

УФ-излучение, применение и обнаружение

Бараночников М. Л. г. Москва. E-mail: baranochnikov@mail.ru

В настоящее время в мире возрос интерес к использованию УФ-диапазона электромагнитного спектра в различных областях науки и техники. Однако, по-прежнему, основной проблемой в эффективном освоении этого диапазона является создание и освоение серийного производства высококачественных и надежных фотоприемников, чувствительных в ультрафиолетовом диапазоне. Ниже рассматриваются перспективы разработки и применения современных УФ-фотоприемников, в том числе, на основе природного алмаза.

1. УФ-излучение и его источники

Ультрафиолетовое излучение (УФ-излучение), не видимое глазом электромагнитное излучение, занимающее спектральную область между видимым и рентгеновским излучениями в пределах длин волн от 10 до 400 нм.

В соответствии с ГОСТ 8552-86 вся область УФ-излучения условно делится на три диапазона: А - 315-400 нм, В - 280-315 нм, С - 200-280 нм.

В зарубежной технической литературе существует несколько иное деление УФ-спектра: диапазон UVB - 280 - 320 нм; UVC - 200 - 280 нм и VUV - менее 200 нм.

Область УФ-излучения от 200 до 400 нм традиционно называют ближней, 10 - 200 нм далекой или вакуумной. Последнее название обусловлено тем, что УФ-излучение этого участка сильно поглощается воздухом и его исследование производят с помощью вакуумных спектральных приборов.

Ближнее УФ-излучение открыто в 1801 году немецким учёным Н. Риттером и английским учёным с У. Волластоном по фотохимическому действию этого излучения на хлористое серебро. Вакуумное УФ-излучение обнаружено немецким учёным В. Шуманом при помощи построенного им вакуумного спектрографа с флюоритовой призмой (1885-1903 г.г.) и безжелатиновых фотопластинок. Он получил возможность регистрировать коротковолновое излучение до 130 нм.

Английский учёный Т. Лайман, впервые построив вакуумный спектрограф с вогнутой дифракционной решёткой, регистрировал УФ-излучение с длиной волны до 25 нм (1924 г.). К 1927 году был изучен весь промежуток между вакуумным УФ и рентгеновским излучением.

Спектр УФ-излучения может быть линейчатым и непрерывным или состоять из полос в зависимости от природы источника УФ-излучения. Линейчатым спектром обладает УФ-излучение атомов, ионов или лёгких молекул (например, водорода H₂). Для спектров тяжёлых молекул характерны полосы, обусловленные электронно-колебательно-вращательными переходами молекул. Непрерывный спектр возникает при торможении и рекомбинации электронов.[1]

1.2. Источники УФ-излучения

1.2.1. Естественные источники УФ-излучения

Источниками естественного УФ-излучения являются Солнце, звёзды, туманности и др. космические объекты. Однако, лишь длинноволновая часть УФ-излучения ($\lambda > 290$ нм) достигает земной поверхности. Более коротковолновое УФ-излучение поглощается озоном, кислородом и другими компонентами атмосферы на высоте 30 - 200 км от поверхности Земли, что играет большую роль в атмосферных процессах.

Солнечная радиация - основной источник энергии для большинства процессов, происходящих на Земле. Излучение Солнца имеет электромагнитную и корпускулярную природы. Корпускулярная солнечная радиация состоит в основном из протонов, обладающих около Земли скоростями 300—1500 км/сек.

Основная часть электромагнитного излучения Солнца лежит в видимой части спектра (рис.1.1.). В табл. 1.1. приведена зависимость спектральной плотности солнечного излучения от длины волны λ в УФ-диапазоне. [2]

Количество лучистой энергии Солнца, поступающей за 1 мин на площадку в 1 см², поставленную вне земной атмосферы перпендикулярно к солнечным лучам на среднем расстоянии Земли от Солнца, называется солнечной постоянной; она равна 1,95 кал/(см² · мин), что соответствует потоку в $1,36 \cdot 10^6$ эрг/(см² · сек). [2]

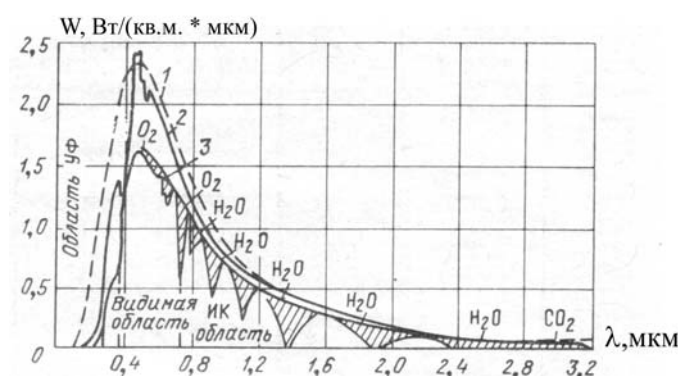


Рис. 1.1. Спектральная интенсивность солнечного излучения. 1 - аппроксимация излучения абсолютно черного тела с температурой 5800°K; 2 - заатмосферная спектральная интенсивность солнечного излучения; 3 - спектральная интенсивность на уровне Земли с полосами поглощения паров воды, кислорода и углекислого газа.

Таблица 1. 1. Зависимость спектральной плотности солнечного излучения $G_c(\lambda)$, измеренной в Вт/см²·мкм от длины волны λ , измеренной в микронах в УФ-диапазоне.

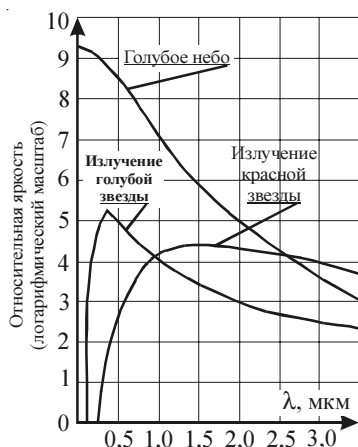
λ , мкм	G_c , Вт/см ² ·мкм	dW,%	λ , мкм	G_c , Вт/см ² ·мкм	dW, %
0,220	0,0030	0,02	0,270	0,025	0,34
0,225	0,0042	0,03	0,275	0,022	0,43
0,230	0,0052	0,05	0,280	0,024	0,51
0,235	0,0054	0,07	0,285	0,034	0,62
0,240	0,0058	0,09	0,290	0,052	0,77
0,245	0,0064	0,11	0,295	0,057	0,98
0,250	0,0064	0,13	0,300	0,061	1,23
0,255	0,010	0,16	0,305	0,067	1,43
0,260	0,013	0,20	0,310	0,076	1,69
0,265	0,020	0,27	0,315	0,082	1,97

dW - доля мощности в солнечном излучении, соответствующая длинам волн, меньшим λ .

При максимуме солнечной активности излучение Солнца несколько увеличивается, однако, если эта возрастание и существует, то оно не превышает долей процента. Коротковолновое излучение Солнца практически полностью поглощается земной атмосферой.

Непрерывный спектр Солнца резко ослабевает при $\lambda \approx 208,5$ нм, в области 155 нм исчезают фраунгоферовы линии и, хотя непрерывный спектр можно проследить до 100 нм, далее 150 нм спектр состоит в основном из линий излучения (линий водорода, ионизованного гелия, многократно ионизированных атомов углерода, кислорода, магния и др.). Всего в ультрафиолетовой части спектра, имеется более 200 линий излучения; наиболее сильна резонансная линия водорода (L_α) с длиной волны 121,6 мкм.

У орбиты Земли поток коротковолнового излучения от всего солнечного диска составляет 3 - 6 эрг/(см²·сек). Рентгеновское излучение Солнца (длины волн от 100 до 1 А) состоит из сплошного излучения и излучения в отдельных линиях. Интенсивность его сильно меняется с солнечной активностью [от 0,13 эрг/(см² · сек) до 1 эрг/(см² · сек) у орбиты Земли] и в годы максимума солнечной активности спектр рентгеновского излучения становится более жёстким.



Во время солнечных вспышек рентгеновское излучение Солнца усиливается в десятки раз. Возрастает и его жёсткость. Хотя ультрафиолетовое и рентгеновское излучения Солнца несут сравнительно немного энергии — менее 15 эрг/(см² · сек) вблизи орбиты Земли, это излучение очень сильно влияет на состояние верхних слоев земной атмосферы.

УФ-излучение звёзд и др. космических тел (рис.1.2.) менее заметно, т.к. поглощается в земной атмосфере, а в интервале 9 - 20 нм оно практически полностью поглощается межзвёздным водородом.

Рис. 1.2. График яркости голубого неба и звезд

1.2.2. Искусственные источники УФ-излучения

Излучение нагретых до 3000°K твёрдых тел содержит заметную долю УФ-излучения непрерывного спектра, интенсивность которого растёт с увеличением температуры. Более мощное УФ-излучение испускает плазма газового разряда. При этом в зависимости от разрядных условий и рабочего вещества может испускаться как непрерывный, так и линейчатый спектр.

Любая высокотемпературная плазма (плазма электрическая искр и дуг, плазма, образующаяся при фокусировке мощного лазерного излучения в газах или на поверхности твёрдых тел, и т. д.) является мощным источником УФ-излучения.

Интенсивное УФ-излучение непрерывного спектра испускают электроны, ускоренные в синхротроне (синхротронное излучение), ракетные двигатели, головные части летательных аппаратов, перемещающихся со сверхзвуковой скоростью.

Для различных применений УФ-излучения промышленность выпускает ртутные, водородные, ксеноновые и др. газоразрядные лампы, окна которых (либо целиком колбы) изготавливают из прозрачных для УФ-излучения материалов (чаще из кварца). Для ультрафиолетовой области спектра разработаны также оптические квантовые генераторы (лазеры). Наименьшую длину волны имеет водородный лазер (109,8 нм). В табл. 1.2. приведены основные характеристики некоторых типов источников УФ-излучения отечественного производства. На рис. 1.3, в качестве примера, приведены спектральные характеристики двух типов источников УФ-излучения: «ртутной» и «ксеноновой» ламп высокого давления.

Искусственные источники УФ-излучения можно условно разделить на две большие группы: промышленного и медицинского назначения.

К источникам промышленного назначения можно отнести все устройства, оборудование и приборы, которые используются в науке, технике и производстве. Например, источники, используемые при изготовлении интегральных схем (в процессах фотолитографии), устройства обеззараживания воды и воздуха и т.д.

К источникам медицинского назначения относятся приборы, используемые в световой физиотерапии, косметологии, стоматологии и т.д. и т.п.

Таблица 1.2. Основные характеристики некоторых типов источников УФ-излучения отечественного производства

Тип источника	Характеристика	Спектр излучения	Длина волны, нм	Назначение
УФО-1, УФО-4	Люминисцентные лампы для облучения светосоставов	Линейчатый	365	Подсветка приборов, определители подлинности банкнот и т.д.
БУВ-15, БУВ-30, БУВ-30П, БУВ-60П ДРБ-40	Бактерицидные облучательные ртутные лампы низкого давления	Линейчатый	254, 365	Обеззараживание (стерилизации) воздуха, помещений, воды, пищевых продуктов и т.д.
ЭУВ-15, ЭУВ-30	Эритемные ртутные лампы низкого давления, использующие свечение люминофоров	Сплошной	280 - 380 $\lambda_{\max} \approx 315$	Компенсации ультрафиолетовой недостаточности, медицина и косметология.
ИВР	Безэлектродная ртутная лампа	Сплошной	230 - 290	Косметические приборы
ИГАР	Ртутная лампа высокого давления	Сплошной	360 - 400	Светокопировальная техника.
РКС-2,5	Ртутно-кварцевые лампы высокого давления	Сплошной	360 - 400	Светокопировальная техника.
ПРК2, ПРК4, ПРК5, ПРК7, ПРК8 ДРТ-125	Ртутно-кварцевые лампы высокого давления	Линейчатый	275, 280, 289, 297, 302, 313, 365, 404, 436	Медицина, экология, фотоотверждение пластмасс и т. д.
ДРШ-100, ДРШ-250, ДРШ-500, ДРШ-1000	Ртутно-кварцевые лампы сверхвысокого давления	Линейчатый	248,2; 289,5; 297; 301; 302; 313,8; 334,5; 365; 373; 405,5; 436,5	Обеззараживание воздуха, экспонирование фотолаков и фоторезистов, медицина, экология и т.д.
ДЦЗС16, ДРС50	Спектральные лампы работающие по принципу дугового разряда.	Линейчатый	253,7; 296,7; 312,6; 334,1	Спектроскопия, рефрактоσκοпия, химия, светотехника, медицина и т.д.
ДКДС20			298,1; 326,1; 340,4; 346,4	
ДЦНС20			280,1; 328,2; 330,3; 334,5	
ДВС25	Спектральные лампы, наполненные водородом, лампы с самокалящимся катодом.	Сплошной	от 214	Спектроскопия, рефрактоσκοпия, химия, светотехника и т.д.
ДВС40			от 185	
ДРТ-220 ДРТ-375 ДРТ-1000 ДРТИ-400	Дуговые ртутно-кварцевые лампы	Сплошной	350 - 450	Обеззараживание (стерилизации) воздуха, помещений, воды, пищевых продуктов, медицина и т.д.
ЛД(Д) ЛВ2 (Cd) ЛВ2 (Zn) ДДС-30	Дейтериевые мощные лампы	Линейчатый	200 - 380	Наука, спектроскопия, экология, промышленность
		Сплошной	150 - 450	
H ₂	Газовый лазер	Монохромный	109,8	
F ₂	Эксимерный лазер	Монохромный	157	
ArF	Эксимерный лазер	Монохромный	193	
KrCl	Эксимерный лазер	Монохромный	222	
KrF	Эксимерный лазер	Монохромный	248 и 308	
Nd:АИГ	Твердотельный лазер	Монохромный	265	
ЛГИ-21	Газовый лазер	Монохромный	337,1	
InGaN	Светодиод полупроводниковый	Сплошной	375 - 385	Подсветка приборов, опр. подлинности банкнот и т.д.

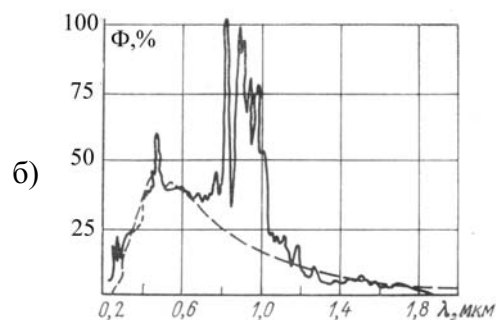
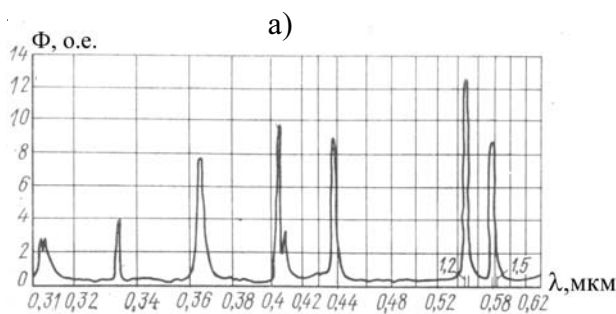


Рис. 1.3. Спектральные характеристики ламп высокого давления: а - «ртутной»; б - «ксеноновой».

Источники ультрафиолетового излучения для практического применения, кроме собственно излучателя (лампы, лазера и т.п.), снабжаются источниками питания, светоотражающими устройствами и фильтрами, специальной оптикой (в необходимых случаях), штативами и т.д.

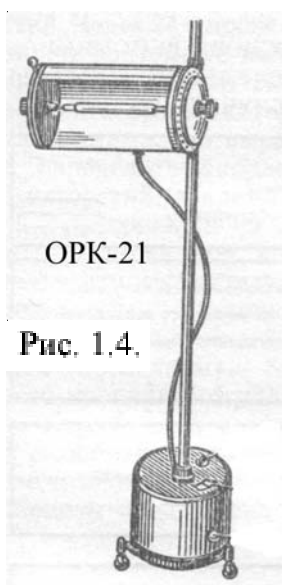


Рис. 1.4.

На рис. 1.4. - 1.7, в качестве примера, приведен внешний вид отечественных источников УФ-излучения, используемых в медицинской практике. На рис. 1.4 показан аппарат «ОРК21», являющийся стационарным облучателем, предназначенным для индивидуального местного и общего ультрафиолетового облучения. Облучатель имеет лампу ДРТ-375, заключенную в рефлектор, установленный на штативе.

Портативный ультрафиолетовый облучатель «ОПУ» (рис.1.5.) с лампой ДРТ-220 применяется для местных облучений. Этот аппарат настольного типа состоит из двух узлов, соединенных штативом-ручкой.

В медицинской практике также используются аппараты для локального воздействия, например, облучатель ультрафиолетовый для носоглотки «ОН-7» с лампой ДРТ-220 (рис. 1.6.). Он представляет собой круглый алюминиевый корпус-рефлектор с четырьмя тубусами со съёмными наконечниками для введения в полость рта, носа или в наружный слуховой проход.

[3]

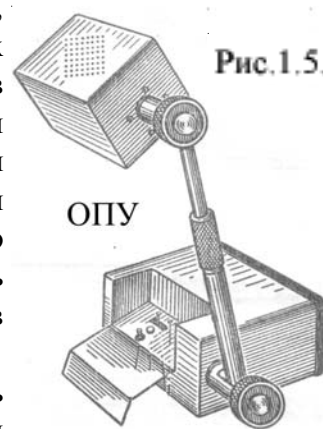


Рис.1.5.

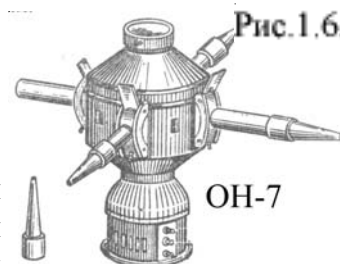


Рис.1.6.

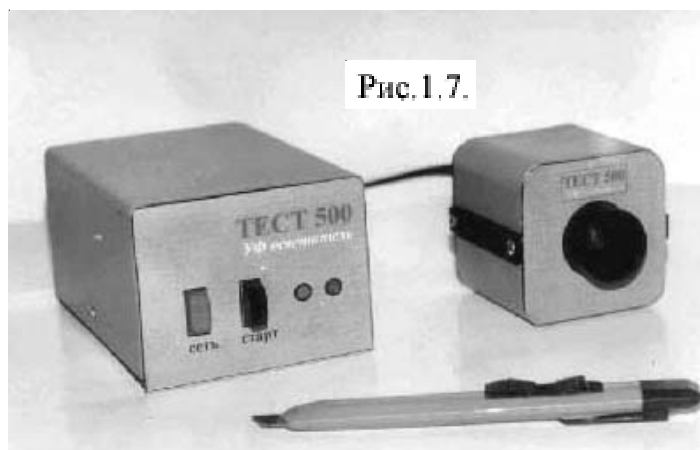


Рис.1.7.

На рис. 1.7. приведен внешний вид УФ-источника типа «Тест 500», который предназначен для использования в качестве источника излучения в оптическо-спектральной аппаратуре, (в том числе в качестве эталонного излучателя), в практической медицине (для облучения крови и обеззараживания инструмента), а также для демонстрационных целей. В зависимости от типа используемой лампы, он генерирует излучение с длинами волн: 254 нм, 314 нм, 365 нм (ртутная лампа); 228 нм. (кадмиевая лампа); 206 нм, 213 нм. (цинковая лампа) и 330-430 нм. (серная лампа).

1.3. Биологическое действие УФ-излучения

Ультрафиолетовое излучение представляет собой участок общего электромагнитного спектра с наименьшей длиной волны, поэтому его кванты несут наиболее высокую энергию, которая в облучаемых тканях трансформируется в химическую и другие виды энергии.

Именно химическая энергия и обусловленные ею химические процессы в тканях лежат в основе биологических преобразований, возникающих после облучения. По своей химической активности ультрафиолетовые лучи значительно превосходят все остальные участки светового спектра. Вместе с тем ультрафиолетовые лучи имеют наименьшую глубину проникновения в ткани — всего до 1 мм. Поэтому прямое влияние их ограничено поверхностными слоями облучаемых участков кожи и слизистых оболочек.

В основе биологического действия ультрафиолетового излучения лежат химические изменения молекул биополимеров. Эти изменения вызываются как непосредственным поглощением ими квантов излучения, так и (в меньшей степени) образующимися при облучении радикалами воды и др. низкомолекулярных соединений.

На человека и животных малые дозы УФ-излучения оказывают благотворное действие - способствуют образованию витаминов группы D, улучшают иммунобиологические свойства организма. Характерной реакцией кожи на УФ-излучение является специфическое покраснение - эритема (максимальным эритемным действием обладает УФ-излучение с длиной волны $\lambda = 296,7$ нм и $\lambda = 253,7$ нм), которая обычно переходит в защитную пигментацию (загар). Большие дозы УФ-излучения могут вызывать повреждения глаз (фотоофтальмию) и ожог кожи. Частые и чрезмерные дозы УФ-излучения в некоторых случаях могут оказывать канцерогенное действие на кожу.

Однако хорошо известно, что местное облучение вызывает и мощные общие реакции организма человека, его жизненно важных органов и систем. Такое воздействие является важным оздоровительным, профилактическим и лечебным фактором. Более того, при неправильном применении, нарушении дозировки и правил техники безопасности ультрафиолетовое облучение может оказывать повреждающее действие как местное, так и общее.

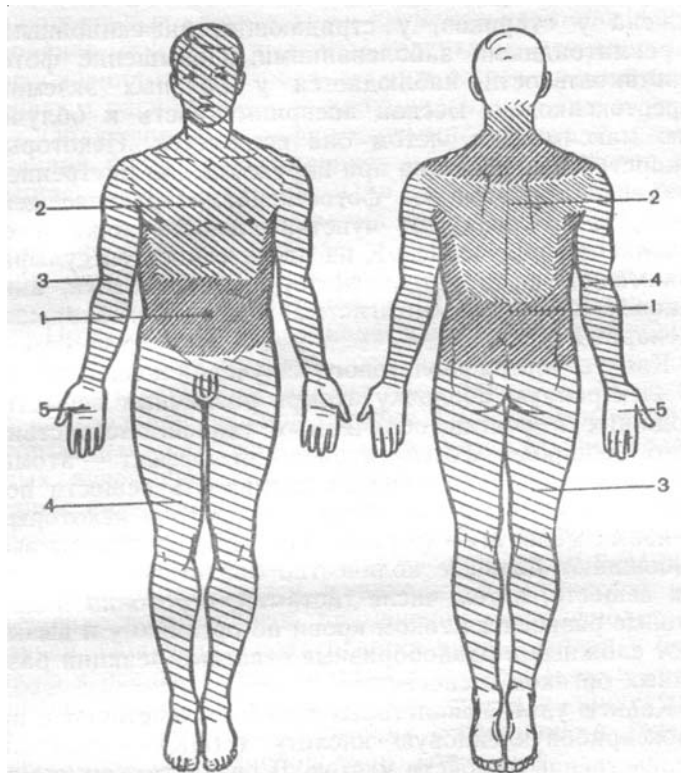


Рис. 1.8 . Схема региональной чувствительности кожи к ультрафиолетовому излучению. Цифрами 1 - 5 обозначены степени понижения фоточувствительности кожи.

Наиболее чувствительна к ультрафиолетовым лучам (фоточувствительность) кожа поверхности туловища, наименее — кожа конечностей (рис. 1.8.). Так, фоточувствительность кожи тыла кистей и стоп в 4 раза ниже, чем кожа живота и поясничной области. Кожа ладоней и подошв наименее чувствительна.

Чувствительность к ультрафиолетовым лучам повышена у детей, особенно в раннем возрасте, но понижена у стариков, у страдающих инфекционными и ревматоидными заболеваниями. Повышение фоточувствительности наблюдается у больных экземой, тиреотоксикозом. Весной восприимчивость к облучению максимальна, летом она снижается. Некоторые лекарственные средства при наружном или внутреннем применении оказывают фотосенсибилизирующее действие, т. е. усиливают чувствительность кожи и ее реакцию на облучение. К их числу относятся сульфаниламидные препараты, некоторые антибиотики, анилиновые красители, антигистаминные и гормональные препараты и др.

Кванты ультрафиолетового излучения воздействуют на электронную оболочку атомов различных веществ, входящих в состав облучаемых тканей. Вследствие этого возникает фотоэлектрический эффект - атомы возбуждаются, а химическая активность веществ повышается. В частности, происходит распад некоторых белковых молекул - фотолиз. При этом молекулы высвобождают большое количество биологически активных веществ, в том числе гистамин, серотонин и др., которые разносятся током крови по организму и вызывают сложные и разнообразные ответные реакции различных органов и систем.

Кванты ультрафиолетовых лучей воздействуют и на дезоксирибонуклеиновую кислоту (ДНК) - носитель наследственных свойств клеток. В результате их изменений возникают клеточные мутации — некоторые клетки при этом погибают. Этот механизм лежит, в частности, в основе бактерицидного действия ультрафиолетового облучения.

К фотохимическому действию ультрафиолетового облучения относится и образование витамина D из неактивного предшественника, на чем основано применение такого облучения для профилактики и лечения рахита у детей, а также при переломах костей.

Воздействие ультрафиолетовых лучей вызывает образование фотоэритемы. В отличие от эритемы, обусловленной влиянием инфракрасных лучей, фотоэритема возникает не сразу, а спустя некоторый латентный (скрытый) период, длительностью 2 - 48 ч. Она проявляется покраснением кожи на облучаемом участке, легким зудом, небольшой припухлостью, затем постепенно угасает и через 2 - 3 дня сменяется пигментными пятнами, коричневого цвета вследствие накопления в клетках кожи пигмента меланина. Образование эритемы вызвано развитием асептического воспаления, своего рода легкого ожога кожи с реактивным расширением ее капилляров.

Облучение ультрафиолетовыми лучами с разной длиной волны обуславливает и разные свойства вызываемой ими эритемы. При коротковолновом излучении она имеет красноватый цвет с синюшным оттенком, образуется и исчезает раньше, при длинноволновом излучении эритема бывает насыщенно красного цвета, позднее появляется и дольше удерживается.

Прямое и опосредованное действие ультрафиолетового излучения можно проследить на всех жизненно важных системах организма. Под влиянием облучения в центральной нервной системе наблюдается усиление тормозных процессов. Большие дозы ультрафиолетовых лучей снижают, а малые, наоборот, усиливают тонус симпатической нервной системы. В крови отмечается повышение количества эритроцитов и увеличение степени их насыщенности кислородом. В последние годы разрабатывается и находит практическое применение новый способ применения ультрафиолетовых лучей. Облучению подвергается кровь, взятая у больного с последующим обратным введением ее в кровеносное русло (реинфузия). Этот метод начинает применяться при гипоксемических состояниях в лечении некоторых форм кислородного голодания.

Ультрафиолетовое облучение повышает активность защитных, саногенетических механизмов, оказывает десенсибилизирующее действие, нормализует процессы свертывания крови, улучшает показатели липидного обмена. Под влиянием ультрафиолетовых лучей улучшаются функции внешнего дыхания, увеличивается активность коры надпочечников, усиливается снабжение миокарда кислородом, повышается его сократительная способность.

Применение ультрафиолетовых лучей в лечебных целях при хорошо подобранной индивидуальной дозе и четком контроле дает высокий терапевтический эффект при многих заболеваниях. Он складывается из обезболивающего, противовоспалительного, десенсибилизирующего, иммуностимулирующего, общеукрепляющего действия ультрафиолетовых лучей. Их использование способствует эпителизации раневой поверхности, а также регенерации нервной и костной ткани. Они оказывают противорахитичное действие.

Показания к лечебному применению ультрафиолетового облучения очень широки. Его назначают: при болезнях внутренних органов (бронхиты, трахеиты, пневмонии, бронхиальная астма, плевриты, ревматизм, атеросклероз, язвенная болезнь); при заболеваниях опорно-двигательного аппарата (артриты, спондилез, последствия переломов костей, миозиты); при заболеваниях нервной системы (невралгии, полиневриты, вегетативно-сосудистые дистонии, травмы спинного мозга и периферических нервов); при заболеваниях кожи (экземы, псориаз, долго не заживающие раны и язвы, после ожогов кожи, при рожевом воспалении).

Ультрафиолетовое облучение может оказывать повреждающее действие при превышении дозировки, а также при повышенной и патологической чувствительности к ультрафиолетовым лучам. Вредные последствия облучения чаще наблюдаются при неумеренной гелиотерапии. Искусственное ультрафиолетовое излучение легче дозировать и контролировать, поэтому осложнения в таких случаях наблюдаются относительно редко.

Недостаточная защита глаз больных и персонала может привести к развитию острого конъюнктивита вследствие ожога ультрафиолетовыми лучами конъюнктивы и роговицы глаз. Это осложнение называется фотоофтальмией. Она проявляется болью, светобоязнью, слезотечением, покраснением конъюнктивы. При грубых нарушениях техники безопасности возможны ожоги кожи. Они требуют лечения, аналогичного таковому при термических поражениях.

Некоторые заболевания могут обостряться под влиянием ультрафиолетового облучения и потому являются противопоказаниями к его применению. К таким заболеваниям относятся злокачественные новообразования, тенденция к кровотечениям, базедова болезнь, системная красная волчанка, кахексия, функциональная недостаточность почек. [3]

В растениях УФ-излучение изменяет активность ферментов и гормонов, влияет на синтез пигментов, интенсивность фотосинтеза и фотопериодические реакции. Не установлено, полезны ли и тем более необходимы ли для прорастания семян, развития проростков и нормальной жизнедеятельности высших растений малые дозы УФ-излучения. Большие дозы УФ-излучения, несомненно, неблагоприятны для растений, о чём свидетельствуют и существующие у них защитные приспособления (например, накопление определённых пигментов, клеточные механизмы восстановления от повреждений).

На микроорганизмы и культивируемые клетки высших животных и растений УФ-излучение оказывает губительное и мутагенное действие (наиболее эффективно УФ-излучение с длиной волны $\lambda = 280 - 240$ нм).

Обычно спектр летального и мутагенного действия УФ-излучения примерно совпадает со спектром поглощения нуклеиновых кислот - ДНК и РНК, в некоторых случаях спектр биологического действия близок к спектру поглощения белков. Основная роль в действии УФ-излучения на клетки принадлежит, по-видимому, химическим изменениям ДНК: входящие в её состав пиримидиновые основания (главным образом тимин) при поглощении квантов УФ-излучения образуют димеры, которые препятствуют нормальному удвоению (репликации) ДНК при подготовке клетки к делению. Это может приводить

к гибели клеток или изменению их наследственных свойств (мутациям).

Определённое значение в летальном действии УФ-излучения на клетки имеют также повреждение биологических мембран и нарушение синтеза различных компонентов мембран и клеточной оболочки.

Большинство живых клеток может восстанавливаться от вызываемых УФ-излучением повреждений благодаря наличию у них систем репарации. Способность восстанавливаться от повреждений, вызываемых УФ-излучением возникла, вероятно, на ранних этапах эволюции и играла важную роль в выживании первичных организмов, подвергавшихся интенсивному солнечному ультрафиолетовому облучению.

По чувствительности к УФ-излучению биологические объекты различаются очень сильно. Например, доза УФ-излучения, вызывающая гибель 90% клеток, для разных штаммов кишечной палочки равна 10, 100 и 800 эрг/мм², а для бактерий *Micrococcus radiodurans* - 7000 эрг/мм².

Чувствительность клеток к УФ-излучению в большой степени зависит также от их физиологического состояния и условий культивирования до и после облучения (температура, состав питательной среды и др.). Сильно влияют на чувствительность клеток к УФ-излучению мутации некоторых генов. У бактерий и дрожжей известно около 20 генов, мутации которых повышают чувствительность к УФ-излучению. В ряде случаев такие гены ответственны за восстановление клеток от лучевых повреждений. Мутации других генов нарушают синтез белка и строение клеточных мембран, тем самым, повышая радиочувствительность негенетических компонентов клетки. Мутации, повышающие чувствительность к УФ-излучению, известны и у высших организмов, в т. ч. у человека. Так, наследственное заболевание - пигментная ксеродерма обусловлено мутациями генов, контролирующих темновую репарацию.

Генетические последствия облучения УФ-излучения, пыльцы высших растений, клеток растений и животных, а также микроорганизмов выражаются в повышении частот мутирования генов, хромосом и плазмид.

Частота мутирования отдельных генов, при действии высоких доз УФ-излучения, может повышаться в тысячи раз по сравнению с естественным уровнем и достигает нескольких процентов.

В отличие от генетического действия ионизирующих излучений, мутации генов под влиянием УФ-излучения возникают относительно чаще, чем мутации хромосом.

Благодаря сильному мутагенному эффекту УФ-излучение широко используют как в генетических исследованиях, так и в селекции растений и промышленных микроорганизмов, являющихся продуцентами антибиотиков, аминокислот, витаминов и белковой биомассы.

Генетическое действие УФ-излучения могло играть существенную роль в эволюции живых организмов. [1, 3]

1.4. Другие применения УФ-излучения

УФ-излучение используется при исследовании атомов, ионов, молекул и твёрдых тел для изучения их уровней энергии, вероятностей переходов и др. характеристик. В УФ-области спектра лежат резонансные линии нейтральных, одно- и двух-кратно ионизованных атомов, а также спектральные линии, испускаемые возбуждёнными конфигурациями высокоионизованных атомов. Электронно-колебательно-вращательные полосы молекул в основном также располагаются в ближней УФ-области спектра. Здесь же сосредоточены полосы поглощения в спектрах большинства полупроводников, возникающих при прямых переходах из валентной зоны в зону проводимости.

Многие химические соединения дают сильные полосы поглощения в УФ-области, что создаёт преимущества использования УФ-излучения при спектральном анализе различных материалов.

УФ-излучение имеет большое значение для внеатмосферной астрофизики при изучении Солнца, звезд, туманностей и др. УФ-спектры Солнца, звёзд и др. несут информацию о физических процессах, происходящих в горячих областях этих космических объектов.

На фотоэффекте, вызываемом УФ-излучением, основана фотоэлектронная спектроскопия. УФ-излучение может нарушать химические связи в молекулах, в результате чего могут происходить различные химические реакции (окисление, восстановление, разложение, полимеризация и т. д.).

Люминесценция, возникающая под действием УФ-излучения, используется при создании люминесцентных ламп, светящихся красок, в люминесцентном анализе и люминесцентной дефектоскопии.

УФ-излучение применяется в банковском деле для проверки подлинности банкнот и других ценных бумаг, в криминалистике для установления идентичности красителей, подлинности документов и т. п. В искусствоведении УФ-излучение позволяет обнаружить на картинах не видимые глазом следы реставраций.

Способность многих веществ к избирательному поглощению УФ-излучения используется в экологии для обнаружения в атмосфере вредных примесей и аэрозолей, для наземных измерений содержания озона в атмосфере, для контроля за содержанием нефтепродуктов в чистых технологических водах, а также в ультрафиолетовой микроскопии.

Приборы, использующие УФ-излучение, находят все более широкое применение в биологии и медицине, в том числе при иммуноферментном анализе крови и белков, и экспресс-контроля концентрации биологически-активных веществ: белков, пептидов, аминокислот, солей. Ультрафиолетовое излучение широко используется в физиотерапии и косметологии.

Высокая бактерицидная эффективность УФ-излучения используется для обеззараживания воды, а также ускоренной сухой низкотемпературной стерилизации и очистки стоматологического и хирургического инструментария, для отверждения пластмасс и т.д.

В электронной промышленности УФ-излучение применяется при лазерной подгонке номиналов тонкоплёночных резисторов интегральных схем, отверждения фотолаков и фоторезистов и т.п.

В последние годы все более широкое распространение получают приборы, регистрирующие УФ-излучение в системах обнаружения возгораний и задымлений, устройствах обнаружения и наведения систем вооружения и т.п.

2. Регистрация УФ-излучения

Для регистрации УФ-излучения при $\lambda > 230$ нм используются обычные фотоматериалы. В более коротковолновой области к нему чувствительны специальные маложелатиновые фотослои. При исследовании УФ-излучения также используют различные люминесцирующие вещества, преобразующие УФ-излучение в видимое, например на основе соединений ZnS, ZnO ($\lambda \gg 300 - 400$ нм). На этой основе созданы некоторые приборы для визуализации изображений, генерируемых в УФ-области спектра.

Широко применяются фотоэлектрические приёмники, использующие способность УФ-излучения вызывать ионизацию и фотоэффект: ионизационные камеры, вакуумные и полупроводниковые фотоэлементы, счётчики фотонов, фотоумножители, вакуумные и полупроводниковые фотодиоды и др. Разработан также особый вид фотоумножителей - каналовые электронные умножители, позволяющие создавать микроканаловые пластины. В таких пластинах каждая ячейка является каналовым электронным умножителем размером до 10 мкм. Микроканаловые пластины позволяют получать фотоэлектрические изображения УФ-излучения и объединяют преимущества фотографических и фотоэлектрических методов регистрации излучения.

Основные параметры и характеристики устройств, приборов и аппаратуры, предназначенных для регистрации УФ-излучения, такие как - рабочий спектральный диапазон, чувствительность, разрешающая способность, быстродействие, масса-габаритные характеристики и энергопотребление, а также эксплуатационная надёжность и стоимость приборов, как правило, определяются типом и качеством используемого датчика или приемника УФ-излучения.

Наиболее широкое применение получили фотоэлектронные и фотоэлектрические приборы, основанные на использовании внешнего и внутреннего фотоэффекта.

2.1. Приёмники УФ-излучения на основе внешнего фотоэффекта

Для работы в УФ-диапазоне спектра наиболее широкое распространение получили вакуумные (или газонаполненные) электронные приборы - фотоэлементы и фотоумножители, действие которых основано на проявлении внешнего фотоэлектрического эффекта.

В основе внешнего фотоэффекта лежит эмиссия фотоэлектронов, возникающая под действием падающего излучения. Эмиссия электронов под действием излучения наблюдается во многих веществах и различных агрегатных состояниях; в твёрдом, жидком, газообразном. Однако, наибольшее практическое применение получило использование фотоэлектронной эмиссии твердых тел - металлов, полупроводников и отдельных видов диэлектриков.

В фотоэлектронных вакуумных приборах поток электронов, испускаемых под действием излучения одним из электродов прибора (фотокатодом) и улавливаемых другим электродом (коллектором электронов или анодом), образует под действием ускоряющего напряжения, приложенного к электродам, ток во внешней цепи, называемый фототоком.

В общем случае для возникновения внешнего фотоэффекта при облучении фотокатода необходимо, чтобы работа выхода материала катода была меньше энергии квантов падающего излучения W_o , связанной с частотой и длиной волны λ излучения уравнением:

$$W_o = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad \text{или} \quad W_o = \frac{1,24}{\lambda} \quad (2.1)$$

Где, c - скорость света, равная $3 \cdot 10^{10}$ см/с; λ - длина волны излучения, мкм; h - постоянная Планка, равная $6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж · с.

При условии, что электрон расположен в поверхностном слое вещества фотокатода и его начальная скорость при выходе из фотокатода равна нулю, минимальное значение энергии кванта, способное вызвать фотоэффект, определяется уравнением:

$$h \cdot \nu = e \cdot \eta \quad \text{или} \quad \nu = \frac{c}{\lambda_0} = \frac{e \cdot \eta}{h} \quad (2.2)$$

Где, ν - частота падающего излучения, Гц;

η - работа выхода материала фотокатода, эВ

Частота, определявшая эту величину, называется граничной, а соответствующая ей длина волны (λ_0) - красной границей чувствительности фотокатода. Длину волны λ_0 , для реальных фотокатодов определяют при заданном значении чувствительности фотокатода по отношению к максимальной, обычно равной 10%.

Следует отметить, что материалом фотокатода определяются основные параметры фотоэлектронных приборов, такие как область спектральной чувствительности, чувствительность, постоянная времени и т.п.

Термины и определения основных параметров фотоэлектронных и фотоэлектрических приборов можно найти в справочной литературе [4,5].

Абсолютную спектральную чувствительность фотоэлектронного прибора можно характеризовать величиной квантового выхода фотоэмиссии, т.е. отношением числа эмитируемых фотоэлектронов к числу падающих на фотокатод фотонов. Соотношение между величиной квантового выхода и спектральной чувствительностью имеют следующий вид:

$$Y = \frac{1,24}{\lambda} = S_{\lambda} \quad (2.3)$$

или

$$S_{\lambda} = 0,807 \cdot Y \cdot \lambda \quad (2.4)$$

Где, Y - квантовый выход в о.е; λ - длина волны излучения, нм; S_{λ} - токовая монохроматическая чувствительность, мА/Вт.

Для изготовления фотоэлектронных приборов используются щелочные металлы, редкоземельные элементы и полупроводниковые соединения. Наиболее высокой чувствительностью в области среднего УФ-диапазона ($\lambda = 200 - 300$ нм) обладают фотокатоды, изготовленные из полупроводниковых соединений класса $A^I B^II$. Из них наиболее широкое распространение получили теллурид цезия ($CsTe$) и рубидия (Rb_2Te). Эти полупроводники с большой шириной запрещенной зоны ($E_g \gg 2,7$ эВ) почти совершенно прозрачные в видимой области, относятся к группе наиболее эффективных фотоэмиттеров. Спектральная чувствительность цезиевого и рубидиевого теллуридов при $\lambda = 250$ нм достигает 40 - 50 мА/Вт, что соответствует квантовому выходу $Y = 0,2 \dots 0,25$.

Солнечно-слепые (нечувствительные к солнечному излучению видимого диапазона) фотокатоды изготавливаются на основе соединений типа двухщелочных теллуридов ($KRbTe$), обладающих спектральной характеристикой, ещё более сдвинутой в коротковолновую область УФ-диапазона спектра.

В более далекой УФ-области спектра (менее 200 нм) высокой квантовой эффективностью обладают фотокатоды на основе соединений типа $A^I B^I Y^{II}$ - галоидные соединения щелочных металлов, например, галоидные соединения серебра и меди, и ряд других соединений [4,5].

Спектральные характеристики большинства фотоэлектронных приборов соответствуют стандартным характеристикам, принятым в СССР. В табл.2.1. приведены типовые (стандартные) спектральные характеристики фотоэлектронных приборов, чувствительных в УФ-диапазоне. На рис. 2.1. и 2.2. приведен вид стандартных характеристик.

Таблица 2.1. Типовые спектральные характеристики фотоэлектронных приборов.

Обозначение спектральной характеристики	Область спектральной чувствительности, мкм	Максимум характеристики спектральной чувствительности, λ_{max} , мкм	Тип фотокатода
C-3	0,215...0,600	0,380±50	Сурьмяно-цезиевый с увиолиевым окном
C-5	0,300...0,800	0,400...0,510	Висмута-серебряно-цезиевый
C-6	0,300...0,600	0,390±50	Сурьмяно-цезиевый на металлической подложке
C-8	0,300...0,650	-	Многощелочной (SbKNaCs)
C-9	0,160...0,650	0,390±50	Сурьмяно-кислородно-цезиевый
C-10	0,215...0,320	-	Магниево-с увиолиевым окном
C-11	0,300...0,850	0,400±50	Многощелочной (SbKNaCs) полупрозрачный
C-13	0,215...0,830	0,400±50	Многощелочной с увиолиевым окном
C-14	0,200...0,400	0,230...0,280	Теллурид-цезиевый
C-15	0,160...0,600	0,380...0,420	Сурьмяно-цезиевый на кварцевой подложке

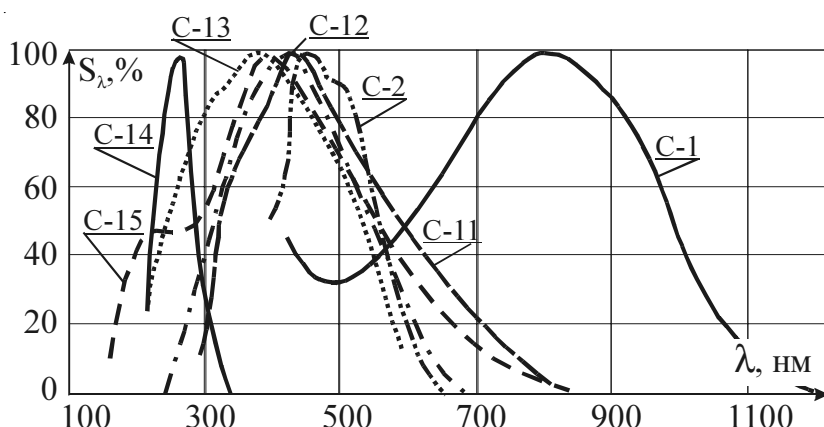


Рис. 2.1. Типовые спектральные характеристики фотоэлектронных приборов.

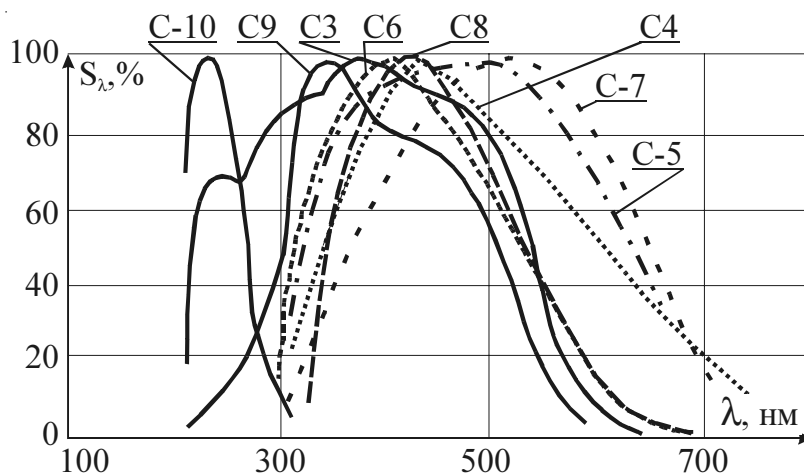


Рис. 2.2. Типовые спектральные характеристики фотоэлектронных приборов.

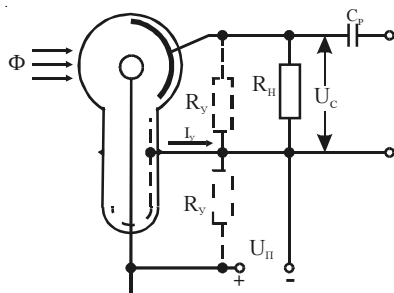


Рис. 2.3. Схема включения вакуумного фотоэлемента с охранным кольцом.

Фотоэлементы являются сравнительно простыми двухэлектродными фотоэлектронными приборами. На рис. 2.3., в качестве примера, приводится схема включения фотоэлемента.

Вакуумные фотоэлементы практически реализуют (без усиления) параметры фотокатода.

Газонаполненные (обычно аргоном) фотоэлементы усиливают фототок в 6 - 10 раз. Токовая монохроматическая чувствительность S_{λ} фотоумножителей в диапазоне длин волн от 250 до 400 нм составляет 0,1 - 40 мкА/Вт. Темновой ток при комнатной температуре лежит в пределах от $1 \cdot 10^{-11}$ до $1 \cdot 10^{-12}$ А. Рабочее напряжение фотоэлементов составляет 100... 300 В. Пороговая чувствительность лежит в пределах от $1 \cdot 10^{-8}$ до $5 \cdot 10^{-12}$ Вт/Гц^{1/2}. Максимальная долговечность фотоэлементов не превышает 1000 часов.[5, 6]

Постоянная времени (инерционность) вакуумных фотоэлементов находится в диапазоне от 2 до 10 нс, а газонаполненных фотоэлементов в пределах 10. ...100 мкс. [5]. Верхняя рабочая частота принимаемого оптического сигнала, в основном, определяется параметрами внешней цепи:

$$f_B \leq \frac{1}{2\pi \cdot R_H \cdot C_H} \quad (2.5)$$

Где, f_B - верхняя частота модуляции оптического излучения, Гц; R_H - сопротивление нагрузки фотоэлемента, Ом; C_H - емкость нагрузки, мкФ.

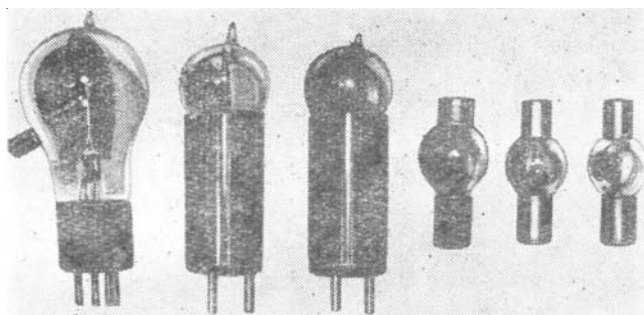
Энергетическая характеристика фотоэлементов достаточно линейна (до 0,3 лм или 0,15 Вт). Линейность характеристики зависит от сопротивления нагрузки и напряжения питания: отклонение от линейности наступает тем раньше, чем выше напряжение питания фотоэлемента и выше сопротивление нагрузки.

Допустимый диапазон рабочих температур окружающей среды, в пределах которого сохраняется чувствительность фотоэлементов обычно составляет от минус 20 до +50°C.

При более глубоком охлаждении наблюдается понижение чувствительности (вблизи порога фотоэффекта) и начинает сказываться увеличение сопротивления фотокатода. При нагреве фотоэлемента свыше 100°C могут наступать необратимые изменения свойств фотокатода.

При конструировании и использовании фотоэлементов значительной проблемой является снижение тока утечки. Ток утечки колбы фотоэлементов (по её наружной и внутренней стороне), и по цоколю при напряжении питания 200 - 300В может достигать величины 10^{-8} - 10^{-7} А. Для снижения тока утечки изготавливают фотоэлементы с разнесенными цоколями, либо вообще без цоколя, удлиняют пути утечки между электродами специальной конструкцией ножки, принимают меры для уменьшения поверхностной проводимости стекла, для чего на наружную поверхность колбы наносят влагостойкое покрытие и т.д. Внешний вид некоторых типов фотоэлементов приведен на рис. 2.4.

Рис. 2.4. Внешний вид некоторых типов вакуумных фотоэлементов.



Наиболее чувствительными эмиссионными приемниками излучения являются фотоумножители (ФЭУ), в которых для усиления фототока используется явление вторичной эмиссии. В них фотоэлектроны падают на промежуточный анод, который называется динодом или эмиттером, и выбивают из него вторичные электроны. Последние, под действием ускоряющего электрического поля, летят на второй динод, находящийся под более высоким положительным потенциалом. Выбитые из второго динода электроны летят на третий динод и т.д., пока электроны, выбитые из последнего динода, не упадут на анод фотоумножителя.

Коэффициент усиления фототока на одном диноде за счет вторичной эмиссии составляет 4 - 10 раз. Поскольку число динодов (каскадов) может составлять десять и более, то коэффициент усиления многокаскадными ФЭУ может достигать 10^6 - 10^8 , при рабочих напряжениях питания от 1000 до 3000В. Спектральная чувствительность ФЭУ определяется материалом фотокатода. Схема включения фотоумножителя приведена на рис. 2.5. Внешний вид некоторых типов ФЭУ показан на рис. 2.6.

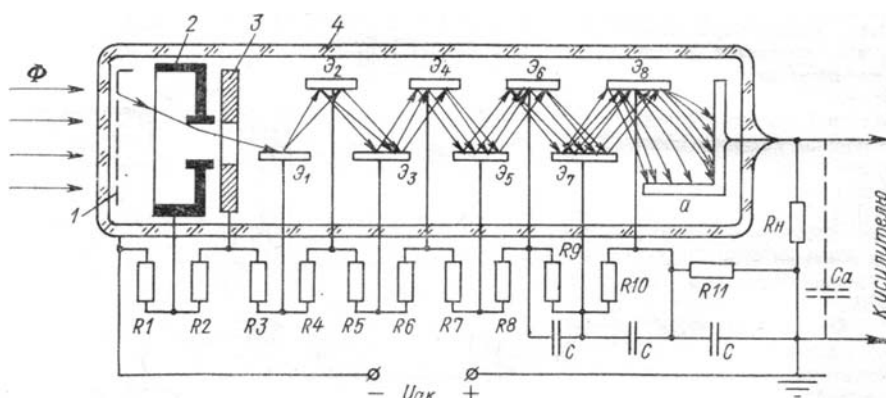


Рис. 2.5. Принципиальная схема и схема включения ФЭУ: 1 - фотокатод; 2 - фокусирующий электрод; 3 - диафрагма; 4 - стеклянный балон; (Э1 - Э8 - диноды, а - анод).

Монохроматическая токовая чувствительность S_{λ} фотоумножителей по току снимаемому с анода, составляет от 10^2 до 10^4 А/Вт для приборов, работающих в УФ-диапазоне. Темновой ток при среднем коэффициенте умножения 10^6 и площади фотокатода 1 см^2 составляет для различных типов ФЭУ величину порядка 10^{-5} - 10^{-11} А.

Для фотоумножителей УФ-диапазона темновой ток составляет от $8 \cdot 10^{-11}$ до 10^{-10} А.

Фотоэлектронные умножители обладают значительным динамическим диапазоном по оптическому сигналу, их энергетическая характеристика линейна до 1000 лк. (При площади фотокатода 1 см^2 это соответствует 0,1 лм или приблизительно 0,005 Вт). Постоянная времени (инерционность) ФЭУ составляет от 2 до 50 нс. [5, 6]

Пороговая чувствительность фотоумножителя УФ-диапазона рассчитывается по формуле:

$$\Phi_{\Pi} = \sqrt{\frac{5e \cdot I_T}{S_{(\lambda)phk} \cdot S_{(\lambda)a}}} \quad (2.6)$$

Где, Φ_{Π} - пороговая чувствительность, Вт/Гц^{1/2}; e - заряд электрона, равный $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; I_T - темновой ток, А; $S_{(\lambda)phk}$ - спектральная чувствительность фотокатода, А/Вт; $S_{(\lambda)a}$ - спектральная анодная чувствительность, А/Вт.

Пороговая чувствительность для высококачественных ФЭУ составляет величину порядка $2 \cdot 10^{-13} - 8 \cdot 10^{-15}$ Вт/Гц^{1/2}. Максимальная долговечность фотоумножителей не превышает 2000 часов. [5,6]

Зависимость параметров фотоэлектронных умножителей от температуры носит сложный характер и может быть различной даже для разных экземпляров ФЭУ одного и того же типа.

Например, охлаждение ФЭУ с полупрозрачным сурьмяно-цезиевым фотокатодом без проводящей подложки до минус 183°С приводит к снижению спектральной чувствительности при длине волны 0,5 мкм в 50... 60 раз. В тех же условиях чувствительность ФЭУ с фотокатодом и проводящей подложкой снижается всего в 2 - 4 раза. В ФЭУ с многощелочным катодами при освещении потоком с различной длиной волны - температурные коэффициенты иногда меняют знак.

Следует отметить, что фотоэлектронным приборам присущ целый ряд недостатков, среди которых можно отметить: неравномерность чувствительности по площади фотокатода, ограниченный динамический диапазон по оптическому сигналу и возможность разрушения отдельных типов фотокатодов при облучении значительными световыми потоками; сильную зависимость чувствительности приборов от фона; ограниченный срок службы (500 – 2000 ч.); довольно сложную схему включения ФЭУ во внешнюю цепь; значительные по величине напряжения питания (до 300 В - для ФЭ, и до 3000 В для ФЭУ), что требует применения достаточно мощных высоковольтных стабилизированных источников питания.

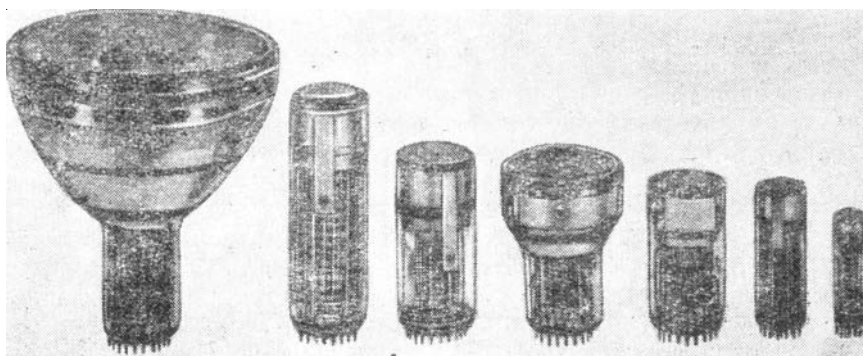
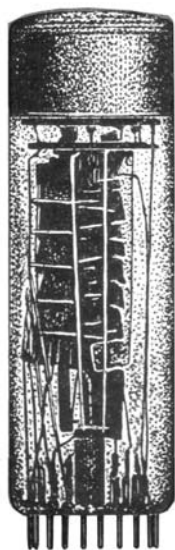


Рис. 2.6. Внешний вид некоторых типов ФЭУ.

Влияние нестабильности источника питания многокаскадного ФЭУ на нестабильность выходного сигнала выражается следующей формулой:

$$\frac{dM}{M} = (0,7 \dots 1,0) \cdot n \cdot \frac{dU}{U} \quad (2.7)$$

где, n – число каскадов фотоумножителя;

dM/M - относительное изменение коэффициента умножения ФЭУ;

dU/U - относительное изменение напряжения питания ФЭУ.

Простой расчет по формуле (2.7) показывает, что для обеспечения постоянства выходного сигнала в 1% для 10-ти каскадного ФЭУ при напряжении питания 1000В, нестабильность источника питания не должна превышать 0,1...0,15%. Коэффициент пульсации напряжения питания при этом не должен быть более 0,01%.

Создание малогабаритных и надежных источников питания на напряжение до 3000В при токе в цепи анода ФЭУ, превышающем 1 мА, с соблюдением указанных требований, представляет собой достаточно серьезную проблему.

Кроме того, фотоэлементам и фотоумножителям свойственны явления старения и утомления. Старение происходит в процессе хранения и не связано с эксплуатацией приборов.

При этом наблюдается изменение, (как правило), уменьшение чувствительности достигающее 40% и более. При включении фотоэлектронных приборов во внешнюю цепь (рабочий режим) и освещении фотокатода происходит изменение его чувствительности, иногда значительное, со стабилизацией через несколько часов работы, и частичным восстановлением - после выключения источника питания. Это явление называют утомлением. В процессе работы чувствительность, как правило, снижается.

Но в отдельных случаях чувствительность приборов может и возрасть вследствие увеличения количества газов в баллоне. Однако, при этом резко снижается отношение сигнал/шум. Пороговая длина волны у всех типов фотокатодов ФЭ и ФЭУ в результате утомления смещается в коротковолновую область спектра на несколько сот ангстрем.

Происходящие изменения характеристик приборов тем сильнее, чем больше освещенность и приложенное напряжение. Например, чувствительность приборов с серебряно-кислородно-цезиевым фотокатодом при освещенности 2500 лк снижается за несколько часов работы на 60-80% от первоначального значения. В газонаполненных фотоэлементах процессы утомления оказываются сильнее, чем в вакуумных.

Процессы старения и утомления фотоэлектронных приборов объясняются как конструкцией приборов и материалом фотокатода, так и несовершенством технологии их изготовления. Утомление значительно увеличивает время готовности прибора.

Завершая обзор основных параметров и характеристик фотоэлектронных приемников УФ-диапазона, следует отметить, что они являются достаточно сложными изделиями электронной техники, со сложной и специфической технологией изготовления. Достаточно сказать, что изготовление фотокатодов ФЭ и ФЭУ, представляющих тонкую пленку химически активного вещества с развитой поверхностью может проводиться только в вакууме при давлении не хуже 10^{-7} мм.рт.ст. и использованием оборудования с безмаслянной откачкой. При этом является обязательной тщательная очистка и обезгаживание всех деталей и элементов конструкции приборов.

Падение вакуума, загрязнение деталей, незначительные натекания по вводам, газоотделение со стенок колбы и металлической арматуры при большой и химически активной поверхности фотокатода делают ФЭ и ФЭУ необычайно чувствительными к изменению состава атмосферы и давления внутри колбы приборов, что приводит к изменению характеристик приборов и снижению их потенциальной надежности.

2.2. Приёмники УФ-излучения на основе внутреннего фотоэффекта

Принцип действия таких приемников заключается в использовании явления перемещения освобожденных излучением электронов внутри твердого тела (без выхода наружу), что влечет за собой изменение его электропроводности или возникновение фото-ЭДС. В этой группе приемников УФ-диапазона наиболее широкое распространение получили фоторезисторы и фотодиоды, длинноволновая граница фотопроводимости приемников основанных на внутреннем фотоэффекте определяется шириной запрещенной зоны материала, используемого в качестве фоточувствительного элемента (ФЧЭ):

$$\lambda_0 = \frac{1,24}{E_g} \quad (2.8)$$

где, λ_0 - длина волны излучения, соответствующая границе фотопроводимости, мкм;
 E_g - ширина запрещенной зоны материала фоточувствительного элемента, эВ.

Для изготовления фоточувствительных элементов приемников УФ-диапазона используются материалы групп $A^{II}B^{VI}$, $A^{III}B^V$, кремний, карбид кремния слоистые соединения. [4, 6].

2.2.1. Фоторезисторы

Из всех известных фотоэлектрических полупроводниковых приборов наиболее простым и дешевым приемником является фоторезистор, действие которого основано на изменении его сопротивления при освещении ФЧЭ. В качестве исходного полупроводникового материала для изготовления ФЧЭ фоторезисторов УФ-диапазона в принципе из материалов группы $A^{II}B^{VI}$ могут использоваться сульфид цинка ($E_g = 3,7\text{эВ}$), селенид цинка ($E_g = 2,7\text{эВ}$) и сульфид кадмия ($E_g = 2,4\text{эВ}$).

В конструктивном отношении чувствительный элемент фоторезистора представляет собой объем полупроводника, заключенный между двумя электродами, проводимость которого изменяется под действием излучения. Наиболее широкое распространение получили два типа конфигураций ФЧЭ – поперечная (рис. 2.7а) и продольная (рис. 2.7б). Схема включения фоторезистора приведена на рис. 2.7в.

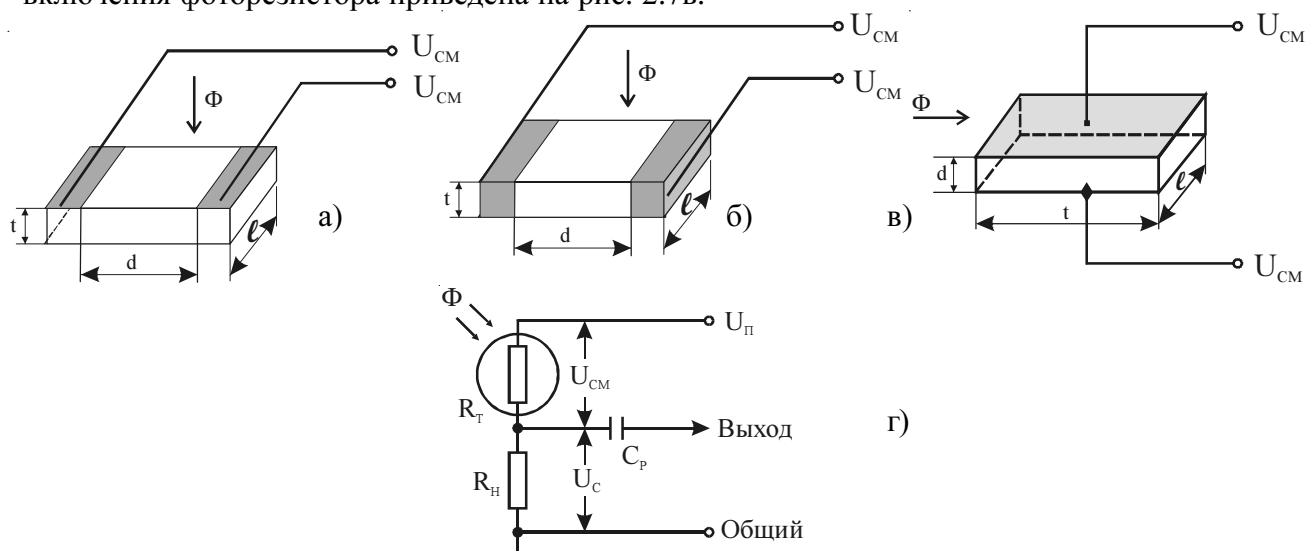


Рис. 2.7. Фоторезистор: а - планарная конструкция ФЧЭ; б - продольная конструкция ФЧЭ; в - поперечная конструкция ФЧЭ; г - схема включения.

В первом случае прикладываемое к ФЧЭ электрическое поле и поток излучения действуют во взаимно перпендикулярных плоскостях, во втором – в одной плоскости. В продольном ФЧЭ - возбуждение осуществляется через контакт (электрод), который должен быть прозрачен для излучения. В общем виде, величина фототока определяется

для поперечной фотопроводимости:

$$I_{p(\text{pop})} = \frac{e \cdot Y \cdot \tau \cdot \mu \cdot \alpha^1}{d^2} \cdot \Phi \cdot U_{cm} \quad (2.9)$$

для продольной фотопроводимости:

$$I_{p(\text{pr})} = \frac{e \cdot Y \cdot \tau \cdot \mu \cdot \alpha^1}{d} \cdot \Phi \cdot U_{cm} \quad (2.10)$$

где, $I_{p(\text{pr})}$ - фототок продольной проводимости, А; $I_{p(\text{pop})}$ - фототок поперечной проводимости, А; e - заряд электрона, Кл; μ - подвижность носителей, $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$; τ - время жизни носителей, с; d - расстояние между электродами, см; t - толщина фоточувствительного элемента в направлении излучения, см.; α - коэффициент поглощения излучения, см^{-1} ; U_{cm} - напряжение на электродах ФЧЭ, В; Φ - поток излучения, Вт/см; Y - квантовый выход, о.е.;

α^1 - безразмерный коэффициент, показывающий долю поглощенного в объеме п/п излучения, равный $\alpha^1 = \alpha \cdot t$.

Характеристикой качества фоторезистора служит величина G , равная

$$G = \frac{\tau \cdot \mu \cdot U_{cm}}{d^2} \quad (2.11)$$

G - обычно называется коэффициентом усиления фототока. Из (2.11) следует, что для получения высокого значения фототока (наибольшей чувствительности) фоторезистора, необходимо выбирать материал для изготовления ФЧЭ, обладающий большим временем жизни τ и высокой подвижностью μ носителей тока. Другой характеристикой качества ФР является отношение токов I_p/I_T , (где I_T - темновой ток, I_p фототок фоторезистора).

Из указанных выше материалов группы $A^{IV}B^{VI}$ наибольшей чувствительностью (I_p/I_T до 10) обладает сульфид кадмия, наименьшей (порядка 2) - сульфид цинка. Сульфид кадмия обладает порогом фотопроводимости на длине волна порядка 0,52 мкм. Фоторезисторы из сульфида кадмия обладают высокой чувствительностью в видимом диапазоне спектра (0,4...0,75) мкм. Длина волны, соответствующая максимуму чувствительности $\lambda_{max} = 0,5$ мкм. Постоянная времени фоторезисторов на основе сульфида кадмия составляет от 5 мс до 8 с. Для работы в УФ-диапазоне фоторезисторы снабжаются специальным светофильтром.

На рис. 2.8. приведен внешний вид и спектральная характеристика фоторезисторов ФСК, чувствительный элемент которых выполнен из сульфида кадмия. Фоторезисторы размещены в пластмассовом корпусе и не имеют входного окна.

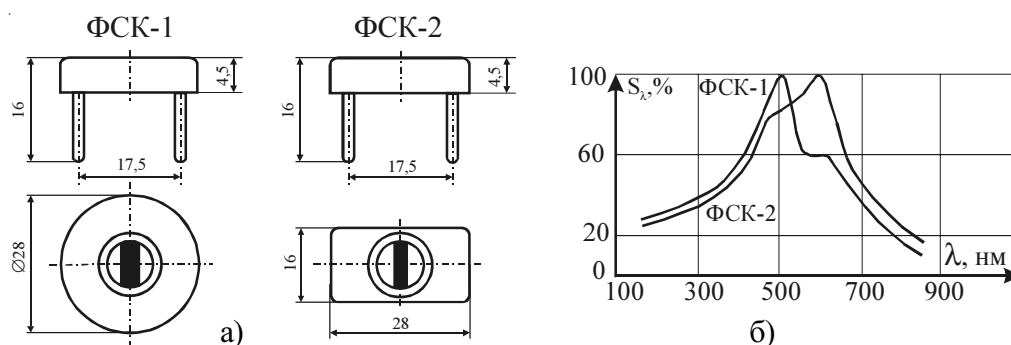


Рис. 2.8. Фоторезисторы типа ФСК-1 с фоточувствительным элементом из сульфида кадмия: а – внешний вид, б - спектральная характеристика.

Отечественной промышленностью на основе сульфида кадмия выпускались два типа фоторезисторов (СФ2-18 и СФ2-19), предназначенных для работы в диапазоне 0,3...0,4 мкм. В указанных фоторезисторах пленочный фоточувствительный элемент расположен в герметичном металlostеклянном корпусе и снабжен светофильтром из стекла УФС-2. Конструкция и спектральная характеристика приборов приведена на рис. 2.9.

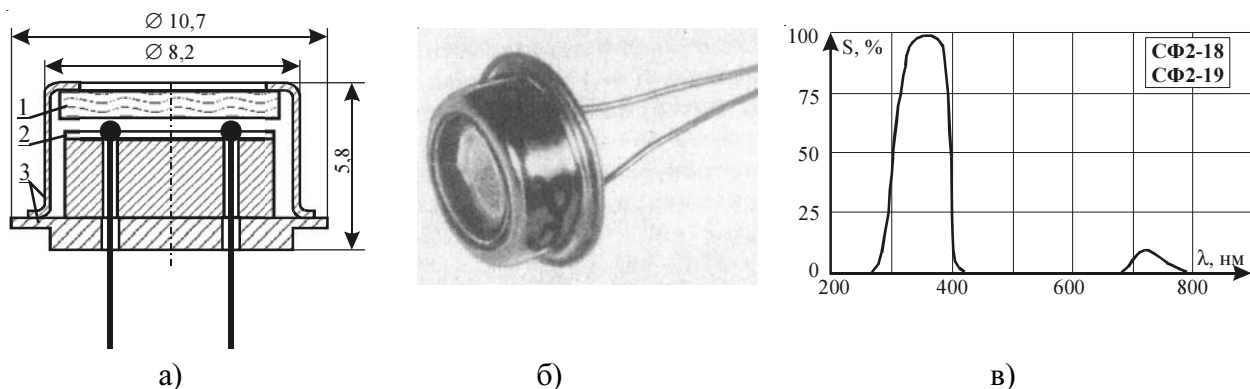


Рис.2.9. Фоторезисторы типа СФ2-18 (СФ2-19): а – устройство: 1- светофильтр, 2 - фоточувствительный слой, 3 - корпус; б внешний вид; в - спектральная характеристика.

Фоторезисторы типа СФ2-18 и СФ2-19 на длине волны $\lambda = 0,365$ мкм имеют спектральную чувствительность порядка 17...57 А/Вт. Пороговая чувствительность составляет $5 \cdot 10^{-12}$ Вт/ Гц^{1/2}, темновое сопротивление от 0,25 до 29 МОм, постоянная времени до 10 мс, рабочее напряжение 5...100В. Температурный коэффициент изменения чувствительности фоторезисторов в диапазоне от минус 60 до +70 °С составляет от +0,2 до -0,2 % на градус. При увеличении температуры происходит уменьшение фототока.[6,7]

Фоторезисторам на основе сульфида кадмия присущ ряд недостатков, среди которых можно отметить: практическое отсутствие чувствительности в коротковолновой области УФ-диапазона (короче 0,3 мкм), неравномерность чувствительности по площади ФЧЭ, нелинейность динамической характеристики по оптическому сигналу (при засветках более 100 мкВт/см), большую постоянную времени фотоответа.

Кроме того, фоторезисторы уменьшают свою чувствительность в первые десятки часов работы (утомление) и обладают невысокой временной стабильностью. В процессе эксплуатации и хранения они могут изменять свою чувствительность, (как правило, уменьшать) на 40...60% от первоначальной величины.

2.2.2. Фотодиоды

В последние годы в качестве приемников УФ-излучения все большее распространение получают фотодиоды - фотоэлектрические приемники с р-п переходом. Действие таких приемников основано на генерации р-п переходом электронно-дырочных пар при воздействии на него потока излучения. Фотодиоды на р-п переходе не обладают эффектом усиления фототока. Монохроматическая чувствительность фотодиода на р-п переходе с квантовым выходом, равном единице определяется, как

$$S_{\lambda} = \frac{\lambda}{1,24} \quad (2.12)$$

где S_{λ} - монохроматическая чувствительность, А/ Вт; λ - длина волны излучения, мкм.

Расчет по формуле (2.12) показывает, что максимальное значение чувствительности р-п перехода на длине волны 0,2 мкм составляет всего 0,16 А/ Вт, а на длине волны 0,4 мкм - 0,32 А/Вт. Длина волны, соответствующая порогу чувствительности определяется по формуле (2.8) и зависит от ширины запрещенной зоны используемых полупроводниковых материалов.

Фотодиоды с обычным р-п переходом (сплавным или диффузионным) имеют низкую чувствительность к УФ-излучению, вследствие её резкого спада на коротких волнах из-за сильного поглощения излучения. В определенной степени отмеченного недостатка лишены фотодиоды, у которых потенциальный барьер образуется не в толще (объеме) полупроводника, а на его поверхности.

Такие фотодиоды получили название поверхностно-барьерных или фотодиодов Шоттки. Смещение потенциального барьера на поверхность полупроводника приводит к тому, что всё коротковолновое излучение, поглощается в поверхностном слое, т.е. в области объемного заряда, что обеспечивает увеличение фототока в коротковолновой области. Барьер Шоттки образуется путем напыления в сверхвысоком вакууме на слой полупроводника тонкого полупрозрачного слоя металла.

Фототок в таком фотодиоде образуется как за счет межзонных переходов электронов в полупроводнике, так и вследствие фотоэмиссии электронов из металла в полупроводник над потенциальным барьером.

Кремниевые фотодиоды с барьером Шоттки обладают чувствительностью в диапазоне от 0,2 до 1,15 мкм. Монохроматическая чувствительность фотодиодов в максимуме спектральной характеристики составляет 0,95 А/Вт ($\lambda = 0,95$ мкм), а в области ультрафиолета достигает 0,04 - 0,08 А/Вт на длине волны 0,284 мкм, лучшие зарубежные образцы фотодиодов имеют чувствительность 0,18 А/Вт на длине волны 0,2 мкм. Порог чувствительности таких фотодиодов достигает $(3 - 7) \cdot 10^{-14}$ Вт \cdot Гц^{1/2}. [3,6,8]

Отечественной промышленностью выпускался кремниевый фотодиод типа ФД-288 с барьером Шоттки. Диапазон спектральной чувствительности фотодиода составляет от 0,3 до 1,05 мкм, монохроматическая чувствительность на длине волны 0,3 мкм находится в пределах 0,04 - 0,06 А/Вт, порог чувствительности $3,6...5,5 \cdot 10^{-12}$ Вт \cdot Гц^{1/2}. Максимум спектральной характеристики находится в пределах $0,850 \pm 50$ нм. Внешний вид фотодиода приведена на рис. 2.10.

Диапазон рабочих температур для фотодиода ФД-288 лежит в пределах от минус 60 до +50°C, темновой ток при комнатной температуре составляет $1,5 \cdot 10^{-7}$ А.



Эксплуатационные характеристики кремниевых фотодиодов с барьером Шоттки, работающих в УФ-диапазоне, изучены пока ещё недостаточно. Однако, можно полагать, что темновой ток фотодиодов, (как и других кремниевых приборов), будет увеличиваться в 2,5 раза на каждые 10°C при повышении температуры окружающей среды. Следовательно, также будет ухудшаться чувствительность диодов. Вопрос об изменении спектральной чувствительности фотодиодов с барьером Шоттки достаточно сложен и требует специального рассмотрения.

Рис. 2.10. Внешний вид фотодиода ФД-288.

Отечественной промышленностью также выпускался кремниевый планарно-диффузионный фотодиод типа М8ППФ1000, предназначенный для работы в УФ-диапазоне. Диапазон спектральной чувствительности фотодиода составляет 0,2 - 1,1 мкм. Максимум спектральной характеристики находится в пределах $0,850 \pm 50$ нм. Монохроматическая чувствительность на длине волны 0,3 мкм составляет 0,08 - 0,12 А/Вт, темновой ток $2 \cdot 10^{-10} - 5 \cdot 10^{-11}$ А. Диапазон рабочих температур фотодиода от минус 5 до +55°C.

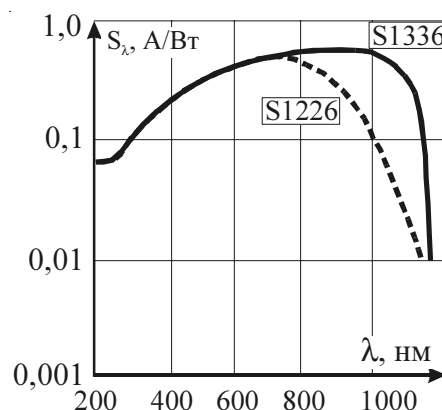
В работе [9] сообщается о том, что Государственным научным центром РФ ГУП НПО «ОРИОН» (г. Москва) разработаны фотодиоды Шоттки на основе двойного соединения фосфида-галлия (GaP). Фотодиод Шоттки на основе GaP работает в области спектра 250 - 470 нм. Особенностью разработанных фотодиодов является возможность регистрации излучения от чрезвычайно низкого до высокого уровня засветки (от $3 \cdot 10^{-12}$ Вт⁻¹ см⁻² до $3 \cdot 10^{-1}$ Вт⁻¹ см⁻²). Пороговая чувствительность, не хуже $3,5 \cdot 10^{-14}$ Вт Гц^{1/2}.

В литературных источниках имеется немало сведений о других типах полупроводниковых приборов, предназначенных для работы в УФ-области спектра. Например, о кремниевых фотодиодах с мелким p-n переходом и инверсным слоем; о фотодиодах на основе арсенида галлия и тройных соединений типа галлий-мышьяк-фосфор;

об инжекционных фотодиодах на основе сульфида цинка; о ячеистых структурах системы кремний-двуокись кремния и др. [11]. Однако, промышленной реализации эти приборы пока не получили.

На сегодняшний день полупроводниковые диоды с барьером Шоттки являются практически единственным типом фотодиодов, работающим в УФ-диапазоне спектра, которые достигли промышленной реализации, и получают все более широкое распространение. Эти приборы отличаются высокой чувствительностью в средневолновой части УФ-диапазона и высоким быстродействием. На рис. 2.11, в качестве примера, приведены спектральные характеристики двух типов фотодиодов, выпускаемых фирмой «Hamamatsu» (Япония).[11].

Рис. 2.11. Спектральные характеристики двух типов фотодиодов, выпускаемых фирмой «Hamamatsu».



Следует отметить, что при промышленной реализации фотодиодов с барьером Шоттки требуется учитывать некоторые особенности приборов этого типа. Например, чувствительность фотодиодов напрямую связана с прозрачностью металлической пленки (полупрозрачного электрода) в УФ-области спектра, которая зависит от толщины пленки.

Однако сильно уменьшить толщину металлического слоя нельзя, т.к. возрастет его продольное сопротивление следовательно, уменьшится фототок. В качестве полупрозрачных электродов обычно используют пленки золота толщиной от 10 до 15 нм. Для уменьшения коэффициента отражения излучения от металлических пленок на них наносят специальные антиотражающее покрытие (слой диэлектрика толщиной в четверть длины волны).

Большое значение для фотодиодов Шоттки имеет качество границы раздела металл-полупроводник. Высота потенциального барьера, в значительной степени, определяет эффективность поверхностно-барьерных структур и зависит от плотности поверхностных электронных состояний, что определяется материалом электрода, качеством обработки поверхности полупроводника, способом нанесения пленок и технологическими условиями изготовления приборов. Для сохранения свойств поверхности ФЧЭ в процессе эксплуатации требуется принятие специальных мер для защиты фоточувствительного элемента, в том числе и размещение его в герметичном корпусе.

Фирмой «BURR-BROWN», входящей в корпорацию «Texas Instruments Incorporated» начат выпуск полупроводникового УФ фотоприемного устройства типа OPT301. В данном приборе в одном кремниевом кристалле размещены фотодиод с приемной площадкой 2,3 x 2,3 мм и усилитель фотосигнала. Напряжение питания ФПУ составляет от ±2.25 до ±18В, ток потребления 400 мкА. [10]

Диапазон спектральной чувствительности ФПУ составляет 0,26 - 1,0 мкм. Максимум спектральной характеристики находится в пределах 0,750±50 нм. Монохроматическая чувствительность на длине волны 0,3 мкм составляет 0,18 А/Вт. Диапазон рабочих температур фотодиода от минус от 40 до +85°С. Прибор размещен в герметичном металlostеклянном корпусе типа ТО-99. На рис. 2.12 приведена спектральная характеристика фотоприемного устройства.

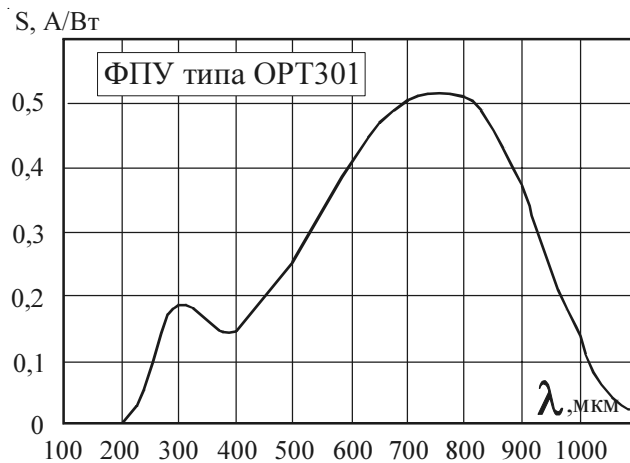


Рис. 2.12. Спектральная характеристика фотоприемного устройства типа OPT301.

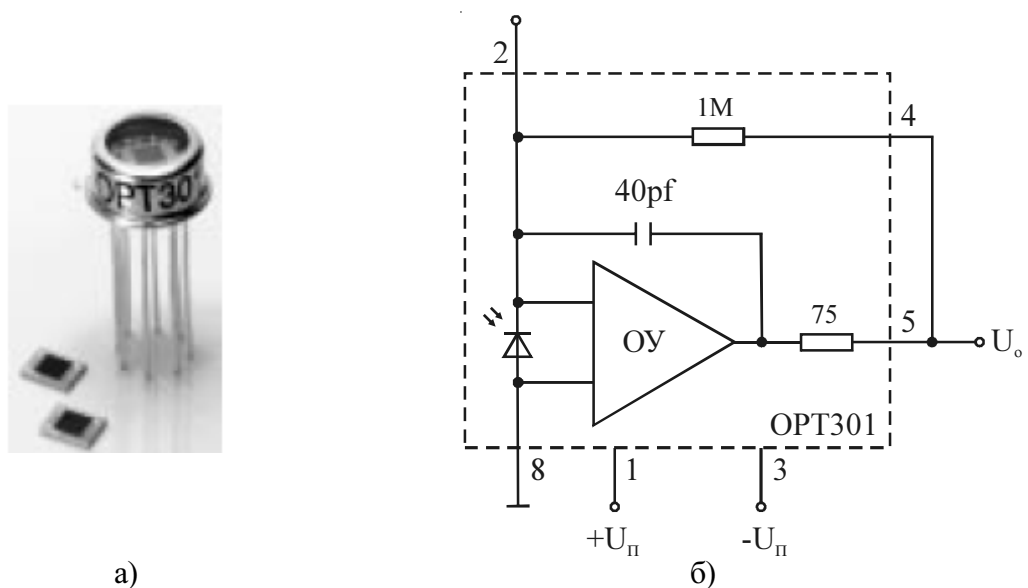


Рис. 2.13. Внешний вид (а) и принципиальная схема (б) фотоприемного устройства типа OPT301, выпускаемого фирмой «BURR-BROWN».

Подводя некоторые итоги рассмотрения параметров и характеристик наиболее широко распространенных фотоэлектронных и фотоэлектрических приемников ультрафиолетового диапазона можно сделать вывод о том, что каждому из рассмотренных типов приборов, кроме достоинств, присущи и определенные недостатки, а также целый ряд конструктивных, технологических и эксплуатационных ограничений.

Ни один из типов рассмотренных приборов не решает всех задач, связанных с регистрацией излучения УФ-диапазоне спектра, а потому необходимо продолжать поиск новых материалов и технических решений.

Основные параметры и характеристики наиболее распространённых фотоприемников УФ-излучения отечественного производства приведены в таблице 2.2.

3. Приёмники УФ-излучения на основе алмаза

Как видно из предыдущего материала, традиционные фотоприемники (фотоэлементы, фотоумножители, фоторезисторы и фотодиоды) не полностью решают задачи регистрации УФ-излучения. Особые проблемы возникают при создании фотоприемников, работающих в коротковолновой части УФ-диапазона спектра.

В последние десятилетия в мире идет интенсивный поиск новых современных материалов для электронных и полупроводниковых приборов. Особый интерес для специалистов представляет природный алмаз, обладающий уникальными свойствами и характеризующийся как «материал XXI века».

В ряде развитых капиталистических стран (США, Япония и др.) осуществляются обширные национальные программы по разработке новых электронных полупроводниковых приборов на основе природного и синтетического алмазов.

В научных источниках имеется ряд сведений о создании на основе алмаза таких приборов, как транзисторы и диоды, детекторы рентгеновского и ядерного излучений, варисторов, лазеров, оптоэлектронных коммутаторов, фотоэмиттеров и фоторезисторов.

Потенциальные преимущества алмазных фотоприемников определяются уникальными свойствами природного алмаза: большой шириной запрещенной зоны, высокой подвижностью носителей, малым временем жизни носителей заряда, высоким темновым сопротивлением и высокой электрической прочностью, повышенной температурной и радиационной стойкостью алмазных кристаллов, а также минимальным уровнем собственных шумов.

Однако, промышленное производство указанных изделий находится на стадиях подготовки и освоения, в основном, зарубежными производителями.

Первые сообщения о фотопроводимости алмаза группы Ia появились более 45 лет тому назад. [11] Дальнейшие исследования, проведенные в нашей стране и за рубежом, подтвердили возможность реализации фоточувствительных приборов с использованием кристаллов природных алмазов.

Из теоретических расчетов и экспериментальных исследований зонной структуры алмаза известно, что переходы, соответствующие энергии ширины запрещенной зоны, являются непрямыми и находятся на расстоянии $0,78k_{\max}$ в направлении [100] от центра зоны Бриллюэна (k - волновой вектор). Поэтому такие переходы происходят с поглощением фотонов. Исследования фононного спектра алмазов дают следующие значения энергии фотонов, участвующих в электронных переходах: 0,141 эВ (поперечный оптический фонон) и 0,163 эВ (продольный оптический фонон). Энергии оптического фонона $k = 0$ составляет 0,167 эВ. Так как энергии фононов достаточно велики, спектр оптического поглощения в УФ-области весьма разнообразен. Большой вклад в фотопроводимость могут давать переходы из глубоких примесных уровней в запрещенной зоне. Спектр фотопроводимости кристаллов Ia с содержанием азота более 10^{19} см^{-3} представляет собой широкую полосу с максимумом вблизи 4,7 эВ, «собственная» фотопроводимость при энергии $E_g \approx 5,5$ эВ не наблюдается (рис. 3.1). При меньшем содержании азота спектр имеет широкое плато с меньшей, чем в Ia, амплитудой и отчетливо выражен пик «собственной» фотопроводимости. Как правило, считается, что основной вклад в примесную, фотопроводимость в диапазоне 4-5 эВ задают, непарамагнитные азотные, дефекты. [12]

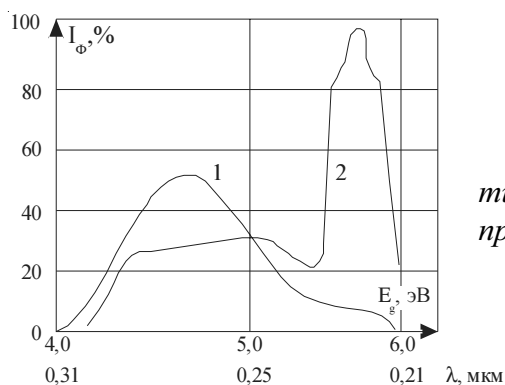


Рис. 3.1. Спектр фотопроводимости алмаза типа Ia (1) и кристалла промежуточного типа (2) при концентрации азота $N \gg 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Особенно перспективным является использование природного алмаза для изготовления фотоприемников ультрафиолетового диапазона спектра с рабочим диапазоном 190...300 нм. Особый интерес представляет создание фотоприемников для работы в жестком ультрафиолетовом диапазоне спектра (ультрафиолет типа «С»: 100...280 нм.), где ощущается острейший дефицит, а использование для этих целей других полупроводниковых материалов весьма затруднительно.

В последние годы в России несколько активизировались работы по созданию различного типа алмазных фотоприемников: фоторезисторов, фотодиодов, фотовольтаических приемников с потенциальной ямой и др. Работы в этом направлении выполнялись в ГИНАЛМАЗЗОЛОТО, АК «АЛРОСА», ЗАО «УралАлмазИнвест», МИРЭА и др.

Принцип действия фотоприемников на основе алмаза аналогичен приборам, изготовленным из других полупроводниковых материалов, например, германия, кремния, антимонида индия и т.п. Конструкция алмазного фотоприемника также аналогична конструкциям широко известных фотоприемников.

Первые отечественные опытные образцы фоторезисторов с использованием природных алмазов были разработаны и изготовлены в начале 90х годов прошлого века в лаборатории Кваскова В. Б. в Государственном институте алмазов и золота.

Для изготовления фоточувствительного элемента алмазного фоторезистора использовалось околуювелирное сырье, добываемое в республика Соха и поставлявшееся в институт Гохраном РФ, как «алмазы для технических нужд».

Конструкция алмазного фоторезистора (АФР) приведена на рис. 3.2. В металlostеклянном цилиндрическом корпусе, имеющем отверстие для входного окна, на специальной подложке из стекла размещался фоточувствительный элемент. ФЧЭ изготавливался из числа предварительно отобранных кристаллов. После стандартной механической обработки (резка, шлифование, полирование и т.д.) из кристаллов неправильной формы выделялись элементы прямоугольной формы. Омические контакты выполнялись при помощи серебрясодержащей пасты, которая вжигалась при температуре 600°C.

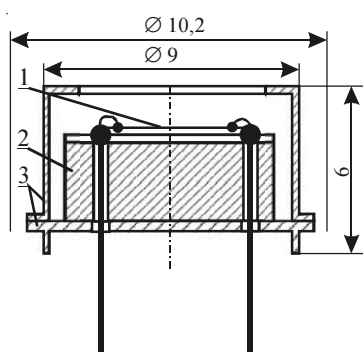


Рис. 3.2. Конструкция алмазного фоторезистора : 1 - фоточувствительный элемент; 2 - подложка; 3 - корпус. Настоящая конструкция фоторезистора разработана канд. физ. мат, наук, ст. научным сотрудником института ГИНАЛМАЗЗОЛОТО Скрипником Федором Васильевичем..

Конструкция фоторезистора предусматривала два варианта использования: без входного окна и с окном, изготовленным из материала, прозрачного в рабочем диапазоне спектра. В последнем случае спектральные характеристики АФР определялась не только свойствами кристалла, но и пропусканием материала из которого изготавливалось входное окно.

В качестве таких материалов использовался плавленый кварц, кварцевое стекло КУ или КИ, увиолевые стекла, УВС1, УТ-48 и УТ-49, оптическая керамика КУ-1-1 и другие материалы, прозрачные в УФ-области спектра. Спектральные характеристики некоторых материалов приведены на рис. 3.3.

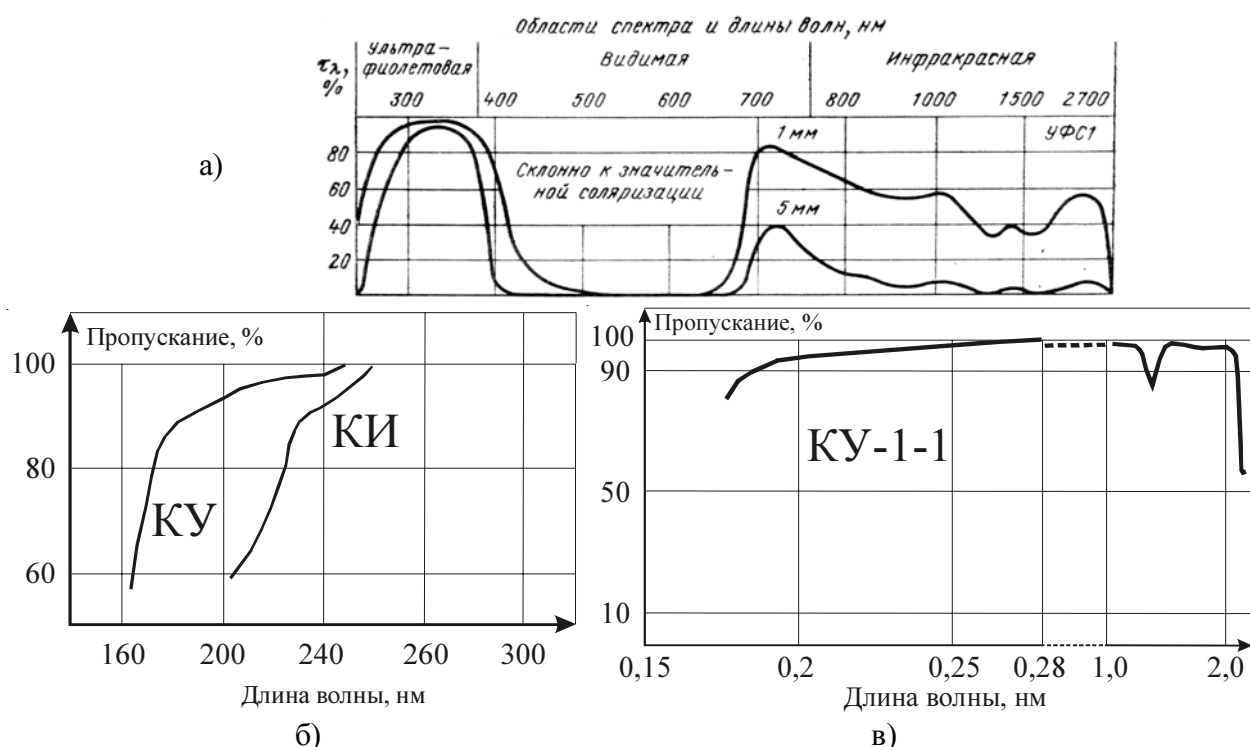


Рис. 3.3. Характеристики пропускания: а – стекла UBC1-1; б – стекла КУ и КИ; в – оптической керамики КУ-1-1.

В 1992 году в институте ГИНАЛМАЗЗОЛОТО сотрудниками Плотниковой С.П. и Скрипником Ф.В. была изготовлена первая опытная партия (более 100 шт.) алмазных фоторезисторов. Для изготовления опытных образцов АФР использовались кристаллы типа Ia и II a. Площадь одного фоточувствительного элемента из алмаза составляла от 2 до 12 мм² при толщине от 0,1 до 1 мм. Масса кристалла составляла от 0,03 до 0,4 карат или от 0,006 до 0,08 г.

Обобщенные параметры опытных образцов АФР приведены в табл. 3.1. , внешний вид - на рис. 3.4, а спектральные характеристики некоторых фоторезисторов приведены на рис. 3.5.

Таблица. 3.1. Обобщенные параметры опытных образцов АФР, изготовленных в институте ГИНАЛМАЗЗОЛОТО

Параметр, единица измерения	Значение параметра
Размер чувствительной площадки, мм ²	2 - 6
Спектральный диапазон чувствительности, нм	215 - 300
Темновое сопротивление, МОм, не менее	300
Рекомендуемое сопротивление нагрузки, МОм,	30
Интегральная токовая чувствительность, мкА/Вт, не менее.	60
Напряжение питания на цепочки «фоторезистор-сопротивление нагрузки», В, не менее	200
Постоянная времени, с	2,5 x 10 ⁻⁶
Габаритные размеры, мм ³	D10,5 x 6,0
Масса, не более, г	3



Рис. 3.4. Внешний вид алмазных фоторезисторов, разработанных в ГИНАЛМАЗЗОЛОТО.

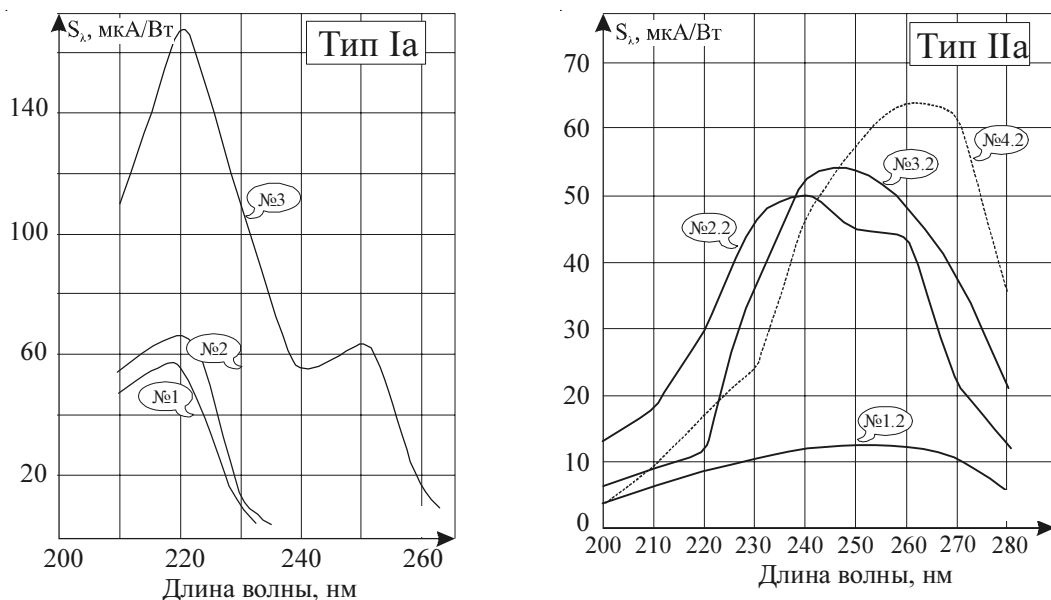


Рис. 3.5. Спектральные характеристики АФР из кристаллов типа I а (а) и II а (б).

По результатам исследований опытных образцов АФР выяснились проблемы и особенности их «поведения», в первую очередь, связанные с высоким темновым сопротивлением фоточувствительного элемента (более 100 Мом) и высоким напряжением питания прибора. При разработке оптико-электронной аппаратуры возникают трудности согласования высокоомного ФЧЭ с её входными цепями. Кроме того, возникают дополнительные затруднения из-за возрастания токов утечки и возможного электрического пробоя при использовании высоковольтных источников питания (100 -1000В), особенно в условиях повышенной влажности (более 35%).

При эксплуатации АФР без входного окна и повышенной влажности воздуха наблюдалось «запотевание» ФЧЭ и возникновение утечек, как на самом кристалле, так и по гермовыводам, что приводило к снижению полезного сигнала и увеличению уровня шумов фоторезистора.

Большинство проблем с использованием алмазных фотоприемников могут быть решены при разработке, т.н. фотоприемных устройств (ФПУ) в состав которых, кроме «алмазного» ФЧЭ, могут входить усилитель фотосигнала, высоковольтный источник питания, схема температурного контроля и т. д. Подробнее см. [4,12]

Возможная структурная схема фотоприемного устройства приведена на рис. 3.6.

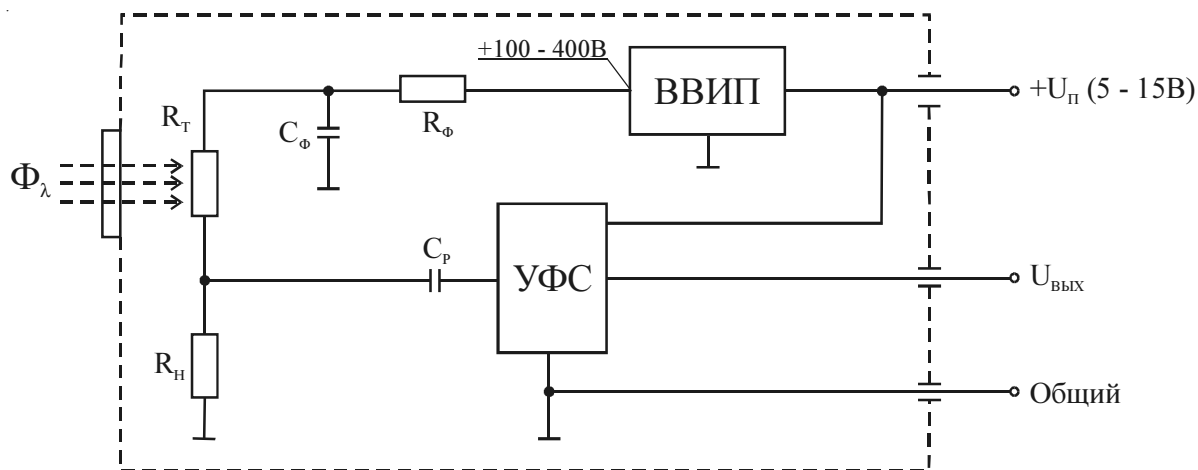


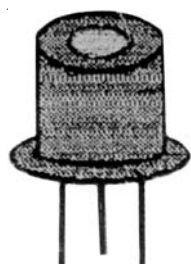
Рис. 3.6. Структурная схема фотоприемного устройства с встроенным высоковольтным вторичным источником питания и усилителем фотосигнала.

Кроме, института ГИНАЛМАЗЗОЛОТО, в России работы по созданию фоторезисторов на основе природного алмаза выполняли и др. организации, например, акционерная компания «АЛРОСА» и ЗАО «УралАлмазИнвест».

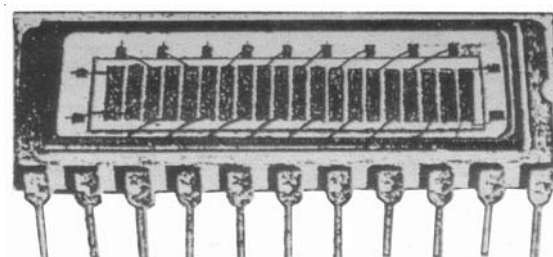
Акционерной компанией «АЛРОСА» были разработаны три варианта алмазных фоторезисторов. Основные параметры АФР приведены в табл. 3.2. , а внешний вид на рис. 3.7. [13]

Таблица 3.2. Основные параметры АФР, разработанных АК АЛРОСА.

Тип прибора	Диапазон спектральной чувствительности, нм	Максимум спектральной характеристики, нм	Напряжение смещения, В	Токовая чувствительность, мА/Вт	Тип корпуса
Тип А	220±8	220	100-400	2-50	ТО-7
Тип В	220-300	250	100-400	0,05-1	ТО-7
Линейка 20 элементов	220-300	н/д	100-400	0,05-1	DIP-22



Тип “А” и “В”



20-ти элементная линейка

Рис. 3.7. Внешний вид алмазных фоторезисторов, разработанных АК АЛРОСА.

В 2003 году ЗАО «УралАлмазИнвест» сообщила о разработке и возможностях производства алмазных фоторезисторов серии ФА. Основные параметры фоторезисторов приведены в табл. 3.3, типовая спектральная характеристика приведена на рис. 3.7, а внешний вид на рис. 3.8. [14]

Таблица 3.3. Основные параметры фоторезисторов ФА-1 - ФА-3, разработанных ЗАО «УралАлмазИнвест». [26]

Параметр, единица измерения	Значение параметра		
	ФА-1	ФА-2	ФА-3
Размер чувствительной площадки, мм ²	1	1	2 - 10
Спектральный диапазон чувствительности, нм	190-300	190-300	180-270
Максимум спектральной характеристики, нм	220		
Монохроматическая токовая чувствительность, А/Вт, не менее	0,03- 0,045	0,08	0,057 - 0,1
Темновой ток, А, не более	$2,8 \times 10^{-12}$	3×10^{-12}	5×10^{-12}
Напряжение смещения, В	30 - 200	30 - 200	30 -150
Постоянная времени, с	250×10^{-6}		
Тип корпуса	ТО-8	ТО-18	DIP-16
Габаритные размеры, мм ³	D11 x 15	D5,5 x 28	6,5 x 19 x 7,5
Масса, не более, г	3	1,5	1,5

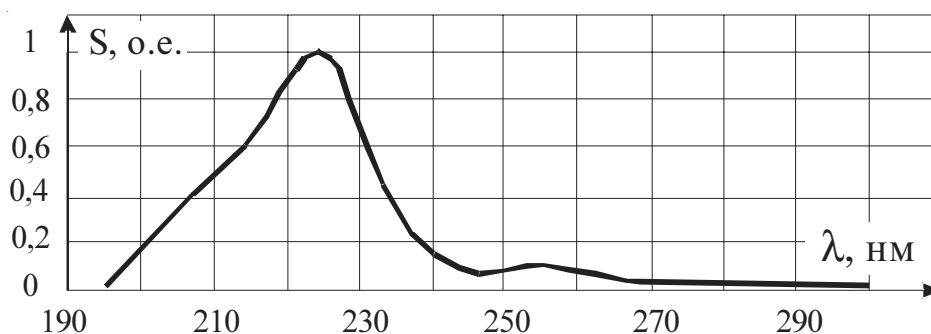
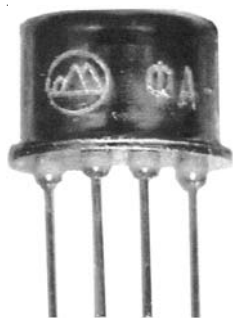


Рис.3.7. Типовая спектральная характеристика алмазных фоторезисторов, рекламируемых ЗАО«УралАлмазИнвест».



ФА-1



ФА-2



ФА-3

Рис. 3.8. Внешний вид фоторезисторов ФА-1 - ФА-3, разработанных ЗАО «УралАлмазИнвест»

Несколько позже ЗАО «УралАлмазИнвест» были предложены еще два типа алмазных фоторезисторов серии ФА-3. Основные параметры фоторезисторов приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4. Основные параметры фоторезисторов ФА-3, разработанных ЗАО «УралАлмазИнвест». [15]

Параметр, единица измерения	Значение параметра	
	ФА-3-1	ФА-3-2
Размер чувствительной площадки, мм ²	2 – 10	
Спектральный диапазон чувствительности, нм	190-300	
Максимум спектральной характеристики, нм	220	
Монохроматическая вольтовая чувствительность, В/Вт, не менее	200	150
Монохроматическая токовая чувствительность, А/Вт, не менее	0,1	0,08
Темновой ток, А, не более	5×10^{-12}	4×10^{-12}
Напряжение смещения, В	30	
Постоянная времени, с	250×10^{-6}	
Тип корпуса	DIP-16	
Габаритные размеры, мм ³	6,5 x 19 x 2	
Масса, не более, г	1,5	

В 2005 году Производственно-технологический Центр «УралАлмазИнвест» сообщил о разработке двух новых типов фотоприемников на основе алмаза: фотовольтаических приемников с потенциальной ямой и р-і-п фотодиодов.

Основные параметры фотовольтаических приемников с потенциальной ямой в табл. 3.5. [32]

Табл. 3.5. Основные параметры фотовольтаических приемников с потенциальной ямой, разработанных ЗАО «УралАлмазИнвест». [15].

Параметр, единица измерения	Значение параметра	
	ФПЯ-1-1	ФПЯ-1-2
Размер чувствительной площадки, мм ²	2 - 10	
Спектральный диапазон чувствительности, нм	190-300	190-300
Максимум спектральной характеристики, нм	220	
Монохроматическая вольтовая чувствительность, В/Вт, не менее	700	150
Монохроматическая токовая чувствительность, А/Вт, не менее	0,15	
Напряжение шума, В/Гц ^{1/2}	1×10^{-8}	
Порог чувствительности, Вт/Гц ^{1/2}	$(1-2) \times 10^{-14}$	
Динамический диапазон, Вт/см ²	$10^{-12} - 10^{-2}$	
Постоянная времени, с	250×10^{-6}	
Напряжение смещения, В	100	
Тип корпуса	DIP-16	
Габаритные размеры, мм ³	6,5 x 19 x 7,8	
Масса, не более, г	1,5	

Основные параметры “алмазных” р-і-п фотодиодов типа ФД-1, разработанных ЗАО «УралАлмазИнвест», приведены в таблице 3.6. На рис.3.9. приведена спектральная характеристика, а на рис 3.10 схема включения и внешний вид фотоприемников.

Табл. 3.6. Основные параметры “алмазных” р-і-п фотодиодов типа ФД-1, разработанных ЗАО «УралАлмазИнвест». [15].

Параметр, единица измерения	Значение параметра	
	ФД-1-1А	ФД-1-2А
Размер чувствительной площадки, мм ²	2 – 10	
Спектральный диапазон чувствительности, нм	180-300	180-300
Максимум спектральной характеристики, нм	220	
Монохроматическая вольтовая чувствительность, В/Вт, не менее	200	150
Монохроматическая токовая чувствительность, А/Вт, не менее	0,13	
Напряжение шума, В/Гц ^{1/2}	1x10 ⁻⁸	
Порог чувствительности, Вт/Гц ^{1/2}	(1-2) 10 ⁻¹⁴	
Удельная обнаружительная способность, см x Гц ^{1/2} /Вт, не менее	0,3 x 10 ¹²	
Темновой ток, А, не более	1 x 10 ⁻¹²	
Напряжение смещения, В	60 - 100	
Постоянная времени, с	250 x 10 ⁻⁶	
Тип корпуса	DIP-16	
Габаритные размеры, мм ³	6,5 x 19 x 2	
Масса, не более, г	1,5	

Примечание: Величины токовой чувствительности и порога, приведенные в табл. 3.5 и 3.6 вызывают некоторые сомнения, т.к. эти значения превышают теоретический предел.

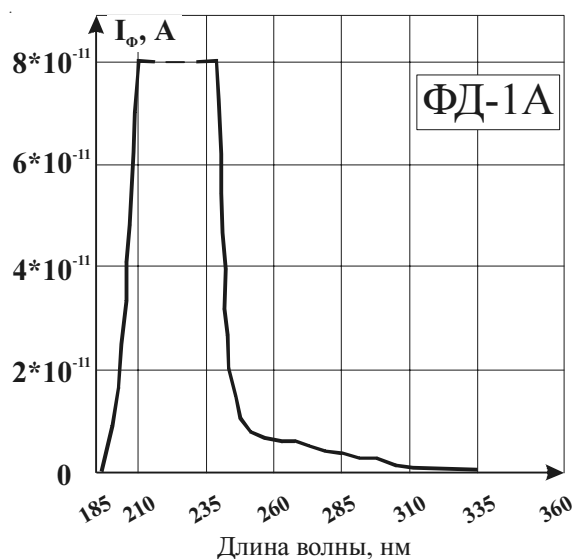


Рис. 3.9. Спектральная характеристика “алмазного” фотодиода ФД-1.

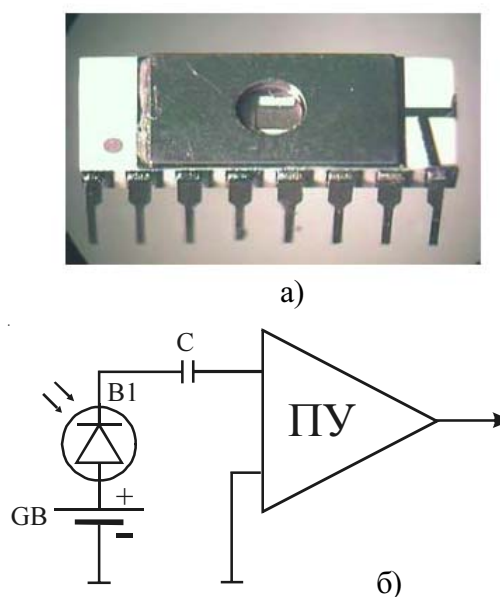


Рис. 3.10. Внешний вид (а) и схема включения (б) “алмазного” фотодиода ФД-1.

В 2005 году Производственно-технологический Центр «УралАлмазинвест» также сообщил о разработке фотоприемного устройства на основе алмаза.[15].

Фотоприемное устройство предназначено для обнаружения слабых оптических сигналов, регистрации и измерения параметров ультрафиолетового излучения путем преобразования оптического излучения в электрический сигнал.

Основные параметры ФПУ типа ФПА-1 приведены в табл. 3.7. На рис. 3.11 приведена принципиальная электрическая схема, а на рис. 3.12 приведены спектральные характеристики ФПУ.

На рис. 3.13 приведено схематическое устройство и внешний вид фотоприемного устройства. Внутри металлокерамического 22-х выводного DIP-корпуса установлены: «алмазный» фоточувствительный элемент, бескорпусная интегральная схема операционного усилителя типа К744УД1а-1 и пассивные компоненты. Корпус имеет входное окно из материала, прозрачного для УФ-излучения.

Таб. 3.7. Основные параметры фотоприемного устройства типа ФПА-1, разработанного ЗАО «УралАлмазИнвест». [15].

Параметр, единица измерения	Значение параметра
Размер чувствительной площадки, мм ²	2 - 10
Спектральный диапазон чувствительности, нм	190 - 280
Максимум спектральной характеристики, нм	220
Монохроматическая вольтовая чувствительность, В/Вт, не менее	$2,3 \times 10^6$
Монохроматическая токовая чувствительность, А/Вт, не менее	2
Порог чувствительности, Вт/Гц ^{1/2}	$(1-2) \cdot 10^{-14}$
Напряжение смещения для фотоприемника, В	5 - 100
Напряжение питания предусилителя, В	± 12
Постоянная времени, с	250×10^{-6}
Тип корпуса	DIP-22
Габаритные размеры, мм ³	10,5 x 28 x 2
Масса, не более, г	5

Примечание: Величины порога чувствительности, приведенная в табл. 3.7 вызывает некоторые сомнения, т.к. это значение превышает теоретический предел.

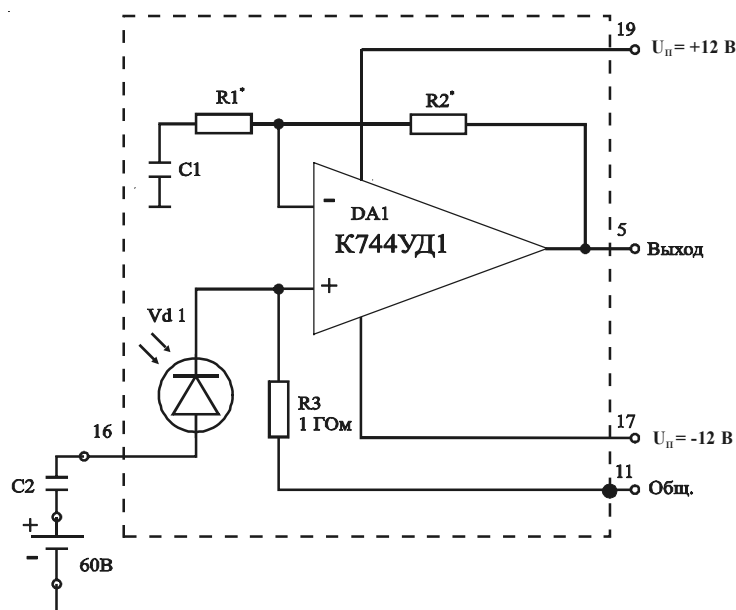


Рис. 3.11. Принципиальная электрическая схема ФПУ типа ФПА-1.

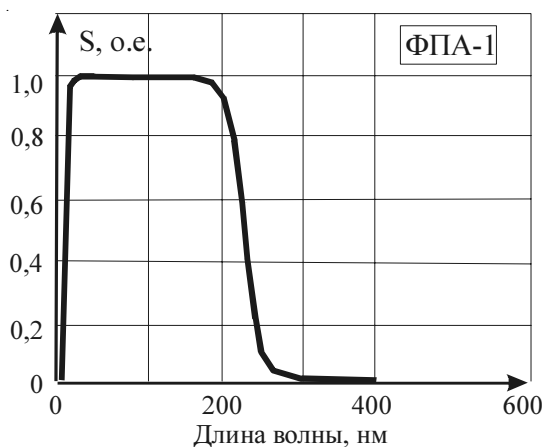


Рис. 3.12а. Относительная спектральная характеристика чувствительности ФПУ типа ФПА-1 без входного окна

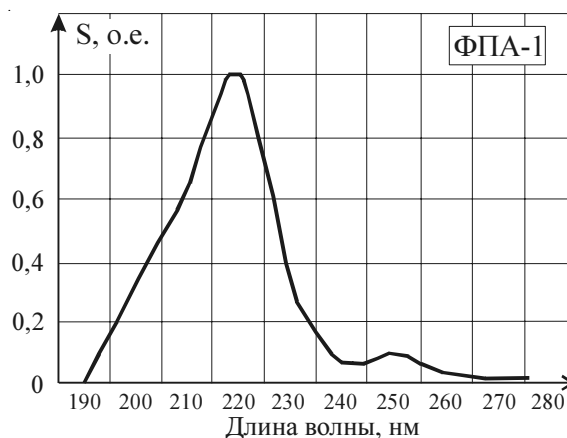
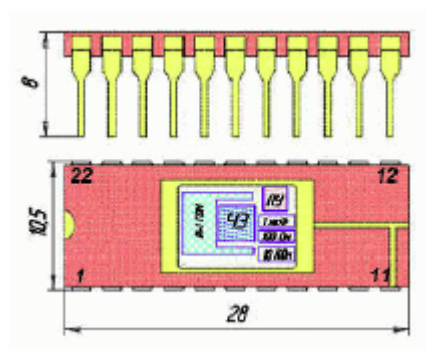


Рис. 3.12б. Относительная спектральная характеристика чувствительности ФПУ типа ФПА-1 с кварцевым входным окном



а)



б)

Рис. 3.13. Схематическое устройство (а) и внешний вид (б) ФПУ типа ФПА-1.

Подводя итоги, можно сказать, что в составе фотоприемного устройства вполне возможна приборная реализация достаточно высоких фотоэлектрических параметров высокоомных ФЧЭ из алмаза. Благодаря освоению нового спектрального диапазона такие ФПУ удачно дополняют существующий ряд приборов.

На основе алмазов возможно создание современных и надежных фотоприемников УФ-диапазона с высокой спектральной селективностью, работающих в широком диапазоне температур (практически от -200 до $+250$ °С и выше).

Стоимость таких приборов не должна быть существенно выше стоимости фотодиодов с барьером Шоттки или фотоумножителей.

4. Некоторые приборы и аппаратура, использующие УФ-фотоприемники

подавляющее большинство типов приборов, использующих УФ-фотоприемники, можно разделить условно на две группы: пассивные и активные.

Пассивные - предназначенные только для регистрации УФ-излучения. В этих приборах фотоприемники преобразуют излучение в электрический сигнал, пропорциональный потоку излучения, который регистрируют соответствующими приборами. Упрощенная функциональная схема пассивного прибора приведена на рис. 4.1.



Рис. 4.1. Упрощенная функциональная схема пассивного прибора.

Комбинированные или активные. Эти приборы содержат в своем составе, как источники, так и приемники УФ-излучения. Между ними размещается исследуемая среда, состояние которой фиксируется по изменению оптических характеристик среды. Упрощенная функциональная схема активного прибора приведена на рис. 4.2.

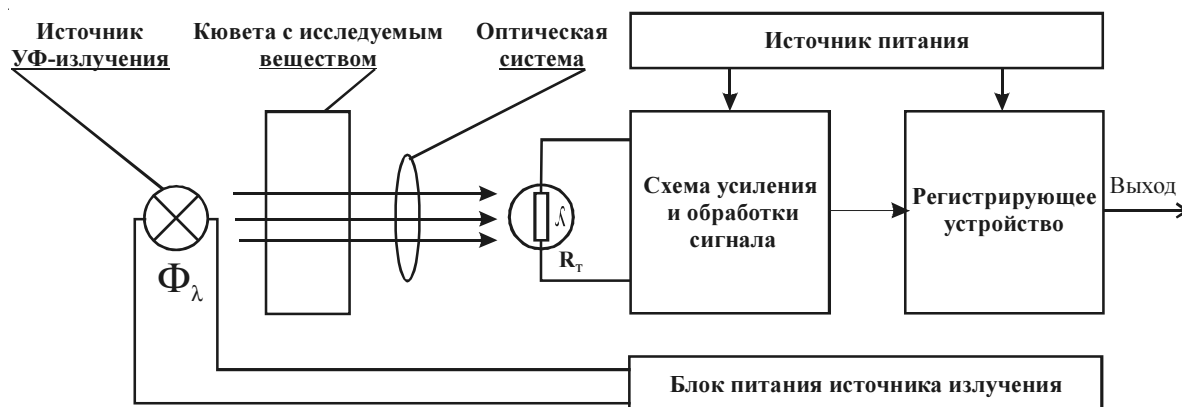


Рис. 4.2. Упрощенная функциональная схема активного прибора.

В настоящее время отечественной промышленностью и зарубежными фирмами выпускается целая гамма приборов, среди которых: УФ-радиометры и УФ-дозиметры; уфиметры, эриметры и эрдозиметры; бакметры и бактерометры; биологические фотометры, флуориметры и др. Эти приборы используют различные типы приемников ультрафиолетового излучения.

С появлением алмазных фотоприемников, некоторые отечественные НИИ и предприятия начали работы по использованию этих приемников в аппаратуре конкретного назначения. Такие работы выполнялись: в институте ГИНАЛМАЗЗОЛОТО, НИИ Биомедицинской технологии, АК «АЛРОСА», ЗАО «УралАлмазИнвест», АО «Полярон», АО «Новый двигатель 92», МИРЭА и др.

Сведения о серийном производстве отечественных приборов отсутствуют, но имеющиеся сведения позволяют сделать некоторые выводы о направлениях работ и уровне параметров опытных образцов.

В 1990 - 92 гг. институтом ГИНАЛМАЗЗОЛОТО, совместно с АО «Новый двигатель», выполнялись работы по разработке прибора для контроля уровня «жесткого» ультрафиолетового излучения.

Стимулом к этой работе являлось то, что практически во всех физиотерапевтических кабинетах советских медицинских учреждений, в то время, для контроля уровня УФ-излучения использовался, т.н. биологический дозиметр БД-2. [3]

Биодозиметр БД-2 представляет собой металлическую пластинку с шестью прямоугольными отверстиями, площадью приблизительно 27 x 7 мм каждое. Они закрываются подвижной заслонкой. Такую пластинку вшивают в клеенку и фиксируют на теле больного при помощи тесемок. Внешний вид биодозиметра БД-2 приведен на рис. 4.3.

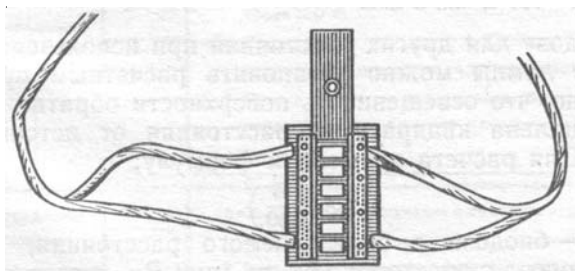


Рис. 4.3. Внешний вид биодозиметра БД-2.

Биодозиметр определял дозу ультрафиолетового облучения, выраженную минимальной его продолжительностью при определенном расстоянии излучателя от тела, облучаемого человека. Такую дозу, достаточную для возникновения эритемы, - называют биологической.

Методика применения этого «уникального» прибора была следующей.

При определении биодозы медицинская сестра накладывала биодозиметр на область, предназначенную для облучения, или на нижнюю часть живота, если было назначено общее облучение. Не подлежащие облучению участки тела закрывали простыней. Больной надевал светозащитные очки. Облучатель с включенной ртутно-кварцевой лампой устанавливали перпендикулярно к поверхности облучения на заданном расстоянии (обычно 50 см). Медицинская сестра открывала первое отверстие биодозиметра и облучала кожу под ним в течение 30 с. Затем через каждые 30 с она открывала поочередно следующие отверстия, продолжая облучать участки под открытыми ранее отверстиями, пока не будут облучены все 6 отверстий.

Через 24 ч после облучения при осмотре кожи обнаруживаются эритемные (покрасневшие) полосы, соответствующие отверстиям биодозиметра. Подсчитав их число, сестра определяла время, которое требовалось для образования минимально выраженной полосы, т. е. собственно и определяла биодозу.

Так как биодозиметр имеет 6 отверстий, а время облучения кожи под каждым из них увеличивали на 30 с, то время экспозиции (облучения) кожи под первым отверстием (в последовательности их открывания) должно составлять 3 мин, под вторым - 2 мин 30 с, под третьим - 2 мин, под четвертым - 1 мин 30 с, под пятым - 1 мин, под шестым (последним) — 30 с. Для расчета биодозы использовали следующую формулу:

$$X = t - (n - m + 1) \quad (4.1)$$

где X - величина биодозы, с; t - время облучения шестого (последнего) отверстия биодозиметра, с; n - число облученных отверстий биодозиметра; m - число эритемных полосок.

Именно, «преимущества» этого уникального дозиметра привели к тому, что после консультаций с Центральным институтом курортологии и физиотерапии Минздрава СССР были начаты работы по созданию электронного прибора.

В результате чего АО «Новый двигатель-92» совместно с институтом ГИНАЛМАЗЗОЛОТО, были разработаны и изготовлены первые опытные образцы дозиметров солнечного излучения ДСИ-1, использующих АФР. Упрощенная структурная схема прибора приведена на рис. 4.4., внешний вид прибора на рис. 4.5. Принцип работы прибора понятен из рис. 4.4. и не нуждается в дополнительных пояснениях.

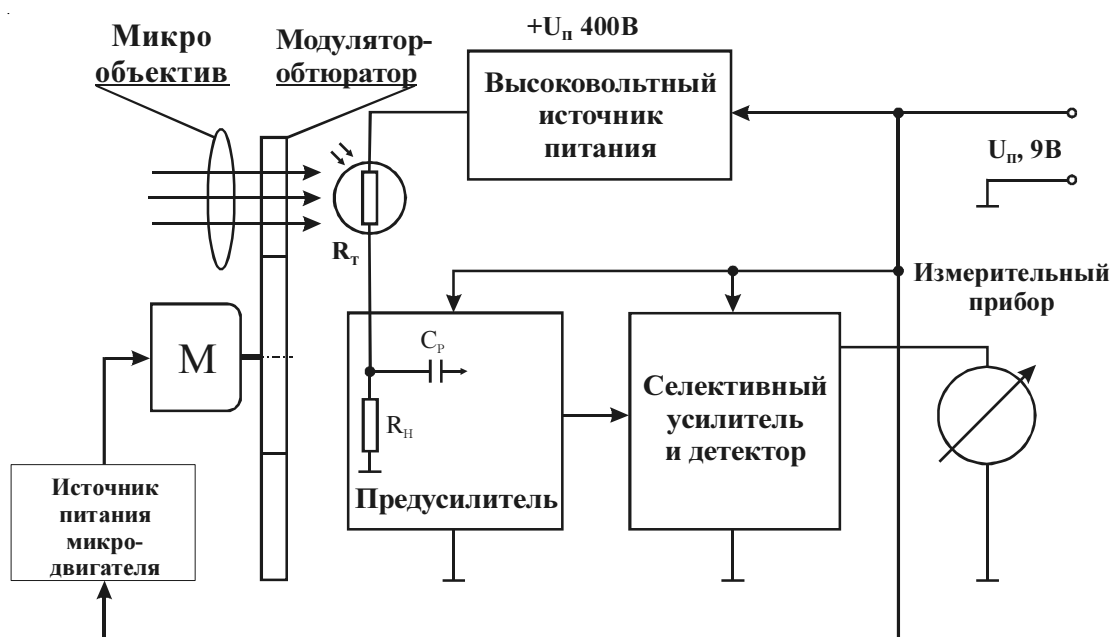


Рис. 4.4. Упрощенная структурная схема дозиметра солнечного излучения ДСИ-1.

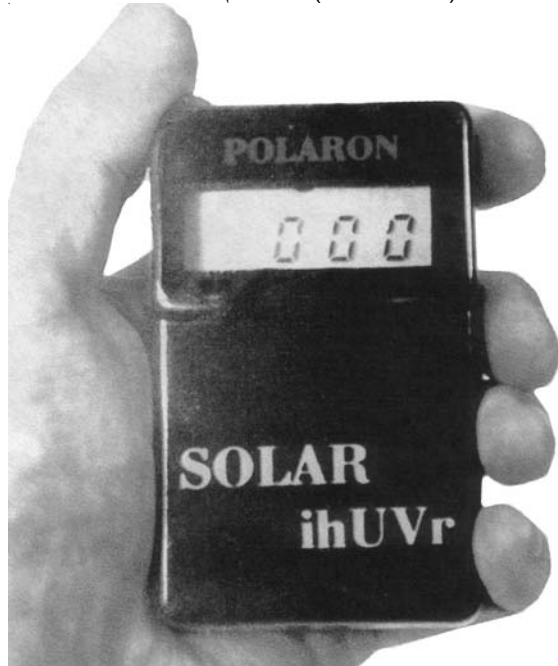
Рис. 4.5. Внешний вид дозиметра солнечного излучения ДСИ-1.



Рабочий спектральный диапазон дозиметра ДСИ-1 составил от 215 до 300 нм, чувствительность от 1 до 100 мкВт/см². Напряжение питания – 9В. В приборе использовался кварцевый микрообъектив Ø8 мм с фокусным расстоянием 13 мм. Габаритные размеры прибора составляли 71,7 x 153 x 36 мм, масса прибора, не более 300 г.

За пределами рабочего диапазона прибор является «солнечно-слепым», т.е. не чувствителен к видимому излучению.

В акционерной компании «Полярон» совместно с АК «АЛРОСА» были разработаны индикаторы UVB-излучения типа «SOLAR – ihUVr», которые предназначены для определения уровня жесткого ультрафиолетового излучения Солнца UVB-диапазона в единицах удельной оптической мощности (мкВт/см²).



Прибор содержит АФР, электронную схему усиления фотосигнала и АЦП. Данные выводятся на ЖК-индикатор. Рабочий спектральный диапазон 280 - 320 нм, - минимальная регистрируемая оптическая мощность, менее $5 \cdot 10^{-9}$ Вт. Напряжение питания прибора 12В. Внешний вид прибора приведен на рис. 4.6.

За пределами рабочего UVB -диапазона прибор является «солнечно-слепым», т.е. не чувствителен к видимому излучению UVB -диапазона (320 - 390 нм), которое считается онкологически безопасным и вызывает здоровый загар.[13]

Рис. 4.6. Внешний вид индикатора UVB-излучения типа «SOLAR – ihUVr»

В акционерной компании «Полярон» совместно с АК «АЛРОСА» также разработан «УФ-монитор для прецизионных измерений мощности УФ-излучения».

УФ-монитор предназначен для измерения энергии и мощности оптических сигналов от дискретных и многоэлементных (линейных и матричных) фотоприемников ультрафиолетового излучения, а также мониторинга ультрафиолетового излучения по мощности, пространственному распределению мощности и спектральному составу источников излучения различной природы (УФ-лазеров, Солнца и др.); испытаний и калибровки фотоприемников различного назначения.



Рис. 4.7. Внешний вид УФ-монитора.

В зависимости от объекта измерений монитор может быть снабжен набором автономных фотодатчиков, подключаемых с помощью разъемов.

Прибор содержит АФР, электронную схему усиления фотосигнала и АЦП. Данные выводятся на 6-ти разрядный светодиодный 7-ми сегментный индикатор. Рабочий спектральный диапазон 280 - 320 нм, - минимальная регистрируемая оптическая мощность, менее $5 \cdot 10^{-12}$ Вт. Напряжение питания прибора 220В. Внешний вид прибора приведен на рис. 4.7. [13]

Акционерной компанией «АЛРОСА» совместно с НИИ Биомедицинской технологии Минздрава СССР был разработан биофотометр типа УФ-215

Биофотометр типа УФ-215 представляет собой портативный однолучевой фотометр с статической или проточной кюветой, АФР на основе природного алмаза типа 2а, источником излучения - газоразрядной лампой с монохроматической линией вблизи 215 нм - и электронным блоком усиления и обработки сигнала.

Предназначен для измерения и экспресс-контроля концентрации биологически-активных веществ: белков, пептидов, аминокислот, солей по оптическому пропусканию содержащих их сред и растворов в УФ-области.

Рабочий спектральный диапазон 215 нм, измеряемая величина оптической плотности 0 – 2. Напряжение питания прибора 220В. Внешний вид прибора приведен на рис. 4.8. [13]

Инициатор разработки и первый заказчик - директор НИИ Биомедицинской технологии, летчик-космонавт СССР, профессор Б.Б. Егоров.



Рис. 4.8. Внешний вид биофотометра типа УФ-215

Акционерной компания «АЛРОСА» сообщается [13] о разработке фотоприемного устройства для измерения мощности излучения импульсных лазеров

Фотоприемное устройство предназначено для измерения мощности энергии оптического излучения пико- и наносекундных импульсов эксимерных лазеров ArF, KrCl, KrF (соответственно, на длинах волн 193, 222, 248 и 308 нм) или на четвертой гармонике лазеров с синхронизацией мод Nd:АИГ (265 нм).

Прибор содержит АФР, электронную схему усиления фотосигнала и АЦП. Данные выводятся на 4-х разрядный светодиодный 7-ми сегментный индикатор. Рабочий спектральный диапазон 180 - 320 нм, максимально допустимая оптическая мощность в импульсе до 1 - 2 ГВт/см². Напряжение питания прибора 220В.

Прибор может использоваться также для измерения пространственного распределения оптической энергии в плоскости луча.

Внешний вид прибора приведен на рис. 4.9.

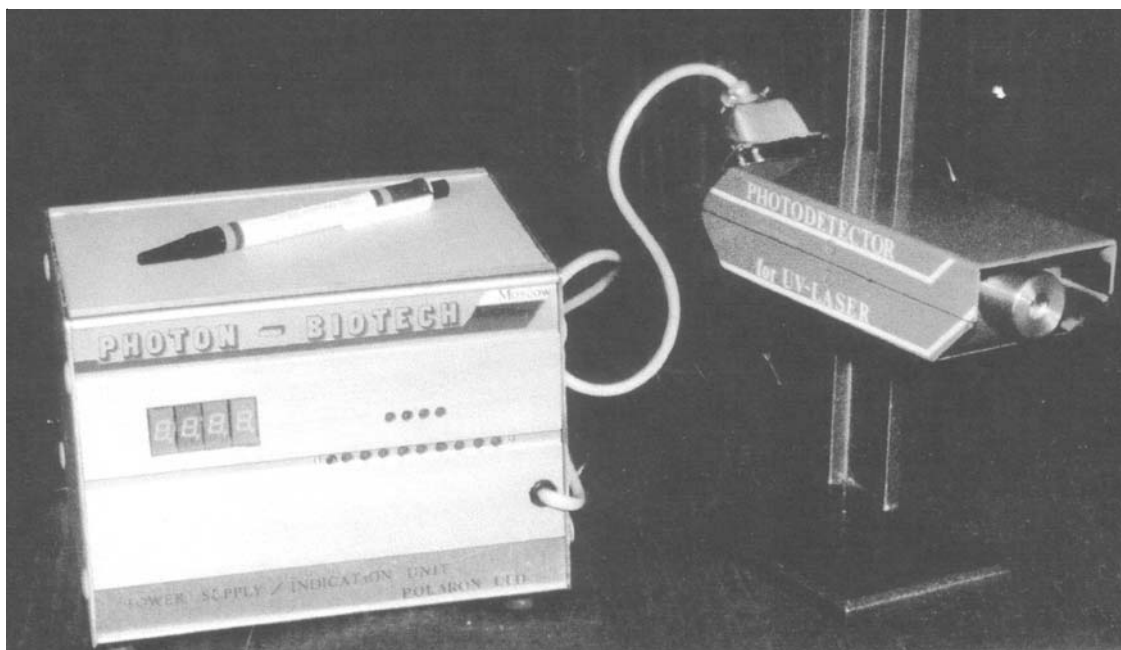


Рис. 4.9. Внешний вид фотоприемного устройства для измерения мощности лазеров.

В последние годы весьма актуальным является разработка приборов, предназначенных для экологических целей.

В качестве примера можно привести некоторые характеристики индикатора содержания нефтепродуктов в воде типа «ФИЛИН ЭКФА 2000», который разработан отечественной фирмой «ЭКСИ».[16]

Индикатор «ФИЛИН ЭКФА 2000» предназначен для контроля за содержанием нефтепродуктов в чистых технологических водах в режиме реального времени. Прибор работает с истинными растворами нефтепродуктов в воде и может использоваться, как в лабораторных, так и в производственных условиях. Прибор встраивается в систему водоснабжения, к нему подводятся соответственно входной и выходной шланги с исследуемой водой.

Принцип действия индикатора основан на поглощении молекулами растворенных в воде нефтепродуктов ультрафиолетового излучения и переизлучения его в видимом диапазоне, то есть фактически прибор контролирует уровень флуоресценции исследуемой воды.

Диапазон измеряемых концентраций примесей нефтепродуктов: 10...2000 мкг/литр. Прибор работает в проточном режиме, производя измерения в режиме реального времени, не требуя процедуры подготовки проб. Напряжение питания прибора 220В.

Прибор состоит из электронного и оптического узлов. В оптическом узле находится источник УФ излучения, кювета для исследуемой воды, система формирования излучения и фотоприемники. Приемники излучения служат для контроля состояния прибора и измерения флуоресцентного излучения.

Приемником слабого излучения флуоресценции служит фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), который расположен под углом 90 градусов относительно направления зондирующего УФ излучения.

Оптическая схема индикатора представлена на рис. 4.10.

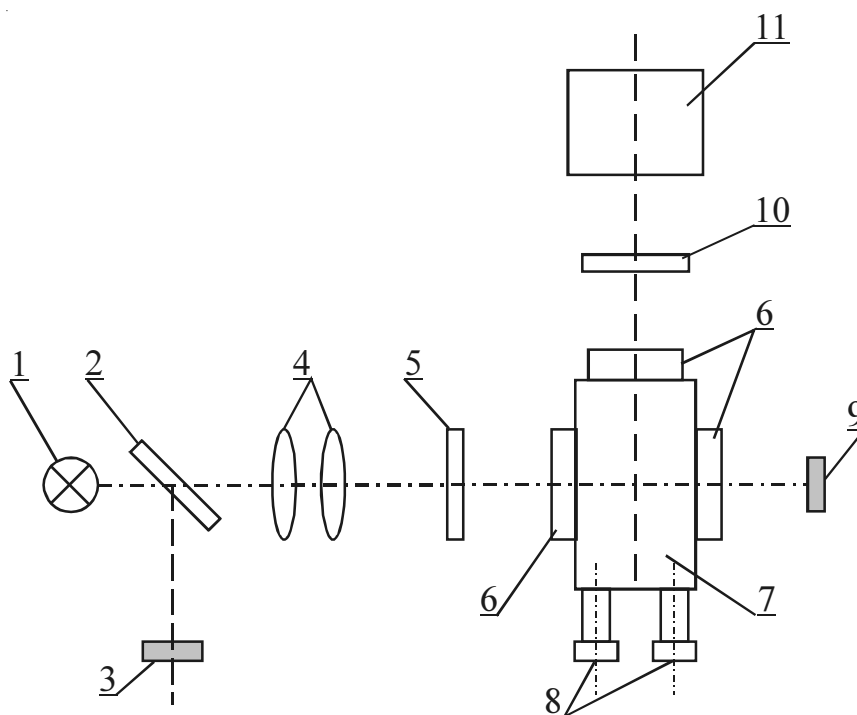


Рис. 4. 10. Оптическая схема индикатора «ФИЛИН ЭКФА 2000»: 1 - ультрафиолетовая лампа ДДС30; 2 - отводящая свет пластинка; 3 - фотоприемник (фотодиод); 4 - конденсор; 5 - Уф светофильтр (входной); 6 - окна кюветы; 7 - кювета; 8 - щипцы; 9 - фотоприемник (фотодиод); 10 - светофильтр (выходной); 11 - фотоэлектронный умножитель.

Прибор работает следующим образом. Излучение лампы ДДС30 направляется при помощи линз 4 в кювету с водой. Часть излучения отводится зеркалом 2 на фотодиод 3. Ультрафиолетовый фильтр 5 пропускает излучение в спектральном диапазоне 250...350 нм.

Излучение, прошедшее через кювету 7, попадает на фотодиод 9. Излучение флуоресценции выходит из кюветы, проходит через светофильтр 10, пропускающий свет в спектральном диапазоне 450...650 нм, и попадает на фотоэлектронный умножитель 11, являющийся основным датчиком прибора.

Фотодиоды 3 и 9 необходимы для контроля исправности лампы 1, контроля чистоты окон 6 и исключения влияния не очень сильного загрязнения окон на окончательный результат. Линзы 4 и окна 6 изготовлены из кварцевого стекла КУ-1. Спектральные диапазоны пропускания фильтров 5 и 10 не перекрываются, что позволяет полностью исключить влияние излучения, рассеянного в среде, на окнах и стенках кюветы, на величину полезного сигнала.

Результаты измерений выводятся на цифровой индикатор и на внешний самописец.

При достижении концентрацией нефтепродуктов одного из двух установленных порогов («авария» и «предупреждение») включаются звуковая и световая сигнализация.

При выходе из строя УФ лампы (ДДС30) или загрязнении окон включаются соответствующие индикаторы, и подается звуковой сигнал.

В данном приборе, вместо фотоумножителя (11), может быть использован высокочувствительный широкополосный алмазный фоторезистор, что приведет к снижению энергопотребления, повышению эксплуатационной надежности и уменьшению габаритных размеров.

5. Заключение

В последние годы во всем мире наблюдается тенденция освоения УФ-диапазона электромагнитного спектра для решения различного рода практических задач: в науке, технике, экологии и медицине, а также для создания современной противопожарной и военной техники.

1. В настоящее время регистрация УФ-излучения, в основном, осуществляется с помощью дорогих и ненадежных вакуумных приборов: фотоэлементов и фотоумножителей. Полупроводниковые фотоприемники, реализованные на основе кремния и материалов группы АІІВІ (сульфида цинка, селенида цинка и сульфида кадмия), также не решают всего круга задач.

Для создания современной и надежной оптико-электронной аппаратуры, работающей в УФ-диапазоне, необходимо применение принципиально иных приемников излучения.

Для этих целей может быть использован природный алмаз.

Проводимые исследования свойств природных алмазов подтвердили уникальность этого материала. Алмазы обладают высокой механической прочностью и химической устойчивостью, их свойства стабильны во времени. Благодаря этим качествам из природных алмазов возможно создание высококачественных и надежных электронных и полупроводниковых приборов, работающих в широком диапазоне рабочих температур (от -273 до +400°С и более), в агрессивных средах, и при повышенной радиации.

Электронные приборы и устройства на основе природного алмаза, как правило, безконкурентны, благодаря уникальным сочетаниям оптических, электро- и теплофизических свойств, отсутствующим в других материалах, включая и синтетические алмазы.

3. Одним из перспективнейших направлений развития «алмазной электроники» является разработка и организация промышленного производства алмазных фоторезисторов (АФР).

3.1. АФР характеризуются высокой чувствительностью в VUV, UVC и UVB-диапазонах, т.е. в наименее освоенных областях оптического спектра, и прекрасным быстро-действием, не хуже 10^{-9} с. Фоторезисторы на основе алмаза обладают большим динамическим диапазоном, допускающим использование АФР в прямых солнечных лучах и при воздействии излучения мощных и сверхмощных УФ-эксимерных лазеров.

3.2. На основе АФР могут быть созданы: системы для контроля возгораний и детекторы пламени; «солнечно-слепые» системы контроля состояния озонового слоя атмосферы Земли; аппаратура для УФгеофизического контроля и картографии; аппаратуры для постоянного космического патруля мягкого рентгеновского и жесткого УФ-излучения Солнца, регистрации воздушных радиоактивных выбросов атомных объектов и при ядерных авариях (взрывах) по оптической флюоресценции воздуха,

3.3. С созданием высокочувствительных АФР станет возможным разработка и промышленное производство портативных приборов для: мониторинга УФ-излучения Солнца, включая контроль уровня мощности онкологически-опасного UVB-излучения на пляжах, курортах, открытом воздухе, при проведении сельскохозяйственных работ, туристических походов и т. д.

Благодаря развитию нового поколения АФР будут совершенствоваться приборы, используемые в криминалистике, банковском деле, в промышленной автоматике и бытовой электронике.

3.4. Использование АФР позволит вывести метрологию УФ-излучения на качественно новый уровень и создать принципиально новые приборы для контроля источников УФ-излучения, (например, измерения основных параметров излучения пико- и наносекундных им-пульсов эксимерных лазеров и ламп высокого давления), используемых в лазерной технике, производстве интегральных схем, полиграфии, пищевой промышленности, биотехнологии, и других областях, включая экологию и технику безопасности.

Одной из главных целей УФ-фотоэлектроники на основе АФР остается создание многофункциональной метрологии ультрафиолетового излучения Солнца, включая измерение и оценку таких тонких эффектов, как мощность отраженного и рассеянного ультрафиолета, угловое распределение (дифракция) поражающих факторов УФ-излучения (эритемного иммунного и др.) относительно прямых солнечных лучей, остаточное поражающее действие излучения в тени и других сложных явлений, к которым до настоящего времени нельзя было подступиться в силу несовершенства существующей спектрофотометрической аппаратуры.

4. Алмаз является единственным материалом электронной техники, который позволяет изготавливать фотоприемники с индивидуальными спектральными характеристиками, а высокая оптическая прочность и стойкость к излучению обеспечивают практически неограниченный ресурс работы алмазных фотоприемников.

Как базовый материал УФ-фотоэлектроники, алмаз имеет хорошие, и во многом безальтернативные, промышленно-коммерческие перспективы в самой широкой области применений.

4.1. Освоение промышленной технологии «алмазной электроники» позволит перевести УФ-фотоэлектронику на твердотельную элементную базу со всеми ее преимуществами: интеграцией элементов, простотой электронной обработки и уменьшением габаритов приборов и устройств. При этом, вполне очевидно, что технология изготовления и условия производства полупроводниковых приборов из алмазов могут быть более простыми, чем, например, при изготовлении вакуумных фотоумножителей или фотодиодов с барьером Шоттки. При этом цена фотоприемников из природного алмаза не должна быть выше стоимости современных электровакуумных приборов.

4.2. С освоением промышленного производства алмазных фотоприемников может быть создано новое поколение медицинских приборов и оборудования, например, индивидуальные и клинические дозиметры УФ-излучения, биофотометры, управляемые источники ультрафиолетового излучения и др. Алмазные фотоприемники найдут применение в устройствах стерилизации медицинского инструмента, обеззараживания воды и воздуха, озонотрономическом оборудовании и т.д.

4.3. Особенно перспективным является разработка линейных и матричных ФЧЭ, чувствительных в УФ-диапазоне спектра, что приведет к созданию приборов визуализации изображений и создания систем УФ-телевидения с распознаванием образов.

Индивидуальные спектральные характеристики АФР могут быть использованы при проектировании аппаратуры обнаружения, наведения и специальной связи.

5. Перечисленные выше возможные направления работ подтверждают одну из знаменательных тенденций мировой науки в начале XXI века - стремление использовать алмаз как широкозонный полупроводник и сделать его базовым материалом полупроводниковой электроники.

6. В последнее десятилетие в мире отмечается определенный интерес к использованию природных алмазов в электронной технике. Это объясняется как уникальными свойствами алмазов, так и настоятельной необходимостью использования все возрастающих запасов сырья, не нашедшего применения в ювелирном деле.

Определенные исследования выполняются организациями России, например, акционерной компанией «АЛРОСА», ЗАО «УралАлмазИнвест», МИРЭА и др, но результаты этих работ пока не достигли должного технического уровня и серийного производства.

Ряд зарубежных фирм также выполняет аналогичные работы, но результаты этих работ нам мало известны. Зарубежные фирмы, в основном, делают ставку на синтетические алмазы.

Россия является второй страной в мире по добыче алмазов. Однако, отходы производства и олоювелирное сырье, по-прежнему, преимущественно используются для производства инструмента.

Выполненные в РФ за последнее десятилетие НИОКР по созданию «электронных алмазных» приборов существенно не улучшили этой ситуации, что объясняется как отсутствием государственной политики, так заинтересованности и координации работ между производителями сырья и разработчиками оптико-электронной аппаратуры, и полупроводниковых приборов.

Список литературы

1. Ультрафиолетовое излучение. Большая советская энциклопедия. – М.: «Советская энциклопедия. 1977 . Том 26 . с. 616 - 618
2. Солнечная радиация. Большая советская энциклопедия. – М.: «Советская энциклопедия. 1976. Том 24 . с. 144
3. Клячкин Л.М., Виноградова М.Н. Физиотерапия. -М.: Медицина, 1988, -272 с.
4. Аксененко М. Д., Бараночников М.Л., Смолин О.В., Микроэлектронные фотоприемные устройства. -М.: Энергоатомиздат,1984. - 208 с.
5. Соболева Н.А., Меламид А.Е. Фотоэлектронные приборы. -М.,: Высшая школа, 1974. - 376 с.
6. Аксененко М. Д., Бараночников М. Л. Приемники оптического излучения. Справочник. - М.: Радио и связь, 1987. - 296 с.
7. Зудова Н.С., Олеск А.О. Фоторезисторы типов СФ2-18 и СФ2-19 для регистрации ультрафиолетового излучения. Приборы и системы управления, №4, 1974. с. 43 - 44.
8. Полупроводниковые фотоприемники: Ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазоны спектра. Анисимова И.Д., Викулин И.М. и др. Под общ. ред. Стафеева В.И. - М., :Радио и связь,1984, - 216 с.
9. Рудневский В.С., Бурлаков И.Д. Фотоприемное устройство для регистрации слабых потоков излучения. XVI Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения 25-27 мая 2000 г. г. Москва.
10. Integrated photodiode and amplifier OPT301. Проспект фирмы «BURR-BROWN», 1994. - 13 р.
11. Фотопроводимость. Сборник статей. Пер. с англ. Под ред. Когана Ш.М. –М.,: Наука. 1967. с. 42.
12. Бараночников М.Л., Гладкова Н.А., Скрипник Ф.В. Фотоприемные устройства на основе фоторезисторов из природного алмаза. В сборнике «Алмаз в электронной технике», - М.,: Энергоатомиздат», 1990 г., с. 128 -139.
13. Электронные приборы на основе природного алмаза. Проспект акционерной компании АЛРОСА. – М.,: 2001. -18 с.
14. Фоторезисторы УФ-диапазона. ФА-1, ФА-2, ФА-3. Проспект закрытого акционерного общества «УралАлмазИнвест». – М.,: 2003. -20 с.
15. Перечень выпускаемой продукции. Производственно-технологический Центр «УралАлмазИнвест», -М.: 2005. -13 с.
16. Проспект фирмы «ЭКСИ». г. Москва, 2004 г.

Содержание

1. УФ-излучение и его источники	1
1.2. Источники УФ-излучения	1
1.2.1. Естественные источники УФ-излучения	1
1.2.2. Искусственные источники УФ-излучения	3
1.3. Биологическое действие УФ-излучения	6
1.4. Другие применения УФ-излучения	10
2. Регистрация УФ-излучения	11
2.1. Приёмники УФ-излучения на основе внешнего фотоэффекта	11
2.2. Приёмники УФ-излучения на основе внутреннего фотоэффекта	18
2.2.1. Фоторезисторы	18
2.2.2. Фотодиоды	20
3. Приёмники УФ-излучения на основе алмаза	24
4. Некоторые приборы и аппаратура, использующие УФ-фотоприемники	34
5. Заключение	41
Список литературы	43