

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**имени М. В. Ломоносова**

---

**Физический факультет**  
**кафедра общей физики и физики конденсированного состояния**

**Методическая разработка**  
**по общему физическому практикуму**

**Лаб. работа № 133**

**ИЗУЧЕНИЕ ВНУТРЕННЕГО**  
**ФОТОЭФФЕКТА**

**Лаб. работу поставил доц. Короленко П.В.**

**Москва 2012 г.**

Подготовил методическое пособие к изданию доц. Авксентьев Ю.И.

# ИЗУЧЕНИЕ ВНУТРЕННЕГО ФОТОЭФФЕКТА <sup>1</sup>

*Внутренним фотоэффектом называют перераспределение электронов между энергетическими уровнями твердого тела, происходящее под действием проникшего внутрь тела света.* Наблюдается внутренний фотоэффект только в диэлектриках и полупроводниках. В случае внутреннего фотоэффекта в отличие от внешнего электроны остаются внутри тела. При этом в веществе изменяются концентрация носителей заряда (электронов и дырок) и их подвижность, что приводит к изменению электрических свойств вещества. Внутренний фотоэффект обнаруживается по изменению проводимости тел (*фотопроводимость*), либо по возникновению электродвижущей силы, (*вентильный фотоэффект*).

Для объяснения внутреннего фотоэффекта приходится привлекать не только квантовые свойства излучения, но и квантовые свойства вещества. Основой для изучения квантовых свойств вещества является *зонная теория*.

## **Зонная теория**

Движение электронов в атомах и молекулах происходит в малых областях пространства, имеющих порядок  $10^{-8}$  см. Как известно, квантовые свойства электронов в этом случае проявляются в наличии строго определенных значений, которые может принимать энергия электронов - *уровней энергии*. Напротив, энергия свободного электрона может принимать непрерывный ряд значений в области от нуля до бесконечности. При объединении атомов в кристалл электроны внутренних атомных оболочек, наиболее тесно связанные с ядром атома, движутся по-прежнему вблизи ядер. Их уровни энергии мало отличаются от уровней энергии соответствующих электронов в отдельных атомах. Электроны внешних оболочек (*валентные электроны*) удерживаются в атомах гораздо слабее и более или менее свободно перемещаются внутри всего кристалла от одного узла кристаллической решетки к другому, становясь, таким образом, общими для всего кристалла. Движение их осуществляется хотя и в ограниченных, но макроскопических пределах пространства. Возможные значения энергии этих электронов образуют отдельные области - *разрешенные зоны*, состоящие из большого числа очень близко расположенных друг к другу уровней энергии. Разрешенные зоны разделены промежутками - *запрещенными зонами*, т.е. областями значений энергии, которые электроны в кристалле иметь не могут.

---

<sup>1</sup> Теоретическое введение к лабораторной работе написано Пустоваловым Г.Е.

Ширина каждой из разрешенных зон, т.е. разность энергий верхнего и нижнего уровней зоны (или, как говорят, расстояние между ее "дном" и "потолком"), и взаимное расположение зон определяются свойствами кристаллической решетки (строением ее ячейки и, следовательно, в конечном счете, химическими свойствами вещества). Разрешенные зоны имеют ширину порядка  $1 \text{ эВ}$ <sup>2</sup>. Ширина запрещенной зоны может быть различной вплоть до того, что разрешенные зоны могут накладываться друг на друга.

Между разрешенными зонами энергии в кристалле и уровнями энергии отдельных атомов, из которых образован кристалл, имеется связь — *каждому уровню энергии атома в кристалле, состоящем из  $N$  атомов, соответствует зона, содержащая  $N$  уровней*. Говорят, что при объединении атомов в кристалл зоны образуются путем расщепления соответствующих уровней энергии атомов. В кристалле макроскопических размеров содержится огромное число атомов (напомним, что в одном моле вещества число атомов равно числу Авогадро  $N_A = 6 \cdot 10^{23}$ ), поэтому расстояние между соседними уровнями в зоне ничтожно мало. Например, при массе кристалла  $1 \text{ мг}$  число уровней в зоне имеет порядок  $10^{19}$ , и расстояние между ними составляет около  $10^{-19} \text{ эВ}$ . Так как эта величина намного меньше энергии, которую может получить электрон при возбуждении каким-либо способом (от внешнего электрического поля, при поглощении кванта света или за счет теплового движения), то можно считать, что внутри зоны энергия электрона меняется непрерывно.

Для системы, состоящей из электронов, справедлив *принцип Паули*, согласно которому в системе не могут находиться электроны, имеющие одинаковые состояния. Состояния электрона с одинаковой энергией могут отличаться друг от друга противоположными направлениями *спина* (собственного момента импульса) электрона. В результате, энергией, соответствующей определенному уровню зоны, могут обладать не более двух электронов. Таким образом, максимальное число электронов энергия, которых может лежать в пределах зоны (электронов, находящихся в данной зоне), если зона имеет  $N$  уровней, равно  $2N$ .

При температуре, приближающейся к абсолютному нулю, общая энергия системы должна быть минимальной: электроны попарно заполняют низшие уровни зоны. Степень заполнения электронами уровней зависит от заполнения электронами атомного уровня, расщеплением которого получается зона. Если этот уровень в атоме заполнен, то и зона заполнена целиком. Пустым уровням соответствуют свободные (незаполненные при

---

<sup>2</sup>  $1 \text{ эВ} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$  — энергия, которую приобретает электрон, проходя в электрическом поле разность потенциалов в  $1 \text{ В}$ .

$T = 0 K$ ) зоны, частично заполненным уровням - заполненные не полностью зоны. Первая сверху зона, содержащая электроны при  $T = 0 K$ , называется *валентной*.

По характеру заполнения валентной зоны электронами вещества делятся на два типа: металлы и неметаллы.

У металлов валентная зона либо заполнена не полностью (рис. 1), либо при полностью заполненной валентной зоне валентная и свободная зоны

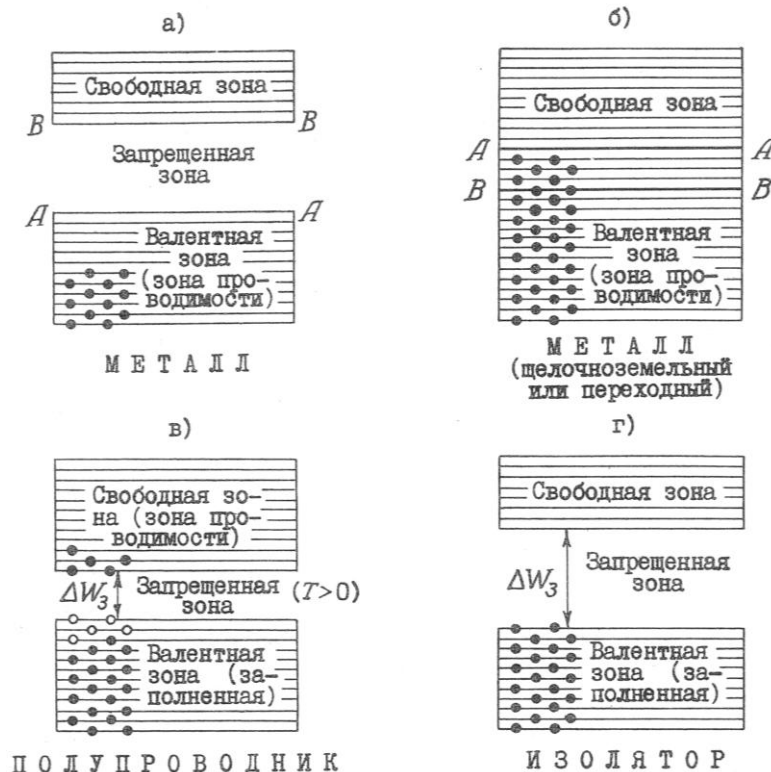


Рис. 1

перекрываются (рис. 1б), что бывает обычно в кристаллах, образованных щелочноземельными и переходными элементами. Электроны, находящиеся на верхних заполненных уровнях энергии валентной зоны металла, под действием электрического поля легко приобретают ускорение. Их энергия изменяется, они переходят на незаполненные уровни, что и приводит к возникновению упорядоченного движения зарядов в веществе, т.е. к появлению электрического тока. Валентная зона в этом случае называется также *зоной проводимости*. Металлы являются хорошими проводниками электричества при любой температуре.

Вещества, у которых между целиком заполненной валентной зоной и свободной зоной имеется запрещенная зона (энергетическая щель), называются *неметаллами*. Ввиду отсутствия при  $T = 0 K$  свободных уровней в валентной зоне электрическое поле при этой температуре не может вызывать перераспределения электронов по уровням энергии внутри зоны и создавать электрический ток. Напряженности электрического поля обычной

величины недостаточно для того, чтобы сообщить электронам энергию, необходимую для перехода через запрещенную зону на свободные уровни лежащей выше зоны. Поэтому при абсолютном нуле температуры все неметаллы являются изоляторами.

При  $T \neq 0 \text{ K}$  некоторая доля электронов может попасть из валентной зоны в свободную за счет энергии теплового движения. Под воздействием электрического поля становится возможным перераспределение электронов по уровням как в свободной зоне, так и в валентной, ввиду появления в ней некоторого числа освободившихся уровней. В результате, вещество становится электропроводным. Число электронов, перешедших в свободную зону вследствие теплового возбуждения, существенно зависит от соотношения между шириной  $\Delta W_3$  запрещенной зоны и средней энергией теплового движения частиц вещества. Средняя энергия теплового движения при температуре  $T$  определяется, как известно, величиной  $kT$  ( $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$  - постоянная Больцмана). При температурах вблизи  $T \approx 300 \text{ K}$ , с которыми чаще всего приходится иметь дело,  $kT \approx 0,025 \text{ эВ}$ . Так как при хаотическом тепловом движении некоторая доля частиц может иметь энергии, значительно превышающие среднюю, то даже в том случае, когда ширина запрещенной зоны  $\Delta W_3 \approx 1 \text{ эВ}$ , т.е. заметно превышает величину  $kT$  при  $T \approx 300 \text{ K}$  в свободную зону за счет теплового возбуждения переходит при этой температуре число электронов, достаточное для того, чтобы создать хотя и малую, но измеримую на опыте электропроводность вещества.

Принято считать, что вещества, у которых  $\Delta W_3 \leq 1 \text{ эВ}$ , являются *полупроводниками*. Вещества же, у которых  $\Delta W_3 > 1 \text{ эВ}$ , относят к *изоляторам*, или *диэлектрикам* (рис. 1в,г). Деление на полупроводники и изоляторы условно, так как резкой границы между ними не существует. В некоторых случаях в качестве критерия, отделяющего полупроводники от изоляторов, берут не  $1 \text{ эВ}$ , а  $2 \text{ эВ}$  или даже  $3 \text{ эВ}$ .

**Собственная проводимость полупроводников.** В проводимости проводников участвуют как электроны, попавшие в свободную зону вследствие теплового возбуждения, так и электроны валентной зоны, получившие возможность изменять свою энергию благодаря наличию в валентной зоне освободившихся уровней. Незанятые (вакантные) места на уровнях валентной зоны называют *дырками*. Вместо того чтобы описывать перераспределение по уровням энергии в почти заполненной валентной зоне всей совокупности электронов, занимающих эту зону, рассматривают перераспределение сравнительно небольшого числа дырок. Возникновение при этом электрического тока можно представить следующим образом. Электрон, связанный в каком-либо узле кристаллической решётки (в валентной зоне эта связь слабая), вследствие возбуждения покидает этот узел, оставляя в узле свободное место – дырку. Такой же валентный электрон из соседнего узла, получив

энергию от электрического поля, может спустя некоторое время занять это место, оставив новую дырку в покинутом узле. Эта дырка, в свою очередь, заполняется электроном, перешедшим из следующего узла, и т.д. Таким образом, движению электрона в каком-либо направлении соответствует движение дырок в противоположном направлении, т.е. в направлении движения в электрическом поле положительных зарядов. В результате, электрический ток, обусловленный перераспределением по уровням энергии электронов валентной зоны, можно представить как движение под действием электрического поля дырок, имеющих положительный заряд, равный по величине заряду электрона. В связи с тем, что электроны в каждом узле кристаллической решётки задерживаются некоторое время, движение дырок происходит не так быстро, как движение электронов в свободной зоне в том же электрическом поле. Поэтому, рассматривая дырки как заряженные частицы, им следует приписывать *эффективную массу*, несколько превышающую массу электрона, причём разную в разных веществах.

Таким образом, электрический ток в полупроводнике складывается из тока, обусловленного движением электронов свободной зоны, и тока, обусловленного движением дырок валентной зоны. Такой вид проводимости осуществляется в чистых (беспримесных) полупроводниках и называется *собственной проводимостью*. Из сказанного ранее следует, что концентрация носителей заряда (электронов и дырок) и, следовательно, собственная проводимость полупроводника тем больше, чем меньше ширина запрещённой зоны. При увеличении температуры концентрация носителей заряда также увеличивается и вместе с тем возрастает собственная проводимость.

**Примесная проводимость полупроводников.** Большое влияние на электропроводность полупроводников оказывают примеси. Атомы примеси в кристаллической решётке находятся далеко друг от друга, поэтому их уровни не расщепляются и зон не образуют. Однако наличие примесей искажает поле решётки, что приводит к появлению *локальных энергетических уровней*. Подбирая примеси, можно получить два типа локальных уровней, расположенных в запрещённой зоне. На рис. 2, а изображены локальные уровни примеси пентавалентных атомов фосфора в решётке, образованной четырёхвалентными атомами полупроводника германий. Если локальные уровни примеси расположены близко к дну свободной зоны, то энергии теплового движения при обычных температурах оказывается достаточно для перевода практически всех электронов с этих уровней в свободную зону, которая превращается при этом в зону проводимости. Атомы примеси, поставляющие электроны в эту зону, называются *донорами*. После перехода электронов в зону проводимости они превращаются в положительные ионы. Если ширина

запрещённой зоны достаточно велика, то из валентной зоны в свободную при той же температуре переходит лишь незначительное число электронов, а в валентной зоне образуется соответствующее число дырок. Проводимость таких полупроводников фактически определяется носителями заряда лишь одного вида – электронами зоны проводимости, полученными от доноров. Их называют *электронными полупроводниками*, или полупроводниками *n*-типа.

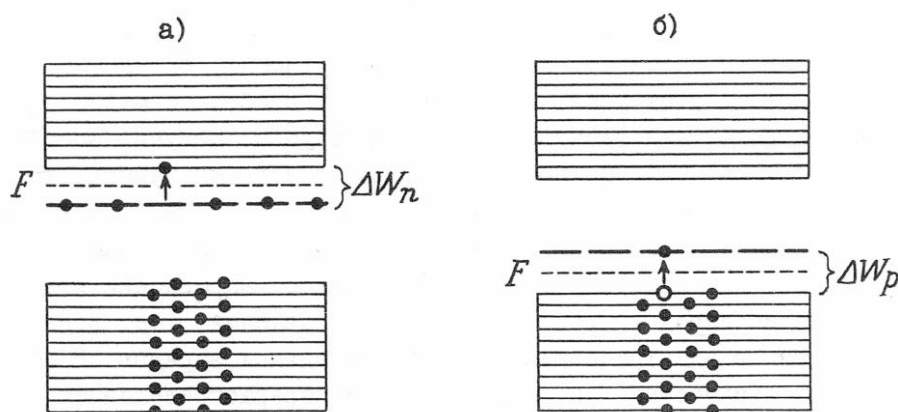


Рис. 2

На рис. 2, б изображены локальные уровни примеси трёхвалентных атомов бора в решётке, образованной четырёхвалентными атомами полупроводника кремния, расположенные вблизи потолка валентной зоны. Переход электронов из валентной зоны на эти локальные уровни приводит к образованию дырок в валентной зоне. Атомы примеси, захватывающие электроны, называются *акцепторами*. После захвата электронов они превращаются в отрицательные ионы. Проводимость такого полупроводника при обычных температурах осуществляется практически лишь одним типом носителей заряда – дырками. Такие полупроводники называются *дырочными полупроводниками*, или полупроводниками *p*-типа.

Проводимость полупроводников, обусловленная наличием примесей, называется *примесной проводимостью*. Однако при повышении температуры концентрация носителей заряда, создаваемых примесями, быстро достигает насыщения – освобождаются все донорные уровни или заполняются все акцепторные, и всё в большей степени начинает сказываться собственная проводимость, вызванная переходом электронов непосредственно из валентной зоны в свободную. В этом случае проводимость полупроводника складывается из примесной и собственной проводимостей. При низких температурах преобладает



примесная проводимость, при высоких – собственная.

**Свойства p-n-перехода.** p-n-переходом называется контакт между примесными полупроводниками разных типов. Как следует из сказанного выше, в полупроводнике n-типа в зоне проводимости обычно находится значительно больше электронов, чем в зоне проводимости полупроводника p-типа. В то же время у полупроводников p-типа больше дырок в валентной зоне, чем у полупроводника n-типа. При контакте полупроводников разных типов электроны из n-полупроводников, а дырки из p-полупроводников диффундируют друг с другом – пара носителей заряда с противоположными знаками исчезает. Поэтому p-n-переход оказывается сильно обеднённым носителями заряда и приобретает большое сопротивление. Одновременно на границе между n- и p-полупроводниками возникает двойной электрический слой, образованный

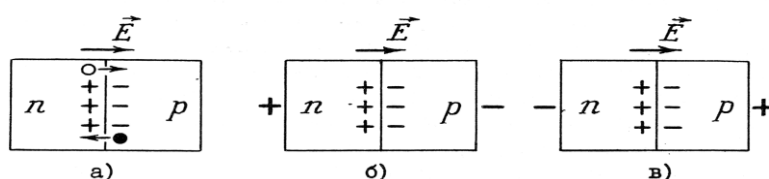


Рис. 3

сторонами положительными ионами донорной примеси в n-полупроводнике, заряд которых теперь не компенсируется ушедшими в p-полупроводник электронами, и с другой стороны – отрицательными ионами акцепторной примеси в p-полупроводнике, заряд которых уже не компенсируется дырками (рис. 3 а).

В результате этого полупроводник n-типа приобретает положительный заряд, а полупроводник p-типа – отрицательный. В узкой области контакта появляется электрическое поле  $\vec{E}$ , которое препятствует дальнейшему переходу электронов в p-полупроводник, а дырок – в n-полупроводник. Таким образом, создаётся потенциальный барьер, при наличии которого сопротивление p-n-перехода будет различным для различных направлений тока: сопротивление велико, когда n-полупроводник имеет положительный потенциал, а p-полупроводник – отрицательный (рис. 3 б), и мало в противоположном случае (рис. 3 в).

**Внутренний фотоэффект в полупроводниках.** Поглощение фотонов внутри вещества, ведущее к перераспределению электронов в веществе по энергетическим состояниям, сопровождается рядом явлений, из которых мы рассмотрим здесь возникновение *фотопроводимости* и *вентильный фотоэффект*.

1. *Фотопроводимостью* называется увеличение электропроводности полупроводника (или диэлектрика) под действием электромагнитного излучения (света). Фотопроводимость вызывается главным образом увеличением концентрации носителей заряда при поглощении света. Возникает она при следующих процессах. Электрон валентной зоны может, поглотив фотон, получить энергию, достаточную для перехода в зону проводимости. Такие переходы ведут к возрастанию числа электронов в зоне проводимости и числа дырок в валентной зоне (*собственная фотопроводимость*). Если в примесном полупроводнике имеется достаточное число свободных акцепторных уровней, то электроны валентной зоны, получившие энергию при поглощении фотонов, могут перейти на эти уровни, образовав в валентной зоне дырки (*дырочная примесная фотопроводимость*). При наличии заполненных донорных уровней, электроны, находящиеся на этих уровнях, поглотив фотоны, могут перейти в свободную зону (*электронная примесная фотопроводимость*). Во всех случаях переходы электронов возможны лишь при поглощении фотонов, имеющих энергию, которая превышает так называемую *пороговую энергию активации*. Для чистых полупроводников (и диэлектриков) энергия активации равна ширине  $\Delta W_z$  запрещённой зоны (рис. 1 в, г), для полупроводников *n*-типа она равна расстоянию  $\Delta W_n$  между донорными уровнями и дном свободной зоны (рис. 2 а), а для полупроводников *p*-типа расстоянию  $\Delta W_p$  между потолком валентной зоны и акцепторными уровнями (рис. 2 б).

Фотопроводимость может вызываться также и фотонами с энергией ниже пороговой энергии активации. При поглощении таких фотонов электронами, находящимися в зоне, где имеются свободные уровни, в конечном счёте, происходит увеличение средней энергии электронов – электроны «разогреваются». С одной стороны, это ведёт к увеличению проводимости из-за возрастания подвижности носителей заряда, а с другой стороны, способствует переходам электронов в свободную зону за счёт дополнительного теплового возбуждения.

2. *Вентильный фотоэффект* наблюдается при поглощении света в области, где свойства вещества неоднородны. На практике для этого используется *p-n*-переход. При освещении области *p-n*-перехода фотоны, обладающие достаточной энергией, так же, как и в случае фотопроводимости, поглощаются электронами и вызывают их переходы в свободную зону или на акцепторные уровни. Образовавшиеся при этом свободные электроны и дырки под действием электрического поля потенциального барьера *p-n*-перехода движутся в противоположных

направлениях: электроны проникают в полупроводник *n*-типа, заряжая его отрицательно, а дырки – в полупроводник *p*-типа, заряжая его положительно. Возникающая при этом электродвижущая сила (*фотоэдс*) определяется величиной светового потока, падающего на *p-n*-переход. Её можно измерить, присоединив вольтметр к точкам, лежащим по разные стороны *p-n*-перехода. Если *p-n*-переход замкнуть на микроамперметр, то он покажет наличие электрического тока, текущего всё время, пока на *p-n*-переход падает свет. Для вентильного фотоэффекта так же, как и для фотопроводимости, существует пороговая энергия активации.

Экспериментальное исследование зависимости фотопроводимости и фотоэдс вентильного фотоэффекта от энергии фотонов (от частоты  $\omega$  или длины волны  $\lambda$  падающего света) позволяет определить величину  $\Delta W_{opt}$  энергии активации, при которой наблюдается оптимальное наблюдение фотопроводимости или возникновение оптимальной фотоэдс:

$$\Delta W_{opt} = \hbar\omega = \frac{2\pi c\hbar}{\lambda_0} = \frac{1,24 \cdot 10^4}{\lambda_0} \text{ эВ}, \quad (1)$$

где  $\lambda_0$  - длина волны (в ангстремах), при которой наблюдается оптимальная фотопроводимость или оптимальная фотоэдс. Пороговая энергия активации определяется по формуле

$$\Delta W_{nop} = \frac{1,24 \cdot 10^4}{\lambda_{nop}} \text{ эВ}, \quad (2)$$

где  $\lambda_{nop}$  - длина волны (в ангстремах), соответствующая фотонам с минимальной энергией, ещё вызывающей фотоэффект.

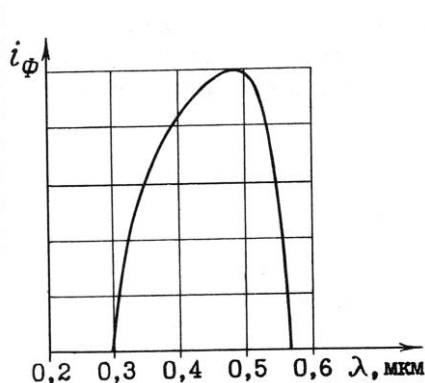


Рис. 4

**Приборы, использующие внутренний фотоэффект.** Из этих приборов простейшим является *фотосопротивление (фоторезистор)*, представляющее собой пластинку из чистого или примесного полупроводника с двумя контактами для включения в цепь. При освещении проводимость фотосопротивления возрастает тем больше, чем больше величина светового потока, и если через фотосопротивление течёт ток, то

сила тока при этом соответственно растёт. Для ряда приложений важно знать зависимость проводимости фотосопротивления от длины волны падающего на него света (его спектральную характеристику). В качестве примера на рис. 4 приведена зависимость от длины волны  $\lambda$  тока  $i_\phi$ , текущего в цепи, содержащей фотосопротивление на основе сульфата

кадмия. Кривая имеет один ярко выраженный максимум. Спад кривой в области малых длин волн (больших частот) связан с тем, что при фиксированной мощности светового потока число фотонов в нём падает с увеличением энергии фотонов, а так как каждый фотон, как правило, вызывает лишь один электронный переход, то проводимость уменьшается. Кроме того, фотоны большой энергии могут возбуждать электроны внутренних оболочек атомов кристалла, не давая при этом вклада в фотопроводимость. Спад кривой в длинноволновой области вызван наличием пороговой энергии активации, которой, как видно из рисунка, соответствует длина волны  $\lambda_{пор} = 0,56 \text{ мкм}$  (длина волны  $\lambda_0 = 0,47 \text{ мкм}$  соответствует оптимальной энергии активации). Благодаря простоте конструкции, высокой надёжности и малым размерам фотосопротивления широко используются в качестве приёмников света в автоматике, фотометрии, спектроскопии.

Недостатками их являются сравнительно большая инерционность и зависимость чувствительности от температуры.

Действие *полупроводниковых фотоэлементов* (фотоэлементов с запирающим слоем) основано на *вентильном фотоэффекте*. Их большим достоинством является то, что они не требуют источников питания. Напротив, будучи источниками ЭДС, они сами преобразуют световую энергию в электрическую. Как приёмники света вентильные фотоэлементы имеют характеристики, схожие с характеристиками фотосопротивлений и употребляются в основном для тех же целей. Разновидностью их являются *фотодиоды* и *фототриоды*, применяемые в радиотехнических схемах автоматики. Батареи полупроводниковых фотоэлементов с высоким коэффициентом полезного действия (до 20 %) используются как автономные источники питания для космических аппаратов (солнечные батареи), микрокалькуляторов и других приборов.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Схема установки приведена на рис.5. В качестве источника излучения используется лампа накаливания *1*, дающая непрерывный спектр излучения.

Максимум испускательной способности лампы приходится на далекую инфракрасную область. В видимой части спектра (именно в этой части спектра производятся измерения) излучаемая лампой энергия растет с увеличением длины волны. Свет от лампы, пройдя конденсорную линзу *2*, падает на входную щель *3* монохроматора УМ-2. Монохроматор представляет собой оптический призмный прибор, позволяющий выделить узкую часть спектра излучения. Если ширина выходной щели *4*

монохроматора составляет  $0,3 \text{ мм}$ , то спектральный интервал выходящего через нее света не превышает  $30 \text{ \AA}$ . Изменение длины волны света, проходящего через выходную щель, осуществляется вращением барабана 5. Сразу за выходной щелью монохроматора находится небольшая поворотная призма, выводящая часть излучения в направлении, показанном на рис.5 стрелкой. Это позволяет в процессе измерения осуществлять визуальный контроль излучения, проходящего через выходную щель. Под выходной

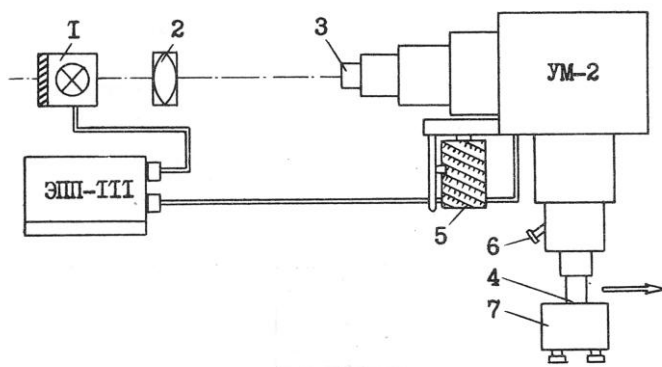


Рис. 5

щелью находится регулировочный штифт. Вдвигая и выдвигая его, можно изменять световой поток, выходящий из монохроматора. Поворотом ручки затвора 6 этот поток можно прервать.

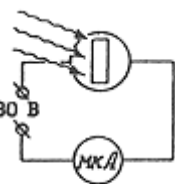


Рис. 6

Монохроматический пучок света, вышедший из монохроматора, падает на полупроводниковый приемник излучения 7. В качестве приемника в упражнении 1 используется фотосопротивление из селенида кадмия, в упражнении 2 - вентильный фотоэлемент. Приемники излучения находятся в кожухах, прикрепленных к оптическим рейтерам. Схема питания фотосопротивления приведена на рис. 6.

Источником питания является стабилизатор напряжения Б5-47. Для измерения тока, текущего через фотосопротивление, последовательно с ним в схему включается микроамперметр. Вентильный фотоэлемент непосредственно присоединяется к микроамперметру. Возникающая в нем под действием падающего на него света фотоэдс приводит к появлению тока.

### Подготовка к измерениям

1. Включают пульт питания ЭПП-III с помощью тумблера «СЕТЬ», находящегося на его передней панели. Включив тумблер пульта «ЛАМПА К-12», подают напряжение на лампу накаливания 1.
2. Перемещая по оптическому рельсу относительно друг друга лампу 1 и

конденсорную линзу 2, добиваются равномерного освещения заслонки входной щели 3 монохроматора. При этом центр светового пятна должен совпадать с центром заслонки, а его величина должна превосходить площадь заслонки.

3. Снимают заслонку с входной щели монохроматора. Ручку затвора 6 поворачивают в положение «ОТКР». С помощью микровинтов, расположенных под входной и выходной щелями, устанавливают ширину щелей 0,5-0,6 мм. Тумблерами «ШКАЛА» и «ИНДЕКС», расположенными на стенке монохроматора, включают освещение шкалы барабана 5 (если это требуется). Помещают на пути лучей, идущих из дополнительного вывода, лист белой бумаги. Вращая барабан, следят за изменением цвета светового пучка, выходящего из монохроматора. Соответствие между делениями шкалы барабана и длиной волны выходящего света устанавливают по прилагаемому к монохроматору графику. Закрывают затвор монохроматора.

## Упражнение 1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ АКТИВАЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ФОТОСОПРОТИВЛЕНИЯ

1. Устанавливают полупроводниковое фотосопротивление сразу за выходной щелью монохроматора вплотную к ней.

2. В соответствии с рис. 6 собирают схему питания фотосопротивления. Для этого подключают к соответствующим клеммам панели, находящейся на лабораторном столе, фотосопротивление, микроамперметр и источник тока. Вращая ручку расположенного на панели переменного сопротивления, устанавливают стрелку микроамперметра на нулевое деление. Открывают затвор монохроматора.

3. Изменяя в пределах от  $4000 \text{ \AA}$  до  $10000 \text{ \AA}$  длину волны  $\lambda$  света, выходящего из монохроматора, через каждые  $300 \text{ \AA}$  измеряют с помощью микроамперметра силу тока  $i$  проходящего через фотосопротивление. В области максимальных значений тока отсчеты производят через  $100 \text{ \AA}$ .

4. Повторяют измерения, устанавливая ширину выходной щели монохроматора вдвое и втрое меньше.

5. Закрывают затвор монохроматора. Разбирают схему питания фотосопротивления. Убирают фотосопротивление от выходной щели монохроматора.

6. Строят графики зависимости  $i$  от  $\lambda$  для каждой ширины щели. На кривых находят значения длины волны  $\lambda_i$ , при которых сила тока максимальна. Длина волны  $\lambda_{opt}$ , которую имеют фотоны, обладающие

оптимальной энергией активации фотосопротивления, определяется как средняя арифметическая величина от найденных значений  $\lambda_i$ .

7. По формуле (1) вычисляют оптимальную энергию активации фотосопротивления.

## Упражнение 2

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ И ПОРОГОВОЙ ЭНЕРГИИ АКТИВАЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКА С ВЕНТИЛЬНЫМ ФОТОЭФФЕКТОМ

1. Устанавливают у выходной щели монохроматора вплотную к ней вентильный фотоэлемент. Соединяют его последовательно с микроамперметром (рис. 7). Открывают затвор монохроматора.

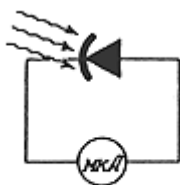


Рис. 7

2. Снимают зависимость силы  $i$  фототока от длины волны  $\lambda$  в области длин волн от  $4000 \text{ \AA}$  до  $8000 \text{ \AA}$  согласно методике, описанной в упражнении 1. Измерения проводят для ширины выходной щели монохроматора  $0.6$ ,  $0.3$  и  $0.2$  мм. По окончании измерений закрывают затвор монохроматора и разбирают схему включения фотоэлемента.

3. Строят кривые зависимости  $i$  от  $\lambda$  при различной ширине щели монохроматора. На кривых находят значения длины волны  $\lambda_K$ , при которых сила фототока максимальна, и значения длины волны  $\lambda_i$ , лежащие на длинноволновых спадах кривых, такие, что соответствующая им величина силы фототока составляет  $10\%$  максимальных значений. Длины волн  $\lambda_{opt}$  и  $\lambda_{пор}$ , соответствующие оптимальному и пороговому значениям энергии активации полупроводника, находятся как средние арифметические величины от найденных значений  $\lambda_K$  и  $\lambda_i$  для трех измерений.

4. По формулам (1) и (2) рассчитывают оптимальную  $\Delta W_{opt}$  и пороговую  $\Delta W_{пор}$  энергии активации вещества фотоэлемента.

#### Вопросы для самопроверки

1. Какой фотоэффект называется внутренним?
2. Что такое разрешенные и запрещенные зоны энергии в твердых телах, зона проводимости, валентная зона?
3. Что такое примесная проводимость? Объясните механизм влияния примеси на проводимость полупроводника.
4. Объясните механизм образования p – n перехода и его влияние на проводимость полупроводника.
5. Объясните принцип работы полупроводникового фотосопротивления и фотоэлемента.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 5 кн. Кн.5  
Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика  
атомного ядра и элементарных частиц. - 4-е Т.3. М.: изд., перераб. -  
М.: Наука. Физматлит. 1998. - 368 с.

Часть I. Квантовая оптика.

Глава 2. Фотоны.

§ 2.2. Фотоэффект.

Часть III. Физика твердого тела.

Глава 9. Контактные и термоэлектрические явления.

§ 9.1. Работа выхода.

§ 9.5. Полупроводниковые диоды и триоды.

§ 9.6. Внутренний фотоэффект.