

ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ. СПОСОБЫ ИХ КРЕПЛЕНИЯ

Устройство, предназначенное для приема и преобразования энергии оптического излучения в какие-либо другие виды энергии (электрическую, тепловую и т.д.) называют **приемником оптического излучения (ПОИ) (или просто приемником излучения (ПИ))**.

Приемники излучения, преобразующие невидимые рентгеновское, ультрафиолетовое или инфракрасное изображения в видимые, называют **преобразователями**.

К **приемникам оптического излучения** часто относят устройства, преобразующие ИК или УФ излучение в видимое, например, электронно-оптические преобразователи, фотопленки различных видов и другие фоточувствительные материалы, а также фотоприемные устройства (**ФПУ**), в которых в единую конструкцию объединены собственно приемник **ПИ** и схема предварительной обработки электрического сигнала, например схема предварительного усиления.

Приемники излучения являются важнейшими элементами в оптико-электронных приборах, так как в ОЭП они осуществляют связь между оптической и электрической частями прибора, определяя технические требования к конструированию ОЭП в целом.

Приемники излучения разделяются на **два основных** класса **фотоэлектрические (фотонные)** и **тепловые**.

Принцип действия **фотоэлектрических приемников излучения** основан на **внешнем** (фотоэлементы, фотоэлектронные умножители и др.) или **внутреннем** (фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы и др.) фотоэффекте.

Внешний фотоэффект (фотоэлектронная эмиссия) состоит в испускании электронов с поверхности фоточувствительного слоя под действием падающего излучения.

Внутренний фотоэффект - это процесс взаимодействия оптического излучения с веществом, в результате которого энергия квантов излучения передается электронам вещества, изменяющим в результате этого свое энергетическое состояние.

Все **фотоэлектрические** приемники являются селективными, т.е. их чувствительность зависит от частоты (или длины волны) излучения, падающего на приемник.

В **тепловых приемниках излучения** энергия оптического излучения сначала преобразуется в тепловую, и лишь затем происходят изменения свойств приемника:

- **термоэлементы** - возникает термоЭДС;
- **боллометры** - изменяется проводимость;
- **пироэлектрические приемники излучения** - изменяется диэлектрическая постоянная;
- и др.

Тепловые приемники неселективны.

Отдельными видами приемников излучения являются:

- **Многоспектральные** (многодиапазонные), работающие в двух или более диапазонах оптического спектра;
- **многоэлементные** приемники излучения;
- **координатные** (позиционно-чувствительные) **ПИ**, у которых выходной сигнал зависит от координат изображения на чувствительном слое, и ряд других.

Классификация **приемников излучения** проводится также по:

- области спектральной чувствительности;
- степени охлаждения чувствительного слоя;
- быстродействию;
- физическим принципам действия (лавинные, инжекционные, гетеродинные, иммерсионные и др. приемники излучения).

ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ПРИЕМНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ

Рассмотрим краткую сравнительную характеристику основных групп и видов **ПИ**, наиболее широко используемых в оптико-электронном приборостроении.

Фотоэмиссионные приемники (с внешним фотоэлектрическим эффектом).

В основе внешнего фотоэлектрического эффекта лежит эмиссия фотоэлектронов под действием падающего излучения.

Эмитируемые электроны под действием приложенного напряжения, создающего ускоряющее поле, направляются от эмиттера-катода к аноду, образуя во внешней цепи ток.

К этим приемникам относятся:

- вакуумные и газонаполненные (ионные) фотоэлементы (ФЭ);
- фотоэлектронные умножители (ФЭУ).

Так как энергия фотонов падающего излучения уменьшается с увеличением длины волны (уменьшением частоты электромагнитных колебаний), для каждого вещества фотокатода существует длинноволновая граница внешнего фотоэффекта, при которой энергия фотоэлектрона не превышает работу выхода, необходимую для эмиссии электрона.

Электрoвакуумные фотоэлементы

Электрoвакуумные фотоэлементы - вакуумные или ионные диоды, основанные на явлении фотоэлектронной эмиссии электронов в вакууме (электронный фотоэлемент) или газе (ионный фотоэлемент), преобразуют энергию оптического излучения в электрические сигналы и содержат фотокатод и анод (**рис. 1**).

Ионные (газонаполненные) фотоэлементы применяют редко. Наибольшее распространение получили электрoвакуумные фотоэлементы (**ФЭ**).

На **рис. 1** показана типичная схема включения **ФЭ**.

ФЭ включают последовательно с источником питания (**U_п**) и сопротивлением нагрузки **R_н**.

При отсутствии освещения в цепи **ФЭ** течет темновой ток, складывающийся из тока утечки между электродами и тока термоэмиссии.

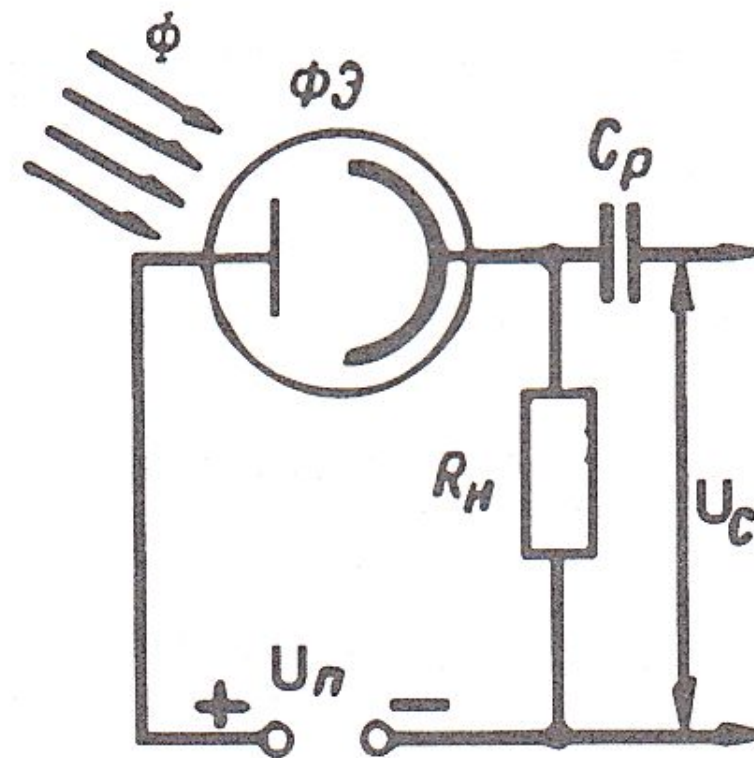


Рис. 1.
Схема включения
ФЭ

Фотоэлектронные умножители

Фотоэлектронный умножитель (**ФЭУ**) - электровакуумный прибор, преобразующий энергию оптического излучения в электрические сигналы.

Конструктивно от вакуумного фотоэлемента **ФЭУ** отличается тем, что, кроме фотокатода (**1**) и анода (**a**), содержит еще фокусирующую электронно-оптическую систему (**2**), диафрагму (**3**) и дополнительные электроды (диноды-**Э1...Э8**), являющиеся эмиттерами вторичных электронов (**рис. 2**).

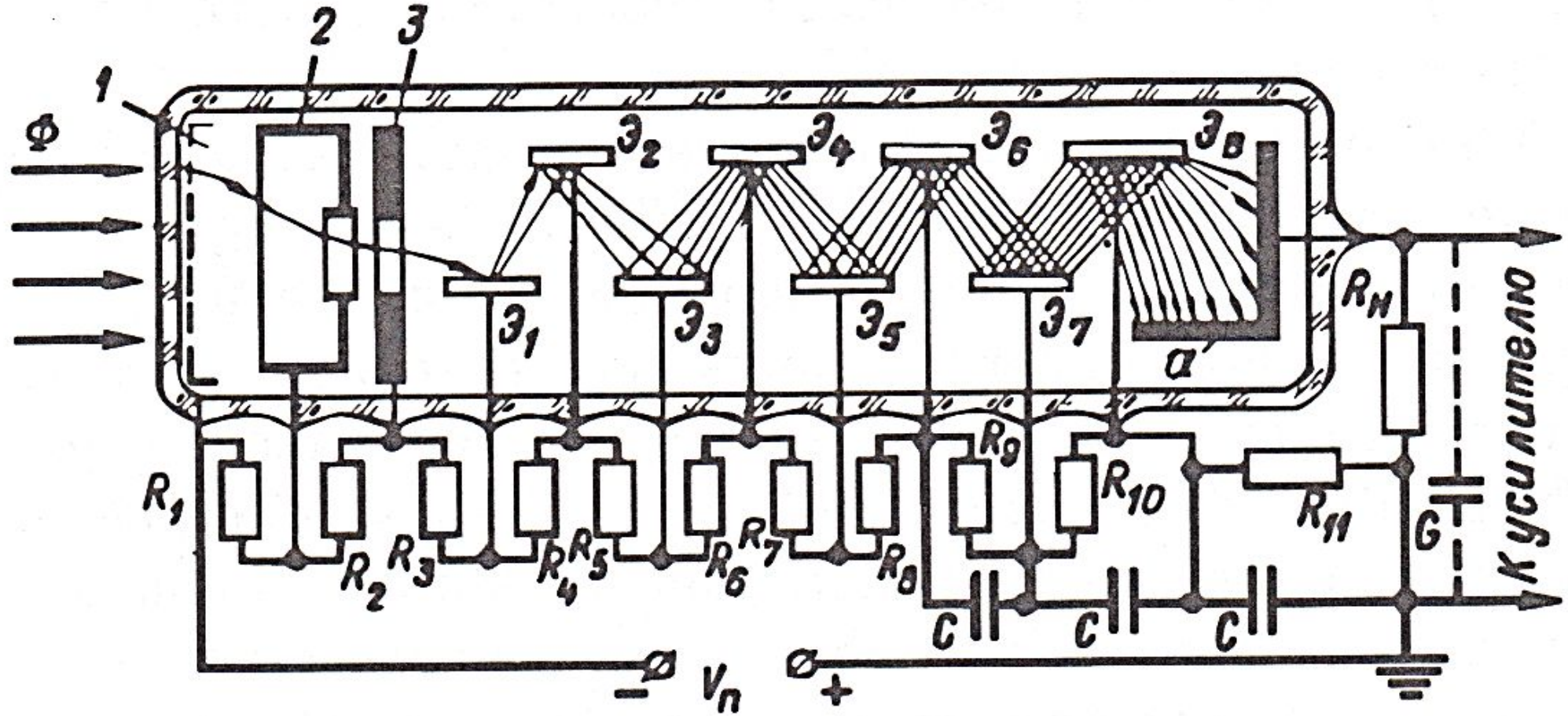


Рис. 2. Устройство ФЭУ со схемой его питания

При освещении фотокатод **1** эмитирует первичные фотоэлектроны, которые ускоряются электрическим полем и фокусируются электронно-оптической системой **2** на первый динод **Э1**, вызывая его увеличенную вторичную электронную эмиссию.

Вторичные электроны, вылетевшие из первого динода, ускоряются электрическим полем и направляются на второй динод **Э2**, увеличенный поток электронов со второго динода - на третий и т. д.

Электрическое поле, ускоряющее электроны, создается делителем постоянного напряжения $R1, \dots, R11$, обеспечивающим большой положительный потенциал каждого последующего каскада относительно предыдущего.

Фотокатоды ФЭУ аналогичны фотокатодам ФЭ.

Разрешение сигналов во времени у **ФЭ** и **ФЭУ** определяется временем движения электронов от места их образования до поверхности фотокатода, временем их пролета от фотокатода до анода и переходными процессами в цепи нагрузки фотоприемника.

В совокупности эти времена малы, и постоянные времени этих приемников также малы и достигают $10^{-10} \dots 10^{-11}$ с. У специальных **ФЭ** и **ФЭУ** эти величины еще меньше.

Параметры современных **ПИ** этого класса позволяют применять их как для регистрации чрезвычайно малых световых потоков (10^{-13} ... 10^{-14} лм), так и для приема очень мощных излучений.

Спектральные характеристики **ФЭ** и **ФЭУ** определяются типом фотокатода, и их постоянная времени обычно не превышает 10^{-9} с.

Токовая чувствительность **ФЭУ** зависит от числа каскадов умножения и напряжения питания и может достигать нескольких десятков ампер на люмен.

При этом важно отметить относительно большой линейный участок световых характеристик **ФЭУ**. Линейная зависимость выходного тока от освещенности на фотокатоде иногда сохраняется при освещенности более 10^3 лк.

Недостатками ФЭУ являются:

- необходимость иметь высокое стабилизированное питающее напряжение (сотни и тысячи вольт);
- возможность потери эмиссионной способности некоторых типов ФЭУ при освещении значительными световыми потоками;
- необходимость защиты от внешних магнитных и электростатических полей;
- сравнительная сложность схемы включения и большие габаритные размеры по сравнению с другими ПИ.

Шумы **фотоэмиссионных** ПИ зависят главным образом от дробового шума и низкочастотного фликкер - эффекта (эффекта мерцания).

Для **ФЭУ** следует также учитывать шум, обусловленный вторичной эмиссией, и шум в нагрузке.

Фликкер-эффект - медленные флуктуации электрических токов и напряжений в электровакуумных и газоразрядных электронных приборах, обусловленные испарением атомов вещества катода; диффузией их из глубинных слоев к поверхности; бомбардировкой катода положительными ионами, приводящей к ионному внедрению и образованию слоев примесных атомов на поверхности катода; структурными изменениями катода.

У фотоэмиссионных **ПИ** можно наблюдать весьма значительную неравномерность чувствительности по площади фотокатода. Основным методом борьбы с ней является создание оптической схемы прибора, при которой фотокатод облучается не в маленькой зоне, а по всей площади, т.е. применение конденсоров.

Фотоэлектрические приемники (с внутренним фотоэффектом).

Фоторезисторы (ФР).

Фоторезистор (**ФР**) - это фотоприемник, принцип действия которого основан на эффекте фотопроводимости - свойстве вещества изменять свою электропроводность под действием излучения.

В основе работы фоторезисторов (**рис. 3**) лежит изменение электропроводности чувствительного слоя при его облучении.

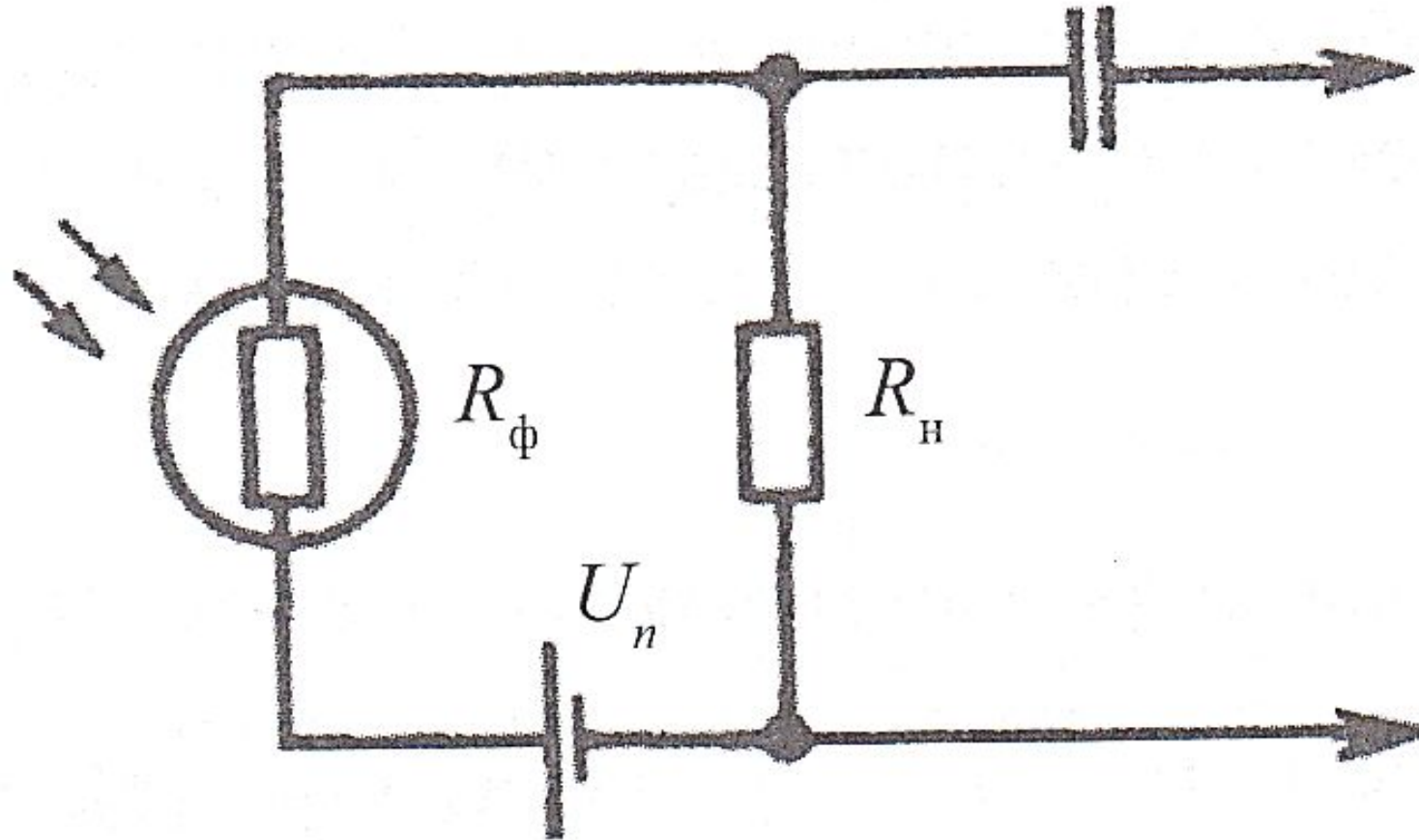


Рис.3. Типовая схема включения фоторезистора

Для изготовления **ФР** используют полупроводники с собственной фотопроводимостью, при которой возникают пары «электрон - дырка», и с примесной фотопроводимостью, когда под действием излучения происходит ионизация атомов донорной или акцепторной примеси.

ФР являются неполярными элементами и одинаково проводят электрический ток в любом направлении, что позволяет включать их в цепи постоянного и переменного тока.

Наибольшее распространение получили **ФР** с собственной фотопроводимостью, так как они не требуют охлаждения.

Помимо полезного сигнала, поступающего обычно на **ФР** в виде модулированного потока оптического излучения, часто присутствует и постороннее мешающее фоновое излучение. Его наличие вызывает уменьшение сопротивления R_{ϕ} слоя и при отсутствии сигнала, что необходимо учитывать при выборе значения R_H .

Допустимая мощность рассеяния **фоторезисторов** зависит от материала чувствительного слоя, а также от режима облучения. При непрерывном облучении эта мощность находится в пределах от сотых до десятых долей ватта, при импульсном облучении она достигает единиц ватт.

К числу основных шумов, определяющих порог чувствительности **ФР**, относятся тепловая и токовый шумы. Предел уменьшения порогового потока ограничивается радиационным шумом.

Снижение температуры чувствительного слоя **ФР** расширяет спектральный диапазон его работы в ИК-области спектра и увеличивает его интегральную чувствительность.

При охлаждении уменьшаются шумы **фоторезистора**, а следовательно, увеличивается его обнаружительная способность. Кроме того, при охлаждении увеличиваются постоянная времени **ФР** и его темновое сопротивление.

Основные **достоинства фоторезисторов**:

- малые размеры и масса;
- пониженное по сравнению с фотоэмиссионными приемниками напряжение питания;
- возможность работы в значительно более широком спектральном диапазоне.

Ряд **фоторезисторов** имеет:

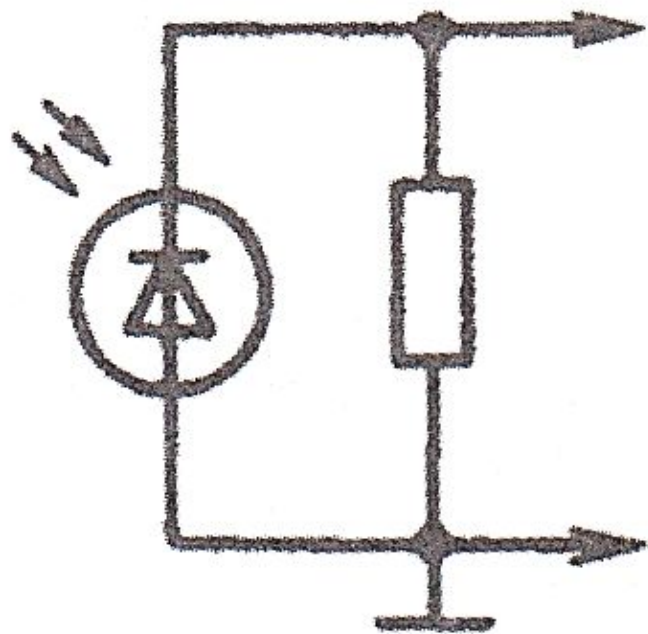
- очень высокую интегральную чувствительность;
- мощность рассеяния достаточную для управления электрической цепью мощностью в несколько ватт.

К недостаткам фоторезисторов можно отнести:

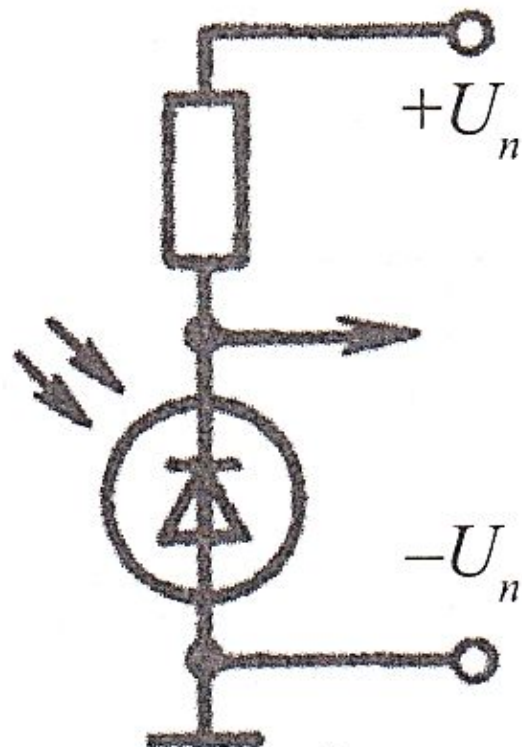
- повышенную инерционность;
- значительную зависимость характеристик и параметров от температуры;
- малую линейную зону энергетической характеристики;
- зависимость выходного сигнала от площади засветки чувствительного слоя.

Фотодиоды и фототранзисторы.

Фотодиодом (ФД) принято называть полупроводниковый приемник излучения, основанный на использовании односторонней проводимости *p-n*-перехода, при освещении которого или образуется ЭДС (фотогальванический или вентильный режим - **рис. 4, а**), или при наличии источника питания в цепи фотодиода изменяется его обратный ток (фотодиодный режим - **рис. 4, б**).



а



б

Рис. 4. Схемы включения фотодиодов в фотогальваническом (а) и фотодиодном (б) режимах

В фотодиодах усиление тока можно обеспечить умножением числа носителей.

На этом принципе основаны лавинные **ФД**, в которых при обратном напряжении, равном или близком к пробивному, в области **p-n**-перехода подвижные носители приобретают столь высокие скорости, что вызывают ионизацию атомов решетки, т.е. образуют новые электронно-дырочные пары. Это же ускорение действует и на носители, появившиеся в области **p-n**-перехода при его освещении.

Для обеспечения стабильности коэффициента усиления фототока необходимо очень тщательно стабилизировать питающее напряжение и температуру, что усложняет использование лавинных фотодиодов.

Такие фотодиоды используют для приема слабых сигналов, в основном при лазерной локации. Их постоянная времени составляет $10^{-8} \dots 10^{-9}$ с при коэффициенте внутреннего усиления до $10^4 \dots 10^5$ и рабочем напряжении 30... 100 В.

Наибольшее влияние на обнаружительную способность **ФД** оказывают дробовый, тепловой (электрического сопротивления базы), а также токовый шумы.

Фототранзисторы (ФТ) - это обладающие свойством усиления фототока приемники излучения с двумя **p-n-** переходами, в которых происходит направленное движение носителей тока.

Принципиальная схема включения **фототранзистора** приведена на **рис. 5.**

Фототранзисторы имеют высокий квантовый выход (около 100).

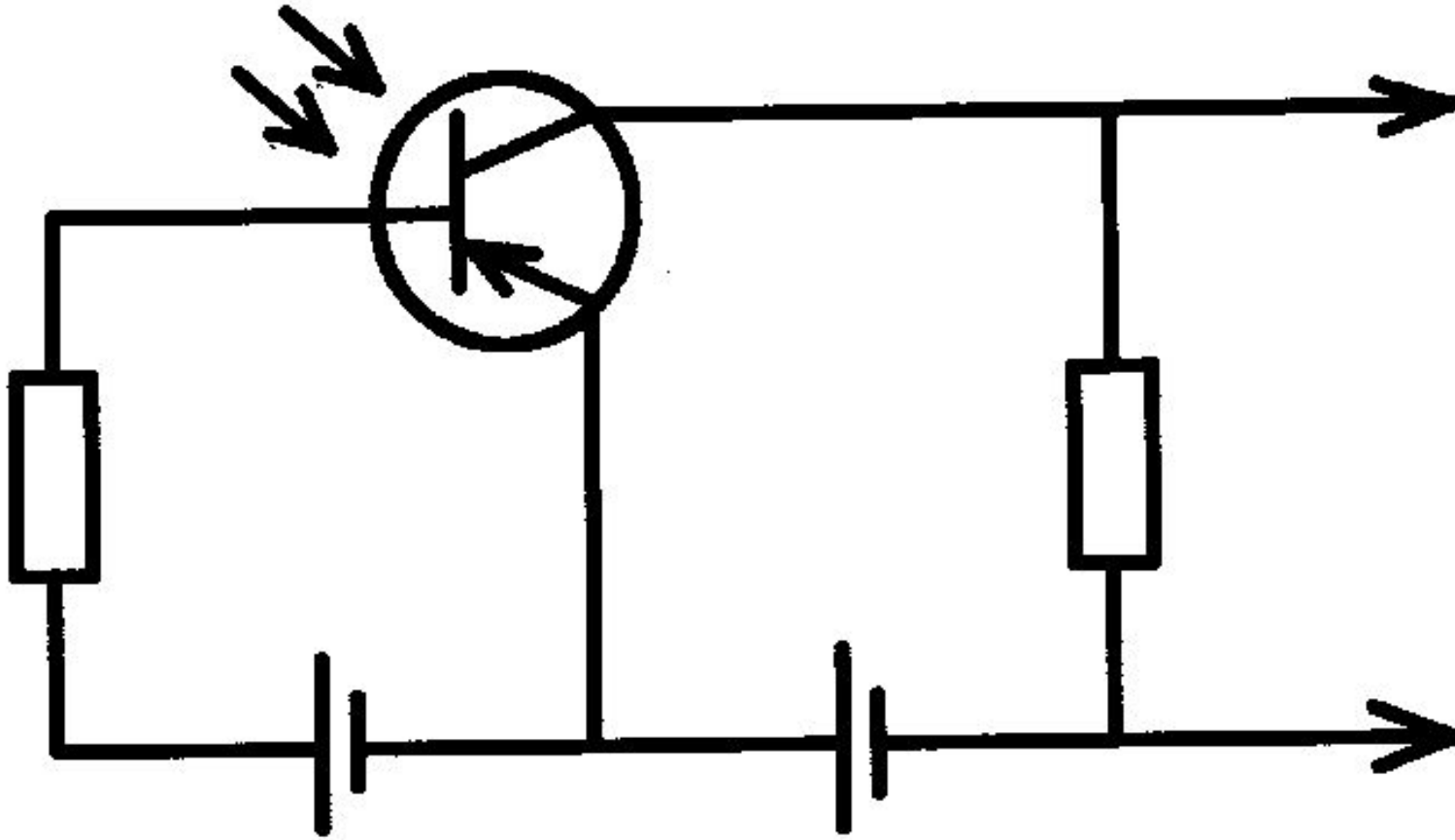


Рис. 5. Принципиальная схема включения фототранзистора

Однако наличие второго **p-n** - перехода приводит к значительному увеличению шумов, поэтому часто предпочитают использовать фотодиод, добавляя дополнительный каскад в усилитель сигнала, шум которого меньше влияет на обнаружительную способность прибора по сравнению с шумом, возникающим при использовании фототранзистора.

Основными видами шумов в фототранзисторах являются тепловой и дробовый шумы.

К недостаткам **фототранзисторов** относятся:

- значительная нестабильность параметров и характеристик во времени и при изменении температуры окружающей среды;
- меньшая, чем у фотодиодов, обнаружительная способность.

У ряда фототранзисторов в центре чувствительного слоя вследствие затенения эмиттером части базы имеется «слепое пятно». Поэтому при их использовании совершенно необходимо распределять поток по всей чувствительной поверхности фотослоя, т. е. применять конденсоры.

Фотоприемники на основе многокомпонентных систем.

В последние десятилетия в оптико-электронных приборах, работающих в ИК-области спектра, широко применяют узкозонные приемники излучения на основе твердых растворов (тройных и более соединений) $Hg_{1-x}Cd_xTe$, $Pb_{1-x}Sn_xTe$, $Pb_{1-x}Sn_xSe$, $Al_xGa_{1-x}Sb$ и др.

В зависимости от химического состава твердого раствора (показателя x) изменяется ширина запрещенной зоны смеси, а следовательно, и спектральная характеристика фотоприемника, которая может перекрывать широкую ИК-область вплоть до 30 мкм.

По мере сдвига этой характеристики в длинноволновый ИК-диапазон требуется охлаждение до более низких температур.

Так, очень распространенные сегодня фотодиоды на основе $Hg_{1-x}Cd_xTe$ в диапазоне 3...5 мкм могут работать при температуре охлаждения 120...200 К, но при использовании их в диапазоне 8... 14 мкм требуют охлаждения до температур порядка 77 К.

В последние десятилетия на базе указанных материалов создано большое число многоэлементных приемников, в том числе работающих одновременно в двух и более спектральных диапазонах.

Эти приемники обладают высокой обнаружительной способностью, хорошей спектральной селективностью, хорошим быстродействием и с успехом применяются во многих областях науки и техники, например в лазерной локации, системах обнаружения и распознавания различных объектов и многих других оптико-электронных приборах и системах.

Тепловые (неселективные) приемники излучения.

Принцип работы **термоэлементов** основан на использовании термоэлектрического эффекта Зеебека, который заключается в появлении электродвижущей силы (термоЭДС) в цепи, состоящей из двух разнородных по составу проводников (**рис. 6**), при условии, что между двумя их спаями имеется разность температур, т.е. контактные разности потенциалов на каждом спае различны.

Падение напряжения на сопротивлении нагрузки R_H измеряется во внешней цепи (**рис. 6**).

Обычно сопротивление термоэлемента очень мало, что обуславливает необходимость применения трансформаторного входа в качестве согласующего звена между приемником излучения и усилителем, а это усложняет конструкцию прибора. К недостаткам термоэлементов следует также отнести их большую инерционность (постоянная времени составляет десятки и сотни миллисекунд).

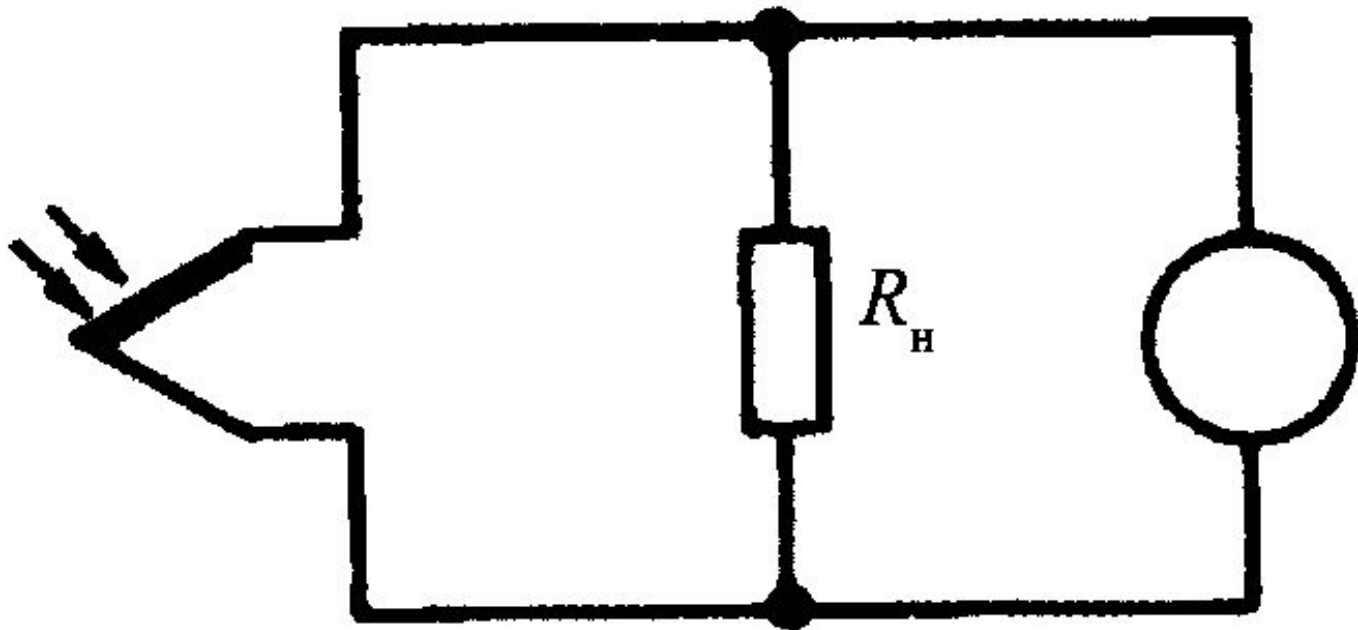


Рис. 6. Принципиальная схема включения термоэлемента

Принцип работы резистивного **болометра** основан на изменении электрического сопротивления полупроводника или металла при нагреве чувствительной площадки под действием падающего на него потока излучения.

Простейшая схема включения **болометра** аналогична схеме включения фоторезистора. Его обычно включают по мостовой схеме (**рис. 7**), которая питается постоянным или переменным током. Влияние окружающей температуры может вызвать нежелательный разбаланс моста, поэтому в качестве уравнивающего элемента схемы часто применяют также болометр, называемый компенсационным.

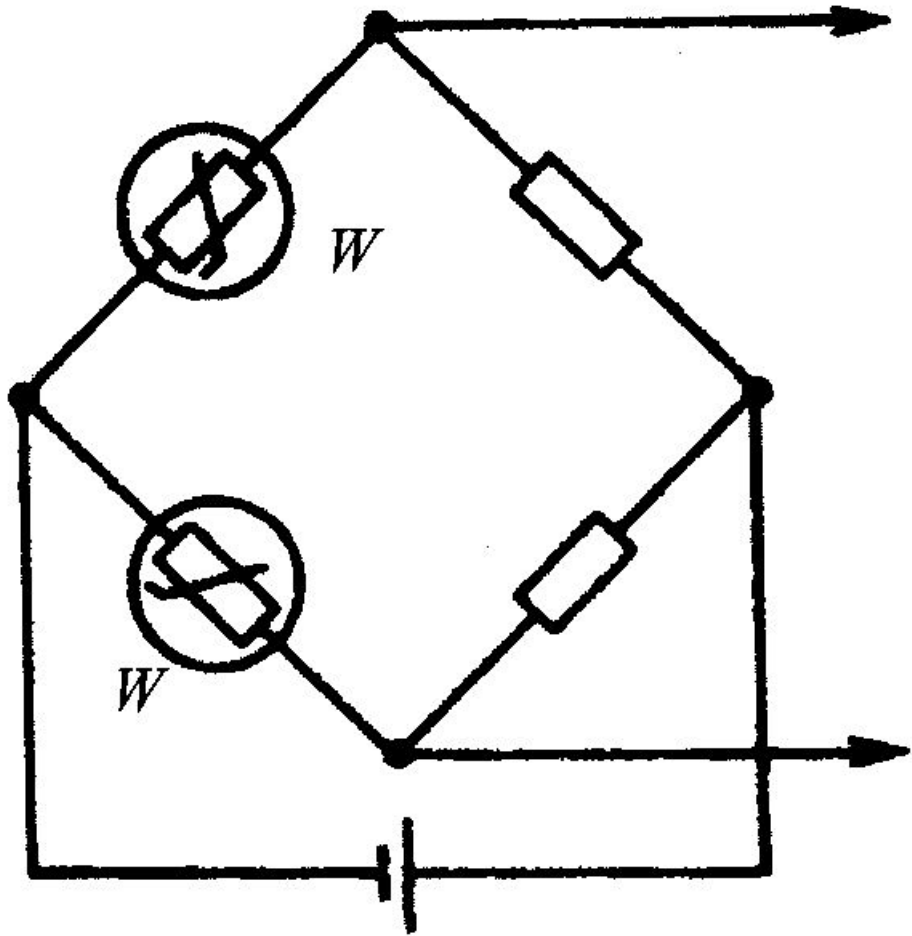


Рис. 7. Принципиальная
схема включения
болметра

При изменении внешних условий оба болметра в одинаковой степени изменяют свое сопротивление, в результате чего равновесие моста сохраняется.

Поток от излучателя попадает только на один болметр, что вызывает разбаланс моста.

В **пироэлектрических ПИ** при малейших изменениях температуры приемника - сегнетоэлектрика с постоянной электрической поляризацией - эта поляризация заметно изменяется, что ведет к изменению разности потенциалов на выходах приемника.

Пироэлектрические ПИ являются емкостными, а не резисторными, т.е. их полное сопротивление уменьшается с ростом частоты модуляции падающего на них излучения. Поэтому они позволяют получить очень широкую и равномерную частотную характеристику.

Оценивая всю группу неселективных **ПИ**, можно отметить, что на тех участках спектра, где могут работать фотоэлектрические приемники излучения, тепловые **ПИ** вследствие их инерционности, худших эксплуатационных и некоторых других параметров применять нецелесообразно.

Однако в длинноволновом ИК диапазоне спектра они пока еще широко используются для обнаружения и измерения потока излучения.

Помимо рассмотренных выше приемников излучения в некоторых современных ОЭП иногда используют и другие виды приемников - **многоэлементные, многоспектральные (многодиапазонные), координатные (позиционно-чувствительные)** и др. - информацию о которых можно найти в специальной литературе.

КОНСТРУКЦИИ УЗЛОВ КРЕПЛЕНИЯ ПРИЕМНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Как отмечалось в начале лекции приемники оптического излучения являются важнейшими элементами оптико-электронных приборов. Осуществляя связь между оптическими и электронными функциональными устройствами прибора, они зачастую определяют технические требования к конструированию прибора в целом.

Широкий спектр существующих в настоящее время приемников излучения, разнообразие условий их применения и требований, предъявляемых к ним, ставят перед конструктором задачи не только их правильного выбора, но также и разработки рациональной конструкции узлов их крепления.

Выбор способа крепления и конструкция узла крепления приемника излучения определяются видом, конфигурацией, размерами, условиями эксплуатации и требованиями к нему.

Узел крепления должен обеспечивать надежное закрепление приемника без возможных смещений при внешних воздействиях (ударах, вибрациях, перепадах температуры) и без деформаций, которые могут ухудшить его характеристики и надежность.

Конструкция узла крепления должна быть простой, технологичной и в большинстве случаев обеспечивать возможность юстировки закрепляемого элемента.

Способы крепления приемников излучения представлены в специальных учебных пособиях. Рассмотрим некоторые (наиболее типичные) из них на примере крепления **фотодиода**.

Крепление установочным винтом. Приемник **1** устанавливают в оправу (корпус) **2** и фиксируют винтом **3** (рис. 8).

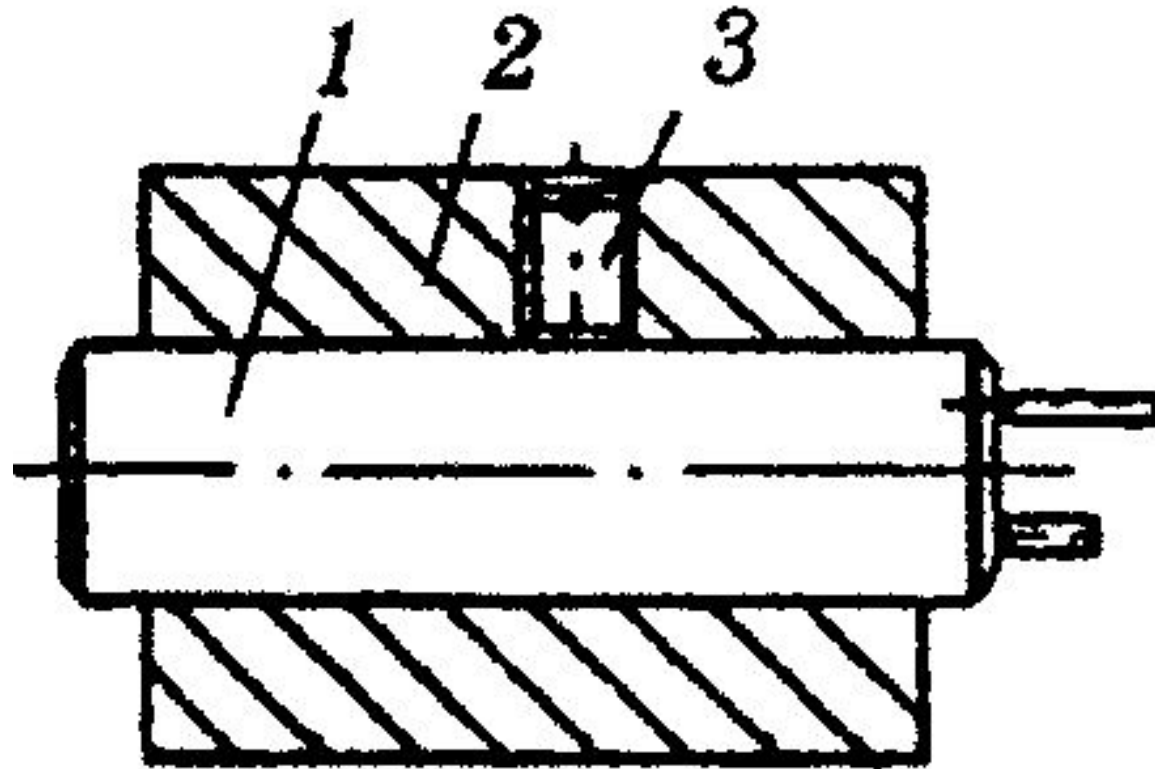


Рис. 8. Крепление фотодиода установочным винтом

Преимуществами способа являются простота и технологичность деталей, а также возможность замены вышедшего из строя закрепляемого элемента, **недостатком** - возможность разрушения корпуса приемника при случайном пережатии установочным винтом.

Данный способ крепления применяется в случаях, когда не предъявляются высокие требования по точности расположения приемника в осевом и поперечном направлениях. При отжатом установочном винте **3** можно вручную переместить приемник в осевом направлении, а при необходимости и развернуть.

Крепление при помощи разрезной втулки. Приемник излучения **1** устанавливается в разрезную втулку **2**, а затем в корпус **3**. Положение деталей в узле крепления фиксируется винтом **4** (рис. 9).

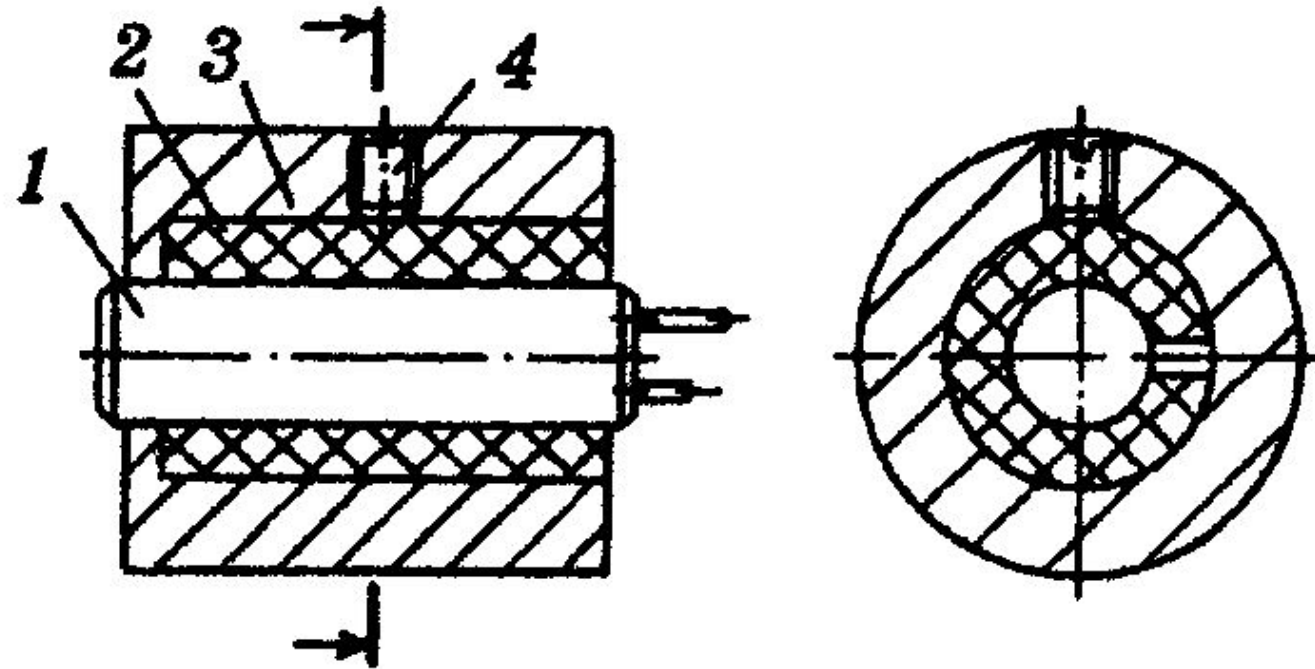


Рис. 9. Крепление фотодиода при помощи разрезной втулки

Такой способ крепления применяется для более безопасного крепления приемников, имеющих малые диаметры корпусов.

Данный способ крепления лишен недостатка предыдущего способа и сохраняет все его преимущества.

Отпустив винт **4** и устранив деформацию в разрезной оправе (т. е. сняв силовое замыкание), можно вручную перемещать (и разворачивать) приемник в осевом направлении.

Крепление хомутом. Приемник **1** устанавливается в корпус **2**, часть которого выполнена в виде хомута, винт **3** стягивает хомут и таким образом удерживает закрепляемый элемент (**рис. 10**).

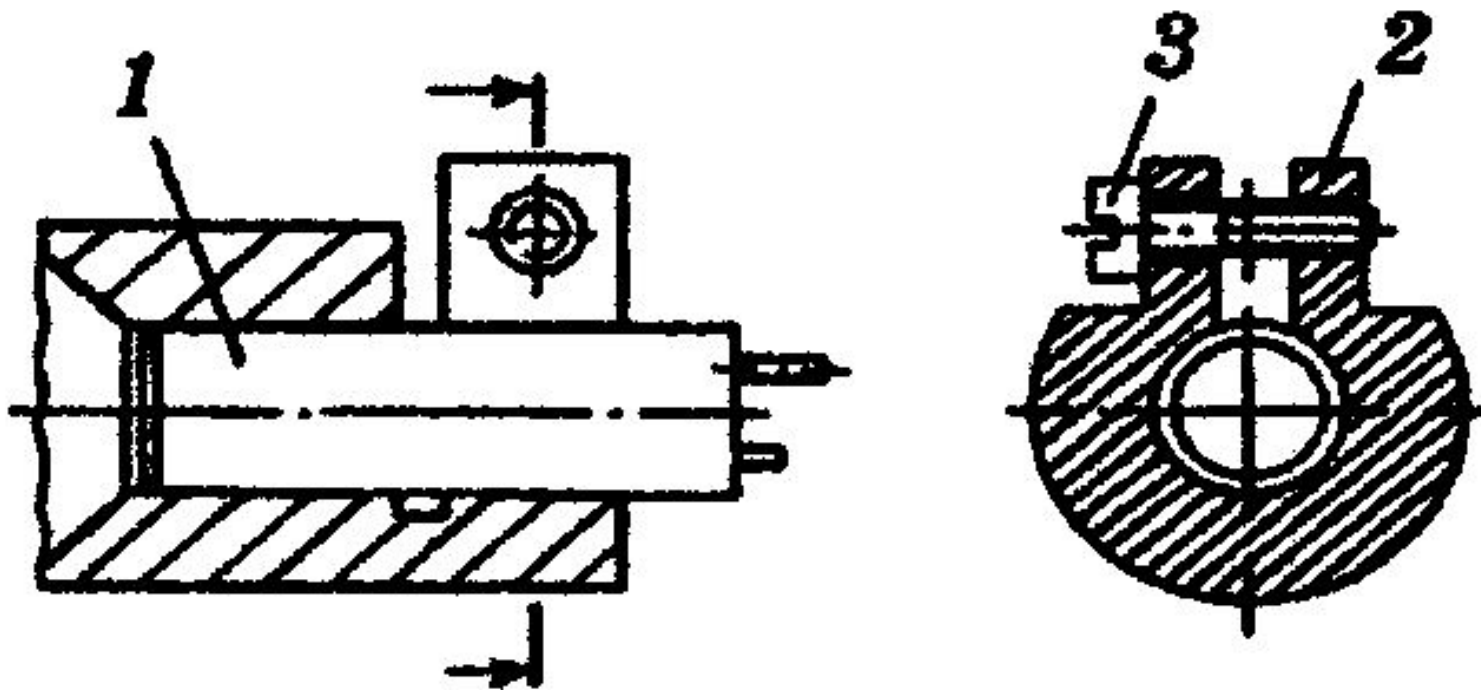


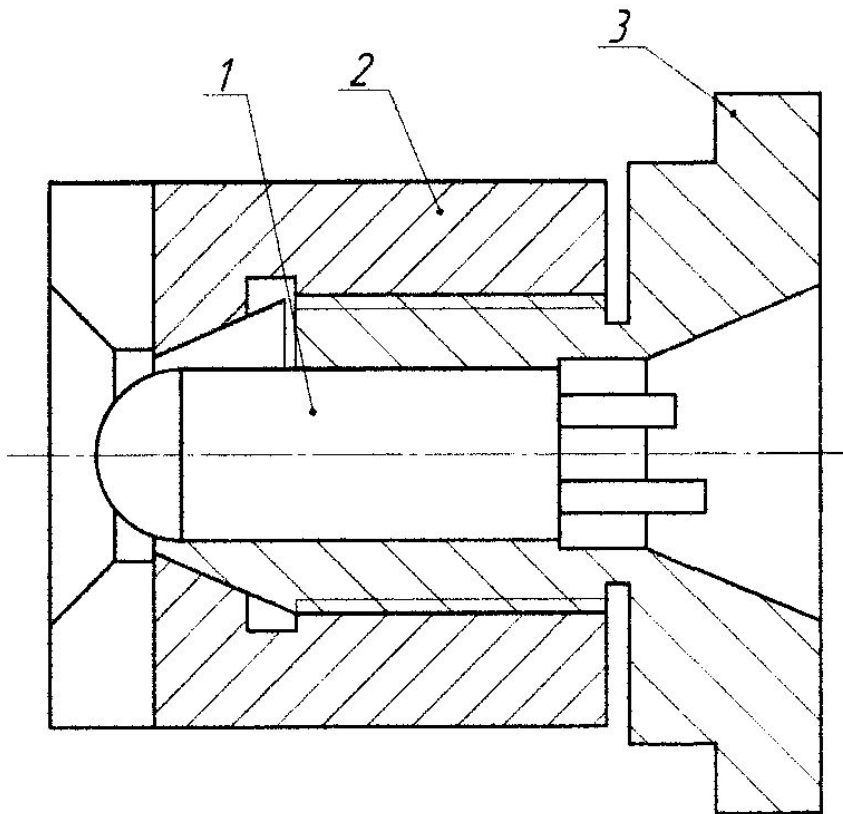
Рис. 10. Крепление фотодиода хомутом.

Способ крепления хомутом аналогичен по принципу удержания закрепляемого элемента способу крепления разрезной втулкой (оправой).

Недостатком его является относительная сложность оправы, что снижает технологические показатели узла.

При отжатом винте можно, при необходимости, вручную осуществить осевое перемещение приемника.

Крепление цангой. Приемник **1** устанавливают в цангу **3**, а гайкой **2**, стягивая ее, удерживают закрепляемый элемент в нужном положении (**рис. 11**). Таким способом пользуются при ответственном креплении приемников.



Недостатком способа является относительная сложность конструкции, что снижает технологические показатели узла.

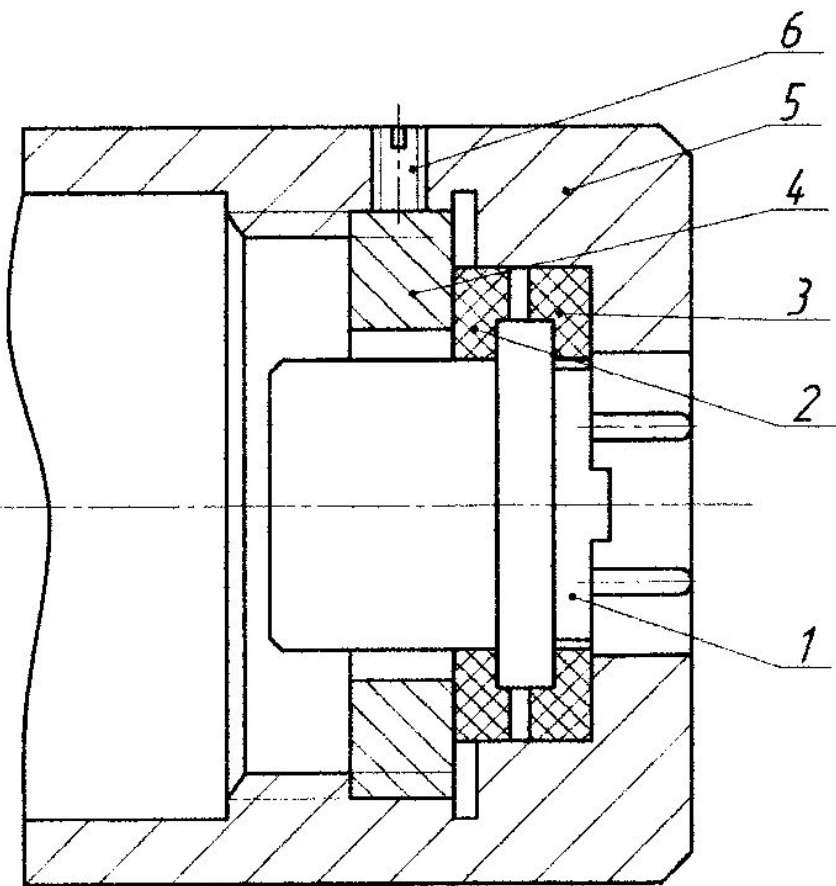
Рис. 11.
Крепление цангой светодиода АЛ-107

Крепление резьбовым кольцом. (рис. 12 – рис. 14).

Закрепляемый приемник в оправе фиксируется с помощью резьбового кольца. Данный способ крепления наиболее предпочтителен при диаметре корпуса источника (приемника) не менее 10 мм.

Однако возможно крепление и при меньших диаметрах, но диаметр резьбового кольца при этом должен быть от М5 и более.

Координатный фотодиод марки ФД-19КК **1** (рис. 12) вместе с диэлектрическими втулками **2** и **3** устанавливается в корпус **5**. Фотодиод удерживается резьбовым кольцом **4**, положение которого фиксируется винтом **6**.



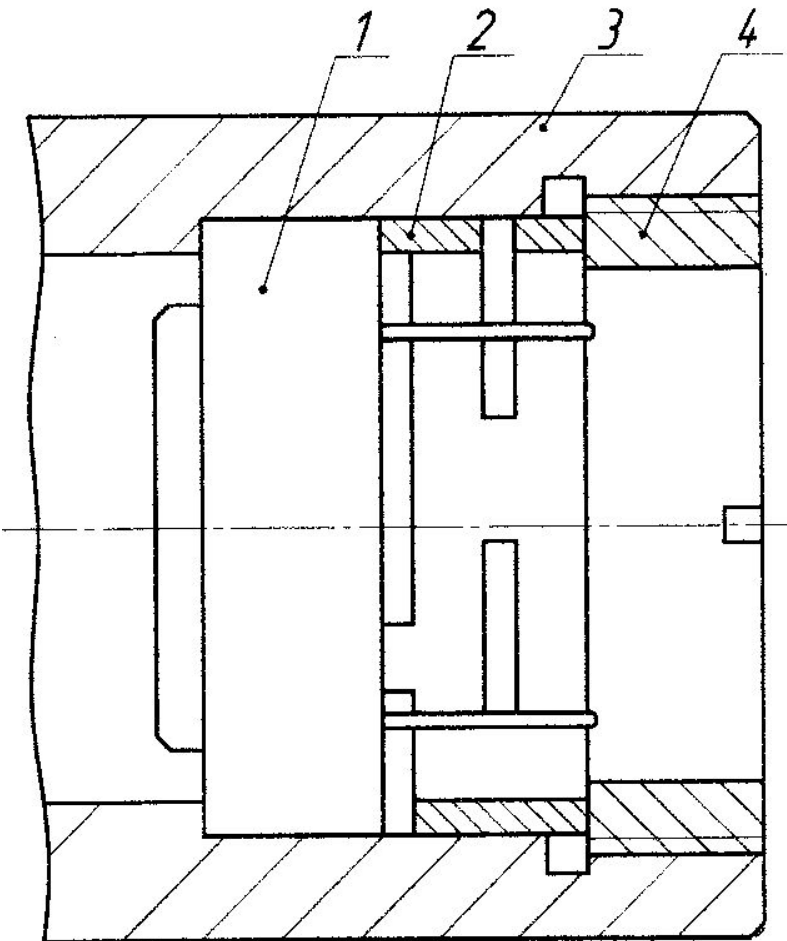
Диэлектрические прокладки служат для электроизоляции фотодиодов от корпуса опико-электронного прибора.

Рис. 12. Крепление фотодиода ФД-19КК резьбовым кольцом

Вследствие возможных перекосов резьбы не обеспечивается равномерное прилегание кольца к закрепляемому элементу, что может вызывать местные деформации его корпуса.

Особенно сильно это проявляется при температурных колебаниях. Для устранения этого недостатка применяются пружинные кольца, устанавливаемые между приемником и резьбовым кольцом (**рис. 13**), либо упругие прокладки между приемником и фланцем оправы (**рис. 14**).

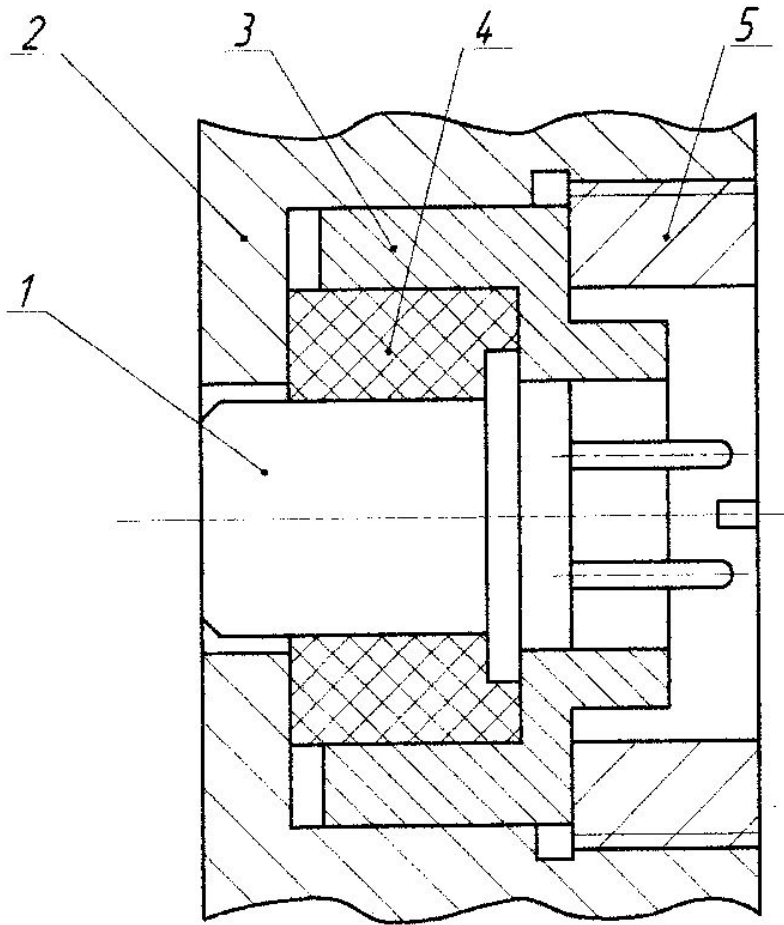
Между фотодиодом ФД-24К **1**, закрепленным в оправе **3** (рис. 13), и резьбовым кольцом **4** установлено пружинное кольцо **2** для устранения местных деформаций корпуса фотодиода.



Подобное пружинное кольцо может использоваться для крепления и других приемников, работающих в условиях температурных колебаний.

Рис. 13.
Крепление фотодиода ФД-24К
резьбовым кольцом

Фотодиод **1** (рис. 14) устанавливается в оправе **3**, затем вместе с эластичной прокладкой **4** базируются в корпусе **2** и поджимается резьбовым кольцом **5**.



Эластичная прокладка обеспечивает также герметизацию корпуса.

Рис. 14.
Крепление фотодиода резьбовым
кольцом

Крепление приклеиванием. Приемник **1** удерживается в корпусе **2** с помощью клеящего вещества, заполняющего кольцевую проточку (**рис. 15**). Для такого крепления можно применять специальные клеи или герметики. Этот способ

крепления в настоящее время применяется все чаще, особенно для малогабаритных приемников оптического излучения.

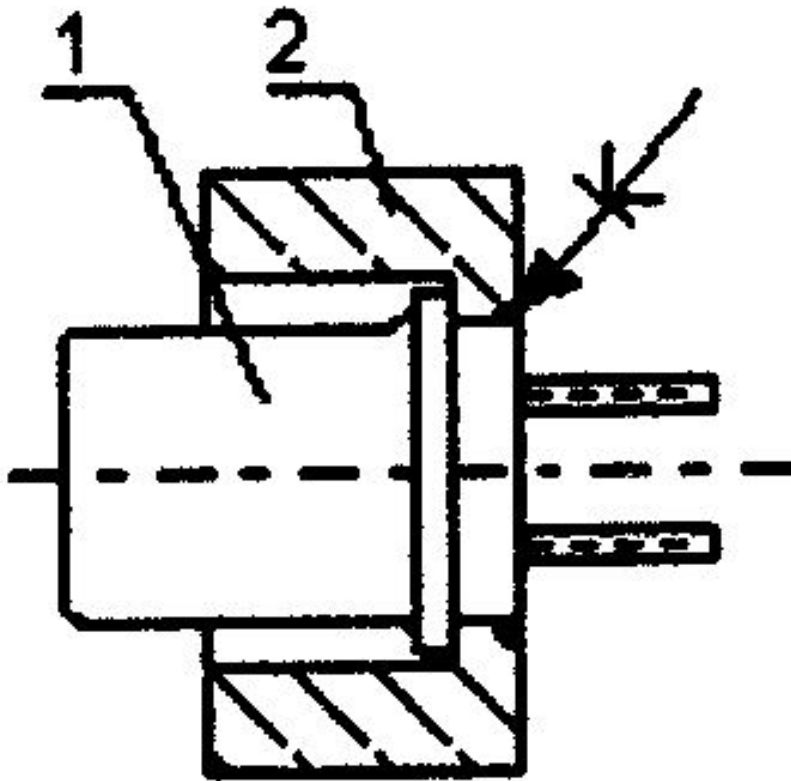


Рис. 15.

Крепление фотодиода приклеиванием.

Данный способ крепления прост, технологичен и надежен.

Недостатком является отсутствие возможности замены вышедшего из строя приемника.

Другие возможные способы крепления приемников (проволочным кольцом, разрезной планкой, накладкой, шайбой, винтами, распаиванием) описаны в различных учебных пособиях.

Вопросы к экзаменам

1. Приемники оптического излучения. Классификация. Основные виды приемников излучения, применяемых в оптико-электронных приборах.
2. Способы крепления приемников оптического излучения.