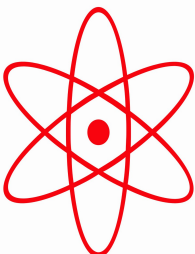


НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБО-
РАТОРНОЙ РАБОТЫ



ФКЛ-17

**ФОТОПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ. ИЗУЧЕНИЕ ВНУ-
ТРЕННЕГО ФОТОЭФФЕКТА С ПОМОЩЬЮ
ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ФОТОДИОДА.**

Тула, 2010 г.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА.

ФОТОПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ. ИЗУЧЕНИЕ ВНУТРЕННЕГО ФОТОЭФФЕКТА С ПОМОЩЬЮ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ФОТОДИОДА.

Цель работы: изучение явления фотопроводимости полупроводников, измерение основных характеристик приёмников оптического излучения: исследование вольт-амперных характеристик фотодиода в стационарном режиме при различных освещённостях.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ.

Фотоэффект на p - n -переходе. Общие сведения о работе фотодиода.

Рассмотрим контакт p -полупроводника и n -полупроводника (p - n -переход). В области контакта происходит изгиб энергетических зон, приводящий к их взаимному смещению. Это показано на рис.1, где штриховой прямой изображен уровень энергии Ферми (в состоянии термодинамического равновесия положение уровня Ферми в p -области совпадает с его положением в n -области), 1 — дно зоны проводимости, 2 — вершина валентной зоны.

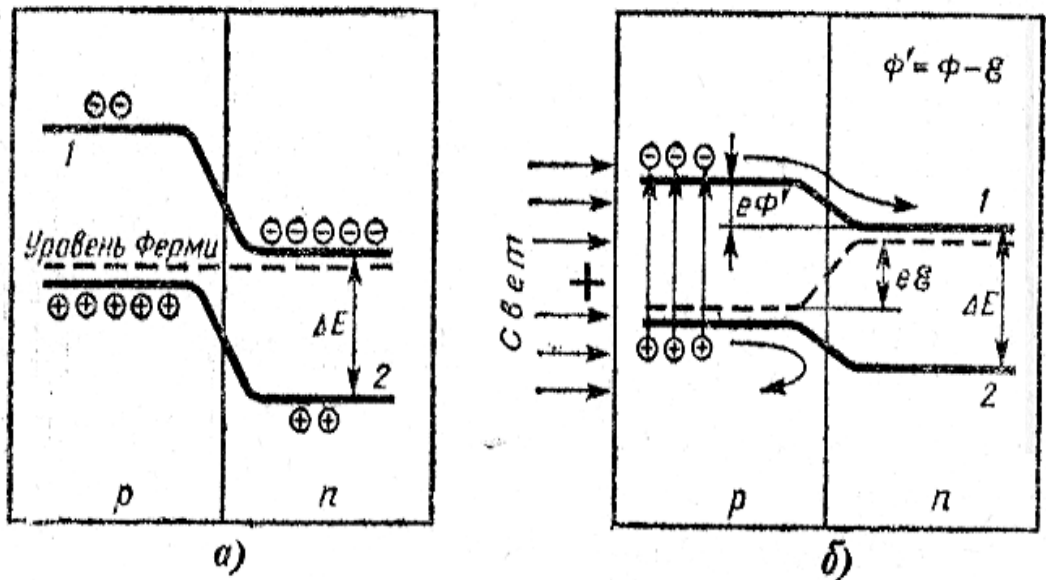


Рис.1

Основными носителями заряда в p -области являются дырки; их концентрация много больше концентрации электронов проводимости. В n -области наблюдается обратная картина; там основными носителями являются электроны проводимости. Диффузии электронов проводимости из области с высокой их кон-

центрацией (n -области) в область с низкой концентрацией (в p -область) препятствует потенциальный барьер высотой $e\phi$; ϕ — контактная разность потенциалов. Аналогичное замечание можно сделать относительно диффузии дырок из p -области в n -область. Иными словами, контактная разность потенциалов в p - n -переходе препятствует уходу основных носителей из «своей» области. В то же время она способствует уходу в другую область неосновных носителей (но этому уходу препятствует более высокая концентрация соответствующих носителей в той области, куда они могли бы уйти).

Предположим теперь, что на p -полупроводник с наружной стороны падает поток фотонов (рис.1,б). Энергия фотонов превышает ширину запрещенной зоны. Фотоны генерируют электроны проводимости и дырки, которые, возникнув, начинают диффундировать через p -область по направлению к p - n -переходу. Электроны проводимости являются для p -области неосновными носителями, поэтому внутреннее поле в p - n -переходе «втягивает» их в n -область. Что же касается дырок, то они являются для p -области основными носителями, поэтому поле в p - n -переходе задержит их и возвратит обратно в p -область. В результате происходит пространственное разделение оптически генерированных электронов и дырок; p -полупроводник приобретает положительный, а n -полупроводник — отрицательный заряд, что эквивалентно возникновению ЭДС. При этом уровни Ферми в p -области и n -области смещаются друг относительно друга на $e\varepsilon$, где ε — фотоЭДС; контактная разность потенциалов уменьшается на ε (рис.).

Внутренний фотоэффект, проявляющийся в возникновении фотоЭДС, называют также *фотогальваническим* (или *фотовольтаическим*) эффектом. Одним из видов этого эффекта является возникновение *вентильной* (барьерной) фотоЭДС в p - n -переходе.

Фотодиоды — селективные регистрирующие фотоэлектрические ПЛЭ, основанные на явлении фотовольтаического эффекта в полупроводниковом контактном переходе и предназначенные как для работы с приложением внешнего напряжения, так и без него.

Как было сказано выше, фотовольтаическим эффектом — (фотогальваническим, вентильным) — называют форму внутреннего фотоэффекта в полупроводниках со свойствами, неоднородными для движения фотоносителей даже при отсутствии внешнего напряжения, при которой оптически генерированные неравновесные носители заряда пространственно разделяются в объеме полупроводника вследствие его неоднородности, образуя при этом пространственно разделенные объемные заряды и, следовательно, разность потенциалов между участками облученного образца, называемую фотоЭДС (V_F).

Если эти участки соединить проводником, то при облучении полупроводника во внешней цепи возникает электрический ток, направленный на уменьшение объемных зарядов — фототок (I_f).

К фотовольтаическим эффектам относятся, например:

- диффузионный фотоэффект,

- фотомагнитоэлектрический эффект,
- фотовольтаический эффект в полупроводниковом, контактном переходе.

Наибольшее применение в современных ПЛЭ нашел последний вид фотовольтаического эффекта, при котором разделение фотоносителей происходит за счет действия внутреннего электростатического поля. Внутреннее электростатическое поле образуется в объеме полупроводника в области контакта полупроводников с разным типом проводимости (p-n перехода) или контакта полупроводника с металлом.

В настоящее время при создании фотодиодов чаще других применяются p-n переходы, поэтому рассмотрим работу таких фотодиодов.

Фотодиод представляет собой пластинку полупроводникового материала, внутри которого имеются области примесной электронной (n – область) и дырочной (p – область) проводимостей. Границу между этими областями называют контактным p - n переходом (рис. 2). Электронная и дырочная области снабжены невыпрямляющими контактами с присоединенными к ним выводами, с помощью которых осуществляется связь с внешней цепью. С целью предохранения чувствительного слоя фотодиода от воздействия внешней среды он покрывается лаком или монтируется в герметичном корпусе, изготовленном или из металла (со стеклянным входным окном) или из пластмасс.

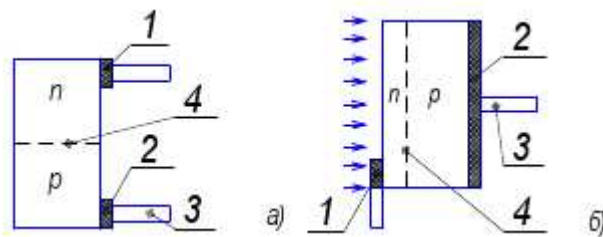


Рис. 2. Принципиальная схема фотодиода.

- а) – направление светового пучка параллельно плоскости p – n перехода;
 б) – световой пучок и плоскость p – n перехода взаимно перпендикулярны.
 1 – контакт n – области; 2 – контакт p – области; 3 – выводы; 4 – p – n переход.

При нормальной температуре примесный полупроводник содержит:

- подвижные заряды – основные носители тока, образованные в подавляющем большинстве термическим возбуждением атомов примеси и, в значительно меньшем количестве – атомами собственного полупроводника;
- подвижные заряды – неосновные носители тока, образованные термическим возбуждением собственного полупроводника;
- неподвижные заряды – ионы примесей.

Если внутри полупроводника граничат две области с разным типом проводимости, то возникает диффузия основных носителей тока: диффузионные токи электронов из n – области в p – область (ток I_{nn}) и дырок из

p – области в n – область (ток I_{pp}) (рис. 3а). Приконтактные области объединяются основными носителями. Это приводит к появлению объемных зарядов вблизи границы, образованных неподвижными зарядами ионизированных атомов примеси (рис. 3 б, в). По мере нарастания объемных зарядов нарастает электрическое поле, противодействующее диффузии основных носителей (возникает потенциальный барьер движению основных носителей (рис. 3 в) и диффузионные токи основных носителей уменьшаются. Разность потенциалов этого поля называют контактной разностью потенциалов V_k , знак ее соответствует обеднению приконтактных областей основными носителями тока. Преодолеть потенциальный барьер могут только те из основных носителей, энергия которых больше энергии потенциального барьера ($E_k = eV_k$, e – заряд электрона).

Одновременно с диффузионным током основных носителей возникает встречный дрейфовый ток неосновных, т.к. для них контактное электрическое поле является ускоряющим. Дырки из n – области переходят в p – область (ток I_{pn}), а электроны из p – области – в n – область (ток I_{np}). Контактная разность потенциалов возрастает до тех пор, пока потоки основных и неосновных носителей через p - n переход не достигнут динамического равновесия:

$$I_{nn} = I_{np}; \quad I_{pp} = I_{pn} \quad (1.1)$$

При этом во внешней цепи ток отсутствует:

$$I_1 = I_{nn} + I_{pp} - I_{np} - I_{pn} = 0 \quad (1.2)$$

При приложении внешнего напряжения V_D потенциальный барьер изменяется на величину eV_D . Равновесие тока нарушается. При этом поток неосновных носителей через p - n переход изменяется незначительно, а ток основных носителей зависит от V_D : при прямом включении (плюс к p – области, минус к n – области) контактная разность потенциалов уменьшается и ток основных носителей очень быстро возрастает с увеличением V_D (рис. 3 г, д соответствует небольшому прямому напряжению $|V_D| < |V_k|$); при обратном (запирающем) включении контактная разность потенциалов увеличивается и ток основных носителей практически прекращается (рис. 3 е, ж). Вольт-амперная характеристика неосвещенного p - n перехода приведена на рис. 4 (кривая $\Phi = 0$), где за положительные значения приняты: запирающее напряжение на диоде и обратный ток диода.

При облучении одной из областей излучением с энергией квантов E_Φ , превышающей ширину запрещенной зоны собственного полупроводникового материала этой области (ΔE — ширина запрещенной зоны): $E_\Phi > \Delta E$ – в объеме полупроводника генерируются пары неравновесных носителей тока – фотоэлектроны и фотодырки (внутренний фотоэффект в собственном полупроводнике). Когда дифференцирующие в объеме полупроводника

фотоносители достигают области p - n перехода, в контактном электрическом поле происходит пространственное разделение пар: основные фотоносители остаются в объеме той области, где они возникли; неосновные свободно проходят через p - n переход, так как для них контактное поле является ускоряющим. Таким образом, неосновные фотоносители создают внутри p - n перехода дополнительный ток, который называют фототоком I_F .

При разомкнутой внешней цепи фотоносители накапливаются: основные в той области, где они возникли, неосновные – в другой. Эти фотоносители образуют объемный заряд и, следовательно, фото ЭДС. Полярность фото ЭДС обратна контактной разности потенциалов, соответствует обогащению областей основными носителями и совпадает со знаком напряжения, приложенного к p - n переходу в прямом направлении. В результате возникновения фото ЭДС разность потенциалов (потенциальный барьер) уменьшается, что вызывает приращение потока основных носителей через p - n переход, направленного навстречу фототоку внутри p - n перехода.

Фото ЭДС возрастает до тех пор, пока не наступит новое состояние динамического равновесия между потоками основных и неосновных носителей через p - n переход.

При коротком замыкании внешней цепи фотоносители, разделенные электрическим полем p - n перехода, будут уходить во внешнюю цепь, создавая в ней фототок I_F .

Величина фототока в p - n переходе, освещенном монохроматическим потоком Φ_λ определяется выражением:

$$I_F = eN_F = e \frac{\Phi_\lambda}{n} \lambda (1 - \rho_x) \beta_\lambda \eta_\lambda = S_{\lambda I} \Phi_\lambda \quad (1.3)$$

N_F – количество неосновных фотоносителей, проходящих через переход в единицу времени;

ρ_λ – коэффициент отражения на поверхности полупроводника;

n_λ – квантовый выход внутреннего фотоэффекта;

β_λ – коэффициент собирания пар оптически генерированных носителей (эффективность разделения пар);

$S_{\lambda I}$ – токовая монохроматическая чувствительность p - n перехода.

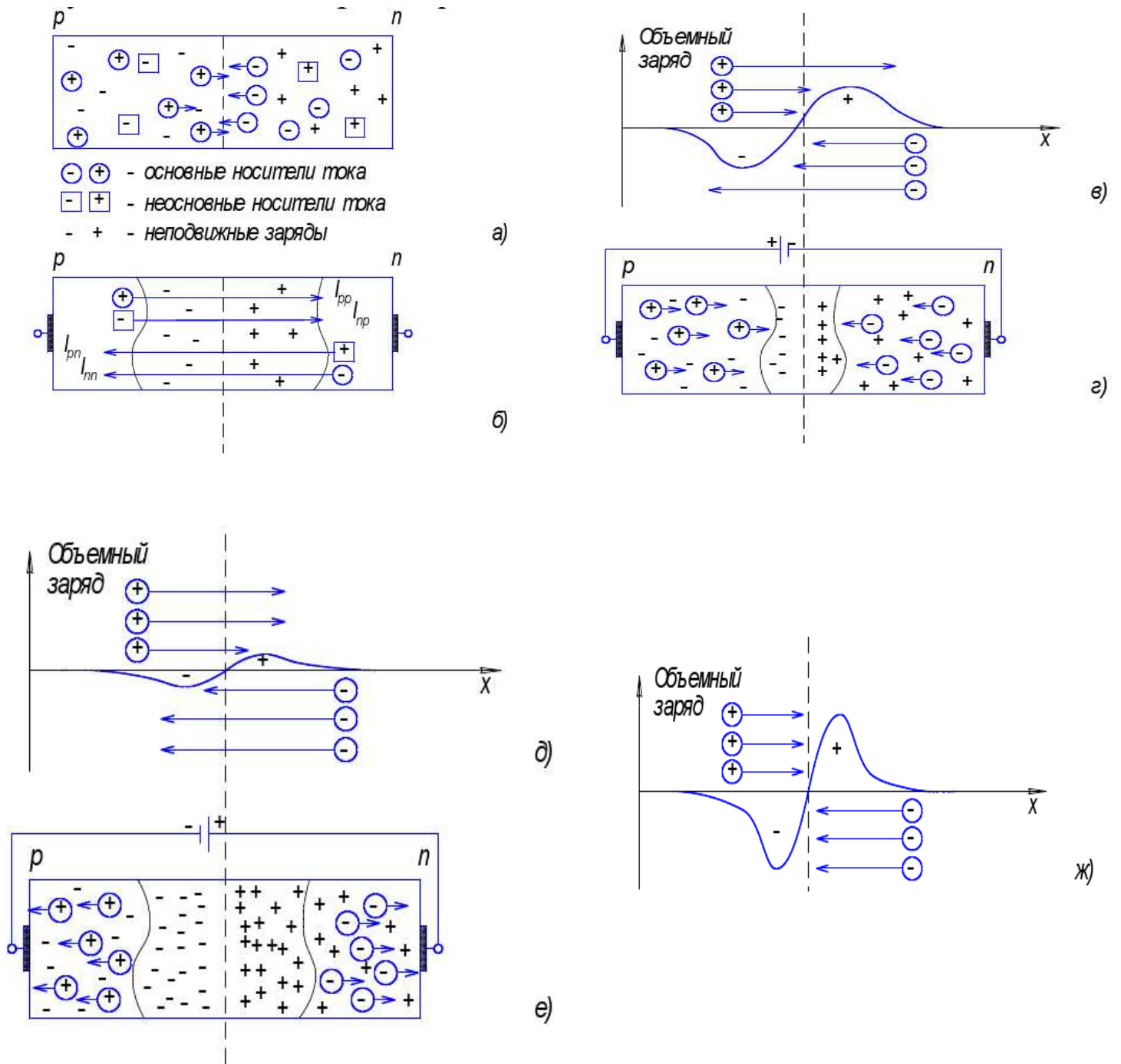


Рис. 3. Контактные явления в полупроводниках.

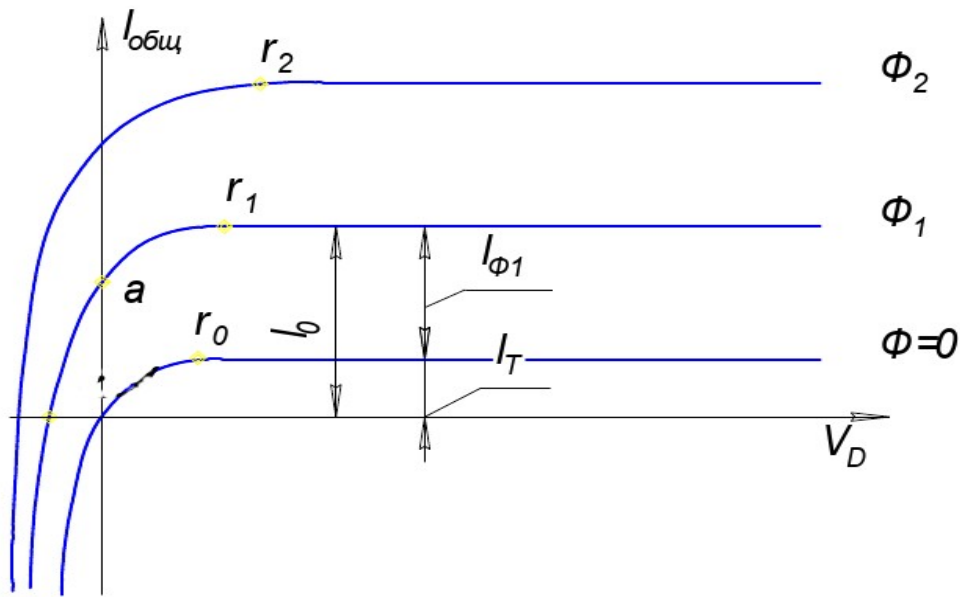


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики фотодиода при различных освещенностях

При приложении к облученному p - n переходу внешнего напряжения в запирающем направлении потенциальный барьер увеличивается. При этом ток основных носителей через p - n переход практически прекращается и во внешней цепи течет суммарный ток неосновных фотоносителей (фототок I_F) и термически генерированных неосновных носителей (темновой ток I_T), который называют общим током $I_{общ}$:

$$I_{общ} = I_F + I_T \quad (1.4)$$

Фотодиоды основаны на фотогальваническом эффекте и предназначены для работы как с приложением внешнего напряжения (фотодиодный способ включения), так и без приложения внешнего напряжения (вентильный способ включения) в отличие от полупроводниковых фотоэлементов, которые работают только в вентильном режиме.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) фотодиода (за положительные направления принимаются: направление фототока; направление напряжения, запирающего p - n переход):

$$I_{общ} = I_F + I_0 \left[1 - \exp \left(- \frac{eV_D}{kT} \right) \right] \quad (1.5)$$

(2)

где V_D – внешнее напряжение, приложенное к фотодиоду;

$I_{общ}$ – общий ток, протекающий через фотодиод; он равен сумме фототока

I_F и темнового тока I_T (1.4):

$$I_{\text{общ}} = I_F + I_T$$

I_T – темновой ток фотодиода, т.е. ток, протекающий через фотодиод в отсутствие облучения при заданном V_D :

$$I_T = I_0 \left[1 - \exp \left(-\frac{eV_D}{kT} \right) \right] \quad (1.6)$$

e – заряд электрона;

k – постоянная Больцмана, $k = 8,63 \cdot 10^{-5}$ [эВ/К] = $1,38 \cdot 10^{-23}$ [Дж/К]

T – температура фоточувствительного элемента фотодиода [К];

I_0 – обратный ток p - n перехода фотодиода, образованный неосновными носителями заряда в отсутствие внешнего напряжения и облучения:

$$I_0 = I_{0\infty} \exp \left(-\frac{\Delta E}{2kT} \right) \quad (1.7)$$

$I_{0\infty}$ – условное значение обратного тока при очень большой температуре, когда ионизированы все собственные атомы полупроводника;

ΔE – ширина запрещенной зоны собственного полупроводника;

I_F – фототок:

$$I_F = S_I \cdot \Phi \quad (1.8)$$

S_I – интегральная токовая чувствительность фотодиода;

Φ – поток, падающий на чувствительную площадку.

Подставляя (1.7) в (1.6), получим:

$$I_T = I_{0\infty} \exp \left(-\frac{\Delta E}{2kT} \right) \left[1 - \exp \left(-\frac{eV_D}{kT} \right) \right] \quad (1.9)$$

При практически используемых напряжениях питания ФД, прикладываемых в запирающем направлении: $eV_D \gg kT$, (при нормальной температуре 293К $kT \approx 0,025$ эВ) т.е. при $V_D = 1$ В $\frac{eV_D}{kT} = 40$ и $\exp \left(-\frac{eV_D}{kT} \right) \approx 0,4 \cdot 10^{-17} \ll 1$.

Поэтому можно считать, что температурная характеристика темнового тока имеет вид:

$$I_T = I_{0\infty} \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right) \quad (1.10)$$

т.е. величина и температурная характеристика темнового тока определяются величиной ширины запрещенной зоны собственного полупроводника ΔE .

Отметим, что в выражение фотосигнала фотодиода – фототока I_F – температура не входит, т.е. он мало зависит от температуры. Это одно из важных достоинств фотодиода.

Графики вольт-амперных характеристик фотодиода приведены на рис. 4 и показывают, что фотодиод – существенно нелинейный электрический элемент. В зависимости от способа включения фотодиода и способа измерения, фотосигналом цепи включения может служить или фототок или напряжение фотосигнала. Фототок фотодиода преобразуется в напряжение фотосигнала посредством включения в электрическую цепь сопротивления нагрузки R_H

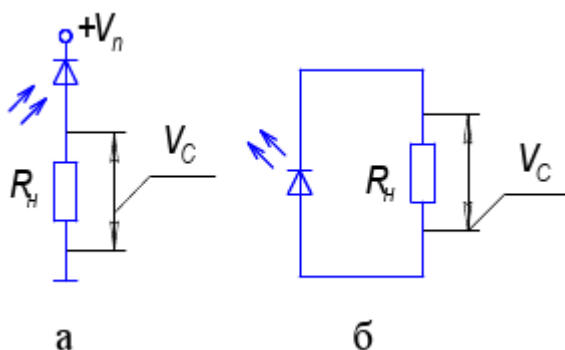


Рис. 5. Способы включения фотодиода в электрическую цепь.

Как было сказано выше, применяют два способа (основных) включения фотодиода:

- фотодиодный режим (рис. 5а)
- вентильный режим (рис. 5б)

Вентильный режим характерен отсутствием внешнего источника питания, т.е. используется способность $p-n$ перехода фотодиода генерировать фотосигналы – фототок или фото ЭДС.

В фотодиодном режиме внешнее напряжение V_D прикладывается в запирающем направлении.

Солнечные элементы. Явление возникновения фотоЭДС в $p-n$ -переходе используется на практике для создания *солнечных элементов*, превращающих энергию излучения Солнца в электрическую энергию. Из солнечных элементов собирают солнечные батареи, применяемые в качестве источников питания различных наземных и космических объектов.

Большое практическое применение находят солнечные элементы на основе кремния (точнее говоря, на основе контакта p -Si и n -Si); КПД этих элементов достигает 15 %. Применяются также элементы на основе арсенида галлия (GaAs). Имея несколько более низкий КПД, они в то же время характеризуются большей стойкостью к радиационным повреждениям. На рис. 6 приведена конструкция наиболее распространённых фотодиодов.

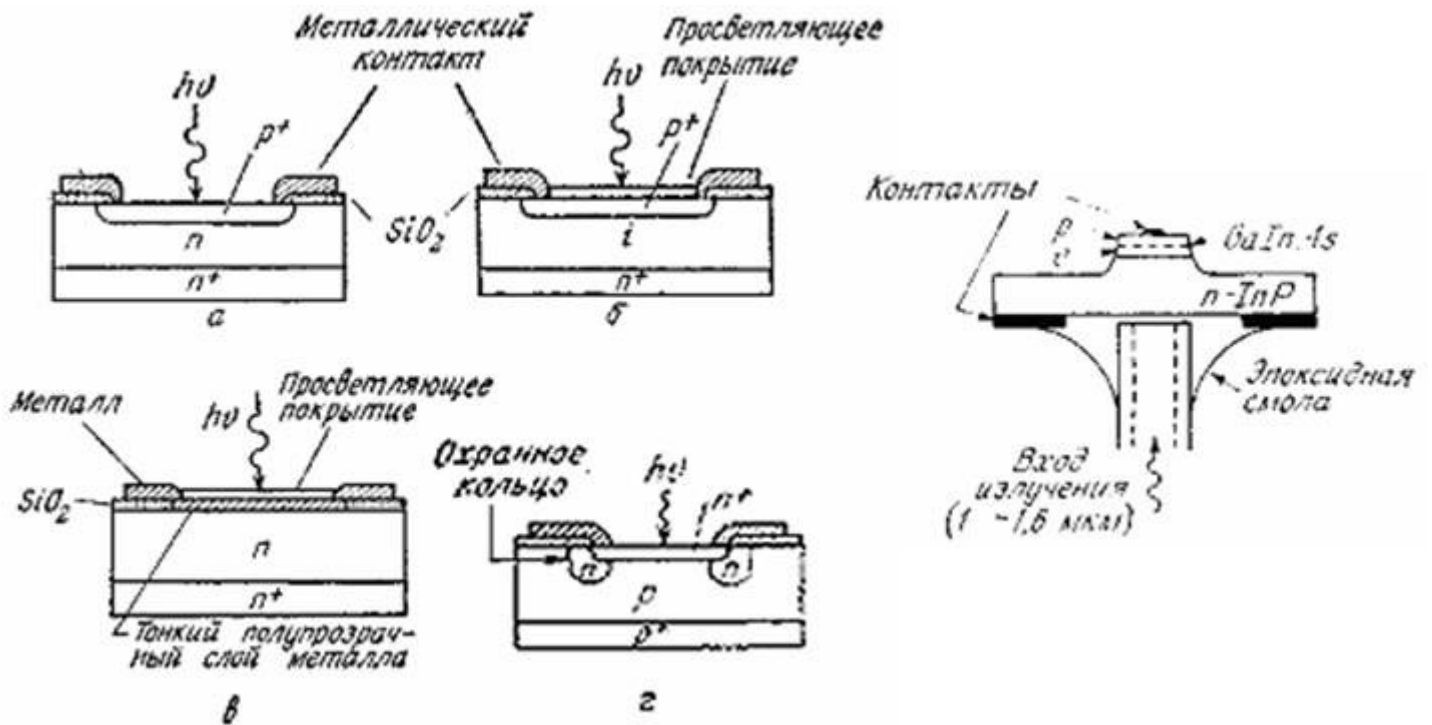


Рис. 6. Схематическая конструкция современных фотодиодов.

В вентильном режиме при коротком замыкании ток во внешней цепи пропорционален световому потоку. Однако эта линейность может быть нарушена при больших световых потоках, если р- и n-области полупроводника имеют заметные сопротивления, эти сопротивления играют роль внешних сопротивлений. На рис.7 показаны световые характеристики фотодиода в разных режимах работы. Коэффициент пропорциональности в уравнении (1.8) получил название интегральной чувствительности фотодиода. Интегральная чувствительность рассчитывается из формулы (1.8):

$$S_I = \Delta I_{\phi} / \Delta \Phi. \quad (1.11)$$

Интегральной она называется потому, что при освещении фотодиода используется белый свет лампы накаливания. Обычно чувствительность S_I фотодиодов измеряют в микроамперах на люкс (мкА/лк). Чувствительность фотодиода - величина постоянная, не зависящая от вели-

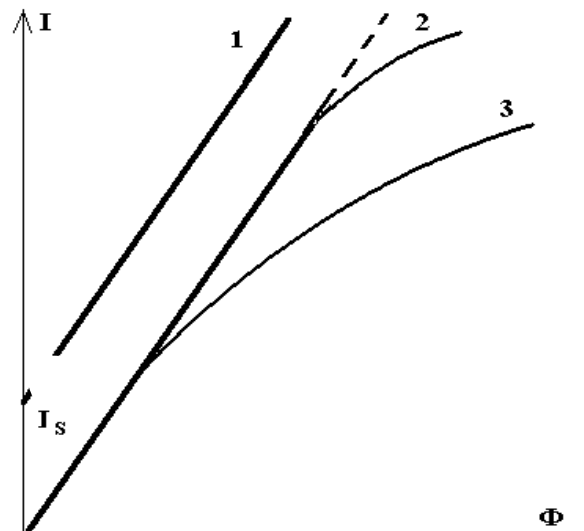


Рис.7.

Световая характеристика фотодиода:

1) фотодиодный режим; 2) режим короткого замыкания; 3) вентильный режим при наличии внешнего сопротивления.

ны светового потока Φ и напряжения, приложенного к фотодиоду. Для определения интегральной чувствительности, при наличии освещения, на фотодиод подают достаточно большие напряжения, чтобы пренебречь экспонентой в выражении (1.6). Тогда через фотодиод будут протекать только фототок и ток насыщения:

$$I_{\text{общ}} = I_F + I_T = I_F + I_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{eV_D}{kT}\right) \right] \simeq I_F + I_0 \quad (1.12)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.

Приборы и оборудование.

Лабораторная работа выполняется на комбинированном учебном комплексе ФКЛ-17.

Источник света — лампа накаливания с регулируемой мощностью излучения. Параметры излучения оцениваются в энергетических единицах (Люксах) по показаниям люксметра, входящего в состав комбинированного цифрового измерительного прибора. Измерителями фотосигнала тока и напряжения, прикладываемого к ФД служат чувствительный цифровой микроамперметр и вольтметр, также входящие в состав измерительного блока.

Упрощенная блок-схема опыта приведена на рис. 8.

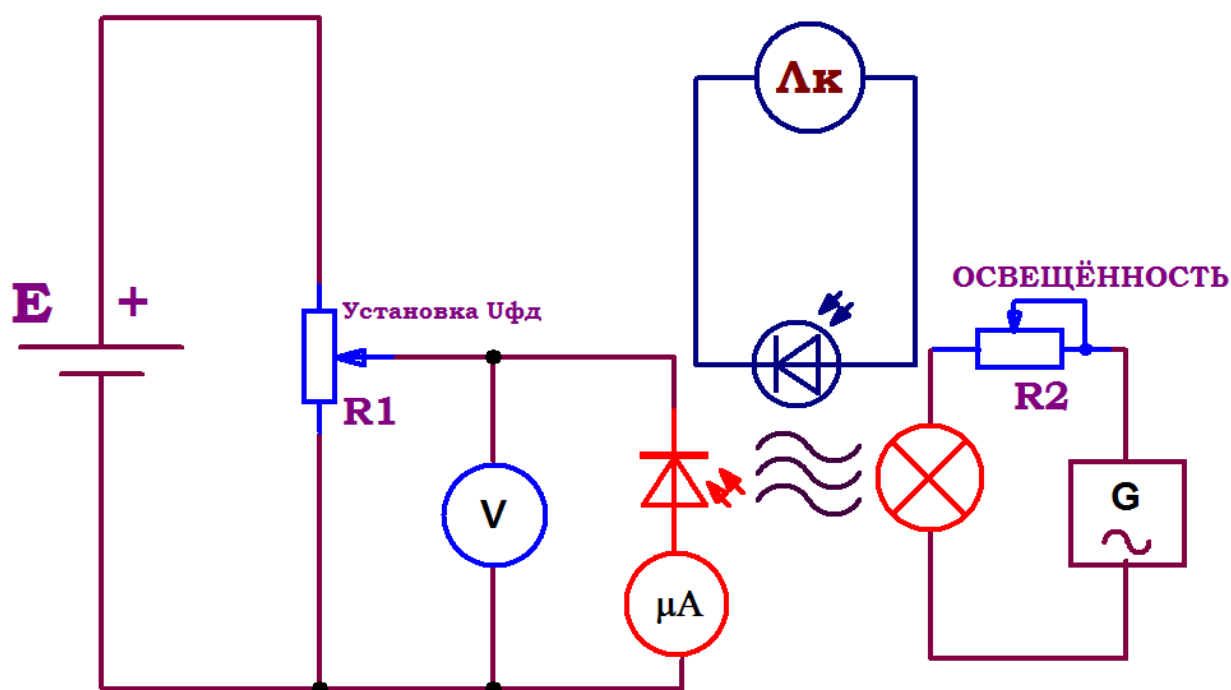


Рис. 8. Блок-схема опыта для изучения работы фотодиода.

Напряжение смещения на фотодиод ФД-256 подается от стабилизированного источника питания и регулируется с помощью многофункциональных кнопок «Установка $U_{фд}$ » (переменный резистор R1 на рис. 8).

Фотодиод освещается белым светом от лампы накаливания, мощность которой регулируется переменным резистором «ОСВЕЩЕННОСТЬ» (R2 на схеме рис. 8), расположенным на боковой панели ОСВЕТИТЕЛЯ и измеряется измерительным фотодиодом, находящимся рядом с исследуемым образцом.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА.

Порядок выполнения.

1. Перед включением следует проверить целостность всех соединительных и сетевых проводов устройств. Повернуть ручку «ОСВЕЩЕННОСТЬ» до упора против часовой стрелки (должен быть слышен щелчок, лампа на должна светиться).
2. Включите лабораторный модуль в сеть ~ 220 В.
3. Перевести переключатель СЕТЬ на панели установки в положение «ВКЛ» при этом должен загореться соответствующий сигнальный светодиод. Дать прибору прогреться не менее 5-7 минут.
4. Снять темновую ВАХ фотодиода, для чего следует повернуть ручку «ОСВЕЩЕННОСТЬ» на боковой панели осветителя до упора против часовой стрелки и выключить лампу накаливания, при этом на ЖКД LCD дисплее БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ значение освещенности E должно быть равно 000 ЛЮКС.
5. Изменяя с помощью ручки «УСТАНОВКА $U_{фд}$ » напряжение, подаваемое на фотодиод, и записывая значение тока в цепи фотодиода для каждого установленного значения напряжения, снять вольт-амперную характеристику образца. Третья цифра после запятой в результатах измерения фототока может быть нестабильной, поэтому как правило, следует ограничиваться двумя цифрами после запятой в значениях фототока $x.xx$ мкА. При этом особо тщательно следует снимать ВАХ при малых значениях напряжения смещения, т. к. в этой области ток фотодиода значительно изменяется при малых изменениях напряжения. Таким образом, в начале измерения ВАХ шаг изменения напряжения должен составлять $\sim 0,2$ В. Затем шаг можно увеличить до 0,8-1,5 В. Измерения следует проводить до значения напряжения на фотодиоде $\sim 9 - 10$ Вольт, когда фототок практически перестает изменяться. Все измеренные значения следует записывать в таблицу 1.

Таблица 1

$E_1 = \dots$ ЛЮКС	U, В				
	I, мкА				
$E_2 = \dots$ ЛЮКС	U, В				
	I, мкА				
$E_3 = \dots$ ЛЮКС	U, В				
	I, мкА				

6. Включить лампу накаливания повернув ручку «ОСВЕЩЕННОСТЬ» по часовой стрелке.

7. Плавное вращая ручку «ОСВЕЩЕННОСТЬ» установить минимально возможное значение освещенности, подаваемой на фотодиод ~ 60 ЛЮКС. Люксметр, используемый в первой части лабораторного опыта обеспечивает точность измерения освещенности ± 2 ЛЮКС.

8. Повторить п. 5 данного методического руководства и снять ВАХ фотодиода при минимальной освещенности. В процессе измерения ВАХ необходимо поддерживать постоянное значение освещенности в пределах установленного значения $E_{уст.} \pm 2$ ЛЮКС при необходимости корректируя освещенность ручкой «ОСВЕЩЕННОСТЬ» на ОСВЕТИТЕЛЕ.

9. Снять ВАХ фотодиода во всем диапазоне освещенностей ($\sim 60 - 100$ Лк) с шагом $5 - 7$ Люкс, повторяя пп. 5 для каждого значения освещенности.

10. Для каждой освещенности построить вольт-амперные характеристики из которых найти значение тока насыщения (практически постоянное значение фототока; фототок при этом практически перестает меняться в зависимости от приложенного напряжения смещения рис. 9).

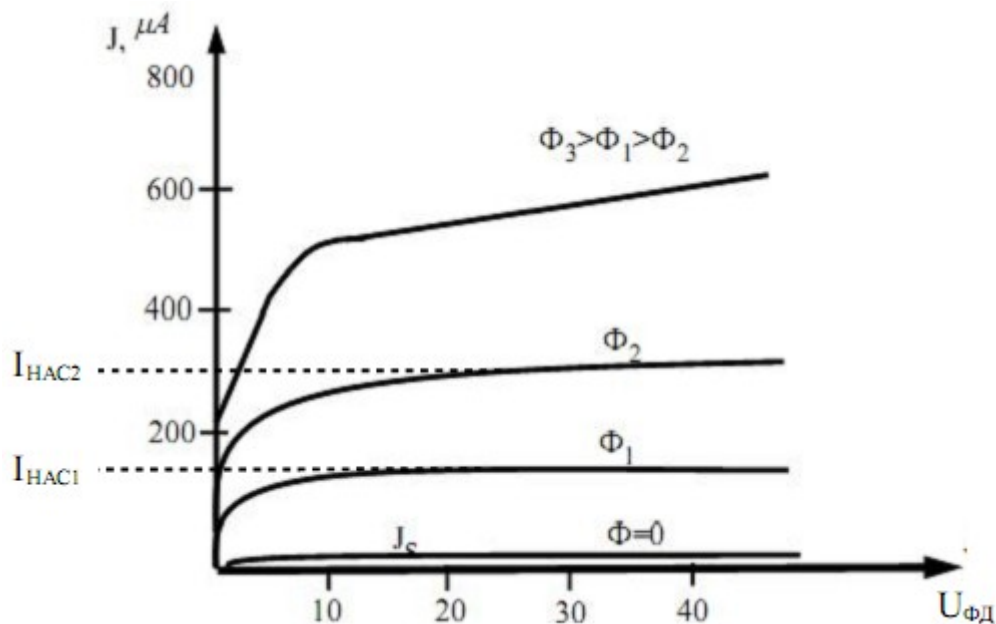


Рис. 9. Вольт — амперные характеристики фотодиода при различных освещенностях $E=\Phi$ при обратном смещении.

11. По полученным данным, построить график зависимости тока насыщения фотодиода от освещенности $I=f(E)$. Экспериментальные точки должны успешно аппроксимироваться прямой линией аналогично рис. 10.

12. Провести анализ данных и аппроксимацию функции $I=f(E)$ прямой линией используя метод наименьших квадратов.

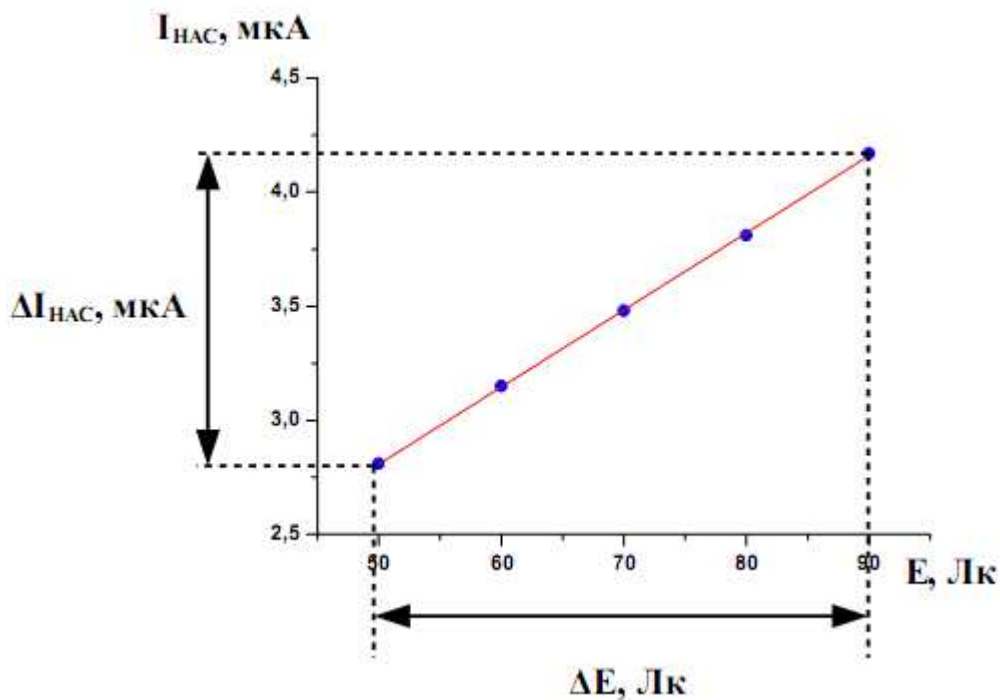


Рис. 10. Зависимость тока насыщения фотодиода от освещенности.

13. Найти интегральный коэффициент токовой чувствительности фотодиода S_I как тангенс угла наклона прямой линии к оси абсцисс. При ручном анализе данных легко получить расчетную формулу $S_I = \frac{\Delta I_{НАС}}{\Delta E}$, где в качестве $\Delta I_{НАС}$ и ΔE для повышения точности рекомендуется брать максимально возможные приращения.

14. Отключить установку от сети, поставив переключатели «СЕТЬ» на панели БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ в положение «ВЫКЛ» и вынуть сетевую вилку из розетки.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое фотодиод?
2. Как можно подключить этот прибор?
3. Почему величина обратного тока через фотодиод зависит от освещенности его p - n -перехода?
4. Почему фототок слабо зависит от приложенного обратного напряжения?
5. Как возникает фотоЭДС?
6. Объясните полученные зависимости фотоЭДС от интенсивности света.
7. Что такое внутренний фотоэффект? Сравните с внешним фотоэффектом.
8. В чем отличие между проводниками и изоляторами с точки зрения зонной теории? Какие вещества относятся к классу полупроводников?
9. Почему полупроводники наиболее широко используются в промышленности?

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Епифанов Г.И. Физика твердого тела.-М.: Высшая школа,1977.
2. Соболева Н.А., Меламид А.Е. Фотоэлектронные приборы. -М.: Высшая школа,1974.
3. Анисимова И.Д., Викулин И.М. Полупроводниковые фотоприемники. – М.: Радиосвязь, 1984.
4. И.В. Боднарь, Л.Г. Березуцкий «Методическое пособие к лабораторным работам по курсу ФХОМКиТ РЭС и ЭВС». Мн.; БГУИР, 1997 г.
5. Б. Ф. Алексеев, К. А. Барсуков «Лабораторный практикум по физике: Учебное пособие для студентов втузов», М., Высш. шк., 1988 г.

ДЛЯ СВОБОДНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ,

НПО учебной техники «ТУЛАНАУЧПРИБОР»