

Лабораторная работа № 6

Изучение вольт-амперных характеристик фотодиода.

Цель работы: Изучить основные физические закономерности, определяющих свойства и параметры фотодиодов. Исследовать вольт-амперные и световые характеристики фотодиодов.

Приборы и принадлежности: фотодиод ($p-n$ -переход), источник света (лампа накаливания), универсальный вольтметр типа В7 – 26, магазин сопротивлений типа РЗЗ, микроамперметр, источники питания, объектив с диафрагмой, соединительные провода.

Общие сведения о $p-n$ -переходе.

Рассмотрим $p-n$ -переход в полупроводнике, образующийся в области контакта двух полупроводников различного типа электропроводности (рис. 1, а, б).

Оба полупроводника как n -, так и p -типов электропроводности имеют сходную зонную диаграмму: положение границ зон E_c , E_v и ширина запрещенной зоны в них совпадают. Различие между рассматриваемыми полупроводниками состоит в типе вводимых в кристалл примесей. В полупроводнике n -типа такими примесями являются доноры с энергией ионизации E_D , а в полупроводнике p -типа примесями являются акцепторы с энергией ионизации E_A . Соответственно различными будут также и положения уровней Ферми. Эти положения отмечены на рис. 1, а, б соответственно как F_n в полупроводнике n -типа электропроводности и как F_p в полупроводнике p -типа. Объединим два рассматриваемых полупроводника в один кристалл так, чтобы кристаллическая структура оставалась кристаллографически правильной. В области контакта полупроводников n - и p -типов электропроводности формируется $p-n$ -переход. Отметим, что при механическом контакте полупроводников различного типа электропроводности $p-n$ -переход не

может быть получен, так как в области механического контакта нарушена трансляционная симметрия кристаллической решетки. Для изготовления p - n -перехода должны быть использованы специальные технологические приемы, позволяющие объединить полупроводники различных типов электропроводности в едином кристалле.

Рассмотрим зонную диаграмму в области p - n -перехода. При таком объединении в один кристалл оба полупроводника, как n -типа, так и p -типа электропроводности образуют единую квантовую систему. Положение уровня Ферми во всех точках такой системы должно быть одним и тем же. Поэтому на зонной диаграмме (рис. 2) p - n -перехода уровень Ферми $F_n = F_p$ отмечен горизонтальной линией. Вдали от p - n -перехода границы энергетических зон E_c и E_v сохраняют свое расположение относительно уровня Ферми F_n и F_p . Ширина запрещенной зоны также остается без изменений во всех точках кристалла. Таким образом, сохраняя ширину запрещенной зоны постоянной по всему кристаллу, а вид зонных диаграмм вдали от p - n -перехода таким, как показано на рис. 1 а и б, можем изобразить зонную диаграмму в области p - n -перехода так, как это показано на рис. 2. Вблизи p - n -перехода имеется наклон энергетических зон, приводящий к возникновению на границе p - и n -области контактной разности потенциалов $e\varphi_k$, которая отмечена на рис. 2.

Существование контактной разности потенциалов объясняется действием контактного электрического поля. При объединении в один кристалл полупроводников различного типа электропроводности через контактную границу проходят потоки электронов (из области n -типа в область p -типа) и дырок (из области p -типа в область n -типа). Эти потоки обусловлены диффузией основных носителей заряда (электронов в n -полупроводнике и дырок в p -полупроводнике) из областей кристалла, где имеется их избыток в области, где имеется их недостаток. Электроны и дырки во встречных потоках рекомбинируют в результате со стороны полупроводника n -типа электропроводности остается нескомпенсированный заряд положительных ионов — доноров, а со стороны полупроводника p -типа электропроводности имеется неском-

пенсированный заряд отрицательных ионов - акцепторов. Эти нескомпенсированные заряды образуют электрическое поле в области p - n -перехода, которое действует как запирающее поле для диффузионных потоков, препятствуя движению основных носителей заряда через p - n -переход. Запирающее действие контактного электрического поля эквивалентно образованию в области контакта потенциального барьера высотой $e\varphi_k$. Действие электрического поля приводит к наклону энергетических уровней электрона в области контакта. Этот наклон обусловлен тем, что потенциальная энергия электрона во внешнем электрическом поле зависит от его координаты. Для однородного электрического поля напряженности E , направленного вдоль оси x , потенциальная энергия электрона имеет вид

$$U(r) = -eEx. \quad (1)$$

Эта потенциальная энергия должна быть включена в гамильтониан, и тогда одноэлектронное волновое уравнение может быть записано в виде

$$\left\{ -\frac{\hbar^2}{2m_0} \Delta + [V(r) + U(r)] \right\} \psi = E' \psi. \quad (2)$$

В первом приближении потенциал внешнего электрического поля можно считать слабо зависящим от координаты на отрезке, соизмеримом с постоянной кристаллической решетки, т.е.

$$U(x) = \text{const.}$$

Тогда одноэлектронное уравнение (2) можно записать (с учетом (1)) в виде

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m_0} \Delta + V(r) \right] \psi = (E' - U) \psi = E \psi. \quad (3)$$

Отсюда следует, что энергия электрона в кристалле при наличии внешнего электрического поля может быть записана в виде

$$E' = E + U, \quad (4)$$

где E - энергия электрона в невозмущенном кристалле, а U — энергия электрона во внешнем электрическом поле.

Для однородного электрического поля энергии U и соответственно E линейно зависят от координаты x , что эквивалентно наклону энергетических уровней (в том числе граничных E_c и E_v) в зависимости от координаты x . Такой наклон и изображен на рис. 2 в области p - n -перехода.

Рассмотрим протекание электрических токов через p - n -переход в состоянии термодинамического равновесия, т. е. когда на область контакта не действуют никакие внешние возмущения.

Обозначим все токи, протекающие в p - n -переходе. Мы упомянули ранее диффузионные потоки основных электронов и дырок через p - n -переход, которые формируют диффузионные токи основных носителей заряда. Эти составляющие тока отмечены на рис. 2 как $j_n^{(n)}$ и $j_p^{(p)}$ - ток электронов в n -области и ток дырок в p -области. Составляющая тока $j_n^{(n)}$ противоположна направлению движения электронов, так как заряд электрона отрицателен и ток электронов противоположен направлению их перемещения, в то время как составляющая $j_p^{(p)}$ совпадает по направлению с перемещением основных дырок.

Помимо диффузионных токов основных носителей заряда через p - n -переход протекают также токи так называемых неосновных носителей заряда. Неосновными носителями заряда являются дырки в полупроводнике n -типа и электроны в полупроводнике p -типа. Неосновные носители заряда образуются за счет энергии тепловых колебаний атомов кристаллической решетки, приводящих к ионизации атомов основного вещества. В образовании токов неосновных носителей заряда через p - n -переход участвуют неосновные носители, образующиеся в области p - n -перехода или в непосредственной близости от него. Неосновные носители заряда, образующиеся на значительном удалении от p - n -перехода, быстро рекомбинируют и в токе через p - n -переход участия не принимают. Составляющие токов неосновных носителей заряда через p - n -переход обозначены как $j_p^{(n)}$ и $j_n^{(p)}$ - ток дырок в n -области и ток электронов в p -области. Неосновные носители заряда проходят через p - n -переход под действием контактного электрического поля. Если основные но-

сители заряда, образующие диффузионные потоки, тормозятся контактным электрическим полем, то неосновные носители заряда, наоборот, ускоряются этим полем. Электрическое поле обуславливает направленный дрейф неосновных носителей заряда, так что составляющие тока $j_p^{(n)}$ и $j_n^{(p)}$ являются дрейфовыми. Дрейфовые составляющие тока через p - n -переход определяют обратный ток p - n -перехода, наблюдаемый при большом обратном смещении. В этом случае потенциальный барьер в области контакта увеличивается за счет внешнего электрического поля. Диффузионные токи основных носителей заряда при этом оказываются полностью запертыми, и ток через p - n -переход определяется дрейфовыми составляющими, которым соответствует ток насыщения обратной ветви вольт-амперной характеристики. Таким образом:

$$j_p^{(n)} = j_{sp} ; j_n^{(p)} = j_{sn} , \quad (5)$$

где

$$j_{sp} = e D_p p_n / L_p \quad \text{и} \quad j_{sn} = e D_n n_p / L_n \quad (6)$$

представляют собой электронную и дырочную составляющие тока насыщения; D_n, D_p — коэффициенты диффузии; p_n и n_p — концентрации неосновных носителей заряда (дырок и электронов, соответственно в n и p -области); L_p и L_n — длины диффузии.

Полный ток насыщения при обратном включении p - n -перехода определяется суммой дырочной и электронной составляющих, т. е.

$$j_s = j_{sn} + j_{sp} = j_n^{(p)} + j_p^{(n)} . \quad (7)$$

Очевидно, что контактная разность потенциалов и величины токов через p - n -переход носят согласованный характер, т.е, разделение электрических зарядов в области контакта и связанное с этим разделение возрастание контактной разности потенциалов продолжается до тех пор, пока диффузионные токи $j_n^{(n)}$ и $j_p^{(p)}$ не будут снижены до уровня составляющих дрейфовых токов $j_n^{(p)}$ и $j_p^{(n)}$ соответственно.

Таким образом, в состоянии равновесия диффузионные токи через p - n -переход полностью скомпенсированы дрейфовыми токами, так что выполняются соотношения:

$$j_n^{(n)} = j_n^{(p)}; \quad (8)$$

$$j_p^{(p)} = j_p^{(n)}. \quad (9)$$

Откуда следует, что

$$-j_n^{(n)} + j_n^{(p)} - j_p^{(p)} + j_p^{(n)} = 0. \quad (10)$$

Фотоэлектрические эффекты в p - n -переходе

Рассмотрим протекание тока через p - n -переход, когда он подвергается облучению потоком квантов с энергиями $h\nu > E_g$. При поглощении света создаются избыточные электронно-дырочные пары. Эти избыточные электроны и дырки ускоряются контактным электрическим полем и образуют дополнительную составляющую тока через p - n -переход так же, как и токи неосновных носителей заряда, т. е. избыточные дырки перемещаются в область p -типа электропроводности, а избыточные электроны - в область n -типа. Избыточные носители заряда формируют составляющую тока j_f . Эта составляющая представляет собой фототок, который совпадает по направлению с составляющими $j_p^{(n)}$ и $j_n^{(p)}$. Фототок частично компенсирует объемный электрический заряд, возвращая часть электронов и дырок в области n - и p -типов электропроводности. В результате потенциальный барьер в области контакта снижается, и диффузионные токи через p - n -переход возрастают. Возрастание диффузионных токов $j_n^{(n)}$ и $j_p^{(p)}$ позволяет таким образом скомпенсировать фототок j_f . Стационарное состояние установится тогда, когда число создаваемых светом электронно-дырочных пар сравняется с числом носителей заряда, уходящих через пониженный потенциальный барьер перехода.

Вероятность преодоления потенциального барьера описывается экспонентой вида $W \sim \exp(-\Delta E / kT)$, где ΔE — высота потенциального барьера. Поэтому, если фототок приводит к снижению потенциального барьера на ве-

личину eV , где V — приращение контактной разности потенциалов, связанное с протеканием фототока j_s , для диффузионных составляющих $j_n^{(n)}$ и $j_p^{(p)}$ на основании (5) можем записать:

$$j_n^{(n)} = j_{sn} \exp (eV / kT); \quad (11)$$

$$j_p^{(p)} = j_{sp} \exp (eV / kT). \quad (12)$$

При воздействии потока излучения p - n -переход выведен из состояния термодинамического равновесия. При выведении из равновесия условие $F_n = F_p$ перестает выполняться и в области p - n -перехода. Степень нарушения равновесия системы может быть охарактеризована разницей $F_n - F_p$. В применении к освещенному p - n -переходу этой разнице может быть сопоставлено приращение высоты потенциального барьера, т. е.

$$F_n - F_p = eV$$

При нарушении равновесия через p - n -переход протекает ток, величина которого может быть представлена в виде

$$j = j_f - j_n^{(n)} + j_n^{(p)} - j_p^{(p)} + j_p^{(n)} \quad (13)$$

Объединяя выражения (5), (11), (12), получаем:

$$j_f - j = j_s (\exp (eV / kT) - 1), \quad (14)$$

откуда будем иметь:

$$V = \frac{kT}{e} \ln \left(1 + \frac{j_f - j}{j_s} \right) \quad (15)$$

где $j_s = j_{sn} + j_{sp}$ — ток насыщения.

Уравнение (15) является уравнением фотодиода в условиях воздействия светового потока для любого режима. Вольт – амперная характеристика p - n -перехода, определяемая уравнением (15), графически представлена на рис. 3.

При включении p - n -перехода в обратном направлении $V = V_{обр}$ (рис. 3) ток через p - n -переход определяется неосновными носителями заряда и составляет величину $j_{обр}$, которая стремится к j_s при возрастании обратного смещения $V_{обр}$. При включении p - n -перехода в прямом направлении $V = V_{пр}$ величина тока через p - n -переход может неограниченно возрастать. В от-

сутствие внешней засветки вольт-амперная характеристика p - n -перехода проходит через начало координат, т. е. $j = 0$ при $V = 0$.

При внешней засветке $\Phi \neq 0$ вольт-амперная характеристика смещается по оси ординат вниз на величину фототока j_f по отношению к вольт-амперной характеристике неосвещенного перехода.

Точке пересечения вольт-амперной характеристики для $\Phi \neq 0$ с осью абсцисс соответствует так называемый **вентильный режим** работы фотодиода. В вентильном режиме работы p - n -перехода внешняя электрическая цепь является разомкнутой и $j = 0$. На зажимах разомкнутой цепи при этом наводится вентильная фото - ЭДС, которая в соответствии с (15) составляет

$$V_{вен} = \frac{kT}{e} \ln \left(1 + \frac{j_f}{j_s} \right) \quad (16)$$

Режим работы p - n -перехода в условиях внешней засветки и при обратном смещении называется **фотодиодным режимом**.

Рассмотрим световую характеристику p - n -перехода, которая представляет собой зависимость фототока от величины светового потока. Для определенности это рассмотрение проведем в применении к вентильному режиму. Величину фототока представим как

$$j_f = e \alpha \beta \gamma \Phi / h \nu \quad (17)$$

где e — заряд электрона; α - коэффициент поглощения света; β - квантовый выход внутреннего фотоэффекта; γ - коэффициент рекомбинации, учитывающий долю неравновесных электронно-дырочных пар, пришедших в p - n -переход и формирующих фототок, от общего числа неравновесных электронно-дырочных пар.

Подставляя (17) в (16), найдем

$$V_{вен} = \frac{kT}{e} \ln \left(1 + \frac{e \alpha \beta \gamma \Phi}{h \nu j_s} \right). \quad (18)$$

При малом уровне возбуждения логарифм в этом выражении может быть разложен в ряд и разложение может быть ограничено первым членом, т.е. $\ln(1+x) \approx x$ и поэтому

$$V_{вен} = kT \frac{\alpha\beta\gamma \Phi}{h \nu j_s} . \quad (19)$$

Таким образом, вентильная фото – ЭДС при низком уровне освещенности пропорциональна потоку излучения $V_{вен} \sim \Phi$, т.е. соответствующая световая характеристика является линейной. При высоком уровне освещенности $j_f/j_s \gg 1$, так что

$$V_{вен} = \frac{kT}{e} \ln e \alpha\beta\gamma \frac{\Phi}{h \nu j_s} \quad (20)$$

и соответствующая световая характеристика имеет вид логарифмической функции $V_{вен} \sim \ln \Phi$.

Из формулы (20) следует, что при увеличении интенсивности света фото – ЭДС возрастает до тех пор, пока не сравняются j_f и j_s , т.е. пока не исчезнет потенциальный барьер, препятствующий переходу носителей заряда. Высота барьера представляет максимально достижимое значение $V_{вен}$. Поэтому вентильная фото – ЭДС зависит от степени легирования, а следовательно, от положения уровня Ферми. Практически этот предел соответствует ширине запрещенной зоны.

Порядок выполнения работы.

I. Изучение свойств $p-n$ -перехода в фотодиодном режиме.

1. Собрать фотоэлектрическую схему установки согласно блок-схеме, изображенной на рис. 4.
2. Включить приборы и дать им прогреться в течении 5 - 10 мин.
3. Измерить обратную вольт-амперную характеристику фотодиода при отсутствии освещения. Для этого:
 - а.) Закрыть окно фотодиода вращающимся металлическим диском.

б.) Установить на источнике питания (8) $U = 3$ В и с помощью магазина сопротивлений (6) плавно изменять прикладываемое к фотодиоду напряжение, которое можно контролировать с помощью вольтметра В7-26 (9).

в.) При необходимости повысить напряжение источника питания (8) до значений $U = 5, 6, 9$ В.

г.) Измерения проводить в интервале обратных напряжений от 2 до 8 В с шагом 0,5 В фиксируя для каждого значения напряжения соответствующую силу тока.

4. Измерить обратную вольт-амперную характеристику фотодиода при внешнем освещении. Для этого:

а.) Открыть окно фотодиода.

б.) Включить источник света (1) и отъюстировать оптическую систему установки. При этом, напряжение питания лампы, с помощью источника (2), установить равным $U = 3$ В. Установить на диафрагме (3) положение «20» (Положение диафрагмы указывает на диаметр окна в мм.)

в.) Повторить подпункты б – г пункта 3.

г.) Установить на диафрагме (3) положение «40»

д.) Повторить подпункты б – г пункта 3.

б. Заполнить отчетную таблицу. Определить световой поток в относительных единицах (\sim площади окна диафрагмы) и построить экспериментальные зависимости вольт-амперной характеристики фотодиода для каждого из случаев.

II. Изучение свойств *p-n*-перехода в вентильном режиме.

1. Собрать схему установки согласно блок-схеме, изображенной на рис. 5.

2. Включить источник света (1). При этом, напряжение питания лампы накаливания установить равным $U = 4,5$ В .

3. Изменяя световой поток, путем открытия окна диафрагмы (3), снять световую характеристику фотодиода в режиме короткого замыкания и при сопротивлении нагрузки, равном 2 кОм.

Диаметр диафрагмы (3) изменять от 10 до 50 мм с шагом 5 мм.

4. Результаты зафиксировать в таблице и построить световую характеристику фотодиода при различных сопротивлениях нагрузки.

Контрольные вопросы.

1. Чем обусловлен тип электропроводности полупроводников? Какова зависимость положения уровня Ферми от типа электропроводности полупроводника?
2. Что представляет собой *p-n*-переход?
3. Поясните, какие токи проходят через переход при отсутствии и при наличии внешних возмущений.
4. Запишите и поясните уравнение динамического равновесия между диффузионными и дрейфовыми токами, проходящими через барьер *p-n*-перехода.
5. Запишите и поясните уравнение Шредингера для электрона находящегося в кристалле во внешнем электрическом поле.
6. Какие наблюдаются изменения в вольт-амперной характеристике фотодиода при внешнем освещении?
7. Расскажите о фотодиодном и вентильном режиме работы *p-n*-перехода.
8. Что называется световой характеристикой фотодиода? Какова ее зависимость для случаев малого и высокого уровней возбуждения?
9. Расскажите об экспериментальной установке и порядке выполнения работы.

Литература

1. Фистуль В.И. Введение в физику полупроводников. М., «Высшая школа», 1975.
2. Шалимова К.В. Физика полупроводников. М., «Энергия», 1976.
3. Алексеев С.А. и др. Экспериментальная оптика полупроводников. СПб, «Политехника», 1994.

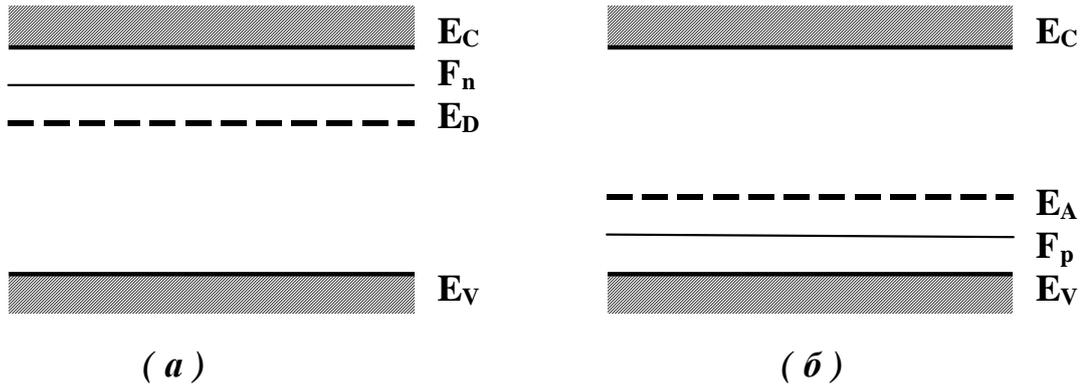


Рис. 1. Зонная диаграмма полупроводника *n*-типа (а); зонная диаграмма полупроводника *p*-типа (б).

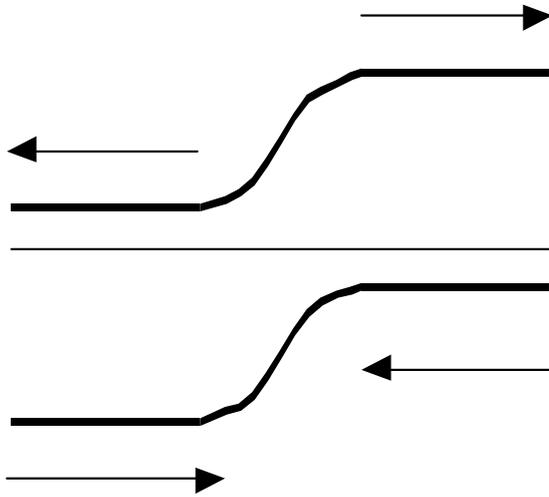


Рис. 2. Энергетические зоны в области *p-n*-перехода при отсутствии внешнего смещения.

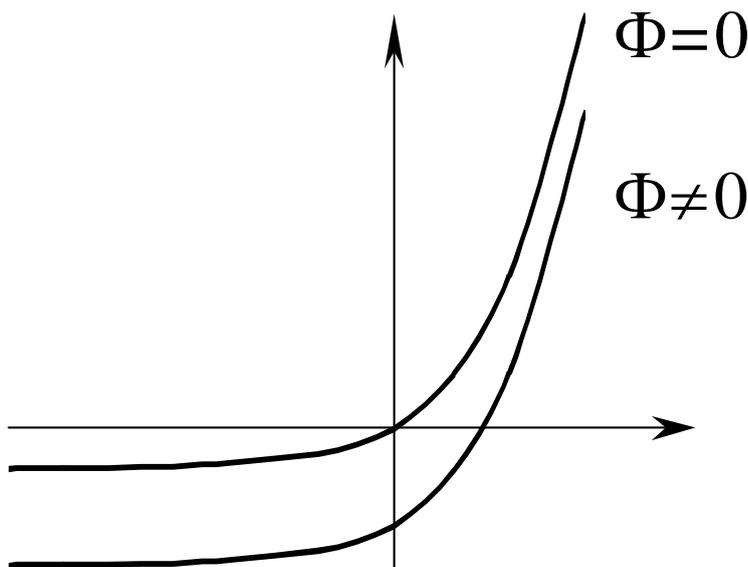


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики *p-n*-перехода при отсутствии ($\Phi = 0$) и при наличии светового потока ($\Phi \neq 0$)

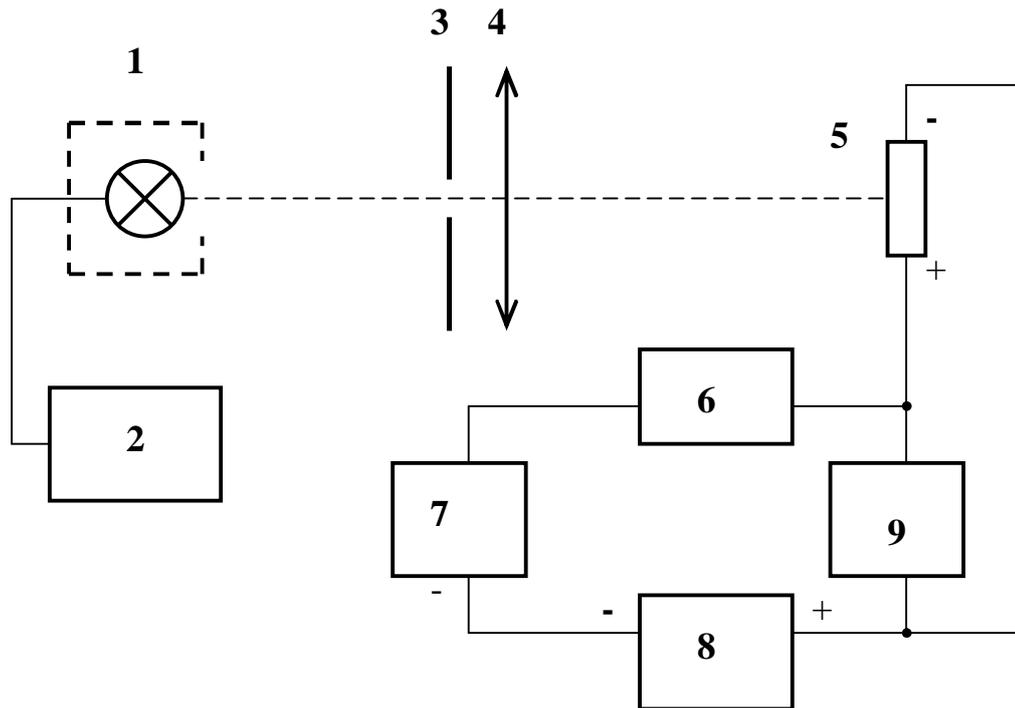


Рис. 4. Блок-схема установки для измерения вольт-амперных характеристик p - n -перехода в фотодиодном режиме.

1 – источник света (лампа накаливания); 2 – источник питания; 3 – диафрагма; 4 – объектив; 5 – фотодиод (p - n -переход); 6 – магазин сопротив-

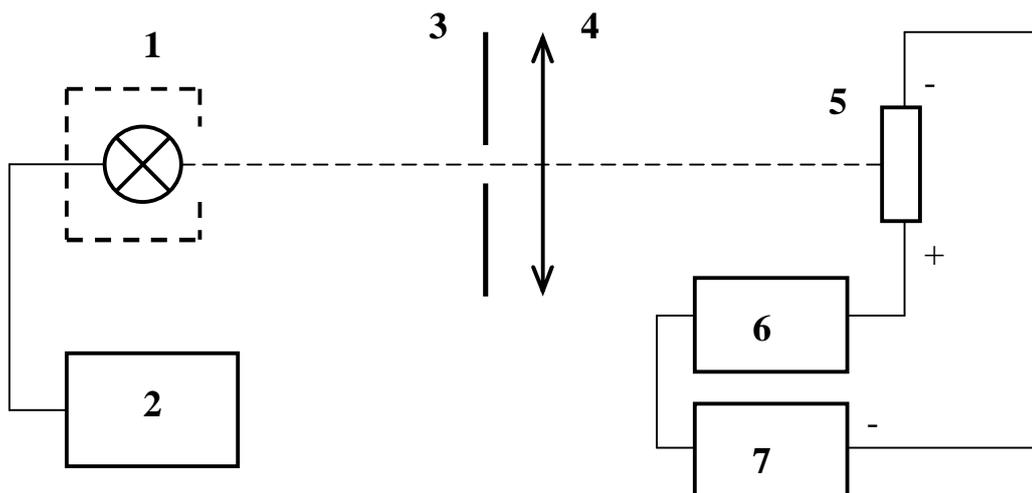


Рис. 5. Блок-схема установки для измерения световых характеристик p - n -перехода в вентильном режиме.

1 – источник света (лампа накаливания); 2 – источник питания; 3 – диа-