

## **ИЗУЧЕНИЕ ВНУТРЕННЕГО ФОТОЭФФЕКТА**

**С.В. Раткевич**

### **Цели работы:**

1. Изучить основы теории проводимости полупроводников.
2. Изучить явление внутреннего фотоэффекта.
3. Исследовать зависимость фотосопротивления от освещенности.

### **Механизм проводимости полупроводников с точки зрения зонной теории**

*Полупроводники* – это вещества, имеющие при комнатной температуре удельную электрическую проводимость в интервале от  $10^{-8}$  до  $10^6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ , которая в сильной степени зависит от вида и количества примеси и структуры вещества, а также от внешних условий: температуры, освещения, внешних электрических и магнитных полей, облучения. Электропроводность твердых тел в современной физике объясняется на основе зонной теории. Известно, что электроны в атоме имеют дискретные энергетические уровни. Согласно зонной теории твердого тела (более детальное объяснение см. в теории к лабораторной работе №3.11), когда атомы соединяются, чтобы сформировать кристалл, эти разрешенные энергетические состояния расщепляются в близко расположенные уровни. В случае объединения большого числа атомов эти энергетические уровни образуют достаточно непрерывные зоны разрешенной энергии, которую может иметь электрон. Именно эти энергетические зоны определяют электрические свойства твердого тела.

Диаграмма энергетических уровней атома показана на рис. 1.

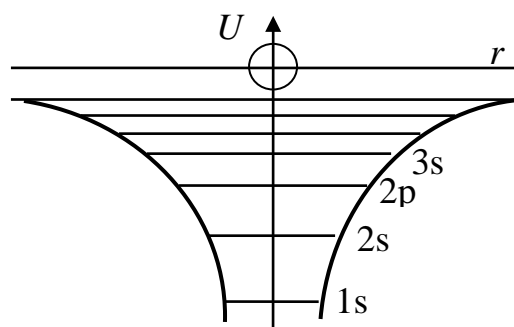


Рис. 1. Энергетические уровни отдельного атома

Например, такая система уровней характерна для единственного изолированного атома натрия. В том случае, когда два одинаковых атома соединяются, появляется раздвоение энергетических уровней (рис. 2). Число энергетических уровней в каждом атоме не изменяется, но уровни в каждом атоме слегка изменяются.

Величина расщепления энергетических уровней в атомах зависит от того, как близко атомы расположены друг от друга, когда они формируют твердое тело. По мере того, как атомы сближаются, расщепление увеличивается.

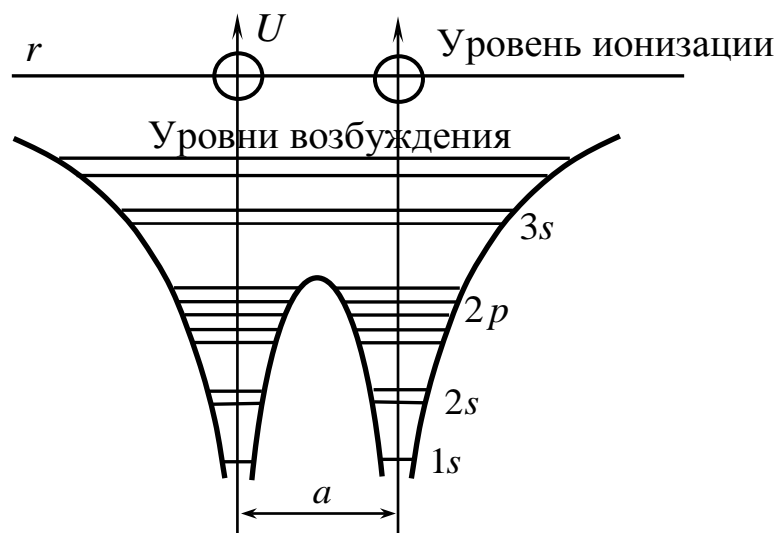


Рис. 2. Диаграмма энергетических уровней двух одинаковых атомов, находящихся близко друг от друга

Расщепленные уровни образуют группы уровней, названные зонами. Зоны имеют практически непрерывные энергетические состояния. Ширина зон зависит от расстояния между атомами. Расстояние между подуровнями очень

мало. Если ширину зоны принять за несколько электронвольт, то расстояние между уровнями будет не более  $10^{-22}$  эВ. Поэтому обычно не учитывают тонкую структуру зоны, считая зону непрерывной.

Например, если кристалл имеет около  $10^9$  атомов, то при типичной ширине зоны  $\sim 1$  эВ энергетический зазор между двумя соседними уровнями составляет всего лишь  $10^{-9}$  эВ. *Валентная зона* – это энергетическая область разрешённых электронных состояний, заполненная валентными электронами атомов твердого тела. Энергетический зазор, непосредственно примыкающий к валентной зоне, называется *запрещенной зоной*, потому что электроны не могут существовать в кристалле с такими энергиями. Зона разрешенных энергетических состояний непосредственно выше запрещенной зоны называется *зоной проводимости*. Если валентная зона принадлежит всему кристаллу как целому, то внутренние зоны или более нижние зоны не принадлежат всем атомам, и поэтому они не являются важными в формировании электрических свойств твердого тела. Так же как валентные электроны определяют химические свойства атомов, так валентная зона и зоны непосредственно выше валентной определяют электрические свойства твердого тела.

В соответствии с принципом Паули *в одном и том же энергетическом состоянии может находиться не более одного электрона*. Другими словами в электронной системе возможно существование только одной частицы с одним набором квантовых чисел  $(n_1, l_1, m_1, s_1)$ . Другая частица должна иметь уже другой набор, например  $(n_1, l_1, m_1, s_2)$ . Отсюда вытекает другая, более важная для нас формулировка постулата Паули: ***на одном электронном уровне может находиться не более двух электронов с противоположными спинами***, то есть третий электрон должен быть на каком-то другом уровне. Поэтому электроны в энергетических зонах заполняют почти все разрешенные энергетические состояния.

В металлах валентная зона заполнена электронами наполовину.

Полупроводники и диэлектрики отличаются от других твердых тел тем, что при низких температурах их валентная зона полностью заполнена электронами, а зона проводимости пустая и отделена энергетическим зазором в несколько эВ, причем ширина запрещенной зоны полупроводника меньше ширины запрещенной зоны изолятора. Полностью заполненная зона не может дать вклад в электропроводность, поскольку электроны не могут накапливать энергию, а пустая зона проводимости не содержит носителей тока и также не может дать вклад в электропроводность. Итак, именно зонная структура полупроводников определяет их специфические электрофизические свойства. Для олова  $\Delta E = 0,08$  эВ, кремния 1,2 эВ, алмаза 5,6 эВ.

На рис. 3 показана упрощенная диаграмма энергетических зон собственного полупроводника. Нижняя зона представляет собой валентную зону, которая у полупроводников так же, как и у диэлектриков, при температуре, равной абсолютному нулю, полностью заполнена электронами. Валентная зона и зона проводимости разделены энергетическим интервалом, так называемой *запрещенной зоной*, ширина которой ( $\Delta E$ ) для полупроводников имеет значения до 2-3 эВ, для диэлектриков более 2-3 эВ (Металлы имеют или частично заполненную валентную зону, или полностью заполненную валентную зону, перекрывающуюся с зоной проводимости.)

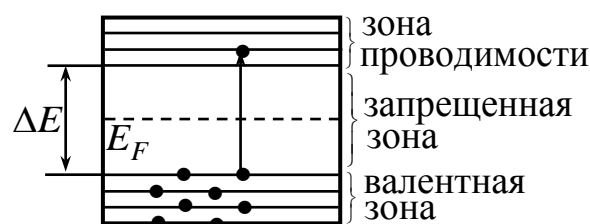


Рис. 3. Энергетические зоны собственного полупроводника

Ширина запрещенной зоны  $\Delta E$  – наименьшее приращение энергии электрона при его переходе из связанного состояния в состояние проводимости (работа выхода).

Предварительно вспомним понятие об **уровне Ферми**. В металлах *уровнем Ферми* считается такой энергетический уровень, ниже которого при абсо-

лютом нуле все состояния заполнены электронами, а все более высокие энергетические состояния свободны. При конечной температуре  $T$  состояния около уровня Ферми в пределах интервала энергии  $2kT$  частично заполнены. Вероятность нахождения электрона в любом данном состоянии связана с разностью энергии между этим состоянием и уровнем Ферми. Также можно считать, что в полупроводниках вероятность нахождения электрона в любом данном состоянии зависит от его энергии.

Существование запрещенной зоны энергий можно объяснить, исходя из особенностей химической связи в полупроводниках. При ненарушенных связях в кристалле (нет химических примесей и структурных дефектов) все валентные электроны каждого атома участвуют в образовании ковалентных связей. На языке зонной теории все такие электроны находятся в валентной зоне. В таком состоянии (температура абсолютного нуля и отсутствие внешних ионизирующих воздействий) кристалл является изолятором. Для создания подвижных электронов необходим разрыв некоторого количества связей, то есть с точки зрения теории энергетических зон это соответствует переходу электронов из валентной зоны в зону проводимости. Это происходит при повышении температуры и под действием ионизирующих излучений. При разрыве каждой связи возникает один электрон проводимости и одно вакантное квантовое состояние электрона (дырки).

При абсолютном нуле полупроводник не имеет свободных электронов в зоне проводимости и является изолятором. Однако с повышением температуры электроны получают тепловую энергию, которая для части электронов оказывается достаточной для преодоления запрещенной зоны и перехода их в зону проводимости. В результате полупроводник теряет свойства идеального изолятора, так как электрическое поле имеет возможность изменять состояние электронов, находящихся в зоне проводимости. Кроме того, вследствие образования вакантных уровней в валентной зоне, электроны этой зоны также могут изменять свою скорость под действием внешнего поля. Поведение электронов ва-

лентной зоны может быть представлено как движение положительно заряженных квазичастиц, получивших название «дырок».

Таким образом, полупроводники обладают двумя видами электропроводности: электронной, обусловленной движением свободных электронов в зоне проводимости, и дырочной, обусловленной движением дырок в валентной зоне.

Проводимость **чистых** полупроводников создается как электронами, так и дырками и называется собственной проводимостью. Уровень Ферми в собственных полупроводниках находится посередине запрещенной зоны.

Типичными представителями полупроводников являются химически чистые элементы IV группы таблицы Менделеева. В кристаллической решетке этих элементов (например, германия) каждый атом образует четыре парно-электронные (ковалентные) связи с соседними атомами.

Введение в полупроводники незначительного количества примесей ( $\approx 10^{-4}\%$ ) приводит к значительному увеличению электропроводности полупроводника. Проводимость, обусловленная наличием примесей в полупроводнике, называется примесной.

### **Фотопроводимость полупроводников**

Источником энергии, способствующим образованию свободных носителей заряда в полупроводниках, кроме теплового действия, могут быть и другие процессы: столкновение с быстрыми электронами,  $\alpha$ -частицами, ионизация под действием света (**фоторезистивный эффект**) или других излучений (рентгеновских,  $\gamma$ -лучей), ионизация под действием сильного поля и др. Так как свободные носители в этом случае возникают за счет непосредственного поглощения энергии, то тепловая энергия решетки практически остается неизменной. При этом нарушается тепловое равновесие между решеткой и свободными носителями заряда. Электроны или дырки проводимости (свободные носители заряда), не находящиеся в термодинамическом равновесии (как по концентрации,

так и по энергетическому распределению), называются неравновесными носителями заряда.

Так как число неравновесных носителей заряда обычно невелико и мала запасенная ими избыточная энергия по сравнению с энергией кристаллической решетки, то наложение и снятие внешнего возбуждения не влияет на концентрацию равновесных носителей заряда и полная концентрация носителей заряда  $n$  или  $p$  равна простой сумме концентраций равновесных ( $n_0, p_0$ ) и **неравновесных** ( $\Delta n, \Delta p$ ) носителей заряда:

$$n = n_0 + \Delta n, \quad (1)$$

$$p = p_0 + \Delta p. \quad (2)$$

Возникновение неравновесных носителей заряда приводит к изменению проводимости полупроводника:

$$\sigma = \sigma_T + \Delta\sigma = e_0 (n_0 \mu_n + p_0 \mu_p) + e_0 (\Delta n \mu_n + \Delta p \mu_p) \quad (3)$$

где  $\sigma_T$  – темновая проводимость;  $\Delta\sigma$  – неравновесная проводимость (фотопроводимость):

$$\Delta\sigma = e_0 (\Delta n \mu_n + \Delta p \mu_p), \quad (4)$$

где  $\mu_n, \mu_p$  – подвижности электронов и дырок соответственно.

Изменение электрического сопротивления полупроводника, обусловленное исключительно действием электромагнитного излучения и не связанное с его нагреванием, называется **фоторезистивным эффектом**, или **внутренним фотоэффектом**. Внутренний фотоэффект возникает за счет изменения концентрации свободных носителей заряда в результате их оптического возбуждения, то есть под действием света происходит перераспределение электронов по энергетическим уровням.

В теории полупроводников выделяют также понятие **вентильного фотоэффекта**, когда фотоЭДС возникает при освещении вентильного, то есть выпрямляющего, контакта. Выпрямляющими свойствами обладают контакты полупроводников различного типа электропроводности (как p-n-переход), металла

с полупроводником. Полупроводниковые приборы, основанные на вентильном фотоэффекте и предназначенные для превращения световой энергии в электрическую или световых сигналов в электрические, называют фотоэлементами.

Энергия неравновесных носителей заряда в результате взаимодействия с фононами и дефектами решетки снижается до энергии равновесных носителей, поэтому можно считать, что генерация неравновесных носителей заряда в полупроводниках приводит лишь к изменению **концентрации** свободных носителей, не изменяя их подвижности. Однако при поглощении света свободными носителями заряда может быть и изменение их **подвижности** в результате следующих причин:

- 1) переброса дырок из одной зоны в другую;
- 2) переброса электронов из одной зоны в другую;
- 3) разогрева электронов вследствие рекомбинационного излучения.

При возникновении неравновесных носителей заряда изменяется полная концентрация носителей, а, следовательно, и положение уровня Ферми.

Если энергия кванта света  $h\nu$  превышает ширину запрещенной зоны  $\Delta E$ , то электрон, поглотивший фотон, переходит из валентной зоны в зону проводимости. В результате появляется дополнительная пара носителей зарядов – электрон и дырка, что приводит к увеличению электропроводности вещества.

Если в веществе есть примеси, то под действием света с энергией кванта  $h\nu \geq \Delta E$ , где  $\Delta E$  – энергия активации примеси, электроны могут переходить из валентной зоны на уровни примеси или с примесных уровней в зоны проводимости. В первом случае возникает дырочная проводимость, во втором – электронная. *Максимальная длина волны (красная граница фотоэффекта)*, при которой свет является еще фотоэлектрически активным, т. е. создает свободные носители заряда, определяется соотношением:

$$\lambda_{\max} = \frac{ch}{\Delta E} = \frac{1,24 \text{ мкм эВ}}{\Delta} . \quad (5)$$



## Основные характеристики фоторезистора

Важной особенностью полупроводников является способность увеличивать электропроводность под действием света (см. выше). Полупроводник, меняющий свою проводимость при освещении его светом, называется *фотосопротивлением* (фоторезистором). Уменьшение сопротивления полупроводника, обусловленное поглощением света, объясняется увеличением числа свободных носителей заряда. *Квантовым выходом* (вероятностью), рассчитанным на поглощённый световой поток, называется отношение числа неравновесных фотоносителей заряда к общему числу поглощенных квантов света:  $\beta = \Delta n / N$ .

Фототоком  $I_{\phi}$  фотосопротивления при данном напряжении называется разность тока при освещении полупроводника  $I_{\text{св}}$  и темнового тока  $I_{\text{т}}$ :

$$I_{\phi} = I_{\text{св}} - I_{\text{т}} \quad (6)$$

Если фотосопротивление не освещено, то его величина очень большая. Его называют **темновым** сопротивлением, а ток, соответствующий ему - темновым током. Величина темнового сопротивления определяется температурой и чистотой полупроводника. При освещении прибора его сопротивление уменьшается и тем значительно, чем больше световой поток.

Благодаря внутреннему фотоэффекту фоторезистор непосредственно преобразует световую энергию в электрическую энергию.

Световой (энергетической) характеристикой фотосопротивления называется зависимость фототока от светового потока при данном напряжении. Эта зависимость, показана на рис. 4.

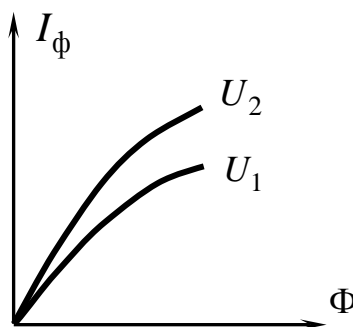


Рис. 4. Световые характеристики фотосопротивления

Вольтамперная характеристика фотосопротивления имеет линейный характер при постоянном световом потоке и выражает зависимость фототока от приложенного напряжения.

Важной характеристикой фотосопротивления также является удельная чувствительность, т. е. отношение фототока  $I_{\Phi}$  к световому потоку  $\Phi$  и к величине приложенного напряжения  $U$ :  $\gamma_{уд} = I_{\Phi} / \Phi \cdot U$ .

Из фотометрии известно, что световой поток

$$\Phi = ES, \quad (7)$$

где  $E$  – освещенность поверхности;  $S$  – площадь светочувствительного слоя фотосопротивления.

В случае малых световых потоков  $\Phi$ , когда кванты света идут на образование избыточных носителей, количество образующихся носителей, а, следовательно, и величина фототока пропорциональны падающему световому потоку ( $I_{\Phi} \sim \Phi$ , т. е.  $I_{\Phi} = a \cdot \Phi = a \cdot ES$ , где  $a$  – некоторая постоянная). При этом фотосопротивление выражается как

$$R_{\Phi} = R_T \frac{I_T}{I_{св}} \quad (8)$$

При больших световых потоках наступает насыщение и линейная зависимость фототока от светового потока нарушается ( $I_{\Phi} \sim \Phi^{1/2}$ ).

Принимая во внимание, что темновой ток ( $(I_T \sim \Phi_0)$ ) и темновое сопротивление являются постоянными для данного фоторезистора, и учитывая (6)-(7) перепишем формулу (8) в виде

$$R_{\Phi} \cdot (aES + I_T) = R_T \cdot I_T = \text{const} \quad (9)$$

или

$$R_{\Phi} \cdot (E + A) = R_T A = \text{const}', \quad (10)$$

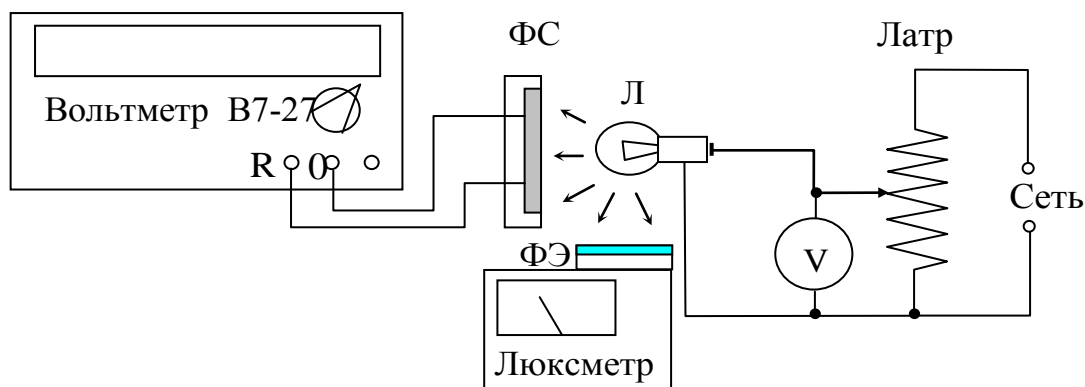
где  $A = I_T / aS$  – некоторая неизвестная постоянная.

Учитывая линейную зависимость фототока от светового потока, из формулы (9) следует описание зависимости фотосопротивления от освещенности:

$$R_{\phi} \cdot (E + A) = \text{const}' \quad (11)$$

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И ФОТОРЕЗИСТОРА

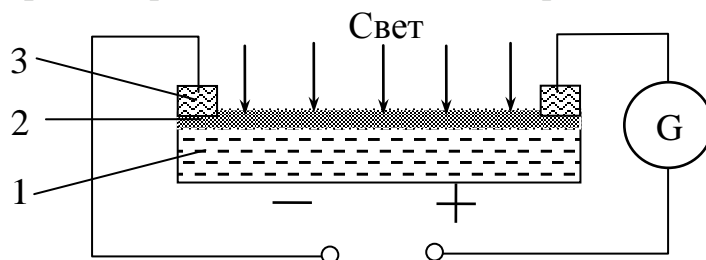
Лабораторная работа выполняется на установке, принципиальная схема которой дана на рис. 5.



**Рис. 5. Принципиальная схема экспериментальной установки**

Электрическая лампочка (Л) и фотосопротивление (ФС) помещены в корпус, к которому с внешней стороны подсоединены люксметр и универсальный цифровой вольтметр В7-27. Для питания электролампочки используется ЛАТР с вольтметром, благодаря чему меняется освещенность фотоэлемента (ФЭ) люксметра. Величина фотосопротивления для различной освещенности измеряется универсальным вольтметром В7-27 в режиме измерения сопротивлений. Освещенность фотосопротивления измеряется люксметром.

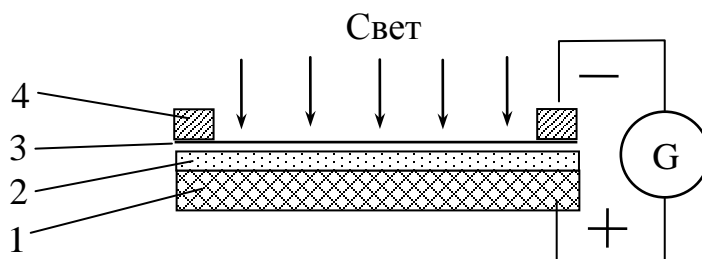
Устройство фотосопротивления показано на рис. 6.



**Рис. 6. Устройство фотосопротивления**

На стеклянную пластинку (1) нанесен тонкий слой полупроводника (2). На два противоположных края этого слоя наложены металлические электроды (3), с помощью которых фотосопротивление включается в цепь.

Фотоэлемент с запирающим слоем является основным элементом *люксметра* – прибора для измерения освещенности. Его устройство и схема включения показаны на рис.7.



**Рисунок 7. Устройство и схема включения фотоэлемента**

На стальное основание (1) нанесен слой селена (2), а на него – тонкий полупрозрачный слой золота (3). К золотому слою плотно прижато металлическое кольцо (4), служащее электродом. Между селеном и золотом Au возникает промежуточный слой, обладающий свойством пропускать электроны только из селена в золото. Если селеновый слой осветить, то электроны будут получать дополнительную энергию и перейдут в полупрозрачный слой золота. В результате в золоте будет избыток электронов, этот слой зарядится отрицательно, а селен и стальное основание зарядятся положительно. Это явление и используется для измерения освещенности, так как появляющаяся при этом фотоэлектродвижущая сила тем больше, чем больше освещенность.

### **ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ**

1. Снять градуировочную кривую освещенности ( $E$ ) фоторезистора при изменении напряжения ( $U$ ) от 0 до 200 В (через 10–15 В).
2. Построить градуировочный график  $E = f(U)$ .
3. Снять зависимость величины фотосопротивления от освещенности. Для этого измеряется величина фотосопротивления при изменении показания вольтметра от 0 до 200 В с шагом 10-15 В (9–10 точек).

4. Построить зависимость величины фотосопротивления  $R$  от освещенности  $E$ . Используя формулу (11), сравнить экспериментальную зависимость  $R = f(E)$  с теоретической.

5. Найти неизвестную постоянную  $A$  по формуле  $A = 200 \cdot R_{\phi}(200) / (R_{\phi}(0) - R_{\phi}(200))$ , где  $R_{\phi}(0)$  и  $R_{\phi}(200)$  – значения фотосопротивления при освещенности 0 лк и 200 лк соответственно. Найти среднее значение  $\langle R_{\phi} \cdot E' \rangle$ , где  $E' = E + A$ , а затем оценить погрешность  $n$  измерений по отношению к среднему  $\langle R_{\phi} \cdot E' \rangle$  по формуле  $\delta = 100\% \cdot \sigma / \langle R_{\phi} \cdot E' \rangle$ , где  $\sigma$  – стандартное отклонение рассчитанных произведений  $(R_{\phi} \cdot E')$  от среднего результата:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left[ (R_{\phi} \cdot E')_i - \langle R_{\phi} \cdot E' \rangle \right]^2}.$$

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем суть явления внутреннего фотоэффекта в полупроводниках?
2. В чем принципиальная схожесть или отличие внешнего и внутреннего фотоэффектов? Что понимают под вентильным фотоэффектом?
3. Как применяют внутренний фотоэффект на практике?
4. Как образуются избыточные носители тока в полупроводниках под действием квантов света?
5. Что такое «темновая» электропроводность полупроводника?
6. Объясните характер зависимости фототока от светового потока, падающего на фотосопротивление (световая характеристика).
7. Что такое квантовый выход?
8. В чем суть экспериментального метода исследования световой характеристики?
9. Какой принцип работы люксметра?

## 10. Какое устройство фоторезистора?

### **Литература**

1. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 3 т. Т. 3 / И. В. Савельев – М. : Наука, 1987.
2. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 5 т. Т.5 / И. В. Савельев – М. : Физматлит, 1998.
3. Киреев, П. С. Физика полупроводников / П. С. Киреев – М. : Высшая школа, 1975.
4. Игумнов, В. Н. Физические основы микроэлектроники : уч. пособие – изд. 2-е, исправленное / В. Н. Игумнов. – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2010. – 272 с.
5. Бьюб, Р. Фотопроводимость твердых тел / Р. Бьюб. – М.: Иностранная литература, 1962. – 558 с.

### КРАТКАЯ ИНСТРУКЦИЯ К РАБОТЕ № 3.12

1. Изучить лабораторную установку.
2. Подключить ЛАТР и ВОЛЬТМЕТР к электросети.
3. Включить ЛАТР и ВОЛЬТМЕТР – установить тумблеры СЕТЬ в верхнее положение. Переключатель РОД РАБОТЫ установить в положение 100 к.
4. Снять градуировочную кривую освещённости фотосопротивления от силы света электролампочки. Для чего изменять напряжение на ЛАТРе от 50 Вольт до 200 Вольт через каждые 10 Вольт и снимать показания ЛЮКСМЕТРА для каждого значения напряжения на электролампочке. Шкала ЛЮКСМЕТРА выбрана 500 лк. Результаты занести в таблицу.
5. Снять зависимость величины фотосопротивления (9 - 10 точек) от его освещённости. Для чего изменять напряжения на ЛАТРе от 0 до 200 Вольт и измерять сопротивление прибором В7-27. Шкалу прибора В7-27 выбирать соответственно величине сопротивления – 1 МОм, 100 кОм, 10 кОм, 1 кОм. Результаты измерений занести в таблицу.
6. Выключить ВОЛЬТМЕТР и ЛАТР, для чего тумблеры СЕТЬ установить в нижнее положение. Вынуть вилки из розеток электросети.

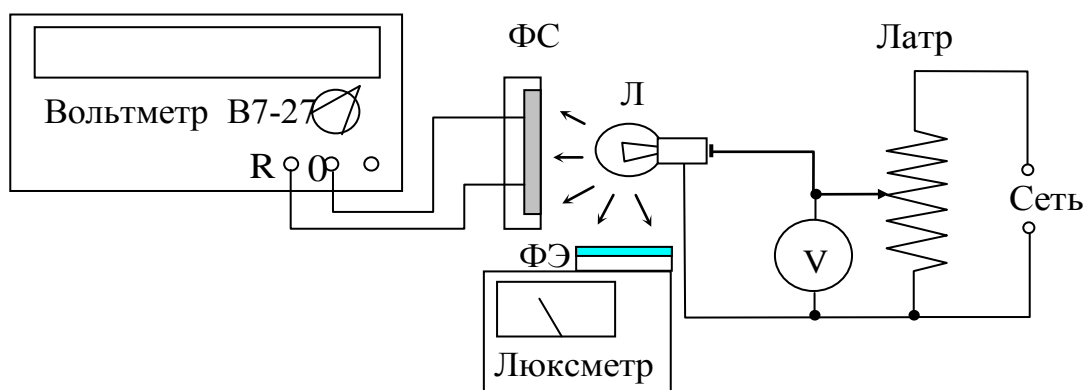


Рис. Схема лабораторной установки