

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 67 ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭФФЕКТА

1. СНЯТИЕ ВОЛЬТАМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАКУУМНОГО ФОТОЭЛЕМЕНТА

1.1. Цель работы

Целью работы является изучение явления внешнего фотоэффекта, исследование физических характеристик вакуумного фотоэлемента.

1.2. Краткая теория

Различают внешний и внутренний фотоэффект. Внешним фотоэффектом называется вырывание электронов с поверхности металлов под действием света.

Установка для изучения внешнего фотоэффекта показана на рис. 1.

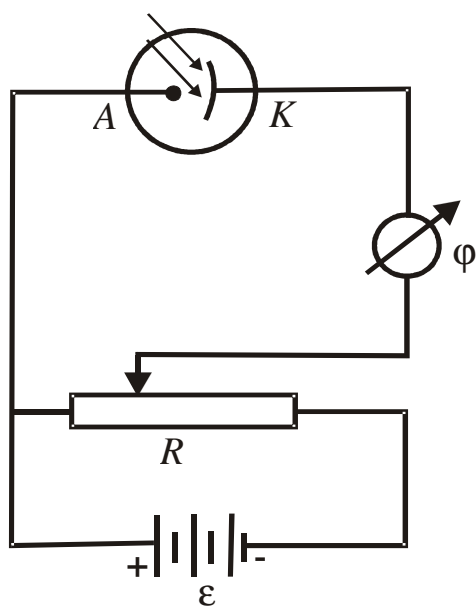


Рис. 1. Установка для изучения фотоэффекта

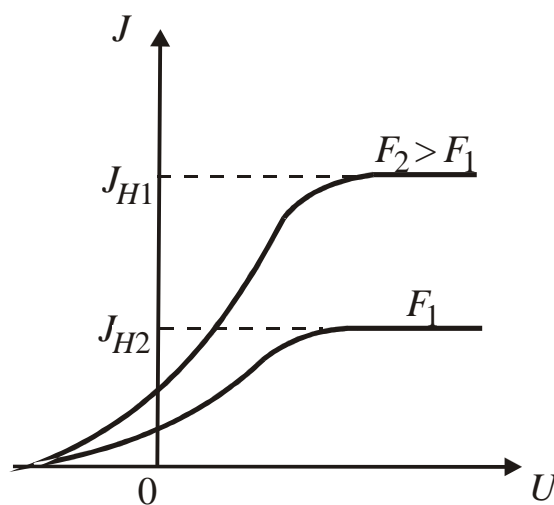


Рис. 2. Вольтамперная характеристика

Свет падает на металлический катод К стеклянного баллона, из которого выкачан воздух. Между катодом К и анодом А приложено напряжение, регулируемое потенциометром R . Электроны, выбитые из катода, движутся к аноду и создают в цепи ток, регистрируемый гальванометром G . Зависимость фототока J от величины напряжения U при неизменном световом потоке F называется *вольтамперной характеристикой* (рис. 2). Наблюдаемый незначительный ток при

нулевым и даже отрицательном напряжениях объясняется тем, что часть электронов, покинувших катод, может достигнуть анода. При увеличении напряжения ток растет до тока насыщения J_H , когда все фотоэлектроны достигают анода.

Явление внешнего фотоэффекта было изучено в 1889 году русским ученым Столетовым.

Первый закон Столетова утверждает, что фототок насыщения прямо пропорционален световому потоку,

$$J_H = k \cdot F, \quad (1)$$

где k - фоточувствительность освещаемой поверхности, т. е. величина, равная току насыщения, возникающему под действием светового потока в один люмен.

В соответствии со вторым законом максимальная скорость фотоэлектронов зависит от частоты падающего света, но не зависит от его интенсивности.

Третий закон Столетова заключается в том, что для каждого вещества существует так называемая красная граница фотоэффекта, т. е. максимальная длина волны, при которой еще возможен фотоэффект.

Объяснить второй и третий законы Столетова удалось лишь с помощью квантовых представлений о физической природе света. Согласно Планку свет представляет собой поток квантов (фотонов). Записав закон сохранения энергии для системы, состоящей из фотона и электрона, Эйнштейн получил, что энергия кванта

$$h\nu = A + \frac{mV_{\max}^2}{2}, \quad (2)$$

где h - постоянная Планка, равная $6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с;

ν - частота света;

A - работа выхода электрона из металла;

$\frac{mV_{\max}^2}{2} = W_k$ - максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона.

Уравнение подтверждает, что максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов зависит только от частоты и не зависит от интенсивности света.

Фотоэффект не наблюдается при частоте, меньше граничной частоты

$$\nu_0 = \frac{A}{h}. \quad (3)$$

Учитывая связь частоты света с длиной его волны в вакууме, получаем, что красная граница соответствует длине волны

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0} = \frac{ch}{A}, \quad (4)$$

где c - скорость света в вакууме, равная $3 \cdot 10^8$ м/с.

В данной работе, с помощью стенда ЭС-6 изучается вольтамперная характеристика вакуумного фотоэлемента СЦВ-3. СЦВ-3 вакуумный фотоэлемент с сурьмяно-цезиевым катодом CsSb. Он представляет собой стеклянный баллон, из которого выкачан воздух, с расположенным в нем кольцевым анодом. На внутреннюю поверхность баллона нанесен тонкий сурьмяно-цезиевый слой, являющийся фотокатодом. Граничная частота ν_0 этого катода находится в красной части спектра. Если на анод подать положительный потенциал, то при освещении фотокатода электроны, вырываемые светом, достигают анода и образуют фототок.

1.3. Выполнение работы

Включают стенд в сеть с напряжением 220 В, устанавливают тумблер "сеть" в положение "вкл", тумблер B_7 - в положение "вакуумный" (рис. 3).

Установив световой поток F_1 , равный 0,23 лм, потенциометром R меняют напряжение U в пределах, указанных в табл. 1, в которую записывают полученные данные. Повторяют измерения при световом потоке 0,46 лм.

Значения анодного напряжения определяют по формуле:

$$U_A = U - J \cdot R_H, \quad (5)$$

где R_H - нагрузочное сопротивление, равное 100 кОм.

По данным наблюдений строят вольтамперные характеристики (см. рис. 2). Для вакуумного фотоэлемента рабочим режимом

Результаты измерений

| $U, \text{В}$ | $F_1=0,23 \text{ лм}$ | | | $F_2=0,46 \text{ лм}$ | | |
|---------------|-----------------------|-------------------------|-----------------|-----------------------|-------------------------|-----------------|
| | $J, \text{мкА}$ | $J \cdot R_H, \text{В}$ | $U_a, \text{В}$ | $J, \text{мкА}$ | $J \cdot R_H, \text{В}$ | $U_a, \text{В}$ |
| 0 | | | | | | |
| 10 | | | | | | |
| 20 | | | | | | |
| 30 | | | | | | |
| 40 | | | | | | |
| 50 | | | | | | |

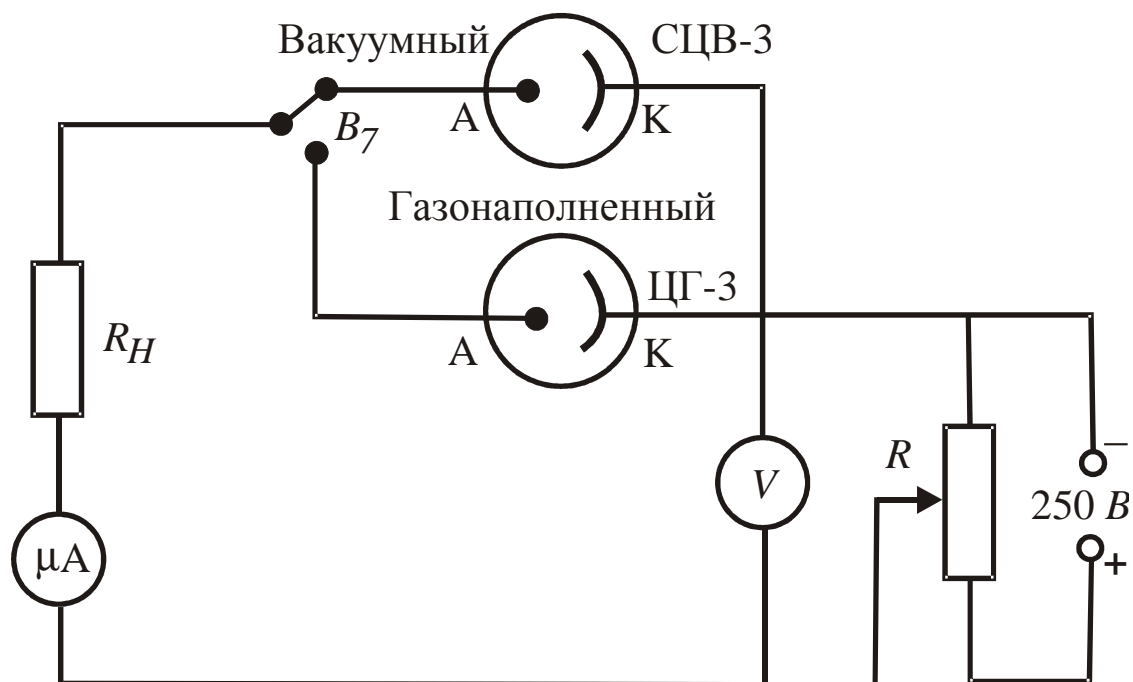


Рис. 3. Схема цепи с вакуумным и газонаполненным фотоэлементами

является режим насыщения. По графикам определяют чувствительность

фотоэлемента

$$K = \frac{\Delta J}{\Delta F}, \quad (6)$$

где ΔJ - разность токов насыщения при потоках F_1 и F_2 ;
 ΔF - разность световых потоков.

Чувствительность сурьмяно-цезиевых фотоэлементов составляет $(0,5 \div 1,5)10^{-4}$ А/лм.

2. СНЯТИЕ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОНАПОЛНЕННОГО ФОТОЭЛЕМЕНТА

2.1. Цель работы

Целью работы является изучение зависимости фототока от приложенного напряжения для газонаполненного фотоэлемента ЦГ-3.

2.2. Краткая теория

Фотоэлемент ЦГ-3 наполнен разреженным инертным газом аргоном до давления 10^{-2} мм рт. ст. и имеет кислородно-цезиевый катод. Ток в цепи такого фотоэлемента значительно больше, чем у вакуумного. Это объясняется тем, что первичные фотоэлектроны при движении к аноду испытывают многократные столкновения с атомами газа и ионизируют их, в результате число носителей тока увеличивается.

Чувствительность газонаполненных фотоэлементов больше, чем у вакуумных, и составляет примерно 10^{-3} А/лм. Газонаполненные фотоэлементы менее стабильны в работе и обладают большей инерционностью.

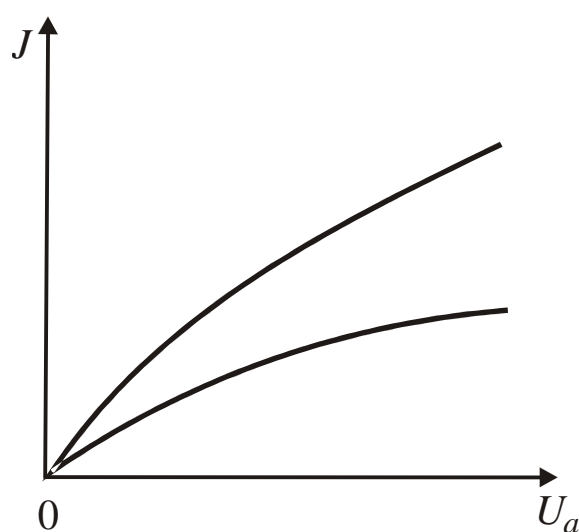
Фотоэлементы широко применяются в современной промышленности, в частности в горном деле. Они используются для автоматического управления шахтной вентиляцией, освещением, для регулирования скорости движения подъемных установок, при фотоэлектрическом методе сортировки полезных ископаемых и др.

2.3. Выполнение работы

Для снятия вольтамперных характеристик газонаполненного фотоэлемента используется электрическая схема (см. рис. 3). Тумблер B_7 на стенде ЭС-6 устанавливается в положение "газонаполн", включают тумблер "сеть". Потенциометром R меняют напряжение в пределах, указанных в табл. 2, сначала при световом потоке 0,14 лм, затем 0,28 лм, записывают значения токов.

Результаты измерений

| $U, \text{В}$ | $F_1=0,14 \text{ лм}$ | | | $F_2=0,28 \text{ лм}$ | | |
|---------------|-----------------------|-------------------------|-----------------|-----------------------|-------------------------|-----------------|
| | $J, \text{мкА}$ | $J \cdot R_H, \text{В}$ | $U_a, \text{В}$ | $J, \text{мкА}$ | $J \cdot R_H, \text{В}$ | $U_a, \text{В}$ |
| 0 | | | | | | |
| 50 | | | | | | |
| 100 | | | | | | |
| 150 | | | | | | |
| 200 | | | | | | |
| 250 | | | | | | |
| 300 | | | | | | |



Анодное напряжение U_a вычисляют согласно (6), а чувствительность по формуле (6), взяв за ΔJ разность токов при напряжении 100 В.

По данным табл. 2 строят графики, примерный вид которых приведен на рис. 4.

Рис. 4. Вольтамперная характеристика газонаполненного фотоэлемента

3. СНЯТИЕ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОРЕЗИСТОРА

3.1. Цель работы

Целью работы является изучение внутреннего фотоэффекта

(фотопроводимости) и исследование зависимости фототока от приложенного напряжения.

3.2. Краткая теория

Внутренний фотоэффект наблюдается в полупроводниках и изоляторах. Фотоны освобождают связанные электроны, которые становятся свободными и могут участвовать в переносе заряда.

Если энергия кванта $h\nu$ превышает ширину запрещенной зоны E_0 , то поглотивший квант электрон переходит из валентной зоны в зону проводимости (рис. 5, а), В результате появляется дополнительная к темновой пара носителей тока - электрон и дырка, что проявляется в увеличении электропроводности вещества. Такая *проводимость* называется *собственной*.

Если же в веществе имеются примеси, то электроны под действием света могут переходить из валентной зоны на акцепторные уровни (рис. 5, б) или с донорных уровней в зону проводимости (рис. 5, в). В первом случае возникает дырочная, а во втором - электронная фотопроводимости, обусловленные возрастанием концентрации токоносителей. Энергия кванта при этом механизме должна быть больше энергии ионизации соответствующих примесей (E_a или E_d). Такую проводимость называют примесной.

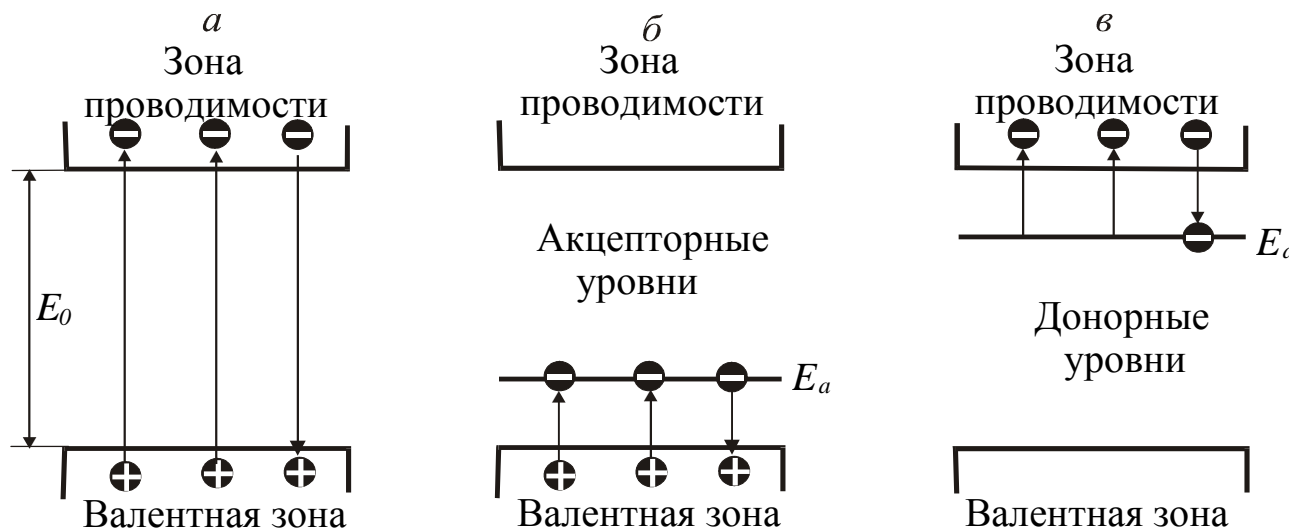


Рис. 5. Зонные схемы возникновения фотопроводимости

Итак, при облучении светом уменьшается электрическое сопротивление, увеличивается электропроводность.

Возбуждение светом носителей тока всегда сопровождается рекомбинацией электронов и дырок. После прекращения освещения

остаются лишь те носители тока, которые возбуждены тепловыми колебаниями атомов, что обуславливает темновую проводимость полупроводника.

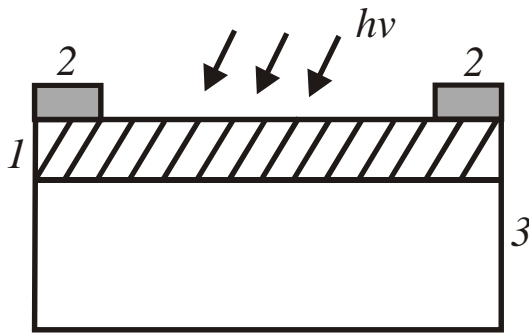


Рис. 6. Устройство фоторезистора

На внутреннем фотоэффекте основано действие фоторезисторов (фотосопротивлений). В данной работе применяется фоторезистор ФСК-1 (рис. 6). Фотоактивным веществом в нем является тонкий слой 1 сульфида кадмия CdS, наносимый напылением на изолирующую подкладку 3. На фотоактивный слой напыляются металлические контакты 2.

Фоторезисторы находят широкое применение в различных схемах автоматики и контроля, а также для целей фотометрии. Их недостатком является заметная инерционность, они не пригодны для регистрации быстропеременных процессов.

3.3. Выполнение работы

Для снятия вольтамперных характеристик ФСК-1 используется схема, изображенная на рис. 7.

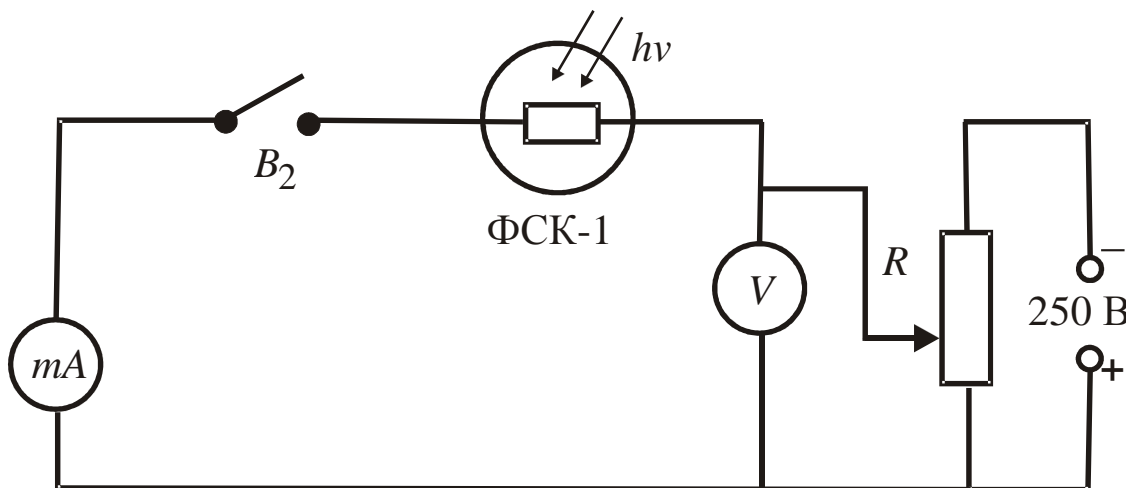


Рис. 7. Схема цепи с фоторезистором

Тумблером B_2 замыкают электрическую цепь. Изменяют напряжение U потенциометром R и записывают в табл. 3 значения токов при разных световых потоках.

Результаты наблюдений

| $U, В$ | $F = 0$ | $F_1 = 0,006 \text{ лм}$ | $F_2 = 0,012 \text{ лм}$ |
|--------|---------|--------------------------|--------------------------|
| | $J, А$ | $J, А$ | $J, А$ |
| 0 | | | |
| 10 | | | |
| 20 | | | |
| 30 | | | |
| 40 | | | |
| 50 | | | |
| 60 | | | |
| 70 | | | |
| 80 | | | |
| 90 | | | |

По результатам измерений строят вольтамперные характеристики (рис. 8), которые у большинства фоторезисторов линейны в широком диапазоне напряжений.

Определяют чувствительность фоторезистора по формуле (6) при напряжении, равном 30 В.

Рассчитывают темновое и световое сопротивления

$$R = \frac{\Delta U}{\Delta J} \quad (7)$$

где ΔU - разность напряжений; ΔJ - соответствующая разность токов.

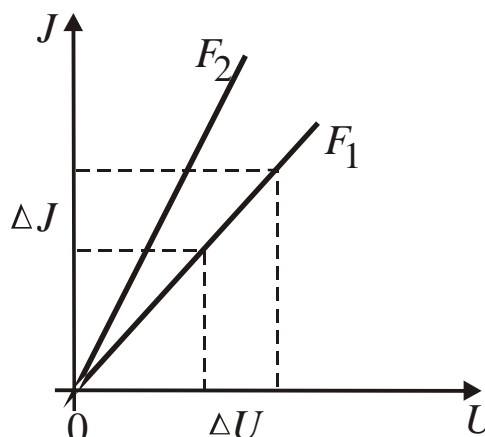


Рис. 8. Вольтамперные характеристики фоторезистора

4. СНЯТИЕ НАГРУЗОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНТИЛЬНОГО ФОТОЭЛЕМЕНТА

4.1. Цель работы

Целью работы является определение фотоэлектродвижущей силы и чувствительности фотоэлемента.

4.2. Краткая теория

Вентильная фотоэлектродвижущая сила является наиболее важной среди других фотоЭДС, наблюдаемых в полупроводниках. Она возникает в случаях, когда светом генерируются носители заряда вблизи потенциального барьера. Генерация токоносителей является результатом внутреннего фотоэффекта. Потенциальные барьеры возникают на *p-n*-переходах, называемых иногда *вентильями* из-за их односторонней проводимости. Поэтому возникающая при освещении *p-n*-переходов ЭДС в физике получила название *вентильной фотоЭДС* (\mathcal{E}_Φ).

Физическая причина возникновения \mathcal{E}_Φ заключается в том, что потенциальный барьер *p-n*-перехода разделяет движущиеся в одном направлении потоки токоносителей, возбуждаемых светом. В физике полупроводников за уровень отсчета энергии электронов и дырок обычно выбирается уровень Ферми. При этом энергия электронов E_e возрастает вверх от уровня Ферми, энергия дырок - вниз от уровня Ферми (рис. 9).

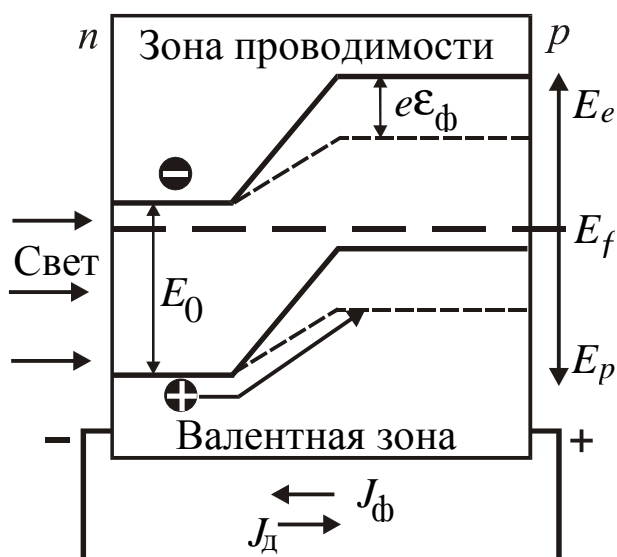


Рис.9. Происхождение вентильной фотоЭДС:

E_0 - ширина запрещенной зоны;

E_f - энергия Ферми

Рассмотрим кристалл полупроводника, в глубине которого создан *p-n*-переход.

На рис. 9 приведена зонная схема *p-n*-перехода (пунктиром показаны края зон при освещении).

Положим, что сильно поглощаемое излучение падает на грань кристалла, параллельную плоскости *p-n*-перехода (в нашем случае на *n*-область).

Будем также считать, что получившийся фотоэлемент разомкнут.

Возникшие в результате внутреннего фотоэффекта на малой глубине от освещаемой поверхности фотоэлектроны и фотодырки будут диффундировать в глубину кристалла. Та их часть, которая не успевает рекомбинировать, достигает *p-n*-перехода. Для основных носителей (электронов *n*-области) *p-n*-переход представляет собой потенциальный барьер, поэтому они не могут перейти в *p*-об-

ласть, для неосновных носителей (дырок в n -области) p - n -переход, в противоположность электронам, представляет собой потенциальную яму, куда они и скатываются, образуя фототок J_Φ , направленный из n - в p -область вентиля. Вследствие протекания фототока p -область вентиля заряжается положительно, n -область - отрицательно, уменьшая при этом потенциальный барьер, существовавший до освещения. Нарушение равновесия зарядов вызывает диффузию основных носителей, стремящихся восстановить равновесие. Диффузионный ток J_d направлен против фототока J_Φ .

В результате между разомкнутыми электродами фотоэлемента устанавливается такая фотоЭДС ε_Φ , при которой результирующий через p - n -переход ток равен нулю. Отметим, что ε_Φ эквивалентна по своему действию на потенциальный барьер некоторому внешнему напряжению, приложенному к p - n -переходу в прямом направлении. Поэтому

$$J_\Phi - J_d = J_\Phi - J_s \left(\exp\left(\frac{q_e \varepsilon}{kT}\right) - 1 \right) = 0, \quad (8)$$

где J_s - темновой ток насыщения вентиля. Отсюда

$$\varepsilon_\Phi = \frac{kT}{q_e} \ln \left(1 + \frac{J_\Phi}{J_s} \right). \quad (9)$$

Если электроды фотоэлемента замкнуты на внешнюю нагрузку (рис. 10), то напряжение U между ними будет меньше ε_Φ , а в цепи потечет не равный нулю ток

$$J = J_\Phi - J_d, \quad (10)$$

определяемый соотношением (8).

При коротком замыкании $U = 0$, а $J = J_\Phi$. На практике такое состояние фотоэлемента не наблюдается, поскольку примыкающие к p - n -переходу n - и p -области обладают некоторым сопротивлением.

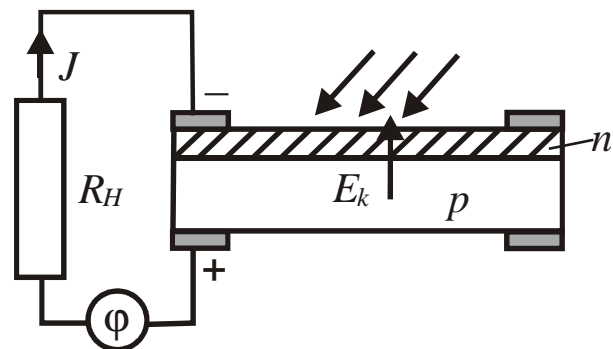


Рис. 10. Устройство вентиляльного фотоэлемента

4.3. Выполнение работы

Для снятия нагрузочных характеристик вентильного фотоэлемента используется схема, изображенная на рис. 11.

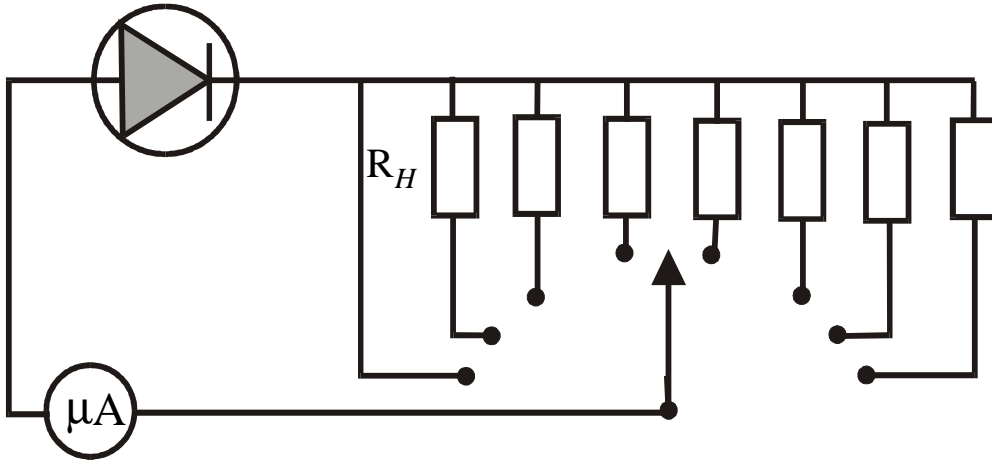
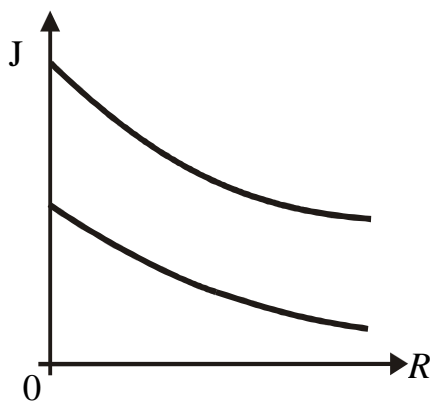


Рис. 11. Схема цепи фотогенератора

Тумблер B_3 на стенде устанавливают в положение "фотогенератор". Меняют сопротивление R_H от нуля до 5,1 кОм и записывают в табл. 4 значения токов сначала при потоке F_1 , затем при потоке F_2 . Строят нагрузочные характеристики (рис. 12).

Таблица 4

Результаты измерений



| R_H , кОм | $F_1=0,001$ лм | $F_2=0,002$ лм |
|-------------|----------------|----------------|
| | J , мкА | J , мкА |
| 0,0 | | |
| 0,51 | | |
| 1,0 | | |
| 2,0 | | |
| 3,0 | | |
| 5,1 | | |

Рис. 12. Нагрузочная характеристика фотогенератора

При сопротивлении, равном 0,51 кОм, определяют чувствительность вентильного фотоэлемента по формуле (6) и два значения фотоЭДС

(внутреннее сопротивление фотогенератора r равно 10 кОм)

$$\varepsilon_{\Phi} = J(R_{\text{H}} + r) . \quad (11)$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сформулируйте законы Столетова для внешнего фотоэффекта.
2. Запишите уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.
3. Поясните устройство и принцип действия вакуумного и газонаполненного фотоэлементов.
4. Как определяется чувствительность фотоэлемента?
5. В чем заключается явление внутреннего фотоэффекта?
6. Какой вид имеет вольтамперная характеристика фоторезистора?
7. Что называется нагрузочной характеристикой фотогенератора?
8. По какой формуле подсчитывается фотоэлектродвижущая сила, возникающая в вентильном фотоэлементе?
9. Задача. Длина волны света, соответствующая красной границе фотоэффекта, для некоторого металла $\lambda_0 = 275$ нм. Найти наименьшую энергию ε фотона, вызывающего фотоэффект.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бушманов, Б. Н., Хромов, Ю. А.* Физика твердого тела / Б. Н. Бушманов, Ю. А. Хромов.- М.: Высш. школа, 1971.- 224 с.
- Савельев, И. В.* Курс общей физики. Т. 3 / И. В. Савельев.- М.: Наука, 1971.- 304 с.
- Бонч-Бруевич, В. Л., Калашников, С. Г.* Физика полупроводников / В. Л. Бонч-Бруевич, С. Г. Калашников.- М.: Наука, 1977.- с. 355 - 359.
- Ландсберг Г.С.* Общий курс физики. Оптика / Г. С. Ландсберг.- М.: Наука, 1976.- 928 с.
- Тугов Н.М., Глебов Б.А., Чарыков Н.А.* Полупроводниковые приборы: Учебник для вузов / Н. М. Тугов, Б. А. Глебов, Н. А. Чарыков.- М.: Энергоатомиздат, 1990.- 576 с.