

Министерство образования и науки Российской Федерации  
КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. А. Н. ТУПОЛЕВА

Кафедра Радиоэлектронных и квантовых устройств

РУКОВОДСТВО к лабораторной работе №712

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОДИОДОВ И ФОТОРЕЗИСТОРОВ

по дисциплине «Оптические направляющие среды и  
пассивные компоненты ВОЛС»  
для студентов специальности 210401.65 «Физика и  
техника оптической связи»

Составили: к.т.н. Айбатов Л.Р.,  
к.т.н. Кесель Л.Г.

КАЗАНЬ 2013

Цель работы:

1. Ознакомиться с принципом действия фоторезисторов и фотодиодов и схемами их включения.
2. Экспериментально исследовать характеристики фоторезисторов и фотодиодов.

## ВВЕДЕНИЕ

Фоторезисторы и фотодиоды относятся к фотоприемным устройствам, принцип действия которых основан на внутреннем фотоэффекте. Внутренний фотоэффект заключается в переходе электронов в объеме освещаемого материала в возбужденные состояния под действием фотонов без выхода электронов за пределы облучаемого тела. Фотоэлектронные приемники применяются в различных областях науки и техники, в частности, в ядерной физике, автоматике, космической технике, оптических системах связи, бытовой радиоэлектронной аппаратуре.

## 1. ФОТОРЕЗИСТОРЫ

Фоторезисторы представляют собой пластинки или пленки фотоактивного полупроводникового материала, снабженные двумя невыпрямляющими контактами. Действие фоторезистора основано на явлении фотопроводимости - изменении электропроводности приемника при его облучении, во многих случаях количественной мерой фотопроводимости является фототок фоторезистора. Фототок - это разность токов в электрической цепи, в которую включен фоторезистор, при наличии и отсутствии освещения.

Величина фототока зависит от интенсивности освещения полупроводника, от приложенного напряжения, размера контактов, расстояния между ними, способа освещения - в продольном (рис.1,а) или поперечном (рис.1,б) направлении по отношению к направлению электрического поля.

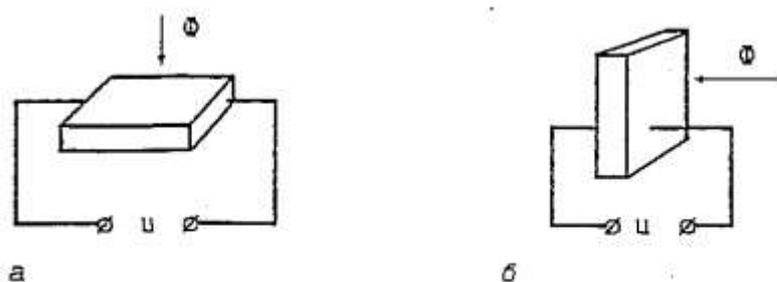


Рис.1. Фоторезисторы: а - с продольной фотопроводимостью; б - с поперечной фотопроводимостью

Фоторезисторы обычно включают в цепь постоянного или переменного тока последовательно с сопротивлением нагрузки (рис.2).

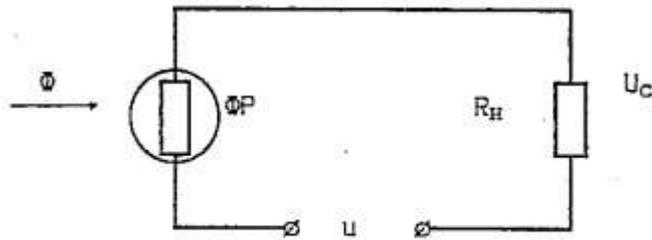


Рис.2. Схема включения фоторезистора

Вольт-амперные характеристики фоторезисторов как при облучении, так и без облучения линейны. Изменение потока излучения изменяет угол наклона этих характеристик (рис.3).

Энергетические характеристики фоторезисторов в общем случае нелинейны из-за зависимости времени жизни носителей заряда от величины потока излучения. Если энергетические характеристики фоторезистора построены в зависимости от освещенности их поверхности, а не от величины потока излучения, то их называют люкс-амперными. В качестве примера на рис.4 приведены люкс-амперные характеристики сернисто-кадмиевого фоторезистора (CdS) типа ФСК-1. Максимальная кривизна характеристики, а, следовательно, и чувствительность фоторезистора соответствуют области малых значений освещенности. С увеличением освещенности чувствительность падает.

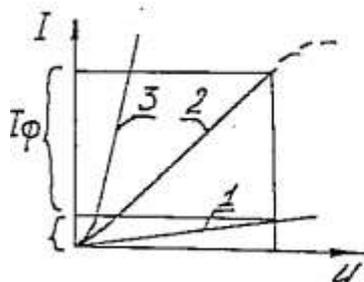


Рис.3. Вольт-амперные характеристики фоторезисторов:  
1 - отсутствие облучения; 2,3 - при облучении различными по величине потоками  $\Phi$ :  
 $\Phi_3 > \Phi_2$

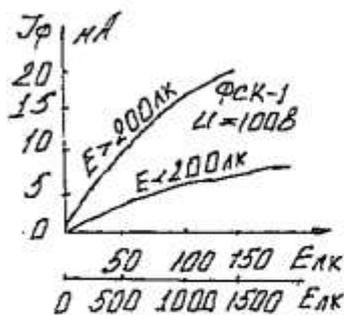


Рис.4. Люкс-амперные характеристики фоторезисторов

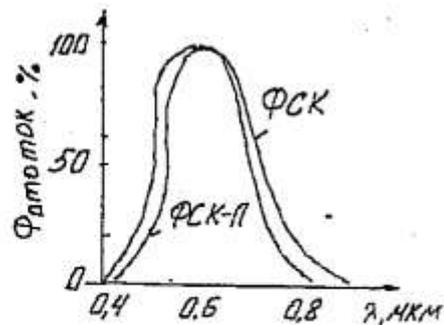


Рис.5. Спектральные характеристики фоторезисторов

Спектральная характеристика фотоприемников - это зависимость их чувствительности (фототока) от длины волны монохроматического излучения, освещающего фоточувствительную площадку. Спектральные характеристики фоторезисторов имеют ярко выраженный максимум (рис.5).

Чувствительность фоторезисторов равна отношению фототока к величине светового потока, поступающего на фоторезистор:

$$S = I_{\Phi} / \Phi. \quad (1)$$

Чувствительность определяется материалом, размерами и существенно зависит от режима работы фоторезистора. Токовая чувствительность линейно возрастает с повышением напряжения и изменяется при изменении потока излучения, так как энергетические характеристики фоторезистора нелинейны. Чувствительность снижается при увеличении частоты модуляции входного амплитудно-модулированного оптического сигнала из-за инерционности фоторезистора, а также зависит от температуры.

Среднее значение постоянной времени фоторезисторов лежит в диапазоне от единиц микросекунд до сотен миллисекунд. Обычно указываются две временные характеристики: время нарастания  $\tau_{н}$  и время спада  $\tau_{сп}$  фототока (рис.6).

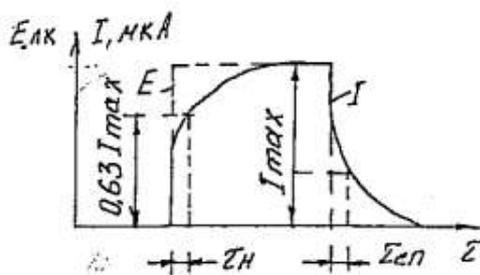


Рис.6. Форма импульсов фототока при освещении фоторезистора прямоугольным световым импульсом.

Время нарастания - это время с момента начала облучения фоторезистора прямоугольным световым импульсом, за которое фототок достигает величины 0,63 от своего максимального значения. Время спада - это время, за которое фототок уменьшается в 2,718 раза после окончания светового импульса. С ростом освещенности инерционность фоторезистора уменьшается, причем сильнее при малых уровнях освещенности. Это связано с увеличением его проводимости.

Основным материалом, используемым для изготовления промышленных фоторезисторов, служат сульфид и селенид кадмия. Полупроводниковые материалы применяются в виде поликристаллических пленок (фоторезисторы типа ФСК-II, СФ-2, СФ-3), спрессованных таблеток (ФСК), монокристаллических пластинок (ФСК-М).

К преимуществам фоторезисторов следует отнести относительную дешевизну изготовления, широту перекрываемых номиналов сопротивлений, возможность работы в средней и дальней инфракрасных областях спектра. Недостатками фоторезисторов являются значительная инерционность, температурная и временная нестабильность характеристик.

## 2. ФОТОДИОДЫ

Фотодиоды представляют собой пластинку полупроводника, внутри которой имеются области электронной (n-область) и дырочной (p-область) проводимости, разделенные электронно-дырочным переходом (рис.7).

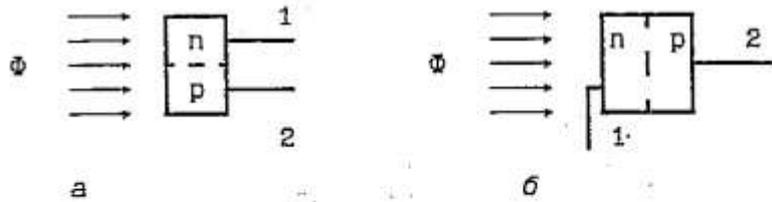


Рис.7. Схемы фотодиодов: а - направление светового потока параллельно плоскости р-п-перехода; б - направление светового потока и плоскость р-п-перехода взаимно перпендикулярны: 1 - вывод n-области, 2 - вывод р-области

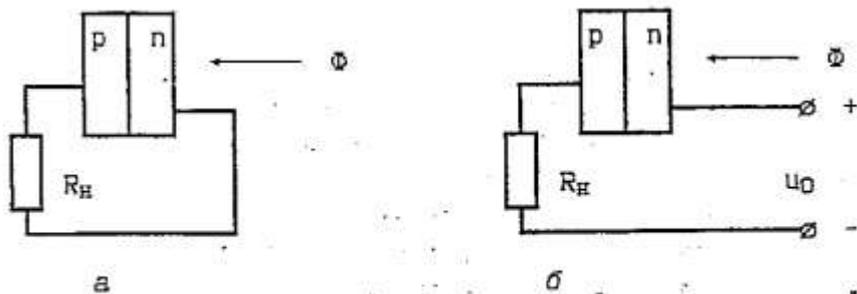


Рис.8. Схемы включения фотодиода: а - фотогальванический режим; б - фотодиодный режим

Р-п- переход как фотоприемник применяется в двух режимах - фотодиодном, когда на р-п- переход подается обратное смещение, и фотогальваническом режиме, то есть в режиме генерации фотоЭДС. При этом внешний источник питания отсутствует (рис.8).

Под действием света, падающего на поверхность полупроводника, происходит генерация электронно-дырочных пар. Электрическое поле перехода разделяет неравновесные носители заряда. По мере возрастания этого поля возрастает и обратный поток носителей. Наступает динамическое равновесие, при котором число неосновных носителей, перемещающихся в единицу времени через запирающий слой, равно числу носителей, перемещающихся в обратном направлении. При этом между электродами устанавливается некоторая разность потенциалов  $E$ . Это и есть фотоЭДС. При подключении к выводам фотодиода сопротивления нагрузки  $R_H$  в ее цепи потечет ток  $I$ , величина которого определяется разностью встречных потоков носителей через р-п-переход. Аналитическое выражение для вольт-амперной характеристики фотогальванического приемника при его освещении имеет вид

$$I = I_{\text{нас}} \times (\exp(eu / (K \times T)) - 1) - I_{\Phi} , \quad (2)$$

где  $I$  - ток во внешней цепи;  $I_{\text{нас}}$  - ток насыщения, протекающий через неосвещенный р-п-переход, то есть темновой ток;  $e$  - заряд электрона;  $K$  - постоянная Больцмана;  $T$  - абсолютная температура;  $I_{\Phi}$  - фототок, созданный возбужденными светом носителями.

В фотодиодном режиме ток через переход определяется неосновными носителями заряда, и при  $|u| \gg R_H I$ ,  $|u| \gg KT/e$  уравнения семейства вольт-амперных характеристик имеют вид

$$I = I_{\text{нас}} + I_{\Phi} . \quad (3)$$

На рис.9,а представлены вольт-амперные характеристики фотодиодов при различных световых потоках  $\Phi$ . Здесь направление фототока принято за положительное. При изменении светового потока  $\Phi$  характеристики смещаются параллельно оси абсцисс на величину, пропорциональную  $\Phi$ . Семейство вольт-амперных характеристик фотодиода эквидистантно. Нижняя характеристика соответствует темновому току фотодиода, т.е. обратному току через неосвещенный p-n-переход:  $I=I_{\text{нас}}+I_{\Phi}$

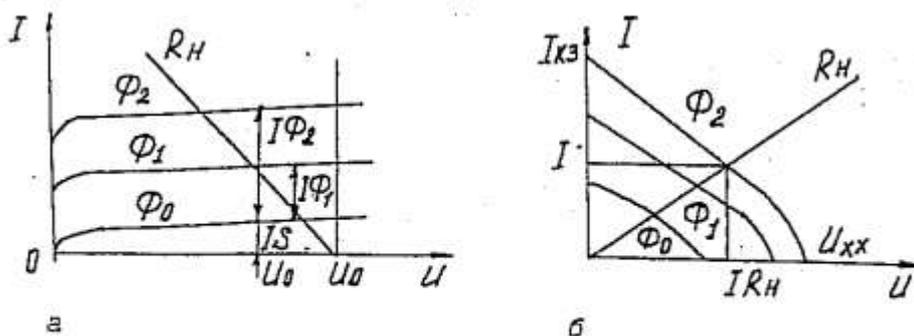


Рис.9. Вольт-амперные характеристики фотоприемников: а - в фотодиодном режиме; б - в режиме генерации ЭДС

Фотодиоды используются при подаче напряжения в запирающем направлении: при включении прямого смещения в цепи фотодиода течет прямой ток, слабо зависящий от освещенности и опасный из-за большой величины, могущей вызвать перегрев прибора. Семейство вольт-амперных характеристик в фотогальваническом режиме при различных световых потоках  $\Phi$  приведено на рис.9,б. При изменении светового потока точки вольт-амперных характеристик по оси ординат (режим короткого замыкания,  $R_H = 0$ ) смещаются пропорционально световому потоку. Смещение по оси абсцисс в режиме холостого хода ( $R_H = \infty$ ) пропорционально логарифму светового потока. Нагрузочные прямые, проведенные из начала координат, пересекают характеристику в точках, абсциссы которых соответствуют падению напряжения на нагрузочном сопротивлении  $R_H I$  а ординаты - току во внешней цепи  $I$ .

Чувствительность фотогальванических элементов (спектральная или интегральная) измеряется в режиме короткого замыкания, т.е. когда фототок связан со световым потоком линейной зависимостью:

$$S = I_{\Phi}/\Phi = I_{\text{кз}}/\Phi . \quad (4)$$

Чувствительность фотодиода определяется как отношение фототока при небольшом обратном напряжении к вызвавшему его световому потоку:

$$S = (I - I_T)/\Phi , \quad (5)$$

где  $I_T$  - темновой ток. Из рис.9,а видно, что вольт-амперные характеристики фотодиода смещаются при освещении параллельно оси абсцисс. Фототок фотодиода очень слабо зависит от величины приложенного напряжения и равен по

величине току короткого замыкания фотоэлемента в фотогальваническом режиме. Таким образом, фотоприемник в фотодиодном и фотогальваническом режимах обладает одинаковой чувствительностью по току. Вольтовая чувствительность этих приборов, т.е. отношение падения напряжения на сопротивлении нагрузки к световому потоку в фотодиодном режиме намного больше, чем в фотогальваническом:

$$S_U = R_H I / \Phi = U_C / \Phi . \quad (6)$$

В фотогальваническом режиме максимальный фототок течет в цепи только в режиме короткого замыкания. Построение нагрузочной прямой на вольт-амперной характеристике фотоприемника (рис.9,б) показывает, что при наличии во внешней цепи небольшого сопротивления фототок заметно снижается. Сигнал  $U_C = R_H I$ , снимаемый с нагрузки, не превышает напряжения холостого тока, равного фото-ЭДС, величина которой ограничивается шириной запрещенной зоны полупроводника и составляет десятые доли вольта,

В фотодиодном режиме величина фототока фотоприемника практически не изменяется при включении высокоомной нагрузки (рис.9,а). Следовательно, сигнал, снимаемый с нагрузочного сопротивления, может достигать большей величины, близкой к значению приложенного напряжения. Внутреннее дифференциальное сопротивление фотоприемника в фотодиодном режиме, определяемое по наклону вольт-амперной характеристики, очень велико ( $10^6 \dots 10^7$  Ом).

Энергетические характеристики фотоприемников в фотодиодном режиме линейны в широких пределах. В фотогальваническом режиме такая закономерность отсутствует (рис.10).

Фотодиоды являются быстродействующими фотоприемниками, инерционность которых, в отличие от инерционности фоторезисторов, не зависит от потока излучения, но изменяется в зависимости от режима работы и конструкции прибора.

Процесс формирования сигнала характеризуется тремя основными постоянными времени: 1) временем жизни неосновных носителей заряда; 2) временем их пролета  $t$  от места генерации до разделения;

3) временем зарядки и разрядки емкости перехода, представляющей собой узкую область с повышенным сопротивлением между двумя низкоомными  $n$ - и  $p$ -областями. Инерционность фотоприемника определяется наибольшим временным параметром. Фотодиодный режим работы оказывается менее инерционным и обладает лучшими частотными характеристиками, чем фотогальванический (рис 11).

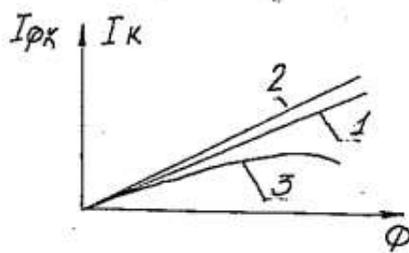


Рис.10. Энергетические характеристики фотоприемников. 1,2 - фотодиодный режим,  $|u_2| > |u_1|$ ; 3 - фотогальванический режим

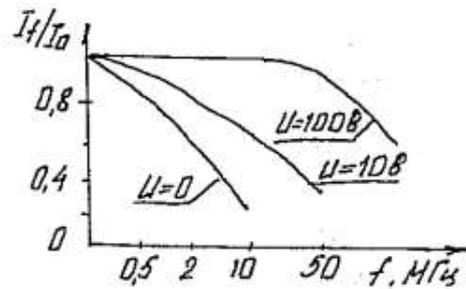


Рис.11. Частотные характеристики кремниевого фотоприемника для двух фотодиодных и фотогальванического режимов

В фотогальваническом режиме граничные частоты кремневых фотоприемников составляют 1... 2 МГц, в фотодиодном - свыше 50 МГц при запирающем напряжении 100 В. В свою очередь, фотогальванический режим обладает двумя важными преимуществами перед фотодиодным: отсутствие источника питания и чрезвычайно низкий уровень собственных шумов. Меньшая величина шумов в фотогальваническом режиме обусловлена тем, что в этом режиме отсутствует темновой ток, в то время как в фотодиодном режиме этот ток имеет заметную величину и шумы определяются его флуктуациями.

На основании вышеизложенного видно, что принципиального различия между фотогальваническими элементами и фотодиодами нет: любой фотодиод можно использовать как в фотодиодном, так и в фотогальваническом режимах. Однако не всякий фотогальванический элемент допускает включение в фотодиодном режиме.

В настоящее время основными материалами для изготовления фотодиодов являются германий и кремний. По конструкции и особенностям работы различают несколько основных типов фотодиодов: сплавные, диффузионные, p-i-n-фотодиоды, лавинные фотодиоды, диоды Шоттки, инжекционные фотодиоды.

### 3. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

#### Описание лабораторной установки

Внимание! При работе следует помнить, в установке имеется высокое напряжение (питание фотоэлектронного умножителя).

Принципиальная схема установки приведена на рис. 12, где 1-й выход - выход фотодиода; 2-й выход - выход фотосопротивления; 3-й выход - выход фотоэлектронного умножителя. На правой стороне лабораторного макета расположены клеммы "Вход", на левой стороне - клеммы "Выход".

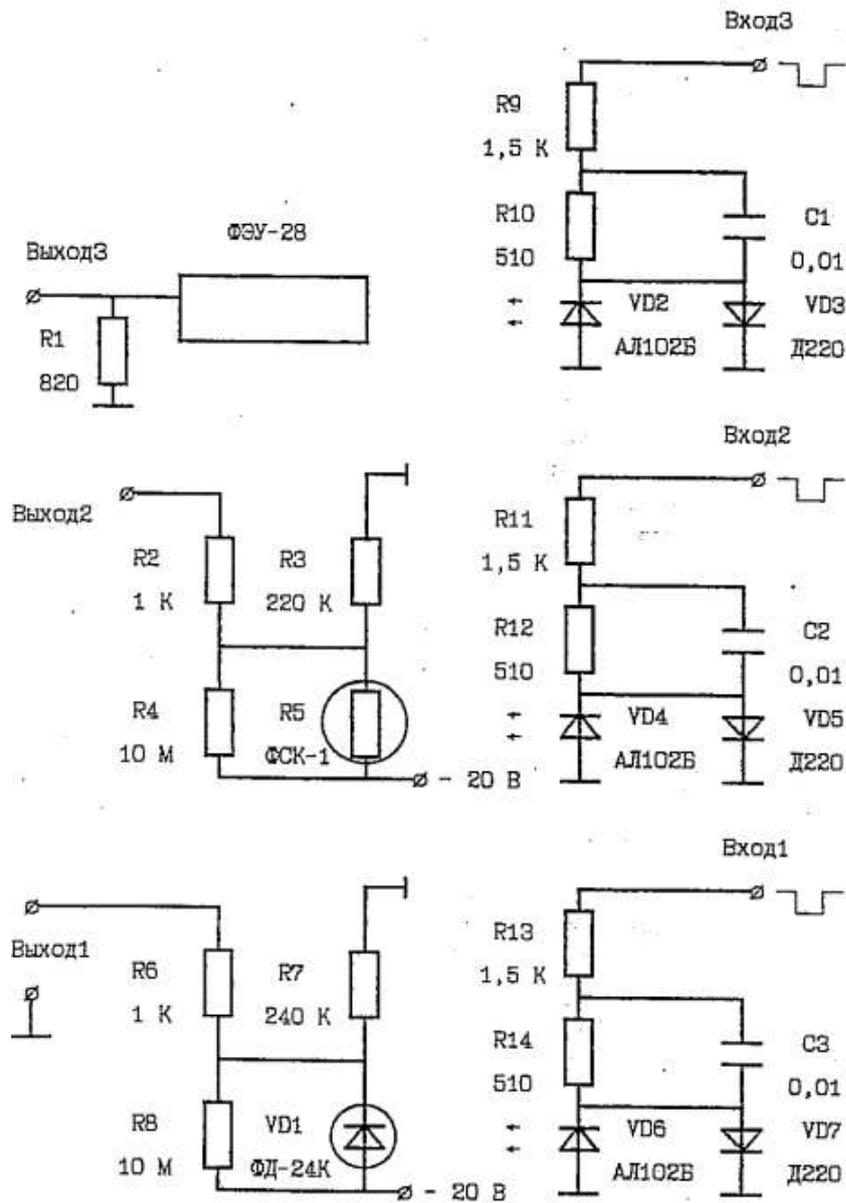


Рис. 12. Схема лабораторной установки

Нумерация клемм следующая: нижняя клемма (с той и другой стороны) - корпус прибора. Над ней расположена клемма "Вход 1" (справа) для подачи сигнала на светодиод VD6, облучавший фотодиод YD1. Клемма "Выход" (вторая снизу с левой стороны) - выход фото- диода VD1. Следующие по порядку (третьи снизу) - клеммы "Вход 2" (справа) и "Выход 2" (слева) используются для подачи сигнала управления на светодиод, освещающий фоторезистор ФСК-1 и съема с него электрического сигнала ("Выход 2"). Верхние клеммы "Вход2 " (справа) и "Выход 3" (слева) используются для подачи сигнала управления на светодиод, освещающий фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), и съема с ФЭУ электрического сигнала.

С правой стороны макета расположены также тумблер включения установки ("Вкл") и индикаторная лампочка ("Сеть").

## Порядок включения установки

Включить тумблер "Сеть" на лабораторном макете, осциллограф, источник постоянного тока, генератор импульсов "Г5 - 54"; прогреть в течение трех минут.

## Порядок выполнения работы

1. Снять вольт-амперную характеристику (ВАХ) излучающей цепи, состоящей из светодиода VD6 типа АЛ1102Б и последовательно включенных резисторов R13, R14.

Для этого последовательно со входом 1 включить плюсовой вывод миллиамперметра. Минусовой вывод миллиамперметра подключить к отрицательному полюсу регулируемого источника питания.

Внимание! Категорически запрещается устанавливать напряжение источника питания выше 15 В.

Включить источник питания. Изменяя напряжение в пределах от 0 до 15 В, снять ВАХ излучающей цепи. Пользуясь ВАХ излучающей цепи и ватт-амперной характеристикой светодиода, полученной у преподавателя, построить зависимость излучаемой светодиодом мощности от напряжения на входе излучающей цепи.

Оценить чувствительность фотодиода ФД-24К.

Подключить к выходу 1 милливольтметр постоянного тока, а ко входу 1 - регулируемый источник напряжения. Изменяя входное напряжение в пределах 0...15 В, построить зависимость напряжения на выходе фотодиода от напряжения на входе. Учитывая, что сопротивление нагрузки фотодиода (R7) составляет 240 кОм и, пользуясь полученной зависимостью излучаемой мощности от напряжения на входе, построить зависимость выходного тока фотодиода от мощности оптического излучения. Считать, что вся излучаемая светодиодом мощность попадает на чувствительную площадку фотодиода.

2.1. Определить темновой ток фотодиода. Для этого, не подавая напряжение на излучающую цепь, измерить напряжение на выходе фотодиода. Зная сопротивление нагрузки, рассчитать темновой ток.

Оценить чувствительность фотосопротивления ФСК-1.

Для этого подключить милливольтметр к выходу 2, а к входу 2- регулируемый источник напряжения и выполнить все последующие операции п. 2; сопротивление нагрузки фоторезистора равно 220 кОм.

3.1. Определить темновой ток фотосопротивления аналогично п.2.1.

4 По результатам измерений сравнить чувствительность фотодиода и фотосопротивления.

5. Исследовать временные характеристики фотодиода. Для этого ко входу 1 подключить генератор импульсов Г5-54. Перед его включением установить следующий режим работы: полярность выходного импульса - отрицательная, длительность импульса - 1000 мкс, частота следования - 100 Гц. К выходу 1 подключить осциллограф. Установить осциллограф в режим внешней синхронизации от генератора Г5-54. Включить приборы. Изменяя амплитуду импульсов генератора от 0 до 10 В, наблюдать, как изменяется импульсный сигнал на выходе фотодиода. Измерить длительности переднего и заднего фронтов выходного импульса по уровню  $0,1 U_{max} - 0,9 U_{max}$ .

6. Исследовать временные характеристики фоторезистора ФСК-1. Установить режим работы генератора Г5-54, соответствующий п. 5, затем установить частоту следования импульсов 10 Гц. Включить приборы и наблюдать пилообразный сигнал на выходе фоторезистора. Такой сигнал получается в результате большой инерционности фоторезистора. Перевести генератор Г5-54 в режим однократного запуска. Подавая одиночные импульсы, оценить постоянную времени восстановления сопротивления фоторезистора. Для этого измерить длительность заднего фронта выходного импульса по уровню  $1/e$  от амплитудного значения, где  $e$  - основание натуральных логарифмов.

7. По результатам экспериментов сравнить быстродействие фотодиода и фоторезистора.

8. Исследовать влияние фоновой засветки на работу фотодиода и фоторезистора. Для этого, поочередно подавая соответствующие сигналы на вход фотодиода и фоторезистора (см. пп. 5 и 6), приоткрывать крышку лабораторной установки. Осциллограф должен работать в режиме с открытым входом. По результатам наблюдений сделать выводы.

9. Сравнить работу фотодиода в режиме генерации ЭДС под действием оптического излучения и в обычном (фотодиодном) режиме. Для этого отключить питание лабораторной установки (тумблером "Вкл"). Затем подать на вход 1 сигналы, соответствующие п. 5. Измерить с помощью осциллографа амплитуду и длительности переднего и заднего фронтов выходного сигнала фотодиода в режиме генерации ЭДС. Затем включить питание установки и наблюдать изменения выходного сигнала фотодиода при переходе в обычный режим. Сделать выводы о чувствительности и быстродействии фотодиода в режиме генерации ЭДС по сравнению с обычным режимом.

10. Выключить все приборы и доложить преподавателю об окончании работы.

### Содержание отчета

Отчет должен содержать название и цель работы, Ф.И.О., номер группы студентов, схемы измерений, расчетные и экспериментальный результаты.

### Контрольные вопросы

1. На каком явлении основано действие фоторезистора, фотодиода?
2. Нарисуйте схему включения фоторезисторов и их вольт-амперные характеристики.
3. Приведите энергетические характеристики фоторезисторов.
4. Что такое чувствительность фоторезисторов, фотодиодов?
5. Что такое темновой ток?
6. Нарисуйте схемы включения фотодиодов.
7. Что такое фотодиодный режим работы?
8. Приведите вольт-амперные характеристики для фотодиодного режима работы.
9. Что такое фотогальванический режим работы?
10. Приведите вольт-амперные характеристики для фотогальванического режима работы.

11. Приведите энергетические характеристики фотодиодов.
12. Приведите временные характеристики фотосопротивления, фотодиода.

#### Список литературы

1. Звелто О. Принципы лазеров. – М.: Лань, 2008.- 720 с.
2. Розенштер Б., Винтер Б. Оптоэлектроника. - М.: Техносфера, 2004. – 592 с.
3. Ермаков О.Н. Прикладная оптоэлектроника. - М.: Техносфера, 2004. – 592 с.
4. Полупроводниковые приемники / Под ред. В.И.Стареева. - М.: Радио и связь, 1984. - 215 с.
5. Соболева Н. А., Меламид А.Е. Фотоэлектронные приборы. - М.: Высшая школа, 1974. - 376 с.
6. Викулин И.М., Стареев В.И. Физика полупроводниковых приборов. - М.: Сов. радио, 1980. - 296 с.
7. Буванова Л.К., Либерман А.Я. Полупроводниковые фотоприемники. - М.: Энергия, 1976. - 63 с.