

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра физики

# МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

*к выполнению лабораторной работы Ф4*

## «ИЗУЧЕНИЕ ФОТОПРОВОДИМОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ»

по дисциплине «ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ»  
для студентов специальности  
1-36 04 02 «Промышленная электроника»  
дневной и заочной форм обучения

Брест 2012

УДК 538.91, 548.73,378.147:53

Методические указания предназначены для студентов специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника» всех форм обучения, выполняющих лабораторные работы по дисциплине «Физические основы электронной техники». Содержат теоретические сведения, задания для самостоятельной работы, контрольные вопросы и рекомендуемую литературу.

Составители благодарны Кушнер Т. Л. за помощь в написании методических указаний.

Составители: Янусик И. С., доцент  
Новикова Т. А., ассистент  
Яромская Л. Н., ассистент

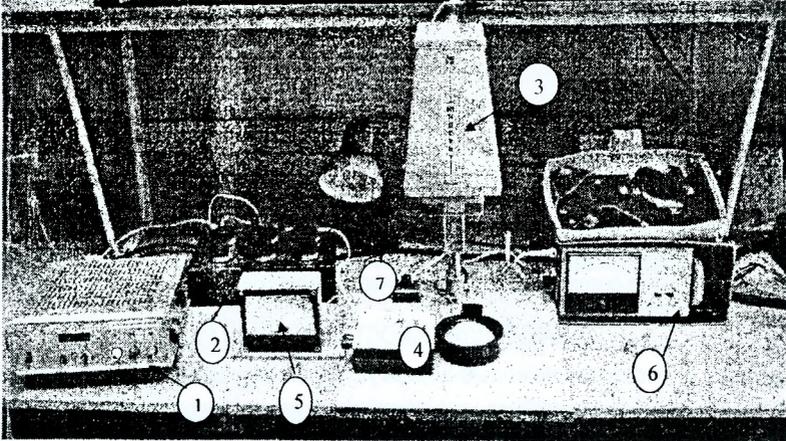
## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА Ф 4

### «Изучение фотопроводимости полупроводников»

**Цель работы:** изучение основных физических закономерностей, определяющих свойства фоторезисторов; исследование вольт-амперных, световых и спектральных характеристик фоторезисторов.

**Приборы и принадлежности:** установка для измерений основных физических закономерностей, определяющих свойства фоторезисторов.

**Описание установки:**



1 - источник постоянного тока (ИПТ); 2 - магазин сопротивлений; 3 - осветительная лампа;  
4 - фоторезистор СФ-Б3; 5 - амперметр; 6 - люксметр; 7 - автотрансформатор

### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Полупроводниками называются вещества, которые занимают промежуточное положение по электропроводности (или по удельному сопротивлению) между проводниками и диэлектриками. Удельное сопротивление полупроводников изменяется в широком интервале от  $10^{-5}$  до  $10^8$  Ом·м. К типичным представителям полупроводников относятся германий, кремний, теллур и т. д. Полупроводник – вещество, основным свойством которого является сильная зависимость удельной проводимости от воздействия внешних факторов (температуры, электрического поля, света и других параметров)

Полупроводник называется беспримесным, если он идеально химически чист и имеет идеально правильную кристаллическую решетку. В таком случае его проводимость называется собственной проводимостью полупроводника. Энергия, которая должна быть затрачена для создания в кристаллах чистых полупроводников электропроводности, называется энергией активации собственной проводимости.

Примесной проводимостью полупроводников называется электропроводность, обусловленная внесением в кристаллическую решетку полупроводников примесей. Примеси могут быть донорного и акцепторного типа.

Донор – это примесный атом или дефект кристаллической решётки, создающий в запрещённой зоне энергетический уровень, занятый в невозбуждённом состоянии электроном и способный в возбуждённом состоянии отдать электрон в зону проводимости.

Акцептор – это примесный атом или дефект кристаллической решётки, создающий в запрещённой зоне энергетический уровень, свободный от электрона в невозбуждённом состоянии и способный захватить электрон из валентной зоны в возбуждённом состоянии [1].

Донорные примеси обеспечивают электронную проводимость (n – типа), акцепторные примеси обеспечивают проводимость дырочную (p-типа).

Полупроводник n-типа – это полупроводник с преимущественно электронной проводимостью.

Полупроводник p-типа – это полупроводники с преимущественно дырочной проводимостью.

Важной особенностью полупроводников является способность увеличивать электропроводность под действием света. Это явление получило название внутреннего фотоэффекта или фотопроводимости.

Фотосопротивлением (или фоторезистором) называется полупроводник, меняющий свою проводимость при освещении его светом.

На внутреннем фотоэффекте основана работа фотосопротивлений, непосредственно преобразующих световую энергию в энергию электрическую.

Световой характеристикой [ $I_{\phi}(\Phi)$ ] фотосопротивления называется зависимость фототока от светового потока при данном напряжении (см. Приложение).

Вольт-амперная характеристика [ $I_{\phi}(U)$ ] фотосопротивления выражает зависимость фототока от приложенного напряжения.

Спектральная характеристика [ $I_{\phi}(\lambda)$ ] выражает зависимость фототока на единицу падающего светового потока от длины волны падающего света.

## ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

### **Задание 1. Исследовать вольт-амперную характеристику фоторезистора.**

1. По указанию преподавателя установите на магазине сопротивлений какое-либо значение  $R$  (от 2 кОм до 10 кОм).

2. По указанию преподавателя установите определенное значение освещенности (от 200 лк до 600 лк).

3. Измерьте при каждом значении напряжения  $U$  силу тока в цепи  $I$ , изменяя с помощью ИПТ напряжение  $U$  от 0 В до 1 В через 0,15 В на участке цепи, состоящем из сопротивления и фоторезистора. Данные занесите в таблицу 1.

4. Используя полученные данные, постройте график зависимости  $I(U)$ , т. е. вольт-амперную характеристику нелинейного участка цепи.

5. Рассчитайте по полученным значениям тока падение напряжения на сопротивлении  $R$  по закону Ома для участка цепи:  $U_R = IR$ .

6. Постройте график зависимости силы тока от напряжения на сопротивлении  $I(U_R)$  на той же координатной плоскости п. 4.

7. Для полученных значений тока  $I$  рассчитайте напряжение на фоторезисторе:  $U_{\phi} = U - U_R$ . Расчеты проведите не менее чем для 10 значений тока  $I$ . Данные занесите в таблицу 1.

Таблица 1

№ п/п	$U$ , В	$I$ , мА	$U_R$ , В	$U_{\phi}$ , В
1				
10				

8. Постройте график зависимости силы тока от напряжения на фоторезисторе  $I(U_{\phi})$  на той же координатной плоскости из п. 4 и п. 6.

9. Установите на магазине сопротивлений  $R = 0$ .

10. Изменяя с помощью ИПТ напряжение на фоторезисторе от 0 В до 1,4 В через каждые 0,2 В, измерьте силу фототока  $I_{\phi}$ .

11. Используя полученные данные, постройте график зависимости фототока от напряжения  $I_{\phi}(U)$ , на той же координатной плоскости (п. 4 - п. 6).

12. Сравните графики зависимости  $I_{\phi}(U)$  п. 4 и п. 6 (вольтамперные характеристики, полученные разными способами). Сделайте вывод.

13\*. Измените значение освещенности на 100 лк (см. пункт 2).

14\*. Выполните п. 9 с новым значением освещенности ( $E$ ). Постройте график зависимости  $I_{\phi}(U)$  для нового значения  $E$ . Сделайте вывод.

**Задание 2. Получить световую характеристику исследуемого фоторезистора.**

1. Установите на магазине сопротивлений значение  $R = 0$ .

2. Установите с помощью ИПТ напряжение на фоторезисторе  $U = 0,5$  В.

3. Изменяя с помощью автотрансформатора освещенность от 200 лк до 700 лк с шагом 50 лк, измеряйте при каждом значении освещенности  $E$  силу фототока  $I_{\phi}$ , ( $U_{\phi} = \text{const}$ ). Постройте график зависимости фототока от освещенности  $I_{\phi}(E)$ .

4. Измените значение напряжения на фоторезисторе на 0,5 В (см. п. 2).

5. Выполните п. 3 при новом значении напряжения  $U_{\phi}$ . Данные занесите в таблицу 2.

Таблица 2

$U_{\phi} = 0,5$  В

$U_{\phi} = 1$  В

$E$ , лк	$I_{\phi}$ , мА		$E$ , лк	$I_{\phi}$ , мА
- // -	- // -		- // -	- // -

6. Постройте график зависимости фототока от освещенности  $I_{\phi}(E)$  на той же координатной плоскости.

**Задание 3. Исследовать спектральную характеристику фоторезистора.**

1. Установите на магазине сопротивлений значение  $R = 0$ .

2. Установите с помощью ИПТ напряжение на фоторезисторе от 0,4 В до 1 В (по указанию преподавателя).

3. Изменяя с помощью светофильтров (не менее пяти) длину волны света от красного  $\lambda_{\text{к}}$  до фиолетового  $\lambda_{\text{ф}}$ , измерьте при каждом значении длины волны  $\lambda$  силу тока  $I$  и освещенность  $E$ . Постройте график зависимости  $I(\lambda)$ .

4. Постройте спектральную характеристику фоторезистора, для чего на графике зависимости  $I(\lambda)$  п. 3 постройте график зависимости  $E(\lambda)$ , а затем разделите ординаты первой кривой на соответствующие ординаты второй кривой. Результирующая кривая  $I/E(\lambda)$  и будет являться спектральной характеристикой фоторезистора. Сделайте вывод. Данные занесите в таблицу 3.

Таблица 3

Свет	$\lambda$ , мкм	$E$ , лк	$I$ , мА	$I/E$ , мА/лк
фиолетовый	400			
синий	490			
зеленый	600			
желтый	650			
оранжевый	690			
красный	760			

**Задание 4. Рассчитать удельную чувствительность фоторезистора.**

По формуле 2.12 (см. Приложение) рассчитать удельную чувствительность ( $\gamma_{\text{уд}}$ ) фоторезистора для различных значений освещенности (не менее 3-х). Сделайте вывод.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### 1. Фотопроводимость полупроводников

Направим на полупроводник пучок света интенсивностью  $J_0$  (рис. 1.1). Проникая внутрь полупроводника, свет постепенно поглощается, и его интенсивность уменьшается. Выделим на глубине  $x$  от поверхности полупроводника бесконечно тонкий слой  $dx$ .

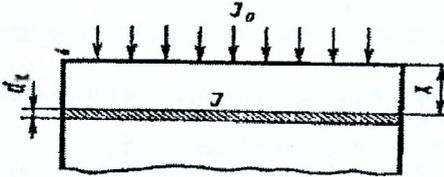


Рисунок 1.1 – Поглощение света полупроводником

Световая энергия  $dI$ , поглощенная слоем  $dx$ , пропорциональна интенсивности  $I$  света, падающего на этот слой, и его толщине:

$$dI = -kI dx. \quad (1.1)$$

Интегрируя (1.1), получим:

$$I = I_0 e^{-kx} \quad (1.2)$$

Знак минус указывает на убыль энергии; коэффициент пропорциональности  $k$  называется коэффициентом поглощения. При  $dx = 1$ ,  $k = -\frac{dI}{I}$ . Таким образом, коэффициент поглощения можно определить как величину, обратную толщине слоя полупроводника, после прохождения которого световой поток (поток фотонов) уменьшается в  $e = 2,718...$  раза. Он имеет размерность, обратную длине ( $m^{-1}$ ).

Поглощаясь внутри полупроводника, свет может вызывать появление избыточных носителей, увеличивающих общую концентрацию свободных зарядов. Носители тока в полупроводнике, возникшие в результате освещения, называются *неравновесными, или избыточными*.

На рис. 1.2 стрелками показано возбуждение электронов проводимости и дырок при собственном поглощении света полупроводником. Фотон с энергией  $h\nu$ , равной или большей ширины запрещенной зоны  $E_g$ , переводит электрон из валентной зоны в зону проводимости. Образующиеся при этом пары электрон – дырка являются свободными и участвуют в увеличении электропроводности полупроводника.

Для возбуждения примесных атомов фотон должен обладать энергией  $h\nu > E_a$ , где  $E_a$  — энергия активации примесных атомов.

На рисунке 1.2 примесными уровнями являются  $E_1$  и  $E_2$ ; возбуждение электронов с этих уровней показано стрелками 2 и 3. Таким образом, если

$h\nu \geq E_g$  — для собственных полупроводников и  $h\nu \geq E_a$  — для примесных полупроводников, (1.3)

то в полупроводнике образуются добавочные носители тока и его проводимость повышается.

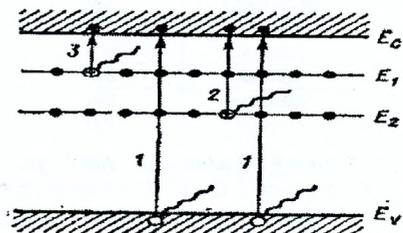


Рисунок 1.2 – Возбуждение электронов проводимости и дырок примесными уровнями

Процесс внутреннего освобождения электронов под действием света называется *внутренним фотоэффектом*. Повышение концентрации носителей заряда под влиянием освещения приводит к увеличению проводимости полупроводника сверх проводимости, обусловленной термическим возбуждением электронов.

При падении излучения на поверхность фоторезистора в последнем генерируются носители вследствие возбуждения либо междузонных переходов (собственное возбуждение), либо переходов с участием энергетических уровней в запрещенной зоне (примесное возбуждение), что приводит к увеличению проводимости (рис. 1.2).

Добавочная проводимость, приобретенная полупроводником при облучении светом, называется *фотопроводимостью*. Проводимость, обусловленная тепловым возбуждением носителей заряда, называется *темновой проводимостью*, так как она отвечает проводимости затемненного полупроводника. Темновой ток, обусловленный собственной проводимостью полупроводника, весьма мал, и его значение определяется темновым сопротивлением  $R_m$ , имеющим большой диапазон значений:  $10^2$ - $10^{10}$  Ом.

В соответствии с тем, что под действием света избыточные носители могут возникать как вследствие возбуждения собственных, так и примесных носителей заряда, различают *собственную* и *примесную фотопроводимости*. Можно определить *красную границу* этой проводимости, т. е. максимальную длину волны, при которой свет является еще фотоэлектрически активным для данного полупроводника:

$$\lambda_0 = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24}{E_g(\text{эВ})} \text{ — для собственных полупроводников,}$$

$$\lambda_0 = hc / E_a \text{ — для примесных полупроводников.} \quad (1.4)$$

Излучение с длинами волн, меньшими  $\lambda_0$ , поглощается в полупроводнике с образованием электронно-дырочных пар. В примесном фоторезисторе фотовозбуждение может происходить между краем зоны и энергетическим уровнем в запрещенной зоне. Фотопроводимость может возникать в результате поглощения фотонов с энергией, которая равна или превышает энергию, отделяющую примесный уровень от зоны проводимости или валентной зоны. При этом длинноволновая граница фотопроводимости определяется глубиной залегания примесного уровня в запрещенной зоне.

Для чистых полупроводников энергия активации равна ширине запрещенной зоны  $E_g$  и лежит в пределах  $1 - 3$  эВ. Для них красная граница фотопроводимости приходится на видимую часть спектра. Многие примесные полупроводники имеют  $E_a$  порядка десятых и даже сотых долей электронвольт. Красная граница фотопроводимости для них лежит в инфракрасной области спектра.

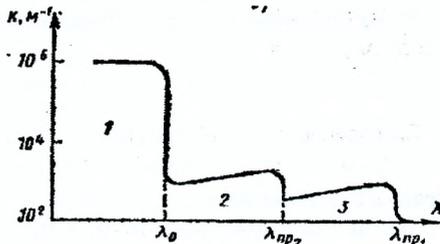


Рисунок 1.3 – Зависимость коэффициента поглощения от длины световой волны для полупроводника, имеющего два примесных уровня

На рис. 1.3 представлена схематическая кривая зависимости коэффициента поглощения света  $k$  от длины световой волны  $\lambda$  для полупроводника, имеющего два примесных уровня  $E_1$  и  $E_2$  (рис. 1.2). Спектр поглощения такого полупроводника имеет три полосы поглощения – полосу собственного поглощения 1, отвечающую перебросу электронов под

действием света из валентной зоны в зону проводимости, и две полосы (2 и 3) примесного поглощения. Они соответствуют перебросу электронов с примесных уровней  $E_1$  и  $E_2$  в зону проводимости (рис. 1.2). Свет с длиной волны  $\lambda < \lambda_0 = ch/E_g$  практически полностью поглощается у самой поверхности в слое толщиной  $x \approx 10^{-6}$  м. Коэффициент поглощения для него  $k \approx 10^6$  м<sup>-1</sup>. Коэффициент примесного поглощения зависит от концентрации примесных центров, но обычно ненамного превышает величину  $k = 10^3$  м<sup>-1</sup>. Чем меньше энергия активации примеси  $E_a$ , тем, согласно (1.4), больше граничная длина волны примесной проводимости.

На фотопроводимость полупроводников существенное влияние оказывает температура. С понижением температуры уменьшается число темновых носителей тока. Это приводит к увеличению относительной роли фотопроводимости в общей проводимости полупроводника [2].

Примесный фотоэффект возможен, очевидно, лишь в том случае, если примесные уровни  $E_1$  и  $E_2$  заполнены электронами, т. е. если полупроводник находится при температуре ниже температуры истощения примеси  $T_s$ . Поэтому для наблюдения примесной фотопроводимости полупроводники необходимо, как правило, охлаждать, причём до тем более низких температур, чем больше их граничная длина волны. Так, германий, легированный золотом, имеет  $\lambda_l = 9$  мкм и требует охлаждения жидким азотом ( $T = 78$  К); германий же, легированный примесями III или V групп таблицы Менделеева, имеет  $\lambda_l = 100$  мкм и требует охлаждения жидким гелием ( $T = 4,2$  К).

Если интенсивность света (плотность светового потока), падающего на полупроводник, равна  $I$ , то энергия, поглощаемая в единицу времени в единицу объема полупроводника, будет равна  $kI$ , а число избыточных свободных носителей, возникающих в единицу объема полупроводника в единицу времени, т. е. скорость их генерации  $g$ , будет равно:

$$g = Ik\beta, \quad (1.5)$$

где  $\beta$  — квантовый выход, показывающий, сколько свободных носителей заряда возникает при поглощении одного фотона [2].

При отсутствии рекомбинации число избыточных носителей непрерывно возрастало бы с течением времени. Вследствие рекомбинации, скорость которой растет с увеличением концентрации избыточных носителей, в полупроводнике устанавливается *стационарное состояние*, при котором скорость генерации равна скорости их рекомбинации:

$$g = R = \Delta n_o / \tau, \quad (1.6)$$

Этому состоянию отвечает постоянная (стационарная) концентрация избыточных носителей  $\Delta n_o$ , равная:

$$\Delta n_o = g\tau_n = Ik\beta\tau_n \quad (1.7)$$

Проводимость собственных фоторезисторов описывается формулой  $\sigma = q(\mu_n n + \mu_p p)$ , и увеличение проводимости под действием освещения в основном связано с увеличением числа носителей.

Так как избыточные носители имеют практически такую же подвижность, какой обладают равновесные носители, то *стационарная (установившаяся) фотопроводимость* полупроводника будет равна для носителей n-типа:

$$\sigma_{\phi, o} = q\beta k I \mu_n \tau_n \quad (1.8)$$

Из (1.8) видно, что стационарная фотопроводимость полупроводника, а, следовательно, и фоточувствительность полупроводниковых приемников излучения пропорциональны подвижности носителей  $\mu_n$ , времени жизни избыточных носителей (фотоэлектронов)  $\tau_n$ , с этой точки зрения выгодно стремиться к получению максимально высоких значений  $\tau_n$ . Однако при этом может существенно увеличиваться инерционность фотоприемников [6].

Действительно, рассмотрим, например, характер спада фотопроводимости полупроводника после выключения источника света (рис. 1.4).

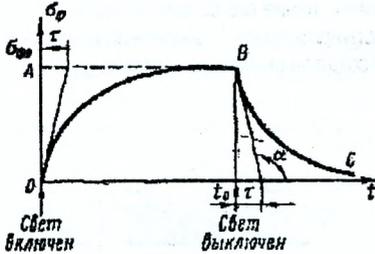


Рисунок 1.4 – Спад фотопроводимости полупроводника после выключения источника

Вследствие протекания процесса рекомбинации концентрация избыточных носителей убывает по закону:

$$\Delta n = \Delta n_0 e^{-t/\tau_n} \quad (1.9)$$

По такому же закону будет происходить и спад фотопроводимости полупроводника (кривая ВС):

$$\sigma_\phi = \sigma_{\phi 0} e^{-t/\tau_n} \quad (1.10)$$

Из (1.10) видно, что чем больше время жизни  $\tau_n$  избыточных носителей, тем медленнее происходит спад фотопроводимости, следовательно, тем более инерционным будет фотоприемник излучения.

Легко показать, что касательная, проведенная к кривой спада фотопроводимости  $\sigma_\phi(t)$  в точке  $t_0$ , отсекает на оси времени отрезок, численно равный  $\tau_n$ . Этим методом часто пользуются для экспериментального определения  $\tau_n$ . На рис. 1.4 показан также и характер нарастания фотопроводимости полупроводника после включения светового импульса (кривая ОВ). Характер и длительность кривых нарастания и спада фототока во времени существенно зависят от механизма рекомбинации неравновесных носителей в данном материале, а также от величины интенсивности света. Рост фотопроводимости происходит плавно и достигает стационарного значения лишь по истечении некоторого промежутка времени. И в этом случае касательная, проведенная к кривой  $\sigma_\phi(t)$  в начале координат, отсекает на прямой АВ отрезок, численно равный  $\tau_n$  [2].

## 2. Фоторезисторы

Зависимость фотопроводимости ряда полупроводников от освещенности используется в фоторезисторах, получивших широкое практическое применение. Фоторезистор – это двухэлектродный полупроводниковый элемент, действие которого основано на фоторезистивном эффекте. Фоторезистивный эффект – это изменение электрического сопротивления полупроводника, обусловленное исключительно действием оптического излучения и не связано с его нагреванием. Фоторезистор изменяет свою электрическую проводимость

в зависимости от интенсивности и спектрального состава падающих на него лучей. Для возникновения фоторезистивного эффекта необходимо, чтобы в полупроводнике произошло либо собственное поглощение фотонов с образованием новых пар носителей заряда, либо примесное поглощение с образованием носителей одного знака при возбуждении однопольных дефектов. Поглощение лучистой энергии полупроводником, из которого состоит фоторезистор, вызывает ионизацию атомов и увеличение числа свободных носителей заряда электронов и дырок, что вызывает уменьшение его сопротивления.

Фоторезистор представляет собой пластину полупроводника (монокристаллическую или в виде тонкой плёнки), на противоположных концах которой созданы омические контакты (рис. 2.1 и 2.2).

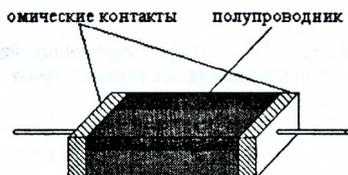


Рисунок 2.1 – Монокристаллический фоторезистор

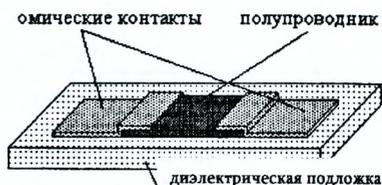


Рисунок 2.2 – Плёночный фоторезистор

Основной частью конструкции фоторезистора является полупроводниковый фоточувствительный слой, который может быть выполнен в виде вырезанной из монокристаллической (рис. 2.1) или поликристаллической пластинки полупроводника или в виде поликристаллической плёнки полупроводника (рис. 2.2), нанесённой на диэлектрическую (изолирующую) подложку – стекло или кварц. На поверхность фоточувствительного слоя наносят два металлических электрода, выполненных из благородных металлов, посредством которых фотосопротивление включается в цепь и не подвергается коррозии, и защитного лакового покрытия [3].

Поверхность полупроводникового фоточувствительного слоя, расположенную между электродами, называют *рабочей площадкой*. Фоторезисторы делают с рабочими площадками прямоугольной формы, в виде меандра или в виде кольца. Рабочая площадка различных фоторезисторов составляет обычно от десятков долей до десятков квадратных миллиметров. Исходя из площади рабочей площадки, можно правильно выбрать размер светового пучка, оценить световой поток, при котором должен работать фоторезистор, и т. д. При эксплуатации фоторезистора рекомендуется его рабочую площадку засвечивать полностью, так как при этом эффект изменения сопротивления фоторезистора максимален. Большинство приборов является неохлаждаемыми, т. е. предназначены для работы при температуре окружающей среды. Но выпускается целый ряд приборов охлаждаемых, работа которых возможна только после заливки в специальный сосуд хладагента, предназначенного для охлаждения фоточувствительного элемента.

Полупроводниковые фоторезисторы работают в цепях как постоянного, так и переменного тока.

Если фоторезистор включен последовательно с источником напряжения (рис. 2.3) и не освещен, то в его цепи будет протекать *темновой ток*

$$I_{\text{темн}} = U / (R_m + R_n), \quad (2.1)$$

где  $U$  – напряжение;  $R_m$  – величина электрического сопротивления фоторезистора в темноте, называемая *темновым сопротивлением*;

$R_n$  – сопротивление нагрузки

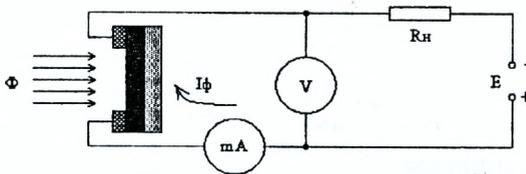


Рисунок 2.3 – Схема включения для измерения параметров и характеристик фоторезистора

При освещении фоторезистора энергия фотонов расходуется на перевод электронов в зону проводимости. Количество свободных электронно-дырочных пар возрастает, сопротивление фоторезистора падает и через него течет *световой ток*

$$I_{св} = U / (R_c + R_n), \quad (2.2)$$

где  $R_c$  – сопротивление фоторезистора при освещении.

Разность между световым и темновым током дает значение тока  $I_\phi$ , получившего название первичного **фототока** проводимости

$$I_\phi = I_{св} - I_{темн} \quad (2.3)$$

Фоторезистор имеет одинаковое сопротивление в обоих направлениях протекания тока и может работать только от внешнего источника.

Рассмотрим процессы, которые происходят в фоторезисторе при падении фотонов.

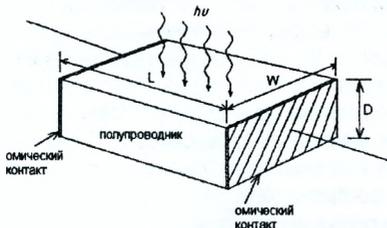


Рисунок 2.4 – Устройство фоторезистора

Пусть в какой-то начальный момент времени  $t = 0$  число избыточных носителей, возникших в единице объема за счёт генерации потоком фотонов, равно  $\Delta n_0$ . В последующие моменты времени  $t$  число носителей в том же объеме уменьшается за счёт рекомбинации по экспоненциальному закону (см. 1.9). Если поток фотонов постоянен и распределён равномерно по поверхности фоторезистора с площадью  $S = WL$ , то общее число фотонов, падающих на поверхность в единицу времени, равно  $P/h\nu$ , где  $P$  – мощность падающего излучения и  $h\nu$  – энергия фотона.

Согласно формуле (1.6), скорость генерации носителей в единице объема равна:

$$g = \frac{\Delta n_0}{\tau} = \frac{\beta(P/h\nu)}{WLD} \quad (2.4)$$

Фототок, протекающий между контактами, если к фоторезистору приложено напряжение  $U$ , равен:

$$I_\phi = (\sigma \varepsilon) WD = (q \mu_n \Delta n_0 \varepsilon) WD = (q \Delta n_0 V_d) WD, \quad (2.5)$$

где  $\varepsilon = \frac{U}{L}$  – электрическое поле внутри фоторезистора и  $V_d = \mu_n \varepsilon$  – дрейфовая скорость.

Подставляя  $\Delta n_0$  из уравнения (2.4) в уравнение (2.5), получим

$$I_{\phi} = q \left( \beta \frac{P}{h\nu} \right) \left( \frac{\mu_n \tau \varepsilon}{L} \right) \quad (2.6)$$

Определяя исходный фототок как

$$I_{\phi}^{исх} = q \left( \beta \frac{P}{h\nu} \right), \quad (2.7)$$

получим коэффициент усиления фототока

$$\frac{I_{\phi}}{I_{\phi}^{исх}} = \frac{\mu_n \tau \varepsilon}{L} = \frac{\tau}{t_{прол}}, \quad (2.8)$$

где  $t_{прол} = LV_d$  – время пролёта носителей. Коэффициент усиления, зависящий от отношения времени жизни и времени пролёта, является исключительно важным параметром фоторезисторов. Для образцов с большим временем жизни и малым расстоянием между контактами коэффициент усиления может быть существенно больше единицы. *Время фотоответа* фоторезистора определяется временем пролёта  $t_{прол}$ . Поскольку для фоторезисторов характерны большие расстояния между контактами и слабые электрические поля, то их время фотоответа обычно больше аналогичного параметра для фотодиодов [3].

В случае малых световых потоков  $\Phi$ , когда кванты света идут на образование избыточных носителей, количество образующихся носителей, а, следовательно, и величина фототока пропорциональны падающему световому потоку ( $I_{\phi} \sim \Phi$ ), т. е. первичный фототок проводимости практически безынерционен. По мере возрастания величины лучистого потока увеличивается число электронов проводимости. Двигаясь внутри вещества, электроны сталкиваются с атомами, ионизируют их и создают дополнительный поток электрических зарядов, получивший название вторичного фототока проводимости. Увеличение числа ионизированных атомов тормозит движение электронов проводимости. В результате этого изменения фототок запаздывает во времени относительно изменений светового потока, что определяет некоторую инерционность фоторезистора.

Линейная зависимость фототока от светового потока нарушается ( $I_{\phi} \sim \Phi^{1/2}$ ).

Постоянная времени  $\tau$  – время, в течение которого фототок изменяется на 63%, т. е. в  $e$  раз. Постоянная времени характеризует инерционность прибора и влияет на вид его частотной характеристики. Т. к.  $I_{\phi} \sim \sigma_{\phi}$ , кривая релаксации фототока соответствует рис.

1.4. При включении и выключении света фототок возрастает до максимума и спадает до минимума не мгновенно. Характер и длительность кривых нарастания и спада фототока во времени существенно зависят от механизма рекомбинации неравновесных носителей в данном материале, а также от величины интенсивности света. При малом уровне инжекции нарастание и спад фототока во времени можно представить экспонентами с постоянной времени  $\tau$ , равной времени жизни носителей в полупроводнике. В этом случае при включении света фототок  $I_{\phi}$  будет нарастать и спадать во времени соответственно по закону  $I_{\phi} = I_{\phi 0} (1 - e^{-t/\tau})$  и  $I_{\phi} = I_{\phi 0} e^{-t/\tau}$ , где  $I_{\phi 0}$  – стационарное значение фототока при освещении.

Для регистрации оптического излучения его световую энергию преобразуют в электрический сигнал, который затем измеряют обычным способом.

Для изготовления фоторезисторов используют полупроводниковые материалы с широкой запрещенной зоны, оптимальной для решаемой задачи. Фоторезисторы имеют высокую чувствительность к излучению в самом широком диапазоне – от инфракрасной до рентгеновской области спектра, причем сопротивление их может меняться на несколько порядков. Так, для регистрации видимого света используются фоторезисторы из селенида

кадмия (CdSe резистор типа ФСД) и сульфида кадмия (CdS), наиболее чувствительного к длинам волн вблизи 0,5 мкм. Для регистрации инфракрасного излучения используются Ge (чистый или легированный примесями Au, Cu или Zn), Si, PbSe, PbTe, InSb, InAs, HgCdTe, часто охлаждаемые до низких температур. Для излучения в диапазоне длин волн 100 – 400 мкм лучше всего выбрать фоторезистор на GaAs. Наибольшее распространение получили фоторезисторы из сернистого свинца (PbS, резистор типа ФСА), чувствительного к далекой инфракрасной области спектра. Используются и другие полупроводниковые материалы, характерной особенностью которых является малая ширина *запрещенной зоны* (например, у InSb она составляет 0,18 эВ).

Основным преимуществом фоторезисторов перед вакуумными фотоэлементами является высокая световая чувствительность. Недостатком фоторезисторов является их инерционность [3].

Фоторезисторам присущи высокая стабильность во времени, они имеют небольшие габариты и выпускаются на различные номиналы сопротивлений.

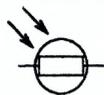
Чувствительность фоторезисторов меняется (уменьшается) в первые 50 часов работы, оставаясь в дальнейшем практически постоянной в течение всего срока службы, измеряемого несколькими тысячами часов. Интервал рабочих температур для сернисто-кадмиевых фоторезисторов составляет от -60 до +85°С для селенисто-кадмиевых - от -60 до +40°С и для сернисто-свинцовых - от -60 до +70°С.

Миниатюрность и высокая чувствительность фоторезисторов позволяют использовать их в автоматике, вычислительной технике и промышленной электронике для регистрации и измерения слабых световых потоков. С помощью фоторезисторов определяют качество поверхностей, контролируют размеры изделий. Фотосопротивления позволяют на расстоянии автоматически обнаружить нарушения нормального хода различных производственных процессов и останавливать в этих случаях процессы. Фотосопротивления применяются для сортировки массовых изделий по их размерам и окраске



Рис. 2.5 – Общий вид фоторезистора

В зависимости от назначения фоторезисторы имеют различное конструктивное оформление. Иногда это просто пластина полупроводника на стеклянном основании с токонесущими выводами, в других случаях фоторезистор имеет пластмассовый корпус с жесткими штырьками. Выпускаются фоторезисторы в металлическом корпусе с цоколем, напоминающим ламповый, или в корпусе, как у герметизированных конденсаторов или транзисторов.



- условное обозначение фоторезистора

Название типа фоторезисторов складывается из букв и цифр, причем в старых обозначениях буквы А, К, Д обозначали тип использованного светочувствительного материала, в новом же обозначении эти буквы заменены цифрами. Буква, стоящая за дефисом, при старом обозначении, характеризовала конструктивное исполнение (Г-герметизированные, П-пленочные). В новой маркировке эти буквы также заменены цифрами. В таблице 4 приведены наименования наиболее распространенных обозначений фоторезисторов.

Таблица 4 – Типовые обозначения фоторезисторов

Вид фоторезисторов	Старое обозначение	Новое обозначение
Сернисто-свинцовые	ФСА-0, ФСА-1, ФСА-6, ФСА-Г1, ФСА-Г2	
Сернисто-кадмиевые	ФСК-0, 1, 2, 4, 5, 6, 7, ФСК-Г1, ФСК-Г2 ФСР-Г7, ФСК-П1	СФ2-1, 2, 4, 9, 12
Селенисто-кадмиевые	ФСД-0, ФСД-1, ФСД-Г1	СФ3-1, 8

**Важнейшие параметры фоторезисторов:**

- **рабочее напряжение  $U_R$**  – постоянное напряжение, приложенное к фоторезистору, гарантирующее его продолжительную работу при длительной работе в заданных эксплуатационных условиях без изменения его параметров свыше определённых допустимых значений. При работе в импульсном режиме у сернисто-кадмиевых и селенисто-кадмиевых фоторезисторов допустимое напряжение может в 2-3 раза превышать рабочее;

- **максимально допустимое напряжение фоторезистора  $U_{max}$**  – максимальное значение постоянного напряжения, приложенного к фоторезистору, при котором отклонение его параметров от номинальных значений не превышает указанных пределов при длительной работе в заданных эксплуатационных условиях;

- **темновое сопротивление  $R_m$**  – сопротивление фоторезистора при 20°С через 30 с после снятия освещённости 200 лк в диапазоне его спектральной чувствительности. У некоторых типов фоторезисторов темновое сопротивление может иметь значительный разброс и лежит в пределах от сотен килоом до нескольких мегаом.

- **световое сопротивление  $R_c$**  – сопротивление фоторезистора, измеренное при 20°С через 30 с после начала воздействия излучения в 200 лк, создающего на нем освещённость заданного значения;

- **кратность изменения сопротивления  $K_R = R_m/R_c$**  – параметр, показывающий отношение темнового сопротивления к сопротивлению при освещённом состоянии. Это один из важнейших параметров, характеризующий чувствительность фоторезистора. С увеличением освещённости кратность возрастает по линейному закону, с уменьшением - снижается. Наименьшей чувствительностью обладают сернисто-свинцовые фоторезисторы, у которых кратность при освещённости 200 лк не ниже 1,2. У остальных типов фоторезисторов чувствительность значительно выше;

- **допустимая мощность рассеяния  $P_{max}$**  – мощность, позволяющая длительную эксплуатацию фоторезистора при температуре +20° С в окружающей среде без опасности появления необратимых изменений в светочувствительном слое;

- **фототок  $I_{\phi}$**  – ток, протекающий через фоторезистор при указанном напряжении на нем, обусловленный только воздействием потока излучения с заданным спектральным распределением;

- **удельная чувствительность  $\gamma_{уд}$**  – отношение фототока  $I_{\phi}$  к световому потоку  $\Phi$  и к величине приложенного напряжения  $U$ :

$$\gamma_{уд} = \frac{I_{\phi}}{\Phi U}, \tag{2.9}$$

где  $\Phi$  – падающий световой поток, лм;  $U$  – напряжение, приложенное к фоторезистору, В. Из фотометрии известно, что

$$\Phi = ES, \tag{2.10}$$

где  $E$  - освещённость поверхности;  $S$  - площадь светочувствительного слоя фотосопротивления.

Если источник света точечный и лучи падают перпендикулярно поверхности, то освещенность будет связана с силой света  $I$  и расстоянием  $r$  до источника следующей зависимостью:

$$E = \frac{I}{r^2} \quad (2.11)$$

Из формул (2.10-2.11) получаем следующее выражение для чувствительности:

$$\gamma_{уд} = \frac{I_{\phi}}{ESU} = \frac{I_{\phi} r^2}{ISU}; \quad (2.12)$$

– **интегральная чувствительность**  $\gamma_{инт}$  – произведение удельной чувствительности на максимальное рабочее напряжение:

$$\gamma_{инт} = \gamma_{уд} U_{max}.$$

Следовательно интегральная чувствительность может быть определена как отношение фототока к падающему на фоторезистор световому потоку от лампы накаливания, вольфрамовая нить которой имеет температуру 2848 К:

$$\gamma_{инт} = \frac{I_{\phi}}{\Phi} \quad (2.13)$$

В пределах линейной зависимости тока  $I_{\phi}$  от величины потока  $\Phi$  величина  $\gamma_{инт}$  постоянна для данного типа фоторезистора;

– **порог чувствительности** — величина минимального сигнала, регистрируемого фоторезистором, отнесённая к единице полосы рабочих частот [4].

### Основные характеристики фоторезисторов

Каждый фотоэлемент характеризуется рядом параметров и характеристик, определяющих не только его свойства, но и пределы его применимости в технике. К *основным* из них относятся: *вольт-амперная, световая (или люкс-амперная), частотная и спектральная характеристики.*

**Вольт-амперная (ВАХ)** (рис. 2.6) представляет собой зависимость светового тока  $I_{св}$  при неизменном световом потоке, а также темнового тока  $I_m$  от приложенного к фоторезистору напряжения.

Эта характеристика линейна в довольно широких пределах. Для некоторых типов фоторезисторов при напряжениях меньше рабочего наблюдается нелинейность

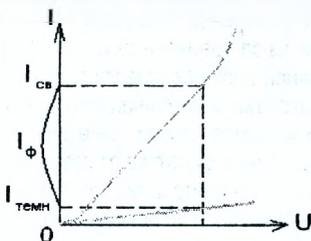


Рисунок 2.6 – ВАХ фоторезистор в темноте и при облучении

В рабочем диапазоне напряжения ВАХ фоторезисторов при различных значениях светового потока практически линейны. Однако у большинства плёночных фоторезисторов с фоточувствительным слоем из поликристаллического полупроводникового материала линейность ВАХ нарушается при малых напряжениях. Эта нелинейность связана с явлениями на контактах между отдельными зёрнами или кристаллами полупроводника. При малых напряжениях сопротивление фоторезистора определяется в основном сопротивлением этих контактов. Напряжение, приложенное к фо-

торезистору, падает в основном на контактах между зёрнами полупроводника. Поэтому напряжённость электрического поля на контактах получается большой даже при малых напряжениях на фоторезисторе. В связи с этим при увеличении приложенного напряжения сопротивление контактов уменьшается либо из-за эффектов сильного поля (например, тунелирование сквозь тонкие потенциальные барьеры на контактах), либо из-за разогрева приконтактных областей отдельных зёрен полупроводника. При дальнейшем увеличении напряжения сопротивление фоторезистора определяется уже объёмным сопротивлением зёрен полупроводника и поэтому остаётся постоянным, что соответствует линейному участку ВАХ.

При больших напряжениях на фоторезисторе ВАХ опять может отклоняться от линейной. Это связано с повышением температуры всего фоточувствительного слоя из-за большой выделяющейся мощности.

**Световая, или люкс-амперная характеристика фоторезистора** (рис. 2.7) представляет собой зависимость фототока  $I_{\phi} = I_{ca} - I_{темн}$  от освещённости, или от падающего на фоторезистор светового потока постоянного спектрального состава.

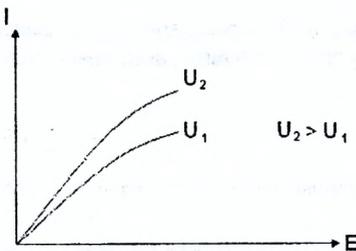


Рисунок 2.7 – Световая характеристика фоторезистора

Фоторезисторы имеют обычно нелинейную световую характеристику (рис. 2.7). Наибольшая чувствительность получается при малых

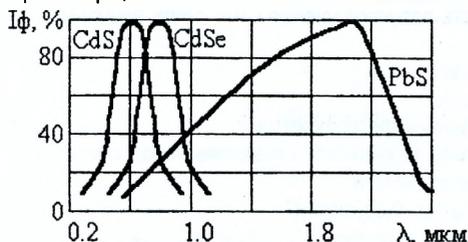
освещенностях. Это позволяет использовать фоторезисторы для измерения очень малых интенсивностей излучения. При увеличении освещенности световой ток растет примерно пропорционально корню квадратному из освещенности. Наклон люкс-амперной характеристики зависит от приложенного к фоторезистору напряжения.

Нелинейность световой характеристики объясняется смещением квазиуровней Ферми, для электронов и для дырок с увеличением отклонения от равновесного состояния при увеличении освещённости. Электронный квазиуровень Ферми смещается к зоне проводимости в результате увеличения концентрации свободных электронов, дырочный квазиуровень Ферми одновременно смещается к валентной зоне из-за увеличения концентрации дырок. Вследствие смещения уровней Ферми часть уровней ловушек захвата становится уровнями рекомбинационных ловушек. С ростом концентрации рекомбинационных ловушек уменьшается время жизни носителей заряда, что и является первой причиной нелинейности световой характеристики. Закономерности возрастания фототока от освещённости различны у различных фоторезисторов и определяются концентрацией тех или иных примесей в полупроводнике и распределением примесных уровней по запрещённой зоне энергетической диаграммы полупроводника.

Второй причиной, приводящей к нелинейности световой характеристики фоторезистора, является уменьшение подвижности носителей заряда при увеличении освещённости из-за увеличения концентрации ионизированных атомов в полупроводнике и, следовательно, из-за увеличения рассеяния носителей заряда ионизированными атомами.

**Спектральная характеристика фоторезистора** – это зависимость фототока от длины волны падающего на фоторезистор света, показывающая, в какой части спектра фоторезистор имеет наибольшую чувствительность. Примерные спектральные характеристики показаны на рис. 2.8.

Как видно из этих характеристик, фоторезисторы с селенисто-кадмиевым светочувствительным элементом имеют максимальную чувствительность в видимой части спектра. Фоторезисторы, выполненные на основе селенистого кадмия, наиболее чувствительны к



красной и инфракрасной части спектра, а селенисто-свинцовые фоторезисторы имеют максимум чувствительности в инфракрасной области спектра [5].

Рисунок 2.8 – Спектральные характеристики различных полупроводников

Спектральные характеристики выражают зависимость фототока на единицу падающего светового потока от длины волны падающего света

$$\left( \frac{I_{\phi\lambda}}{\Phi_s} = f(\lambda) \right), \quad (2.14)$$

При больших длинах волн, т. е. при малых энергиях квантов света по сравнению с шириной запрещенной зоны полупроводника, энергия кванта оказывается недостаточной для переброса электрона из валентной зоны в зону проводимости. Поэтому для каждого полупроводника и соответственно для каждого фоторезистора существует пороговая длина волны (наибольшая), которую обычно определяют как длину волны, соответствующую спаду фототока на 50% со стороны больших длин волн.

При малых длинах волн с уменьшением длины волны падающего на фоторезистор света растёт показатель поглощения. Поэтому глубина проникновения квантов света в полупроводник уменьшается, т. е. основная часть неравновесных носителей заряда возникает вблизи освещаемой поверхности фоточувствительного слоя. При этом увеличивается роль поверхностной рекомбинации и уменьшается среднее время жизни неравновесных носителей. Таким образом, спектральная характеристика имеет спад и при малых длинах волн.

Различные полупроводники имеют ширину запрещенной зоны от десятых долей до 3 эВ. Поэтому максимум спектральной характеристики различных фоторезисторов может находиться в инфракрасной, видимой, или ультрафиолетовой частях электромагнитного спектра [5].

**Частотная характеристика** – определяет чувствительность фоторезистора при действии на него светового потока, изменяющегося с определенной частотой. Наличие инерционности у фоторезисторов приводит к тому, что величина их фототока зависит от частоты модуляции падающего на них светового потока – с увеличением частоты модуляции светового потока фототок уменьшается (рис.2.9). Инерционность ограничивает возможности применения фоторезисторов при работе с переменными световыми потоками высокой частоты.

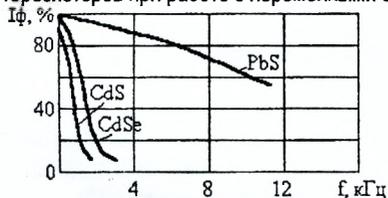


Рисунок 2.9 – Частотные характеристики фоторезистора

Как видно из характеристики, величина сигнала, снимаемого с фоторезистора, уменьшается с увеличением частоты модуляции светового потока.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем обусловлена собственная проводимость полупроводников? Как изменяется сопротивление полупроводников с изменением температуры? Почему?
2. Как примеси влияют на проводимость полупроводников? Что такое донорные и акцепторные примеси?
3. Что такое проводимость р-типа? п-типа?
4. Объяснить понятие фотопроводимости.
5. Какой фотоэффект называется внутренним фотоэффектом?
6. Какие носители тока в полупроводнике называются неравновесными, или избыточными? Какова их роль в создании фотопроводимости?
7. Как определяется красная граница фотопроводимости?
8. Какими параметрами определяется фотопроводимость полупроводника?
9. Конструкция фоторезистора, основные типы фоторезисторов.
10. Какие процессы происходят в фоторезисторе при падении света?
11. Важнейшие параметры фоторезисторов.
12. Основные характеристики фоторезисторов.
13. Назвать причины нелинейности световой характеристики фоторезистора.
14. Примеры применения фоторезисторов в технике.
15. Используя формулы из курса электричества, получить формулу (2.5)

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Наркевич, И.И. Физика / И.И. Наркевич, Э.И. Волмянский, С.И. Лобко. – Минск: ООО «Новое знание», 2004. – С.569–573.
2. Елифанов, Г.И. Физика твёрдого тела. – М.: Высшая школа, 1977. – С. 168–173.
3. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Мир, 1984. – Т. 2. – С. 339–393.
4. Гранитов, Г.И. Физика полупроводников и полупроводниковые приборы. – М.: Советское радио, 1977. – С 150–157.
5. Пасынков, В.В. Полупроводниковые приборы / В.В. Пасынков, В.В. Чиркин. – М.: Высшая школа, 1987. – С. 378–393.

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

*Составители:*

**Янусик Ирина Семеновна  
Новикова Таисия Антоновна  
Яромская Людмила Николаевна**

# **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

*к выполнению лабораторной работы Ф4*

## **«ИЗУЧЕНИЕ ФОТОПРОВОДИМОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ»**

по дисциплине «ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ»  
для студентов специальности  
1-36 04 02 «Промышленная электроника»  
дневной и заочной форм обучения

Ответственный за выпуск: Янусик И.С.  
Редактор: Строкач Т.В.  
Компьютерная верстка: Боровикова Е.А.  
Корректор: Никитчик Е.В.

---

Подписано к печати 7.02.2012 г. Формат 60×84 1/16. Бумага «Снегурочка». Усл. печ. л. 1,17.  
Уч. изд. л. 1,25. Заказ № 137. Тираж 40 экз. Отпечатано на ризографе учреждения  
образования «Брестский государственный технический университет».  
224017, г. Брест, ул. Московская, 267.