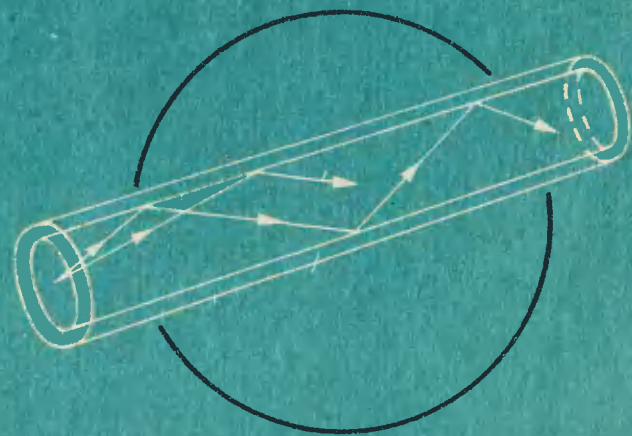


1 руб.

Световодные датчики

Световодные ДАТЧИКИ



«МАШИНОСТРОЕНИЕ»

Световодные ДАТЧИКИ



МОСКВА
« МАШИНОСТРОЕНИЕ »
1990

ББК 32.96-04
С24
УДК 681.7.068

Авторы: Б. А. Красюк, О. Г. Семенов, А. Г. Шереметьев, В. А. Шестериков

Рецензент канд. техн. наук А. А. Кеткович

Световодные датчики/Б. А. Красюк, О. Г. Семенов,
С24 А. Г. Шереметьев и др.— М.: Машиностроение, 1990.—
256 с.: ил.

ISBN 5-217-00465-7

Рассмотрены вопросы создания световодных датчиков для регистрации различных физических процессов, параметров, явлений: давления, температуры, интенсивности электрического и магнитного полей, силы и напряжения тока, значений углового и линейного перемещений, ускорений и др. Даны сведения о теории, конструкциях, методах расчета и конструирования, параметрах и возможностях применения датчиков в приборостроении, робототехнике и системах управления машинами и технологическими процессами.

Для инженерно-технических работников, занимающихся проектированием средств информационно-измерительной техники для управления различными машинами и технологическими процессами.

С 2706040000—609
038(01)—90 КБ-10-29—90

ББК 32.96-04

ISBN 5-217-00465-7

© Б. А. Красюк, О. Г. Семенов,
А. Г. Шереметьев и др., 1990

Одним из важнейших направлений развития измерительной техники, необходимой для всех без исключения отраслей народного хозяйства, является создание новых методов и приборов, основанных на использовании оптических эффектов и предназначенных для регистрации и контроля температуры, давления, скорости и ускорения, определения интенсивности электрического и магнитного полей, ионизирующих излучений.

Приборы, получившие наименование оптических датчиков, и, в частности, оптические датчики, в которых применяются волоконные световоды (световодные датчики), в настоящее время разрабатывают и изготавливают во многих странах мира. Уже созданы и производятся сотни типов световодных датчиков самого различного назначения и оптических сенсорных устройств, включая принципиально новые типы высокочувствительных волоконно-оптических гироскопов.

Оптические датчики обладают многими весьма ценными качествами. Они могут быть нечувствительными к влиянию электромагнитных помех, работать в условиях высокой взрыво- и пожароопасности, иметь малые размеры и массу, использоваться для дистанционных измерений, а также, что очень важно при современном состоянии разработки оптических компьютеров, легко и просто стыковаться с оптическими процессорами.

Для широкого развития промышленного производства световодных датчиков и сенсорных устройств большое значение имеет то обстоятельство, что их изготавливают, в основном, на той же элементной базе, что и быстро развивающиеся волоконно-оптические системы связи.

В СССР число публикаций в области оптических датчиков и сенсорных систем пока еще очень невелико, хотя потребность в них значительна. Световодные датчики и сенсорные устройства необходимы для решения многих задач по созданию новейшей техники, особенно в свете решений XXVII съезда КПСС и ускорения развития многих отраслей промышленности.

В настоящей книге изложены основные сведения о световодных датчиках и сенсорных оптических устройствах различного назначения, их компонентах и функционировании. Глава I книги посвящена областям применения световодных датчиков и сенсорных

устройств. В ней содержатся также данные о масштабах производства датчиков разного вида в капиталистических странах в настоящее время и на ближайшую перспективу. Далее в этой же главе описаны основные типы световодных датчиков с амплитудной, фазовой модуляцией, модуляцией изменением состояния поляризации, с частотной модуляцией и приведены конкретные примеры соответствующих датчиков и сенсорных систем. Важнейшие компоненты световодных датчиков (оптические волноводы, источники и приемники излучения) описаны в гл. 2. Последующие главы книги посвящены более детальному рассмотрению датчиков температуры, интенсивности электрических и магнитных полей и измерению токов и напряжений. В заключительной главе книги описаны современные конструкции волоконно-оптических гироскопов.

В развитии световодной техники очень большую роль играли крупнейшие советские ученые, и, в первую очередь, академики В. А. Котельников, А. М. Прохоров, Н. Г. Басов, В. М. Тучкевич и Ж. И. Алферов. Им принадлежат многие капитальные работы, выполненные в этой области, ими внесен значительный вклад в теоретические основы современной оптической сенсорики, так как без соответствующих волоконных световодов, полупроводниковых источников света, фотоприемников создание световодных датчиков невозможно. Это обстоятельство нужно всегда иметь в виду, рассматривая каждый конкретный тип световодного датчика любого назначения.

Предисловие, гл. 2 и 4 написаны Б. А. Красюком, гл. 1 и 3 — О. Г. Семеновым. В гл. 3 О. Г. Семеновым впервые систематически изложены сведения о видеодиагностике изделий световодной техники. Гл. 5, посвященная датчикам интенсивности электромагнитных полей и волоконно-оптическим устройствам для измерения силы тока и разности электрических потенциалов, написана В. А. Шестериковым. Большое внимание в книге уделено волоконно-оптическим гироскопам и акселерометрам, описанным в гл. 6, написанной А. Г. Шереметьевым.

Авторы приносят глубокую благодарность Г. И. Корнееву, В. С. Хотимченко и В. Ф. Ламекину за ценные советы при обсуждении рукописей этой книги.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СВЕТОВОДНЫХ ДАТЧИКАХ И ОПТИЧЕСКИХ СЕНСОРНЫХ УСТРОЙСТВАХ

1. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ, ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ, КЛАССИФИКАЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО

Использование оптических волноводов в системах связи и передачи данных является очень важной, но далеко не единственной областью применения средств световодной техники в промышленности и науке.

По световодам может передаваться излучение, генерируемое различными источниками для освещения отдельных предметов и даже помещений, солнечная энергия, концентрируемая в фокусе параболического зеркала, расположенного у входного торца оптического волновода. При этом уже известны устройства, рассчитанные на передачу солнечного света с потоком излучения около 3 кВт на расстояние 10 м при КПД 60...65 % по кабелю диаметром 40 мм, состоящему из 1000 световодов (диаметр отдельной «жилы» — 1 мм) и, соответственно, 1000 параболических зеркал, каждое радиусом 3,5 см.

По световодам могут передаваться изображения (в медицинских эндоскопах, устройствах для визуального осмотра поверхности объектов при дефектоскопии), записываться и передаваться голограммы [27, 137] и т. д.

В отдельных системах дистанционного управления в настоящее время с помощью световодов осуществляется питание приборов. Необходимый для этого электрический ток преобразуется в свет, распространяющийся по оптическому волноводу. Максимальное значение передаваемого потока излучения определяется в данном случае интенсивностью нагрева канала передачи — оптического волокна. Эксперименты показали [109], что если, например, пользоваться волоконными световодами с сердцевинами из кварцевого стекла диаметром 200 мкм, имеющими оболочки из полимера, то по такому одиночному световоду может передаваться излучение мощностью свыше 0,8 кВт на расстояние нескольких десятков метров.

Особенно широкие перспективы новых областей применения световодных устройств открылись в связи с ростом потребности многих отраслей техники в датчиках и сенсорных устройствах для регистрации давления, температуры, интенсивности магнитного и

электрического полей, ионизирующих излучений и др. Развитие комплексной автоматизации и механизации, робототехники, систем дистанционного контроля и управления, совершенствование прежних и создание новых технологических процессов — все это привело к формированию новой научной дисциплины, получившей название сенсорики. В ней рассматриваются вопросы теории, расчета, конструирования и эксплуатации датчиков и сенсорных устройств, основанных на использовании тепловых, оптических, электрических, магнитных, пьезо- и пирозлектрических, радиационных, химических и других эффектов [80].

Лет 12 — 15 тому назад, при разработке основ сенсорики, возможному применению волоконной оптики в контрольно-измерительной технике еще не уделяли большого внимания, однако уже тогда определился основной рациональный подход к созданию световодных датчиков и оптических сенсорных систем, сущность которого заключалась в следующем: интенсивность исследуемого эффекта следовало оценивать по результатам его влияния на излучение, распространяющееся от источника к фотоприемнику. Таким образом, каждая оптическая сенсорная система должна была состоять из излучателя, оптических волноводов, модулятора — световодного датчика и фотоприемника. Свет, проходя через датчик, должен был подвергаться воздействию исследуемого эффекта.

Одновременно при конструировании световодных датчиков должны выполняться следующие требования:

а) в конструкции датчика должны содержаться элементы, обеспечивающие осуществление выбранного вида модуляции — изменения параметров светового потока под влиянием исследуемого эффекта;

б) конструкция датчика должна предусматривать возможно более узкую специализацию его использования в заданном диапазоне измерения значений исследуемого эффекта и ни в коем случае не универсальность его применения.

Оптические волноводы, соединяющие модулятор, с одной стороны, с источником света, а с другой — с фотоприемником, должны быть пассивными и, по возможности, нечувствительными к каким-либо внешним физическим возмущениям.

В световодных датчиках могут модулироваться интенсивность проходящего через датчик излучения (амплитудная модуляция), фаза (фазовая модуляция), состояние поляризации света, спектральный состав излучения. При этом выбор применяемого вида модуляции не связан с конкретным назначением датчика, и модуляция изменением одного и того же параметра излучения может использоваться в датчиках различного назначения, но конечно различающихся по своей конструкции. Сказанное можно иллюстрировать следующими примерами.

Одни из первых оптических сенсорных устройств — медицинские эндоскопы, созданные более 20 лет тому назад, были очень

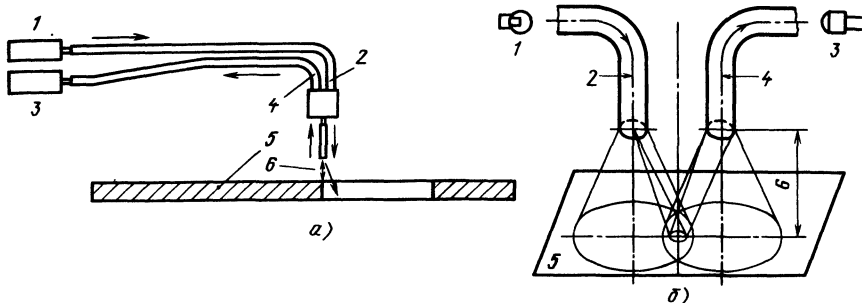


Рис. 1. Датчик, регистрирующий приближение точки падения светового луча, выходящего из оптического волновода, к заданному участку поверхности объекта (к краю отверстия):

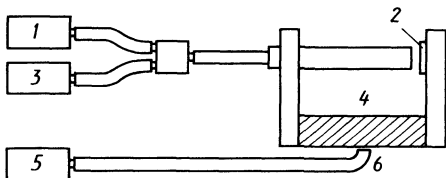
а—конструкция; *б*—расположение регистрируемого светового пятна на поверхности объекта; 1—источник излучения; 2—передающий оптический волновод; 3—фотоприемник; 4—приемный оптический волновод; 5—объект (пластина с отверстием); 6—зазор между поверхностью объекта и торцом волоконного световода

простыми по своей конструкции и служили лишь для наблюдения изображений, проецируемых на торцы многих волоконных световодов, собранных в один «жгут» с регулярной структурой, т. е. с одинаковым расположением торцов световодов в плоскостях ввода и вывода изображения. Различие в интенсивности отдельных участков изображения, передаваемых каждым отдельным волоконным световодом, в своей совокупности обеспечивало формирование «мозаичной» картины в плоскости, где располагались выходные торцы. Таким путем в эндоскопе осуществлялась амплитудная модуляция при передаче изображения.

Простейший эндоскоп явился прототипом волоконно-оптического сенсорного устройства для автоматической регистрации приближения инструмента или светового луча (последнее при обработке изделий с помощью лазера) к участку поверхности изделия, подлежащему обработке, к месту расположения в изделии того или иного отверстия, выступа, реперной метки (рис. 1, *а*, *б*), при точном автоматическом измерении диаметра отверстия, степени его овальности, размеров щели в объекте и т. п. [83, 99]. Тот же «принцип эндоскопа» был использован при создании устройства для определения изменений положения в пространстве объекта, отражающего свет [50], а также прибора совсем иного назначения — датчика (рис. 2), регистрирующего изменения температуры по тепловому расширению алюминиевого стержня [99].

Рис. 2. Рефлектометр — датчик температуры:

1—источник света; 2—зеркало; 3—фотоприемник; 4—алюминиевый стержень; 5—гальванометр; 6—термопара



Опыт, накопленный исследователями и конструкторами, позволяет ориентироваться в вопросе выбора способа модуляции излучения при создании световодных датчиков для измерения различных параметров, характеризующих отдельные физические явления и процессы. На основании этого опыта составлена табл. 1.

Спрос на световодные датчики на мировом рынке растет исключительно быстрыми темпами, конструкции датчиков совершенствуются, а стоимость их непрерывно уменьшается, особенно датчиков, регистрирующих изменения интенсивности излучения, т. е. датчиков с амплитудной модуляцией. В меньшей степени снижается стоимость датчиков, регистрирующих сдвиги фазы света, поляризационных и интерферометрических (датчиков, в которых применяют интерферометры).

Области применения световодных датчиков и сенсорных устройств непрерывно расширяются, причем все более четкими ста-

Таблица 1

Измеряемая физическая величина	Модулируемый параметр излучения	Принцип действия световодного датчика	Тип световодного волокна
Сила тока. Интенсивность магнитного поля	Состояние поляризации	Использование эффекта Фарадея	Многомодовое, одномодовое
	Сдвиг фазы	Влияние магнитострикции ферромагнитного материала на деформацию волокна. Интерференция	Одномодовое
Разность потенциалов. Интенсивность электрического поля	Состояние поляризации	Использование эффекта Поккельса	Многомодовое
	Сдвиг фазы	Влияние электрострикции. Интерференция	Одномодовое
Температура	Интенсивность	Прерывание светового потока, проходящего по волокну. Применение кристалла полупроводника в качестве аттенюатора. Отражение света	Многомодовое
		Фотолюминесценция (фосфоры, полупроводники)	Многомодовое
	Интенсивность. Спектр	Регистрация излучения черного тела	Многомодовое
	Состояние поляризации	Двойное лучепреломление	Многомодовое
Частота вращения объекта	Сдвиг фазы	Использование эффекта Саньяка	Одномодовое

Измеряемая физическая величина	Модулируемый параметр излучения	Принцип действия световодного датчика	Тип световодного волокна
Давление, вибрация, ускорение	Интенсивность	Микроизгибные потери. Прерывание светового потока, проходящего по волокну. Отражение света	Многомодовое
	Состояние поляризации	Использование упруго-оптического эффекта	Многомодовое
	Сдвиг фазы	Использование упруго-оптического эффекта. Интерференция	Одномодовое
	Изменение длины волны света	Использование эффекта Доплера	Многомодовое, одномодовое
Интенсивность гамма-лучей, нейтронных потоков	Интенсивность	Возникновение в световодном волокне окрашенных центров	Многомодовое
Анализ газовых сред	Интенсивность	Регистрация изменений спектра поглощения газа	Многомодовое
Определение уровня жидкости	Интенсивность	Отражение света	Многомодовое

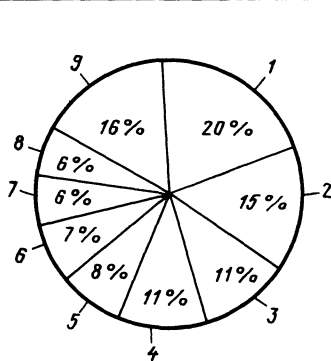
новятся оценки достоинств датчиков, возможности их применения в различных машинах и механизмах, а также затрат времени на разработку новых датчиков и стоимости выполнения соответствующих научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (табл. 2) [78].

Таблица 2

Область применения		Целесообразность широкого применения	Объем потребности	Затраты на исследования и разработки	Сроки разветывания широкого промышленного производства, лет
Общее и химическое машиностроение	Автоматика	Невысокая	Средний	Малые	3—5
	Металлообработывающие станки	Средняя	Средний	Малые	3—5
	Метрология	Средняя	Большой	Средние	1—3
	Робототехника	Невысокая	Невысокий	Малые	3—5
	Процессы управления	Средняя	Большой	Средние	До 10
	Химическое аппаратостроение	Большая	Большой	Средние	3—5

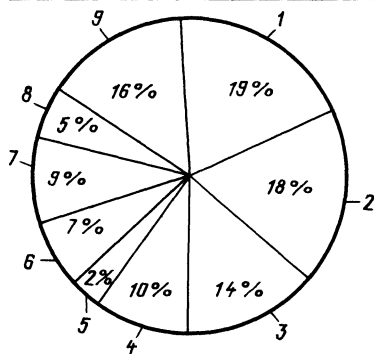
Область применения		Целесооб- разность ши- рокого при- менения	Объем пот- ребности	Затраты на исследова- ния и разра- ботки	Сроки раз- вертывания широкого промышлен- ного произ- водства, лет
Горное де- ло и энерге- тика	Геофизические исследования	Средняя	Большой	Средние	3—5
	Петрохимия	Большая	Средний	Средние	3—5
	Горнодобыва- ющая промыш- ленность	Невысокая	Средний	Малые	До 10
	Электростан- ции, линии электропереда- чи, управление энергоснабже- нием	Средняя	Большой	Большие	До 10
	Газовая про- мышленность и водоснабжение	Невысокая	Невысокий	Малые	3—5
Военная техника	ВОГ	Большая	Большой	Большие	До 10
	Гидрофоны, магнитомеры	Большая	Средний	Большие	3—5
	Авиационные приборы	Средняя	Средний	Средние	3—5
	Контроль ра- диоактивности	Большая	Невысокий	Малые	1—3
	Военная химия	Большая	Большой	Средние	3—5
	Системы за- секречивания	Средняя	Большой	Средние	3—5
Автомо- бильная техника, быт, обору- дование жилых зда- ний и слу- жебных помещений	Автомобильная техника	Невысокая	Большой	Средние	3—5
	Управление электрически- ми, в том чис- ле бытовыми, приборами	Невысокая	Средний	Малые	До 10
	Управление системами теп- ло- и водоснаб- жения в жи- лых домах	Средняя	Средний	Малые	1—3
	Системы обра- ботки данных в учреждениях, внутриобъекто- вая связь, сиг- нализация о возгорании при пожарах, сис- темы охранной сигнализации в зданиях	Средняя	Средний	Малые	1—3

Область применения		Целесообразность широкого применения	Объем потребности	Затраты на исследования и разработки	Сроки раз- вертывания широкого промышлен- ного произ- водства, лет
Медицин- ская техни- ка	Приборы для диагностики и медицинская термометрия Хирургия, ге- матология Колориметрия, измерения pH	Средняя	Невысокий	Малые	3—5
		Средняя	Средний	Средние	3—5
		Большая	Большой	Средние	1—3

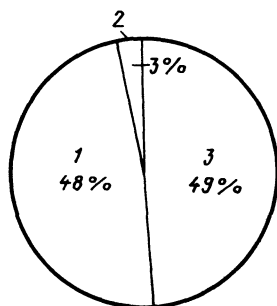


1990 г. - 79,7 млн. долл.

а)

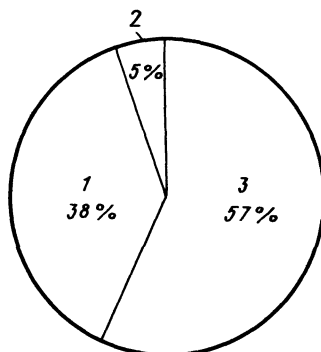


2000 г. - 1305 млн. долл.



1990 г. - 188 млн. долл.

б)



2000 г. - 3570 млн. долл.

Рис. 3. Диаграммы объема производства световодных датчиков различного назначения: а—датчиков с амплитудной модуляцией (1—химических; 2—температурных; 3—уровня жидкости и скорости потока жидкости или газа; 4—давления; 5—радиации; 6—местонахождения объектов и значений их взаимных смещений; 7—акустических; 8—электрических и магнитных полей; 9—прочих); б—интерферометрических датчиков (1—для систем управления и регулирования; 2—для систем и устройств локации; 3—для измерения интенсивности магнитных полей и прочих)

По сведениям Управления связи Департамента торговли США [28] динамика роста производства световодных датчиков была такова: 1983 г.— 25 млн. долларов, 1984 г.— 36 млн. долларов, 1985 г.— 49 млн. долларов, 1986 г.— 64 млн. долларов. Прогнозы о росте объемов производства световодных датчиков в 1990 — 2000 гг. по данным фирмы «Электроникаст Корпорейшн» («Electronicast Corporation»), опубликованным в 1986 г. [107], приведены на диаграммах (рис. 3, а, б).

2. СВЕТОВОДНЫЕ ДАТЧИКИ И СЕНСОРНЫЕ УСТРОЙСТВА С АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

В сенсорных оптических устройствах (рис. 4) применяют световодные датчики различных видов и конструкций, причем простейшими и, как правило, наиболее дешевыми являются датчики с амплитудной модуляцией, сокращенно именуемые амплитудными.

Амплитудные датчики по своей чувствительности существенно уступают некоторым другим датчикам, например интерференционным, основанным на использовании фазовой модуляции и способным регистрировать очень малые изменения фазы света, однако их широко применяют во многих отраслях промышленности. Амплитудные датчики позволяют в ряде случаев с практически достаточной точностью измерять давление, механические напряжения, вибрацию, ускорение, интенсивность электрического поля, силу тока, уровни радиации (гамма-излучения), температуру и т. д.

В сенсорных оптических устройствах с амплитудными датчиками часто применяют дешевые волоконные многомодовые световоды и светоизлучающие диоды (СИД).

Сенсорные устройства с амплитудными датчиками можно классифицировать следующим образом:

устройства, в которых регистрируемое физическое возмущение моделирует свет, генерируемый излучателем, например, изменяя силу тока в цепи питания излучателя, оказывая какое-либо внешнее воздействие на излучатель, способное влиять на его эмиссию, и т. д.;

устройства с детектированием пучка света, интенсивность которого модулируется помещенным на его пути аттенуатором, ослабляющим оптическую мощность излучения. Аттенуатором может служить, в частности, непрозрачный подвижной экран, перекрывающий при своем перемещении большую или меньшую часть поперечного сечения пучка света. Аттенуатор может быть поглощающим, изменяющим мощность идущего к фотодетектору светового пучка в зависимости от интенсивности физического возмущения, регистрируемого датчиком, или предельным. Предельный аттенуатор должен отсекал часть пучка, распространяющегося от источника излучения, если его мощность превысит заранее заданное значение;

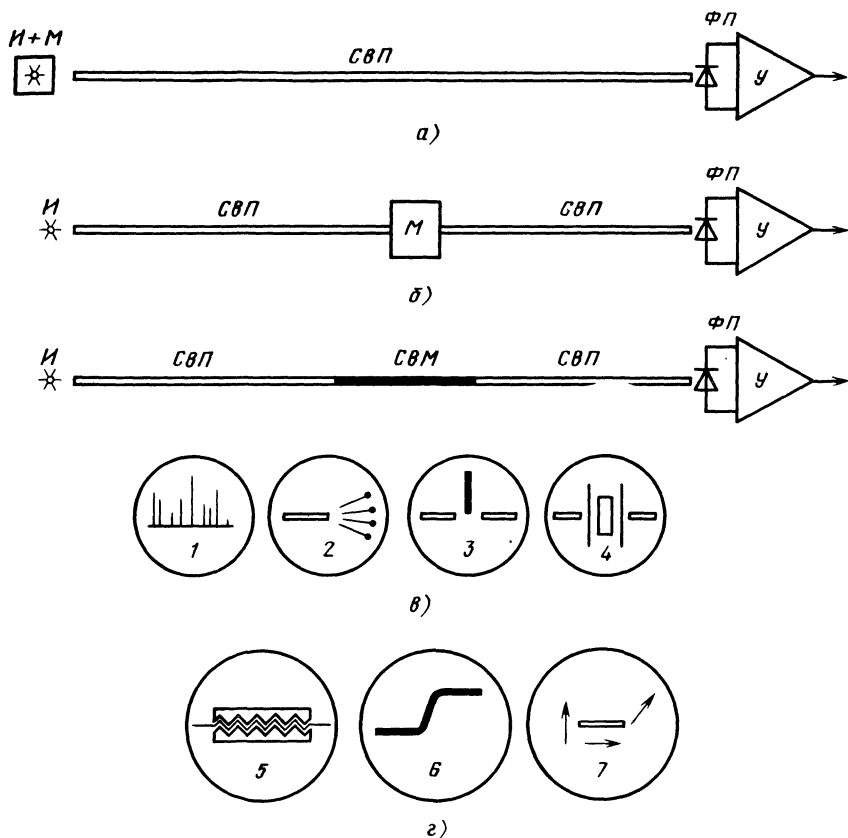


Рис. 4. Схемы основных типов оптических сенсорных устройств и виды модуляции излучения:

а—с модуляцией света воздействием на источник излучения; *б*—с отдельным модулятором, помещенным между источником излучения и фотоприемником; *в*—с модуляцией света воздействием на волокно; *И*—источник излучения; *М*—модулятор; *СВП*—пассивный волоконный световод; *СВМ*—световод, выполняющий одновременно функции модулятора; $\Phi П$ — фотоприемник; *У* — усилитель; *г*—модуляция излучения; 1—изменением спектрального состава излучения; 2—с использованием эффекта Доплера; 3—экранированием или применением сред, изменяющих прозрачность; 4—размещением на пути предварительно поляризованного света кристаллов, влияющих на изменение плоскости поляризации; 5—созданием изгибов или микроизгибов в волоконном световоде; 6—изменением фазы света; 7—изменением состояния поляризации света

устройства с детектированием света, модулируемого изменением положения отражателя, помещенного между излучателем и фотодетектором;

устройства с микроизгибными или изгибными световодными датчиками.

Рассмотрим некоторые оптические сенсорные устройства с амплитудными датчиками.

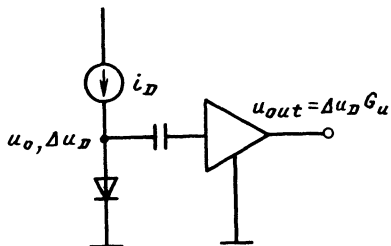


Рис. 5. Включение светозлучающего диода для модуляции генерируемого им света воздействием механического давления на диод: i_D — ток через диод; u_D — падение напряжения на диоде; u_{out} — напряжение выходного сигнала; G_u — коэффициент усиления

На рис. 5 показана схема включения светозлучающего диода для его использования в качестве датчика переменного давления, а на рис. 6 — устройства для регистрации давления, возникающего при гидродинамическом ударе (рис. 6, а), и график (рис. 6, б) зависимости отклика светодиода Δu_D от силы гидродинамического удара ΔP_d [95].

Изменение воздействующего на светодиод (в [95] авторы применяли диоды из арсенида галлия с некоторыми присадками, позволяющими получать свечение от красного до зеленого) давления приводило к существенному изменению напряжения u_D прямого смещения. Вольтамперная характеристика полупроводникового диода описывается, как известно, уравнением Шокли

$$i_D = i_0 (\exp(eu_D/kT) - 1),$$

где i_D — ток через диод; i_0 — обратный ток утечки для диода; e — заряд электрона; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура, К.

Преобразуя это выражение, подставляя в него соответствующие числовые значения известных величин и учитывая зависимость i_0 от ширины запрещенной зоны для выбранного полупроводника, можно рассчитать при заданных значениях характеристик режимов работы выбранных светодиодов зависимость изменения Δu_D от изменения измеряемого давления ΔP_d , хорошо согласующуюся с экспериментальными данными (рис. 6, б). При

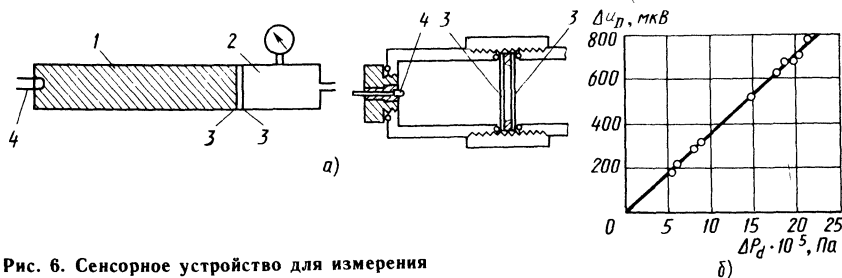
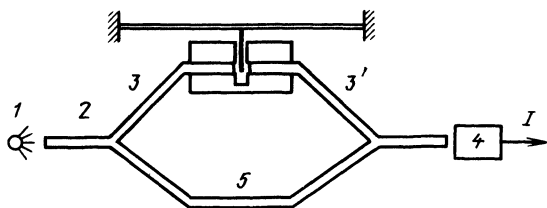


Рис. 6. Сенсорное устройство для измерения силы гидродинамических ударов:

а — конструкция; б — график зависимости изменения напряжения прямого смещения светодиода от изменения давления; 1 — герметически закрытая труба, заполненная метанолом; 2 — камера, заполненная газом, с присоединенным к ней контрольным манометром; 3 — мембраны; 4 — светозлучающий диод-датчик

Рис. 7. Сенсорное устройство с амплитудной модуляцией и прямым детектированием света



рациональном выборе жидкости, заполняющей изображенную на рис. 6, *а* трубу и передающей гидравлический удар датчику — светодиоду (авторы в качестве такой жидкости предложили метанол), описываемое оптическое сенсорное устройство, с помощью которого можно регистрировать изменения давлений в широком диапазоне значений прикладываемой нагрузки, обладает малой инерционностью с временем нарастания нагрузки, меньшем 70 мкс.

Рассмотрим некоторые оптические сенсорные устройства с амплитудными датчиками.

На рис. 7 приведена схема устройства с прямым детектированием света, использованная в ряде конструкций простейших оптических микрофонов. В таких микрофонах свет модулируется тонкой шторкой из титановой фольги, прикрепленной к гибкой мембране, колеблющейся под действием переменного акустического поля. Свет поступает из светодиода или лазерного диода 1 в разветвитель 2. По волоконному световоду 3 он поступает в полость, где расположена модулирующая излучение шторка. Модулированный свет далее, по световоду 3' направляется к фотодетектору 4. Другая часть разветвленного пучка по световоду 5 поступает непосредственно к фотодетектору.

В сенсорном устройстве, схема которого приведена на рис. 8, *а*, принцип модуляции интенсивности света реализован иначе, чем в описанной выше схеме оптического микрофона. Это устройство предназначено для измерения амплитуды малой вибрации [46] и состоит из следующих составных частей: источника света 5, диафрагмы 4, узкой полоски 3, выполняющей роль экрана, перекрывающего часть светового пучка, и расположенных на одном чипе 2 интегральной схемы двух $p-i-n$ -диодов. Полоска-экран прикреплена к образцу 1, вибрирующему под действием, например, переменной внешней нагрузки. В блоке фотоприемника 2 кроме двух фотодетекторов 6 (рис. 8, *б* — *г*) имеются четыре зашунтированных сопротивления операционных усилителя 7 и конденсатор для частотной компенсации. Такое устройство, прикрепленное к пьезоэлектрическому преобразователю, позволяет измерять вибрацию с амплитудой колебаний менее 1 мкм и приблизительно до 10 мкм с погрешностью, не превышающей 1%.

В оптических сенсорных устройствах амплитудная модуляция может осуществляться также при непосредственном воздействии

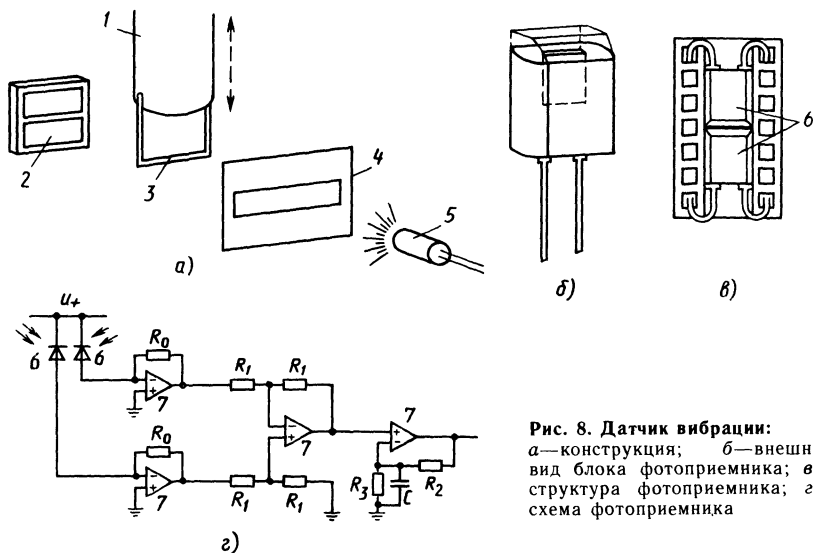
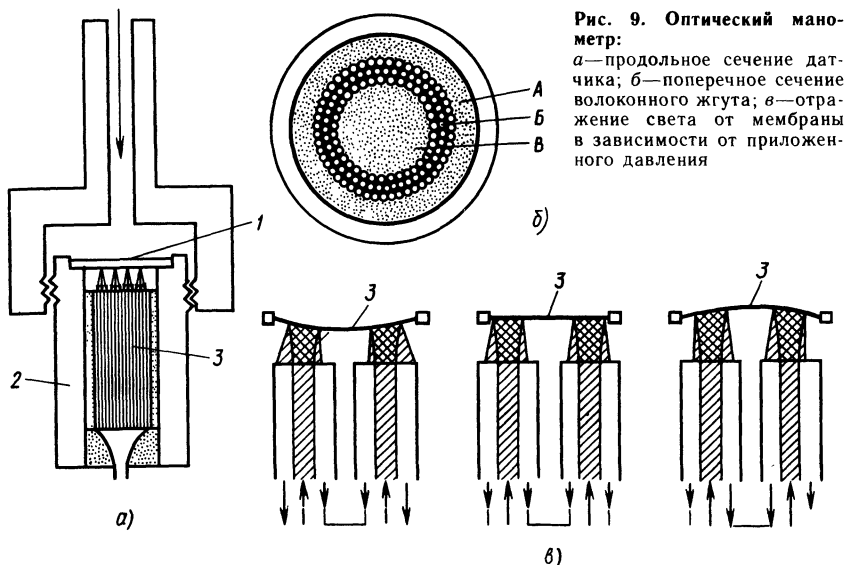


Рис. 8. Датчик вибрации:
 а—конструкция; б—внешний вид блока фотоприемника; в—структура фотоприемника; г—схема фотоприемника

регистрируемого физического возмущения на материал световода, вызывая изменения его прозрачности. Этот принцип реализуется, в частности, в простейших дозиметрах гамма-радиации. Последняя вызывает образование в стеклах, окрашенных в темный цвет, так называемых *F*-центров, поглощающих проходящее по волоконному световоду излучение.

Значительно более сложным, чем описанные выше устройства с амплитудной модуляцией, является разработанный недавно и уже получивший широкое применение оптический манометр с датчиком, в котором прогибающаяся под действием давления упругая диафрагма одновременно является отражателем для падающего на нее с обратной стороны света [102].

Внутри корпуса датчика оптического манометра в обойме 2 помещены, как показано на рис. 9, а, имеющий регулярное строение жгут 3 из волоконных световодов, расположенных по трем concentric rings зонам А, Б и В (рис. 9, б), и гибкая мембрана 1. Световоды, торцы которых находятся в кольцевой зоне Б, служат для освещения некоторой, также имеющей форму кольца, области на поверхности мембраны, являющейся в то же время диафрагмой манометра. Световоды, торцы которых расположены в зонах А и В, должны передавать двум фотоприемникам излучение, отраженное полированной внутренней (обращенной к жгуту) поверхностью мембраны. Если на мембрану не действует какое-либо давление, она имеет плоскую форму (рис. 9, в), и распределение света, отраженного мембраной, между зонами А и В будет симметричным. При воздействии на мембрану давления *P* она становится выпуклой по отношению к торцу жгута, и возникает



дисбаланс отраженного света: на выходе фотоприемника, регистрирующего излучение, передаваемое световодами, расположенными в кольцевой зоне А, сигнал увеличится. При действии на мембрану давления обратного знака — P , наоборот, возрастет сигнал от другого фотоприемника, так как свет будет отражаться мембраной преимущественно по направлению к центру жгута.

Электронная схема рассматриваемого оптического манометра (рис. 10, а) содержит усилители сигналов, получаемых от фотодетекторов, преобразователи этих сигналов из аналоговой формы в цифровую (после сопоставления их значений) и устройство цифровой индикации.

В типичной конструкции описанного выше датчика жгут состоит из волоконных световодов с сердцевинкой и оболочкой из соответствующих кварцевых стекол с показателями преломления: сердцевинки — $n_1 = 1,62$ и оболочки — $n_2 = 1,52$. Отличительной особенностью примененных в жгуте волокон является очень малая толщина оболочки каждого световода. При диаметре сердцевинки 70 мкм оболочка волокна имеет толщину лишь 3,5 мкм. Такое нестандартное оптическое волокно изготавливается специально для рассмотренных датчиков, нашедших широкое применение как в медицине (миниатюрные датчики), так и в ряде отраслей промышленности за рубежом.

Диаметр, толщина и материал диафрагмы зависят от диапазона давлений, на который рассчитан оптический манометр. Например, авторы работы [102] рекомендуют применять в наиболее миниатюрных датчиках, предназначенных для измерения давлений $P \leq 33,25$ Па, диафрагмы из пленки поликарбоната толщиной

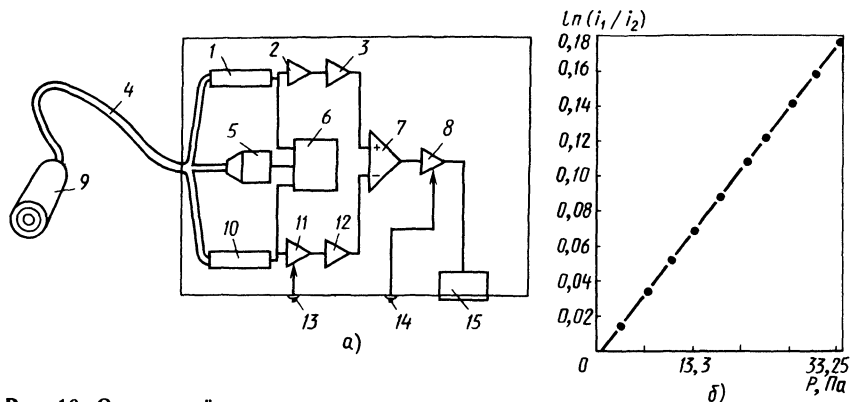


Рис. 10. Оптический манометр:

а—схема; *б*—пример градуировочного графика; 1, 10—фотоприемники; 2, 11—предварительные усилители; 3, 12—логарифмические усилители; 4—световодный жгут; 5—источник излучения; 6—устройство стабилизации работы источника излучения; 7—дифференциальный усилитель; 8—выходной усилитель; 9—датчик; 13, 14—органы регулировки соответственно баланса и чувствительности; 15—АЦП с устройством индикации

0,13 мм и диаметром 2,2 мм, а в более крупных датчиках для измерения давлений до 532 Па — диафрагмы, вырезанные из пластинки кремния толщиной 0,3 мм, диаметром 10,4 мм. Заметим, что в миниатюрных датчиках световодами, размещенными в зоне *Б* волоконно-оптического жгута, на поверхности диафрагмы освещалась область, имеющая форму кольца шириной 125 мкм и диаметром 0,8 мм.

При градуировке оптических манометров определялась зависимость логарифма отношения сил токов i_1 и i_2 , регистрируемых фотодетекторами, находящимися в фотоприемниках 1 и 10, от значения регистрируемого давления. Эта зависимость в интервале значений давления, на которые рассчитывался соответствующий тип прибора, должна была быть линейной. Типичная градуировочная кривая для рассматриваемых оптических манометров приведена на рис. 10, б.

Кроме оптического манометра с отражающей свет мембраной, большой практический интерес представляет простое и хорошо зарекомендовавшее себя по надежности сенсорное устройство для регистрации присутствующей в потоке жидкости второй фазы, например пузырьков газа [81]. Такие устройства используют в некоторых типах теплообменников.

В рассматриваемом сенсорном устройстве (рис. 11, а) излучение, генерируемое светодиодом 2, модулируется модулятором 3, управляемым таймером 5, и через соединитель-разветвитель 1 направляется по световодному кабелю к датчику 15. В полости датчика 15 часть света (рис. 11, б) проникает через суженный конец световода в жидкость 14, в которую погружен датчик, а

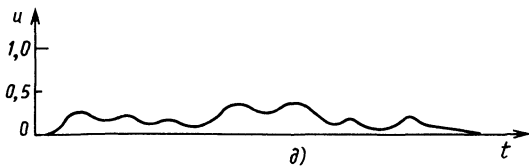
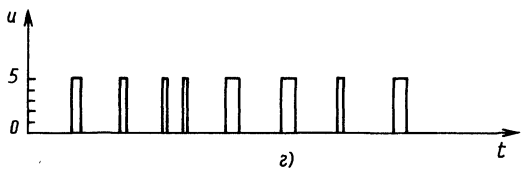
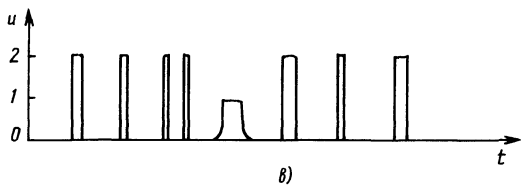
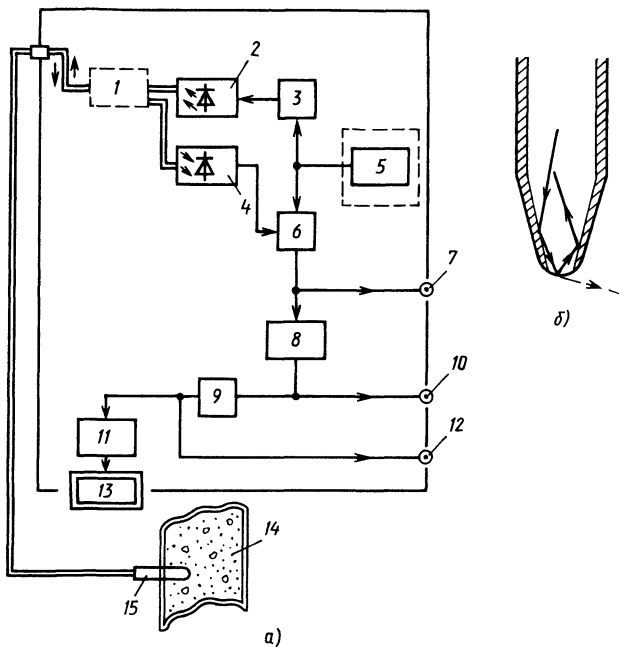


Рис. 11. Сенсорное устройство для регистрации пузырьков газа:
 а—схема устройства; б—ход лучей в суженном конце волоконного датчика; в—г—форма сигнала соответственно на выходах 7, 10 и 12

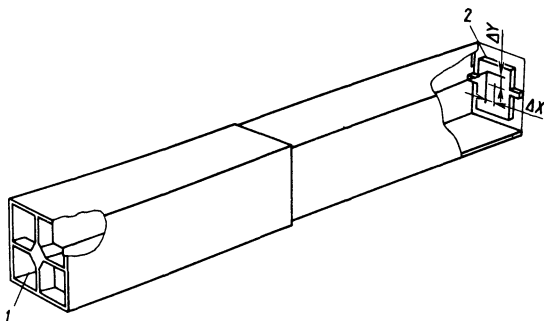


Рис. 12. Конструкция датчика «глаза—руки» робота

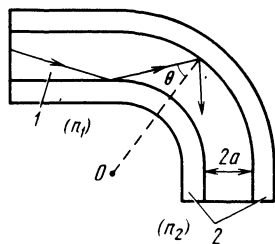


Рис. 13. Траектория меридионального луча в изогнутом волоконном световоде со ступенчатым показателем преломления

часть света — отражается. Отраженный свет возвращается в соединитель-разветвитель 1 и далее принимается фотодиодом 4. Принятое диодом излучение преобразуется в электрические сигналы, поступающие в демодулятор 6 и потом в процессор 8 для их обработки. К выходу демодулятора 6 присоединена также клемма выхода аналогового сигнала 7. На цифровой выход 10 поступают сигналы из процессора 8. Усреднитель 9 значений принятых и обработанных процессором 8 электрических сигналов одним своим выходом присоединен к выходу усреднителя 12, а другим выходом через аналого-цифровой преобразователь 11 — к дисплею 13.

На рис. 11, в — д приведена форма сигналов, регистрируемых соответственно на аналоговом, цифровом выходах и выходе усреднителя устройства при распространении в трубке потока жидкости с плавающими в нем пузырьками газа.

Оптическое сенсорное устройство, предназначенное для контроля за перемещением и искривлением телескопического манипулятора робота, показано на рис. 12 [42]. Оно содержит расположенные на противоположных концах манипулятора источник света 1 и фотодетектор 2, регистрирующий смещение попадающего на него светового луча.

Потери мощности оптического излучения при прохождении его по изогнутому световоду (в частности, волоконному) уже много лет подробно исследуются как теоретически, так и экспериментально [16, 22, 33, 103, 129]. Целью исследований является разработка мероприятий, обеспечивающих снижение потерь в волоконно-оптических кабелях при создании длинных линий связи и передаче информации. Кроме того, большой интерес представляет практическое использование изменения потерь мощности излучения, т. е. амплитудная модуляция путем изгиба световода в датчиках различного назначения.

Механизм образования изгибных потерь наиболее просто поясняется построением хода лучей в волокне согласно представлениям геометрической оптики (рис. 13). По сердцевине световода 1 могут распространяться только лучи, угол падения которых на

границу сердцевина — оболочка $\theta \geq \theta_c = \arcsin(n_2/n_1)$, где θ_c — угол полного внутреннего отражения на границе сердцевина — оболочка; n_1, n_2 — коэффициенты преломления соответственно сердцевины 1 и оболочки 2 [8, 16].

Если $\theta < \theta_c$, лучи выходят в оболочку 2 волокна, и происходит перекачка энергии из направляемых мод в моды оболочки и вытекающие моды. В свою очередь, моды оболочки при распространении вдоль световода сами могут постепенно преобразовываться в вытекающие моды.

Изгибы приводят к появлению напряжений сжатия и растяжения в световоде. У внешней поверхности искривленного участка коэффициент преломления материала световода уменьшается, а у внутренней — увеличивается. В результате луч отклоняется в сторону центра кривизны изогнутого участка световода, появляются условия для возвращения части излучения, уже вышедшего в оболочку, обратно в сердцевину. Все это может отрицательно сказаться на эффективности амплитудной модуляции света.

Рассмотрим два вида простейших изгибных световодных датчиков, в которых используются амплитудная модуляция и прямое детектирование излучения, прошедшего по волокну. Первый из них — устройство для измерения показателя преломления жидкости [133], второй — измеритель уровня жидкости в баке, цистерне [64].

Конструкция устройства для измерения показателя преломления жидкости такова. На некотором участке волоконного световода, присоединенного одним своим концом к источнику света (светоизлучающему диоду, лазерному диоду, а в некоторых случаях к оптическому соединителю с обычной лампой накаливания), а другим концом — к фотоприемнику, с поверхности сердцевины удалены слой защитного покрытия и оболочка. Протяженность оголенного таким образом участка может составлять до 15 — 20 см. В

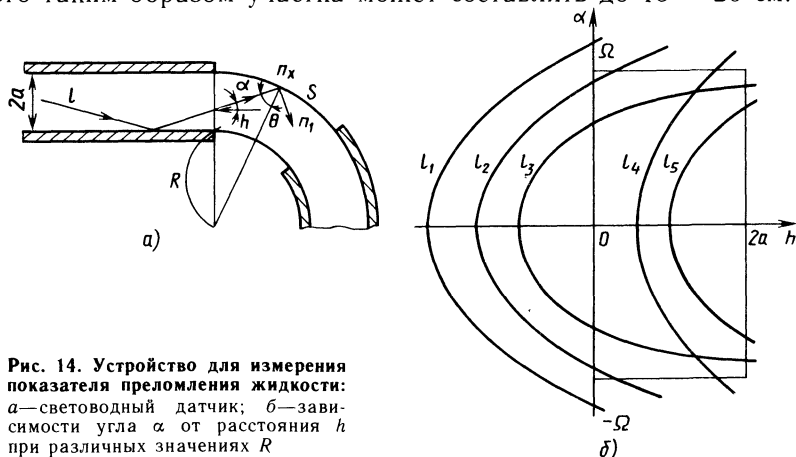


Рис. 14. Устройство для измерения показателя преломления жидкости:
 а — световодный датчик; б — зависимости угла α от расстояния h при различных значениях R

этом месте волокно изогнуто, как показано на рис. 14, а, и часть энергии света, введенного в сердцевину волокна, рассеивается, выходя наружу из сердцевины. Количество излученной энергии зависит от соотношения значений показателя преломления n_1 сердцевины волокна и показателя преломления n_x жидкости, находящейся в контакте с оголенным участком световода. Если угол падения θ луча на поверхность S изогнутой сердцевины (имеющей диаметр $2a$) будет предельным для траектории луча, который сможет пройти в световоде через зону изгиба и далее распространяться по волокну до фотоприемника, то справедливо соотношение

$$\theta = \arcsin [\cos \alpha (R + h) / (R + 2a)],$$

где α — угол между направлением распространения луча и осью волоконного световода; R — радиус изгиба волокна на оголенном участке его сердцевины; h — расстояние между точкой падения луча и границей области, где с поверхности сердцевины не удалена оболочка. Если обозначим через n_2 — показатель преломления оболочки, которой покрыта неоголенная сердцевина, и примем, что

$$\arcsin \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

равен некоторому значению Ω , можно записать, что условие полного внутреннего отражения в зоне S луча, распространяющегося по волокну, определится соотношениями $h \geq \sin \theta (R + 2a) / \cos \alpha - R$; $0 \leq h \leq 2a$, и $|\alpha| = \Omega$ для меридионального луча в плоскости $h - a$. Кривые l_j ($j = 1, \dots, 5$), приведенные на рис. 14, б, соответствуют $h = \sin \theta (R + 2a) / \cos \alpha - R$, где j определяется условием $h_0 = n_2 (R + 2a) n_1 - R$ и $\alpha_0 = \arccos [n_x (R + 2a) / n_1 R]$.

Кривые l_j строят по данным экспериментов, и, пользуясь ими и приведенными выше расчетами, можно вычислить искомое значение

n_x показателя преломления жидкости, в которую погружен датчик (при длине волны λ света, вводимого от источника излучения в датчик).

Конструкция и принцип действия уровнемера, показанного на рис. 15, чрезвычайно просты и не требуют пояснений. В этом уровнемере оголенный от оболочки и изогнутый участок волоконного световода при погружении в жидкость оказывается окруженным не воздухом, имеющим показатель преломления $n_0 = 1$, а средой с показателем преломления, значительно большим единицы. Это обстоятель-

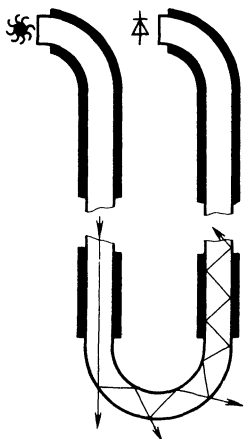


Рис. 15. Конструкция волоконного уровнемера жидкости

ство немедленно сказывается на регистрируемой с помощью фотодетектора оптической мощности прошедшего по волокну излучения и таким образом позволяет определить момент начала погружения датчика в жидкость, а следовательно, и высоту уровня жидкости.

Под микроизгибами обычно понимают множество местных искривлений прямого или слабоизогнутого световода, имеющих небольшую амплитуду отклонения от основной траектории данного участка световода. В волоконно-оптическом кабеле кривизна микроизгибов, как правило, невелика, а сами они случайным образом расположены вдоль кабеля. Для датчиков характерно наличие согласованных с длиной волны применяемого излучения, регулярно расположенных микроизгибов значительной кривизны, вызывающих максимальные потери или изменение потерь света.

Использование периодических микроизгибов световода, приводящих к конверсии мод и перекачке энергии в вытекающие моды, для амплитудной модуляции света было впервые предложено в 1980 г. [72, 73]. Для этого многомодовое оптическое волокно со ступенчатым или почти параболическим профилем показателя преломления помещалось между двумя гребенчатыми пластинами (рис. 16). Сжатие и разведение этих пластин приводит к изменению изгибов волокна и, следовательно, затухания света в нем. Увеличение глубины амплитудной модуляции достигалось удалением мод оболочки перед тем, как свет попадал на фотодетектор.

Для зависимости вызванного микроизгибами дополнительного затухания света в волокне с почти параболическим профилем показателя преломления от пространственного периода возмущений Λ характерна ярко выраженная тенденция к возникновению резонанса (сильный рост затухания при определенных значениях Λ) [58]. Условием резонанса является $\Lambda = l_1 = 2\pi/\beta_c$, где β_c — разность между постоянными распространения соседних групп мод. Для рассматриваемого типа волокна $\beta_c = (2\Delta)^{1/2}/a$, где Δ — максимальная разность относительного показателя пре-

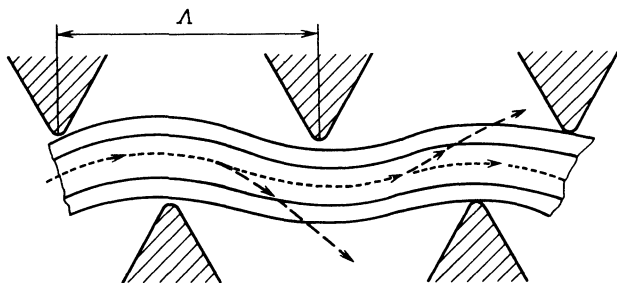


Рис. 16. Изгибы волоконного световода, помещенного между двумя гребенчатыми пластинами. Траектории лучей, выходящих наружу из световода вследствие возникновения микроизгибов

ломления сердцевины; a — радиус сердцевины. Использование гребенчатых пластин не с полукруглыми, а с заостренными V-образными выступами приводит к росту потерь в волокне также при $\Lambda = 3l_1$; $5l_1$ и т. д. Для этих дополнительных резонансных максимумов характерны больший рост потерь (по сравнению со случаем $\Lambda = l_1$) и снижение требований к постоянству значений Λ вдоль пластин.

Необходимо отметить, что аналогичный резонанс наблюдается, если возбуждать одну спиральную моду в градиентном волокне различного типа [140]. При несовпадении периода деформации волокна Λ с шагом спирали эта мода распространяется по световоду практически без изменения.

Как уже указывалось, микроизгибы вызывают перекачку энергии в основном между соседними группами мод. Увеличения глубины амплитудной модуляции света можно достичь выборочным возбуждением некоторых групп мод. В зависимости от того, возбужденные ранее моды или нет регистрируются на выходе световода, получается знак амплитудной модуляции.

Если из пучка света, передаваемого по волоконному световоду, заранее удалить моды низшего порядка и регистрировать вызываемое микроизгибами изменение энергии мод высшего порядка, то можно значительно повысить глубину амплитудной модуляции. Однако этот способ имеет недостаток (иногда существенный) — динамический диапазон микроизгибного датчика уменьшается, а при распространении света по значительно изогнутым участкам волоконного световода обмен энергией между модами различного порядка быстро придет к некоторому равновесному состоянию.

Изгибы многомодового волокна и вызываемая ими конверсия мод приводят к неравновесным и нелинейным в ряде случаев изменениям энергии излучения, содержащейся в различных модах. На примере микроизгибного датчика давления было выяснено [139], что зависимость оптической мощности P_0 на выходе из отрезка градиентного многомодового волокна от угла изгиба световода ψ , или от нагрузки M_n , действующей на деформирующее устройство) микроизгибного датчика, имеет резко выраженные флуктуации (рис. 17). По этой причине микроизгибный датчик с многомодовым волокном не всегда может обеспечивать получение точных данных о значении приложенной к нему нагрузки.

Возникновение рассматриваемых флуктуаций объясняется тем, что при некоторых значениях угла изгиба волокна часть энергии мод, перешедших в оболочку, возвращается в сердцевину световода. Для ликвидации таких колебаний мощности излучения и улучшения линейности амплитудной модуляции света микроизгибным датчиком необходимо создать условия, обеспечивающие эффективный вывод наружу, из оболочки световода, мод, проникших в нее

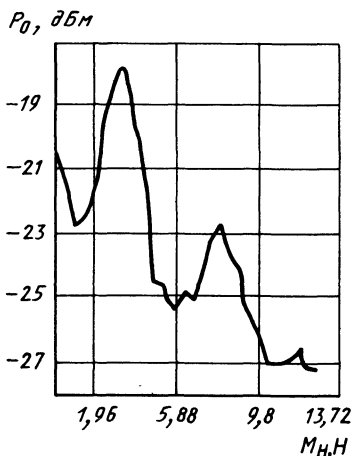


Рис. 17. Зависимость мощности излучения, выходящего из торца сердцевины многомодового градиентного волокна, от нагрузки, приложенной к микроизгибному датчику давления

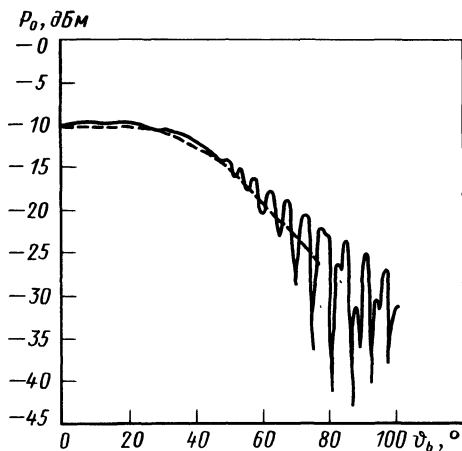


Рис. 18. Зависимость мощности излучения, выходящего из торца сердцевины одномодового волокна, от угла изгиба волокна

при изгибах сердцевины. С этой целью было предложено погружать световод в жидкость, имеющую показатель преломления, несколько превышающий показатель преломления материала оболочки волоконного световода.

Использование одномодового волокна представляется наиболее удачным при реализации микроизгибной амплитудной модуляции света. В этом волокне имеется лишь одна направляемая фундаментальная мода, часть энергии которой может перекачиваться только в моды оболочки или вытекающие моды. Экспериментальное исследование свойств одиночного микроизгиба одномодового волокна выявило наличие значительных колебаний мощности излучения, распространяющегося по сердцевине, с ростом угла изгиба [139], однако более упорядоченных, чем в случае многомодового волокна (рис. 18).

Рассматривая процессы, происходящие в микроизгибном и изгибном датчиках, необходимо отметить следующее:

чувствительность микроизгибных датчиков может быть весьма высокой, и на практике могут иметь место случаи, когда возникает необходимость в возможно большей степени использовать это их свойство;

с другой стороны, когда в рассматриваемых датчиках к потерям мощности излучения, вызванным микроизгибами, добавляются изгибные потери, зависимость отклика датчика при слишком значительных давлениях на деформирующее волокно «гребенки» может стать нелинейной, в результате возникнет необходимость понизить чувствительность датчика.

Существует ряд путей, позволяющих в возможно большей степени использовать высокую чувствительность волокна к микроизгибам. Первый из них — применение в сенсорных устройствах гетеродинных фотоприемников. Второй — переход от амплитудной модуляции проходящего по волокну света к фазовой модуляции. Третий путь — это возбуждение в изгибаемом волокне дополнительных периодически изменяющихся деформаций, например, с помощью присоединенного к изгибающим волокно «гребенкам» пьезоэлектрического вибратора. В последнем случае в периодически деформируемом волокне — датчике возникает своеобразный резонанс, приводящий к существенному увеличению чувствительности датчика.

Для понижения порога чувствительности микроизгибного датчика можно пользоваться специальным оптическим смещением, используемым в фотоприемнике. Значение смещения подбирается таким, чтобы при отсутствии сигнала от датчика, т. е. при отсутствии воздействия на датчик давления, вызывающего только микроизгибные потери без сколько-нибудь значительных изгибных потерь, фотодетектор, являющийся одним из компонентов сенсорного устройства, не освещается излучением, проходящим по волокну датчика. Тогда минимальное регистрируемое датчиком давление будет зависеть от темнового тока фотодетектора и определяться минимальной детектируемой оптической мощностью

$$МДМ = (2ei_{\text{темн}}B)^{1/2}/\sigma_{\lambda},$$

где e — заряд электрона; $i_{\text{темн}}$ — темновой ток фотодетектора; B — ширина полосы детектирования; σ_{λ} — отклик фотодетектора. Благодаря применению оптического смещения порог чувствительности микроизгибного датчика можно понизить, например, до 60 дБ на 1 мкПа.

Развитие конструкций микроизгибных датчиков, отличительными особенностями которых являются простота их изготовления, низкая стоимость и высокая надежность в условиях эксплуатации, привело к разработке сенсорных устройств, содержащих расположенные по одной световодной линии датчики (до нескольких десятков), измеряющие почти одновременно давление во многих точках. Такого рода сенсорные устройства быстро нашли применение, в частности, в сложных строительных конструкциях для контроля за возникновением в них перегрузок, измерения значений напряжений в процессе эксплуатации.

Примером хорошо зарекомендовавшей себя на практике сенсорной системы с многими микроизгибными датчиками может служить система [56], именуемая в литературе устройством с модуляцией света микроизгибами и с участками волокна, покрытыми слоем вещества, поглощающего излучение, проникающее из сердцевины в оболочку световода. Такой участок назван участком темного фона (*dark-field*).

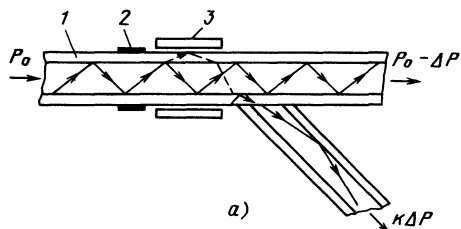
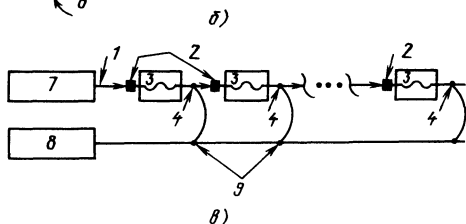
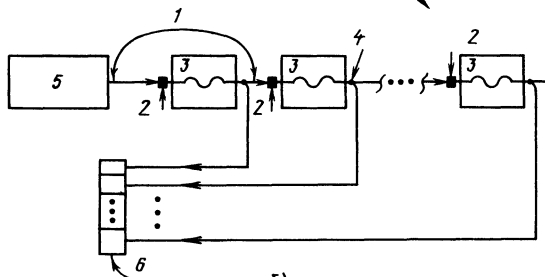


Рис. 19. Сенсорные системы с многими микроизгибными датчиками для одновременного измерения в разных точках объекта изменений давления и механических напряжений:

а—датчик; *б*—общая схема системы непрерывного действия; *в*—общая схема системы дискретного действия; 1—базовая световодная линия; 2—участки затемнения; 3—гребенчатые устройства для создания микроизгибов; 4—ответвители; 5—лазерный диод; 6—блок фотодетекторов; 7—импульсный лазерный диод; 8—фотоприемник; 9—смесители



Разработаны [56] следующие типы рассматриваемой сенсорной системы:

система непрерывного действия с многими микроизгибными датчиками, каждый из которых присоединен к отдельному фотодетектору (рис. 19, *а*, *б*);

система дискретного действия (импульсная) с многими микроизгибными датчиками, присоединенными к одному общему фотодетектору (рис. 19, *а*, *в*).

В системах непрерывного действия в качестве источника света применяется лазерный диод. В системе дискретного действия — импульсный лазерный диод с амплитудой в импульсе, составляющей 20 Вт при частоте повторений 5 кГц.

Излучение лазерного диода вводится через соединитель во входной торец волокна, играющего роль базовой световодной линии. Далее вдоль базовой линии располагаются на некоторых расстояниях друг от друга гребенчатые микроизгибные датчики. Для системы непрерывного действия эти расстояния небольшие (около 1 м), а протяженность световодной линии составляет несколько метров. В системе дискретного действия протяженность базовой световодной линии превышает 100 м, и в примере, описанном авторами работы [56], она достигает длины 550 м, причем на про-

тяжении линии размещены 25 микроизгибных датчиков.

Перед каждым датчиком некоторый участок волокна покрыт слоем поглощающего свет вещества. Назначение такого участка темного фона состоит в том, чтобы в волокно, пропущенное через деформер, поступало только излучение, распространяющееся по сердцевине световода.

Вслед за каждым датчиком расположен волоконно-оптический ответвитель, присоединенный к базовому волоконному световоду таким образом, чтобы в него перекачивалась только энергия излучения, проникшего в оболочку волокна. Если на входе в первый, ближайший к источнику излучения датчик мощность светового потока будет равной некоторому значению P_0 , а ее потери при прохождении через микроизгибный датчик составляют ΔP , то в расположенный непосредственно за датчиком ответвитель передастся мощность $K\Delta P = P_1$. Мощность светового потока, оставшегося в базовом световоде, составит $P_0 - \Delta P$. Значение коэффициента передачи мощности K не может быть заранее рассчитано и определяется только по данным опытов.

Практика показывает, что при использовании в качестве базового световода кварцевого оптического волокна, имеющего значение потерь 6...10 дБ/км, первый же датчик, ближайший к источнику излучения, уменьшает мощность P_0 исходного светового потока почти на 1%. До половины этой мощности (в зависимости от значения приложенного к датчику давления) может быть передано в ответвитель, присоединенный другим своим концом к фотодетектору. Аналогичный процесс происходит, когда оставшееся в сердцевине базового волоконного световода излучение проходит последовательно через участок темной зоны в следующий, второй по свету датчик и т. д.

В такой многодатчиковой системе каждый ответвитель присоединен к своему фотодетектору, в результате почти одновременно регистрируются значения нагрузки, действующей на соответствующий микроизгибный датчик (рис. 19, б).

Многодатчиковая система непрерывного действия, показанная на рис. 19, б, не может иметь большую протяженность, и число датчиков в ней обычно ограничено (5 — 8) вследствие сравнительно невысокой мощности лазерного диода, работающего в непрерывном режиме.

Возможности системы с микроизгибными датчиками, питаемой излучением импульсного лазера, как указывалось выше, весьма значительны (большая протяженность базовой световодной линии, десятки датчиков). Режим работы такой системы отличается тем, что длительность и частота следования лазерных импульсов должны быть согласованы с временем задержки, на которое запаздывает импульс распространяющегося по базовому световоду излучения. Например, при расстоянии между ответвителями 22 м, когда задержка в поступлении в очередной датчик импульса света сос-

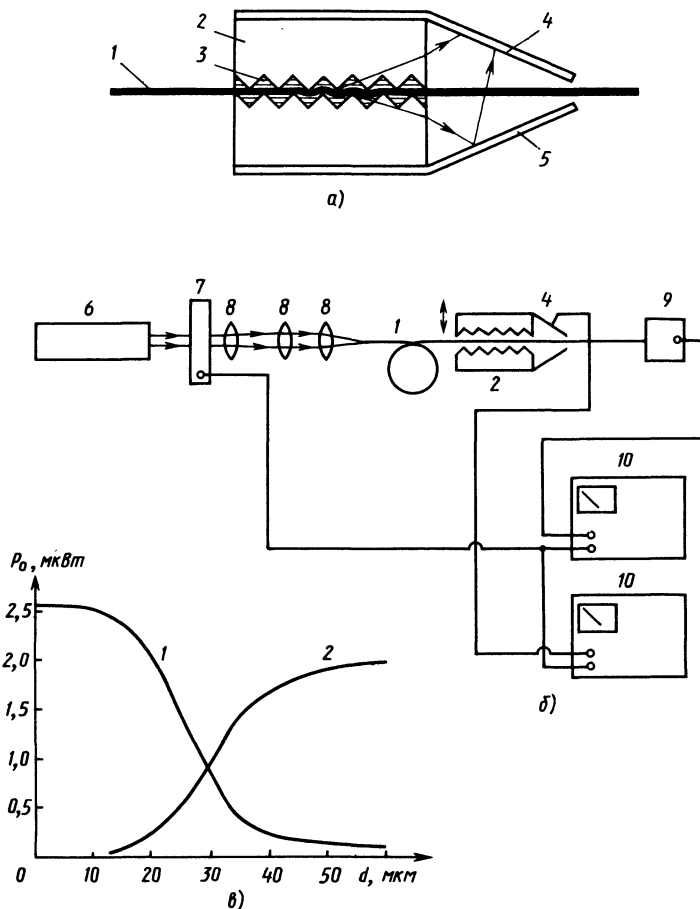


Рис. 20. Микроизгибное устройство регистрации перемещений повышенной чувствительности:

а—датчик; б—схема устройства (1—световодное волокно; 2—деформер; 3—жидкость; 4—детектор «темного поля»; 5—зеркало; 6—He—Ne-лазер; 7—прерыватель света; 8—линзы; 9—детектор «светлого поля»; 10—синхронные усилители); в—зависимость мощности излучения P_0 , регистрируемого детекторами, от смещения объекта d (1—в «светлом поле»; 2—в «темном поле»)

тавляет 110 нс, импульсы света от лазера должны вводиться через промежутки времени, равные 100 нс. Соблюдение этих условий позволяет осуществлять амплитудную модуляцию в системе, работающей, как показано на рис. 19, в, с подключением всех датчиков к единственному общему фотоприемнику.

Дальнейшее развитие конструкций микроизгибных датчиков с зонами темного и светлого полей привело к созданию регистрирующих давление устройств с повышенной чувствительностью,

достигающей $1 \cdot 10^{-11}$ м/Гц^{1/2} [66]. В датчиках новой конструкции пластины, рельеф которых позволяет получать микроизгибы световодного волокна 1 на его участке, находящемся в деформере 2 (рис. 20, а), изготавливают из прозрачного материала. Зазор между профилированными (зубчатыми) поверхностями пластин в деформере и волоконным световодом заполнен жидкостью 3, имеющей коэффициент преломления, согласованный с коэффициентом преломления материала оболочки световода. Эта особенность датчика новой конструкции позволяет удалять из оболочки световода большую часть излучения, проникшего в нее из сердцевины волокна в зонах его микроизгибов. Таким образом, на фотодетектор, регистрирующий излучение, поступившее на него из темной области датчика, и размещенный непосредственно за деформером, может поступать, как показали эксперименты, до 80% света, проникающего в оболочку в зонах микроизгибов волокна. Большая площадь фотодетектора и наличие зеркала, находящегося в общем корпусе с фотодетектором (рис. 20, а), обеспечивают высокое значение его КПД по отношению к общей мощности света, проникшего в оболочку из сердцевины волокна. Другая часть светового пучка, введенного в волокно перед деформером, распространяется далее по световоду к фотодетектору светлой зоны, как показано на рис. 20, б.

В одной световодной линии могут быть помещены несколько микроизгибных датчиков рассмотренного выше типа и построены с этими датчиками соответствующие сенсорные сети или системы, обладающие высокой чувствительностью, необходимой для локальных измерений малых давлений.

3. СВЕТОВОДНЫЕ ДАТЧИКИ И СЕНСОРНЫЕ УСТРОЙСТВА С ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ. ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ОПТИЧЕСКИХ СЕНСОРНЫХ УСТРОЙСТВАХ С ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Применение фазовой модуляции в волоконно-оптических сенсорных устройствах впервые было предложено в 1974 г. [55] для датчиков, в которых использовалось многомодовое волокно. В этих сенсорных устройствах оптическое волокно наматывалось на цилиндры, изготовленные из материалов, обладающих пьезоэлектрическими свойствами. Таким образом, были созданы первые конструкции волоконно-оптических вольтметров, в которых изменения размеров указанных выше цилиндров, вызванные приложенной извне разностью потенциалов, в свою очередь, приводили к изменению распределения энергии между модами проходившего по волокну излучения.

Об изменении значений механических напряжений в материале волоконных световодов сначала было предложено судить на основании визуально наблюдаемой картины модовой структуры излучения, пользуясь методикой так называемого «даль-

него поля». Эта методика оказалась сложной и не привела к четко документированным результатам измерений. Вскоре была разработана иная методика, также с использованием цилиндров из пьезоэлектрических материалов. Обмотку пьезоэлектрических сердечников в датчиках стали выполнять из одномодового волокна [63], а о значении измеряемой разности потенциалов, вызывавшей механические напряжения в волоконных световодах при изменении размеров пьезоэлектрических сердечников, было предложено судить по изменению длины оптического пути луча, распространявшегося от источника света до фотоприемника.

Идея применения в световодных датчиках фазовой модуляции, позволяющей регистрировать различные физические возмущения при изменении фазы распространяющегося по волокну излучения, оказалась исключительно плодотворной.

В датчике с фазовой модуляцией на световодное волокно воздействуют регистрируемые физические возмущения (механические напряжения, акустические колебания и др.), вызывая изменения фазы проходящего по волокну света. Возникающий сдвиг фазы регистрируется интерферометром. Сенсорные устройства с фазовой модуляцией значительно сложнее устройств с амплитудными датчиками, дороже их, но чувствительность датчиков с фазовой модуляцией гораздо выше. В таких датчиках для наиболее полного использования их преимуществ следует применять одномодовое оптическое волокно.

При распространении когерентного света по волоконному световоду, имеющему показатель преломления сердцевин n и длину L , фаза может характеризоваться (в радианах) соотношением $\varphi = \beta n L$, где β — постоянная распространения, равная $2\pi/\lambda_0$; λ_0 — длина волны света в вакууме, связанная с длиной волны света λ в среде с показателем преломления n соотношением $n/\lambda_0 = 1/\lambda$. Изменение значений n или L приводит к изменению фазы.

Оптическая частота составляет около 10^{14} Гц. Поэтому фотодетекторы, применяемые в световодной технике, нельзя использовать для непосредственной регистрации результатов фазовой модуляции. Необходимо в устройствах рассматриваемого вида пользоваться специальными преобразователями, чтобы в конечном итоге иметь возможность наиболее точно измерять сдвиг фазы. Иначе говоря, необходимо отображать результаты фазовой модуляции, приводя их к результатам амплитудной модуляции. Эту функцию могут выполнять оптические интерферометры.

В сенсорных системах с фазовой модуляцией наибольшее применение получили интерферометры четырех видов: Майкельсона, Маха—Зендера, Фабри—Перо и Саньяка. Каждый из них является преобразователем излучения, модулированного по фазе, в регистрируемое фотодетектором излучение, модулирован-

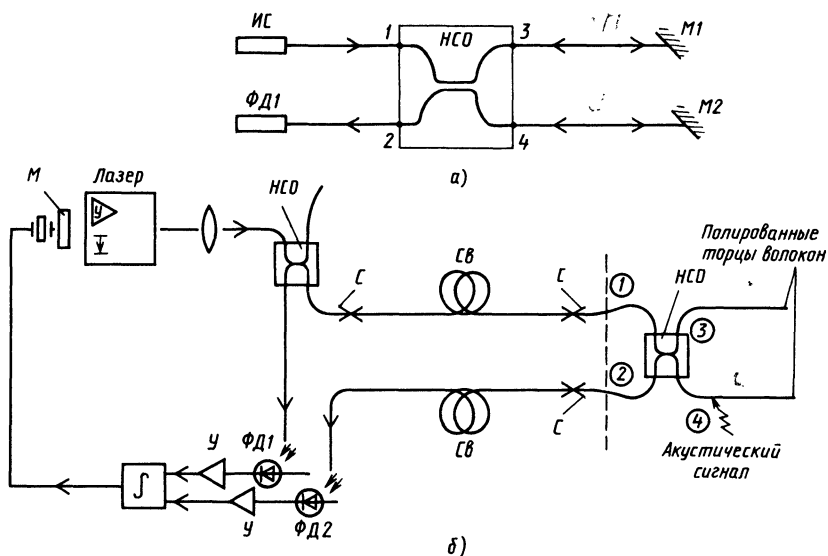


Рис. 21. Волоконно-оптический интерферометр Майкельсона:

а—принципиальная схема простейшего интерферометра; *б*—схема интерферометра для дистанционного измерения акустических сигналов; ИС—источник света; НСО—направленный смеситель-ответвитель с входными-выходными портами 1—4; М, М1, М2—зеркала; СВ—волоконный световод; ФД1, ФД2—фотодетектор; С—сварное соединение световодных волокон; ОП—опорное плечо интерферометра; СП—сигнальное плечо интерферометра; У—усилитель

ное по амплитуде. В сенсорных устройствах с модуляцией света не по фазе, а изменением состояния поляризации, частоты, применяют другие приборы, например поляризметрические интерферометры, спектроанализаторы, для декодирования прошедших по световодной линии откликов датчика на регистрируемое физическое возмущение.

Интерферометр Майкельсона состоит из следующих основных частей [87, 91]:

источника света, из излучения которого выделена какая-либо одна спектральная линия, возможно более узкая;

не менее чем одного направленного смесителя-ответвителя;

волоконных (в интегральном исполнении — планарных или волоконных в сочетании с планарными) световодов;

зеркал, роль которых в некоторых конструкциях интерферометров могут выполнять определенные тщательно отполированные и посеребренные торцы волоконных световодов;

фотоприемника.

Генерируемый излучателем пучок света проникает в направленный смеситель-ответвитель НСО (рис. 21) через вход 1. Направленный смеситель-ответвитель, применяемый в данном случае, имеет четыре входа-выхода, каждый из которых именуют

портом, по аналогии с гаванью, в которую могут входить, или которую могут покидать речные или морские суда. Такой прибор, имеющий четыре порта, представляет собой два волоконных (или планарных, если имеется в виду устройство интегрально-оптическое) световода, причем эти световоды на некотором своем участке протяженностью L располагаются очень близко друг к другу, например, на расстоянии $d=2\ldots 3$ мкм.

При достаточно малом значении d часть светового потока, проходящего по одному из световодов направленного ответвителя, переходит в другой световод. Таким образом, вследствие особенностей электромагнитной природы света осуществляется обмен оптической энергией между волноводами через пространственные моды излучения. Инициированное излучение распространяется в том же направлении, что и свет, вызвавший его возникновение.

Пусть в один из волноводов, через какой-либо порт направленного смесителя-ответвителя введена оптическая мощность, пропорциональная величине $|E_0(0)|^2$, тогда мощность $|E_1(L)|^2$, переданная в другой волновод, определится соотношением [87]

$$|E_1(L)|^2 = \frac{|E_1(0)|^2}{(\Delta\beta/2c_d)^2 + 1} \cdot \cos\left(c_d L \sqrt{\left(\frac{\Delta\beta}{2c_d}\right)^2 + 1}\right),$$

где $\Delta\beta$ — разность постоянных распространения света; c_d — коэффициент передачи мощности из одного волновода в другой, зависящий от ряда факторов, в том числе от значений d и L .

Пучок света, проникший, как указывалось выше, в направленный смеситель-ответвитель через порт 1, разделится на два луча, один из которых выйдет через порт 3, а другой — через порт 4 (рис. 21, а). Каждый из обоих лучей, распространяясь по отдельному световоду, достигнет своего зеркала (M_1 или M_2). Один из лучей, например, вышедший из порта 3, можно назвать опорным, а другой, вышедший из порта 4, сигнальным. Эти наименования должны означать, что на участок световода порт 3— M_1 не будет оказываться какое-либо внешнее воздействие, а на участок порт 4— M_2 будет влиять регистрируемое физическое возмущение, вызывающее сдвиг фазы света. Отраженные зеркалами M_1 и M_2 опорный и сигнальный лучи далее возвратятся в порты 3 и 4 ответвителя, но фаза сигнального луча окажется смещенной на некоторое значение $\Delta\varphi$ благодаря тому, что сигнальный луч распространялся по световоду, оптические свойства которого были изменены. Достигнув направленного ответвителя, части обоих лучей соединятся в один пучок, интенсивность которого после его выхода наружу через порт 2, будет зарегистрирована фотодетектором $\Phi Д$. Таким образом, окажется возможным определить значение сдвига фазы $\Delta\varphi$.

Если датчик с фазовой модуляцией используется для регистрации значений механической силы, действующей на волоконный световод и вызывающей изменения показателя преломления n сердечника световода и длины L световода, то соответствующее изменение фазы можно характеризовать соотношением

$$\Delta\varphi = \beta\Delta(nL) = \beta nL(\Delta n/n + S_{11}),$$

где $S_{11} = \Delta L/L$ — осевая деформация, а Δn выражается соотношением

$$\Delta n = -(n^3/2) [(P_{11} + P_{12})S_{12} + P_{12}S_{11}],$$

где P_{11} и P_{12} — постоянные фотоупругости и S_{12} — радиальная деформация. Таким образом, имеем

$$\Delta\varphi = \beta nL \left[S_{11} - \frac{n^2}{2} ((P_{11} + P_{12})S_{12} + P_{12}S_{11}) \right].$$

Механическое напряжение может быть вызвано, например, усилием, действующим на волоконный световод через его наружное покрытие при деформации сердцевин, на которую намотано волокно. Многие способы создания в волокне напряжений могут быть использованы для того чтобы, применяя фазовую модуляцию, измерять температуру, интенсивность магнитных, электрических, акустических полей и т. д.

К настоящему времени создан ряд конструкций на основе интерферометра Майкельсона для выполнения дистанционных измерений. К таким конструкциям относится, например, устройство для измерения акустического поля с датчиком, находящимся на расстоянии 1 км от источника света (лазера), содержащее фотоприемник, источник питания и соответствующие регистрирующие приборы (рис. 21, б) [91]. В этом устройстве предусмотрено исключение влияния случайных флуктуаций интенсивности излучения источника света: часть генерируемого лазером света отводится с помощью дополнительного направленного ответвителя в дополнительную световодную линию, ведущую к второму фотодетектору ФД2. Схема, приведенная на рис. 21, б, позволяет, кроме того, осуществлять обратную связь между датчиком и лазером. Регистрируемая устройством разность длин оптических путей пучков, распространяющихся в опорном и сигнальном плечах интерферометра, служит основанием для определения сдвига фазы $\Delta\varphi$ с помощью соотношения

$$\Delta\varphi = 2\pi\Delta n_{\text{эфф}} \nu/c,$$

где $n_{\text{эфф}}$ — эффективный показатель преломления сердцевин световодов в датчике; ν — оптическая частота применяемого излучения; c — скорость света в вакууме.

Интерферометр Маха—Зендера [87], схема которого приведена на рис. 22, а, б, принадлежит, как и интерферометр Май-

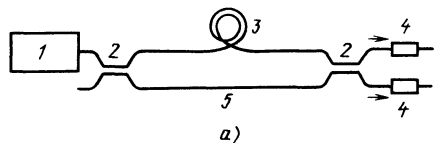
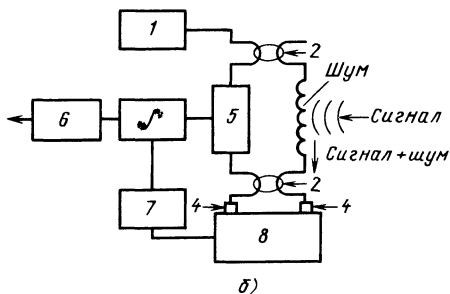


Рис. 22. Волоконно-оптический интерферометр Маха—Зендера:

а—принципиальная схема; *б*—схема интерферометра с синхронным гомодинным детектированием при определении значения сдвига фазы света; 1—источник света; 2—направленный смеситель-ответвитель; 3—сигнальное плечо интерферометра; 4—фотодетектор; 5—опорное плечо интерферометра; 6—фильтр высоких частот; 7—фильтр низких частот; 8—усилители и сумматор



кельсона, к типу двухлучевых приборов. Главным конструктивным отличием простейшего интерферометра Маха—Зендера от интерферометра Майкельсона является отсутствие в нем зеркал, отражающих свет, распространяющийся в каждом плече световода до торца световода. Интерферометр Маха—Зендера легко может быть изготовлен методами, применяемыми в производстве интегрально-оптических схем, иметь очень малые размеры, точно регулироваться в процессе производства. Последнее обстоятельство весьма существенно для того, чтобы поставляемые промышленными предприятиями в большом числе интерферометры Маха—Зендера могли применяться во многих сенсорных устройствах различного назначения.

В связи с распространением интегрально-оптических компонентов в световодной технике в настоящее время многими зарубежными фирмами уделяется особенно большое внимание интерферометрам Маха—Зендера в таком исполнении. Выпускается даже ряд модулей, содержащих в одной плате миниатюрные источники излучения, фотоприемники, различные соединители, переключатели света и интерферометры Маха—Зендера, изготовленные по планарной технологии.

Рассмотрим некоторые примеры, предварительно приведя соответствующие расчеты [45].

На рис. 23, *а* приведена принципиальная схема интерферометра Маха—Зендера в интегральном исполнении, причем символически обозначена φ_i общая разность фаз между лучами, проходящими по опорному и измерительному планарным волноводам. Показанные на этой схеме плечи интерферометра расположены взаимно симметрично, и в данном случае отношение между оптической мощностью P_1 на входе в интерферометр и мощностью P_2 на выходе определится выражением

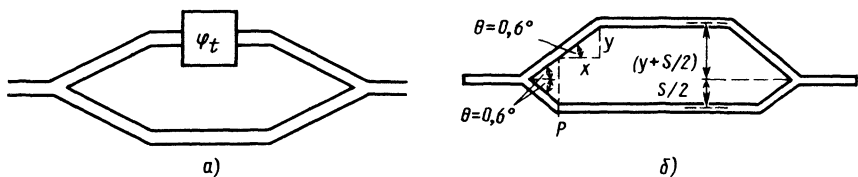


Рис. 23. Интерферометр Маха—Зендера с планарными световодами:

а—с симметричным расположением опорного и сигнального плеч; б—с асимметрично расположенными опорным и сигнальными плечами, выполненными из одномодовых волноводов; φ_t — сдвиг фазы света в сигнальном плече

$$P_2/P_1 = 0,5(1 + \cos \varphi_t),$$

где φ_t может быть суммой разности фаз φ_0 , обусловленной собственно конструктивными и технологическими особенностями плечей конкретного образца интерферометра, и разности фаз $\Delta\varphi$, вызванной действием на измерительное плечо внешнего физического возмущения, например обусловленного внешним электромагнитным полем, благодаря приложенной к внешнему электроду, расположенному возле измерительного плеча, разности потенциалов V .

Для единичного значения вводимой мощности получаем соотношение

$$P_2 = \frac{1}{2} [1 + \cos (\varphi_0 + KV)],$$

где K — постоянная.

Если $\varphi_0 = \pi/2$, $\sin KV \approx KV$, то зависимость между оптической мощностью на выходе P_2 и измеренным значением разности потенциалов V носит линейный характер.

При изготовлении прецизионных интегрально-оптических схем с интерферометрами Маха—Зендера, выполненными по планарной технологии, необходимо обеспечивать высокую точность выполнения ряда технологических операций, в первую очередь операций подготовки кристаллов ниобата лития, служащих подложками схем, и получения на них планарных световодов. Так, например, перед формированием в подложке методом термической диффузии (6 ч выдержки при 1000 °С) легированных титаном областей (полосок шириною около 4 мкм) необходимо применять электронолитографию, пользуясь пучком электронов диаметром не более 0,1 мкм, а на поверхность ниобата лития предварительно наносить слой титана толщиной 24—30 нм.

Даже небольшие нарушения технологического процесса изготовления планарных световодов могут приводить к значительному дисбалансу параметров опорного и измерительного плеч интерферометра. Непосредственными причинами дисбаланса могут быть нарушения заданной конфигурации элементов интерферометра, допусков на размеры планарных световодов и др.

20 мкм. Планарные световоды, образующие / в своей совокупности отдельный интерферометр, имеют вид полосок шириною 3,7 мкм. Глубина световодного слоя в волноводе не превышает 2 мкм. При изготовлении большого числа интерферометров одновременно на одной пластине ниобата лития методом фотолитографии (точнее — электронной литографии) сначала получают полоски титана толщиной по 40 нм, а затем осуществляют термодиффузию титана в ниобат лития в атмосфере аргона, смешанного с водяным паром, в течение 4,5 ч при температуре в 1000 °С. Параллельно одному из плеч каждого интерферометра наносят на поверхность подложки (LiNbO_3), покрытой буферным электроизолирующим слоем SiO_2 , узкие токопроводящие полоски, к которым прикладывают разность потенциалов V_n . С помощью разности потенциалов осуществляют электрооптическую подгонку интерферометров.

Между интерферометрами размещаются на той же плате ниобата лития дополнительные прямолинейные планарные световоды, используемые при проводимых измерениях и «подгонке» плеч интерферометров. В процессе измерения распределения фазы и амплитуды по сечению волнового фронта P_0 сопоставляют значения оптической мощности P_q на выходе каждого из микроинтерферометров с значениями мощности P_1, P_2, \dots на выходе дополнительных планарных световодов. Перед выполнением измерений исследуемых параметров волнового фронта микроинтерферометры должны быть отъюстированы, для того чтобы на результаты измерений не повлияли результаты производственных дефектов, допущенных при изготовлении этих приборов.

Юстирование микроинтерферометров должно обеспечить эквивалентность длин оптических путей, проходимых лучами по световодам — плечам интерферометра. Выполняется юстирование следующим образом. На входы каждой пары прямолинейных световодов подается излучение, мощность которого соответственно P_1 и P_2 . Для эквивалентных оптических длин лучей в плечах микроинтерферометра Маха—Зендера мощность на выходе интерферометра P_q должна определяться соотношением [121]

$$P_q = \frac{1}{2} B [P_1 - P_2 + 4P_1^{1/2} P_2^{1/2} \cos^2(\varphi/2)],$$

где φ — разность фаз между оптическими волнами на входе в плечи интерферометра, и множитель B характеризует дополнительные потери в плечах интерферометра, обусловленных, например, их изгибами. Если $P_1 = P_2 = P$, то

$$P_q = B[2P \cos^2(\varphi/2)].$$

На рис. 24, б показан путь исследуемого луча от источника света до матрицы микроинтерферометров. Соответствующим по-

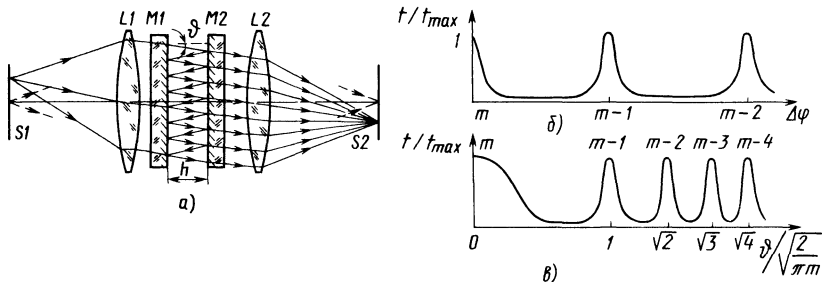


Рис. 25. Классический интерферометр Фабри—Перо:

a—схема интерферометра; *б*—график зависимости t от $\Delta\varphi$; *в*—график зависимости t от $\delta/\sqrt{2/(\pi\epsilon)}$; S_1 — плоскость, в которой расположены источники света; S_2 — плоскость, в которой располагаются сходящиеся лучи, прошедшие через интерферометр; $L1$ и $L2$ —линзы; h —ширина полости резонатора; $M1$ и $M2$ —отражающие плоско-параллельные пластины; Δ —ход лучей; T —функция пропускания; m —порядок интерференции

воротом зеркал δ регулируется положение исследуемого волнового фронта относительно входов в микроинтерферометры.

Интерферометр Фабри—Перо относится к типу многолучевых приборов. В нем первичная плоская волна разбивается в результате многократных отражений от двух зеркал на последовательности вторичных плоских волн, различающихся по амплитуде и сдвинутых по фазе. При интерференции вторичных плоских волн образуется плоская волна того же направления, что и падающая. Отношение интенсивностей первичной и образующейся волн зависит от разности фаз между двумя последовательными вторичными волнами.

На рис. 25, *a* приведена схема устройства классического интерферометра Фабри—Перо, получившего широкое применение в оптических системах при визуальной, фотографической и фотоэлектрической регистрации спектров, особенно в областях длин волн ближнего УФ, видимого и ближнего ИК-света.

Классический интерферометр Фабри—Перо представляет собой устройство, состоящее из двух строго параллельных плоских зеркал, изготовленных из стекла или кварца (последнее необходимо для расширения диапазона длин волн используемого излучения). Поверхности пластин, обращенных друг к другу, должны быть обработаны с высокой степенью точности (порядка нескольких нанометров) и покрыты хорошо отражающим слоем (серебро, алюминий, многослойные диэлектрические покрытия).

Распределение освещенности в плоскости S_2 определяется соотношением

$$E_s = B_s \frac{\pi D^2}{4f_2^2} t,$$

причем

$$t = \left(1 - \frac{a}{1-r}\right)^2 / \left[1 + \frac{4r}{1-r^2} \sin^2 \frac{\Delta\varphi}{2}\right],$$

где B_s — яркость источника; D — диаметр интерферометра Фабри—Перо; f_2 — фокусное расстояние линзы L_2 ; a и r — коэффициенты поглощения и отражения зеркал $M1$ и $M2$ интерферометра; $\Delta\varphi$ — разность фаз между двумя вторичными волнами. В свою очередь,

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{2h}{\lambda} n \cos \vartheta,$$

где h — расстояние между зеркалами интерферометра Фабри—Перо; λ — длина волны; n — показатель преломления среды между зеркалами; ϑ — угол между лучом и нормалью к зеркалам [18].

Все особенности интерференционной картины определяются функцией пропускания t , графики которой приведены на рис. 25, б и в. Так как t зависит от ϑ , то интерференционная картина в фокальной плоскости $S2$ линзы L_2 имеет вид концентрических колец. Максимальное значение функции t достигается при $2hn \cos \vartheta = m\lambda$ (m — порядок интерференции, целое число) и равно $t_{\max} = [1 - a/(1 - r)]^2$.

На рис. 26 схематически представлены две из многих возможных конфигураций интерферометра Фабри—Перо, в которых отражение луча осуществляется непосредственно у входного и выходного торцов волоконного световода: в одном случае (рис. 26, а) зеркала смонтированы непосредственно на торцах волоконного световода, в другом случае специальных отдельных зеркал нет (рис. 26, б), и их роль выполняют тщательно отполированные торцевые поверхности концов волоконного световода. На графиках, расположенных под схемой рис. 26, б, изображены кривые, характеризующие зависимости функции пропускания F_t и функции отражения F_r от разности фаз $\Delta\varphi$ между прямым и обратным лучами у входного торца световода [67].

Во многих сенсорных устройствах с фазовой модуляцией оп-

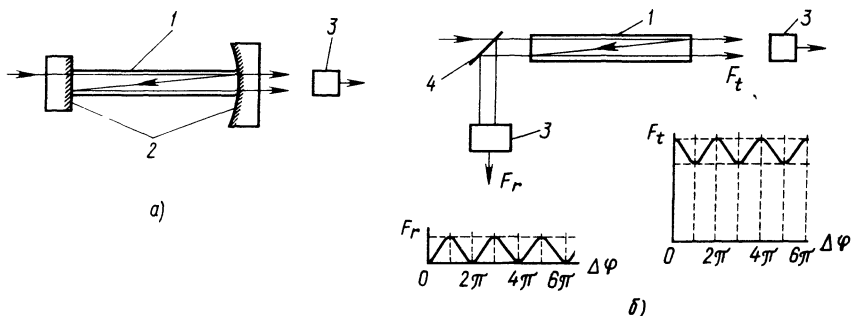


Рис. 26. Различные конструкции волоконно-оптических интерферометров Фабри—Перо: а—интерферометр с зеркалами, примыкающими к торцам волоконно-оптических световодов; б—интерферометр с полированными торцами волоконных световодов; 1—волоконный световод; 2—зеркало; 3—фотодиод; 4—делитель светового пучка

тических сигналов применяют интерферометры Фабри—Перо, выполняющие роль интерференционных спектроскопов [30, 47, 114, 131]. В волоконно-оптическом интерферометре этого вида (рис. 27, а, б) генерируемое источником света излучение вводится через волоконный световод и коллимирующую линзу, например стержневую градиентную линзу соответствующей длины, в зазор, где помещены два строго параллельных друг другу плоских зеркала, отстоящих одно от другого на расстояние h . Значение h может изменяться и составлять от долей миллиметра до нескольких миллиметров. Поверхности зеркал могут быть покрыты предохраняющим их от механических повреждений слоем окиси кремния. Толщина слоя отражающего свет покрытия на зеркалах может составлять 20...30 нм. В качестве материала отражающего покрытия наиболее часто применяют алюминий, осаждаемый на стекло при его конденсации из паров («термическое напыление»).

В интерферометрах с малой апертурой зеркалами могут служить соответствующим образом обработанные торцы градиентных стержневых линз диаметром около 2 мм (рис. 28).

Зазор между зеркальными торцами градиентных стержневых линз может быть заполнен воздухом, а сами линзы помещены в небольшую трубку и закреплены у концов трубки, например, эпоксидным клеем (рис. 28, а).

В отдельных конструкциях сенсорных устройств, в зазоре между торцами градиентных стержневых линз может быть помещен датчик, регистрирующий то или иное физическое возмущение. На рис. 28, б показан пример такой конструкции — это прибор, содержащий слой полимера, коэффициент преломления которого существенно отличается от коэффициента преломления воздуха (которым заполнена остальная часть зазора), и обладающего сравнительно высоким коэффициентом температурного расширения ($1,5—2,5 \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^\circ$). Такой датчик может регистрировать изменения температуры, хотя и в относительно узких пределах, вследствие того, что при нагреве полимер размягча-

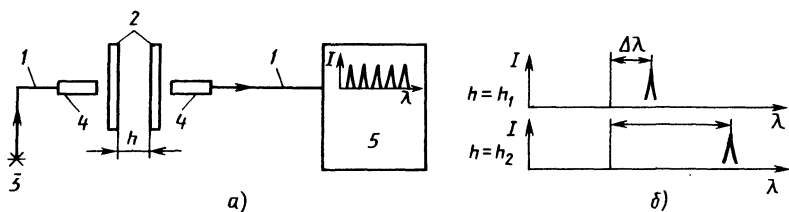


Рис. 27. Интерференционный спектрометр на основе интерферометра Фабри—Перо:
а—схема спектрометра; б—смещение максимума пропускания интерферометром с изменением h ; 1—световод; 2—зеркала; 3—источник света; 4—градиентные стержневые линзы (ГСЛ); 5—измеритель мощности излучения; h —расстояние между зеркалами; I —мощность излучения, прошедшего через интерферометр

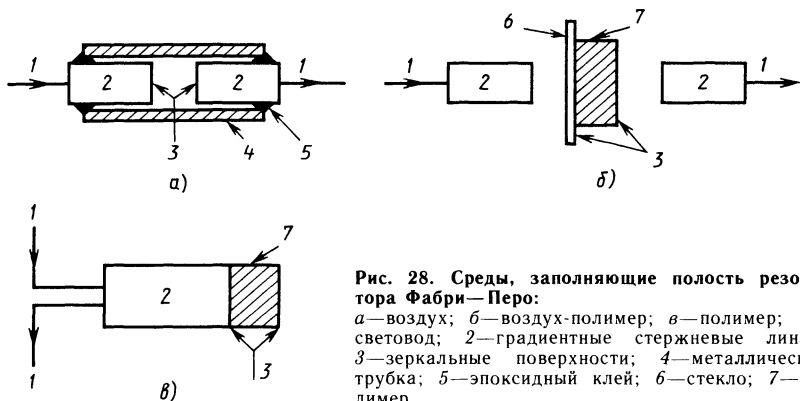


Рис. 28. Среды, заполняющие полость резонатора Фабри—Перо:

а—воздух; б—воздух-полимер; в—полимер; 1—световод; 2—градиентные стержневые линзы; 3—зеркальные поверхности; 4—металлическая трубка; 5—эпоксидный клей; 6—стекло; 7—полимер

ется (для полиметилметакрилата верхний предел, соответствующий началу размягчения, равен $+75^{\circ}\text{C}$) [47].

Некоторые типы интерферометров Фабри—Перо конструируют с расчетом на их функционирование с выходом света в том же направлении, что и направление света, входящего в зазор между зеркалами (рис. 28, в).

Интерферометр Саньяка. В интерферометре Саньяка свет, генерируемый источником когерентного излучения, расщепляется на два пучка, распространяющихся по одной и той же замкнутой петлеобразной траектории, но в противоположных направлениях, и рекомбинирующих затем в том же расщепителе.

Интерферометр Саньяка получил широкое применение в новейших типах волоконно-оптических гироскопов и поэтому подробные сведения о нем приводятся ниже, в гл. 6.

4. ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ДАТЧИКИ

Регистрация световых сигналов при модуляции излучения изменением состояния поляризации. Особенность поляризованной электромагнитной волны заключается в наличии преимущественного направления колебаний вектора напряженности электрического поля **E** (а следовательно, и вектора напряженности магнитного поля **H**). Поляризация света может возникать непосредственно в излучателе, при распространении световой волны в некоторых анизотропных средах, при преломлении или отражении света на границе раздела двух сред, а также при воздействии на среду, в которой распространяется свет, ряда внешних возмущающих факторов. В последнем случае внешнее физическое возмущение изменяет анизотропию оптических свойств материала световода.

Состояние поляризации света, распространяющегося по

оптическому волноводу, определяется экспериментально путем выявления характера поведения вектора \mathbf{E} .

Если колебания вектора \mathbf{E} происходят в одной плоскости, то волна именуется *плоскополяризованной*. При суперпозиции волн, генерируемых двумя или большим числом излучателей, если напряженность электрического поля беспорядочно изменяется со временем по амплитуде и направлению (в плоскости, перпендикулярной лучу), то результирующая волна называется *неполяризованной* или «естественной».

Для сенсорных систем с модуляцией света по изменению состояния его поляризации представляет особый интерес случай, когда в двух волнах, распространяющихся в одном и том же направлении вдоль оси z и поляризованных в плоскостях xz и yz , напряженности электрического поля изменяются гармонически с одинаковой круговой частотой ω . При этом вектор \mathbf{E} в результирующей волне вращается, и его конец с круговой частотой ω описывает эллипсы в плоскости, перпендикулярной оси волоконного световода. Такая поляризация называется *эллиптической*. Поляризация света называется *полной*, если в рассматриваемом световом потоке все волны, генерируемые различными излучателями, поляризованы одинаково.

Пусть символы φ_x и φ_y обозначают начальные фазы волн, поляризованных в плоскостях xz и yz . Тогда распределение средних квадратических значений \mathbf{E} в плоскости, перпендикулярной оси z , определит положение и ориентировку полуосей эллипса, а направление вращения вектора \mathbf{E} будет соответствовать знаку разности фаз $(\varphi_x - \varphi_y)$. При изменении фаз φ_x или φ_y таким образом, что $|\varphi_x - \varphi_y|$ равно $\pi/2$ и $E_x = E_y$, эллиптическая поляризация становится *круговой* или *циркулярной*, а при $\varphi_x = \varphi_y$ результирующая волна будет плоскополяризованной.

Если в световоде одновременно возникают волны, поляризованные в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, и волны некогерентные, то получается *частичная поляризация*. Можно выделить поляризованную компоненту в частично поляризованном свете, введя некоторый сдвиг фазы в одну из составляющих вектора \mathbf{E} по двум взаимно перпендикулярным направлениям x и y . Пользуясь этим приемом, можно также определить степень поляризации, т. е. отношение потока энергии поляризованной компоненты к общему значению потока энергии распространяющегося по оптическому волноводу пучка света, а также установить характер поляризации.

Для получения полностью или частично линейно поляризованного света в видимой и ультрафиолетовой областях используются поляризационными призмами. В ряде световодных сенсорных систем с модуляцией по состоянию поляризации для разделения луча света на два плоско поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях луча, расходящихся под некото-

рым углом друг к другу, применяют призмы Волластона. Призма Волластона состоит из двух склеенных между собою прямоугольных призм, изготовленных из кристаллов, обладающих двойным лучепреломлением (исландский шпат, природный кварц). Призмы вырезаны таким образом, чтобы благодаря их кристаллографической ориентировке луч света, падающий на боковую грань одного кристалла, разделялся бы на два плоско поляризованных луча — обыкновенный и необыкновенный, распространяющихся в таком кристалле с различными скоростями. Попадая во вторую призму под другим углом к направлению оптической оси второго кристалла, они преломляются у поверхности раздела двух склеенных кристаллов под различными углами (при этом обыкновенный луч становится необыкновенным и наоборот). Выходя из второго кристалла наружу, каждый из двух лучей снова преломляется, почти симметрично отклоняясь один от другого в разные стороны от направления луча, входящего в первую призму. В световодной технике для поляризации инфракрасного света используют то обстоятельство, что это явление может возникать при отражении света.

Для преобразования линейно поляризованного света в эллиптически поляризованный в сенсорных устройствах с поляриметрами обычно пользуются так называемыми четвертьволновыми пластинками. Четвертьволновая пластинка вырезается из оптически анизотропного кристалла или изготавливается из слюды, расщепленной по плоскости спайности.

Свое название четвертьволновая пластинка получила вследствие того, что при прохождении через такую пластинку светового пучка колебания вектора E , направленные вдоль двух определенных взаимно перпендикулярных направлений в плоскости пластинки, приобретают разность хода, равную четверти длины волны ($\lambda/4$) или $(m + 1/4)\lambda$, где m — целое число. Два взаимно перпендикулярных направления в плоскости пластинки, о которых сказано выше, называются главными направлениями.

При прохождении через такую пластинку линейно поляризованный свет, направление колебаний в котором составляет угол 45° с главными направлениями пластинки, становится поляризованным по кругу.

Важными компонентами световодных сенсорных систем с модуляцией излучения по состоянию поляризации, кроме призм или иных приборов, разделяющих частично поляризованный свет на поляризованную и неполяризованную его доли, являются также оптические компенсаторы и анализаторы.

Простейшим оптическим компенсатором может служить упомянутая выше четвертьволновая пластинка. Пластинку помещают на пути исследуемого луча и поворачивают, пока ее оптические оси не совпадут с осями колебаний. При этом фиксируемом положении пластинка выполняет основную роль ком-

пенсатора — преобразует излучение с круговой поляризацией в свет, поляризованный линейно, дополняя разность фаз до нуля или до π . К другим поляризационным компенсаторам, используемым для определения степени поляризации частично поляризованного света, относятся, например, устройства с помещенной на пути луча плоскопараллельной пластинкой. При повороте этой пластинки вокруг оси, параллельной ее плоскости, меняется интенсивность отражения лучей различной поляризации. Компенсаторы такого рода применяют для измерения вращения плоскости поляризации (компенсатор Солейля и др.).

Типичным образцом оптического анализатора — устройства для анализа характера поляризации света путем обнаружения плоско поляризованного света — является поворачиваемая пластинка турмалина.

Примеры сенсорных устройств с модуляцией излучения по состоянию поляризации. К сенсорным устройствам с модуляцией по состоянию поляризации относятся главным образом устройства двух типов. В одних датчиком служит сам волоконный световод, по которому распространяется поляризованный свет. На световод воздействует регистрируемое физическое возмущение, влияющее на поляризованный по кругу свет. Компенсатор Солейля, упомянутый выше, в сочетании с анализатором позволяют определить характер и степень изменения поляризации света под действием физического возмущения (рис. 29, а), а следовательно, и получить данные о регистрируемом возмущении.

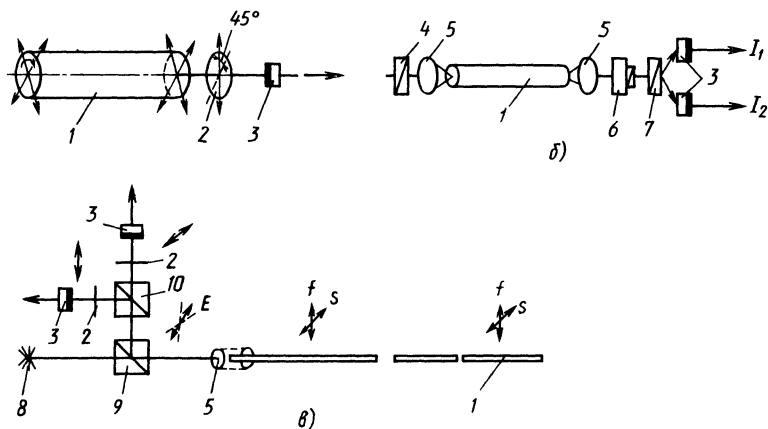


Рис. 29. Поляриметрическая сенсорная система с датчиком-световодом:

а, б—простейшие поляриметрические сенсорные системы; в—комбинированное интерферометрическое поляриметрическое устройство для измерения температуры; 1—оптическое волокно-датчик; 2—анализатор; 3—фотодетектор; 4—поляризатор; 5—линза; 6—призма Волластоны; 7—компенсатор Солейля; 8—лазер; 9—расщепитель-смеситель; 10—расщепитель; Е—вектор электрического поля

Устройства второго типа содержат поляризационный датчик, помещаемый между двумя отрезками волоконных световодов. Первый из этих отрезков соединяет датчик с источником света, а второй отрезок — с анализатором и рядом других компонентов устройства, обеспечивающих возможность регистрации фотодетектором характера и степени поляризации света, прошедшего через датчик.

В устройствах первого типа волоконный световод, не обладающий в исходном состоянии свойством удерживать состояние поляризации распространяющегося по нему света, не имеющий высокого двойного лучепреломления, существенно изменяет свою способность пропускать с различной скоростью свет, поляризованный в различных плоскостях. Так, например, воздействуя на световод механическими нагрузками, можно вызвать (индуцировать) в волокне способность к двойному лучепреломлению. Простейшим примером подтверждения сказанного является тот факт, что волоконный световод, вначале не обладающий двойным лучепреломлением, приобретает в той или иной степени это свойство, если волокно намотать на стержень с небольшим радиусом сечения или просто придать волокну форму петли [114]. Схема сенсорного устройства, в котором используется волоконный световод, реагирующий на внешнее физическое возмущение изменением характера и степени поляризации света, распространяющегося по волокну, приведена на рис. 29, б.

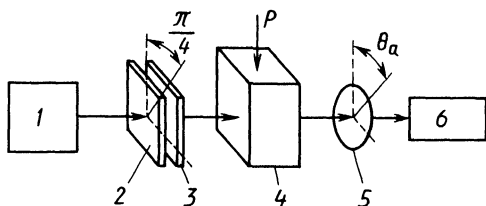
Эта схема реализуется в настоящее время в ряде типов сенсорных устройств. В частности, она удачно применена в сочетании с интерферометром Фабри—Перо в одном из комбинированных интерференционных поляриметрических устройств (рис. 29, в) для дистанционного измерения температуры (волоконно-оптический датчик помещен на расстояние нескольких десятков метров от источника света, поляриметра и фотодетекторов) [30].

Как видно из рис. 29, в, в рассматриваемом сенсорном устройстве свет, излучаемый гелий-неоновым лазером, распространяется через участок пассивного световода длиной около 50 м по направлению к участку, выполняющему роль датчика, и имеет направление поляризации, промежуточное между «быстрым» f и «медленным» s направлениями собственных осей световода. Датчик — световод длиной около 20 см, имеет на своем выходном торце слой отражающего покрытия и функционирует по принципу интерферометра Фабри—Перо. Нагрев такого датчика вызывает в нем изменение фазы в каждой собственной моде, что дает возможность регистрировать значение температуры.

В устройствах второго типа, в которых состояние поляризации света, распространяющегося от источника излучения к фотоприемнику, модулируется датчиком, последовательно включенным в световодную линию, чаще всего применяют кристаллы веществ, обладающих способностью изменять характер и степень

Рис. 30. Сенсорная система с фотоупругим датчиком:

1—источник света; 2—поляризатор; 3—четвертьволновая пластинка, ориентированная в направлении наиболее быстрого распространения поляризованного света; 4—фотоупругий датчик, изменяющий поляризацию проходящего через него света под действием нагрузки P ; 5—анализатор; 6—фотодетектор



поляризации проходящего через них света, а также некоторые растворы, способные, например, вращать плоскость поляризации света под действием магнитного поля, механических напряжений, температуры.

Пример конструкции сенсорного устройства с датчиком — кристаллом, обладающим свойством фотоупругости, приведен на рис. 30 [131]. На рис. 31, *а* показан график изменения оптической мощности, регистрируемой на выходе поляриметра. Данные, представленные на рис. 31, *б*, получены при испытаниях волоконно-оптической сенсорной системы, имеющей следующую структуру. Свет от излучателя направляется в волокно через градиентную стержневую линзу, служащую коллиматором, и проходит через поляризационный расщепитель пучка, четвертьволновую пластинку, активный двулучепреломляющий элемент и полуволновую пластинку. Последняя используется для поворота поляризации таким образом, чтобы второй поляризационный расщепитель пучка мог разделять $\pm \pi/4$ компоненты пучка. После этого разделения оба компонента инжектируются в выходной волоконный световод через градиентную стержневую линзу.

Примененное в данной конструкции оптическое волокно имеет диаметр сердцевины 200 мкм, числовую апертуру, равную 0,57. Его сердцевина и оболочка изготовлены из многокомпонентного стекла. Стержневые градиентные линзы имеют диаметр 1,5 мм

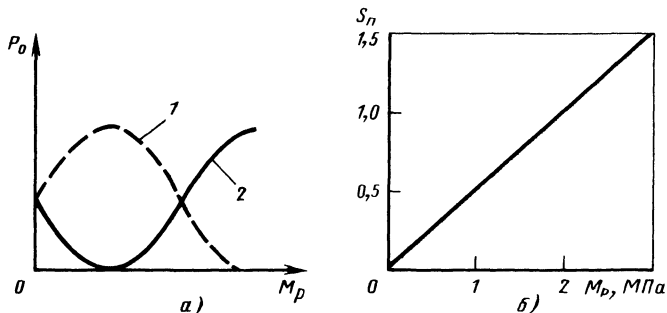


Рис. 31. Характеристика сенсорной системы с фотоупругим датчиком:

а—зависимость регистрируемой оптической мощности P_0 от приложенной нагрузки M_p ; *б*—зависимость отношения S_n «разность/сумма» сигналов на выходе от приложенной нагрузки; 1—положение анализатора $+\pi/4$; 2 — $-\pi/4$

и числовую апертуру 0,30. Для создания давления на пьезоупругий элемент применяется гидравлическое ручное устройство. В системе имеются два выходных канала. Первый из них служит для регистрации интенсивности света фотодиодом и визуального отсчета данных. Второй — для автоматической регистрации данных. При обработке полученных результатов измерений учитывались значения шумов в каждом из обоих каналов.

5. СИСТЕМЫ, СОЧЕТАЮЩИЕ В СЕБЕ СЕНСОРНЫЕ УСТРОЙСТВА И ПРОЦЕССОРЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ, ПОЛУЧАЕМЫХ ОТ СВЕТОВОДНЫХ ДАТЧИКОВ

Результаты измерений различных физических параметров световодными датчиками в ряде случаев могут быть использованы без дополнительной обработки (значения температуры, силы тока и др.), но в преобладающем большинстве случаев, особенно для дистанционного управления машинами и механизмами, автоматического регулирования технологических процессов, телеметрии, возникает необходимость обрабатывать данные, полученные от датчиков, средствами электронной вычислительной техники. В этом отношении оказывается очень важным и полезным следующее обстоятельство.

В сенсорных оптических устройствах широко применяют, как указывалось выше, различные интерферометрические системы, в частности, построенные из планарных световодов, микросоединителей и других элементов интегральных оптических схем. Вместе с тем в настоящее время решена проблема создания логических элементов «И—НЕ», «И—ИЛИ» и других, а также микроинверторов, сумматоров полностью из световодных компонентов по той же, в основном, технологии и на той же технологической базе, что и изготовление световодных датчиков и миниатюрных световодных сенсорных устройств. Таким образом, возникла возможность создания систем, в которых выходы датчиков можно соединять непосредственно, в одном и том же интегральном блоке с процессором, обрабатывающим получаемые результаты измерений и позволяющим вырабатывать сигналы управления, рассчитывать различные обобщенные показатели, обрабатывать данные на основе анализа показаний многих датчиков.

Интегральное устройство «оптический датчик — микропроцессор» может состоять из двух совместимых между собою блоков: сенсорной системы и микропроцессора. Современная техника изготовления интегральных схем позволяет размещать эти блоки на общей подложке, например из ниобата лития.

Допустим, что первым блоком интегрального устройства является система со световодными датчиками с фазовой модуляцией, содержащая микроинтерферометры, а вторым блоком — процессор, построенный на аналогичных микроинтерферометрах.

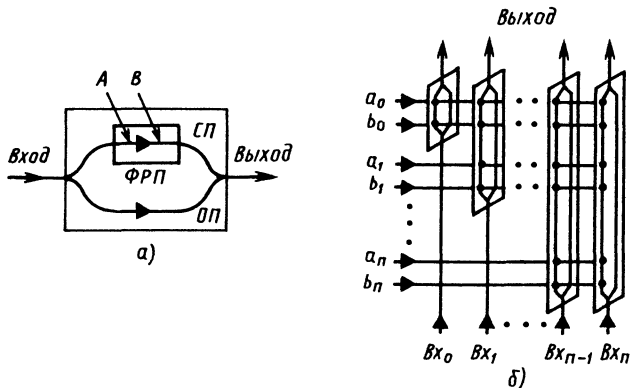


Рис. 32. Схема процессора на основе микроинтерферометров Маха—Зендера: *а*—единичный микроинтерферометр; *ОП*—опорное плечо интерферометра; *б*—схема оптического процессора на основе матрицы микроинтерферометров с дополнительными входами $a_0, b_0, a_1, b_1, \dots, a_n, b_n$ для ввода обрабатываемой информации, кодированной световыми сигналами Vx_0, Vx_1, \dots, Vx_n .

Их совместимость между собой (по токам, напряжениям, условиям эксплуатации) очевидна, а к настоящему времени конструкции интерферометрических микропроцессоров уже разработаны [61, 86]. В них используют несколько специфичные по своей конструкции интерферометры Маха—Зендера и другие интерферометры.

Основной принцип действия интерферометрических оптических процессоров заключается в следующем.

В интерферометре любой фактор, вызывающий дисбаланс оптических путей света, проходящего по сигнальному и опорному плечам, приводит к смещению фазы света. В сенсорных устройствах такой дисбаланс недопустим, если только он не вызван регистрируемым физическим возмущением. Однако при использовании интерферометра не в качестве элемента сенсорного устройства, дисбаланс, возникший в результате действия на плечи интерферометра оптических сигналов, несущих заданную, кодированную светом информацию, позволит на базе интерферометров или микроинтерферометров построить процессор.

Пример осуществления этого принципа применительно к созданию микропроцессора на базе интерферометров Маха—Зендера приведен на рис. 32. В микроинтерферометр Маха—Зендера (рис. 32, *а*) введены новые элементы: пластина из фоторефрактивного материала ФРП и два дополнительных входа *A* и *B* на основе соединителей [86]. Фоторефрактивным материалом может служить халькогенидное стекло, показатель преломления которого изменяется при действии на него света.

При подаче на входы *A* и *B* пучков света, несущих закодированную информацию, происходит их взаимодействие между

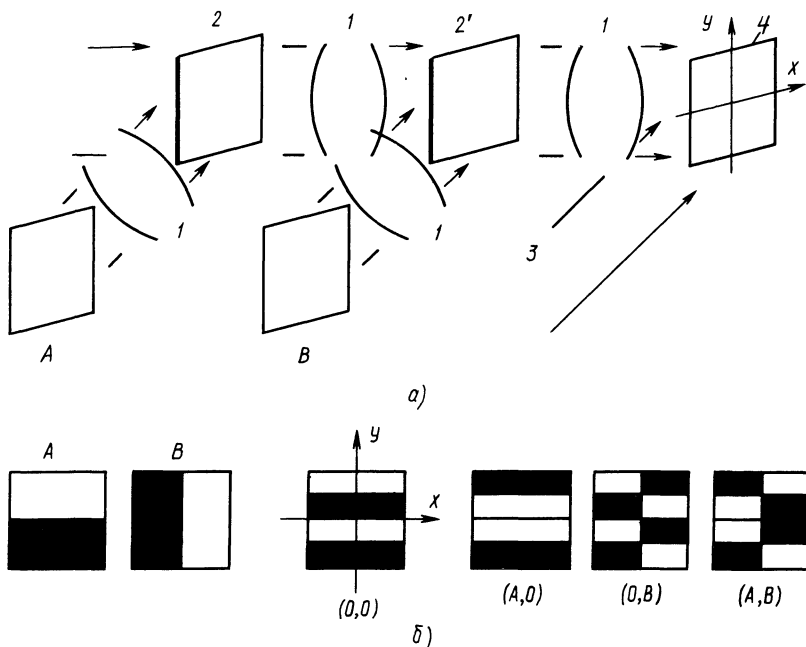


Рис. 33. Интерферометрический оптический процессор:

a—схема; 1—оптические формирующие устройства; 2, 2'—фоторефрактивные пластины; 3—опорный пучок; 4—выходной экран; *б*—типичные интерференционные картины, отображающие вводимую через входы *A* и *B* информацию, с расшифровкой ее численных значений

собой и с пучком, распространяющимся по сигнальному плечу *СП* прибора. В результате на выходе интерферометра регистрируется разность фаз, характеризующая результат операции, выполненной над поступившей через входы *A* и *B* информацией.

На рис. 33, *a* приведена схема оптического процессора более сложной конструкции, чем процессор, построенный по схеме, показанной на рис. 32, *б*. В этом более сложном процессоре на фоторефрактивную пластину 2 падают одновременно два пучка света: один пучок поступает из внешнего, не показанного на рисунке устройства оптической памяти, второй — формируется оптическим устройством 1 на основании световой картины, представляемой на экране у входа *A*. Если принять, что светлая полоса на экране соответствует, при двоичном коде счисления, единице, а темная полоса — нулю, то совокупность черных и светлых полос на поверхности фоторефрактивной пластины 2, спроецированных на вторую пластину 2' и падающий одновременно на пластину 2' световой пучок, поступающий в систему через вход *B*, позволяет сформировать на пластине 2' новую интерференционную картину, проецируемую на выходной экран 4 и характеризующую итог выполненных процессором операций.

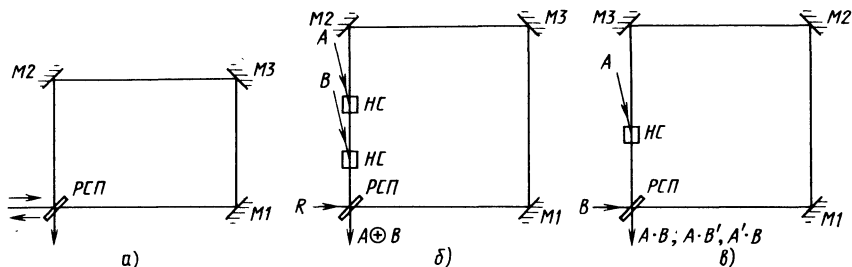


Рис. 34. Интерферометры Саньяка, применяемые в микропроцессорах:

а—базовая конфигурация интерферометра; *б*—интерферометр с двумя дополнительными входами; *в*—интерферометр с двумя входами, один из которых служит одновременно для ввода в прибор основного пучка света; *M1*—*M3*—зеркала; *PCП*—расщепитель светового пучка; *HC*—направленный соединитель световых пучков; *R*—вход опорного пучка

На рис. 33, *б* показаны некоторые виды интерференционных картин, получаемых на выходном экране процессора; их численная интерпретация при различных значениях входных сигналов приведена ниже

<i>A</i>	<i>B</i>	Темн.	Светл.
0	0	0	1
1	0	1	0
0	1	1	0
1	1	0	1
		XOR	$\overline{\text{XOR}}$

Другой пример оптического процессора, который может быть использован совместно с сенсорным устройством, построенным на основе фазовой, а также поляризационной модуляции,—процессор на интерферометрах Саньяка с распространяющимися в замкнутой петле навстречу друг другу двумя лучами, полученными при расщеплении светового пучка, генерируемого одним источником света. Существенным отличием применяемого в процессоре интерферометра является то, что он не перемещается в пространстве и не вращается, а располагается в неподвижном корпусе. Разность фаз между распространяющимися навстречу друг другу лучами в новом типе интерферометра Саньяка создается введением в его контур дополнительно одного или нескольких световых сигналов, которыми кодирована обрабатываемая информация.

На рис. 34, *а* показан интерферометр Саньяка классического типа, но ему придана форма прямоугольной рамки. На рис. 34, *б*

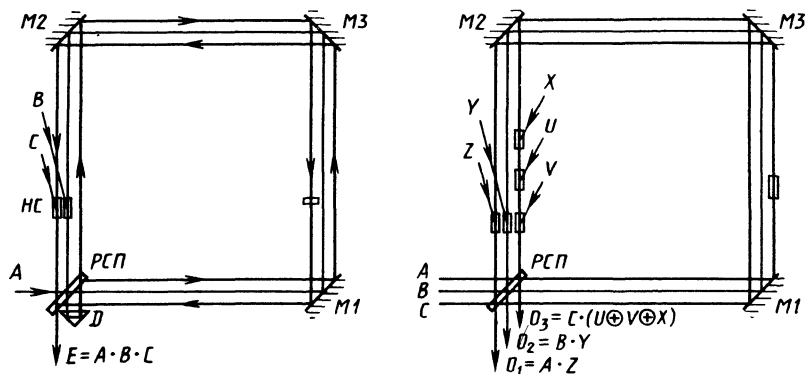


Рис. 35. Матрицы, состоящие из нескольких интерферометров Саньяка:

РСП—расщепитель светового пучка; *НС*—направленные соединители световых пучков; *М1*—*М3*—зеркала; *A, B, C, U, V, X, Y, Z*—входы; *D*—призмный отражатель; *E, O₁—O₃*—результаты логических операций

приведен тот же интерферометр, но с двумя дополнительными входами: *A* и *B*; на рис. 34, *в* — интерферометр Саньяка с двумя входами, через один из которых (вход *B*) в контур прибора вводится исходный луч света. Ниже приведена таблица, показывающая, какие операции могут быть выполнены процессором, построенным на основе интерферометра Саньяка с двумя входами.

Вход	Выход															
$A B$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0 0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1
0 1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0
1 0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0
1 1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0
	0	1	A	B	A'	B'	$A + B$	$(A + B)'$	$A \times B$	$A \times B'$	$A \times B$	$A + B$	$A + B'$	$A' + B$	$(A + B)'$	$(A + B) \times B'$

Вместе с тем, число входов в контур интерферометра Саньяка можно увеличить, а несколько таких интерферометров соединить параллельно, как показано на рис. 35 [61]. Это позволит существенно повысить сложность операций, выполняемых процессором такого типа, а также выполнять операции не последовательно, а параллельно.

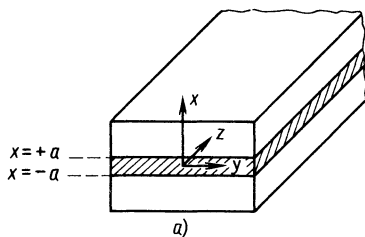
1. ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛНОВОДЫ

Виды оптических волноводов и распространение по ним света.

В датчиках и сенсорных устройствах оптические волноводы используются в качестве элементов, непосредственно реагирующих на внешние физические возмущения, а также служат пассивными, передающими свет компонентами. Независимо от роли, которую играет оптический волновод в датчике или сенсорном устройстве, он всегда служит каналом, по которому распространяются пучки света, модулируемые действием регистрируемых физических возмущений и несущие информацию.

Различают два вида оптических волноводов, применяемых в световодной технике, в том числе в датчиках и сенсорных системах: планарные световоды и оптические волокна.

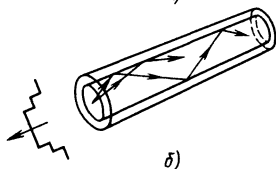
Планарный световод в простейшем случае представляет собой полосу прямоугольного сечения толщиной $2a$ (так называемая сердцевина световода) из прозрачного материала, имеющего для применяемого в датчике или в сенсорном устройстве излучения с длиной волны λ показатель преломления n_1 . Эта полоска окружена также прозрачным веществом с показателем преломления n_2 , причем $n_1 - n_2 > 0$ (рис. 36, а). Слой вещества, окружающий сердцевину, именуется оболочкой световода. Роль



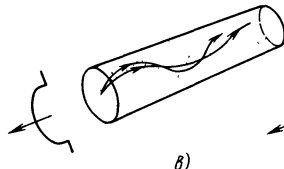
а)

Рис. 36. Схемы оптических волноводов и графики изменения профиля их показателя преломления:

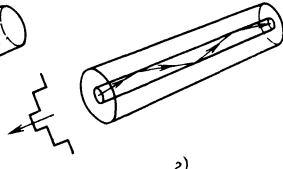
а—планарного; б—многомодового ступенчатого волоконного световода; в—многомодового градиентного волоконного световода; г—одномодового ступенчатого волоконного световода



б)



в)



г)

оболочки планарного световода может играть не только твердое вещество, но и жидкая среда, газ или даже вакуум. Соотношение значений показателя преломления ($n_1 > n_2$) позволяет лучу света, проникшему извне в сердцевину планарного световода, при определенных условиях распространяться вдоль продольной оси световода, многократно испытывая полное внутреннее отражение на границе между его сердцевиной и оболочкой.

Траектория луча в сердцевине планарного световода будет зигзагообразной и состоящей из прямолинейных отрезков, если значение n_1 одинаково во всех точках внутри сердцевины и лишь на границе сердцевины и оболочки показатель преломления скачком уменьшается до значения n_2 . Световод с таким характером изменения показателя преломления именуется ступенчатым (рис. 36, б).

На практике планарные световоды большей частью представляют собой полоски прямоугольного сечения (сердцевины), окруженные с боков и снизу слоями твердого диэлектрика. Верхней частью оболочки может служить воздух с показателем преломления, принимаемым равным 1, или же слой наружного покрытия, защищающий сердцевину световода от механических повреждений, загрязнений и от действия влаги или иной, в ряде случаев агрессивной, внешней среды.

Доказано [129], что по одному световоду одновременно может распространяться только определенный дискретный набор электромагнитных волн, каждая из которых является собственной волной, или *модой*. В волновом фронте каждой моды колебания распространяются с общей фазой. Волны в сердцевине, соответствующие лучам, траектории которых образуют малые углы с осью световода, называются *модами низших порядков*, а лучи, траектории которых образуют большие углы с осью световода, — *модами высших порядков*. В зависимости от размера угла, под которым лучи проникают в световод, их можно упрощенно подразделить на лучи, распространяющиеся лишь по сердцевине (*направляемые моды*), лучи, проникающие из сердцевины в оболочку световода и, по крайней мере, на некоторое расстояние распространяющиеся в ней (*моды оболочки*), и лучи, выходящие через оболочку из световода наружу (*вытекающие моды*). Моды оболочки могут стать вытекающими и выйти из оболочки наружу, но в некоторых случаях, например в изогнутом световоде, в той части, где в материале световода возникают механические напряжения растяжения, могут преобразовываться в направляемые моды.

Число N направляемых мод в световоде всегда конечно. Если известны длина волны λ применяемого излучения, толщина a (в случае волоконного световода, имеющего круглое сечение, — радиус a) поперечного сечения сердцевины и разность значений показателей преломления сердцевины и оболочки, чис-

ло N может быть рассчитано по формуле, справедливой для ступенчатых световодов [16]:

$$N = \frac{2\pi^2 a^2}{\lambda^2} (n_1^2 - n_2^2).$$

Световоды, по которым может распространяться не одна, а большее число мод, называют *многомодовыми*. Диаметр их сердцевины относительно велик. Например, в волоконных световодах круглого сечения, наиболее широко применяемых в системах оптической связи, он обычно составляет 25...200 мкм, а иногда (например, в оптических волокнах, изготавливаемых из полимеров) даже превышают 500 мкм. По многомодовым световодам с сердцевинной такого большого диаметра могут распространяться при $0,8 < \lambda < 1,6$ мкм (диапазон длин волн, наиболее часто применяемых в световодной технике) сотни и тысячи мод. Для многомодовых оптических волноводов значение

$$\Delta = (n_1 - n_2)/n_2 \approx (n_1 - n_2)/n_1,$$

как правило, лежит в пределах 0,01...0,03.

Световоды, для которых $N=1$, называют *одномодовыми*. По одномодовому световоду может распространяться только одна мода, называемая *фундаментальной*, или же две разновидности фундаментальной моды, различающиеся состоянием поляризации света. Диаметр сердцевины одномодового световода круглого сечения (а для планарного световода прямоугольного сечения его толщина) должен составлять 3...10 мкм при $0,003 < \Delta < 0,01$ мкм и $0,8 < \lambda < 1,6$ мкм.

Планарные световоды в настоящее время получают наибольшее применение в малогабаритных устройствах интегральной оптики, разрабатываемых в основном для систем световодной связи. В датчиках и сенсорных устройствах этот вид световодов пока используют сравнительно редко, и несмотря на то, что в литературе уже появились сообщения и описаны первые результаты, полученные для сенсорных систем с планарными световодами, о большом практическом значении таких систем говорить еще рано. Поэтому основное внимание в нашей книге уделяется второму из указанных в начале настоящего параграфа типу световодов — волоконным световодам, а также датчикам и сенсорным устройствам, в которых применяются волоконные световоды круглого сечения следующих видов:

многомодовые волоконные световоды со ступенчатым изменением показателя преломления по поперечному сечению световода;

одномодовые волоконные световоды со ступенчатым изменением показателя преломления по поперечному сечению световода;

волоконные световоды с сердечником, в котором значение показателя преломления имеет наибольшее значение на оси волок-

на и постепенно уменьшается по радиусу волокна до некоторого значения n_2 (показателя преломления материала оболочки световода). Такого вида волокно называют *многомодовым градиентным*.

Некоторое промежуточное место между указанными выше одномодовыми и многомодовыми ступенчатыми волоконными световодами занимают маломодовые световоды, о которых следует упомянуть в связи с их применением в определенных типах датчиков.

Если характеристики параметров волоконного световода и значение длины волны λ таковы, что по световоду может распространяться несколько (например, 3, 6, 10) мод, то число этих мод ограничивается так называемой отсечкой по длине волны. Суть ее заключается в следующем. Фундаментальная мода распространяется в маломодовом световоде всегда, а прохождение мод последующих порядков запрещается, если длина волны излучения превышает некоторое критическое значение — длину волны отсечки $\lambda_{\text{отс}}$, определяемую значениями показателя преломления материалов сердцевины и оболочки волокна и радиусом сечения сердцевины. В теории оптических волноводов [16] выводится соотношение, определяющее, каким должен быть наибольший радиус сечения одномодового ступенчатого волоконного световода:

$$\frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} < 2,405.$$

Расчет по этой формуле показывает, например, что наибольший радиус сечения одномодового световода составит около 3,5 мкм, если $n_1 = 1,46$, $\Delta = 2 \cdot 10^{-3}$ и $\lambda = 0,85$ мкм, и не выше 5,35 мкм, если $\lambda = 1,35$ мкм.

Значение $\lambda_{\text{отс}}$ для световода, радиус сечения которого несколько превышает значение указанного выше наибольшего радиуса сечения одномодового световода для соответствующей длины волны λ , не инвариантно, а зависит от воздействия на световод ряда внешних факторов, например прикладываемых к световоду механических нагрузок [96]. В работе [96] значение длины волны отсечки определялось на образцах волоконных световодов путем регистрации мощности прошедшего по волокну излучения с различной длиной волны. При изгибе световода с увеличением кривизны R^{-1} в месте изгиба наблюдалось значительное смещение длины волны отсечки в сторону коротких волн. Экспериментально установленная зависимость $\lambda_{\text{отс}} = f(R^{-1})$ хорошо описывается эмпирической формулой.

$$\lambda_{\text{отс}} = {}^\infty\lambda_{\text{отс}} + AR^{-1} + B(R^{-1})^2,$$

где ${}^\infty\lambda_{\text{отс}}$ — длина волны отсечки для идеально прямолинейного волоконного световода; A и B — коэффициенты, определяемые из опытов.

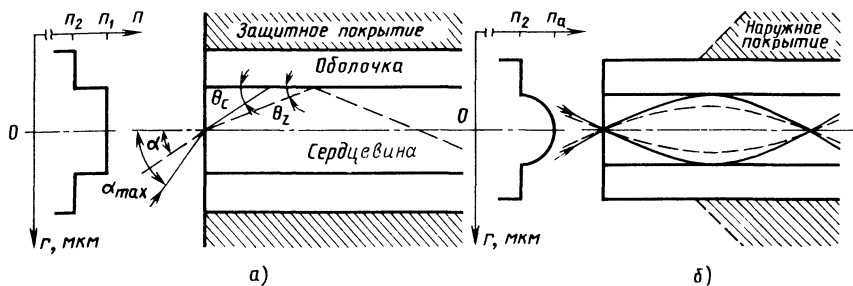


Рис. 37. Распространение меридиональных лучей по световоду:
а—ступенчатому; б—градиентному

Практическое значение регистрации зависимости длины волны отсечки от кривизны изгиба световода состоит в возможности по значению $\lambda_{отс}$ определять, например, значения деформации волоконных световодов, вызванных действием изгибающих напряжений. С другой стороны, с помощью датчика, выдающего информацию об изменениях длины волны отсечки в образце маломодового волокна, могут быть проверены: соответствие значения показателя преломления сердцевин изгибаемого волоконного световода заданным техническим условиям; геометрические размеры сердцевин и оболочки волокна; искривления одномодового и маломодового волоконных световодов, возникающие в процессе нанесения на световодные жилы защитных наружных покрытий при сборке волоконных световодов в многожильный кабель.

Рассматривая ход лучей, падающих извне на торец ступенчатого волоконного световода, и лучей, проникших в сердцевину волокна и далее распространяющихся по световоду, можно отметить следующее (рис. 37). Каждому значению угла θ_z (рис. 37, а) между распространяющимся в сердцевине лучом и поверхностью раздела сердцевина — оболочка (для упрощения рассматриваются лучи, распространяющиеся в меридиональной плоскости продольного сечения ступенчатого световода) соответствует свое значение угла падения α на входной торец световода. Лучи, распространяющиеся в сердцевине под углами $0 < \theta_z \leq \theta_c$, где θ_c — угол, соответствующий полному внутреннему отражению на границе между сердцевиной и оболочкой, будут многократно отражаться у этой границы, каждый раз возвращаясь в глубь сердцевин, а их траектории получатся зигзагообразными, как указывалось выше.

Наибольший угол α_{\max} между лучом, падающим на торец световода, и осью волокна, при котором $\theta_z = \theta_c$, называется *углом входа световода* и часто, как принято для обычной линзовой оптики, характеризуется значением *числовой апертуры* $NA = n_0 \sin \alpha_{\max}$ (n_0 — показатель преломления среды, из которой

падает луч). Если снаружи торца световода окружен воздухом, то $n_0=1$ и $NA=\sin\alpha_{\max}$. Для ступенчатого волоконного световода числовая апертура $NA=\sqrt{n_1^2-n_2^2}$. В зависимости от значений диаметра сечения волокна и показателя преломления его сердцевин и оболочки числовая апертура применяемых в датчиках и сенсорных устройствах световодов обычно равна 0,18...0,23 и лишь для световодов отдельных марок, имеющих диаметр сечения порядка сотен микрометров, достигает 0,4...0,6.

Как указывалось выше, в градиентных световодах значение показателя преломления материала сердцевин постепенно убывает вдоль радиуса r поперечного сечения волокна, изменяясь от n_a до значения показателя преломления оболочки, т. е. до n_2 . В наиболее широко используемых типах градиентных волокон это изменение показателя преломления сердцевин подчиняется закону, очень близкому к параболическому:

$$n^2(r)=n_a^2\{1-2\Delta(r/a)^2\},$$

где $\Delta\approx 1-n_2/n_a$, a — радиус сердцевин, причем $|r|\leq a$.

На рис. 37, б показаны типичные траектории лучей, распространяющихся в меридиональной плоскости градиентного волоконного световода.

Значение числовой апертуры NA градиентного световода рассчитывают по иной формуле, чем ступенчатого. Причина заключается в том, что числовая апертура ступенчатого волоконного световода не зависит от того, в какой точке входного торца сердцевин находится вершина конуса лучей, вводимых в волокно (рис. 38, а). Для градиентного световода входной угол имеет наибольшее значение, если эта вершина конуса лежит на оси сердцевин волокна (рис. 38, б). Значение числовой апертуры градиентного волоконного световода обычно рассчитывают по максимальному значению входного угла α_{\max} :

$$NA=\sin\alpha_{\max}=\sqrt{n_a^2-n_2^2}.$$

Потери (затухание) мощности излучения, распространяющегося по волоконным световодам. При прохождении света через обычное, например оконное, стекло наблюдается понижение мощности излучения, если свет пройдет в этой среде расстояние, равное лишь 5...6 см. Причиной столь больших оптических потерь

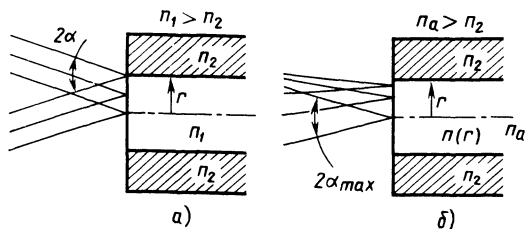
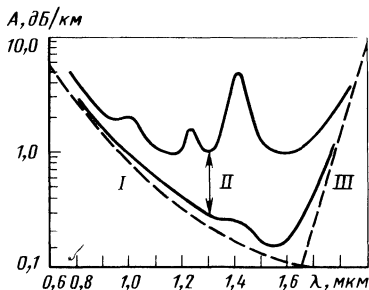


Рис. 38. Изменение входного угла 2α в зависимости от местонахождения вершины конуса лучей, входящих в сердцевину оптического волокна: а — ступенчатого; б — градиентного

Рис. 39. Оптические потери в волоконных световодах, изготавливаемых зарубежными фирмами:

I—потери на рэлеевское рассеяние; *II*—область значений потерь при различных λ для световодов типа «кварц—кварц» различных марок; *III*—граница ИК-поглощения



является, главным образом, загрязненность стекла некоторыми рассеивающими и поглощающими свет примесями. Путем очистки стекла от ряда примесей в процессе его изготовления, совершенствования технологического процесса, а также изменения основного состава стекла значение оптических потерь в нем может быть понижено во много раз. Например, в тщательно очищенном стекле из двуоксида кремния, применяемом в настоящее время в световодной технике, мощность излучения, распространяющегося на расстояние 10 км, может уменьшиться только в 2 раза.

Основные причины потерь мощности излучения при прохождении его по волоконному световоду следующие (рис. 39):

рассеяние света на субмикроскопически малых, значительно меньших по своим размерам, чем длина волны применяемого излучения, оптических неоднородностях материала световода; такие потери именуется рэлеевскими, а их значение пропорционально λ^{-4} , т. е. соответствует закономерности, известной из оптики как закон Рэлея; поглощение и рассеяние света содержащимися в материале световода ионами некоторых примесей (примесные потери);

нежелательные изменения модовой структуры распространяющегося по световоду излучения, например преобразование направляемых мод в моды оболочки и вытекающие моды и рассеяние света в материале световода вследствие изгибов, микроизгибов, различных макро- и микродефектов в световоде, в том числе микроскопически малых неоднородностей, газовых пузырьков.

В стеклянных волоконных световодах некоторый, сравнительно небольшой вклад в общие потери вносят рассеяние, обусловленное вариациями состава стекла, и поглощение света при взаимодействии фотонов с электронами или с колебательными состояниями основных компонентов материала в сердцевине световода. В кварцевом стекле это поглощение существенно возрастает, если длина волны применяемого излучения превышает приблизительно 1,7 мкм, а также лежит в УФ-области спектра [79].

Общее значение оптических потерь в световодах обычно измеряется в децибеллах на километр (дБ/км). Лучшие одномодовые волоконные световоды, изготавливаемые в настоящее время из кварцевого стекла, имеют потери около 0,2 дБ/км.

О способности волоконных световодов сохранять состояние поляризации проходящего по ним света. Во многих случаях к волоконным световодам, применяемым в датчиках и сенсорных устройствах, предъявляют специфические требования, например, такие, как очень низкая способность сохранять состояние поляризации распространяющегося по волокну излучения, или наоборот, высокая чувствительность к изменению температуры, высокая чувствительность к упругой деформации. В частности, для волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) в настоящее время особенно широко применяют одномодовое волокно с устойчивой поляризацией, позволяющее сохранять состояние поляризации света, распространяющегося по световоду на большие расстояния.

По одномодовому волокну круглого сечения с осесимметричным распределением показателя преломления сердцевины, как известно, в направлении оси z распространяются две, различающиеся состоянием поляризации, разновидности фундаментальной моды HE_{11} — именуемые модами HE_{11}^x и HE_{11}^y , электрические поля которых ортогонально поляризованы вдоль осей x и y . Такое волокно не может сохранять стабильным направление поляризации мод на более или менее значительном пути их распространения в волокне. Если считать рабочей модой HE_{11}^x , то на нерегулярностях структуры волокна (естественных и возникших в результате влияния внешних физических возмущений) по мере распространения в нем, эта мода преобразуется в ортогонально поляризованную (паразитную) модой HE_{11}^y , так как эти моды вырождены, т. е. их фазовые постоянные одинаковы.

Даже весьма малые возмущения вдоль световода легко связывают моды. Экспериментально установлено, что линейно поляризованное излучение, введенное в оптическое волокно круглого сечения, становится эллиптически поляризованным при распространении света уже на относительно малые расстояния. Состояние поляризации излучения, распространяющегося в волокне, всегда в той или иной мере чувствительно к изменениям температуры окружающей среды, длины волны света и очень чувствительно к механическим напряжениям, возникающим в материале волокна, независимо от причин, их вызывающих.

Повысить поляризационную стойкость оптического волокна можно различными путями. Одним из таких методов является придание поперечному сечению волоконных световодов эллиптической или прямоугольной формы, другим методом — создание в световоде осесимметричного распределения показателя преломления с помощью неравномерно распределенных по сечению

волоконна механических напряжений, вызывающих упругие деформации. В таких световодах устраняется вырождение ортогонально поляризованных мод, и обе ортогональные составляющие фундаментальной моды будут иметь различные фазовые постоянные распространения. Это уменьшит связь по мощности между ортогонально поляризованными составляющими фундаментальной моды и снизит возможность преобразования мод в волокне. Для создания неравномерно действующих в материале сердцевин упругих деформаций, можно вводить в конструкцию световода конструктивные элементы с коэффициентом теплового расширения, отличающимся по значению от коэффициента теплового расширения, материала волокна, индуцируя таким образом в волокне двойное лучепреломление. Известны также поляризационно-устойчивые крученые одномодовые волокна, трехслойные одномодовые световоды с эффективной фильтрацией моды с паразитной поляризацией HE_{11} и другие.

Волоконные световоды с сердцевинной из кварцевого или из многокомпонентного силикатного стекла, применяемые в датчиках и сенсорных устройствах. Многомодовые ступенчатые волоконные световоды с сердцевинной из кварцевого стекла, содержащего присадки некоторых примесей, повышающих показатель преломления, и оболочкой из кварцевого стекла с понижающими показатель преломления присадками (световоды типа «кварц—кварц»), а также волокна с сердечником из кварцевого стекла и оболочкой из полимера (световоды типа «кварц—полимер») применяют в устройствах, в которых используется излучение в диапазоне от 0,5—0,6 до $\sim 1,6$ мкм. Этот спектральный диапазон следует подразделить на четыре области значений λ :

область видимого света с длинами волн до 0,7 мкм;

область длин волн, близких к 0,83 мкм;

излучение с длиной волны около 1,3 мкм;

излучение с длиной волны около 1,55 мкм.

В области видимого света оптические потери в кварцевом стекле относительно велики (см. рис. 39), и волоконные световоды при длинах волн, меньших 0,7 мкм, целесообразно использовать лишь для передачи света на короткие расстояния, не превышающие, например, нескольких метров. Качество таких световодов может быть не очень высоким, если их применять для изготовления эндоскопов или для подсветки шкал некоторых приборов, как это практиковалось несколько лет тому назад. Однако недавно перед световодами, передающими видимый свет, открылись новые широкие возможности применения, особенно в связи с развитием робототехники.

В роботах нашли применение короткие волоконно-оптические линии в органах технического зрения и в системах управления руками, устройствами захвата различных объектов, устройствами управления перемещением и др. [126]. Волоконно-оптические

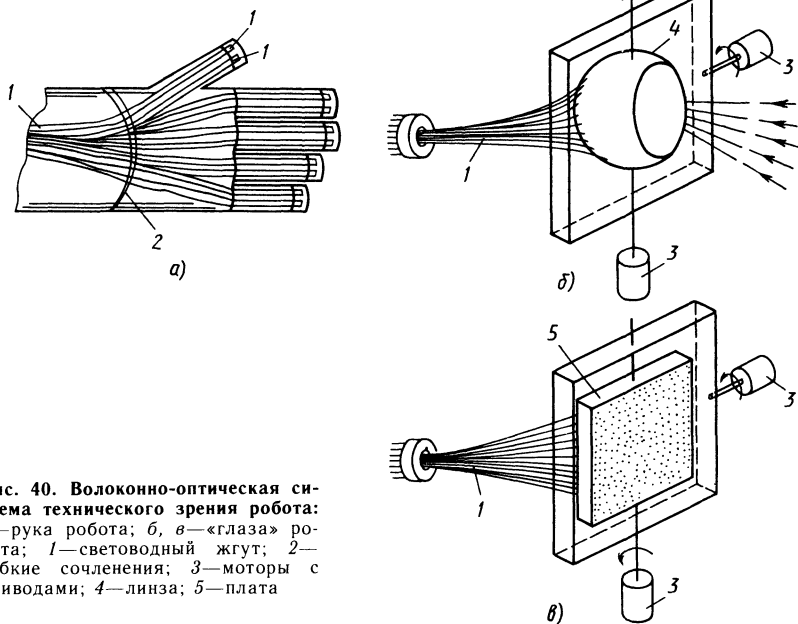


Рис. 40. Волоконно-оптическая система технического зрения робота: а—рука робота; б, в—«глаза» робота; 1—световодный жгут; 2—гибкие сочленения; 3—моторы с приводами; 4—линза; 5—плата

органы технического зрения робота могут быть размещены в различных участках корпуса, «конечностей» и «головы» робота в зависимости от того, для выполнения каких функций он предназначен. На рис. 40 приведены некоторые простейшие схемы волоконно-оптических органов зрения робота: рука робота (рис. 40, а), сконструированного в 1984 г. фирмой «Сумитомо» (Sumitomo Electric Ind., Япония), и два типа конструкций «глаза» — с шаровой линзой (рис. 40, б) и с сетчаткой в виде платы, на поверхность которой выведены принимающие извне свет торцы световодных волокон (рис. 40, в). В этих конструкциях каждый «глаз» содержит по 100 тыс. оптических волокон с сердцевинами диаметром 7 мкм из кварцевого стекла. Входные торцы волокон чувствуют освещенность отдельных точек наблюдаемой роботом картины, а выходные торцы присоединяются к находящемуся в корпусе робота микропроцессору, обрабатывающему получаемые от органов зрения данные и формирующему необходимые сигналы управления.

Самый ранний период развития световодной техники—1960—1970 гг., когда начали получать широкое применение волоконно-оптические медицинские эндоскопы, а затем и оптроны. Основными материалами, из которых изготовлялись тогда источники света для оптронов, были арсенид и фосфид галлия. В то время была разработана и широко освоена промышлен-

ностью технология производства лазерных диодов и светоизлучающих диодов на основе арсенида и фосфида галлия с длиной волны генерируемого ими света, лежащей в области 0,8...0,9 мкм. Поэтому исторически сложилось положение, при котором к моменту создания оптических волноводов с относительно низкими потерями лучшими источниками света для систем световодной связи и различных световодных устройств явились приборы, генерирующие излучение с длиной волны 0,82...0,85 мкм. Позднее были созданы полупроводниковые приборы, генерирующие свет с длинами волн 1,3 и 1,55 мкм, соответствующими положению минимумов на кривой зависимости потерь в кварце от длины волны излучения (см. рис. 39).

В настоящее время в световодной технике происходит постепенный переход от использования длин волн 0,83...0,85 мкм к технически и экономически более выгодным длинам волн 1,3 и 1,55 мкм.

Световоды из полимеров. Волоконные световоды типа «полимер—полимер», изготовлявшиеся до 1980 г. для медицинских эндоскопов и некоторых видов оптронов, имели оптические потери, превышавшие 700 дБ/км. Для использования в световодных линиях связи они, конечно, были не пригодными. Однако многие исследователи продолжали работать над решением проблемы повышения прозрачности таких веществ, как полиметилметакрилат и другие, имея в виду получение коротких полимерных световодов, предназначенных не только, например, для систем освещения шкал приборов, дистанционного включения и выключения радиоприемника, магнитофона, проигрывателя, кондиционера в новых типах автомашин, изготовляемых в Японии, но и для производства дешевых стержневых градиентных линз.

В 1980—1981 гг. удалось разработать технологические процессы тщательной очистки исходных компонентов, необходимых для получения полимерных волоконных световодов с оптическими потерями, сниженными до значений 200...300 дБ/км. Одновременно было установлено [90], что потери в световодах с сердцевинной из обычного полиметилметакрилата в ИК и близкой к ИК области видимого света вызываются главным образом поглощением света колеблющимися С—Н-группами и что дальнейшее уменьшение этих потерь возможно лишь путем предотвращения образования С—Н-групп в структуре полимера. Замена части протонов дейтронами в полимере привела к созданию так называемого дейтерированного полиметилметакрилата *d8* с потерями 20 дБ/км на длине волны излучения $\lambda = 0,65...0,68$ мкм и 25...50 дБ/км на длинах волн 0,78 и 0,85 мкм [90]. Для тех же длин волн волоконные световоды с сердцевинами из полиметилметакрилата, содержащего не дейтерий, а протоны, обладают значительно более высокими оптическими потерями (свыше 128 дБ/км при $\lambda = 0,65$ мкм и свыше 500 дБ/км при $\lambda = 0,78$

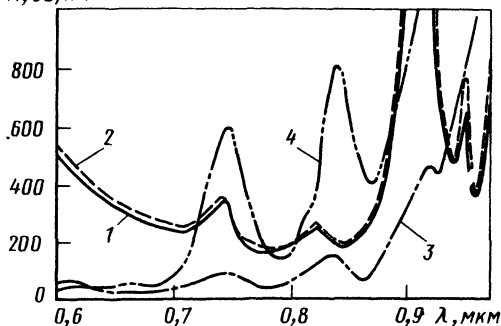


Рис. 41. Зависимость потерь A в волоконных световодах, изготовленных из различного вида полимеров, от длины волны излучения и адсорбции полимерами влаги: 1 — пентафтор—тридегтеростирен (P—5F3DSt) до адсорбции воды; 2—то же, после адсорбции воды; 3—дейтерированный полиметилметакрилат (P(MMA—d8) до адсорбции воды; 4—то же, после адсорбции воды

и 0,85 мкм). Таким образом, дейтерированный полиметилметакрилат некоторое время считался весьма перспективным материалом для изготовления сердцевины волокон типа «полимер—полимер». Однако вскоре было установлено [89], что этот материал легко адсорбирует влагу, и при повышении влажности окружающей среды до 85—90 % оптические потери в световодном волокне возрастают почти на 300 дБ/км.

Дальнейшие исследования показали [89], что одним из эффективных методов получения влагоустойчивого полимера типа полиметилметакрилата является его фторирование, приводящее к снижению потерь на поглощение света колеблющимися группами молекул. К сожалению, в результате фторирования существенно уменьшалось значение показателя преломления полимера, и тогда возникали трудности с подбором полимера для оболочки световода. В итоге были предложены волоконные световоды с сердцевинной из пентафтор-тридегтеростирена, изготовляемого по технологии, близкой к технологии получения дейтерированного полиметилметакрилата. Оболочка этих световодов состоит из сополимера фторалкил-метакрилата. На рис. 41 показаны кривые спектральной зависимости потерь в полиметилметакрилате и в пентафтор—тридегтеростирене.

Важными достоинствами полимерных световодов являются их высокая стойкость против действия ионизирующих излучений, например гамма-лучей, сравнительно низкие оптические потери при изгибах. Полимерное волокно с диаметром сечения сердцевины 200 мкм и более, с высокой числовой апертурой, значение которой достигает 0,4...0,5 и более, легко стыкуется с источниками света и фотоприемниками, используемыми в световодной технике. Наличие у полимерных волокон «окон» повышенной прозрачности в видимой части спектра позволяет, с одной стороны, применять полимерные световоды для передачи визуально наблюдаемых изображений, а с другой — значительно упрощает технологию получения неразъемных и разъемных соединений, в особенности когда применяются полимерные волокна срав-

нительно большого диаметра с сечением сердцевины, составляющим десятые доли миллиметра.

Дисперсия импульсов света, распространяющихся по волоконным световодам. При прохождении импульса света по оптическому волноводу изменяется не только его амплитуда (вследствие потерь мощности излучения), но и форма (рис. 42, а), т. е. импульс уширяется. Это явление называется *дисперсией импульсов*. Дисперсия и связанная с ней ширина полосы пропускания B являются очень важными волноводными характеристиками волоконных световодов. Полоса пропускания оптического волновода приблизительно определяется минимальной длительностью светового гауссовского импульса, амплитуда которого при распространении по волокну уменьшается в 2 раза (рис. 42, б). Это соответствует понижению уровня оптической мощности сигнала на 3 дБ или понижению мощности электрического сигнала на выходе фотодетектора, регистрирующего излучения, на 6 дБ, так как ток i , получаемый при преобразовании света фотодетектором, пропорционален мощности излучения, а электрическая мощность пропорциональна i^2 . Полоса пропускания B волоконного световода ограничивается некоторым значением частоты ν_B благодаря возникновению в волокне дисперсии импульсов. Существует несколько механизмов дисперсии импульсов света, рас-

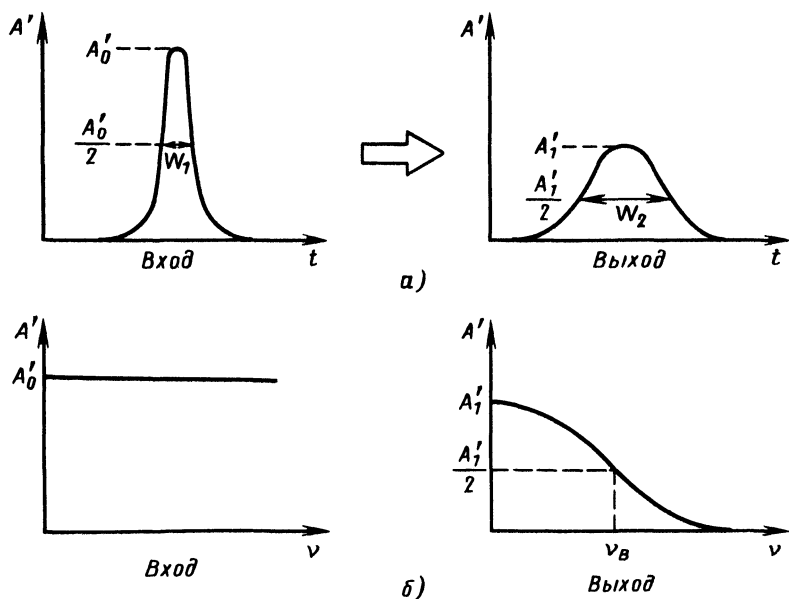
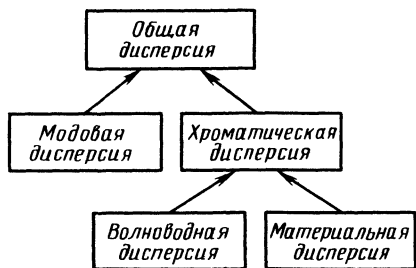


Рис. 42. Влияние волоконного световода на проходящий по нему оптический сигнал: а—изменение амплитуды и ширины гауссовского импульса; б—изменение амплитудно-частотной характеристики сигнала



кой, причем хроматическая дисперсия, в свою очередь, обусловлена дисперсией материальной и волноводной (рис. 43).

Общая дисперсия может быть выражена для световодов, рассматриваемых как гауссовские фильтры, через величину v_B , соответствующую верхней границе полосы B пропускания, соотношением $\Delta t_v = 0,44/v_B$. В случае, если среда, в которой передается оптический импульс, не является гауссовским фильтром, для перехода от временной к частотной характеристике полосы пропускания следует применить преобразование Фурье.

Сущность явления модовой дисперсии ($\Delta t_{\text{мод}}$) заключается в следующем. Как было сказано выше, в многомодовом волоконном ступенчатом световоде одновременно распространяется большое число мод. Каждая мода имеет свое значение постоянной распространения, и время прохождения различных мод до выходного конца световода неодинаково. Моды, в своей совокупности образующие оптический сигнал, появляются на выходе световода неодновременно. В результате возникает уширение импульса. Значение этого уширения для ступенчатого волоконного световода можно рассчитать [129].

Луч, падающий извне на входной торец световода под углом $\alpha \leq \alpha_{\text{max}}$, распространяется далее по сердцевине световода

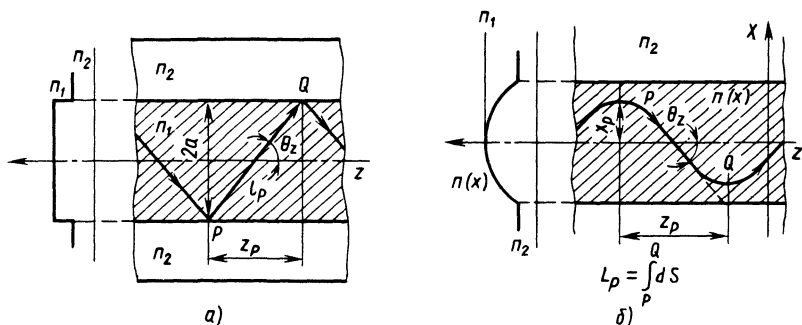


Рис. 44. Участки траекторий меридиональных лучей, распространяющихся по волоконным световодам:

а — ступенчатому; б — градиентному

под углом θ_z к его оси, причем $0 \leq \theta_z \leq \theta_c$ (рис. 44, а). Зигзагообразная траектория луча представляет собой совокупность прямолинейных отрезков, каждый из которых имеет длину $PQ = L_p$. Проекция PQ на ось z световода — полупериод, значение которого $z_p = L_p \cos \theta_z$. Число N полупериодов z_p вдоль пути распространения луча на расстояние Z равно Z/z_p . Обозначая через $v_g = c/n_1$ скорость распространения излучения по сердцевине световода, имеющего показатель преломления n_1 , можно определить время t_z распространения в волокне излучения на расстояние z :

$$L_p = 2a/\sin \theta_z, \quad t_z = \frac{Z}{z_p} \frac{L_p}{v_g} = \frac{Z}{c} \frac{n_1}{\cos \theta_z}.$$

Уширение импульса за счет модовой дисперсии $\Delta t_{\text{мод}} = t_{\text{макс}} - t_{\text{мин}}$, где $t_{\text{мин}}$ — время распространения по световоду основной (фундаментальной) моды; $t_{\text{макс}}$ — время распространения по световоду моды, соответствующей лучу, для которого $\theta_z = \theta_c$; $t_{\text{мин}} = (Z/c)n_1$, $t_{\text{макс}} = (Z/c)(n_1^2/n_2)$, $\Delta t_{\text{мод}} = t_{\text{макс}} - t_{\text{мин}} = (Z/c)n_1\Delta$. Так как значение $\Delta \ll 1$, можно это уширение импульса, возникшее за время t_z , рассчитать, пользуясь приближенным выражением [129]

$$\Delta t_{\text{мод}} \approx Zn_1\theta_c^2/(2c).$$

В градиентном волоконном световоде с почти параболической зависимостью изменения показателя преломления по поперечному сечению сердечника дело с модовой дисперсией обстоит совершенно иначе, чем в ступенчатом волоконном световоде (рис. 44, б). Градиентный характер изменения профиля показателя преломления приводит к тому, что скорость распространения луча по сердцевине зависит от того, на каком расстоянии от оси световода располагается тот или иной участок пути луча Z . На расстояниях, более близких к оси сердцевины, значение показателя преломления n_1 несколько выше, чем на более удаленных. Поэтому происходит выравнивание значений времени, затрачиваемого проходящими по световоду модами с траекториями, располагающимися на различных расстояниях от оси сердцевины. Однако о том, чтобы в реальных градиентных световодах значение $\Delta t_{\text{мод}}$ было бы исчезающе малым, говорить все же нельзя в силу многих причин, и в первую очередь вследствие неоднородности структуры и состава материала световода, всегда искажающих, хотя и в небольшой степени, модовые траектории. Модовая дисперсия в градиентных световодах, небольшая по своему значению, всегда имеется.

Хроматическая дисперсия ($\Delta t_{\text{хром}}$) импульсов возникает вследствие немонохроматичности излучения, вводимого в волоконный световод. Спектр излучения любого источника света, применяемого в оптических системах связи, световодных сенсорных устройствах, всегда имеет конечную ширину. Ширина спектра излуче-

ния, генерируемого лучшими одномодовыми лазерными диодами, может составлять около 1 нм, многомодовыми лазерными диодами — 2...3 нм, лучшими по качеству светоизлучающими диодами — до 80...100 нм, а обычными светоизлучающими диодами, не подвергающимися строгому выходному контролю, достигать даже 200...300 нм.

Хроматическую дисперсию обуславливают два фактора: зависимость показателя преломления материала световода от длины волны проходящего по световоду излучения и изменение модовой структуры этого излучения при изменении его длины волны. Первый фактор называется *материальной дисперсией*, приводящей к уширению импульса на некоторую величину, обозначаемую $\Delta t_{\text{мат}}$, а второй фактор — *волноводной дисперсией*. Уширение импульса вследствие волноводной дисперсии обозначается символом $\Delta t_{\text{вол}}$.

При расчете значения Δt_v общей дисперсии в многомодовом волоконном световоде и полосы пропускания можно пользоваться следующими формулами [79]:

$$\Delta t_v = \sqrt{W_2^2 - W_1^2} \text{ и } \Delta t_v = \sqrt{\Delta t_{\text{мод}}^2 + \Delta t_{\text{хром}}^2},$$

где W_1 и W_2 — ширина гауссовских импульсов на половине высоты (см. рис. 41, а). Полоса пропускания $B = 0,44/\Delta t_v$.

Влияние некоторых факторов (температуры, давления и, в частности давления, создаваемого акустическим полем) на излучение, распространяющееся по волоконному световоду. При изменении температуры изменяются объем и показатель преломления стекла. Это приводит, в свою очередь, к изменению фазы света, проходящего по оптическому волноводу. Сдвиг фазы $\Delta\varphi$, вызываемый изменением температуры ΔT , может быть определен по формуле [90]

$$\Delta\varphi = \frac{-2\pi L}{\lambda_0} \left\{ \left(n + \frac{a\lambda_0}{2\pi} \frac{\partial\beta}{\partial a} \right) \alpha_e + \frac{\partial n}{\partial T} \right\} \Delta T,$$

где α_e — коэффициент линейного расширения материала сердцевин; L — длина отрезка оптического волокна; $\partial n/\partial T$ — температурный коэффициент изменения показателя преломления; n — среднее значение показателя преломления сердцевин оптического волокна; λ_0 — длина волны излучения в вакууме; $\partial\beta/\partial a$ — коэффициент изменения константы распространения излучения по радиусу сердцевин оптического волокна.

Подстановка в это выражение экспериментально полученных соответствующих данных для типичного кварцевого волоконного световода приводит к значению $\Delta\varphi$ порядка 100 рад на 1 °С при длине отрезка подвергаемого нагреву волокна $L = 1$ м, что может быть представлено приблизительно 15 интерференционными полосами на 1 °С.

Исследование влияния гидростатического давления показало следующее [48]. Сдвиг фазы света, распространяющегося по оптическому волокну, который подвергается действию изменяющегося гидростатического давления ΔP_a , при длине датчика (отрезка волокна), равной L , с удовлетворительной точностью можно вычислить по формуле

$$\Delta\varphi = \Delta P_a \frac{\pi L}{\lambda_0} \left\{ \frac{\lambda_0 a}{\pi} \frac{\partial \beta}{\partial a} - \right. \\ \left. - n^3 (P_{11} + P_{12}) \right\} \left[\frac{1 - \kappa + 2\kappa^2}{Y} \right],$$

где p_{11} , p_{12} — постоянные фотоупругости; Y — модуль нормальной упругости; κ — коэффициент Пуассона.

Эксперименты с определением сдвига фазы в оптическом волокне, которое подвергается действию приложенной растягивающей нагрузки, вызывающей пропорциональное значению нагрузки удлинение волокна на значение SL , показали, что сдвиг фазы в этом случае может быть рассчитан с удовлетворительной точностью по эмпирической формуле [48]

$$\Delta\varphi = \frac{-2\pi SLn}{\lambda_0} \left\{ 1 - \frac{n^2}{2} [p_{12} - \kappa(p_{11} + p_{12})] - \frac{\kappa}{2} \frac{\lambda_0 a}{\pi n} \frac{\partial \beta}{\partial a} \right\}.$$

Если на оптическое волокно действует акустическое поле, то изменение свойств сердцевины волокна, приводящее к сдвигу фазы проходящего по световоду света, будет зависеть, в первую очередь, от температуры T поверхности волокна и абсолютного значения давления P_a , действующего на волокно. Для когерентного излучения при этом справедливо соотношение [32]

$$\Delta\varphi/\varphi = \frac{1}{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial T} \Big|_{P_a} \Delta T + \frac{1}{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial P_a} \Big|_T \Delta P_a.$$

Распространение акустических волн — адиабатический процесс. Изменения температуры могут быть представлены выражением

$$\Delta T = \frac{\partial T}{\partial P} \Big|_S \Delta P_a.$$

Положим, для упрощения расчетов, что сердцевина изготовлена из однородного материала, тогда

$$\left| \frac{\partial T}{\partial P_a} \right|_S = \frac{TV\beta_c}{C_p},$$

где V — объем; β_c — коэффициент объемного расширения; C_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении. Подставляя значение ΔT в выражение для $\Delta\varphi/\varphi$, получаем формулу для расчета акустической чувствительности волокна:

$$\frac{\Delta \Phi}{\Phi \Delta P_a} = \frac{\partial T}{\partial P_a} \Big|_S \frac{1}{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial T} \Big|_P + \frac{1}{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial P_a} \Big|_T.$$

Значение акустической чувствительности, таким образом, определяется действием двух компонентов: теплового компонента и компонента, характеризующего давление. Если волокно находится в воде, то $\partial T / \partial P_a \approx 6 \cdot 10^{-8} \text{ } ^\circ / \text{Па}$; для волокна, окруженного воздухом, $\partial T / \partial P_a \approx 9 \cdot 10^{-2} \text{ } ^\circ / \text{Па}$.

Волоконные световоды не обладают высокой прочностью и легко могут быть повреждены внешними механическими воздействиями. Поэтому в датчиках применяют оптические волокна без нанесенного на их поверхность защитного покрытия лишь в случаях, когда регистрируемое датчиком физическое возмущение должно воздействовать непосредственно на само волокно. В качестве наружных защитных покрытий световодов обычно используют композиции различных полимеров, главным образом на основе фторопласта, обладающие возможно большей адгезией по отношению к стеклу, высокой гидрофобностью, водостойкостью и механической прочностью.

Технологические процессы изготовления кабеля, содержащего волоконные световоды, весьма разнообразны; структуры так называемых оптических кабелей также многочисленны. Наружные защитные покрытия могут быть однослойными и многослойными, с чередующимися в оболочке кабеля слоями жестких и мягких материалов, слоями веществ, обеспечивающих продольную и поперечную герметизацию световодных жил, и т. д. Кабели могут быть одноволоконными, т. е. содержащими лишь одно оптическое волокно, а также многоволоконными, с числом содержащихся в них световодов, достигающим нескольких сотен. Однако всегда процесс изготовления оптического кабеля начинается с нанесения на заделываемое в кабель волокно первичного слоя защитного покрытия. Если кабель должен быть грузонесущим и выдерживать большие нагрузки на растяжение, то в нем размещают так называемые силовые элементы: ленты и стержни из особо прочных пластмасс, металлические стержни и др. Световодными жилами в оптических кабелях могут быть волокна типа «полимер—полимер», «кварц—полимер», «кварц—кварц», волокна из многокомпонентных силикатных стекол, а также волокна из специальных материалов, обладающих высокой прозрачностью для ИК-излучения с длиной волны, превышающей 3...5 мкм, и т. д.

Световодные жгуты. В некоторых конструкциях сенсорных устройств предусматривается применение волоконных световодов для освещения отдельных участков поверхности исследуемого объекта. Простейшим примером такого устройства является обычный медицинский эндоскоп, в котором свет от внешнего источника освещает объект, пройдя по жгуту, состоящему из нескольких сотен и более отрезков волоконных световодов. Оп-

тические волокна в жгуте, предназначенном лишь для освещения объекта, располагаются, как правило, беспорядочно, т. е. взаимное расположение образующих жгут волокон неодинаково на входном и выходном его торцах.

Если взаимное расположение волокон в жгуте упорядоченно, т. е. идентично на входном и выходном торцах жгута и концы волокон у этих торцов скреплены друг с другом, например, при помощи склеивания эпоксидным клеем, то такой жгут может служить не только для передачи света, но и для передачи изображений. В медицинских эндоскопах некоторых видов часть оптических волокон служит для освещения исследуемого участка на поверхности объекта и обычно располагается неупорядоченно. Другая часть волокон, которая передает изображение, всегда располагается упорядоченно, т. е. образует своего рода жгут с регулярной структурой. Разрешающая способность совокупности волокон, передающих изображение, зависит от диаметра волокон и плотности их размещения на входном (принимающим изображением) и выходном торцах, так как по каждому из многочисленных волокон в данном случае передается лишь небольшой фрагмент общей картины, и его размеры зависят от размеров изображения, проецируемого на входной торец отдельного передающего оптического волокна. Для обеспечения необходимой четкости передаваемого по эндоскопу изображения, у входного торца прибора помещают короткофокусную линзу, выполняющую роль своеобразного объектива. Разрешающая способность большинства простейших эндоскопов невелика и составляет около 15... 20 линий/мм.

2. ИСТОЧНИКИ СВЕТА

Виды источников света, применяемых для световодных датчиков и в сенсорных устройствах. В большинстве световодных устройств, предназначенных для регистрации различных физических возмущений, источниками излучения являются полупроводниковые светоизлучающие диоды (СИД) и лазерные диоды (ЛД). Реже применяют малогабаритные газовые лазеры, например He—Ne-лазеры, а в некоторых типах датчиков — нагретые до высоких температур и излучающие свет тела, люминофоры и др.

СИД и ЛД изготавливают из полупроводниковых соединений, в состав которых обычно входят элементы III и V групп (соединения $A^{III}B^V$) или II и VI групп (соединения $A^{II}B^{VI}$) по периодической системе Д. И. Менделеева, часто в эти соединения вводят [85] некоторые легирующие присадки (рис. 45). В любых СИД и ЛД должны иметься слои полупроводников с разного типа (электронной и дырочной) проводимостью, а генерация излучения обуславливается рекомбинацией носителей тока, инжектируемых в различные слои полупроводников. Вместе с тем, каж-

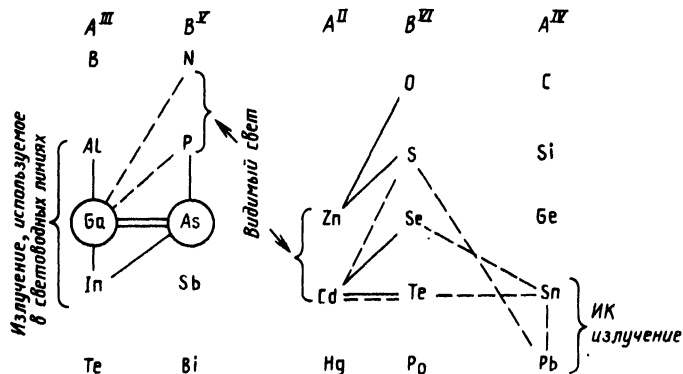


Рис. 45. Соединения и элементы, применяемые в полупроводниковых материалах источников света

дый из видов этих полупроводниковых приборов имеет свои характерные особенности, определяющие: является или нет генерируемый им свет когерентным; ширину спектра излучения того или иного прибора; линейность зависимости мощности излучения от тока инжекции; инерционность прибора (точнее, длитель-

Таблица 3

Параметры	Характеристики диодов	
	светоизлучающих	лазерных
Общая характеристика получаемого пучка света	Излучение некогерентное. Пучок расходящийся	Излучение когерентное. Пучок слабо расходящийся
Материалы, из которых изготавливают приборы	GaAs, GaAlAs, GaAsP	GaAs, GaAlAs, InGaAsP
Мощность излучения (в непрерывном режиме)	400 мкВт ... 5 мВт	3 ... 50 мВт
Область рабочих температур	-50 ... +85 °C	-50 ... +70 °C
Срок службы при температуре +15°C	Может превышать 100 тыс. ч	Может превышать 100 тыс. ч
Ширина спектра	Не менее 50 нм	2 ... 5 нм
Полоса модулируемых частот	До 200 МГц	До 2 ГГц
Длительность фронта импульса	5 ... 300 нс	0,1 ... 10 нс

ность времени отклика на воздействия, модулирующие мощность излучения); чувствительность к изменениям температуры и др. Все эти особенности необходимо учитывать при выборе источника света для световодных датчиков и сенсорных устройств конкретного назначения.

Некоторые общие сведения, позволяющие сопоставлять СИД и ЛД, приведены в табл. 3 [116].

Светоизлучающие диоды. Простейший светоизлучающий диод состоит [85] из расположенных в одном кристалле полупроводника двух областей с различным типом проводимости, между ними находится область p — n -перехода (рис. 46). В обладающую проводимостью n -типа область кристалла полупроводника инжектируются носители тока — электроны, а в область p -типа — дырки. Носители тока поступают в диод по внешней цепи от источника питания. В зоне электронно-дырочного перехода происходит рекомбинация инжектированных носителей. Рекомбинация может быть излучательной, и тогда в так называемой активной области прибора возникают фотоны ($h\nu$ на рис. 46), и безызлучательной, приводящей к некоторому нагреву решетки кристалла полупроводника. Образовавшиеся в активной зоне прибора фотоны большей частью выходят наружу из кристалла, и последний оказывается генератором света.

Интенсивность генерируемого излучения модулируется изменением тока инжекции. Максимальная частота модуляции составляет для СИД несколько сотен мегагерц, но в преобладающем большинстве изготавливаемых промышленностью СИД такое максимальное значение частоты не удается получить, так как в них на практике оказывается слишком длительным промежуток времени, необходимый для того, чтобы проникшие в кристалл

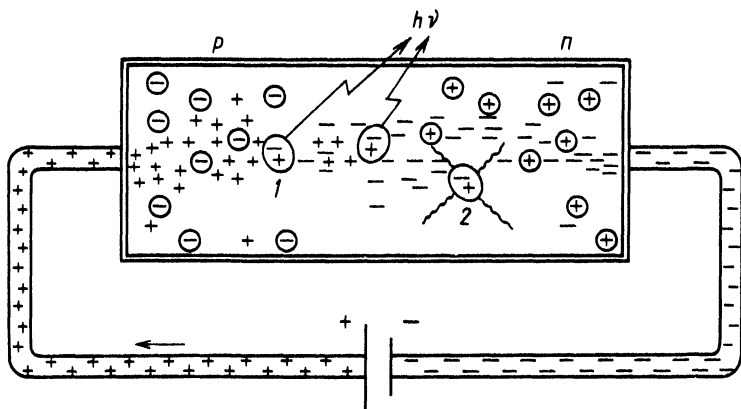


Рис. 46. Схема инжекции и рекомбинации носителей тока в светоизлучающем диоде с электронно-дырочным переходом:

1 — излучательная рекомбинация; 2 — безызлучательная рекомбинация, нагрев

инжектированные носители, перемещаясь по сложным траекториям в решетке кристалла, достигали бы положений, в которых осуществима рекомбинация. Необходимо отметить, что далеко не все акты излучательной рекомбинации происходят в СИД с эмиссией фотонов, обладающих одинаковой энергией. Результатом этого является расширение области частот излучения, генерируемого СИД.

Основные особенности СИД как источника света таковы: ненаправленное угловое распределение излучения (по закону Ламберта);

значительное (2...20 нс) время отклика при модуляции излучения СИД изменением тока инжекции. Это время отклика зависит от продолжительности жизни носителей в полупроводниках, из которых изготовлен светоизлучающий диод, особенностей механизма рекомбинации носителей и других факторов;

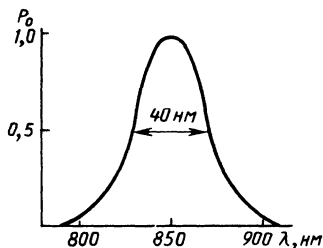
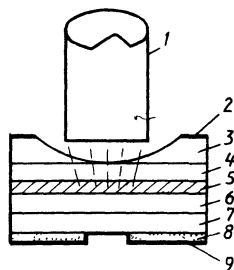
отсутствие какого-либо «порога» значения тока инжекции, обуславливающего излучательную рекомбинацию носителей; соотношение между управляющим током и получаемым на выходе оптическим сигналом носит почти линейный характер в сравнительно широком диапазоне значений тока инжекции;

ширина спектра излучения, генерируемого СИД, относительно велика и может достигать 40...140 нм.

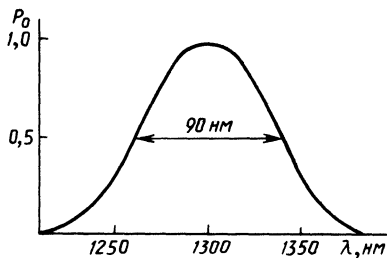
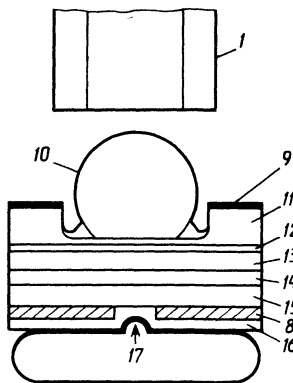
Диаметр излучающей площадки СИД, через которую выходят наружу генерируемые прибором фотоны, значителен (200...300 мкм), но может быть уменьшен созданием в приборе «окон», что облегчает при необходимости ввод излучаемого диодом света в световод, имеющий диаметр сердцевины, например, 50 мкм.

В типичных конструкциях и СИД, разработанных специально для световодных систем передачи данных (рис. 47), генерируемое излучение выходит наружу и распространяется перпендикулярно плоскости электронно-дырочного перехода, расположенного между слоями полупроводников с проводимостью различного типа. В подложке прибора вытравлено углубление, в одном случае (рис. 47, а) используемое для того, чтобы максимально уменьшить расстояние между активной зоной СИД и входным торцом световода, а в другом (рис. 47, б) — для размещения между активной зоной прибора и входным торцом световода сферической микролинзы. В световодных системах связи и сенсорных устройствах применяют также СИД, сконструированные таким образом, чтобы генерируемое ими излучение выходило из прибора наружу не перпендикулярно поверхности электронно-дырочного перехода, а параллельно ей, т. е. через боковую грань кристалла полупроводника. Это приводит к уменьшению размера сечения пучка света, генерируемого СИД.

Длина волны света, излучаемого СИД, зависит от ширины запрещенной зоны полупроводника, используемого в приборе, и определяется соотношением $\lambda = hc/\Delta E$, где h — постоянная



а)



б)

Рис. 47. Типичные конструкции и спектры излучения СИД:

а—генерирующих свет с $\lambda=0,84$ мкм; б—генерирующих свет с $\lambda=1,3$ мкм; 1—волоконный световод; 2—металлический контакт; 3—CaAs n^+ -типа; 4—AlGaAs n -типа; 5—GaAs p -типа (активный слой); 6—AlGaAs p -типа; 7—GaAs p^+ -типа; 8—SiO₂; 10—сферическая микролинза; 11—подложка (InP n -типа); 12—InP n -типа; 13—GaInAsP p -типа; 14—InP p -типа; 15—GaInAsP p^+ -типа; 16—GaAs p -типа; 17—контакт диаметром 10...50 мкм

Планка; c — скорость света в вакууме; ΔE — энергетическая ширина запрещенной зоны, эВ.

Длина волны света, генерируемого СИД из арсенида галлия, около 0,9 мкм. При введении в арсенид галлия легирующей примеси алюминия длина волны генерируемого СИД излучения может быть уменьшена и составлять, например, 0,78 мкм. Для изготовления СИД, генерирующих еще более коротковолновое излучение (видимый свет), нужно переходить к таким полупроводниковым материалам, как арсенидфосфид галлия или фосфид галлия. Наоборот, СИД, излучающие свет с большей длиной волны, например, равной 1,3 мкм, должны состоять из полупроводников, содержащих не только мышьяк и галлий, но и индий, а также фосфор.

Числовая апертура СИД с большой по размерам излучающей площадкой может достигать 0,9, а для СИД с вытравленным в

Структура	Диаметр излучающей площадки, мкм	Длина волны, мкм	Мощность излучения, мВт	Мощность, вводимая в волокно, мкВт	Диаметр волокна, мкм	Числовая апертура	Ввод излучения	Фирма
-----------	----------------------------------	------------------	-------------------------	------------------------------------	----------------------	-------------------	----------------	-------

Плоскостные светодиоды

Гомопереход	50	0,903	3	—	—	—	—	"Плесси" (Англия)
	50	0,9	6	170	50	0,66	Торец (клей)	«Белл Телефон» (США)
	35	0,86	2,2	20	80	0,14	Сферическая линза	«Мицубиси» (Япония)
	40	0,83	4,7	280	85	0,16	Оплавление волокна	«Хитачи» (Япония)

Светодиоды с торцовым выводом излучения

Двойной гетеропереход	7×50	0,855	3	600	80	0,14	Полусферическая линза	НТТ (Япония)
	6×75	0,82	7,6	800	90	0,14	Просветление Фокон	(США)
	3×74	0,885	0,65	120	80	0,26		«Тосиба» (Япония)
		0,81— —0,89	—		50	0,14		СССР

них углублением, обеспечивающим большую эффективность ввода излучения в волоконный световод, получается значительно меньшей (0,3...0,2). Такое уменьшенное значение числовой апертуры излучателя способствует благоприятному соотношению значений числовой апертуры СИД и волоконных световодов.

Повышение температуры приводит к снижению оптической мощности на выходе СИД. Экспериментально установлено, что, как правило, при повышении температуры на 1 °С мощность излучения, генерируемого СИД с рабочей длиной волны 0,85 мкм, уменьшается на 0,8 %, а с рабочей длиной волны 1,3 мкм — на 2 % (если за 100 % считать мощность излучения СИД при +25 °С).

В табл. 4, 5 приведены типичные характеристики светоизлучающих диодов, изготавливаемых некоторыми зарубежными фирмами.

Лазерные диоды. В отличие от светоизлучающих диодов, лазерные диоды (ЛД) генерируют когерентное излучение, возникающее при стимулированной рекомбинации инжектируемых в диод носителей тока. Объем активной области в СИД, в которой

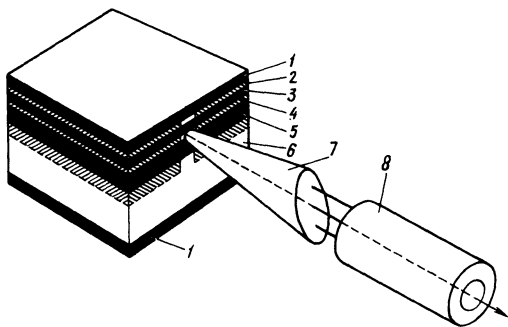


Рис. 48. Структура лазерного диода с p - n и p - p^+ -переходами:

1—металлизированный слой; 2—слой GaAs p -типа; 3—слой AlGaAs P^+ -типа; 4—слой GaAs p -типа (активный слой); 5—слой AlGaAs n -типа; 6—подложка GaAs n -типа; 7—конус распространения излучения; 8—оптическое волокно

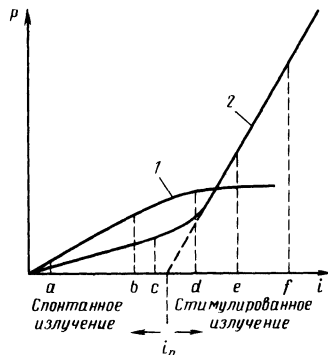


Рис. 49. Изменение выходной оптической мощности P в зависимости от тока инжекции i :

1—светоизлучающий диод; 2—лазерный диод

ном диоде, благодаря особенностям его конструкции, происходит в условиях, обеспечивающих возникновение стимулированного излучения при высокой концентрации инжектированных в полупроводник носителей — электронов и дырок.

В изображенной на рис. 48 структуре ЛД [8] активная область из арсенида галлия GaAs с дырочным типом проводимости заключена между двумя горизонтально расположенными слоями AlGaAs, обладающими различным типом проводимости (нижний слой — проводимостью n -типа, а верхний — p -типа). Показатель преломления AlGaAs для ближней инфракрасной области спектра несколько ниже показателя преломления арсенида галлия. В результате активная область в ЛД этой конструкции приобретает по отношению к некоторой части генерируемого в ней излучения свойства световода со ступенчатым профилем изменения показателя преломления. Торцами такого световода являются полупрозрачные зеркала — грани, образующиеся при сколе кристалла по плоскостям спайности. Чтобы обеспечить требуемую высокую концентрацию носителей в активной области прибора, участки объема в структуре лазера, расположенные по обеим сторонам активной области, имеющей вид узкого канала, делают «полуизолирующими», для чего значительно увеличивают их электрическое сопротивление с помощью бомбардировки протонами (на рис. 47 эти участки заштрихованы).

Ограниченная с торцов полупрозрачными зеркалами активная область становится в полупроводниковом ЛД областью резонатора, в которой при токе инжекции, превышающем некоторое пороговое значение i_n (рис. 49), генерируется стимулированное излучение. При токе инжекции, меньшем порогового, полупроводниковый лазер работает как СИД. Размеры активной области

в ЛД настолько малы, что выходная оптическая мощность лазерного диода, оказавшегося по существу обычным светоизлучающим диодом в условиях слишком слабого тока инжекции, которая не обеспечивает возникновение стимулированного излучения, получается меньшей, чем для СИД, и, как правило, не превышает 5 мВт/мА. Типичное для применяемых в световодных системах связи и в сенсорных устройствах ЛД значение i , при котором в приборе возникает лазерный эффект, лежит в интервале 50...150 мА. После достижения током инжекции порогового значения выходная оптическая мощность лазерного диода быстро растет при сохранении хорошей линейной зависимости между выходной оптической мощностью и силой тока инжекции в сравнительно широкой области значений тока инжекции.

Лазерные диоды обладают следующими качествами:

относительно направленным угловым распределением излучения (угол при вершине конуса пучка света, выходящего из активной области ЛД, может составлять 10...30°), определяемым модовой структурой пучка света на выходе из резонатора в диоде;

относительно малым временем отклика при модуляции (0,01...1 нс), обусловленным сильным взаимодействием света и носителей в процессе стимулированной рекомбинации;

нелинейностью соотношения между рабочим током и излучением на выходе, если сила рабочего тока не достигает своего порогового значения, необходимого для возникновения стимулированного излучения;

узким спектром излучения (0,2...2 нм для лазера многомодового и менее 0,01 нм для одномодового).

Различия свойств между СИД и ЛД определяют особенности применения этих источников излучения в световодной технике и, в частности, в области датчиков и сенсорных систем. В технике световодной связи и передачи информации СИД используют в линиях, работающих с относительно низкими скоростями передачи информации (менее 50 Мбит/с) и требующих ввода в волокно небольшой мощности света. В датчиках СИД применяют главным образом в случаях использования амплитудной модуляции. Отсутствие у СИД порогового значения тока, определяющего различие процессов излучательной рекомбинации в активной области прибора, позволяет существенно расширять в сторону уменьшения тока инжекции его рабочий диапазон. СИД менее чувствительны, чем ЛД, к изменениям температуры и к старению с течением времени.

ЛД в системах связи работают при более высоких скоростях передачи информации (сотни мегабит и даже свыше 1—2 Гбит/с) и обеспечивают ввод в оптическое волокно по меньшей мере в 10 раз более интенсивное излучение. ЛД необходимы для волоконнооптических линий большой протяженности. Однако рабо-

чие условия ЛД более критичны к влиянию различных внешних факторов (температуры и др.), чем для СИД; ЛД более склонны к деградации и некоторым другим ухудшениям своих свойств в процессе старения.

ЛД широко применяют в сенсорных системах со световодными датчиками, основанными на использовании фазовой модуляции и модуляции изменением состояния поляризации. В отличие от СИД, ЛД генерирует свет, частично поляризованный с плоскостью поляризации, ориентированной параллельно электронно-дырочному переходу.

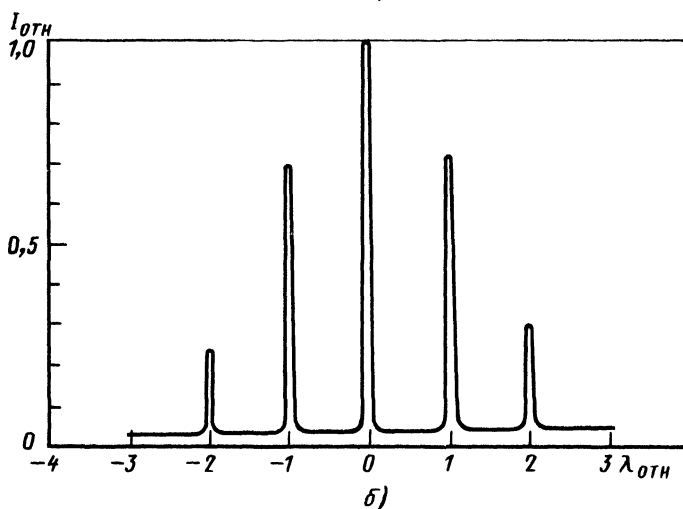
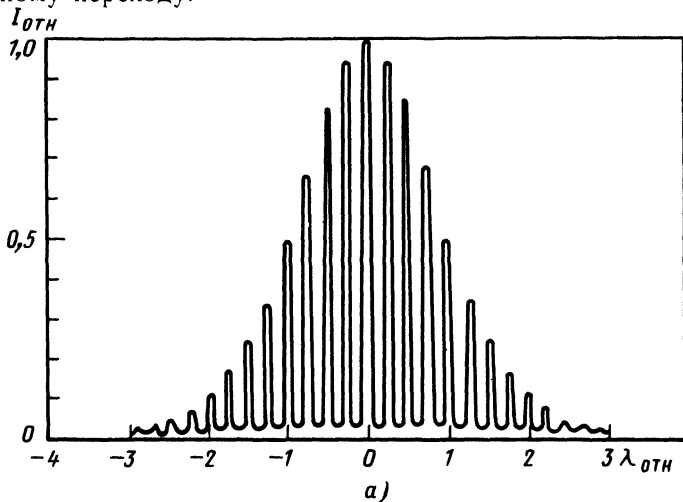


Рис. 50. Спектры излучения многомодовых лазерных диодов:

а—диода, генерирующего свет с $\lambda = 0,85$ мкм; б—диода, генерирующего свет с $\lambda = 1,3$ мкм

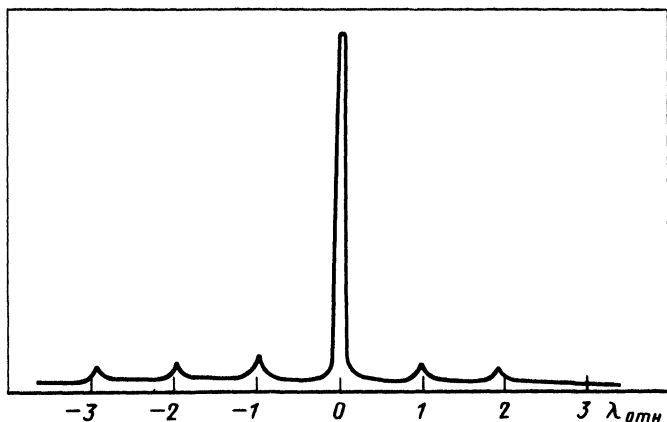


Рис. 51. Спектр излучения одномодового лазера

ЛД может быть многомодовым и одномодовым в зависимости от своей конструкции, определяющей форму и размеры области резонатора в диоде. При относительно больших размерах области резонатора ЛД может генерировать 10...20 продольных мод (для лазера с пиковой длиной волны около 0,8 мкм) или 5—6 мод (для лазера с пиковой длиной волны 1,3 мкм), как показано на рис. 50. При длине волны 0,85 мкм, что соответствует частоте 350 ТГц, и ширине каждой дополнительной линии, например 0,2 нм (соответствующей частоте 80 ГГц), общая ширина спектра излучения лазера составит менее 3—4 нм. Одномодовые ЛД с малыми размерами резонатора генерируют одну основную монохроматическую линию (рис. 51), ширина которой может составлять менее 0,1 нм [79].

Схемы сенсорных устройств с лазерными диодами намного сложнее схем с СИД, так как лазером необходимо управлять, обеспечивая стабильность его работы, а также защиту его от воздействия слишком высоких входных сигналов, различных неисправностей в цепи питания и паразитных электрических колебаний.

Для решения этих задач часто пользуются фотодиодом, помещаемым возле задней грани лазера и детектирующим часть излучения ЛД. Фотодиод выполняет функцию обратной связи, и генерируемый им фототок поступает в схему управления и защиты ЛД, содержащую цепь обратной связи, поддерживающую постоянство мощности излучения ЛД от воздействия слишком высокого входного сигнала, и схему защиты ЛД от воздействий, обусловленных, например, неисправностями цепи питания, паразитными электрическими эффектами и др.

Для поддержания постоянства мощности излучения ЛД, например, в случае деградации лазера при изменении темпера-

туры окружающей среды необходимо, чтобы блок регулирования изменял ток инжекции лазера i пропорционально интенсивности дестабилизирующего фактора, при этом

$$\Delta i = \delta P / G_i,$$

где Δi — изменение тока инжекции; δP — изменение мощности излучения; G_i — усиление, требующееся для компенсации.

3. ФОТОДЕТЕКТОРЫ

Характеристики параметров детекторов, применяемых в фотоприемниках оптических сенсорных устройств. К настоящему времени разработаны многие виды приборов, регистрирующих свет и преобразующих его в электрические сигналы. В световодной технике и, в частности, в оптических сенсорных устройствах наибольшее применение получили полупроводниковые детекторы света в связи с тем, что они удовлетворяют требованиям, предъявляемым к ним в этой области, как по своей чувствительности и частотным характеристикам, так и вследствие относительной простоты их изготовления и удобства в эксплуатации.

Простейший полупроводниковый прибор, регистрирующий свет — это фотодиод с одним электронно-дырочным переходом. Принцип его действия заключается в следующем.

Пучок света — поток фотонов, каждый из которых обладает энергией $h\nu$, где ν — частота излучения, Гц, а величина h — константа, равная $6,63 \cdot 10^{-34}$ Вт·с². Частота ν и длина волны света λ взаимосвязаны соотношением $\nu = c/\lambda$, где скорость света в вакууме $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Оптическая мощность пучка света $P = h\nu N$, где N — число фотонов, пересекающих при своем движении за 1 с плоскость, перпендикулярную пучку света.

Фотоны, обладающие энергией, большей ширины запрещенной зоны полупроводника, поглощаются последним с образованием пар электрон-дырка. Это явление характеризуется значением коэффициента поглощения α' или относительным уменьшением интенсивности света I_x при распространении света в веществе на расстояние x : $I_x = I(0)\exp(-\alpha'x)$. Коэффициент поглощения α' зависит от длины волны света λ , и его значение различно для разных полупроводниковых материалов (рис. 52) [53].

При освобождении пар электрон-дырка соответствующие электроны из заполненной зоны перебрасываются в свободную зону, а ставшие свободными дырки остаются в заполненной зоне. Как те, так и другие носители тока приобретают возможность участвовать в прохождении тока по полупроводнику. Электронно-дырочные пары, оказавшиеся вблизи p — n -перехода будут вести себя следующим образом: под действием электрического поля, действующего в области p — n -перехода, ставшие свободными электроны будут отбрасываться p — n -переходом в полупровод-

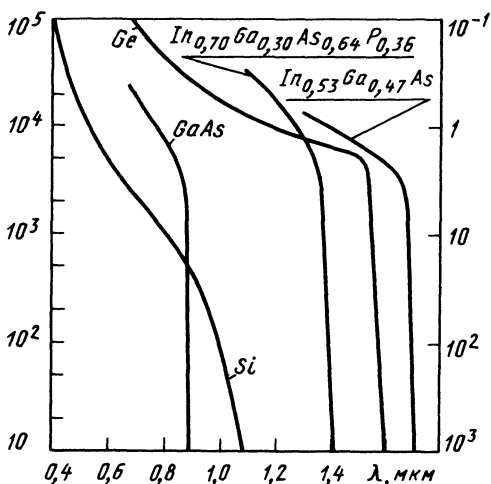
Рис. 52. Зависимость коэффициента поглощения α' и глубины x проникновения света в вещество от длины волны излучения для различных полупроводниковых материалов

ник n -типа, а дырки — накапливаться в области полупроводника p -типа. Таким образом, между областями электронной и дырочной проводимости будет возникать и до определенного предела возрастать контактная разность потенциалов, значение которой будет характеризовать возникающую фотоЭДС. Использование генерируемой таким путем фотоЭДС нашло самое широкое применение в технике, в первую очередь в солнечных батареях.

Фотоэлементы описанного типа, именуемые вентильными фотоэлементами, изготавливают из различных материалов: германия, кремния, селена, сульфидов, теллуридов, арсенидов некоторых металлов и др. Спектральные характеристики, фоточувствительность и прочие важные для практики свойства фотоэлементов зависят от применяемых для их изготовления полупроводников, конструкции этих приборов и ряда других факторов. Чтобы фотодиод можно было использовать в световодной системе связи или в сенсорной системе в качестве фотодетектора, необходимо к нему приложить обратное смещение $u_{обр}$ и выбрать режим его работы таким, чтобы обеспечить требуемую линейную зависимость между регистрируемым на выходе прибора током i_n и мощностью пучка света, падающего на рабочую площадку фотодиода.

Если фотодиод не освещен, то во внешней его цепи будет протекать так называемый темновой ток $i_{темн}$. При действии на фотодиод потока фотонов в нем генерируется фототок i_ϕ . Тогда через внешнее сопротивление, подключенное к прибору, будет течь ток i_n , являющийся суммой токов i_ϕ и $i_{темн}$. Значения темнового тока и шума относятся к числу основных характеристик фотодиода. Различают два вида темнового тока фотодиода:

ток утечки, проходящий главным образом по поверхности полупроводника и зависящий от состояния этой поверхности и геометрии прибора; он может быть уменьшен соответствующей обработкой поверхности полупроводника; значение тока утечки в значительной степени обусловлено технологией изготовления фотодиода;



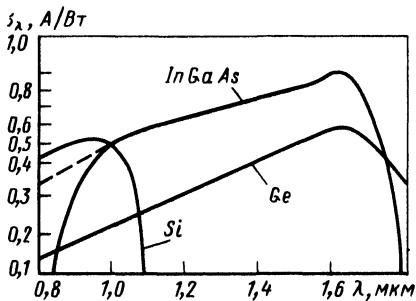


Рис. 53. Спектральная зависимость значения отклика для фотодетекторов, изготовленных из различных материалов

ны запрещенной зоны полупроводника. Темновой ток фотодетектора должен быть по возможности малым.

При анализе шумовых свойств фотодиодов, например в случае необходимости найти отношение сигнал/шум или определить чувствительность того или иного прибора, ограниченную только свойствами фотоприемника, обычно следует учитывать три вида шумовых токов, возникающих в фотодиоде: шумовой ток, обусловленный регистрацией фотодетектором светового потока, состоящего из отдельных фотонов (дробовой шум); шумовой ток, вызванный беспорядочным тепловым движением электронов в нагрузочном сопротивлении и в элементах электронных цепей, присоединенных к фотодиоду; шумовой ток самого фотодиода, связанный с его темновым током.

Отношение числа электронов, образующих фототок $i_{\text{ф}}$, к числу N падающих на диод фотонов характеризует значение квантовой эффективности $\eta_{\text{к}}$ прибора, пропорциональное отклику σ (А/Вт) фотодиода, в свою очередь зависящему от длины волны света, регистрируемого фотодиодом. Характер этой зависимости обусловлен видом полупроводникового материала, из которого изготовлен прибор (рис. 53).

Значение отклика фотодиода зависит от ряда факторов, в том числе от постоянной времени RC , где C — емкость фотодиода; R — сопротивление цепи. Необходимо, чтобы фотодиод обладал возможно меньшей емкостью C . В случае резкого p — n -перехода и большой разницы в концентрациях донорной и акцепторной примесей в областях p и n , емкость перехода описывают соотношением [79]

$$C = \frac{eS\varepsilon_0}{d} = S \sqrt{\frac{e\varepsilon N_b \varepsilon_0}{2(u_{bi} \pm u)}},$$

где S — площадь перехода; ε — диэлектрическая проницаемость материала полупроводника; N_b — концентрация примесей в зоне, минимально легированной; u_{bi} — потенциал диффузии в переходе; u — приложенное напряжение от внешнего источника тока; e_0 — электрическая постоянная.

Значение обратного смещения $u_{обр}$, прикладываемого к фотодиоду, выполняющему роль фотодетектора, обычно составляет от нескольких вольт до 150...200 В в зависимости от конструкции и требуемых рабочих характеристик применяемого фотодиода. Характеризуя фотодиод как фотодетектор, указывают значения следующих его параметров: площадь активной поверхности (площадки, на которую падает регистрируемое прибором излучение), мм^2 ; область спектральной чувствительности, мкм ; длину волны λ , мкм , соответствующую наибольшей спектральной чувствительности прибора; полосу пропускания частот, МГц ; квантовую эффективность, %; мощность шума, $\text{Вт/Гц}^{1/2}$; время нарастания отклика, нс ; рабочее напряжение, В; темновой ток, нА ; емкость прибора, пФ ; пределы области рабочих температур, $^{\circ}\text{C}$; чувствительность (отклик), А/Вт ; срок службы, ч.

Рассматривая выше некоторые основные вопросы теории фотодиодов, мы, для упрощения изложения, имели в виду приборы, в которых $p-n$ -переход резко выражен. Однако в диоде, на который подано обратное смещение, всегда между областями с электронной и дырочной проводимостью имеется промежуточная, так называемая i -область. В i -области (*intrinsic* — собственный, свойственный чему-либо) донорные примеси, придающие полупроводнику проводимость n -типа, и акцепторные примеси, придающие полупроводнику проводимость p -типа, компенсируют действие друг друга. В результате, полупроводник в i -области обладает собственной проводимостью, присущей ему при отсутствии в нем легирующих примесей — донорных и акцепторных.

Фотодиоды, в которых i -область значительна, что достигается приложением к прибору достаточно высокого обратного смещения, при некоторых особенностях конструкции прибора, именуют $p-i-n$ -фотодиодами. Они обладают более высокой квантовой эффективностью и большим значением отклика, чем простейшие $p-n$ -диоды с резким электронно-дырочным переходом, и благодаря этим качествам их широко применяют в световодной технике, в частности в сенсорных системах. Кроме того, в световодной технике для регистрации относительно слабых световых сигналов широко применяют так называемые, лавинные фотодиоды.

Фотодиоды типа $p-i-n$ и лавинные фотодиоды. На рис. 54, а и б представлены схемы, показывающие различие между структурами простейшего $p-n$ - и $p-i-n$ -фотодиодов. В $p-i-n$ -фотодиоде концентрация донорной примеси в n -области особенно значительна (это обстоятельство отображено тем, что на схеме рис. 54, б зона, легированная донорной примесью, обозначена символом n^+ , а не символом n), переходные сопротивления между омическими контактами и соответствующими областями p - и n -типа малы, а к прибору прикладывается относительно высокое обратное напряжение. При этих условиях i -область в фотодиоде

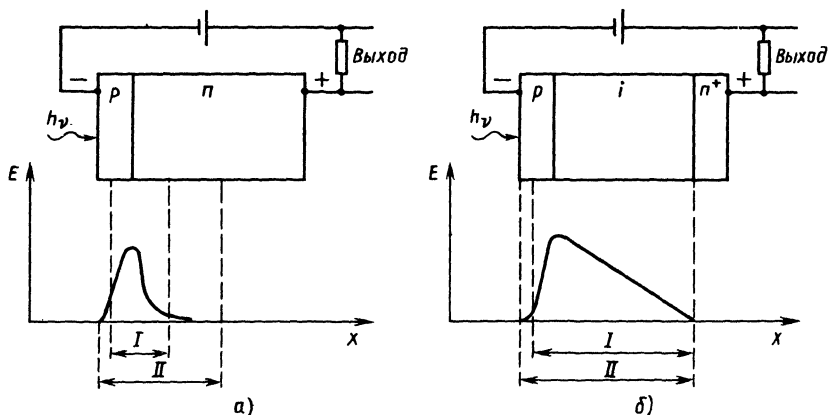


Рис. 54. Строение простейших фотодиодов:

а—типа $p-n$; б—типа $p-i$; I —обедненная носителями область; II —область поглощения фотонов

получается значительной. Электрическое поле действует только в пределах i -области, имея максимум интенсивности возле ее границы с p -областью, на которую падает свет.

Требования высокой квантовой эффективности и высокого быстродействия для $p-i-n$ -фотодиода в известной степени взаимно противоречивы. Повышение квантовой эффективности этого прибора связано с увеличением ширины i -области, в которой наиболее эффективно происходит процесс образования электронно-дырочных пар, а для увеличения скорости отклика $p-i-n$ -фотодиода, наоборот, желательно иметь узкую i -область, чтобы затраты времени на перемещение носителей тока в ней были бы минимальными. Спектральная чувствительность и квантовая эффективность $p-i-n$ -фотодиода зависят от ширины его i -области и длины волны регистрируемого излучения.

В фотодиоде типа $p-i-n$ поглощение одного фотона может вызвать образование лишь одной электронно-дырочной пары, и вносимый ею вклад в общий фототок мал. Однако $p-i-n$ -фотодиоды обладают значительно более высокой квантовой эффективностью и большей величиной отклика, чем $p-n$ -фотодиоды. Квантовая эффективность лучших фотодиодов может составлять 65...70 %, а отклик — 0,6...0,7 мА/мВт.

Благодаря этим обстоятельствам фотодиоды типа $p-i-n$ широко используют в световодных системах и сенсорных устройствах в качестве фотодетекторов при условии достаточной оптической мощности сигналов, поступающих на фотодетектор после прохождения по световодной линии. Однако, если оптические сигналы слабы, то порог чувствительности $p-i-n$ -фотодиода может оказаться слишком высоким, чтобы их регистрировать. Воз-

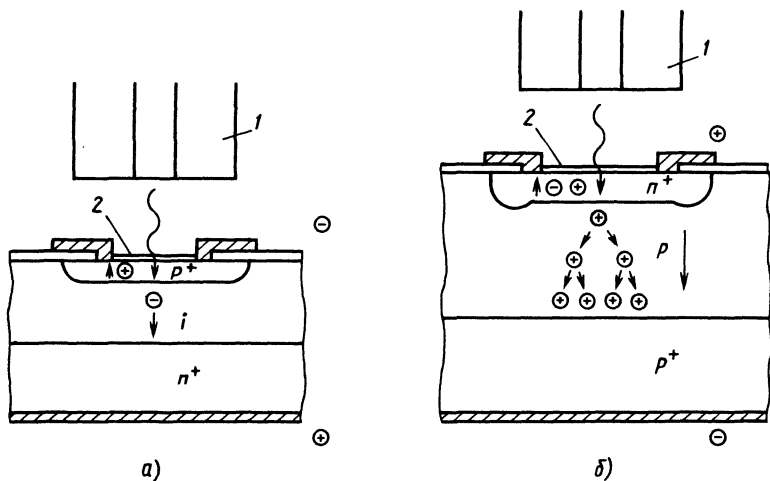


Рис. 55. Генерация электронов и дырок при поглощении кванта света:

а—в $p-i-n$ -фотодиоде; *б*—в лавинном фотодиоде; 1—волоконный световод; 2—просветляющее покрытие

ника необходимость разработки приборов, позволяющих получать на выходе фотодетектора более высокие значения тока при малых значениях мощности светового пучка.

Первым решением этой задачи явилось создание фотодиода, в котором после образования каждой электронно-дырочной пары при поглощении отдельного фотона происходит размножение носителей тока. Электрон, освободившийся при поглощении фотона, взаимодействует с атомами полупроводника, вызывая ударную ионизацию оказавшегося на его пути атома; от последнего отщепляется другой электрон, в свою очередь вызывающий новый акт ударной ионизации, и т. д. (рис. 55). Процесс размножения носителей тока носит нарастающий, лавинообразный характер, а прибор, в котором он происходит, именуется *лавинным фотодиодом* (ЛФД). В лавинном фотодиоде при поглощении одного фотона с образованием вначале одной электронно-дырочной пары далее могут быть получены десятки, сотни и даже тысячи таких пар. Освободившиеся таким образом электроны поступают в выходную цепь ЛФД. Лавинный эффект при размножении носителей приводит к внутреннему усилению фототока в ЛФД.

Для возникновения лавинного эффекта в фотодетекторе необходимо выполнить следующие условия.

1. Создать в приборе структуру, состоящую из чередующихся слоев полупроводников с проводимостью различного типа. Под тонким наружным слоем n -типа может располагаться слой p -типа, слаболегированный акцепторной примесью, под ним — широкая

Параметр	Материал						
	$Ga_xIn_{1-x}As_y$ $P_{1-y}: InP$	$Ga_{0,47}$ $In_{0,53}:$ InP	$Ga_{0,27}In_{0,73}$ $As_{0,4}P_{0,6}:$ InP	$Hg_{0,3}$ $Cd_{0,7}Te$	Al_xGa_{1-x} $As_ySb_{1-y}:$ $GaSb$	Ge	Si
Ширина запрещенной зоны, эВ	1,35...0,75	0,75	0,95	0,92	1,24...0,73	0,72	1,1
Длина волны, соответствующая зоне, мкм	0,92...1,67	1,67	1,30	1,35	1,0...1,7	1,72	1,1
Подвижность, $см^2/V \cdot с$, электронов дырок	3200—8500 70...180	8500 180	5000 80	Не определялась		3900 1900	1300 500
Плотность темнового тока, $A/см^2$	$10^{-6}—10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$(1,5...3) \times 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	3×10^{-4} 10^{-3}	3×10^{-9}
Коэффициент ионизации k	0,2...0,3	0,25	0,25	0,03	0,05...0,5	0,5	0,02
Абсолютная чувствительность, $мА/мВт$	0,6...0,8	0,8	0,6	0,6	0,6	0,85	—

область полупроводника, обладающего собственной проводимостью, т. е. i -типа, в свою очередь расположенного над слоем p^+ -типа, сильнолегированного акцепторной примесью.

2. Значительно повысить по сравнению с $p-i-n$ -фотодиодом напряжение обратного смещения для того, чтобы носители тока, образовавшиеся при поглощении фотонов в наружных слоях этой сложной полупроводниковой структуры (n - и p -областях), пройдя через зону действия сильного электрического поля, обладали бы энергией, необходимой для возбуждения лавинного процесса ударной ионизации.

Типичные данные о полупроводниковых материалах, используемых в фотодиодах различного типа, приведены в табл. 6 [132].

Шумы в $p-i-n$ и лавинных фотодиодах. Отношение сигнал/шум (SNR) для $p-i-n$ -фотодиода

$$SNR = \frac{\langle i_{\phi}^2 \rangle}{2e(i_{\phi} + i_{\text{темн}})B + 4kTB/R_{\text{экв}}},$$

где $i_{\text{ф}} = (e/h\nu)\eta_{\lambda}P_0$ — фототок; e — заряд электрона; η_{λ} — квантовая эффективность; P_0 — оптическая мощность излучения на входе в фотодетектор; B — эффективная ширина полосы оптического канала; k — постоянная Больцмана; T — эффективная температура; $R_{\text{экв}}$ — эквивалентное сопротивление на входе усилителя, присоединенного к фотодетектору [132].

В случае лавинного фотодиода, когда носители тока, генерированные падающим на рабочую площадку фотодиода светом, ускоряются приложенным к ЛФД напряжением (электрическим полем) и вызывают акты ударной ионизации и лавинного размножения, возникает избыточный шум, определяемый множителем

$$F = M[1 - (1 - k)(M - 1)^2/M^2],$$

где M — усиление, обусловленное лавинным размножением, k — отношение коэффициентов ионизации дырок и электронов, причем $k < 1$. В случае, когда $k > 1$, его заменяют величиной $1/k$.

Германиевые фотодиоды, для которых длина волны излучения, соответствующая ширине запрещенной зоны, равна почти 1,7 мкм (см. табл. 5), используются преимущественно в волоконно-оптических линиях при длине волны проходящего по ним света, составляющей 1,3 или 1,55 мкм. Наоборот, кремниевые ЛФД целесообразно применять при $\lambda = 0,8$ мкм и менее.

Шумы в фотоприемниках световодных сенсорных устройств. **Случай амплитудной модуляции сигналов, характеризующих регистрируемые датчиками физические возмущения.** Существует большое число факторов, являющихся причинами шумов, возникающих в световодных сенсорных устройствах. Необходимость изучения этих факторов очевидна, так как наличие шумов может весьма отрицательно сказываться на точности показаний, быстродействии, рабочем интервале температур и других параметрах световодных датчиков и сенсорных устройств.

Как указывалось выше, в сенсорных устройствах, в зависимости от конкретных требований к ним, используют различные способы модуляции излучения (амплитудную, фазовую и другие), причем каждый способ модуляции имеет свои характерные особенности. Последнее обстоятельство, в свою очередь, делает практически невозможным решение проблемы борьбы с шумами в ее общем виде в сенсорных системах. Число исследований, опубликованных в печати и посвященных шумам в сенсорных устройствах, в которых используется, например, фазовая модуляция или модуляция изменением состояния поляризации света, крайне мало и явно недостаточно для разработки каких-либо общих рекомендаций при создании соответствующих датчиков, а тем более — сенсорных систем. Пока более или менее освещенным можно считать лишь вопрос о шумах в фотоприемниках с лавинными и $p-i-n$ -фотодетекторами, используемыми в сенсорной технике.

В световодных сенсорных устройствах, так же как и в волоконно-оптических системах связи, имеют место шумы в основном двух видов: шум, вносимый регистрируемым сигналом, и шум фотоприемника. Шум, вносимый сигналом, вызывается главным образом статистическими флуктуациями фототока при регистрации фотонов фотодетектором. Это квантовый шум $\langle i_{\text{кв}} \rangle$, определяемый из известного соотношения, справедливого, например, для систем с ЛФД:

$$\langle i_{\text{кв}}^2 \rangle = 2e i_c MFB,$$

где F — коэффициент избыточного шума, обусловленный внутренним процессом лавинного умножения в ЛФД, причем $F = M^x$ (обычно $x = 0,2 \dots 0,3$ для хороших кремниевых ЛФД, применяемых для детектирования света с длиной волны, меньшей 1,1 мкм); B — полоса пропускания.

Шум в фотоприемнике является суммой всех шумов, генерируемых в схеме приемного оптического модуля. Основную роль при этом играют тепловые шумы и флуктуационный шум в предусилителе. Совокупность всех этих видов шума можно обозначить $\langle i_{\text{шум}} \rangle$ — величиной, определяемой значением энергетического эквивалента шума NEP (noise equivalent power), выражаемого в Вт·Гц^{-1/2}. Для фотоприемника с $p-i-n$ -фотодиодом значение NEP составляет около 10⁻¹² Вт·Гц^{-1/2}, а с лавинным фотодиодом 10⁻¹⁴ Вт·Гц^{-1/2}. Влияние некоррелированных между собой шумов $\langle i_{\text{кв}}^2 \rangle$ и $\langle i_{\text{ш}}^2 \rangle$ определяется их суммой, и коэффициент, характеризующий отношение среднего квадратического значения тока сигнала к среднему квадратическому значению шумового тока, составляет [82]

$$K = \frac{\langle i_c^2 \rangle}{\langle i_{\text{кв}}^2 \rangle + \langle i_{\text{ш}}^2 \rangle}.$$

Для случая передачи аналоговых сигналов от световодного датчика по волоконно-оптической линии с глубиной модуляции светового пучка, равной 100 % ($m = 1$),

$$K = \frac{P_0^2/2}{[2(h\nu/\eta_{\lambda})(P_0/\sqrt{2})F + (\text{NEP})^2]B}.$$

Для лавинного фотодиода справедливо соотношение

$$(\text{NEP})^2 \ll 2(h\nu/\eta_{\lambda})(P_0/\sqrt{2})F.$$

Если значение шума, характеризуемого величиной NEP, пренебрежимо мало по сравнению с квантовым шумом, то последний будет играть определяющую роль. Мощность P_0 будет пропорциональна полосе пропускания:

$$P_0 = 2\sqrt{2} \frac{h\nu}{\eta_\lambda} BKF.$$

При теоретически наименьших значениях $F=1$ и $\eta_\lambda=1$ в условиях минимального квантового шума

$$P_{\min} = 2\sqrt{2} h\nu BK.$$

Если в фотоприемнике будет преобладать не квантовый шум, а шумы других видов, то, как показано в работе [82], значение мощности P_0 , необходимое для приема аналоговых сигналов при значении отношения сигнал/шум выше 40 дБ (как это принято во многих случаях согласно требованиям к световодным системам передачи данных), окажется более высоким и определится соотношением

$$P_0 = \sqrt{2} \frac{h\nu B}{\eta_\lambda} KF \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\text{NEP} \sqrt{BK}}{\frac{h\nu B}{\eta_\lambda} KF} \right)^2} \right].$$

Оптическая мощность, достаточная для того, чтобы отношение сигнал/шум при приеме импульсов света по световодной линии передачи данных было равно единице, называется минимальной детектируемой оптической мощностью (МДМ). Ее значение определяется из выражений

$$K=1=(\sigma_\lambda P_0)^2 / \langle i_{\text{шум}}^2 \rangle; \text{МДМ} = (1/\sigma_\lambda) \sqrt{\langle i_{\text{шум}}^2 \rangle}.$$

Если в фотоприемнике преобладающую роль среди различных видов шума будут играть шум, вызванный темновым током $i_{\text{темн}}$ фотодиода, равный $\langle i_{\text{темн.ш}}^2 \rangle = 2ei_{\text{темн}}B$, и тепловой шум, обусловленный наличием в схеме электрических сопротивлений R и характеризующийся соотношением $\langle i_{\text{шR}}^2 \rangle = (4kT/R)B$, то значение МДМ может быть рассчитано по формуле

$$\text{МДМ} = \frac{1}{\sigma_\lambda} \sqrt{[2ei_{\text{темн}} + (4kT/R)] B},$$

где в случае $4kT/R \ll 2ei_{\text{темн}}$ можно пренебречь находящимся под знаком квадратного корня слагаемым $4kT/R$. Тогда

$$\text{МДМ} = \frac{1}{\sigma_\lambda} \sqrt{2ei_{\text{темн}} B} \text{ и } \text{NEP} = \frac{1}{\sigma_\lambda} \sqrt{2ei_{\text{темн}}}.$$

Аналогичные расчеты могут быть выполнены и для случая передачи по световодной линии цифровой информации.

При регистрации отклика световодного датчика или сенсорного устройства, основанного на принципе амплитудной модуляции интенсивности излучения, проходящего по волоконному световоду, расчет средней оптической мощности используемого

пучка света, необходимой для обеспечения требуемого значения коэффициента K , может быть основан на следующем [82].

Мгновенное значение фототока $i(t)$, генерируемого фотодетектором, пропорционально мгновенному значению мощности пучка света $p(t)$, падающего на рабочую площадку фотодетектора, $i(t) = \sigma_\lambda p(t)$, где σ_λ — чувствительность (отклик) фотодетектора, А/Вт. Для $p-i-n$ -фотодиода с областью спектральной чувствительности 0,4...1,1 мкм (кремниевые фотодиоды) при длине волны λ , близкой к 0,9...1,0 мкм, σ_λ составляет около 0,5 А/Вт, а для кремниевого лавинного фотодиода при коэффициенте лавинного умножения, равном 100, σ_λ достигает почти 50 А/Вт. Величина σ_λ , характеризующая эффективность генерации электронно-дырочных пар в фотодиоде, может быть с удовлетворительной точностью выражена для $p-i-n$ -фотодиода, а также для лавинного фотодиода при длине волны света, лежащей в пределах спектральной чувствительности диода, соотношением

$$\sigma_\lambda = \frac{\eta_\lambda e}{h\nu} M = 0,8 \eta_\lambda \lambda M,$$

где e — заряд электрона; h — постоянная Планка; ν — частота электромагнитных колебаний; M — коэффициент усиления фотодиода (для $p-i-n$ -фотодиода $M=1$).

При приеме оптического сигнала от датчика (в случае аналоговой модуляции) мгновенное значение $p(t)$ изменяется во времени от значения $2P_0$ до 0 при глубине модуляции 100 % и от $P_0/2$ до $3P_0/2$ при глубине модуляции, равной 50 %, и справедливо соотношение

$$p(t) = P_0(1 + m \sin \omega_m t),$$

где m — глубина модуляции и ω_m — частота модуляции. Из приведенных выражений следует, что

$$i(t) = \sigma_\lambda P_0 + m \sigma_\lambda P_0 \sin \omega_m t.$$

Первый член этого выражения $\sigma_\lambda P_0$ представляет собой значение тока, постоянно текущего в цепи прибора, а второй — переменную составляющую тока сигнала.

Приведенные выше расчеты, как было указано, могут быть использованы лишь при анализе процессов, имеющих место при амплитудной модуляции излучения, которое поступает в волоконный световод и принимается после датчика $p-i-n$ -диодом или лавинным фотодиодом. Однако они представляют интерес и при решении задач, связанных с функционированием световодных датчиков и сенсорных систем, в которых применяются другие виды модуляции.

Некоторые данные о значениях темнового тока, коэффициентов лавинного размножения и других параметров для отдельных типов фотоприемников приведены в табл. 7 [8].

Таблица 7

Фирма. Марка фотодетектора	Тип детектора	Площадь активной поверхности, мм ²	Область спектральной чувствительности, нм	Длина волны, соответствующая наибольшей чувствительности, нм	Полоса частот, МГц	Квантовый выход, %	Внутреннее усиление	Эквивалентная шумовая мощность Вт/Гц ^{1/2}	Время нарастания импульса фототока, нс	Рабочее напряжение, В	Пробивное напряжение, В	Темновой ток, нА	Емкость пФ	Рабочая температура, °С	Чувствительность мкА/мкВт
ИИТ Компонентс Групп OFDP-10 OFDP-04 «Тосиба» TOPD-20 TOPD-21 TOPD-30 TOPD-23 «Фотон Кинетикс» 35C 30C RCA 529L C30979E	Si-p-i-n	0,05 0	—	770 850	— —	— —	— —	0,14 —	1 500	10 20	50	0,15 2	1 10	— —	0,3 0,55
			0,4 ... 1,1	900	80 50	83 —	— —	1 1,5	3 5	45	100	10 30	2,5 6	-10 ... +60	0,6
		0,8 5			40	67	—	0,6	3	10	20	2	8		
		1,3	0,43 ... 1,14	800	300	78	200	—	1	190	130 ... 180	3	2	— —	— —
		0,07	0,5 ... 1,0		—	—	—	—	—	—	—	—	—		
		0,03	0,6 ... 1,1	900	1500	60	700	0,1	0,2	—	150	0,3	4,5	—	—
		0,1	0,6 ... 1,7	1400	1000	—	40	100	0,3	35	40	100	5	—	—
	Si-p-i-n	0,25	0,4 ... 1,0	830	200	—	—	—	—	100	—	—	—	-40 ... +70	—
	In Ga As	0,008	0,9 ... 1,65	1300 ... 1550	—	60	—	—	1	100	60	40	1	—	0,63

4. ОПТИЧЕСКИЕ ИНТЕРФЕЙСЫ В СЕНСОРНЫХ УСТРОЙСТВАХ

В сенсорных устройствах применяют оптические интерфейсы следующих видов:

соединители волоконных световодов между собою и волоконных световодов с планарными;

соединители-разветвители для передачи (перекачки) энергии световых пучков из одного оптического волновода в другой (такие интерфейсы могут использоваться, в частности, в мультиплексорах и демультиплексорах);

соединители типа «источник излучения — световод».

Интерфейсы перечисленных типов являются пассивными элементами сенсорных систем. Эти интерфейсы можно классифицировать по принципу их действия, подразделяя на две категории: соединители-разветвители с передачей излучения через торцы сердцевин волокон и соединители-разветвители с передачей излучения из одного световода в другой или в несколько других световодов через боковые поверхности волокон.

Конструкции соединителей-разветвителей каждого вида могут быть различными. Так, например, соединители-разветвители с передачей излучения из одного световода в один или несколько других световодов в настоящее время наиболее часто изготавливают из микрооптических компонентов с переменным по их сечению значением показателя преломления.

Успехи современной технологии изготовления оптической аппаратуры, и в первую очередь линз различного размера, в том числе микролинз, позволили определить пути разработки конструкций и технологии выполнения малогабаритных и высокоэффективных оптических интерфейсов для самых различных систем световодной связи и, одновременно, для световодных сенсорных устройств.

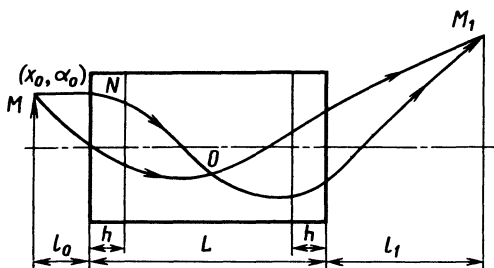
За последние 10—12 лет оптической промышленностью ряда стран особенно успешно было освоено получение так называемых градианов или селфоков — градиентных стержней (в том числе — градиентных стержневых линз) из кварцевого и многокомпонентного силикатного стекла различных марок, а также из полимерных материалов. В градиентных стержнях, как и вообще в любых градиентных оптических изделиях, показатель преломления материала плавно изменяется на пути распространения лучей света в изделии.

Различают три вида градиента показателя преломления:

аксиальный, при котором значение показателя преломления изменяется вдоль некоторой оси оптического изделия;

радиальный, при котором эквиградиентные поверхности имеют форму цилиндров, а эквиградиентные линии в сечении изделия плоскостью, перпендикулярной оси изделия, представляют собою окружности; примерами таких изделий являются градиентные

Рис. 56. Траектории меридиональных лучей в градиентной стержневой линзе с близким к параболическому изменением показателя преломления



волоконные световоды и градиентные стержневые линзы;

сферический, при котором значения показателя преломления симметричны относительно некоторой точки (центра), находящейся внутри или вне изделия, и эквиградиентные поверхности имеют сферическую форму.

Для применяемых в световодной технике оптических интерфейсов основное значение имеют градиентные стержневые линзы.

Структура градиентной стержневой линзы в принципе не отличается от структуры градиентного волоконного световода с почти параболическим изменением значения показателя преломления по радиусу поперечного сечения изделия. Но если диаметр сечения градиентного волоконного световода составляет единицы микрометров, или, в крайнем случае, 100...150 мкм, радиус сечения стержневой градиентной линзы обычно достигает 1...1,5 мм.

Закономерность изменения показателя преломления в сердцевине градиентной стержневой линзы такова, что любой луч, вошедший через торец в стержень в пределах его числовой апертуры, распространяется в стержне по криволинейной траектории и не выходит наружу через боковую поверхность линзы. Сначала луч удаляется от оси стержня на расстояние, не превышающее половины диаметра стержня, затем приближается к оси, пересекает ее, если это меридиональный луч, — вновь отклоняется от оси, но уже в другой половине плоскости сечения градиентной стержневой линзы (рис. 56). Таким образом луч, распространяющийся в градиентной стержневой линзе, имеет синусоидальную траекторию, период которой определяется соответствующим фокусным расстоянием

$$f = 1/n_a \sqrt{A} \sin(L\sqrt{A}),$$

где n_a — показатель преломления на оси стержня, т. е. $n_a = n_{1 \max}$; A — положительная константа; L — длина линзы.

Рассмотрим ход двух лучей, распространяющихся из некоторой точки M , удаленной от входного торца стержневой линзы на расстояние l_0 (см. рис. 56), один из которых падает в точку N , находящуюся на расстоянии x_0 от оси линзы, а другой — под углом α_0 в точку выхода оси линзы на плоскость сечения ее входного торца.

Пройдя путь h в линзе, эти два луча окажутся наиболее удаленными друг от друга, затем они будут сближаться, пересекутся в некоторой точке O и снова начнут отдаляться друг от друга. По выходе из линзы оба луча встретятся в точке M_1 на некотором расстоянии l_1 от выходного торца линзы. Значение h определяется соотношением

$$h = 1/n_a \sqrt{A} \operatorname{tg}(L\sqrt{A}/2).$$

Таким образом, значения фокусного расстояния f и расстояния l_1 для градиентной стержневой линзы зависят от длины линзы. При $l_0 = l_1 = 0$ изображение объекта, проецируемого на входной торец линзы, получится на поверхности ее выходного торца.

Расстояние l_1 между выходным торцом градиентной стержневой линзы и плоскостью, в которой получится изображение объекта, может быть определено из соотношения

$$l_1 = \frac{1}{n_a \sqrt{A}} \frac{l_0}{l_1} \times \frac{\cos(L\sqrt{A}) + \sin(L\sqrt{A})}{\sin(L\sqrt{A}) - \cos(L\sqrt{A})}.$$

Если l_1 положительно, то изображение получится действительным, если отрицательно — мнимым.

Согласно закону преломления

$$n_0 \sin \alpha_{\max} = n_a \sin \alpha_1 = n_0 \sqrt{\Delta n (2n_a - \Delta n)},$$

где α_{\max} — максимальный входной угол стержневой линзы; α_1 — угол преломления на входе в торец линзы, в точке, лежащей на ее оси; n_0 — показатель преломления среды, из которой падает луч; $\Delta n = n_a - n_2$.

Так, для идеальной градиентной стержневой линзы, пренебрегая некоторыми величинами второго и более высоких порядков [125] и принимая для воздуха, т. е. среды, из которой падает луч, $n_0 = 1$, можно вычислить значение входной числовой апертуры стержневой линзы из соотношения

$$\sin \alpha_{\max} \approx \sqrt{2n_a \Delta n}.$$

Градиентная стержневая линза, длина которой L равна полному периоду P' синусоиды, характеризующей траекторию луча (рис. 57, а), называется *одношаговой*. Если длина линзы равна половине этого периода, т. е. $L = P'/2$, линза называется *полушаговой* (рис. 57, б), а если $L = P'/4$ — *четвертьшаговой* (рис. 57, в). В световодной аппаратуре и, в частности, в оптических интерфейсах наиболее широко применяют четвертьшаговые линзы. В связи с тем, что положение на оси линзы точки, в которой сходятся прошедшие через градиентную стержневую линзу лучи,

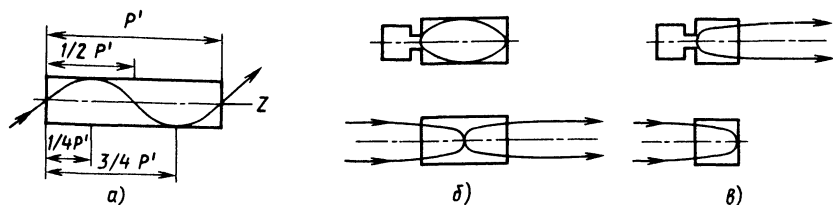


Рис. 57. Распространение меридиональных лучей в градиентных стержневых линзах: а—одношаговой; б—полушаговой; в—четвертьшаговой

имеет важное значение, при изготовлении таких линз особенно большое внимание уделяется точности выполнения операции разрезания длинной заготовки — стержня с градиентной структурой — на мерные заготовки. Из отдельных мерных заготовок после доводки их длины, шлифования и полирования торцов получают требуемые линзы.

Фокусное расстояние градиентной стержневой линзы может быть очень малым, например меньшим, чем 1 мм, а диаметр линзы — менее 0,5 мм.

Как показано на рис. 58, а, в оптическом интерфейсе для ввода в волоконный световод излучения, генерируемого, например, светоизлучающим диодом, прошедший через полушаговую градиентную стержневую линзу пучок света, имеющий сечение $A-A$, должен на выходе из линзы иметь поперечное сечение, равное диаметру сердцевины волоконного световода ($A'-A'$). Поэтому используемая в таком интерфейсе полушаговая линза должна быть изготовлена несколько укороченной. Точность из-

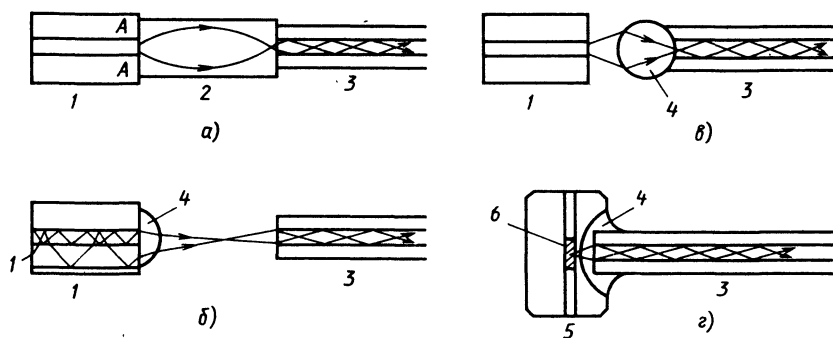


Рис. 58. Схемы оптических интерфейсов, применяемых для ввода излучения СИД или ЛД в сердцевину волоконного световода:

а—с полушаговой градиентной стержневой линзой; б—с полусферической линзой, образованной каплей полимера, нанесенной на поверхность светоизлучающей площадки СИД; в—со сферической линзой, прикрепленной к торцу световода; г—со сформированной в углублении ЛД и прикрепленной к торцу световода полусферической линзой; 1—СИД; 2—градиентная стержневая линза; 3—волоконный световод; 4—линза; 5—ЛД; 6—активная зона ЛД

готовления линзы имеет исключительно важное значение, если диаметр сечения сердцевины световода составляет 50 мкм и менее, причем требования к точности возрастают с уменьшением значения числовой апертуры световода.

Наряду с градиентными стержневыми линзами, имеющими особенно большое значение в микрооптике, в оптических интерфейсах, которые используют для ввода в волоконные световоды излучения, генерируемого СИД, ЛД и другими источниками, широко применяют также и линзы, не имеющие градиентной структуры (рис. 58, б—г). Так, например, необходимые для этих интерфейсов микролинзы могут быть изготовлены путем формирования части сферической линзы непосредственно на светоизлучающей площадке СИД (см. рис. 58, б). Для получения полусферической линзы можно пользоваться методом фотополимеризации, выполняемой следующим образом. На поверхность, где должна быть расположена полусферическая линза, наносят небольшую каплю мономера, подвергаемого затем фотополимеризации при освещении его светом с соответствующей длиной волны. Превращение жидкой полукapли в твердую полусферическую микролинзу может быть осуществлено и другими способами, например, предварительным введением в мономер веществ, способствующих развиту полимеризации.

Соединители волоконных световодов между собой и волоконных световодов с планарными волноводами. В конструкциях сенсорных устройств со световодными датчиками очень часто применяют разъемные соединители оптических волноводов, главным образом — оптических волокон. В таких соединителях потери света при его передаче из одного световода в другой должны быть минимальными, соединители — надежными, взаимозаменяемыми, с высокой ремонтпригодностью, а их сборка и монтаж — возможно более простыми. Кроме этих общих требований, разъемные соединители для сенсорных устройств во многих случаях должны обладать также и некоторыми специфическими качествами, определяемыми назначением и условиями эксплуатации того или иного световодного датчика или сенсорного устройства в целом. Например, разъемные соединители для устройств с фазовой модуляцией должны обеспечивать отсутствие в линиях источник излучения — датчик и датчик — детектор каких-либо искажений сдвига фаз, амплитуды передаваемых сигналов, возникновения паразитной интерференции в зазоре между торцами стыкуемых световодов и других нежелательных явлений, возникающих вследствие особенностей конструкции соединителя. Соединители волоконных световодов, сохраняющих то или иное состояние поляризации проходящего по ним излучения, не должны влиять на это состояние; соединители для систем регистрации физических возмущений по изменению спектральных характеристик излучения не должны влиять на интенсивность

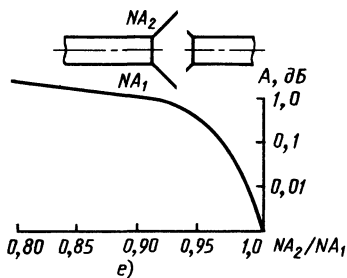
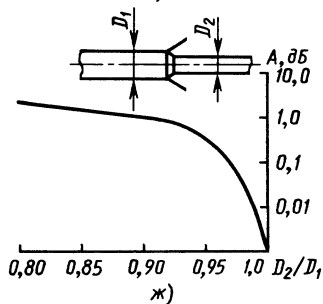
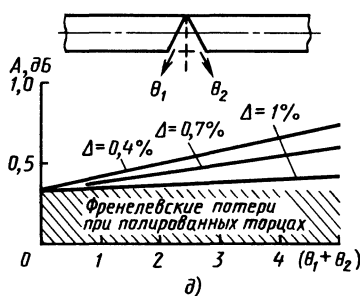
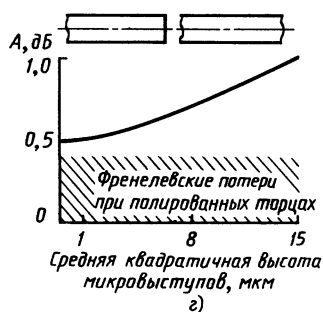
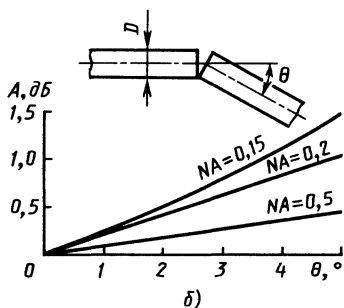
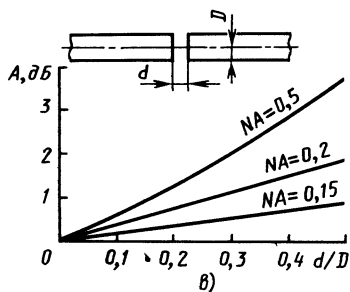
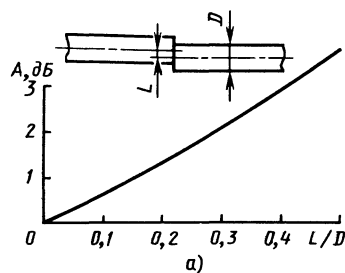


Рис. 59. Зависимость потерь в разъемном соединении:
 а—от радиальной несогласованности стыкуемых волоконных световодов; б—от угловой несогласованности; в—от наличия зазора между торцами; г—от шероховатости поверхности торцов; д—непараллельности поверхностей торцов; е—от неодинаковой числовой апертуры; ж—от разницы в диаметрах сечений сердцевин

и положение соответствующих спектральных линий и т. д.

Причины возникновения потерь в разъемных соединениях волоконных световодов таковы:

радиальная несогласованность L/D стыкуемых волокон, когда их оси расположены параллельно друг другу на расстоянии L (рис. 59, а);

угловая несогласованность осей волокон, характеризующаяся углом θ между осями световодов (рис. 59, б);

наличие зазора d между торцами стыкуемых волокон (рис. 59, в);

наличие микровыступов (шероховатости) на поверхности торцов волокон (рис. 59, г);

взаимная непараллельность поверхностей торцов волокон (рис. 59, д);

неодинаковая числовая апертура стыкуемых волокон (рис. 59, е);

разница в диаметрах сердцевин стыкуемых волокон (рис. 59, ж).

Разъемные соединители волоконных световодов могут быть безлинзовыми (рис. 60, а) или содержащими микролинзы (рис. 61). Простейший безлинзовый соединитель (разъем) для одноволоконного кабеля представляет собой два кабельных наконечника (рис. 60, б), стыкуемых друг с другом с помощью адаптера, изображенного на рис. 60, в. Соединяемые между собой волоконные световоды центрируются по оси металлического или

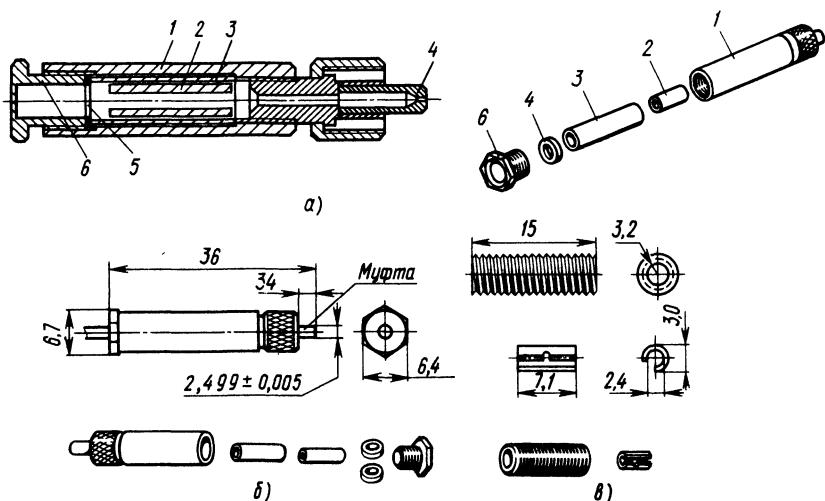


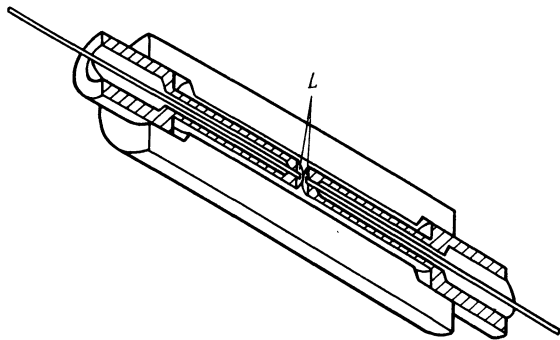
Рис. 60. Соединитель типа HFBR-4000:

а—схема устройства; б—внешний вид и детали конструкции; в—адаптер к соединителю (размеры указаны в миллиметрах):

1—корпус соединителя; 2, 3—центрирующие трубки; 4—муфта; 5—прокладка; 6—гайка

Рис. 61. Продольный разрез соединителя с прикрепленными к торцам соединяемых волоконных световодов полусферическими микролинзами:

L — микролинзы



пластмассового корпуса соединителя, фиксируются внутри центрирующей трубки с помощью специального клея, не дающего усадки при

затвердевании, а затем их торцы, предварительно отполированные и тщательно очищенные от загрязнений, плотно прижимаются друг к другу благодаря натягу, создаваемому навинчиваемой гайкой.

Применяемые в сенсорных устройствах разъемные соединители весьма разнообразны по конструкции. Обычно торцы волокон отполированы заподлицо с торцами муфт кабельных наконечников, однако иногда небольшие по длине концы волокон оставляют выступающими из муфт. Соединители некоторых типов содержат небольшие отрезки волоконных световодов (именуемых «пигтайями»), которые используют для подсоединения к различным световодным устройствам, например приклеивают к планарным световодам. В соединителях-разветвителях, используемых для разветвления оптических волноводов (рис. 62, *a—e*), мощность пучка света, распространяющегося по одному, входному, световоду, распределяется в различных, заранее рассчитанных и определяемых конструкцией разветвителя пропорциях между двумя или большим числом волноводов.

Кроме разъемных соединителей и разветвителей, в оптических сенсорных устройствах очень широко используют неразъемные соединения, причем к некоторым из них могут быть предъявлены специальные требования; например, такое, как способность не влиять на состояние поляризации распространяющегося по световоду излучения. Последнее обстоятельство имеет особенно большое значение в сенсорных устройствах с модуляцией света изменением его состояния поляризации [105].

Неразъемные соединители, ответвители и разветвители могут быть построены по принципу непосредственной передачи излучения из торца в торец сердцевины стыкуемых световодов, а также по принципу передачи (перекачки) излучения от одного световода в другие через контактирующие между собой или очень близко расположенные боковые поверхности сердцевин световодов. Последний метод передачи излучения особенно удобен для стыковки волоконных световодов с планарными.

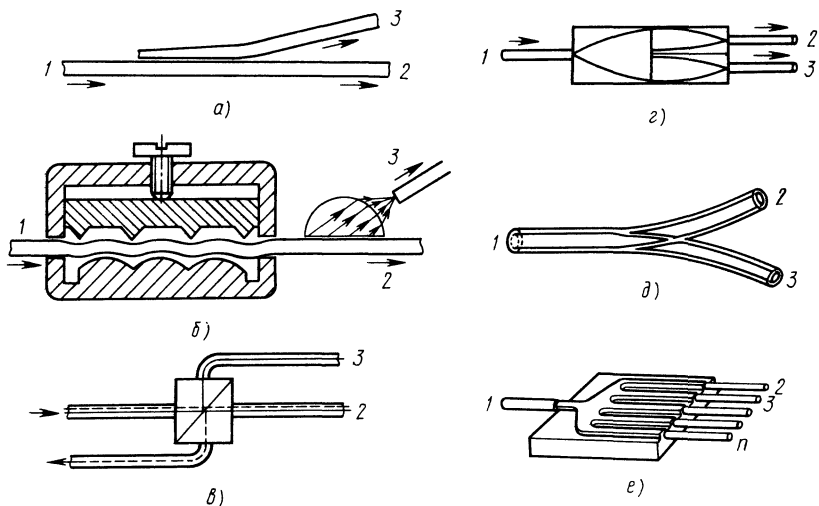


Рис. 62. Различные соединители и делители оптической мощности:

a—ответвитель в световод, имеющий скошенный конец; *б*—изгибный ответвитель с фокусирующей линзой; *в*—разветвитель с призмой; *г*—разветвитель с градиентными стержневыми линзами; *д*—Y-образный разветвитель; *е*—планарный мультиплексный разветвитель; 1—оптический вход; 2, 3, ..., *n*—оптические выходы

Эти оба принципа передачи энергии излучения широко применяют также в оптических мультиплексорах и демультимплексорах, в различных сенсорных устройствах и в устройствах с передачей по одному и тому же волоконному световоду двух направленных навстречу друг другу потоков света.

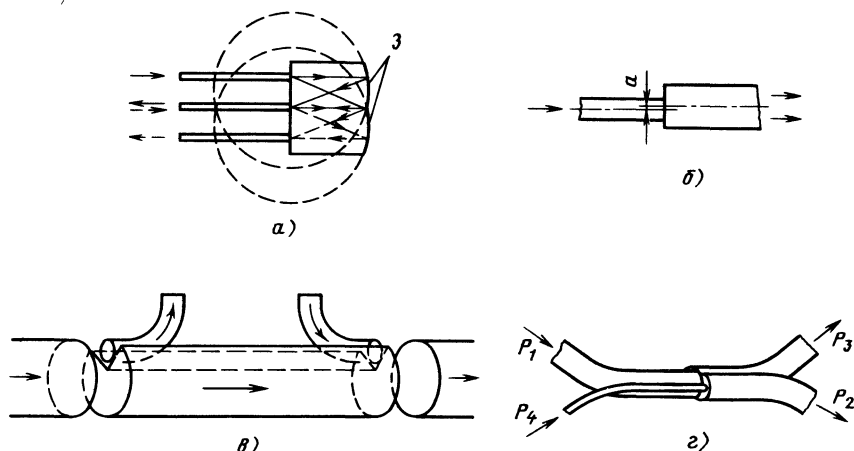


Рис. 63. Виды стыковки волоконных световодов:

a—с применением сферических зеркал (*З*—зеркала); *б, в*—соединением торцов; *г*—созданием контакта между боковыми поверхностями сердцевин ($P_1 - P_4$ —оптическая мощность)

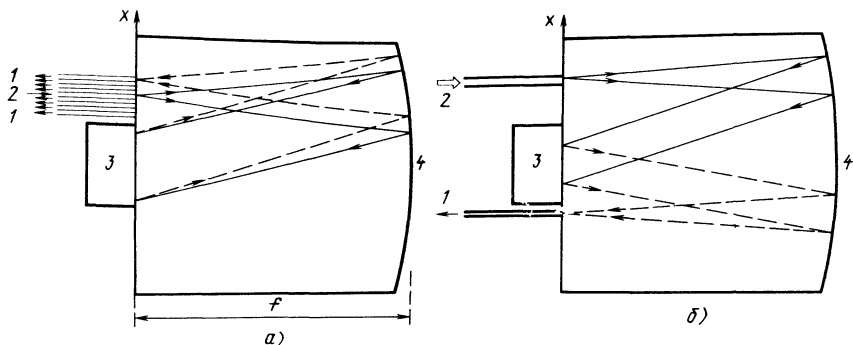


Рис. 64. Ход лучей:

a—в световодном демультиплексоре; *б*—в световодном мультиплексоре; 1—оптический выход; 2—оптический вход; 3—отражающая решетка; 4—планарное зеркало

Неразъемные соединители, ответвители и разветвители могут быть построены с соединением двух или нескольких стыкуемых между собою световодов через градиентные стержневые линзы, описанные выше. Кроме того, в неразъемных соединениях могут быть применены сферические зеркала (рис. 63, *a*); стыковка может быть осуществлена приклеиванием друг к другу торцов соединяемых волокон (рис. 63, *б* и *в*), а также созданием контакта между боковыми поверхностями световодов (рис. 63, *г*) [29, 40].

На рис. 64 приведены схемы малогабаритных оптических мультиплексора и демультиплексора с планарными сферическими микрозеркалами и ход лучей в них. В этих приборах использованы планарные дифракционные решетки для обеспечения требуемого расщепления входного светового пучка или соединения нескольких световых пучков для их ввода в общий выходной световод.

Показанное на рис. 65, *a* простейшее устройство для передачи (перекачки) энергии излучения из одного световода в другой, расположенный очень близко к первому, представляет собой направленный ответвитель. Если излучение из внешней световодной линии поступает на вход только одного из световодов направленного ответвителя [т. е. $P_2(0)=0$], то мощность $P_2(l)$, перекаченная во второй световод на длине взаимодействия l , характеризуется выражениями

$$P_2(l) = \frac{P_1(0) \sin^2 c_d l \left[1 + (\Delta\beta/2c_d)^2 \right]^{1/2}}{1 + (\Delta\beta/2c_d)^2};$$

$$P_1(l) = P_1(0) - P_2(l),$$

где c_d — коэффициент связи двух световодов; $\Delta\beta$ — разность постоянных распространения света.

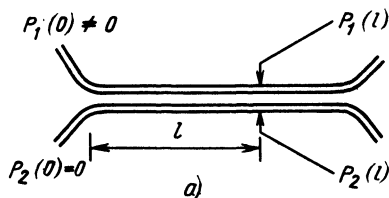


Рис. 65. Направленные ответвители: а—с параллельно расположенными световодами; б—с коаксиальной структурой

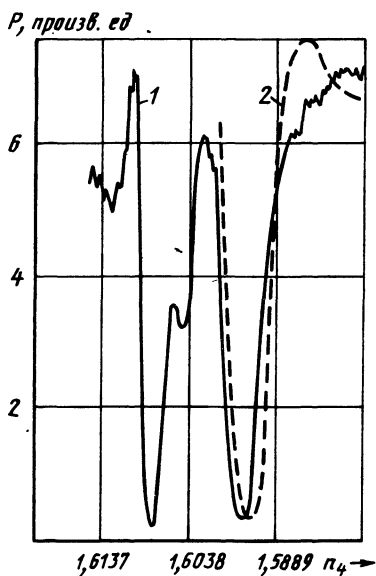
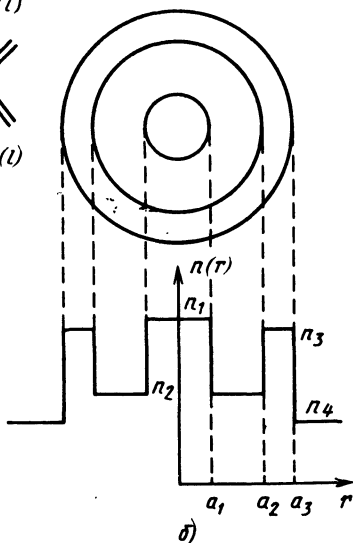


Рис. 66. Зависимость мощности излучения P на выходе центрального световода коаксиального датчика от показателя преломления жидкости: 1—результаты измерений; 2—результаты расчетов

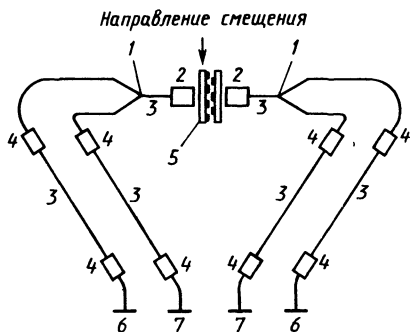


Рис. 67. Схема размещения световодов в сенсорном устройстве, обеспечивающем компенсацию потерь в оптических соединителях: 1—смеситель-разветвитель; 2—градиентная линза; 3—оптическое волокно; 4—оптический соединитель; 5—датчик; 6—СИД; 7—фотодетектор

В работе [34] было описано аналогичное по указанному выше принципу работы устройство — направленный ответвитель, состоящий из двух коаксиально расположенных друг относительно друга световодов (рис. 65, б). Он применяется в приборе для

быстрого измерения значений pH (концентрации водородных ионов) по заранее установленной для данного раствора зависимости величины pH от показателя преломления в нем света (значение этого показателя преломления обозначено на рис. 65, б символом n_4).

Созданный на базе описанного коаксиального направленного ответвителя прибор оказался достаточно точным, что можно видеть на рис. 66, где сопоставлены результаты измерений и расчетов.

Оптические потери в соединителях существенно ограничивают точность измерения различных параметров сенсорными устройствами с амплитудной модуляцией. Эти потери значительно варьируются при замене неразъемных соединителей или при повторной стыковке частей разъемных соединителей. Однако уже разработаны конструкции световодных сенсорных устройств, в частности, для измерения перемещений, позволяющие компенсировать потери в оптическом волокне и соединителях [37].

Как видно на рис. 67, подобная система содержит два световых излучающих диода, два фотодетектора и четыре волоконно-оптические ветви. Датчик перемещения — расщепитель, состоит из двух близко расположенных дифракционных решеток специального профиля. При смещении одной из решеток относительно другой изменяется коэффициент пропускания датчика. Каждый из фотодетекторов регистрирует как прошедшее через датчик, так и отраженное им излучение. Описанная система допускает замену оптических волокон и соединителей без изменения точности последующих измерений и обеспечивает сохранение калибровки.

1. СТРОЕНИЕ ПУЧКОВ СВЕТА. ОСНОВЫ ВИДЕОДИАГНОСТИКИ

При расчете и конструировании световодных датчиков, особенно датчиков с фазовой модуляцией и модуляцией путем воздействия исследуемых возмущающих факторов на состояние поляризации света, проходящего по оптическому волокну, необходимо учитывать структуру пучков света, несущих регистрируемую информацию. Распределение плотности мощности (интенсивности, яркости), излучения по сечению пучка света, характер изменения модовой структуры излучения как в отрезках волокна, подключаемых к датчику, так и в самом датчике, распределение интенсивности света на участке его ввода от излучателя (СИД, ЛД) в сенсорную систему — все это отражается на чувствительности датчика, линейности его характеристики и возможности использования в тех или иных условиях эксплуатации. Поэтому мы ниже уделяем особое внимание проблеме определения структуры пучков света, распространяющихся по волоконным световодам, и методике ее изучения и регистрации, получившей название видеодиагностики [8, 117].

Одна из методик видеодиагностики заключается в кодировании определенных интервалов уровня яркости излучения условными цветами (псевдокolorизация). Представление различных значений яркости излучения в отдельных участках пучка света с помощью условной цветовой шкалы повышает информативность изображения. Цветовые видеограммы легко воспринимаются визуально и анализируются. Другая методика предусматривает регистрацию более подробной информации об исследуемом изображении, запись в запоминающее устройство (ЗУ) яркости каждой точки изображения, построение двумерных и квазитрехмерных видеограмм, но требует использования ЭВМ и более сложной аппаратуры.

Видеодиагностика, осуществляемая в условиях так называемого ближнего или дальнего поля, дает исчерпывающую информацию об оптических свойствах какого-либо отдельного элемента или волоконно-оптической системы в целом. В ближнем поле регистрируют распределение яркости непосредственно в плоскости

излучающей поверхности источника света (СИД, торец оптического волокна и т. п.), а в дальнем поле — на расстоянии [122]

$$l > b^2/\lambda,$$

где l — расстояние от источника излучения до фотодетектора; b — размер источника излучения; λ — длина волны излучения.

Метод видеодиагностики включает выделение исследуемого сечения светового пучка, регистрацию изображения с преобразованием оптического сигнала в электрический, преобразование электрического сигнала из аналоговой формы в цифровую, расчеты параметров и анализ изображения по этим параметрам [8].

Здесь и далее под изображением будем понимать наблюдаемую, а также записанную и хранимую в цифровом виде световую картинку независимо от того, в каких условиях, ближнего или дальнего поля, она формировалась.

Как правило, первую из перечисленных выше операций выполняют с помощью микроскопа с короткофокусным объективом. Перемещая объектив микроскопа вдоль оптической оси, можно настроиться, например, на выходной торец оптического волокна либо на сечения, расположенные как на небольшом удалении от торца, так и на некоторой глубине внутри волокна. При этом не следует забывать о возможных ограничениях, вносимых входной апертурой и диаметром зрачка объектива микроскопа.

Для регистрации изображения используют телевизионную камеру. Современные телевизионные передающие трубки, такие, как видикон, ультрикон и другие, отличаются высокой чувствительностью ($1,5 \text{ мВт/см}^2$ — для них уже насыщение), хорошей геометрической линейностью сигнала (до 99,5 %). Отношение сигнал/шум у них достигает 50 дБ. К тому же, диапазон их спектральной чувствительности распространяется в инфракрасную область до $1,5\ldots 2 \text{ мкм}$, что очень важно в применении к волоконной технике. Высокая чувствительность телевизионной передающей трубки требует принятия мер по защите ее от повреждения избыточной световой мощностью. Иногда защиту обеспечивают введением специальных цепей в схему питания трубки, а в более простом варианте — перед телевизионной камерой устанавливают светофильтры. Использование диафрагмы при работе в ближнем поле нежелательно, так как возможно ограничение входной апертуры.

Требования к аналого-цифровому преобразователю определяются особенностями телевизионного сигнала и разрешением, которое необходимо иметь при последующем анализе изображения. Частоту оцифровки не имеет смысла делать выше 13 МГц, что приблизительно равно удвоенной максимальной передаваемой частоте в телевидении. Разрядность аналого-цифрового преобразователя обычно берут от 3 до 8. В частности, тремя разрядами ограничиваются при псевдocolоризации изображения с разбивкой всего диапазона яркости излучения на восемь градаций.

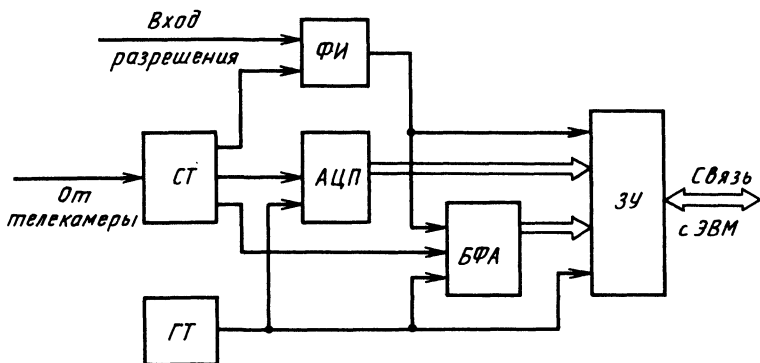


Рис. 68. Схема преобразователя телевизионного кадра в установке для видеодиагностики:

ФИ—формирователь импульсов; СТ—селектор телевизионных сигналов; АЦП—аналого-цифровой преобразователь; БФА—блок формирования адреса; ЗУ—запоминающее устройство; ГТ—тактовый генератор

Перед оцифровкой из телевизионного сигнала выделяют информационную часть, кадровые и строчные синхроимпульсы.

Преобразователь телевизионного кадра в цифровую, готовую для обработки на ЭВМ форму (рис. 68) содержит следующие блоки:

формирователь импульсов ФИ, который по сигналу на входе разрешения пропускает на свой выход только один импульс из серии поступающих на второй вход;

селектор СТ, выделяющий из поступающего на его вход стандартного телевизионного сигнала кадровые и строчные синхроимпульсы, а также информационный сигнал;

аналого-цифровой преобразователь АЦП, который преобразует информационный сигнал из аналоговой формы в цифровую;

запоминающее устройство ЗУ, используемое для хранения оцифрованного изображения с целью последующей обработки на ЭВМ;

блок формирования адреса БФА, который по сигналам синхронизации формирует адрес записи очередного байта информации от АЦП;

генератор тактовых импульсов ГТ, синхронизирующий работу АЦП, БФА, и запись в ЗУ.

Преобразователь работает следующим образом. По сигналу на входе разрешения формирователь импульсов ФИ пропускает на свой выход очередной кадровый синхроимпульс от селектора, на вход которого поступает видеосигнал от телекамеры. Этот синхроимпульс переключает счетчики блока формирования адреса БФА в исходное состояние, а также обнуляет содержимое ЗУ. Строчный синхроимпульс от селектора устанавливает счетчик БФА, отвечающий за последовательную запись точек телевизион-

ной строки, в исходное состояние и изменяет содержимое счетчика строк на единицу. Импульсы, поступающие от ГТ, с помощью БФА последовательно переключают адреса ячеек ЗУ и дают разрешение на запись. С приходом следующего строчного синхроимпульса начинается запись следующей строки телевизионного кадра, и так до переполнения счетчика строк в БФА. В результате в ЗУ будет записано оцифрованное изображение, которое может быть считано для дальнейшей обработки на ЭВМ.

Решение задач по обработке цифровой информации, вычислению числовых параметров, характеризующих структуру светового пучка, может быть реализовано аппаратно либо по программе. Это зависит от используемых вычислительных средств.

Графический дисплей и графопостроитель являются непременными компонентами системы видеодиагностики. Дело в том, что структуру светового пучка, в общем случае, невозможно полностью охарактеризовать каким-либо одним числом или двумерным графиком. Особенности распределения яркости по изображению трудно заранее предугадать, чтобы заложить их поиск и распознавание в программу обработки видеogramм. Однако, визуально оценив графическое изображение (цветовую или квазитрехмерную видеogramму), можно, по крайней мере, определить направление, в котором следует проводить анализ.

Как отмечалось выше, при трехразрядной оцифровке видеосигнала, точнее — информационной его части, получают разбику заданного диапазона изменения яркости излучения на восемь интервалов. Присвоение каждому интервалу яркости своего цветового кода и отображение затем на экране дисплея псевдоколеризованного изображения сечения пучка света позволяет осуществлять визуальный анализ структуры по сечению пучка.

Количественная характеристика распределения яркости света по сечению пучка может быть получена путем определения, на видеogramме относительных размеров участков площади, окрашенных при псевдоколеризации в тот или иной цвет. Результаты такого расчета обычно представляют гистограммой, пример которой приведен на рис. 69 (см. цв. вкладку).

При оси абсцисс на гистограмме приводятся «столбики», окрашенные в те же цвета, что и участки на псевдоколеризованной видеogramме, соответствующие различным интервалам значений яркости света. Высота каждого «столбика» на гистограмме отображает относительную суммарную площадь участков сечения пучка света, имеющих ту или иную яркость. Недостатком такого рода расчетов является то, что цвет, характеризующий нижний интервал яркости (0...12,5 %) на псевдоколеризованной видеogramме, одинаков для всех малоосвещенных (в том числе фоновых) участков видеogramмы. Это не позволяет выделить на видеogramме относительно неяркие, но в то же время играющие существенную роль точки анализируемого светового пучка.

Максимальные требуемые для расчетов значения пространственной частоты дискретизации и разрядности оцифровки изображения на видеограмме ограничены. Так, частота дискретизации ограничивается при изучении структуры светового пучка в ближнем поле значением длины волны излучения, которое может быть зарегистрировано видиконом, а при изучении в дальнем поле с получением видеограммы непосредственно на экране (без применения проецирующей оптики) — размером источника излучения, например поперечным сечением световода. Максимальная разрядность оцифровки будет зависеть от отношения сигнал/шум видеосигнала. При больших значениях отношения сигнал/шум разрешающая способность метода будет, в конечном итоге, определяться линейностью и стабильностью характеристик телевизионной передающей трубки.

Расчет параметров видеограмм сводится к нахождению двумерных зависимостей, наиболее полно характеризующих структуру светового пучка. К простейшим параметрам относятся следующие: распределение интегральной мощности излучения по уровням яркости — яркостное распределение мощности излучения; зависимость суммарной мощности излучения в точках, равноудаленных от центра сечения светового пучка, от значения этого удаления (для ближнего поля) — радиальное распределение мощности излучения; зависимость суммарной мощности излучения в точках, соответствующих данному углу между направлением распространения световых лучей и оптической осью, от размера данного угла (для дальнего поля) — угловое распределение мощности излучения; распределение интегральной мощности излучения по секторам круга, построенного из центра изображения, — осевое распределение мощности излучения.

Яркостное распределение мощности излучения подсчитывают суммированием значений интенсивности в точках изображения, имеющих одинаковую яркость. Оно отличается, прежде всего, простотой расчетов и отражает наличие или отсутствие пиков в структуре изображения, вклад этих пиков в интегральную мощность излучения. Изменение этой характеристики свидетельствует о перераспределении энергии по сечению светового пучка или между модами в световоде (но не об обмене ею). Производным параметром от яркостного распределения мощности излучения является зависимость суммарной площади участков изображения, все точки в которых имеют одинаковую яркость, от значения этой яркости. Для вычисления указанной зависимости достаточно вклад каждого уровня яркости в интегральную мощность излучения разделить на значение данного уровня. Полученная зависимость будет характеризовать равномерность свечения, либо однородность диаграммы направленности излучения исследуемого объекта.

Радиальное распределение мощности излучения подсчитыва-

ют суммированием значений интенсивности излучения в точках изображения, расположенных на одинаковом расстоянии от физического (по смыслу) центра изображения. Знание радиального распределения необходимо при рассмотрении условий стыковки различных элементов волоконно-оптической линии, в частности, оно помогает определить значение допустимого поперечного рас- согласования элементов в месте стыка.

Угловое распределение мощности излучения подсчитывают аналогично радиальному. Отличие только в физическом смысле расстояния между точками изображения. Если для радиального распределения это расстояние исчислялось как пространственное и измерялось, например, в микронах, то для углового распределения оно измеряется в радианах или градусах. Угловое распределение для световода со ступенчатым профилем показателя преломления — это фактически проинтегрированное по азимутальным индексам модовое распределение. С его помощью можно определить направление перекачки энергии между модами различного порядка, например, в результате разнообразных внешних воздействий на световод. Модовое распределение и его изменения — весьма важные характеристики. Они позволяют прогнозировать поведение светового пучка при прохождении его по световодной линии.

Интегрирование яркостного, радиального или углового распределения позволяет определить значение общей мощности излучения в световом пучке.

Для расчета осевого распределения мощности излучения необходимо разбить изображение с помощью диаметральных сечений на ряд секторов и затем в каждом секторе просуммировать значения мощностей излучения во всех точках. Полученные данные, как ясно из самого названия, будут отражать осевую симметрию пространственных или угловых характеристик исследуемого пучка света. Совместно с радиальным или угловым осевое распределение укажет на местоположение отдельных периферийных ярких пятен в сечении светового пучка.

На рис. 70, *а* и *б* (см. цв. вкладку), иллюстрирующих принципы расчетов соответственно радиального (углового) и осевого распределения мощности излучения, точками представлен массив данных, в котором записана оцифрованная структура светового пучка, где O — физический центр изображения. Суммируются только точки, входящие в заштрихованные области. Фактически радиус кольца r измеряется числом точек массива, но с помощью калибровочных множителей может быть переведен, например, в микроны или градусы. Подсчеты ведутся для всевозможных значений радиуса r и угла α при фиксированных ширине кольца и растворе сектора.

В связи с пространственной дискретностью отсчетов яркости изображения, яркостное, радиальное, угловое и осевое распре-

деления мощности излучения часто носят весьма неравномерный характер, что затрудняет их анализ и использование. Для исправления положения можно воспользоваться следующими приемами: суммировать амплитуды точек, входящих в достаточно широкие интервалы значений яркости, радиуса или угла; усреднять полученные значения с учетом соседних точек; строить интегральные графики зависимостей, т. е. с накоплением значений мощности излучения.

В качестве примера, на рис. 71, *а* и *б* (см. цв. вкладку) изображены снятые в ближнем поле цветовая и квазитрехмерная видеограммы излучения, выходящего из волоконно-оптического смесителя. Видеограммы дают ясное представление о качестве работы смесителя: видны неравномерности распределения яркости излучения по поверхности выходного торца. Результаты расчета параметров смесителя изображены в виде графиков на рис. 72, *а—в*. Радиальное распределение мощности излучения (рис. 72, *б*) подсчитывалось суммированием не внутри колец, а внутри кругов различного радиуса. Это часто бывает полезным при практическом применении расчетов, так как показывает размеры центральной области светового пучка, в которой сконцентрирована основная доля мощности излучения.

Ясно, что получением данных об описанных выше параметрах не исчерпываются возможности оценки структуры светового пучка. Существуют значительно более трудоемкие задачи, требующие быстродействующих вычислительных средств, как, например, пространственно-частотный анализ изображения, позволяющий сразу в достаточно большом объеме выявить особенности изображения. Необходимо также учесть, что в большинстве случаев важны не столько сами параметры и характеристики, сколько их изменение (во времени, от сечения светового пучка к сечению, вследствие воздействия различных возмущающих факторов и т. д.).

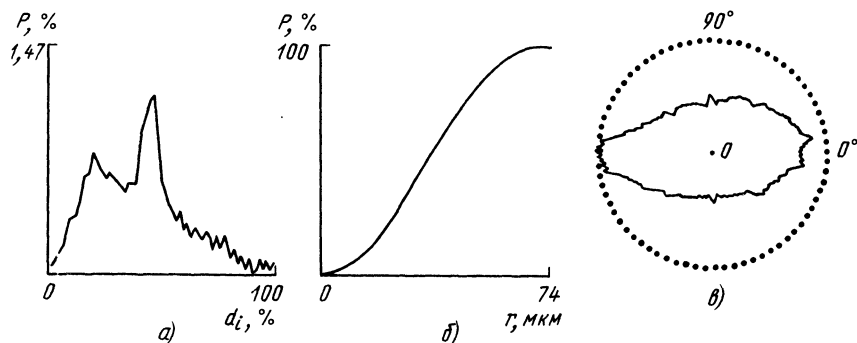


Рис. 72. Распределение мощности излучения в плоскости выходного торца волоконно-оптического смесителя:

а—яркостное; *б*—радиальное; *в*—осевое

Как уже указывалось, в лучших существующих передающих телевизионных трубках отношение сигнал/шум достигает 50 дБ. Иногда для трубок этот параметр может снижаться до 35... 40 дБ. При наблюдении изображения на экране монитора данный факт не имеет особого значения, вследствие визуального усреднения многих кадров. Однако в случае необходимости цифровой обработки изображения возникает серьезная проблема снижения уровней шума.

Специально для повышения качества изображения могут быть использованы дополнительные средства вычислительной техники. Так, например, автоматическая интерактивная система анализа изображений IBAS помимо основного микропроцессора содержит специальный матричный процессор, совершающий до восьми миллионов операций в секунду.

К основным операциям по обработке изображения можно отнести следующие [36]:

растяжение или сжатие объектов двоичного изображения с помощью так называемых структурных элементов (совмещение обеих операций позволяет исключить мелкие детали изображения);

дискриминация, в результате которой все элементы изображения, имеющие яркость выше или ниже заданного порога, становятся либо белыми, либо черными;

медианная фильтрация, в процессе которой матрица, имеющая нечетный размер не более 15 точек, перемещается по изображению от точки к точке, причем значение яркости в центральной точке пересчитывается с учетом значений яркости соседних точек;

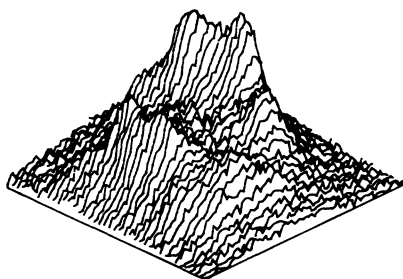
псевдоколоризация.

На практике хорошие результаты по снижению уровня шума дает медианная фильтрация в ее простейшей реализации. Амплитуда (яркость) в каждой точке изображения тогда вычисляется по формуле

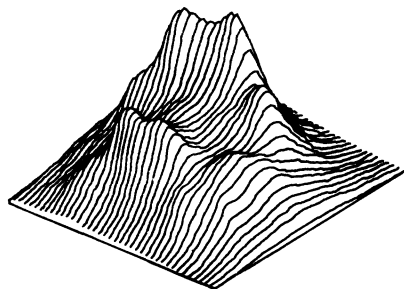
$$d'_i = (d_i + d_{i-j} + d_{i+j})/3,$$

где d'_i — новое значение амплитуды в i -й точке; i — текущий номер точки; d_i — старое значение амплитуды в i -й точке; j — степень разрежения отсчетов цифрового фильтра, принимает фиксированные значения в диапазоне от 1 до 7.

В процессе фильтрации при конкретном значении j сначала последовательно перебираются точки во всех строках, а затем и во всех столбцах изображения. Операцию можно несколько раз повторять как при одинаковых значениях j , так и меняя их. От значения индекса j зависит диапазон отфильтровываемых пространственных частот. Для достижения максимального эффекта необходимо сочетать четные и нечетные значения j .



а)



б)

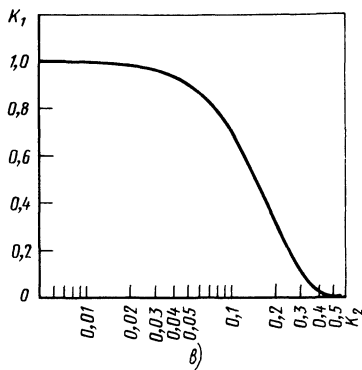


Рис. 73. Фильтрация шума при обработке видеogramм:

а—сильно зашумленная видеogramма; б— видеogramма после двукратной фильтрации со степенью разрежения отсчетов цифрового фильтра $j=1$; в— амплитудно-частотная характеристика примененного цифрового фильтра (K_1 — коэффициент пропускания фильтра; K_2 — отношение частоты сигнала к частоте оцифровки)

На рис. 73, а показана неотфильтрованная видеogramма. Аддитивный шум, амплитуда которого в данном случае составляет 25 мВ, полностью маскирует особенности распределения яркости по сечению светового пучка. После двукратной фильтрации изображения с разрежением $j=1$ высокочастотный шум практически исчезает и видеogramма приобретает вид, пригодный для анализа (рис. 73, б). Амплитудно-частотная характеристика примененного цифрового фильтра изображена на рис. 73, в. По оси абсцисс графика отложено отношение K_2 частоты сигнала к частоте оцифровки, а по оси ординат — коэффициент K_1 пропускания фильтра.

Если требуется найти изменение распределения яркости от одного изображения к другому, то фильтрацию рекомендуется проводить после вычисления разности амплитуд в точках этих двух изображений, уменьшив тем самым затраты времени без потери качества обработки информации. Более того, предварительная фильтрация может только ухудшить результат, внося дополнительные потери в пространственные частоты исследуемого распределения яркости.

Рассмотрим возможности медианной фильтрации на примере изучения влияния изгибов на модовое распределение в кабеле типа «кварц—кварц» со ступенчатым профилем изменения показателя

теля преломления. Исходная видеограмма, снятая в дальнем поле, представлена на рис. 74, *а*. После вычитания видеограмм (исходной из результирующей, которая отражает измененное изгибами распределение мод) информационный сигнал оказался ниже уровня шума (рис. 74, *б*). Простое усиление сигнала в данном случае нецелесообразно (рис. 74, *в*). Однако, если последовательно профильтровать изображение с разрежениями отсчетов $j=1, 2, 3$ и 4, то после усиления видеограмма приобретает окончательный, удобный для визуального и количественного анализа вид (рис. 74, *г*). Таким образом, становится очевидным, что изгибы вызвали увеличение энергии мод низшего порядка и потерю части энергии модами высшего порядка. Общее усиление сигнала в процессе обработки изображения в рассматриваемом случае составило 31,4 дБ.

Усреднение значений амплитуд в каждой точке по двум, трем и более изображениям всегда целесообразно. Это связано с тем, что сложение (или вычитание) шума приводит к повышению доли высоких частот в спектре шума. Кроме того, в спектре реального сигнала может быть низка доля низкочастотного шума. В этом случае, фильтрация с меньшими значениями индекса j

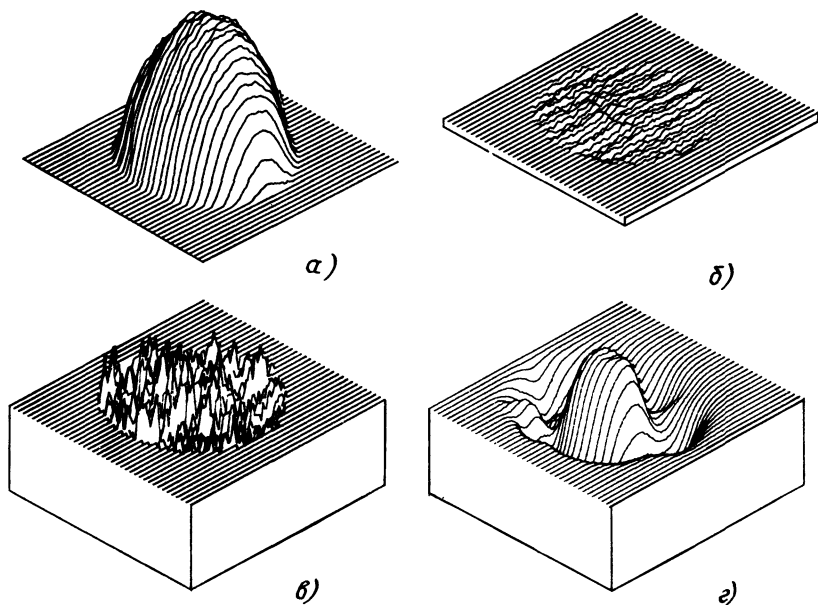


Рис. 74. Изменение распределения мод по поперечному сечению одноволоконного кабеля типа «кварц—кварц» при изгибе кабеля:

а—видеограмма распределения мод на выходе кабеля до изгиба; *б*—результат поточечного вычитания видеограмм распределения мод на выходе изогнутого и неизогнутого кабеля; *в*—то же, что и (*б*), после усиления; *г*—то же, что и (*в*), после фильтрации и повторного усиления

позволит выделить на фоне шума более мелкие, ранее скрытые детали изображения.

Шероховатость Q изображения, т. е. усредненное абсолютное значение третьей производной в каждой точке яркостного профиля (вдоль какой-либо строки или какого-либо столбца) изображения, рассчитывают по следующей формуле:

$$Q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-3k} |(d_i - d_{i+k}) - 2(d_{i+k} - d_{i+2k}) + (d_{i+2k} - d_{i+3k})|,$$

где N — число точек в столбце или строке массива; d_i — амплитуда в i -й точке; k — индекс, отражающий выбор контролируемых пространственных частот, который принимает фиксированные значения от 1 до 7, $k \ll N$. В сумму Q для повышения информативности целесообразно включать только точки перегиба.

Для оценки эффективности методов обработки и фильтрации изображения можно ввести величину относительной шероховатости

$$Q_r = (Q'/Q_0) 100\%,$$

где Q_0 и Q' — значения функции Q до и после обработки.

В табл. 8 приведены значения Q_r , рассчитанные по результатам усреднения нескольких сигналов, а в табл. 9 по результатам фильтрации одного и того же исходного сигнала с различными разрежениями отсчетов j . Используемый для расчетов шу-

Таблица 8

Число усредняемых сигналов	Относительная шероховатость Q_r , %				
	k				
	1	2	3	4	5
2	65,62	72,77	61,47	68,78	69,73
3	55,59	58,05	55,51	56,13	59,00

Таблица 9

Степень разрежения отсчетов	Относительная шероховатость Q_r , %				
	k				
	1	2	3	4	5
1	16,47	28,50	12,99	17,51	18,43
2	74,43	43,27	85,00	56,73	76,53
1—4	1,03	1,36	0,50	0,83	0,82
3—6	2,67	4,04	1,52	3,43	3,25

мовой сигнал был моделирован на ЭВМ. Описанный алгоритм фильтрации требует определенного числа точек для вхождения в режим. Значения Q_r , указанные в табл. 8 и 9, подсчитывались при изменении i от 20 до 492 при общем количестве точек 512 и амплитуде шума, равной 100 произвольных единиц.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СВЕТОВОГО ПУЧКА В БЛИЖНЕМ И ДАЛЬНОМ ПОЛЯХ ПРИ ВИДЕОДИАГНОСТИКЕ

Наиболее просто реализуется исследование структуры светового пучка в ближнем поле. Фактически метод ближнего поля заключается в наблюдении распределения яркости излучения по площади поперечного сечения пучка с помощью отображающей оптики, например микроскопа. Для четкого выделения этого сечения объектив микроскопа должен быть достаточно короткофокусным.

Необходимо следить, чтобы апертура объектива была не меньше числовой апертуры исследуемого оптического волокна. Лучи, угол распространения которых больше значения угловой апертуры волокна, можно не регистрировать, так как они соответствуют модам оболочки и вытекающим модам и, как правило, не оказывают влияния на работу волоконно-оптической системы в целом.

Визуальному наблюдению в ближнем поле практически не мешает наличие мелких дефектов на выходном торце оптического волокна. Однако при необходимости проведения количественных расчетов задача идентификации дефектов часто становится неразрешимой.

Целью применения метода дальнего поля в видеодиагностике является регистрация распределения мощности излучения среди лучей, распространяющихся под различными углами к оптической оси данного участка волоконно-оптической линии [122]. Если использовать фокусирующую линзу как преобразователь углового распределения излучения в пространственное, в ее фокальной плоскости получится распределение яркости, в точности соответствующее исходному угловому распределению в исследуемом пучке. Задача тем самым сводится к регистрации изображения в ближнем поле с наводкой объектива микроскопа на фокальную плоскость линзы. Однако расчеты показывают, что используемая линза должна иметь очень короткое фокусное расстояние, угловая апертура объектива должна превосходить расходимость исследуемого пучка света не менее чем на 20 %, а глубина резкости объектива может оказаться недостаточно малой. Изготовить высококачественную короткофокусную линзу также не просто.

Установка тонкого матового экрана в фокальной плоскости линзы и наблюдение на обратной стороне этого экрана картины, отображающей структуру излучения, практически не решают задачи. Сравнительно плотный, белый материал экрана не пропус-

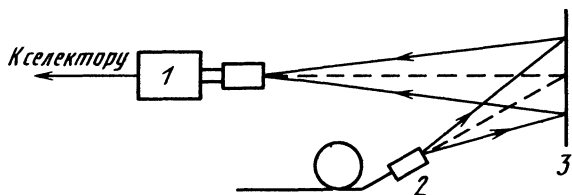


Рис. 75. Схема установки для наблюдения структуры пучка света в дальнем поле:

1 — телевизионная камера с длиннофокусным объективом; 2 — источник излучения (в данном случае — выходной торец волоконного световода, через который распространяется свет); 3 — экран

тит нужного количества света к микроскопу и телекамере. Поэтому целесообразно располагать регистрирующую телекамеру с обычным длиннофокусным объективом по ту же сторону от экрана, что и исследуемый источник излучения. Направлять свет на экран нужно под углом (рис. 75). Конечно, регистрируемое таким образом распределение яркости света окажется пространственно искаженным, но его можно исправить с помощью ЭВМ (рис. 76, а и б, см. цв. вкладку).

Исследуемый источник света должен быть расположен на расстоянии $l \gg b/\text{tg}(\alpha)$ от экрана, где l — расстояние до экрана; b — размер источника излучения; α — угловая апертура волокна или расходимость светового пучка. Если приведенное неравенство превратить в равенство, то значения α определит угловое разрешение метода.

При исследовании структуры светового пучка, выходящего из оптического волокна, методом дальнего поля дефекты обработки торца волокна оказываются незаметными на видеограмме. Однако они могут вносить весьма значительные искажения. Сколы, трещины в волокне, так же как сферичность, скос торца, отклоняют лучи света, изменяют распределение мощности излучения по углам распространения. Иногда, правда, эти изменения используют. Так, например, дефекты, расположенные внутри волокна, выполняют роль модового смесителя.

Модовое распределение в оптических волокнах с градиентным профилем показателя преломления может быть вычислено на основании результатов, полученных как методом ближнего поля, так и методом дальнего поля [88].

Видеодиагностика — это, прежде всего, диагностика реально существующих волоконно-оптических линий и компонентов. При ее проведении основное внимание должно быть уделено качеству обработки и очистки выходных торцов оптических элементов вблизи исследуемого сечения светового пучка.

Примеры использования видеограмм. 1. Кабель типа «кварц — кварц» диаметром 3 мм (вместе с защитной оболочкой) и длиной 15 м наматывали (10 витков) начальной своей частью на стержни (так называемые мандрелы) диаметром 64, 40 и 20 мм. Источником излучения являлся светонизлучающий диод.

На рис. 77, *а—в* (см. цв. вкладку) представлены видеограммы изменения распределения яркости излучения на выходе кабеля для мандрелов различных диаметров. За исходное во всех случаях было принято распределение яркости при отсутствии мандрела. Наблюдение велось в дальнем поле. При анализе видеограмм за нулевой уровень принимался уровень «плато», так как при изгибе кабеля имело место как увеличение, так и уменьшение амплитуды в различных участках изображения. На рис. 77, *а—в* видно, что с уменьшением диаметра мандрела увеличивается отток энергии из мод высшего порядка. Одновременно снижается приток энергии в моды низшего порядка.

2. Производили местное надавливание на оптическое волокно типа «кварц—полимер» длиной 1 м ножом с радиусом закругления 0,5 мм. Усилие при надавливании составляло 20 Н. Источником излучения являлся светоизлучающий диод. Изучали распределение яркости излучения в плоскости выходного торца волокна (наблюдение велось в ближнем поле).

На рис. 78, *а* и *б* (см. цв. вкладку) изображены цветовые, а на рис. 78, *в* и *г* для сравнения — квазитрехмерные видеограммы, снятые до и в момент надавливания на волокно. Распределение цветов на рис. 78, *б* дано без учета общего снижения яркости излучения, которое при надавливании составляло 24,5 %. Обращает на себя внимание значительное снижение мощности излучения в приосевой части волокна. Отсутствие аксиальной симметрии в структуре светового пучка говорит о том, что, как правило, не следует ограничиваться снятием распределения яркости излучения в какой-либо одной меридиональной плоскости [88].

3. Рассматривалось изменение пятнистой картины на выходе кабеля типа «кварц—кварц» длиной 300 м при возбуждении его с помощью лазерного диода. Ширина спектра излучения лазерного диода не превышала 3 нм. Наблюдение велось в ближнем поле.

На рис. 79, *а* и *б* (см. цв. вкладку) изображены видеограммы исходной пятнистой картины и картины, измененной внешним незначительным механическим воздействием на кабель (перемещением произвольного свободного участка кабеля на 1 мм в перпендикулярном оси направлении). Подсчеты показали, что сумма абсолютных значений изменения мощности излучения в каждой точке изображения составила 22,2 % от интегральной мощности в световом пучке.

4. Видеодиагностика может принести большую пользу, в частности, при анализе функционирования светодиодов. На рис. 80 дана видеограмма, отражающая изменение распределения яркости излучения СИД в ближнем поле при увеличении тока через диод с 20 до 25 мА. Нарастание концентрации плот-

ности мощности излучения в отдельных пиках свидетельствует о возможном возникновении дефектов в данных точках.

Обычно в паспорте светодиода содержатся сведения о его электрических, динамических характеристиках и мощности излучения (при определенных значениях тока через светодиод). Видеодиагностику можно использовать в процессе выходного контроля светодиодов с целью более полного отражения в паспорте их оптических свойств. В частности, в паспорте можно указать отдельные численные параметры радиального распределения излучения на выходе светодиода или поместить простейшую видеограмму (рис. 81, см. цв. вкладку).

Световодные устройства для регистрации температуры могут состоять как из трех, так и из двух основных элементов, соединенных между собою волоконными световодами. В первом случае такими элементами являются отдельный источник излучения, датчик и фотоприемник. Во втором случае функции источника излучения и датчика могут быть совмещены. В некоторых конструкциях роль датчика может выполнять участок световодной линии, соединяющей источник излучения с фотоприемником.

Световодные устройства для регистрации температуры, рассчитанные на сравнительно невысокую точность измерений, например на $\pm 0,5 \dots 1^\circ\text{C}$, чаще всего строятся по принципу амплитудной модуляции или на основе использования модуляции состояния поляризации света. Наиболее прецизионные устройства содержат датчики с фазовой модуляцией.

Рассмотрим разработанные к настоящему времени световодные устройства для регистрации температуры, их конструкции и принципы действия.

1. УСТРОЙСТВО С ДАТЧИКОМ — АТТЕНЮАТОРОМ, МОДУЛИРУЮЩИМ АМПЛИТУДУ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕТА, ПРОХОДЯЩЕГО ПО ОПТИЧЕСКОМУ ВОЛОКНУ

Аттенюатором в устройстве, приведенном на рис. 82, служит полированная пластинка полупроводникового соединения, например CdTe или GaAs, толщиной около 0,5 мм для поликристаллического теллурида кадмия или 0,2 мм для арсенида галлия. Размеры площади аттенюатора $1 \times 1 \text{ мм}^2$. Может применяться квадратный аттенюатор или выполненный в виде круглой шайбы с приблизительно такой же площадью круга. Аттенюатор помещается внутрь короткого отрезка трубки из нержавеющей стали, в свою очередь служащей муфтой, соединяющей два отрезка стеклянного капилляра, в которые введены концы оптических световодов, как показано на рис. 82, б. Концы световодов приклеены прозрачным полимерным клеем к аттенюатору. В устройстве внешним источником излучения служит AlGaAs — свето-

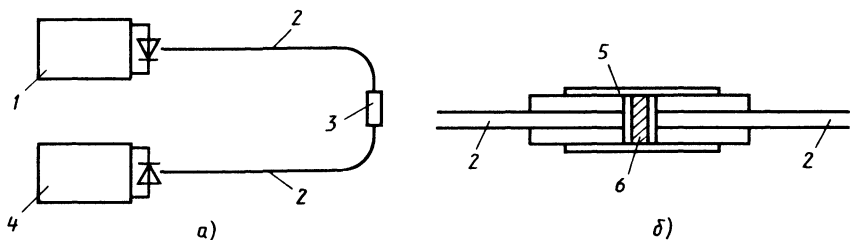
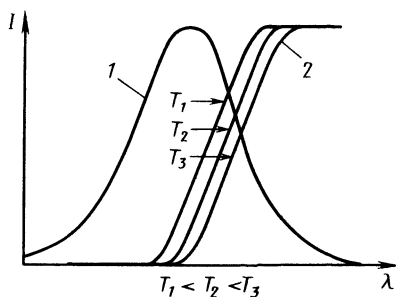


Рис. 82. Световодное устройство с внешним аттенуатором для измерения температуры: а—схема устройства; б—конструкция датчика; 1—оптический передатчик; 2—волоконный световод; 3—датчик; 4—фотоприемник; 5—трубка из нержавеющей стали; 6—полупроводниковый аттенуатор

излучающий диод с шириной спектра около 150 нм. В качестве фотодетектора используется обычный лавинный полупроводниковый фотодиод.

Способность датчика с полупроводниковым аттенуатором регистрировать температуру обусловлена тем, что край полосы поглощения в спектре пропускания света для многих полупроводников смещается в линейной зависимости в сторону более длинных волн при повышении температуры (рис. 83). Это смещение, характеризуемое значением $d\lambda/dT$, составляет около 0,31 нм/°С для аттенуатора из теллурида кадмия и 0,35 нм/°С — из арсенида галлия. Таким образом, применяя в качестве материалов для аттенуаторов теллурид кадмия или арсенид галлия и учитывая то, что температура плавления тефлона, используемого для наружного покрытия волоконно-оптических кабелей и отдельных волоконных световодов, близка к 300 °С, датчик описанной выше конструкции можно применять, как показывают и полученные экспериментально кривые зависимости относительного значения выходной мощности от температуры (рис. 84), с целью измерения температуры в интервале $-10...+300$ °С. Точность измерений составляет ± 3 °С, длительность одного измерения менее 2 с.

Конструкция описанного выше световодного устройства была в 1982 г. усовершенствована. В схему устройства были введены



два источника излучения (на длину волны 0,88 мкм и 1,27 мкм), питаемые от двух импульсных генераторов. Оптический датчик был выделен в отдельный блок (рис. 85), соединенный двумя отрезками

Рис. 83. Зависимость спектрального распределения световодного устройства от температуры:

1—спектральное распределение; 2—край полосы поглощения

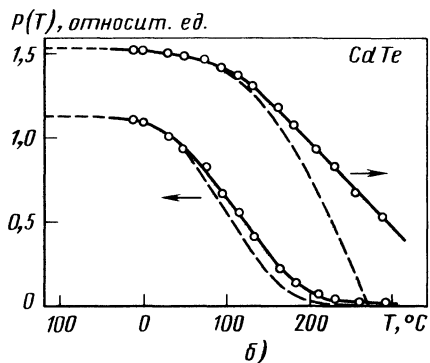
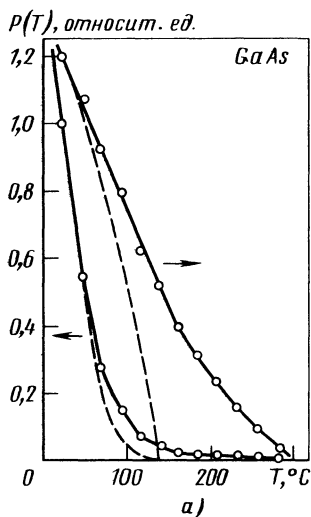


Рис. 84. Зависимости относительной мощности излучения на выходе датчика от температуры (— — — — расчетные, — — — — экспериментальные): а — датчик на основе GaAs; б — датчик на основе CdTe

пассивных волоконных световодов через разъёмные соединители соответственно со светоизлучающими диодами и лавинным фотодиодом. Точность измерения температуры этим прибором достигала $\pm 1^\circ\text{C}$ в интервале $-10 \dots +300^\circ\text{C}$ даже при флуктуациях значения интенсивности оптического сигнала более $\pm 20\%$.

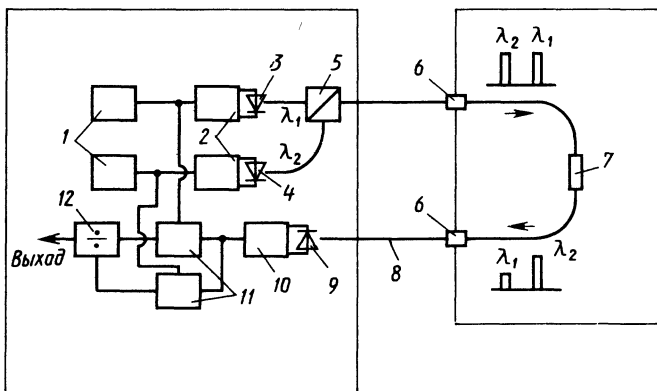


Рис. 85. Оптическая система для измерения температуры, использующая два светоизлучающих диода с разными длинами волн излучения ($\lambda_1 = 0,88$ мкм; $\lambda_2 = 1,27$ мкм): 1 — импульсный генератор; 2 — схема управления СИД; 3 — СИД на основе AlGaAs; 4 — СИД на основе InGaAsP; 5 — оптический смеситель; 6 — оптический датчик; 8 — оптическое волокно; 9 — лавинный фотодиод на основе Ge; 10 — оптический приемник; 11 — усилитель; 12 — делитель

2. ДАТЧИК С ФИЛЬТРОМ ИЗ НИОБАТА ЛИТИЯ

Кристаллы ниобата лития, вырезанные ориентированно по y -сечению, широко применяют в приборах, основанных на использовании поверхностных акустических волн, например акустооптических переключателях. Ниобат лития LiNbO_3 — ферроэлектрик, кристаллы его обладают сильным двойным лучепреломлением. Явление двойного лучепреломления заключается в раздвоении световых лучей при прохождении через анизотропную среду, происходящем вследствие зависимости показателя преломления от направления электрического вектора световой волны. При распространении световой волны в анизотропном теле она распадается на две компоненты с взаимно перпендикулярными плоскостями поляризации. В одноосных кристаллах, к которым относятся и кристаллы ниобата лития, одна из компонент имеет плоскость поляризации, перпендикулярную плоскости, проходящей через направление луча и оптическую ось кристалла. Такая плоскость именуется главным сечением, а рассматриваемая компонента световой волны — обыкновенным лучом. Скорость распространения в кристалле обыкновенной волны, а следовательно, и значение n_o показателя преломления обыкновенного луча не зависят от направления распространения света.

Вторая компонента световой волны, называемая необыкновенным лучом, имеет плоскость поляризации, перпендикулярную плоскости поляризации обыкновенного луча. Скорость распространения и показатель преломления n_e необыкновенного луча зависят от направления распространения света в кристалле. Для необыкновенного луча законы преломления света отличаются от законов, установленных для обыкновенного луча, например, плоскость падения и плоскость, в которой лежит преломленный луч, могут быть различными. При распространении света вдоль оптической оси кристалла $n_o = n_e$ и двойное лучепреломление отсутствует. Анизотропия, приводящая к двойному лучепреломлению, может быть естественной, как это наблюдается в кристаллах ниобата лития и ряде других кристаллов, или искусственно вызванной, например, наложением электрического поля, действием механических напряжений и пр. Точка Кюри для ниобата лития лежит около 1200°C , а оптические потери при прохождении света через фильтр-пластину ниобата лития зависят не только от толщины фильтра, но и от значения разности показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей и длины волны света в соответствии с соотношением

$$I = I_0 \sin^2 \left(\frac{\pi(n_o - n_e) d}{\lambda} \right),$$

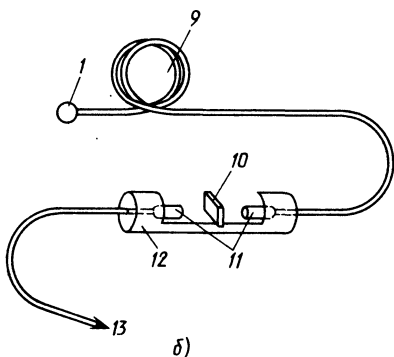
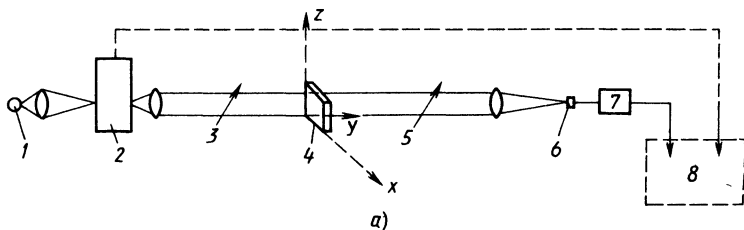


Рис. 86. Схемы приборов для регистрации температуры на основе кристалла LiNbO_3 :

а—с использованием в оптическом тракте монохроматического света; **б**—с использованием в оптическом тракте белого света; 1—источник белого света; 2—монокроматор; 3—поляризатор; 4—датчик-кристалл ниобата лития; 5—анализатор; 6—кремниевый фотодиод; 7—усилитель; 8—записывающее устройство; 9—волоконно-оптический кабель с диаметром сердцевинны 200 мкм; 10—датчик—«сэндвич» из кристалла ниобата лития, расположенного между скрещенными поляризатором и анализатором; 11—градиентные стержневые линзы; 12—латунный корпус; 13—оптический выход к дифракционному монокроматору с кремниевым фотодиодом

где I — интенсивность излучения, прошедшего через фильтр; I_0 — интенсивность излучения до прохождения им фильтра; d — толщина пластины ниобата лития; λ — длина волны света.

Так как значение разности показателей преломления ($n_o - n_e$) зависит от температуры кристалла ниобата лития, фильтр, обладающий двойным лучепреломлением, может быть использован для создания прибора, регистрирующего температуру (рис. 86, *а* и *б*).

Как показано авторами, исследовавшими температурные датчики с кристаллами ниобата лития [94], спектр пропускания светофильтра, имеющего высокое двойное лучепреломление, с увеличением температуры смещается в сторону более высоких частот (рис. 87). При этом особый интерес с точки зрения возможности измерения датчиком температуры имеют два параметра: расстояние $\Delta\nu$ между двумя соседними минимумами на спектральной кривой и положение ν_p для p -го минимума. Значение $\Delta\nu$ определяется по формуле

$$\Delta\nu = \frac{1}{(n_o - n_e) d}.$$

Изменение взаимного положения максимумов на спектральной кривой определяется из выражения

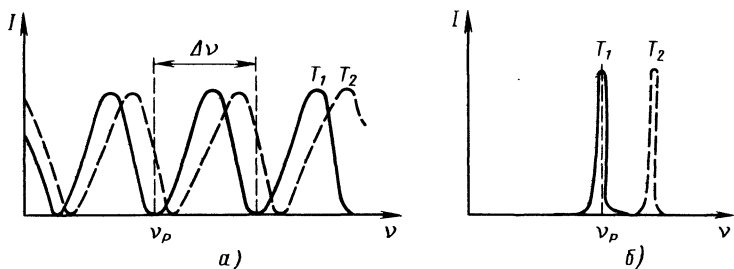


Рис. 87. Изменение спектра пропускания фильтра с двойным лучепреломлением в зависимости от температуры:
 а—периодический характер спектра пропускания фильтра; б—спектр пропускания однополосного фильтра

$$\frac{1}{\Delta\nu} \frac{\partial(\Delta\nu)}{\partial T} = \frac{1}{\nu} \frac{\partial\nu}{\partial T} = \frac{1}{(n_o - n_e)} \frac{\partial(n_o - n_e)}{\partial T} = \alpha_T.$$

По сравнению с многими кристаллами, обладающими двойным лучепреломлением, кристаллы ниобата лития характеризуются особенно высоким значением α . При точности показаний рассматриваемого датчика, составляющей около 1°C , смещение максимумов для ниобата лития будет около $0,3\text{ нм}$ в интервале изменения температуры от 20 до 180°C .

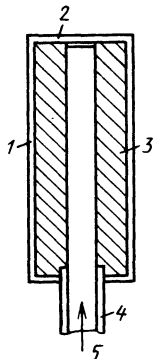
В конструкции температурного датчика, разработанного лабораторией ИЦИ «Ранкорн» (ICI «Runcorn») для промышленного применения, при протяженности световодной линии между датчиком и регистрирующим устройством, составляющей около 1 км , применялся кристалл ниобата лития в виде тонкой прослойки ($\sim 0,55\text{ мм}$) между двумя тонкими поляроидными пленками, одна из которых выполняла роль поляризатора, а другая—анализатора. При этом оптическое волокно имело сердцевину диаметром 200 мкм и числовую апертуру $0,4$. Для освещения датчика служила обычная лампа накаливания мощностью 50 Вт с вольфрамовой нитью. Из потока света, излучаемого лампой, выделялась с помощью фильтров или монохроматора область спектра со значениями $\lambda = 0,7...0,8\text{ мкм}$.

3. ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ

Волоконно-оптический медицинский термометр. К числу новых, сразу получивших широкое признание, приборов, созданных несколько лет назад для медицинской диагностики и физиотерапии, относится очень простой по своей конструкции волоконно-оптический медицинский термометр [113], схема которого и относи-

Рис. 88. Волоконно-оптический медицинский термометр:

1—капилляр; 2—отражающая поверхность; 3—жидкость с коэффициентом преломления, зависящим от температуры; 4—оболочка волокна; 5—сердцевина волокна



тельные размеры показаны на рис. 88. Кроме малых размеров, этот термометр обладает следующими важными достоинствами: нечувствительностью к действию внешних электромагнитных полей и возможностью применения в условиях строгой стерильности, так как имеющийся в нем датчик заключен в герметизированную стеклянную оболочку.

Новый термометр незаменим для контроля температуры живой ткани, подвергающейся нагреванию токами высокой частоты (ТВЧ), он обладает малой инерционностью и позволяет осуществлять непрерывную регистрацию нагрева ткани во время ее обработки ТВЧ.

Датчик термометра представляет собою короткий, длиною не более 2 см, закрытый с одного конца капилляр с внутренним диаметром 1...2 мм и наружным диаметром 1,5...3 мм, заполненный внутри жидкостью, в который введен освобожденный от оболочки конец волоконного световода. Торец сердцевины световода, имеющего диаметр сечения 300...600 мкм, отполирован и размещен таким образом, что между ним и отражающим «доннышком» капилляра имеется зазор шириною 0,1...0,25 мм. Зазор заполнен той же жидкостью, которая заполняет пространство между отрезком сердцевины волокна и внутренними стенками капилляра. Сердцевина волокна изготовлена из кварцевого стекла с показателем преломления 1,5...1,58, в то время как коэффициент преломления специально подобранного минерального масла, заполняющего капилляр, почти равен или несколько выше коэффициента преломления материала сердцевины.

При изменении температуры среды, окружающей капилляр, изменяется температура масла в капилляре и увеличивается или уменьшается коэффициент преломления этой жидкости, что естественно приводит к изменению интенсивности света, вышедшего через торец сердцевины волокна и частично возвратившегося в эту сердцевину после отражения от «доннышка» капилляра.

В описанном выше датчике используется обычное волокно типа «кварц—полимер», конец которого герметизируется, например, эпоксидным клеем. Источником света, проходящего через волокно, может быть гелий-неоновый миниатюрный лазер, а фотоприемником служит $p-i-n$ -диод. Датчик имеет четко выраженную линейную характеристику в интервале температур приблизительно от 32...33 °С до 45 °С, т. е. именно в области температур, представляющих наибольшее значение для диаг-

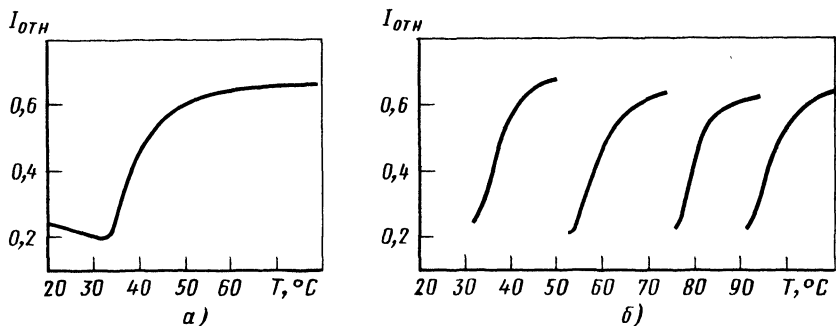


Рис. 89. Температурные характеристики датчика волоконно-оптического медицинского термометра (I_{OTN} —относительная интенсивность): а—с капилляром, заполненным маслом, специально подобранным для измерения температуры тела человека; б—сдвиги линейного участка температурной характеристики, вызванные изменением состава масла, заполняющего капилляр

ностирования человека. Вместе с тем, подбирая для датчиков различные композиции минеральных масел, отличные от масла, используемого в приборе, получившем наиболее широкое применение и предназначенного специально для медицинских целей, можно изготовить такого же типа приборы с другими значениями интервалов температур, в которых характеристика линейна (рис. 89). Чувствительность рассматриваемых датчиков, как правило, составляет около $0,1^{\circ}\text{C}$.

Флуорооптический волоконно-оптический термометр. Нечувствительность световодных датчиков к действию внешнего электромагнитного поля, свойственная описанным выше волоконно-оптическим термометрам, относится также к числу достоинств недавно разработанных флуорооптических датчиков [31]. Устройство типичного флуорооптического датчика показано на рис. 90. Источником света в датчике служит фосфоресцирующее вещество, тонкий слой которого находится на дне маленькой (длиной 5 мм, со стенками толщиной 0,25 мм и диаметром внутренней полости 0,8 мм) капсулы, в которую вставлен конец волоконного световода с сердцевинкой из кварцевого стекла диаметром 400 мкм. Фосфоресценция вещества, помещенного на дне капсулы, возбуждается прошедшим по световоду ультрафиолетовым светом, генерируемым специальной галогенной лампой с вольфрамовой нитью накаливания. Как видно из рис. 91, свет, распространяющийся от этой лампы, коллимируется линзой 5 и проходит через фильтр 6, препятствующий

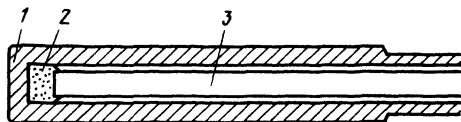


Рис. 90. Устройство флуорооптического датчика:
1—капсула; 2—фосфоресцирующее вещество; 3—кварцевый волоконный световод

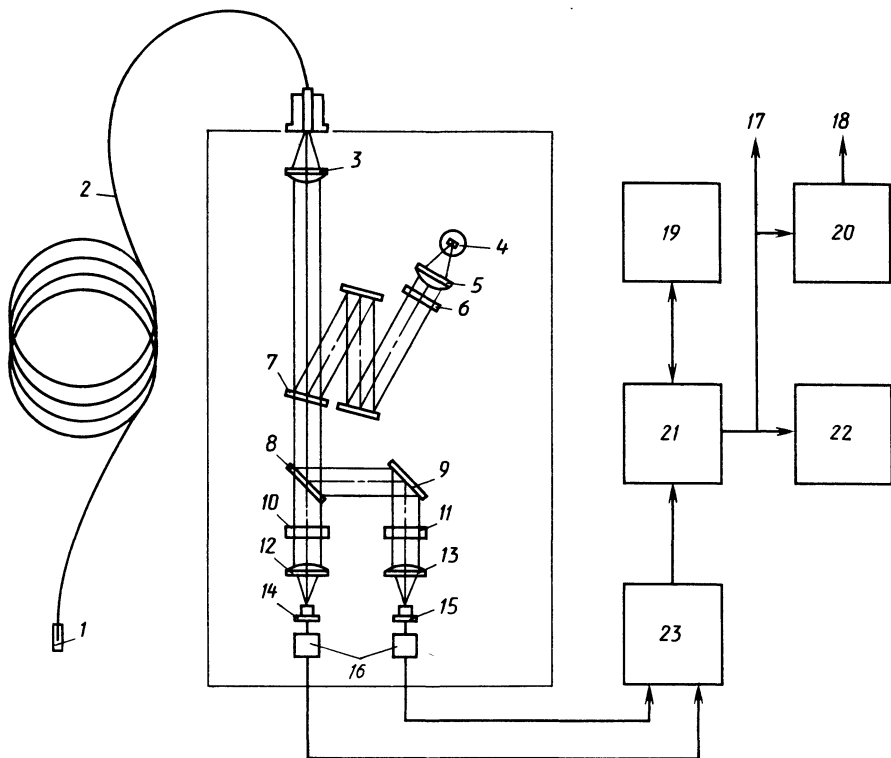


Рис. 91. Схематическое изображение флуорооптического термометра (модели 1000А и 1000В):

1—датчик; 2—волоконный световод; 3, 5, 12, 13—линзы; 4—галогенная лампа; 6, 10, 11—фильтры; 7—полупрозрачное зеркало; 8—разделитель пучка; 9—зеркало; 14, 15—детекторы; 16—предварительные усилители; 17—цифровой выход; 18—аналоговый выход; 19—запоминающее устройство; 20—цифроаналоговый преобразователь; 21—микропроцессор; 22—дисплей; 23—аналого-цифровой преобразователь с мультиплексором

дальнейшему распространению в системе длинноволнового излучения, так как наиболее интенсивное возбуждение фосфора создается поглощением в последнем света с длиной волны, лежащей в интервале $0,3...0,35$ мкм. Выделенное таким образом из спектра излучения лампы УФ-излучение, далее, после двукратного отражения, падает на полупрозрачное зеркало 7, отражаясь от которого, фокусируется линзой 3 на входной торец волоконного световода 2, чтобы в конце концов достигнуть слоя фосфоресцирующего вещества.

Интенсивность флуоресценции фосфора зависит от значения измеряемой датчиком температуры. Линейчатый спектр флуоресценции, показанный на рис. 92, состоит из нескольких групп линий (H , M и L), если в качестве фосфора применяется соедине-

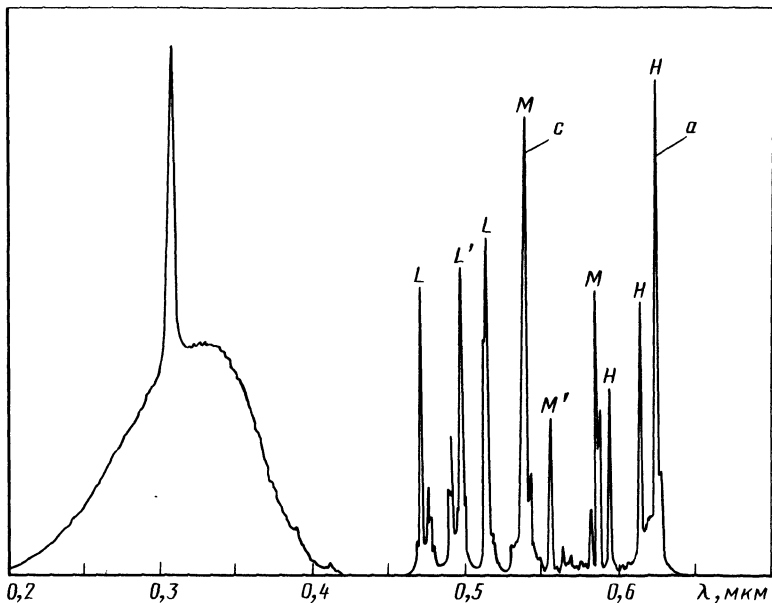
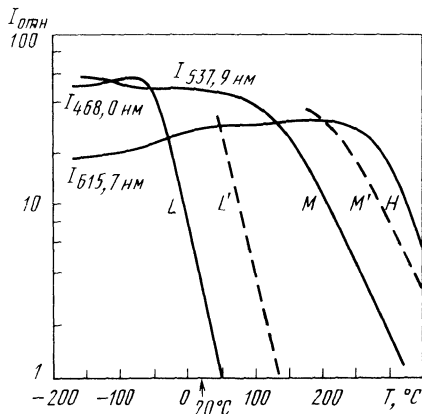


Рис. 92. Спектр флуоресценции соединения $\text{La}_2\text{O}_2:\text{Eu}$

ние $\text{La}_2\text{O}_2:\text{Eu}$. В этом спектре наибольшей интенсивностью обладают одна из линий группы H (обозначенная на рисунке буквой a и характеризующаяся длиной волны около 0,62 мкм) и одна из линий группы M (обозначенная буквой c и характеризующаяся длиной волны около 0,54 мкм). Меньшей интенсивностью, чем линии a и c обладает, при той же температуре, равной 20 °С, одна из линий группы L с длиной волны около 0,47 мкм. Интенсивность



каждой из перечисленных спектральных линий зависит от температуры (рис. 93), причем эта зависимость носит линейный характер для линии a в диапазоне температур 280...350 °С для линии c в диапазоне 150...250 °С и для линии из группы L в диапазоне — 50 °С.... + 50 °С.

Рис. 93. Зависимость интенсивности спектральных линий флуоресценции от температуры: — — — $\text{La}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Eu}$; — — — $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Eu}$

Свет, генерируемый фосфором, распространяется сначала по волоконному световоду до линзы 3 (см. рис. 91), коллимируется ею и проходит до полупрозрачного зеркала — разделителя пучка 8, причем часть пучка направляется к фильтру 10, а часть — к фильтру 11. С помощью фильтра 10 из пучка света выделяется спектральная линия *a*, а с помощью фильтра 11 — спектральная линия *c*. Детекторы 14 и 15, на которые линзами 12 и 13 фокусируются пучки света соответствующих длин волн, регистрируют интенсивность излучения с длиной волны 0,62 и 0,54 мкм, т. е. отдельно линий *a* и *c*. Полученные от детекторов 14 и 15 сигналы усиливаются, полученные значения интенсивности линий *a* и *c* преобразовываются в цифровую форму и обрабатываются с помощью микропроцессора. После этого данные о значении температуры, определяемой на основании отношения интенсивностей указанных выше линий (*c/a*) и соответствующих градуировочных таблиц, могут быть отображены на дисплее устройства или поступить на цифровой и аналоговый выходы сенсорного устройства.

За рубежом фирмой «Люкстрон» (США) серийно выпускаются две модели флуоресцентных термометров. Одна из них (модель 1000 А) рассчитана на измерение температур от 20 до 240 °С с точностью до 0,1 °С, причем к прибору может быть придан специальный датчик, понижающий нижний предел измеряемых температур до -100 °С, а другая (модель 1000 В) — на измерение температур в интервале 20...80 °С с точностью до 0,1 °С.

Описанные выше флуоресцентные волоконно-оптические термометры применяют в медицине — при контроле индукционного нагрева, в электронной промышленности — при радиочастотном плазменном травлении и плазменном напылении тонких пленок различных веществ, в установках для ядерного и электронно-спинового резонанса.

4. ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОЧЕНЬ ВЫСОКИХ И НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Большая часть волоконно-оптических датчиков, разработанных к настоящему времени и применяемых в различных отраслях промышленности и в медицине, рассчитана на измерение температур от нескольких десятков градусов Цельсия ниже нуля и не превышающих 600 °С. Сравнительно редким исключением являются так называемые высокотемпературные датчики, позволяющие измерять температуру выше 600 °С.

Типичным образцом высокотемпературного датчика может служить датчик Дилса с генерацией излучения непосредственно самим нагретым телом и регистрацией температуры по интенсивности светового потока, возникающего в нагретом теле. В этом датчике источником излучения служит помещенный в рабочую зону печи отрезок сапфирового волокна толщиной око-

ло 0,25 мм, который покрыт снаружи напыленным на него тонким (~ 10 мкм) слоем платины и имеет длину от нескольких сантиметров до 30 см [59].

При нагревании некоторого участка сапфирового волокна до температур 600...1300 °С длина волны генерируемого света (теплового излучения) на участке спектра шириной 0,1 мкм изменяется от $\sim 0,7$ до 0,6 мкм, причем повышению температуры на 1 % соответствует увеличение светового потока на 20 %. Значение общей мощности излучения на единицу длины нагретой части волновода $\Phi(\lambda)n$, Вт/м, определяется соотношением

$$\Phi(\lambda) = \frac{S_c \varepsilon_e C_1}{\lambda^5 (\exp(C_2/\lambda T) - 1)},$$

где S_c — площадь сечения нагретого тела, м²; ε_e — величина, характеризующая эмиссию нагретого вещества; C_1 — первая радиационная константа, равная $3,7418 \cdot 10^{-16}$ Вт·м²; C_2 — вторая радиационная константа, равная $1,43879 \cdot 10^{-2}$ м·°; λ — длина волны излучения, м; T — температура, К.

Температура плавления искусственно выращенного кристалла сапфира составляет 2050 °С, и рассматриваемый датчик позволяет измерять температуру, достигающую почти 2000 °С. Интенсивность теплового излучения нагретой до высоких температур части отрезка сапфирового волокна определяется с помощью фотодетектора, которым может служить фотоумножитель либо фотодиод соответствующего типа. Так как мощность излучения сапфирового волокна изменяется в зоне выхода из рабочего пространства печи наружу (предполагается, что печь снаружи окружена атмосферой, имеющей нормальную температуру, или температуру, при которой эмиссия теплового излучения волокна незначительна), критическое значение для фотометрических измерений имеет отношение длины участка L волокна, находящегося в области рабочего пространства печи, к диаметру волокна D . Эксперименты показали, что фотометрическая погрешность, равная 0,1 %, получается при $L/D = 20/1$ для температур 1000...1200 °С. Наружный торец сапфирового волокна стыковался с обычным световодом.

Для решения более сложной задачи — создания волоконно-оптического датчика для измерения низких температур недавно был разработан датчик нового типа [110], в котором используется оптическое волокно из фторидного стекла, легированного европием, обладающее достаточно высокой прозрачностью в области длин волн света между 1,8 и 2,4 мкм. Это волокно имеет сердцевину из стекла следующего состава: ZrF₄ (61,3 %) — BaF₂ (33,7 %) — GdF₃ (5,0 %). Оно дополнительно легируется ионами Eu³⁺ (0,87 %).

Легированное Eu³⁺ фторидное стекло служит термооптическим преобразователем, так как при изменении температуры

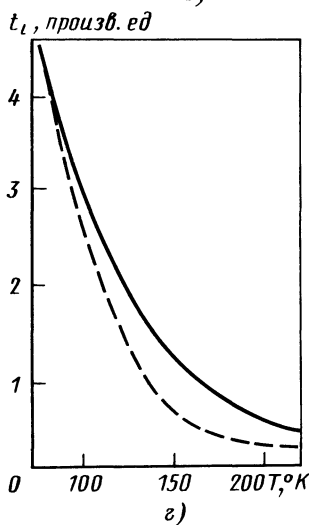
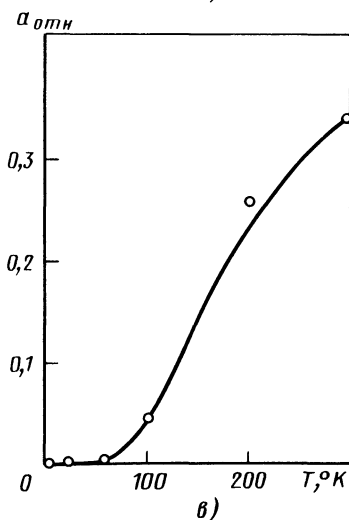
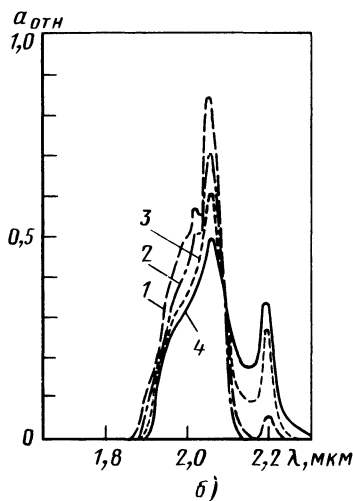
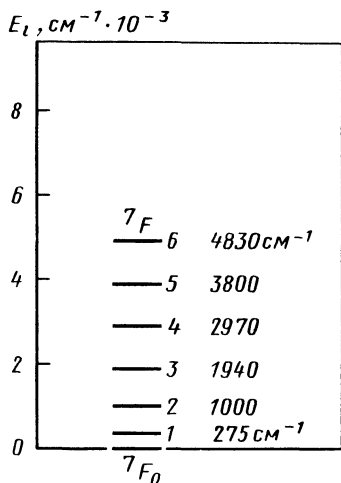


Рис. 94. Спектральные и температурные характеристики Eu^{3+} и фторидного стекла: а—энергетические уровни иона Eu^{3+} (E_e —энергия); б—спектры поглощения переходов 7F_0 — 7F_6 при разных температурах (1—4,2 К; 2—100 К; 3—200 К; 4—300 К; $a_{\text{отн}}$ —поглощение); в—зависимость поглощения света ($\lambda \approx 2,2$ мкм) ионами Eu^{3+} от температуры; г—зависимость прозрачности t_l легированного европием фторидного стекла от температуры (— — — экспериментальная; - - - - - расчетная)

оно изменяет свою прозрачность в переходе 7F_1 — 7F_6 в области длин волн света 1,8...2,3 мкм (рис. 94, а—г).

Спектры поглощения приведены на рис. 94, б для температур 4,2...300 К согласно экспериментам, выполненным для фторидного стекла, содержащего 0,87 % ионов Eu^{3+} . Они позволили

выявить пик поглощения света с длиной волны 2,07 мкм, возрастающий по мере понижения температуры вследствие влияния ${}^7F_0 - {}^7F_6$ -перехода. Как видно из рис. 94, в, интенсивность поглощения света для ионов Fu^{3+} (переход ${}^7F_1 - {}^7F_6$) носит близкий к линейному характер в области температур 100...300 К. Прозрачность рассматриваемого фторидного стекла, легированного европием, в этом интервале температур может быть выражена эмпирически выведенным уравнением (рис. 94, г)

$$t(T) = \exp[-\varepsilon c_l l N_1(T)],$$

где ε — поглощающая способность; c_l — концентрация ионов Fu^{3+} ; l — длина оптического пути луча в стекле; $N_1(T)$ — населенность первого возбужденного состояния, определяемая распределением Больцмана.

Область практического применения описанного выше низкотемпературного волоконно-оптического датчика лежит ниже 200 К. Для интервала температур 77...150 К точность выполняемых с его помощью измерений составляет около 0,5 К.

ДАТЧИКИ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И МАГНИТНОГО ПОЛЕЙ, РАЗНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛОВ И ТОКА

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Оптические методы контроля и измерения напряженностей электрического и магнитного полей, силы тока, разности электрических потенциалов (напряжения) и мощности электромагнитного поля получили быстрое развитие в связи с успехами технологии производства компонентов световодных систем связи. Использование волоконных световодов в конструкциях датчиков и сенсорных устройств создает дополнительные преимущества оптических методов измерения перечисленных выше физических величин. Появляется возможность удалить контрольно-измерительную аппаратуру и обслуживающий ее персонал на значительное расстояние от зоны измерений, которая может находиться, например, в пространстве, опасном для человека вследствие СВЧ-излучения. Волоконные световоды являются диэлектриками высокого класса и нечувствительны к действию помех, создаваемых электромагнитными излучениями. Материалы, из которых изготавливают световодные кабели, способны выдерживать в течение длительного времени напряжения, равные 3...5 кВ на 1 см длины кабеля [17]. С применением волоконных световодов решается проблема электрической развязки исследуемых высоковольтных цепей и контрольно-измерительной аппаратуры, а также обеспечивается безопасность работы операторов, выполняющих измерения. Упрощается решение задачи электромагнитной совместимости этой аппаратуры с устройствами, являющимися источниками сильных электромагнитных помех (рис. 95).

В данной главе рассмотрены датчики и сенсорные устройства, используемые для измерения электрических величин и интенсивности магнитного поля, причем волоконный световод может служить элементом, на который прямо или косвенно воздействует исследуемая физическая величина, вызывая модуляцию светового потока. Кроме того, рассмотрены сенсорные устройства, соединяемые волоконными световодами с регистрирующей аппаратурой и аппаратурой для обработки и отображения информации, получаемой от датчиков.

Простейший датчик тока можно построить на основе эффекта электролюминесценции при прохождении тока через p — n -переход.

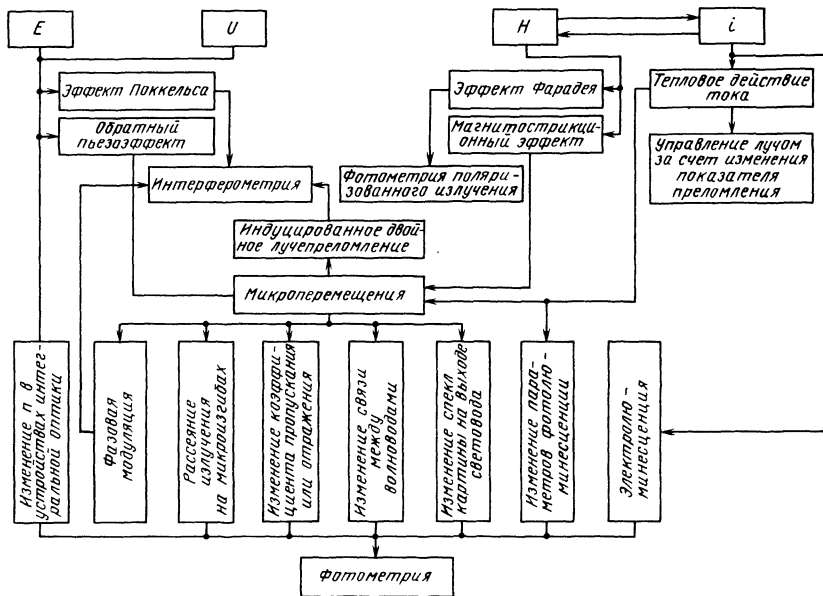


Рис. 95. Основные принципы и эффекты, используемые в световодных датчиках напряженностей электрического E и магнитного H полей, разности электрических потенциалов U , электрического тока i

В качестве источника излучения для такого датчика наиболее подходит полупроводниковый светодиод, отличающийся высокой линейностью зависимости мощности оптического излучения от значения протекающего через него тока. По сравнению с торцовым светодиодом и полупроводниковым лазером такой светодиод обладает высокими надежностью и значением верхнего предела рабочего диапазона температур, меньшей зависимостью мощности излучения от температуры. Ток накачки светодиода может находиться в пределах от единиц до нескольких сот миллиампер. Сопротивление его при токах накачки, больших 10 мА, меняется мало и составляет несколько десятков ом. Ток через светодиод, пропорциональный измеряемому току в сильноточной цепи, обеспечивают с помощью шунта или трансформатора тока. Датчик на основе полупроводниковых излучателей позволяет измерять токи в широкой полосе частот от нуля до сотен мегагерц.

При использовании усилителей с автономным питанием для управления током светодиода в преобразователе датчика можно строить системы для измерения и наблюдения на осциллографе токов в высоковольтных цепях. Например, использование светодиода типа АЛ107 и световодного кабеля на основе моноволокна со ступенчатым профилем показателя преломления, с диаметром

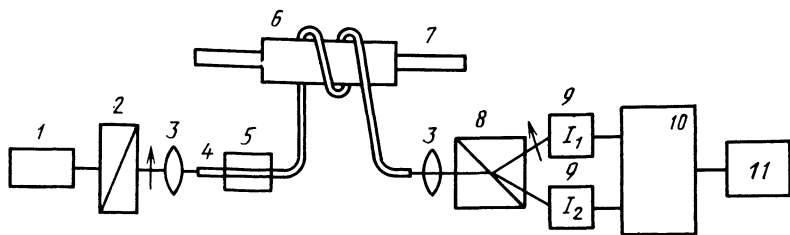


Рис. 96. Схема устройства для измерения тока на основе эффекта Фарадея в материале волоконного световода:

1—He—Ne-лазер; 2—поляризатор; 3—микрообъективы; 4—одномодовый волоконный световод; 5—фильтр для вывода оболочечных мод; 6—катушка, содержащая N витков Волластона; 7—шина, по которой протекает измеряемый ток; 8—призма Волластона; 9—фотодетекторы; 10—электронная схема, обеспечивающая вычисление

$\frac{i_1 - i_2}{i_1 + i_2}$; 11—индикатор результата измерения

сердцевины 400 мкм и $NA=0,3$ дает возможность построить систему с отношением сигнал/шум на выходе до 70 дБ и коэффициентом нелинейных искажений 0,5% в полосе частот 0...10 кГц. Технология их изготовления достаточно проста и аналогична технологии изготовления световодных линий связи. Значительная зависимость мощности на выходе излучателя от температуры (1...1,5%/°) вызывает необходимость использования схем температурной компенсации. Опыт показывает, что правильный подбор термокомпенсирующих элементов позволяет обеспечить температурную погрешность измерения тока 3...5% при изменении температуры на 50°.

Параметры датчиков тока на основе светодиода позволяют широко использовать их в системах контроля и быстродействующей защиты силовых цепей постоянного тока. Например, благодаря быстродействию датчика можно обеспечить защиту мощной радиолампы при возрастании анодного тока выше установленного предела.

Перспективным для создания световодных датчиков магнитного поля является эффект Фарадея, открытый в 1846 г. Теоретически эффект Фарадея позволяет создавать датчики для исследования магнитного поля на частотах от нуля до сотен мегагерц. Динамический диапазон датчиков может достигать $10^3...10^4$. Впервые попытка практического применения эффекта Фарадея в измерительной технике была сделана в СССР [6].

Можно выделить два основных типа конструкций датчиков тока. В одном из них (рис. 96) используется эффект Фарадея, возникающий в материале волоконного световода [123]. В другом типе конструкции применяют так называемые ячейки Фарадея, основу которых составляет стержень из специального вещества с большим значением постоянной Верде. Оптическое излучение под-

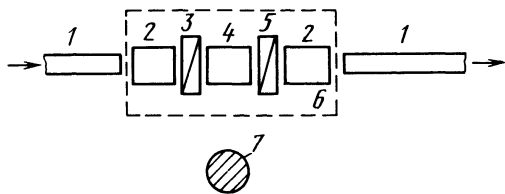


Рис. 97. Схема преобразователя световодного датчика напряженности магнитного поля с пассивными подводящими волоконными световодами:

1—многомодовые волоконные световоды; 2—стержневые линзы; 3—поляризатор; 4—стержень из материала с высоким значением постоянной Верде; 5—анализатор; 6—ячейка Фарадея (показано взаимное по-

ложение проводника с током 7 и ячейки Фарадея 6 в случае измерения силы тока по его магнитному полю)

водится и отводится от ячейки Фарадея с помощью волоконного световода [108] (рис. 97).

Оптически активные в магнитном поле вещества вращают плоскость поляризации излучения, распространяющегося в веществе вдоль силовых линий напряженности магнитного поля. Угол поворота плоскости поляризации определяется выражением

$$\gamma = V_i H_{11} l, \quad (1)$$

где V_i — постоянная Верде; H_{11} — проекция вектора напряженности магнитного поля на направление распространения излучения; l — расстояние, проходимое излучением в веществе.

Выражение (1) описывает угол поворота плоскости поляризации в пара- и диамагнитных материалах. Следует принять во внимание, что направление вращения плоскости поляризации в магнитном поле зависит только от направления распространения излучения. Это отличает вращение плоскости поляризации, вызванное эффектом Фарадея, от естественной оптической активности. Поэтому угол поворота плоскости поляризации излучения может быть увеличен во столько раз, сколько раз излучение прошло через ячейку Фарадея.

Чувствительность световодного датчика, как следует из формулы (1), можно повысить либо за счет роста постоянной Верде используемого материала, либо за счет увеличения расстояния l . В кварцевых волоконных световодах, применяемых в световодных линиях связи, значение постоянной Верде невелико ($V_i = 0,016$ /А). Для повышения постоянной Верде в кварц можно вводить некоторые легирующие примеси, например ионы парамагнитных материалов, но при этом сильно возрастает затухание в световоде, что снижает эффект от их использования [112]. Значительное увеличение длины волоконного световода, используемого в первом типе конструкции датчика, невозможно из-за паразитного двойного лучепреломления [120]. Примеры конструкций датчиков на основе эффекта Фарадея, их основные параметры и некоторые вопросы технологии изготовления рассмотрены ниже в настоящей главе.

Основой для создания большого числа различных по конструкции датчиков напряженности магнитного поля является магнитострикционный эффект, заключающийся в изменении линейных размеров и объемов тел, изготовленных из магнитострикционных материалов, в магнитном поле. Датчики на основе магнитострикционного эффекта обладают очень высокой чувствительностью и позволяют измерять переменные поля частотой до нескольких десятков килогерц.

Магнитострикционный эффект в материале оценивается коэффициентом магнитострикции $K_m = \Delta l / l$, где l — длина тела; Δl — ее максимальное изменение в магнитном поле. Относительные изменения линейных размеров тела из магнитострикционного материала в направлении магнитного поля и направлении, перпендикулярном ему, как правило, различны и характеризуются коэффициентами продольной и поперечной магнитострикции.

В качестве магнитострикционных материалов для световодных датчиков можно использовать железо, кобальт, никель, сплавы на основе железа и никеля, а также сплавы на основе ферромагнетиков, имеющие аморфное строение и называемые металлическими стеклами. Металлические стекла получают обычно в виде лент толщиной около 0,5 мм путем отливки расплава на поверхность вращающегося барабана. В результате высокой скорости охлаждения расплава кристаллическая структура не успевает образоваться. Использование металлических стекол обеспечивает датчикам более высокую чувствительность, чем применение других магнитострикционных материалов. Преобразователь датчика состоит из одномодового волоконного световода (ВС), приклеенного на пластину или намотанного на цилиндр из металлического стекла. Изменение линейных размеров тела из металлического стекла вызывает изменение длины световода, включенного в одно из плеч интерферометра Маха—Зендера.

Металлы и сплавы, обладающие свойством магнитострикции, можно наносить непосредственно на волоконные световоды методами электролитического осаждения или напыления в вакууме. Чистый никель широко используют в качестве магнитострикционного покрытия волоконных световодов благодаря коррозионной стойкости, дешевизне, высокому коэффициенту магнитострикции и простоте получения покрытия. На свойства покрытия сильно влияют примеси и техническая обработка. Качественное покрытие световода слоем никеля толщиной 10 мкм получают путем электролитического осаждения. Для устранения внутренних напряжений волокна, покрытые никелем, ожигают при температуре 1000 °С.

Анализируя зависимость $\Delta l / l$ от индукции магнитного поля для различных металлов и сплавов, можно выделить участки, на которых небольшое изменение индукции магнитного поля вызывает максимальное изменение $\Delta l / l$. Следовательно, для достиже-

Таблица 10

Тип конструкции преобразователя датчика	Магнитная индукция смещающего поля, 10^{-4} Тл	Чувствитель- ность датчи- ка, 10^{-11} Тл/м
ВС в никелевой трубке	3,0	8
ВС в гальванически нанесенной никелевой пленке (15 мкм)		6
ВС в никелевой пленке, нанесенной методом вакуум- ного напыления (1,5 мкм)	0	1
ВС на ленте из аморфного металла 2605 СО		0,23
ВС на цилиндре из аморфного металла 2605 SO	0,94	0,05
ВС в пленке из аморфного металла, нанесенной мето- дом вакуумного напыления (0,6 мкм)	0	300

ния максимальной чувствительности датчика необходимо магнито-стрикционный материал помещать в постоянное магнитное поле (смещающее поле). В табл. 10 представлены сравнительные характеристики световодных датчиков магнитного поля различных конструкций [112].

Чувствительность датчиков указана в теслах на метр длины волоконного световода (ВС).

Существует несколько путей построения датчиков тока, в основе действия которых лежит использование джоулевой теплоты. Постоянная времени датчиков, в зависимости от конструкции, может находиться в пределах от долей секунды до десятков секунд. Такие датчики предназначены для измерения действующего значения тока. В качестве преобразователя датчика может быть, например, использован направленный ответвитель на планарных световодах, в котором осуществляется местный нагрев участка световода за счет протекания микротока. В результате теплового изменения показателя преломления обеспечивается перераспределение энергии излучения на выходах преобразователя. Подобная конструкция преобразователя может быть использована в пороговых датчиках, однако при существующей технологии она проигрывает по ряду параметров конструкции датчика тока на основе электролюминесценции.

Микротоки, приводящие к разогреву небольшой массы термочувствительного материала, могут быть измерены с помощью чувствительного световодного датчика температуры на основе зависимости параметров фотолюминесценции от температуры. На тепловом действии вихревых микротоков, индуцируемых в небольшом объеме проводящего материала, помещенного в СВЧ-электромагнитное поле, основано действие датчика мощности электромагнитного поля, рассмотренного ниже.

Высокочувствительный датчик тока, позволяющий измерять токи порядка 10^{-9} — 10^{-12} А [54], можно построить на основе

одномодового волоконного световода, покрытого на некотором протяжении пленкой из алюминия, через которую пропускают измеряемый ток. В результате теплового действия тока изменяются линейные размеры покрытия и связанного с ним световода, который включен в плечо интерферометра Маха—Зендера.

Недостатком датчиков, использующих интерферометр Маха—Зендера, является чувствительность к паразитным внешним воздействиям, по-разному влияющим на оптическую длину пути излучения в плечах интерферометра. Технология изготовления таких датчиков сложна в связи с необходимостью применения одномодовых волоконных световодов.

Значительно более простую и технологичную конструкцию имеют одноволоконные датчики с межмодовой интерференцией, но чувствительность их на 6—18 дБ ниже. На выходе многомодового световода можно наблюдать интерференционную картину (спекл). В состоянии покоя световода эта картина статистически устойчива. Но даже слабые механические напряжения, микроизгибы в световоде приведут к перераспределению энергии между модами, к различной фазовой и поляризационной модуляции отдельных мод, а следовательно, к изменению спекла. В результате обработки данных об изменении спеклов можно определить измеряемую величину. Микроизгибы волоконного световода в датчике на основе межмодовой интерференции могут быть вызваны, например, протеканием измеряемого тока по тонкому металлическому покрытию, напыленному на световод, или воздействием измеряемого магнитного поля на магнитострикционный материал, нанесенный на световод [119].

2. СВЕТОВОДНЫЕ ДАТЧИКИ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И РАЗНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛОВ

Датчики напряженности электрического поля и разности потенциалов базируются в основном на эффекте Поккельса и обратном пьезоэлектрическом эффекте. Эффект Поккельса заключается в возникновении под влиянием внешнего электрического поля двойного лучепреломления, причем разность показателей преломления необыкновенного и обыкновенного лучей пропорциональна первой степени напряженности электрического поля. Эффект Поккельса обладает очень малой инерционностью, оптическая анизотропия следует за изменением значения напряженности электрического поля с запаздыванием порядка 10^{-10} с [13]. Преобразователь датчика, служащий для модуляции излучения в соответствии со значением напряженности электрического поля, называют ячейкой Поккельса.

Различают продольный и поперечный эффекты Поккельса. В обоих случаях оптическое излучение должно распространяться в направлении оптической оси, которую кристалл имеет при отсут-

ствии внешнего электрического поля. В случае продольного эффекта поле должно быть приложено вдоль этой оптической оси, что осуществляют, приложив напряжение к прозрачным электродам или электродам, имеющим небольшие отверстия для прохода излучения.

При реализации поперечного эффекта Поккельса электроды расположены параллельно лучу, расстояние между ними может быть малым, а длина вдоль луча — большой. Поэтому можно создать полуволновую ячейку при сравнительно небольшой разности потенциалов между электродами.

При использовании продольного эффекта разность фаз между обыкновенным и необыкновенным лучами для фиксированной разности потенциалов не зависит от длины ячейки, потому что с увеличением длины уменьшается напряженность электрического поля. Продольный эффект предпочтительнее использовать для создания преобразователей световодных датчиков, предназначенных для исследования высокочастотных процессов, поскольку в этом случае электроды имеют меньший размер, а преобразователь — меньшую электрическую емкость.

Для построения световодных датчиков напряженности электрического поля и датчиков выражения используют эффект Поккельса в монокристаллах $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ [111], $\text{Bi}_4\text{Ce}_3\text{O}_{12}$, CdTe [52], в ЦТСЛ-керамике [24].

Световодные датчики на основе обратного пьезоэлектрического эффекта могут быть построены с использованием пластинок или цилиндров из материалов, обладающих пьезоэффектом. Изменение линейных размеров такой пластинки при приложении напряжения может быть использовано для осуществления амплитудной модуляции оптического излучения в преобразователе световодного датчика, например, за счет перемещения шторки в зазоре между двумя световодами, по которым распространяется излучение. Изменение диаметра цилиндра в электрическом поле приводит к возникновению микроизгибов в световоде, плотно намотанном на цилиндр со специально подготовленной поверхностью. Размеры микроизгибов в световоде обуславливают, в свою очередь, амплитудную модуляцию излучения. Такие конструкции датчиков отличаются неравномерностью частотной характеристики, вызванной механическими резонансами на частотах от сотен герц до десятков килогерц.

Высокой чувствительности датчиков на основе обратного пьезоэлектрического эффекта достигают, используя интерферометр Маха — Зендера. Одномодовый волоконный световод в одном из плеч интерферометра должен быть механически связан с элементом конструкции преобразователя датчика, выполненного из материала, обладающего пьезоэффектом. Наибольший интерес заслуживает пьезоэлектрический полимер поливинилиденфторид. Перспективность этого материала связана с легкостью нанесения

пленочных покрытий непосредственно на волоконные световоды, а также возможность приблизительно на порядок увеличить чувствительность датчиков по сравнению с датчиками на обычной ЦТСЛ-керамике.

Световодный датчик на основе волоконного световода длиной 1000 м и интерферометра, способного детектировать фазовые сдвиги до 10^{-7} рад, обладает чувствительностью 4 мкВ/м [60].

В работе [136] сообщается о световодном датчике напряженности электрического поля на основе одномодового волоконного световода, покрытого пленкой из пьезоэлектрического полимера и включенного в одно из плеч интерферометра Маха — Зендера. Волоконный световод имеет диаметр сердцевины 4 мкм, в качестве покрытия использован материал P:VDF—TFE (поливинилиденфторид — тетрафторэтилен), диаметр световода с покрытием — 100 мкм. Датчик предназначен для исследования полей в диапазоне частот 1...100 кГц и обладает хорошей линейностью. Так, на частоте 5 кГц характеристика линейна в диапазоне измеряемых значений $10^4...2 \cdot 10^5$ В/м.

Большие перспективы для построения датчиков открывает интегральная оптика. Ниже на примерах будет рассмотрена возможность измерения напряженности электрического поля и напряжения в широкой полосе частот (до 1 ГГц) с использованием таких элементов интегральной оптики, как модулятор Маха — Зендера и направленный ответвитель с электрически управляемой связью между световодами. Будут приведены также примеры наиболее типичных и перспективных конструкций световодных датчиков электрических величин и магнитного поля, основанных на других принципах, рассмотрены некоторые вопросы технологии их производства, приведены параметры и характеристики датчиков.

Интегрально-оптические датчики. Для измерения напряжения и напряженности электрического поля можно использовать датчики на основе известных интегрально-оптических устройств, таких как интерферометр Маха — Зендера и направленный ответвитель (НО) [2]. Достоинствами их являются малые габаритные размеры, высокая электрическая прочность, возможность стыковки с волоконными световодами и проведения измерений в широкой полосе частот (до сотен мегагерц). Такие датчики могут найти применение, например, для исследования диаграммы направленности антенны мощного радиопередатчика в ближней зоне, для исследования распределения напряженности поля по поверхности изоляторов высоковольтных установок, а также в различных ограниченных и труднодоступных пространствах — в волноводах, резонаторах, между деталями высоковольтных установок.

Датчики напряжения и напряженности электрического поля могут быть изготовлены на основе одних и тех же материалов и с применением одной технологии, но создание датчика поля в

общем случае — более сложная задача, так как необходимо обеспечить достаточно высокую его чувствительность.

Высокая чувствительность датчиков может быть обеспечена, если на стадии изготовления активную часть световодной системы упомянутых интегрально-оптических устройств выполнить так, чтобы направления поляризации материала подложки внутри каждого из световодов — плечей интегрально-оптического интерферометра или НО были взаимно противоположными [14]. Тогда при однонаправленном управляющем поле (которым является измеряемое электрическое поле) достигается дифференциальный эффект: увеличение показателя преломления в одном световоде и уменьшение его в другом. При этом никаких специальных управляющих электродов в конструкции датчика не требуется.

Материалы и технологическая реализуемость датчиков напряженности электрического поля. Существует большое число сегнетоэлектриков, пригодных для практического использования в качестве материалов для электрооптических устройств. Исследования показывают, что кристаллическая структура некоторых из них допускает устойчивое существование доменов с поляризацией в двух противоположных направлениях вдоль направления спонтанной поляризации, т. е. 180° -ных макродоменов. Это является основой создания систем световодов на одной подложке с противоположными направлениями поляризации.

Такие 180° -ные домены наблюдаются в монокристаллах LiNbO_3 и LiTaO_3 [9]. Они возможны также в монокристаллах так называемых кислородно-октаэдрических сегнетоэлектриков со структурами типа перовскита и бронзы с легирующими примесями калия и вольфрама [10].

В качестве технологического метода получения систем полосковых световодов с противоположными направлениями поляризации предложен [14] метод локальной поляризации, заключающийся в том, что после получения световодов проводится местная поляризация участков подложки путем приложения поляризующего электрического поля E_n . Для этого используют специальные тонкопленочные технологические электроды. В зависимости от свойств сегнетоэлектрика локальную поляризацию можно проводить как при температуре T_n выше точки Кюри, так и при более низкой [9, 10].

Одним из хорошо освоенных промышленностью и широко доступных электрооптических материалов, свойства которого позволяют изготавливать датчики поля, имеющие световоды с противоположными направлениями поляризации, является LiTaO_3 . Точка Кюри у него $T_k = (660 \pm 10)^\circ\text{C}$ значительно ниже температуры плавления, что позволяет выполнить локальную поляризацию в относительно легко реализуемых условиях. В то же время при нормальной температуре состояние поляризации настолько устойчивое, что небольшое нагревание кристалла, приложение электри-

ческих полей напряженностью до пробивной и даже разрезание, шлифование и полирование кристалла не вызывают деполяризации.

Световоды со встречными направлениями поляризации можно получить, например, следующим образом. На подложку из LiTaO_3 через соответствующую маску напыляют металлические пленки технологических электродов. Затем проводят локальную поляризацию, прикладывая к областям связи световодов противоположно направленные электрические поля напряженностью E_n , значение которой определяется температурой подложки [9]. Поляризацию целесообразно осуществлять при повышенной температуре: $200 < T_n < 600^\circ\text{C}$. Чем выше T_n , тем меньше необходимое значение E_n . Охлаждение кристалла проводится в поляризующем поле. После поляризации технологические электроды с поверхности подложки можно удалить методом химического травления.

В датчиках поля на основе НО для повышения чувствительности и линейности модуляционной характеристики целесообразно не только иметь противоположное направление оптических осей, но и фиксированное начальное отклонение показателей преломления $\pm \Delta n_0$, которое также можно получить в ходе выполнения указанных выше технологических операций.

Датчик напряженности электрического поля на основе модулятора Маха — Зендера. Датчик напряженности электрического поля на основе асимметричного световодного интерферометрического модулятора Маха — Зендера описан в работе [44]. Недостатком устройства, практически лишаящим его основных преимуществ интегрально-оптических измерителей поля, является то, что непосредственный прием поля осуществляется при помощи выносной антенны, представляющей собой проводящее тело, соединенное проводниками с модулятором. Все это ограничивает возможность применения упомянутого измерителя в случаях, когда необходимо проводить измерения в точке и минимально искажать конфигурацию исследуемого поля, а также для измерений поля в замкнутых и труднодоступных полостях.

Имеется еще один [1] вариант датчика поля на основе асимметричного модулятора Маха — Зендера, не требующий металлических электродов и антенны. На рис. 98 показаны две разновидности предложенного датчика. Особенность датчика заключается в том, что полосковые световоды — плечи интерферометра путем локальной поляризации сегнетоэлектрической подложки изготовлены так, что в них направления поляризации взаимно противоположны. Благодаря этому, внешнее (измеряемое) электрическое поле непосредственно вызывает разбаланс интерферометра. Для получения линейной амплитудной характеристики датчика, световоды — плечи интерферометра имеют разную длину, так что обеспечивается начальная разность фаз $\varphi_0 = \pi/2$.

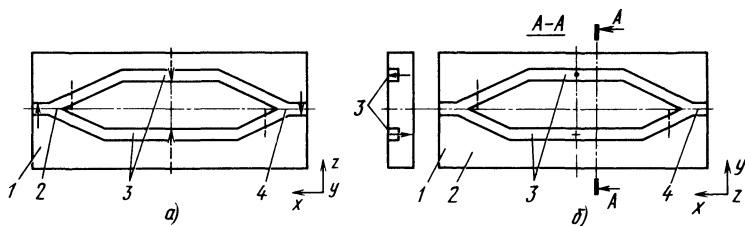


Рис. 98. Упрощенные изображения преобразователей датчиков электрического поля на основе модулятора Маха—Зендера:

a—вариант на *y*-срезе LiTaO_3 ; *б*—вариант на *z*-срезе LiTaO_3 ; 1—подложка; 2, 4—входной и выходной Y-разветвители; 3—световоды—плечи интерферометра (штриховыми линиями показаны границы 180° -ных макродоменов, стрелками — направления векторов поляризации)

Расчет интерферометра проводится по известным формулам [44]. Начальную разность фаз $\varphi_0 = \pi/2$ можно получить и у геометрически симметричного интерферометра (при $l_1 = l_2$), например, соответствующим ионным легированием одного или обоих световодов — плеч. Внешнее электрическое поле напряженностью E (считаем, что вектор поля параллелен оптической оси материала подложки) вызывает появление дополнительной разности фаз $\Delta\varphi = kE$, где k — константа датчика. Интенсивность оптического излучения на выходе интерферометра при $\varphi_0 = \pi/2$

$$I = \frac{1}{2} I_0 [1 + \cos(\varphi_0 + \Delta\varphi) = \frac{1}{2} I_0 [1 - \sin kE],$$

где I_0 — интенсивность излучения на входе. При достаточно малых kE интенсивность излучения на выходе интерферометра является линейной функцией напряженности поля E :

$$I \approx \frac{1}{2} I_0 (1 - kE).$$

Недостатком датчика на основе модулятора Маха — Зендера является зависимость выходной мощности от уровня мощности источника излучения. Этого недостатка можно избежать в датчиках, построенных на основе направленного ответвителя.

Датчик напряженности электрического поля на основе направленного ответвителя. Датчик (рис. 99) состоит из источника когерентного света (полупроводникового лазера) 1, волоконных

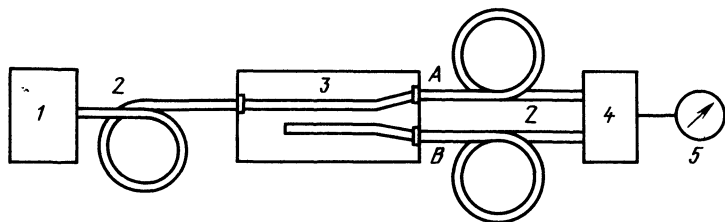


Рис. 99. Схема датчика напряженности электрического поля с преобразователем на основе направленного ответвителя

световодов 2, интегрально-оптического НОЗ со встречными направлениями поляризации световодов, устройства обработки сигналов 4 и измерителя 5.

Коэффициент передачи мощности излучения из одного световода НО в другой при дифференциальном эффекте определяется формулой [2, 15]

$$B^2 = \frac{1}{1 + \eta^2} \sin^2 \left(\frac{\pi l}{2L} \sqrt{1 + \eta^2} \right),$$

где l — длина области связи световодов; L — эталонная длина НО, при которой происходила бы полная передача мощности (т. е. когда $B^2 = 1$). Величина η есть нормативная фазовая расстройка волн в световодах НО:

$$\eta = \frac{4L}{\lambda} \Delta n,$$

где Δn — отклонение показателя преломления в световодах НО, определяемое управляющим полем E ,

$$\Delta n = \frac{1}{2} n^3 r_{ij} E,$$

причем n — показатель преломления материала; r_{ij} — электрооптический коэффициент.

Модуль коэффициента передачи излучения со входа на выход одного и того же световода можно определить из энергетического соотношения

$$|A|^2 = 1 - B^2.$$

Наибольшие пределы изменения значений $|A|^2$ и B^2 обеспечиваются при выборе отношения $l/L = 1$.

Величину $|A|^2$ удобно принять за выходную характеристику датчика, однако, чтобы устранить зависимость показаний датчика от уровня мощности источника и потерь излучения, следует провести обработку сигнала, отнеся эту величину к сумме сигналов на обоих выходах направленного ответвителя;

$$J_1 = |A|^2 / (|A|^2 + B^2).$$

Для повышения чувствительности датчика к слабым сигналам необходимо выбрать начальную точку при $|A|^2 = 0,5$ ($\eta \approx 0,8$). Это достигается введением на стадии изготовления начальных отклонений показателей преломления, равных

$$\Delta n_0 = (\lambda/4L) \eta_0 = 0,2\lambda/L.$$

Вблизи выбранной рабочей точки рассматриваемый датчик поля имеет линейную амплитудную характеристику [1]

$$J_1 = 0,5 + 0,95(\eta - \eta_0),$$

представленную на рис. 100 прямой 2. Преобразователь датчика напряженности электрического поля типа НО, имеющий противо-

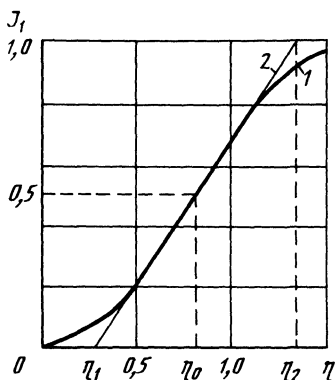


Рис. 100. Амплитудная характеристика датчика на основе НО (индикация сигнала по одному из выходных плеч): 1—экспериментальная кривая; 2—ее линейная аппроксимация

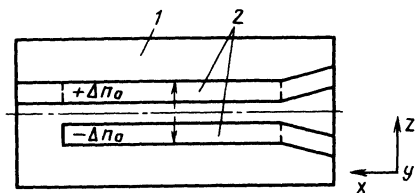


Рис. 101. Упрощенное изображение варианта преобразователя датчика электрического поля на основе НО:

1—подложка (y -срез LiTaO_3); 2—полосковые световоды с противоположными направлениями поляризации (показаны стрелками) и фиксированными начальными отклонениями показателей преломления $\pm \Delta n_0$ в пределах области связи (отмечена штриховой линией)

положные направления поляризации и фиксированные начальные отклонения $\pm \Delta n_0$ показателя преломления в пределах области связи световодов, показан на рис. 101.

Если измеряемое поле $E = E_m \sin \omega_E t$, то переменная составляющая нормированного коэффициента передачи излучения датчика

$$J_{1\sim} = J_{1m} \sin \omega_E t,$$

где

$$J_{1m} = 0,95 \frac{4L}{\lambda} \Delta n_m = \frac{1,9L}{\lambda} n^3 r_{ij} E_m.$$

Высокие напряженности поля, выходящие за пределы линейного участка амплитудной характеристики, можно измерить, заглубив датчик путем его поворота, так что $J'_{1m} = J_m \cos \alpha_E$, где α_E — угол между оптической осью кристалла и направлением поля.

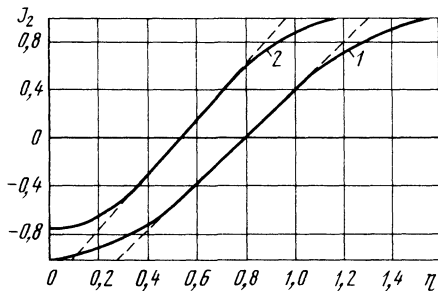
Чувствительность датчика можно повысить, используя разностно-суммарную обработку сигнала:

$$J_2 = \frac{|A|^2 - B^2}{|A|^2 + B^2} = 1 - 2B^2.$$

При отсутствии измеряемого поля $J_2 = 0$, т. е. направленный ответитель используется в режиме мостовой схемы и $|A|^2 = B^2 = 0,5$. Достичь равного деления мощности можно при разных соотношениях l/L и значения η_0 . При тех же начальных значениях $l/L = 1$ и $\eta_0 = 0,8$ переменная составляющая интенсивности излучения будет в 2 раза больше, чем в первом случае, и $J_{2\sim} = 2J_{1\sim}$.

Рис. 102. Амплитудная характеристика датчика на основе НО при суммарно-разностной обработке сигнала:

1—с наибольшим линейным участком; 2—с наибольшей чувствительностью



Зависимость J_2 от η и ее линейная аппроксимация изображены на рис. 102 (кривая 1).

Можно повысить чувствительность к слабым сигналам еще на 10%, выбирая l/L и η_0 , соответствующие максимуму производной $\partial B/\partial \eta$, при условии равного деления мощности в плечах НО. Этим условиям соответствуют значения $l/L=1,23$ и $\eta_0=0,55$. Однако зависимость J_2 от η становится несимметричной (кривая 2), а пределы линейного участка существенно сужаются [1].

Для количественной иллюстрации возможностей рассматриваемого датчика приведем пример расчетных значений параметров датчика, выполненного на танталате лития для $\lambda=0,633$ мкм и $l=L=2$ мм. Начальное отклонение показателей преломления световодов от среднего значения $\Delta n_0=0,633 \cdot 10^{-4}$; максимальная измеряемая напряженность электрического поля (при $\alpha_E=0$) $E_m=2,7 \cdot 10^5$ В/м и чувствительность $J_{1m}/E_m=6,1 \cdot 10^{-8}$ м/В.

Таким образом, метод локальной поляризации сегнетоэлектрической подложки позволяет создавать датчики напряженности электрического поля на основе известных элементов интегральной оптики.

Интегрально-оптический датчик напряжения с использованием волоконного световода, сохраняющего плоскость поляризации излучения. В интегрально-оптическом датчике напряжения [62], основные конструктивные узлы которого представлены на рис. 103, излучение от инжекционного лазерного диода (ЛД) через волоконный световод, сохраняющий плоскость поляризации, поступает на интегрально-оптический преобразователь 8, выполненный в виде НО с электрически управляемой связью световодов. Промодулированное излучение от преобразователя через градиентный волоконный световод 7 подается к электронному блоку 1, состоящему из оптического приемника 2 и устройства управления ЛД 3. Электронный блок для работы в полевых условиях может быть удален на значительное расстояние от сборки, содержащей: ЛД; волоконный световод, сохраняющий плоскость поляризации; интегрально-оптический преобразователь и градиентный волоконный световод.

Датчик испытан в частотном диапазоне 10 кГц...200 МГц, его динамический диапазон равен 40 дБ при полосе пропускания 200 МГц.

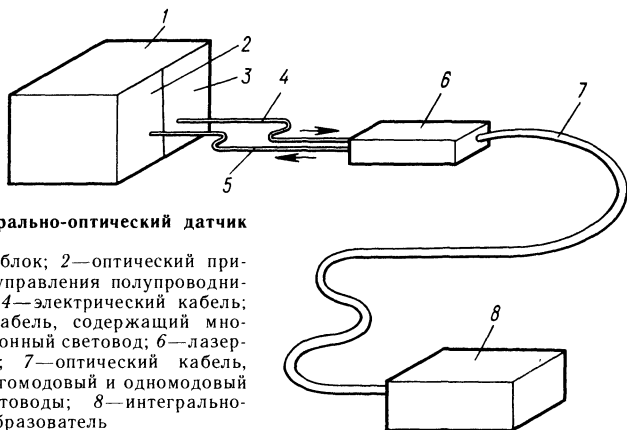


Рис. 103. Интегрально-оптический датчик напряжения:

1—электронный блок; 2—оптический приемник; 3—блок управления полупроводниковым лазером; 4—электрический кабель; 5—оптический кабель, содержащий многомодовый волоконный световод; 6—лазерный излучатель; 7—оптический кабель, содержащий многомодовый и одномодовый волоконные световоды; 8—интегрально-оптический преобразователь

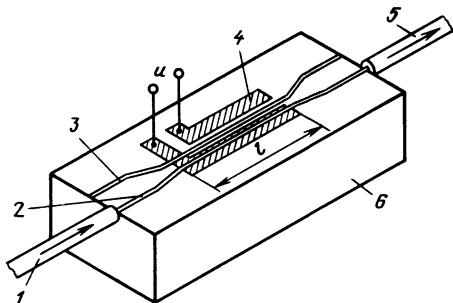
Интегрально-оптический преобразователь представляет собой пассивное оптическое устройство, потребляющее малую мощность, так как не расходуется энергия на генерирование оптического излучения. Типичные значения емкости между электродами таких преобразователей несколько пикофарад, значений сопротивлений — несколько мегаом. Для обеспечения глубины модуляции, близкой к 100%, требуется управляющее напряжение ± 10 В.

В датчике применен интегрально-оптический преобразователь со связанными планарными световодами, обладающий высокой чувствительностью. Для подачи на вход преобразователя одномодового линейно поляризованного излучения от ЛД применен одномодовый волоконный световод, сохраняющий плоскость поляризации излучения. Модулированный оптический сигнал с выхода преобразователя подается в электронный блок с помощью многомодового градиентного оптического волокна. Соединения между ЛД, волокном и преобразователем неразъемные, что упрощает проблему соединения одномодовых световодов. ЛД дистанционно отделен от сравнительно большого электронного блока, включающего устройство управления ЛД и приемник излучения, с помощью электрического кабеля и градиентного волоконного световода. Система легко разворачивается в полевых условиях. Оптические волокна защищены трубчатыми пластиковыми оболочками диаметром около 9 мм.

Принцип действия используемого преобразователя основан на связи между двумя близко расположенными планарными световодами (рис. 104). Излучение, вводимое в один из световодов, будет проникать в другой световод. Соотношение интенсивностей излучения на выходах световодов зависит от расстояния между световодами, длины области связи световодов l и параметров световодов. Часть излучения, проникающая из свето-

Рис. 104. Интегрально-оптический преобразователь на основе планарных световодов с управляемой связью:

1—одномодовый волоконный световод, сохраняющий плоскость поляризации излучения; 2, 3—планарные световоды; 4—электроды, к которым подводится измеряемое напряжение u ; 5—многомодовый градиентный волоконный световод; 6—подложка из LiNbO_3 ; l —длина области связи световодов



вода 2 в световод 3 (см. рис. 104), может быть определена по формуле [62]

$$I/I_0 = c_d l \sin \sqrt{(c_d l)^2 + (\Delta\beta l)^2},$$

где I/I_0 — отношение интенсивностей излучения на выходах световодов 3 и 2 (без учета потерь); c_d — коэффициент связи; $\Delta\beta$ — разность между волновыми числами в двух планарных световодах.

Связь между световодами 2 и 3 наиболее эффективна, когда $\Delta\beta$ равно нулю, а c_d имеет большое значение.

Предположим, что пара связанных световодов имеет $\Delta\beta$, близкое к нулю, а $c_d l = (2m+1)\pi/2$, $m=0, 1, 2, \dots$, тогда все излучение будет проникать в световод 3. В модуляторе имеется пара электродов 4 (см. рис. 104). Если измеряемое напряжение приложить к этим электродам, то электрическое поле, образующееся между ними, будет приложено только к одному из световодов, и, следовательно, будет создаваться $\Delta\beta$ между двумя планарными световодами, зависящая от приложенного напряжения. При увеличении $\Delta\beta$ отношение I/I_0 уменьшается и становится равным нулю, когда $\sqrt{(c_d l)^2 + (\Delta\beta l)^2}$ достигает значения $(m+1)\pi$. Таким образом, все излучение возвращается в световод 2 при некотором определенном уровне измеряемого напряжения. Наилучшую линейность световодного датчика обеспечивают при использовании напряжения смещения, с помощью которого устанавливают приблизительно 50% связи между световодами 2 и 3 преобразователя.

В образце световодного преобразователя на связанных световодах с длиной связи 5 мм обеспечивалась глубина модуляции 30% при напряжении +2 В, при частотах вплоть до 200 МГц и напряжении смещения, не превышающем 6 В.

Для обеспечения напряжения смещения, необходимого для работы преобразователя в линейном режиме, использована малогабаритная электрическая батарея, установленная в блоке световодного модулятора.

Излучение на выходе интегрально-оптического преобразователя должно иметь определенную поляризацию. Для передачи излучения от лазера на вход преобразователя использовано одномодовое волокно, сохраняющее поляризацию излучения.

Для передачи оптического сигнала от интегрально-оптического преобразователя к электронному блоку использовано градиентное многомодовое волокно с диаметром сердцевины 50 мкм и числовой апертурой 0,25.

Изготовление кабеля на основе волокна, сохраняющего плоскость поляризации, оказалось сложной проблемой. Попытки использования обычного способа кабелирования оказались неудачными — волокно теряло способность сохранять поляризацию. Успешным оказался метод использования полимерных трубок диаметром 9,5 мм. Два волокна склеивались друг с другом через каждые 0,3 м и затем протягивались через трубку, причем для уменьшения трения о стенки в трубку нагнетался сжатый воздух. Таким способом можно протянуть 30 м волокна. Для датчика изготовлен кабель длиной 120 м путем сращивания четырех 30-метровых отрезков. После изготовления кабеля указанным способом заметных ухудшений в способности волоконного световода сохранять поляризацию не наблюдалось.

Расчет чувствительности датчика базируется на расчете уровня сигнала на входе оптического приемника. Мощность излучения на выходе инжекционного лазера $P=15$ мВт или 12 дБм. Потери в световодном тракте распределяются следующим образом:

на ввод излучения в одномодовое волокно	8 дБ;
в одномодовом волокне	2 дБ;
на ввод излучения в планарный световод	7 дБ;
в интегрально-оптическом преобразователе	5 дБ;
на ввод излучения в градиентный световод	1 дБ;
на ввод излучения в оптический приемник	1 дБ.

В результате мощность оптического сигнала на входе оптического приемника может достигать —12 дБм. При коэффициенте модуляции порядка 0,3, обеспечиваемым световодным модулятором при напряжении ± 2 В, расчетная чувствительность датчика (с эквивалентной шумовой полосой частот 0,1 ГГц), ограниченная дробовыми шумами, составляет ± 8 мВ. Вследствие влияния шумов лазера расчетные значения минимального регистрируемого датчиком сигнала составляют ± 11 мВ. Минимальное значение сигнала, регистрируемого в ходе испытаний, составило 20 мВ при полосе пропускания сигнала 200 МГц. Динамический диапазон датчика — 40 дБ.

Блок лазерного излучателя, представленный на рис. 105, содержит соединитель, который обеспечивает подключение электронной схемы, управляющей лазерным диодом, и градиентную

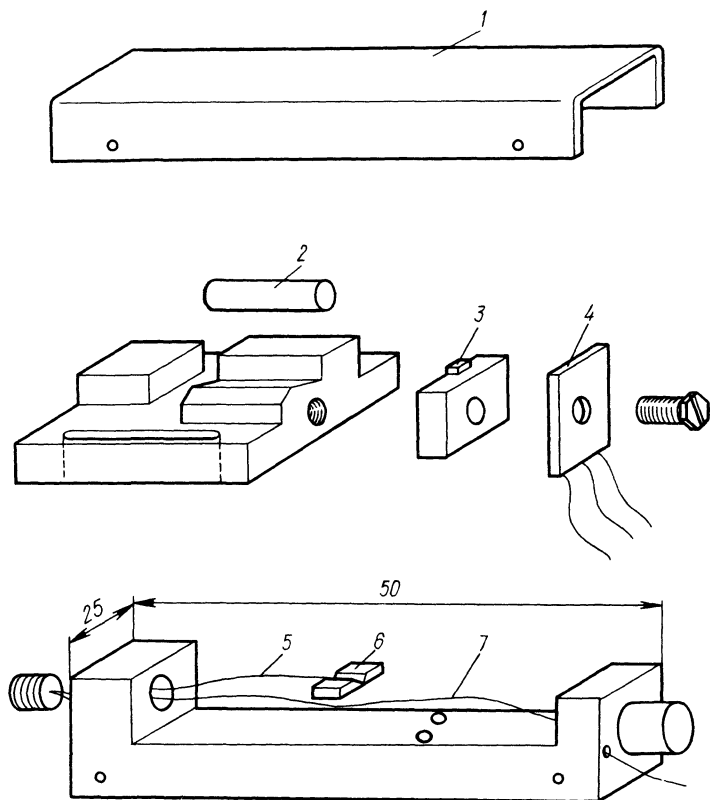


Рис. 105. Блок лазерного излучателя для интегрально-оптического датчика напряжения:

1—крышка корпуса блока; 2—градиентная стержневая линза; 3—полупроводниковый лазерный диод; 4—*p-i-n*-диод на пластинке (для схемы, стабилизирующей мощность на выходе лазера); 5—одномодовый волоконный световод, сохраняющий плоскость поляризации излучения; 6—пластина с V-образной канавкой; 7—многомодовый градиентный волоконный световод

линзу, служащую для согласования лазерного диода и одномодового волоконного световода.

Используемая линза имеет длину 9 мм, что составляет 0,43 периода траектории луча в линзе, поэтому излучающая поверхность лазера может находиться на расстоянии приблизительно 0,77 мм от торцевой поверхности линзы, а конец волоконного световода также на небольшом расстоянии от противоположной поверхности линзы ($\sim 0,75$ мм).

Сборка блока излучателя производится следующим образом. Лазерный диод и линза в держателе, а также конец одномодового волоконного световода, укрепленный на пластинке с V-образной канавкой, юстируют с помощью микроманипуляторов для

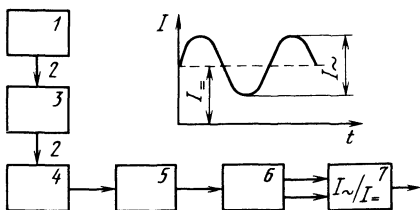


Рис. 106. Схема световодного датчика напряженности электрического поля и напряжения:

1—источник излучения; 2—волоконный световод; 3—преобразователь датчика; 4—фотодиод; 5—усилитель; 6—фильтр; 7—блок вычисления отношения $I_{\sim}/I_{=}$

достижения максимальной эффективности согласования лазерного диода с волоконным световодом и фиксируют эпоксидной смолой. Отверждение смолы производят в ультрафиолетовых лучах. Конструкция обеспечивает эффективность связи около 22 % до отверждения. После завершения процесса отверждения эффективность связи уменьшается до 20 %.

Другой конец одномодового волоконного световода также укрепляется на кремниевой пластине с V-образной канавкой. Эту пластину юстируют по отношению к торцу планарного световода для получения максимальной эффективности согласования.

Световодный датчик для измерения напряженности электрического поля и напряжения. Волоконно-оптический датчик напряженности электрического поля и напряжения на основе использования эффекта Погкельса в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ [111] позволяет с высокой точностью измерять напряженность электрического поля и напряжение в высоковольтных электроэнергетических системах.

В качестве источника излучения I в датчике (рис. 106) использован лазерный диод на длину волны 0,87 мкм, а в качестве фотодетектора — $p-i-n$ -фотодиод 4. Использование этих полупроводниковых приборов упрощает конструкцию датчика и уменьшает его размеры. Датчик определяет значение переменного напряжения, приложенного к кристаллу $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, посредством вычисления отношения переменной составляющей I_{\sim} оптического сигнала к постоянной составляющей $I_{=}$. Когда напряжение, приложенное к кристаллу $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, достаточно мало, мощность промодулированного оптического сигнала описывается уравнением [111]

$$P = P_0(1 + k\sqrt{2}u_0 \sin \omega_E t),$$

где k — постоянная величина; $\sqrt{2}u_0 \sin \omega_E t$ — приложенное напряжение.

Постоянная составляющая оптического сигнала P_0 , переменная составляющая $P_0 k\sqrt{2}u_0 \sin \omega_E t$. Определяя отношение переменной составляющей оптического сигнала к постоянной, получаем величину $k\sqrt{2}u_0 \sin \omega_E t$. Таким образом, практически исключаются погрешности измерения, обусловленные изменением мощности на выходе полупроводникового лазерного диода, изменениями затуханий в волоконном световоде и оптических соединениях.

Для увеличения энергии, вводимой в волоконный световод от излучателя, используется световод с диаметром сердцевины 100 мкм и $NA=0,25$. В такой световод вводится излучение мощностью около 100 мВт, при этом средняя мощность излучения на входе оптического приемника достигает ~ 12 мВт. Следовательно, потери в этом датчике ~ 9 дБ.

Преобразователь датчика (рис. 107) состоит из поляризатора 6, анализатора 3, кристалла $Bi_{12}SiO_{20}$ 4, четвертьволновой пластинки 5 и двух градиентных стержневых линз 2, 7. Направление электрического поля, приложенного к кристаллу, совпадает с направлением светового пучка. Излучение, выходящее из волоконного световода, коллимируется стержневой линзой, а затем линейно поляризуется поляризатором. Четвертьволновая пластинка преобразует линейную поляризацию излучения в круговую. В соответствии с измеряемым переменным напряжением, которое приложено к кристаллу $Bi_{12}SiO_{20}$, излучение с круговой поляризацией преобразуется в эллиптически поляризованное. Таким образом, мощность излучения на выходе анализатора оказывается промодулированной в соответствии с измеряемым переменным напряжением. Протектировав оптический сигнал, можно определить исследуемое напряжение.

Обе стороны кристалла $Bi_{12}SiO_{20}$, перпендикулярные направлению луча, покрыты окисью индия. Для измерения напряженности электрического поля никаких электрических проводов к преобразователю датчика подключать не надо. В случае измерения напряжения электрические провода подключают к двум сторонам кристалла, покрытым окисью индия.

Для измерения распределения напряженности электрического поля размеры преобразователя должны быть как можно меньше. Размеры образца датчика $19 \times 12 \times 9$ мм. Волоконные световоды подключены к преобразователю с помощью пластмассовых оптических соединителей.

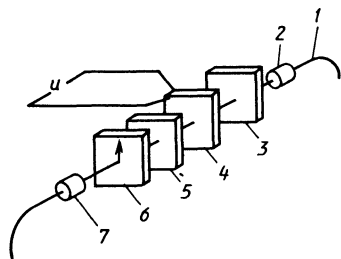


Рис. 107. Схема преобразователя световодного датчика:
1—волоконный световод; 2, 7—градиентные стержневые линзы; 3—анализатор; 4—кристалл $Bi_{12}SiO_{20}$; 5—четвертьволновая пластинка; 6—поляризатор

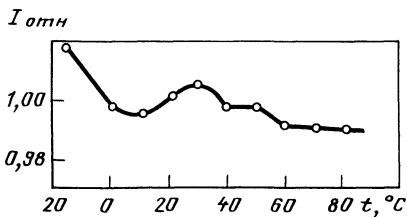


Рис. 108. Изменение относительной чувствительности датчика напряженности электрического поля и напряжения в зависимости от температуры

Кристалл $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ обладает электрооптическим эффектом и оптической активностью. Электрооптический коэффициент на длине волны 0,87 мкм равен $4,35 \cdot 10^{-12}$ м/В, постоянная вращения равна $1,05 \cdot 10^4$ °/м. Толщина кристалла $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, используемого в преобразователе световодного датчика, равна 2 мм, поэтому оптической активностью нельзя пренебречь при рассмотрении основных характеристик такого световодного датчика.

При угле между поляризатором и анализатором, равном 45° , модуляционная характеристика датчика $m(u)$ с учетом как электрооптического эффекта, так и оптической активности, может быть представлена в таком виде:

$$m(u) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{\pi u}{u_\pi} \frac{\sin \psi}{\psi} \right\},$$

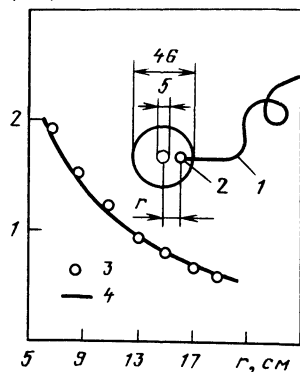
где $\psi = \left[\pi(u/u_\pi)^2 + (2[\alpha]d)^2 \right]^{1/2}$,

u — напряжение, приложенное к преобразователю датчика; u_π — полуволновое напряжение для $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$; $[\alpha]$ — постоянная вращения $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$; d — толщина кристалла (2 мм); $\pi/u_\pi = 4,62 \cdot 10^{-4}$ В $^{-1}$; $2[\alpha]d = 0,73$ рад.

На основании приведенного выражения вычислены значения коэффициента модуляции и нелинейности, которые равны соответственно 0,06%/В и 1% (в диапазоне измеряемых значений 0—300 В) [111]. Значение коэффициента модуляции, измеренное в ходе эксперимента, оказалось равным 0,05%/В, что хорошо согласуется с расчетным значением. Нелинейность выходной характеристики датчика составила около 0,5 % при измеряемом напряжении 500 В.

На рис. 108 показана температурная зависимость чувствительности датчика. Изменение чувствительности датчика не превышает $\pm 2\%$ в диапазоне температур $-15 \dots 80^\circ\text{C}$. Такая температурная стабильность достигнута за счет двух факторов. Во-

$E, \text{кВ/см}$



первых $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ не обладает двойным лучепреломлением в отсутствие электрического поля. В основном коэффициенты преломления обыкновенного (n_o) и необыкновенного (n_e) лучей имеют различную температурную зависимость. Это вызывает необходимость компенсации температурной зависимо-

Рис. 109. Распределение напряженности электрического поля в пространстве между коаксиальными электродами:

1—волоконные световоды; 2—преобразователь датчика; 3—экспериментальные данные; 4—теоретическая кривая

сти аппаратным путем. В случае использования $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ такая компенсация не нужна. Во-вторых, благодаря использованию микрооптической технологии объем датчика очень мал, поэтому влияние изменений в материалах становится незначительным.

Результаты измерений распределения напряженности электрического поля в пространстве между коаксиальными электродами (рис. 109) хорошо совпадают с теоретическими значениями напряженности электрического поля. Следовательно, световодный датчик позволяет исследовать распределение напряженности электрического поля вблизи электродов сложной формы.

Световодный датчик напряженности электрического поля и напряжения с высокой температурной стабильностью. В работе [43] изложены результаты теоретического анализа и экспериментальных исследований световодного датчика на основе $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, проведенных с целью повышения его температурной стабильности. В преобразователе рассмотренного датчика (рис. 110) d — толщина пластинки из $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, а v_a — угол установки анализатора относительно оси $\langle 011 \rangle$ $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$. Обычно v_a устанавливают равным приблизительно $\pi/4$ рад, что обеспечивает лучшую линейность коэффициента модуляции интенсивности излучения m на выходе преобразователя датчика. Уравнения, позволяющие проанализировать влияние d и v_a на m , имеют следующий вид [43]:

$$m = \frac{\pi u}{\psi u_{\pi}} \sin \psi \sin 2v_a - 2(2[\alpha]d) \left(\frac{\pi u}{\psi^2 u_{\pi}} \right) \sin^2 \frac{\psi}{2} \cos 2v_a;$$

$$\psi = \left[(\pi u / u_{\pi})^2 + (2[\alpha]d)^2 \right]^{1/2},$$

где u — напряжение, прикладываемое к кристаллу $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$; u_{π} — полуволновое напряжение; $[\alpha]$ — постоянная вращения.

На температурную зависимость m влияют u_{π} , $[\alpha]$ и d . Температурный коэффициент линейного расширения $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ ($1,6 \cdot 10^{-5} \text{ } 1/^{\circ}$) намного меньше, чем температурные коэффициенты u_{π} ($3,5 \cdot 10^{-4} \text{ } 1/^{\circ}$) и $[\alpha]$ ($-2,9 \cdot 10^{-4} \text{ } 1/^{\circ}$), поэтому изменением d от температуры можно пренебречь [43].

Результаты расчетов (на основании приведенного для m уравнения) температурной нестабильности Δm при различных

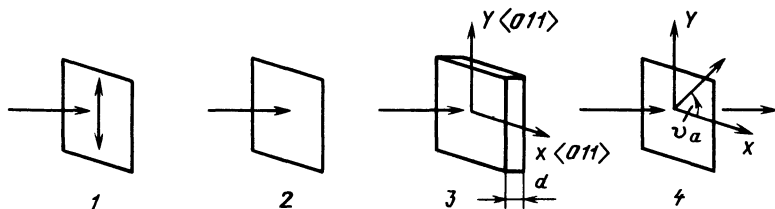


Рис. 110. Схема преобразователя световодного датчика напряженности электрического поля и напряжения на основе $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$:

1 — поляризатор; 2 — четвертьволновая пластинка; 3 — кристалл $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$; 4 — анализатор

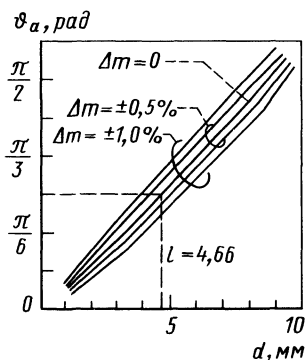


Рис. 111. Зависимость температурной нестабильности коэффициента модуляции интенсивности излучения на выходе преобразователя датчика Δm от φ и l :

$\Delta m = (m_1 - m_2)/m_2$ (m_1 при $t = 80^\circ\text{C}$; m_2 при $t = 20^\circ\text{C}$)

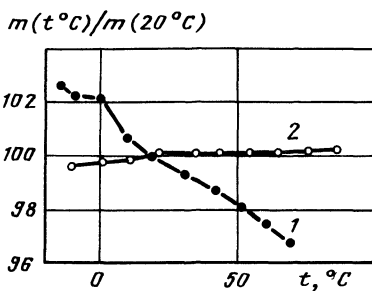


Рис. 112. Зависимость относительной чувствительности датчиков от температуры: 1—для датчика с $l = 2$ мм; 2—для датчика с $l = 4,7$ мм

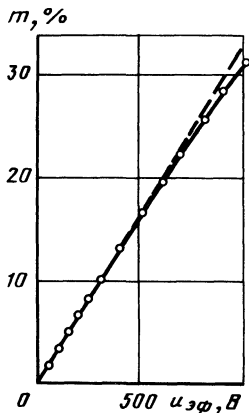
значениях d и φ_a представлены на рис. 111. Расчеты выполнены для эффективного значения $u_{\text{эф}} = 200$ В, причем при температуре $t = 20^\circ\text{C}$ $u_n = 6800$ В и $[\alpha] = 10,5^\circ/\text{мм}$, а при $t = 80^\circ\text{C}$ $u_n = 6943$ В и $[\alpha] = 10,32^\circ/\text{мм}$. Кривые показывают комбинации d и φ_a , которые обеспечивают температурную погрешность m в пределах $\pm 0,5\%$ или $\pm 1\%$ в диапазоне температур $20\dots 60^\circ\text{C}$. Как следует из рис. 111, для датчика, рассмотренного выше ($d = 2$ мм), оптимальное значение $\varphi_a = \pi/10$. Однако в этом случае линейность и чувствительность датчика сильно ухудшаются вследствие влияния второго члена уравнения, определяющего m . Оптимальными значениями являются $d = 4,66$ мм и $\varphi_a = \pi/4$, которые обеспечивают $m = 0,039\%$ при $u_{\text{эф}} = 1$ В и отклонение от линейной характеристики менее чем на 1% при изменении $u_{\text{эф}}$ от 0 до 330 В. Температурную нестабильность можно уменьшить почти до нуля за счет увеличения d от 2 мм (в предыдущей конструкции) до 4,66 мм. Уменьшение погрешности происходит за счет взаимной компенсации температурных зависимостей u_n и $[\alpha]$.

Габаритные размеры преобразователя датчика $30 \times 14 \times 12$ мм. Основными узлами его являются два оптических соединителя, поляризатор, пластинка $\lambda/4$, пластинка из $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ толщиной 4,7 мм и анализатор ($\varphi_a = \pi/4$).

На рис. 112 показаны температурные зависимости датчиков с различными размерами преобразователя. Кривая 2 подтверждает результаты теоретического исследования: при температурах от -10°C до 85°C нестабильность не превышает $\pm 0,2\%$.

Рассмотрим экспериментально определенные значения m (рис. 113) рассматриваемого преобразователя (в частности, $m = 0,034\%$ при $u_{\text{эф}} = 1$ В). Отклонение характеристики от ли-

Рис. 113. Зависимость коэффициента модуляции интенсивности излучения на выходе преобразователя датчика от эффективного значения напряжения, приложенного к датчику



нейной менее чем 1 % при $u_{эф} \leq 300$ В. Эти значения хорошо соответствуют результатам теоретического анализа.

Отношение сигнал/шум на выходе датчика достигает 90 дБ при полосе пропускания 1 кГц и $u_{эф} = 100$. Входное сопротивление более чем 10^4 МОм, входная емкость 5 пФ.

Световодный датчик напряженности электрического поля на основе электрического эффекта в кристалле $\text{Bi}_4\text{Ce}_3\text{O}_{12}$. Для измерения напряженности электрического поля и разности электрических потенциалов в высоковольтных установках может быть использован электрооптический эффект в кристаллах LiNbO_3 , $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{CeO}_{20}$. Температурная зависимость датчиков на основе LiNbO_3 объясняется накоплением на поверхности кристаллов электрического разряда, зависящего от температуры этих кристаллов, что приводит к искажению измеряемого электрического поля.

Поскольку $\text{Bi}_{12}\text{CeO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ обладают оптической активностью, чувствительность и температурная стабильность датчика являются сложными функциями протяженности пути распространения света в кристалле и с трудом регулируются [43].

$\text{Bi}_4\text{Ce}_3\text{O}_{12}$ не обладает ни естественным двойным лучепреломлением, ни оптической активностью и не накапливает на поверхности заряд, зависящий от температуры, и, следовательно, отсутствует определяемая перечисленными факторами температурная зависимость. Чувствительность датчика на основе $\text{Bi}_4\text{Ce}_3\text{O}_{12}$ может легко регулироваться при изменении длины кристаллов. Возмущение электрического поля, измеряемого датчиком на основе $\text{Bi}_4\text{Ce}_3\text{O}_{12}$, меньше, чем возмущения, вызываемые датчиками на основе других перечисленных материалов, поскольку относительная диэлектрическая проницаемость $\text{Bi}_4\text{Ce}_3\text{O}_{12}$ меньше, чем в кристаллах из LiNbO_3 , $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{CeO}_{20}$.

Схема датчика напряженности переменного электрического поля на основе $\text{Bi}_4\text{Ce}_3\text{O}_{12}$ соответствует рассмотренной выше схеме (см. рис. 106). Излучение к преобразователю передается по волоконному световоду. Для устранения модовых шумов в качестве источника излучения используется световод. Интенсивность излучения на выходе излучателя, а следовательно, и на входе преобразователя поддерживается приблизительно постоянной. В преобразователе излучение модулируется измеряемым

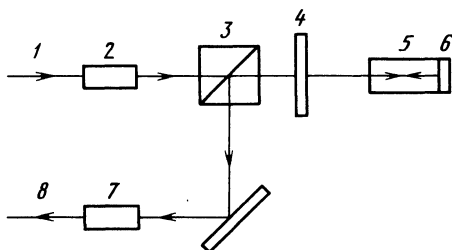


Рис. 114. Схема преобразователя световодного датчика напряженности электрического поля на основе кристалла $\text{Bi}_4\text{Ce}_3\text{O}_{12}$:

1, 8—волоконные световоды; 2, 7—градиентные стержневые линзы; 3—поляризующий делитель луча; 4—четверть-волновая пластинка; 5—кристалл $\text{Bi}_4\text{Ce}_3\text{O}_{12}$; 6—отражающая пленка

электрическим полем и по другому волоконному световоду подводится к фотодетектору. Сигнал на выходе фотодетектора усиливается, проходит через фильтры и разделяется на две составляющие, пропорциональные переменному и постоянному токам фотодетектора. Далее вычисляется отношение этих составляющих сигнала, которое и определяет напряженность измеряемого переменного электрического поля. Вычисление отношения указанных величин позволяет уменьшить погрешность измерения переменного электрического поля, обусловленную изменением выходной мощности источника излучения и изменением потерь при передаче по световодному тракту.

В преобразователе датчика напряженности переменного электрического поля (рис. 114) излучение, поступающее по оптическому волокну 1, коллимируется линзой 2. Часть излучения проходит через поляризующий делитель луча 3 и поляризуется. Четверть-волновая пластинка 4 вносит задержку по фазе $\pi/4$ между обыкновенным и необыкновенным лучами, а кристалл 5 — разность фаз, соответствующую напряженности измеряемого электрического поля. После отражения луча от отражающей пленки 6 кристалл 5 и пластинка 4 повторно внесут указанные задержки по фазе в оптическое излучение. Далее луч делится поляризующим делителем 3 на две составляющие, одна из которых, проходя через другую коллимирующую линзу 7 и волоконный световод 8, поступает на фотодиод. Излучение в преобразователе распространяется вдоль оси $\langle \bar{1}10 \rangle$ кристалла $\text{Bi}_4\text{Ce}_3\text{O}_{12}$, а электрическое поле прикладывается вдоль оси $\langle 110 \rangle$. Изменение разности фаз Γ между обыкновенным и необыкновенным лучами при двойном прохождении через кристалл 5 в результате воздействия поля E , возникающего в кристалле, определяется так:

$$\Gamma = (2\pi/\lambda)n^3r_{41}E(2L),$$

где λ — длина волны; n — показатель преломления ($n=2,07$ при $\lambda=453\ldots 616$ нм); r_{41} — электрооптический коэффициент ($r_{41}=0,95 \cdot 10^{-12}$ м/В при $\lambda=631$ нм); L — длина кристалла.

Следует подчеркнуть, что данный датчик — отражательного типа, и оптическое излучение распространяется вдоль кристалла дважды, следовательно, чувствительность датчика в 2 раза пре-

вышает чувствительность датчика на кристалле, вдоль которого оптическое излучение распространяется один раз. Кроме того, в датчике отражательного типа подключение волоконных световодов выполняется с одной стороны кристалла, что делает конструкцию датчика более удобной для эксплуатации.

Отношение интенсивности излучения на выходе преобразователя I_i к интенсивности излучения на его входе I_0 , без учета потерь в оптической системе преобразователя,

$$\frac{I_i}{I_0} = \sin^2\left(\frac{\Gamma}{2} + \frac{\pi}{4}\right).$$

Преобразователь датчика имеет длину 32 мм, ширину 17 мм, толщину 8 мм. Длина измерена вдоль направления распространения света, толщина — в направлении $\langle 110 \rangle$ кристалла $\text{Bi}_4\text{Ce}_3\text{O}_{12}$. Датчик позволяет измерять напряженность переменного электрического поля в пределах 10 В/см...3 кВ/см при отклонении выходной характеристики от линейной менее 0,5 %.

Температурная зависимость датчика исследовалась в пределах от -15 до $+60$ °С. К измерительному преобразователю было приложено электрическое поле напряженностью около 2 кВ/см. Изменение измеренного значения напряженности в указанном диапазоне температур не превышало $\pm 0,5$ %. В качестве четвертьволновой пластинки, обеспечивающей сдвиг по фазе $\pi/4$, использовали кварц. Естественное двойное лучепреломление и оптическая активность кварца зависят от температуры, но, поскольку использовалась пластинка толщиной всего около 0,1 мм, температурной погрешностью, вносимой этой пластинкой, можно пренебречь. Результаты эксперимента показали, что датчик обладает малой температурной погрешностью, а электрооптический коэффициент кристалла $\text{Bi}_4\text{Ce}_3\text{O}_{12}$ практически не зависит от температуры в указанном температурном диапазоне.

Чувствительность датчика зависит от угла между измерительным преобразователем и вектором напряженности электрического поля \mathbf{E} . Чувствительность датчика максимальна, если \mathbf{E} приложен в направлении $\langle 110 \rangle$ кристалла. Была экспериментально исследована зависимость относительной чувствительности датчика от α_E — острого угла между направлением $\langle 110 \rangle$ кристалла и вектором \mathbf{E} . Кривая зависимости относительной чувствительности датчика от угла α_E хорошо совпадает с кривой $\cos \alpha_E$.

Метод определения значения напряженности и направления электрического поля. Для определения вектора напряженности электрического поля можно использовать зависимость чувствительности датчика от угла α_E . Первоначально измерительный преобразователь помещают в точку измерения и определяют напряженность переменного электрического поля. Измеренную вели-

чину обозначим E_1 . Затем измерительный преобразователь поворачивают на 90° вокруг оси z , совпадающей с направлением распространения излучения в кристалле. Измерение повторяют и результат его обозначают E_2 . Величины E_1 и E_2 можно представить как

$$E_1 = E_r f(\alpha_E); E_2 = E_r f\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_E\right),$$

где $E_r = |\mathbf{E}_r|$; \mathbf{E}_r — проекция вектора напряженности электрического поля \mathbf{E} в точке измерения на плоскость, перпендикулярную оси z ; $f(\alpha_E)$ — функция, отражающая зависимость относительной чувствительности датчика от угла α_E ; α_E — острый угол между направлением $\langle 110 \rangle$ кристалла и \mathbf{E} .

Учитывая, что $f(\alpha_E) \approx \cos \alpha_E$, получаем

$$\alpha_E = \arctg(E_2/E_1); E_r = E_1/\cos \alpha_E.$$

Световодный датчик напряженности электрического поля высокой частоты на основе CdTe. Диэлектрический световодный датчик напряженности электрического поля на основе эффекта Поккельса в кристалле CdTe [52] предназначен для исследования электрических полей на частотах до 150 МГц. При расширении полости пропускания оптического приемника датчик может быть использован для исследований на частотах до 1 ГГц. Он предназначен для исследования ближнего поля передающей радиомантенны и не вызывает при этом значительных искажений поля.

Схема преобразователя рассматриваемого световодного датчика показана на рис. 115. Как видно на рисунке, излучение дважды проходит через кристалл, что позволяет в 2 раза увеличить чувствительность датчика. В данной конструкции входной и выходной световоды подводятся к преобразователю с одной стороны, что делает датчик более удобным в эксплуатации.

В ходе измерения чувствительности датчика на частоте 5 МГц при полосе пропускания измерительного прибора датчика 10 Гц

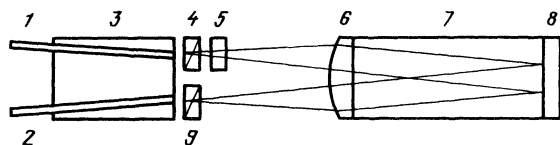


Рис. 115. Схема преобразователя световодного датчика напряженности электрического поля высокой частоты: 1, 2 — входной и выходной волоконные световоды; 3 — держатель волоконных световодов; 4 — поляризатор; 5 — четвертьволновая пластинка; 6 — линза; 7 — кристалл CdTe; 8 — диэлектрическое отражающее покрытие; 9 — анализатор

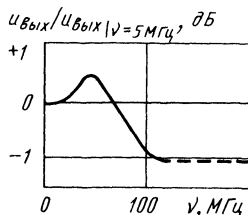


Рис. 116. Относительное изменение сигнала на выходе световодного датчика при изменении частоты исследуемого электрического поля

отношение сигнал/шум, равное 20 дБ, достигнуто при эффективном значении напряженности электрического поля 66 В/м.

Экспериментально было определено (рис. 116) изменение чувствительности датчика в полосе частот до 150 МГц по отношению к чувствительности датчика на частоте 5 МГц. На частотах выше 150 МГц характеристика не измерена вследствие влияния наводок на измерительную электронную аппаратуру. При увеличении мощности источника оптического сигнала и при улучшении экранирования измерительной аппаратуры возможно с помощью упомянутого преобразователя проводить измерения напряженности электрического поля на частотах вплоть до 1 ГГц [52].

На диаграмме зависимости чувствительности датчика от угла между направлением вектора электрического поля и осью датчика, представленной на рис. 117, непрерывной линией отмечена ожидаемая косинусоидальная зависимость, точками отмечены значения, измеренные при повороте преобразователя датчика вокруг оси, совпадающей с направлением распространения излучения.

Световодный датчик напряженности электрического поля на основе ЦТСЛ-керамики. Рассматриваемый датчик [24] предназначен для исследования сильных электромагнитных полей на частоте 50 Гц с целью выявления в высоковольтном энергетическом оборудовании точек, опасных в отношении возможного электрического пробоя. Датчик может быть использован также для неразрушающего контроля качества высоковольтных изоляторов путем исследования распределения поля у поверхности изоляторов.

Оптические импульсы с частотой следования 1 кГц и скважностью 2 поступают от источника импульсов через подводящий полимерный световод 7 к преобразователю 2 (рис. 118). На

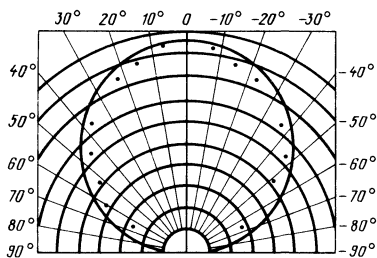


Рис. 117. Диаграмма зависимости чувствительности датчика от угла между направлением вектора электрического поля и осью датчика

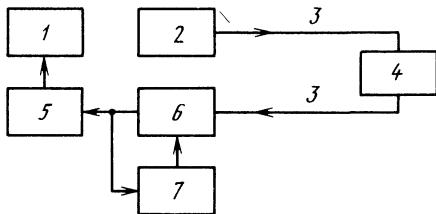
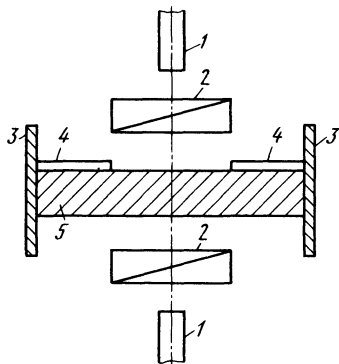


Рис. 118. Световодный датчик напряженности электрического поля на основе ЦТСЛ-керамики:

1—источник оптических импульсов с частотой следования 1 кГц и скважностью 2; 2—преобразователь датчика; 3—фотодетектор и усилитель с автоматической регулировкой усиления (АРУ); 4—фильтр на частоту 1 кГц и детектор АРУ; 5—фильтр на частоту 50 Гц; 6—цифровой вольтметр; 7—полимерные световоды

Рис. 119. Преобразователь датчика напряженности электрического поля на основе ЦТСЛ-керамики:

1—пластинка из ЦТСЛ-керамики; 2—планарные электроды; 3—емкостные обкладки; 4—скрещенные поляроидные пленки; 5—полимерные волоконные световоды



выходе преобразователя 2 излучение оказывается промодулированным по амплитуде с частотой модуляции 50 Гц. Глубина модуляции зависит от напряженности измеряемого электрического поля.

Промодулированные по амплитуде импульсы поступают через отводящий полимерный световод 7 на фотодетектор и усилитель 3 с АРУ. Глубина регулировки усиления достигает 40 дБ. На выходе усилителя 3 с помощью полосового фильтра на частоту 1 кГц и детектора АРУ 4 поддерживается постоянный уровень сигнала на частоте 1 кГц. Таким образом, на частоте 1 кГц образуется контрольный канал, позволяющий значительно уменьшить влияние изменений мощности излучателя в источнике оптических импульсов 1, а также изменений затуханий излучения в оптических соединениях и в световодах 7 на погрешность измерения напряженности электрического поля. Кроме того, работа источника 1 в импульсном режиме позволяет избежать приращения усилителя постоянного тока.

Преобразователь датчика (рис. 119) состоит из керамической пластинки (ЦТСЛ) 1, зажатой между двумя скрещенными поляроидными пленками 4. На керамическую пластинку 1 нанесены два планарных электрода 2, имеющих электрический контакт с емкостными обкладками 3, площадь которых равна 1 см³.

Керамика пластинки 1 в процессе изготовления преобразователя поляризуется так, что переменное электрическое поле линейно изменяет глубину модуляции излучения на выходе преобразователя. Датчик имеет линейную характеристику в диапазоне измеряемых значений 30...1000 В/мм. Верхний предел ограничивается для исключения возможности пробоя в преобразователе датчика, нижний предел может быть уменьшен до 1...5 В/мм при увеличении мощности излучения на входе преобразователя до 2 мВт.

3. СВЕТОВОДНЫЕ ДАТЧИКИ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Датчик тока на основе эффекта Фарадея в одномодовом волоконном световоде. На основе эффекта Фарадея в одномодовом волоконном световоде можно построить широкополосный датчик тока для высоковольтных цепей в случае, если удастся исполь-

зовать волоконный световод достаточной длины. В соответствии с формулой (1), в идеальном волоконном световоде (без собственного двойного лучепреломления) длиной l , намотанном в виде катушки из N витков радиусом r вокруг проводника с током i , плоскость поляризации излучения поворачивается на угол

$$\gamma = V_{\lambda} H_{11} l = NV_{\lambda} i,$$

где V_{λ} — постоянная Верде; $H_{11} = i/(2\pi r)$ — напряженность магнитного поля вдоль световодов.

Таким образом, чувствительность датчика прямо пропорциональна l . В реальном волоконном световоде, благодаря неоднородностям и внутренним напряжениям, возникает двойное лучепреломление, характеризующееся коэффициентом χ_i , изменяемым в радианах на метр. Двойное лучепреломление не позволяет реализовать датчик на эффекте Фарадея, если световод длиннее, чем π/χ_i [120]. Низкое значение χ_i дает возможность использовать более длинный световод, но и в этом случае необходима специальная технология для компенсации неизбежно возникающего двойного лучепреломления χ_b , вызванного изгибами при намотке волокна на катушку.

Эти проблемы могут быть частично решены за счет простого скручивания волокна. Скрученное волокно в датчике может быть значительно длиннее, чем π/χ_i . Одновременно за счет скрутки уменьшается влияние χ_b , появляется возможность упростить технологию изготовления катушки. Это подтверждено экспериментально [120]. Для изготовления катушки было использовано одномодовое волокно с $\chi_i = 6,8$ рад/м. Максимально возможная длина волоконного световода, используемого без скрутки, в датчике была бы равна 0,46 м. Волоконный световод длиной 10,37 м был скручен с коэффициентом скрутки $\tau = 94,3$ рад/м. Из скрученного световода изготовлена катушка ($N = 56$ и $r \approx 3$ см). С помощью этой катушки достигнута чувствительность 0,25 мрад/А, позволяющая измерять токи в диапазоне 0,2...2000 А.

Излучение от He—Ne-лазера (см. рис. 96) проходит через поляризатор и через объектив микроскопа вводится в волоконный световод. Из световода излучение выводится также с помощью объектива микроскопа, затем пропускается через компенсатор Бабине — Солейля и анализатор. В качестве анализатора используется призма Волластона, на выходах которой помещены два кремниевых фотодиода. С помощью электронного решающего устройства получают сигнал вида

$$S_n = \frac{i_1 - i_2}{i_1 + i_2},$$

где i_1 и i_2 — токи на выходах фотодиодов.

При идеальном волоконном световоде имеем

$$S(i_n) = \sin(2NV_{\lambda} i).$$

Для датчика тока представляет интерес только часть характеристики, близкая к линейной. Учитывая, что зависимость выходного сигнала S_n от тока i синусоидальная, для обеспечения отклонения характеристики от линейной менее чем $\pm 1\%$ выходной сигнал не должен превышать 0,35 от максимального значения. Выполнение аналогового преобразования по формуле

$$i = \frac{(S_n + S^3/6)}{2NV_{\lambda}}$$

позволяет обеспечить отклонение от линейной характеристики не более $\pm 1,4 \cdot 10^{-1}\%$ при $|S_n| \leq 0,8$. В рассматриваемом датчике это соответствует предельному значению измеряемого тока $|i| \leq 1,8$ кА.

Основной вклад в погрешность измерений вносит температурная погрешность, которая составляет 80 А/°С. Эта погрешность объясняется, главным образом, влиянием температуры на ту составляющую общего поворота плоскости поляризации, которая не зависит от измеряемого тока. Проблему уменьшения температурной погрешности можно решить созданием катушки, состоящей из двух частей, соединенных последовательно, но на которых волоконные световоды имеют закрутку в противоположных направлениях, что позволяет полностью исключить составляющую, зависящую от температуры.

Световодный датчик электрического тока на основе малогабаритной ячейки Фарадея с высокой температурной стабильностью. В работе [71] сообщается о разработке широкополосного датчика тока на основе эффекта Фарадея в стекле SF-6, являющемся диамагнетиком. Использование диамагнитного материала обусловило высокую температурную стабильность датчика. Температурная погрешность измерения не превышает $\pm 0,5\%$ в диапазоне температур от $-25...+80$ °С. Так как эффект Фарадея малоинерционен, верхнее значение частоты токов, измеряемых датчиком, определяется оптическим приемником.

В датчике тока (рис. 120) в качестве источника излучения 1 использован светодиод, излучение от которого через многомодовый световод 2 поступает в ячейку Фарадея 3, расположенную вблизи проводника с током 4. Излучение с выхода ячейки Фарадея 3 через многомодовый волоконный световод 2 подводится к фотодетектору. Сигнал с выхода фотодетектора усиливается предварительным усилителем 5, далее переменная и постоянная составляющие сигнала усиливаются раздельно усилителями 6 и 7. Электронная схема 8 определяет отношение переменной и постоянной составляющих сигнала, позволяя тем самым значительно

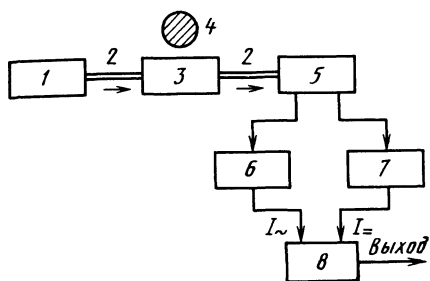


Рис. 120. Схема устройства для измерения тока:

1—источник излучения; 2—волоконные световоды; 3—ячейка Фарадея; 4—проводник с измеряемым током; 5—фотодетектор и предварительный усилитель; 6—усилитель переменной составляющей сигнала; 7—усилитель постоянной составляющей сигнала; 8—электронная схема, обеспечивающая операцию деления $i \sim / i =$

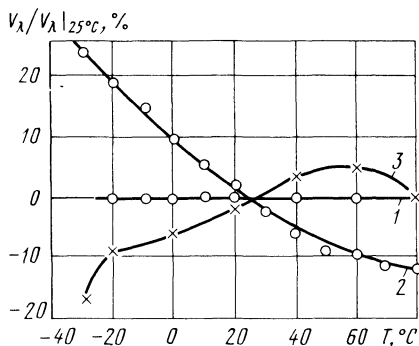


Рис. 121. Зависимость от температуры относительного изменения постоянной Верде для стекол различных марок:

1—SF-6 (диамагнетик); 2—FR-5 (парамагнетик); 3—YIG (ферромагнетик)

уменьшить погрешность измерения, обусловленную изменением мощности на выходе источника излучения.

В ячейке Фарадея (см. рис. 97) фарадеевский элемент выполнен из стекла SF-6 в виде отрезка многомодового волокна длиной 30 мм. Экспериментально показано, что данная длина оптимальна, увеличение длины фарадеевского элемента ограничено вследствие роста затухания излучения. Поляризатор и анализатор (см. рис. 97) выполнены в виде тонких пленок, нанесенных на торцовые поверхности фарадеевского элемента. Эти тонкопленочные элементы имеют приемлемое качество и значительно дешевле обычно применяющихся с этой целью призм Глана — Томсона или Волластона.

С целью выбора материала для фарадеевского элемента были проведены измерения постоянных Верде стекол SF-6 (диамагнетик), FR-5 (парамагнетик) и YIG (ферромагнетик) в интервале температур $-25...80^\circ\text{C}$. Относительное изменение постоянных Верде перечисленных материалов в зависимости от температуры показано на рис. 121 [71]. Стекло SF-6 выбрано для изготовления фарадеевского элемента с учетом практически полного отсутствия зависимости его постоянной Верде от температуры.

Угол поворота γ плоскости поляризации излучения в фарадеевском элементе пропорционален проекции вектора напряженности магнитного поля на направление распространения излучения H_{11} . Так как значение H_{11} пропорционально измеряемому току i , то угол γ также пропорционален i . С помощью анализатора модуляция по углу плоскости поляризации излучения преобразуется в модуляцию интенсивности. Для получения макси-

мула чувствительности и линейности датчика анализатор в ячейке Фарадея расположен под углом 45° к поляризатору. На входе фотодетектора мощность излучения

$$P = P_0(1 + \sin 2\gamma),$$

где P_0 — средняя мощность излучения на выходе фотодетектора.

Среднее квадратическое значение шумовых флуктуаций тока на нагрузке фотодетектора обусловлено флуктуациями тока дробовых, тепловых и так называемых избыточных шумов (N_{ex}). Отношение сигнал/шум на выходе фотодетектора определяется соотношением

$$SNR = \frac{(\sigma_\lambda P_0 \sin 2\gamma)^2}{2eBSP_0 + (4kTB/R) + N_{ex}},$$

где σ_λ — отклик фотодетектора; e — заряд электрона; B — полоса пропускания детектора; R — эквивалентное сопротивление нагрузки фотодетектора.

Выходная характеристика датчика линейна для изменяемых токов до 5000 А [71].

Преобразователь датчика тока, выполненный в виде ячейки Фарадея внутри одномодового волоконного световода. Преобразователь датчика тока (рис. 122), предложенный в работе [127], отличается очень малыми размерами, не требует встроенных линз и призм-поляризаторов. Фарадеевский вращатель изготовлен в виде отрезка одномодового волоконного световода из стекла FR-5. Постоянная Верде стекла FR-5, являющегося парамагнетиком, равна $0,314^\circ/\text{А}$ на длине волны $\lambda = 0,633$ мкм, что в 21 раз больше, чем в чистом кварце. Собственное двойное лучепрелом-

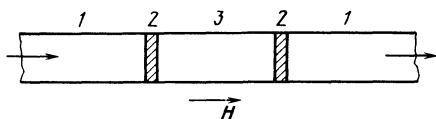


Рис. 122. Преобразователь датчика тока, выполненный в виде ячейки Фарадея в сердцевине одномодового волоконного световода:

1 — сердцевина одномодового волоконного световода, служащего для подвода и отвода излучения от ячейки Фарадея; 2 — микрополяризатор и микроанализатор, состоящие из многослойной структуры «металл—диэлектрик»; 3 — сердцевина одномодового волоконного световода из парамагнитного стекла FR-5 с высоким значением постоянной Верде

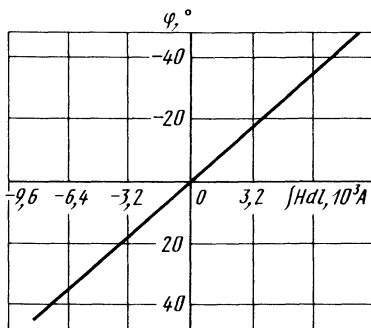
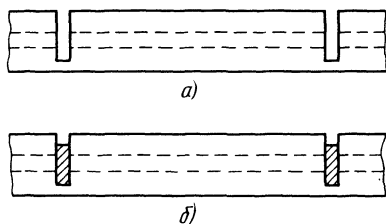


Рис. 123. Экспериментально определенная зависимость угла поворота плоскости поляризации излучения φ в отрезке одномодового волоконного световода из стекла FR-5 от значения $\int Hdl$ (при $t = 25^\circ\text{C}$ и $\lambda = 0,633$ мкм)

Рис. 124. Процесс изготовления микрополяризатора и микроанализатора в теле световода:

а—прорезание канавок с помощью процесса ионного травления; б—осаждение в канавках многослойной структуры «металл—диэлектрик»



ление стекла FR-5— $200^\circ/\text{м}$. Затухание в световоде составляет 10 дБ/м. Световод имеет W-профиль показателя преломления. Диаметр сердцевины волоконного световода 5,6 мкм, внешний диаметр световода 250 мкм. Постоянная Верде для одномодового волоконного световода из стекла FR-5 такая же, как для целого блока из этого стекла.

На рис. 123 показан результат измерений зависимости угла ψ поворота плоскости поляризации излучения в рассматриваемом преобразователе от значения $\{Hdl\}$. Вращение плоскости поляризации на 45° может быть получено при $\{Hdl\} = 8,4 \cdot 10^3 \text{ А}$.

Для изготовления преобразователя датчика была применена следующая специальная технология [127]. В теле световода с помощью процесса ионного травления прорезают канавки, как показано на рис. 124. Затем в каждой канавке осаждается многослойная структура «металл — диэлектрик», служащая поляризатором или анализатором. Такой процесс полностью устраняет необходимость классической юстировки отдельных компонентов ячейки Фарадея, выполнявшейся ранее вручную. Предложенный технологический процесс изготовления преобразователей может быть автоматизирован и пригоден для серийного изготовления датчиков тока.

Для достижения некоторого начального поворота плоскости поляризации излучения, соответствующего максимуму чувствительности датчика, необходимо использовать несколько постоянных магнитов, размещенных вдоль поверхности фарадеевского элемента.

• **Световодный датчик плотности мощности электромагнитного поля СВЧ-диапазона.** Электромагнитные поля обычно измеряют с помощью различных антенн, которые посредством электрических кабелей подключают к измерительным приборам, удаленным из зоны измерений. Антенна и соединительный электрический кабель существенно искажают исследуемое электромагнитное поле. В световодных датчиках используют преобразователи, помещаемые в исследуемую точку пространства и соединенные волоконными световодами с измерительными приборами. Приборы могут быть удалены из зоны измерений на значительное расстояние. Преобразователи световодных датчиков, предназначенных для ис-

следования электромагнитных полей, должны иметь минимальные размеры и изготавливаться, в основном, на основе диэлектрических материалов с минимальным значением диэлектрической проницаемости.

Примером датчика, вызывающего минимальные искажения исследуемого электромагнитного поля, является датчик плотности мощности электромагнитного поля СВЧ-диапазона, рассмотренный в работе [104].

Преобразователь этого датчика выполнен, в основном, из диэлектрика с диэлектрической проницаемостью, близкой к диэлектрической проницаемости воздуха. Небольшое количество проводящего материала, содержащееся в преобразователе, разогревается токами, индуцируемыми в СВЧ-поле. Конструкция преобразователя такова, что обеспечивается линейная зависимость разности температур разогреваемого материала и окружающей среды от плотности мощности электромагнитного поля.

Температура разогреваемого в преобразователе материала измеряется с помощью световодного датчика температуры. Использование такого датчика в рассматриваемом случае дает значительный положительный эффект. Малая постоянная времени измерения по сравнению с постоянными времени в других термометрических методах измерения мощности электромагнитного поля, а также малая энергия, необходимая для разогрева термочувствительного материала, обусловлены очень малой массой, а следовательно, и низкой теплоемкостью термочувствительного материала световодного датчика температуры. Высокая точность измерения температуры (погрешность менее $0,1^\circ\text{C}$) с помощью световодного датчика обуславливает потенциальную возможность измерения с высокой точностью и в значительном динамическом диапазоне плотности мощности электромагнитного поля. Для нормальной работы датчика достаточно очень небольшое превышение температуры термочувствительного материала над температурой окружающей среды. Так, при максимальной измеряемой в ходе экспериментов плотности мощности электромагнитного поля (40 мВт/см^2) температура термочувствительного материала менее чем на 2°C превышала температуру окружающей среды [104]. Термочувствительный материал, размещенный в преобразователе, соединяется с измерительным прибором только с помощью волоконного световода, который вносит минимальные искажения в исследуемое поле.

Мощность, поглощаемую телом конечного размера в СВЧ-поле, можно записать в виде

$$P = CP_i,$$

где C — некоторый коэффициент; P_i — падающая мощность.

Поглощаемая мощность приводит к разогреву тела. Как известно, существуют три способа эвакуации тепловой энергии

с поверхности и из внутренней структуры тел: радиация (P_n), конвекция (P_k) и теплопроводность (P_τ) [7]. При равновесном состоянии, когда поглощаемая мощность равна мощности рассеиваемой,

$$P = P_n + P_k + P_\tau.$$

Мощность, рассеиваемая в окружающее пространство за счет теплового излучения некоторой поверхности в соответствии с законом Стефана — Больцмана, определяется выражением [20]

$$P_n \approx \sigma \varepsilon_{\text{пр}} S (T^4 - T_c^4),$$

где σ — постоянная Стефана — Больцмана, равная $5,67 \times 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot (\text{°})^4$; T — температура поверхности; T_c — температура окружающей среды; S — площадь поверхности; $\varepsilon_{\text{пр}}$ — приведенная степень черноты поверхности.

Мощность, рассеиваемая за счет конвекции, определяется уравнением [20]

$$P_k = a_k S (T - T_c)^{1+\delta},$$

где a_k — константа для конкретной конструкции; S — площадь охлаждаемой поверхности; δ — число в диапазоне 0,1...0,6 [104].

Поскольку P_n и P_k нелинейно зависят от разности температур T и T_c , конструкция преобразователя датчика выполнена таким образом, чтобы минимизировать энергию, рассеиваемую за счет излучения и конвекции и обеспечить основной отвод теплоты от нагреваемого проводящего материала только за счет теплопроводности. Проводящий материал и нагреваемый до температуры этого материала термочувствительный материал световодного датчика температуры помещены между двумя пластинками, выполненными из материала типа пенопласта. Выражение для мощности, рассеиваемой за счет теплопроводности пластинок, получается как результат решения дифференциального уравнения Фурье [26] для одномерного стационарного случая:

$$P_\tau = K(\Delta T/d)A,$$

где K — теплопроводность материала пластинки; ΔT — разность температур наружной и внутренней поверхностей пластинки; d — толщина пластинки; A — суммарная площадь пластинок.

Приведенное выражение справедливо, если d значительно меньше размеров, определяющих площадь A . Температура внешних поверхностей $T_{\text{пов}}$ термоизолирующих пластинок почти равна температуре окружающей среды. С помощью высокочувствительного тепловизора показано [104], что температура этих поверхностей менее чем на 0,1 °С превышает температуру окружающей среды, даже при максимальной измеряемой плотности мощности электромагнитного поля. Тогда

$$\Delta T \approx T_m - T_c,$$

где T_m — температура термочувствительного материала термометра.

При равновесном состоянии

$$CP_i = K(\Delta T/d)A,$$

или

$$P_i = \beta \Delta T,$$

где

$$\beta = KA/(Cd).$$

Из последнего выражения видно, что ΔT линейно зависит от плотности мощности электромагнитного поля; β в значительной степени зависит от частоты поля и определяется эмпирическим путем.

Датчик температуры проводящего материала в преобразователе выполнен на основе волоконного световода, на торец которого нанесено небольшое количество (около 40 мкг) специального термочувствительного материала на основе фосфора. Другой конец волоконного световода через оптический разъем подключен к измерительному прибору. Для механической защиты волоконного световода и предотвращения проникновения в устройство паразитного излучения из окружающей среды используется полимерная трубка. Ультрафиолетовое излучение большой интенсивности от источника, размещенного внутри измерительного прибора, через волоконный световод подводится к термочувствительному материалу на основе фосфора. В результате облучения этот материал становится источником фотoluminesцентного излучения видимого диапазона, которое через этот же световод поступает в измерительный прибор. В приборе излучение разветвляется на два канала, и фильтрами выделяются составляющие в двух диапазонах частот. Оптические сигналы на выходе фильтров с помощью кремниевых фотодиодов преобразуются в электрические сигналы. По отношению уровней этих сигналов в измерительном приборе вычисляется температура термочувствительного материала, которая равна температуре проводящего материала в преобразователе.

В преобразователе световодного датчика плотности мощности электромагнитного поля СВЧ-диапазона, представленном на рис. 125, пластинки изготовлены из материала с относительной диэлектрической постоянной, равной 1,1 (стирофом). Пересекающиеся диполи выполнены методом напыления из материала, используемого для покрытия телевизионных трубок. Напыление производилось до тех пор, пока толщина покрытия не достигла приблизительно 10 мкм.

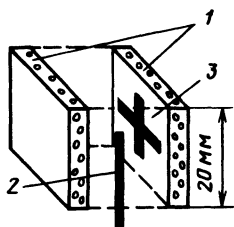


Рис. 125. Конструкция преобразователя световодного датчика плотности мощности электромагнитного поля СВЧ-диапазона:

1—пластинки из стирофома; 2—световод с термочувствительным материалом на торце; 3—пересекающиеся диполи

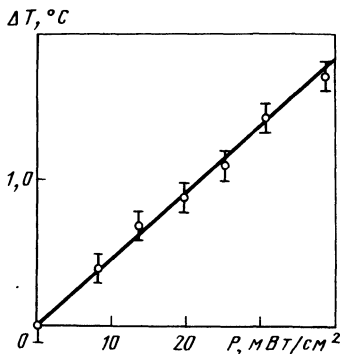


Рис. 126. Зависимость измеренного изменения температуры проводящего материала в преобразователе датчика от плотности потока энергии электромагнитного поля P при $\nu = 2,45$ ГГц

На рис. 126 представлены результаты измерения плотности мощности электромагнитного поля в диапазоне от 0 до 40 мВт/см² на частоте 2,45 ГГц. Приведенная характеристика доказывает возможность построения преобразователя датчика, в котором изменение температуры проводящего материала линейно зависит от изменения измеряемой плотности мощности. На рис. 127 представлена временная диаграмма, отражающая влияние шумов в системе датчика и флуктуаций температуры окружающей среды на выходной сигнал. Большая часть обусловленной этими причинами погрешности, достигающей $\pm 0,1$ °C (что соответствует погрешности измеряемой величины примерно ± 2 мВт/см²), является результатом флуктуаций температуры окружающей среды [104]. Точность датчика может быть значительно повышена путем введения компенсационного канала, позволяющего учитывать температуру окружающей среды.

Быстродействие датчика можно определить по временной диаграмме (рис. 128), отражающей изменение выходного сиг-

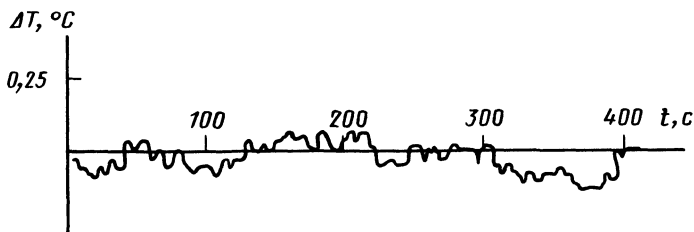


Рис. 127. Влияние шумов в системе и флуктуаций температуры окружающей среды на выходной сигнал световодного датчика

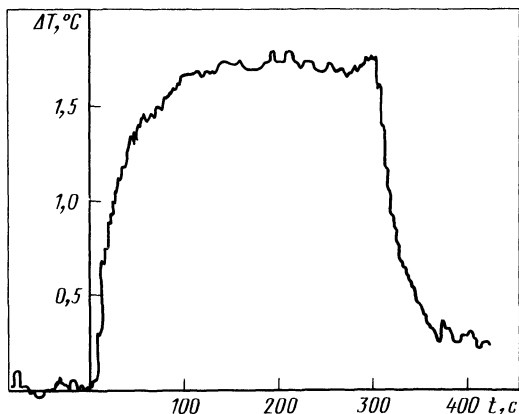


Рис. 128. Изменение выходного сигнала датчика при воздействии на него радиоимпульса

нала датчика при измерении поля радиоимпульса, начинающегося при $t=0$ и заканчивающегося при $t=300$ с. Плотность мощности электромагнитного поля в ходе эксперимента была равна 39 мВт/см^2 . Датчик обладает достаточно большой инерционностью. Время установления температуры нагреваемого материала до 99% от максимального значения составляет около 120 с.

Датчики рассмотренного типа имеют относительно простую и технологическую конструкцию. Такие датчики без компенсационного канала, позволяющего учитывать температуру окружающей среды, могут быть применены для исследования сильных полей.

Датчик магнитных полей на основе магнитострикционного эффекта в тонкопленочном покрытии волоконного световода.

Использование металлических стекол в качестве магнитострикционного материала позволяет, как было отмечено в начале настоящей главы, значительно повысить чувствительность датчиков магнитного поля. В работе [138] рассмотрен световодный датчик для исследования постоянных магнитных полей, в котором использован интерферометр Маха—Зендера. В измерительное плечо интерферометра включен световод, покрытый тонкой пленкой из аморфного сплава $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$, магнитострикционный эффект в которой на два порядка выше, чем в никелевом покрытии световода, нанесенном методом напыления.

Действие датчика основано на изменении оптической длины пути излучения в измерительном плече интерферометра при возникновении деформаций в магнитострикционном материале покрытия световода. Интерференционная картина регистрируется с помощью линейки фотодиодов, сигналы с выхода которых обрабатываются ЭВМ.

Основой интерферометра являются два одинаковых отрезка волоконного световода с диаметром сердцевины 4 мкм и отражающей оболочки 125 мкм. В качестве излучателя применен He—Ne-лазер. Концы волоконных световодов с удаленной на промежутке

приблизительно 150 мм защитной оболочкой помещают в специальные наконечники, покрытые изнутри черным неопреном. Такое покрытие позволяет эффективно вывести оболочечные моды, не применяя обычно используемых для этой цели ванн из жидкого парафина. Пленка толщиной 5 мкм из аморфного сплава $\text{Fe}_{80}\text{V}_{20}$ напылена на участке длиной 50 мкм непосредственно на наружную поверхность отражающей оболочки световода.

Интерференционная картина получается с помощью линзы, в фокусе которой располагаются выходные торцы опорного и измерительного световодов интерферометра. Линейка, служащая для регистрации этой картины, состоит из 128 фотодиодов, сигналы с выходов которых обрабатывает ЭВМ. Поскольку контрастность интерференционной картины зависит от взаимной ориентации плоскостей поляризации излучений на выходах световодов интерферометра, осуществляется нормализация коэффициента контрастности. Сдвиг по фазе излучений на выходах световодов интерферометра определяется посредством вычитания в ЭВМ чисел, соответствующих сигналам фотодиодной линейки без воздействия и при воздействии магнитного поля.

ВОЛОКОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ГИРОСКОПЫ И ВОЛОКОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ АКСЕЛЕРОМЕТРЫ

1. ОСОБЕННОСТИ ВОЛОКОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ

Волоконный оптический гироскоп (ВОГ) и волоконный оптический акселерометр (ВОА) — новые оптико-электронные приборы, разработка которых стала возможной с развитием и совершенствованием элементной базы квантовой электроники. Перспективность применения этих приборов как датчиков первичной информации в системах навигации, управления и стабилизации подвижных объектов несомненна. Особенно это относится к ВОГ, поэтому основное содержание настоящей главы посвящено именно ВОГ.

Главными элементами ВОГ являются излучатель, фотоприемник и многовитковый замкнутый контур из одномодового диэлектрического световода с малым затуханием — так называемый интерферометр Саньяка. Достоинством интерферометра Саньяка является возможность реализовать с его помощью точные интерферометрические измерения фазы оптического излучения. Это свойство и явилось стимулирующим началом в разработке ВОГ — прибора, регистрирующего угловую скорость объекта по интерферометрическому измерению фазы оптического излучения.

Перечислим важнейшие особенности ВОГ, определяющие возможности его применения в качестве чувствительного элемента в системах управления и стабилизации:

- потенциально высокая чувствительность (точность) прибора, квантовый предел которой составляет менее $0,001^\circ/\text{ч}$;

- большой динамический диапазон измеряемых угловых скоростей (диапазон $1^\circ/\text{ч} \dots 300^\circ/\text{с}$ можно перекрыть одним прибором);

- твердотельность исполнения конструкции, малые размеры и масса (в перспективе — возможность разработки ВОГ полностью на интегральных оптических и электронных схемах);

- очень малое потребление энергии;

- относительная простота технологии, низкая стоимость производства и конструирования (при массовом производстве и использовании элементной базы световодных систем связи);

- отсутствие быстровращающихся механических роторов и подшипников (по сравнению с механическим гироскопом);

очень малое время выхода на рабочий режим, так как не затрачивается время на раскрутку ротора;

нечувствительность к внешним электромагнитным излучениям и проникающей радиации, кроме того, нечувствительность к механическим перегрузкам.

Уместно отметить существенные отличия ВОГ от кольцевого лазерного гироскопа (КЛГ). В КЛГ в качестве замкнутого оптического контура используется газоразрядный лазер с кольцевым резонатором. В контуре возбуждаются когерентные колебания, распространяющиеся в противоположных направлениях. При вращающемся контуре разность частот противоположно бегущих лучей пропорциональна угловой скорости контура. Конструктивные отличия КЛГ от ВОГ определяют следующие преимущества последнего:

1) в ВОГ отсутствует так называемое явление «захвата», т. е. синхронизация противоположно бегущих типов колебаний вблизи нулевой угловой скорости, что позволяет измерять очень малые значения угловой скорости без необходимости внесения сложных в настройке устройств смещения нулевой точки;

2) в ВОГ эффект Саньяка проявляется на несколько порядков сильнее, чем в КЛГ, вследствие большого периметра, достигающего 500...1500 м, и малых потерь в волокне;

3) в КЛГ необходимо контролировать давление газов и утечку в газоразрядной трубке, в то время как ВОГ целиком конструируется в виде твердого тела (в будущем полностью на интегральных оптических схемах);

4) ВОГ измеряет мгновенное значение угловой скорости, в то время как КЛГ регистрирует приращение углового положения.

По данным зарубежной литературы, ВОГ найдет применение в системах управления малых судов и тактических ракет (требуемая точность более $10^\circ/\text{ч}$); ракет средней дальности и самолетов гражданской авиации (требуемая точность $1...10^\circ/\text{ч}$ и $0,1...1^\circ/\text{ч}$ — в зависимости от назначения); больших кораблей, самолетов военной авиации и ракет большой дальности (требуемая точность $0,01...0,1^\circ/\text{ч}$); стратегических носителей, космических кораблей и подводных лодок (требуемая точность менее $0,01^\circ/\text{ч}$) [106].

Исследования и разработки ВОГ идут по двум основным направлениям.

Первое направление связано с совершенствованием элементной базы прибора, т. е. с созданием световодов с устойчивой поляризацией, направленных световодных соединителей и ответвителей, поляризаторов, фазовых и частотных модуляторов, излучателей и фотодетекторов, интегральных оптических схем и т. д. Следует, разумеется, учитывать то обстоятельство, что ряд элементов ВОГ уже разработаны и выпускаются промышлен-

ленностью, в частности, для использования в волоконно-оптических системах связи. Однако специфика ВОГ налагает ряд дополнительных требований на элементы прибора (как будет показано ниже).

Второе направление связано с очень высокой чувствительностью ВОГ к внешним и внутренним возмущениям и неустойчивостям и с необходимостью создания прибора высокой точности. Эта специфика приводит к необходимости создания различных устройств, компенсирующих или стабилизирующих действие возмущений и органически входящих в ВОГ. Оба направления тесно взаимосвязаны.

Параллельно с совершенствованием элементов ВОГ разрабатываются различные схемы компенсации возмущений и неустойчивостей, а также схемы обработки выходной информации ВОГ.

Большое число научных публикаций говорит о том, что этап экспериментальных исследований проблемы ВОГ находится в стадии завершения, наступает этап опытно-конструкторской разработки и создания серийных приборов. По опубликованным данным [19, 23, 35, 76, 106] ВОГ может полностью заменить сложные и дорогостоящие электромеханические (роторные) гироскопы и трехосные гиросtabilизированные платформы, в частности, он может быть применен в качестве жестко закрепленного на корпусе носителя чувствительного датчика вращения в инерциальных системах управления и стабилизации. К 1994 г. в США предполагается около 50% всех гироскопов, используемых в системах навигации, управления и стабилизации объектов различного назначения, заменить волоконными оптическими гироскопами [106].

В отечественной печати проблеме ВОГ посвящен ряд научных работ [3, 5, 12, 25]. В настоящей главе рассмотрены физическая модель шумов и неустойчивостей ВОГ, волоконные оптические гироскопы с усложненными системами обработки и коррекцией масштабного коэффициента, ВОГ с измерением фазы на низкой частоте, гетеродинные ВОГ, волоконные оптические акселерометры. Некоторые из рассмотренных конструкций и способов компенсации возмущений, возможно, и не найдут широкого применения, однако можно надеяться, что большинство способов получат свое развитие при конструировании ВОГ.

Учитывая перспективность этого нового прибора, небезинтересно и поучительно рассмотреть основные идеи и технические решения, которые были использованы при конструировании и испытаниях экспериментальных ВОГ.

2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ВОГ

Принцип действия ВОГ основан на «вихревом» эффекте Саньяка [4, 11, 23]. Идею эффекта Саньяка можно пояснить следующим образом.

Рассмотрим идеальный кольцевой оптический контур радиуса R_k , возбуждаемый световым лучом (рис. 129). Зеркало 31 является полупрозрачным, а зеркало 32 — полностью отражающим. С помощью этих зеркал луч, приходящий в точку A , расщепляется на два луча. Один луч распространяется по часовой стрелке в контуре, а другой луч — против часовой стрелки. После обхода контура лучи с помощью этих же зеркал объединяются и направляются по одному пути. В случае, когда оптический контур неподвижен, пути прохождения лучей одинаковы и равны $2\pi R_k = c\tau$, где c — скорость света; τ — время прохождения периметра контура лучом. Вследствие равенства путей распространения оба луча приходят на расщепитель в точку A в фазе. Приведем теперь контур во вращение с постоянной угловой скоростью Ω . Луч, бегущий по часовой стрелке, прежде чем попадает на движущийся расщепитель, пройдет путь

$$2\pi R_k + R_k \Omega \tau_+ = c\tau_+.$$

Дополнительное слагаемое появляется вследствие того, что за время прохождения луча по замкнутому контуру зеркальный расщепитель, ранее находившийся в точке A , перейдет в точку B .

Рассуждая аналогично, найдем, что для луча, распространяющегося против часовой стрелки, путь равен

$$2\pi R_k - R_k \Omega \tau_- = c\tau_-.$$

Таким образом, во вращающемся контуре пути распространения встречно бегущих лучей неодинаковы. Это эквивалентно разным временам τ_+ и τ_- прохождения лучами замкнутого вращающегося контура. Разность времен распространения

$$\Delta\tau = \tau_+ - \tau_- = \frac{4\pi R_k^2}{c^2 - R_k^2 \Omega^2} \Omega.$$

В приближении первого порядка по $R_k \Omega / c$

$$\Delta\tau = \frac{4\pi R_k^2}{c^2} \Omega = \frac{4S}{c^2} \Omega,$$

где $S = \pi R_k^2$ — площадь контура.

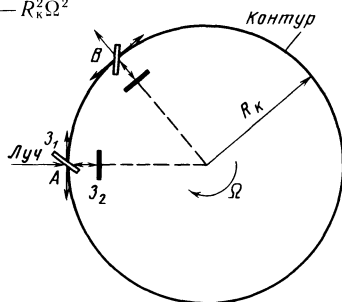


Рис. 129. Вихревой эффект Саньяка

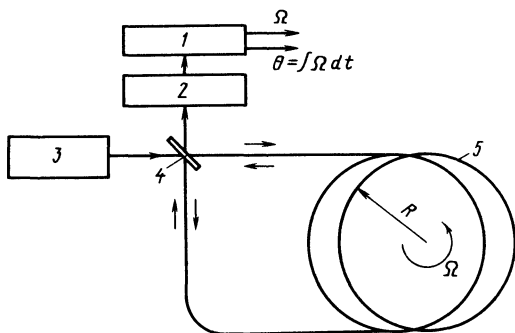


Рис. 130. Принципиальная схема ВОГ:

1—электронное устройство обработки; 2—фотодетектор; 3—лазерный диод; 4—светоделитель; 5—волоконный контур; θ —угол поворота

Выражая относительное запаздывание встречных волн, возникающее при вращении контура, через разность фаз встречных волн, получим

$$\Delta\varphi_c = \omega\Delta\tau = \frac{4\omega S}{c^2} \Omega = \frac{8\pi\nu S}{c^2} \Omega = \frac{8\pi S}{\lambda c} \Omega, \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi\nu$; S — площадь контура; $\lambda = c/\nu$. Разность фаз $\Delta\varphi_c$ называется *фазой Саньяка*. Из выражения (2) следует, что фаза Саньяка пропорциональна угловой скорости контура.

Рассмотрим теперь простейшую конструкцию ВОГ (рис. 130). В этой конструкции замкнутый оптический контур образован многовитковой катушкой оптического волокна. В качестве источника используется лазерный диод, излучение которого с помощью полупрозрачного светоделителя разделяется на два луча. Лучи направляются в противоположные ветви контура, образуя встречно бегущие потоки. Два встречных луча, обошедшие контур в противоположных направлениях, рекомбинируют на светоделителе и смешиваются в фотодетекторе.

Используя выражение (2), фазу Саньяка можно записать в других обозначениях:

$$\Delta\varphi_c = \frac{8\pi N S_b}{\lambda c} \Omega = \frac{4\pi R L}{\lambda c} \Omega, \quad (3)$$

где N — число витков; S_b — площадь одного витка контура; R — радиус витка контура; L — полная длина контура.

Электронное устройство обработки измеряет разность фаз $\Delta\varphi_c$ и, следовательно, угловую скорость объекта Ω , на котором закреплен контур. Интегрируя измеренный сигнал, получают угол поворота объекта. Информация об угловой скорости и угле поворота используется для управления и стабилизации объекта.

При смешении двух лучей в фотодетекторе результирующее колебание имеет вид

$$u = A_1 e^{j(\omega t + \varphi_1)} + A_2 e^{j(\omega t + \varphi_2)},$$

где A_1 , A_2 — амплитуды колебаний; ω — частота излучения;

$\varphi_1 = \varphi_0 + \frac{1}{2}\Delta\varphi_C$; $\varphi_2 = \varphi_0 - \frac{1}{2}\Delta\varphi_C$; φ_0 — начальная фаза колебания; $\Delta\varphi_C$ — фаза Саньяка.

Интенсивность излучения, падающего на фотодетектор,

$$I = I_{\text{и}}^* = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (4)$$

Обозначим интенсивность излучения на выходе лазерного диода I_0 . Считая, что в световодном контуре отсутствуют потери, и полагая, что светоделитель разделяет входную энергию точно поровну, получим $A_1^2 = A_2^2 = I_0/4$. Учитывая это, запишем выражение (4) в виде

$$I = \frac{1}{2}I_0(1 + \cos\Delta\varphi_C). \quad (5)$$

Как следует из графика зависимости, описываемой выражением (5) (рис. 131), при малых значениях $\Delta\varphi_C$ имеет место очень малое изменение интенсивности, т. е. такая конфигурация ВОГ имеет небольшую чувствительность к малым угловым скоростям. Это также следует и из выражения для чувствительности:

$$(1/I_0)(dI/d\Delta\varphi_C) = \frac{1}{2}\sin\Delta\varphi_C.$$

Для обеспечения работы ВОГ в области наивысшей крутизны графика (см. рис. 131), т. е. для максимизации чувствительности прибора к малым изменениям информативного параметра (фазы Саньяка), в волоконный контур включают фазосдвигающее устройство, дающее «невзаимный» фазовый сдвиг $\pi/2$ между двумя встречно бегущими лучами. В этом случае интен-

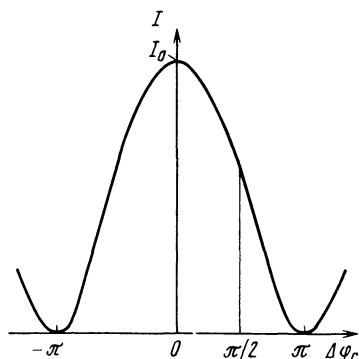


Рис. 131. Изменение интенсивности излучения на входе фотодетектора от фазы Саньяка

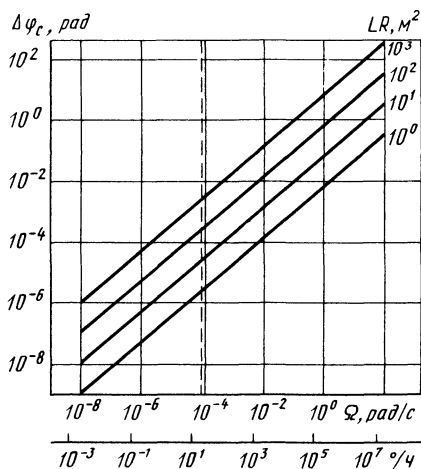


Рис. 132. Изменение фазы Саньяка в зависимости от угловой скорости

сивность интерференционного сигнала на фотодетекторе будет изменяться почти линейно в широких пределах при малых угловых скоростях:

$$I = \frac{1}{2} I_0 (1 - \sin \Delta \varphi_c), \quad (6)$$

а чувствительность ВОГ будет иметь максимальное значение 0,5.

В регистрирующем устройстве ВОГ используется фотодетектор, выходной ток которого пропорционален интенсивности падающего входного излучения, т. е.

$$i \approx \sigma_\lambda I = \frac{\eta_\lambda e}{h\nu} I, \quad (7)$$

где η_λ — квантовая эффективность фотодетектора; e — заряд электрона; h — постоянная Планка; ν — частота оптического излучения.

Пренебрегая постоянной составляющей тока, из формул (6) и (7) следует, что для малых значений $\Delta \varphi_c$ сигнальный ток

$$i_c \approx \frac{\sigma_\lambda}{2} I_0 \sin \Delta \varphi_c \approx \frac{\sigma_\lambda}{2} I_0 \Delta \varphi_c,$$

Таким образом, изменения угловой скорости Ω , приводящие к изменениям фазы Саньяка $\Delta \varphi_c$, регистрируются изменениями выходного сигнального тока фотодетектора i_c . Следует сразу же заметить, что такая схема регистрации имеет малый динамический диапазон линейности.

На рис. 132 построена зависимость фазы Саньяка от угловой скорости [согласно выражению (3)] для $\lambda = 0,6328$ мкм и при различных значениях LR . Из графиков видно, что для типичной конструкции ВОГ с радиусом витка контура $R = 0,1$ м и длиной световода $L = 500$ м измерение значения угловой скорости, равной $1^\circ/\text{ч}$, требует регистрации фазы с разрешением около 10^{-5} рад. Для измерения угловых скоростей в диапазоне $0,1 \dots 0,01^\circ/\text{ч}$ (точная инерциальная навигация) требуется регистрация фазы с разрешением $10^{-6} \dots 10^{-7}$ рад.

3. ЭЛЕМЕНТЫ ВОГ

Основными элементами ВОГ являются световодный контур, световой излучатель и фотодетектор. Наряду с этими оптическими элементами при конструировании ВОГ применяются поляризаторы, фазовые пластинки, ротаторы (вращатели плоскости поляризации), фазовые и частотные модуляторы, соединители и светоделители лучей, пространственные фильтры, зеркала, интегрально-оптические схемы и т. д. Кроме того, в схему ВОГ входит электронная система обработки выходного сигнала.

Световоды. В настоящее время для намотки чувствительного контура ВОГ используют три вида волокна: многомодовое, одномодовое и одномодовое с устойчивой поляризацией. Длина

периметра контура 40...1200 м, диаметр катушки 0,05...0,3 м. Отечественной и зарубежной промышленностью хорошо освоены круглые двухслойные диэлектрические световоды, состоящие из световедущей сердцевины с малыми потерями и окружающей ее оболочки (см. рис. 38, а), в которых коэффициент преломления оболочки n_2 примерно на 0,01...0,001 меньше коэффициента преломления сердцевины n_1 .

В ранних конструкциях волоконных оптических гироскопов применяли многомодовые световоды. Однако присущие им недостатки, в частности дисперсионные характеристики, привели к тому, что многомодовый световод был повсеместно вытеснен одномодовым.

Одномодовые световоды обладают меньшими потерями, чем многомодовые ($\sim 0,2$ дБ/км при длине волны 1,55 мкм). В них отсутствует одна из причин появления невязимости в контуре ВОГ — дисперсия мод, а дисперсия материала может быть уменьшена на длине волны 1,3...1,5 мкм. Однако применение в ВОГ одномодовых световодов требует разработки оптических соединителей, поляризаторов, фильтров, фазовых модуляторов и других элементов, построенных непосредственно на одномодовом волокне.

Ряд зарубежных фирм освоили производство одномодовых волокон со следующими характеристиками. Диаметр сердцевины равен 7...10 мкм, диаметр оболочки 100...125 мкм, полный диаметр волокна 200...250 мкм, потери, измеренные на длине волны 1,3 мкм, составляют 0,5...0,8 дБ/км, полоса пропускания более 25 ГГц·км, длина промышленного отрезка 5...10 км.

Некоторые применения волокна такие, например, как применение в датчиках вращения (ВОГ), где длина волоконного контура 200...1200 м, или применение в гетеродинных волоконных линиях связи с дальностью порядка 100 км, требуют использования так называемого волокна с устойчивой поляризацией. Поэтому в последнее время разработчики ВОГ все чаще используют для формирования контура одномодовое волокно, позволяющее сохранить поляризацию моды на больших длинах световода.

Световые излучатели для ВОГ. К источникам излучения в ВОГ предъявляют следующие требования: соответствие длины волны излучения номинальной длине волны световода, для которой потери минимальны; обеспечение достаточно высокой эффективности ввода излучения в световод; возможность генерации источника в непрерывном режиме без устройства охлаждения; достаточно высокий уровень выходной мощности излучателя; долговечность, воспроизводимость характеристик и твердотельное исполнение; минимальные размеры, масса, потребляемая мощность и стоимость излучателя.

Наиболее полно этим условиям отвечают полупроводниковые лазерные диоды (ЛД), светоизлучающие диоды (СИД) и суперлюминесцентные диоды (СЛД).

При конструировании ВОГ в качестве излучателя, соединяемого с волоконным световодом, часто применяют лазерные диоды с полосковой геометрией контакта на двойных гетероструктурах. В этих конструкциях лазерное излучение выходит из малой области, что обеспечивает хорошие условия ввода излучения в световоды с низкой числовой апертурой. Вследствие небольших размеров активной области лазер обладает малыми пороговыми и рабочими токами при достаточной выходной мощности, что обеспечивает длительную работу в непрерывном режиме при нормальной температуре. При малом размере активной области проще получить площадь, свободную от дефектов, что важно для повышения эффективности лазера.

Светоизлучающие диоды генерируют некогерентное излучение, поскольку в них излучательная рекомбинация носит чисто спонтанный характер. Спектральное распределение линии излучения излучательной рекомбинации по крайней мере на порядок шире линии излучения лазерных диодов. В ряде случаев широкий спектр излучения СИД весьма благоприятен для ВОГ, поскольку за счет малой длины когерентности позволяет компенсировать влияние эффекта Керра и обратного рэлеевского рассеяния. Коэффициент ввода излучения в световоды с низкой числовой аппаратурой значительно меньше, чем для лазерных диодов. Однако СИД проще в конструктивном выполнении и обладает меньшей температурной зависимостью мощности излучения.

Суперлюминесцентные диоды конструируют на основе двойной гетероструктуры с полосковой геометрией. При конструировании двойной гетероструктуры с полосковой геометрией для СЛД активная p -область CaAs делается толщиной 0,3...0,5 мкм, контактная полоска — шириной 12...15 мкм. При длине полоски до 1,5 мм и плотности тока 10^4 А/см² мощность излучения в импульсном режиме достигает 50 мВт при ширине линии генерации 8 нм [21].

Для одной экспериментальной конструкции ВОГ был разработан специальный СЛД [69], основанный на V-образной желобковой структуре инжекционного полупроводникового лазера. Лазер с V-образной желобковой структурой — это специальный инжекционный лазер с полосковой геометрией и с волноводным усилением. При конструировании суперлюминесцентного диода из этой желобковой структуры одно зеркало лазера заменяется ненакачиваемой, и поэтому поглощающей, областью материала длиной 300 мкм. Мощность в непрерывном режиме — около 5 мВт, максимум линии излучения на длине волны 0,82 мкм при ширине линии 11 нм.

Фотодетекторы. Назначение фотодетектора (ФД) волоконного оптического гироскопа состоит в преобразовании оптической интерференционной картины на входе в выходной электрический сигнал. Как следует из формул (6), (7), интенсивность интер-

ференционного оптического сигнала зависит от соотношения фаз двух интерферирующих лучей, поэтому амплитуда электрического сигнала, линейно связанная с интенсивностью оптического сигнала, отображает упомянутые фазовые соотношения. В свою очередь, в соответствии с эффектом Саньяка разность фаз двух лучей пропорциональна угловой скорости ВОГ. Именно эта специфика применения фотодетектора в ВОГ налагает определенные требования на параметры и характеристики фотодетектора.

Прежде всего фотодетектор должен обладать очень высокой чувствительностью или высоким разрешением с тем, чтобы чувствовать такие градации изменения интенсивности, которые соответствуют разности фаз оптических колебаний порядка 10^{-7} рад, что эквивалентно угловой скорости ВОГ примерно $10^{-2} \dots 10^{-3}^\circ/\text{ч}$ (требуемая точность для систем инерциальной навигации). Для реализации такой чувствительности нужно минимизировать собственные шумы фотодетектора (темновой ток и тепловые шумы нагрузочного сопротивления).

Фотодетектор должен обеспечивать требуемый динамический диапазон и быстродействие. Зависимость характеристик фотодетектора от изменений окружающих условий (температуры, вибрации, влажности и т. д.) должна быть минимальной. Спектральная характеристика должна быть согласована с длиной волны излучателя. Кроме того, фотодетектор должен иметь малые размеры и массу, отвечать условиям совместимости со световодами и электронными устройствами, потреблять малую энергию. При массовом производстве ВОГ фотодетектор должен быть дешевым и, по возможности, изготовлен в твердотельном исполнении.

Если уменьшить тепловой шум нагрузочного сопротивления изменением эффективной температуры сопротивления, а принципиально неустранимый дробовой шум считать малым, то пороговую чувствительность фотодиода будет определять темновой ток. С этой точки зрения для реализации максимальной пороговой чувствительности необходимо выбирать фотодиод с минимальными темновыми токами. Сила темнового тока зависит от свойств материала фотодиода, температуры, площади $p-n$ -перехода, конструктивных особенностей и т. д.

В последнее время разработаны $p-i-n$ -фотодиоды на основе InGaAs: InP, которые совместно с усилителем на полевом транзисторе (*FET*) образуют интегральную схему [118]; такой $p-i-n-FET$ приемник работает в диапазоне длин волн 1,3...1,5 мкм, имеет высокую квантовую эффективность — 0,65...0,7, малую емкость — 0,15 пФ, что определяет его высокое быстродействие. Фотодиод смонтирован в кварцевом блоке, в котором имеется небольшое отверстие для ввода волоконного световода с диаметром сердцевины 50 мкм, при этом оптический сигнал с волокна полностью перехватывается фотодиодом. Кварцевый блок монтируют на толстопленочной гибридной схеме предваритель-

ного усилителя. Подвод световода к схеме герметизирован. Предварительный усилитель содержит полевой транзистор (GaAs MESFET), резистор смещения с сопротивлением 10 МОм, два кремниевых биполярных транзистора с граничной частотой около 7 ГГц и толстопленочные резисторы, изготовленные на гибридной схеме. Чувствительность такого модульного $p-i-n-FET$ приемника составляет -53 дБм; интересно отметить, что при изменении окружающей температуры от 20 до 60 °C чувствительность изменяется только на 1 дБ.

При выборе фотодетектора для ВОГ частотная характеристика и быстродействие фотодетектора играют менее значительную роль, чем шумы, поскольку максимальная частота изменения угловой скорости, измеряемой ВОГ, всегда укладывается в полосу пропускания ФД независимо от применения вспомогательной модуляции (может быть, за исключением некоторых специальных случаев).

Вспомогательные оптические элементы. В современных схемах ВОГ кроме основных элементов используют ряд вспомогательных оптических. Перечень вспомогательных оптических элементов приведен в начале данного параграфа. Основное их назначение — управление параметрами оптического излучения как вне, так и внутри контура ВОГ. Управляемыми параметрами оптического излучения являются фаза, частота, поляризация и амплитуда.

ВОГ является очень чувствительным прибором, поэтому даже небольшие внутренние и внешние возмущения приводят к серьезному ухудшению точности. Такие возмущения, как изменение температуры, механические и акустические напряжения, внешние магнитные поля и другие требуют стабилизации параметров оптического излучения, например, фазы и поляризации распространяющегося в ВОГ излучения. Нередко стабилизацию выполняют в разных точках волоконного контура, во входных и выходных оптических ветвях. Такую стабилизацию осуществляют вспомогательные элементы (поляризаторы, фазовые пластинки и т. д.). Кроме того, в ряде схем ВОГ для удобства регистрации проводят фазовые и частотные преобразования лучей с помощью вспомогательных элементов (фазовых и частотных модуляторов).

Одним из видов *поляризаторов* (анализаторов) является поляроидная пленка, состоящая из кристаллов апатита, введенных в пластик. Кристаллы апатита поглощают составляющую электрического поля одного направления и пропускают ортогональную составляющую. Другим широко используемым поляризатором (анализатором) является призма Николя, изготавливаемая из двух кальцитовых или кварцевых призм, склеенных вместе.

Фазовые пластинки вносят фиксированную разность фаз между световыми компонентами, параллельными ее осям. Их применяют для преобразования линейной поляризации луча в круговую или,

наоборот, для внесения требуемого фазового сдвига и для компенсации нежелательного фазового сдвига в оптических элементах. Фазовые пластинки часто изготавливают из одноосных диэлектрических кристаллов, в частности кальцита.

Оптический ротатор осуществляет операцию вращения плоскости поляризации луча на требуемый угол.

Одним из широко используемых ротаторов является фараде-евский ротатор, основанный на эффекте Фарадея, заключающемся во вращении плоскости поляризации оптического луча под действием магнитного поля.

Эти дискретные оптические элементы позволяют управлять поляризацией и фазой оптического излучения вне или внутри контура ВОГ.

Аналогом рассмотренных выше дискретных оптических элементов являются недавно разработанные *световодные витковые элементы* (СВЭ), позволяющие вносить требуемый фазовый сдвиг и контролировать состояние поляризации излучения в световоде [98].

Световодный витковый элемент (СВЭ) полностью эквивалентен дискретной фазовой пластинке классической оптики. Фазовая разность в СВЭ появляется за счет индуцированного механическим напряжением двулучепреломления в световоде; при этом механическое напряжение возникает при изгибе и скрутке волокна (эффект фотоупругости).

В оптической гироскопии широкое применение находят частотные и фазовые модуляторы. Частотные модуляторы переводят фазу Саньяка в переменные изменения разности частот противоположно бегущих лучей; при компенсации фазы Саньяка разностная частота пропорциональна угловой скорости Ω . Достоинством частотных модуляторов является представление выходного сигнала в цифровой форме. Фазовые модуляторы преобразуют фазу Саньяка в изменения амплитуды переменного сигнала, что переводит измерение информативного параметра в другой диапазон и исключает низкочастотные шумы.

Частотные модуляторы основаны на акустооптическом эффекте, который состоит в том, что при прохождении в среде ультразвуковых колебаний в ней появляются области с механическими напряжениями (области сжатия и разрежения), это приводит к изменению коэффициента преломления среды. Вызванные ультразвуковой волной изменения коэффициента преломления среды образуют центры дифракции для падающего света. Частотный сдвиг дифрагированного света определяется частотой ультразвуковых колебаний.

Некоторые фазовые модуляторы рассмотрены при описании конструкций экспериментальных ВОГ.

4. ШУМЫ И НЕСТАБИЛЬНОСТИ ВОГ

Способы измерения информативного параметра ВОГ. Под информативным параметром ВОГ понимается фазовая разность между противоположно бегущими волнами в контуре ВОГ, появляющаяся в результате вращения контура и пропорциональная угловой скорости, т. е. фаза Саньяка $\Delta\varphi_c$.

Точность измерения информативного параметра зависит от рабочего диапазона измеряемых угловых скоростей и требуемой точности управления или стабилизации соответствующего объекта, на котором установлен ВОГ.

Рабочий диапазон угловых скоростей, измеряемых гироскопическим устройством инерциальных систем управления простирается от $0,1^\circ/\text{ч}$ до $400^\circ/\text{с}$. Если использовать ВОГ с параметром $LR=100 \text{ м}^2$, то, как следует из рис. 132, указанному диапазону угловых скоростей соответствует диапазон изменения фазы от 10^{-7} до 10 рад; измерение угловой скорости $0,1^\circ/\text{ч}$ с точностью 10% требует измерения фазы с точностью порядка 10^{-8} рад.

В настоящее время для измерения фазы Саньяка в ВОГ разработан ряд методов, которые можно условно разделить на четыре вида.

1. Метод внесения статической невязки разности фаз $\pi/2$ между двумя лучами. В этом методе контур ВОГ работает в режиме квадратуры, а рабочая точка измерений смещается в область максимальной крутизны, т. е. в область максимальной чувствительности ВОГ. В этой области связь между изменениями интенсивности и изменениями фазы является линейной (до 1%) лишь до максимальных отклонений фазы, равных $0,1$ рад. Как видим, линейный динамический диапазон неширок. Кроме того, случайные флуктуации интенсивности излучения источника ВОГ приводят к кратковременным шумовым флуктуациям измеряемой фазы; случайные изменения фазового смещения $\pi/2$ также приводят к погрешностям в измерении фазы.

2. Динамический способ внесения переменной разности фаз ($-\pi/2, \pi/2$) в контур ВОГ, при котором относительная фаза для встречно бегущих лучей модулируется периодически с частотой $1/2T$, где T — время прохождения луча по контуру.

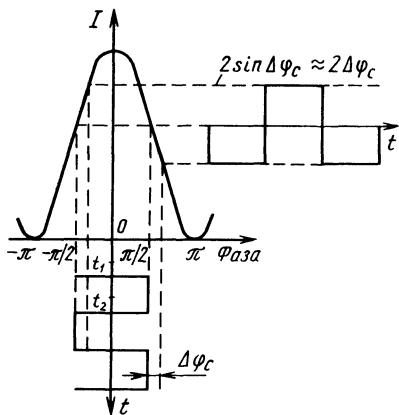


Рис. 133. Способ регистрации с переменной разностью фаз

Интенсивность результирующего излучения на входе фотодетектора зависит от периодического фазового смещения и от фазового сдвига, обусловленного вращением. Глубина модуляции определяется фазой Саньяка (рис. 133). Часто используют синусоидальную фазовую модуляцию, получаемую с помощью цилиндрического пьезоэлектрического датчика, вокруг которого намотано волокно. Переменная составляющая результирующей интенсивности на входе фотодетектора с учетом синусоидальной фазовой модуляции на частоте ω_m и с девиацией φ_m

$$I(t) = A_0 [\cos(\Delta\varphi_c + \varphi_m \cos \omega_m t)],$$

где A_0 — постоянная.

При разложении переменной составляющей по функциям Бесселя

$$I(t) = A_0 \cos \Delta\varphi_c [J_0(\varphi_m) + 2J_2(\varphi_m) \cos 2\omega_m t + \dots] + A_0 \sin \Delta\varphi_c [2J_1(\varphi_m) \sin \omega_m t + \dots].$$

Из этого выражения видно, что измерение на частоте модуляции дает сигнал, амплитуда которого пропорциональна $2A_0 J_1(\varphi_m) \sin \Delta\varphi_c$. Соответствующим выбором $\varphi_m \approx 1,8$ рад амплитуду можно сделать максимальной. Рассмотренный метод измерения также обладает нелинейностью вида $\sim \sin \Delta\varphi_c$.

3. Метод обращения разности фаз в нуль при распространении по контуру различных по частоте колебаний. Различие по частоте двух лучей эквивалентно определенной фазовой разности между ними (при этом фазовая разность пропорциональна разностной частоте). Если эта фазовая разность компенсирует невзаимную фазу Саньяка, то разностная частота становится пропорциональной угловой скорости Ω . Покажем это, получив соотношение между требуемой частотной разностью и фазой Саньяка (или угловой скоростью Ω).

Если немодулированный световой луч частоты ν вводится в контур против часовой стрелки, а луч, сдвинутый по частоте $\nu - \nu_p$, — по часовой стрелке, то с учетом фазы Саньяка (обусловленной вращением) относительная фаза двух выходящих лучей

$$\varphi_r = \frac{2\pi n L}{\lambda} \cdot \frac{\nu_p}{\nu} - \Delta\varphi_c = \frac{2\pi L}{\lambda} \left(\frac{n\nu_p}{\nu} - \frac{2R\Omega}{c} \right).$$

Как видим, относительная фаза φ_r зависит от ν_p . Тогда для обращения фазы в нуль можно регулировать разностную частоту ν_p с помощью частотного модулятора. Разностная частота ν_p , при которой относительная фаза φ_r обращается в нуль,

$$\nu_p = 2\Omega R / (\lambda n).$$

Измеряя разностную частоту ν_p , получают значение угловой скорости Ω . Необходимо, однако, включить устройство, регистри-

рующее сведение фазы φ_r к нулю. Варианты ВОГ с обращением фазы в нуль будут рассмотрены в следующем параграфе. При измерении широкого диапазона изменений угловой скорости Ω частота ν_r изменяется от долей герца до нескольких сотен килогерц. Преимуществами рассмотренной системы регистрации является наличие автоматической обратной связи и цифровой выходной сигнал.

4. Гетеродинный способ измерения, в котором разность фаз на оптической частоте переносится на достаточно низкую промежуточную частоту, что позволяет измерять ее электронными способами, и в частности, с использованием цифровых счетчиков временных интервалов. Гетеродинный способ выгоден тем, что ВОГ становится более устойчивым к влияниям флуктуаций интенсивности источника излучения (перед гетеродинированием осуществляется амплитудное ограничение сигнала). Кроме того, реализуется высокая линейность масштабного коэффициента ВОГ в широком динамическом диапазоне.

О свойстве невзаимности ВОГ. Эффект Саньяка — существенно невзаимный эффект, проявляющийся в контуре ВОГ при его вращении. Количественно он проявляется в виде фазовой невзаимности встречно распространяющихся в контуре лучей, т. е. в появлении разности фаз между этими лучами. Очевидно, что в случае отсутствия вращения контур ВОГ должен обладать полной фазовой взаимностью. Появление фазовой невзаимности, не связанной с вращением, дает на выходе ВОГ разность фаз, которая накладывается на фазу Саньяка и, в сущности, искажает последнюю. Это изменяет показания ВОГ. Если фазовая невзаимность является медленной функцией времени, то в показаниях ВОГ появляется некоторый временной дрейф. При быстрых случайных флуктуациях фазовой невзаимности показания ВОГ искажаются быстро флуктуирующим шумом. Наряду с фазовой взаимностью в контуре говорят также о частотной, поляризационной, амплитудной, геометрической взаимности, понимая под этими понятиями сохранение соответствующего параметра в обоих плечах контура.

Нарушение любого типа взаимности в контуре ВОГ приводит, как следует из дальнейшего, к ухудшению точности (чувствительности) прибора. Следует отметить, что чувствительность ВОГ к невзаимностям чрезвычайно высока. Объясняется это тем, что в интерферометре Саньяка регистрируется интерферометрическая картина биений, связанная с измерением фазы на оптической частоте. Кроме того, для применения ВОГ в высокоточных системах управления ($0,01 \dots 0,001$ °/ч) требуется, чтобы фаза Саньяка была искажена невзаимными эффектами минимальным образом, а ее измерение проводилось с очень малой погрешностью.

Например, вследствие высокой чувствительности ВОГ к не-

взаимностям введение оптического излучения мощностью 1 мВт в волокно приводит к нелинейному эффекту (эффекту Керра), дающему заметную невязанность, эквивалентную паразитной угловой скорости, превышающей $1^\circ/\text{ч}$ [49]. Отсюда следует, что невязанные эффекты, индуцированные в волокне контура ВОГ, должны быть по возможности исключены или компенсированы.

Кроме влияния невязанных эффектов точность ВОГ зависит от различных внешних и внутренних источников флуктуаций и нестабильностей, приводящих к появлению шумового фона при измерении фазы Саньяка.

Модель шумов и нестабильностей ВОГ. На рис. 134 показана феноменологическая модель источников шумов и нестабильностей в ВОГ. Как следует из модели, шумы и нестабильности условно можно разделить на быстрые и медленные возмущения.

Быстрые возмущения оказывают случайное кратковременное влияние на чувствительность ВОГ и наблюдаются в виде быстро флуктуирующего шума при нулевой угловой скорости. Медленные возмущения приводят к долговременным уходам при регистрации показаний ВОГ (долговременный дрейф). К быстрым возмущениям можно отнести: флуктуации интенсивности и быстрые флуктуации частоты источника излучения, дробовые шумы сигнала, мультипликативные шумы ЛФД, тепловые шумы, коге-

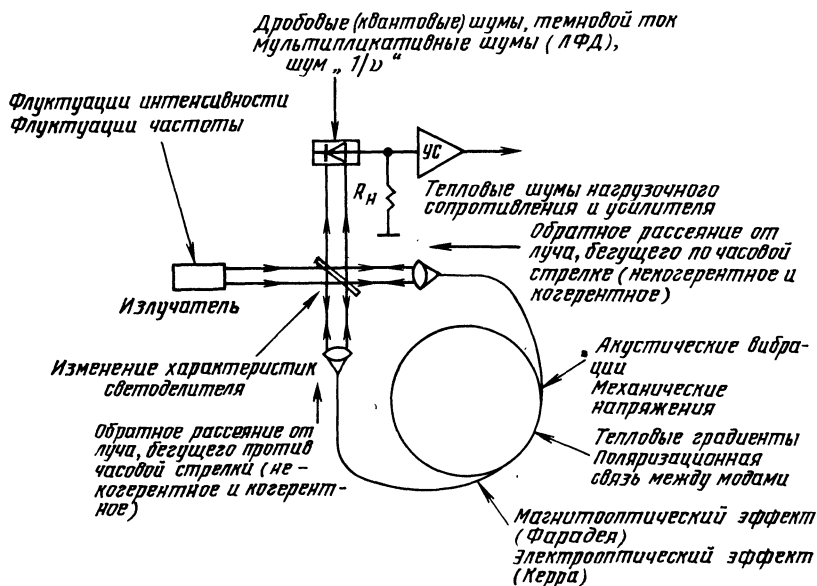


Рис. 134. Феноменологическая модель шумов и нестабильностей ВОГ

рентное и некогерентное обратное рассеяние, нелинейные эффекты, акустическую вибрацию.

К медленным возмущениям относят: долговременные уходы частоты, механические напряжения, тепловые градиенты, поляризационную связь между типами колебаний в ВОГ, магнитные поля, температурные изменения коэффициента светоделения и др. Такое деление в известной степени условно, и определяется характерным временем действия возмущений.

Кроме перечисленных источников шумов при практическом конструировании ВОГ могут появиться дополнительные источники, связанные с соответствующими конструктивными элементами (фазовыми и частотными модуляторами, поляризаторами, временными стробирующими устройствами). Разумеется, эти источники шумов должны быть учтены при оценке результирующей точности ВОГ.

Главные источники возмущений и способы компенсации их будут рассмотрены ниже.

О предельной точности (чувствительности) ВОГ. Предел точности ВОГ определяется так называемыми квантовыми или дробовыми шумами полезного сигнала. Даже при устранении всех источников шумов и нестабильностей в ВОГ всегда остаются принципиально неустранимые квантовые шумы, источником которых является полезный сигнал.

Квантовые шумы обусловлены дискретной или квантовой природой светового излучения. Случайное распределение скорости прихода квантов на фотодетектор приводит к случайным флуктуациям тока фотодетектора. Уровень квантовых шумов зависит от мощности оптического излучения, падающего на фотодетектор.

При измерении фазы Саньяка регистрируется сигнал, пропорциональный мощности оптического излучения, падающего на фотодетектор. Мощность оптического излучения пропорциональна скорости прихода квантов на фотодетектор. Следовательно, флуктуации скорости прихода квантов через флуктуации мощности переносятся на флуктуации фазы Саньяка. В результате при измерении фазы Саньяка появляется «фазовый» шум, среднее квадратическое значение которого [25]

$$\delta(\Delta\varphi_c) = \sqrt{2h\nu B/P},$$

где h — постоянная Планка; ν — частота излучения; B — полоса пропускания системы измерения; P — мощность входящего в ВОГ излучения (мощность излучателя).

Предполагается, что затухание в контуре ВОГ пренебрежимо мало.

Среднее квадратическое значение флуктуаций фазы Саньяка $\delta(\Delta\varphi_c)$ является пределом точности (чувствительности) ВОГ. Для типовых значений $P=200$ мкВт и $\nu=3\cdot 10^{14}$ Гц

$$\delta(\Delta\varphi_c)/\sqrt{B} \approx 10^{-7} \text{ Гц}^{-1/2},$$

что при ширине полосы, равной 1 Гц, дает предел чувствительности по измеряемой фазе 10^{-7} рад. Для определения средней квадратической погрешности измерения угловой скорости, обусловленной квантовыми шумами, используем выражение для фазы Саньяка: $\Delta\varphi_c = \frac{4\pi LR}{\lambda c} \Omega$. Тогда получим

$$\frac{\delta\Omega}{\sqrt{B}} = \frac{c^2}{4\pi\nu LR} \sqrt{\frac{2h\nu}{P}}.$$

Приняв для типового ВОГ $L=1000$ м, $R=5$ см, $P=200$ мкВт и $\nu=3 \cdot 10^{14}$ Гц, получим

$$\frac{\delta\Omega}{\sqrt{B}} \approx 10^{-2} (^\circ/\text{ч})/\text{Гц}^{1/2}.$$

Из этого выражения следует, что для ширины полосы 1 Гц и для контура с $LR=50$ м² фундаментальный предел точности измерения угловой скорости составляет 0,01 °/ч. Выражая полосу пропускания через единицы, обратные часам, получим еще одно выражение для минимального случайного дрейфа ВОГ (минимальной обнаруживаемой угловой скорости)

$$\delta\Omega/\sqrt{B} \approx 10^{-4} \text{ } ^\circ/\sqrt{\text{ч}}.$$

Интересно отметить, что с увеличением площади контура ВОГ (параметра LR) и ростом мощности сигнала P предельная чувствительность возрастает; с увеличением полосы B предельная чувствительность ВОГ уменьшается, поскольку возрастает уровень квантовых шумов.

Рассмотрим кратко основные источники шумов и нестабильностей ВОГ и способы их компенсации.

Обратное рэлеевское рассеяние. Экспериментальные исследования конструкций ВОГ показали, что обратное рэлеевское рассеяние существенно снижает чувствительность ВОГ к угловой скорости [51].

Встречно распространяющиеся в контуре ВОГ первичные волны возбуждают маломасштабные неоднородности в волокне. Эти неоднородности действуют как вторичные индуцированные дипольные излучатели, генерирующие излучение в широком угловом спектре. Световод с конечной числовой апертурой захватывает часть рассеянного излучения и канализирует его в обратном направлении.

При формировании полного рассеянного поля в обоих направлениях излучения от каждого элементарного рассеивателя суммируются векторно. Следовательно, если в контуре ВОГ

отсутствуют дестабилизирующие возмущения, то амплитуда и фаза рассеянного поля стабильны во времени. Поэтому обратные рассеянные волны обладают некоторой степенью когерентности относительно первичных волн.

Суммирование обратной рассеянной волны с первичной волной, распространяющейся в том же направлении, происходит также векторно со случайной фазой. Фазы двух результирующих волн на выходе контура будут разными (как вследствие случайного распределения рассеивателей вдоль волокна, так и вследствие влияния окружающих условий). Налицо фазовая невзаимность контура, обусловленная обратным рэлеевским рассеянием. Эта фазовая невзаимность «накладывается» на фазовую невзаимность, обусловленную вращением контура. Фаза Саньяка искажается, и появляется погрешность в измерении угловой скорости контура. При одиночном измерении (без усреднения) погрешность может достигать больших значений.

Получено [51] следующее выражение для максимальной фазовой погрешности, обусловленной обратным рэлеевским рассеянием при одном обходе контура: $\varphi_p = \alpha(G_s \alpha_s L)^{1/2}$.

Эквивалентная угловая скорость

$$\Omega_p = \frac{\lambda c \alpha}{4 \pi R} \left(\frac{G_s \alpha_s}{L} \right)^{1/2},$$

где λ — длина волны; α — линейный угол ввода излучения в сердцевину световода; R — радиус контура; G_s — коэффициент направленного рассеяния вдоль волокна ($1 < G_s < 1,5$); α_s — коэффициент ослабления излучения за счет рэлеевского рассеяния; L — длина контура.

Численную оценку можно получить, задавшись значениями входящих в формулы коэффициентов: $\lambda = 1$ мкм, $R = 0,5$ м, $\alpha = 0,1$ рад, $\alpha_s = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$ (0,5 дБ/км), $G_s = 1$, $L = 1000$ м [51]. Подставляя эти значения, получим максимальную фазовую погрешность при одном обходе контура $\varphi_p = 0,035$ рад. Эта погрешность линейно преобразуется в погрешность измерения угловой скорости $\Omega_p = 341$ °/ч (0,095 °/с). Хотя погрешность весьма велика, следует подчеркнуть, что это значение получено при одиночном отсчете.

Если измерения осуществлять с определенной частотой отсчетов в секунду, полагая, что значения фазы обратной волны между отсчетами некоррелированы, то при последующем накоплении (интегрировании) отсчетов погрешность можно значительно уменьшить. Для высокоточных систем управления время интегрирования может сильно возрасти. Поэтому наряду с интегрированием, для уменьшения влияния рэлеевского обратного рассеяния применяют и другие методы.

Нужно отметить еще одно обстоятельство. Влияние внешних условий, приводящих к механическим, акустическим и тепловым

воздействиям на контур ВОГ, обуславливает рандомизацию до некоторой степени фазы рассеянной волны. Такой процесс «декогерирует» обратную рассеянную волну, улучшая точность ВОГ. Однако эти воздействия, если они не полностью взаимны, приводят к появлению других погрешностей. При последующем совершенствовании ВОГ чувствительность его к механическим, акустическим и тепловым возмущениям будет уменьшаться, что приведет к возрастанию веса погрешности за счет рэлеевского обратного рассеяния. Вспомогательная частотная или фазовая модуляция излучения в контуре (примененная, например, для удобства регистрации сигнала) также приводит к частичному «декогерированию» обратной рассеянной волны.

Для уменьшения погрешности ВОГ, обусловленной рэлеевским обратным рассеянием, разработчиками предложено несколько способов [38]:

- накопление (интегрирование) сигнала;

- уменьшение мощности обратной рассеянной волны, проинтерферировавшей с прямой волной, распространяющейся в том же направлении;

- применение частотной или фазовой модуляции излучения специально для рандомизации фазы обратной рассеянной волны;

- уменьшение длины когерентности излучения источника, минимизирующее степень взаимной когерентности между первичной и рассеянной волнами.

Метод накопления (интегрирования) сигнала широко используется в экспериментальных конструкциях ВОГ для получения усредненного отсчета. Число накоплений зависит от требуемой точности и темпа выдачи данных; время интегрирования составляет десятки доли секунды и может достигать до нескольких десятков минут.

Способ, связанный с уменьшением мощности обратной рассеянной волны, реализуют, используя импульсный сигнал, длительность которого значительно короче времени распространения луча в контуре. В любой данный момент импульс локализуется в соответственно коротком сегменте волоконного контура. Тогда лишь часть обратной рассеянной волны совпадает с прямым сигнальным импульсом. Обратное рассеянное излучение, не совпадающее с прямым импульсом, исключается временным стробированием. При коротком импульсе число источников обратного рассеянного излучения значительно уменьшается, поскольку оно определяется длиной короткого сегмента волокна. Дальнейшего уменьшения обратного рассеянного излучения можно добиться соответствующей обработкой сигнала, в частности усреднением в течение постоянной интегрирования системы обработки.

При использовании источника излучения с относительно высокой степенью когерентности для рандомизации фазы когерент-

ной составляющей обратного рассеянного излучения применяют фазовую модуляцию. При этом фазовый модулятор размещают в разных точках ВОГ (на входе контура, в середине контура, или на одном конце контура).

Наиболее успешным приемом декогерирования поля обратного рассеянного излучения и, соответственно, уменьшения погрешности ВОГ за счет рэлеевского рассеяния оказалось применение источника с низкой степенью когерентности. К таким источникам относятся лазерный диод, суперлюминесцентный диод и газовый лазер с частотной модуляцией. В одной из конструкций ВОГ, показавшей хорошую точность, в качестве излучателя использовался GaAs-лазер с длиной когерентности около 0,5 мм.

Еще лучшие результаты дает сочетание низкокогерентного источника с использованием фазо-модуляционной схемы в контуре [97].

Электрооптический эффект Керра. Нелинейный электрооптический эффект Керра состоит в изменении коэффициента преломления среды при изменении интенсивности взаимодействующего со средой электрического поля. Проявление этого эффекта в волокне приводит к тому, что фазовая постоянная сердцевины волокна становится функцией мощности распространяющейся волны. Если интенсивности встречно бегущих лучей в контуре ВОГ неодинаковы, то возмущения фазовых постоянных для таких лучей будут разные. Следствием этого является появление фазовой невязимости контура ВОГ. Соответственно ухудшается точность прибора, поскольку на индуцированную вращением фазу Саньяка накладывается фазовая невязимость, обусловленная эффектом Керра.

Если разность интенсивностей лучей флуктуирует случайно во времени (например, вследствие акустической или механической вибрации, действующей на направленный соединитель), то в ВОГ появляется случайный уход фазы. При этом разность мощностей, равная 10^{-8} Вт, дает погрешность, выходящую за пределы допустимой точности систем инерциальной навигации [38].

Как видим, несмотря на очень низкий уровень мощности излучения, распространяющегося в контуре, и малую разность мощностей двух лучей, нелинейные эффекты оказывают весьма значительное влияние на точность ВОГ. Объясняется это, конечно, тем, что прибор очень чувствителен к фазовым невязимостям в контуре.

Выражение для вычисления погрешности измерения угловой скорости, появляющейся вследствие влияния нелинейного электрооптического эффекта Керра,

$$\Omega_k = A(1 - 2K) \left[\frac{I^2(t) - 2(\bar{I}(t))^2}{\bar{I}(t)} \right],$$

где A — постоянная; K — коэффициент деления мощности направленного светоделиителя ($0 < K < 1$); $\bar{I}(t)$ — среднее по времени значение интенсивности излучения, распространяющегося в контуре.

При выводе этой формулы считается, что при определении погрешности измерения угловой скорости Ω_k , индуцированной эффектом Керра, измерительное устройство формирует сигнал, пропорциональный средневзвешенному по интенсивности значению невязимного фазового сдвига.

Как следует из этого выражения, погрешность измерения угловой скорости Ω_k становится равной нулю при обращении в нуль выражения в круглых скобках, т. е. при $K=0,5$ (светоделиитель делит мощность точно поровну между ветвями контура). Допуски на точность деления и соответствующую стабильность коэффициента деления во времени очень жестки. Так, например, при допустимой погрешности измерения $\Omega_k \leq 10^{-3} \text{ } ^\circ/\text{ч}$ и при постоянной интенсивности излучения $I(t)=1 \text{ мВт/мкм}^2$ коэффициент деления $K=0,5 \pm 10^{-4}$. Таким образом, один из способов уменьшения погрешности измерения угловой скорости, обусловленной эффектом Керра, является сохранение очень жесткого допуска на коэффициент деления мощности светоделиителя, что далеко не всегда возможно. Для снижения этих допусков можно уменьшить интенсивность излучения (уменьшив мощность излучателя), однако это ведет к возрастанию квантового предела чувствительности ВОГ.

Второй способ уменьшения влияния эффекта Керра состоит в специальной импульсной модуляции источника сигналом типа «меандр». Такая модуляция при временном усреднении интенсивности обращает выражение в квадратных скобках в нуль, тем самым сводя к нулю Ω_k .

И наконец, третий способ также связан с выражением в квадратных скобках приведенной выше формулы. Если выбрать источник излучения ВОГ с такими статистическими и (или) спектральными характеристиками, при которых $\bar{I}^2(t) - 2(\bar{I}(t))^2 = 0$, то паразитный дрейф Ω_k обращается в нуль. Здесь имеет место явление своеобразной самокомпенсации влияния эффекта Керра.

Как известно, достаточно широкополосный (низкокогерентный) шумовой источник излучения имеет гауссово распределение амплитуд, рэлеевское распределение огибающей и экспоненциальное распределение интенсивности. Для такого источника $\bar{I}^2 = 2(\bar{I})^2$. Ряд источников излучений, такие как суперлюминесцентный диод (СЛД) и полупроводниковый лазерный диод (ЛД), работающий в многомодовом несинхронизованном режиме, обладают распределением огибающей, приближающимся к рэлеевскому. Как показали эксперименты [39, 115, 130], использование именно таких излучателей позволяет резко уменьшить влияние эффекта Керра. Таким образом, как с точки зрения умень-

шения влияния когерентной составляющей обратного рэлеевского рассеяния, так и с точки зрения уменьшения влияния эффекта Керра, по-видимому, целесообразно использовать в качестве излучателя ВОГ низкокогерентный источник.

Магнитное поле. Действие магнитного поля на волоконный световод заключается во вращении плоскости поляризации распространяющегося в волокне излучения, пропорциональном напряженности магнитного поля (эффект Фарадея). Угол поворота плоскости поляризации на пути l

$$\gamma = V_{\lambda} H l,$$

где V_{λ} — постоянная Верде; H — напряженность магнитного поля.

Существуют магнитные датчики, основанные на эффекте Фарадея, в которых воздействующее на оптическое волокно внешнее аксиально направленное магнитное поле вызывает в волокне вращение плоскости поляризации света. Эффект Фарадея слабо проявляется в волокне, однако ввиду сверхвысокой чувствительности ВОГ к невзаимным эффектам в контуре, внешнее магнитное поле оказывает серьезное влияние на чувствительность ВОГ.

В большинстве конструкций ВОГ в волоконном контуре уже существует взаимное двулучепреломление. Магнитное поле индуцирует невзаимное двулучепреломление, которое зависит от направления распространения луча. Оба двулучепреломления суммируются в контуре, и их комбинация определяет чувствительность ВОГ к внешнему магнитному полю. Если состояние поляризации изменяется вдоль волоконного контура непредвиденным образом, т. е. случайно, то внешнее магнитное поле вносит дополнительную случайную погрешность в измерение фазы Саньяка.

Выражение для разности фаз противоположно бегущих в контуре волн [41] при действии магнитного поля и вращении имеет следующий вид:

$$\varphi^1 = \Delta\varphi_{\text{с}} - \Psi_m,$$

где $\Delta\varphi_{\text{с}}$ — фаза Саньяка; Ψ_m — разность фаз, обусловленная влиянием магнитного поля.

Разность фаз определяется следующим выражением:

$$\Psi_m = 2V_{\lambda} H l \sin\gamma,$$

где l — длина части контура, на которой рассматривается действие магнитного поля; γ — угол поворота плоскости поляризации на этом участке контура.

Случайные флуктуации Ψ_m , обусловленные неоднородностью магнитного поля и случайными флуктуациями угла γ , дают случайную погрешность (дрейф) ВОГ. Например, при постоянной

Верде $V_\lambda = 2,6 \cdot 10^{-6}$ рад/А для длины волны 0,83 мкм магнитное поле Земли с напряженностью $H = 40$ А/м на длине участка контура $l = 5$ м дает фарадеевское вращение $V_\lambda H l \approx 5 \cdot 10^{-4}$ рад. Это вращение для худшего случая ($\gamma = \pi/2$) дает погрешность измерения фазы Саньяка около 10^{-3} рад. Как видно, погрешность достигает весьма внушительных значений.

Влияние магнитного поля Земли на чувствительность ВОГ проверялось экспериментально [41, 69, 101]. При этом длина контура составляла 800 м, а диаметр 0,2 м. При отсутствии специального магнитного экрана максимальные значения долговременного ухода (дрейфа) угловой скорости составляют $\pm 15^\circ/\text{ч}$ (среднее квадратическое значение дрейфа $\sim 10^\circ/\text{ч}$); разброс измеряемой фазы Саньяка составил $\pm 3 \cdot 10^{-4}$ рад.

При установке вблизи волоконного контура постоянного магнита, напряженность поля которого превышает магнитное поле Земли примерно в 100 раз, максимальные отклонения дрейфа составляют $\pm 0,2^\circ/\text{с}$, т. е. почти на два порядка больше, чем в отсутствие постоянного магнита. Для ослабления действия магнитного поля Земли волоконный контур был помещен в экран из мю-металла. Для этого случая среднее квадратическое значение остаточного дрейфа составляло приблизительно $1^\circ/\text{ч}$, т. е. точность ВОГ повысилась на один порядок.

Таким образом, действие магнитного поля существенно ухудшает точность ВОГ; при этом погрешность зависит от значения и ориентации магнитного поля и от двулучепреломления волокна в контуре. Заметно уменьшить эту погрешность можно путем экранирования контура от магнитного поля и жесткой стабилизацией состояния поляризации волн в контуре.

Температурные градиенты и механические напряжения. Некоторые исследователи и разработчики ВОГ отмечают влияние температурных градиентов на чувствительность ВОГ. Воздействие случайно изменяющейся во времени и пространстве температуры даже на одномодовое волокно с устойчивой поляризацией приводит к появлению фазовой невзаимности контура ВОГ. При этом любой дифференциальный элемент волоконного контура dl вносит приращение фазового набегу в оба встречно бегущих луча $d\varphi = \beta dl$, где β — фазовая постоянная распространения света в сердцевине.

Расчет приращения фазы за временной период при учете, что температура изменяется во времени и в зависимости от положения участка dl вдоль волокна, приведен в работе [128]. Было найдено, что вклад в приращение невзаимной фазы (а следовательно, в погрешность измерения фазы Саньяка) дает изменение фазовой постоянной β с температурой, а также температурное удлинение волокна (так называемый эффект Шуппе). При этом, чем больше перепад температур за отрезок времени, тем больше приращение невзаимной фазы. Расчет показал, что

для обеспечения работы ВОГ на квантовом пределе ($\sim 0,008^\circ/\text{ч}$) стабильность температуры необходимо поддерживать с точностью $\Delta T < 6,7 \cdot 10^{-3}^\circ\text{C}$. Сохранение такой стабильности температуры (в период прогрева или изменения окружающих условий) является серьезной задачей.

Для уменьшения фазовой невзаимности ВОГ, обусловленной воздействием температурных эффектов, предложен ряд способов.

Первый способ, наиболее простейший, связан со стабилизацией температуры, действующей на ВОГ. Реализуется он помещением ВОГ в бокс из пенопласта.

Второй способ связан с поиском материалов для волокна с малым температурным коэффициентом dn/dT .

И наконец, третий способ состоит в намотке волоконного контура таким образом, что части волокна, которые находятся на равных расстояниях от середины контура, располагаются рядом друг с другом, что симметрирует распределение температуры относительно середины контура. В настоящее время нашел применение только первый способ.

Случайные временные изменения механических напряжений и акустической вибрации волоконного контура (и других оптических элементов ВОГ) также приводят к случайным изменениям оптических постоянных распространения и геометрических размеров волокна. Следовательно, неизбежно появление случайной фазовой невзаимности ВОГ, снижающей точность прибора. Уменьшения влияния этих механических факторов можно добиться ужесточением конструкции ВОГ, механической изоляцией и различными видами демпфирования (что применяется уже в ряде конструкций, см. ниже).

Другие источники шумов и нестабильностей ВОГ. Среди других источников возмущений в ВОГ в литературе упоминаются следующие.

1. Так называемые низкочастотные шумы фотодетекторов типа « $1/\nu$ », уменьшить которые удается при переходе в более высокочастотный диапазон и осуществлении измерений на переменном сигнале. Частотный или фазовый метод измерений с цифровым выходным сигналом позволяет исключить влияние флуктуаций интенсивности излучателя ВОГ.

2. Темновой ток фотодетектора и тепловые шумы нагрузочного сопротивления можно уменьшить охлаждением ФД и первых каскадов усилителя. Этот способ, однако, не является лучшим, поскольку он удорожает конструкцию ВОГ. По-видимому здесь можно пойти по пути оптимизации схемы обработки выходного сигнала. Поляризационную связь между ортогональными поляризационными модами в одномодовом волокне, приводящую к флуктуациям интенсивности на входе ФД, можно ослабить применением одномодового волокна с устойчивой поляризацией или поляризационных устройств, контролирующих поляризацию в контуре (см. ниже).

Следует упомянуть о таких источниках флуктуаций, как некогерентная составляющая обратного рэлеевского рассеяния, спонтанные и стимулированные шумы источника излучения, шумы умножения ЛФД, рассеяние Бриллюэна, рассеяние Mu и др. Уровень флуктуаций этих шумов невысок, однако в каждом конкретном случае конструирования ВОГ они должны рассматриваться особо. В частности, например, если ВОГ будет работать в условиях мощной акустической вибрации (при работающих двигателях летательного аппарата), то заметным источником шумов может стать рассеяние Бриллюэна (рассеяние на фонах — акустических образованиях в среде).

Непредвиденные источники шумов могут возникнуть при конструировании специальных схем обработки выходного сигнала. Так, например, шумы и нестабильности различных переключателей, синхронных детекторов, фазовых и частотных модуляторов и демодуляторов могут стать доминирующими и свести к нулю все ухищрения, примененные при конструировании оптической части ВОГ.

Разумеется, к источникам нестабильностей в ВОГ можно отнести флуктуации питающих токов и напряжений, а также эффекты старения оптических и электронных элементов ВОГ, включая контур. При конструировании ВОГ эти моменты также следует принимать во внимание.

5. ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ВОГ

По данным зарубежной научной и технической печати, волоконные оптические гироскопы и волоконные оптические акселерометры планируется применять в инерциальных системах управления подвижными объектами, в частности в бесплатформенных инерциальных системах (БИС) управления ракетами, космическими аппаратами, самолетами [35, 38, 49, 106].

В БИС чувствительными элементами относительно инерциального пространства, т. е. датчиками первичной информации, служат измерители линейных ускорений (акселерометры) и измерители углового движения (гироскопы). Информативные сигналы с первичных датчиков об ускорениях и вращениях объекта по трем ортогональным осям поступают на бортовую ЭВМ, где осуществляются интегрирование уравнений движения и выработка управляющих команд, регулирующих движение объекта.

В БИС датчики первичной информации жестко закрепляют на борту объекта. Следовательно, эти датчики и, в частности, гироскопы должны обладать большим диапазоном, нечувствительностью к сильным перегрузкам, малыми массой и размерами, иметь невысокую стоимость. Этим требованиям удовлетворяет ВОГ. Достоинства и точностные характеристики ВОГ делают возможным создание высокоточной, простой, малогабаритной

БИС, пригодной для использования в испытывающих значительные перегрузки объектах.

Требуемые точности (уходы) для гироскопов инерциальных систем управления лежат в пределах $0,02...100^\circ/\text{ч}$ и зависят от конкретных применений.

В типовом применении для носителей тактического оружия требуемый дрейф составляет $5...100^\circ/\text{ч}$ [35]. Гироскоп для ракет класса «воздух — воздух» с коротким временем полета должен удовлетворять следующим требованиям: дрейф $10^\circ/\text{ч}$; экстраполированный дрейф $1^\circ/\sqrt{\text{ч}}$; угловая скорость $1000^\circ/\text{с}$; стабильность масштабного коэффициента $5 \cdot 10^{-4}$ [35].

Наибольшая точность требуется в дальней навигации. В зависимости от времени полета требуемая точность гироскопа лежит в пределах $0,02...3^\circ/\text{ч}$. Гироскоп, предназначенный для БИС, жестко закрепленной на корпусе носителя, должен удовлетворять следующим требованиям: дрейф $0,02^\circ/\text{ч}$; экстраполированный дрейф $0,001^\circ/\sqrt{\text{ч}}$; угловая скорость $500^\circ/\text{с}$; стабильность масштабного коэффициента 10^{-5} [35].

Теоретический анализ чувствительности (точности) волоконно-оптического гироскопа, проведенный в работе [100], дает весьма высокие цифры по точности. Так, при длине волны излучения $0,633 \text{ мкм}$ и мощности излучателя 2 мВт случайный дрейф ВОГ составляет $7,8 \cdot 10^{-3}^\circ/\text{ч}$, при мощности 81 мВт он равен $0,9 \cdot 10^{-3}^\circ/\text{ч}$; при переходе к рабочей длине волны $\lambda = 1,1 \text{ мкм}$ случайный дрейф составляет лишь $0,7 \cdot 10^{-3}^\circ/\text{ч}$. Эти теоретические значения точности могут удовлетворить требованиям высокоточных систем управления для объектов большой дальности и большого полетного времени, не говоря уже о том, что эти значения превосходят точность кольцевого лазерного гироскопа (КЛГ).

По полученным данным [76] уже разработаны экспериментальные конструкции ВОГ, точность которых составляет менее $0,1^\circ/\text{ч}$ (макеты Морской исследовательской лаборатории, Массачусетского технологического института, Станфордского университета в США и фирмы АЕГ «Телефункен», ФРГ).

Ниже будут рассмотрены экспериментальные конструкции ВОГ и результаты испытаний этих конструкций. Следует, однако, сразу оговорить, что результаты, полученные в лабораториях, трудно сравнивать с результатами серийных образцов. Тем не менее, уже сейчас имеются достаточные основания делать оптимистические прогнозы по развитию ВОГ.

Конструкция ВОГ с точностью $3^\circ/\text{ч}$. Экспериментальный макет, являющийся прототипом ВОГ с точностью $3^\circ/\text{ч}$, разрабатывался фирмой «Стандарт Электрик Лоренц АГ» (*Standard Elektrik Lorenz AG* ФРГ) [35]. При разработке макета конструкторы учитывали следующие моменты. Для обеспечения фазовой взаимности конструкции пути пробега противоположно

пропорционален частотной разности $\Delta\nu$ между противоположно бегущими лучами в контуре:

$$\varphi_1 = 2\pi(nL/c)\Delta\nu.$$

Этот невзаимный фазовый сдвиг при частотной перестройке компенсирует вызываемый вращением невзаимный фазовый сдвиг Саньяка $\Delta\varphi_c$ (в режиме замкнутого регулирования). Следовательно, $\Delta\varphi_c = \varphi_1$, откуда легко получить компенсирующую разность частот

$$\Delta\nu = 2R\Omega/(n\lambda).$$

Из этого выражения следует, что в замкнутом режиме частотная разность между возбуждающими частотами ячеек Брэгга линейно зависит от угловой скорости Ω . Таким образом, в схеме реализуется способ измерения с обращением фазы Саньяка в нуль.

Для удобства измерений возбуждающая частота модулятора на ячейке Брэгга 11 периодически переключается. Это позволяет переключать невзаимную фазу ($\pi/2$, $-\pi/2$) для выбора рабочей точки на кривой изменения интенсивности и осуществлять фазовую компенсацию фазы Саньяка. Возбуждающие частоты ячейки Брэгга 11 равны ν_b и ν_n , при этом частотная разность $\nu_b - \nu_n$ выбирается так, чтобы этой разности частот соответствовал невзаимный фазовый сдвиг $\varphi_1 = \pi$. Кроме того, частота ГУН 4 в замкнутом режиме при отсутствии вращения устанавливается равной $(\nu_b + \nu_n)/2$. Тогда в первом периоде переключения $\nu_b - (\nu_b + \nu_n)/2 = (\nu_b - \nu_n)/2$, что соответствует невзаимному фазовому сдвигу противоположно бегущих лучей $\pi/2$; во втором периоде переключения $\nu_n - (\nu_b + \nu_n)/2 = -(\nu_b - \nu_n)/2$, что соответствует фазовому сдвигу $-\pi/2$. В результате на входе фотодетектора появляется постоянный сигнал (см. рис. 133).

При приведении во вращение ВОГ между противоположно бегущими лучами возникает разность фаз Саньяка $\Delta\varphi_c$, что приводит к несимметричному фазовому переключению и появлению переменного сигнала на фотодетекторе (см. рис. 133). Амплитуда этого сигнала пропорциональна фазе Саньяка (точнее $2\sin\Delta\varphi_c$), а фаза соответствует направлению вращения. Последующий усилитель, полосовой фильтр и интегратор вырабатывают сигнал, который сдвигает частоту выходного сигнала ГУН до тех пор, пока переменный сигнал фотодетектора не обратится в нуль. В этом случае частота $\Delta\nu = \nu_{\text{ГУН}} - (\nu_b + \nu_n)/2$ становится прямо пропорциональной угловой скорости Ω .

Рассматриваемая схема ВОГ была испытана в трех вариантах при различных геометрических параметрах и масштабных коэффициентах (табл. 11).

Вначале определялась кратковременная шумовая составляющая выходного сигнала (шумовой кратковременный дрейф) в

Параметры	Варианты		
	I	II	III
Тип волокна	Стандартное одномодовое волокно		Волокно, сохраняющее поляризацию
Длина волны, мкм	0,633	0,855	0,829
Радиус контура, м	0,15	0,07	0,06
Длина периметра, м	1180	1055	937
Масштабный коэффициент, Гц/(°/ч)	1,57	0,54	0,46

разомкнутом режиме работы ВОГ. Измерения в разомкнутом режиме понадобились для того, чтобы исключить влияние управляющей цепи, обращающей фазу в нуль. Шумовые отсчеты измерялись с постоянной интегрирования, равной 125 мс, которая соответствует полосе пропускания 1 Гц фильтра синхронного усилителя.

Обширные измерения кратковременной шумовой составляющей в варианте с гелий-неоновым лазером в качестве источника показали, что главным источником шумов являются шумы, вносимые частотным переключателем, а не дробовые шумы, амплитудные шумы источника излучения, или рэлеевское обратное рассеяние волокна (которое подавляется вследствие различных управляющих частот ячеек Брэгга).

При использовании ВОГ в бесплатформенной инерциальной системе управления требуемым параметром является проинтегрированная угловая скорость, т. е. угол поворота. Считая, что ограничивающим фактором при измерениях угловой скорости является уровень белых шумов, среднее квадратическое отклонение угла поворота можно вычислить в функции шумового сигнала угловой скорости, измеренного в данной полосе. Точность (скорость случайного дрейфа) макета ВОГ составляла около 3 °/ч.

Таким образом, результаты первоначальных испытаний ВОГ говорят о том, что прибор может, в принципе, удовлетворять требованиям систем управления со средней точностью (~ 3 °/ч). Более того, имеются данные, что ВОГ может удовлетворять более жестким требованиям для навигации (по динамическому диапазону и уровню шумов) [35].

Экспериментальный ВОГ для инерциальной навигации. Конструкция экспериментального ВОГ, описанная в [69], имеет следующие особенности:

для повышения чувствительности использована фазо-модуляционная схема;

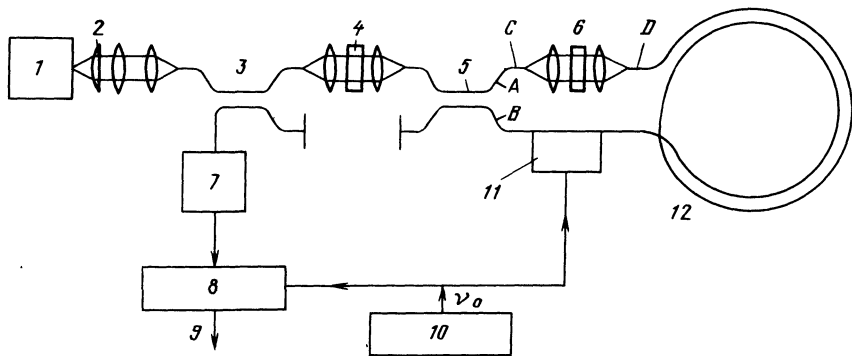


Рис. 136. Схема ВОГ для инерционной навигации:

1—суперлюминесцентный диод; 2—цилиндрическая линза; 3, 5—направленный ответвитель; 4—поляризатор; 6—деполяризатор; 7—фотодетектор; 8—синхронный усилитель; 9—выход; 10—генератор; 11—фазовый модулятор; 12—волоконный контур

применен одномодовый фильтр, уменьшающий случайный дрейф;

для стабилизации масштабного коэффициента использован деполяризатор;

в целях ослабления шумов обратного рэлеевского рассеяния применен источник света с малой длиной когерентности.

В схеме ВОГ, изображенной на рис. 136, свет суперлюминесцентного диода (СЛД) подается в одномодовое волокно и расщепляется волоконно-оптическим направленным ответвителем 3. Часть излучения проходит поляризатор и направляется в волоконно-оптический направленный ответвитель 5. В нем излучение делится поровну и поступает в два конца волоконного контура. Два противоположно бегущих луча проходят фазовый модулятор, волоконный контур и деполяризатор. Оба луча рекомбинируют в направленном ответвителе 5. Затем световое излучение, проходя через поляризатор и направленный ответвитель 3, подается на фотодетектор. Длина контура составляет 800 м одномодового волокна, намотанного на кварцевый барабан диаметром 20 см. Для уменьшения потерь на микроизгибах четыре слоя волокна на катушке отделены друг от друга мягкой пластиковой пленкой.

На чувствительность ВОГ влияют выбор рабочей точки на рабочей характеристике, шумы обратного рэлеевского рассеяния, дрейф вследствие изменения двулучепреломления в волокне и нестабильность масштабного коэффициента вследствие изменения состояния поляризации излучения.

Поскольку интенсивность светового излучения на фотодетекторе пропорциональна косинусу фазы Саньяка (фазы, обусловленной вращением контура), для повышения чувствитель-

ности ВОГ вносят искусственный фазовый сдвиг с помощью фазо-модуляционной схемы. Два противоположно бегущих луча проходят через фазовый модулятор с временной задержкой, соответствующей времени распространения луча в волоконном контуре. Между двумя противоположно бегущими лучами появляется фазовый сдвиг, который изменяется с частотой ν_0 (частотой фазовой модуляции). Синхронный усилитель (детектор) выделяет составляющую электрического колебания на частоте ν_0 . Амплитуда этой составляющей пропорциональна синусу фазы Саньяка, а фаза указывает направление вращения. Следовательно, появляется возможность измерять малые угловые скорости и определять знак вращения.

Серьезным источником шумов в ВОГ является обратное отраженное излучение. Кроме отражений от поверхности стекло — воздух наблюдается обратное рассеяние по длине волокна в контуре, обусловленное рэлеевским рассеянием. Обратное рассеянное излучение интерферирует с волной света, распространяющейся в том же направлении. Фазовая разность между распространяющимися и обратно рассеянным излучениями подвергается случайным флуктуациям, и поэтому суперпозиция этих двух компонентов генерирует шумы в фотодетекторе. Часть обратно рассеянного света, которая может интерферировать с распространяющейся волной, пропорциональна длине когерентности света. Выбирая источник света с малой длиной когерентности, т. е. с широким спектром, можно существенно уменьшить шумовую составляющую, обусловленную обратным рассеянием. В описываемой экспериментальной конструкции ВОГ был использован суперлюминесцентный диод с длиной когерентности излучения, равной 20 мкм. Измеренное значение шумовой составляющей ВОГ эквивалентно среднему квадратическому значению угловой скорости, равному $1,25^\circ/\text{ч}$, при времени интегрирования 0,3 с (на рис. 137 показан выходной сигнал ВОГ при угловых скоростях $\pm 0,02^\circ/\text{с}$).

Изменение двулучепреломления в волокне индуцирует дрейф выходного сигнала ВОГ. Дрейф появляется, если два противоположно бегущих луча проходят различные оптические пути. Разность длин оптических путей обусловлена существованием в одномодовом волокне двух мод с ортогональными состояниями поляризации. Эти две моды распространяются, в общем случае, с различными скоростями. В волокне с небольшим или средним

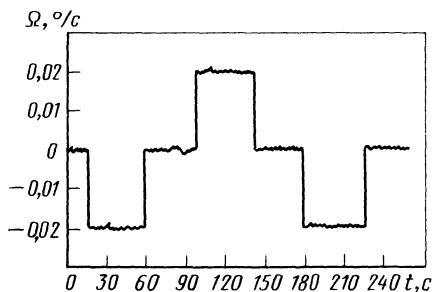


Рис. 137. Выходной сигнал ВОГ при угловых скоростях $\pm 0,02^\circ/\text{с}$

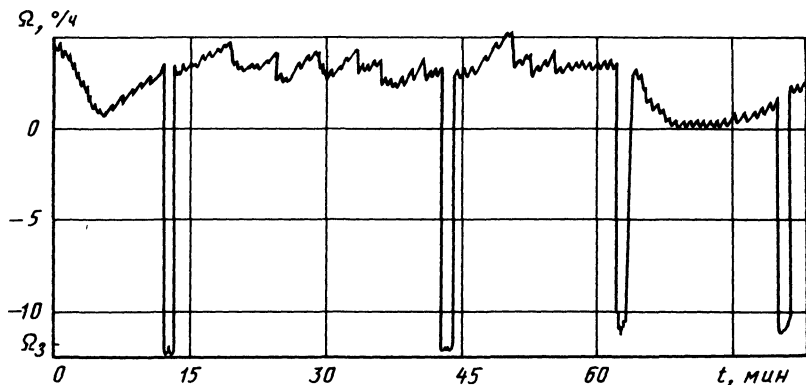


Рис. 138. Характеристика долговременной стабильности ВОГ:
 Ω_3 —угловая скорость вращения Земли в г. Ульме

двулучепреломлением осуществляется обмен энергией между этими двумя модами. Воздействие окружающей среды, например механические напряжения или температурные градиенты, приводит к тому, что связь между модами флуктуирует случайно. Для обеспечения одинаковости оптических путей двум противоположно бегущим лучам необходимо использовать только одно состояние поляризации. Это состояние поляризации селектируется поляризатором.

Экспериментально снятая характеристика долговременной стабильности выходного сигнала ВОГ показана на рис. 138. Гироскоп вращался около 80 мин на поворотном столе с угловой скоростью $14,4^\circ/\text{ч}$, направление которой противоположно вертикальной составляющей угловой скорости Земли. Эта вертикальная составляющая для г. Ульма (ФРГ), где проводился эксперимент, равна $11,2^\circ/\text{ч}$, т. е. чистая угловая скорость составляет $3,2^\circ/\text{ч}$. Для калибровки сигнала поворотный стол останавливали на время, равное ~ 1 мин. Среднее квадратическое отклонение дрейфа выходного сигнала от истинного нуля составляет $1^\circ/\text{ч}$ [69].

Нестабильность масштабного коэффициента в значительной степени определяется изменениями поляризации излучения в волокне. В точках *A* и *B* направленного ответвителя 5 (см. рис. 136) излучение имеет определенное состояние поляризации. Если свет распространяется от точки *A* до точки *C* и от точки *B* до точки *D*, то состояние поляризации изменяется непредсказуемым образом. В общем случае состояния поляризации излучений в точках *C* и *D* не совпадают.

В отсутствие деполаризатора степень совпадения состояний поляризации в точках *C* и *D* будет определять значение сигнала на фотодетекторе. В наихудшем случае — при ортогональных по-

ляризациях в точках *C* и *D* сигнал исчезает. Для устранения такой ситуации между точками *C* и *D* помещен деполяризатор.

Деполяризатор распределяет световое излучение равномерно по всем возможным состояниям поляризации. Поэтому в каждый момент лишь половина излучения обладает соответствующим состоянием поляризации. В результате масштабный коэффициент сохраняется постоянным. Следует отметить, что волокно само по себе является в известной степени деполяризатором, тем не менее включение искусственного деполяризатора позволяет существенно улучшить степень деполяризации. Из рис. 138 следует, что в пределах ограничений точности измерения дрейфа масштабный коэффициент остается постоянным.

Для экспериментов был сконструирован специальный суперлюминесцентный диод (СЛД). Конструкция его основана на V-образной желобковой структуре инжекционного полупроводникового лазера. Выходная мощность СЛД около 5 мВт, максимум эмиссии на длине волны 0,82 мкм, полуширина линии генерации — около 0,011 мкм.

В схеме ВОГ, кроме шумов обратного рассеяния, имеются шумы фотодетектора и предварительного усилителя. Для получения высокого отношения сигнал/шум необходимо обеспечить высокий уровень входной мощности на фотодетекторе.

Для увеличения части мощности оптического излучения, попадающего из светового источника в одномодовое волокно, были приняты специальные меры. Лазер с V-образной желобковой структурой и СЛД характеризуется большим астигматизмом генерируемого излучения. Используя цилиндрическую линзу, компенсировали астигматизм, и эффективность ввода излучения в волокне возросла в 10 раз.

В качестве приемников использовались различные фотодетекторы. Наименьший уровень шумов был достигнут при использовании лавинного фотодиода, однако хорошие результаты дает также $p-i-n$ -диод с трансимпедансным усилителем [69].

При конструировании деполяризатора света был учтен тот факт, что двулучепреломляющая пластина с высоким запаздыванием между «быстрой» и «медленной» осями кристалла обладает зависящей от длины волны характеристикой преобразования между входной и выходной поляризациями. Поэтому, чем шире спектр входного излучения, тем более равномерно выходной сигнал распределен по всем возможным состояниям поляризации. Требование широкого спектра выполняется в СЛД. Одна двулучепреломляющая пластина не обладает свойством деполяризации, если на входе присутствует излучение линейной поляризации и если плоскость поляризации совпадает с одной из осей кристалла. Поэтому деполяризатор был сконструирован из двух двулучепреломляющих кальцитовых пластин разной толщины. Отношение

толщин равно 2:1, а оси двух пластин развернуты на угол 45° . Такое устройство действует как деполяризатор независимо от поляризации входного излучения и поворотов деполяризатора.

Фазовый модулятор основан на эффекте фотоупругости (изменение коэффициента преломления материала под действием механических напряжений). Волоконный световод посажен на клей в канале, который просверлен в центре двух пьезокерамических преобразователей. На резонансной частоте около 120 кГц был получен фазовый сдвиг значением в несколько радиан.

Таким образом, используя световой источник с малой длиной когерентности, обеспечивая взаимность оптических путей в противоположных направлениях распространения света и усредняя по всем возможным состояниям поляризации излучения, можно реализовать ВОГ с достаточно высокой чувствительностью, малым дрейфом и стабильным масштабным коэффициентом.

ВОГ на волокне, сохраняющем поляризацию. Анализ источников шумов в ВОГ показывает, что нестабильность оптической поляризации является серьезным источником шума в приборе. Это, естественно, ограничивает чувствительность прибора. Поэтому создание одномодового волокна, сохраняющего одно состояние поляризации, позволяет сконструировать ВОГ с высокой чувствительностью. В работе [68] сообщается о разработке ВОГ, в котором все волокно, использованное в согласователе (светоделителе), фазовом модуляторе и контуре, является волокном с устойчивым состоянием поляризации.

В качестве излучателя используется СЛД, работающий на длине волны 0,84 мкм; между СЛД и волоконным светоделителем размещают обычные объемные оптические линзы, поляризатор и расщепитель луча. Последний использован для направления двух лучей, выходящих из волоконного контура, на фотодетектор. Волокно имеет затухание 3,8 дБ/км. Светоделитель распределяет энергию в контур в соотношении 49/51%, вносимые потери составляют 0,2 дБ.

Для изготовления фазового модулятора был использован пьезоэлектрический цилиндр с радиальным расширением, на который наматывалось волокно с устойчивой поляризацией. При резонансной частоте возбуждения фазового модулятора 85 кГц оптимальный фазовый сдвиг получался при приложенном напряжении около 100 мВ. Длина волокна 430 м, диаметр катушки 32 см. В качестве фотодетектора использовался $p-i-n$ -диод. Для регистрации сигнала использовалась схема фазового детектирования, синхронизированная с фазовым подмодулятором. Мощность выходного сигнала СЛД 3...6 мВт, при этом в волоконный согласователь вводился сигнал мощностью 100...200 мкВт, на входе фотодетектора интенсивность составляла 15...30 мкВт. Для магнитного экранирования ВОГ применяли экран из мю-металла.

Кратковременная нестабильность ВОГ (кратковременный шум) измерялась в течение 10 мин при постоянной времени интегрирования 1,25 с и при мощности выходного сигнала СЛД 6 мВт; диапазон флуктуации от пика до пика составлял $0,11^{\circ}/\text{ч}$. При измерениях долговременной стабильности нуля контур ВОГ вращался до исчезновения выходного сигнала (это фиксировалось по электрическому нулю в цепи обратной связи); при грубой настройке электрический нуль был в диапазоне $0,2...0,3^{\circ}/\text{ч}$. В качестве термостата использовался бокс из пенопласта, который обеспечивал постоянство окружающей температуры. Отсчеты долговременной стабильности нуля брались при постоянных времени интегрирования 40 и 125 с.

Было найдено, что при постоянной времени интегрирования 40 с уход от пика до пика составлял $0,022^{\circ}/\text{ч}$ за 10 ч; при постоянной времени 125 с уход от пика до пика составлял $0,035^{\circ}/\text{ч}$ за 24 ч при среднем дрейфе за измерение около $0,013^{\circ}/\text{ч}$.

Теоретически и экспериментально показано, что нестабильности показаний ВОГ носят характер шумовых флуктуаций с распределением, близким к гауссовскому. В данном эксперименте рассчитанные средние квадратические отклонения равны $0,015^{\circ}/\text{ч}$ при постоянной времени 1,25 с и $0,003^{\circ}/\text{ч}$ при постоянной времени 40 с. Эти значения вычислялись по 100 статистически независимым точкам. При использовании в усилителе фильтра со спадом 12 дБ на октаву полоса пропускания $B=1/(8\tau_{\text{ф}})$, где $\tau_{\text{ф}}$ — постоянная времени фильтра. Экстраполированный дрейф, вычисленный при $\tau_{\text{ф}}=1,25$ с, равен

$$\Omega_{\text{ср.кв.}}/\sqrt{B}=8 \cdot 10^{-4}^{\circ}/\text{ч}^{1/2}.$$

При измерениях составляющей угловой скорости Земли в местной точке, равной $9,4^{\circ}/\text{ч}$, нестабильность составляла несколько десятых долей градуса в час от этого значения (при постоянной времени 12,5 с). Это говорит о хорошей стабильности масштабного коэффициента ВОГ, сравнимой со стабильностью нуля.

При удалении магнитного экрана наблюдался дополнительный уход в несколько десятых долей градуса в час. Такое небольшое влияние магнитного поля на волокно, сохраняющее поляризацию, находится в согласии с теорией.

Предполагается, что по кратковременной стабильности чувствительность ВОГ ограничена флуктуациями интенсивности СЛД и шумом волоконного согласователя; на долговременную стабильность (постоянная времени 125 с) влияет уход температуры, который создает оптическую разъюстировку элементов. При постоянных времени, равных 30...40 с, заметно увеличение чувствительности; это улучшение связано с отсутствием поляризационного дрейфа в волокне с устойчивой поляризацией.

Дрейф, обусловленный шумами рэлеевского рассеяния и эффекта Керра (так же, как и поляризационного шума), не был обнаружен. Это является следствием использования широкополосного источника излучения (СЛД) и волокна с устойчивым состоянием поляризации. Волокно, сохраняющее состояние поляризации, имеет низкий уровень поляризационного шума. Весьма полезным является применение такого волокна в согласователе, поскольку смешение поляризационных мод на концах и в середине волоконного контура создает наибольший вклад в поляризационный шум. Разработка согласователя на таком волокне уменьшает вклад в шумовую составляющую на концах контура ВОГ. Такой согласователь дополнительно обеспечивает поляризационную стабильность в нем самом, что ослабляет восприимчивость к уходам температуры и механической вибрации.

$$\Delta\varphi_C = \frac{8\pi S_B N}{\lambda_C} \Omega,$$

где $S_{\text{в}}$ — площадь витка катушки, $S_{\text{в}} = \pi R^2$; R — радиус катушки; N — число витков катушки; Ω — угловая скорость.

Для конфигурации ВОГ, приведенной на рис. 139, легко по-

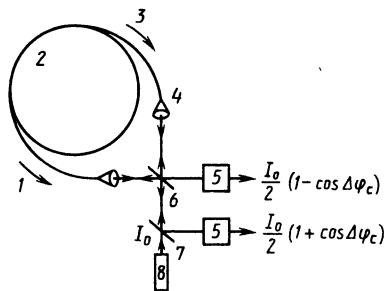


Рис. 139. Типовой ВОГ на дискретных элементах:

1—луч, бегущий против часовой стрелки; 2—многовитковый одномодовый волоконный контур; 3—луч, бегущий по часовой стрелке; 4—фокусирующая линза; 5—фотодетектор; 6—светоделитель луча 1; 7—светоделитель луча 3; 8—источник излучения

казать, что интенсивности интерферирующих лучей на обоих фотодетекторах (за счет фиксированной фазовой задержки между двумя светоделителями, равной $\pi/2$) определяются выражениями

$$I_1 = \frac{I_0}{2}(1 + \cos \Delta\varphi_c); \quad (8)$$

$$I_2 = \frac{I_0}{2}(1 - \cos \Delta\varphi_c), \quad (9)$$

где I_0 — интенсивность входного оптического излучения.

Схема ВОГ, показанная на рис. 139, имеет ряд недостатков. Первый из них связан с тем, что в схеме использованы дискретные элементы (линзы, зеркальные расщепители и др.), которые весьма чувствительны к возмущениям внешней среды. Поэтому работа системы критична к настройке элементов. Вторая проблема возникает вследствие того, что члены уравнений (8) и (9), связанные с угловой скоростью Ω , пропорциональны функции $\cos \Delta\varphi_c$. Эта функция определяет очень низкую чувствительность прибора при малых значениях $\Delta\varphi_c$, поскольку чувствительность к угловой скорости, определяемая выражением

$$S_r = \frac{dI_{1,2}}{d(\Delta\varphi_c)} = \frac{I_0}{2} \sin \Delta\varphi_c,$$

приближается к нулю при уменьшении фазы Саньяка до нуля. Однако система достигает максимума чувствительности, если $\Delta\varphi_c = (2m + 1)\pi/2$, где m — целое число. Поэтому для обеспечения максимума чувствительности необходим постоянный фазовый сдвиг $\pi/2$ между лучами (невзаимное фазовое смещение противоположно бегущих лучей).

Третья проблема связана с природой оптической измерительной системы, регистрирующей почти постоянное напряжение (или ток) при медленных изменениях Ω . Система измерений подвергается действию шумов очень низких частот; к таким источникам шумов относятся генератор излучения, фотодетекторы и электронная система обработки. Наиболее мощными шумами являются шумы с частотной зависимостью типа « $1/\nu$ ». Вследствие этой зависимости измерение на низкой частоте с постоянным фазовым сдвигом $\pi/2$ не позволяет обеспечить эффективность ВОГ, ограничиваемой только дробовыми шумами. Для минимизации действия шумов « $1/\nu$ » необходимо с помощью модуляционной техники перевести измерения на достаточно высокую частоту. Кроме того, следует отметить, что низкочастотные шумы, индуцируемые вариациями двулучепреломления волокна при изменениях внешних условий, также вносят значительный вклад.

Малый динамический диапазон обусловлен тем фактом, что измеряемый сигнал в большинстве систем является периодической функцией угловой скорости. Для расширения динамического диапазона и устранения неоднозначности используют

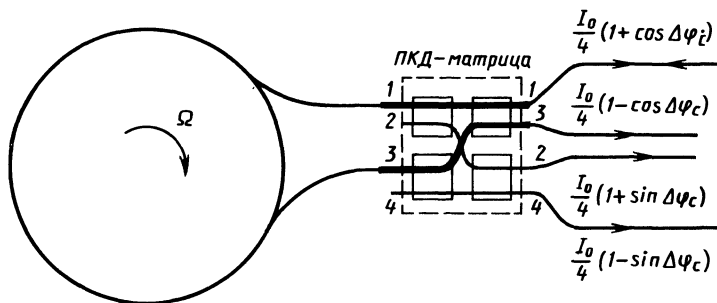


Рис. 140. ВОГ с пассивным фазосдвигающим устройством (ПКД-матрица)

акусто-оптический частотный модулятор в контуре ВОГ для компенсации фазового сдвига Саньяка, обусловленного вращением. Частоты сигнала, прикладываемого к модулятору, будут однозначно определять угловую скорость. Однако следует избегать использования в конструкции ВОГ отдельных видов оптических элементов, это позволит более полно реализовать преимущества всеволоконного одномодового прибора. В настоящее время еще нет конструкций, выполняемых целиком на волокне и имеющих большой динамический диапазон.

Пассивное оптическое фазосдвигающее устройство, предназначенное для пассивной квадратурной демодуляции (ПКД), было разработано, изготовлено и испытано в ВОГ [84].

Длина комплекта оптической матрицы ПКД составляет несколько сантиметров. Разность длин оптических путей для достижения фазового сдвига $\pi/2$ — менее 1 мкм, следовательно, минимизируется влияние температурных эффектов. Кроме того, поскольку каждый из четырех соединителей изготовлен методом сплавления без перекрутки волокон, они почти лишены двулучепреломления. Поэтому фазовый сдвиг $\pi/2$ внутри ПКД-матрицы также нечувствителен к изменению состояния поляризации света.

ВОГ, в котором используется ПКД-матрица в качестве пассивного фазосдвигающего устройства, показан на рис. 140. По существу, этот датчик состоит из двух гироскопов. На выходе основного гироскопа (жирные линии) сигнал пропорционален $\cos \Delta \varphi_c$ (как указывалось выше), однако на выходе вторичного гироскопа (тонкие линии) сигнал пропорционален $\sin \Delta \varphi_c$. Это является результатом невязимной разности хода лучей внутри ПКД-матрицы, поэтому вторичный гироскоп работает в условиях максимальной чувствительности. Выходные сигналы вторичного гироскопа определяются выражениями

$$I_2 = \frac{I_0}{4} (1 + \sin \Delta \varphi_c); \quad (10)$$

$$I_4 = \frac{I_0}{4} (1 - \sin \Delta \varphi_c), \quad (11)$$

где I_0 — интенсивность входного лазерного излучения.

Из уравнений (10) и (11) можно получить нормированный сигнал

$$S_n = \frac{I_2 - I_4}{I_2 + I_4} = \sin \Delta \varphi_c. \quad (12)$$

При малой угловой скорости $\Delta \varphi_c$ мало, и уравнение (12) можно аппроксимировать:

$$S_n \approx \Delta \varphi_c = \frac{8\pi N S_b}{\lambda c} \Omega. \quad (13)$$

Из уравнения (13) следует, что нормированный сигнал S_n не зависит от интенсивности входного лазерного пучка I_0 и, следовательно, не чувствителен к флуктуациям источника излучения.

Рассматриваемый ВОГ, хотя и имеет высокую чувствительность и в целом пассивен, не свободен от низкочастотных шумов (типа « $1/\nu$ »), имеет малый динамический диапазон. В нем также имеет место дрейф нулевого уровня, появляющийся вследствие изменений коэффициента связи соединителя, флуктуаций фазы смещения $\pi/2$ и шумов, индуцированных вариациями двулучепреломления волокна при изменениях внешних условий. Эти проблемы могут быть одновременно решены, если датчик будет работать на переменном сигнале с амплитудой, прямо пропорциональной соответствующей угловой скорости. В настоящее время для этой цели используют несколько модуляционных схем (оптических или электромеханических), которые будут рассмотрены ниже.

В общем случае с учетом прикладываемой модуляции и в соответствии с рис. 140 выходные сигналы ВОГ можно записать в виде:

$$I_1 = 1 + \cos[\Delta \varphi'_c(t) + \varepsilon_1]; \quad (14)$$

$$I_2 = 1 + \sin[\Delta \varphi'_c(t) + \varepsilon_1 + \varepsilon_2]; \quad (15)$$

$$I_3 = 1 - \cos[\Delta \varphi'_c(t) + \varepsilon_1]; \quad (16)$$

$$I_4 = 1 - \sin[\Delta \varphi'_c(t) + \varepsilon_1 + \varepsilon_2], \quad (17)$$

$$\text{где } \Delta \varphi'_c(t) = \frac{8\pi S_b N}{\lambda c} \Omega(t)$$

содержит модуляционный член; ε_1 — невзаимный фазовый сдвиг вследствие двулучепреломления, который варьирует с изменением внешних условий; ε_2 — малое фазовое смещение от значения $\pi/2$, которое также изменяется с изменением внешних условий. Постоянные множители опущены.

Комбинируя уравнения (14) и (16), получим

$$I_a = \frac{I_1 - I_3}{I_1 + I_3} = \cos[\Delta \varphi'_c(t) + \varepsilon_1]; \quad (18)$$

Подобным образом комбинируя уравнения (15) и (17), имеем

$$I_b = \sin[\Delta\varphi'_d(t) + \varepsilon_1 + \varepsilon_2]. \quad (19)$$

Сигнал, пропорциональный фазе Саньяка, $\Delta\varphi'_d(t)$ можно легко отделить от сигналов, пропорциональных ε_1 и ε_2 , если модулирующая частота фазы Саньяка выбрана выше частотных спектров, составляющих ε_1 и ε_2 (которое обычно не выше нескольких килогерц). Такое выделение достигается дифференцированием и взаимным перемножением.

Временные производные уравнения (18) и (19) имеют вид

$$-[\dot{\Delta\varphi'_d(t)} + \dot{\varepsilon}_1] \sin[\Delta\varphi'_d(t) + \varepsilon_1]; \quad (20)$$

$$[\dot{\Delta\varphi'_d(t)} + \dot{\varepsilon}_1 + \dot{\varepsilon}_2] \cos[\Delta\varphi'_d(t) + \varepsilon_1 + \varepsilon_2]. \quad (21)$$

Умножая выражение (20) на (19) и выражение (21) на (18), получим

$$-[\dot{\Delta\varphi'_d(t)} + \dot{\varepsilon}_1] \sin[\Delta\varphi'_d(t) + \varepsilon_1] \sin[\Delta\varphi'_d(t) + \varepsilon_1 + \varepsilon_2]; \quad (22)$$

$$[\dot{\Delta\varphi'_d(t)} + \dot{\varepsilon}_1 + \dot{\varepsilon}_2] \cos[\Delta\varphi'_d(t) + \varepsilon_1] \cos[\Delta\varphi'_d(t) + \varepsilon_1 + \varepsilon_2]. \quad (23)$$

Вычитая выражение (22) из выражения (23), имеем

$$I_{\text{вых}} = \dot{\Delta\varphi'_d(t)} \cos \varepsilon_2 + \dot{\varepsilon}_1 \cos \varepsilon_2 + \dot{\varepsilon}_2 \cos[\varepsilon_1 + \Delta\varphi'_d(t)] \times \\ \times \cos[\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \Delta\varphi'_d(t)] \cos[\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \Delta\varphi'_d(t)]. \quad (24)$$

Таким образом, интенсивность выходного сигнала $I_{\text{вых}}$ содержит три слагаемых: фазу Саньяка $\Delta\varphi'_d$, фазовый сдвиг за счет двулучепреломления ε_1 и фазовое отклонение от $\pi/2 - \varepsilon_2$. Третье слагаемое пренебрежимо мало, так как ε_2 изменяется медленно во времени. Первое слагаемое (при учете модуляции) может быть отделено от второго с помощью полосового фильтра. Тогда с хорошим приближением уравнение (24) может быть записано в виде

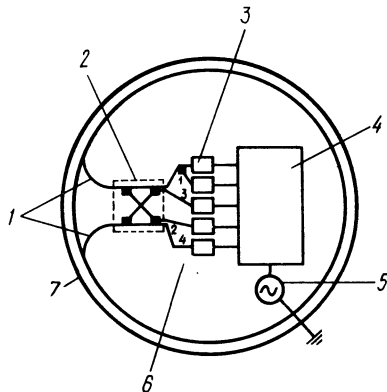
$$I_{\text{вых}} \approx \dot{\Delta\varphi'_d} \cos \varepsilon_2. \quad (25)$$

Из этого выражения следует, что фазовое отклонение от $\pi/2(\varepsilon_2)$ оказывает влияние на выходной сигнал в виде множителя $\cos \varepsilon_2$. Поскольку $\cos \varepsilon_2$ достигает единицы при стремлении ε_2 к нулю, небольшие фазовые погрешности вследствие влияния внешних условий будут незначительно изменять выходной сигнал. Из уравнения (25) видно, что угловая скорость прямо пропорциональна интенсивности выходного сигнала $I_{\text{вых}}$, и поэтому система обладает большим динамическим диапазоном. Можно ожидать, что система также будет иметь высокую чувствительность и малый дрейф, так как вклады составляющих погрешности ε_1 и ε_2 могут быть либо пренебрежимо малы, либо отделены от информативной составляющей (угловой скорости).

Одна из модуляционных схем, изготовление которой требует лишь хорошо разработанной технологии, показана на рис. 141.

Рис. 141. ВОГ с модуляцией переменным сигналом:

1—волокно, сохраняющее поляризацию; 2—ПКД-матрица; 3—лазерный диод; 4—электронный блок; 5—возбудитель переменного сигнала; 6—фотодетекторы; 7—пьезоэлектрический барабан и волоконный контур



На пьезоэлектрический цилиндр наматывается большое число витков одномодового световода; образуется чувствительный контур. Концы световода, идущие от цилиндра, присоединяются (плавлением) к одной стороне ПКД-матрицы, а лазерный луч вводится в ПКД-матрицу с другой стороны. Модуляция осуществляется подачей переменного сигнала на пьезоэлектрический цилиндр. Радиус цилиндра, а следовательно, радиус волоконного контура изменяются с частотой приложенного сигнала:

$$R = R_0 + \Delta R \sin \omega_m t, \quad (26)$$

где R_0 — радиус цилиндра; ΔR — изменение радиуса вследствие пьезоэлектрического эффекта; ω_m — частота приложенного переменного сигнала.

Подставляя уравнение (26) в (13), получим

$$\Delta \varphi'_c = \frac{8\pi^2 (R_0 + \Delta R \sin \omega_m t)^2 N}{\lambda c} \Omega.$$

При $\Delta R \ll R_0$ членом порядка малости $(\Delta R)^2$ можно пренебречь, тогда имеем

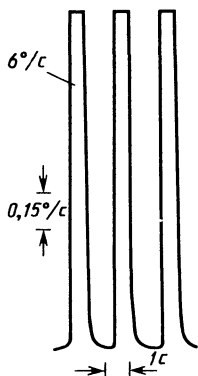
$$\Delta \varphi'_c \approx \Delta \varphi_c \left[1 + \frac{2\Delta R}{R_0} \sin \omega_m t \right]. \quad (27)$$

Подставляя уравнение (27) в (25) и учитывая, что $\cos \varepsilon_2 \approx 1$, получим

$$\begin{aligned} I_{\text{вых}} &\approx \Delta \varphi_c \left(\frac{2\Delta R}{R_0} \omega_m \right) \cos \omega_m t = \\ &= \frac{16\pi S_b N}{\lambda c} \Omega \left(\frac{\Delta R}{R_0} \omega_m \right) \cos \omega_m t. \end{aligned} \quad (28)$$

Из уравнения (28) следует, что амплитуда интенсивности выходного сигнала $I_{\text{вых}}$ прямо пропорциональна угловой скорости Ω и модулирована на частоте переменного сигнала ω_m . Если частоту возбуждения пьезоэлектрического модулятора ω_m выбрать так, чтобы выполнялось условие $\omega_m = R_0/(\sqrt{2}\Delta R)$, то среднее квадра-

Рис. 142. Кратковременный дрейф ВОГ



тическое значение выходного сигнала [уравнение (28)] будет точно равно фазе Саньяка $\Delta\varphi_c$ и, следовательно, пропорционально угловой скорости Ω .

Рассматриваемая модуляционная схема будет минимизировать низкочастотные шумы, поскольку система работает на модулирующей частоте более высокой, чем верхняя частота шумового спектра. Система также должна иметь малый дрейф и большой динамический диапазон. Степень улучшения чувствительности зависит, конечно, от модулирующей частоты, значения приложенного напряжения и физических свойств пьезоэлектрического цилиндра.

Подобные результаты могут быть получены и при использовании других модуляционных схем, в частности при модуляции длины волны излучения лазера или при оптическом переключении выходных излучений контура ВОГ [84].

ВОГ с ПКД-матрицей (см. рис. 140) был изготовлен и экспериментально проверен. Конструкция ВОГ включает барабан диаметром 15 см, на который намотан одномодовый световод длиной 250 м; в качестве источника излучения использовался одномодовый GaAs-лазер. ВОГ приводился во вращение с постоянной скоростью, равной $6^\circ/\text{с}$.

Было определено, что пассивное фазосдвигающее устройство обеспечивает выход вторичного гироскопа, отличающийся по фазе от выхода первичного гироскопа на 80° . Изменения выходного сигнала в результате вращения для первичного гироскопа незначительны, в то время как вторичный гироскоп весьма чувствителен к малым угловым скоростям (рис. 142). Кратковременная, минимально обнаруживаемая угловая скорость — менее $0,01^\circ/\text{с}$. График долговременной стабильности ВОГ в течение 1 ч приведен на рис. 143. Проводились также эксперименты

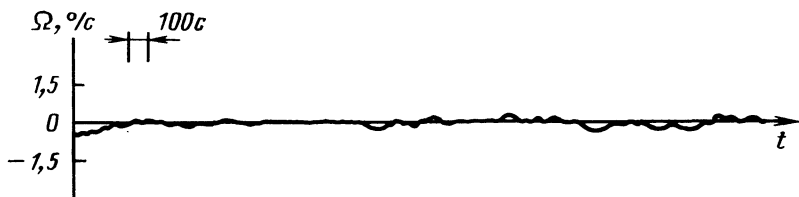


Рис. 143. Долговременный дрейф ВОГ ($R=7,5$ см; $L=250$ м; $\lambda=0,85$ мкм)

с другим образцом ВОГ с волокном длиной $L=44$ м, намотанным на барабан диаметром $D=5$ см. Для получения пассивного фазового сдвига применялась также ПКД-матрица. Возбуждение переменным сигналом осуществлялось с помощью магнитного вибратора, работавшего на частоте 1 кГц с амплитудами, эквивалентными угловым скоростям, равным $5,5^\circ/\text{с}$, $0,55^\circ/\text{с}$ и $0,055^\circ/\text{с}$.

Работа на переменном сигнале позволяет оценить точность ВОГ без влияния низкочастотных шумов типа « $1/v$ ». В ходе этого эксперимента было найдено, что ВОГ имеет очень хорошую линейность. Экстраполированный дрейф, определяющий минимально регистрируемую угловую скорость, составил $2 \cdot 10^{-5}$ рад/ $\sqrt{\text{Гц}}$ (в основном в результате изменений состояния поляризации и геометрической невзаимности путей, проходимых встречно бегущими волнами, — как следствие влияния окружающих условий). При увеличении частоты переменного сигнала до 25 кГц шумовой дрейф ВОГ уменьшался на 10 дБ. Этот результат означает, что ВОГ с модуляцией гармоническим сигналом, частота которого не ниже нескольких килогерц, потенциально обладает высокой чувствительностью, малым уходом и большим динамическим диапазоном.

ВОГ средней точности с обращением фазы Саньяка в нуль. Волоконный оптический гироскоп, предназначенный для систем управления средней точности, должен работать в широком динамическом диапазоне рабочих угловых скоростей, иметь линейный цифровой выход. Важными факторами являются также стоимость прибора и технологичность его конструкции. Особенности и конструкция ВОГ, отвечающего этим требованиям, описаны в работе [135]. В ВОГ невзаимная разность фаз, появляющаяся в результате вращения контура, компенсируется разностью фаз лучей при частотном сдвиге одного из встречно бегущих лучей в контуре. Частотный сдвиг, пропорциональный угловой

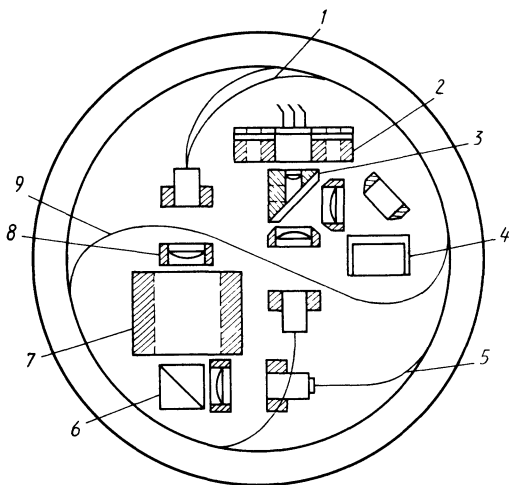


Рис. 144. Компоновочная схема ВОГ с обращением фазы в нуль:
 1—волоконный контур; 2—лазерный диод; 3—расщепитель; 4—фотодетектор; 5—волоконный пространственный фильтр; 6—поляризатор; 7—акустооптический модулятор; 8—линза; 9—перекрещенный световод

скорости, легко преобразуется в цифровой сигнал.

При конструировании этого ВОГ были приняты меры для исключения влияния температурных эффектов. Диаметр макета равен 6,35 см, толщина 1,65 см (рис. 144). Источником излучения служил одночастотный лазерный диод, работавший в режиме одной поперечной моды. Для сохранения свойства взаимности и уменьшения чувствительности прибора к изменениям окружающих условий использовались одномодовый волоконный пространственный фильтр и поляризатор. Акустооптический модулятор, лазерный диод и другие оптические элементы были тщательно термически изолированы с целью устранения геометрических отклонений оптических лучей под действием температурных градиентов в системе. Концы волоконного контура были установлены так, чтобы акустооптический модулятор работал в режиме лучерасщепления, а относительное смещение двух концов было исключено. Были также приняты меры для экранирования фотодетектора от попадания случайных блуждающих лучей.

В компоновочной схеме, показанной на рис. 144, излучение лазерного диода коллимируется и направляется в одномодовый пространственный волоконный фильтр. Фильтр исключает геометрические невязки в оптической системе, включая волоконный контур. С выхода фильтра излучение коллимируется и, отражаясь от кубического поляризатора, поступает в акустооптический модулятор.

В модуляторе осуществляются частотный сдвиг и расщепление лучей в пространстве. Лучи нулевого и первого порядков на выходе модулятора направляются в разные концы волоконного контура. Оба луча после распространения в контуре реколлимируются и рекомбинируют в акустооптическом модуляторе. После рекомбинации лучи поступают обратно в пространственный фильтр и отраженные расщепителем попадают на фотодетектор.

Испытания образца ВОГ с диаметром 6,35 см на вибрацию, влияние магнитного поля, влияние акустических воздействий и температурные градиенты показали относительную нечувствительность прибора к влиянию окружающих условий. Остаточная погрешность определяется временным уходом значения длины волны излучения источника.

Кроме конструкции ВОГ с диаметром 6,35 см и длиной контура 100 м, была разработана конструкция с диаметром, равным 14,2 см и длиной контура 1100 м. Испытаниям подвергались обе конструкции. Нижний предел чувствительности составил для 100-метрового контура около $50^\circ/\text{ч}$ и для 1100-метрового контура — $5...10^\circ/\text{ч}$.

При отсутствии температурной компенсации чувствительность 1100-метрового контура была около $12^\circ/\text{ч}$. Ближайшим этапом разработок является конструирование ВОГ, сравнимого по чувст-

вительности с лучшими механическими гироскопами и кольцевыми лазерными гироскопами [135].

ВОГ на интегрально-оптических схемах. В последнее время разработчики ВОГ обращают внимание на создание прибора на интегрально-оптических элементах. Такой подход позволяет создавать малогабаритные надежные конструкции ВОГ твердотельного исполнения, использовать дешевую планарную технологию [74, 75, 77]. Переходными конструкциями являются образцы ВОГ на так называемых гибридных схемах.

В гибридной схеме ВОГ все элементы, кроме оптического контура, изготовляют в виде интегрально-оптических схем на подложке из ниобата лития [74, 75]. В интегрально-оптическом исполнении конструируют такие элементы ВОГ, как излучатели, переключатели, поляризаторы, расщепители луча, ячейки смещения, модуляторы, фотодетекторы, а в качестве оптического контура применяют многовитковую катушку оптического волокна (рис. 145).

Для реализации идеи микроминиатюризации в системе обработки и выделения информативного сигнала (угловой скорости и углового положения) используют микропроцессор. Ожидаемая точность гибридных ВОГ позволит использовать их в системе стабилизации космических аппаратов [74].

Так называемый микрооптический гироскоп (МОГ) разработан полностью на интегрально-оптических элементах [77]. В

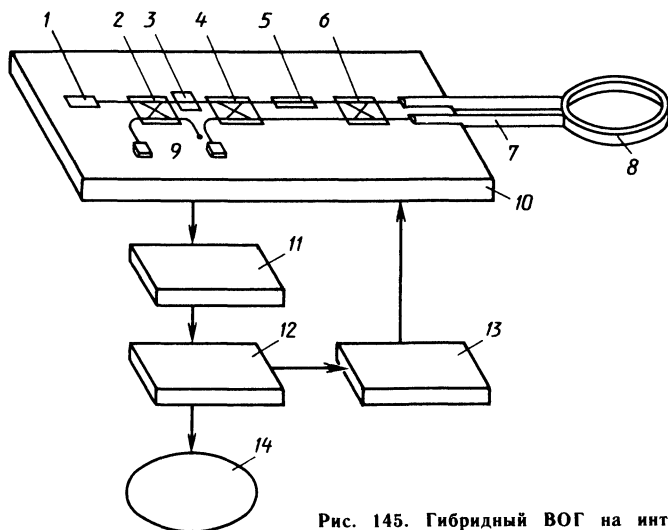


Рис. 145. Гибридный ВОГ на интегрально-оптических схемах и волоконном контуре:

1—лазер; 2—переключатель; 3—поляризатор; 4—расщепитель луча; 5—ячейка смещения; 6—модулятор; 7—одномодовые световоды; 8—световодный контур; 9—фотодетекторы; 10—подложка из ниобата лития; 11—сигнальные цепи; 12—микропроцессор; 13—схема питания элементов; 14—информация об угловой скорости и угле

макете МОГ многовитковая катушка оптического волокна (контур) заменена тонкопленочным одновитковым волноводом из титана. Волновод из титана наносится методом диффузионной технологии на подложку из ниобата лития. Остальные элементы, как и у гибридного ВОГ, также изготавливают на основе интегрально-оптической технологии. Применение планарной технологии изготовления МОГ удешевляет прибор. Предполагается, что точность МОГ составит $0,1...1^\circ/\text{ч}$ [77].

ВОГ с усложненными схемами обработки и выделения информативного параметра. Для расширения динамического диапазона рабочих угловых скоростей ВОГ применяют усложненные схемы выделения фазы Саньяка: с гетеродинированием, с гармонической обратной связью, с обращением фазы в нуль и др.

Разработана схема с фазовой модуляцией и выделением одной боковой полосы, в которой оптический фазовый сдвиг Саньяка непосредственно преобразуется в относительную фазу низкочастотного сигнала [92]. В этой схеме используется дискретный фазовый модулятор, возбуждаемый сигналом параболической формы, что индуцирует пилообразную дифференциальную фазовую модуляцию между встречно бегущими в контуре лучами. Развитием этой схемы является экспериментальная установка ВОГ, рассматриваемая ниже.

ВОГ с псевдо-гетеродинным детектированием. В этой схеме выделяется низкочастотный гармонический сигнал, фаза которого прямо связана с фазой Саньяка [92]. Однако здесь используется синусоидальная фазовая модуляция, осуществляемая непосредственно пьезоэлектрическим волоконным преобразователем, работающим на растяжение и размещаемым на одном конце чувствительного волоконного контура длиной L , в комбинации с селективным временным стробированием детектора. Все это позволяет реализовать выделение сигнала несущей методом гетеродирования.

Такая схема исключает потребность в дискретных оптических элементах и позволяет конструировать «всеволоконный» гироскоп, т. е. прибор целиком построенный на волокне.

Схема экспериментальной конфигурации ВОГ показана на рис. 146. Возбуждение пьезоэлектрического волоконного преобразователя достаточно сильным синусоидальным фазомодулирующим сигналом $\varphi_c \sin \omega_c t$ приводит к эффективной фазовой модуляции $\varphi_e \cos \omega_c t$ между встречно бегущими в контуре лучами; при этом амплитуда девиации фазы $\varphi_e = 2\varphi_c \sin(\omega_c \tau / 2)$, где τ — групповая временная задержка на длине волоконного контура.

В результате выделения интерференционной картины на выходе контура фотодиод генерирует выходной ток $i(t)$. Селективное временное стробирование фототока $i(t)$ осуществляется сигналом прямоугольной формы $g(t)$, синхронизируемым от генератора сигнала частоты ω_c .

Форма выходного сигнала после стробирования содержит гармоники, кратные ω_c . Этот выходной сигнал можно выразить в виде произведения разложения фототока по бесселевым функциям и разложения в ряд Фурье прямоугольной стробирующей функции. Можно показать, что полная амплитуда m -й четной гармоники частоты ω_c в стробированном фототоке выражается в виде

$$S_m = K \left\{ J_m(\varphi_e) \cos \varphi_N \cdot \cos m\omega_c t + \right. \\ \left. + \frac{2}{\pi} \sin \varphi_N \cdot \sin \omega_c t \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n J(\varphi_e) \times \right. \\ \left. \times \left[\frac{1}{j+m} - \frac{1}{j-m} \right] \right\},$$

где $m=2, 4, 6, \dots, j=2n+1$, значение K зависит от мощности оптического сигнала.

Это уравнение можно представить в форме

$$[A \cos \varphi_N \cdot \cos m\omega_c t + B \sin \varphi_N \cdot \sin m\omega_c t],$$

где коэффициенты A и B определяются относительными значениями бесселевых компонент. При наложении специального условия $|A|=|B|$ получим выражение

$$S_m = K A \cos(m\omega_c t \pm \varphi_N),$$

которое имеет постоянную амплитуду, частоту $m\omega_c$ и относительную фазу φ_N , равную полному невзаимному фазовому

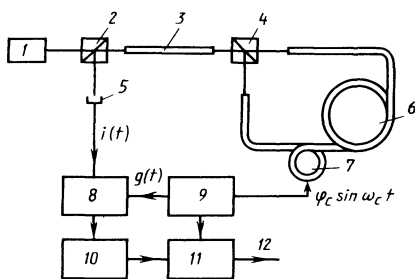


Рис. 146. Конфигурация экспериментального ВОГ:

1—лазерный диод; 2—расщепитель P1; 3—волоконный фильтр; 4—расщепитель P2; 5—фотодиод; 6—контур ВОГ; 7—пьезоэлектрический преобразователь; 8—аналоговое стробирующее устройство; 9—осциллятор (ω_c); 10—полосовой фильтр ($2\omega_c$); 11—фазовый анализатор; 12—выходной сигнал

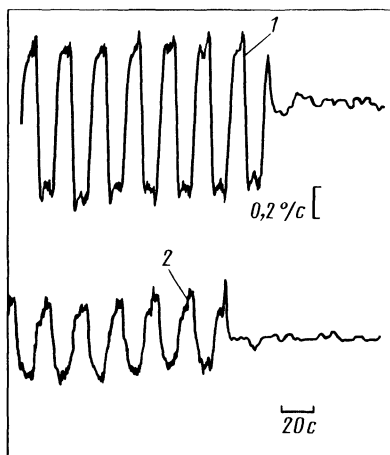


Рис. 147. Выходной сигнал фазового анализатора (время интегрирования 1 с): 1—угловая скорость $0,45^\circ/\text{с}$; 2— $0,2^\circ/\text{с}$

сдвигу, включающему дифференциальную фазу Саньяка. Демодуляция этого сигнала соответствующим отслеживающим фазу устройством дает искомый информативный параметр Ω .

В эксперименте использовался гироскоп, контур которого был образован одномодовым волокном длиной 270 м, намотанным на катушку с диаметром 32 см. Длина волны излучения лазерного диода, выполненного на основе GaAlAs, составляет 792 нм.

Назначение расщепителей $P1$ и $P2$ ясно из рисунка, между ними помещен модовый фильтр из световода. Волоконный пьезоэлектрический преобразователь возбуждается на своей резонансной частоте, равной 27 кГц.

Фототок на выходе $p-i-n$ -фотодиода строится аналоговым переключателем. Затем этот сигнал поступает в полосовой фильтр. Вторая гармоника ($m=2$) стробированного сигнала фильтруется и подается на фазовый анализатор (синхронный анализатор).

Можно показать, что для случая $m=2$ условие $|A|=|B|$ удовлетворяется при $\varphi_e=2,82$ рад. В этих условиях фаза выходного сигнала частоты 54 кГц ($2\omega_c$) непосредственно связана с полным невзаимным фазовым сдвигом в контуре ВОГ; это было проверено в эксперименте.

Следует заметить, что эксперименты в основном были направлены на отработку схемы выделения информативного параметра, а не на максимизацию чувствительности ВОГ. На рис. 147 показаны предварительные записи выходных сигналов фазового анализатора при двух значениях угловой скорости ВОГ.

Значениям угловой скорости $0,45^\circ/\text{с}$ и $0,2^\circ/\text{с}$ эквивалентны фазы Саньяка, равные $8,9 \cdot 10^{-3}$ и $4 \cdot 10^{-3}$ рад соответственно. Масштабный коэффициент ВОГ составляет $2,26^\circ/(\circ/\text{с})$ или $0,04$ рад/ $(^\circ/\text{с})$.

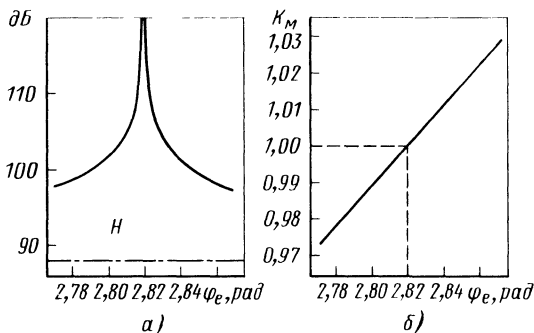
Большая часть флуктуаций выходного сигнала (см. рис. 147) обусловлена шумами, возникающими вследствие «дрожания» вращающейся платформы, использованной для проведения этих начальных измерений. Однако относительно высокий уровень кратковременного дрейфа (ухода) обусловлен эффектами двулучепреломления в волоконном контуре и частотной нестабильностью осциллятора и полосового фильтра. Кроме того, ожидаемый дрейф может быть высок также потому, что модулирующая частота $\omega=27$ кГц намного ниже требуемой модулирующей частоты, равной $\omega_0=\pi/\tau$.

В последующих экспериментах планируется [92] использовать одномодовое волокно, сохраняющее поляризацию, в соединении с волоконным направленным ответвителем, а в качестве источника применять достаточно мощный суперлюминесцентный диод вместо лазерного диода.

Теоретический анализ показывает, что масштабный коэффициент и максимальный динамический диапазон связаны с пико-

Рис. 148. Динамический диапазон (а) и нормализованный масштабный коэффициент (б) ВОГ в зависимости от пикового значения эффективной фазовой модуляции φ_e :

H — предельное значение динамического диапазона при линейности 100 частей на 10^6 (найденное для способа динамического фазового смещения [38])



вым значением эффективной фазовой модуляции φ_e зависимостью, графически показанной на рис. 148. Допуская, что чувствительность ВОГ к измерению фазы составляют 10^{-6} рад (как было найдено для некоторых «всеволоконных» гироскопов [97]), из графика можно видеть, что можно реализовать широкий динамический диапазон измерений с высокой линейностью (100 частей на 10^6). Но, поскольку масштабный коэффициент ВОГ приблизительно прямо пропорционален значению φ_e (в диапазоне, показанном на рис. 148), необходимость обеспечения высокой стабильности масштабного коэффициента K_m потребует жесткого контроля величины φ_e . Это, однако, станет достижимым при использовании системы замкнутого регулирования, поддерживающей значение $\varphi_e = 2,82$ рад.

Таким образом, схема псевдогетеродинного детектирования со сканируемой фазой позволяет непосредственно трансформировать фазу Саньяка в фазу низкочастотного сигнала. Низкочастотный синусоидальный сигнал генерируется синусоидальной фазовой модуляцией, приложенной к одному концу волоконного контура, в сочетании с селективным временным стробированием детектора. Схема имеет большой линейный динамический диапазон.

ВОГ с гетеродинной схемой детектирования и частотным (цифровым) выходом. Разработанная экспериментальная конструкция ВОГ имеет следующие особенности [124]:

для расширения динамического диапазона и обеспечения линейности применена электрическая схема обращения фазы в нуль с обратной связью;

для удобства последующей обработки информативного параметра выходной сигнал имеет частотную (цифровую) форму, т. е. частота выходного сигнала пропорциональна угловой скорости;

приняты меры для исключения частотной невязимости и уменьшения геометрической невязимости контура ВОГ;

для разрушения когерентности излучения применена частотная модуляция одномодового лазерного диода, что уменьшает дрейф прибора, обусловленный обратным рэлеевским рассеянием.

Кроме того, использование метода обращения фазы в нуль позволяет уменьшить влияние флуктуаций интенсивности оптического сигнала, обусловленные изменением состояния поляризации излучения в волокне.

Эти меры позволили обеспечить хорошую линейность ВОГ и достигнуть кратковременного разрешения (дрейфа) угловой скорости около $5^\circ/\text{ч}$ ($0,0014^\circ/\text{с}$) при времени интегрирования 1 с.

В схеме гетеродинного ВОГ (рис. 149) излучение лазерного диода разделяется дифракционной решеткой на две волны, которые с помощью расщепителя направляются в противоположные концы волоконного контура.

После распространения в контуре две волны, поступающие с торцов волокна, с помощью того же расщепителя направляются в акустооптический модулятор (АОМ) по направлениям лучей 0-го и 1-го дифракционных порядков. Поэтому АОМ действует не только как устройство для сдвига частоты оптического сигнала, но и как направленный соединитель. Геометрическая взаимность оптических путей достигается строгой симметрией расположения дифракционной решетки и АОМ относительно расщепителя луча. На входе лавинного фотодиода появляется недифрагированная часть волны, распространяющейся по часовой стрелке в контуре, на частоте ν_0 , равной частоте генерации лазерного диода, и дифрагированная часть волны, распространяющейся против часовой стрелки, на частоте $\nu_0 + \nu_1$, где ν_1 — частота задающего сигнала АОМ.

В результате гетеродинирования на выходе ЛФД появляется сигнал биений промежуточной (разностной) частоты ν_1 . Фаза

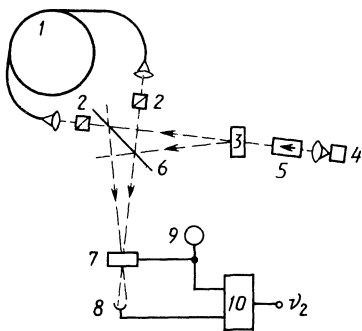


Рис. 149. Схема гетеродинного ВОГ с частотным выходом:

1—волоконный контур; 2—поляризатор; 3—дифракционная решетка; 4—лазерный диод; 5—изолятор; 6—расщепитель луча; 7—акустооптический модулятор (АОМ); 8—лавинный фотодиод; 9—генератор модулирующего сигнала; 10—фазовый детектор

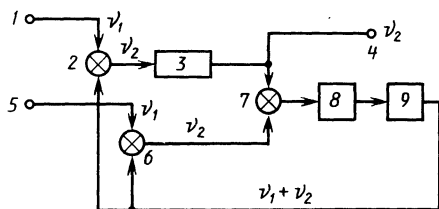


Рис. 150. Электронная схема измерения с обращением фазы в нуль и частотным выходом:

1—вход опорного сигнала; 2—ДБС1; 3—линия задержки; 4—выход; 5—вход измеряемого сигнала; 6—ДБС2; 7—ДБС3; 8—фильтр; 9—ГУН

Саньяка, обусловленная вращением контура, содержится в разности фаз между протектированным сигналом биений и задающим сигналом АОМ.

При наличии остаточной разности в длинах оптических путей между лучами тепловые флуктуации этой разности или различия между оптическими частотами будут вызывать дрейф выходного сигнала, а следовательно, погрешность в измерении угловой скорости. Кроме того, в этом случае нельзя использовать источник оптического сигнала с малой когерентностью (с широким спектром) для ослабления шумов, вызванных обратным рэлеевским рассеянием. Однако при строго выверенном расположении оптических элементов (дифракционной решетки и АОМ относительно расщепителя) разность хода лучей будет незначительной.

При наличии различий по частоте двух лучей изменение длины волокна с температурой будет также приводить к дрейфу выходного сигнала. Для исключения этого дрейфа в рассматриваемой конфигурации прибора АОМ сдвигает частоту луча *после* его прохождения по волокну.

Электронная схема с обращением фазы Саньяка в нуль показана на рис. 150. Частота электрического сигнала на выходе схемы пропорциональна угловой скорости. Эта частота служит для измерения угла поворота. Два двухбалансных смесителя (ДБС) 3 и 4 преобразуют частоты сигнального и опорного напряжений во вторую промежуточную частоту ν_2 . Опорный сигнал на второй промежуточной частоте ν_2 поступает в линию задержки с прецизионно фиксированным временем задержки.

В качестве линии задержки использовано устройство с зарядовой связью (УЗС), которое вносит фазу пропорционально частоте ν_2 , т. е. $2\pi\nu_2\tau_d$, где τ_d — время задержки в УЗС.

Фаза сигнала на выходе линии задержки и фаза сигнала с выхода ДБС 4 сравниваются с помощью ДБС 5, при этом цепь обратной связи (фильтр, ГУН) управляет частотой ν_2 так, чтобы сигналы на входе ДБС 5 были все время в квадратуре (сдвинуты по фазе на $\pi/2$). Тогда фазовое соотношение, из которого следует значение регулирующей частоты ν_2 , будет иметь вид $2\pi\nu_2\tau_d = \Delta\varphi + 2\pi n - \pi/2$, где $\Delta\varphi$ — входная фазовая разность; n — произвольное целое число, выбираемое так, чтобы $\nu_2 > 0$ в требуемом динамическом диапазоне. Такая схема не накладывает условия точной линейности ГУН.

В экспериментальной конструкции ВОГ используется контур из одномодового волокна длиной 2 км, намотанного на катушку радиуса 15,9 см, дискретные оптические элементы, одномодовый лазерный диод (марки Хитахи НЛР=3400, длина волны 816 нм). Частота возбуждающего сигнала АОМ равна 40 МГц. Линия задержки на УЗС дает временную задержку 49,9 мкс. Стабильность временной задержки определяется стабильностью частоты синхронизации УЗС. Целое число в фазовом соотношении было

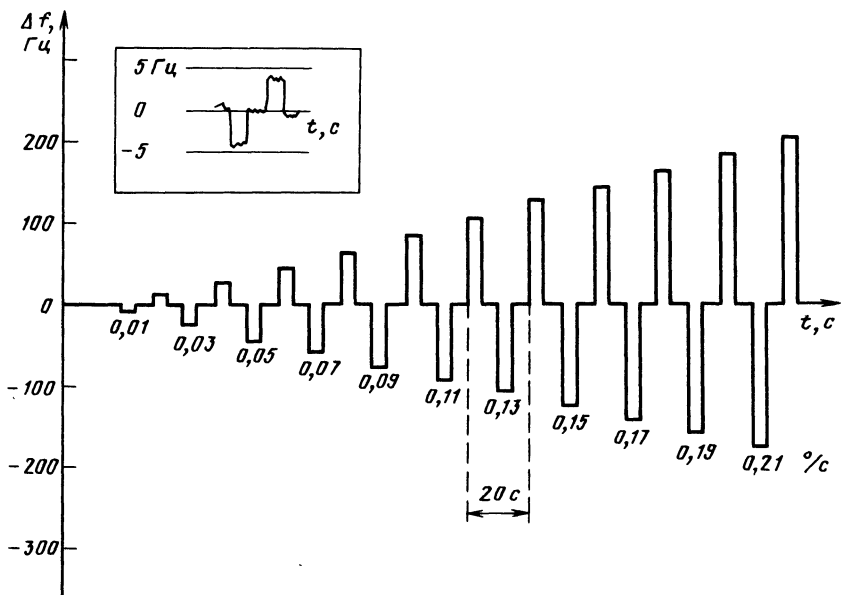


Рис. 151. Результат измерения угловой скорости гетеродинным ВОГ; время интегрирования 1 с (на рисунке также показана измеренная угловая скорость Земли $\pm 0,0042$ °/с)

выбрано равным 10. Коэффициент преобразования фазовой разности в выходной частотный сдвиг равен $55,7$ Гц/°, что соответствует масштабному коэффициенту гироскопа 910 Гц/(°/с). Частота выходного сигнала умножалась в 10 раз перед подачей в частотомер.

На рис. 151 показаны результаты измерений угловой скорости ВОГ. Диапазон скоростей $\pm 0,01 \dots \pm 0,21$ °/с. Время интегрирования при измерениях равно 1 с и определяется временем стробирования частотомера. В верхней части рис. 151 показан график измерения угловой скорости Земли ($\pm 0,0042$ °/с).

Долговременный дрейф экспериментального ВОГ показан на рис. 152, где также показано измеренное значение угловой скорости Земли. Кратковременное разрешение угловой скорости ограничивается обратным рэлеевским рассеянием и остаточным френелевским отражением на дискретных оптических элементах.

Одномодовый лазерный диод, использованный в экспериментах, имел относительно высокую выходную мощность (10 мВт) и высокий коэффициент ввода излучения в волокно.

Лазерный диод имел высокую степень когерентности генерируемого излучения. Поэтому для уменьшения длины когерентности излучения была использована прямая частотная модуляция лазерного диода полосовым шумовым сигналом. В результате

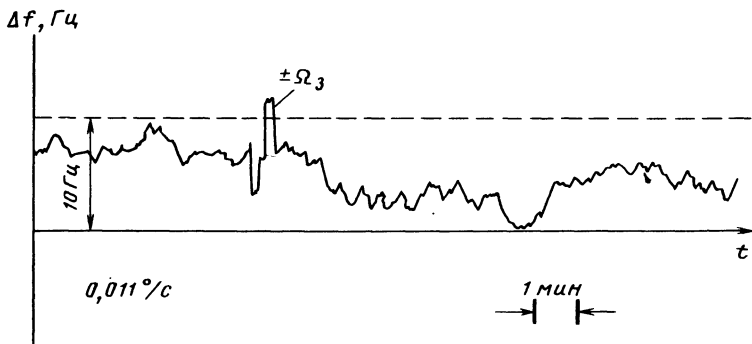


Рис. 152. Долговременный дрейф гетеродинного ВОГ; время интегрирования 1 с (показано изменение скорости вращения Земли $\pm \Omega_3$)

кратковременное разрешение было улучшено почти в 20 раз и составило $\sim 5^\circ/\text{ч}$ ($0,0014^\circ/\text{с}$), что видно из рис. 151, 152. Как полагают разработчики ВОГ, долговременный дрейф порядка $0,01^\circ/\text{с}$, показанный на рис. 152, вызван в основном механической нестабильностью устройств, вводящих излучение в волокно, и тепловыми флуктуациями скорости акустической волны в АОМ. Разработанный прибор обладает хорошей линейностью; угловой скорости $11^\circ/\text{с}$ соответствует фаза Саньяка 180° .

В дальнейшем для улучшения кратковременного разрешения предполагается использовать оптический источник с широким спектром. Долговременный дрейф предполагается уменьшить использованием интегрально-оптических схем и стабилизацией тепловых флуктуаций в АОМ. Если вместо АОМ использовать дифракционную решетку, то частотного сдвига в одном из лучей не будет. В этом случае легко реализуется гомодинная схема детектирования с точно контролируемым фазоразностным смещением без какой-либо остаточной разности длин путей.

ВОГ с линейным масштабным коэффициентом в широком динамическом диапазоне и с цифровым выходом. Как уже рассматривалось ранее, широкий динамический диапазон с высокой линейностью можно реализовать в замкнутом ВОГ. В разомкнутом ВОГ с широким динамическим диапазоном [93] прямое измерение фазы Саньяка, преобразованное в изменение фазы низкочастотного электрического сигнала, дает возможность реализовать цифровой выходной отсчет и высокую линейность масштабного коэффициента в широком динамическом диапазоне. Для получения отсчета можно использовать цифровой счетчик временных интервалов.

Идея низкочастотной обработки может быть пояснена следующим образом. Фазовый модулятор, размещенный в асимметричной точке чувствительного волоконного контура, обеспечивает синусоидальную модуляцию фазовой разности между встречно

бегущими лучами. Тогда выходной ток фотодетектора $i(t)$ содержит спектральные компоненты на частоте фазовой модуляции ν_m и ее гармоники, т. е.

$$i(t) = B[1 + \cos(\Delta\varphi_m \sin \omega_m t + \Delta\varphi_c)] = B[1 + \{J_0(\Delta\varphi_m) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\Delta\varphi_m) \cos 2n\omega_m t\} \cos \Delta\varphi_c + \{2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(\Delta\varphi_m) \sin (2n-1)\omega_m t\} \sin \Delta\varphi_c], \quad (29)$$

где B — постоянная; $\Delta\varphi_m$ — амплитуда фазоразностной модуляции между встречно бегущими волнами; $\omega_m = 2\pi\nu_m$; $\Delta\varphi_c$ — фаза Саньяка; J_n — функция Бесселя n -го порядка.

Из этого выражения видно, что, измеряя амплитуду частотной компоненты на нечетной гармонике частоты ν_m , пропорциональную $\sin \Delta\varphi_c$, высокой чувствительности можно достичь лишь вблизи нулевой угловой скорости. Однако в этом случае масштабный коэффициент остается нелинейным (синусоидальным). Если измерять дополнительный сигнал на четной гармонике и комбинировать его с сигналом нечетной гармоники для получения сигнала, пропорционального $\tan \Delta\varphi_c$, то можно вычислить $\Delta\varphi_c$. Однако необходимость применения аналого-цифрового преобразователя (АЦП) ограничивает динамический диапазон и разрешение [93].

Если просуммировать два гармонических сигнала одной частоты с амплитудами $\sin \Delta\varphi_c$ и $\cos \Delta\varphi_c$ и с фазами, находящимися в квадратуре (т. е. сдвинутыми на $\pi/2$), то можно непосредственно получить синусоидальный сигнал, фаза которого равна $\Delta\varphi_c$. Это видно из векторной диаграммы, изображенной на рис. 153, а.

Выходной сигнал фотодетектора разомкнутого ВОГ, как видно из выражения (29), имеет в своем составе компоненты подобного вида, однако у них различные частоты (четные и нечетные гармоники частоты ν_m). Осуществляя амплитудную периодическую модуляцию тока фотодетектора $i(t)$ на разностной частоте

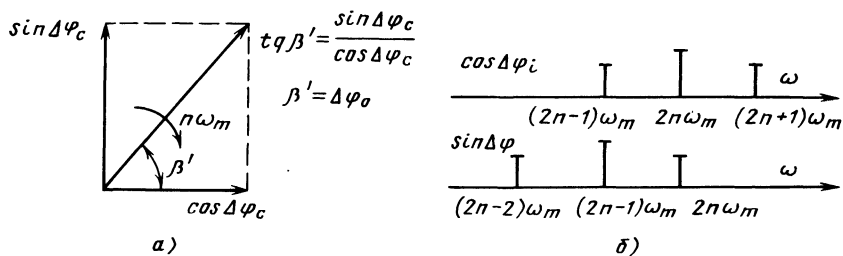


Рис. 153. Фазовые и частотные соотношения в ВОГ с гармонической модуляцией: а—векторная диаграмма; б—спектр амплитудной модуляции

ν_m , можно получить квадратурные компоненты на одной частоте ($\nu\nu_m$) с амплитудами $\sin\Delta\varphi_c$ и $\cos\Delta\varphi_c$.

Амплитудная модуляция частично преобразует каждую частотную компоненту в свои боковые частоты (рис. 153, б). Тогда каждая гармоническая компонента содержит члены с множителями $\sin\Delta\varphi_c$ и $\cos\Delta\varphi_c$. Относительные фазы этих двух членов будут определяться фазой амплитудно-модулирующего сигнала, фаза АМ-сигнала регулируется так, чтобы фазы членов с множителями $\sin\Delta\varphi_c$ и $\cos\Delta\varphi_c$ были в квадратуре. Следовательно, фаза гармонического члена содержит фазу Саньяка — $\cos(\nu\omega_{mt} + \Delta\varphi_c)$.

Отметим важную особенность рассмотренных преобразований. Фазовый сдвиг на оптической частоте, пропорциональный угловой скорости ВОГ, преобразован в фазовый сдвиг электрического сигнала низкой частоты, что позволяет измерить его стандартными средствами цифровой техники с любой требуемой точностью. Следует также указать, что частотное преобразование сигнала оптической частоты с сохранением фазы в удобный для измерений электрический сигнал низкой частоты (фаза которого пропорциональна информативному параметру) можно осуществить одинарным или двойным гетеродинированием. Экспериментальная установка ВОГ, разработанная для проверки рассмотренных выше идей, показана на рис. 154.

Волоконный фазовый модулятор, расположенный асимметрично в контуре ВОГ, осуществляет синусоидальную фазоразностную модуляцию $\Delta\varphi(t) = \Delta\varphi_m \sin \omega_{mt}$ на частоте ν_m . Постоянная составляющая тока фотодетектора, не несущая информации о фазе Саньяка, удаляется усилителем переменного сигнала.

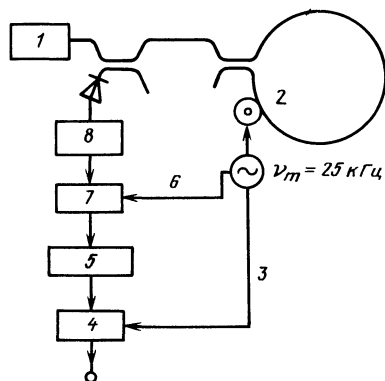


Рис. 154. Одноканальный ВОГ с фазовым отсчетом:

1—лазерный диод; 2—фазовый модулятор; 3—опорный сигнал; 4—фазометр; 5—полосовой фильтр; 6—сигнал синхронизации; 7—стробирующее устройство; 8—усилитель переменного сигнала

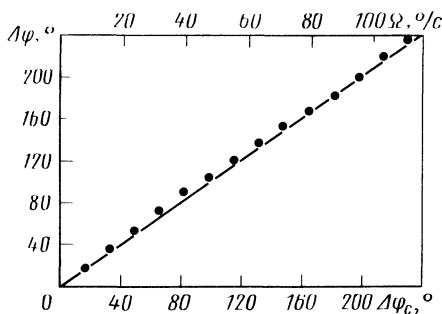


Рис. 155. Экспериментальная характеристика одноканального ВОГ

Амплитудная модуляция переменной составляющей тока детектора осуществляется временным стробированием на частоте ν_m (прямоугольная АМ). Фаза стробирования жестко связана с фазой $\Delta\varphi(t)$. Первая гармоническая компонента (ν_m) стробированного сигнала фильтруется полосовым фильтром и подается на фазометр, который измеряет фазовую разность между выходным сигналом полосового фильтра и сигналом, возбуждающим фазовый модулятор.

Как было показано выше, n -я гармоническая составляющая стробированного выходного сигнала $i_g(n\nu_m)$ содержит члены с множителями $\sin\Delta\varphi_c$ и $\cos\Delta\varphi_c$, фазы которых находятся в квадрате:

$$i_g(n\nu_m) = K_1 \cos\Delta\varphi_c \cdot \cos n\omega_m t + K_2 \sin\Delta\varphi_c \cdot \sin n\omega_m t,$$

где K_1 и K_2 — действительные постоянные, зависящие от формы АМ, $\Delta\varphi_m$ и номера гармоники n . Для случая $n=1$ и прямоугольной АМ коэффициенты K_1 и K_2 рассчитывают по формулам

$$K_1 = \left(\frac{4}{\pi}\right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{4n^2 - 1} J_{2n}(\Delta\varphi_m), \quad K_2 = J_1(\Delta\varphi_m).$$

Если подобрать амплитуду фазовой девиации $\Delta\varphi_m$ так, чтобы $K_1 = K_2 = K$, то для $n=1$ $i_g(\nu_m) = K \cos(\omega_m t - \Delta\varphi_c)$.

Измерение фазовой разности между сигналом $i_g(\nu_m)$ и сигналом, возбуждающим фазовый модулятор, дает фазу Саньяка $\Delta\varphi_c$ плюс постоянную фазовую задержку, присущую фазовому модулятору и электронным элементам.

В экспериментальной установке (см. рис. 154) использовались лазерный диод ($\lambda = 0,83$ мкм) и кремниевый фотодетектор. Фазовый модулятор из пьезоэлектрического цилиндра с несколькими намотанными витками волокна возбуждался синусоидальным электрическим сигналом частотой 25 кГц. Электрическое стробирование осуществлялось также на частоте 25 кГц, полосовой фильтр выделял эту частотную компоненту из стробированного выходного сигнала. Фаза этой частотной компоненты и фаза сигнала, возбуждающего фазовый модулятор, сравнивались в синхронном усилителе (детекторе), использованном в качестве фазометра. Фазовые измерения легко осуществить цифровым счетчиком временных интервалов, который измеряет временную разность между нулевыми пересечениями двух сигналов.

Условие $K_1 = K_2$ достигалось экспериментально небольшой подстройкой значения девиации $\Delta\varphi_m$ и фазы стробирования, так что амплитуда сигнала на выходе полосового фильтра была независима от угловой скорости Ω . Теоретически наименьшее значение $\Delta\varphi_m$, которое удовлетворяет приведенному выше условию, равно 3,4 рад. На рис. 155 показан измеренный фазовый

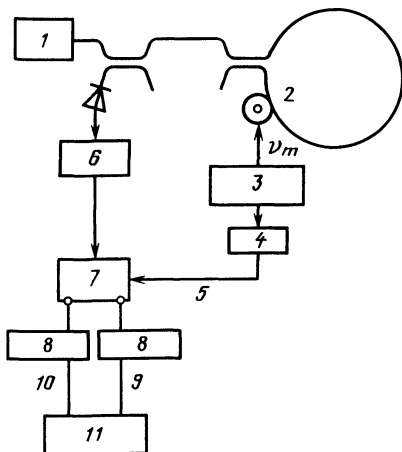


Рис. 156. Двухканальный ВОГ с фазовым отсчетом:
1—лазерный диод; 2—фазовый модулятор; 3—сигнал-генератор; 4—линия задержки; 5—сигнал синхронизации; 6—усилитель переменного сигнала; 7—переключатель; 8—полосовой фильтр; 9—канал 2; 10—канал 1; 11—фазометр

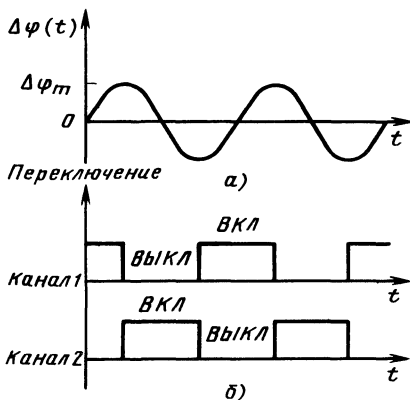


Рис. 157. Модулирующие сигналы:
а—синусоидальная фазоразностная модуляция; б—последовательности переключения для каналов 1 и 2

сдвиг сигнала $\Delta\varphi$ на выходе фильтра, индуцированный вращением ВОГ. Небольшое отклонение от строгой линейности объясняется выбросами электрических сигналов вследствие переходных процессов при стробировании.

Рассмотренная одноканальная схема обработки и выделения информативного параметра имеет некоторые недостатки. Одним из них является нестабильность постоянной фазовой задержки между сигналом возбуждения фазового модулятора и сигналом на выходе полосового фильтра. Кроме того, процесс стробирования приводит к потере информации об угловой скорости и половины оптической мощности. Эти проблемы могут быть исключены при измерении выходного сигнала детектора в течение обеих половин цикла стробирования. В схеме ВОГ, показанной на рис. 156, стробирующее устройство заменено электронным переключателем, попеременно подключающим выход усилителя к каналам 1 и 2 с частотой фазовой модуляции ν_m . Сигналы в каналах 1 и 2, подвергаясь прямоугольной амплитудной модуляции, сдвинуты по фазе относительно друг друга на 180° . Фаза переключения устанавливается по отношению к фазе сигнала $\Delta\varphi(t)$, при этом переходы переключения совмещены с пиками сигнала $\Delta\varphi(t)$ (рис. 157). С помощью полосовых фильтров выделяются сигналы одной гармонической компоненты $n\omega_m$ в каждом из каналов 1 и 2. Другие элементы этого двухканаль-

ного ВОГ такие же, как у одноканального ВОГ, показанного на рис. 154.

В общем случае выходные сигналы полосовых фильтров в каналах 1 и 2 выражаются следующим образом:

$$i_1 = K_1 \cos \Delta \varphi_c \cdot \cos n \omega_m t + K_2 \sin \Delta \varphi_c \cdot \sin n \omega_m t;$$

$$i_2 = K_3 \cos \Delta \varphi_c \cdot \cos n \omega_m t + K_4 \sin \Delta \varphi_c \cdot \sin n \omega_m t,$$

где K_i ($i=1, \dots, 4$) — постоянные, зависящие от $\Delta \varphi_m$, номера гармоники n и формы амплитудной модуляции.

Ввиду того, что наблюдались большие сигнальные выбросы вследствие переходного процесса переключения на частоте ν_m (а не на частоте $2\nu_m$, как ожидалось), практический интерес представляет случай, когда номер гармоники $n=2$. В этом случае рассчитанные коэффициенты

$$K_1 = K_3 = J_2(\Delta \varphi_m),$$

$$K_2 = -K_4 = (8/\pi) \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n-1}(\Delta \varphi_m) / (2n-3)(2n+1).$$

Как и в одноканальном ВОГ, если подобрать девиацию фазы $\Delta \varphi_m$ такой, чтобы $K_1 = K_2 = K$, получим

$$i_1 = K \cos(2\omega_m t - \Delta \varphi_c);$$

$$i_2 = K \cos(2\omega_m t + \Delta \varphi_c).$$

При измерениях фазовой разности между сигналами i_1 и i_2 получим удвоенное значение фазы Саньяка $2\Delta \varphi_c$. В отличие от одноканального варианта обработки, двухканальный вариант не имеет потерь оптической мощности, в нем исключаются фазовые нестабильности, обусловленные фотодетекторами, усилителями, электронным переключателем.

Экспериментальные измерения проводились с двухканальным ВОГ. На фазовый модулятор подавался синусоидальный электрический сигнал частоты 13 кГц; с этой же частотой переключались каналы 1 и 2. Сигналы частоты 26 кГц с двух каналов фильтровались полосовыми фильтрами и подавались на цифровой счетчик временных интервалов для измерения фазовой разности. Условие $K_1 = K_2$ выполнялось подстройкой девиации фазы $\Delta \varphi_m$ и фазы переключения. Теоретическое наименьшее значение $\Delta \varphi_m$, которое удовлетворяет указанному условию, составляет около 2,8 рад. Измеренный электрический фазовый сдвиг, обусловленный вращением ВОГ, как и ожидалось, имеет хорошую линейность в широком динамическом диапазоне.

Для оценки точности ВОГ выходной отсчет счетчика временных интервалов подавался на ЭВМ и графопостроитель. Временная выборка выходного сигнала ВОГ с временем интегриро-

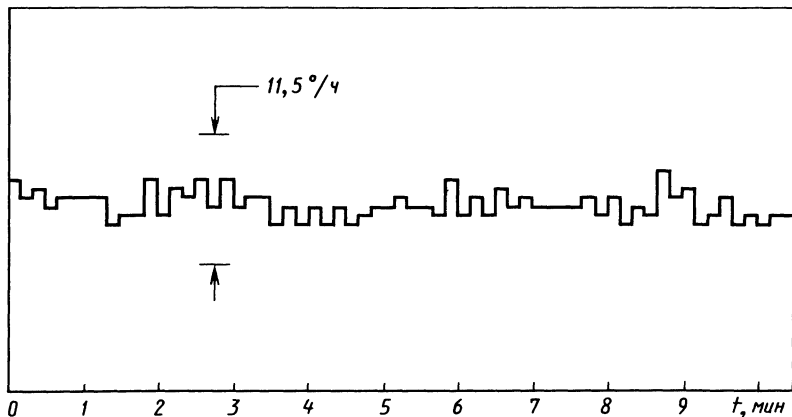


Рис. 158. Уровень шума на выходе двухканального ВОГ (время интегрирования 10 с, вращение отсутствует)

вания 10 с показана на рис. 158. Минимально значащий отсчет счетчика составляет 100 пс при времени интегрирования 10 с. Это соответствует разрешению угловой скорости, равному $\sim 0,8^\circ/\text{ч}$ при работе с фильтрами 26 кГц. Среднее квадратическое значение шумов (согласно рис. 158) $\Omega_{\text{ср кв}}$ составляет около $1,2^\circ/\text{ч}$.

Для сравнения полученных результатов с погрешностью ВОГ, работающего в обычном разомкнутом непрерывном режиме, в приборе использовалась синхронная демодуляция первой гармоники выходного сигнала детектора; при этом использовался один канал при отсутствии амплитудной модуляции. Частота фазовой модуляции была равна 20 кГц. Средний квадратический уровень шумов в этом случае составил около $0,1^\circ/\text{ч}$ при времени интегрирования 8 с.

Из этих цифр видно, что уровень шумов приблизительно на порядок больше в режиме измерения фазы по сравнению с обычным режимом.

Считается, что эти дополнительные шумы обусловлены полосовыми фильтрами и счетчиком временных интервалов; ожидается улучшение точности прибора при оптимизации электронных элементов схемы ВОГ. Еще большего уменьшения шумов можно ожидать при работе фазового модулятора на частоте $\nu_p = 1/(2\tau)$, где τ — групповое время распространения излучения в чувствительном контуре (для данной конструкции ВОГ $\nu_p = 172$ кГц).

Таким образом, рассмотренный экспериментальный ВОГ, хотя и имеет на порядок худшую точность, обладает масштабным коэффициентом высокой линейности в практически неограниченном динамическом диапазоне; считываемый сигнал, пропор-

циональный угловой скорости, легко преобразуется в цифровую форму.

6. ВОЛОКОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ АКСЕЛЛЕРОМЕТРЫ (ВОА)

Принцип действия волоконного оптического датчика ускорений (акселлерометра) основан на взаимодействии ускоряемой массы с оптическим волокном, при этом физические параметры волокна изменяются, что приводит к изменению параметров световой волны, распространяющейся в волокне. Регистрирующее устройство измеряет эти изменения.

Волоконный оптический акселлерометр (ВОА), как всякий волоконно-оптический сенсор, содержит источник светового излучения, волоконный световод, устройство оптической модуляции, фотодетекторы, другие оптические элементы, такие как объединители, расщепители, соединители, и электронное устройство обработки сигналов.

Источник излучения может быть широкополосным (некогерентный гауссов излучатель), узкополосным (суперлюминесцентный диод, многомодовый лазер) или монохроматическим (одночастотный лазер). Световоды и оптические элементы могут быть одномодовыми или многомодовыми. Модуляция оптических параметров световой волны может осуществляться как по амплитуде, фазе, частоте, так и по поляризации. Выбор оптических элементов, методов модуляции, способов обработки сигнала зависит от типа ВОА.

В настоящее время при разработке ВОА используют амплитудно-модулированные или фазово-модулированные сенсоры.

ВОА с амплитудной модуляцией. Разновидностью амплитудной модуляции, реализуемой в волоконных световодах, является так называемая микроизгибная модуляция. С помощью микроизгибной модуляции оптическое волокно испытывает механическую деформацию перпендикулярно оси. Деформация волокна приводит к тому, что световые моды высших порядков сердцевины начинают пересекать поверхность «сердцевина — оболочка»; утечка излучения пропорциональна деформации. Следовательно, интенсивность светового излучения в сердцевине и оболочке становится пропорциональной деформации волокна.

Волоконные оптические сенсорные устройства с микроизгибной модуляцией являются приборами с амплитудной модуляцией, в них можно использовать многомодовые световоды и другие оптические элементы. Такие приборы обладают высокой чувствительностью.

Для эжекции световой волны из сердцевин в оболочку волокна применяют механическое деформирующее устройство, состоящее из пары зубчатых (или шариковых) пластин, между которыми помещают волокно. Зубцы вносят микроизгибы перпенди-

кулярно оси волокна. Расстояние между соседними зубцами определяет пространственную частоту деформирующего устройства.

Согласно лучевой геометрии, лучи вначале распространяются в неизогнутой секции сердцевины под углами, которые меньше или близки к критическому по отношению к поверхности «сердцевина — оболочка». Под влиянием изгибов волокна углы распространения лучей будут увеличиваться и превышать критическое значение, поэтому часть лучей будет переходить в оболочку (см. рис. 16). Усиление деформации увеличивает пучок лучей, углы распространения которых превышают критический угол, что в свою очередь увеличивает количество световой энергии, перетекающей из сердцевины в оболочку.

Если деформация вызывается воздействием, которое необходимо измерить (ускорение, давление, вибрация, звук и др.), то флуктуации интенсивности света либо в сердцевине, либо в оболочке будут прямо пропорциональны соответствующему воздействию (при малых деформациях). Таким образом, выделяя световое излучение сердцевины или оболочки, можно измерить соответствующее физическое воздействие.

Элементы волоконного оптического сенсорного устройства с микроизгибной модуляцией показаны на рис. 159. Излучение оптического источника поступает в многомодовый световод. Полосковый ограничитель мод оболочки удаляет излучение, распространяющееся в оболочке. Идеально эту функцию может выполнять обжимное покрытие оптического волокна. Затем волокно пропускается через деформирующее устройство, где часть излучения, пропорциональная деформации, эжектируется из серд-

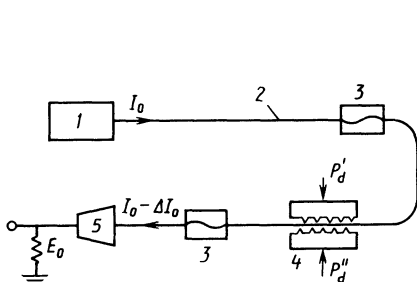


Рис. 159. Конфигурация волоконно-оптического сенсорного устройства с микроизгибной модуляцией:

1—оптический источник; 2—многомодовое волокно; 3—полосковый ограничитель мод оболочки; 4—деформирующее устройство; 5—фотодетектор

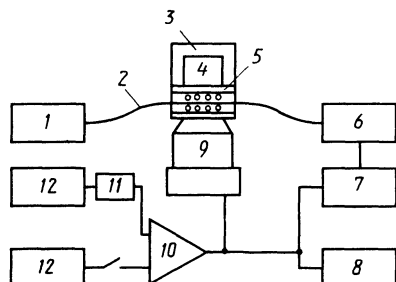


Рис. 160. Волоконный оптический акселерометр с микроизгибной модуляцией и испытательное оборудование:

1—оптический источник; 2—оптическое волокно; 3—акселерометр; 4—масса; 5—деформер; 6—фотодетектор; 7—осциллограф; 8—спектроанализатор; 9—пьезоэлектрический преобразователь (набор пластин); 10—усилитель мощности; 11—ослабитель; 12—сигнал-генератор

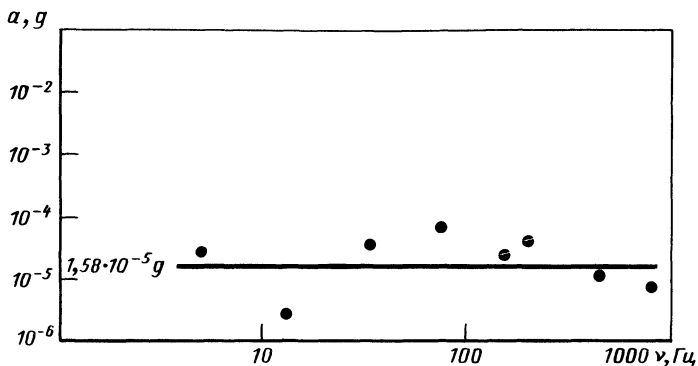


Рис. 161. Минимально обнаруживаемое ускорение ВОА с микроизгибной модуляцией

цевины в оболочку. Сила, вызывающая деформацию оптического волокна, пропорциональна измеряемому физическому параметру. После деформирующего устройства появившееся излучение оболочки снова удаляется, а выходное излучение сердцевины волокна фотодетектируется.

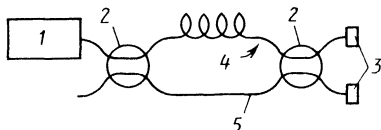
В волоконном оптическом акселерометре с микроизгибной модуляцией, показанном на рис. 160 [57], использовалось оптическое волокно со ступенчатым изменением показателя преломления, числовая апертура его 0,2, диаметр сердцевины 120 мкм, диаметр оболочки 240 мкм. Акселерометр смонтирован на калиброванном столике пьезоэлектрического преобразователя (набор пластин) с коэффициентом смещения, равным $6 \cdot 10^{-9}$ м/В.

Линейность прибора исследовалась при одновременной подаче напряжений двух независимых частот на пьезопреобразователь; при этом измерялись амплитуды на выходе фотодетектора на суммарной и разностной частотах. Минимально обнаруживаемое ускорение в полосе 1 Гц в частотном диапазоне 5...800 Гц составило $1,5 \cdot 10^{-5}g$ (рис. 161); динамический диапазон при нелинейности 1% равен 100 дБ. Таким образом, работа в линейном режиме осуществляется в интервале ускорений $1,5 \cdot 10^{-5} \dots 1,5g$ ($g = 9,8$ м/с²). Интервал ускорений может быть легко сдвинут выбором параметров прибора, например, в диапазон 0,01...100g. Разброс измеряемых данных определяется действием шумов.

ВОА с фазовой модуляцией. Наиболее чувствительными волоконными оптическими датчиками являются датчики, основанные на оптической фазовой модуляции. При конструировании таких датчиков необходимы одномодовые оптические компоненты и одномодовое волокно. При распространении оптического излучения в световоде длиной L набег фазы составляет $2\pi nL/\lambda$, где n — показатель преломления материала волокна; λ — длина волны. Вариации n или L приводят к линейным изменениям фазы, т. е. к фазовой модуляции.

Рис. 162. Интерферометр Маха—Зендера:

1—лазер; 2—3 дБ-ный расщепитель-соединитель; 3—фотодетекторы; 4—чувствительное плечо; 5—опорное плечо



Поскольку фотодетекторы не реагируют на изменения фазы оптического сигнала, необходимо устройство для преобразования фазовой модуляции в амплитудную. Таким устройством может служить интерферометр Маха — Зендера (рис. 162).

Выходное излучение одномодового когерентного оптического источника подается в световод, затем с помощью 3 дБ-ного расщепителя излучение поступает в два плеча интерферометра. Излучение в одном плече интерферометра является опорным по отношению к излучению другого (чувствительного) плеча. Во втором 3 дБ-ном расщепителе лучи двух плечей интерферометра рекомбинируют и поступают на два фотодетектора. Интерференция между опорным и чувствительным лучами преобразует фазовую модуляцию в амплитудную. Фотодетекторы выделяют амплитудно-модулированный свет (оба сигнала находятся в квадратуре).

Интерферометрические сенсорные устройства наиболее эффективны при изменении вариаций фазы; следовательно, измерения целесообразно проводить на переменном сигнале. Источники низкочастотных шумов (связанных с шумами $1/\nu$ и температурными флуктуациями) могут значительно ухудшить чувствительность интерферометрических волоконных сенсоров.

Один из образцов интерферометрического ВОА с фазовой модуляцией показан на рис. 163 [57]. Плоские волоконные катушки укреплены на каждом конце цилиндра, наполненного ртутью. В каждое плечо интерферометра Маха — Зендера входит по одной

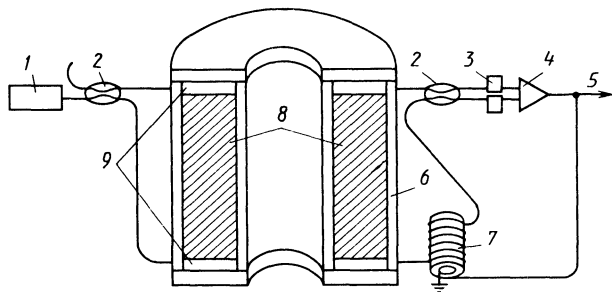


Рис. 163. Интерферометрический волоконный оптический акселерометр:

1—лазер; 2—3 дБ соединитель-расщепитель; 3—фотодетекторы; 4—демодулированный сигнал и напряжение обратной связи; 5—выходной сигнал; 6—цилиндр акселерометра, 7—пьезоэлектрический корректор; 8—ртуть, 9—волоконные оптические катушки (преобразователи давления)

катушке. Плечи интерферометра объединяются соответствующими 3 дБ-ными расщепителями-соединителями.

Если ускорение цилиндра направлено вверх, то нижняя катушка испытывает увеличенное давление, в то же время верхняя катушка испытывает уменьшенное давление. Обозначив расстояние между катушками h , а плотность ртути ρ , легко показать, что разность давлений на две катушки, обусловленная действием ускорения a , составит ρah .

Дифференциальные приращения давления вызывают малые дифференциальные изменения отношения длин плеч интерферометра (а следовательно, относительной фазы). В сконструированном приборе [57] каждая катушка содержит 60 м одномодового волокна, $h=6$ см, $\rho=13,5$ г/см³. На частоте вибрации 35 Гц фазовый сдвиг составлял 10^{-4} рад (этот сдвиг ограничен влиянием окружающих условий); результирующее минимально обнаруживаемое ускорение равно $6 \cdot 10^{-8}g$.

Для значительного увеличения чувствительности прибора необходимо увеличивать длину катушек и расстояние между ними, а также добиться уменьшения минимально обнаруживаемых фазовых изменений.

Прибор имеет высокие механические резонансные частоты (4 кГц) и малочувствителен к поперечным ускорениям. Если прибор (см. рис. 163) подвергнуть действию горизонтального ускорения, направленного вправо, то левая половина каждой катушки испытает увеличение давления, а правая половина — уменьшение давления. Эти два эффекта имеют тенденцию к взаимной компенсации. Кроме того, поскольку катушки находятся в разных плечах интерферометра, остаточные изменения фазы, которые проявляются одинаковым образом в обеих катушках, будут компенсироваться при рекомбинации лучей, прошедших эти катушки.

Другая конструкция волоконного оптического акселерометра с фазовой модуляцией рассмотрена в работе [65]. При синусоидальном изменении ускорения в этом приборе достигнута чувствительность более 1 рад/г.

Акселерометр выполнен в виде простого гармонического (механического) осциллятора, содержащего массу, взвешенную между двумя волокнами (рис. 164, а), или массу, подвешенную к одному волокну (рис. 164, б). При ускорениях прибора в указанных на рисунке направлениях в световоды вносится деформация $\delta L/L$, пропорцио-

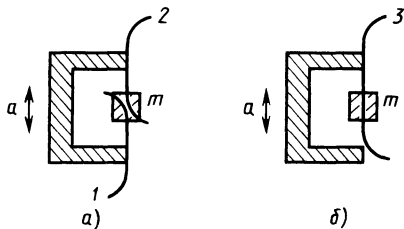


Рис. 164. Две конфигурации ВОА с фазовой модуляцией:
1, 2, 3—оптическое волокно

нальная ускорению a . Для массы m в конфигурации, показанной на рис. 164, б,

$$\delta L/L = ma/(YS_c),$$

где L — длина; Y — модуль Юнга волокна; S_c — площадь поперечного сечения волокна.

Если пренебречь изменением коэффициента преломления n при растягивающем напряжении, то изменение длины волокна индуцирует фазовый сдвиг световой волны, распространяющейся в волокне, равный

$$\delta\varphi = 2\pi n\delta L/\lambda.$$

Отсюда чувствительность прибора, выраженная в оптическом фазовом сдвиге на единицу ускорения,

$$\delta\varphi/a = 8Lmn/(\lambda YD^2),$$

где D — диаметр волокна.

Для использованного в приборе волокна $n=1,5$, $Y=7,3 \cdot 10^{10}$ Н/м², $D=80$ мкм и $\lambda=633$ нм:

$$\delta\varphi/a = 4 \cdot 10^5 Lm. \quad (30)$$

При этом $\delta\varphi/a$ измеряется в рад/ g .

Измерение столь малых приращений оптического пути, индуцированных в волокне, можно осуществить при использовании интерферометра Маха — Зендера, изготовленного полностью из волокна. С помощью такого интерферометра можно измерить фазовые сдвиги порядка 10^{-6} рад.

В конфигурации ВОА, показанной на рис. 164, а, волокно вплавлено в каждое плечо интерферометра; в то же время в конфигурации, показанной на рис. 164, б, одиночное волокно вплавлено в одно плечо интерферометра.

С помощью электронной системы режим работы интерферометра сохраняется на максимуме чувствительности (квадратурный режим), что позволяет компенсировать фазовые сдвиги, вызываемые температурными изменениями в волокне. Сигналы с выхода фотодиодов поступают для обработки на синхронный усилитель.

Для создания механических ускорений при испытаниях этих устройств использовался пьезоэлектрический цилиндр, возбуждаемый синусоидальным напряжением. Действительная амплитуда ускорения определяется пьезоэлектрической константой.

На рис. 165 приведены кривые теоретической (получаемой из уравнения (30)) и измеренной чувствительности устройства, показанного на рис. 164, б; при этом масса равна 0,4 г, а длина волокна 1,6 см. Из рисунка видно хорошее совпадение кривых до частот ниже 200 Гц; ускорения около $0,5 \cdot 10^{-3}g$ легко измеряются до частоты 30 Гц. Выше 200 Гц и в верхней части «хвоста»

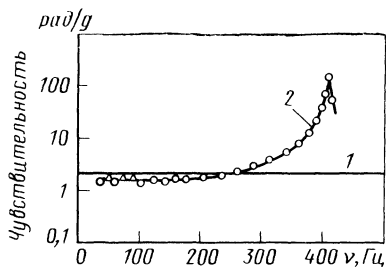


Рис. 165. Зависимость чувствительности ВOA от частоты:

1—значение теоретической чувствительности при низкой частоте; 2—экспериментальная кривая

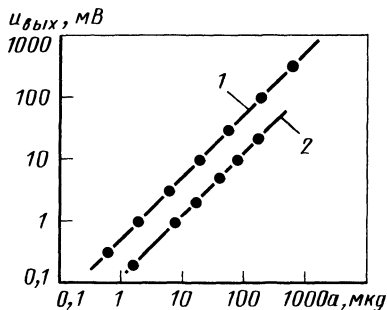


Рис. 166. Зависимость выходного сигнала интерферометра от приложенного ускорения:

1—на частоте 600 Гц для конфигурации ВOA, показанной на рис. 164, а; 2—на частоте 300 Гц для конфигурации, показанной на рис. 164, б

механического резонанса чувствительность так высока, что возможно измерить ускорения порядка $10^{-5}g$. Характеристика акселерометра является линейной функцией действующего ускорения для всех измеряемых частот, включая частоты ниже и выше резонансного пика. Эти характеристики для двух конфигураций прибора показаны на рис. 166.

Верхний частотный предел работы такого прибора, как акселерометр, определяется частотой его наинизшего механического резонанса. В общем случае полезный частотный диапазон такого прибора ограничивается продольными вибрациями. Продольная фундаментальная частота для конфигурации, показанной на рис. 164, б,

$$\nu_L = \frac{1}{4} \sqrt{YD^2/(\pi Lm)}, \quad (31)$$

или в терминах чувствительности акселерометра

$$\nu_L = \sqrt{\left(\frac{n}{2\pi\lambda}\right)} / \sqrt{\left(\frac{\delta\varphi}{a}\right)}. \quad (32)$$

Частота ν_L для конфигурации ВOA, показанной на рис. 164, а, в $\sqrt{2}$ раз больше, чем для конфигурации ВOA, приведенной на рис. 164, б.

Из уравнения (32) видно, что увеличение чувствительности снижает резонансную частоту и поэтому ограничивает полезный частотный диапазон. Для случая, рассматриваемого здесь (см. рис. 164, б), значение ν_L , получаемого из уравнения (31), составляет ~ 1200 Гц.

Для рассматриваемых конфигураций ожидается существование поперечных мод вибрации, фундаментальная частота которых

$$\nu_T = \frac{1}{26} \sqrt{(T/\mu)}, \quad (33)$$

где T — натяжение волокна; μ — масса на единицу длины волокна.

Натяжение волокна может быть осуществлено при изготовлении акселерометра, показанного на рис. 164, а. Это обеспечит уход частоты поперечного резонанса к значению выше, чем частота продольной моды. Поскольку интерферометр реагирует на натяжение волокна, выходной сигнал появляется на удвоенной частоте по сравнению с частотой, вычисляемой по уравнению (33).

Значение ν_T , рассчитанное по уравнению (33) для данной конфигурации прибора, составляет ~ 550 Гц. Появление резонанса на частоте 400 Гц, по-видимому, может быть объяснено существованием не только одномодовой вибрации, но, возможно, наличием тесной связи двух мод вибрации.

Таким образом, новый волоконный акселерометр при хорошей линейности обладает чувствительностью, позволяющей измерять ускорения менее $10^{-3}g$. При конструировании практического прибора возможно потребуются ограничить поперечное движение инерционной массы или ввести дополнительное демпфирование.

В заключение следует отметить, что ВОА с амплитудной модуляцией менее дороги, просты в изготовлении и подходят для измерений как на постоянном, так и на переменном сигналах. Однако они менее чувствительны по сравнению с интерферометрическими ВОА с фазовой модуляцией. Последние способны достичь очень высокой чувствительности, но ценой удорожания конструкции и усложнения техники конструирования. Кроме того, ВОА с фазовой модуляцией конструируют для измерений на переменном сигнале.

7. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВОГ И ВОА

Последующее развитие и совершенствование ВОГ и ВОА, по-видимому, будет в основном зависеть от разработки и промышленного освоения элементной базы этих приборов. В частности, для ВОГ перспективным считается изготовление контура из одномодового волокна с устойчивой поляризацией и малыми потерями ($\lambda = 0,85$ мкм и $\lambda = 1,3$ мкм). Промышленное освоение такого волокна является важной задачей. Кроме того, конструкторы ВОГ столкнутся с проблемой выбора излучателей и фотодетекторов для длинноволнового диапазона. При этом полоса частот излучателя будет играть доминирующую роль, поскольку низкокогерентное излучение позволяет существенно ослабить влияние обратного рэлеевского рассеяния и нелинейного эффекта Керра. В настоящее время используются как СЛД, так и полупроводниковые ЛД, хотя большинство разработчиков предпочитают применять низкокогерентные СЛД.

Фирма, страна	Чувствительность, °/ч	Источник излучения	Длина контура, м	Диаметр катушки, см	Схема детектирования	Особенности конструкции
<i>Mc Donnell Douglas Astronautics Company</i> (США)	50 ... 100 5 ... 10	Лазерный диод $\lambda = 0,83$ мкм	100 1100	6,35 14,2	С обращением фазы в нуль	
<i>AEG — Telefunken</i> (ФРГ)	1	Суперлюминесцентный диод, $\lambda = 0,82$ мкм	800	20	С фазовой модуляцией	На дискретных элементах
<i>Standard Elektrik Lorenz AG</i> (ФРГ)	3	Лазерный диод, $\lambda = 0,83$ мкм	937	12	С обращением фазы в нуль	
<i>Naval Research Laboratory</i> (США)	0,015	Суперлюминесцентный диод, $\lambda = 0,84$ мкм	430	32		На волокне с устойчивой поляризацией
<i>Stanford University</i> (США)	0,2	Лазерный диод, $\lambda = 0,83$ мкм	580	14	С фазовой модуляцией	Цельноволокненное исполнение
<i>Massachusetts Institute of Technology</i> (США)	0,05	Трехмодовый He—Ne-лазер со сканированием частоты, $\lambda = 0,63$ мкм	200	19	С обращением фазы в нуль	
<i>Martin Marietta</i> (США) <i>Honeywell</i> (США)	0,7 1,6	He—Ne-лазер, $\lambda = 0,63$ мкм	1200 150	30 —	С использованием двух поляризаций	На дискретных элементах
<i>Siemens</i> (ФРГ)	2—3	Лазерный диод, $\lambda = 0,85$ мкм	1000	12	С фазовой модуляцией	

В зависимости от конструктивных особенностей ВОГ потребуются промышленное изготовление ряда дополнительных элементов: пространственных и поляризационных фильтров, вращателей поляризации и поляризационных «выравнивателей», светоделителей и соединителей, оптических переключателей, фазосдвигающих пластин, частотных и фазовых модуляторов и других элементов.

Следует особо остановиться на интегрально-оптических схемах (ИОС). ИОС, как известно, имеют малые размеры и массу, низкую стоимость при высокой объемной плотности. Элементы ИОС взаимозаменяемы, а конструкция их монолитна, что исключает перемещения и расстройки при вибрации и ударах. При массовом производстве ВОГ будут широко использоваться ИОС, позволяющие уменьшить массу и размеры датчиков и снизить их стоимость [106].

Наряду с совершенствованием элементной базы, развитие ВОГ будет зависеть от полноты изучения источников шумов и нестабильностей в приборе и способов компенсации этих возмущений, а также от разнообразия исследуемых схемных вариантов оптической части ВОГ и системы обработки сигнала, позволяющих создать оптимальную структуру ВОГ и добиться требуемой точности.

Работы исследователей и конструкторов ВОГ в этих направлениях будут способствовать созданию прибора малых размеров и массы, невысокой стоимости, способного работать в реальных эксплуатационных условиях и обеспечивать необходимую точность.

По опубликованным данным [106], создание серийных конструкций ВОГ для систем управления и стабилизации малой и средней точности ($10...0,1^\circ/\text{ч}$) ожидается к началу 90-х годов; создание высокоточного ВОГ ($0,01...0,001^\circ/\text{ч}$) для систем навигации и управления ожидается в первой половине 90-х годов. Параметры экспериментальных конструкций ВОГ, разработанных некоторыми зарубежными фирмами, приведены в табл. 12 [25].

1. Балодис Ю. Н., Машковцев Б. М., Шестериков В. А. Интегрально-оптические датчики для техники радиостроения//Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника радиосвязи. № 6. 1985. С. 10—18.
2. Барноски М. Введение в интегральную оптику. М.: Мир, 1977. 368 с.
3. Бирман А. Я., Логозинский В. Н. Нелинейная фазовая невзаимность в кольцевом волоконном интерферометре//Квантовая электроника. Т. 9. № 2. 1982. С. 410—411.
4. Бычков С. И., Лукьянов Д. П., Бакаляр А. И. Лазерный гироскоп. М.: Сов. радио, 1975. 421 с.
5. Ваганов Р. Б., Клевицкий Б. Г. Эффект Саньяка в кольцевом волоконном интерферометре//Радиотехника и электроника. Т. XXIX, № 3, 1984. С. 586—590.
6. Голодолинский Г. В. Электрооптические методы и аппаратура для измерения токов и напряжений//Электричество. № 4. 1963. С. 68—75.
7. Дульнев Г. Н., Семяшкин Э. М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. Л.: Энергия, 1968. 358 с.
8. Красюк Б. А., Корнеев Г. И. Оптические системы связи и световодные датчики. Вопросы технологии. М.: Радио и связь, 1985. 192 с.
9. Кузьминов Ю. С. Ниобат и танталат лития. М.: Наука, 1975. 224 с.
10. Кузьминов Ю. С. Сегнетоэлектрические кристаллы для управления лазерным излучением. М.: Наука, 1982. 400 с.
11. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля. М.: Наука, 1973. 504 с.
12. Логозинский В. Н., Новиков А. Г. Оптимизация параметров кольцевого волоконного интерферометра//Квантовая электроника. Т. 9. № 4. 1982. С. 775—776.
13. Матвеев А. Н. Оптика. М.: Высшая школа, 1985. 351 с.
14. Машковцев Б. М., Балодис Ю. Н., Горбачева Н. П. Устройство для измерения напряженности электрического поля: А.с. 1101746, БИ № 25, 1984.
15. Машковцев Б. М. Устройства интегральной оптики. Л.: Из-во ЛЭИС, 1981. 64 с.
16. Мидвинтер Дж. Э. Волоконные световоды для передачи информации: Пер. с англ./Под ред. Е. М. Дианова. М.: Радио и связь, 1983. 336 с.
17. Применение оптико-электронных устройств в энергетике и электротехнике. Материалы семинара. Л.: Изд-во ЛДНТП, 1979. 70 с.
18. Раутиан С. Г. Интерферометр Фабри-Перо//Физический энциклопедический словарь. Т. 2. М.: Сов. Энциклопедия, 1962. С. 204—205.
19. Савельев А. М., Соловьева Т. И. Волоконно-оптические гироскопы (обзор)//Зарубежная радиоэлектроника. № 6. 1982. С. 55—66.
20. Улинич Р. Б. Практическое обеспечение надежности РЭА при проектировании. М.: Радио и связь, 1985. 111 с.
21. Унгер Х. Г. Оптическая связь. М.: Связь, 1979. 264 с.
22. Унгер Х. Г. Планарные и волоконные оптические волноводы: Пер. с англ./Под ред. В. В. Шевченко. М.: Мир, 1980. 656 с.
23. Федоров Б. Ф., Шереметев А. Г., Умников В. Н. Оптический квантовый гироскоп. М.: Машиностроение, 1973. 222 с.
24. Цугулиев А. И., Запалов А. П., Шестериков В. А. Оптоэлектронный измеритель напряженности электрического поля промышленной частоты.//Информационный листок № 1038—84, Ленинградский ЦНТИ, 1984. С. 3—5.

25. **Шереметьев А. Г.** Волоконный оптический гироскоп. М.: Радио и связь, 1987. 150 с.
26. **Яворский Б. М., Детлаф А. А.** Справочник по физике. М.: Наука, 1977. 942 с.
27. **Abbe F., Fagot H., Smigelski P.** Use of an Endoscope for Optical Fiber Holography//Progress in Holographic Applications. Proc. SPIE. Vol. 600, 1986. P. 199—203.
28. **A Competitive Assessment of the US Fiber Optics Industry/Office of Telecommunication US Department of Commerce//Fiber and Integr. Optics. Vol. 5. N. 4. 1986. P. 329—409.**
29. **Agarwal A. K.** Review of Optical Fiber Couplers//Fiber and Integrated Optics. Vol. 6. N. 1. 1987. P. 27—50.
30. **Akhavan Leilabady P., Jones J.D.C., Jackson D.** Combined Interferometric-Polarimetric Fibre Optic Sensor//Opt. Comm. Vol. 51. 1986. P. 77—80.
31. **Alves R. F., Wickersheim K. A.** «Fluoroptic» Thermometry: Temperature Sensing Using Optical Fibers//Optical Fibers in Broadband Networks, Instrumentation. Proc. SPIE. Vol. 403. 1984. P. 146—152.
32. **Application of Air-Acoustic Signals/Maurer G. S., Schuetz L., Cole J. H.** et al//Opt. Lett. Vol. 7. 1982. P. 503—505.
33. **Arnold S. M., Allen R.** Microbending Losses in Optical Waveguides//IEEE Proc. Vol. 130, 1983. P. 331—339.
34. **Attridge J. W., Leaver K. D., Cozens J. R.** Design of a Fiber-Optic pH Sensor with Rapid Response//Journ. Phys. E: Sci. Instrum. Vol. 20. 1987. P. 548—553.
35. **Auch W., Schlemper E.** Optical Gyroscope//Electrical Communication, Vol. 58, N. 3. 1984. P. 314—318.
36. **Bauer B., Schwarz H., Thanh N.** Digital Image Processing of Combined SEM and EDX Signals.//Journ. of Microscopy. Vol. 130. 1983. P. 325—330.
37. **Beheim G.** Loss-Compensation for Fiber-Optic Sensors and its Application to Displacement Measurements//Appl. Opt. Vol. 26, N. 3. 1987. P. 452—455.
38. **Bergh R. A., Lefevre H. C., Shaw H. J.** An Overview of Fiber-Optic Gyroscopes//Journ. of Lightwave Technology. Vol. 2. N. 2. 1984. P. 91—107.
39. **Bergh R. A., Lefevre H. C., Shaw H. J.** Compensation of the Optical Kerr Effect in Fiber-Optic Gyroscope//Optics Lett. Vol. 7. N. 6. 1982. P. 282—284.
40. **Bersiner L., Rund D.** Planar Microoptical Multiplexer and Demultiplexer for Multimode Optical Transmission Lines//Opt. and Quant. Electronics. Vol. 18. 1986. P. 437—443.
41. **Boehm K., Petermann K., Weidel E.** Sensitivity of Fiber-Optic Gyroscope to Environmental Magnetic Fields//Optics Lett. Vol. 7. N. 4. 1982. P. 180—182.
42. **Boie R. A.** Light Beam Stiffening of Flexible Robot Arms.//Intelligent Robot and Computer Vision, Proc. SPIE. Vol. 579. 1986. P. 162—164.
43. **BSO/Fiber-Optic Voltmeter with Excellent Temperature Stability/Kuhara Y., Hamasaki Y., Kowakami A.** et al.//Electronics Lett. Vol. 18. N. 24. 1982. P. 1055—1056.
44. **Bulmer C. H., Burne W. K., Moeller R. P.** Linear Interferometric Modulator for Electromagnetic Field Detection/Digest Techn. Papers Topical Meeting on Integrated and Guided-Wave Optics, N. Y., 1980. Paper TuC4.
45. **Bulmer C. H., Moeller R. P., Burrus W. K.** Linear Mach—Zender Interferometers in LiNbO₂ for Electromagnetic Field Sensing./IEE 2nd European Conf. Integr. Optics, Venue, October 1983. P. 140—143.
46. **Cimmino A., Davis T. J.** A Simple Optical Transducer for the Measurement of Small Vibration Amplitudes//Journ. Phys. E: Sci. Instrum. Vol. 18, 1985. P. 947—948.
47. **Cox E. R., Jones B. E.** Fiber Optic Colour Sensors Based on Fabry—Perot Interferometry/Ist Intern. Conf. on Optical Fibre Sensors, Venue, April, 1983. P. 102—126.
48. **Culchaw B., Davies D.E.N., Kingsley S. A.** Fiber Optic Strain Pressure and Temperature Sensors./Proc. 4th European Conf. on Optical Comm., Genoa, Italy, September, 1978. P. 115—126.

49. **Culshaw B., Giles J. P.** Fibre Optic Gyroscopes.//Journ. Phys. E: Sci. Instrum. Vol. 16, 1983. P. 5—14.
50. **Cusworth S. D., Senior J. M.** A Reflective Optical Sensing Technique Employing a GRIN Rod Lens.//Journ. Phys. E: Sci. Instrum. Vol. 20, 1987. P. 102—103.
51. **Cutler G. G., Newton S. A., Shaw H. J.** Limitation of Rotation Sensing by Scattering.//Optics Lett. Vol. 5. N. 11, 1980. P. 488—490.
52. **Dakin J. P., Holliday M. C.** A Passive All-Dielectric Field Probe for R. F. Measurement Using The Electro-Optic Effect.//Fiber Optics'84. London, May 1—3. Proc. SPIE. Vol. 468, 1984. P. 237—246.
53. **Daly J. C.** Fiber Optics. Florida, USA. CRC Press Inc. 1985. 260 p.
54. **Dandridge A., Tveten A. B., Giallorenzi T. G.** Interferometric Current Sensors using Optical Fibers.//Electronics Lett. Vol. 17. N. 15, 1981. P. 523—525.
55. **Davies D.E.N., Kingsley S. A.** Method of Phase Modulating Signals in Optical Fibers: Application to Optical Telemetry Systems.//Electron. Lett. Vol. 10. 1974. P. 21—22.
56. **Davis C. M.** Fiber Optic Sensors: An Overview.//Fiber Optic and Laser Sensors. Proc. SPIE. Vol. 412, 1983. P. 2—8.
57. **Davis C. M.** Fiber Optic Sensors: An Overview.//Fiber Optic and Laser Sensors II, Proc. SPIE. Vol. 478, 1984. P. 12—18.
58. **Diemer M.B.J., Trommel E. S.** Fiber Optic Microbend Sensors: Sensitivity as a Function of Distortion Wavelength.//Opt. Lett. Vol. 9. 1984. P. 260—262.
59. **Dils R. R.** High Temperature Optical Fiber Thermometer.//J. Appl. Phys. Vol. 54, 1983. P. 1198—1201.
60. **Edwall G.** Sensors.//Ericsson Review. Vol. 61, N. F. 1984. P. 45—48.
61. **Eichmann G., Alfano R. R.** Digital Optic Logic Using a Pulsed Sagnac Interferometer Switch.//Optical Eng. Vol. 25. 1986. P. 91—97.
62. **Electromagnetic Sensor Using Integrated Optic Channel Waveguide Modulator and Polarization Preserving Fibers.**/Yao S. K., Findakley T., Cardero—Jannarella R. et al.//Fiber Optic and Laser Sensors, Proc. SPIE. Vol. 412. 1983. P. 154—160.
63. **Elimination on Drift in a Single-Mode Optical Fibre Interferometer Using a Piezoelectrically Stretched Coiled Fiber**/Jackson D. A., Priest R., Dandridge A. et al.//Appl. Opt. Vol. 19. 1980. P. 2926—2929.
64. **Experimental Investigations on Fiber Optic Liquid Level Sensors and Refractometers**/Spanner K., Singh M. D., Schulte H. et al.//Proc. 1st Intern. Conf. on Optical Fibre Sensors. Venue, April 1983. P. 96—99.
65. **Fiber Optic Accelerometer**/Tveten A. B., Dandridge A., Davis C. M. et al.//Systems, Instruments and Related Principles. 1981. P. 255—257.
66. **Fiber-Optic Dark-Field Micro-Bend Sensor**/Kriegh M., Steijer O., Pers O. et al.//Fiber Optic Sensors. Proc. SPIE. Vol. 586. 1986. P. 216—222.
67. **Fiber-Optic Fabry-Perot Interferometer and its Sensor Applications.**/Yoshino T., Kurosawa K., Itoh K. et al.//IEEE Journ. Quant. Electronics. Vol. QE—18, 1983. P. 1624—1633.
68. **Fiber-Optic Gyroscope with Polarisation-Holding Fiber**/Burns W. K., Moeller R. P., Villaruel C. A. et al.//Optics Lett. Vol. 8. N. 10. P. 540—542.
69. **Fiber-Optic Gyro for Sensitive Measurement of Rotation.**//Radio and Electronic Engineer. Vol. 53. N. 3. 1983. P. 121—124.
70. **Fiber Optic Instrument for Temperature Measurement**/Kyuma K., Tai Sh., Sawada T. et al.//IEEE J. Quantum Electronics. Vol. QE—18, 1982. P. 676—680.
71. **Fiber Optic Measuring System for Electric Current by Using a Magneto-optic Sensor**/Kazuo K., Shuichi T., Masahiro T. et al.//IEEE Journ. Quant. Electron. Vol. 18. N. 10. 1982. P. 1619—1623.
72. **Fiber Optic Pressure Sensor**/Fields J. N., Asawa C. K., Ramer O. G. et al.//Journ. Amer. Acoust. Soc. Vol. 67. 1980. P. 816—818.
73. **Fields J. N.** Attenuation of Parabolic Index Fiber with Periodic Bends.//Appl. Phys. Lett. Vol. 36. 1980. P. 799—801.

74. **Goss W. C., Goldstein R.** Fiber Optic Rotation Sensor Technology.//IEEE/OSA Conference on Laser Engineering and Applications. 1979. P. 39.
75. **Goss W.C., Goldstein R.** Integrated Optics for Fiber Gyros.//Proc. SPIE. Vol. 412. 1983. P. 248—251.
76. **Gubbins H. L., Carrington W. A., Reynolds R.** Results of Testing 1, 3 Micrometer Devices for Ultimate Application in Sagnac Passive Gyro//Proc. SPIE. Vol. 412. 1983. P. 261—267.
77. **Haavisto J. R.** Thin-Film Waveguides for Inertial Sensors.//Proc. SPIE. Vol. 412. P. 221—228.
78. **Harmer A. L.** Optical Fibre Sensor Market.//First Intern. Conf. Opt. Fibre Sensors, 26—28 April 1983. Venue. P. 53—56.
79. **Hentshel C.** Fiber Optics Handbook. Boebling, FRG, Hewlett—Packard GmbH. 1983. 141 p.
80. **Heywang W.** Sensorik. Springer—Verlag, Berlin—Heidelberg—New York—Tokio. 1984. 260 p.
81. **High Bandwidth Two-Phase Flow Void Fraction Fiber Optic Sensor/** Graindorge Ph., Le Boudec G., Meyet D. et al.//Fiber Optic Sensors. Proc. SPIE. Vol. 586. 1986. P. 211—214.
82. **Hodara H.** Fiberoptic Receivers Performance: A Tutorial View.//Fiber and Integrated Opt. Vol. 4. 1983. P. 234—315.
83. **Hogenboom L., Hull-Allen G., Wang S.** Theoretical and Experimental Analysis of a Fiber Optic Proximity Probe.//Fiber Optic and Laser Sensors II. Proc. SPIE. Vol. 478. 1984. P. 46—57.
84. **Hsu T. Y., Tekippe V. J.** A Passive Fiber Optic Gyroscope.//Fiber Optic and Laser Sensor II, Proc. SPIE. Vol. 478. 1984. P. 128—134.
85. **Iizuka Keigo.** Engineering Optics. Berlin Heidelberg. Springer—Verlag, 1985. 489 p.
86. **Imai Y., Ohtsuka Y.** Optical Computing Based on Interference Fringe Shifting.//Optical Eng. Vol. 25. 1986. P. 98—102.
87. **Jackson D. A.** Monomode Optical Fibre Interferometers for Precision Measurements.//Journ. Phys. E: Sci. Instrum. Vol. 18. 1985. P. 981—1001.
88. **Jeuhomme L., Pocholle J. P.** Mode Coupling in a Multimode Optical Fiber with Microbends.//Appl. Opt. Vol. 14. 1975. P. 2400—2405.
89. **Kaino T.** Plastic Optical Fibers for Near-Infrared Transmission.//Appl. Phys. Lett. Vol. 48. 1986. P. 757—758.
90. **Kaino T., Jingui K., Nara Sh.** Low Loss Poly (Methulmetacrilate-d5) Core Optical Fibers.//Appl. Phys. Lett. Vol. 40. 1982. P. 281—285.
91. **Kashyar R., Nayar B. K.** A Single—Mode Fibre Michelson Interferometer Sensors.//Ist Intern. Conf. on Optical Fibre Sensors. Venue. April 1983. P. 38—42.
92. **Kersley A. D., Lewin A. C., Jackson D. A.** Pseudo—Heterodyne Detection Scheme for the Fibee Gyroscope.//Electron Lett. Vol. 20. N. 9. P. 368—370.
93. **Kim B. Y., Shaw H. J.** All-Fiber-Optic Gyroscope with Linear Scale Factor Using Phase Detection.//Fiber Optic and Laser Sensors II. Proc. SPIE. Vol. 478. 1984. P. 142—148.
94. **Knox J. M.** Birefringent Filter Temperature Sensor.//Proc. First Intern. Conf. Opt. Fibre Sensors, 26—28 April 1983. Venue. P. 1—3.
95. **Kruger A.** Light Emitting Diodes as Dinamic Pressure Transducers.//Journ. Phys. E: Sci. Instrum. Vol. 18. 1985. P. 944—946.
96. **Lazau P.** Effect of Curvature on the Cutoff Wavelength of Single Mode Fibers.//Techn. Digest Symposium on Optical Fiber Measurement, Boulder. Colorado. October 1980. P. 93—95.
97. **Lefevre H. C., Bergh R. A., Shaw H. J.** All-Fiber Gyroscope with Inertial Navigation Short-Term Sensitivity.//Optics Lett. Vol. 7. N. 9. 1982. P. 454—456.
98. **Lefevre H. C.** Single-Mode Fibre Fractional Wave Devices and Polarisation Controllers.//Systems, Instruments and Related Principles. 1981. P. 253—254.
99. **Lewis N. E., Miller M. B., Lewis W. H.** Fiber Optics Sensors Utilizing Surface Reflection.//Fiber Optic and Laser Sensor II. Proc. SPIE. Vol. 478. 1984. P. 39—45.

100. **Lin S. C., Giallorenzi T. G.** Sensitivity Analysis of the Sagnac-Effect Optical-Fiber Ring Interferometer.//Appl. Optics, vol. 18. N. 6. 1979. P. 915—931.
101. **Low—Drift** Fiber Gyro Using a Superluminescent Diod./Bohm K., Marten P., Petermann K. et al.//Electron Lett. Vol. 17. 1981. P. 352.
102. **Lowson C. M., Tekippe V. J.** Enviromentally Intensitive Diaphragm Reflectance Pressure Transducer.//Fiber Optic and Laser Sensor. Proc. SPIE. Vol. 412. 1983. P. 96—102.
103. **Marcuse D.** Microbending Losses of Single-Mode, Step—Index and Multimode, Parabolic//Index Fibers.—BSTJ. Vol. 55. 1976. P. 937—951.
104. **Martin V. M., Sega R. M., Angell S. K.** A Fiber Optic Microwave Power Probe: A Preliminary Report.//Fiber Optic and Laser Sensors. Arlington. April 5—7. SPIE. Vol. 412. 1983. P. 104—109.
105. **Masuda SH., Chikama T., Touge T.** Polarization Preserving Fiber—Optic 2×2 Directional Coupler (PPFDC).//Coherent Technology in Fiber Optic Systems. Proc. SPIE. Vol. 568. 1985. P. 61—68.
106. **Montgomery J. D.** Fiber Optic Angular Rotation Sensor Market Forecast.//Fiber Optic and Laser Sensors, Proc. SPIE. Vol. 412. 1983. P. 277—285.
107. **Montgomery J. D., Glasco J.** Fiber Optic Sensor Long—Range Market Forecast.//Fiber Optic Sensors. Proc. SPIE. Vol. 586. 1986. P. 2—13.
108. **Nakayama T.** Optical Sensing Techonologies by Multimode Fiber.//Fiber Optic and Laser Sensors II, Arlington, May 1—2, SPIE. Vol. 478. 1984. P. 19—27.
109. **Nemoto S., Tetsusaki K.** Energy Transmission Capacity of Fibers Determinated by Temperature Rise.//Appl. Optics. Vol. 20. N. 8. 1981. P. 1407—1412.
110. **Ohishi Y., Takahashi S.** Optical Temperature Sensor Using Eu 3+ —Doped Fluoride Glass.//Appl. Opt. Vol. 25. 1986. P. 720—723.
111. **Optical** Fiber Sensor for the Measurement of Electric Field Intensity and Voltage (OPSEF).—Fiber and Integrated Optics. Vol. 3 N. 4. 1981. P. 383—389.
112. **Optical** Fiber Sensor Technology/Giallorenzi T. G., Buccaro J. A., Dandridge A. et al.//IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. Vol. MTT-30. N. 4. 1982. P. 472—511.
113. **Optical** Fiber Termometer for Medical Use/Scheggi A. M., Brenchi M., Conforti G. et al./First Intern. Conf. Opt. Fibre Sensors, 26—28 April 1983. Venue. P. 13—17.
114. **Pavlat G. A., Moore E. L., Suman M. S.** Application of All-Fiber Technology to Sensors.//Fiber Optic and Laser Sensors. Proc. SPIE. Vol. 412. 1983. P. 70—80.
115. **Petermann K.** Intensity-Dependent Nonreciprocal Phase Shift in Fiber Optic Gyroscopes for Light Sources with Low Coherence.//Optics Lett. Vol. 7. N. 12. 1982. P. 623—625.
116. **Pitt G. D.** Fibre Optic Devices for Process Control.//Proc. Intern. Conf. on Opt. Techniques in Process Control, The Hague, The Netherlands. June 14—16. 1983. P. 193—206.
117. **Presby H. M., Chang R.** Videocolorization Diagnostics in Optical Telecommunication//BSTJ. Vol. 61. 1982. P. 267—282.
118. **Progress** in Monomode Transmission Techniques in the United Kingdom/Hooper R. C., Midwinter J. E., Smith D. W. et al.//Journ. of Lightwave Technology. Vol. LT-1. N. 4. 1983. P. 596—610.
119. **Ramprasad B. S., Radhabay T. S.** Speckle-Based Fiber-Optic Current Sensor.//Optics and Laser Technology. Vol. 16. N. 3. 1984. P. 156—159.
120. **Rashleigh S. C., Ulrich R.** Magneto—Optic Current Sensing with Birefringent Fibers.//Appl. Phys. Lett. Vol. 34. N. 11. 1979. P. 768—770.
121. **Rediker R. H., Lind T. A., Leonberger F. J.** Integrated Optics Wave Front Measurement Sensor.//Appl. Phys. Lett. Vol. 42. 1983. P. 647—649.
122. **Rittich D.** Practicability of Determine the Modal Power Distribution by Measured Near and Far Fields.//Journ. of Lightwave Techn. Vol. LT-3. 1983. P. 652—661.
123. **Rogers A. J.** Optical Fibre Current Measurement.//Fibre Optics'83. London. April 19—21. SPIE. Vol. 347. 1983. P. 196—202.

124. **Rotation** Detection by Optical Heterodyne Fiber Gyro with Frequency Output./Hotate K., Okuma N., Higashiguchi M. et al.//Optics Lett. Vol. 7. № 7. 1982. P. 331—333.
125. **Sacamoto T.** Evaluation Method of Gradient-Index Rod Lenses.//Opt. Eng. Vol. 22. 1983. P. 359—363.
126. **Safford E. L.** Fiberoptics and Laser Handbook. New York: TAB BOOKS Inc., 1984. 356 p.
127. **Shiraishi K., Sugaya S., Kawakami S.** Fiber Faraday Rotator.//Appl. Optics. Vol. 23. N. 7. 1984. P. 1103—1106.
128. **Shupe D. W.** Thermally Induced Nonreciprocity in the Fiber—Optic Interferometer.//Appl. Optics. Vol. 19 N. 5. 1980. P. 654—655.
129. **Snyder A.W., Love J. D.** Optical Waveguide Theory.—London—New-York. Chapman and Hall. 1983. 754 p.
130. **Source** Statistics and the Kerr Effect in Fiber-Optic Gyroscopes./Bergh R. A., Culshaw B., Cutler C. C. et al.//Optics Lett. Vol. 7. N. 11. P. 563—565.
131. **Spillman W. B., McMahon D. H.** Multimode Fiber Optic Sensors.//Proc. 1st Intern. Conf. on Optical Fiber Sensors, August 1983. P. 160—163.
132. **Suematsu Yasuharu.** Long-Wavelength Optical Fiber Communication.//Proc. IEEE. Vol. 71. 1983. P. 692—709.
133. **Takeo Takashi, Hattori Hajime.** Optical Fiber Sensor for Measuring Refractive Index.//Japanese Journ. Appl. Phys. Vol. 21. 1982. P. 1509—1512.
134. **Tomlinson W. J.** Application of Grin-Rod Lenses in Optical Fiber Communication Systems.//Appl. Opt. Vol. 19. 1980. P. 1127—1142.
135. **Udd E., Cahill R. F.** Phase—Nulling Fibre Optic Gyro Development Review.//Integrated Optics II, Proc. SPIE. Vol. 321. 1981. P. 114—121.
136. **Un Capteur de Champ Electrique a Fibre Optique Enrobee dans un Film Plastique.**//Mesures. Vol. 49. N. 14. 1984. P. 90—91.
137. **Von Lingeichem T., Ahrens T.** A New Holographic Interferometer with Monomode Fibers for Integrated Optic Applications.//Progress in Holographic Applications. Proc. SPIE. Vol. 600. 1986. P. 106—114.
138. **Willson J. P., Jones R. E.** Magnetostrictive Fiber-Optic Sensor System for Detecting of Magnetic Field.//Optics Lett. Vol. 8. N. 6. 1983. P. 333—335.
139. **Yao S. K., Asawa C. K.** Microbending Fiber Optics Sensing.//Fiber Optic and Laser Sensors. Proc. SPIE. Vol. 412. 1983. P. 9—13.
140. **Yao S. K., Asawa C. K., Lipscomb G. F.** Microbending Loss in a Single-Mode Fiber in the Pure—Bend Loss Regime.//Appl. Opt. Vol. 21. 1982. P. 3059—3060.

Предисловие	3
Глава 1. Общие сведения о световодных датчиках и оптических сенсорных устройствах	5
1. Области применения, принципы действия, классификация и производство	5
2. Световодные датчики и сенсорные устройства с амплитудной модуляцией	12
3. Световодные датчики и сенсорные устройства с фазовой модуляцией. Интерферометры, применяемые в оптических сенсорных устройствах с фазовой модуляцией	30
4. Поляризационные датчики	42
5. Системы, сочетающие в себе сенсорные устройства и процессоры для обработки данных, получаемых от световодных датчиков	48
Глава 2. Компоненты световодных датчиков и сенсорных устройств	53
1. Оптические волноводы	53
2. Источники света	71
3. Фотодетекторы	82
4. Оптические интерфейсы в сенсорных устройствах	94
Глава 3. Видеодиагностика	106
1. Строение пучков света. Основы видеодиагностики	106
2. Исследование структуры светового пучка в ближнем и дальнем полях при видеодиагностике	117
Глава 4. Световодные устройства для регистрации температуры	121
1. Устройство с датчиком — аттенуатором, модулирующим амплитуду интенсивности света, проходящего по оптическому волокну	121
2. Датчик с фильтром из ниобата лития	124
3. Волоконно-оптические термометры	126
4. Волоконно-оптические датчики для измерения очень высоких и низких температур	131
Глава 5. Датчики напряженности электрического и магнитного полей, разности электрических потенциалов и тока	135
1. Общие сведения	135
2. Световодные датчики напряженности электрического поля и разности электрических потенциалов	141
3. Световодные датчики напряженности магнитного поля и электрического тока	164

Глава 6. Волоконные оптические гироскопы и волоконные оптические акселерометры	176
1. Особенности волоконных оптических гироскопов	176
2. Принцип действия ВОГ	179
3. Элементы ВОГ	182
4. Шумы и нестабильности ВОГ	188
5. Исследования и разработки ВОГ	201
6. Волоконные оптические акселерометры	236
7. Перспективы развития ВОГ и ВОА	243
Список литературы	246

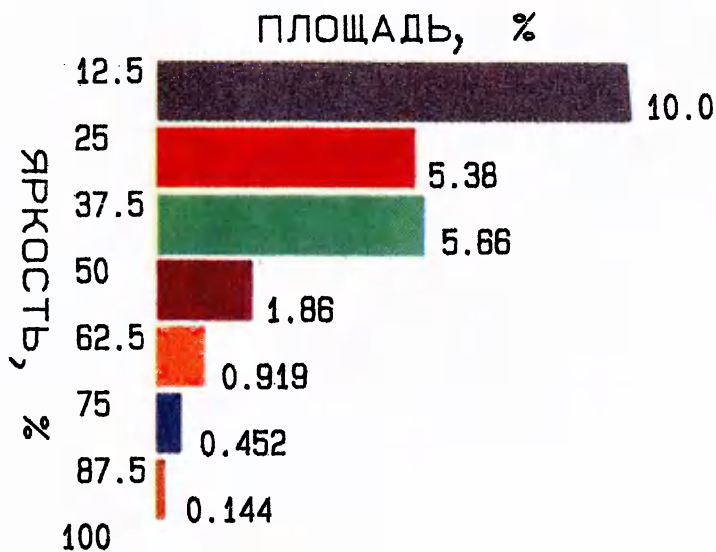


Рис. 69. Относительное распределение площади участков сечения пучка света на выходе волоконного смесителя по интервалам яркости излучения

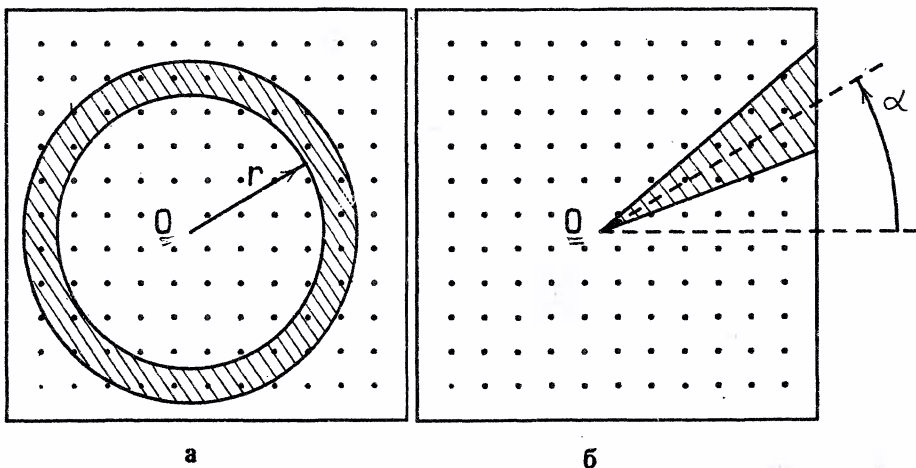
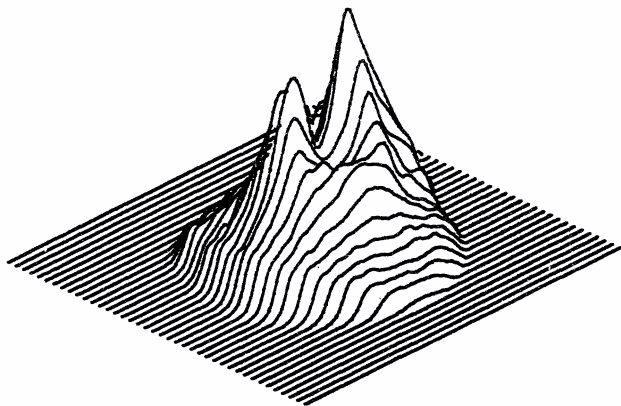


Рис. 70. Иллюстрация расчета распределения мощности излучения:
а—радиального; б—осевого

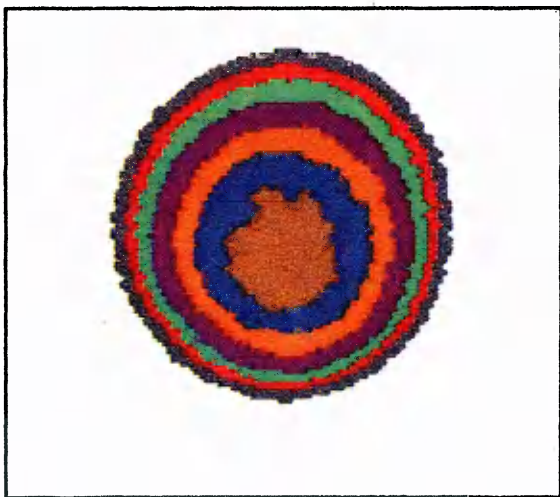


а

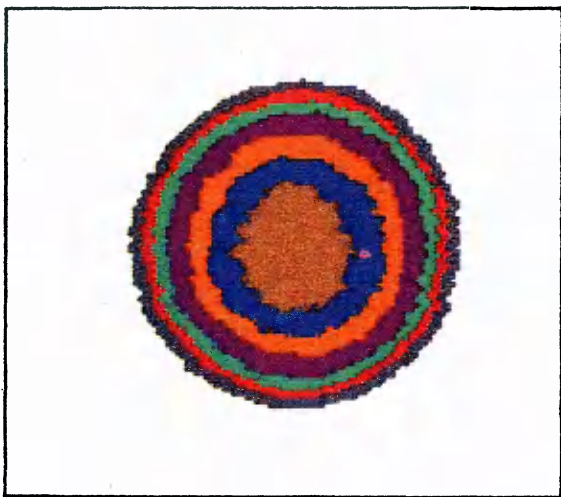


б

Рис. 71. Вideoграммы распределения яркости излучения по сечению пучка света в ближнем поле у выходного торца волоконно-оптического смесителя:
а — цветовая; *б* — квазитрехмерная



а



б

Рис. 76. Корректировка углового искажения распределения яркости излучения на видеограмме с помощью ЭВМ:
а—исходная видеограмма; **б**—после корректировки



а



б

Рис. 77. Видеограммы, показывающие изменения распределения яркости излучения в дальнем поле на выходе световода типа «кварц—кварц» для одноволоконного кабеля, намотанного на мандрелы различного диаметра:

а—диаметр мандрела 64 мм; **б**—диаметр мандрела 40 мм; **в**—диаметр мандрела 20 мм



Рис. 77 *в*

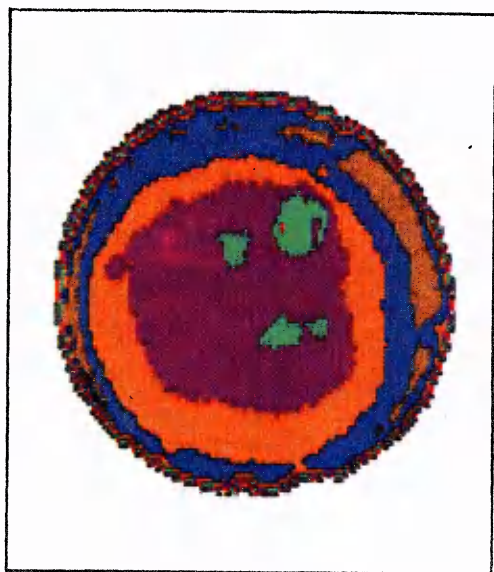
В



а

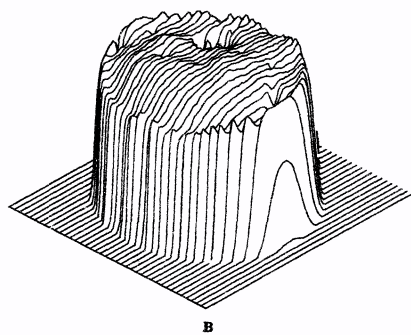
Рис. 78. Видеогаммы структуры светового пучка в плоскости выходного торца волокна типа «кварц—полимер»:

а—цветовая для недеформированного волокна; *б*—цветовая для деформированного волокна; *в*—кваситрехмерная для недеформированного волокна; *г*—кваситрехмерная для деформированного волокна



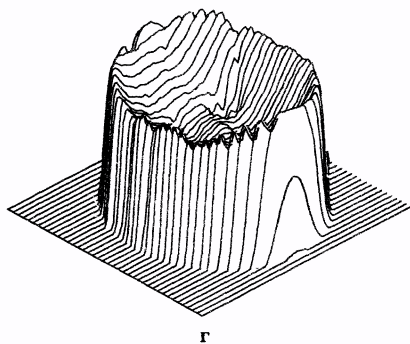
б

Рис. 78. б



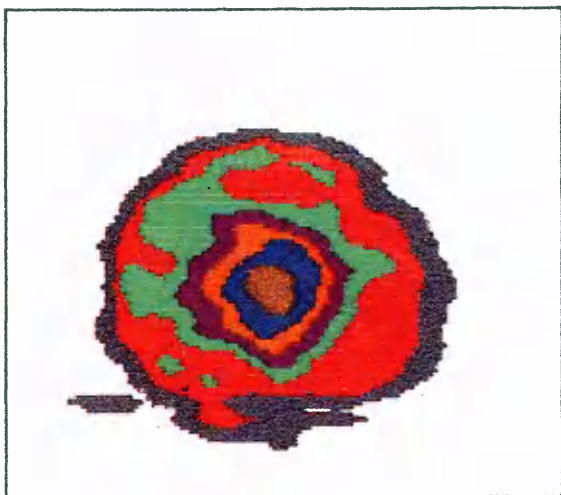
в

Рис. 78. в

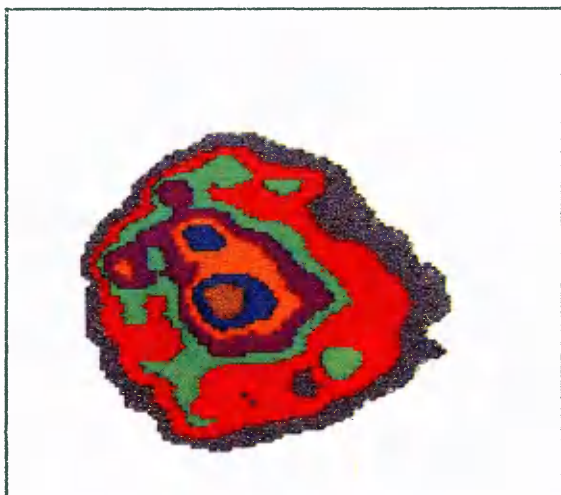


г

Рис. 78. г



а



б

Рис. 79. Видеogramмы распределения в ближнем поле яркости излучения, прошедшего по одноволоконному кабелю:
а — до деформации волокна; *б* — после деформации

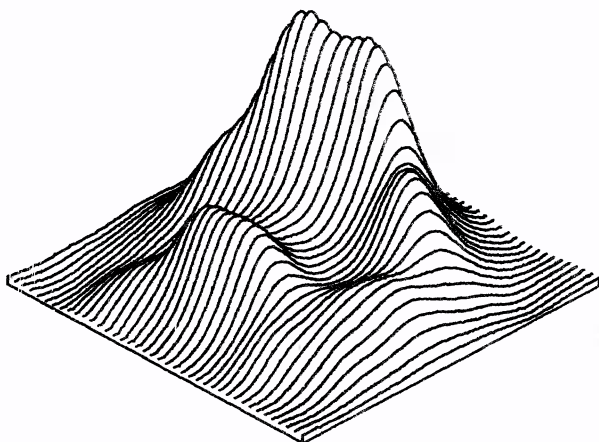


Рис. 80. Изменение распределения яркости излучения по излучающей площадке СИД (ближнее поле) при увеличении силы тока через диод

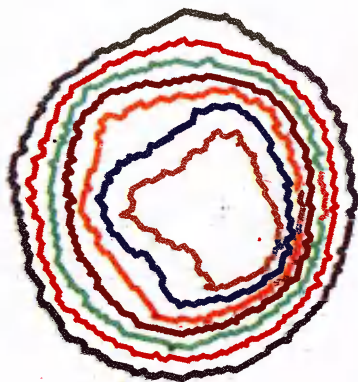


Рис. 81. Простейший видеопаспорт светонизлучающего диода

ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ИЗДАНИЕ

Борис Анатольевич Красюк

**Олег Геннадиевич Семенов
Алексей Григорьевич Шереметьев
Вячеслав Алексеевич Шестериков**

СВЕТОВОДНЫЕ ДАТЧИКИ

*Редактор А. В. Лысенко
Обложка художника А. Я. Михайлова
Художественный редактор А. С. Вершинкин
Технический редактор Т. С. Старых
Корректор О. Е. Мишина*

ИБ № 5261

Сдано в набор 04.09.89. Подписано в печать 03.05.90. Т-01788. Формат 60×88¹/₁₆.
Бумага офсетная № 2. Гарнитура литературная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 16,7
(в т. ч. вкл.). Усл. кр.-отт. 19,36. Уч.-изд. л. 17,8 (в т. ч. вкл.). Тираж 6100 экз. Заказ № 2460.
Цена 1 р.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Машиностроение»
107076, Москва, Стромынский пер., 4.

Московская типография № 4 при Государственном комитете СССР по печати
129041. Москва, Б. Переяславская ул., д. 46.

УВАЖАЕМЫЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Издательство «Машиностроение» выпустит в 1990 году следующие книги из серии **«Библиотека приборостроителя»**:

Головченко А. Н. Пневморезисторные преобразователи измерительных систем.— М.: Машиностроение, 1990.— 10 л.: ил.— (в обл.): 50 к.

Изложены основные принципы построения пневморезисторных преобразователей. Предложены новые пневморезисторные элементы, представлен их теоретический расчет и результаты экспериментального исследования. Указаны пути получения высокостабильных измерительных преобразователей. Рассмотрены принципы действия и конструкции новых типов пневмопреобразователей. Даны примеры использования пневморезисторных преобразователей для контроля параметров различных промышленных объектов.

Для инженерно-технических работников, занимающихся разработкой и эксплуатацией средств измерительной техники.

Каледин Б. Ф. Крепление оптических деталей эластичными материалами.— М.: Машиностроение, 1990.— 11 л.: ил.— (в обл.): 55 к.

Рассмотрены особенности крепления оптических деталей эластичными материалами. Приведены характеристики применяемых для этой цели эластичных материалов. Предложены технологические процессы эластичного крепления, различные методы испытания образцов. Даны рекомендации по конструктивному оформлению крепления деталей.

Для инженерно-технических работников конструкторских бюро и предприятий оптического приборостроения, занимающихся проектированием, изготовлением, модернизацией и ремонтом оптических приборов.

ВНИМАНИЮ РУКОВОДИТЕЛЕЙ

ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И ОРГАНИЗАЦИЙ
ВСЕХ ОТРАСЛЕЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

РЕКЛАМУ

на Вашу продукцию и разработки

Ваши предложения о сотрудничестве
с коллегами других отраслей

РЕКЛАМУ

о Ваших возможностях в оказании
услуг населению

и другие виды РЕКЛАМЫ
и ОБЪЯВЛЕНИЙ

**ПРИМЕТ
И
ОПУБЛИКУЕТ
МНОГОТЫСЯЧНЫМ
ТИРАЖОМ
В СВОИХ
ПЕРИОДИЧЕСКИХ
И
КНИЖНЫХ
ИЗДАНИЯХ**

**Издательство
МАШИНОСТРОЕНИЕ**

Об условиях,
размещения рекламы
обращаться по адресу:
107076, Москва, Стромьинский пер., 4
тел. 269-71-41