

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский горный университет**

Кафедра общей и технической физики

**ФИЗИКА
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ**

*Методические указания к лабораторным работам
для студентов всех специальностей и направлений подготовки*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2023**

УДК 539.2/145.+536.2.02 (073)

ФИЗИКА. Фотоэлектрические преобразователи: Методические указания к лабораторным работам / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *Т.В. Стоянова, Н.А. Тулицкая*. СПб, 2023. 23 с.

Методические указания к лабораторной работе «Фотоэлектрические преобразователи» являются частью цикла методических указаний к лабораторным работам по дисциплине «Физика. Основы физики твёрдого тела».

Методические указания разработаны в соответствии с требованиями Федеральных Государственных образовательных стандартов (ФГОС 3).

Предназначены для студентов всех специальностей и направлений подготовки Горного университета.

Авторы методических указаний выражают благодарность доц. И.И. Парфёновой за подготовку материалов.

Научный редактор д.ф.-м.н. *А.С. Мустафаев*

Рецензент к.т.н., с.н.с., *Л.С. Вавилова* (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН)

© Санкт-Петербургский
горный университет, 2023

ВВЕДЕНИЕ

В описании лабораторной работы кратко изложены теоретические основы работы фотоэлектрических преобразователей, для более глубокого ознакомления с физическими процессами, происходящими при преобразовании световой энергии в электрическую, рекомендуется литература [1– 5]. Данные методические указания содержат краткую теорию изучаемого явления, описание лабораторной установки и методику выполнения физического эксперимента. Примерная схема записи результатов измерений и их обработки (формы таблиц, отчёта, некоторые параметры измеряемого образца) приведены на рабочих местах. Вопросы к зачёту в конце каждого описания позволяют студенту проверить свои знания по данной теме. Требования к оформлению отчета изложены ниже.

1. РЕКОМЕНДАЦИИ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Целью лабораторных работ является приобретение студентами практических навыков в проведении физического эксперимента, что включает в себя ознакомления с методиками измерения физических величин, обучение работе с измерительными приборами, методам и способам их правильного применения. Студенту предстоит совершенствовать свои навыки использования компьютера для написания отчетов и оформления графиков.

Прежде, чем приступить к изучению описания лабораторной работы, рекомендуется ознакомиться с общей теоретической частью методического указания [4] – основами зонной теорией твёрдого тела.

При подготовке к экспериментальной части лабораторной работы студенту необходимо оформить заготовку, которая должна содержать:

- 1.Цель работы;
- 2.Схема экспериментальной установки с указанием и расшифровкой её основных элементов;

3. Основные рабочие формулы, с расшифровкой величин, входящих в формулу и их размерности;

4. Таблица для записи результатов измерений.

5. Исходные данные.

Титульный лист заготовки оформляется в соответствии с правилами оформления титульных листов лабораторных работ.

Заполнение таблицы с результатами измерений следует проводить аккуратно, в строгом соответствии с показаниями приборов. Результаты измерений необходимо записывать непосредственно такими, какими они сняты с приборов, без какой-либо предварительной обработки. В случае, если измерение выглядит неправдоподобно, необходимо перепроверить схему подключения прибора и аккуратно повторить измерение.

На основе данных, полученных в результате проведения лабораторной работы и изложенных в заготовке, оформляется отчет. Требования к отчету изложены на стр. 22.

Контрольные вопросы приведены на стр. 23.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Цель работы:

Целью работы является исследование работы фотоэлектрических преобразователей (солнечной батареи) и изучение их основных характеристик.

2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Фотоэлектрические преобразователи или фотоэлементы являются источником электроэнергии, который генерирует электрическое напряжение за счёт поглощения света, испускаемого внешними источниками. В случае поглощения фотоэлектрическим преобразователем видимого (солнечного) света его называют *солнечным элементом или солнечной ячейкой*. Солнечные элементы обычно конструируют на основе Si, GaAs, GaAsP твёрдых растворов на их основе. Фото-ЭДС обычно составляет величину $\sim 0,5$ В.

Для получения большей ЭДС их соединяют в батареи последовательно (*солнечные батареи*), а для получения большей мощности – параллельно.

Разные материалы имеют максимум поглощательной способности в разных интервалах электромагнитного спектра, например для кремния, он лежит в инфракрасной области спектра. Для повышения КПД солнечных элементов их изготавливают в виде многослойных структур. Многослойные батареи представляют собой конструкцию, состоящую из слоев различных материалов. Их подбирают в расчете на кванты разной энергии. То есть один слой поглощает энергию зеленого цвета, второй – синего, третий – красного. В теории различные комбинации этих слоев могут дать значение КПД 87%. Но это, к сожалению, лишь теория. Как показывает практика, изготовление подобных конструкций в производственных масштабах очень трудоемкое занятие, да и стоимость таких модулей очень высока. В настоящее время максимальных КПД, достигнутый на многослойных модулях, составил 44,7 % (данные на сентябрь 2013 года).

Солнечные батареи питают бортовые системы космических аппаратов, автомобилей, обогревают и освещают помещения, автомобили, теплицы и т.д. Со временем они будут играть всё большую роль в энергетике, которая является возобновляемой и позволяет сохранять ископаемые виды топлива.

2.2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ. ВНУТРЕННИЙ ФОТОЭФФЕКТ

Проводимость полупроводников с большой степени зависит от внешних факторов, главным образом, от температуры и от облучения квантами света. Дополнительная проводимость в полупроводниках, возникающая под действием света, называется *фотопроводимостью* или *внутренним фотоэффектом* [1,3].

Существует три пути увеличения концентрации носителей под действием света:

- 1) в собственном проводнике кванты света вырывают электроны из валентной (заполненной) зоны и забрасывают их в зону проводимости, при этом одновременно образуется равное число

дырок в валентной зоне. Для осуществления этого процесса необходимо, чтобы энергия квантов была больше ширины запрещенной зоны, т.е. $\eta\omega \geq E_g$ (рис. 1, *a*);

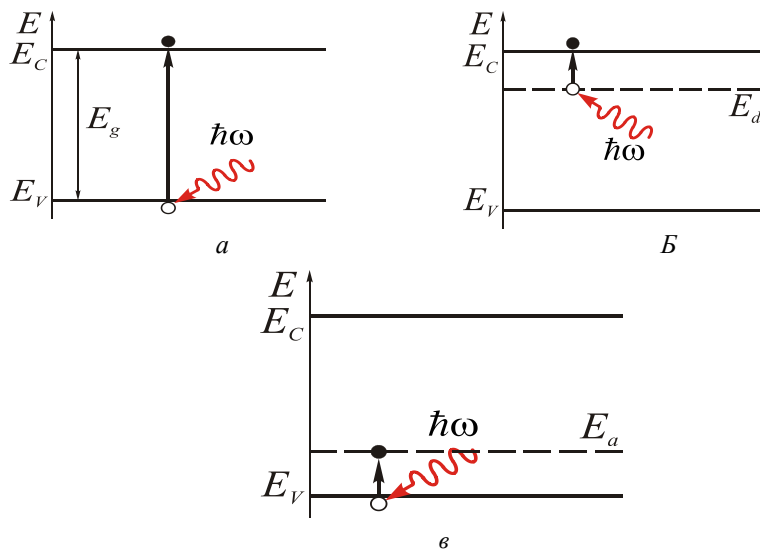


Рис. 1 (*a*, *б*, *в*) Основные механизмы поглощения света

2) в примесном полупроводнике *n*-типа (электронном) электроны забрасываются с донорных уровней в зону проводимости, и увеличивается электронная проводимость. Для этого необходимо, чтобы энергия квантов была больше энергии ионизации донорной примеси, т.е. $\eta\omega \geq E_d$ (рис. 1, *б*);

3) в полупроводнике *p*-типа (дырочном) электроны вырываются из валентной зоны и забрасываются на акцепторные уровни, при этом возрастает дырочная проводимость. В этом случае необходимо, чтобы энергия квантов была больше энергии ионизации акцепторной примеси, т.е. $\eta\omega \geq E_a$ (рис. 1, *в*).

При освещении находящегося под напряжением полупроводника в нем течет световой ток I .

Рассмотрим принцип действия кремниевого фотопреобразователя (солнечной ячейки) с $p-n$ -переходом. В области $p-n$ -перехода может наблюдаться **вентильный**

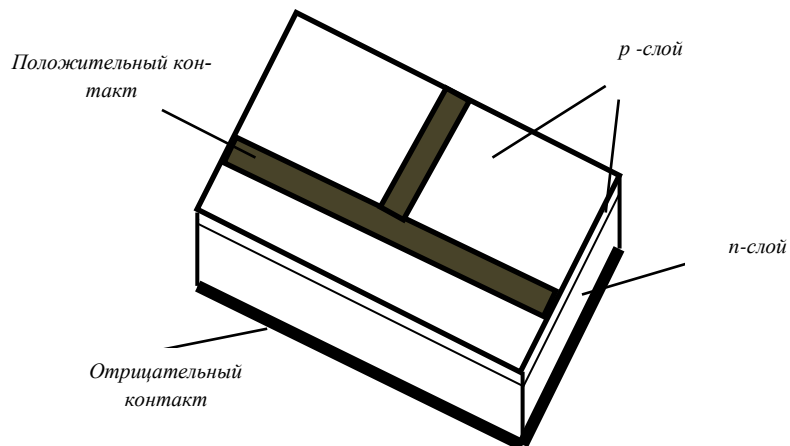


Рис. 2. Устройство кремниевого фотопреобразователя с $p-n$ - переходом.

фотоэффект.

Структура фотопреобразователя представлена на рис. 2. При освещении кремния из-за поглощения квантов света в $p-n$ -переходе и в областях полупроводника, прилегающих к $p-n$ -переходу, происходит генерация электронно-дырочных пар – новых неравновесных носителей заряда. Возникающие при этом дырки в n -области и электроны в p -области являются неосновными носителями тока, для которых поле контактной разности потенциалов является ускоряющим.

В результате эти электроны и дырки начинают двигаться в противоположных направлениях и концентрироваться по обе стороны $p-n$ -перехода.

Основные носители, для которых поле контактной разности потенциалов является тормозящим, остаются в объеме той области полупроводника, где они образовались.

В результате накопления электронов в n -области и дырок в p -области между этими областями возникает дополнительная разность потенциалов, так называемая фото-ЭДС.

2.3. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ В ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ

Энергетическая диаграмма p - n -перехода представлена на рис. 3. Если на p - n -переход падает оптическое излучение с энергией фотонов $\hbar\omega$, превышающих ширину запрещенной зоны E_g , т.е.

$\hbar\omega \geq E_g$, то это приводит к образованию (генерации) электронно-дырочных пар.

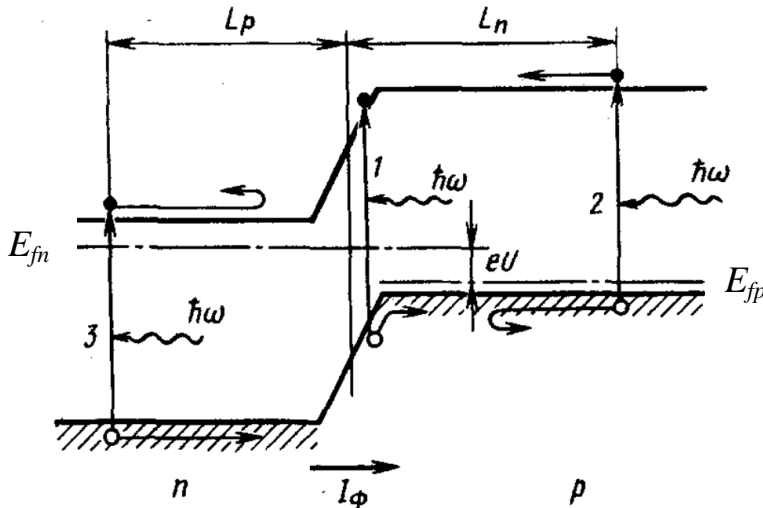


Рис.3. Действие света на p - n -переход

Если поглощение фотона происходит в области объемного заряда p - n -перехода (процесс 1 на рис. 3), то под воздействием внутреннего поля перехода носители заряда будут перемещаться в противоположных направлениях: электроны будут стремиться в n -область, а дырки соответственно в p -область. Вероятность этого процесса мала, потому что толщина объемного слоя невелика [2,4].

Основная часть носителей генерируется в областях, примыкающих к p - n -переходу (на рис. 3 они обозначены как процессы 2 и 3). Эти избыточные носители заряда диффундируют к области p -перехода. Если генерация происходит на расстояниях меньше диффузионной длины электронов L_n и дырок L_p , то генерированные неосновные носители дойдут до p - n -перехода, не рекомбинируя с основными носителями тока этих областей.

Предположим для определенности, что основные акты поглощения происходят в толще p -полупроводника недалеко от его поверхности. В p -полупроводнике, таким образом, создается неравновесная концентрация зарядов обоих знаков, которые и диффундируют по направлению к области с меньшей концентрацией, т. е. к запирающему слою. Достигнув этого слоя, электроны увлекаются контактным полем и перебрасываются в n -область, где они являются основными носителями. Дырки тормозятся контактным полем и остаются в p -области. Таким образом, по обе стороны запирающего слоя увеличивается концентрация основных носителей зарядов. В результате разделения носителей p -область будет заряжаться положительно, а n -область – отрицательно.

Объемный заряд этих основных носителей частично компенсирует заряды ионизированных атомов примесей в запирающем слое, и потенциальный барьер на переходе снижается. Условие равновесия нарушается, и через переход возникает диффузионный ток основных носителей. Новое равновесное состояние будет соответствовать меньшей величине потенциального барьера, при которой поток неосновных носителей через переход, возникающих в результате поглощения квантов света, будет полностью уравновешен встречным диффузионным потоком основных носителей.

Возникающая при этом разность потенциалов U , на величину которой снижается потенциальный барьер в переходе, называется фотоэлектродвижущей силой (фото-ЭДС). E_{fn} и E_{fp} – квазиуровни Ферми в n - и p -областях соответственно.

Фото-ЭДС зависит от интенсивности облучающего переход света и других факторов. Если области полупроводника, образующие p - n -переход, замкнуть внешней цепью, то в ней потечет фототок I_{ϕ} , обязанный движению через переход неосновных носителей

заряда, генерированных квантами света, и, следовательно, совпадающий по направлению с обратным током.

2.4. ПЛОТНОСТЬ ТОКА ЧЕРЕЗ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Вдали от p - n -перехода электрическое поле очень слабое, поэтому основным механизмом движения носителей там является диффузия. Не все фотоэлектроны, возникающие при поглощении света, дойдут до p - n -перехода, так как на этом пути возможна рекомбинация носителей заряда. Дойдут лишь те носители заряда, у которых время пути до перехода меньше времени жизни электрона в зоне проводимости (или расстояние до перехода больше длины диффузионного пробега).

Плотность тока через фотопреобразователь складывается из тока электронов в p -области, дырок в n -области и электронно-дырочных пар, появившихся в p - n -переходе:

$$j = j_n + j_p - eg \quad (1)$$

где g – количество электронно-дырочных пар, родившихся в единицу времени с единицы площади p - n -перехода.

2.5. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

2.5.1. ВОЛЬТ-АМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Основной характеристикой фотоэлектрического преобразователя (ФП) является его вольт-амперная характеристика (ВАХ), полученная при различных освещённостях или световых потоках (рис. 4а). При отсутствии освещения ($J = 0$) вольт-амперная характеристика имеет вид, характерный для обычного p - n -перехода. При увеличении освещённости (J_1 и J_2) появляется обратный ток неосновных носителей, и вся кривая смещается вниз.

Точки пересечения вольт-амперной характеристики с осью напряжений соответствуют значениям фото-ЭДС (или напряжению холостого хода U_{xx}) при разных освещённостях (для кремниевого фотоэлемента фото-ЭДС имеет порядок $\sim 0,5 - 0,55$ В).

Точки пересечения вольт-амперной характеристики с осью токов соответствуют значениям токов короткого замыкания $I_{кз}$.

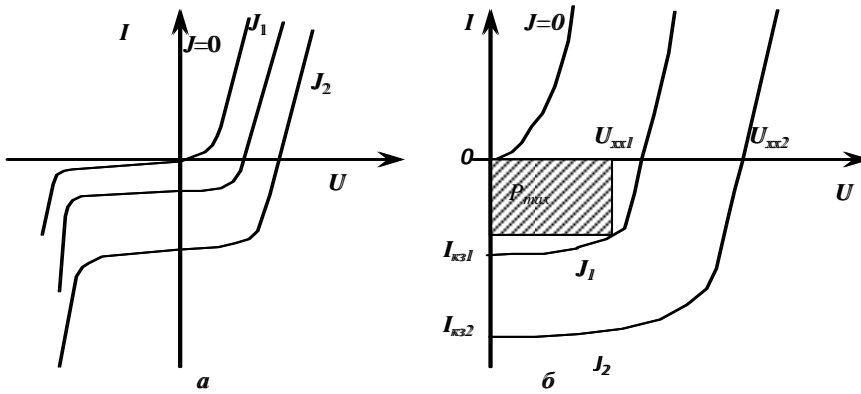


Рис. 4. Общий вид (а) и рабочая область (б) вольт-амперной характеристики фотопреобразователя.

У кремниевых фотопреобразователей плотность тока короткого замыкания при средней освещённости солнечным светом имеет порядок $\sim 20 - 25 \text{ мА/см}^2$.

По вольтамперной характеристике при различных освещённостях фотопреобразователя можно выбрать оптимальный режим работы его, т.е. оптимальное сопротивление нагрузки, при котором в нагрузке будет выделяться наибольшая мощность. Оптимальному режиму работы фотопреобразователей соответствует наибольшая площадь вписанного прямоугольника вершиной на вольт-амперной характеристике при заданной освещённости (рис. 4б). Для кремниевых фотопреобразователей при оптимальной нагрузке напряжение нагрузки составляет $\sim 0,35 - 0,4 \text{ В}$, плотность тока $15 - 20 \text{ мА/см}^2$.

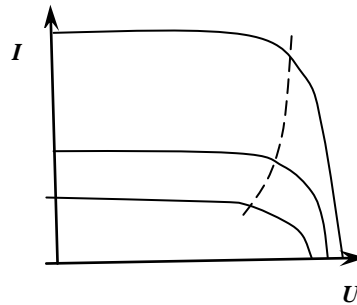


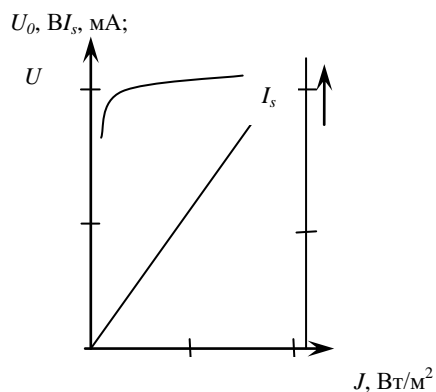
Рис. 5. Вольт-амперная характеристика фотоэлектрического преобразователя при разных интенсивностях света J и линия оптимальной нагрузки.

Так как рабочей областью является область прямого смещения p - n - перехода и обратного тока, то обычно вольт-амперную характеристику фотопреобразователя переворачивают, и она имеет вид, приведённый на рис. 5.

2.5.2. СВЕТОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Световые характеристики фотопреобразователя (фотоэлемента) – это зависимости фото-ЭДС и тока короткого замыкания фотопреобразователя от его освещённости.

При малой освещённости зависимость линейна, т.к. ток



прямо пропорционален количеству родившихся электронно-дырочных пар g , которое, в свою очередь, прямо пропорционально количеству поглощённых квантов света и, следовательно, интенсивности падающего света:

$$I_{\text{кз}} \sim g \sim J$$

где J – интенсивность света.

Рис. 6. Ток короткого замыкания I_s и напряжение холостого хода U_0 как функция интенсивности света J .

В данной работе солнечная батарея состоит из четырёх фотопреобразователей (ячеек), соединённых

последовательно, и имеет максимальное напряжение холостого хода 2 В.

При слабых освещённостях зависимость напряжения холостого хода ($U_{\text{хх}}$) от освещённости J такая же, как у тока короткого замыкания. При возрастании освещённости потенциальный барьер понижается так сильно, что прямая составляющая тока уравнивает обратный фототок вне зависимости от степени освещённости и напряжение перестаёт увеличиваться (рис. 6).

2.5.3. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СВЕТА В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ. КПД ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Коэффициент полезного действия (КПД) представляет собой отношение максимальной электрической мощности, которую можно получить от фотопреобразователя (фотоэлемента), к полной мощности светового потока, падающего на рабочую поверхность фотоэлемента:

$$\eta = P_{\text{max}} / P_0 \quad (2)$$

К основным процессам, приводящим к уменьшению КПД фотоэлемента, относят: отражение от поверхности полупроводника, фотоэлектрически неактивное поглощение квантов света (поглощение без образования пар носителей электрон-дырка), рекомбинацию неравновесных носителей ещё до их разделения электрическим полем *p-n*-перехода, а также потери мощности при прохождении тока через объёмное сопротивление базы фотоэлемента. В результате этих процессов КПД кремниевых фотоэлементов при преобразовании солнечного света в электрическую энергию составляет величину ~ 20 %. (Теоретически предельный КПД для кремния составляет 24 %).

Большой КПД реализуют на солнечных элементах на основе арсенида галлия (GaAs), однако стоимость этого материала существенно выше и с целью удешевления солнечных элементов на основе GaAs используют концентраторы солнечной энергии.

2.5.4. СПЕКТРАЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Спектральная характеристика фотопреобразователя это зависимость тока короткого замыкания, рассчитанного на единицу энергии падающего оптического излучения, от длины волны падающего света. Чувствительность фотопреобразователя это отношение фотосигнала к величине падающего на него светового потока. Для кремниевого фотоэлемента максимум спектральной характеристики почти соответствует максимуму спектрального распределения энергии солнечного света (рис. 7).

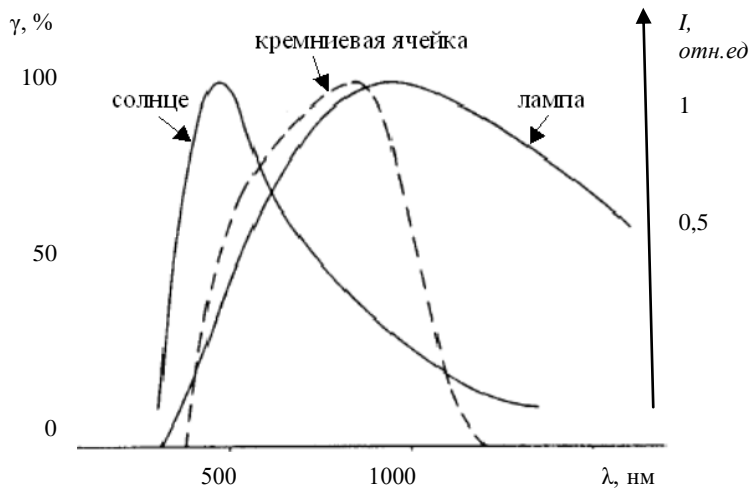


Рис. 7. Спектральное распределение интенсивности I излучения Солнца ($T \approx 5800 \text{ K}$) и лампы ($T \approx 2000 \text{ K}$); спектральная чувствительность γ кремниевых фотопреобразователя.

Именно поэтому кремниевые фотопреобразователи или фотоэлементы широко используются для создания солнечных батарей.

Спектр лампы и Солнца отличаются тем, что у Солнца больше коротковолнового излучения (с большей энергией), а у лампы больше длинноволновая составляющая. Таким образом, лампа сильнее нагревает фотоэлемент, поэтому её свет даёт меньший ток короткого замыкания и, соответственно, меньший КПД.

Если энергия кванта света меньше ширины запрещённой зоны, то фотоэффекта не будет вовсе, поэтому существует минимальная энергия (или максимальная длина волны), при которой эффект ещё наблюдается. Для кремния Si ширина запрещённой зоны $E_g = 1,1 \text{ эВ}$, что соответствует длине волны $\lambda_{\text{max}} = 1,3 \text{ мкм}$ и частоте $\nu = 2,5 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$.

2.5.5. ЗАВИСИМОСТЬ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ И НАПРЯЖЕНИЯ ХОЛОСТОГО ХОДА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

С повышением температуры фотопреобразователя происходит:

а) понижение потенциального барьера (уменьшаются ширина запрещённой зоны); б) увеличивается количество основных носителей, имеющих большую энергию, т.е. происходит перераспределение носителей по уровням. Понижение барьера приводит к понижению напряжения холостого хода (а также тока короткого замыкания) – уменьшается площадь под вольт-амперной характеристикой – уменьшается КПД фотозлемента (рис. 8).

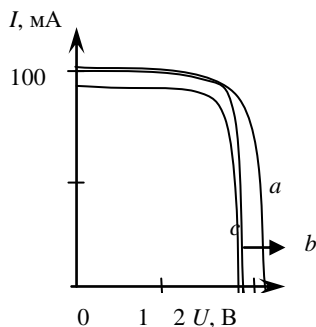


Рис. 8. Вольт-амперная характеристика фотопреобразователя: а) с охлаждающим вентилятором, б) без охлаждающего вентилятора, с) при экранировке стекляннм колпаком.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

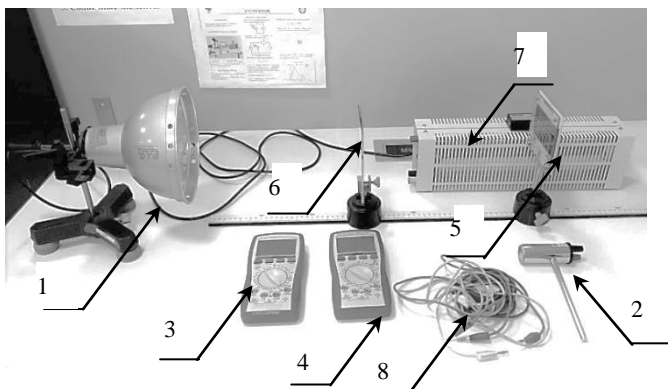


Рис. 9. Вид экспериментальной установки: 1 – лампа; 2 – датчик интенсивности излучения; 3, 4 – мультиметры; 5 – солнечная батарея; 6 – стеклянный фильтр; 7 – реостат, 8 – соединительные провода.

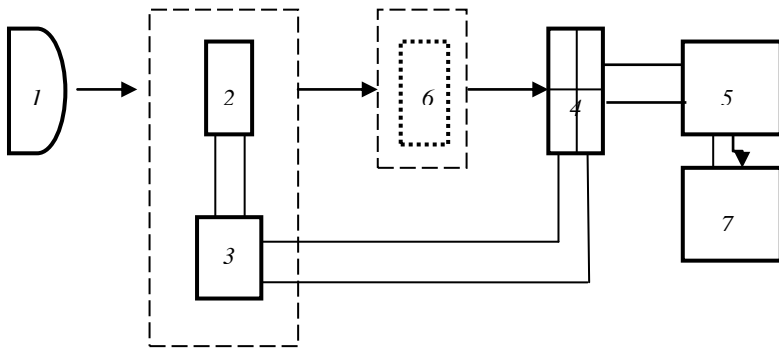


Рис. 10. Блок-схема установки для исследования солнечной батареи

Фототок солнечной батареи 4 измеряется мультиметром 5. Реостат 7 является переменным сопротивлением, позволяющим изменять значения напряжения на фотоэлементе в режиме снятия ВАХ. Фильтр 6 служит для уменьшения нагрева солнечной батареи.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Перед включением оборудования необходимо убедиться в отсутствии посторонних предметов в рабочей зоне и предупредить товарищей о начале лабораторной работы; до начала работы приборы должны быть выключены.

В случае обнаружения неисправностей, связанных с токопроводящими проводниками, изоляцией, греющимися токонесущими частями, необходимо немедленно прекратить работу и обратиться к преподавателю или дежурному лаборанту.

4.1. СНЯТИЕ ЗАВИСИМОСТИ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕТА ОТ РАССТОЯНИЯ ДО ИСТОЧНИКА

Для снятия световых характеристик солнечной батареи надо изменять интенсивность света лампы. Проще всего это сделать, меняя расстояние до лампы. Поэтому измерим интенсивность излучения лампы на разных от нее расстояниях. Для этого следует:

Установить датчик интенсивности (ДИ) в держатель.

Поместите держатель на линейку на расстоянии 1 м от лампы. Снять с разъёмов датчика заглушки. Подключить разъёмы датчика к мультиметру V – к разъёмам «com» и «VΩHz» (рис. 11).

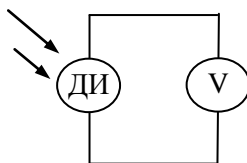


Рис. 11 Схема для измерения интенсивности света

Переведите мультиметр в режим измерения напряжения – повернуть ручку предела шкалы на отметку «200 mV». Включить лампу и мультиметр. Меняя расстояние r от лампы до датчика в диапазоне от 1 м до 50 см с шагом 5 см, записать показания мультиметра U_J в таблицу 1. Показания мультиметра записываются через 10 секунд после перемещения датчика. Выключить лампу.

РАССТОЯНИЕ НЕ ДОЛЖНО БЫТЬ МЕНЬШЕ 50 см!

Таблица 1

r , см	U_J , В	J , Вт/м ²	U_{xx} , В	$I_{кз}$, мА

4.2. ИЗМЕРЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ ХОЛОСТОГО ХОДА ОТ ОСВЕЩЕННОСТИ

Для снятия характеристик солнечной батареи соберем схему согласно рис. 12. Установить солнечную батарею в держатель. Поместить держатель на линейку на расстоянии 1 м от лампы.

Подключить фотоэлемент к мультиметру V – к разъёмам «com» и «VΩHz». Перевести мультиметр в режим измерения напряжения – повернуть ручку предела шкалы на отметку «20 V». Включить лампу и мультиметр. Изменяя расстояние от солнечной батареи до лампы в диапазоне от 1 м до 50 см с шагом 5 см, измерить зависимость напряжения холостого хода U_{xx} от расстояния до лампы. Данные занести в таблицу 1. Выключить лампу.

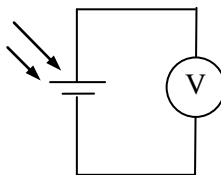


Рис. 12 Схема для измерения напряжения холостого хода

4.3. ИЗМЕРЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ОТ ОСВЕЩЕННОСТИ

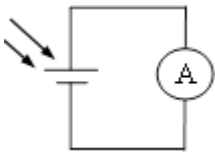


Рис. 13 Схема для измерения тока короткого замыкания

Не меняя схему, перевести мультиметр А в режим измерения тока с пределом шкалы «200 мА» (рис. 13). Перенести контактный провод на мультиметре из гнезда «V» в «mA». Включить лампу. Изменяя расстояние от солнечной батареи до лампы в диапазоне от 1 м до 50 см с шагом 5 см, измерить ток короткого замыкания $I_{кз}$. Данные занесите в таблицу 1.

Выключить лампу и мультиметр.

4.4. СНЯТИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ОСВЕЩЕННОСТИ

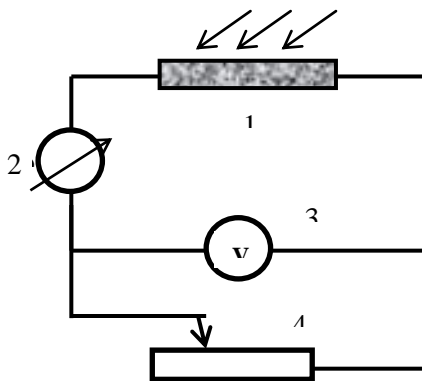


Рис. 14. Принципиальная схема установки для снятия вольт-амперных характеристик солнечной батареи

Принципиальная схема установки для снятия вольт-амперных характеристик (ВАХ) приведена на рис. 14. Фототок солнечной батареи 1 измеряется мультиметром 2, а ее напряжение – мультиметром 3. Регулировка тока производится реостатом 4.

1. Для проведения эксперимента соберите схему, приведенную на рис. 14.

Подключите один разъем солнечного элемента к мультиметру 2 – к разъему «mA», а другой к одному из

разъемов сопротивления (R).

Внимание! Жёлтый разъем не использовать!

Подключить второй разъем сопротивления ко второму разъёму мультиметра – «СОМ». Перевести мультиметр в режим измерения тока с пределом шкалы «200 mA».

Подключить к солнечной батарее (к разъёмам уже подключенных к солнечной батарее штекеров) второй мультиметр (3) (разъёмы «com» и «VΩHz»). Переведите его в режим измерения напряжения с пределом шкалы «20 V».

2. Поставить солнечную батарею на расстоянии 50 см от лампы.

Перевести бегунок сопротивления в положение максимального значения R (положение, наиболее удалённое от разъёмов). Плавно изменяя сопротивление R движением бегунка в сторону разъёмов, измерить зависимость тока от напряжения в диапазоне напряжений от максимального значения до минимального снять 10 точек.

Данные занесите в таблицу 2.

Таблица 2

$r = 50$ см без освещения			$r = 50$ см			$r = 70$ см			$r = 90$ см		
$J, \text{Вт/м}^2 =$			$J, \text{Вт/м}^2 =$			$J, \text{Вт/м}^2 =$			$J, \text{Вт/м}^2 =$		
$U,$ В	$I,$ мА	$P,$ мВт	$U,$ В	$I,$ мА	$P,$ мВт	$U,$ В	$I,$ мА	$P,$ мВт	$U,$ В	$I,$ мА	$P,$ мВт

3. Включите лампу. Перевести предел измерения мультиметра (2) в диапазон измерения «200 mA», предел второго мультиметра (3) в диапазон измерения шкалы «20 V».

Измерить зависимость тока от напряжения. Повторить пункт 2 для расстояний 50, 70 и 90 см. Данные также занесите в таблицу 2. (Данные вольт-амперной характеристики, снятые на расстоянии 50 см от лампы, занесите в таблицу 3 (первый столбик).

Выключите лампу.

4.5. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФИЛЬТРА НА ВОЛЬТ-АМПЕРНУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ И НАПРЯЖЕНИЕ ХОЛОСТОГО ХОДА СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ

Одним из способов понижения температуры является помещение между лампой и солнечной батареей стеклянной пластины, которая отсекает инфракрасное излучение.

Выставить держатель с солнечной батареи на расстоянии 50 см от лампы. Соберите схему, представленную на рис.11. Включите лампу. Поставьте стеклянную пластинку на пути света, запишите зависимость силы тока от напряжения (вольт-амперную характеристику). Запишите значение напряжения холостого U_{xx} со стеклянной пластинкой. Полученные данные занесите в таблицу 3. Выключите лампу.

Таблица 3

Без стеклянной пластины		Со стеклянной пластиной	
$U, В$	$I, мА$	$U, В$	$I, мА$
.	.	.	.
.	.	.	.
$U_{xx}, В =$		$U_{xx}, В =$	

После окончания лабораторной работы необходимо выключить электроизмерительные приборы.

5. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

1. Определить зависимость интенсивности света от расстояния: для этого определим интенсивность из формулы:

$$J = U_J / (u \cdot s)$$

где U_J – показания мультиметра, u – чувствительность фотодетектора и s – площадь датчика интенсивности. Характеристики датчика интенсивности: диаметр равен 2,5 см, чувствительность $u = 0,16$ мВ/мВт. Построить график J от r . Для расстояний меньше 50 см интенсивность находят экстраполяцией графика J от r .

2. Построить зависимости $I_{кз}$ и U_{xx} от освещённости J . Значения J получить из построенного в пункте 1 графика $J(r)$.

3. Построить вольт-амперную характеристику для трёх положений фотоэлемента: 50, 70 и 90 см от лампы, определить по графику $J(r)$ пункта 1 соответствующие этим положениям значения освещённости J и вписать их в таблицу 2.

4. Вычисление КПД солнечного элемента для трёх значений интенсивностей. По вольт-амперной характеристике для каждого расстояния из пункта 3 определить максимальную мощность, даваемую солнечной батареей. Для этого необходимо построить прямоугольник максимальной площади так, чтобы одна точка касалась вольт-амперной характеристики. Площадь этого прямоугольника и есть максимальная мощность, вырабатываемая фотоэлементом:

$$P_{max} = U \cdot I.$$

Потребляемая мощность определяется из соотношения:

$$P_0 = J \cdot S,$$

где $S = 50 \text{ см}^2$ – площадь солнечной батареи, J – интенсивность света. Коэффициент полезного действия

$$\eta = P_{max}/P_0 \cdot 100\%.$$

Результаты расчётов записать в таблицу 2.

5. Построить вольт-амперную характеристику солнечной батареи без стеклянной пластины и со стеклянной пластины.

6. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЁТУ

По лабораторной работе оформляется отчет, который должен содержать:

- 1) номер и название работы;
- 2) формулировку цели работы;
- 3) физическое обоснование цели работы и метода измерения;
- 4) рабочую формулу с расшифровкой всех буквенных обозначений;
- 5) результаты прямых измерений и вычислений;
- 6) построенные графики зависимости:
 - интенсивности света от расстояния от лампы, $J(r)$.
 - напряжения холостого хода от освещённости, $U_{xx}(J)$.
 - тока короткого замыкания от освещённости, $I_{кз}(J)$.
 - тока от напряжения (вольт-амперные характеристики) без освещения и для трёх различных значений освещённости, $I(U)$ для J_1, J_2, J_3 .

– вольт-амперную характеристику для двух спектральных характеристик излучения – без фильтра и с фильтром на расстоянии 50 см от лампы.

7) рассчитать значения КПД солнечной батареи для расстояний 50, 70 и 90 см до лампы.

8) сделать оценку погрешности (неопределенности) КПД.

9) подпись студента и дату выполнения данной лабораторной работы.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется внутренним фотоэффектом?

2. Объяснить внутренний фотоэффект с точки зрения зонной теории.

3. Что такое фотоэлемент? Каков принцип его действия? Что такое солнечная батарея?

4. Что такое напряжение холостого хода и ток короткого замыкания?

5. Что такое КПД солнечной батареи и как его рассчитывать? Как выбрать оптимальный режим работы солнечной батареи?

6. Какое воздействие оказывает температура на напряжение холостого хода фотоэлемента?

7. В чём различие между освещением солнечным светом и освещением лампой?

8. На кремниевый фотопреобразователь падает излучение с длиной волны 2 мкм. Будет наблюдаться внутренний фотоэффект. Если ширина запрещённой зоны кремния 1,1 эВ?

8. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Детлаф А.А.* Курс физики : учеб.пособие / А.А. Детлаф, Б.М.Яворский. - 5-е изд., стер. - М. : АCADEMIA, 2005. - 720 с.и пред.изд. (2003, 2002, 2001, 1998)
2. *Парфенова И.И.* Квантовая механика, физика твёрдого тела и элементы атомной физики /С.В. Егоров, А.С. Мустафаев, И.И. Парфенова/ Сборник задач для студентов технических специальностей, СПб.: СПГИ (ТУ), 2010. 112 с.
3. *Савельев И.В.* Курс физики : учеб.пособие: в 3 т. Т.3. /И.В. Савельев – Изд. 4-е, стер. - СПб.[и др.]: Лань,2016. - 308 с.и пред. изд. (2007,1989, 1987)
4. *Томаев В.В.* Общая физика. Физика твёрдого тела. Зонная теория твердых тел. Контактные и магнитные явления в твёрдых телах. Метод. указания к лабораторным работам/ Томаев В.В., Стоянова Т.В., Левин К.Л. СПб.: 2012
5. *Трофимова Т.И.* Курс физики: учеб.пособие / Т.И. Трофимова. - 21-е изд., стер. - М. : Академия, 2015. - 560 с. и пред.изд. (2008, 2007, 2004, 1997).

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1. Рекомендации к выполнению лабораторных работ	3
2. Основные теоретические положения.....	4
3. Экспериментальная установка	15
4. Порядок выполнения работы	16
5. Обработка экспериментальных данных	20
6. Требования к отчёту	21
7. Контрольные вопросы.....	22
8. Библиографический список.....	23

ФИЗИКА
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

*Методические указания к лабораторным работам
для студентов всех специальностей и направлений подготовки*

Сост.: *Т.В. Стоянова, Н.А. Тулицкая*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой
общей и технической физики

Ответственный за выпуск *Т.В. Стоянова*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 10.02.2023. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 1,3. Усл.кр.-отг. 1,3. Уч.-изд.л. 1,1. Тираж 50 экз. Заказ 108.

Санкт-Петербургский горный университет
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2