



Масъум
Оқилматов
таърифи

Электроника



М. Мухитдинов
Э. С. Мусаев

Свето- излучающие диоды и их применение

Издательство «Радио и связь»

ББК 32.852
М 92
УДК 621.383.8

Редакционная коллегия:

*Б. Ф. Высоккий, Г. Г. Горбунова, Л. Г. Дубицкий, В. И. Иванов,
И. В. Лебедев, Ю. Р. Носов, Ю. Н. Рысев, В. Н. Сretenский,
В. И. Стафеев, В. А. Шахнов*

Рецензенты: А. С. Сидоров и Л. Е. Эпштейн

Редакция литературы по электронной технике

Мухитдинов М., Мусаев Э. С.

М 92 Светоизлучающие диоды и их применение. — М.: Радио и связь, 1988. — 80 с.: ил. — (Массовая б-ка инженера «Электроника»).

ISBN 5-256-00140-X

Даны основные эксплуатационные характеристики, методика расчета режимов питания и выбора вариантов включения светонзлучающих диодов. Рассмотрены устройства регулирования, усиления, контроля и коммутации с применением светонзлучающих диодов. Приведены практические схемы некоторых устройств и справочные данные светонзлучающих диодов.

Для инженерно-технических работников, занимающихся проектированием радиоэлектронной аппаратуры.

М $\frac{2403000000-052}{046(01)-88}$ 130—88

ББК 32.852

ISBN 5-256-00140-X

© Издательство «Радио и связь», 1988

ПРЕДИСЛОВИЕ

Оптоэлектроника — одно из направлений микроэлектроники — развивается быстрыми темпами. Ее новейшие достижения открывают широкие возможности для решения практических задач, имеющих важное народно-хозяйственное значение.

Перспективным элементом оптоэлектроники является светоизлучающий диод. Достоинства светоизлучающего диода — высокая надежность и быстродействие, малые габариты и квазимонохроматичность спектральных характеристик в видимой и ИК-областях спектра — позволяют широко применять их в качестве индикаторов, элементов систем регулирования и управления, формирователей импульсных сигналов и источников анализирующего излучения. С помощью светоизлучающих диодов могут разрабатываться фотометры, влагомеры и анализаторы состава и свойств различных материалов и веществ. Применение новых структур и совершенствование технологии позволили получить светоизлучающие диоды, спектр излучения которых от 0,4 до 3 мкм.

В настоящей книге обобщены разрозненные сведения по применению светоизлучающих диодов. Приведены классификация приборов и их основные характеристики, режимы питания и схемы включения, а также методы компенсации временной и температурной нестабильности интенсивности излучения диодов. Рассматриваются общие принципы построения устройств с использованием светоизлучающих диодов. Показана возможность применения светоизлучающих диодов в устройствах метрологического обеспечения и калибровки.

Обращаем особое внимание читателей на описание практических схем различных электронных устройств с использованием светоизлучающих диодов: индикаторов, преобразователей угол — код, уровнемеров, генераторов и др.

Глава 1

СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ ДИОДЫ И ИХ ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ. ФОТОПРИЕМНИКИ

1.1. ТИПЫ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ

Светоизлучающий диод (СИД) представляет собой полупроводниковый электрически управляемый элемент. Электрические и излучательные свойства СИД зависят от механизма переноса носителей при смещении переходов в прямом и обратном направлениях и законов излучательной и безызлучательной рекомбинации в полупроводниках. В основе принципа действия СИД лежит преобразование электрической энергии в электромагнитное излучение, спектр которого может лежать в видимой и инфракрасной (ИК) областях спектра.

Светодиодная структура представляет собой электронно-дырочный переход, в котором одна из областей, например n , является эмиттерной, а другая — p — базовой. В базовую область дополнительно вводят нейтральную примесь, например кислород или азот. Введение этой примеси не приводит к образованию в полупроводнике дополнительных носителей заряда, но способствует генерации света. При подаче на p - n переход прямого смещения начинается инжекция электронов из эмиттерной области в базовую (рис. 1.1). Одновременно происходит процесс инжектирования дырок из базовой области в эмиттерную соответственно, и рекомбинации носителей происходят как в базовой, так и в эмиттерной

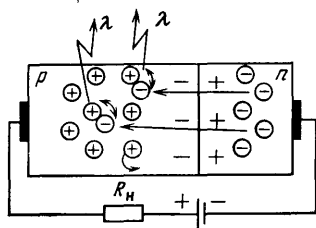


Рис. 1.1. Структура p - n перехода светоизлучающего диода («+», «-» — знаки объемных зарядов p - n перехода; \oplus , \ominus — носители заряда: дырка, электрон)

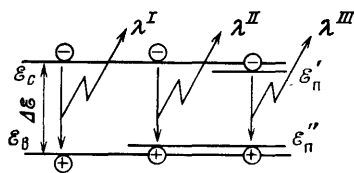


Рис. 1.2. Энергетическая диаграмма рекомбинации электронов в базовой области светоизлучающего диода (ϵ_c , ϵ_v — энергетическая граница свободной и валентной зон; λ^I , λ^{II} и λ^{III} — краевое, примесное и междуприимесное излучение; ϵ'_n , ϵ''_n — энергия примесных уровней; ΔE — ширина запрещенной зоны)

областях, но базовая область является той частью полупроводниковой структуры, в которой происходит эффективное преобразование энергии инжектированных электронов в энергию излучения. Прямой ток, текущий через переход, складывается из токов электронов и дырок, которые определяют число актов излучательной (в p -области) и безызлучательной в (n -области) рекомбинации. Чтобы повысить число излучательных рекомбинаций, эмиттер легируют сильнее, чем базу. Поток электронов из n -области в p -область больше потока дырок в n -область, что приводит к увеличению числа актов излучательной рекомбинации.

В соответствии с квантовой теорией возбужденный электрон, инжектированный в базовую область, рекомбинируя с дыркой, испускает квант энергии излучения. При этом максимальная энергия, которая может выделиться при рекомбинации, равна ширине запрещенной зоны данного полупроводника:

$$\Delta \mathcal{E} = h \nu,$$

где h — постоянная Планка; ν — частота колебаний электромагнитной энергии (рис. 1.2).

Основные материалы из элементов А^{III}В^V, применяющиеся в настоящее время для изготовления СИД, приведены в табл. 1.1.

Изготовить СИД можно из различных элементов. На рис. 1.3 приведена гистограмма, отражающая возможности изготовления СИД, излучающих в видимой части спектра.

Ток, протекающий через СИД, содержит электронную i_n и дырочную i_p составляющие: $i_d = i_n + i_p$. В излучательной рекомбинации участвует только ток, обусловленный инжекцией электронов в базу. Показатель эффективности излучающего p - n перехода — внутренний квантовый выход — определяется по формуле [5]

$$\eta_{\text{вн}} = \frac{N_{\Phi}}{i_{\text{п}}/q},$$

где N_{Φ} — интенсивность генерации фотонов в базовой области; q — заряд электрона.

Таблица 1.1

Материал	Перекрываемая область спектра, мкм
SiC, InGaP, GaN	0,4...0,68
GaP, GaAsP	0,6...0,7
GaAs, GaAsP, GaAbAs	0,7...0,95
GaAsSb, AlGaAsSb	1,0...2,0
InGaAsP—InP	1,0...2,1
InGaAsSb—GaSb	1,8...4,0
InGaAsSb—InAs	
InAs, InGaAs	

Таблица 1.2

Тип источника	Температурный диапазон, °С	Температурный коэффициент, %/°С
СИД на основе GaP	—40...+60	—(0,14...0,21)
СИД на основе SiC, использующие рекомбинационное излучение	—30...+60	—(0,3...0,8)
СИД на основе SiC, использующие предпробойное излучение	—30...+60	—(0,05...0,24)
Лавинные излучатели без p - n перехода	—30...+60	—(0,5...0,75)

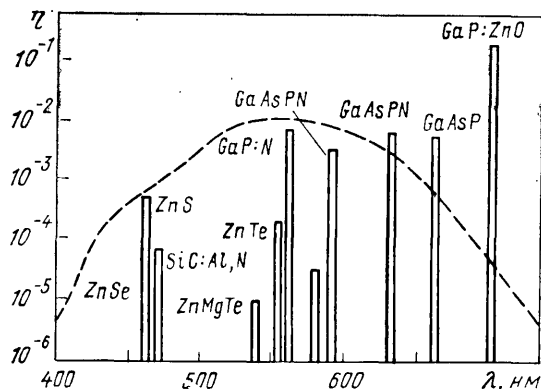


Рис. 1.3. Возможности изготовления светонизлучающих диодов из различных элементов

Однако следует отметить, что не все фотоны, возникшие в результате излучательных рекомбинаций, могут покинуть пределы прибора. Часть из них поглощается по пути к оптической поверхности диода, а часть отразится от поверхности внутрь. Излучательная эффективность с учетом этих потерь характеризуется внешним квантовым выходом излучения

$$\eta_{\text{внешн}} = \eta_{\text{вн}} \gamma K = \frac{N_{\text{ф}}}{i_{\text{п}}/q} - \gamma K,$$

где γ — коэффициент инжекции p - n перехода; K — коэффициент, характеризующий потери излучения при его выводе из СИД через оптическую систему.

Светонизлучающие диоды в зависимости от спектра излучения подразделяются на излучающие в видимой области спектра (0,45 ... 0,68 мкм) и излучающие в инфракрасной области спектра (выше 0,7 мкм).

К основным характеристикам СИД относятся:

яркостная характеристика (для СИД видимого спектра излучения) $L = f(I_{\text{пр}})$, где $I_{\text{пр}}$ — прямой ток, протекающий через СИД;

диаграмма направленности излучения;

вольт-амперная характеристика $I_{\text{пр}} = f(U)$;

мощностная характеристика (для СИД инфракрасного спектра излучения) $P_{\text{изл}} = f(I_{\text{пр}})$.

К основным параметрам СИД относятся [6]:

Φ — сила света — световой поток, приходящийся на единицу телесного угла в направлении, перпендикулярном плоскости излучающего кристалла; измеряется в канделах (люмен на стерадиан);

L — яркость — величина, равная отношению силы света к площади светящейся поверхности; измеряется в канделах на квадратный метр (кд/м²);

$U_{\text{пр}}$ — напряжение на СИД при протекании через него постоянного прямого тока;

$I_{\text{пр max}}$ — максимально допустимый постоянный прямой ток, при котором обеспечивается заданная надежность при длительной работе;

$I_{\text{п max}}$ — максимально допустимый прямой импульсный ток через СИД, при котором обеспечивается заданная надежность при длительной работе;

$P_{\text{изл}}$ — мощность излучения измеряется в милливаттах (мВт)

$P_{\text{изл.л}}$ — импульсная мощность излучения — амплитуда потока, излучаемо-
то СИД в импульсе;

$U_{\text{обр.мах}}$ — максимально допустимое обратное напряжение;

$\lambda_{\text{мах}}$ — длина волны излучения, соответствующая максимуму спектральной
характеристики СИД;

$\Delta\lambda_{0,5}$ — ширина спектра излучения — интервал длин волн, в котором мощ-
ность излучения СИД составляет половину максимальной;

$t_{\text{вр.изл}}$ — время нарастания излучения — интервал времени в момент вклю-
чения, в течение которого мощность излучения диода изменяется от 0,1 до 0,9
своего максимального значения; $t_{\text{сп.изл}}$ — время спада излучения — интервал
времени в момент выключения, в течение которого мощность излучения диода
изменяется от 0,9 до 0,1 своего максимального значения.

В приложении приведены основные характеристики и параметры серийно
выпускаемых СИД. В последнее время СИД широко применяются в устройст-
вах контроля различных качественных и количественных параметров веществ и
материалов [23]. В этих устройствах наиболее часто используются СИД, излу-
чающие в ближней ИК-области спектра. На этот диапазон спектра разработа-
ны СИД на основе твердых растворов антиманидов индия — галлия [3]. Такие
СИД должны иметь достаточно высокий КПД, хорошую герметизацию и на-
правленный поток излучения. Однако внешний квантовый выход этих прибо-
ров ограничивается большими потерями излучения, связанными с поглощениями
внутри кристалла и очень малыми критическими углами. Эти потери могут быть
уменьшены, если одной из областей *p-n* структуры придать форму сферы Вей-
ерштрасса или использовать покрытия из халькогенидных стекол [4]. Покрытия
также выполняются в виде сферы Вейерштрасса или усеченного эллипсоида.
Диаметр сферы выбирается в 4 раза больше линейных размеров СИД.

Спектральные характеристики СИД со стеклянным покрытием и без него
при 300 и 77 К представлены на рис. 1.4. Как видно из рисунка, покрытие СИД
не изменяет их спектральных характеристик. Вместе с тем при использовании
покрытия в виде сферы Вейерштрасса или усеченного эллипсоида КПД СИД воз-

I , отн. ед.

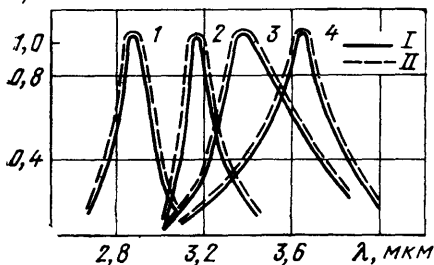


Рис. 1.4. Спектры излучения свето-
излучающих диодов на основе InAs
(2, 4) и твердых растворов InGaAs
(1, 3):

1, 2 — при 77 К; 3, 4 — при 300 К; I, II —
спектральные характеристики без покры-
тия и с покрытием из халькогенидного
стекала

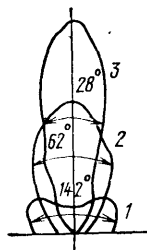


Рис. 1.5. Диаграмма направленности
излучения:

1 — без покрытия; 2, 3 — с покрытием в
виде эллипсоида с соотношением линей-
ных размеров 1:4 и 1:6 соответственно

растает в 3—4 раза, достигая 1,6% при 300 К. Диаграммы направленности излучения СИД без покрытий и с покрытием приведены на рис. 1.5.

Как элемент электрической цепи СИД характеризуется вольт-амперной характеристикой (ВАХ), близкой к характеристике обычного диода. Характерным для ВАХ СИД является наличие начального порога включения 1,5... 2,2 В и почти линейного рабочего участка. Спектральные характеристики могут быть с одним и двумя выраженными максимумами. Диаграмма направленности излучения СИД как точечного источника излучения определяется его конструкцией, наличием линз, оптическими свойствами материала и может быть узконаправленной.

Одним из основных недостатков СИД является температурная зависимость интенсивности излучения. С увеличением температуры интенсивность излучения уменьшается и максимум спектральной характеристики уходит в сторону длинных волн. В качестве примера на рис. 1.6 и 1.7 приведены температурная зависимость потока излучения и разброс спектральных характеристик [7].

Величина и характер изменения интенсивности СИД при изменении температуры окружающей среды определяется их физико-химическими свойствами. В случае линейного характера изменения интенсивности излучения СИД в заданном диапазоне температур температурная нестабильность излучения обусловлена температурным коэффициентом K_T , значение которого находится из выражения [8]

$$K_T = \frac{\Delta \Phi}{\Phi_{max} \Delta T} 100\%,$$

где $\Delta \Phi$ — величина изменения интенсивности излучения СИД; Φ_{max} — максимальная интенсивность излучения; ΔT — изменение температуры светодиода. Значение температурного коэффициента обычно выражено в процентах на градус. Значения температурных коэффициентов для некоторых СИД приведены в табл. 1.2.

Знаки перед температурными коэффициентами указывают на уменьшение интенсивности излучения при повышении температуры. Если изменения интенсивности излучения имеют сложный ха-

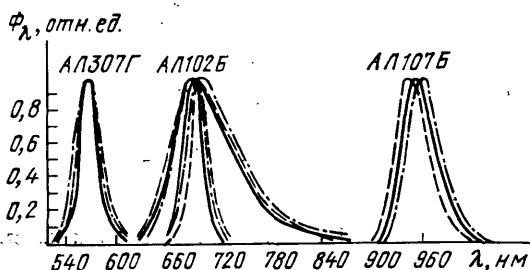


Рис. 1.6. Температурный разброс спектральных характеристик светодиодов:

— $t=20^\circ\text{C}$; --- $t=1^\circ\text{C}$; - · - · $t=40^\circ\text{C}$

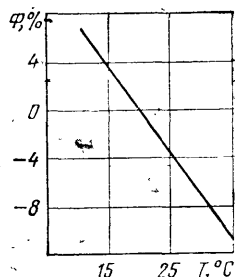


Рис. 1.7. Типовая температурная зависимость потока излучения

рактически, то температурную нестабильность лучше характеризовать графическим способом.

Для применения СИД в различных устройствах необходимы сведения об их основных характеристиках и параметрах. Выбор необходимого излучателя производится по конкретным требованиям, предъявляемым к устройству, в котором предполагается использовать СИД. Затем приступают к выбору режима питания и варианта включения.

1.2. РЕЖИМЫ ПИТАНИЯ И СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ

Питание СИД осуществляется в различных режимах: постоянным током, в импульсном режиме и функциональном режиме (например, питание током, сформированным по экспоненте). В табл. 1.3. приведены эти режимы, их временные диаграммы и математическое представление.

Рассмотрим в отдельности каждый режим.

Режим питания постоянным током является наиболее простым, так как для его осуществления не требуются специальные устройства (генераторы), СИД подключаются к источнику питания через токозадающий резистор. Сопротивление этого резистора определяется из выражения

$$R = (U_{\text{п}} - U_{\text{с.д.}}) / I_{\text{н.}}$$

Таблица 1.3

Режим питания	Схема включения	Временные диаграммы	Математическое представление сигнала
Постоянным током			$\Phi(t) = KI_0 = \Phi_0$
Импульсный			$\Phi(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0, \\ \Phi_0 & \text{при } 0 \leq t \leq t_{\text{н}}, \\ 0 & \text{при } t \geq t_{\text{н}} \end{cases}$
Экспоненциальный			$\Phi(t) = \Phi_0 e^{-(t/\tau_{\text{э}})}$

Примечание: ЗГ — задающий генератор, БФР — блок функциональной развертки

где $U_{\text{н}}$ — напряжение источника питания; $U_{\text{с.д}}$ — падение напряжения на СИД, значение которого от 1,0 до 2,2 В; $I_{\text{н}}$ — номинальный ток СИД.

Этот режим питания наиболее приемлем для одноканальных оптоэлектронных измерительных преобразователей с модуляцией сигнала в оптическом канале (например, для подсчета штучной продукции, измерения плотности ткани по утку и т. п.).

Импульсный режим питания имеет ряд преимуществ по сравнению с режимом питания постоянным током. Если СИД применяются в двухволновых устройствах, то этот режим обеспечивает временное разделение потоков и, следовательно, применяется один фотоприемник со спектральной характеристикой, чувствительной к обоим потокам. Упрощаются процесс усиления и обработка сигнала по сравнению с первым режимом. Уменьшается энергопотребление, что крайне необходимо при разработке приборов с автономным питанием. Мощность рассеяния на СИД можно определить с учетом линейной аппроксимации ВАХ по следующей формуле:

$$W_{\text{рас}} = I_{\text{с.д}} U_{\text{с.д}} + I_{\text{с.д}}^2 r_{\text{д}},$$

где $I_{\text{с.д}}$ — ток через СИД; $r_{\text{д}}$ — динамическое сопротивление СИД; $U_{\text{с.д}}$ — напряжение отсечки.

Эффективное значение тока

$$I_{\text{эф}} = I_{\text{н}} \sqrt{Q},$$

где $I_{\text{н}}$ — импульсный ток; Q — скважность.

Отсюда максимально допустимое значение тока

$$I_{\text{н max}} = I_{\text{н}} \sqrt{Q} = I_{\text{н}} \sqrt{T/t_{\text{н}}},$$

где $t_{\text{н}}$ — длительность импульса; T — длительность паузы.

Следовательно, для получения необходимой мощности излучения необходимо уменьшать длительность импульса и увеличивать паузы между импульсами. Однако следует отметить, что длительность импульсов тока ограничена быстродействием фотоприемника. Если фотопроводимость (фототок) успевает установиться за $(3 \dots 4) \tau_{\text{ф}}$, то

$$t_{\text{н}} \geq (3 \dots 4) \tau_{\text{ф}},$$

где $\tau_{\text{ф}}$ — постоянная времени фотоприемника.

Подбирая необходимую скважность, можно обеспечивать достаточно высокую мощность излучения, на один-два порядка превышающую номинальную мощность излучения СИД.

Третий режим питания — функциональный. Его преимуществом является интенсификация выполняемых математических операций, и в случае применения в устройствах контроля обеспечивается линеаризация передаточной (градуировочной) характеристики устройства с одновременным упрощением всего устройства и повышением точности.

При питании СИД током, изменяющимся по экспоненциальному закону, значение максимально допустимого тока определяется из выражения

$$I_{\text{т}} = I_{\text{н}} \frac{\alpha T}{1 - e^{-\alpha T}},$$

где $\alpha = 1/\tau_{\text{с}}$; $\tau_{\text{с}}$ — постоянная времени экспоненциального тока; T — время измерения, равное длительности экспоненциального импульса.

Увеличения мощности излучения СИД при экспоненциальной развертке можно достичь уменьшением постоянной времени, длительности экспоненты и увеличением начального максимального значения тока СИД. Однако уменьшение постоянной времени приводит к снижению чувствительности и увеличению погрешности измерения. Дальнейшее увеличение мощности излучения можно достигнуть, применив режим дискретного функционального питания. При этом максимально допустимый ток через СИД

$$I_m = \sqrt{Q} \frac{I_n \alpha T}{1 - e^{-\alpha T}}.$$

Рассмотрим схемы включения светоизлучающих диодов. На рис. 1.8 приведены схемы включения с одним СИД.

Для схемы (рис. 1.8,а) значение тока $I_{с.д.}$, протекающего через СИД, зависит от сопротивления R_n , напряжения питания U_n и падения напряжения на СИД:

$$I_{с.д.} = \frac{U_n - U_{с.д.}}{R_n}.$$

Для схемы на рис. 1.8,б входное напряжение $U_{вх} \approx U_{вых}$, а ток

$$I_{с.д.} = I_{вх} (1 + \beta) \frac{R_{вх}}{r_{вх}} \frac{R_9 + (R_n + r_d)}{R_9},$$

где $R_{вх}$, $r_{вх}$ — входное сопротивление каскада и транзистора соответственно; r_d — динамическое сопротивление СИД; β — коэффициент усиления тока.

Если считать, что $R_{вх} \approx r_{вх}$, а $r_d \ll R_n$, что легко обеспечить при питании большим напряжением, то получим

$$I_{с.д.} = I_{вх} (1 + \beta) \frac{R_9 + R_n}{R_9}.$$

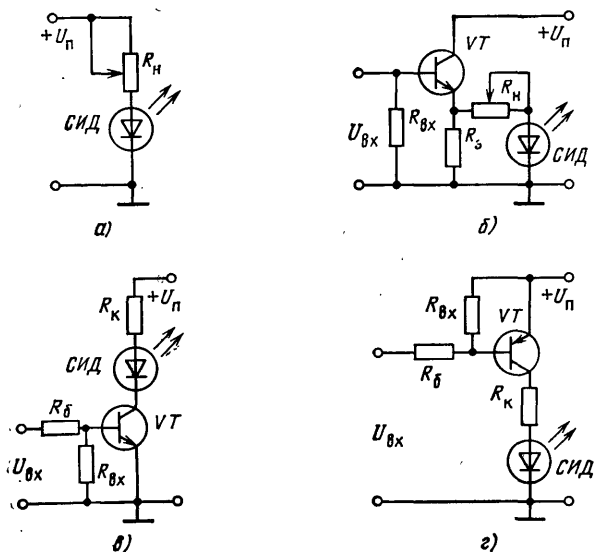


Рис. 1.8. Схемы включения светоизлучающих диодов

Для схемы на рис. 1.8, в, г ток через СИД

$$I_{c.d} = \frac{U_{п} - U_{c.d} - U_{кэ откp}}{R_{к} + r_{д}},$$

где $U_{кэ откp}$ — остаточное напряжение на транзисторе в открытом состоянии.

Если считать, что $U_{п} \gg U_{c.d}$, $U_{п} \gg U_{кэ}$ и $R_{к} \gg r_{д}$, то получим

$$I_{c.d} = U_{п}/R_{к}.$$

Ток базы транзистора

$$I_{б} = (U_{вх} - U_{бэ})/R_{б};$$

сопротивление $R_{б}$ должно обеспечивать ток насыщения транзистора

$$I_{б} = SI_{к}/\beta,$$

где $S = I_{б}/I_{бгр}$ — коэффициент насыщения; $I_{бгр}$ — граничное значение тока базы.

Анализ схем включения СИД показывает, что схемы на рис. 1.8, в, г имеют более высокое быстродействие и являются генераторами тока, если их не доводить до насыщения. Схема на рис. 1.8, б является генератором напряжения, и следовательно, ток через СИД определяется сопротивлением нагрузочного резистора СИД.

Наибольшим быстродействием обладают схемы на рис. 1.8, в, г. Их различие состоит в том, что в схеме на рис. 1.8, г СИД подключен к общей шине. Следует также отметить, что значение тока через СИД определяется его внутренним сопротивлением. Для устранения этих нестабильностей необходимо повышать напряжение питания $U_{п}$, так как нестабильность, вносимая транзистором и СИД,

$$K_{нс} = \Delta U_{н}/U_{п},$$

где $\Delta U_{н}$ — нестабильность из-за изменения падения напряжения на транзисторе и СИД.

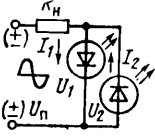
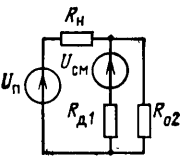
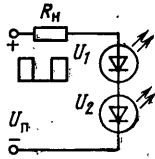
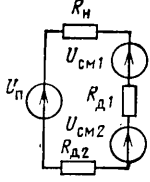
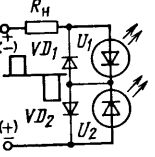
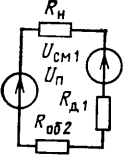
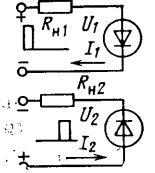
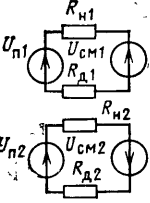
Таким образом, чем больше $U_{п}$, тем больше должны быть сопротивления $R_{к}$ и $R_{н}$ и, следовательно, меньше будет сказываться влияние внутреннего сопротивления СИД.

При использовании СИД в двухволновых устройствах следует различать четыре варианта включения СИД опорного и измерительного каналов: встречно-параллельное; последовательное; встречно-последовательное, раздельное (независимое) включение.

В табл. 1.4 приведены варианты включения СИД и их схемы замещения, составленные с учетом следующих допущений. Для схем включения 1, 2 считаем, что СИД U_1 , U_2 имеют идентичные характеристики, и составляем схему замещения для одного из СИД. Рассмотрим в отдельности каждый из вариантов включения.

При встречно-параллельном включении СИД питание осуществляется от генератора переменного тока. В один из полупериодов

Таблица 1.4

Схема включения СИД	Схема замещения	Расчетные формулы
		$I = \frac{U_{\text{П}} - U_{\text{СМ}} + I_2 r_{\text{Д}}}{R_{\text{О}2} + R_{\text{Н}}} = \frac{U_{\text{СМ}} + I_1 r_{\text{Д}}}{R_{\text{О}2} + R_{\text{Д}1}}$ $R_{\text{Н}} = \frac{U_{\text{П}} - U_{\text{СМ}} - r_{\text{Д}1}(I_1 + I_2)}{I}$
		$I = \frac{U_{\text{П}} - U_{\text{СМ}1} - U_{\text{СМ}2}}{R_{\text{Н}} + r_{\text{Д}1} + r_{\text{Д}2}}$ $R_{\text{Н}} = \frac{U_{\text{П}} - U_{\text{СМ}1} - U_{\text{СМ}2} - I(r_{\text{Д}1} + r_{\text{Д}2})}{I}$
		$I_1 = I_2, E_1 = E_2,$ $I_1 = \frac{E_1 - U_{\text{СМ}1}}{R_{\text{Н}} + r_{\text{Д}1} + R_{\text{О}2}}$ $R_{\text{Н}} = \frac{U_{\text{П}} - U_{\text{СМ}} - I_1(r_{\text{Д}1} + R_{\text{О}2})}{I}$
		$I_1 = \frac{U_{\text{П}1} - U_{\text{СМ}1}}{R_{\text{Н}1} + r_{\text{Д}1}}$ $I_2 = \frac{U_{\text{П}2} - U_{\text{СМ}2}}{R_{\text{Н}2} + r_{\text{Д}2}}$ $R_{\text{Н}1} = \frac{U_{\text{П}1} - U_{\text{СМ}1} - I_1 r_{\text{Д}1}}{I_1}$ $R_{\text{Н}2} = \frac{U_{\text{П}2} - U_{\text{СМ}2} - I_2 r_{\text{Д}1}}{I_2}$

Примечание. $U_{\text{П}}, U_{\text{П}1}, U_{\text{П}2}$ — напряжения источников питания; $R_{\text{Н}1}, R_{\text{Н}2}$ — сопротивление нагрузочных резисторов; I_1, I_2 — токи через СИД; $r_{\text{Д}}$ — динамическое сопротивление СИД; $R_{\text{О}1}, R_{\text{О}2}$ — обратные сопротивления СИД; $U_{\text{СМ}}$ — прямое падение напряжения на СИД.

включается один СИД, в другой полупериод — второй. Следовательно, если подобраны идентичные СИД, то на точность измерения не влияет нестабильность питающихся импульсов. Расчетные соотношения для этого варианта включения СИД приведены в табл. 1.4. При этом считаем, что СИД идентичны и расчет произведен для одного из них.

Достоинством последовательного варианта включения является простота схемной реализации источника питания. Недостатком является необходимость применения двух фотоприемников, причем каждый из них должен воспринимать излучение только одного СИД, т. е. этот вариант не обеспечивает временного разделения потоков от каждого импульса излучателя. Однако применение комбинации фотодиод — фоторезистор дает возможность реализовать операцию отношения сигналов от потоков обоих СИД. Основная погрешность последовательного включения СИД связана с нестабильностью характеристик двух фотоприемников, особенно чувствительных к потокам первого и второго СИД. Эта схема может быть применена при невысоких требованиях к устройствам контроля (абсолютная погрешность свыше 3%).

Следующим вариантом включения СИД является встречно-последовательное включение. Для определения тока, протекающего через СИД, сделаем допущения, что СИД имеют идентичные электрические параметры. Как и при первом варианте включения, здесь питание осуществляется от генератора переменного напряжения. Недостатком является отсутствие отдельного выравнивания потоков излучения. Данная схема может найти применение в индикаторах предельных значений влаги.

Последним вариантом является отдельное независимое включение СИД. В этом случае составляют уравнения для обеих цепей с СИД в отдельности и из них находят токи и нагрузочные сопоставления.

Достоинства последней схемы включения — возможность независимого питания СИД, взаимного выравнивания потоков излучения и временное разделение этих потоков.

1.3. МЕТОДЫ КОМПЕНСАЦИИ ВРЕМЕННОЙ И ТЕМПЕРАТУРНОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ

Одной из основных характеристик СИД является их временная и температурная стабильность мощности излучения. Выявление и устранение дестабилизирующих факторов имеют большое значение.

Рассмотрим существующие методы стабилизации интенсивности излучения СИД: термостатирование; изоляция СИД от различного рода дестабилизирующих воздействий [8]; введение в цепь питания СИД термочувствительных элементов с обратной температурной характеристикой (см. рис. 1.9, в) [10]; выбор оптимальных сопротивлений цепи питания СИД [9, 10]; стабилизация рабочего режима введением обратной связи по термозависимому параметру СИД; стабилизация вводом обратной связи по оптическому каналу. На рис. 1.9 приведены схемы стабилизации интенсивности излучения.

Первый и второй способы стабилизации интенсивности излучения СИД позволяют уменьшить нестабильность его излучения,

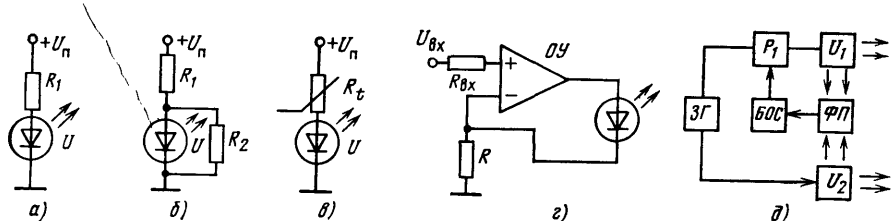


Рис. 1.9. Схемы стабилизации интенсивности излучения светоизлучающих диодов

однако отличаются сложностью и инерционностью, а также обладают сравнительно ограниченными возможностями и не исключают необходимости принятия дополнительных мер для ослабления нестабильности, обусловленной наличием разброса параметров СИД и их изменения вследствие старения.

Способы, основанные на выборе рабочего режима, являются наиболее универсальными для определенного установленного значения мощности. Кроме того, они более выгодны в части аппаратной реализации. Необходимо отметить, что температурная стабилизация при таком способе может быть получена в том случае, если динамическое сопротивление положительно.

Экспериментально значение R_1 (см. рис. 1.9,а) определяют следующим образом [10].

Устанавливают температуру СИД θ_1 и измеряют падение напряжения на СИД U_1 и относительную величину потока излучения Φ_1 при нормальном токе I_1 . Затем изменяют температуру θ_2 , выставляют значение напряжения U_2 , при котором поток не изменяется, и измеряют соответствующее значение тока I_2 . Требуемое сопротивление определяют по формуле

$$R = (U_2 - U_1) / (I_1 - I_2).$$

Сопротивления резисторов составляют единицы и десятки ом. Выбор сопротивления для каждого конкретного образца также является одним из недостатков этого метода.

Рассмотрим еще один метод, основанный на выборе оптимальных значений элементов цепи питания [9]. Сущность метода заключается в том, что с повышением температуры уменьшается падение напряжения на СИД и при включении параллельно СИД резистора (рис. 1.9,б) происходит перераспределение тока в сторону ветви с СИД. Кроме того, увеличивается общий ток, протекающий через параллельно включенную цепь резистор — СИД. При оптимальном выборе сопротивления резистора увеличение температуры приводит к увеличению тока через СИД.

Этот метод можно применить и для цепочки с несколькими последовательно включенными СИД, причем для нескольких СИД метод наиболее эффективен, так как повышается КПД.

Несмотря на простоту схемной реализации, этот метод требует больших затрат мощности, так как сопротивление компенсационного резистора R_2 стремится к нулю и не устраняет временную нестабильность СИД.

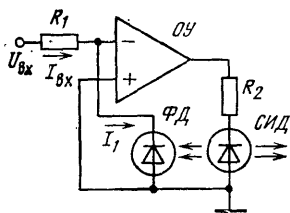


Рис. 1.10. Схема стабилизации интенсивности излучения светоизлучающего диода на операционном усилителе

Сущность его заключается в том, что у всех полупроводниковых элементов с изменением температуры изменяется прямое и обратное падение напряжения. Изменение этого напряжения можно использовать для термостабилизации. Недостатком этого метода является невозможность устранения временной нестабильности.

В простейшем случае стабилизацию интенсивности излучения СИД можно осуществить вводом обратной связи по оптическому каналу (рис. 1.9.д), используя операционный усилитель и один фотодиод [14]. На рис. 1.10 показана схема стабилизации, для которой можно записать

$$\frac{(I_{вх} - I_1) R_{вх} K - U_{с.д.}}{R_2 + r_d} = I_{с.д.},$$

где K — коэффициент усиления усилителя; I_1 — ток фотодиода; $I_{с.д.}$ — ток СИД; r_d — динамическое сопротивление СИД.

Фототок для фотодиода можно записать

$$I_1 = \gamma P_0,$$

где P_0 — мощность излучения СИД; γ — коэффициент преобразования.

Подставив значение фототока в выражение для тока СИД, после элементарных преобразований получим

$$P_0 = \frac{I_{вх}}{\gamma} \left(1 - \frac{R_2 + r_d}{a \gamma R_{вх} K} \right) - \frac{U_{с.д.} a}{a \gamma R_{вх} K + R_2 + r_d},$$

где a — коэффициент преобразования. Если произведение $a \gamma R_{вх} K$ достаточно большое, то

$$P_0 = I_{вх} / \gamma.$$

Т а б л и ц а 1.5

Тип СИД	Длина волны излучения, мкм	Ток СИД, мА	P_0 , с усиления фотодиода, мВт	$K_{0,с}$, мА/В	K , мА/В	β , В/мА	$K\beta$	δ , %	$\Phi_{Б5-50}$, %	$\delta/\delta_{Б5-50}$
АЛ307Г	0,56	7,9	100	1,29	1470	0,75	1100	0,0392	0,1192	3,03
АЛ102Г	0,69	7,0	10	1,12	700	0,91	610	0,0084	0,1292	15,34
АЛ107Б	0,96	13,7	0,1	2,57	157	0,35	58	0,0066	0,1519	23,06

Следовательно, в первом приближении мощность светового потока определяется только входным током.

Степень стабилизации предложенной схемы была проведена при работе с СИД АЛ307Г, АЛ102Г и АЛ107Б. Каждое измерение степени стабилизации схемы сопровождалось измерением стабильности потока СИД при питании его от стабилизатора тока Б5-50 при тех же значениях силы тока. Результаты измерений и соответствующие параметры схемы стабилизации мощности излучения приведены в табл. 1.5 [12].

Из полученных результатов следует, что данная схема позволяет более чем на порядок повышать временную стабильность потока излучения СИД.

1.4. ФОТОПРИЕМНИКИ И ИХ ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В устройствах с СИД возможно применять фотоприемники с внутренним или внешним фотоэффектом. Поскольку устройства с применением СИД в основном имеют малые габариты и низкое напряжение питания, то наиболее подходящими в качестве фотоприемников являются фоторезисторы, фотодиоды и фототранзисторы.

В фоторезисторах используются явления фотопроводимости, т. е. изменение электропроводности вещества под воздействием электромагнитного излучения; изготавливаются они на основе полупроводниковых материалов, обладающих как собственной, так и примесной фотопроводимостью.

К первой группе относятся фоторезисторы на основе соединений свинца ($PbSe$, PbS , $PbTe$) и индия ($InSb$, $InAs$). Ко второй группе относятся фоторезисторы на основе германия и кремния, легированных примесями различных элементов: золота, сурьмы, свинца, ртути, бора, кадмия, меди и др. В последнее время фоторезисторы стали разрабатывать также на основе тройных твердых растворов. Отличительной особенностью этих фоторезисторов является изменение спектральной чувствительности в широких пределах.

Основными характеристиками фоторезисторов являются вольт-амперные (ВАХ), спектральные, люкс-омические и люкс-амперные.

На рис. 1.11 приведены спектральные характеристики для некоторых фоторезисторов.

Вольт-амперные характеристики фоторезисторов обычно имеют линейный характер. Угол наклона зависит от освещенности, падающего на светочувствительную поверхность фоторезистора.

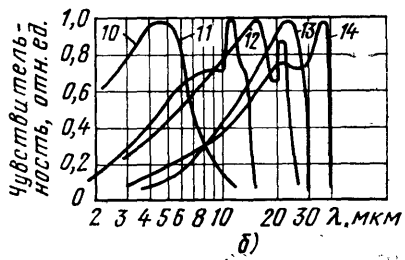
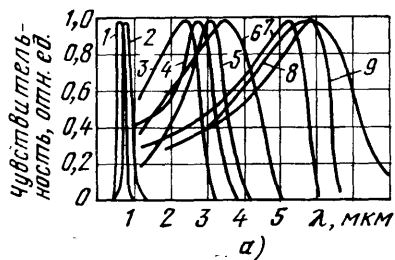


Рис. 1.11. Относительные характеристики спектральной чувствительности фоторезисторов на основе собственной (а) и примесной (б) фотопроводимости

Основными недостатками фоторезисторов являются высокая инерционность и сильная зависимость параметров от температуры. В общем случае практически все фоторезисторы обладают нелинейной люкс-амперной характеристикой, которую упрощенно можно представить в виде [15]

$$I_{\Phi} = c U^{\gamma} \Phi^{\alpha},$$

где I_{Φ} — фототок; c — постоянная, определяемая свойствами материала; U — напряжение, приложенное к фоторезистору; Φ — поток излучения, падающий на светочувствительную поверхность фоторезистора; γ, α — коэффициенты нелинейности.

Полный ток I_{Π} , протекающий через фоторезистор,

$$I_{\Pi} = I_{\Phi} + I_{\tau},$$

где I_{τ} — темновой ток, протекающий через неосвещенный фоторезистор; $I_{\tau} = U/R_{\tau}$; R_{τ} — темновое сопротивление.

Люкс-омическую характеристику принято описывать выражением

$$R_{\Phi} = R_0 \left(\frac{E_0}{E} \right)^{\gamma},$$

где R_0 — сопротивление фоторезистора при освещенности E_0 .

Инерционность, как отмечалось выше, является одним из недостатков, так как в устройствах с СИД в большинстве случаев используется импульсный режим работы. Инерционность характеризуется постоянными времени нарастания τ_n и спада τ_c фототока. При выборе фоторезистора по быстродействию принято считать, что длительность импульса излучения должно в три-четыре раза превышать постоянную времени нарастания, так как за это время фототок достигает своего максимального значения.

Сопротивление нагрузки можно определить по формуле

$$R_H = \sqrt{R_{\tau} R_{св}}.$$

Фотодиоды, в отличие от фоторезисторов, представляют собой пластину полупроводникового материала, внутри которой имеются области электронной (n -область) и дырочной (p -область) проводимостей, разделенные p - n переходами. У фотодиодов различают два режима работы: фотодиодный и фотогенераторный. При засветке фотодиода в фотодиодном режиме ток неосновных носителей возрастает, причем прирост этого тока значительно превосходит прирост тока основных носителей, т. е. отношение светового тока к темновому у фотодиодов намного превышает то же отношение у фоторезистора. Полный ток через фотодиод при обратном смещении

$$I = I_{\Phi} - I_s (e^{DU} - 1),$$

где I_{Φ} — фототок; I_s — обратный ток через p - n переход; U — напряжение на фотодиоде; D — коэффициент; $I_{\Phi} = S\Phi$; s — интегральная токовая чувствительность фотодиода.

В фотогенераторном режиме, т. е. без внешнего источника питания, роль p - n перехода сводится в основном к разделению пар носителей заряда (электронов и дырок), возникающих под действием света, в результате которого фотодиод вырабатывает фото-ЭДС. В режиме холостого хода напряжение на фотогенераторе пропорционально логарифму от светового потока:

$$U = \frac{1}{c} \ln \left(\frac{S\Phi}{I_s} + 1 \right).$$

Следует отметить, что инерционность фотодиода в режиме фотогенератора намного выше, чем в фотодиодном режиме. Спектральная характеристика фотодиода определяется материалом, на основе которого он изготовлен. Большинство фотодиодов изготавливается из германия и кремния. Спектральная характеристика кремниевых фотодиодов имеет максимум в области 0,8... 0,9 мкм. У германиевых фотодиодов максимум смещен до 1,2 мкм.

Фототранзисторы обладают свойством усиления фототока. Конструктивно фототранзистор представляет собой полупроводниковый прибор с тремя чередующимися областями электронной и дырочной проводимостей, снабженными выводами для включения в схему, причем базовая область доступна для воздействия на нее светом.

При необходимости фотоприемники с высокой инерционностью можно использовать для регистрации импульсов излучения малой длительности. Для этого в качестве нагрузки включается катушка индуктивности [16].

Глава 2

ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА АВТОМАТИКИ НА СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДАХ

2.1. УСТРОЙСТВА ИНДИКАЦИИ, ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ И ЗАЩИТЫ

Появление СИД позволило создать малогабаритные бесконтактные устройства переключения и защиты от перегрузок и короткого замыкания. Во время контроля технологических процессов иногда возникает необходимость бесконтактно дистанционного переключения (например, во взрывоопасных средах). Для этого можно применять дистанционные выключатели на основе СИД — фотоприемник с открытым оптическим каналом.

На рис. 2.1 приведены структурные схемы дистанционных выключателей, которые состоят из излучателя (СИД), фотоприемника (рис. 2.1, а, б) и световодов (рис. 2.1, в, г).

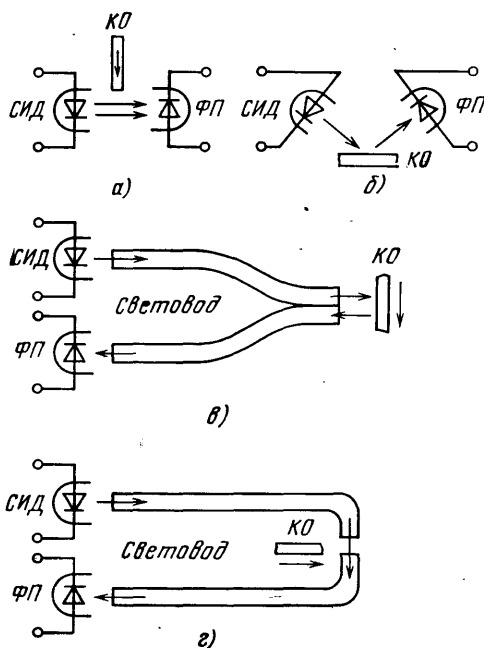


Рис. 2.1. Оптические схемы дистанционных выключателей

Принцип действия этих устройств основан на том, что контролируемый объект КО (узел или шторка) прерывает световой поток или, попадая между излучателем и фотоприемником, отражает световой поток, который далее падает на фотоприемник и преобразуется в фотоэлектрический сигнал. Применение переключателей со световодами целесообразно в тех случаях, когда по условиям технологических процессов излучатели и фотоприемники невозможно располагать непосредственно у контролируемого объекта, например при высоких температурах, в агрессивных средах и взрывоопасных помещениях [17].

Если между СИД и фотоприемником разместить управляемый оптический канал (УОК), изготовленный из призмы, то это устройство можно использовать в качестве бесконтактного переключателя [18].

Установлено, что луч отражается не в месте падения, а проходит некоторое расстояние в оптически менее плотной среде и выходит на некотором расстоянии от места падения под углом, равным углу отражения [19]. Тогда смещение луча

$$D = 0,5 n_2 \frac{\lambda_1}{\sqrt{\sin^2 \theta_1 - (n_2/n_1)^2}}, \quad (2.1)$$

где n_1, n_2 — показатели преломления материала УОК и внешней среды соответственно; θ — угол падения луча света на поверхность УОК; λ_1 — длина волны в среде. При этом открывается возможность влияния на световой поток, распространяющийся в УОК, путем воздействия на поверхностную волну, существующую за его границей [19]. Такой принцип управления световым потоком дает значительные преимущества по сравнению с емкостными и резистивными сенсорными переключателями.

На рис. 2.2 приведена схема бесконтактного переключателя [18], который содержит корпус 1 из светонепроницаемого материала, СИД 2, фототранзистор 3, призму 4 из оптически прозрачного материала, электропроводящее зеркальное покрытие 5, электрически связанное с дополнительным контактом 6, генератор 7, формирова- тель 8.

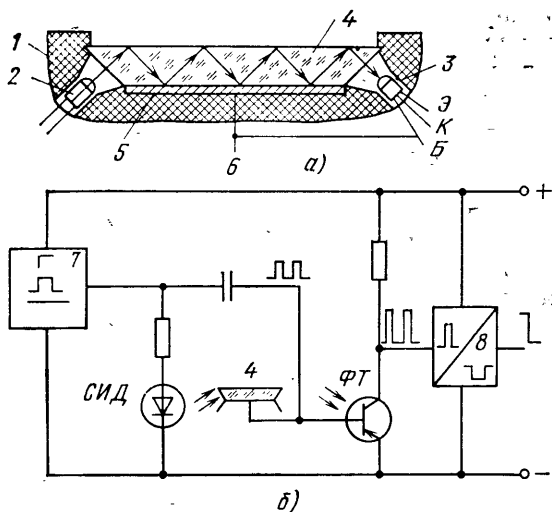


Рис. 2.2. Конструкция (а) и схема (б) оптоэлектронного сенсорного переключателя

Переключатель работает следующим образом. Переменное (импульсное) напряжение от генератора подается на СИД и через конденсатор на электропроводящее зеркальное покрытие 6, электрически связанное с базой фототранзистора; при этом поток света от СИД распространяется в призме, претерпевая полное внутреннее отражение.

При касании поверхности призмы нарушаются условия полного внутреннего отражения на границе раздела (призма — воздух), световой поток уменьшается, что приводит к запиранию фототранзистора. Одновременно образуется емкость между электропроводящим покрытием и диэлектриком, которым является оптически прозрачный материал призмы 4. Емкость шунтирует переменное напряжение, поступающее на базу фототранзистора, что приводит к запиранию последнего. Такое резервирование каналов позволяет увеличить глубину модуляции.

На рис. 2.3 приведена схема, являющаяся примером использования СИД в индикаторах напряжения аккумуляторов [20]. В состав индикатора входит делитель 1 контролируемого напряжения источника 2, состоящий из трех последовательно соединенных резисторов. Средний резистор 3 делителя включен между входами логического элемента 4 типа НЕ и управляемого генератора 5, причем выход элемента 4 подключен к входу другого управляемого генератора 6, а выходы генераторов соединены с входами логического элемента 7 типа И — НЕ, к выходу которого подключен светоизлучающий диод СД.

Управляемые генераторы 5 и 6 выполнены так, что при поступлении на вход 1 они запускаются и начинают выдавать прерывистый сигнал с частотой следования 4 и 1 Гц соответственно, а при поступлении 0 выдают 1.

Питание логических элементов и генераторов может осуществляться от контролируемого аккумулятора. Для этого в индикаторе могут быть использованы микросхемы серии К511 или К561, имеющие диапазоны питающих напряжений 10,8...22 и 3...15 В соответственно.

Предположим, что делитель напряжения 1 настроен так, что на его выводах А и Б потенциалы превышают входное пороговое напряжение переключения логических элементов при превышении напряжения аккумулятора 11 и 14 В соответственно. При этом индикатор работает следующим образом. Если в точках А и Б делителя 0, то генератор 6 возбужден, а генератор 5 остановлен и с его выхода разрешается прохождение импульсов генератора 6 через элемент 7 на СИД, который выдает прерывистый световой сигнал с пониженной частотой следования 1 Гц, что сигнализирует о уменьшении контролируемого напряжения ниже уровня 11 В.

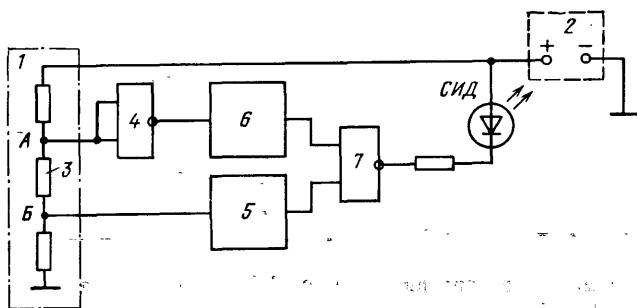


Рис. 2.3. Схема трехуровневого индикатора напряжения

Если в точках *A* и *B* соответственно 1 и 0, то генераторы 5 и 6 остановлены и сигналы 1 с их выходов отпирают логический элемент 7. При этом СИД включен непрерывно, что свидетельствует о том, что контролируемое напряжение находится в диапазоне 11 ... 14 В.

Если в точках *A* и *B* делителя 1 установлена 1, то генератор 5 возбужден, а генератор 6 остановлен и СИД выдает прерывистый световой сигнал с повышенной частотой следования 4 Гц, что сигнализирует о превышении контролируемого напряжения уровня 14 В.

Изменяя сопротивления резисторов делителя 1, можно устанавливать требуемые пороги контролируемых напряжений.

Таким образом, устройство позволяет производить трехуровневую индикацию напряжения аккумулятора с помощью одного элемента сигнализации за счет использования его состояний «Прерывисто с малой частотой» (1 Гц), «Включено» и «Прерывисто с большой частотой» (4 Гц).

2.2. ИМПУЛЬСНЫЕ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Использование СИД в импульсных устройствах позволяет значительно упростить различные схемы автоматики. Широко известные оптоэлектронные пары СИД — фоторезистор, или СИД — фотодиод, или СИД — фототранзистор уже сами по себе могут быть использованы как элементарные ключевые схемы [1, 21, 45]. В устройствах, где используются обычные полупроводниковые диоды, удобно заменить их СИД. При этом можно осуществить дополнительную оптическую связь в схеме или индикацию.

На основе элементов СИД — фотоприемник можно создавать генераторы и формирователи импульсов различной формы [23]. Наиболее часто используются генераторы пилообразного напряжения. Получить импульсы пилообразного напряжения можно с помощью RC-цепи, но при этом трудно обеспечить заданную линейность. Линеаризацию выходного пилообразного напряжения можно осуществить параметрическим методом и с помощью обратных связей.

Параметрическая линеаризация осуществляется за счет разряда (или заряда) хронизирующего конденсатора через токостаби-

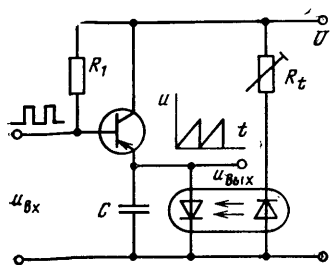


Рис. 2.4. Схема генератора пилообразного напряжения

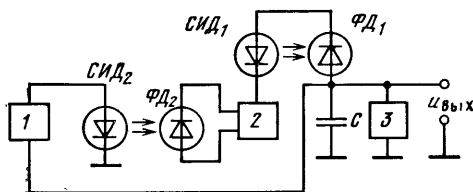


Рис. 2.5. Схема генератора пилообразного напряжения с отрицательной обратной связью

лизирующий двухполюсник, в качестве которого можно использовать фотодиод. На рис. 2.4 приведена схема генератора пилообразного напряжения с параметрической стабилизацией через тоcostабилизирующий фотодиод, оптически связанной с СИД. Основными недостатками этой схемы являются низкая экономичность и нелинейность сформированного пилообразного напряжения.

Линейность можно значительно повысить, применяя отрицательную связь (ООС). На рис. 2.5 приведена схема генератора пилообразного напряжения с ООС. Ток в цепи основного светоизлучившего диода СИД₁, подключенного к выходу усилителя 2, можно представить в виде суммы токов:

$$I_{с.л} = I_{с.до} + I_{фд2}, \quad (2.2)$$

где $I_{с.до}$ — постоянная составляющая тока СИД; $I_{фд2}$ — ток дополнительного фотодиода.

Учитывая, что дополнительный фотодиод оптически связан с дополнительным светоизлучающим диодом СД₂, который подключен через усилитель мощности 1 к выходу генератора, предыдущее равенство можно записать в виде

$$I_{с.л1} = I_{с.до} + m u_{вых}, \quad (2.3)$$

где m — коэффициент преобразования выходного напряжения в ток СИД₁.

С учетом равенства (2.2), которое нетрудно подобрать экспериментально:

$$K_{1m} = \frac{1}{R_y} + \frac{1}{R_{кр}} + G_{с.л2}, \quad (2.4)$$

где K_1 — коэффициент передачи оптопары; $R_y, R_{кр}$ — эквивалентные сопротивления управляемого ключа 3, получим напряжение на конденсаторе C

$$u_c = \frac{K_1 I_{с.до} + G_{с.л2} U_{п}}{C}, \quad (2.5)$$

где $U_{п}$ — напряжение питания; C — емкость конденсатора.

Используя обратные связи с фотодиодными и фоторезисторными фотоприемниками, можно получить широкий класс степенных функций [23].

Основными элементами автоколебательных импульсных схем являются конденсаторы, с помощью которых задается необходимая частота повторения импульсов. Для получения импульсов низкой частоты необходимы большие емкости. Увеличение емкости приводит к увеличению габаритов генератора. Получить периодическую последовательность прямоугольных импульсов можно, используя пары СИД — фотоприемник с включением в частотозадающую цепь.

На рис. 2.6. приведена схема [25] безреактивного оптоэлектронного мультивибратора. При подключении генератора к источ-

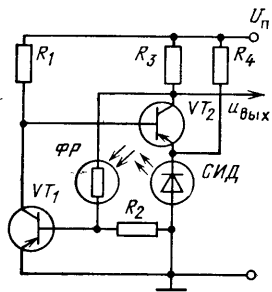


Рис. 2.6. Схема оптоэлектронного мультивибратора

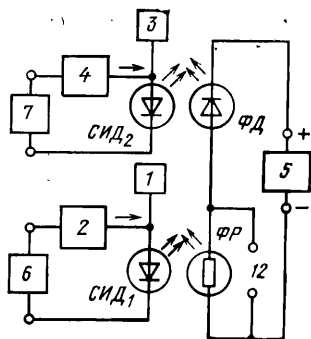


Рис. 2.7. Схема оптоэлектронного множительно-делительного устройства

нику питания транзистор VT_1 закрыт, так как темновое сопротивление фоторезистора ΦP велико, а транзистор VT_2 открыт. Через СИД, включенный в эмиттерную цепь транзистора VT_2 , протекает ток, вызывающий свечение СИД. Последний оптически связан с фоторезистором и поэтому сопротивление фоторезистора снижается с некоторой постоянной времени, зависящей от инерционных свойств фоторезистора и уровня излучения до тех пор, пока ток, протекающий через фоторезистор, не будет достаточен для отпирания транзистора VT_1 . Так как напряжение на коллекторе открытого транзистора VT_2 невелико, то для отпирания VT_1 необходимо значительное уменьшение сопротивления фоторезистора. Это приводит к снижению нижней границы частотного диапазона.

При открывании транзистора VT_1 отрицательное напряжение на его коллекторе уменьшается, и при некотором его значении начинается процесс запираания транзистора VT_2 . В этот момент (в момент вывода рабочих точек транзисторов на активный участок характеристик) вступает в действие гальваническая обратная связь через фоторезистор, которая приводит к быстрому переключению схемы. Транзистор VT_2 полностью запирается, а VT_1 отпирается до насыщения.

При включении СИД сопротивление фоторезистора возрастает до момента, пока ток смещения, задаваемый фоторезистором, не окажется недостаточным для насыщения транзистора VT_1 . Транзистор VT_1 запирается, а VT_2 отпирается, затем цикл повторяется.

Следует отметить, что частота генерируемых импульсов зависит от температуры фоторезистора (особенно в области относительно малых частот).

Большие возможности для построения различных нелинейных преобразователей и их моделей дает использование пары СИД — фотоприемник [26].

Схема такого устройства приведена на рис. 2.7 [27]. В ее состав входят: светоизлучающий диод СИД₁, выходной фоторезистор ΦP ,

источник постоянного смещения 1, преобразователь 2 напряжения в ток, фотодиод ФД; дополнительный источник постоянного смещения 3, дополнительный преобразователь 4 напряжения в ток, дополнительный светоизлучающий диод СИД₂ и источник питания 5.

Светоизлучающий диод СИД₂, электрически соединенный с преобразователем 4 напряжения в ток, и фотодиод ФД являются первой оптопарой; СИД₁, соединенный с преобразователем 2 напряжения в ток, и фоторезистор ФР являются второй оптопарой. Оба СИД подключены к источникам постоянного смещения (I'_0 и I''_0) и источникам питания 6 и 7. Фотодиод и фоторезистор включены последовательно и подсоединены к источнику питания 5 ($U_{п}$).

Работа устройства основана на линейной зависимости тока фотодиода от падающего потока света независимо от напряжения питания. Ток фотодиода

$$I_{фд} = K_1 I_1,$$

где K_1 — коэффициент передачи первой оптопары.

Проводимость фоторезистора определяется падающим световым потоком и может быть записана как

$$G_{фр} = K_2 I_2,$$

где K_2 — коэффициент передачи второй оптопары.

Выходное напряжение

$$u_{вых} = I_{фд} R_{фр} = \frac{I_{фд}}{G_{фр}} = \frac{K_1 I_1}{K_2 I_2} = K \frac{I_1}{I_2},$$

где K — коэффициент передачи устройства.

Как видно из последнего выражения, выходной сигнал пропорционален частному от деления токов I_1 и I_2 . Следовательно, если преобразователи напряжения в ток 2 и 4 преобразовывают входные напряжения u_1 и u_2 в пропорциональные им токи I_1 и I_2 , то устройство выполняет функции делителя. Если преобразователь напряжения в ток 2 вырабатывает ток, по величине обратно пропорциональный напряжению u_2 , то устройство является умножителем.

Выходной сигнал, пропорциональный частному или произведению входных величин, снимается с фоторезистора.

2.3. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Применение СИД в преобразователях механических величин значительно повышает надежность, быстродействие и обеспечивает высокие чувствительность и помехозащищенность.

На основе СИД можно создать малогабаритные измерители частоты вращения, датчики давления, уровнемеры и преобразователи линейных и угловых перемещений.

На рис. 2.8 приведена схема устройства для измерения частоты вращения вала. Работа устройства основана на стробоскопическом эффекте. Светоизлучающий диод СИД питается от генератора импульсов 1 с регулируемой частотой. Частота генерато-

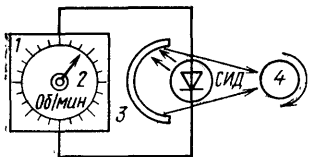


Рис. 2.8. Стробоскопический измеритель частоты вращения:

1 — генератор с регулируемой частотой; 2 — движок; 3 — зеркальный отражатель; 4 — контролируемый объект

Непрерывный бесконтактный контроль частоты вращения различных электрических машин можно осуществлять, если в вал машины встроить СИД и электрически связать его с несколькими витками катушки, намотанных на якорь машины. При вращении якоря через СИД протекает пульсирующий ток, частота которого зависит от частоты вращения ротора машины. Этот ток вызывает пульсирующий поток, который принимается фотоприемником и преобразуется в пульсирующий электрический сигнал. Измерив частоту сигнала, можно определить частоту вращения ротора машины.

Применение принципа нарушения полного внутреннего отражения позволяет создавать простые и надежные в эксплуатации датчики давления [11, 28]. Конструкция такого датчика приведена на рис. 2.9. Чувствительный элемент датчика представляет собой стеклянную призму и прикрепленную к гипотенузной грани призмы стеклянную мембрану, разделенные кольцевой прокладкой толщиной около 1 мкм.

Принцип действия датчика заключается в следующем. Если зазор между стеклянной мембраной 6 и верхней гранью призмы 7 примерно равен длине волны используемого излучения, то весь свет от СИД, проходя по световодам 1, испытывает полное внутреннее отражение на верхней грани призмы и попадает на фото-

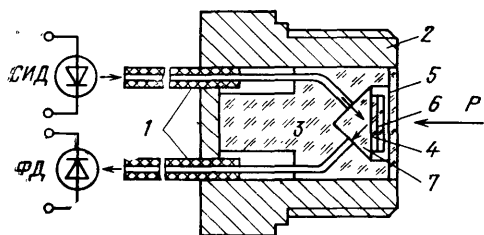
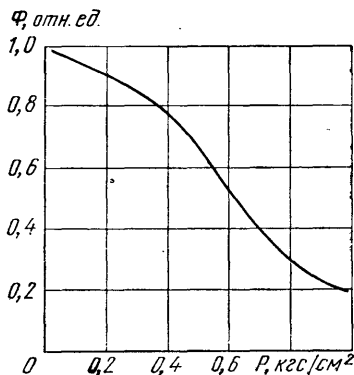


Рис. 2.9. Конструкция датчика давления:

1 — световоды; 2 — корпус; 3 — капсула; 4 — прокладка; 5 — разделитель; 6 — мембрана; 7 — призма

Рис. 2.10. Зависимость отраженного светового потока от давления



приемник ФД. При подаче давления мембрана прогибается, уменьшая зазор, что приводит к частичному нарушению полного внутреннего отражения. Зависимость отраженного светового потока от прогиба мембраны представляет собой изменение отражательной способности на границе двух оптических сред, разделенных тонким зазором переменной величины. Глубина модуляции излучения зависит от конструктивных параметров датчика давления [11]:

$$M = \left[1 - \exp\left(-\beta \frac{\kappa^2}{d^2}\right) \right] \frac{d_b^2}{d^2} - RS_{min},$$

где S_{min} — величина шероховатости поверхности мембраны и грани призмы; d_b — диаметр волновых световодов; κ — диаметр пятна оптического контакта; R — отражательная способность; β — эмпирический коэффициент; d — длина пути осевых лучей от СИД до фотоприемника.

Расчет статических характеристик датчика включает в себя (кроме расчета модуляционных характеристик) расчет упругого элемента. Уравнение упругого элемента выглядит так [11]:

$$P = W \frac{16}{3(1-\mu^2)} E \left(\frac{h_p^3}{R^4} - \frac{h_m^3}{R^2 r^2} \right),$$

где P — перепад давления; E — модуль упругости мембраны; μ — коэффициент Пуансона; h_p, h_m — толщины разделителя и мембраны; r, R — радиусы разделителя и мембраны; W — перемещение упругого элемента.

В качестве излучателя в этом датчике использовался СИД типа АЛ107, а в качестве фотоприемника — кремниевый фотодиод.

Стабильность характеристик датчика давления определяется в основном стабильностью излучателя и фотоприемника. Стабилизацию светового потока можно осуществить описанными в гл. 1 методами. На рис. 2.10 приведена зависимость светового потока от величины давления для этого датчика, полученная экспериментально [11].

По принципу нарушения полного внутреннего отражения можно построить также оптоэлектронный уровнемер. В оптоэлектронном уровнемере с открытым протяженным световодом, изображенном на рис. 2.11, а, нарушение полного внутреннего отражения происходит за счет контакта с контролируемой жидкостью [11].

По принципу нарушения полного внутреннего отражения можно построить также оптоэлектронный уровнемер. В оптоэлектронном уровнемере с открытым протяженным световодом, изображенном на рис. 2.11, а, нарушение полного внутреннего отражения происходит за счет контакта с контролируемой жидкостью [11].

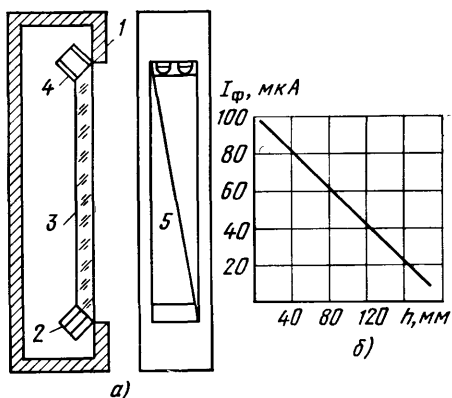


Рис. 2.11. Конструкция уровнемера жидкости (а) и зависимость фототока от уровня жидкости (б):

1 — корпус; 2 — светоизлучающий диод; 3 — световод; 4 — фотоприемник; 5 — отражающая маска

Уровнемер состоит из плоскопараллельного световода 3 со скошенными торцами, через которые осуществляется ввод светового потока от СИД 2 и вывод его из световода на фотоприемник 4. Зависимость фототока от уровня жидкости определяется из выражения [11]

$$I_{\Phi} = \Phi_0 \frac{S}{F} (1 - R_{\Phi})^2 e^{-\varepsilon P} R^N A,$$

где S — чувствительность фотоприемника; Φ_0 — световой поток СИД; F — площадь световода; A — коэффициент потерь на оптическом пути; R_{Φ} — коэффициент отражения светового потока от торцов световода; ε — коэффициент ослабления светового потока от границы раздела световод — жидкость; N — число отражений светового потока от поверхности световода; P — длина световода.

Число отражений зависит от угла скоса торцов φ_2 световода, уровня жидкости h и толщины световода d :

$$N = h/2 d \operatorname{tg} \varphi_2.$$

Одним из недостатков уровнемера является нелинейная зависимость фототока от уровня жидкости. Для линеаризации характеристики уровнемера на рабочую поверхность световода наносят отражающую маску, кривизна границы которой определяется по формуле [11]

$$f(h) = b \left[\frac{C}{R^{N_0}} + \frac{(R^{N_0} - C)(1 - R^{N'})}{(1 - R^{N_0}) R^{N_0}} \right],$$

где b — ширина световода; C — коэффициент, равный Φ_{\min}/Φ ; N_0, N — число отражений от всей длины L световода и от границы раздела световод — воздух соответственно:

$$N_0 = \frac{L}{2 d \operatorname{tg} \varphi_2}; \quad N = \frac{L - h}{2 d \operatorname{tg} \varphi_2}.$$

На рис. 2.11,б приведена зависимость фототока от уровня жидкости.

Реализовать уровнемер жидкости можно также на волоконно-оптическом световоде, имеющем изгиб [29]. Радиус изгиба определяется из соотношения

$$\frac{n_0 + 1}{n_0 - 2} r < R < \frac{n_c + n_0}{n_c - n_0} \rho,$$

где n_0 — показатель преломления материала оболочки волокна; n_c — показатель преломления материала сердцевинки волокна; r — внешний радиус оболочки волокна; ρ — радиус сердцевинки волокна.

Принцип действия этого уровнемера состоит в следующем. Оптическое излучение от источника поступает в волоконный световод и распространяется по его сердцевинке. Чтобы интенсивность этого излучения зависела от окружающей среды, необходимо вывести его из сердцевинки в оболочку. Это достигается крутым изгибом волоконного световода по радиусу 1—2 мм. Излучение, вышедшее в оболочку в области изгиба, падает на границу раздела оболочка — окружающая среда. Если окружающей средой является воздух, то излучение отражается от границы раздела и возвращается в сердцевинку. Если же изгиб погружен в жидкость, то оптическое излучение частично или полностью (в зависимости от радиуса изгиба) покидает световод. Это приводит к уменьшению интенсивности светового потока, который регистрируется фотоприемником.

Достоинствами волоконно-оптических уравнимеров являются высокая точность и помехозащищенность, а также широкий температурный диапазон работы и стойкость к химически активным веществам. Монохроматичность излучения СИД и хорошее согласование с фотоприемниками позволяют применять их в качестве источника света в устройствах с использованием явления дифракции. При наличии лампы накаливания в таких устройствах из-за широкого спектрального диапазона излучения дифракция на растре и хроматические аберрации оптической системы увеличивают постоянную засветку фотоприемника и уменьшают полезный сигнал [30]. Это можно объяснить тем, что часть потока лампы из-за аберраций создает лишь постоянную засветку, а в образовании полезного сигнала не участвует.

Использование СИД в таких устройствах позволяет значительно улучшить их эксплуатационные характеристики.

В других преобразователях нарушение условий полного внутреннего отражения происходит за счет изменения кривизны световода. Механическое воздействие в них вызывает либо плавное изменение кривизны, либо микроизгибы [46]. При изгибе световода нарушается условие полного внутреннего отражения для мод высшего порядка с характерным углом между направлением распространения и осью световода. Энергия, соответствующая этим модам, выходит из световода на изогнутом участке через боковую поверхность, в результате чего пропускание света уменьшается. Такие преобразователи представляют собой изогнутый световод, закрепленный между неподвижными и перемещающимися частями объекта. При перемещении объекта изменяется радиус кривизны световода, что вызывает амплитудную модуляцию излучения, прошедшего по световоду к фотоприемнику, по закону перемещения контролируемого объекта.

Основными преимуществами оптоэлектронных преобразователей на основе волоконной оптики являются возможность подведения света только к контролируемой точке и установки электронных элементов в удаленном месте, что важно при измерениях во взрыво- и пожароопасных агрессивных средах, при наличии внешних электромагнитных полей, в труднодоступных местах.

Измерительные преобразователи на волоконных световодах представляют относительно новую область измерительной техники. Многие эффекты в световодах, которые можно использовать для измерения различных физических величин, еще недостаточно изучены, в связи с чем для ряда преобразователей не существует строгой теории [46] для оценки их параметров и возможности улучшения метрологических характеристик. Работы в этом направлении могут привести к качественному скачку, дающему широкие возможности применения цепи СИД — световод — фотоприемник в измерительных устройствах.

В условиях промышленного контроля важное значение имеет измерение перемещений, мгновенной скорости и ускорения.

Структурная схема цифрового фотоэлектрического датчика мгновенной скорости и ускорения приведена на рис. 2.12. [64].

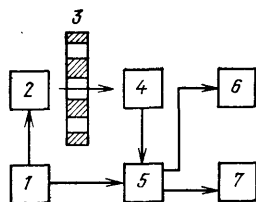


Рис. 2.12. Структурная схема фотоэлектрического датчика мгновенной скорости и ускорений:

1 — генератор; 2 — светозлучающий диод; 3 — кодовая линейка; 4 — фотодиод; 5 — блок обработки фотоэлектрического сигнала; 6, 7 — блоки цифрового отсчета мгновенной скорости и ускорений соответственно

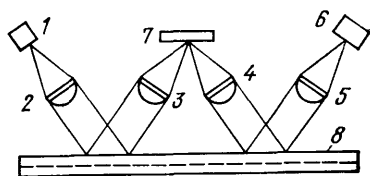


Рис. 2.13. Преобразователь линейных перемещений:

1 — светозлучающие диоды; 2—5 — линзы; 6 — фотоприемники; 7 — зеркало; 8 — измерительная линейка

Устройство измерения скорости работает следующим образом. Диод излучает световые импульсы, которые проходят через передающий светодиода кодовую линейку и далее через приемный световод попадает на фотодиод ФД. Кодовая линейка имеет равномерно нанесенные прорези с шагом h . При движении кодовой линейки приемные световоды освещаются или заменяются и на фотодиод проходят пакеты световых импульсов. Каждый пакет импульсов соответствует перемещению в одну дискретность кодовой линейки. Чем больше скорость кодовой линейки, тем меньше число импульсов в пакете.

Действительно, для скорости объекта v_x при шаге кодовой линейки h время прохождения одного шага

$$t_x = h/v_x.$$

Если период частоты генератора импульсов равен T_0 , то число импульсов в пакете, соответствующих мгновенной скорости объекта,

$$N_x = t_x/T_0 = h/T_0 v_x,$$

т. е. обратно пропорционально v_x . Для $h=1$ мм, частоты генератора $f=10^4$, $T_0=10^{-4}$ с

$$v_x = \frac{h}{T_0} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{10^{-4}} = 10 \text{ м/с.}$$

В цифровом датчике можно использовать микросхемы серии К155, светозлучающие диоды АЛ107 и кремниевые фотодиоды.

В станкостроении и приборостроении широкое применение находят растровые фотоэлектрические устройства для измерения линейных и угловых перемещений. Применение СИД в этих устройствах обусловлено их высоким быстродействием. В общем случае растровые преобразователи линейных перемещений состоят из измерительной и индикаторной линеек, на которые нанесены растры с одинаковым шагом. Число участков растра на индикаторной линейке соответствует числу фаз фотоэлектрического фазовраща-

ля n , причем участки пространственно сдвинуты относительно друг друга на $1/n$ шага растра.

В зависимости от числа используемых СИД растровые преобразователи могут быть построены по трехфазной [74, 75] и четырехфазной схемам [76, 77]. Для каждого участка индикаторного растра n устанавливаются n светодиодов и соответственно n фотоприемников. Погрешность измерения, обусловленную различием параметров фотоприемников, можно исключить, используя один фотоприемник [74], на который с помощью линз собирается световой поток со всех участков растра. Питание СИД осуществляется от источника синусоидальных напряжений сдвинутых по фазе на $360/n$.

Измеряемое перемещение находится как сумма целого числа пройденных шагов растра и доли шага, определяемой по фазе суммарного сигнала с выходов фотоприемников. Для снижения потребляемой мощности устройства на СИД можно подавать импульсы высокой частоты с большой скважностью, промодулированных по амплитуде синусоидальным напряжением низкой частоты.

В [79] описан преобразователь линейных перемещений с дискретностью 1 мкм, имеющий зазор между измерительной линейкой и индикаторной головкой 5 мм и допускающий изменение этого зазора на $\pm 0,5$ мм. Схема преобразователя приведена на рис. 2.13. Источники света 1 (четыре СИД), расположенные в фокальной плоскости линзы 2, освещают участок измерительной линейки площадью 1 см². Оптическая проекционная система этого устройства состоит из линз 3, 4 и зеркала 7. В фокусе линзы 5 расположены четыре фотоприемника 6. Изменив наклон зеркала 7, можно получить необходимый шаг муаровых полос.

На рис. 2.14 приведена схема преобразователя круговых перемещений [79], работа которого сводится к следующему. Свето-

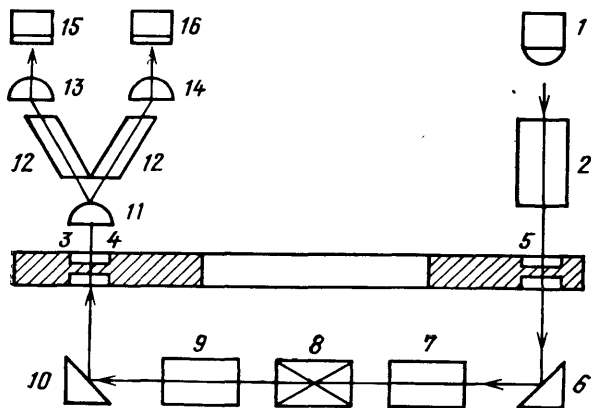


Рис. 2.14. Преобразователь круговых перемещений:

1 — светоизлучающий диод; 2 — конденсор; 3 — лимб; 4, 5 — растровые дорожки; 6, 10 — объективы; 11, 13, 14 — линзы; 12 — световоды; 15, 16 — фотоприемники

излучающий диод 1 с помощью конденсора 2 освещает участок лимба 3. На лимб нанесены две растровые дорожки 4 и 5 каждая по 10 000 штрихов, причем штрихи дорожек сдвинуты на 1/4 шага относительно друг друга. С помощью призм 6, 10, объективов 7, 9, призмы 8 один участок лимба проецируется на другой. Через фокусирующую линзу 11, СИД 12, линзы 13, 14 световые потоки попадают на фотоприемники 15 и 16.

Для снижения требований к точности нанесения раstra и получения значительного масштаба преобразования круговых перемещений можно использовать оптическую систему с большим увеличением или периодические структуры с теньевыми свойствами.

При использовании трех периодических решеток [80] световой поток, проходя через первую решетку с пространственной частотой f_1 , диффузно освещает вторую решетку с пространственной частотой f_2 , отстоящую от первой на расстоянии h . Если направления штрихов решеток совпадают, то на расстоянии

$$H = \frac{f_1}{f_2} (h + v)$$

от второй решетки возникает ее теньевая картина, имеющая пространственную частоту

$$f_3 = \frac{h}{h + v} f_2.$$

При смещении второй решетки на d картина смещается на отрезок

$$D = d \left(1 + \frac{f_1}{f_1 - f_2} \right) = \frac{f_2 d}{f_2 - f_1}.$$

В зависимости от пространственной частоты и углового положения третьей решетки, совмещаемой с теньевым изображением второй решетки, получают абтюрационное, муаровое или нониусное сопряжение. При $f_1 = f_2$ теньевая картина не образуется. При $f_2 = 2f_1$, $v = h$ и $f_3 = f_1$ можно построить устройство, применив только две решетки, одна из которых работает в отраженном свете, а другая — в проходящем. Теньевая картина образуется при наблюдении следующих условий:

$$h = \left(N - \frac{1}{2} \right) \lambda f_1 f_2,$$

где N — целое число; λ — длина волны источника света. При использовании СИД с длиной волны 0,94 мкм, измерительной решетки с шагом 200 мкм, индикаторной решетки с шагом 100 мкм величина зазора составляет 20 мм.

УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ И ИЗМЕРЕНИЯ
НА СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДАХ3.1. КЛАССИФИКАЦИЯ И ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ
УСТРОЙСТВ КОНТРОЛЯ И ИЗМЕРЕНИЯ
НА СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДАХ

Такие преимущества СИД, как быстроедействие, значительная монохроматичность спектральных характеристик, малые габариты, высокая надежность, 100%-ная модуляция светового потока посредством тока, протекающего через СИД, и другие, позволяют разрабатывать различные устройства для контроля и измерения параметров широкого класса веществ и материалов.

Оптоэлектронные устройства можно классифицировать по следующим основным признакам, лежащим в основе принципа построения этих устройств: виду измеряемой физической величины; числу используемых участков спектра или СИД с различными длинами волны спектральных характеристик; числу используемых кювет или СИД, излучающих на одной длине волны (каналы); способу преобразования измеряемого параметра в фотоэлектрический сигнал; способу обработки фотоэлектрического сигнала.

По виду измеряемой физической величины оптоэлектронные измерительные устройства (ОИУ) подразделяются на фотометры и анализаторы состава веществ и материалов.

По числу используемых участков спектра ОИУ подразделяются на одноволновые, двухволновые и многоволновые, а по числу каналов (числу используемых кювет или СИД, излучающих на одной длине волны) — на одноканальные, двухканальные и многоканальные устройства.

Понятия «волна» и «канал» очень важны для структурного анализа, поэтому для различения этих понятий введем обозначения: В — волна, К — канал, М — многоканальный, многоволновый, а цифрами перед буквами обозначим число длин волн и каналов. Например: 2В1К — двухволновая одноканальная структурная схема.

В табл. 3.1 приведены основные (базовые) структурные схемы устройств на СИД согласно приведенной классификации. Математические модели этих схем составлены согласно основному закону фотометрии — закону Бугера — Бера, где ИП — источник питания СИД; СИД — светоизлучающий диод; ФП — фотоприемник; БОФС — блок обработки фотоэлектрического сигнала; РП — регистрирующий прибор; Φ_{01} и Φ_{02} — потоки излучения на опорной и измерительной длинах волн, излучаемых СИД, I_1 , I_2 — токи светоизлучающих диодов; Φ_1 и Φ_2 — потоки, прошедшие через контролируемый объект (КО) и эталонный объект (ЭО); K_1 , K_2 , K_3 и K_4 — коэффициенты; m_1 — неинформативный параметр контро-

Таблица 3.1

Обозначение	Структурная схема	Математическая модель
1В1К		$\Phi_1 = \Phi_0 e^{-\kappa m_2}; \quad \Phi_{01} = K_{с.д} I_0;$ $u = S e^{-\kappa m_2} a$
1В2К		$\Phi_1 = K_{с.д1} I_1 e^{-\kappa_1 m_1}; \quad \Phi_1 = K_{с.д1} I_1;$ $\Phi_2 = K_{с.д2} I_2 e^{-\kappa_2 m_2}; \quad u = S \frac{\Phi_1}{\Phi_2}$
2В2К		$\Phi_1 = K_{с.д1} I_1 e^{-\kappa_1 m_1}; \quad K_{с.д1} I_1 = \Phi_{01};$ $\Phi_2 = K_{с.д2} I_2 e^{-\kappa_1 m_1} e^{-\kappa_2 m_2};$ $I_2 K_{с.д2} = \Phi_{02}; \quad u = S e^{\kappa_2 m_2}$
2В2К		$\Phi_1 = \Phi_{01} e^{-\kappa_1 m_1}; \quad \Phi_2 = \Phi_{02} e^{-\kappa_1 m_1} e^{-\kappa_2 m_2};$ $\Phi'_1 = \Phi'_{01} e^{-\kappa_1 m_1};$ $\Phi'_2 = \Phi'_{02} e^{-\kappa_1 m'_1} e^{-\kappa_2 m'_2}$
МВ1К		$\Phi_1 = K_{с.д1} I_1 e^{-\kappa_1 m_1}; \quad K_{с.д1} I_1 = \Phi_{01};$ $\Phi_2 = K_{с.д2} I_2 e^{-\kappa_2 m_2}; \quad K_{с.д2} I_2 = \Phi_{02};$ $\Phi_3 = K_{с.д3} I_3 e^{-\kappa_3 m_3}; \quad K_{с.д3} I_3 = \Phi_{03}$

лируемого объекта (масса, плотность и т. п.); m_2 — значение контролируемого параметра.

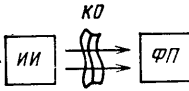
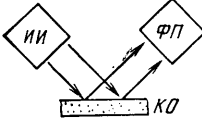
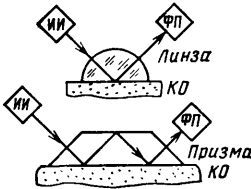
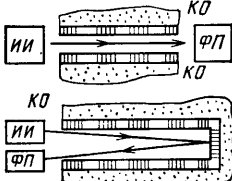
При составлении математических моделей считаем, что зависимость интенсивности излучения от тока имеет линейный характер, что справедливо для большинства типов СИД.

По способу преобразования измеряемого или контролируемого параметра в фотоэлектрический сигнал различают устройства не посредственной оценки и устройства с функциональной разверткой потока излучения СИД по закону, обратному или совпадающем с законом поглощения [31].

По способу обработки фотоэлектрического сигнала различают схемы непосредственной оценки, дифференциальные, автоматические равновесные с компенсацией измерительного и опорного каналов; логометрические с частотным выходом и время-импульсные схемы.

Принцип преобразования контролируемого параметра в фотоэлектрический сигнал основан на следующем. Контролируемый объект облучают потоком излучения (для одноволновых, одноканальных структурных схем) или двумя потоками на разных дли

Таблица 3.2

Оптическая схема	Область применения
	<p>Прозрачные в диапазоне 0,75...2,5 мкм материалы: хлопок, шерсть, бумага, ткани, нителента, воздушная среда, жидкости, бензин</p>
	<p>Сыпучие и волокнистые материалы, отражающие ИК-излучение в диапазоне 0,75...2,5 мкм: ксилит, минеральные удобрения, сахар, хлопок, ткани и др.</p>
	<p>Жидкости, сыпучие и волокнистые материалы, нефть и нефтепродукты, хлопок и др.</p>
	<p>Бурты хлопка, зерно, сыпучие материалы, сружающая среда, хлопковые семена, хранилища различных продуктов и др.</p>

Примечание. ИИ — источник излучения; КО — контролируемый объект.

нах волн, одна из которых лежит на полосе поглощения контролируемым параметром, другая — вне полосы, принимают долю интенсивности излучения, прошедшего или отраженного от поверхности объекта, преобразуют в электрический сигнал, пропорциональный значению контролируемого параметра. В табл. 3.2 приведены различные оптические схемы преобразователей и области их применения.

Таким образом, для построения устройств контроля и измерения на СИД прежде всего необходимы сведения об оптических свойствах контролируемого объекта. По спектральным характеристикам в зависимости от вида измерения выбирают соответствующий полосам поглощения СИД и необходимый режим его работы.

Для обеспечения максимальной избирательности полосы поглощения контролируемого параметра должны максимально перекрываться спектральными характеристиками СИД. Далее подбирают фотоприемник и согласуют его с устройствами усиления и обработки сигнала.

3.2. ОДНОВОЛНОВЫЕ УСТРОЙСТВА НА СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДАХ (ФОТОМЕТРЫ)

Одноволновые устройства на СИД могут быть построены по одноканальной и двухканальной схемам. Они применяются для определения качественных и количественных параметров твердых веществ и материалов (например, для определения плотности, массы и т. п.) или анализа оптических свойств жидкостей и газов.

В одноволновых устройствах непосредственной оценки процесс измерения сводится к следующему. Контролируемый объект облучают потоком Φ_{01} . Тогда на основе закона Бугера — Бера

$$\Phi_1 = \Phi_{01} e^{-K_1 m_1}, \quad (3.1)$$

где K_1 — коэффициент; m_1 — контролируемый параметр (масса, плотность и т. п.).

Разложив в степенной ряд это выражение, получим

$$\Phi_1 = \Phi_{01} (1 - K_1 m_1 + K_1^2 m_1^2 \dots). \quad (3.2)$$

Пренебрегая членами высшего порядка, получаем приближенную зависимость контролируемого параметра

$$m \approx \frac{1}{K} \left(4 - \frac{\Phi_1}{\Phi_{01}} \right). \quad (3.3)$$

Но аппроксимация выходной характеристики линейной функцией вносит погрешность в результаты измерения, которая не превышает модуля выражения

$$\delta = K_1^2 m_1^2. \quad (3.4)$$

Эта погрешность имеет мультипликативный характер, так как зависит от измеряемого параметра. Для уменьшения этой погреш-

ности обычно сужают диапазон измерения, и для линеаризации применяют логарифмирующие устройства, что также приводит к уменьшению точности (появляются инструментальные погрешности).

Помимо перечисленных факторов на результат измерения влияет также нелинейность световой характеристики фотоприемника так как зависимость фототока от потока излучения имеет нелинейный характер [15]:

$$I_{\Phi} = c U^{\alpha} \Phi^{\beta}, \quad (3.5)$$

где U — напряжение питания фотоприемника; Φ — световой поток; α, β — показатели степени; c — постоянная величина.

Таким образом, в приборах непосредственной оценки возникают погрешности из-за нелинейности световых характеристик фотоприемника и нелинейной зависимости фотоэлектрического сигнала от контролируемого параметра. Действительно, если подставить (3.1) в (3.5), то с учетом нагрузочного резистора фотоприемника

$$U = S I_{\Phi} R_{\text{н}} = c S R_{\text{н}} U^{\alpha} (\Phi_{01} e^{-K_1 m_1})^{\beta}, \quad (3.6)$$

где S — чувствительность фотоприемника; $R_{\text{н}}$ — сопротивление нагрузочного резистора.

Скомпенсировать эти погрешности можно с помощью функциональной развертки, которую осуществляют со стороны фотоприемника или со стороны излучателя.

Примером одноволнового одноканального устройства с функциональной разверткой со стороны фотоприемника может служить концентратометр, структурная схема которого приведена на рис. 3.1 [32]. В начальный момент ключ 2 находится в открытом состоянии и светоизлучающий диод СИД, питающийся от генератора тока 1, излучает световой поток. Этот световой поток проходит через контролируемую среду 4 и преобразуется фотодиодом ФД в фототок, а операционный усилитель 3 преобразует фототок в напряжение.

При превышении выходного напряжения усилителя установленного порогового уровня ключ 2 закрывается и излучение диода прекращается. При этом напряжение на входе усилителя не исчезает мгновенно, а спадает по экспоненциальному закону с постоянной времени, эквивалентной входной емкости и сопротивлению усилителя до определенного значения, при котором сигнал на входе усилителя 3 уменьшается до

$$U_2 = U_1 \exp(-t/\tau), \quad (3.7)$$

где U_1 — напряжение срабатывания ключа; t — время, в течение которого включен СИД; τ — постоянная времени.

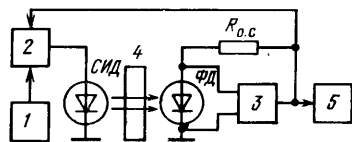


Рис. 3.1. Структурная схема концентратомера:

1 — генератор тока; 2 — пороговый ключ; 3 — операционный усилитель; 4 — контролируемая среда; 5 — блок цифровой индикации; $R_{\text{обс}}$ — резистор отрицательной обратной связи

В результате в системе возникают незатухающие колебания. Временной интервал на выходе усилителя равен логарифму отношения U_1/U_2 :

$$t = \tau \ln (U_1/U_2). \quad (3.8)$$

Так обеспечивается линейная зависимость между периодом повторения импульсов и концентрацией.

Существенным недостатком этого устройства является отсутствие компенсации временной и температурной нестабильности СИД.

В одноволновых одноканальных устройствах с функциональной разверткой [31] со стороны излучателя также удается скомпенсировать погрешности, присущие приборам непосредственной оценки. Действительно, если контролируемый объект облучать потоком СИД Φ_0 , то в общем случае прошедший поток

$$\Phi = \Phi_0 \lambda (x), \quad (3.9)$$

где $\lambda(x)$ — некоторая функция контролируемого параметра. На практике часто функция $\lambda(x)$ аппроксимируется показательной или степенной функцией.

Если поток излучения СИД сделать переменным во времени, то получим

$$\Phi (t) = \Phi_0^* \varphi (t) \lambda (x), \quad (3.10)$$

где Φ^* — некоторое постоянное значение потока; $\varphi(t)$ — временная функция изменения потока.

Для указанного класса функций $\lambda(x)$ и при выборе функции $\varphi(t)$, совпадающей с $\lambda(x)$ или обратной ей, функция $\Phi(t)$ может быть приведена к видам:

$$\begin{aligned} \Phi (t) &= \Phi_0^* \lambda (x + t); \\ \Phi (t) &= \Phi_0^* \lambda (x - t); \\ \Phi (t) &= \Phi_0^* \lambda (x/t); \\ \Phi (t) &= \Phi_0^* \lambda (xt). \end{aligned} \quad (3.11)$$

При измерении, например, диаметра отверстия прошедший через отверстие поток излучения

$$\Phi = K^* \Phi_0 d^2, \quad (3.12)$$

где K^* — коэффициент пропорциональности; d — измеряемый диаметр.

Если изменять Φ_0 по закону $\Phi_0(t) = \Phi_0^* t^2$, то предыдущее выражение примет вид

$$\Phi (t) = K^* \Phi^* (dt)^2. \quad (3.13)$$

Если изменять Φ_0 по закону $\Phi_0(t) = \Phi_0^* \frac{1}{t^2}$, то получим

$$\Phi (t) = K^* \Phi_0^* (d/t)^2. \quad (3.14)$$

Настроив измерительную систему на некоторый постоянный уровень $\Phi_0(t)$, получим следующую связь между диаметром и временем, за которое контролируемый сигнал достигнет заданного порогового уровня: $dt=c_1$; $d/t=c_2$, где c_1 и c_2 — некоторые постоянные.

Следовательно, диаметр будет равен соответственно $d=c_1/t$; $d=tc_2$, т. е. использование управляемого источника излучения (диода) с соответствующим законом изменения потока во времени позволяет использовать фотоприемник и измерительный тракт в пороговом режиме, что существенно повышает точность измерения.

При измерении плотности или массы объекта прошедший через объект поток излучения подчиняется закону Бугера — Ламберта, и если изменять облучающий поток во времени по экспоненциальному закону с постоянной времени τ

$$\Phi_0(t) = \Phi_0^* e^{t/\tau}, \quad (3.15)$$

где $\Phi_0^* = \text{const}$, то информативный поток

$$\Phi_{\text{инф}}(t) = \Phi_0^* e^{\frac{t}{\tau} - km}, \quad (3.16)$$

где k — коэффициент, зависящий от длины волны.

Фиксируя время, за которое сигнал фотоприемника достигает установленного значения (порога), получаем

$$\Phi_{\text{инф}}(t_{\text{ср}}) = \Phi_0^* e^{\frac{t_{\text{ср}}}{\tau} - km}, \quad (3.17)$$

где $c_2 = \text{const}$ — установленный порог. Отсюда $m = at_{\text{ср}} - b$,

$$\text{где } a = \frac{1}{k\tau}; \quad b = \ln \frac{c}{\Phi_0^* k}; \quad (3.18)$$

$t_{\text{ср}}$ — время срабатывания (от начала экспоненты до момента ее пересечения с порогом).

Таким образом, связь между массой (плотностью) объекта и временем $t_{\text{ср}}$ оказывается линейной. Пороговый режим фотоприемника плотностью устраняет влияние нелинейности световой характеристики.

Аналогично можно применить изменение потока по спадающей экспоненте. В этом случае получается следующая зависимость:

$$m = b - at_{\text{ср}}. \quad (3.19)$$

На рис. 3.2 приведена структурная схема устройства для контроля плотности, основанного на этом способе. Оно имеет те же недостатки, что и описанный выше концентратормер.

Таким образом, одноволновые одноканальные устройства обладают существенным недостатком, связанным с нестабильностью интенсивности излучения СИД, и, следовательно, имеют ограниченную область применения.

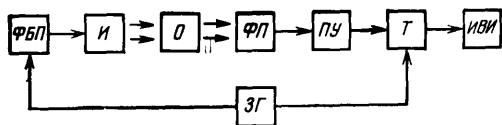


Рис. 3.2. Структурная схема устройства с функциональной разверткой потока излучения: ЗГ — задающий генератор; ФБП — функциональный блок питания; И — излучатель (светодиод); О — объект; ФП — фотоприемник; ПУ — пороговое устройство; Т — триггер; ИВИ — измеритель временных интервалов

В одноволновых двухканальных устройствах контроля, в отличие от одноканальных, вводится второй эталонный канал или второй опорный СИД, излучающий на той же длине волны, что и основной.

На рис. 3.3 приведена структурная схема одноволнового двухканального фотометра с отрицательной обратной связью по оптическому каналу [33]. Выделим в структурной схеме фотометра два контура. Первый контур (отрицательной обратной связи — ООС) содержит функциональный генератор 1, дифференциальный усилитель 2, сумматор 3, устройство управления интенсивностью излучения 4, СИД 5, оптический разделитель 6, оптический канал 7, включающий рабочую кювету 8 и фотоприемник 10. Второй контур (измерительный) содержит СИД 5, оптический разделитель 6, оптический канал с эталонной кюветой 9, фотореле 11, элемент И 12, генератор 13 счетных импульсов и цифровой регистратор 14.

Рассмотрим работу контура отрицательной обратной связи. Пусть на выходе функционального генератора 1 формируется, например, импульсное линейное нарастающее напряжение

$$u_{\text{н}}(t) = at, \quad (3.20)$$

где $a = u_{\text{max}}/T$ — крутизна линейно нарастающего напряжения; u_{max} — наибольшее напряжение в момент окончания импульса длительностью T ; t — текущее время, в течение которого формируется очередной сигнал генератора 1 ($0 \leq t \leq T$).

Это напряжение поступает на входы дифференциального усилителя 2 и сумматора 3. Пройдя через сумматор 3, сигнал поступает на вход устройства управления интенсивностью излучения 4. Это устройство регулирует световой поток СИД 5, не изменяя спектрального состава светового потока.

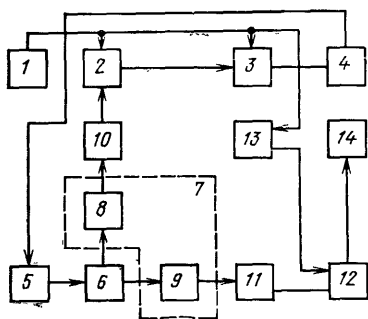


Рис. 3.3. Структурная схема фотометра:

1 — функциональный генератор; 2 — дифференциальный усилитель; 3 — сумматор; 4 — устройство управления; 5 — светодиод; 6 — оптический разделитель; 7 — кюветное отделение; 8, 9 — рабочая и эталонная кюветы; 10 — фотоприемник; 11 — фотореле; 12 — элемент И; 13 — генератор счетных импульсов; 14 — цифровой регистратор

Линейно нарастающий во время действия импульса $u_n(t)$ световой поток $\Phi_0(t)$ СИД 5, проходя оптический разделитель 6, делится на два потока. Один поток $\Phi_1(t) = K_1 \Phi_0(t)$, где $K_1 < 1$ — коэффициент деления оптического разделителя 6 для первого потока, поступает в кюветное отделение 7. Поток $K_2 \Phi_0(t)$, проходя через рабочую кювету 8 с коэффициентом оптического пропускания K_p , уменьшается до $K_2 K_p \Phi_1(t)$ и падает на фотоприемник 10 с линейной энергетической характеристикой фототока (например, фотодиод). Фотоприемник 10, имеющий чувствительность S , преобразует падающий на него световой поток в электрический сигнал $u_{фп}(t) = S \Phi_0(t) K_p$, который поступает на первый вход дифференциального усилителя 2. Если в какой-то момент сигнал фотоприемника 10 отличается от напряжения функционального генератора 1, то на выходе дифференциального усилителя 2 появляется сигнал рассогласования, усиленный дифференциальным усилителем 2. Этот сигнал поступит на другой вход сумматора 3 в такой полярности, чтобы, изменив сигнал на выходе сумматора 3 посредством устройства управления интенсивностью излучения 4, изменить световой поток СИД 5. Коррекция $\Phi_0(t)$ приведет к появлению на выходе фотоприемника 10 сигнала, равного в каждый момент t сигналу функционального генератора 1, причем чем больше коэффициент усиления дифференциального усилителя 2 (при работе в зоне устойчивости), тем меньше различие между сигналом фотоприемника 10 и $u_n(t)$. Поэтому можно записать $u_n(t) = u_{фп}(t)$. Раскрывая значение $u_{фп}(t)$, получаем

$$u_n(t) = S K_p K_1 \Phi_0(t). \quad (3.21)$$

Равенство сигналов сохраняется независимо от коэффициента пропускания рабочей кюветы 8. Чем меньше K_p , тем больше в каждый момент световой поток СИД 5.

Таким образом, контур ООС стабилизирует световой поток $\Phi_0(t)$ так, чтобы сигнал на выходе фотоприемника 10 (с линейной энергетической характеристикой фототока) в любой момент пренебрежимо мало отличался от сигнала функционального генератора 1. Равенство этих сигналов за счет воздействия контура ООС сохраняется независимо от вида передаточных характеристик сумматора 3 и устройства управления интенсивностью излучения 4, от функции преобразования управляющего воздействия в световой поток СИД 5, от коэффициента пропускания рабочей кюветы 8. При этом контур ООС должен удовлетворять условию: время обработки сигнала рассогласования должно быть много меньше времени формирования сигнала функционального генератора 1.

Рассмотрим работу измерительного контура. Оптическим разделителем 6 формируется второй световой поток $\Phi_2(t) = K_2 \Phi_0(t)$, где K_2 — коэффициент деления оптического разделителя 6 для второго потока. Этот поток пройдет через кюветное отделение 7 с эталонной кюветой 9, имеющей коэффициент оптического пропускания $K_э$, и поступит на фотореле 11 с порогом срабатывания

Φ_{Π} . Поскольку второй световой поток (как и первый) формируется из линейно нарастающего потока $\Phi_0(t)$, то в момент t_1 второй световой поток достигнет уровня Φ_{Π} и фотореле 11 сработает. При этом закроется элемент И по второму его входу. На первый вход элемента И поступают импульсы от генератора 13 счетных импульсов, причем на вход синхронизации этого генератора поступает сигнал с функционального генератора 1, разрешая формирование счетных импульсов синхронно с началом формирования $u_r(t)$. Число импульсов N_1 , прошедших элемент И и поступивших на цифровой регистратор 14, будет пропорционально времени t_1 и частоте f_c следования счетных импульсов:

$$N_1 = f_c t_1. \quad (3.22)$$

Число импульсов N_1 пропорционально отношению K_p/K_9 . Для момента t_1 справедливо отношение $\Phi_{\Pi} = \Phi_2(t)$, или, раскрывая значение $\Phi_2(t)$, получаем

$$\Phi_{\Pi} = K_9 K_2 \Phi_0(t). \quad (3.23)$$

Подставим в (3.23) значение $\Phi_0(t)$, найденное из (3.15) с учетом $t = t_1$:

$$\Phi_{\Pi} = K_2 K_9 u_r(t) / K_2 S K_p. \quad (3.24)$$

Выражение (3.24) подставим в (3.23) и перепишем полученную формулу относительно t_1 :

$$t_1 = K_1 S K_p \Phi_{\Pi} / a K_2 K_9. \quad (3.25)$$

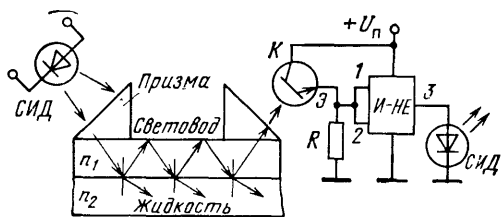
Подставив последнее выражение в (3.22), получим

$$N_1 = \frac{f_c K_1 S \Phi_{\Pi} K_p}{a K_2 K_9}. \quad (3.26)$$

Таким образом, число импульсов, зарегистрированное цифровым регистратором 14, прямо пропорционально отношению коэффициента пропускания рабочей кюветы 8 к коэффициенту пропускания эталонной кюветы 9. Коэффициент пропорциональности $f_c K_1 S \Phi_{\Pi} / a K_2$ в выражении (3.26) является величиной постоянной, поскольку все входящие в него сомножители постоянны. Предварительной установкой значений f_c и a данный коэффициент легко сделать равным, например, тысяче (ста); тогда N_1 будет выражать K_p/K_9 в десятых долях процента (процентах). Если (как это обычно принято считать) $K_p = K_{06} K_9$, где K_{06} — коэффициент пропускания собственно исследуемого объекта, то на выходе устройства получим цифровой код N_1 , выражающий K_{06} в единицах коэффициента пропускания с требуемым числом значащих разрядов.

В случае перестановки кювет 8 и 9 местами, т. е. установки эталонной кюветы 9 на пути потока $\Phi_1(t)$, падающего на фотоприемник 10, а рабочей кюветы 8 на пути потока $\Phi_2(t)$, падающего на фотореле 11, на выходе фотометра будет зарегистрирован цифровой код, прямо пропорциональный K_9/K_p (или $1/K_{06}$), причем

Рис. 3.4. Схема индикатора вида жидкости



коэффициент пропорциональности $f_c K_1 S \Phi_0 / a K_2$ из (3.26) останется без изменения.

Предлагаемый фотометр позволяет получать на выходе цифровой код оптической плотности D исследуемого объекта ($D = -\lg K_{об}$), для чего функциональный генератор 1 должен формировать на выходе импульсный сигнал, изменяющийся по закону

$$u_r^*(t) = u_{max} \cdot 10^{-bt}, \quad (3.27)$$

где b — постоянный коэффициент.

Мы рассмотрели устройства, в которых значение контролируемого параметра определяют, просвечивая контролируемый объект. Эти устройства можно использовать для контроля различных параметров веществ материалов и изделий (твердых, жидких и газообразных).

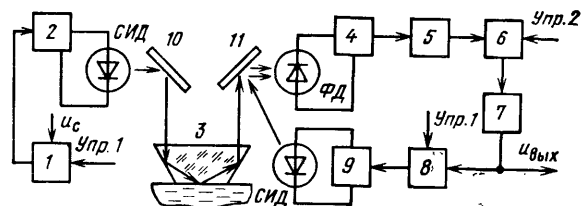
Реализовать одноволновые устройства контроля можно также, используя эффект нарушения полного внутреннего отражения с помощью линз, призм и световодов. В этом случае контролируемый объект контактируется с линзой или призмой.

Одной из областей применения преобразователей на основе световодных структур является использование их для определения вида жидкостей в резервуарах по их показателю преломления [35]. Работа индикаторов вида жидкости, приведенного на рис. 3.4, основана на различии показателей преломления контролируемых жидкостей (например, для воды $n_2 = 1,33$, керосина $n_2 = 1,41$), приводящих к изменению пропускания оптического канала [36].

На измерении показателя преломления основан также оптоэлектронный рефрактометр (рис. 3.5) [37—39]. Рефрактометр предназначен для контроля содержания хлористого натрия в рассолах хлорных производств. Измерения показателя преломления в пределах 1,364 ... 1,369 показали достаточную стабильность рабо-

Рис. 3.5. Структурная схема оптоэлектронного рефрактометра:

1, 8 — модуляторы; 2, 9 — преобразователи напряжения в ток; 3 — призма; 4 — преобразователь тока в напряжение; 5 — усилитель; 6 — синхронный детектор; 7 — фильтр; 10 — зеркало; 11 — светоделительная пластина; U_c — стабильное напряжение



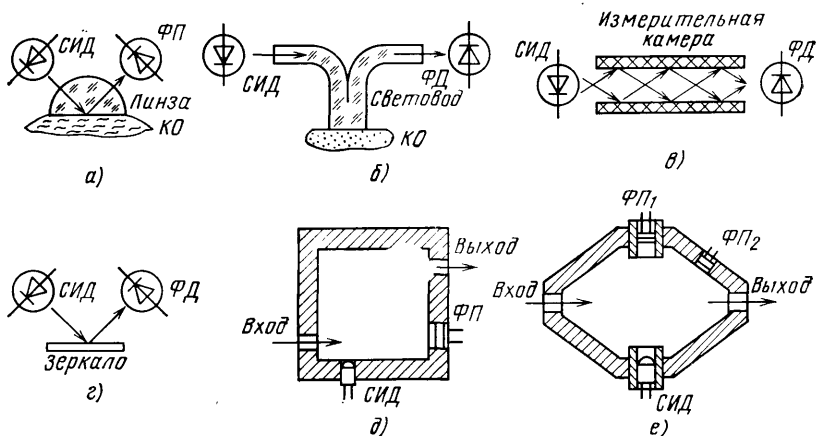


Рис. 3.6. Оптические схемы гигрометров с использованием полусферической линзы (а), световодов (б), отражающих поверхностей (в), зеркала (г), цилиндрической камеры (д) и двух фотоприемников для компенсации (е)

ты устройства. Основная погрешность измерения составила $\pm 0,5 \cdot 10^{-4}$ с доверительной вероятностью 0,95.

Светоизлучающие диоды с успехом применяются в гигрометрах [40—43]. Здесь они используются в основном в качестве индикатора момента выпадания росы. На рис. 3.6 приведены оптические схемы гигрометров. Рассмотрим одну из схем гигрометра точки росы [44].

Датчик гигрометра (рис. 3.7) содержит измерительное зеркало 3, которое охлаждается термоэлектрическим модулем, и примыкающее к нему сухое зеркало 4 для компенсации влияния загрязнений. Температура сухого зеркала поддерживается выше температуры измерительного. На мокрое и сухое зеркала в противофазе подается излучение от СИД 1 и 2, установленных над мокрым и сухим зеркалами соответственно. Отраженные от сухого и влажного зеркал сдвинутые во времени потоки принимаются фототранзистором 5 и преобразуются в фотоэлектрический сигнал.

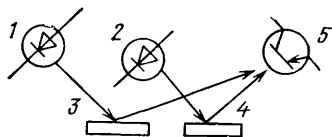


Рис. 3.7. Индикатор датчика гигрометра:

1, 2 — светоизлучающие диоды; 3 — измерительное (мокрое) зеркало; 4 — компенсационное (сухое) зеркало; 5 — фототранзистор

В измерительном устройстве эти потоки разделяются и обрабатываются. Сигнал разности управляет работой термоэлектрического модуля. Настройка нуля выполняется при отсутствии росы уравниванием потоков обоих каналов путем изменения тока СИД. Температуру точки росы измеряет встроенный в датчик терморезистор.

Многоволновые устройства предназначены для определения содержания одного вещества в другом и основаны на том, что контролируемый объект облучается двумя и более потоками излучения, один из которых лежит на полосе поглощения контролируемым параметром (измерительный), другой — вне полосы поглощения (опорный). Эти устройства применяются для определения влажности, загазованности, концентрации жидкостей и газов и т. п.

Наиболее широкое применение СИД нашли во влагометрии, так как вода обладает рядом спектральных полос поглощения и на эти полосы разработаны и выпускаются высокоэффективные СИД [3].

Как и в одноволновых устройствах, преобразование влажности или какой-либо компоненты среды в фотоэлектрический сигнал можно производить, используя импульсный режим питания СИД или функциональный режим питания [47]. При импульсном режиме питания процесс преобразования контролируемого параметра сводится к следующему. Контролируемый объект облучается как минимум двумя потоками излучения на опорной и измерительной длинах волн. Прошедшие через объект потоки:

$$\Phi_1 = \Phi_{01} e^{-K_1 m_1};$$

$$\Phi_2 = \Phi_{02} e^{-K_1 m_1} e^{-K_2 m_2},$$

где Φ_{01} , Φ_{02} — начальные значения потоков; K_1 , K_2 — коэффициенты передачи опорного и измерительного каналов; m_1 , m_2 — массы вещества и контролируемой компоненты соответственно.

Следует отметить, что коэффициент K_1 в выражениях в некоторой степени зависит от длины волны. Для простоты изложения считаем эти коэффициенты равными.

Потоки преобразуются фотоприемником в электрический сигнал, и если применяется временное разделение потоков опорного и измерительного СИД, а один фотоприемник имеет спектральную характеристику, чувствительную к обоим потокам, то получим:

$$u_1 = S\Phi_{01} e^{-K_1 m_1 \alpha};$$

$$u_2 = S\Phi_{02} e^{-K_1 m_1 \alpha} e^{-K_2 m_2 \alpha},$$

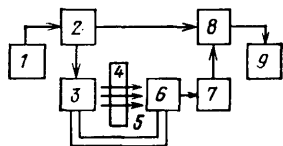
где S — чувствительность фотоприемника; α — показатель нелинейности фотоприемника.

Чтобы получить значение контролируемого параметра, необходимо реализовать операцию отношения сигналов от потоков опорного и измерительного каналов и, предварительно выравнив начальные значения потоков, получим $u_3 = Ae^{K_2 m_2 \alpha}$. Таким образом, в двухволновых устройствах с импульсным режимом питания СИД на результат измерения влияют нелинейности световых характеристик фотоприемника и контролируемого объекта, а также не

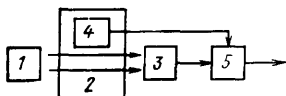
Таблица 3.3

Структурная схема

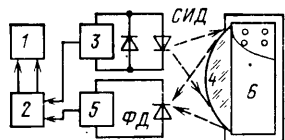
Основные узлы



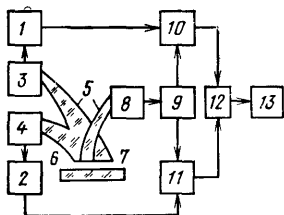
1 — блок питания; 2 — коммутатор; 3 — источник света; 4 — контролируемая среда; 5 — световоды; 6 — фотоприемник; 7 — усилитель; 8 — синхронный детектор; 9 — регистрирующее устройство



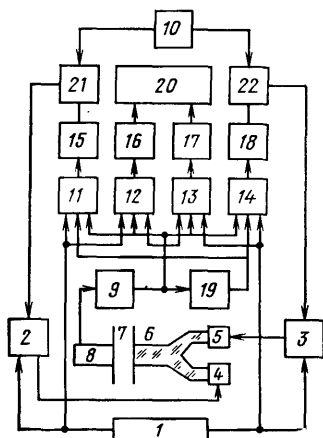
1 — СИД; 2 — контролируемая среда; 3 — фотоприемник; 4 — терморезистор; 5 — блок модуляции



1 — измерительный блок; 2 — коммутатор; 3 — генератор; 4 — линза; 5 — усилитель; 6 — шлюза



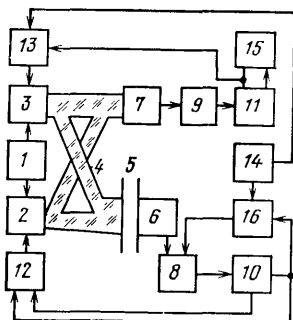
1, 2 — генераторы; 3, 4 — СИД; 5 — световоды; 6 — концентратор; 7 — материал; 8 — фотоприемник; 9 — усилитель; 10, 11 — синхронные детекторы; 12 — блок обработки; 13 — регистрирующее устройство



1 — блок импульсного питания; 2, 3 — усилители; 4, 5 — СИД; 6 — световод; 7 — контролируемый объект; 8 — фотоприемник; 9 — усилитель; 10 — источник опорного напряжения; 11—14 — ключи; 15—18 — элементы памяти; 19 — пороговый элемент; 20 — регистрирующее устройство; 21, 22 — блоки сравнения

Структурная схема

Основные узлы



1 — блок импульсного питания; 2, 3 — СИД; 4 — световоды; 5 — контролируемый объект; 6, 7 — фотоприемники; 8, 9 — усилители; 10, 11 — схемы селекции; 12, 13 — блоки сравнения; 14 — опорный сигнал; 15 — регистрирующее устройство; 16 — блок сравнения

исключены инструментальные погрешности, которые обусловлены устройствами получения отношения.

В табл. 3.3 приведены структурные схемы двухволновых устройств. Эти устройства можно использовать для контроля влажности жидких, твердых и газообразных веществ, а также определения содержания одного вещества в другом.

При импульсном режиме питания довольно просто можно реализовать отношение потоков, если использовать переходные процессы в фотоприемниках, спад фотопроводимости в которых с достаточной точностью описывается экспонентой [47]. Действительно, если на светочувствительную поверхность фотоприемника падают потоки Φ_1 и Φ_2 , то величина фотопроводимости будет пропорциональна этим потокам:

$$G_{1max} = a \Phi_{01} e^{-K_1 m_1};$$

$$G_{2max} = b \Phi_{02} e^{-K_1 m_1} e^{-K_2 m_2},$$

где G_{1max} , G_{2max} — проводимости фотоприемника, соответствующие установившемуся режиму; a , b — коэффициенты преобразования фотоприемника для опорного и измерительного потоков (если применяется один фотоприемник, то $a = b$).

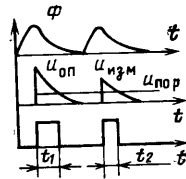
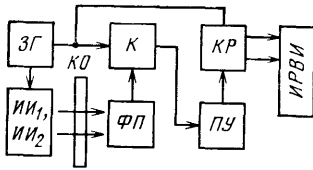
После прекращения каждого импульса излучения фотопроводимость спадает во времени по экспоненциальному закону, и если из спадающего участка проводимости сформировать прямоугольные импульсы, начало которых совпадает с началом спада, а конец соответствует моменту достижения фотопроводимостью установленного порогового уровня, то можно записать:

$$G_1(t_1) = G_{1max} e^{-t_1/\tau_{сп}} = a \Phi_{01} e^{-K_1 m_1} e^{-t_1/\tau_{сп}} = G_{пор};$$

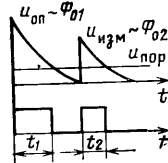
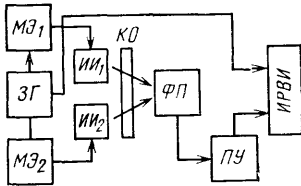
$$G_2(t_2) = G_{2max} e^{-t_2/\tau_{сп}} =$$

$$= b \Phi_{02} e^{-K_1 m_1} e^{-K_2 m_2} e^{-t_2/\tau_{сп}} = G_{пор},$$

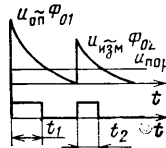
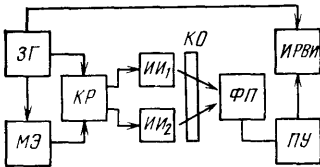
1



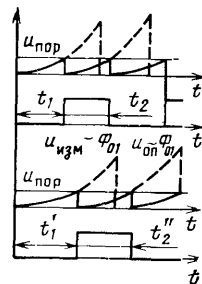
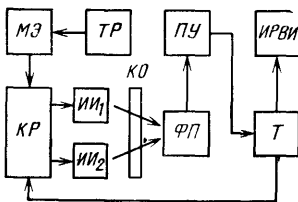
2



3



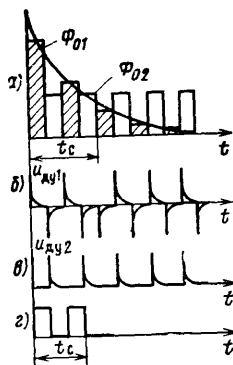
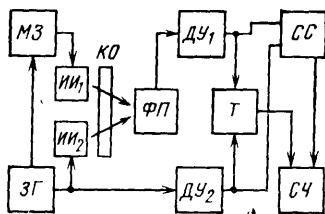
4



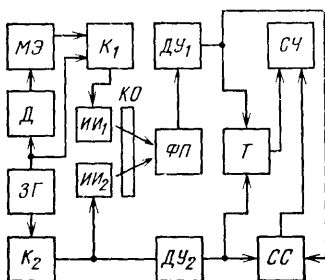
Структурная схема устройства

Временные диаграммы

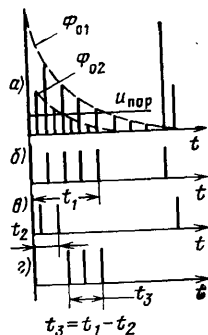
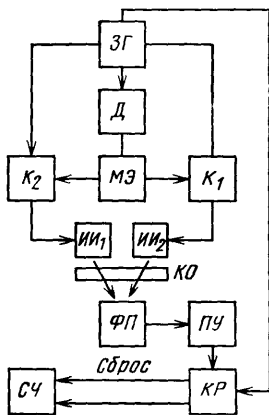
5



6



7



где t_1 и t_2 — временные интервалы от начала спада до достижения проводимостью установленного порогового уровня $G_{пор}$.

Приравнивая начальные значения потоков $a\Phi_{01} = b\Phi_{02}$ (что необходимо обеспечить, изменяя токи СИД), получаем $t_2 = c(t_1 - t_2)$, где $c = 1/K_2\tau_{сн} = \text{const}$.

Для схемной реализации этого метода необходимо выбрать грузочное сопротивление фотоприемника так, чтобы обеспечи-

валось неравенство $G_n \gg G_{max}$, где G_n — проводимость нагрузочного резистора.

В табл. 3.4 (поз. 1) приведены структурная схема устройства, построенного на этом методе, и временные диаграммы, поясняющие принцип действия этого устройства.

Следует отметить, что в устройствах с импульсным режимом питания не используются в достаточной мере основные преимущества СИД — быстроедействие и линейная зависимость потока излучения от величины тока, протекающего через него. Максимальное использование основных свойств СИД обеспечивается при функциональной развертке потока излучения (функциональный режим питания). В этом случае обеспечиваются упрощение устройства, повышение точности и интенсификация выполняемых математических преобразований.

Функциональную развертку в двухволновых устройствах можно осуществить с непрерывной или дискретной экспоненциальной разверткой. В свою очередь дискретная экспоненциальная развертка может быть опорного потока или измерительного потока излучения.

При функциональной развертке опорного потока излучения по экспоненциальному закону, т. е. $\Phi_{01} = \Phi_{01}^* e^{-t/\tau_0}$, получим:

$$\Phi_1 = \Phi_{01}^* e^{-t_1/\tau_0} e^{-K_1 m_1};$$

$$\Phi_2 = \Phi_{02}^* e^{-K_1 m_1} e^{-K_2 m_2}.$$

Приравняв эти потоки с установленным пороговым уровнем, получим

$$m_2 = \frac{1}{K_2 \tau_0} (t_1) = c t_1,$$

т. е. значение контролируемого параметра пропорционально временному интервалу от начала опорного потока до момента пересечения с измерительным потоком.

Если изменять во времени опорный и измерительный потоки по экспоненциальному закону, то значение контролируемого параметра будет пропорционально разности временных интервалов от начала опорного и измерительного потоков до момента пересечения их с установленным пороговым уровнем:

$$\Phi_1 = \Phi_{01}^* e^{-t_1/\tau_0} e^{-K_1 m_1};$$

$$\Phi_2 = \Phi_{02}^* e^{-t_2/\tau_0} e^{-K_1 m_1} e^{-K_2 m_2}.$$

Приравняв начальные значения потоков, при достижении потоками установленного порогового уровня получим

$$m_2 = \frac{1}{K_2 \tau_0} (t_1 - t_2) = c (t_1 - t_2).$$

В табл. 3.4 (поз. 1—7) приведены структурные схемы устройств с функциональной разверткой. Здесь: ЗГ — задающий генератор; И₁, И₂ — СИД, излучающие на опорной и измерительной длинах

волн; К — ключ; ФП — фотоприемник; МЭ — модулятор экспоненты; ПУ — пороговое устройство; КР — коммутатор; ТР — терморезистор; Т — триггер; ДУ — дифференцирующее устройство; СС — схема совпадений; Д — делитель частоты; СЧ — счетчик; ИРВИ — измеритель разности временных интервалов; КО — контролируемый объект.

Принцип действия устройств в поз. 2, 3 и 4 основан на использовании непрерывной экспоненциальной развертки. В устройствах 5, 6 и 7 (табл. 3.4) используется дискретная функциональная развертка.

Работают эти устройства следующим образом. Задающий генератор ЗГ вырабатывает периодическую последовательность прямоугольных импульсов. Эти импульсы через делитель частоты Д подаются на модулятор экспоненты МЭ, который формирует экспоненциальный импульс напряжения. Одновременно с противофазных выходов ЗГ управляющие импульсы подаются на ключи K_1 , K_2 , которые поочередно подключают излучатели I_1 и I_2 . Делитель частоты обеспечивает синхронизацию начала формирования экспоненты и начала дискретизирующих импульсов. Дискретно сформированный экспоненциальный импульс тока протекает через СИД и вызывает потоки. Эти потоки проходят через контролируемый объект и преобразуются фотоприемником ФП в электрический сигнал. Далее сигнал либо дифференцируется при развертке опорного потока, либо подается на вход порогового устройства (при развертке опорного и измерительного потоков).

Из временных диаграмм видно, что при развертке опорного потока временной интервал, пропорциональный значению контролируемого параметра, соответствует интервалу от начала дискретной экспоненты до момента перемены фазы фотоэлектрического сигнала. В этом случае после перемены фазы сигнала на входы триггера Т импульсы поступают одновременно и триггер перестает срабатывать. Число импульсов до перемены фазы фиксируется счетчиком. Сброс счета после каждого цикла и подготовка к новому циклу осуществляются схемой совпадения СС.

В случае развертки опорного и измерительного потоков фотоэлектрический сигнал проходит через пороговое устройство ПУ, разделяются коммутатором КР и подаются на вход счетчика СЧ. Импульсы от измерительного потока излучения осуществляют сброс.

Таким образом, применяя функциональную развертку, можно реализовывать различные устройства для контроля параметров веществ материалов и изделий.

Можно значительно упростить устройство, если использовать свойства СИД работать в фотодиодном режиме [61]. В этом случае при двухволновой структурной схеме один и тот же СИД поочередно работает в режиме излучателя и в режиме фотоприемника. Схема такого устройства приведена на рис. 3.8 [62]. Генератор ГИ вырабатывает периодическую последовательность импульсов переменного тока. При положительном полупериоде вклю-

чается СИД₁ (ток проходит через резистор R_1 , диоды СИД₁ и VD_1); СИД₁ излучает на опорной длине волны. Это излучение проходит через контролируемый объект КО и диод СИД₂, который работает в фотодиодном режиме, преобразуется в электрический сигнал, снимаемый с резистора R_2 . Этот сигнал подается на вход блока обработки фотоэлектрического сигнала.

При действии отрицательного полупериода ток протекает через резистор R_1 , диод VD_2 и светоизлучающий диод СИД₂, который излучает на измерительной длине волны. Излучение от СИД₂ проходит через КО и СИД₁, работающий в этот промежуток времени в фотодиодном режиме, преобразуется в электрический сигнал и далее с резистора R_2 также подается на вход БОФС. В блоке БОФС реализуется отношение этих сигналов, которое пропорционально контролируемому параметру.

Из-за невысокой чувствительности СИД в фотопреобразовательном режиме это устройство обладает невысокой чувствительностью и может найти применение во влагометрии и колориметрии жидкостей.

В тех случаях, когда одной опорной длиной волны невозможно скомпенсировать влияние неинформативных параметров контролируемой среды, можно ввести еще одну опорную длину волны. В этом случае применяются три СИД, один из которых излучает на полосе поглощения контролируемых параметров, другой излучает на опорной длине волны и спектр излучения находится левее полосы поглощения, третий также излучает на опорной длине волны и спектр излучения находится правее от полосы поглощения.

На рис. 3.9 приведена структурная схема трехволнового устройства с двумя опорными каналами [60]. Как и в рассмотренных выше двухволновых устройствах, здесь используется принцип функциональной развертки. Оба опорных потока формируются по

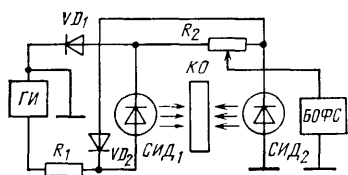


Рис. 3.8. Устройство для определения содержания одного вещества в другом:

ГИ — генератор импульсов переменного тока; БОФС — блок обработки фотоэлектрического сигнала

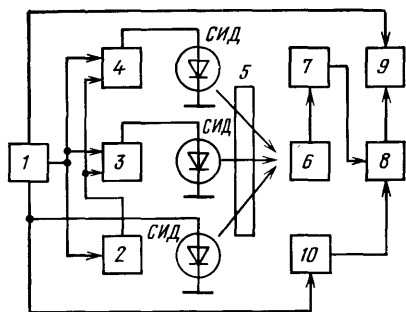
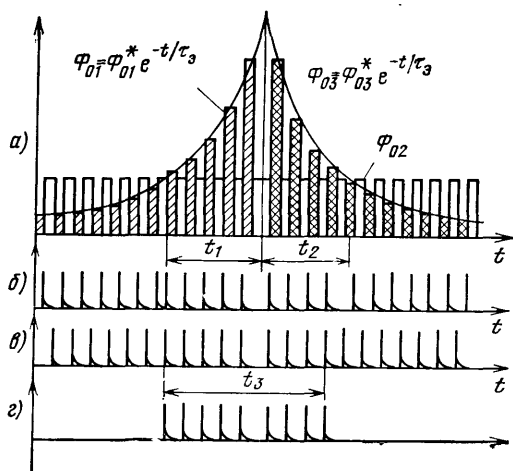


Рис. 3.9. Устройство для измерения влажности:

1 — задающий генератор; 2 — делитель частоты; 3, 4 — модуляторы спадающей и нарастающей экспонент соответственно; 5 — контролируемый объект; 6 — фотоприемник; 7, 10 — дифференцирующие устройства; 8 — триггер; 9 — счетчик импульсов

Рис. 3.10. Временные диаграммы:

a — сигнал на выходе фотоприемника, пропорциональный потокам;
б, в — сигналы на выходах первого и второго дифференцирующих устройств; *г* — сигнал на выходе схемы совпадения



экспоненциальному закону, один — спадающей экспонентой, другой — нарастающей. Принцип действия этого устройства поясняется временными диаграммами, приведенными на рис. 3.10. Как видно из этих диаграмм, значение контролируемого параметра равно временному интервалу от момента перемены фазы между сигналами первого опорного и измерительного каналов и до момента перемены фазы фотоэлектрического сигнала между вторым опорным и измерительным каналами.

Появление СИД с различными спектрами излучения в видимом диапазоне позволило создать простые многоволновые многоканальные устройства для контроля цветowych параметров твердых и жидких веществ и материалов. Примером такого устройства может служить колориметр, схема которого приведена на рис. 3.11 [63]. Прибор содержит кювету, в которую вводятся: контролируемый объект КО; осветительный блок с несколькими источниками света (СИД), излучающими в видимой области спектра; приемный блок с несколькими фотоприемниками, каждый из которых соответствует отдельному источнику света.

На рис. 3.11, *a* изображена схема включения одного канала излучателя с фотоприемником. Конструктивно СИД и фотоприемники расположены, как показано на рис. 3.11, *б*.

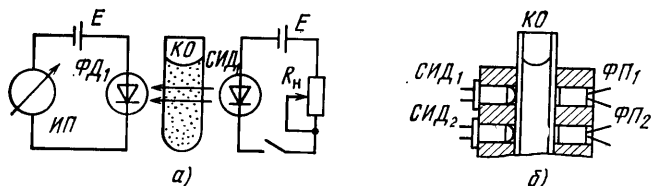


Рис. 3.11. Схема колориметра (*a*) и расположение светонизлучающих диодов и фотоприемников (*б*)

Следует отметить, что применение СИД в качестве источников анализирующего излучения открывает широкие возможности в разработке миниатюрных датчиков и измерительных устройств для контроля различных физических параметров. Эти устройства могут найти применение во многих областях народного хозяйства, а также при разработке роботов.

3.4. СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ ДИОДЫ В УСТРОЙСТВАХ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ И КАЛИБРОВКИ

В настоящее время СИД находят широкое применение в метрологии при создании стабильных излучателей для контроля параметров элементов и систем.

В области энергетической фотометрии средств метрологического обеспечения измерений лучистого потока и освещенности сталкиваются с необходимостью градуировки и калибровки данных средств измерений. Особенно актуальна эта задача для УФ- и ИК-областей спектра.

Наличие у СИД таких положительных свойств, как высокая стабильность излучения, длительный срок службы, малые размеры, малая ширина спектра излучения (квазимонохроматичность), простота управления интенсивностью излучения путем изменения тока, дают возможность их использования в метрологическом обеспечении в качестве эталонной или образцовой меры лучистого потока.

Единицу лучистого потока светодиода можно определить косвенным методом путем определения разности между подводимой к СИД электрической мощностью и мощностью, превращаемой в тепловую [65]:

$$P = I_{\text{п}} U_{\text{п}} - S_{\text{т}}^{-1} U_{\text{т}}^n - G,$$

где $I_{\text{п}}$, $U_{\text{п}}$ — ток в прямом направлении и напряжение на СИД; $S_{\text{т}}$ — чувствительность термопреобразователя; $U_{\text{т}}^n$ — ЭДС термопреобразователя; G — систематическая погрешность из-за неэквивалентного действия на термопреобразователь электрической мощности светодиода.

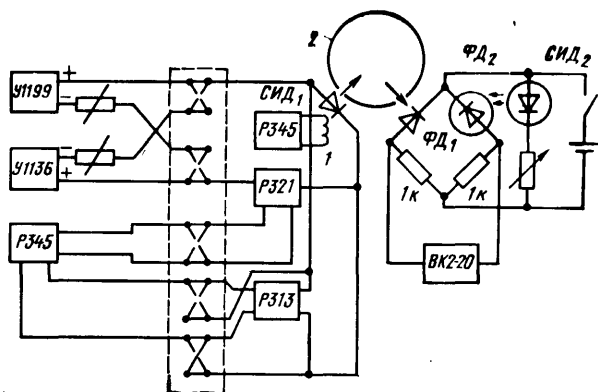
При испытаниях термопреобразователя с различными экземплярами СИД систематическая погрешность не превышала 1,4%.

Размер единицы лучистого потока от одного калиброванного СИД к другому (калибруемому) передается с помощью фотометрического шара диаметром 200 мм методом фотометрического сличения. На рис. 3.12 приведена схема измерительной установки [65]. Для компенсации темнового тока фотодиода его включают в электрический мост, в другом плече которого находится фотодиод. Добиваются полной компенсации темнового тока, изменяя сопротивление в цепи компенсационного СИД. В диагональ моста включен цифровой вольтметр ВК2-20.

Передача лучистой энергии осуществляется следующим образом. При прямом направлении тока через калиброванный СИД и

Рис. 3.12. Схема измерительной установки для калибровки светоизлучающих диодов:

1 — датчик термопреобразователя; 2 — фотометрический шар; СИД₁ — фотодиод; СИД₂ — компенсационный фотодиод; ФД₁ — измерительный фотодиод; ФД₂ — компенсационный фотодиод; СД₂ — светоизлучающий диод, подсвечивающий компенсационный фотодиод; У1199, У1136 — источники тока; Р345, Р321, Р313 — магазин сопротивлений; ВК2-20 — цифровой вольтметр



снятой заглушке термопреобразователя одновременно измеряют ток, напряжение на СИД и ток фотодиода. Затем включают калибруемый СИД и подбирают проходящий через него ток, при котором ток фотодиода достигает прежнего значения. При этом поток излучения калибруемого СИД

$$P' = P \frac{U'_{\text{фд}}}{U_{\text{фд}}} + G_{\text{сп}} + G_{\text{пр}},$$

где $U_{\text{фд}}$, $U'_{\text{фд}}$ — напряжение на фотодиоде в первом и втором случаях; $G_{\text{сп}}$, $G_{\text{пр}}$ — систематические погрешности измерений, связанные с различием спектров излучения сличаемых СИД и их пространственного разделения излучения соответственно.

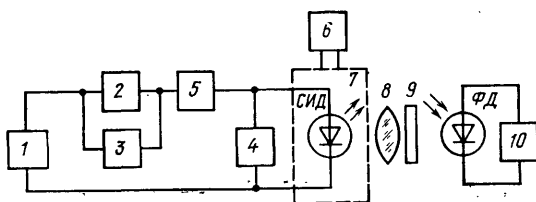
Следует отметить, что при использовании СИД для калибровки первичных измерительных преобразователей необходимо обеспечить температурную и временную стабилизацию интенсивности излучения, которую можно осуществить методами, описанными в гл. 1.

Для температурной компенсации интенсивности излучения СИД необходимо измерить зависимость потока излучения от температуры. Эти исследования можно провести на установке, схема которой приведена на рис. 3.13 [10].

Светоизлучающие диоды применяются также при исследовании широкополосных фотоприемных устройств, имитации лазерного излучения [67] и контроля, стабилизации спектрометрического тракта [68].

Рис. 3.13. Установка для измерения температурной зависимости потока излучения светодиода:

1 — источник питания; 2, 4, 10 — ампервольтметры; 3 — образцовое сопротивление; 5 — магазин сопротивлений; 6 — блок питания микрорефрижератора; 7; 8, 9 — оптическая система



При разработке оптоэлектронных устройств необходимо знать такие параметры фотоприемного тракта, как амплитудно-частотные характеристики, быстродействие, переходные характеристики, и их зависимости от элементов схемы. Для использования СИД в таких устройствах на первый план выдвигаются модуляционные световые характеристики [69]. Например, для СИД АЛ106 при токе 40...60 мА модуляционная характеристика равномерна до 5 МГц.

При засветке фотоприемника излучением СИД в спектре флуктуаций фототока появляется низкочастотная составляющая шума, простирающаяся до частоты 30 кГц [69]. Подобный характер излучения СИД необходимо иметь в виду при его использовании для калибровки измерительной аппаратуры.

Для измерения линейности фотометрических устройств применяют обычно метод, основанный на законе обратного квадрата расстояния или используют калиброванные ослабители. Упрощение этого метода без потерь в точности измерений достижимо с помощью двух СИД [70]. Сущность его заключается в следующем. Два СИД располагают перед фотоприемником, линейность которого измеряют. Включают один СИД и измеряют сигнал фотоприемника I_1 , затем его выключают; включают второй СИД и измеряют сигнал фотоприемника I_2 . Не выключая второго СИД, включают первый и измеряют сигнал фотоприемника $I_{1,2}$ от двух СИД, работающих одновременно. О линейности фотоприемника судят по отличию отношения $I_{1,2}/(I_1+I_2)$ от единицы при различных уровнях сигнала.

Применение СИД позволяет значительно упростить измерения и получить погрешности, определяемые только уровнем сигнала и классом измерительного прибора.

Глава 4

ПРАКТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ УСТРОЙСТВ НА СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДАХ

4.1. ИМПУЛЬСНЫЕ И ИНДИКАТОРНЫЕ УСТРОЙСТВА

В настоящее время наша промышленность выпускает СИД со спектром излучения в видимом и ближнем ИК-диапазонах. С каждым годом совершенствуется технология выпуска этих приборов и разрабатываются излучатели со спектром излучения в длинноволновой области оптического диапазона.

Светоизлучающие диоды с видимым спектром свечения применяются как индикаторы изменения режимов в электронных цепях (рис. 4.1—4.5) [6, 72].

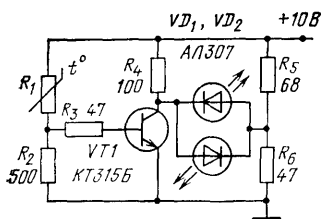


Рис. 4.1. Схема индикатора заданной температуры

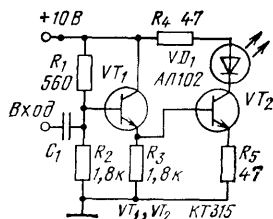


Рис. 4.2. Схема индикатора сигнала модуляции

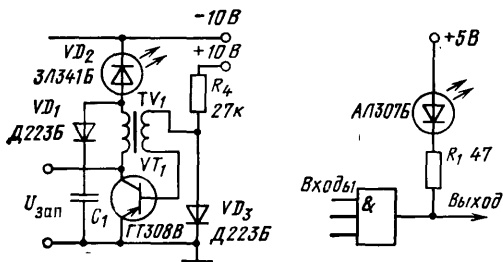


Рис. 4.3. Схема включения светодиода в импульсном режиме

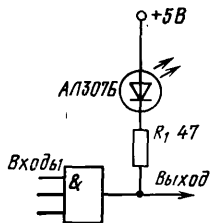


Рис. 4.4. Схема индикатора состояния логического элемента

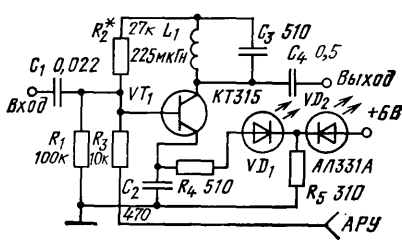


Рис. 4.5. Схема индикатора настройки на радиопередающую станцию

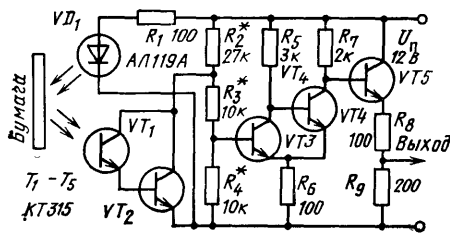


Рис. 4.6. Схема устройства обнаружения края листа бумаги

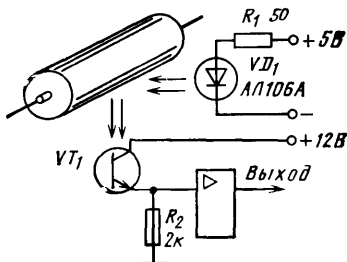


Рис. 4.7. Схема оптоэлектронного преобразователя угол — код

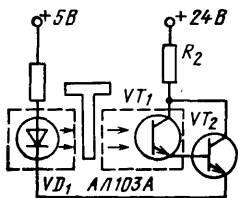


Рис. 4.8. Схема оптоэлектронного клавишного переключателя

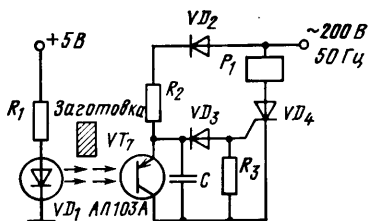
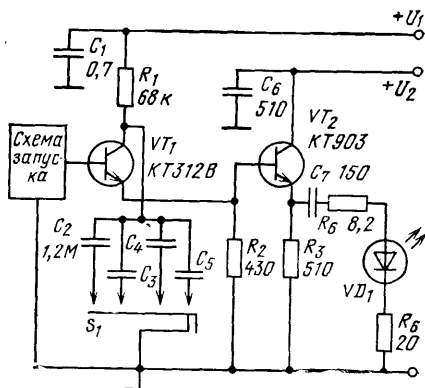
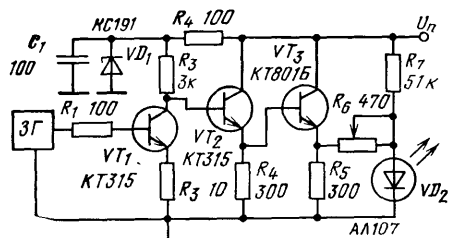


Рис. 4.9. Схема аварийной остановки конвейера

Рис. 4.10. Схема источника импульсного питания

Рис. 4.11. Схема имитатора лазерного излучения



Инфракрасные СИД можно использовать во внешних устройствах вычислительной техники, в системах преобразования угол — код, в коммутационных устройствах и др. (рис. 4.6—4.9) [6, 72].

Большинство устройств использует импульсный режим питания СИД, так как при этом можно обеспечить необходимую мощность излучения, упростить процесс усиления и обработки сигнала. Следовательно, для питания СИД необходимы генераторы импульсов, в которых обеспечиваются необходимая стабильность амплитуды и частота повторения выходных импульсов. При невысоких требованиях источник импульсного питания может быть реализован по схеме на рис. 4.10.

При использовании СИД в имитаторах лазерного излучения можно использовать схему, приведенную на рис. 4.11 [67]. Схема запуска может быть выполнена в виде блокинг-генератора. Амплитуда импульса тока может устанавливаться от 2 до 10 А изменением сопротивления резистора R_6 . Длительность импульса может изменяться в пределах 50...500 нс переключением зарядных конденсаторов $C_2—C_5$ переключателем S_1 .

При высоких требованиях источники импульсного питания могут быть выполнены на основе компенсированных транзисторных ключей (рис. 4.12) [68]. Такие источники имеют высокую стабильность выходного импульсного напряжения ($5 \cdot 10^{-5}$). Управляющий сигнал через входное устройство (VT_5, VT_6) поступает на базы транзисторов $VT_1—VT_4$, которые при этом открываются. С коллектора VT_4 на базу VT_1 поступает запирающее напряжение. Такое управление позволяет устранить выбросы на фронте выходного импульса. Ток, протекающий через СИД, определяется емкостью конденсатора C . Его включение обеспечивает малую зависимость светового потока от внутреннего сопротивления СИД. Нестабильность коммутируемого напряжения определяется в основном выбором стабилитронов и условиями их работы.

С помощью рассмотренных излучателей могут проводиться исследования импульсных и переходных характеристик фотоприемников при различных номиналах элементов схемы.

Рис. 4.12. Схема генератора стабильной амплитуды

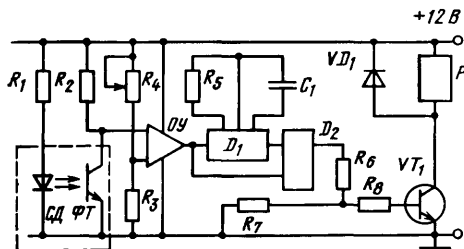
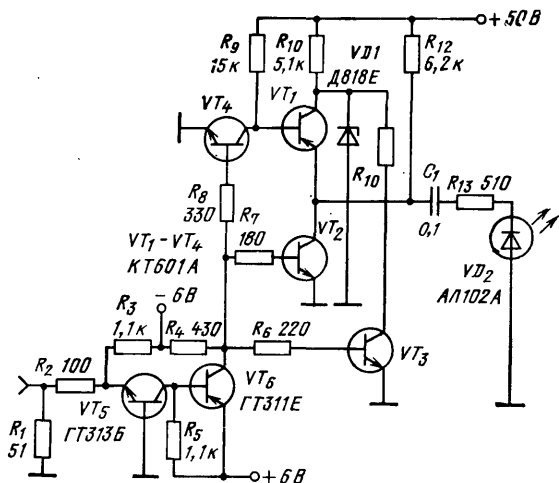


Рис. 4.13. Схема одного канала уровнемера:

D_1 — одновибратор; D_2 — элемент ИЛИ

При повышенных требованиях к линейности излучения можно использовать параметрическую линеаризацию выходной характеристики СИД [71].

Оптопару СИД — фотоприемник можно использовать для контроля уровня. Прибор контроля уровня жидкости содержит две пары элементов СИД — фототранзистор. Одна пара используется для контроля верхнего уровня, другая — нижнего [73]. Электрическая схема одного канала уровнемера приведена на рис. 4.13. Принцип действия прибора основан на том, что при уменьшении уровня жидкости на фототранзистор ФТ падает излучение от СИД. Срабатывает реле P и включает соответствующий блок системы. Так автоматически регулируется уровень жидкости.

4.2. УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрим схемы, которые могут быть использованы при разработке влагомеров, газоанализаторов и других устройств.

На рис. 4.14 приведена электрическая схема прибора на СИД, работающих в импульсном режиме. Основными его узлами являются: задающий генератор на микросхемах D_1 — D_3 ; формирователь импульсов необходимой длительности на микросхемах D_4 —

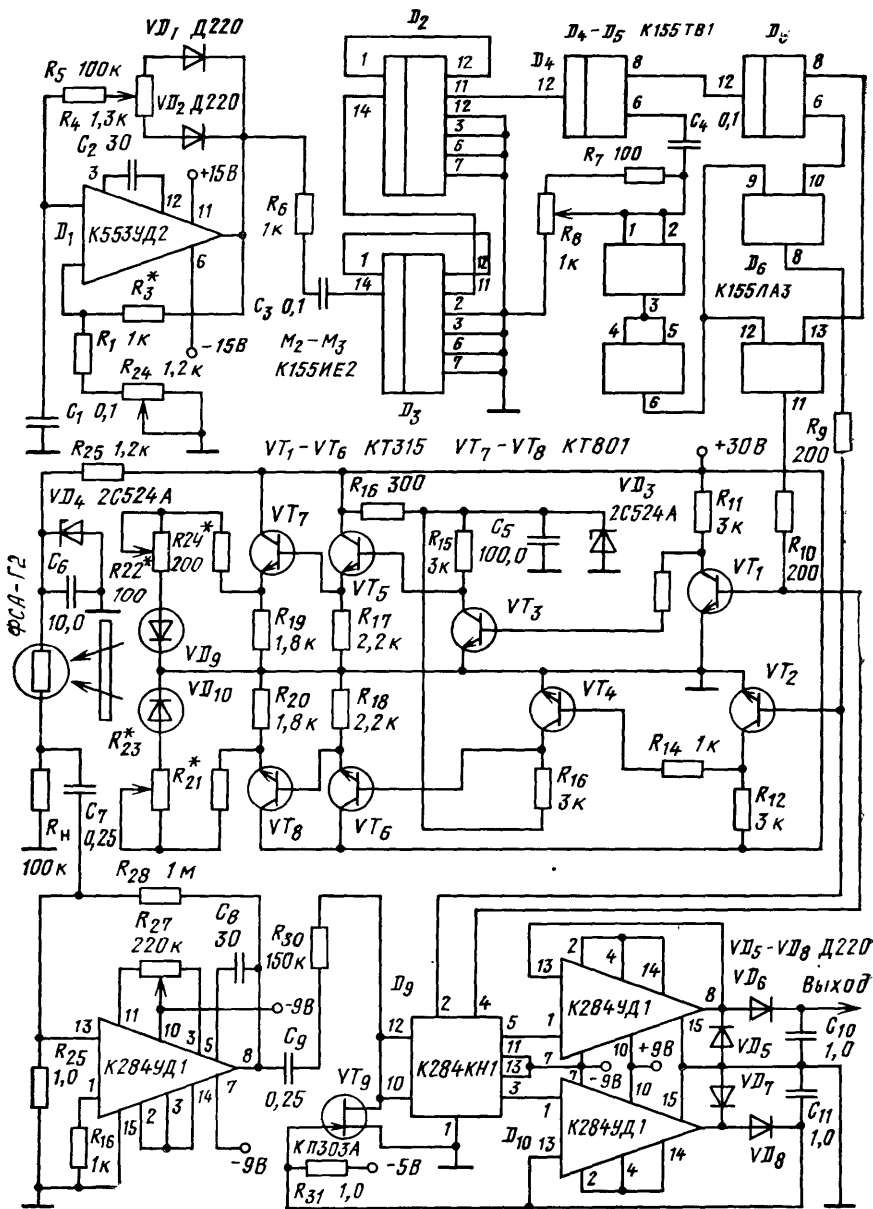


Рис. 4.14. Принципиальная схема прибора на светоизлучающих диодах, работающих в импульсном режиме питания

D_6 ; формирователь импульса напряжения стабильной амплитуды на транзисторах $VT_1—VT_4$ и стабилитроне VD_3 ; усилитель мощности на транзисторах VT_5 , VT_7 и VT_6 , VT_8 ; блок обработки фотоэлектрического сигнала на микросхемах $D_7—D_{10}$, полевом транзисторе VT_9 и диодах $VD_5—VD_8$.

Работает схема следующим образом. Задающий генератор на микросхеме D_1 вырабатывает периодическую последовательность прямоугольных импульсов высокой частоты. Эти импульсы подаются на вход делителя частоты, выполненного на микросхемах D_2 , D_3 . Далее формируются импульсы необходимой скважности. С выхода формирователя импульсы подаются на вход формирователя импульсного напряжения стабильной амплитуды, равного напряжению стабилизации стабилитрона VD_3 , через усилители тока (эмиттерные повторители) и токозадающие резисторы $R_{20}—R_{22}$ подаются на СИД VD_9 и VD_{10} , излучающие на разных длинах волн.

Протекающие через СИД токи вызывают потоки излучения, которые направляются на контролируемый объект. Прошедшие через контролируемый объект и чередующиеся во времени потоки принимаются фотоприемником R_{31} . Электрические сигналы от обоих потоков усиливаются усилителем D_7 и далее подаются на устройство, реализующее отношение этих потоков (микросхемы $D_8—D_{10}$, полевой транзистор VT_9 и диоды $VD_5—VD_8$). Выходной сигнал, пропорциональный отношению измерительного и опорного сигналов, подается на регистрирующий прибор или в систему автоматического регулирования. Прибор потребляет ток не более 0,2 А.

На рис. 4.15 приведена схема прибора на СИД, работающих в функциональном режиме. В отличие от предыдущей схемы, здесь введен формирователь экспоненциального импульса, выполненный на транзисторе VT_6 , резисторах R_{13} , R_{14} и конденсаторе C_5 , а на выходе фотоприемника включен усилитель на микросхемах D_6 , D_7 . Задающий генератор выполнен на микросхеме типа К155ЛА3.

На светодиод VD_6 подается дискретно сформированный экспоненциальный ток, на VD_7 — в противофазе импульсы тока с неизменной амплитудой. После прохождения через контролируемый объект потоки от обоих СИД принимаются фотоприемником, усиливаются усилителями D_1 , D_2 и подаются на один из входов схемы совпадения, выполненной на микросхеме D_8 . На другой вход этой схемы подается сигнал от задающего генератора. До момента перемены фазы фотоэлектрического сигнала на выходе схемы совпадения появляются импульсы. Временной интервал от начала экспоненты до момента перемены фазы сигнала пропорционален отношению потоков измерительного и опорного СИД. Блок питания прибора выполнен на диодах $B_1—B_3$, стабилитронах VD_3 , VD_4 и транзисторе VT_{10} .

В рассмотренных схемах можно применять также МОП-микросхемы и операционные усилители типа К140УД1. Схемы могут

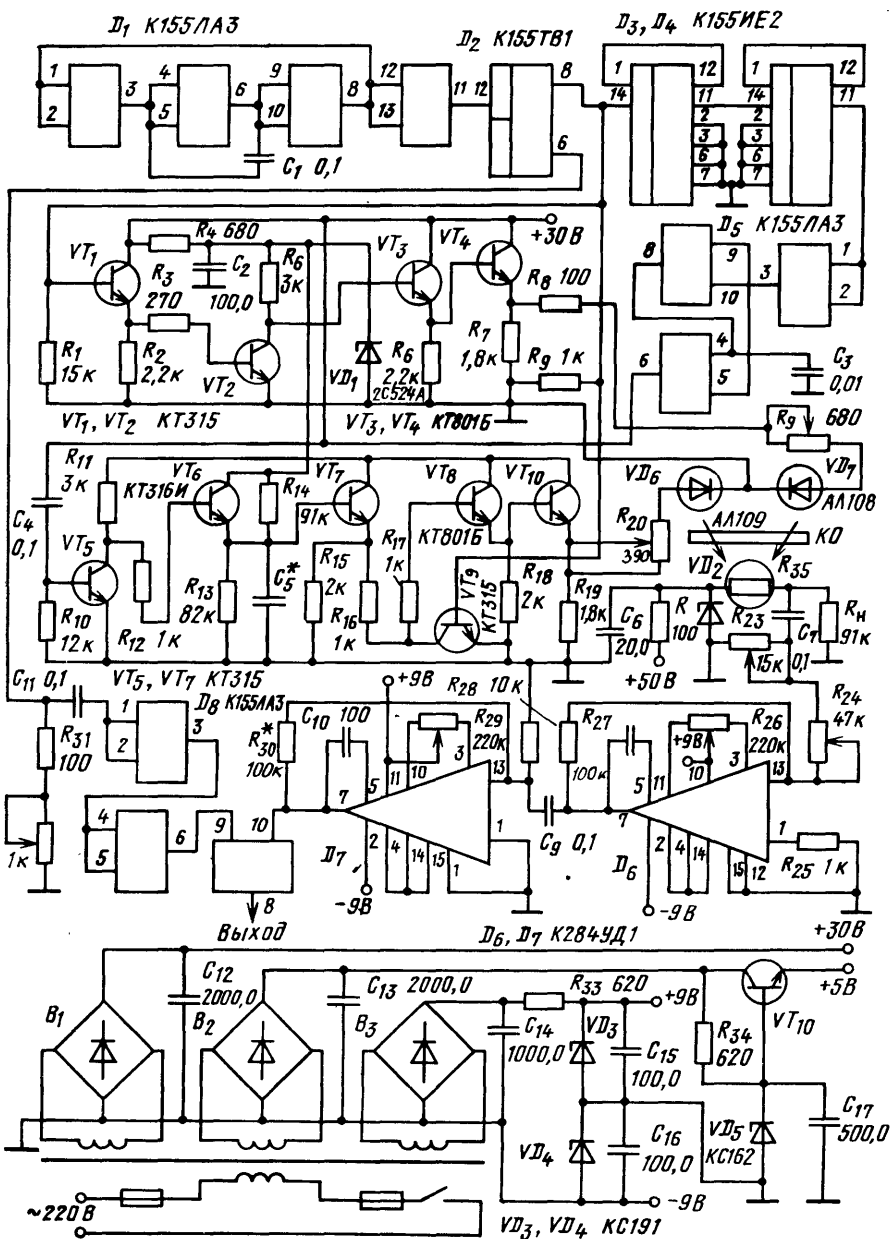


Рис. 4.15. Принципиальная схема прибора на светоизлучающих диодах, работающей в функциональном режиме питания

быть использованы при разработке цветометров, влагомеров, различных устройств контроля и индикации.

Если для измерения использовать линзы и призмы, измерительная грань которых соприкасается с контролируемым веществом, то можно обеспечить высокую чувствительность, например, при измерении содержания одного вещества в другом, момента выпадения росы, влажности и т. п.

На рис. 4.16 приведена схема прибора с использованием линзы с нарушением принципа полного внутреннего отражения. Схема состоит из задающего генератора, выполненного на микросхеме D_1 , триггера со счетным входом D_2 , формирователей импульсов необходимой амплитуды на транзисторах VT_1, VT_2 , усилителей мощности на транзисторах VT_3, VT_4 и VT_4, VT_6 , измерительного и компенсационного СИД VD_4 и VD_3 , фотодиодов VD_5 и VD_6 и блока усиления и обработки фотоэлектрического сигнала на микросхеме D_3 и транзисторе VT_7 . Работает схема следующим образом. Задающий генератор вырабатывает прямоугольные импульсы с частотой 8...10 кГц. Эти импульсы подаются на вход триггера D_2 и далее с двух противофазных выходов раздельно на входы формирователей VT_1 и VT_2 . Сформированные прямоугольные импуль-

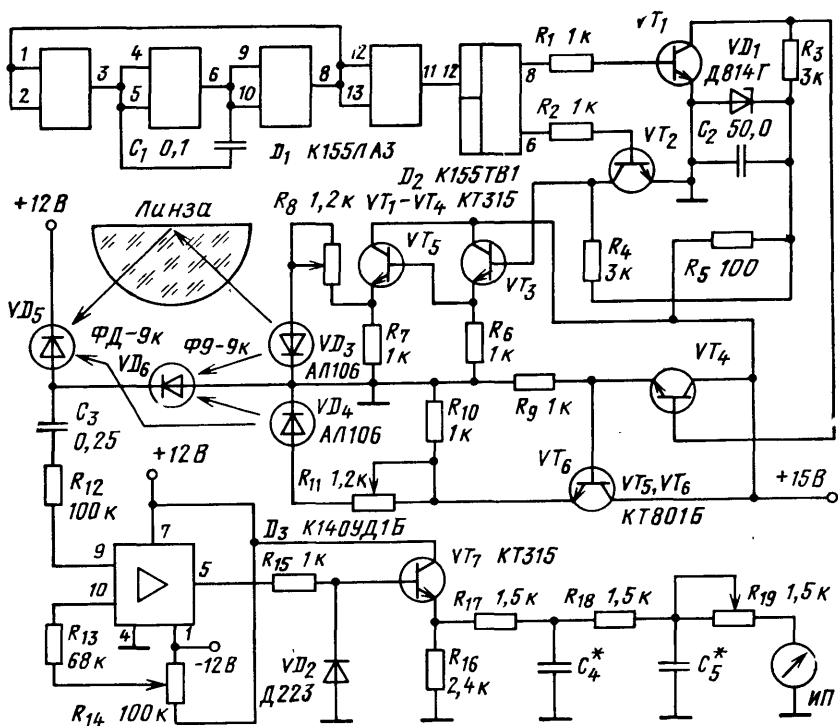


Рис. 4.16. Схема прибора, использующего эффект нарушения полного внутреннего отражения

сы через усилители мощности VT_3 , VT_5 и VT_4 , VT_6 и токозадающие резисторы R_8 , R_{11} подаются на СИД измерительного и опорного каналов. Протекающие через СИД токи вызывают потоки излучения. Поток излучения измерительного СИД фокусируется на измерительную поверхность сферической линзы и через световод одновременно подается на компенсационный фотодиод VD_5 . Излучение компенсационного СИД VD_4 через световоды одновременно подается на оба фотоприемника.

На рис. 4.17 приведена конструкция датчика прибора. Фотодиоды измерительного и компенсационного каналов включены последовательно. В первый момент, когда значение контролируемого параметра минимально или равно нулю, поворотом ручек резисторов R_8 и R_{11} устанавливают сигнал, равный нулю. При наличии контролируемого вещества изменится поток, отраженный от измерительной поверхности линзы. Появится сигнал рассогласования, который через разделительный конденсатор C_3 подается на вход усилителя D_3 .

Такая схема включения СИД и фотоприемников позволяет исключить их временную и температурную нестабильность. Параметры этих приборов должны быть приблизительно одинаковыми.

Сигнал рассогласования, пропорциональный значению контролируемого параметра, после усиления интегрируется; по углу отклонения стрелки прибора ИП определяют значение контролируемого параметра.

В зависимости от назначения и вида контролируемого параметра в схеме можно использовать различные СИД и фотоприемники. Наиболее целесообразно использование рассмотренной схемы для контроля качественных и количественных параметров жидкостей. На базе этой схемы разработан влагомер, погрешность измерения которого не превышала 1%.

При невысоких требованиях к устройствам контроля можно использовать простую схему оптоэлектронного двухволнового генератора, схема которой приведена на рис. 4.18. Принцип действия генератора основан на использовании в цепи обратной связи фоторезистора, оптически связанного через контролируемую среду с СИД, включенным встречно-параллельно на выходе генератора.

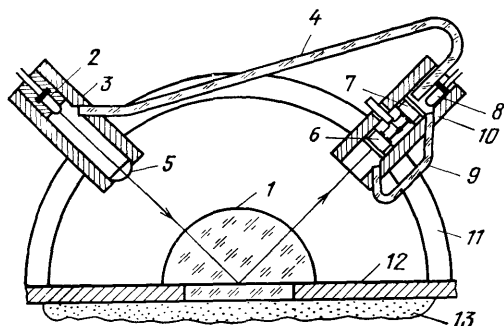


Рис. 4.17. Конструкция датчика:

1 — сферическая линза; 2, 4, 8, 9 — светозлучающие диоды; 3, 10 — корпуса; 5 — линза; 6, 7 — фотодиоды; 11 — направляющая планка для установки угла падения и приема излучения; 12 — основание датчика; 13 — контролируемый объект

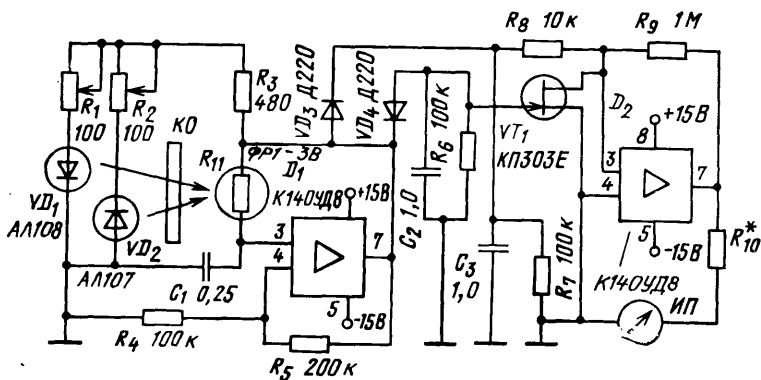


Рис. 4.18. Схема оптоэлектронного двухволнового генератора

В отсутствие контролируемого вещества (газ, дым и т. п.) поворотом ручек переменных резисторов R_1 , R_2 и подбором делителя R_4R_5 на выходе усилителя устанавливают равенство длительностей импульсов положительной и обратной полярностей. При наличии контролируемого вещества изменяется длительность импульса одной полярности. Длительность импульса другой полярности зависит от значений неинформативных параметров, так как длина волны этого СИД лежит вне полосы поглощения контролируемым параметром.

Таким образом, генератор непрерывно вырабатывает периодическую последовательность прямоугольных импульсов разной полярности. Длительность импульса одной полярности, например положительной, зависит от контролируемого параметра, а длительность импульса отрицательной полярности зависит от неинформативных параметров (например, при контроле загазованности, загрязненности и т. п.). Следует отметить, что при изменении фоновой засветки и температуры изменяется лишь частота повторения импульсов генератора, а отношение длительностей импульсов положительной и отрицательной полярностей зависит только от значения контролируемого параметра.

Для реализации отношения длительностей этих импульсов на выход микросхемы D_1 подключено устройство, выполненное на полевом транзисторе VT_1 и операционном усилителе D_2 . Разделение импульсов отрицательной и положительной полярностей осуществляется диодами VD_3 и VD_4 . Далее разделенные импульсы интегрируются цепочками R_6C_2 и R_7C_3 . Значение контролируемого параметра регистрируется измерительным прибором ИП.

Тип СИД выбирается в зависимости от вида контролируемого параметра по спектральным характеристикам. Зная спектры излучения СИД, выбирают фотоприемник, чувствительный к потокам излучения обоих СИД.

4.3. РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ УСТРОЙСТВ КОНТРОЛЯ НА СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДАХ

Повышение чувствительности и избирательности устройств контроля на светоизлучающих диодах возможно при максимальном согласовании спектральных характеристик контролируемой среды (вещества) фотоприемника и светоизлучающего диода.

Пусть имеется источник распределения интенсивности излучения источника по спектру в виде $f(\lambda)$. В этом распределении можно выделить некоторую монохроматическую составляющую $f(\lambda)d\lambda$ для интервала $\delta\lambda$, а для некоторой произвольной точки спектра с длиной волны λ' будем иметь распределение вида $\tilde{\alpha}(\lambda' - \lambda)f(\lambda)d\lambda$. Другие монохроматические составляющие также дадут соответствующий вклад в общую интенсивность в точке λ' . Тогда наблюдаемое распределение интенсивности по спектру определяется интегралом

$$\Phi(\lambda) = \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{\alpha}(\lambda' - \lambda)f(\lambda)d\lambda.$$

Если обозначить через $\tilde{\alpha}_1(\lambda)$ спектр излучения, а через $\tilde{\alpha}(\lambda)$ — регистрирующую часть, то наблюдаемое распределение энергии в плоскости

$$\Phi_1(\lambda) = \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{\alpha}_1(\lambda' - \lambda)f(\lambda)d\lambda;$$

$$\alpha(\lambda) = \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{\alpha}_2(\lambda' - \lambda)\tilde{\alpha}_1(\lambda)d\lambda.$$

Следует отметить, что если ширина спектральной линии поглощения или поглощение много меньше ширины спектра излучения, то спектральная характеристика источника не принимается во внимание.

На практике для распространенных источников излучения и полос поглощения справедливы функции в виде прямоугольного треугольника, трапеции или колоколообразной функции. Совместимость по длине волны может иметь определяющее значение, если спектр излучения и спектральная характеристика фотоприемника узкополосные. Для определения эффективной связи по потоку необходимо произвести интегрирование произведения спектров всех элементов, входящих в систему; тогда фототок имеет вид

$$I_{\Phi} = \Phi \frac{\int S_M M S_{\Phi} d\lambda}{\int S_n d\lambda},$$

где S_n — нормализованный спектр излучения источника; M — коэффициент пропускания среды; I_{Φ} — чувствительность приемника.

Немаловажное значение имеют предел разрешения и разрешающая способность при использовании светоизлучающих диодов

в двух-, трех- и многоволновых устройствах, так как в ряде случаев из-за максимального сближения спектральных полос происходит взаимное перекрытие спектров.

Предел разрешения — это угловая или линейная величина, характеризующая расстояние между двумя монохроматическими спектральными линиями одинаковой интенсивности.

Для теоретической оценки наиболее часто используют критерий Рэля, согласно которому две спектральные линии одинаковой интенсивности находятся на пределе разрешения, если суммарная интенсивность посередине между линиями составляет приблизительно 80% интенсивности в главных максимумах.

Если спектральные характеристики не имеют точек перегиба, то для оценки предела разрешения используют другой критерий, а именно; две спектральные линии одинаковой интенсивности считаются разрешенными, если они расположены друг от друга на расстоянии $\delta\lambda$, равном половине ширины этих линий. В этом случае суммарная интенсивность посередине между ними составит приблизительно 83% интенсивности каждой из спектральных характеристик. Следует отметить, что предел разрешающей способности также зависит от спектральных характеристик фотоприемника.

В общем случае выражение для фототока может быть представлено в виде

$$I_{\Phi} = k \int \exp[-\rho\alpha(\lambda)nL] \Phi(\lambda) S(\lambda) d\lambda \approx \\ \approx k \int [1 - \rho\alpha(\lambda)nL] \Phi(\lambda) S(\lambda) d\lambda,$$

где $\rho\alpha(\lambda)nL < 1$; k — контролируемая константа; ρ — концентрация детектируемого вещества; $\alpha(\lambda)$ — спектральная зависимость массового коэффициента поглощения; L, n — длина оптического пути при однократном прохождении кюветы и кратность прохождения диода; $\Phi(\lambda)$ — спектральное распределение излучения источника; $S(\lambda)$ — спектральная зависимость чувствительности фотоприемника.

Спектральная чувствительность в данном участке спектра с достаточно высокой точностью может быть аппроксимирована линейной зависимостью вида

$$S(\lambda) = S_0 + \nu\lambda,$$

где ν — коэффициент пропорциональности.

Для спектральной зависимости массового коэффициента поглощения $\alpha(\lambda)$ в настоящее время имеются протабулированные аппроксимационные соотношения.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П1. Фотометрические и электрические параметры некоторых типов светоизлучающих диодов

Тип прибора	Исходный материал	Корпус	Цвет свечения, длина волны, нм	Сила света I_v при $I_{пр} = 10$ мА, мкд		Угол излучения θ (типное значение), град	Постоянное прямое напряжение $U_{пр}$, В, не более
				мин.	макс.		
ЗЛ341Б; АЛ341Б	GaP:Zn—O	Металло-стеклянный	Красный, $\lambda_{max} = 700$ нм	0,5	1,5	60	2,8
ЗЛ341Г; АЛ341Г	GaP:N	То же	Зеленый, $\lambda_{max} = 565$ нм	0,5	1,5	60	2,8
ЗЛ314Е; АЛ314Е	GaP:N Zn—O	> >	Желтый, $\lambda_{эф} = 580$ нм	0,5	1,5	60	2,8
АЛ336Б; АЛ336К	GaAlAs	Полимерный	Красный, $\lambda_{max} = 660$ нм	20; 40	50; 150	10; 10	2,0; 2,0
АЛ336Г; АЛ336И	GaP:N	То же	Зеленый, $\lambda_{max} = 565$ нм	15; 20	25; 50	15; 15	2,8; 2,8
АЛ336Е; АЛ336Ж	GaP:N Zn—O	> >	Желтый, $\lambda_{эф} = 580$ нм	10; 15	20; 25	15; 15	2,8; 2,8
АЛ307КМ	GaAlAs	> >	Красный, $\lambda_{max} = 660$ нм	2	5	50	2,0
АЛ307НМ *	GaP:N	> >	Зеленый, $\lambda_{max} = 565$ нм	6	10	50	2,8
АЛС331А *	GaP	Металло-стеклянный	Красный	0,6	1,5	40	4,0
ЗЛС331А	GaP	То же	Зеленый Красный Зеленый	0,25	1,0	60	3,0

* При $I_{пр} = 20$ мА.

Таблица П2

Цвет свечения	Исходный материал	Внешний квантовый выход излучения, %		Сила света I_v при $I_{пр} = 10$ мА, мкд		Угол излучения, град.
		тип.	макс.	тип.	макс.	
Красный	GaP:Zn, O	0,5	1,0	50	100	60
Красный	Ga _{0,7} Al _{0,3} As	2,0	4,0	175	400	40, 10
Оранжевый	GaP:N, O	—	—	75	150	40
Желтый	GaP:N, O	—	—	75	250	40, 25
Зеленый	GaP:N	0,05	0,2	100	250	40, 25
					1000	2000

Таблица ПЗ

Тип прибора	Исходный материал	Конструкция	Цвет свечения и длина волны, нм	Сила света I_v , мкд			Постоянное прямое напряжение $U_{пр}$, В, не более	Угол излучения, град
				мин.	тип.	макс.		
АЛ102А *	GaP:Zn, O	Металлостеклянный корпус	Красный, $\lambda_{max} = 700$	0,04	0,1	0,15	—	—
АЛ102Б **				0,1	0,2	0,25	3,0	60
АЛ102Г **				0,2	0,25	0,5	—	—
АЛ102В ***	GaP:N	То же	Зеленый, $\lambda_{max} = 565$	0,25	0,3	0,5	—	—
АЛ102Д ***				0,4	0,75	1,5	3,0	60
АЛ307Б(М) **	Ga _{0,7} Al _{0,3} As	Полимерная герметизация	Красный, $\lambda_{max} = 670$	0,9	2,0	5,0	2,0	40
АЛ310А **				0,6	—	—	2,0	—
АЛ307Б ***	GaP:N	То же	Зеленый, $\lambda_{max} = 565$	0,4	1,0	1,8	2,8	40
АЛ307Г ***				1,5	2,5	5,0	—	—
АЛ307Д **	GaP:N, O	> >	Желтый, $\lambda_{эф} = 580$	0,4	1,2	1,8	2,8	40
АЛ307Е **				1,5	2,0	5,0	—	—
АЛ307И **	GaP:N, O	> >	Оранжевый, $\lambda_{эф} = 600$	0,4	1,2	1,8	—	—
АЛ307Л **				1,5	2,0	3,0	2,8	40
АЛ301Б **	GaP:Zn, O	Без корпуса	Красный, $\lambda_{max} = 700$	0,1	0,15	0,22	2,8	180
2Л101А	SiC	То же	Желтый, $\lambda_{max} = 590$	0,1	0,15	—	—	5,0

* При $I_{пр} = 5$ мА.** При $I_{пр} = 10$ мА.*** При $I_{пр} = 20$ мА.

Т а б л и ц а П 4. Параметры корпусных фосфидгаллиевых светоизлучающих диодов с направленным излучением

Тип прибора	Цвет свечения	Сила света I_v , мкд, не менее	Постоянный прямой ток $I_{пр}$, мА	Постоянное напряжение $U_{пр}$, В, не более	Длина волны излучения λ_{max} , мкм	Условное обозначение на корпусе (точка)
АЛ102А	Красный	0,04	5	2,8	0,69	Одна красная
АЛ102Б	Красный	0,10	10	2,8	0,69	Две красные
АЛ102В	Зеленый	0,20	20	2,8	0,53	Одна зеленая
АЛ102Г	Красный	0,25	10	2,8	0,69	Три красные
АЛ102Д	Зеленый	0,40	20	2,8	0,53	Две зеленые
ЗЛ102А	Красный	0,02	5	3,0	0,69	Одна черная
ЗЛ102Б	Красный	0,10	10	3,0	0,69	Две черные
ЗЛ102В	Зеленый	0,25	20	2,8	0,53	Одна белая
ЗЛ102Г	Красный	0,06	10	3,0	0,69	Три черные
ЗЛ102Д	Красный	0,20	10	3,0	0,69	Две белые

Т а б л и ц а П 5. Максимально допустимые режимы корпусных светоизлучающих диодов с направленным излучением для интервала рабочих температур $-60...+70^\circ\text{C}$

Параметр	АЛ102А	АЛ102Б	АЛ102В	АЛ102Г	АЛ102Д	ЗЛ102А	ЗЛ102Б	ЗЛ102В	ЗЛ102Г	ЗЛ102Д
Постоянный прямой ток $I_{пр\ max}$, мА, при $T_{окр}$, $^\circ\text{C}$:										
+50	10	20	22	20	22	20	20	22	20	20
+50...+70	10	10	22	10	22	11	11	22	11	11

Т а б л и ц а П 6. Параметры алюмоарсенидгаллиевых корпусных светоизлучающих диодов с красным рассеиваемым излучением

Тип прибора	Энергетическая яркость L_e , кд/м ² , при $I_{пр}=10$ мА	Длина волны излучения λ_{max} , мкм	Условное обозначение на корпусе
АЛ112А	$1000\pm 50\%$	0,68	Красная полоска
АЛ112Б	$600\pm 50\%$	0,68	Зеленая полоска
АЛ112В	$250\pm 50\%$	0,68	Синяя полоска
АЛ112Г	$350\pm 50\%$	0,68	Красная полоска
АЛ112Д	$150\pm 50\%$	0,68	Зеленая полоска
АЛ112Е	$1000\pm 50\%$	0,68	Красная полоска
АЛ112Ж	$600\pm 50\%$	0,68	Зеленая полоска
АЛ112И	$250\pm 50\%$	0,68	Синяя полоска
АЛ112К	$1000\pm 50\%$	0,68	Красная точка
АЛ112Л	$600\pm 50\%$	0,68	Зеленая точка
АЛ112М	$250\pm 50\%$	0,68	Синяя точка
АЛ310А	—	0,67	Красная точка
АЛ310Б	—	0,67	Синяя точка

Примечание. Для АЛ310А $I_v=0,61...1,2$ мкд, $I_{пр}=10$ мА, для АЛ310Б $I_v=-0,25...0,6$ мкд, $I_{пр}=10$ мА.

Таблица П7. Параметры светоизлучающих диодов в пластмассовом корпусе

Тип прибора	Исходный материал	Цвет свечения	Сила света I_v , мкд	Постоянный прямой ток $I_{пр}$, мА	Постоянное прямое напряжение $U_{пр}$, В, не более	Длина волны излучения λ_{max} , мкм	Условное обозначение на корпусе
АЛ307А	GaAlAs	Красный	0,15	10	2	0,666	Одна черная точка
АЛ307АМ	GaAlAs	Красный	0,15	10	2	0,666	—
АЛ307Б	GaAlAs	Красный	0,9	10	2	0,666	Две черные точки
АЛ307БМ	GaAlAs	Красный	0,9	10	2	0,666	—
АЛ307В	GaP	Зеленый	0,4	20	2,8	0,566	Одна черная точка
АЛ307Г	GaP	Зеленый	1,5	20	2,8	0,566	Две черные точки
АЛ307Д	GaP	Желтый	0,4	10	2,5	0,56; 0,7	Одна черная точка
АЛ307Е	GaP	Желтый	1,5	10	2,5	0,56; 0,7	Две черные точки
АЛ307И	GaP	Оранжевый	0,4	10	2,5	0,56; 0,7	Одна белая точка
А307Л	GaP	Оранжевый	1,5	10	2,5	0,56; 0,7	Две белые точки
АЛ316А	GaAlAs	Красный	0,8	10	2	0,67	Красная полоска
АЛ316Б	GaAlAs	Красный	0,25	10	2	0,67	Синяя полоска

Таблица П8. Параметры фосфидогаллиевых светоизлучающих диодов в металлостеклянном корпусе

Тип прибора	Цвет свечения	Сила света I_v , мкд, не менее	Постоянный прямой ток $I_{пр}$, мА	Длина волны излучения λ_{max} , мкм
ЗЛ341А	Красный	0,15	10	0,69...0,71
ЗЛ341Б	Красный	0,5	10	0,69...0,71
ЗЛ341В	Зеленый	0,15	10	0,55...0,56
ЗЛ341Г	Зеленый	0,5	10	0,55...0,56
ЗЛ341Д	Желтый	0,15	10	0,69...0,7; 0,55...0,56
ЗЛ341Е	Желтый	0,5	10	0,68...0,7; 0,55...0,56

Т а б л и ц а П 9. Параметры карбиткремниевых бескорпусных светоизлучающих диодов

Тип прибора	Цвет излучения	Энергетическая яркость L_e , кд/м ² , не менее	Постоянное прямое напряжение $U_{пр}$, В, не более	Постоянный прямой ток $I_{пр}$, мА	Длина волны излучения λ_{max} , мкм	Условное обозначение на таре-спутнике
КЛ101А	Желтый	10	5,5	10	0,67	—
КЛ101Б	Желтый	15	5,5	20	0,67	—
КЛ101В	Желтый	20	5,5	40	0,67	—
2Л101А	Желтый	10	5	10	0,67	—
2Л101Б	Желтый	15	5	20	0,67	—
АЛ301А	Красный	—	2,8	5	0,7	Одна красная точка Две красные точки
АЛ301Б	Красный	—	2,8	10	0,7	

Примечание. Для АЛ301А $I_{пр} = 0,025$ мкд, для АЛ301Б $I_{пр} = 0,1$ мкд.

Т а б л и ц а П 10. Максимально допустимые режимы бескорпусных светоизлучающих диодов

Тип прибора	Постоянный прямой ток $I_{пр max}$, мА	Интервал рабочих температур, $T_{окр}$, °С	Тип прибора	Постоянный прямой ток $I_{пр max}$, мА	Интервал рабочих температур, $T_{окр}$, °С
КЛ101А	10	-10...+70	2Л101Б	20	-10...+70
КЛ101Б	20	-10...+70	АЛ301А	11	-60...+70
КЛ101В	40	-10...+70	АЛ301Б	11	-60...+70
2Л101А	10	-10...+70			

Т а б л и ц а П 11. Параметры арсенидгаллиевых светоизлучающих диодов инфракрасного спектра в металлоглазном корпусе

Тип прибора	Мощность излучения $P_{изл}$, мВт, не менее	Постоянный прямой ток $I_{пр}$, мА	Постоянное прямое напряжение $U_{пр}$, В, не более	Длина волны излучения λ_{max} , мкм	Время нарастания импульса излучения $t_{пр.изл}$, нс, не более	Время спада импульса излучения $t_{сп.изл}$, нс, не более
АЛ106А	0,2	100	1,7	0,92...0,935	—	—
АЛ106Б	0,4	100	1,7	0,92...0,935	—	—
АЛ106В	0,6	100	1,7	0,92...0,935	—	—
АЛ106Г	1,0	100	1,7	0,92...0,935	—	—
АЛ106Д	1,5	100	1,7	0,92...0,935	—	—
АЛ119А	40	300	3	0,93...0,96	1000	1500
АЛ119Б	40	300	3	0,93...0,96	350	1500
ЗЛ119А	40	300	3	0,93...0,96	1000	1500
ЗЛ119Б	40	300	3	0,93...0,96	350	1500

Таблица П12. Параметры фосфидгаллиевого светоизлучающего диода АЛСЗ3А с управляемым цветом свечения

Параметры	Цвет свечения: от красного до зеленого
Сила света I_v , не менее (при $I_{пр} = 20$ мА)	0,6 мкд
Постоянное прямое напряжение $U_{пр}$ не более (при $I_{пр} = 20$ мА)	4 В
Длина волны излучения λ_{max}	0,7 мкм; 0,56 мкм

Таблица П13. Максимально допустимые режимы светоизлучающих диодов инфракрасного спектра в металлокерамическом корпусе

Тип прибора	Постоянный прямой ток $I_{пр max}$, мА	Тип прибора	Постоянный прямой ток $I_{пр max}$, мА
АЛ106А	100	АЛ119А	200
АЛ106Б	100	АЛ119Б	200
АЛ106В	100	ЗЛ119	200
АЛ106Г	100	ЗЛ119Б	200
АЛ106Д	100		

Таблица П14. Параметры арсенидгаллиевых светоизлучающих диодов инфракрасного спектра в пластмассовом корпусе

Тип прибора	Мощность излучения $P_{изл}$, мВт, не менее	Постоянный прямой ток $I_{пр}$, мА	Постоянное прямое напряжение $U_{пр}$, В, не более	Длина волны излучения λ_{max} , мкм	Ширина спектра излучения $\Delta\lambda = 0,5$ мкм	Время нарастания импульса излучения $t_{вр. изл.}$, нс, не более		Условное обозначение на корпусе
						$t_{ср. изл.}$	$t_{ср. изл.}$	
АЛ108А	1,5	100	1,35	0,94	0,04	—	—	Одна красная точка
ЗЛ108А	1,5	100	1,35	0,94	0,04	—	—	Одна белая точка
АЛ107А	6	100	2	0,95	0,03	—	—	—
АЛ107Б	10	100	2	0,95	0,03	—	—	—
ЗЛ107А	6	100	2	0,94—0,96	0,03	—	—	Один цветной ободок
ЗЛ107Б	10	100	2	0,94—0,96	0,03	—	—	Два цветных ободка
АЛ115А	10	50	2	0,9—1,0	0,05	300	500	—
ЗЛ115А	10	50	2	0,9—1,0	0,04—0,05	300	500	Одна белая точка

Таблица П15. Максимально допустимые режимы светоизлучающих диодов инфракрасного спектра в пластмассовом корпусе

Тип прибора	Постоянный прямой ток $I_{пр max}$, мА	Постоянное обратное напряжение $U_{обр max}$, В	Тип прибора	Постоянный прямой ток $I_{пр max}$, мА	Постоянное обратное напряжение $U_{обр max}$, В
АЛ108А	110	2	ЗЛ107А	80	—
ЗЛ108А	110	2	ЗЛ107Б	80	—
АЛ107А	80	—	АЛ115А	50	4
АЛ107Б	80	—	ЗЛ115А	50	4

Примечание. Для АЛ108А и ЗЛ108А $I_{пр. max} = 10\ 000$ мА, $\tau_d = 20$ мкс.

Т а б л и ц а П 16. П а р а м е т р ы а р с е н и д г а л л и е в ы х б е с к о р п у с н ы х с в е т о и з л у ч а ю щ и х д и о д о в и н ф р а к р а с н о г о с п е к т р а

Тип прибора	Мощность излучения $P_{изл}$, мВт, не менее	Постоянный прямой ток $I_{пр}$, мА	Постоянное прямое напряжение $U_{пр}$, В, не более	Длина волны излучения λ_{max} , мкм	Ширина спектра излучения $\Delta\lambda=0,5$ мкм	Время нарастания импульса излучения $t_{пр.изл}$, нс, не более	Время спада импульса излучения $t_{сп.изл}$, нс, не более
АЛ103А	1	50	1,6	0,95	0,05	200...300	500
АЛ103Б	0,6	50	1,6	0,95	0,05	200...300	500
ЗЛ103А	1	50	1,6	0,95	—	300	800
ЗЛ103Б	0,6	50	1,6	0,95	—	300	800
АЛ109А	0,2	20	1,2	0,94	0,04	—	—

Т а б л и ц а П 17. М а к с и м а л ь н о д о п у с т и м ы е р е ж и м ы б е с к о р п у с н ы х с в е т о и з л у ч а ю щ и х д и о д о в и н ф р а к р а с н о г о с п е к т р а

Тип прибора	Постоянный прямой ток $I_{пр max}$, мА	Постоянное обратное напряжение $U_{обр max}$, В	Тип прибора	Постоянный прямой ток $I_{пр max}$, мА	Постоянное обратное напряжение $U_{обр max}$, В
АЛ103А	52	2	ЗЛ103Б	50	—
АЛ103Б	52	2			
ЗЛ103А	50	—	АЛ109А	22	—

Т а б л и ц а П 18. П а р а м е т р ы и м п у л ь с н ы х с в е т о и з л у ч а ю щ и х д и о д о в и н ф р а к р а с н о г о с п е к т р а

Тип прибора	Исходный материал	Мощность излучения $P_{изл}$, мВт, не менее	Постоянный прямой ток $I_{пр}$, мА	Импульсная мощность излучения $P_{изл.и}$, мВт, не менее	$I_{пр.ш}$, мА
АЛ402А	GaAlAs	0,05	10	10	3000
АЛ402Б	GaAlAs	0,025	10	5	3000
АЛ402В	GaAlAs	0,015	10	3	3000
АЛ118А	GaAs	2	50	10	500
ЗЛ118А	GaAs	2	50	10	500

Тип прибора	Постоянное прямое напряжение $U_{пр}$, В, не более	Длина волны излучения λ_{max} , мкм	Ширина спектра излучения $\Delta\lambda=0,5$ мкм	Время нарастания импульса излучения $t_{пр.изл}$, нс, не более	Время спада импульса излучения $t_{сп.изл}$, нс, не более
АЛ402А	—	0,7...0,69	0,025	25	45
АЛ402Б	—	0,7...0,69	0,025	25	45
АЛ402В	—	0,7...0,69	0,025	25	45
АЛ118А	1,7	0,9...1,0	0,04	100	150
ЗЛ118А	1,7	0,91...0,95	0,04	100	150

Т а б л и ц а П19. Максимально допустимые режимы импульсных светоизлучающих диодов инфракрасного спектра в металлоглазном корпусе

Тип прибора	Постоянный прямой ток $I_{пр\ max}$, мА	Прямой импульсный ток $I_{пр.и\ max}$, мА	Длительность импульса излучения $t_{и}$, мкс	Сквозность Q	Постоянное обратное напряжение $U_{обр\ max}$, В
АЛ402А	12	3100	0,05	2000	—
АЛ402Б	12	3100	0,05	2000	—
АЛ402В	12	3100	0,05	2000	—
АЛ118А	50	500	50	20	1
ЗЛ118А	50	500	50	20	1
		350			

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Носов Ю. Р. Оптоэлектроника. — М.: Сов. радио, 1977. — 232 с.
- Берг А., Дин П. Светодиоды. — М.: Мир, 1979. — 686 с.
- Применение светодиодов на основе гетеропереходов четвертых твердых растворов для измерения влажности/Л. М. Долгинов, М. Мухитдинов, Э. С. Мусаев и др.//Измерительная техника. — 1981. — № 6. — С. 65—67.
- Абишев Т. Д., Есина Н. П., Зотова Н. В. Светодиоды с улучшенной эффективностью для полупроводниковых газоанализаторов//Письма в Журнал технической физики. — 1982. — Т. 8, вып. 13. — С. 779—781.
- Stepniak A. Diody Elektroluminescencyjne z Niekonwencjonalnych Materialow Polprze — Wodnikawych//Elektronika. — 1982. — N 7. — P. 10—13.
- Иванов В. И., Аксенов А. И., Юшин А. М. Параметры и характеристики полупроводниковых излучающих приборов трех классов//Полупроводниковая электроника в технике связи. — М., 1982. — Вып. 22. — С. 188—220.
- Кравцов В. Е., Ловинский Л. С., Самойлов Л. Н. О разработке образцовых средств измерений потока излучения//Тез. докл. III Всесоюз. науч.-техн. конференции «Фотометрия и ее метрологическое обеспечение». — М.: Всесоюз. научно-иссл. ин-т оптико-физических измерений, 1979. — С. 113.
- О температурной нестабильности излучения опорных источников и способы ее компенсации/В. А. Шемякин, В. К. Баранов, В. Н. Парфененок, В. В. Садко.//Оптико-механическая промышленность. — 1978. — № 1. — С. 7—9.
- Метод температурной стабилизации потоков излучения светодиодов/В. Е. Кравцов, В. И. Кузнецов, Л. С. Ловинский и др.//Метрология. — 1979. — № 8. — С. 15—19.
- Простая схема для устранения тепловой нестабильности светодиодов/ВЦП — № 77/1669. — М., 11.12.77. — 4 с.: ил. — Пер. ст. Кайнер Ф., Краузе Г из журн.: Radiotecnica, televisione. — 1974. — Vol. 250, № 25. — P. 30, 31.
- Оптоэлектронные преобразователи и устройства отображения информации Сб. науч. тр. — М.: МАИ, 1983. — 82 с.
- Коньков В. В., Федосеева О. П., Чапнин В. А. Стабилизация излучения светодиодов//Измерительная техника. — 1983. — № 6. — С. 40—42.
- Ходапп М. Применение оптронов в линейных схемах//Электроника. — 1979. — № 5. — С. 33—40.
- Ольшевски Б. Дифференциальный оптрон — средство повышения линейности и стабильности//Электроника. — 1978. — № 2. — С. 48—54.
- Расчет фотоэлектрических цепей/С. Ф. Корндорф, А. М. Дубиновский, Н. С. Муратова и др. — М.: Энергия, 1967. — 200 с.
- Мхитарян В. М., Паргамян Х. В. Скоростные фотоприемники импульсного излучения на основе инерционных фоторезисторов и светодиодов//Журнал технической физики. — 1982. — Т. 52, № 9. — С. 1900—1902.
- Göpel K., Richter K. Einsatz der Optoelektronik in Automatisierungs — Anlagen//Mess. — Stenern Regeln. — 1979. — Vol. 22, N 9. — P. 495—499.

18. А. с. 624368 СССР. Бесконтактный оптоэлектронный сенсорный переключатель/Н. П. Удалов, И. В. Ивкин, В. И. Садовников и др. — Оpubл. 1978, Бюл. № 34.
19. Садовников В. И. Бесконтактный оптоэлектронный переключатель.//Оптоэлектронные преобразователи и устройства отображения информации. — М.: МАИ, 1983. — С. 22—27.
20. А. с. 1089678 СССР. Трехуровневый индикатор напряжения аккумулятора автомобиля/Н. Ш. Габитов, А. Б. Брюханов, В. В. Фомин и др. — Оpubл. 1984, Бюл. № 6.
21. Мальников Г. М., Русланов В. И. Ключевые схемы с оптоэлектронными преобразователями//Электронная техника в автоматике. — М.: Сов. радио, 1973. — С. 119—121.
22. Игумнов Д. В., Чернышев А. А., Шведов А. Н. Особенности применения оптронов в режиме малых токов. — М.: Энергия, 1979. — 56 с.
23. Мухитдинов М. М. Оптоэлектронные измерительные преобразователи. — Ташкент: ФАН, 1983. — 128 с.
24. Чурбаков А. В. Импульсные устройства с диодными оптронами. — М.: Энергия, 1980. — 144 с.
25. А. с. 630733 СССР. Оптоэлектронный мультивибратор/М. М. Мухитдинов, Э. С. Мусаев, У. У. Назаров, В. М. Рожков. — Оpubл. 1978, Бюл. № 40.
26. Схемы автоматики с фоточувствительными и излучающими полупроводниковыми приборами/В. Г. Воронин, А. К. Гребнев, А. Н. Кривонос, В. И. Русланов. — М.: Энергия, 1972. — 80 с.
27. А. с. 572813 СССР. Множительно-делительное оптоэлектронное устройство/М. М. Мухитдинов, У. У. Назаров, В. М. Рожков. — Оpubл. 1977, Бюл. № 34.
28. Пасынков В. И. Волоконно-оптический преобразователь давления.//Новые электронные приборы и устройства/МДНТП. — 1980. — С. 89—92.
29. Красюк Б. А., Корнев Г. И. Оптические системы связи и световодные датчики. — М.: Радио и связь, 1985. — 192 с.
30. Колонистов В. П., Робачевский Н. П. Оптико-акустический приемник с полупроводниковым излучателем и фотоприемником//Оптико-механическая промышленность. — 1983. — № 9. — С. 56.
31. А. с. 670805 СССР. Способ измерения параметров объектов/М. М. Мухитдинов, Э. С. Мусаев, У. У. Назаров и др. — Оpubл. 1979, Бюл. № 24.
32. А. с. 1091028 СССР. Концентраномер/П. М. Сопруок, А. А. Пац, С. К. Кузовкин и Л. Т. Гончарук. — Оpubл. 1984, Бюл. № 17.
33. А. с. 972341 СССР. Фотометр/Е. П. Попечителей, Б. И. Чигирев. — Оpubл. 1982, Бюл. № 41.
34. Мухитдинов М. М. Оптоэлектронные устройства контроля и измерения в текстильной промышленности. — М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. — 126 с.
35. Оптоэлектронные преобразователи на основе управляемых световодных структур/В. И. Бусурин, В. Ф. Ляровский, В. И. Садовников, Н. П. Удалов. — М.: Радио и связь, 1984. — 72 с.
36. А. с. 840711 СССР. Индикатор вида жидкости/Н. П. Удалов, В. И. Бусурин, С. С. Годубев. — Оpubл. 1981, Бюл. № 23.
37. Багровский С. П. Оптронный рефрактометр отражения уравнивающего преобразования//Моделирование и проектирование систем управления технологическими процессами. — Ташкент, 1982. — С. 90—95.
38. Багровский С. П., Поваренкин В. Г., Бабкин Н. В. Рефрактометр отражения с фотометрической регистрацией//Автоматизация химических производств. — М., 1982. — Вып. 2. — С. 39—42.
39. А. с. 939957 СССР. Фотометр/С. П. Багровский, В. Г. Поваренкин, Н. В. Бабкин и др. — Оpubл. 1982, Бюл. № 24.
40. А. с. 890202 СССР. Гигрометр точки росы/А. А. Болотов, Л. Л. Синий. — Оpubл. 1981, Бюл. № 46.
41. А. с. 979978 СССР. Гигрометр точки росы/А. А. Болотов, Л. Л. Синий. — Оpubл. 1982, Бюл. № 45.
42. А. с. 881588 СССР. Оптомолекулярный гигрометр/Н. С. Лидоренко, И. А. Зайденман, Б. И. Ильин и др. — Оpubл. 1981, Бюл. № 42.

43. Wiederhold P., Harding J. Recent Advances in Optical dew Point Hygrometry//Advances Instrumentation. — 1979. — Vol. 33, Part 2. — P. 437—444.
44. Пат. 4345455 (США). Dew Point Hygrometer with Continuous Balancing System. — 24.08.82.
45. Носов Ю. Р., Сидоров А. С. Оптроны и их применение. — М.: Радио и связь, 1981. — 280 с.
46. Гречинский Д. А., Патлах А. Л. Современное состояние и перспективы развития волоконно-оптических преобразователей механических величин//Оптико-механическая промышленность. — 1983. — № 4. — С. 57—60.
47. Мусаев Э. С. Оптоэлектронные методы и устройства контроля влажности с экспоненциальной разверткой//Оптические и радиоволновые методы и средства неразрушающего контроля качества материалов и изделий: Тез. докл. межвуз. конференции. — Фергана, 1981. — Ч. 1. — С. 96—101.
48. А. с. 438918 СССР. Способ измерения относительной влажности/А. С. Малкин, В. А. Усольцев, А. Э. Юнович и др. — Оpubл. 1975, Бюл. № 29.
49. А. с. 419772 СССР. Устройство для количественных измерений компонент среды, прозрачной в какой-либо части спектра светового излучения/В. М. Грабов, Г. А. Иванов, А. С. Малкин и др. — Оpubл. 1974, Бюл. № 10.
50. А. с. 561896 СССР. Оптический влагомер/В. П. Коробцев, Тянь Хак Су, Л. И. Ланенко. — Оpubл. 1977, Бюл. № 22.
51. Курланов Ю. В., Козлов А. Б., Таточенко Л. К. Полупроводниковый инфракрасный влагомер//Технология текстильной промышленности. — 1979. — № 2. — С. 74—77.
52. А. с. 918826 СССР. Влагомер/Ю. В. Курланов, Л. К. Таточенко. — Оpubл. 1982, Бюл. № 13.
53. А. с. 1081488 СССР. Влагомер/Ю. В. Курланов. — Оpubл. 1984, Бюл. № 11.
54. А. с. 819649 СССР. Влагомер/М. М. Мухитдинов, Э. С. Мусаев, В. М. Рожков. — Оpubл. 1981, Бюл. № 13.
55. А. с. 802857 СССР. Фотоэлектрический влагомер/М. М. Мухитдинов, Э. С. Мусаев, В. М. Рожков. — Оpubл. 1981, Бюл. № 5.
56. А. с. 851203 СССР. Влагомер/М. М. Мухитдинов, Э. С. Мусаев, Р. Джапаров. — Оpubл. 1982, Бюл. № 28.
57. А. с. 802856 СССР. Способ измерения влажности/М. М. Мухитдинов, Э. С. Мусаев, В. М. Рожков. — Оpubл. 1981, Бюл. № 5.
58. А. с. 934325 СССР. Влагомер/М. М. Мухитдинов, Э. С. Мусаев. — Оpubл. 1982, Бюл. № 21.
59. А. с. 914975 СССР. Влагомер/М. М. Мухитдинов, Э. С. Мусаев. — Оpubл. 1982, Бюл. № 11.
60. А. с. 1024807 СССР. Устройство для измерения влажности/М. М. Мухитдинов, Э. С. Мусаев, Ю. Мамасадыков. — Оpubл. 1983, Бюл. № 23.
61. Мухитдинов М. М., Назаров У. У. Статические характеристики оптронов светодиод — светодиод//Приборы и системы управления. — 1977. — № 12. С. 30.
62. А. с. 1040348 СССР. Устройство для определения содержания одного вещества в другом/М. М. Мухитдинов, Э. С. Мусаев, Ю. Мамасадыков и др. — Оpubл. 1982, Бюл. № 33.
63. Пат. 2838498 ФРГ. Photoelektrisches Meßgerät/Affonso Alvaro, Hübner Herbert, Dahell Peter, G01N21/02. — Оpubл. 6.03.80.
64. Фотоэлектрический датчик перемещений/И. Р. Добровинский, В. В. Марченко, Ю. Т. Медведик и др.//Оптико-электронные приборы для контроля линейных и угловых размеров. — М., 1981. — С. 67—73.
65. О возможности воспроизведения и передачи единицы лучистого потока — ватта — с помощью светодиодов/А. Ф. Котюк, В. И. Кузнецов, В. М. Нестеренко и др.//Метрология. — 1976. — № 1. — С. 7—14.
66. Фотоэлектрические образцовые средства измерений энергии и максимальной мощности импульсных лазеров/А. И. Глазов, Т. М. Митрофанов, С. В. Тихомиров, В. Г. Тютюник//Измерительная техника. — 1983. — № 9. — С. 53—55.
67. Импульсные имитаторы лазерного излучения/Н. А. Константинов, О. А. Медников, Т. А. Фрагин, Л. А. Хомутова//Приборы, техника эксперимента. — 1978. — № 5. — С. 211—212.

68. **Генератор импульсов точной амплитуды для контроля и стабилизации спектрометрического тракта/Е. В. Лазутик, Ю. В. Кузнецов, И. М. Пискарев и др.//Приборы, техника эксперимента. — 1978. — № 3. — С. 144—146.**
69. **Молчанов М. И., Переверзев А. В., Ярошенко Н. Г. Определение характеристик фотоприемного устройства с помощью светодиода. //Оптико-механическая промышленность. — 1983. — № 9. — С. 57—58.**
70. **Измерение линейности фотометрических устройств с использованием светодиодов/А. П. Захарченко, В. Е. Кравцов, В. И. Кузнецов и др.//Оптико-механическая промышленность. — 1979. — № 1. — С. 48.**
71. **Польщиков Г. В., Мурашко М. П. Импульсная широкополосная схема линеаризации выходной характеристики люминесцентного диода.—//Оптико-механическая промышленность. — 1972. — № 9. — С. 12—16.**
72. **Юшкин А. М., Коняев В. А., Раков Ю. Ф. Некоторые схемы применения полупроводниковых светодиодов и контроль их электрических режимов в радиоэлектронной аппаратуре//Электронная промышленность. — 1973. — № 4. — С. 36.**
73. **Kollman T. M., Reddish J. F. A Continuous ion Selective Analyser//Laboratory Practice. — 1983. — Vol. 32, N 4. — P. 80—84.**
74. **А. с. 528533 СССР. Растровый преобразователь перемещения в фазовый сдвиг/В. В. Драгонер, М. А. Габидулин, Н. Х. Корня. — Оpubл. 1976, Бюл. № 34.**
75. **Пат. 1380045 (Великобритания). Improvements in or relating to position detection and control devices/Alexander Russel, G1O205/21, G01B11/14. — Оpubл. 8.07.75.**
76. **Пат. 4837107 (Япония). Фотоэлектрическое устройство для измерения длины/Нидзука Киеси, 106С34, G01B11/02. — Оpubл. 9.11.73.**
77. **Пат. 3833303 (США). Measuring apparatus using the moire fringe concept of measurement/Richard H. Webster, Donald R. Hosack, Helmut Welker et. al., 356/169, G01B11/04. — Оpubл. 3.09.74.**
78. **А. с. 424209 (СССР). Способ преобразования перемещения в фазовый сдвиг/О. А. Горайнов, М. А. Габидулин. — Оpubл. 1974, Бюл. № 14.**
79. **Голубовский Ю. М., Пивоварова Л. Н., Афанасьева Ж. К. Фотоэлектрические преобразователи линейных и угловых перемещений//Оптико-механическая промышленность. — 1984. — № 8. — С. 50—58.**
80. **Пат. 4049965 США. Measurement apparatus/Robert Martin Pettigrew, 250/237, H01j3/14. — Оpubл. 20.09.77.**

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
<i>Глава 1. Светоизлучающие диоды и их основные характеристики.</i>	
<i>Фотоприемники</i>	
1.1. Типы светоизлучающих диодов	4
1.2. Режимы питания и схемы включения светоизлучающих диодов	9
1.3. Методы компенсации временной и температурной нестабильности излучения светоизлучающих диодов	14
1.4. Фотоприемники и их основные характеристики	17
<i>Глава 2. Электронные устройства автоматики на светоизлучающих диодах</i>	
2.1. Устройства индикации, переключения и защиты	19
2.2. Импульсные и вычислительные устройства	22
2.3. Преобразователи механических величин	25
<i>Глава 3. Устройства контроля и измерения на светоизлучающих диодах</i>	
3.1. Классификация и принципы построения устройств контроля и измерения на светоизлучающих диодах	33
3.2. Одноволновые устройства на светоизлучающих диодах (фотометры)	36
3.3. Многоволновые многоканальные устройства контроля	45
3.4. Светоизлучающие диоды в устройствах метрологического обеспечения и калибровки	54
<i>Глава 4. Практические схемы устройств на светоизлучающих диодах</i>	
4.1. Импульсные и индикаторные устройства	56
4.2. Устройства контроля параметров веществ и материалов	59
4.3. Разрешающая способность устройств контроля на светоизлучающих диодах	66
Приложение	68
Список литературы	75

Производственное издание

Мухитдинов Мухсинжон
Мусаев Эльдар Сейфатович

СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ ДИОДЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Заведующий редакцией Ю. Н. Рысев. Редактор Г. Н. Астафуров.
Художественный редактор Н. С. Шеин. Технический редактор А. Н. Золотарева.
Корректор Н. В. Козлова

ИБ № 1118

Сдано в набор 25.03.87 Подписано в печать 22.06.87
Т-10206 Формат 60×90/16 Бумага типографская № 1 Гарнитура литературная
Печать высокая Усл. печ. л. 5,0 Усл. кр.-отг. 5,25 Уч.-изд. л. 5,47 Тираж 40 000 экз.
Изд. № 21114 Зак. № 53 Цена 30 к.
Издательство «Радио и связь». 101000 Москва, Почтамт, а/я 693

Московская типография № 5 ВГО «Союзучетиздат». 101000 Москва, ул. Кирова, д. 40