

## Лабораторная работа № 5

### ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА ПОЛУПРОВОДНИКАМИ

**Цель работы:** экспериментальное исследование процессов поглощения света полупроводниками.

**Материалы и приборы:** кремниевая батарея, вольтметр, амперметр, набор резисторов.

#### Краткие сведения из теории.

Под действием оптического излучения происходит изменение электрофизических параметров фотоприёмника, обусловленное образованием дополнительных свободных носителей заряда в полупроводнике. **Процесс образования дополнительных носителей заряда внутри полупроводника под действием оптического излучения называется внутренним фотоэффектом.**

В фотоприёмниках используются внутренние фотоэффекты: фотогальванический и фотопроводимости.

Фотогальванический эффект возникает в полупроводниках с внутренним потенциальным барьером (с p-n переходом; с переходом металл-полупроводник; с гетеропереходом). Внутреннее электрическое поле разделяет возникшие под воздействием оптического излучения фотоносители. **Пространственно разделённые фотоносители разных знаков – дырки и электроны – создают фото-ЭДС.**

Эффект фотопроводимости состоит только в создании фотоносителей. **Результатом изменения концентрации носителей в полупроводнике является увеличение проводимости полупроводника.**

Фотогальванический эффект применяется в фотодиодах, в фототранзисторах, фототиристорах и других приёмниках с p-n переходами. Эффект фотопроводимости применяется в фоторезисторах.

**Рассмотрим процессы, происходящие в фотодиоде.** Пусть излучение воздействует

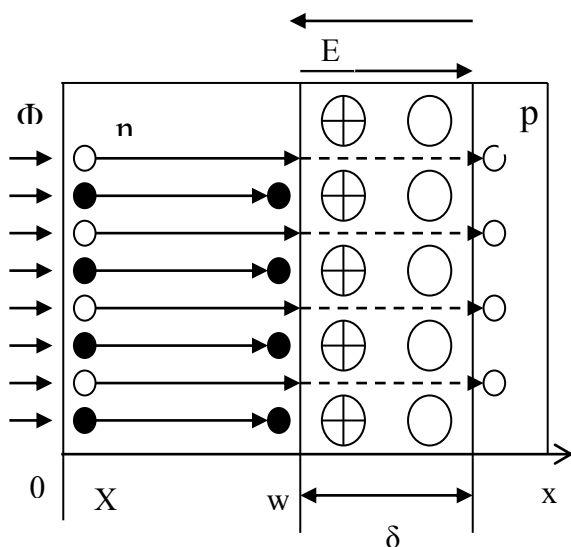


Рис.1. Структура фотодиода при воздействии излучения.

в направлении, перпендикулярном плоскости p-n перехода. В результате поглощения фотонов с энергией, большей, чем ширина запрещённой зоны, в n-базе на глубине примерно  $\chi_0$  от поверхности возникают электронно-дырочные пары (фотоносители). Фотоносители диффундируют вглубь n-области. Ширина n-области  $w$  такова, что основная доля носителей не успевает рекомбинировать в n-области и доходит до границы p-n перехода ( $x = w$ ). Электроны и дырки разделяются электрическим полем p-n перехода напряжённостью  $E_0$ , при этом дырки переходят в p-область, а электроны не могут преодолеть поле перехода и скапливаются у границы p-n перехода в n-области. Таким образом, **ток фотоносителей через p-n переход обусловлен дрейфом неосновных носителей – дырок.**

Сравним действие

выпрямительного диода и фотодиода. В равновесном состоянии, когда поток излучения отсутствует ( $\Phi = 0$ ), зонные диаграммы диода и фотодиода полностью совпадают. При этом уровень Ферми одинаков для обеих областей и диффузионная составляющая тока через p-n переход – тока основных носителей – равна дрейфовой составляющей тока неосновных носителей (рис.2). В обычном диоде равновесие в структуре нарушается при приложении к

р-п переходу прямого напряжения (плюс к р- области и минус к п-области) – внутренний потенциальный барьер снижается. Равновесие в потоках носителей через переход нарушается в пользу **диффузионной** составляющей тока, которая при достаточно большом

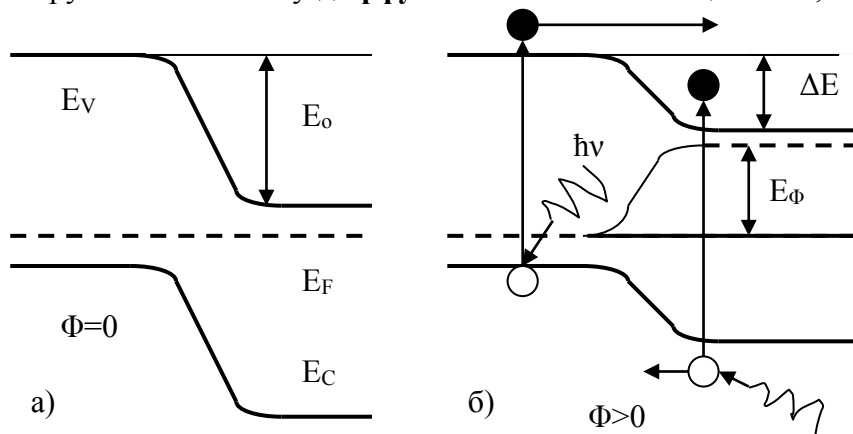


Рис.2. Внутренний эффект в р-п переходе.  
 а) р- п переход в равновесном состоянии;  
 б) р- п переход при воздействии излучения.

прямом напряжении определяет значение тока через р- п- переход. **Дрейфовая** составляющая тока через р-п переход в выпрямительном диоде является фактически паразитной и должна быть минимально возможной.

В фотодиоде р-п переход разделяет созданные излучением фотоносители (рис.2,б). Это приводит к снижению внутреннего потенциального барьера в фотодиоде (аналогично приложению прямого напряжения в обычном диоде).

Уровни Ферми в структуре по обе стороны перехода уже не совпадают, а смещаются относительно друг друга.

**В фотодиоде главной является дрейфовая составляющая тока через р- п- переход.** Диффузионную составляющую необходимо уменьшать.

Дрейфовый поток фотоносителей (дырочек и электронов) образует фототок  $I_{\phi}$ . Дырочки заряжают р- область положительно относительно п-области, а электроны – п- область отрицательно по отношению к р-области. Возникшая таким образом разность потенциалов, называемая фото-ЭДС  $E_{\phi}$ , снижает внутренний потенциальный барьер до значения  $\Delta E$ .

Одновременно с накоплением дырочек в р - области и электронов в п - области происходит понижение потенциального барьера  $E_0$  на величину возникшей фото-эдс. Очевидно, что  $E_{\phi}$  должна быть меньше  $E_0$ , так как разделение фотоносителей возможно только при наличии некоторого потенциального барьера  $\Delta E$ . Уменьшение высоты потенциального барьера и соответственно напряжённости электрического поля в р-п переходе ухудшает разделительные свойства р- п- перехода.

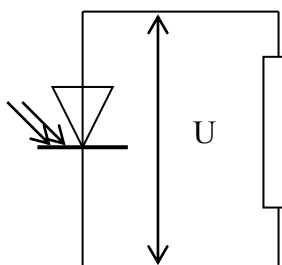


Рис.3

**Для обеспечения высокой чувствительности к излучению необходимо, чтобы в фотодиоде диффузионная составляющая тока была минимальной.** Поэтому фотодиод работает или вообще без внешнего напряжения (фотогальванический режим), или при обратном внешнем напряжении.

**Фотогальванический режим характеризуется отсутствием источника внешнего напряжения в цепи фотодиода.** На рис.3 изображена схема включения фотодиода в фотогальваническом режиме. При этом выражение для тока фотодиода  $I_{\phi d}$  можно получить из схемы замещения фотодиода (рис.4).

$$I_{\phi d} = U/R = I_{\phi} - I_{pn} = I_{\phi}(\Phi) - I_o(e^{U/\phi T} - 1) \quad (1)$$

где  $I_{\phi}$ -ток фотоносителей (фототок); R-сопротивление нагрузки;  $I_{pn}$ -ток р- п- перехода;  $\phi T$ - температурный потенциал.

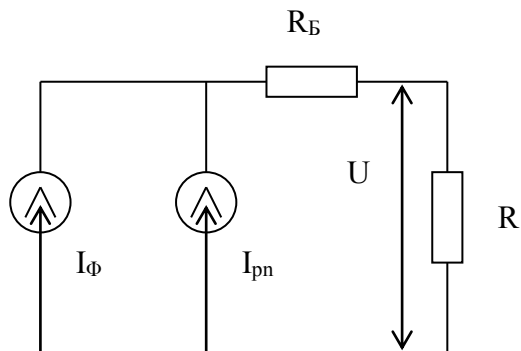


Рис.4. Схема замещения включения фотодиода в фотогальваническом режиме.

При разомкнутой внешней цепи ( $R=\infty$ ,  $I_{фд} = 0$ ) из схемы замещения имеем  $I_{\phi} = I_{pn}$ . Тогда из формулы (1) можно получить напряжение на переходе при холостом ходе, которое равно фото-эдс:

$$U_x = \varphi_T \ln\left(I + \frac{I_{\Phi}}{I_o}\right) \quad (2)$$

При коротком замыкании в нагрузке ( $R = 0$ ) напряжение на фотодиоде  $U = 0$ , а ток фотодиода  $I_{фд} = I_k = I_{\phi}$ .

В **фотодиодном режиме** последовательно с фотодиодом включается источник обратного напряжения. В этом режиме потенциальный барьер возрастает и ток через переход будет определяться током, который протекает при отсутствии излучения. Ток фотодиода при этом:

$$I_{фд} = I_{\phi} - I_{pn} = I_{\phi} + I_o \approx I_{\phi} \quad (3)$$

### Характеристики и параметры фотодиода

Вольтамперная характеристика фотодиода в общем случае (при любой полярности) описывается формулой

$$I_{фд} = \frac{U}{R} = I_{\phi} - I_{pn} = I_{\phi}(\Phi) - I_o(e^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1) \quad (4)$$

Это выражение представляет собой зависимость тока фотодиода от напряжения на фотодиоде при разных значениях потока излучения  $\Phi$ , т.е. является уравнением семейства ВАХ фотодиода.

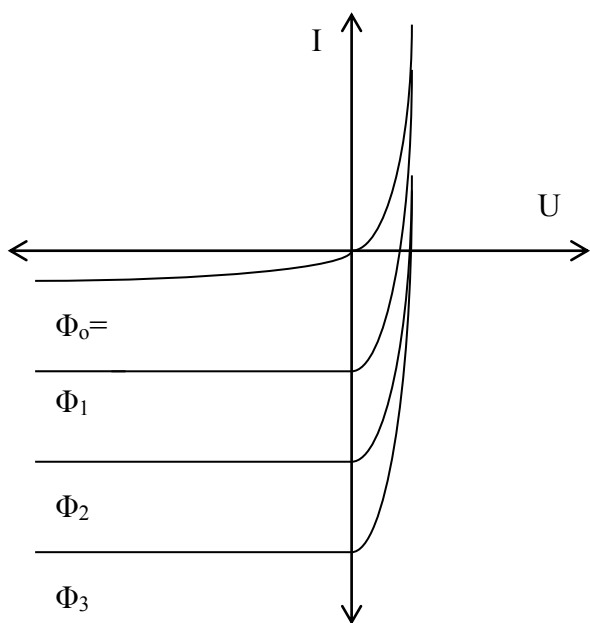


Рис.5. Семейство ВАХ фотодиода.  
 $\Phi_1 < \Phi_2 < \Phi_3$

На рис.5 изображены вольтамперные характеристики фотодиода.

Квадрант 1 – это нерабочая область фотодиода. Здесь к р-п переходу прикладывается прямое напряжение и диффузионная составляющая тока полностью подавляет фототок.

Квадрант 3 – это фотодиодная область работы фотодиода. К р-п переходу прикладывается обратное напряжение. В рабочем диапазоне обратных напряжений фототок практически не зависит от обратного напряжения и сопротивления нагрузки. ВАХ нагрузочного резистора представляет собой прямую линию, уравнение которой имеет вид:

$$E_{обр} - I_{\phi} R = U$$

Таким образом, в **фотодиодном режиме при заданном потоке излучения фотодиод является источником тока по отношению к внешней цепи.**

Семейство ВАХ фотодиода соответствующие фотогальваническому режиму работы изображены на рис.6. По точкам пересечения ВАХ с осью напряжения можно определить значения фото-ЭДС (напряжения холостого хода) при разных световых потоках  $\Phi$ . У

кремниевых фотодиодов значение фото-ЭДС равно 0,5 – 0,55 В. Точка пересечения ВАХ с осью токов соответствует значениям токов короткого замыкания. Промежуточные значения сопротивления нагрузки определяются линиями нагрузки, которые при разных значениях R выходят из начала координат под разными углами. При заданном значении тока по ВАХ

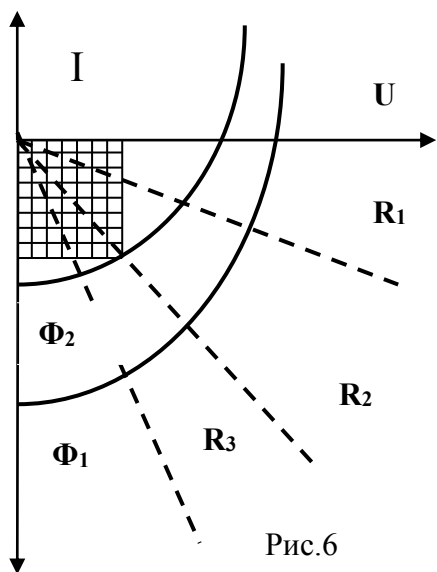


Рис.6

можно выбрать оптимальный режим работы фотодиода в фотогальваническом режиме. Под оптимальным режимом в данном случае понимают выбор такого сопротивления нагрузки, при котором в R будет передаваться наибольшая электрическая мощность.

Оптимальному режиму для потока  $\Phi_2$  соответствует линия нагрузки R2 (площадь заштрихованного прямоугольника). Для кремниевых фотодиодов при оптимальной нагрузке напряжение на фотодиоде равно 0,35 – 0,4 В.

### Энергетическая характеристика

Это зависимость тока фотодиода от потока излучения, падающего на поверхность. Поток излучения  $\Phi$  – мощность излучения, приходящаяся на всю поверхность n-области полупроводника. Число фотонов, приходящих в единицу времени на всю поверхность, равно  $\Phi/h\nu$ . Очевидно, что  $I_\Phi$  пропорционален числу фотонов, поглощаемых в полупроводнике в единицу времени:

$$I_\Phi = q\eta\gamma\Phi/h\nu, \quad (5)$$

где  $\eta$  – внутренний квантовый выход, т.е. число электронно-дырочных пар, образуемых одним фотоном;  $\gamma$  – коэффициент переноса, учитывающий долю непрорекомбинировавших в базе носителей заряда от общего количества носителей, возникающих под действием излучения.

При оценке эффективности фотодиода нужно учитывать, что часть излучения  $\Phi_0$  отразится от поверхности фотодиода, часть излучения будет поглощена полупроводником ( $\Phi_{\text{пог}}$ ), и часть излучения пройдет сквозь полупроводник ( $\Phi_{\text{прох}}$ ). В формуле (5) учитывается только часть поглощенного излучения. Для различных длин волн коэффициенты поглощения отражения и пропускания имеют различные значения, т.е зависят от длины волны.

В фотодиодном режиме энергетическая характеристика описывается выражением (5) и в рабочем диапазоне значений потока излучения линейна. Это значит, что практически все фотоносители доходят до p-n перехода и принимают участие в образовании фототока.

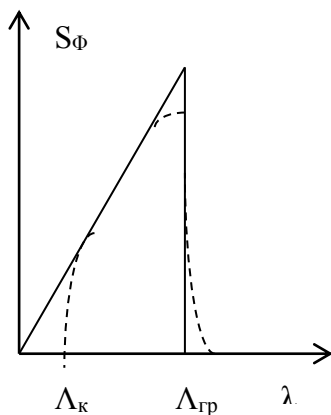


Рис.7.  
Спектральные характеристики фотоприёмника.

В фотогальваническом режиме энергетические характеристики представляются зависимостями либо тока короткого замыкания  $I_k$ , либо фото-ЭДС  $E_\Phi = U_x$  от потока излучения. При больших потоках  $\Phi$  закон изменения этих зависимостей существенно отклоняется от линейного. Для функции  $I_k = f(\Phi)$  появление нелинейности связано с ростом падения напряжения на объёмном сопротивлении базы фотодиода. Снижение фото-ЭДС объясняется уменьшением высоты потенциального барьера при накоплении избыточного заряда электронов в n-области и дырок в p- области. Как следствие этого процесса, поле p- n- перехода хуже разделяет фотоносители и рост фото-ЭДС при увеличении потока излучения замедляется.

### Спектральная характеристика

Чувствительность  $S_\Phi$  зависит от длины волны  $\lambda$  следующим образом:

$$S_{\Phi} = I_{\Phi}/\Phi = q\eta\gamma/hc_0 \quad (6)$$

Из выражения (6) следует, что спектральная характеристика линейна и проходит через начало координат. Снижение чувствительности в области коротких волн связано с тем, что при уменьшении длины волны энергия поглощается в тонком поверхностном слое, где скорость рекомбинации значительно больше. Коротковолновая граница чувствительности фотодиода зависит и от толщины базы, и от скорости поверхностной рекомбинации. Уменьшая толщину базы и скорость рекомбинации, можно сдвигать коротковолновую границу фотодиода в сторону уменьшения длины волны. Спад чувствительности в области длинных волн соответствует длинноволновой границе спектральной чувствительности материала. Положение максимума на спектральной характеристике фотодиода сильно зависит от спектральной характеристики коэффициента поглощения материала фотодиода. Если глубина поглощения  $\chi_0$  резко уменьшается с уменьшением длины волны падающего света, то положение максимума определяется шириной запрещённой зоны и от толщины базы практически не зависит. Если же зависимость глубины поглощения от длины слоя слабая, то максимум спектральной характеристики может смещаться при изменении толщины базы и скорости поверхностной рекомбинации. Максимум спектральной характеристики кремниевого фотодиода можно изменять в диапазоне от 0,6 до 1 мкм.

### Измерение вольтамперной характеристики.

Для изучения энергетических характеристик фотоэлектрического преобразователя (ФЭП) необходимо собрать схему, изображённую на рис.8. Исследуемый фотоэлектрический преобразователь (VD) включён последовательно с миллиамперметром А и сопротивлением нагрузки  $R_n$ . Напряжение на ФЭП измеряется вольтметром V.

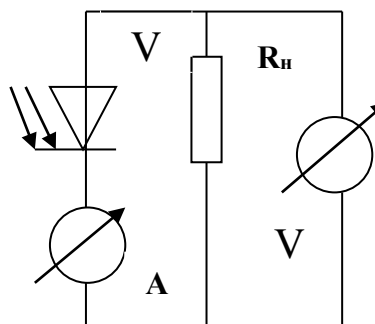


Рис.8

Измерения проводятся не менее чем для двух различных освещённостей. Сделаем допущение, что за время измерений освещённость в помещении существенно не изменилась. Тогда первую вольтамперную характеристику можно построить для максимальной освещённости ФЭП. Для этого надо расположить ФЭП так, чтобы падающий на его рабочую поверхность световой поток был максимальным. Для построения ВАХ надо измерить напряжения холостого хода ( $U_{xx}$ ), т.е. напряжение на ФЭП при отсутствии нагрузки. Затем измерить ток короткого замыкания ( $I_{кз}$ ). Кроме этого провести измерения тока и напряжения для нескольких промежуточных значений сопротивления нагрузки. Результаты занести в таблицу и построить график.

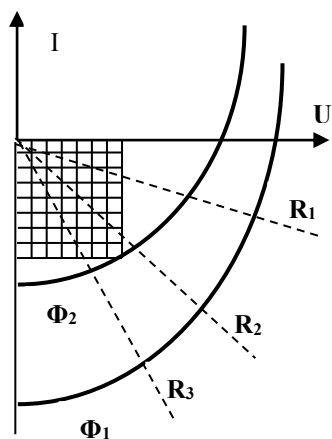


Рис.9

Провести такие же измерения для много меньшей освещённости. Для этого поместить установку с ФЭП так, чтобы освещённость была существенно меньшей.

Пример построения ВАХ характеристики фотоэлектрического элемента представлен на рис.9. На этом рисунке  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  – две вольтамперные характеристики соответствующие разным световым потокам. Различные нагрузочные сопротивления обозначены через  $R_1, R_2, R_3$ .

**Используя полученные вольтамперные характеристики, определить режим максимальной мощности для ФЭП при различных освещённостях.**

### Контрольные вопросы

1. Объясните природу дрейфового тока через переход.
2. Объясните природу диффузионного тока через переход.

3. Определите гальванический режим фотодиода.
4. Определите фотодиодный режим фотодиода.
5. Дайте определение “красной границы” фотоэффекта.

#### **Основная литература**

1. Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника М., 1991
2. Власов А.Б. Физические основы электроники.
3. Носова Г.И., Задворный А.Г.. Физические основы электроники.
4. Бобылев Ю.Н. Физические основы электроники.
5. Соболев В.Д. Физические основы электронной техники. Москва, “Высшая школа”, 1979.
6. Степаненко И.П.. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. Москва, “Энергия”, 1977.
7. Блэйкмор Дж. Физика твёрдого тела. Москва, “Мир”, 1988.

#### **Дополнительная литература**

1. Манаев Е.И. Основы радиоэлектроники. М., Радио и связь. 1985 504с.
2. Ефимчик М.К., Шушкевич С.С. Основы радиоэлектроники. Минск, изд-во Бел.Ун-та, 1986, 302 с.
3. Горелик С.С., Дашевский М.Я. Материаловедение полупроводников и диэлектриков. М., Металлургия, 1988, 574 с.
4. Тугов Н.М., Глебов Б.А., Чарыков Н.А.. Полупроводниковые приборы. М., Энергоатомиздат, 1990, 575 с.
5. Карлов Н. В. Лекции по квантовой электронике. М.. Наука 1988 335 с.