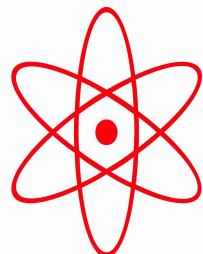


НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»

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 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.

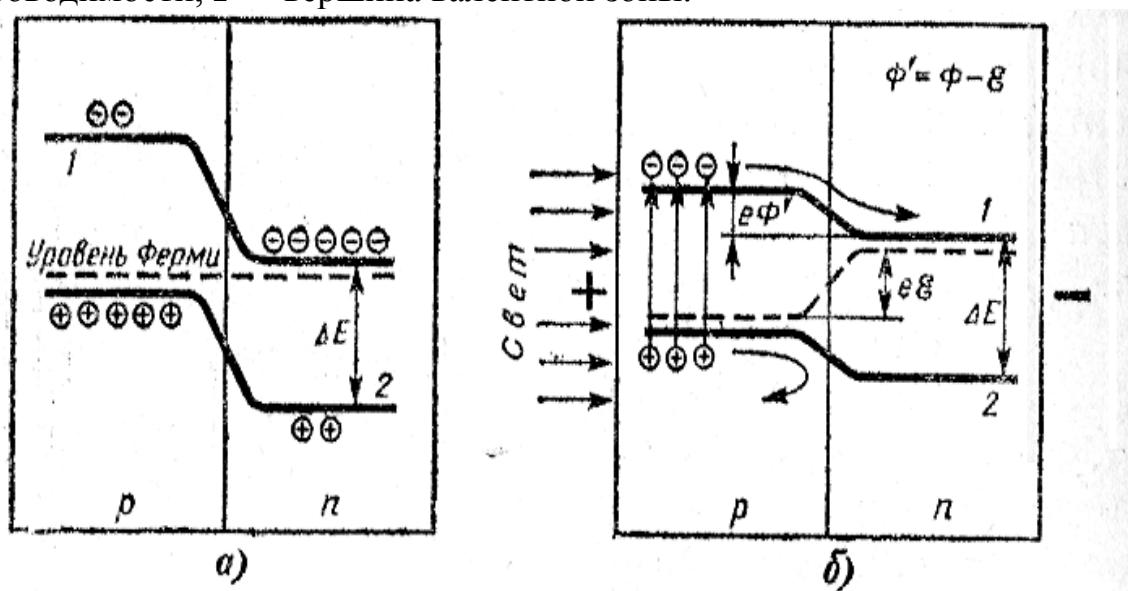


Рис.1

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  $e\varphi$ ;  $\varphi$  — 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  $\varepsilon$  — фотоЭДС; контактная разность потенциалов уменьшается на  $\varepsilon$  (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 ( $J_f$ ).

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 photoносителей 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 из металла (со стеклянным входным окном) или из пластика.

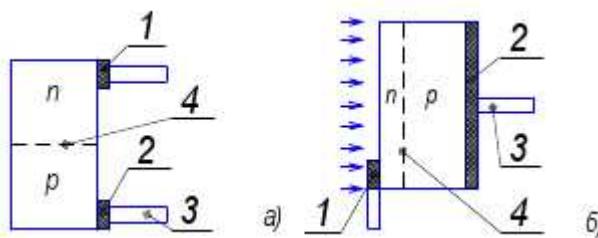


Рис. 2. Принципиальная схема фотодиода.

- направление светового пучка параллельно плоскости  $p-n$  перехода;
  - 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  $E_\phi$ , превышающей ширину запрещенной зоны собственного полупроводникового материала этой области ( $\Delta E$  – 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  $\Phi_\lambda$  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;

$\rho_\lambda$  – коэффициент отражения на поверхности полупроводника;

$n_\lambda$  – квантовый выход внутреннего фотоэффекта;

$\beta_\lambda$  – коэффициент сортирования пар оптически генерированных носителей (эффективность разделения пар);

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

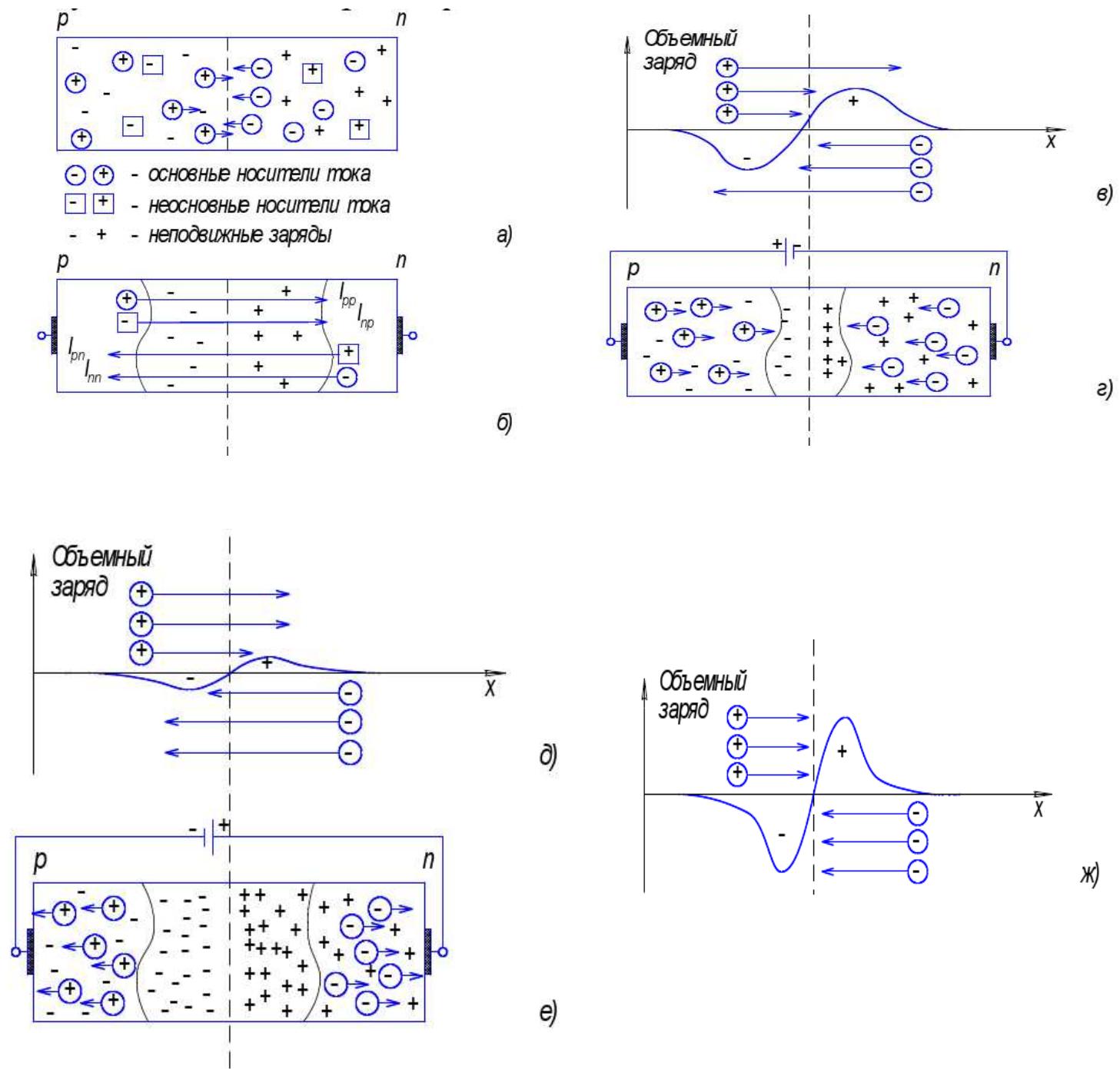


Рис. 3. Контактные явления в полупроводниках.

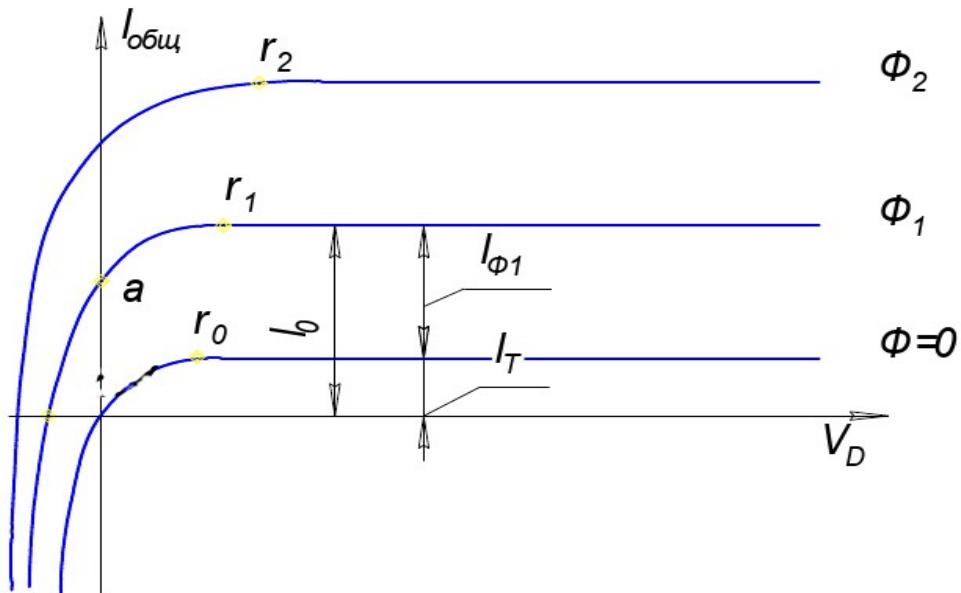


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики фотодиода при различных освещенностях

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 photoносителей (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;

$\Delta E$  – ширина запрещенной зоны собственного полупроводника;

$I_F$  – фототок:

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

$S_I$  – интегральная токовая чувствительность фотодиода;

$\Phi$  – 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  $\Delta E$ .

Отметим, что в выражение фотосигнала – 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  $R_H$

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 фото ЭДС 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.

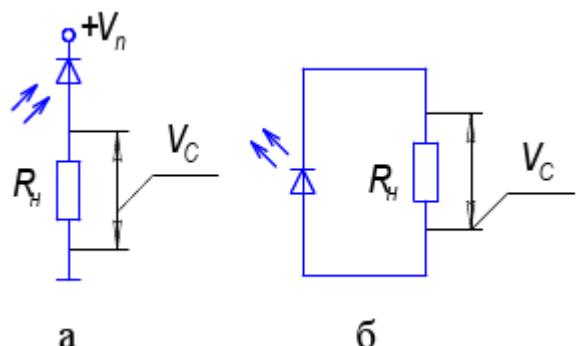


Рис. 5. Способы включения фотодиода в электрическую цепь.

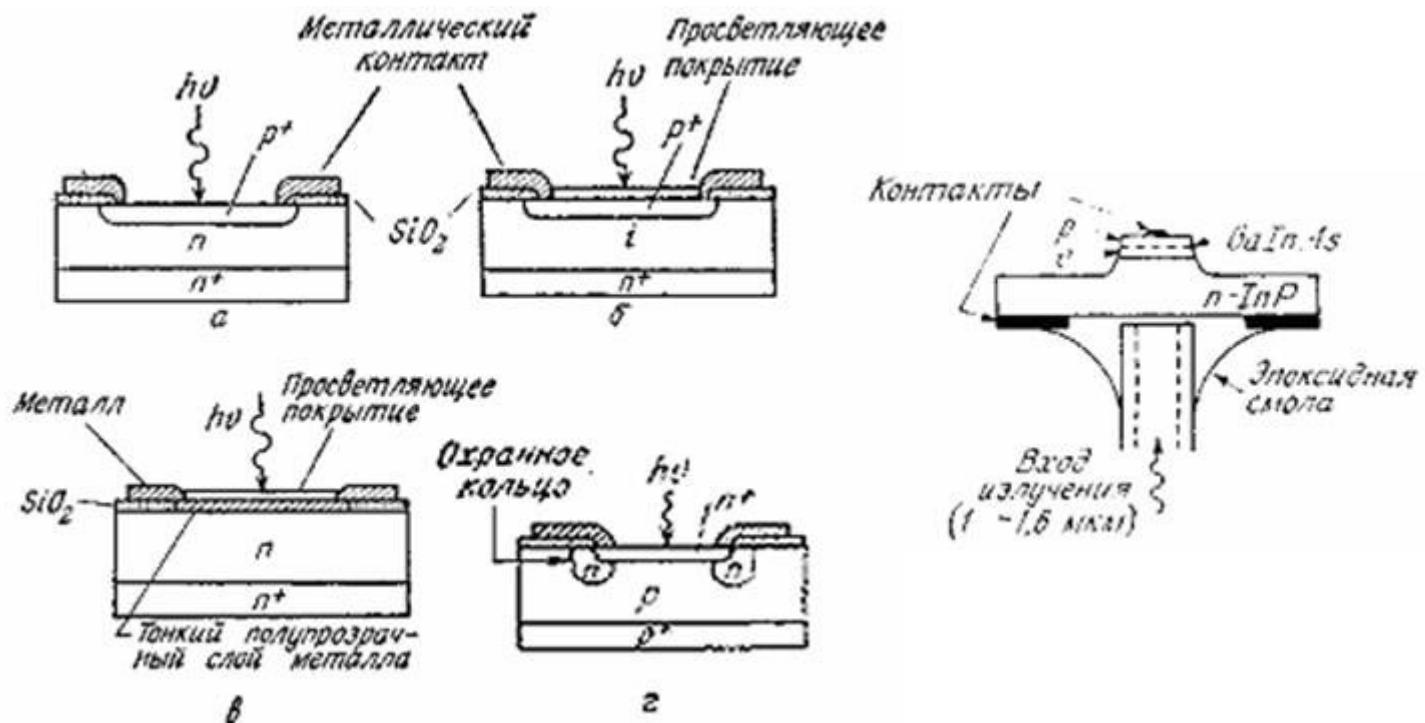


Рис. 6. Схематическая конструкция современных фотодиодов.

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 н-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 величи-

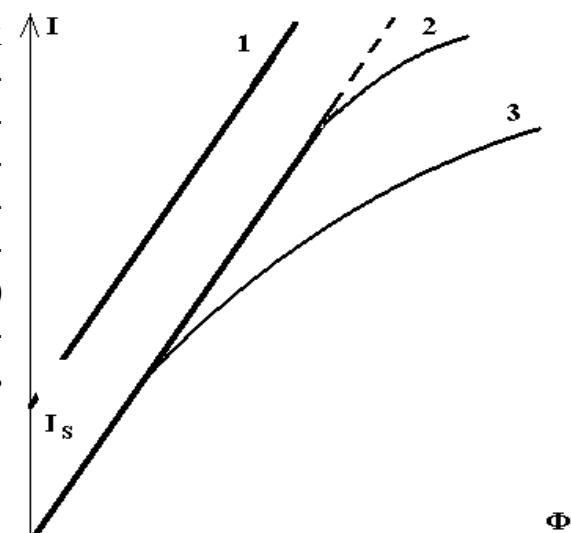


Рис.7.

Световая характеристика фотодиода:  
1) фотодиодный режим; 2) режим короткого замыкания; 3) вентильный режим при наличии внешнего сопротивления.

ны светового потока  $\Phi$  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:

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

## 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.

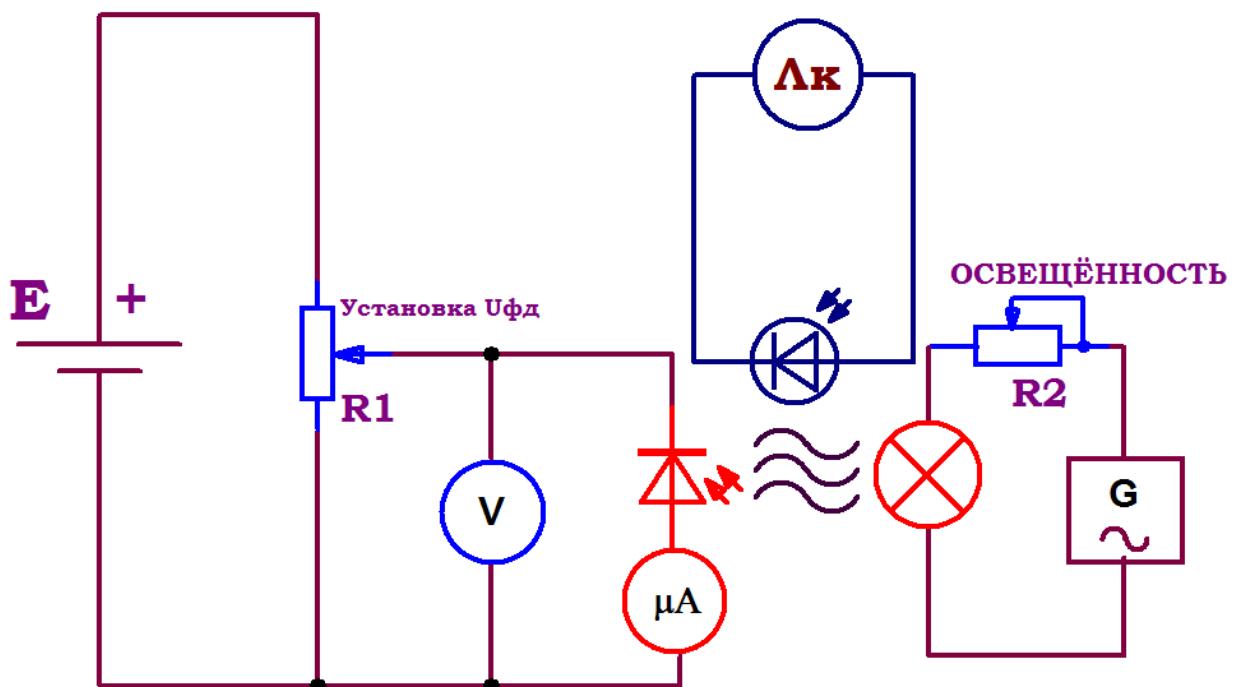


Рис. 8. Блок-схема опыта для изучения работы фотодиода.

Напряжение смещения на фотодиод ФД-256 подается от стабилизированного источника питания и регулируется с помощью многофункциональных кнопок «Установка Уфд» (переменный резистор  $R_1$  на рис. 8).

Фотодиод освещается белым светом от лампы накаливания, мощность которой регулируется переменным резистором «ОСВЕЩЕННОСТЬ» ( $R_2$  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 свето-диод. 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 ча-совой стрелки и выключить лампу накаливания, при этом на ЖКД LCD дисплее БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ значение освещенности Е должно быть равно 000 ЛЮКС.
5. Изменяя с помощью ручки «УСТАНОВКА  $U_{ФД}$ » напряжение, подава-емое на фотодиод, и записывая значение тока в цепи фотодиода для каж-дого установленного значения напряжения, снять вольт-амперную харак-теристику образца. Третья цифра после запятой в результатах измерения фототока может быть нестабильной, поэтому как правило, следует огра-ничиваться двумя цифрами после запятой в значениях фототока x.xx мкА. При этом особо тщательно следует снимать ВАХ при малых значения напряжения смещения, т. к. в этой области ток фотодиода значительно из-меняется при малых изменениях напряжения. Таким образом, в начале из-мерения ВАХ шаг изменения напряжения должен составлять ~0,2 В. За-тем шаг можно увеличить до 0,8-1,5 В. Измерения следует проводить до значения напряжения на фотодиоде ~9 — 10 Вольт, когда фототок практи-чески перестает изменяться. Все измеренные значения следует записи-вать 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. Плавно вращая ручку «ОСВЕЩЕННОСТЬ» установить минимально возможное значение освещенности, подаваемой на фотодиод  $\sim 60$  ЛЮКС. Люксметр, используемый в первой части лабораторного опыта обеспечивает точность измерения освещенности  $\pm 2$  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).

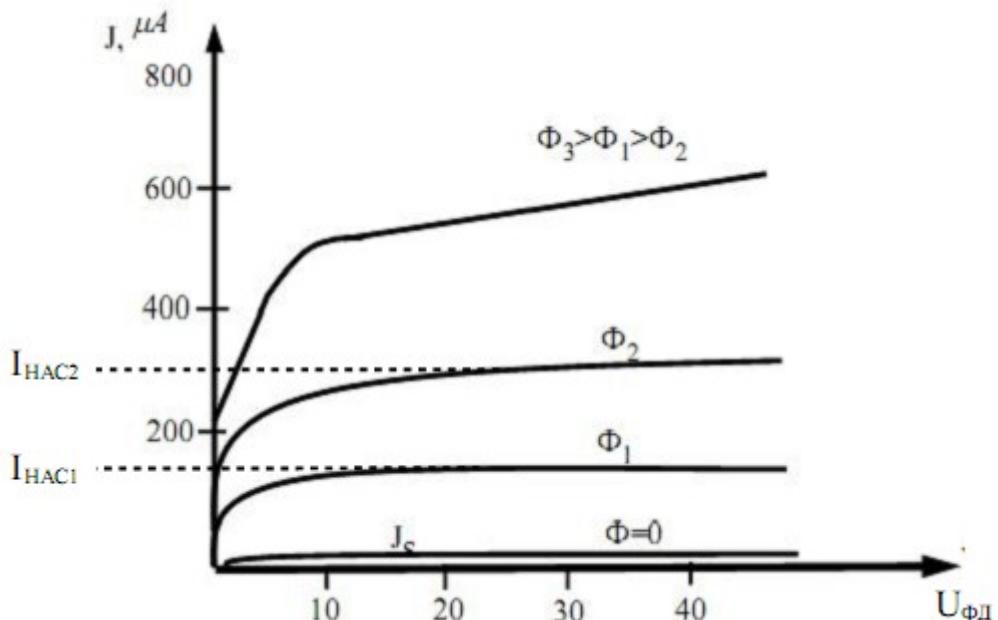


Рис. 9. Вольт — амперные характеристики фотодиода при различных освещенностях  $E=\Phi$  при обратном смещении.

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.

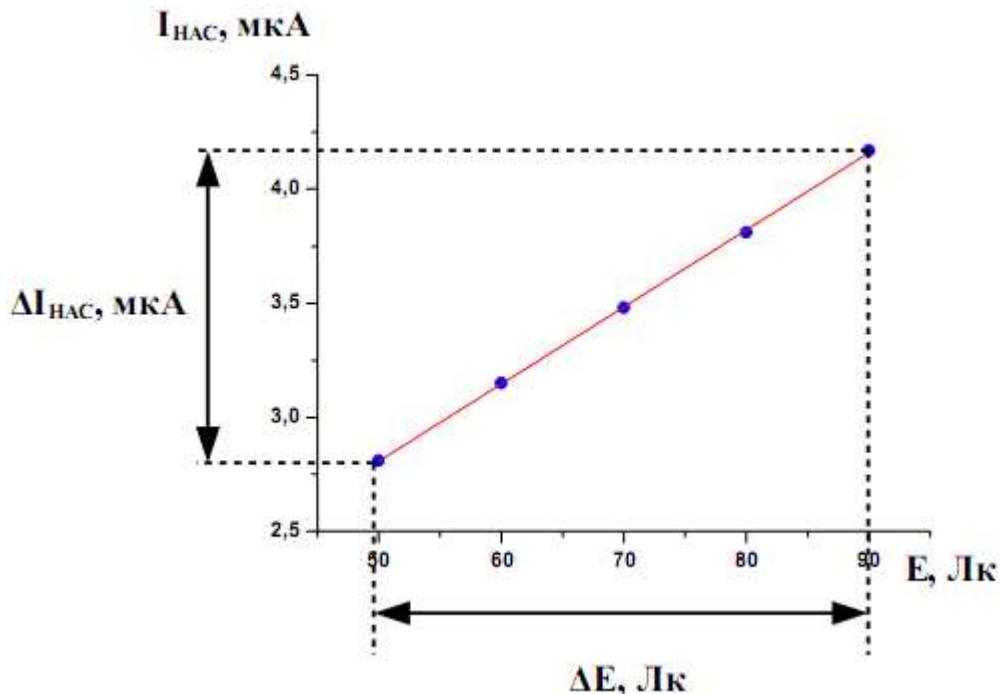


Рис. 10. Зависимость тока насыщения фотодиода от освещенности.

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  $S_I = \frac{\Delta I_{HAC}}{\Delta E}$ , где в качестве  $\Delta I_{HAC}$  и  $\Delta E$  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»