

Министерство образования и науки РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени С. М. Кирова»

Кафедра физики

ОПТИКА

Лабораторная работа № 14

ИЗУЧЕНИЕ ВЕНТИЛЬНОГО ФОТОЭЛЕМЕНТА

Методические указания
к лабораторной работе в практикуме по физике
для студентов всех направлений и видов обучения

Санкт-Петербург
2012

Рассмотрены и рекомендованы к изданию
учебно-методической комиссией
факультета химической технологии и биотехнологии
Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета
25 января 2012 г.

Составители:

кандидат физико-математических наук, доцент **Л. П. Казакова**,
ведущий инженер **М. С. Качарова**

Отв. редактор

доктор физико-математических наук, профессор **С. М. Герасюта**

Рецензент

кафедра физики СПбГЛТУ

Изучение вентильного фотоэлемента: методические указания к лабораторной работе / сост.: Л. П. Казакова, М. С. Качарова. – СПб.: СПбГЛТУ, 2012. – 16 с.

Методические указания к лабораторной работе по разделу «Оптика» предназначены для студентов всех направлений и видов обучения.

ВВЕДЕНИЕ

Для изготовления вентильного фотоэлемента используются *полупроводники*. К полупроводникам относится очень широкий класс веществ. Удельное сопротивление полупроводников может иметь весьма различные значения от $10^{-5} - 10^{-4}$ Ом · см, обычного для металлов, до 10^{12} Ом · см, типичного для изоляторов. Полупроводниковые материалы обладают замечательными особенностями. Их свойствами можно управлять в широких пределах при введении в них примесей или воздействуя на них электрическим и магнитными полями, светом и другими факторами.

Полупроводниковые приборы широко используются в радиоэлектронике, автоматике и вычислительной технике, в квантовой электронике. Солнечные батареи снабжают электроэнергией приборы на космических аппаратах, термоэлектрогенераторы заменяют батареи питания, широко применяются полупроводниковые выпрямители и оптические квантовые генераторы (лазеры).

Полупроводники – это твердые тела, состоящие, как и все тела, из атомов, между которыми действуют связи, определяющие сформированные кристаллографические структуры. При образовании твердого тела атомы сближаются на расстояния порядка 10^{-10} м. На таких расстояниях электрон притягивается не только ядром «своего» атома, но и ядрами соседних атомов, что приводит к ослаблению связи этого электрона со своим ядром. Кроме того, возникают и *квантово-механические* эффекты. Основным из них является появление возможности перехода электрона от атома к атому без изменения энергии, т. е. электрон может перемещаться по горизонтальному энергетическому уровню (это *туннельный эффект*). Возникновение туннельного эффекта при сближении атомов приводит к расщеплению изолированных уровней энергий электронов атомов в полосы или зоны уровней. Каждая такая зона состоит из N уровней (N – число атомов в кристалле), находящихся на небольшом энергетическом расстоянии друг от друга. Расстояние между уровнями энергий электронов в зоне очень мало и его можно оценить из таких соображений: экспериментальные значения ширины зоны разрешенных уровней порядка 1 эВ; число уровней порядка числа Авогадро: 10^{23} см⁻³.

Таким образом, с точки зрения *зонной теории*, дискретные изолированные уровни энергий электронов в атомах, при сближении атомов до обычных для твердых тел межуатомных расстояний, образуют зоны разрешенных энергетических состояний (*разрешенные зоны*), разделенные полосами или зонами, в которых лежат такие значения энергий (E), которые по законам квантовой механики не могут иметь электроны в твердом теле, т. е. *запрещенными зонами* (рис. 1).

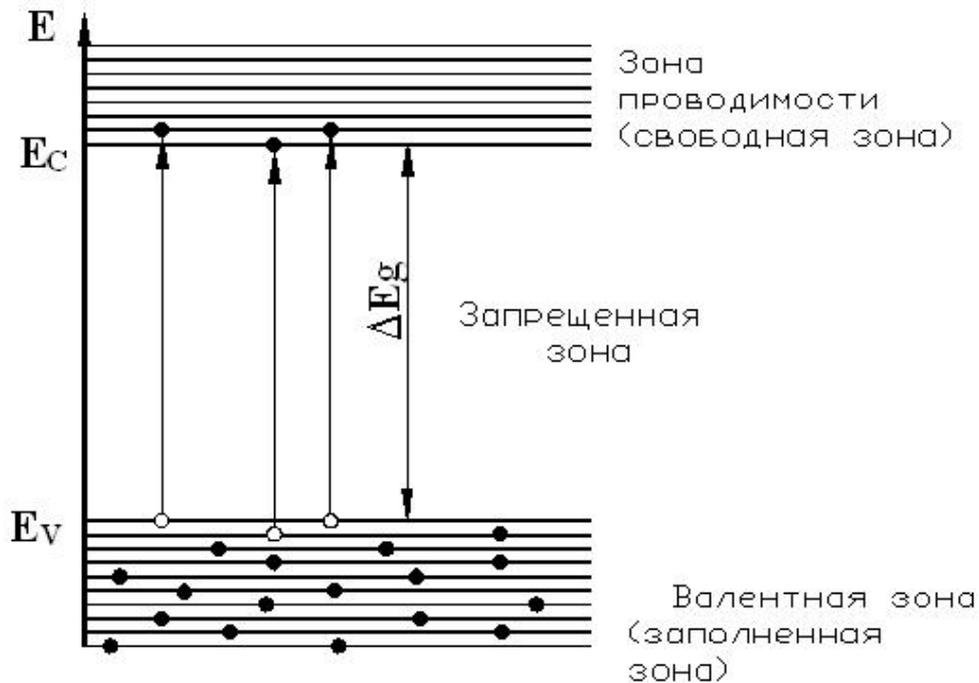


Рис. 1. Энергетическая диаграмма собственного полупроводника (черные точки – электроны, светлые точки – дырки)

Согласно *принципу Паули*, существующему в квантовой механике, на одном энергетическом уровне могут находиться только два электрона с противоположно направленными спинами. При этом ниже лежащие уровни всегда должны быть заполненными, чтобы кристалл имел минимальную полную энергию.

Из разрешенных зон обычно рассматривают две зоны: самую верхнюю из зон, целиком заполненных электронами, называемую *валентной* или просто *заполненной*, и лежащую над ней – *зону проводимости* или *свободную зону*. Энергетический промежуток ΔE_g , отделяющий эту зону от валентной, равен ширине запрещенной зоны (рис. 1).

В полупроводниках при $T = 0$ К валентная зона полностью заполнена валентными электронами, участвующими в междоатомных связях, а состояния в зоне проводимости пусты. На рис. 1 E_V – максимальная энергия электронов в связанном состоянии, а E_C – минимальная энергия, которую может иметь свободный электрон.

Переход электрона из валентной зоны в зону проводимости возможен при разрыве связи, на что необходимо затратить энергию $\Delta E \geq \Delta E_g$, которая может быть получена при нагреве, при действии достаточно сильного электрического поля или электромагнитного излучения.

При $T > 0$ К электроны, попавшие в свободную зону, где есть множество очень близких вакантных уровней (рис. 1), могут ускоряться электрическим полем и участвовать в переносе тока. Поэтому свободную зону

называют зоной проводимости, а попавшие в нее электроны – электронами проводимости.

Уход электрона из валентной зоны сопровождается появлением в ней вакантного (свободного) места, получившего название *дырки*. Электроны валентной зоны под действием электрического поля способны также совершать внутризонные переходы. Такие переходы возможны, очевидно, только на те уровни, где образовались дырки. В результате этих переходов дырки начинают перемещаться в пределах валентной зоны вниз. В кристалле дырка перемещается под действием электрического поля в направлении, противоположном перемещению электрона, что равносильно перемещению положительного заряда. Это позволяет рассматривать дырки как квазичастицы (приставка «квази» означает «как бы»), несущие на себе положительный заряд.

В идеально чистом (*собственном*) полупроводнике концентрации дырок и свободных электронов одинаковы (рис. 1). Проводимость в равной степени обуславливается обоими типами зарядов и носит название *собственной*. В обычных условиях собственная проводимость встречается очень редко. На практике для изготовления полупроводниковых приборов используются полупроводники, проводимость которых определяется наличием в них примеси. К примесям относятся атомы посторонних элементов; избыточные (по сравнению со стехиометрическим составом) атомы элементов, входящих в полупроводники; всевозможные дефекты кристаллической решетки: пустые узлы, атомы или ионы, внедренные в междуузлия решетки, трещины и т. п. Введение примеси сильно влияет на проводимость и другие свойства полупроводников.

Примеси бывают двух родов: *донорные* и *акцепторные*. Атомы донорной примеси имеют валентность большую, чем атомы кристалла полупроводника. Введение донорной примеси приводит к появлению в запрещенной зоне локального энергетического уровня E_D вблизи дна зоны проводимости (рис. 2).

При $T = 0$ К на этом уровне находятся валентные электроны атомов примеси, которые служат дополнительным источником электронов в кристалле. Для перехода электронов с этого уровня в зону проводимости нужна энергия ΔE_D , много меньшая ширины запрещенной зоны (рис. 2). Поэтому концентрация электронов проводимости n_3 при $T > 0$ К резко повышается и становится много больше концентрации дырок n_d . Полупроводник, у которого основными носителями тока являются электроны ($n_3 > n_d$), называется *электронным* или *полупроводником n -типа* (от слова negative – отрицательный).

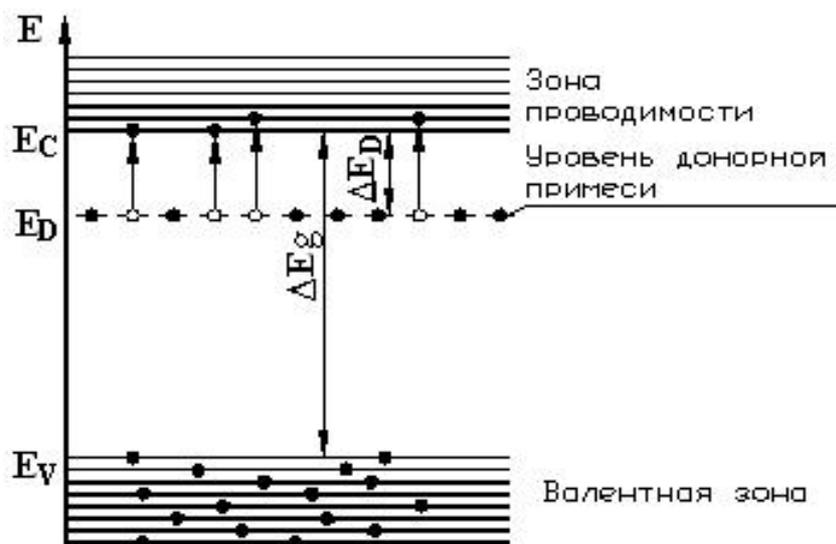


Рис. 2. Энергетическая диаграмма полупроводника *n*-типа с донорной примесью

Примесь называется акцепторной, если она увеличивает концентрацию дырок в кристалле. В этом случае дырки становятся основными носителями тока ($n_d > n_s$), и полупроводник называют *дырочным* или *полупроводником *p*-типа* (от слова positive – положительный). Атомы акцепторной примеси имеют валентность меньшую, чем основные атомы кристалла. Введение акцепторной примеси приводит к появлению в запрещенной зоне локального энергетического уровня E_A вблизи потолка валентной зоны (рис. 3).



Рис. 3. Энергетическая диаграмма полупроводника *p*-типа с акцепторной примесью

Состояния на этом уровне пусты при $T = 0$ К, поэтому при $T > 0$ К в них легко (т. к. $\Delta E_A \ll \Delta E_g$) переходят электроны из валентной зоны, что приводит к резкому увеличению концентрации дырок в полупроводнике.

В данной работе исследуется *вентильный фотоэлемент*. Действие вентильных фотоэлементов основано на свойствах контакта двух полупроводников с разными типами проводимости, называемого *p-n-переходом*.

В момент контакта полупроводников *p*- и *n*-типа (рис. 4, а) по обе стороны границы раздела имеются области, в одной из которых находится много свободных электронов (*n*-область), в другой – много свободных дырок (*p*-область).

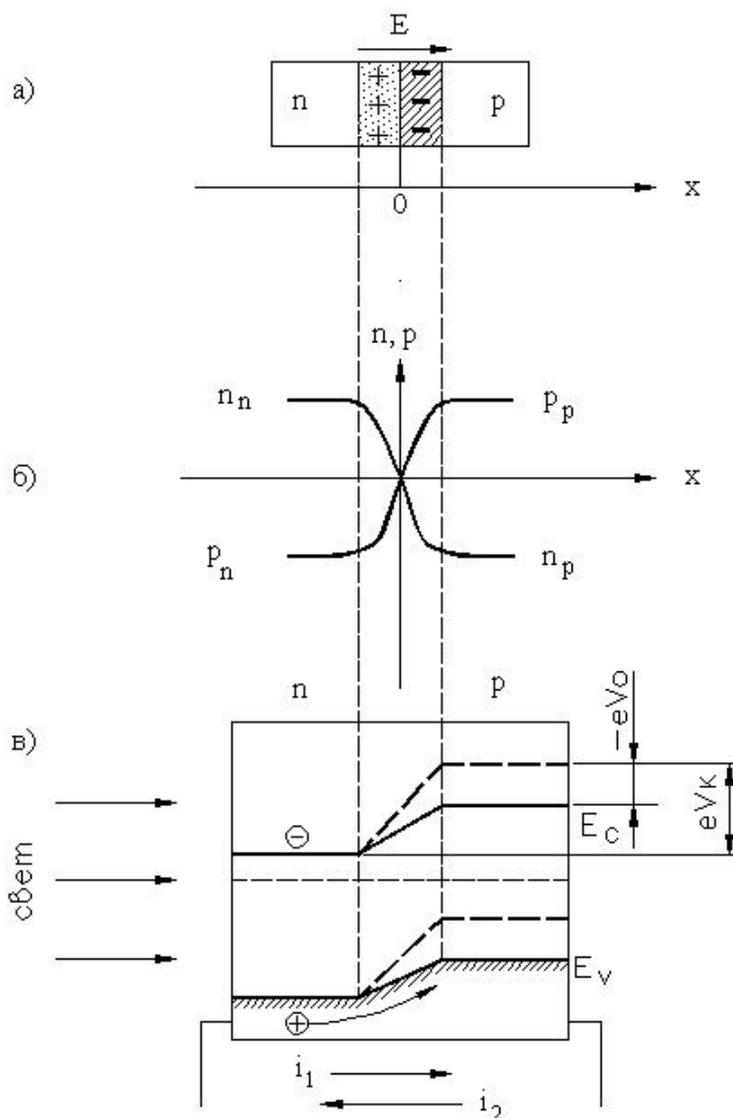


Рис. 4. Происхождение вентильной фото-ЭДС:

- а) контакт полупроводников *n*- и *p*-типа (формирование *p-n*-перехода);
- б) распределение концентраций электронов n_p, n_n и дырок p_p, p_n в приконтактных *p*- и *n*-областях (нижний индекс) соответственно; в) энергетическая диаграмма *p-n*-перехода (пунктиром показаны края энергетических зон в темноте)

При соприкосновении этих областей происходит процесс *диффузии* свободных носителей тока из одной области в другую, направленный на выравнивание концентраций дырок и электронов по обе стороны от границы.

Таким образом, в месте контакта возникают встречные потоки диффундирующих дырок и электронов. Сталкиваясь в пограничной области, электрон и дырка взаимно уничтожают друг друга (*рекомбинируют*), и тонкий слой (порядка 10^{-5} см) в области контакта оказывается почти полностью лишенным свободных зарядов. Уход дырок из полупроводника *p*-типа приводит к возникновению в приконтактной области объемного отрицательного заряда, образованного нескомпенсированными зарядами отрицательных ионов акцепторной примеси. Соответственно, уход электронов из полупроводника *n*-типа приводит к тому, что оказываются нескомпенсированными заряды ионов донорной примеси и в приконтактной области возникает объемный положительный заряд. Таким образом, возникает двойной электрический слой, который состоит из положительных ионов и дырок в *n*-области и отрицательных ионов и электронов в *p*-области (рис. 4, а). Этот слой называют запирающим, т. к. создаваемое им электрическое поле, направленное от *n*-области к *p*-области, препятствует дальнейшим переходам *основных* носителей – электронов из полупроводника *n*-типа и дырок из полупроводника *p*-типа. В результате устанавливается равновесие, при котором поле объемного заряда уравнивается определенным распределением концентраций электронов и дырок по обе стороны от границы. Это распределение симметрично при равенстве концентраций примесей в *n*- и *p*-областях (рис. 4, б).

Наличие электрического поля в области *p-n*-перехода связано с контактной разностью потенциалов V_k и приводит к искривлению энергетических уровней (рис. 4, в). Вследствие этого, как видно из рис. 4, в, для электронов, находящихся в полупроводнике *n*-типа, появляется энергетический (потенциальный) барьер eV_k , препятствующий их переходу в полупроводник *p*-типа (e – заряд электрона). Аналогичный барьер возникает для дырок в полупроводнике *p*-типа. В этих условиях диффузионный ток электронов и дырок компенсируется дрейфовым током, обусловленным движением *неосновных* носителей заряда: дырок из полупроводника *n*-типа и электронов из полупроводника *p*-типа по направлению электрического поля, возникшего в области *p-n*-перехода. Таким образом, в состоянии термодинамического равновесия (в темноте) суммарный ток через *p-n*-переход равен нулю.

В результате теоретического рассмотрения *p-n*-перехода получены следующие соотношения для концентраций основных (p_p, n_n) и неосновных носителей заряда (p_n, n_p):

$$p_n = p_p e^{\frac{-eV_k}{kT}}; \quad n_p = n_n e^{\frac{-eV_k}{kT}}; \quad (1)$$

где p_p , p_n и n_p , n_n – концентрации дырок и электронов в p - и n -областях (нижний индекс) соответственно; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Если к p - n -переходу приложить внешнее напряжение V , то он проявит свои выпрямляющие свойства. При подаче напряжения в *пропускном* направлении (минус к n -области) высота потенциального барьера снижается на величину eV по сравнению с равновесным состоянием. В этом случае большое число электронов переходит в p -область и большое число дырок в n -область, причем, в каждой из этих областей введенные носители заряда являются неосновными. В результате в приконтактной области концентрация электронов и дырок будет повышена на величину $\Delta n = \Delta p$ по сравнению с равновесным состоянием, т. е. происходит *инжекция* неравновесных неосновных носителей заряда. Согласно теории p - n -перехода с увеличением напряжения V концентрация инжектируемых неосновных носителей заряда резко возрастает в соответствии со следующими формулами:

$$\Delta p = p_n \left(e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right); \quad \Delta n = n_p \left(e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right); \quad (2)$$

что приводит к сильному росту тока через p - n -переход в пропускном направлении:

$$i = i_s \left(e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right), \quad (3)$$

где i_s – ток насыщения, обусловленный прохождением через переход неосновных носителей заряда, для которых нет барьера при приложении к p - n -переходу напряжения, *обратного* пропускному направлению, поэтому дырки из n -области будут затягиваться в p -область, а электроны из p -области – в n -область.

При обратном направлении внешнего поля (плюс к n -области) потенциальный барьер повышается на величину eV – это *запорное* направление. При этом основные носители заряда уходят из приконтактной области, а ток через p - n -переход в запорном направлении обусловлен лишь незначительной концентрацией неосновных носителей заряда, поэтому ток очень мал и с увеличением обратного напряжения (V) вначале растет, а затем стремится к величине i_s , называемой током насыщения.

В области p - n -перехода может наблюдаться *вентильный фотоэффект*. Он заключается в возникновении под действием света электродвижущей силы (*фото-ЭДС*). Рассмотрим механизм ее возникновения.

Пусть свет падает на p - n -переход со стороны n -области (рис. 4, в) и поглощается в ней. При этом наблюдается *внутренний фотоэффект*,

который состоит в вызванных излучением переходах электронов из валентной зоны в зону проводимости (если энергия фотонов больше или равна ширине запрещенной зоны: $E_{\text{ф}} = h\nu \geq \Delta E_g$, где h – постоянная Планка, ν – частота излучения). В результате появляются дополнительные пары электрон – дырка (*фотоэлектрон* и *фотодырка*) как в p -, так и n -областях, что проявляется в увеличении электропроводности вещества. Возникающая в полупроводнике световая добавка к электропроводности называется *фотопроводимостью*.

Будем считать для начала, что фотоэлемент разомкнут. Фотоэлектроны и фотодырки будут диффундировать в глубь кристалла, и некоторая их доля, не успевшая рекомбинировать (на поверхности и в объеме), достигнет p - n -перехода, который разделяет потоки фотодырок и фотоэлектронов. Так для основных носителей (в n -области) – электронов – в p - n -переходе существует потенциальный барьер, и поэтому практически все они не пройдут в p -область. Напротив, для неосновных носителей – дырок – потенциального барьера нет и все достигшие p - n -перехода фотодырки будут затягиваться полем перехода в глубь кристалла, создавая ток i_1 (*фототок*). Величина i_1 определяется числом неравновесных дырок, созданных светом и дошедших до p - n -перехода. Если через I обозначим число квантов света, падающих каждую секунду на единицу поверхности, β – квантовый выход их, т. е. количество пар носителей, возникающих на один падающий квант света, а через g долю непрорекомбинировавших пар носителей заряда, пришедших к p - n -переходу, то

$$i_1 = eg\beta IS, \quad (4)$$

где S – освещаемая площадь. Так как количество рождающихся в единицу времени носителей заряда пропорционально световому потоку I , то очевидно, что фототок возрастает с увеличением освещенности – ϵ .

Вследствие появления фототока p -область будет заряжаться положительно, а n -область – отрицательно, и между электродами элемента появится разность потенциалов. Таким образом, разделение зарядов приводит к появлению дополнительной составляющей электрического поля, и, следовательно, к возникновению на p - n -переходе разности потенциалов, представляющей собой для внешней цепи фото-ЭДС (V_0). Вместе с тем происходит изменение и потенциального барьера, существующего в неосвещенном p - n -переходе. Возникшая фото-ЭДС уменьшает этот барьер на величину eV_0 (рис. 4, в). Поэтому в фотоэлементе, который представляет собой обычный диод с p - n -переходом, возникнет еще дополнительный ток i_2 (рис. 4, в), обусловленный инжекцией дырок в n -область и электронов в p -область и направленный противоположно току i_1 . Этот ток по своему характеру подобен протекающему через p - n -переход току, который имеет

место при приложении к переходу пропускного напряжения [см. формулу (3)]. В условиях термодинамического равновесия между разомкнутыми электродами фотоэлемента установится такое напряжение V_0 , при котором полный ток $i = i_1 - i_2 = 0$.

Если электроды фотоэлемента замкнуты на внешнюю нагрузку, то напряжение между ними V будет меньше V_0 и токи i_1 и i_2 уже не будут компенсировать друг друга. Поэтому в цепи возникнет ток

$$i = i_1 - i_2 = i_1 - i_s \left(e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right). \quad (5)$$

Соотношение (5) является основным в теории вентильных фотоэлементов. Полагая в формуле (5) $i = 0$ (разомкнутая цепь), находим, что вентильная фото-ЭДС элемента равна:

$$V_0 = \frac{kT}{e} \ln \left(1 + \frac{i_1}{i_s} \right). \quad (6)$$

Используя в этом выражении формулу (4) для i_1 , получаем:

$$V_0 = \frac{kT}{e} \ln \left(1 + \frac{eg\beta SI}{i_s} \right). \quad (7)$$

При большом уровне освещения, когда $i_1 / i_s \gg 1$, из формулы (7) имеем:

$$V_0 = \frac{kT}{e} \ln \frac{eg\beta SI}{i_s}. \quad (8)$$

При малом уровне возбуждения, когда $i_1 / i_s \ll 1$, разлагая логарифм в ряд, из формулы (7), получаем:

$$V_0 = kT \frac{g\beta SI}{i_s}. \quad (9)$$

То есть вентильная фото-ЭДС при малом уровне возбуждения пропорциональна интенсивности света и, следовательно, освещенности. С увеличением освещенности (т. е. с увеличением фототока i_1) ЭДС увеличивается, однако не пропорционально i_1 , а по логарифмическому закону. Конечно, это увеличение происходит не беспредельно, так как при возрастании освещенности уменьшается высота потенциального барьера в p - n -переходе, и, когда барьер становится порядка kT , увеличение ЭДС прекращается. Отсюда следует, что вентильная фото-ЭДС не может превышать контактную разность потенциалов между p - и n -областями.

Вентильные фотоэлементы представляют собой своеобразные источники тока, преобразующие световую энергию в электрическую.

Если p - и n - области кристалла подключить к внешней нагрузке, в ней будет течь ток. При не очень больших освещенностях сила тока пропор-

циональна падающему на кристалл световому потоку. На этом основано действие фотоэлектрических фотометров, например, применяемых в фотографии экспонометров. Несколько десятков соединенных последовательно кремниевых *p-n*-переходов образуют солнечную батарею. Такие батареи применяются для питания радиоаппаратуры на космических ракетах и спутниках Земли. Из существующих сейчас таких источников наибольшим КПД (19–25 %) обладают Si – и GaAs – фотоэлементы. В земных условиях солнечные батареи используются для питания устройств автоматики, навигационных указателей, переносных радиостанций и др.

В лабораторной практике широко используются вентильные селеновые фотоэлементы (ФЭ). Спектральная чувствительность этих ФЭ близка к чувствительности человеческого глаза: максимум чувствительности приходится на желто-зеленые лучи 0,55 мкм. В фотоэлементе, изучаемом в данной работе, одним электродом служит металлическая (железная) пластинка, на которую нанесен слой селена с дырочной проводимостью (*p*-тип). Вторым электродом является тонкий полупрозрачный слой золота, напыленный на селен. В процессе обработки некоторая часть атомов золота диффундирует в селен. Тот слой селена, в глубину которого проникли атомы золота, приобретает электронную проводимость и становится полупроводником *n*-типа. Таким образом, внутри селена осуществляется *p-n*-переход. При освещении фотоэлемента образуется фото-ЭДС, причем, железная пластинка служит положительным электродом, а слой золота – отрицательным.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Работа посвящена изучению вентильного фотоэлемента (селенового).

Для исследования вентильного фотоэлемента используется установка, позволяющая измерять фототок и фото-ЭДС, возникающие в нем при освещении. Схема установки представлена на рис. 5 и 6.

Как видно из рис. 5, используемый в данной работе селеновый фотоэлемент освещается белым светом, испускаемым лампой накаливания с известной силой света ($J = 40$ кд). Сила света характеризует световой поток Φ , испускаемый источником в единичный телесный угол Ω : $J = \frac{d\Phi}{d\Omega}$. За единицу

силы света принимается кандела – 1 кд = 1 лм/стер, единицей светового потока является люмен (1 лм = 1/683 Вт).

Фотоэлемент и лампа находятся на оптической скамье (см. рис. 5), что позволяет определять расстояние между ними. Освещенность фотоэлемента ϵ можно изменять, перемещая его по оптической скамье. Освещенностью называют величину, численно равную световому потоку, приходящемуся

на единицу площади S освещаемой поверхности: $\varepsilon = \frac{d\Phi}{dS}$. За единицу освещенности принимается люкс – 1 лк = 1 лм/м².

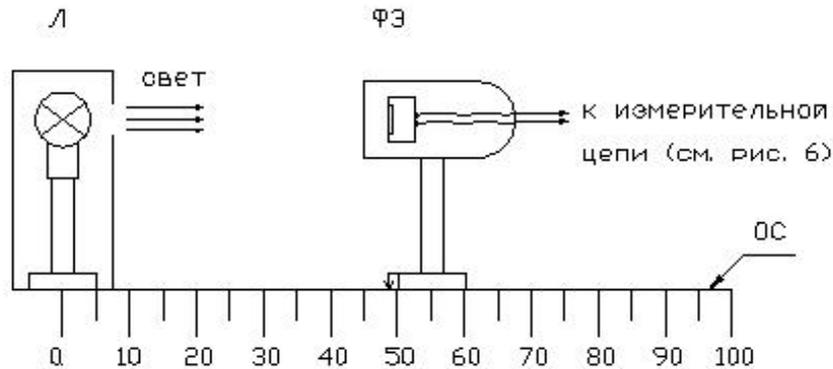


Рис. 5. Схема оптической части установки для исследования вентильного фотоэлемента (ФЭ): Л – лампа накаливания; ОС – оптическая скамья

Из фотометрии известно, что освещенность – ε и сила света – J связаны следующим соотношением:

$$\varepsilon = \frac{J}{r^2} \cos \alpha, \quad (10)$$

где r – расстояние до источника; α – угол между лучом и нормалью к поверхности фотоэлемента.

В данной лабораторной работе с помощью измерительной цепи, схема которой изображена на рис. 6, определяются следующие характеристики фотоэлемента:

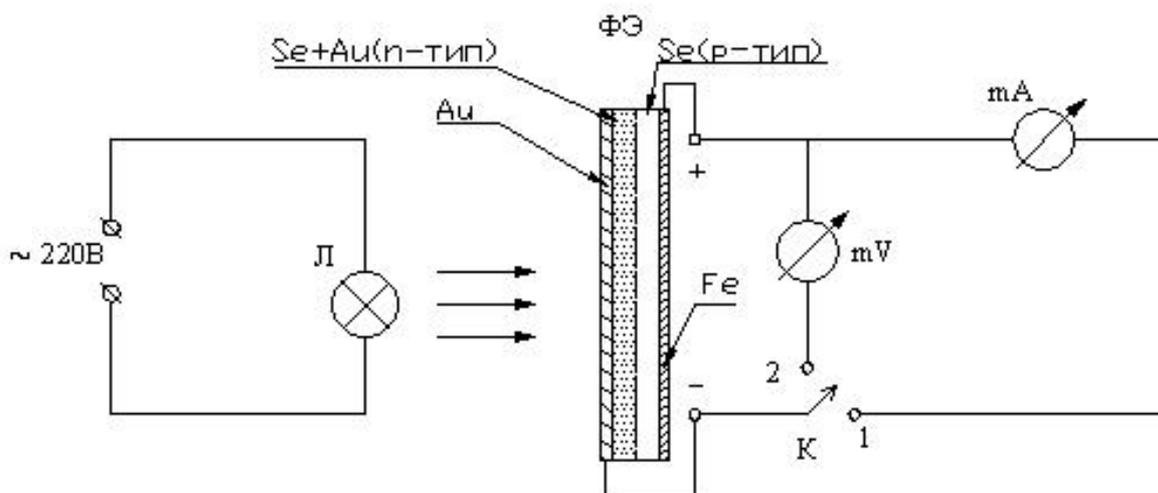


Рис. 6. Схема измерительной цепи в установке для исследования вентильного фотоэлемента – ФЭ: К – переключатель; mV – милливольтметр; mA – миллиамперметр

1. Зависимость силы фототока от освещенности поверхности фотоэлемента: $i = f(\epsilon)$.

2. Интегральная чувствительность фотоэлемента (γ), т. е. чувствительность к белому свету. Чувствительность численно равна силе фототока, возникающего в цепи фотоэлемента, когда световой поток, падающий на него, равен одному люмену: $\gamma = i / \Phi = i / \epsilon S$.

Чувствительность можно определить из графика зависимости $i = f(\epsilon)$, которая имеет линейный характер. Определив угловой коэффициент прямой, т. е. отношение $\Delta i / \Delta \epsilon$ (с учетом выбранного масштаба), и зная площадь фотоэлемента S , можно найти γ , мкА/(лк·м²) по формуле

$$\gamma = \Delta i / \Delta \epsilon S. \quad (11)$$

3. Зависимость фото-ЭДС от освещенности: $V_0 = f(\epsilon)$.

4. Сопротивление фотоэлемента: R .

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Поместите фотоэлемент вблизи конца оптической скамьи, например, на расстоянии $r = 75$ см от лампы. Включите лампу накаливания и отвинтите с кожуха фотоэлемента крышку. Запишите в таблицу значение r .

2. Измерьте силу фототока i и ЭДС V_0 , соединяя фотоэлемент, согласно схеме измерительной цепи, приведенной на рис. 6, с помощью переключателя сначала с микроамперметром, а потом с милливольтметром.

3. Уменьшите на 5 см расстояние r и снова измерьте i и V_0 . Сделайте еще 8–10 подобных измерений.

4. Результаты измерений занесите в таблицу:

№ п/п	r , см	r^2 , м ²	ϵ , лк	i , мкА	V_0 , мВ	R , Ом
1						
2						
3						
.						
.						
.						
10						

5. Вычислите значения освещенности фотоэлемента ϵ при всех его положениях по формуле (10) и занесите их в таблицу.

Величины силы света, испускаемого лампой накаливания, и площадь фотоэлемента указаны на рабочем столе.

6. Определите сопротивление фотоэлемента R по закону Ома и занесите значения в таблицу.

7. Постройте графики: $i = f(\varepsilon)$ и $V_0 = f(\varepsilon)$.
8. Найдите по графику $i = f(\varepsilon)$ значение углового коэффициента $\Delta i / \Delta \varepsilon$. Вычислите значение γ по формуле (11).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие вещества относятся к полупроводникам? Какими свойствами они характеризуются? Где они используются?
2. Какие полупроводники называются собственными? Как объяснить с точки зрения зонной теории механизм собственной проводимости полупроводников?
3. Какие полупроводники называются электронными или n -типа? Каким путем могут быть созданы такие полупроводники?
4. Какие полупроводники называются дырочными или p -типа? Как создаются такие полупроводники?
5. Как возникает p - n -переход и каковы его свойства?
6. В чем состоит явление вентильного фотоэффекта? При каком соотношении между шириной запрещенной зоны и энергией кванта света может наблюдаться внутренний фотоэффект?
7. В чем состоит явление фотопроводимости? Как можно объяснить зависимость фототока от освещенности с точки зрения квантовой теории света?
8. Каков принцип действия вентильного фотоэлемента? Объясните механизм возникновения фото-ЭДС.
9. Что характеризует интегральная чувствительность фотоэлемента?

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Шалимова, К. В. Физика полупроводников / К. В. Шалимова. – М., 1971.
2. Трофимова, Т. И. Курс физики / Т. И. Трофимова. – М., 2007.
3. Савельев, И. В. Курс общей физики / И. В. Савельев. – М., 2005.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Цель работы и методика измерений.....	12
Порядок выполнения работы.....	14
Контрольные вопросы	15
Рекомендуемая литература.....	15

Составители:
Казакова Людмила Павловна
Качарова Маргарита Семеновна

ОПТИКА

Лабораторная работа № 14

ИЗУЧЕНИЕ ВЕНТИЛЬНОГО ФОТОЭЛЕМЕНТА

Методические указания
к лабораторной работе в практикуме по физике
для студентов всех направлений и видов обучения

Редактор *Л. В. Лукьянчук*
Компьютерная верстка – *Р. П. Абакаров*

Подписано в печать с оригинал-макета 05.03.12.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Печать трафаретная.
Уч.-изд. л. 1,0. Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 55. С 187.

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет
Издательско-полиграфический отдел СПбГЛТУ
194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., 5.