

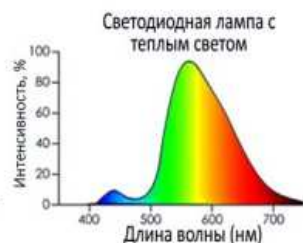
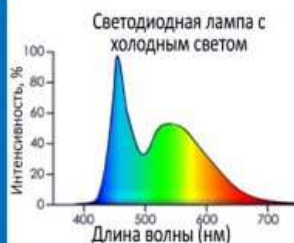
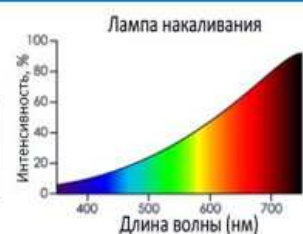
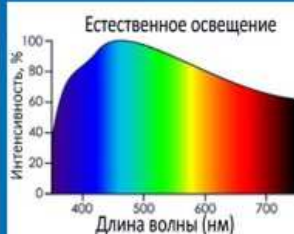


ВВЕДЕНИЕ В ТЕХНИКУ ЭКСПЕРИМЕНТА

Лабораторный практикум

Ананьева Н.Г., Колмычек И.А., Погожев В.А., Салецкий А.М.

Лабораторная работа № 7 СВЕТОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ



Задача 7.

СВЕТОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Цель работы

Закрепить навыки измерения силы тока и напряжения в электрических цепях, а так же оценки погрешностей прямых и косвенных измерений.

Познакомиться со световыми измерениями и фотоэлектрическими преобразователями. Исследовать зависимости характеристик фотодиодов и солнечных батарей от освещенности.

Оптическое излучение и его детектирование

Оптическое излучение – электромагнитные волны, длины которых заключены в диапазоне с условными границами от единиц *нм* до десятых долей *мм*. К ним, помимо видимого света, относят *инфракрасное* и *ультрафиолетовое* излучения.

Фотометрия – наука об изучении и измерении параметров и характеристик переноса энергии оптического излучения. **Световые измерения** – раздел фотометрии, относящийся к видимому излучению.

Для характеристики оптического излучения используют следующие основные величины:

- **Поток излучения** $\Phi_{Вт}$ характеризует мощность, переносимую оптическим излучением через произвольную поверхность. Поток излучения равен отношению энергии, переносимой излучением через поверхность, ко времени переноса. Единица измерения Дж/с = Вт.
- **Световой поток** $\Phi_{лм}$ – поток излучения, оцениваемый по его воздействию на человеческий глаз. Единица измерения светового потока – люмен (лм). Световой поток в люменах измеряют только в видимой человеческим глазом части спектра электромагнитного излучения. То, что лежит за пределами этого диапазона (если частоты ниже – это инфракрасное излучение, радиоволны; выше – ультрафиолет, гамма-излучение) – измеряют в ваттах. Чувствительность глаза зависит от длины волны излучения. Поэтому одинаковые по мощности потоки излучения, но разные по длине волны, вызывают разные световые ощущения у человека. Между ваттами и люменами есть соотношение: 1 ватт эквивалентен 683 лм для длины волны электромагнитного излучения 555 нм – это область, где дневная чувствительность глаза максимальна.

Световой поток монохроматического излучения с произвольной длиной волны λ , выражаемый в люменах, определяется по формуле

$$\Phi_{лм}(\lambda) = 683 \times \Phi_{Вт}(\lambda) \times V(\lambda),$$

где $V(\lambda)$ – значение относительной спектральной световой эффективности для дневного зрения, соответствующее длине волны λ (см. рис.7.1 [1]).

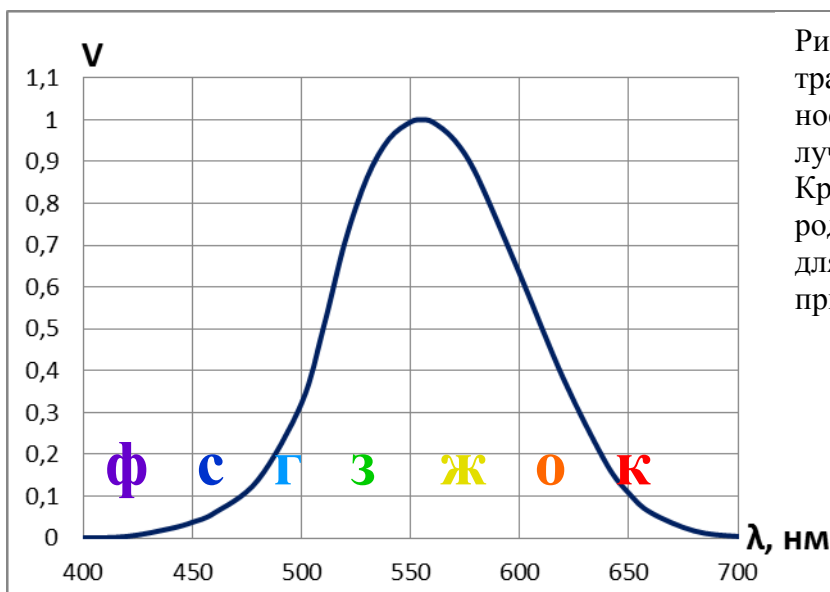


Рис. 7.1. Относительная спектральная световая эффективность монохроматического излучения для дневного зрения. Кривая утверждена международной осветительной комиссией для среднего нормального глаза при дневном свете.

Мощность излучения лампы не равна мощности, потребляемой лампой от электрической сети (батарейки), т.к. не вся энергия, потребляемая источником света от сети питания, преобразуется в излучение. В частности, лампа накаливания излучает не только видимый свет, но и инфракрасное (тепловое) излучение. В светодиоде часть энергии теряется в преобразователе питания, часть света задерживается оптикой — отражателями, рассеивателями, линзами. Например, карманные фонари на лампочках накаливания на каждый ватт электроэнергии отдают около 10 люмен. Для фонарей на галогенных лампочках накаливания это соотношение примерно вдвое больше: 20 лм. Средние величины светотдачи для массовых современных светодиодных фонарей находятся в пределах 60 - 90 лм/Вт.

- **Освещённость** E равна световому потоку $d\Phi$, падающему на участок поверхности малой площади $d\sigma$:

$$E = \frac{d\Phi}{d\sigma}.$$

Единицей измерения освещённости в Международной системе единиц (СИ) служит люкс ($1\text{лк} = 1\text{ лм}/\text{м}^2$).

Солнечная освещённость в средних широтах в полдень — примерно 17клк. Прочитать текст можно при освещённости около 50 лк. Для классных комнат, лабораторий, библиотек рекомендована освещённость 750-300 лк.

- **Сила света** I — основная световая фотометрическая величина. Характеризует световую энергию, переносимую в некотором направлении в единицу времени. Освещённость от точечного источника находят по формуле:

$$E = \frac{I \cdot \cos \theta}{r^2},$$

где I – сила света в *канделах*; r – расстояние до источника света; θ – угол падения лучей света относительно нормали к освещаемой поверхности.

Кандела (кд) (в переводе с латинского – свеча) – единица силы света, одна из семи основных единиц Международной системы единиц (СИ). Сила света, излучаемая восковой свечой, примерно равна одной канделе, лампа накаливания, потребляющая мощность 100 Вт, излучает примерно 100 кд.

Фотометрические измерения принято разделять на объективные (при помощи приборов) и визуальные (производятся непосредственно глазом). Объективные световые измерения производятся приборами, в состав которых входят приёмники света – *фотоприемники*, предназначенные для преобразования энергии оптического излучения в электрическую (фотодетекторы) или тепловую.

В свою очередь работа фотодетекторов может быть основана на:

- внешнем фотоэффекте (фотоэлектронные умножители и вакуумные фотоэлементы, электронно-оптические преобразователи)¹;
- внутреннем фотоэффекте (фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы фототиристоры и т.п.)².

Наиболее широкое распространение для преобразования световой (солнечной) энергии в электрическую получили полупроводниковые элементы – фотодиоды.

Основы физики полупроводников.

В однородном полупроводнике, имеющем совершенную кристаллическую структуру, *проводимость собственная*, она обусловлена как электронами (проводимость *n-типа*), так и дырками (проводимость *p-типа*).

Если в полупроводнике имеются примеси других элементов или несовершенство кристаллической решетки, то к собственной электропроводности добавляется еще *примесная электропроводность*, которая, в зависимости от рода примеси, может быть электронной или дырочной. Легирование (добавление атомов примеси) значительно увеличивает число свободных носителей зарядов.

Полупроводники, электропроводность которых обусловлена избыточными электронами, называются полупроводниками *n-типа*, они получаются при добавлении атомов примеси с валентностью, превышающей валентность

¹ *Внешним фотоэффектом* называют испускание электронов веществом под действием оптического излучения

² *Внутренний фотоэффект* – появление неравновесных носителей заряда (без их вылета из прибора) при облучении полупроводника или диэлектрика квантами с достаточной энергией (красная граница фотоэффекта)

атомов решетки. Полупроводники с преобладающей дырочной проводимостью называются полупроводниками *p*-типа. Атомы примеси, валентность которых меньше валентности атомов кристалла, называется акцепторными, так как они захватывают электроны. Некоторые типы полупроводников обладают одновременно *n*- и *p*- типами электропроводности.

Электронно-дырочный переход. Диод. Если привести в контакт два полупроводника с различными типами электропроводности, то на границе возникает область, ширина которой может варьироваться от 10 до 1000 межатомных расстояний, называемая ***n-p* переходом**.

Рассмотрим свободный (не подключенный к источнику тока) *n-p* – переход (рис. 7.3 а). *P*- и *n*-области в целом электрически нейтральны: заряд ионов примесей компенсируется противоположным зарядом порожденных ими носителей. Свободные носители зарядов участвуют в тепловом движении, поэтому на границе раздела полупроводников вследствие большой разницы концентрации электронов и «дырок» происходит следующее. Электроны из *n*-области, в результате диффузии попадающие в *p*-область, рекомбинируют с имеющимися там «дырками», в результате узкая полоска в *p*-области заряжается отрицательно. В свою очередь, «дырки» из *p*-области вследствие диффузии попадают в *n*-область, где рекомбинируют с электронами, заряжая узкую полоску в *n*-области положительно (см. рис. 7.3). Таким образом, в области *p-n* перехода возникает электрическое поле, направленное от *n*-области к *p*-области, которое препятствует дальнейшей диффузии. Устанавливается равновесие, при котором сила ток через контакт равна нулю. При этом **в узкой области переходного слоя возникает контактная разность потенциалов**.

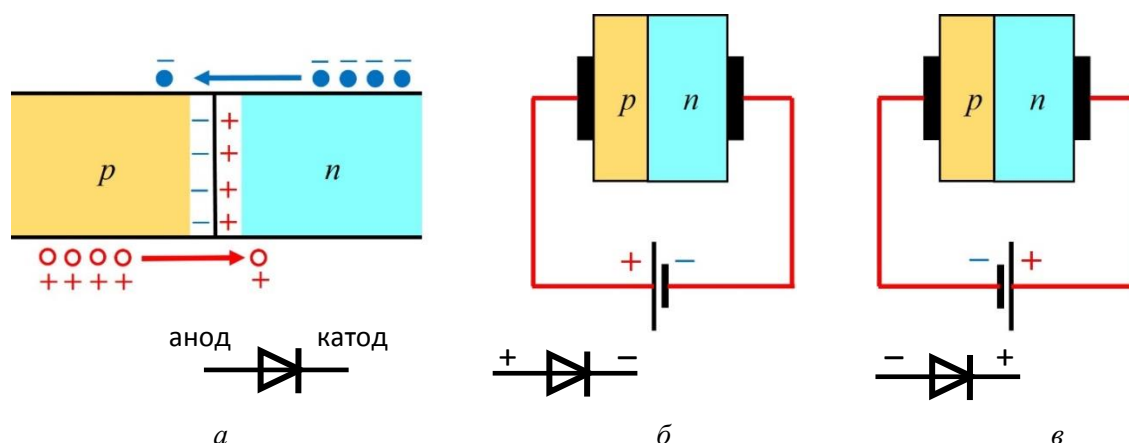


Рис. 7.3. *n-p* –переход (и обозначение диода): свободный (а) при прямом (б) и обратном (в) подключении в цепь.

Полупроводниковый диод – прибор, содержащий один *p-n*-переход. На рис. 7.4 а показано устройство диода, а на рис. 7.4, б - внешний вид диодов нескольких типов, Обозначение диода на электрических схемах приведено на рис. 7.3. **Электрод, подключенный к *p*-области, называют анодом, к *n*-области - катодом.**



Рис. 7.4. Устройство (а) и внешний вид некоторых типов диодов (б): 1-выводы, 2- корпус, 3- стеклянный изолятор, 4-контактная пластина, 5- пластина индия, 6-пластина кремния (или германия), 7- основание.

Рассмотрим два возможных способа подключения источника внешнего электрического напряжения к электродам диода. Будем считать напряжение от внешнего источника на контактах диода положительным ($U > 0$), если внешнее поле направлено против внутреннего поля $p-n$ перехода (рис. 7.3,б), т.е. «плюс» источника подключен к аноду, а «минус» - к катоду. В этом случае потенциальный барьер, препятствующий прохождению основных носителей через $p-n$ переход, уменьшается. При увеличении внешнего напряжения сила тока возрастает экспоненциально.

При отрицательном напряжении внешнего источника на диоде потенциальный барьер, напротив, увеличивается, и основные носители не могут его преодолеть. Неосновные носители («дырки» в n -области и электроны в p -области) свободно проходят через границу, ускоряясь в электрическом поле перехода. В этом случае сила протекающего через диод тока весьма мала из-за небольшого количества неосновных носителей (рис. 7.3, в).

Таким образом, диод обладает односторонней проводимостью: он проводит ток в направлении от анода к катоду и практически не проводит в противоположном направлении.

Типичный график зависимости силы тока от напряжения (вольтамперная характеристика - ВАХ) для диода представлен на рис. 7.5. Небольшой ток насыщения $I_{\text{нас}}$ при не очень больших обратных напряжениях обусловлен движением неосновных носителей зарядов.

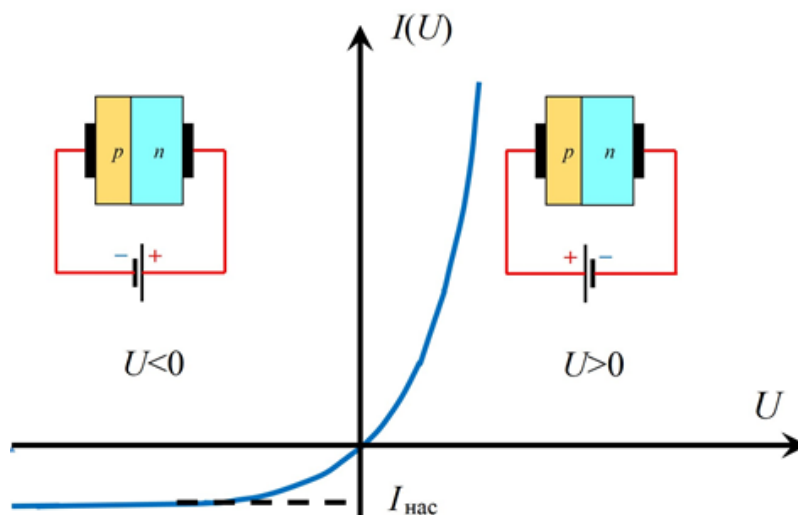


Рис. 7.5. Вольтамперная характеристика p - n -перехода.

Фотодиод. Вентильный фотоэффект.

Явление возникновения фото ЭДС в p - n -переходе при облучении его светом называют фотовольтаическим эффектом или *вентильным фотоэффектом*. Устройство, построенное на этом эффекте, называют *фотодиодом*.

При попадании света на фотодиод (например, на n -область) в освещаемой области в результате поглощения фотонов возникают электронно-дырочные пары, называемые *фотоносителями*. При диффузии фотоносителей вглубь n -области основная доля электронов и дырок не успевает рекомбинировать и доходит до границы p - n -перехода. Здесь фотоносители разделяются электрическим полем p - n -перехода: электроны не могут преодолеть поле перехода и скапливаются у границы p - n -перехода, а дырки переходят в p -область, создавая тем самым электрический ток.

Таким образом, ток через p - n -переход обусловлен дрейфом **неосновных** носителей – дырок. Дрейфовый ток фотоносителей называется *фототоком*, в переходе он направлен из n -области в p -область.

Если цепь не замкнута, то фототока нет, но возникает разность потенциалов поля разделенных зарядов, которую называют фото-электродвижущей силой – фото ЭДС (ΔU рис. 7.6). В отсутствии излучения фото ЭДС равна нулю.

На рис. 7.7 показан внешний вид фотодиода ФД-7К.

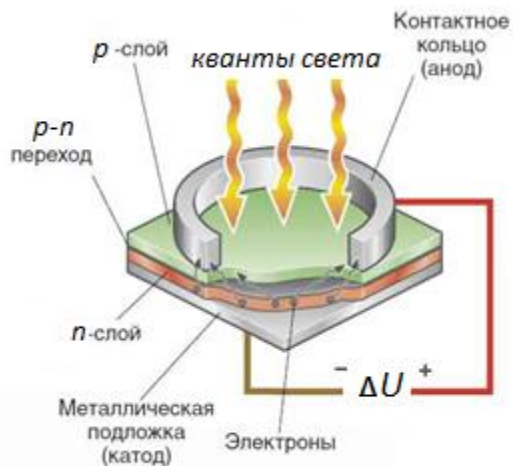


Рис. 7.7. Фотодиод ФД-7К.

Рис. 7.6. Устройство фотодиода.

В зависимости от схемы включения фотодиоды могут работать в двух режимах: *фотодиодном* (рис.7.8, а) с внешним источником напряжения и *фотовольтаическом* (рис. 7.8, б) без внешнего источника.

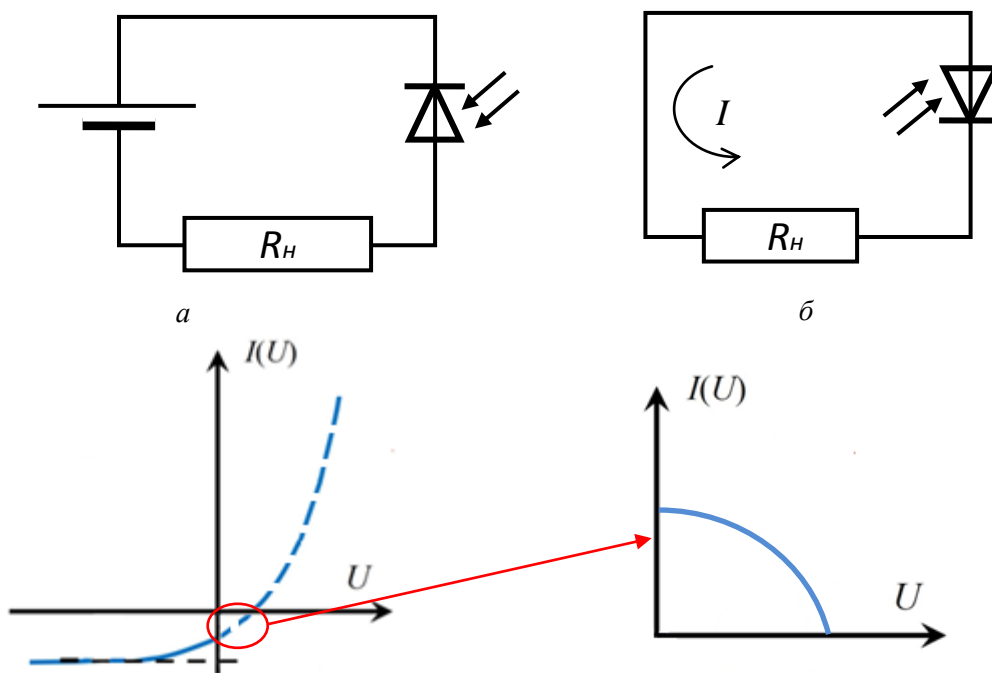


Рис. 7.8. Схема включения фотодиода и ВАХ схемы:

а – фотодиодный режим;

б – фотовольтаический режим.

В *фотодиодном режиме* (рис. 7.8, а) фотодиод применяется при внешнем обратном (запирающем) напряжении (рис 7.8 в). В рабочем диапазоне напряжений обратный ток фотодиода практически не зависит от приложенного обратного напряжения, но зависит от освещенности. При этом сила тока через фотодиод пропорциональна падающему на него световому потоку. При включении фотодиода в прямом направлении через него

протекает большой ток, и фототок, возникающий за счет освещения, является малой добавкой.

В *фотовольтаическом режиме* (рис. 7.8, б) фотодиод выполняет роль источника фото ЭДС. Величина фото ЭДС зависит от мощности светового излучения. Это позволяет использовать фотодиоды в качестве элементов солнечных батарей.

Солнечная батарея

Солнечная батарея – устройство, преобразующее энергию солнечного излучения в электрическую. Фотоэлектрические преобразователи могут быть кремниевые или полимерные пленочные.

Существует три вида кремниевых солнечных батарей: *монокристаллические преобразователи, поликристаллические, аморфные.*



Рис. 7. 9. Внешний вид пленочных солнечных преобразователей.

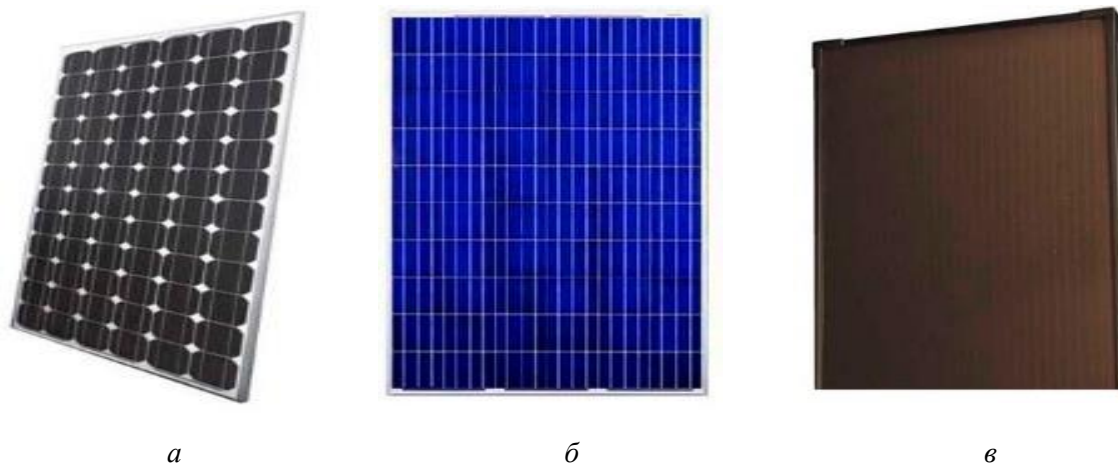


Рис. 7 .10. Внешний вид солнечных батарей: монокристаллические (а), поликристаллические (б) и аморфные (в).

Монокристаллические преобразователи: светочувствительные ячейки направлены строго в одну сторону. У монокристаллических преобразователей КПД наиболее высокий – достигает 22%. Однако для работы свет должен падать по нормали к поверхности солнечной батареи, иначе КПД резко снижается. Внешне такие системы можно отличить по скошенным углам панелей (из-за особенностей их изготовления), и глубокому черному цвету, который дают направленные в одну сторону ячейки (рис. 7.9, а).

Поликристаллические батареи. На пластинах расположены разнонаправленные кристаллы кремния, что дает более низкий, по сравнению с монокристаллами, КПД. Он составляет порядка 18%. Внешний вид таких батарей представляют собой пластины правильной квадратной формы темно-синего цвета (рис. 7.9, б).

Аморфные кремниевые панели представляют собой очень тонкие слои кремния, которые получают напылением кремния в вакууме на металл, пластик или стекло. КПД таких устройств невелик, примерно 6%. Внешне аморфные пластины можно отличить по темно-серому цвету (рис. 7.9, в).

Конструкция солнечных батарей. На полупроводниковую пластину с проводимостью n -типа нанесен тонкий слой полупроводника p -типа. На границе двух полупроводников образуется p - n -переход. Свет падает со стороны p -слоя. Для включения солнечного элемента в цепь имеются металлические контакты: сплошной со стороны n -слоя и по периферии – с освещенной стороны. При падении света на солнечный элемент фотоны «выбивают» электроны из кристаллической решетки, образуя электронно-дырочную пару. Далее носители зарядов движутся под действием электрического поля p - n -перехода. Таким образом, на обкладках солнечной батареи появляется ЭДС. Напряжение и сила тока на нагрузке от такого элемента питания зависит от сопротивления нагрузки и от освещенности солнечного элемента.

Изменяя сопротивление нагрузки при одинаковой освещенности, получают ВАХ солнечной батареи. На рис. 7.11, в качестве примера представлены кривые зависимости $I(U)$ для двух значений освещенности.

На ВАХ существует точка (U_m, I_m) (рис. 7.11), в которой мощность солнечной батареи максимальна. Эту точку называют рабочей. Максимальная мощность солнечной батареи равна площади заштрихованного прямоугольника на рис. 7.11. С ростом освещенности E увеличиваются напряжение, сила тока и мощность.

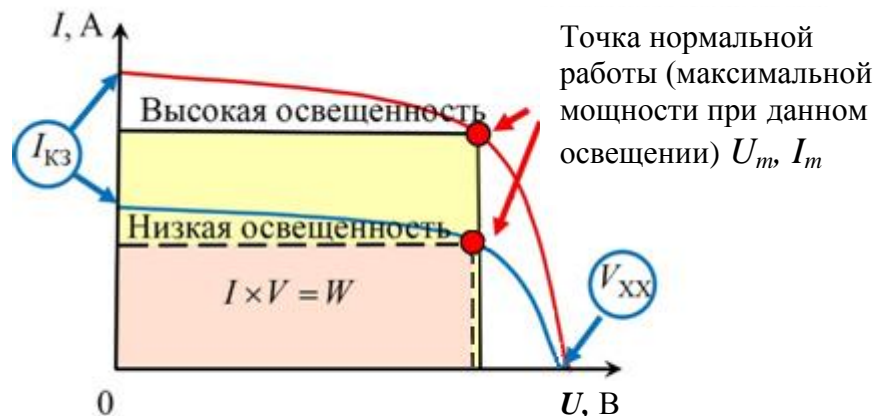


Рис. 7.11. ВАХ солнечной батареи для двух значений освещенности.

К числу важнейших характеристик солнечной батареи относят:

- *напряжение холостого хода* $U_{хх}$ – разность потенциалов между клеммами солнечной батареи, возникающая при ее освещении в отсутствии нагрузки.
- *ток короткого замыкания* $I_{кз}$, протекающий через солнечную батарею при ее освещении при замкнутых накоротко клеммах солнечной батареи.

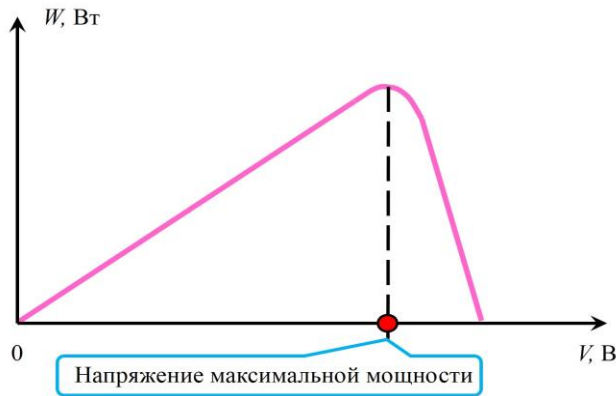


Рис. 7.12. Зависимость мощности солнечной батареи от напряжения.

Зависимость мощности от напряжения между клеммами солнечной батареи при некоторой освещенности представлена на рис. 7.12. Коэффициентом полезного действия η солнечной батареи называют отношение максимальной электрической мощности P_m , развиваемой батареей, к мощности Φ падающего излучения:

$$\eta = \frac{P_m}{\Phi} = \frac{U_m I_m}{\Phi} .$$

Многие процессы умень-

шают КПД, например:

- Частично свет отражается от поверхности полупроводника (для уменьшения отражения на p -слой наносят интерференционное просветляющее покрытие).
- В падающем потоке излучения есть фотоны, энергия которых недостаточна для возникновения внутреннего фотоэффекта.
- Пары электрон – дырка могут рекомбинировать и не давать вклада в фототок (если толщина p -слоя будет достаточно большой).

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка показана на рисунке 7.13. На оптической скамье (1) установлена лампа накаливания (2), подключенная к блоку питания (3). В подвижную подставку - рейтер (4) можно установить либо фотодатчик люксметра MS 6610, либо фотодиод в оправе (на рис. 7.13 не показаны), либо солнечную батарею (5) на поворотном столике. Для регулировки силы тока через фотодиод и регулировки нагрузки солнечной батареи используют блок резисторов (6), подключенный к мультиметру DT – 830В (7) для измерения сопротивления блока. Силу тока в цепи фотоприемников измеряют либо вторым мультиметром DT – 830В в режиме измерения «DCA», либо стрелочным амперметром (8), напряжение – мультиметром M9803 R (9). Для питания схемы с фотодиодом используют блок питания HY 3002 (на рис. не показан).

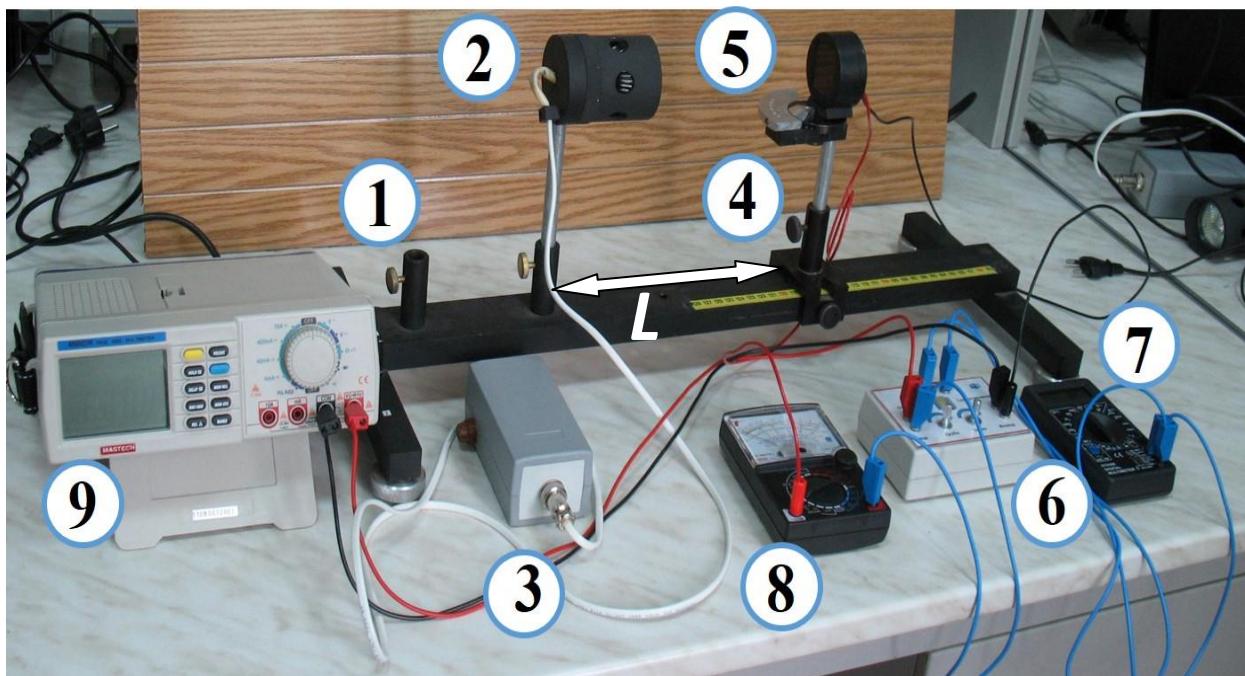





Рис. 7.13. Экспериментальная установка для измерения световых характеристик. Приборы и оборудование, используемые в лабораторной работе:

Блок питания HY 3002 (для питания схемы с фотодиодом)		
	Параметры	Значение
	Выходное напряжение, В	0 - 30
	Точность установки выходного напряжения, В	0,1
	Выходной ток, А	0 - 3
	Точность установки выходного тока, А	0,01

Цифровой мультиметр M9803R (используют для измерения постоянного напряжения)			
	Диапазон	ΔU, мВ	
	400 мВ	$\pm(0.3\% X + 0,5)$	
	4 В	$\pm(0.3\% X + 2)$	
	40 В	$\pm(0.3\% X + 20)$	
	400 В	$\pm(0.3\% X + 200)$	
	1000В	$\pm(0.3\% X + 2000)$	
X - измеренная величина.			
Мультиметр DT- 830 В (используют для измерения сопротивления и силы тока)			
	Сопротивление «Ω»		
	Предел	Разрешение (единица счета)	Точность
	200 Ом	0,1 Ом	$\pm 0,8\% \pm 2$ ед. счета
	2000 Ом	1 Ом	$\pm 0,8\% \pm 2$ ед. счета
	20 кОм	10 Ом	$\pm 0,8\% \pm 2$ ед. счета
	200 кОм	100 Ом	$\pm 0,8\% \pm 2$ ед. счета
	2000 кОм	1 кОм	$\pm 1\% \pm 2$ ед. счета
	Сила постоянного тока «DCA»		
	200 мкА	0,1 мкА	$\pm 1\% \pm 2$ ед. счета.
	2 мА	1 мкА	$\pm 1\% \pm 2$ ед. счета.
20 мА	10 мкА	$\pm 1\% \pm 2$ ед. счета.	
200 мА	100 мкА	$\pm 1,2\% \pm 2$ ед. счета.	
\pm (% от измеренного значения + число единиц счета)			
Люксметр MS 6610 (используют для измерения освещенности)			
	Диапазон	Разрешение D (единица младшего разряда)	Погрешность
	X1 0 – 1999 лк	1 лк	$\pm(5\% + 2D)$
	X10 2000 – 19990 лк	10 лк	$\pm(5\% + 2D)$
	X100 2000-50000 лк	100 лк	$\pm(5\% + 2D)$
	\pm (% от измеренного значения + число значений разрешения D)		



Набор проводов и радиодеталей, монтажная плата, линейка.

Упражнение 1. Исследование зависимости освещенности поверхности от расстояния до источника света с помощью люксметра.

Измерения

1. Проведите измерения люксметром фоновой засветки **при выключенной лампе накаливания**. Для этого установите в подвижный рейтер фотодатчик люксметра MS6610. Входное окно фотодатчика и лампа должны быть на одной высоте. Переключатель на люксметре установите в самый грубый режим «*100» и включите люксметр. Перемещая фотодатчик вдоль скамьи, наблюдайте изменение фоновой освещенности. Если сигнал мал, перейдите в более чувствительный режим «*10» или «*1».

Занесите в таблицу 7.1 максимальные $E_{фон, max}$ и минимальные $E_{фон, min}$ показания прибора при фоновой засветке¹. Если при перемещении рейтера вдоль скамьи будет наблюдаться какая-либо закономерность, постарайтесь выявить ее.

Также в таблицу 7.1 занесите диапазон изменения координат рейтера с фотодатчиком (x_{max} и x_{min}), а также примерную координату источника излучения (лампы накаливания) $x_{ист,прибл}$.

2. Установите переключатель на люксметре в режим «*100». Расположите люксметр на максимальном расстоянии от лампы и включите его.
Включите лампу. Дождитесь стабилизации показаний люксметра (примерно 3 – 7 минут).
3. Для уточнения координаты источника $x_{ист}$ проведите измерение освещенности E_0 для случая максимального расстояния от лампы (координата люксметра x_{00}). Затем, приближая люксметр к лампе, найдите

¹ Таблицы для записи результатов приведены в конце описания задачи.

координату x_{01} , при которой освещенность увеличится в четыре раза. В соответствии с ранее приведенной формулой зависимости освещенности от расстояния это означает, что расстояние до лампы уменьшилось в два раза. Зная величину перемещения люксметра $|x_{00} - x_{01}|$, нетрудно найти координату лампы $x_{ист}$ (результат занесите в табл. 7.1) Для повышения точности подобные измерения можно провести для нескольких начальных координат x_{00} .

4. Приближая фотодатчик к лампе, проведите измерения освещенности E_i в точках с координатами x_i таких, чтобы расстояния L_i между датчиком и лампой были равны 35, 30, 25, 20 и 15 см. Для оценки случайной погрешности повторите измерения 3-4 раза при тех же координатах x_i , то удаляя фотодатчик от лампы, то приближая его. Данные занесите в таблицу 7.2.
5. По окончании измерений **выключите лампу накаливания.**

Обработка результатов

1. Сравните показания люксметра при выключенной и включенной лампе накаливания и примите решение о необходимости учета фоновой засветки. В качестве оценки фона $E_{фон}$ и его погрешности $\sigma_{фон}$ можно использовать соотношения:

$$E_{фон} = \frac{E_{фон,маx} + E_{фон,миn}}{2}; \quad \sigma_{фон} = \frac{E_{фон,маx} - E_{фон,миn}}{2}.$$

2. По результатам серии прямых измерений освещенности E от расстояния L :
 - а) в качестве оценки $E(L)$ рассчитайте среднее арифметическое;
 - б) оцените приборную погрешность $\sigma_{люкс}$ измерений освещенности по приведенным выше паспортным данным люксметра;
 - в) оцените случайную погрешность $S_{люкс}$ освещенности по результатам прямых измерений;
 - г) суммарную погрешность оцените по формуле:

$$\sigma_{сумм} = \sqrt{S_{люкс}^2 + \sigma_{люкс}^2}$$

(в случае учета фоновой засветки формула изменится – как?)

3. Проверьте ранее приведенную формулу зависимости освещенности E от расстояния L от точечного источника:

$$E = \frac{I \cdot \cos\theta}{L^2}.$$

Для этого постройте график зависимости E от $\frac{1}{L^2}$ и проверьте его линейность (визуально или с использованием МНК). При необходимости дайте объяснение полученных результатов.

Упражнение 2. Исследование зависимости характеристик фотодиода, включенного без внешней нагрузки, от освещенности его поверхности.

Измерения

1. Установите в подвижный рейтер фотодиод. Входное окно фотодиода и лампа должны быть на одной высоте. Выходные клеммы фотодиода подключите к мультиметру М9803R, включенному в режиме измерения постоянного напряжения. **Лампу накаливания не включайте.**
2. Проведите измерения фото ЭДС ($U_{фон}$) от естественного освещения при тех же расстояниях L , что и в Упр.1¹. В случае существенных колебаний $U_{фон}$ зафиксируйте максимальные $U_{фон, max}$ и минимальные $U_{фон, min}$ показания прибора, а затем, аналогично Упр.1, оцените $U_{фон}$ и погрешность $\sigma_{U_{фон}}$. Полученные данные занесите в таблицу 7.3.
3. Подключите выходные клеммы фотодиода к мультиметру DT – 830B, включенному в режиме измерения постоянного тока. Проведите измерения силы тока ($I_{фон}$) при естественном освещении аналогично п.2 настоящего упражнения. Полученные данные занесите в таблицу 7.4.
4. Установите фотодиод на максимальном расстоянии от лампы $L=35$ см. Включите лампу. **Дождитесь стабилизации показаний мультиметра (примерно 3 – 7 минут).**
5. Проведите измерения силы тока ($I_{фд0}$) фотодиода при включенной лампе на тех же расстояниях L . Данные занесите в табл. 7.4.
6. Переключите фотодиод к мультиметру М9803R для измерения напряжения. Проведите измерения фото ЭДС ($U_{фд0}$) при включенной лампе на тех же расстояниях L . Данные занесите в табл. 7.3.
7. По окончании измерений **не выключайте лампу накаливания.**

Обработка результатов

1. Для каждого значения L вычислите фотоЭДС $U_{фд}$ на фотодиоде и силы тока $I_{фд}$ через фотодиод по формуле:
$$U_{фд}(L) = U_{фд0} - U_{фон} \cdot \quad I_{фд}(L) = I_{фд0} - I_{фон}$$
2. По паспортным данным мультиметров оцените систематические погрешности измеряемых величин. Так как измерения проводятся однократно, то случайную погрешность можно оценить по колебаниям показаний мультиметров при каждом фиксированном L .
Оцените суммарную погрешность $\sigma_{сумм, U_{фд}}$ фотоЭДС на фотодиоде и $\sigma_{сумм, I_{фд}}$ силы тока через фотодиод.

¹ Для ускорения процесса фоновые значения можно измерять и при включенной лампе накаливания (пункты 5,6), просто перекрывая идущий от нее свет каким-либо непрозрачным предметом.

3. Используя измеренные в Упр.1 значение освещенности E для каждого L , постройте графики зависимости $U_{фд}(E)$ и $I_{фд}(E)$. Сделайте вывод о возможном использовании фотодиода для измерения освещенности.

Упражнение 3. Измерение вольтамперной характеристики (ВАХ) фотодиода при различных расстояниях до лампы накаливания.

Измерения

1. Соберите с использованием платы с гнездами схему, представленную на рис. 7.14, для измерения «прямой ветви» ВАХ.

Для питания схемы используйте блок питания НУ 3002. Проверьте, что обе ручки регулировки напряжения на нем установлены на нуль (против часовой стрелки до упора). Ручки регулировки силы тока установите в среднее положение **Включать блок питания можно только после проверки собранной схемы преподавателем.**

В качестве вольтметра используйте мультиметр М9803R в режиме измерения напряжения, а в качестве амперметра – мультиметр DT-830B в режиме измерения силы тока.

Диапазоны измерения напряжения мультиметра М9803R переключаются автоматически, а диапазоны измерения силы тока мультиметра DT-830B – вручную. **Поэтому необходимо внимательно следить за показаниями амперметра и начинать измерения на заведомо большем пределе измерения.** Последовательно с диодом подключается резистор с сопротивлением **6,8 кОм**, который ограничивает максимальный ток через диод, не допуская его выхода из строя.

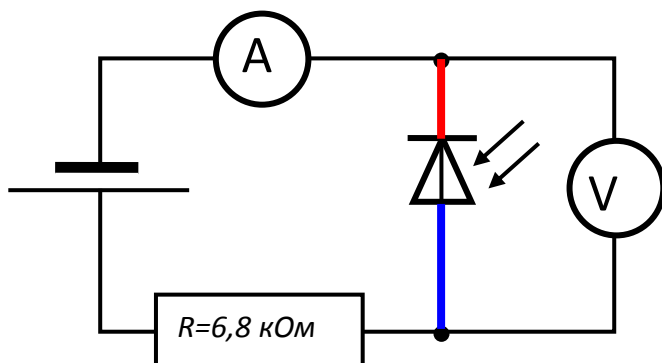


Рис. 7.14. Схема электрической цепи для измерения «прямой ветви» ВАХ фотодиода (к «←» источника питания подключить красный провод от фотодиода).

2. Установите фотодиод на расстоянии $L_1 = 35$ см от лампы накаливания. Лампа накаливания включена (с предыдущего упражнения). Включите мультиметры. **Блок питания выключен.**
3. **После проверки собранной схемы преподавателем** включите блок питания и установите напряжение на выходе блока питания $U_{ншт}$ равное нулю. При этом мультиметры будут показывать силу тока I , протекающего через фотодиод, и напряжение между выводами фотодиода U .

4. Необходимо проверить полярность подключения всех элементов схемы. Для этого установите на выходе блока питания напряжение $U_{пит}$, равное 5 В. В соответствии с приведенной на рис. 7.8а ВАХ фотодиода в случае «прямой ветви» сила тока должна быть положительной и довольно большой (сотни мкА), при этом напряжение на диоде мало (менее 1 В), т.к. диод открыт. Если же подключение выполнено для «обратной ветви», то сила тока должна быть отрицательной и малой, при этом напряжение на диоде сравнимо с напряжением питания (около 3-4 В). Для проверки можно поменять полярность подключения источника питания. В соответствии с показаниями приборов сделайте вывод о правильности подключения всех устройств, при необходимости поменяйте полярность подключения мультиметров, предварительно уменьшив до нуля напряжение питания.
5. Изменяя напряжение на выходе блока питания $U_{пит}$, измерьте напряжение между выводами фотодиода U и протекающий через фотодиод ток I . Полученные данные занесите в таблицу 7.5. Обращайте внимание на знак «—» перед измеряемыми значениями I и U , не забывайте его записывать. Напряжение на выходе блока питания рекомендуется изменять:
 - от 0 до 1 В через 0,2 В
 - от 1 В до 5 В через 1 В
 - от 5 В до 10 В через 5 В
6. Соберите схему для измерения «обратной ветви» ВАХ. Для этого уменьшите до нуля напряжение на выходе блока питания и поменяйте местами провода, идущие от него (изменяется полярность подключения). Поскольку в упражнении используются цифровые мультиметры, полярность их включения менять не надо, так как она определяется автоматически.
7. Изменяя напряжение на блоке питания, измерьте напряжение между выводами фотодиода U и протекающий через амперметр ток I (аналогично п.5). Для «обратной ветви» напряжение на выходе блока питания рекомендуется изменять:
 - от 0 до 2 В через 0,5 В.
 - от 2 до 10 В через 2 В.
8. (этот пункт выполняется по указанию преподавателя)
Уменьшите напряжение на выходе блока питания до нуля. Установите фотодиод на расстояние $L_2 = 20$ см от лампы накаливания и повторите измерения «прямой и обратной ветвей» вольтамперной характеристики (аналогично п. 5-7). Полученные данные занести в таблицу 7.5.
9. Выключите блок питания и мультиметр ДТ-830В, разберите схему. Лампу накаливания оставьте включенной для выполнения следующего упражнения.

Обработка результатов

1. Оцените систематические погрешности измерения напряжения σ_U мультиметром М9803R и измерения силы тока σ_I мультиметром DT-830B.
2. Постройте ВАХ фотодиода при различных значениях освещенности на одном графике (формата А4). Проанализируйте результат (сравните с рис. 7.8).

Упражнение 4. Исследование зависимости характеристик солнечной батареи, включенной без внешней нагрузки, от освещенности.

Порядок выполнения данного упражнения аналогичен измерениям с фотодиодом в Упр.2.

Измерения

1. Установите в рейтер солнечную батарею, клеммы батареи подсоедините к мультиметру М9803R, включив его в режим измерения постоянного напряжения. Свет должен падать перпендикулярно поверхности батареи.
2. Установите солнечную батарею на расстояние $L = 35$ см (лампа включена с предыдущего упражнения).
3. Проведите измерения напряжения холостого хода U_{XX0} и фоновых значений $U_{фон}$ при тех же расстояниях L , что и в Упр.1. Для измерений фоновых значений перекройте световой поток от лампы накаливания непрозрачным объектом (например, рукой). Результаты измерений запишите в таблицу 7.6. В эту же таблицу перенесите значения $E_0(L)$ из таблицы 7.1
4. Переключите клеммы солнечной батареи к мультиметру DT – 830B, включенному в режиме измерения постоянного тока. Проведите измерения силы тока $I_{сб0}$ «короткого замыкания» солнечной батареи и фонового значения аналогично п.3-4. Результаты измерений запишите в таблицу 7.7.

Обработка результатов

1. Оцените погрешности измеряемых величин.
2. Рассчитайте значения напряжения холостого хода и тока короткого замыкания солнечной батареи:

$$U_{XX}(L) = U_{XX0} - U_{фон} \quad I_{сб}(L) = I_{сб0} - I_{фон}$$

3. Постройте графики зависимости $U_{XX}(E)$ и $I_{сб}(E)$, сравните с аналогичными графиками из Упр. 2 для фотодиода.

Упражнение 5. Исследование зависимости напряжения холостого хода от угла поворота солнечной батареи.



Рис. 7.15. Поворотное устройство солнечной батареи.

Измерения

1. Установите солнечную батарею на расстоянии $L = 25$ см от лампы накаливания. Свет должен падать перпендикулярно поверхности батареи, на лимбе солнечной батареи должна стоять нулевая отметка (рис. 7.15).
2. Поворачивая солнечную батарею от 0 до 50 градусов, измерьте напряжение холостого хода U_{xx} и силу тока I_{cb} . Данные занесите в табл. 7.8.

Обработка результатов

1. Постройте графики зависимости $U_{xx}(\varphi)$ и $I_{cb}(\varphi)$. Изменяются ли эти величины пропорционально $\cos \varphi$?

Упражнение 6. Измерение ВАХ и КПД солнечной батареи.

Измерения

1. Соберите схему для измерения ВАХ солнечной батареи (рис. 7.16). В качестве вольтметра используется мультиметр М9803R в режиме измерения напряжения, а в качестве амперметра – мультиметр DT-830B в режиме измерения силы тока.
В качестве регулируемой нагрузки R используется блок резисторов - реостат (рис. 7.17), состоящий из двух переменных резисторов ($R_1 = 10$ кОм и $R_2 = 1$ кОм), соединенных последовательно. Регулировка сопротивления реостата осуществляется вращением ручек резисторов. Реостат подключается в схему через клеммы «вход» и «выход». К этим же клеммам подключается вольтметр.
Величина сопротивления реостата определяется подключенным к нему вторым мультиметром DT 830B, для этого переключатель на блоке резисторов устанавливается в положение «Омметр» (рис. 7.17), при этом реостат отключается от схемы (тока через реостат нет). При переводе переключателя в положение «Сопротивление» резисторы включаются в измерительную цепь с солнечной батареей, а измеритель сопротивления отключается.
2. Установите батарею на нулевую отметку на лимбе ее поворота (свет должен падать перпендикулярно поверхности батареи). Расстояние L установите равным 35 см. Лампа включена.
3. Поставьте минимальное значение сопротивления на реостате, измерьте это значение (переключатель в положении «Омметр») и запишите его в

таблицу 7.9. Переводя переключатель в положение «Сопротивление», измерьте напряжение U на реостате и силу тока I через амперметр. Результаты этих и всех последующих измерений записывайте в таблицу 7.9.

4. Вращая ручки реостата, устанавливайте его сопротивление в соответствии с таблицей 7.9. Измеряйте и записывайте U и I для каждого значения сопротивления нагрузки.

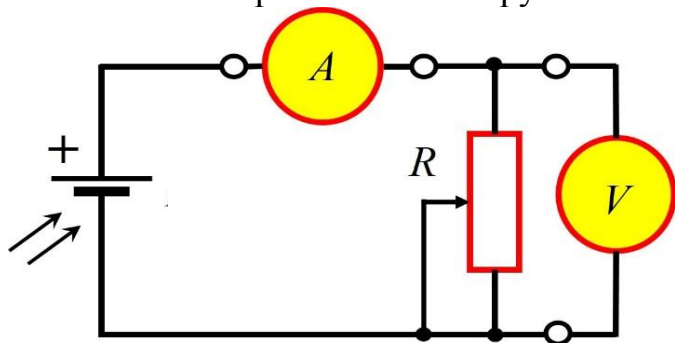


Рис. 7.16. Схема для измерения ВАХ солнечной батареи.

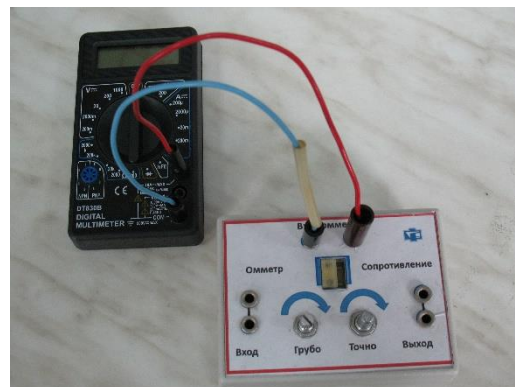


Рис. 7.17. Внешний вид реостата.

5. **(этот пункт выполняется по указанию преподавателя)**
Уменьшите расстояние между лампой и солнечным модулем до 20 см. Выполните измерения U и I , аналогично п.4.
6. Выключите лампу накаливания, все мультиметры, разберите схему. Приведите рабочее место в порядок.

Обработка результатов

1. Оцените погрешность измерения напряжения мультиметром M9803R и силы тока мультиметром DT-830B.
2. Для каждого измерения рассчитайте электрическую мощность по формуле

$$W = I U.$$

Оцените погрешность определения мощности σ_W как косвенно измеряемой величины.

3. Вычислите потоки излучения Φ (в Ваттах), падающие на солнечную батарею при различных расстояниях L , по формуле:

$$\Phi = E_0 * S_{c3} / 683,$$

где E_0 (в люксах) – показания люксметра из Упр. 1 (для расстояний L , равных 35 и 20 см),

S_{c3} – площадь облучаемой поверхности солнечной батареи (можно считать прямоугольником со сторонами $(28 \pm 0,3)$ и $(35 \pm 0,3)$ мм),

$\Phi_{\text{лм}} = E_0 * S_{c3}$ – световой поток в люменах (напомним, что $\text{лм} = \text{лк} \cdot \text{м}^2$).

4. Определите КПД солнечной батареи для всех сопротивлений реостата

$$\eta = \frac{W}{\Phi}$$

и оцените его погрешность как косвенно измеряемой величины.

5. Постройте ВАХ солнечной батареи для двух значений освещенности. Отметьте на графиках точки, соответствующие максимальным значениям КПД.
6. Постройте графики зависимости КПД солнечной батареи от сопротивления R для двух значений освещенности.

Основные итоги работы: ...

Выводы: ...

Контрольные вопросы

1. Что такое полупроводниковый диод?
2. Чем фотодиод отличается от полупроводникового диода?
3. Каких свободных носителей больше в легированном полупроводнике р-типа?
4. Что возникает на границе контакта полупроводников с разными концентрациями примесей?
5. Что такое внутренний фотоэффект?
6. Как изменится ВАХ фотодиода при его освещении? Почему?
7. Какие световые величины вы знаете? В каких единицах их измеряют?
8. Что такое контактная разность потенциалов?
9. Что такое режим холостого хода?
10. Как рассчитать КПД солнечной батареи?
11. Какие виды солнечных батарей Вы знаете?
12. Какие факторы влияют на КПД солнечной батареи?

Литература.

1. <https://ru.wikipedia.org/> «Люмен», «Кандела», «Люкс».
2. http://genphys.phys.msu.ru/rus/lab/vtek/Graf_of_rez_eksp_2016.pdf
Графическое оформление результатов эксперимента.

Таблицы для записи результатов измерений

(задача 7)

Можно распечатать и использовать для записи результатов измерений

Таблица 7.1

Измерения освещенности $E_{фон}$ люксметром при **выключенной** лампе

$E_{фон, max} =$	ЛК	$E_{фон, min} =$	ЛК
$x_{max} =$	СМ	$x_{min} =$	СМ
$x_{ист, прил} \approx$	СМ	$x_{ист} =$	СМ
$E_{фон} =$	ЛК	$\sigma_{фон} =$	ЛК

Таблица 7.2

Измерения освещенности $E_{фон}$ люксметром при **включенной** лампе

x (СМ)					
L (СМ)	15	20	25	30	35
E_i (ЛК)					
E (ЛК)					
$S_{люкс}$ (ЛК)					
$\sigma_{люкс}$ (ЛК)					
$\sigma_{сумм}$ (ЛК)					
$1/L^2$ (СМ ⁻²)					

Таблица 7.3

Измерения фото ЭДС фотодиодом без внешней нагрузки

x (СМ)					
L (СМ)	15	20	25	30	35
$U_{фон}$ (МВ)					
$\sigma_{U_{фон}}$ (МВ)					
$U_{ф\delta 0}$ (МВ)					
$U_{ф\delta}$ (МВ)					
$\sigma_{сумм, ф}$ (МВ)					
E (ЛК)					

Таблица 7.4

Измерения силы тока фотодиода без внешней нагрузки

$L(\text{см})$	15	20	25	30	35
$I_{\text{фон}}(\text{мА})$					
$\sigma_{I_{\text{фон}}}(\text{мА})$					
$I_{\text{фд}0}(\text{мА})$					
$I_{\text{фд}}(\text{мА})$					
$\sigma_{\text{сумм.}\phi}(\text{В})$					
E (ЛК)					

Таблица 7.5

Измерения вольтамперной характеристики фотодиода

	$U_{\text{пит}},$ В	$L_1 = 35 \text{ см}$				$L_2 = 20 \text{ см}$			
		$U,$ В	$\sigma_U,$ В	$I,$ мА	$\sigma_I,$ мА	$U, \text{В}$	$\sigma_U,$ В	$I,$ мА	$\sigma_I,$ мА
«Прямая ветвь» ВАХ	0								
	0,2								
	0,4								
	0,6								
	0,8								
	1								
	2								
	3								
	4								
	5								
10									
«Обратная ветвь» ВАХ	0								
	-0,5								
	-1								
	-1,5								
	-2								
	-4								
	-6								
	-8								
-10									

Задача 7.

Таблица 7.6

Измерения напряжения холостого хода U_{XX} солнечной батареи без внешней нагрузки

$L(\text{см})$	15	20	25	30	35
$U_{фон}(\text{мВ})$					
$\sigma_{U_{фон}}(\text{мВ})$					
$U_{XX0}(\text{мВ})$					
$U_{XX}(\text{мВ})$					
$\sigma_{сумм, XX}(\text{мВ})$					
E (ЛК)					

Таблица 7.7

Измерения силы тока $I_{сб}$ через солнечную батарею без внешней нагрузки

$L(\text{см})$	15	20	25	30	35
$I_{фон}(\text{В мА})$					
$\sigma_{I_{фон}}(\text{мА})$					
$I_{сб0}(\text{мА})$					
$I_{сб}(\text{мА})$					
$\sigma_{сумм, \phi}(\text{В})$					
E (ЛК)					

Таблица 7.8

Зависимость напряжения U_{XX} и силы тока $I_{сб}$ солнечной батареи от угла падения

ϕ , град	U_{XX} , В	$I_{сб}$, мА
0		
10		
20		
30		
40		
50		

Таблица 7.9

ВАХ солнечной батареи

L = 35 см										
N	R, кОм рекомен- довано	R, кОм установ- лено	U, В	σ_U , В	I, мА	σ_I , мА	W, Вт	σ_W , Вт	η	σ_η
1										
2	0,1									
3	0,2									
4	0,5									
5	0,8									
6	1									
7	1,2									
8	1,4									
9	1,6									
10	2									
11	3									
12	4									
13	6									
14	10									
L = 20 см										
1										
2	0,05									
3	0,1									
4	0,2									
5	0,25									
6	0,3									
7	0,35									
8	0,4									
9	0,5									
10	0,7									
11	1									
12	2									
13	3									
14	10									