

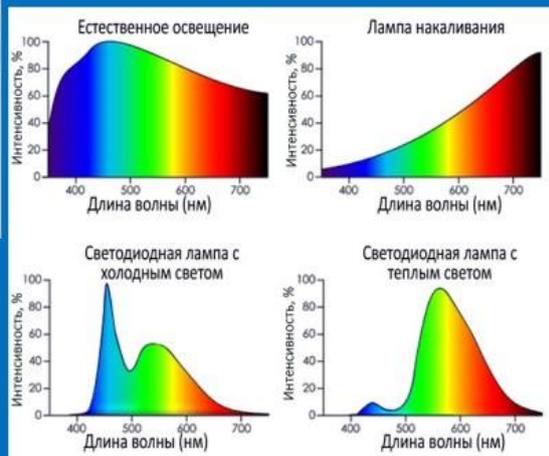
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
МГУ им. М.В. ЛОМОНОСОВА



ВВЕДЕНИЕ В ТЕХНИКУ ЭКСПЕРИМЕНТА

Лабораторный практикум

Лабораторная работа № 7 СВЕТОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ



2018

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).

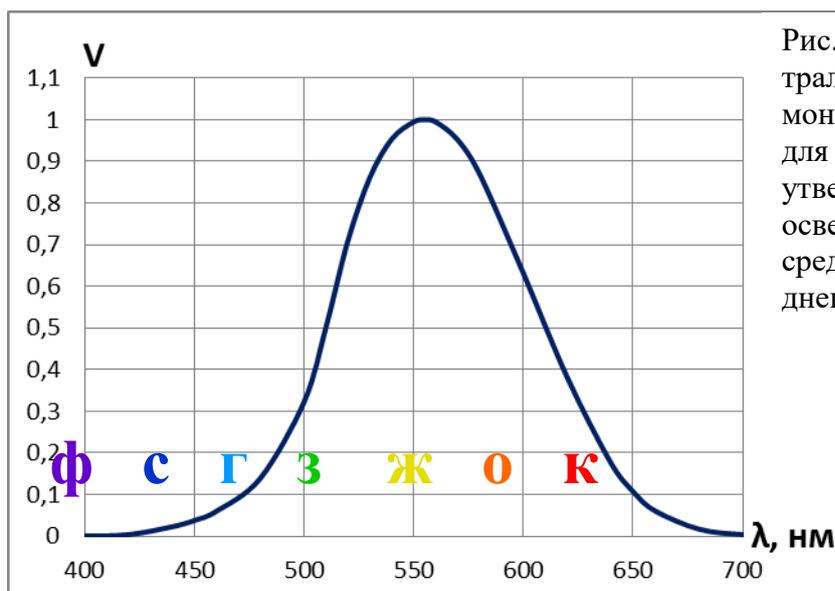


Рис. 7.1. Относительная спектральная световая эффективность монохроматического излучения для дневного зрения. Кривая утверждена международной осветительной комиссией для среднего нормального глаза при дневном свете.

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 светоотдачи 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 17 клк. 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 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

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).

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, *a*). *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**.

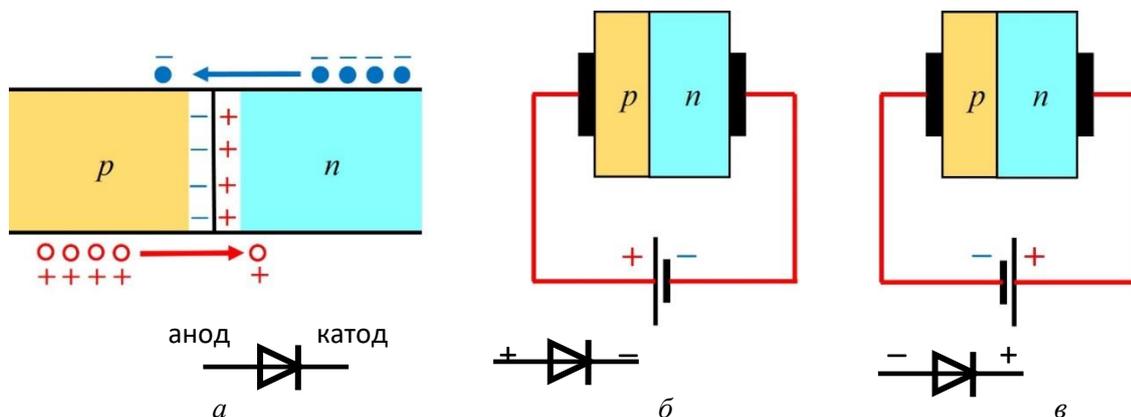


Рис. 7.3. *n-p* –переход (и обозначение диода): свободный (*a*) при прямом (*б*) и обратном (*в*) подключении в цепь.

Полупроводниковый диод – прибор, содержащий один *p-n*-переход. На рис. 7.4, *a* 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 (*a*) 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. Такое подключение называют **прямым**.

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). Такое подключение называют **обратным**.

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.

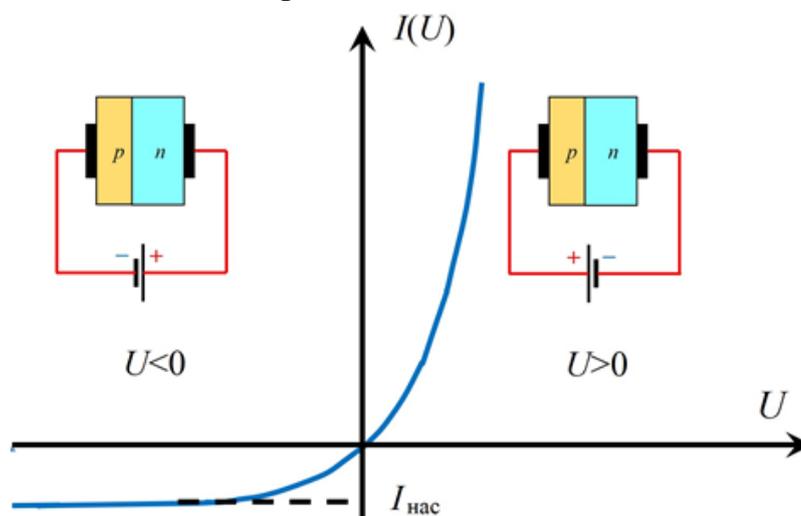


Рис. 7.5. Вольтамперная характеристика p - n -перехода.

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

Таким образом, ток через p - n -переход обусловлен дрейфом **неосновных** носителей – электронов из p -области в n -область. Если же освещать n -область, то и в этом случае будет наблюдаться дрейф **неосновных** носителей – дырок из n -области в p -область. Дрейфовый ток фотоносителей называется *фототоком*, в переходе (внутри фотодиода) он направлен из n -области в p -область.

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

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

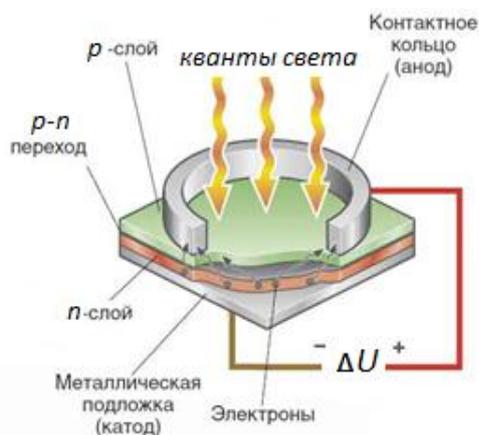


Рис. 7.6. Устройство фотодиода.



Рис. 7.7. Фотодиод ФД-7К.

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.

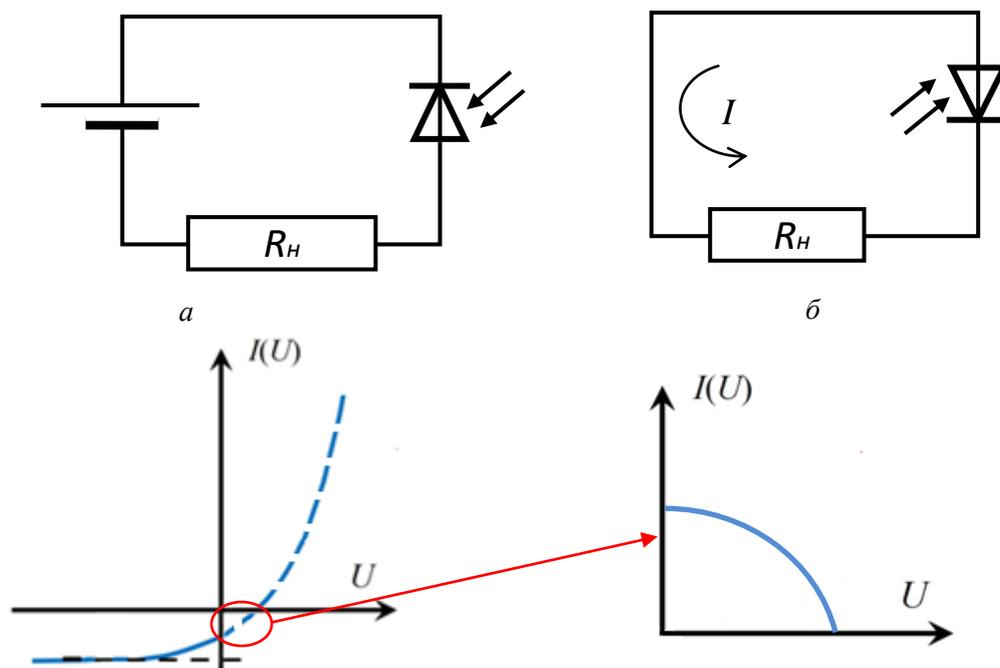


Рис. 7.8. Схема включения фотодиода и ВАХ схемы:

а – фотодиодный режим;

б – фотовольтаический режим.

В *фотодиодном режиме* (рис. 7.8, *а*) фотодиод применяется при внешнем обратном (запирающем) напряжении. 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 (рис. 7.9).

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



Рис. 7.9. Внешний вид пленочных солнечных преобразователей.

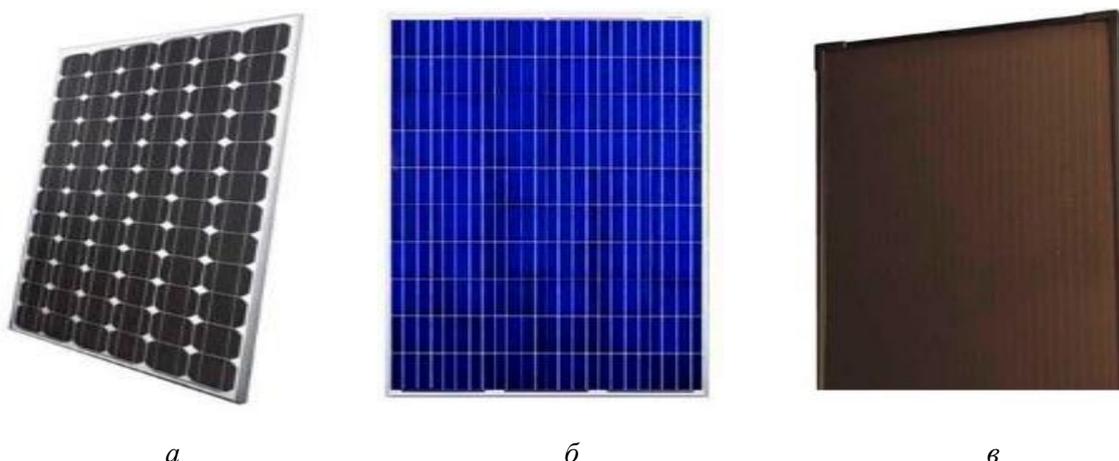


Рис. 7.10. Внешний вид солнечных батарей: монокристаллические (а), поликристаллические (б) и аморфные (в).

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. 7.10, 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. 7.10, 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. 7.10, 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 диффундируют к p - n -переходу, где разделяются 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.

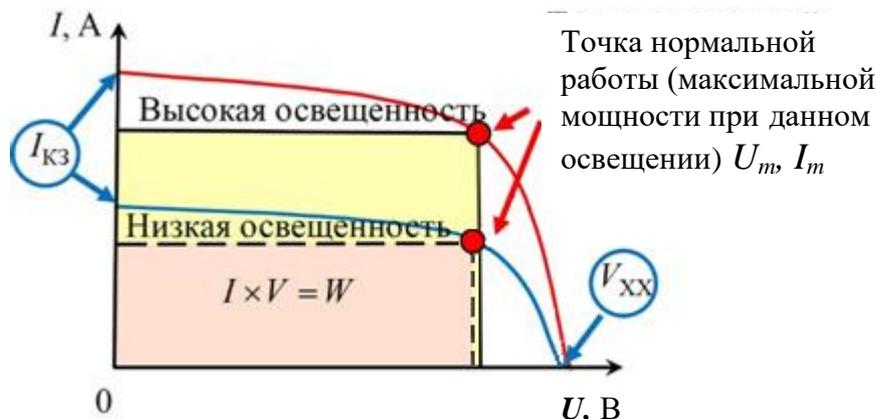


Рис. 7.11. ВАХ солнечной батареи для двух значений освещенности.

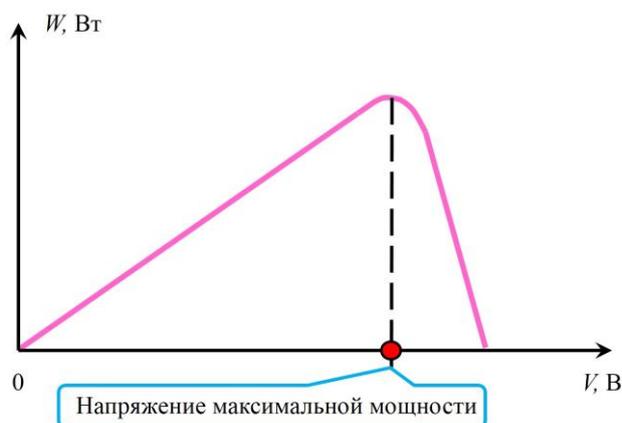


Рис. 7.12. Зависимость мощности солнечной батареи от напряжения.

К числу важнейших характеристик солнечной батареи относят:

- *напряжение холостого хода* U_{XX} — 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.

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 уменьшают 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 рис. 7.13. На оптической скамье (1) установлены: светодиод (2) (подключённый к блоку питания (3)) и поворотный держатель (4), на который закрепляются либо *фотодатчик люксметра DT-1308*, либо *фотодиод*, либо *солнечный элемент* (на рис. 7.13 оба не показаны). Для регулировки тока через фотодиод и регулировки нагрузки солнечного элемента используется реостат и мультиметр DT-830B, работающий в режиме омметра. Ток и напряжение в цепи фотоприемников измеряются мультиметрами DT-830B и MS8040.

Для питания схемы с фотодиодом используют блок питания НУ 3003 (на рис. 7.13 не показан).

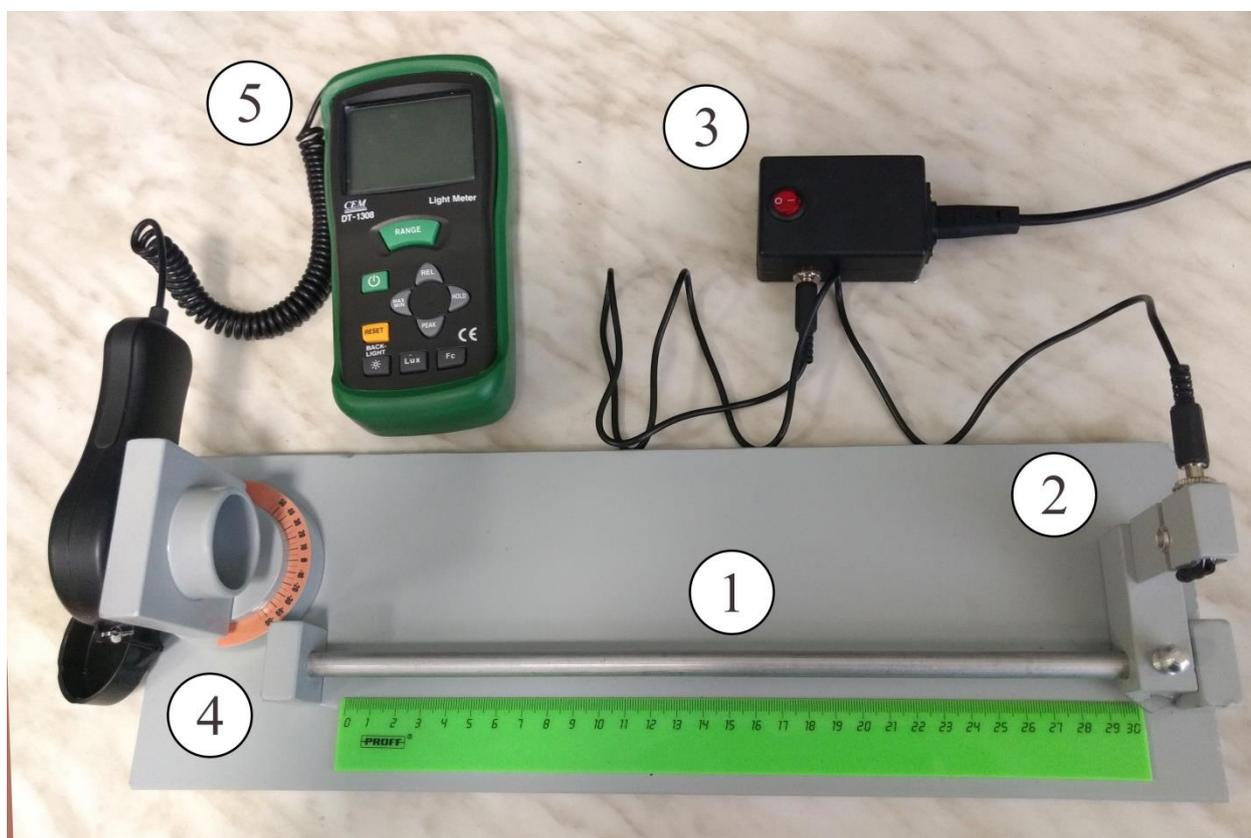


Рис. 7.13. Экспериментальная установка для измерения световых характеристик.

Приборы и оборудование, используемые в лабораторной работе:

Блок питания HY 3003 (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 MS8040

(используют для измерения постоянного напряжения и тока)



Постоянное напряжение

Диапазон	Разрешение	Погрешность
200 мВ	0.01 мВ	$\pm(0.05\%+6)$
2 В	0.1 мВ	$\pm(0.05\%+6)$
20 В	1 мВ	$\pm(0.05\%+6)$
200 В	10 мВ	$\pm(0.05\%+6)$
1000 В	0.1 В	$\pm(0.05\%+6)$

Постоянный ток

Диапазон	Разрешение	Погрешность
200 мкА	0.01 мкА	$\pm(0.15\%+15)$
2000 мкА	0.1 мкА	$\pm(0.15\%+15)$
20 мА	1 мкА	$\pm(0.15\%+15)$
200 мА	10 мкА	$\pm(0.15\%+15)$

Формула для расчета погрешности измерений:

$$0,05\% \cdot X + 6 \cdot Y \text{ (напряжение),}$$

$$0,15\% \cdot X + 15 \cdot Y \text{ (ток),}$$

где X – измеренное значение, Y – разрешение.

Мультиметр DT- 830 В

(используют для измерения сопротивления, напряжения и силы тока)



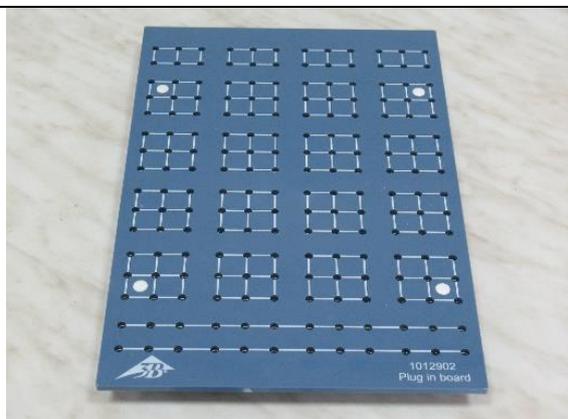
Отображение информации

Единицы счета ?	.....	1999
Количество измерений в секунду ?	.....	3
Базовая погрешность ?	.....	1%

Диапазоны и погрешность измерений

Максимальное постоянное напряжение (U-) ?	.....	1000 В
Минимальное постоянное напряжение (U-) ?	.....	0.2 В
Погрешность показаний U- (% + единицы счета) ?	.....	0.5% + 2
Максимальное переменное напряжение (U~) ?	.....	750 В
Минимальное переменное напряжение (U~) ?	.....	200 В
Погрешность показаний U~ (% + единицы счета) ?	.....	1.2% + 10
Максимальный постоянный ток (A) ?	.....	10 А
Минимальный постоянный ток (A-) ?	.....	0.0002 А
Погрешность показаний A- (% + единицы счета) ?	.....	2% + 2

Плата с гнездами для установки элементов схем, перемычки, резисторы, набор проводов.



Люксметр DT 1308
(используется для измерения светового потока)



Погрешность измерений: $\pm 5\% * X (< 10,000 \text{ Lux})$, $\pm 10\% * X (> 10,000 \text{ Lux})$

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

Измерения

1. Проведите измерения люксметром фоновой засветки **при выключенном светодиоде**. Для этого установите на поворотный держатель *фотодатчик люксметра DT-1308 (убедиться в том, что риска на поворотном держателе совпадает с нулем на шкале лимба!)*. Перемещая светодиод вдоль скамьи, наблюдайте изменение фоновой освещенности. Для **переключения диапазонов измерения люксметра используйте кнопку «RANGE»**.

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

Также в таблицу 7.1 занесите диапазон изменения координат светодиода ($x_{\text{макс}}$ и $x_{\text{мин}}$), а также примерную координату фотодатчика люксметра $x_{\text{ист,прибл}}$.

2. **Включите светодиод. Дождитесь стабилизации показаний люксметра.**

Для уточнения координаты источника $x_{\text{ист}}$ проведите измерение освещенности E_0 для случая максимального расстояния от светодиода (координата фотодатчика люксметра x_{00}) (**обращайте внимание на фоновую засветку в помещении!**). Затем, приближая светодиод к люксметру, найдите 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 светодиода уменьшилось в два раза. Зная величину перемещения светодиода $|x_{00} - x_{01}|$, нетрудно найти координату светодиода $x_{\text{ист}}$ (результат занесите в табл. 7.1) Для повышения точности

¹ Таблицы для записи результатов приведены в конце описания задачи.

подобные измерения можно провести для нескольких начальных координат x_{00} .

3. Приближая светодиод к фотодатчику люксметра, проведите измерения освещенности E_i в точках с координатами x_i таких, чтобы расстояния L_i между датчиком и светодиодом были равны 30, 20 и 10 см. Для оценки случайной погрешности повторите измерения 3-4 раза при тех же координатах x_i , то удаляя светодиод от фотодатчика, то приближая его. Данные занесите в таблицу 7.2.
4. По окончании измерений **выключите светодиод**.

Обработка результатов

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

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

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 на подвижный держатель фотодиод (**убедиться в том, что риска на поворотном держателе совпадает с нулем на шкале лимба!**). Выходные клеммы фотодиода подключите к мультиметру MS8040, включенному в режиме измерения постоянного напряжения (рис. 7.14). **Светодиод не включайте.**



Рис. 7.14. Схема для выполнения упражнения 2.

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 светодиод на минимальном расстоянии от фотодиода $L=10$ см. Включите светодиод. **Дождитесь стабилизации показаний мультиметра.**
5. Проведите измерения силы тока ($I_{фд0}$) фотодиода при включенном светодиоде на тех же расстояниях L . Данные занесите в табл. 7.4.
6. Переключите фотодиод к мультиметру MS8040 для измерения напряжения. Проведите измерения фото ЭДС ($U_{фд0}$) при включенном светодиоде на тех же расстояниях L . Данные занесите в табл. 7.3.
7. По окончании измерений **не выключайте светодиод.**

¹ Для ускорения процесса фоновые значения можно измерять и при включенном светодиоде (пункты 5,6), просто перекрывая идущий от него свет каким-либо непрозрачным предметом.

Обработка результатов

1. Для каждого значения L вычислите фотоЭДС $U_{ф\delta}$ на фотодиоде и силы тока $I_{ф\delta}$ через фотодиод по формуле:

$$U_{ф\delta}(L) = U_{ф\delta 0} - U_{фон} \quad I_{ф\delta}(L) = I_{ф\delta 0} - I_{фон}$$

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 $\sigma_{сумм, U_{ф\delta}}$ фотоЭДС на фотодиоде и $\sigma_{сумм, I_{ф\delta}}$ силы тока через фотодиод.

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

Упражнение 3. Измерение вольтамперной характеристики (ВАХ) фотодиода.

Измерения

1. Соберите с использованием платы с гнездами схему, представленную на рис. 7.15, для измерения «прямой ветви» ВАХ.

Для питания схемы используйте блок питания НУ 3003. 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 MS8040 в режиме измерения напряжения, а в качестве амперметра – мультиметр DT-830B в режиме измерения силы тока.

Диапазоны измерения напряжения мультиметра MS8040 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.

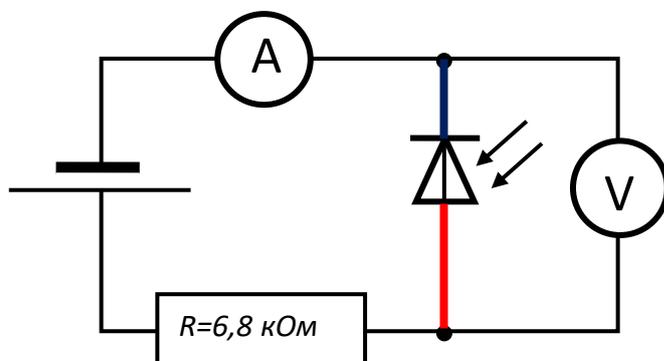


Рис. 7.15. Схема электрической цепи для измерения «прямой ветви» ВАХ фотодиода (к «+» источника питания следует подключить вывод кабеля от фотодиода с красным штекером).

2. Установите светодиод на расстоянии $L = 30$ см от фотодиода. Светодиод включен (с предыдущего упражнения). Включите мультиметры. **Блок питания выключен.**
3. **После проверки собранной схемы преподавателем** включите блок питания и установите напряжение на выходе блока питания $U_{\text{пит}}$ 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 $U_{\text{пит}}$, равное 5 В. В соответствии с приведенной на рис. 7.8, а 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 питания¹.
5. По окончании проверки полярности подключения всех устройств установите напряжение источника равным нулю. Измерьте напряжение между выводами фотодиода U и протекающий через фотодиод ток I (излучение светодиода падает на фотодиод). Полученные данные занесите в таблицу 7.5 (графы «засветкой»).
Перекройте падающий на фотодиод световой поток непрозрачным объектом, располагая его в непосредственной близости от фотодиода. Проведите измерения напряжения и силы тока и занесите в таблицу 7.5 (графы «без засветки»).
6. Изменяя напряжение на выходе блока питания $U_{\text{пит}}$, измерьте напряжение между выводами фотодиода U и протекающий через фотодиод ток I (с засветкой и без засветки). 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
7. Соберите схему для измерения «обратной ветви» ВАХ. **Для этого уменьшите до нуля напряжение на выходе блока питания и поменяйте местами**

¹ Для прямой ветви при питании 5 В и сила тока, и напряжение на фотодиоде, фиксируемые мультиметрами, должны быть положительными. Для обратной ветви при питании 5 В и сила тока, и напряжение на фотодиоде, фиксируемые мультиметрами, должны быть отрицательными. При невыполнении какого-либо из этих требований полярность подключения мультиметра следует поменять.

провода, идущие от него (изменяется полярность подключения питания). Поскольку в упражнении используются цифровые мультиметры, полярность их включения менять не надо, так как она определяется автоматически.

8. Изменяя напряжение на блоке питания, измерьте напряжение между выводами фотодиода U и протекающий через фотодиод ток I (аналогично п.6 с засветкой и без засветки). 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.
9. Выключите блок питания и мультиметр DT-830В, разберите схему. Светодиод оставьте включенным для выполнения следующего упражнения.

Обработка результатов

1. Оцените систематические погрешности измерения напряжения σ_U мультиметром MS8040 и измерения силы тока σ_I мультиметром DT-830В.
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 (выполняется по согласованию с преподавателем).

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

Измерения

1. Установите на подвижный держатель солнечную батарею, клеммы батареи подсоедините к мультиметру MS8040, включив его в режим измерения **постоянного напряжения**. Свет должен падать **перпендикулярно поверхности батареи**.
2. Установите светодиод на расстоянии $L = 20$ см от светодиода (светодиод включен с предыдущего упражнения).
3. Проведите измерения напряжения холостого хода $U_{ХХ0}$ и фоновых значений $U_{фон}$ при тех же расстояниях L , что и в Упр.1. Для измерений фоновых значений перекройте световой поток от светодиода 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. Подключите клеммы солнечной батареи к мультиметру MS8040, **включенному в режиме измерения постоянного тока (режим «mA» (рис. 7.16))¹**. Проведите измерения силы тока $I_{сбо}$ «короткого замыкания» солнечной батареи и фонового значения аналогично п.3. (**следует установить**

¹ Если же показания мультиметра в данном режиме окажутся слишком малы, то следует перейти в режим « μA ».

переключатель режимов измерения мультиметра MS8040 в положение «mA». Результаты измерений запишите в таблицу 7.7.

Обработка результатов

1. Оцените систематические погрешности силы тока σ_I мультиметром MS8040.
2. Оцените погрешности измеряемых величин.
3. Рассчитайте значения напряжения холостого хода и тока короткого замыкания солнечной батареи:

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

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



Рис. 7.16. Подключение мультиметра MS8040 в режиме измерения постоянного тока.

Упражнение 5. Исследование зависимости напряжения холостого хода от угла поворота солнечной батареи (выполняется по согласованию с преподавателем).



Рис. 7.17. Поворотное устройство солнечной батареи.

Измерения

1. Установите светодиод на расстоянии $L = 30$ см от светодиода. Свет должен падать перпендикулярно поверхности батареи, на лимбе солнечной батареи должна стоять нулевая отметка (рис. 7.17).
2. Поворачивая солнечную батарею от 0 до 50 градусов, измерьте напряжение холостого хода U_{XX} и силу тока $I_{сб}$. Данные занесите в табл. 7.8.

Обработка результатов

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

Упражнение 6. Измерение ВАХ и КПД солнечной батареи.

Измерения

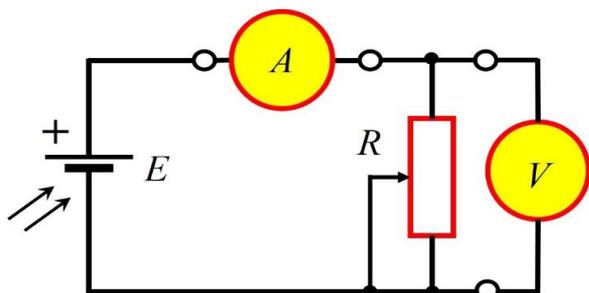


Рис. 7.18. Схема для измерения ВАХ солнечной батареи.

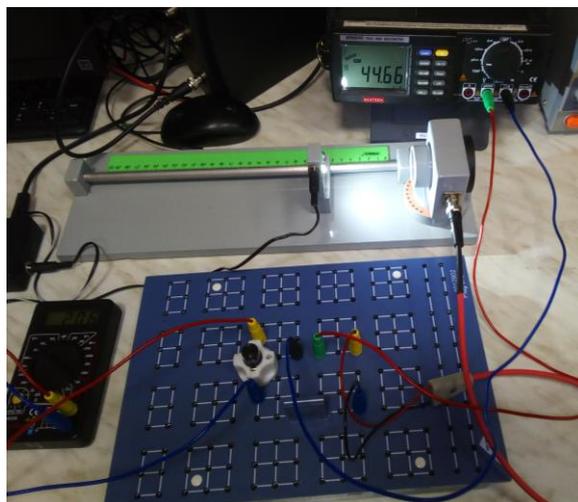


Рис. 7.19. Внешний вид собранной схемы.

1. Соберите схему для измерения ВАХ солнечной батареи (рис. 7.18 и 7.19). В качестве вольтметра используется мультиметр DT-830B в режиме измерения напряжения, а в качестве амперметра – мультиметр MS8040 в режиме измерения силы тока.

В качестве регулируемой нагрузки R используется резистор - реостат (рис. 7.19), состоящий из переменного резистора $R = 50$ кОм (его подключение к общей цепи осуществляется комплектной перемычкой). Регулировка сопротивления реостата осуществляется плавным вращением ручки резистора.

Величина сопротивления реостата определяется при помощи подключенного к нему мультиметра DT-830B.

2. Установите батарею на нулевую отметку на лимбе ее поворота (свет должен падать перпендикулярно поверхности батареи). Расстояние L установите равным 10 см. Светодиод включен.
3. Поставьте минимальное значение сопротивления на реостате, измерьте это значение (предварительно удалив перемычку¹ (рис. 7.20) и переключив мультиметр DT-830B в режим измерения сопротивления (с нужным диапазоном измерений)) и запишите его в таблицу 7.9. Возвратите перемычку назад, переключите мультиметр DT-830B в режим измерения постоянного напряжения (DCV) (с нужным диапазоном) и измерьте напряжение U на реостате и силу тока I (при помощи мультиметра MS8040 (см. рис. 7.16)).

¹ В данной работе также может быть использована перемычка, отключаемая специальным тумблером.

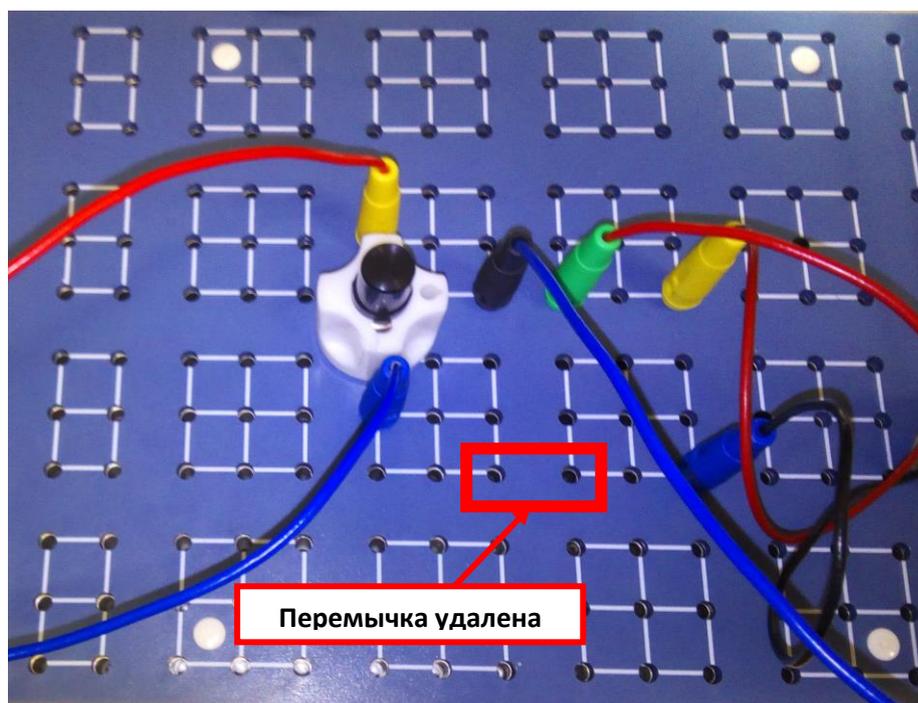


Рис. 7.20. Схема для измерения сопротивления реостата.

Результаты этих и всех последующих измерений записывайте в таблицу 7.9.

4. Вращая ручку реостата, устанавливайте его сопротивление в соответствии с таблицей 7.9. Измеряйте и записывайте U и I для каждого значения сопротивления нагрузки.
5. Выключите светодиод, все мультиметры, разберите схему. Приведите рабочее место в порядок.

Обработка результатов

1. Оцените погрешность измерений при помощи мультиметров MS8040 и DT-830B.
2. Для каждого измерения рассчитайте электрическую мощность по формуле

$$W = I \cdot U.$$

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 расстояния L , равного 10 см), S_{c3} – площадь облучаемой поверхности солнечной батареи (можно считать прямоугольником со сторонами $(24 \pm 0,3)$ и $(38 \pm 0,3)$ мм).

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 p -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.
3. Алешкевич В.А. Электромагнетизм. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 404 с.
4. Калашников С.Г., Электричество, 6-е изд., стереот. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 24 с.
5. Лебедев А.И. Физика полупроводниковых приборов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008, 488 с.
6. Кашкаров А. П. Ветрогенераторы, солнечные батареи и другие полезные конструкции. М.: ДМК Пресс, 2011, 144 с.

Таблицы для записи результатов измерений

(задача 7)

Рекомендуется распечатать и использовать для записи результатов измерений

Таблица 7.1

Измерения освещенности $E_{фон}$ люксметром при **выключенном** светодиоде

$E_{фон, max} =$	ЛК	$E_{фон, min} =$	ЛК
$x_{max} =$	см	$x_{min} =$	см
$x_{ист, при бл} \approx$	см	$x_{ист} =$	см
$E_{фон} =$	ЛК	$\sigma_{фон} =$	ЛК

Таблица 7.2

Измерения освещенности E люксметром при **включенном** светодиоде

x (см)			
L (см)	10	20	30
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)	10	20	30
$U_{фон}$ (мВ)			
$\sigma_{U_{фон}}$ (мВ)			
$U_{ф\partial\theta}$ (мВ)			
$U_{ф\partial}$ (мВ)			
$\sigma_{сумм, U}$ (мВ)			
E (ЛК)			

Таблица 7.4

Измерения силы тока фотодиода без внешней нагрузки

L (см)	10	20	30
$I_{фон}$ (мкА)			
$\sigma_{I_{фон}}$ (мкА)			
$I_{ф\partial\partial}$ (мкА)			
$I_{ф\partial}$ (мкА)			
$\sigma_{сумм,I}$ (мкА)			
E (Лк)			

Таблица 7.5

Измерения вольтамперной характеристики фотодиода ($L = 30$ см)

	$U_{пит}$, В	С засветкой				Без засветки			
		U , В	σ_U , В	I , мкА	σ_I , мкА	U , В	σ_U , В	I , мкА	σ_I , мкА
«Прямая ветвь» ВАХ	0								
	0,2								
	0,4								
	0,6								
	0,8								
	1								
	2								
	3								
	4								
	5								
10									
«Обратная ветвь» ВАХ	0								
	-1								
	-2								
	-4								
	-6								
	-8								
	-10								

Таблица 7.6

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

$L(\text{см})$	10	20	30
$U_{\text{фон}}(\text{В})$			
$\sigma_{U_{\text{фон}}}(\text{В})$			
$U_{XX0}(\text{В})$			
$U_{XX}(\text{В})$			
$\sigma_{\text{сумм.хх}}(\text{В})$			
E (ЛК)			

Таблица 7.7

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

$L(\text{см})$	10	20	30
$I_{\text{фон}}(\text{мкА})$			
$\sigma_{I_{\text{фон}}}(\text{мкА})$			
$I_{cб0}(\text{мкА})$			
$I_{cб}(\text{мкА})$			
$\sigma_{\text{сумм.}I}(\text{мкА})$			
E (ЛК)			

Таблица 7.8

Зависимость напряжения U_{xx} и силы тока I_{cb} солнечной батареи от угла падения

φ, град	U_{xx} , В	I_{cb} , мкА
0		
10		
20		
30		
40		
50		

Таблица 7.9

ВАХ солнечной батареи

L = 10 см									
N	R, кОм установ- лено	U, В	σ_U , В	I, мкА	σ_I , мкА	W, мВт	σ_W , мВт	η	σ_η
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									