

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»

О.Ю. Дементьева, Н.А. Задорожный, С.Л. Тимченко

Характеристики солнечной батареи

Москва
Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана

2026

УДК 621.383.51
ББК 31.252.8

Издание доступно в электронном виде по адресу

Факультет «Фундаментальные науки»
Кафедра «Физика»

*Рекомендовано Научно-методическим советом
МГТУ им. Н.Э. Баумана в качестве учебно-методического пособия*

Авторы:

О.Ю. Дементьева, Н.А. Задорожный, С.Л. Тимченко

Рецензент

доктор технических наук В.Я. Колючкин

О.Ю. Дементьева Характеристические кривые солнечной батареи: учебно-методическое пособие/О.Ю. Дементьева, Н.А. Задорожный, С.Л. Тимченко. — Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026. — с.: ил.

ISBN 978-5-7038-

Представлено описание принципа работы солнечной батареи и показана возможность преобразования световой энергии в электрическую за счет внутреннего фотоэффекта. Рассмотрены методы измерения мощности светового потока, электрических характеристик солнечной батареи - тока короткого замыкания, напряжения холостого хода, а также расчета коэффициента полезного действия. Разобран принцип работы экспериментальной установки, ее компонентов и измерительной аппаратуры, с помощью которых студенты получают экспериментальные данные. Представлена методика обработки экспериментальных данных.

Для студентов всех специальностей МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 621.383.51
ББК 31.252.8

Содержание

Предисловие	5
ВВЕДЕНИЕ.....	7
1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	8
1.1. Внутренний фотоэффект	8
1.2. Освещенный р-п переход	9
1.3. ВАХ солнечного элемента.....	111
1.4. КПД СБ.....	144
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	166
2.1. Используемое оборудование.....	166
2.2. Указания к проведению измерений и меры предосторожности	177
2.3. Термоэлектрическая батарея	188
2.4. Измерение потока излучения, напряжения холостого хода и тока короткого замыкания солнечной батареи при разной интенсивности излучения.....	199
2.5. ВАХ и КПД солнечной батареи при разной интенсивности излучения.	233
2.6. Расчет погрешности измерений	25
3. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ.....	266
ЛИТЕРАТУРА	277

Предисловие

Учебно-методическое пособие подготовлено в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «Физика», в рамках которой предусмотрено выполнение лабораторной работы, позволяющей изучить явление внутреннего фотоэффекта, устройство и принцип работы солнечной батареи. Содержание учебно-методического пособия к лабораторной работе направлено на формирование практических навыков и освоение экспериментальных методов расчета характеристик солнечной батареи.

В теоретической части учебно-методического пособия приведены краткие сведения о способе преобразования световой энергии в электрическую, основанном на внутреннем фотоэффекте. Представлена схема подключения солнечного элемента, приведены ВАХ солнечного элемента при различной интенсивности внешнего излучения.

В экспериментальной части учебно-методического пособия дано описание экспериментальной установки, методов измерения потока излучения, ВАХ солнечной батареи, напряжения холостого хода, тока короткого замыкания, и приведена методика расчета интенсивности светового потока и КПД солнечной батареи.

Приведены подробные рекомендации по обработке результатов проведенных экспериментов.

После освоения материала учебно-методического пособия студенты:

- получают теоретические знания о внутреннем фотоэффекте, красной границе фотоэффекта, p - n переходе, устройстве солнечного элемента;
- овладеют методикой измерения ВАХ солнечной батареи;
- овладеют основными методиками измерения потока излучения и расчёта интенсивности светового потока;
- познакомятся с понятиями: напряжение холостого хода U_{xx} , ток короткого замыкания $I_{кз}$, КПД солнечной батареи;
- узнают о влиянии температуры на ВАХ и КПД солнечной батареи.

Цель работы:

- Ознакомление с процессом преобразования световой энергии в электрическую;
- Освоение методов измерения мощности светового потока, электрических характеристик – ВАХ (тока короткого замыкания, напряжения холостого хода) при разных температурах солнечной батареи;
- Освоение методики расчета КПД солнечной батареи.

ВВЕДЕНИЕ

Солнечная батарея (СБ) – техническое устройство, преобразующее световую энергию в электрическую. Преобразование света в электроэнергию с помощью солнечных батарей оказалось эффективным способом создания альтернативного и надежного источника энергии. Солнечные батареи являются одним из основных устройств, которые используются для получения электрической энергии на космических аппаратах. В отличие от ядерных и радиоизотопных источников энергии, в процессе преобразования энергии СБ представляет собой экологически безопасный источник энергии, работающий долгое время без расхода каких-либо дополнительных материалов.

СБ состоит из нескольких солнечных элементов - фотоэлементов (СЭ). Действие СЭ основано на реализации внутреннего фотоэффекта в неоднородных полупроводниковых структурах. СЭ с p - n – переходами являются наиболее распространенной полупроводниковой структурой. В результате облучения светом p – области p - n – перехода, в полупроводнике генерируются дополнительные носители заряда, которые перемещаются под действием электрического поля p - n -перехода и создают на внешних выводах электродвижущую силу, которую называют фото-ЭДС (фотоэлектродвижущая сила). СЭ используют не только в качестве источника электрической энергии, его также применяют в качестве фотоприемника для обнаружения и измерения количественных характеристик света, например, в фотографии. Использовать энергию солнечных элементов можно так же, как и энергию других, альтернативных источников питания. Солнечные элементы не боятся короткого замыкания, что является их достоинством. Каждый из СЭ предназначен для поддержания определенной силы тока в цепи при заданном напряжении. Электрическая энергия, вырабатываемая СБ зависит от потока солнечной энергии, который обратно пропорционален квадрату расстояния от Солнца и от углового положения ее поверхности по отношению к потоку солнечного излучения. Например, при облачности выходная мощность может снизиться более чем на 50%. При полётах на большом удалении от Солнца (за орбитой Марса) использование СБ становится технически проблематичным и малоэффективным. При полётах же к Венере и Меркурию, напротив, мощность солнечных батарей значительно возрастает (в районе Венеры в 2 раза, в районе Меркурия в 6 раз).

За пределами земной атмосферы плотность потока солнечного излучения

составляет 1353 Вт/м^2 . На поверхности Земли плотность потока солнечного излучения меньше вследствие поглощения света в атмосфере, зависящего от высоты Солнца над горизонтом и состояния атмосферы. Приняв ориентировочно плотность потока 850 Вт/м^2 , получим, что солнечная батарея площадью 1 м^2 при КПД 10 % вырабатывает электрическую мощность 85 Вт.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1. Внутренний фотоэффект

Возможность преобразования световой энергии в электрическую основана на внутреннем фотоэффекте (рис. 1).

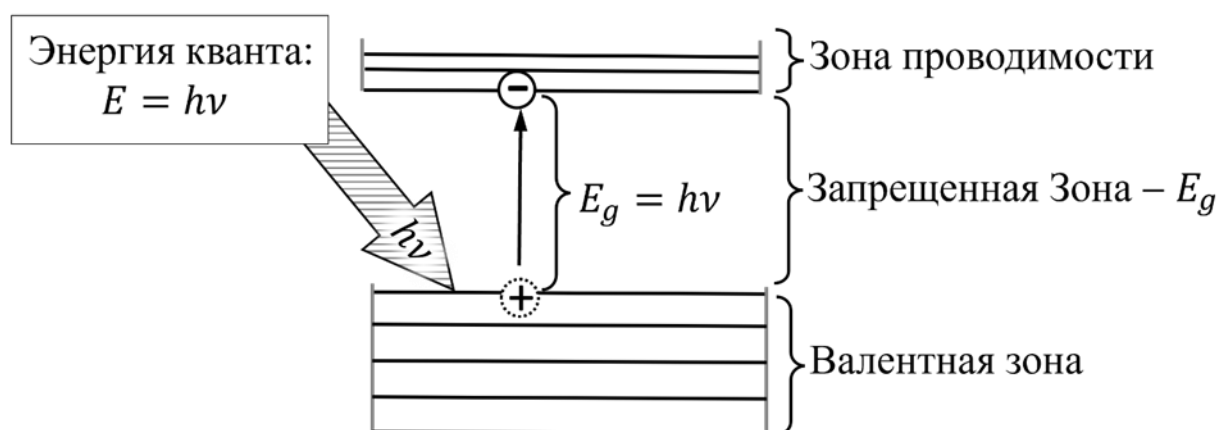


Рис. 1. Схема энергетических зон в беспримесном полупроводнике.

В полупроводнике, внешние - валентные электроны атомов принадлежат кристаллу в целом, при этом они имеют близко расположенные дискретные значения энергии, которые принято объединять в энергетические зоны (рис.1). Поглощая квант света, электрон переходит на энергетический уровень с большим значением энергии. Внутренним фотоэффектом называется поглощение электроном кванта света, в результате чего электрон переходит из валентной зоны в зону проводимости, создавая в валентной зоне вакансию (дырку, рис. 1). В результате в полупроводнике появляются дополнительные носители тока - электроны проводимости и дырки. Внутренний фотоэффект имеет «красную границу». Для беспримесных полупроводников, в энергетическом выражении «красная граница» фотоэффекта равна ширине запрещенной зоны $h\nu_{кр} = \frac{hc}{\lambda_{кр}} = E_g$ (рис. 1). Внутренний фотоэффект

реализуется, если энергия кванта света (фотона) превышает ширину запрещенной зоны E_g , разделяющей валентную зону и зону проводимости:

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} \geq E_g, \quad (1)$$

где h - постоянная Планка, $h = 6.63 \cdot 10^{-34}$ (Дж · с), c – скорость света (м/с); ν - частота света (с^{-1}), λ - длина волны (м). В кремнии внутренний фотоэффект имеет место для волн с длиной $\lambda \leq 1,1$ мкм. т. е. для ближнего инфракрасного, видимого и ультрафиолетового излучений.

1.2. Освещенный p-n переход

СБ представляют собой эффективный фотоэлектрический преобразователь солнечной и альтернативной световой энергии. В качестве элементной базы для СБ используют полупроводники, в частности – кремний. Солнечная батарея представляет собой несколько объединённых фотоэлектрических преобразователей (фотоэлементов) - СЭ, преобразующих непосредственно солнечную энергию в постоянный электрический ток.

Схема подключения СЭ показана на рис. 2. СЭ устроен следующим образом: 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 СЭ в цепь имеются металлические контакты: сплошной со стороны n -слоя, а с освещаемой стороны, стороны – p - слоя контакты размещены по периферии этого слоя.

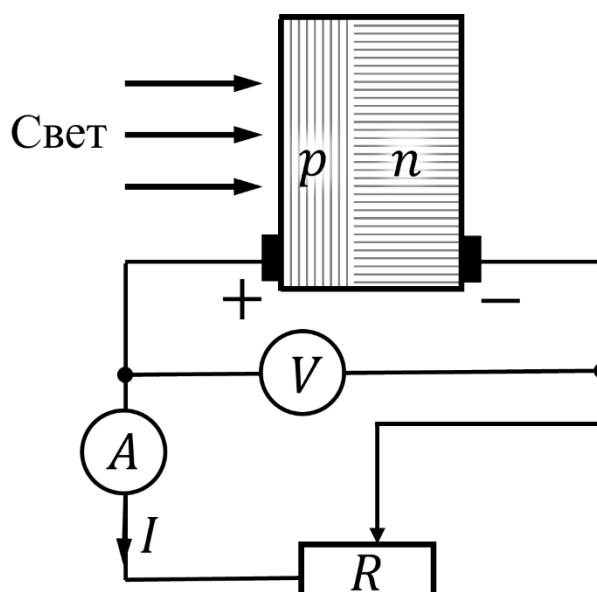


Рис. 2. Схема подключения СЭ.

Рассмотрим p - n -переход в отсутствие света и внешнего источника напряжения. В зоне контакта полупроводников имеется градиент концентрации дырок и электронов, поэтому возникает диффузия носителей – дырок и электронов. Концентрация дырок в p -области больше, чем в n -области, поэтому дырки будут диффундировать в n -область. Аналогично, концентрация электронов в n -области больше, чем в p -области, поэтому электроны будут диффундировать в p -область. Вблизи границы формируется электрическое поле $\vec{E}_{\text{конт}}$, создаваемое отрицательными ионами акцепторов (p – область) и положительными ионами доноров (n – область) (рис. 3). Примесные атомы в p -области, которые приняли электроны и стали отрицательными, встроены в кристаллическую решетку и поэтому малоподвижны. Электроны, покидая приграничный слой n -области и переходя в p -область, оставляют положительно заряженные неподвижные ионы донора. Созданное в результате диффузии основных носителей электрическое поле $\vec{E}_{\text{конт}}$ препятствует движению основных носителей через p - n -переход, однако позволяет перемещаться неосновным носителям. Контактная разность потенциалов $U_{\text{к}}$ (потенциальный барьер для основных носителей тока) определяется напряженностью поля и толщиной двойного электрического слоя, в котором сформировались неподвижные ионы акцепторов и доноров. Толщина двойного электрического слоя для стандартного кремниевого диода составляет $\sim (1-2)$ мкм.

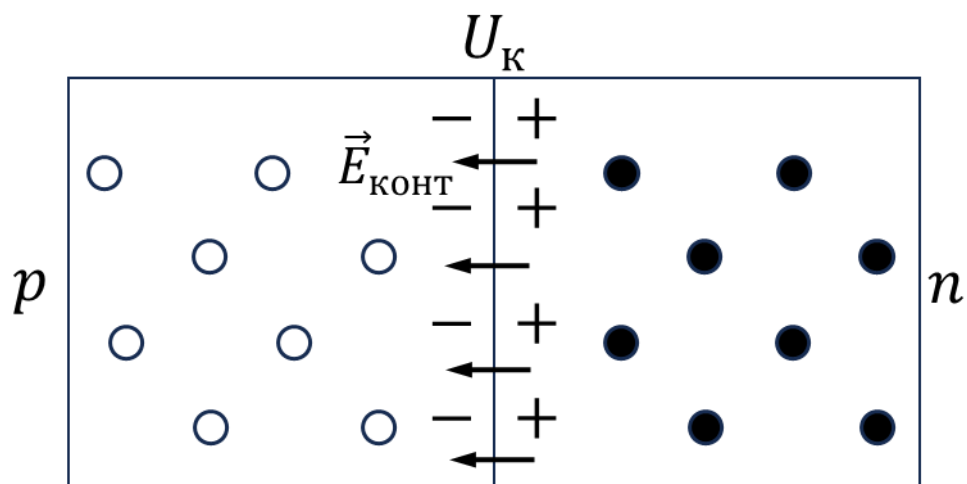


Рис. 3 Электрическое поле $\vec{E}_{\text{конт}}$ на границе раздела полупроводников:
 $\circ$ – дырки, $\bullet$ – электроны.

На рис. 4 показано расположение энергетических зон для контакта

полупроводников p - и n - типа. Значение U_k для p - n перехода зависит от количества легирующих примесей в контактирующих полупроводниках и соответствует разности энергетических уровней Ферми (E_F), разделенных p - и n - областей (рис.4).

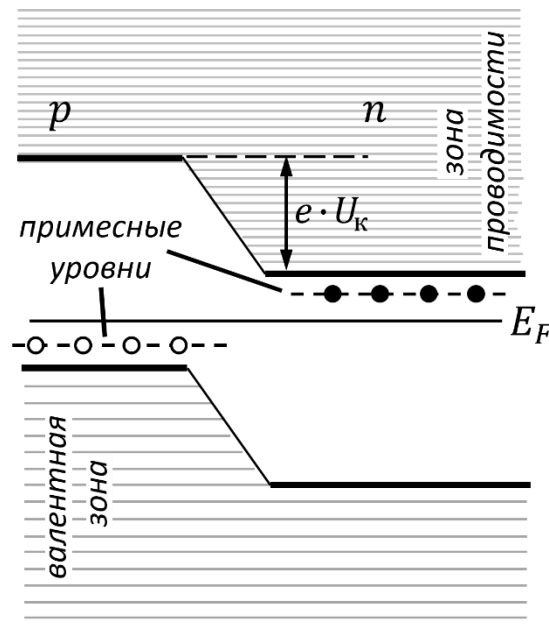


Рис. 4. Схема энергетических уровней в области p - n контакта.

Ширина энергетической щели между валентной зоной и зоной проводимости в кремнии при комнатной температуре составляет ~ 1.1 эВ. Контактная разность потенциалов для полупроводников на основе кремния составляет $(0.5 \dots 0.7)$ В. Через p - n -переход в отсутствие света и внешнего источника напряжения протекают два небольших, равных по величине и противоположных по направлению тока: неосновных носителей $I_{nh} = -I_0 e^{\left(-\frac{eU_k}{kT}\right)}$ и основных носителей $I_{oh} = +I_0 e^{\left(-\frac{eU_k}{kT}\right)}$. Так, что в результате суммарный ток через переход равен нулю: $I_{nh} = -I_{oh}$. Если к p - n переходу подключить резистор, то ток в нем будет отсутствовать. Хотя в контуре имеется разность потенциалов U_k между p - и n - областями, напряжение на резисторе все же равно нулю так как его компенсируют контактные разности потенциалов между полупроводниками и металлическими контактами. Таким образом, в отсутствие света и при одинаковой температуре всех участков замкнутой цепи в соответствии с законом сохранения энергии электрический ток через p - n переход отсутствует.

1.3. ВАХ солнечного элемента

Рассмотрим, что происходит в СЭ при его освещении светом от источника излучения. Солнечные элементы являются нелинейными устройствами и их вольтамперные характеристики (ВАХ) нельзя описать линейным законом Ома. Падающее на СЭ излучение поглощается в основном в p -области и генерирует в ней неравновесные электронно-дырочные пары, образующиеся вблизи p - n -перехода. Электроны (неосновные носители в p -области), поглощая фотоны, перебрасываются контактным полем в n -область. Аналогично избыточные дырки, созданные в n -слое, частично переносятся в p -слой. При этом снижается первоначальная контактная разность потенциалов U_k между p - и n -слоями полупроводника, на переходе формируется прямое смещение $U_k - U$, понижающее потенциальный барьер на величину eU , где e - заряд электрона по модулю и во внешней цепи появляется напряжение U .

Снижение контактной разности потенциалов на величину U ведет к возрастанию тока основных носителей, который становится равным: $I_{nn} \cdot \exp(eU/(kT))$. При освещении p - n перехода (СЭ) светом, через переход протекают следующие токи: неосновных носителей – I_{nn} , основных носителей $+ I_{nn} \cdot \exp(eU/(kT))$ и первичный фототок $-I_F$. Первичный фототок I_F – соответствует переносу через границу раздела сгенерированных излучением носителей заряда в результате разделения их электрическим полем p - n перехода. Фототок I_F пропорционален количеству фотонов поглощаемых СЭ в единицу времени и, следовательно, потоку излучения (мощности излучения) Φ , падающему на СЭ: $I_F = \alpha\Phi$, где α – коэффициент пропорциональности. Первичный фототок, как и ток неосновных носителей, имеет отрицательный знак.

Полный ток через p - n - переход равен:

$$I = I_{nn} \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right) - I_F \quad (2)$$

При отсутствии внешнего освещения, $I_F = 0$ и формула (2) принимает вид:

$$I = I_{nn} \cdot \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right) \quad (3)$$

и описывает ВАХ идеального, неосвещенного p - n – перехода.

Из формулы (2), описывающей ВАХ идеального СЭ, можно определить прямое смещение:

$$U = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I + I_F}{I_{nn}} + 1 \right) \quad (4)$$

Напряжение U , которое появляется на клеммах солнечного элемента при его

освещении называется фото–ЭДС. При этом отрицательному полюсу источника тока соответствует n -слой, а p -слой – положительному. Таким образом, p - n - переход является источником тока, в котором энергия света преобразуется непосредственно в энергию электрического поля. А область p - n – перехода является областью действия сторонних сил. Через сопротивление течет ток I , а на сопротивлении R выделяется электрическая энергия (рис. 2). Следовательно, p - n - переход стал источником тока, в котором энергия света преобразовалась непосредственно в электрическую энергию. Так как фото-ЭДС равна понижению контактного напряжения, она не может превысить само контактное напряжение, которое для кремния составляет примерно 1В.

Для непрерывного протекания тока по замкнутой цепи (рис. 2) необходимо, чтобы на одном из участков замкнутой цепи заряды перемещались в направлении от меньшей к большей потенциальной энергии, т.е. поднимались на потенциальный барьер. Это участок называется участком действия сторонних сил. В СЭ потенциальная энергия электронов повышается за счет энергии поглощенных ими фотонов, в результате чего электроны переходят на более высокий энергетический уровень (в кристалле - из валентной зоны в зону проводимости).

Ток в нагрузке I зависит от значения первичного тока I_F и от сопротивления нагрузки R . При коротком замыкании СЭ, когда $R = 0$, напряжение на сопротивлении $U = IR = 0$, а ток в цепи, как следует из (2), равен $-I_F$ и называется током короткого замыкания ($I_{кз}$). Это означает, что все генерированные светом носители поступают во внешнюю цепь и высота барьера в p - n -переходе не изменяется. Если внешняя цепь разомкнута, то сила тока в цепи: $I = 0$. При этом напряжение, вырабатываемое СЭ, называется напряжением холостого хода U_{xx} . Напряжение холостого хода можно выразить из выражения для прямого смещения (4):

$$U = U_{xx} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_F}{I_{nn}} + 1 \right) \quad (5)$$

Из выражения (5) видно, что напряжение на p - n -переходе логарифмически увеличивается с ростом первичного фототока, который пропорционален потоку излучения.

Подбор требуемой мощности, вырабатываемой СБ можно осуществить за счет соединений СЭ и подбора сопротивления нагрузки в цепи. Для

увеличения напряжения солнечные элементы включают в батареи последовательно, а для увеличения тока – параллельно.

Вольтамперные характеристики идеального СЭ, при различной интенсивности внешнего источника излучения, показаны на рис. 5. Каждой точке кривой соответствует определенное сопротивление нагрузки цепи (рис. 2). С увеличением сопротивления нагрузки R напряжение на СЭ растет, а ток падает. На нагрузке выделяется электрическая мощность: $P = IU$.

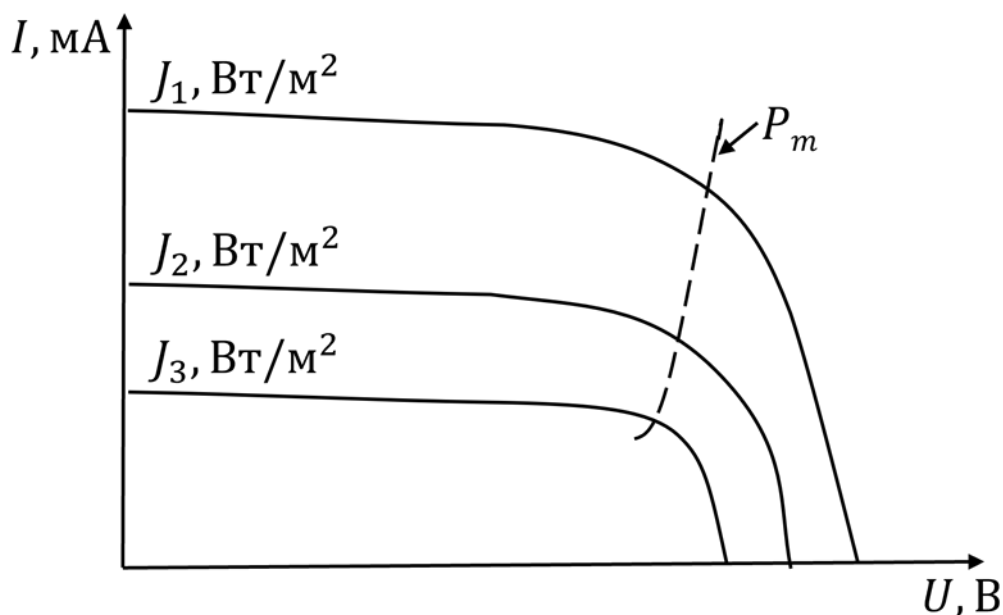


Рис. 5. ВАХ СЭ при различной интенсивности: $J_1 > J_2 > J_3$.

1.4. КПД СБ

Выделяемая электрическая мощность зависит от сопротивления нагрузки R . При некотором значении сопротивления нагрузки R_m электрическая мощность достигает максимального значения: $P_m = I_m \cdot U_m$, где I_m и U_m – ток и напряжение при максимальной электрической мощности СЭ (максимальная мощность равна площади заштрихованного прямоугольника на рис. 6). При изменении интенсивности излучения ВАХ изменяются так, как показано на рис. 5. С ростом интенсивности излучения J увеличиваются напряжение, ток и мощность, а оптимальное сопротивление R_m , то есть сопротивление, при котором мощность, вырабатываемая СЭ максимальна, уменьшается. На рис. 5 штриховой линией показана максимальная мощность при различной интенсивности светового потока на СЭ.

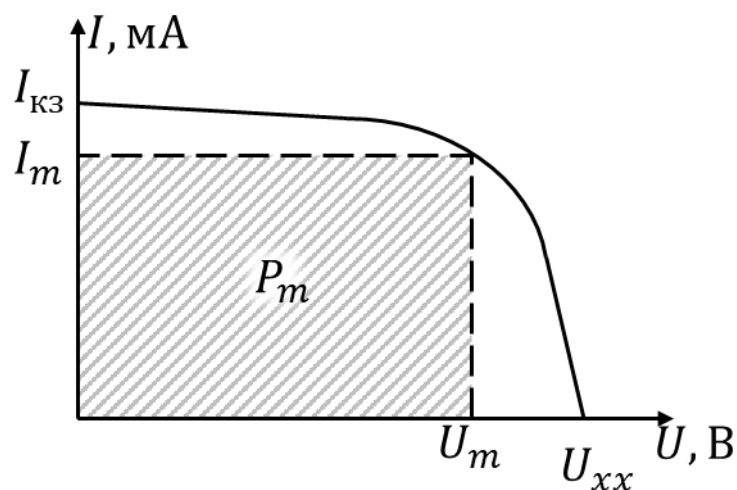


Рис. 6. ВАХ солнечного элемента.

Коэффициент полезного действия - КПД СБ рассчитывают по формуле:

$$\eta = \frac{P_m}{\Phi_{\text{СБ}}} 100\%, \quad (6)$$

где $\Phi_{\text{СБ}}$ – поток излучения, падающий на поверхность СБ; P_m – максимальная электрическая мощность.

Согласно теории, солнечный элемент из кремния имеет КПД не более 20%, а на практике, значение КПД СЭ составляет примерно 10 %.

Существуют процессы, которые могут уменьшать КПД СБ:

1. Свет частично отражается от поверхности полупроводника, поэтому для уменьшения отражения излучения от поверхности СЭ, последний покрывают интерференционным просветляющим слоем.
2. Фотоны, энергия которых недостаточна для внутреннего фотоэффекта, не дают вклада в электрическую энергию, однако приводят к нагреву СЭ, что снижает ее КПД.
3. Некоторые пары электрон – дырка рекомбинируют и не дают вклада в фототок. Световая мощность теряется при прохождении тока через полупроводник, за счет его собственного сопротивления.

В данной работе мы будем определять КПД СБ в случае, когда источником света является лампа накаливания, спектр которой отличается от состава спектра солнечного излучения. Спектры лампы накаливания и солнечного света имеют непрерывный спектр. У лампы накаливания спектр определяется температурой накала. Рабочие температуры нитей накаливания ламп обычно лежат в пределах (2000–2800) °С. Спектр излучения лампы смещён в красную часть спектра. Основная доля электромагнитного излучения такой лампы приходится на инфракрасное излучение, а не на

видимый свет. Свет лампы накаливания содержит относительно большую интенсивность излучения на длине волны 650 нм, а на длине волны 550 нм излучается не более 2 % энергии. По этой причине видимое излучение лампы накаливания смещено в красно-желтую область. Лампы накаливания менее эффективны по сравнению с другими типами освещения: менее 5% потребляемой энергии преобразуется в видимый свет, остальная энергия выделяется в виде тепла. Спектр солнечного света представляет собой сложное сочетание излучения с непрерывным спектром и дискретных спектральных линий, которые образуются из-за поглощения света атомами и молекулами в атмосфере. Наиболее интенсивная часть спектра солнечного света приходится на видимый диапазон и варьируется от ~ 380 нм до ~ 760 нм. За счет отличия спектрального состава излучения лампы накаливания от солнечного излучения, полученные в эксперименте значения КПД СБ, могут отличаться от значений КПД данной солнечной батареи при освещении ее солнечным светом.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

При выполнении лабораторной работы необходимо решить следующие задачи:

1. Используя термобатарею провести измерение потока излучения светового источника и расчет интенсивности излучения на различных расстояниях от светового источника.
2. Измерить ток короткого замыкания и напряжения холостого хода солнечной батареи при различном расстоянии от источника света.
3. Получить экспериментальные ВАХ солнечной батареи при различных режимах работы: охлаждение солнечной батареи вентилятором, без охлаждения, при освещении солнечной батареи светом, прошедшим через стеклянную пластинку и рассчитать коэффициент полезного действия СБ.

2.1. Используемое оборудование

На рис. 7 показан внешний вид экспериментальной установки, расположение ее основных составляющих:

1. Кремниевая солнечная батарея состоит из (а) 4 ячейки по $2,5 \times 5,0$ см² каждая; (б) 4 ячейки по $3,0 \times 7,5$ см² каждая).
2. Термоэлектрическая батарея.

3. Универсальный измерительный усилитель.
4. Реостат.
5. Источник света.
6. Вентилятор.
7. Цифровые мультиметры (измерение силы тока, напряжения, температуры).
8. Термометр.
9. Стеклянные пластинки.

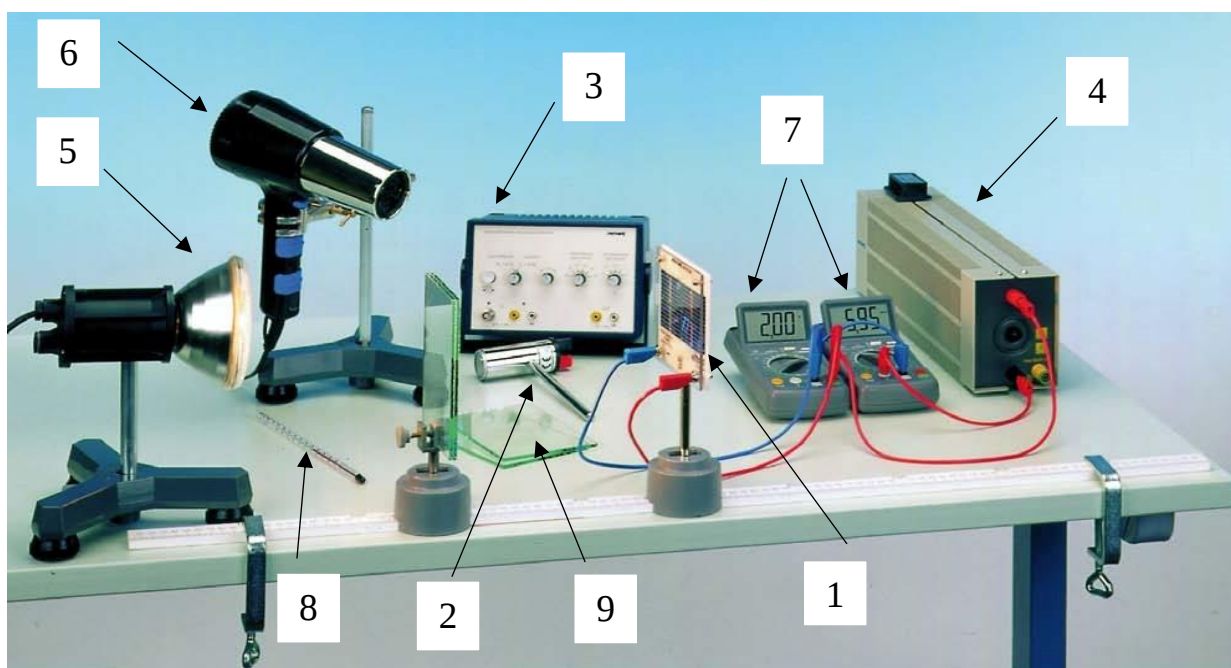


Рис. 7. Внешний вид экспериментальной установки.

2.2. Указания к проведению измерений и меры предосторожности

Солнечный элемент поглощает как прямой свет, идущий от лампы, так и рассеянный свет. Световой конус лампы составляет примерно 30° . Рассеянный свет возникает в основном в результате отражения от поверхности стола. Поэтому для подавления отраженного светового потока необходимо использовать экраны.

- Во избежание перегрева СБ, рекомендуется закрыть СБ стеклянной пластинкой.
- Во избежание перегрева СБ, источник света (лампу освещения) следует включать только в момент снятия показаний с мультиметров.
- При измерении ВАХ контролировать температуру поверхности СБ,

используя термометр. Значение температуры записать в соответствующих строках таблицы 3. Температуру СБ можно регистрировать с помощью термопары, подключенной к мультиметру в режиме измерения температуры в «°C – по Цельсию».

- Регулировка температуры солнечной панели осуществляется с помощью вентилятора (см. рис. 7, позиция 6).

2.3. Термоэлектрическая батарея

Термоэлектрическая батарея (ТЭБ) (позиция 2, рис. 7) служит датчиком электромагнитного излучения для широкого спектрального диапазона длин волн, от УФ до ИК и имеет высокую чувствительность в диапазоне длин волн от 150 нм до 15 мкм. ТЭБ предназначена для измерения интенсивности светового потока. На рис. 8 схематически показано продольное сечение термобатареи. Зачерненная поверхность детектора состоит из термоэлементов, соединенных последовательно. Паяные соединения термоэлементов встроены в корпус из твердого материала. Конический отражатель увеличивает поперечное сечение пучка излучения, который достигает детектора. Работа термоэлектрической батареи основана на эффекте Зеебека: в замкнутой цепи, содержащей спай двух металлических проводников с разными физическими свойствами и имеющий разные температуры в месте их контакта, возникает термоэлектродвижущая сила, пропорциональная разности температур проводников.

При измерении потока излучения необходимо подключить выходные разъемы термобатареи через усилитель к вольтметру. Рекомендуется использовать следующие диапазоны измерений: от 30 мкВ до 10 мВ. Термобатарея является исключительно чувствительным детектором для теплового излучения. Следовательно, необходимо изолировать установку от дополнительных источников высоких и низких температур.

При проведении измерений в указанном спектральном диапазоне защитное стекло, расположенное на входном отверстии ТЭБ, должно быть удалено. Это связано с низкой проникающей способностью защитного стекла в ИК и УФ диапазоне. Защитное стекло следует использовать в случае проведения измерений с мощными источниками света в видимой области спектра, для устранения влияния теплового излучения.

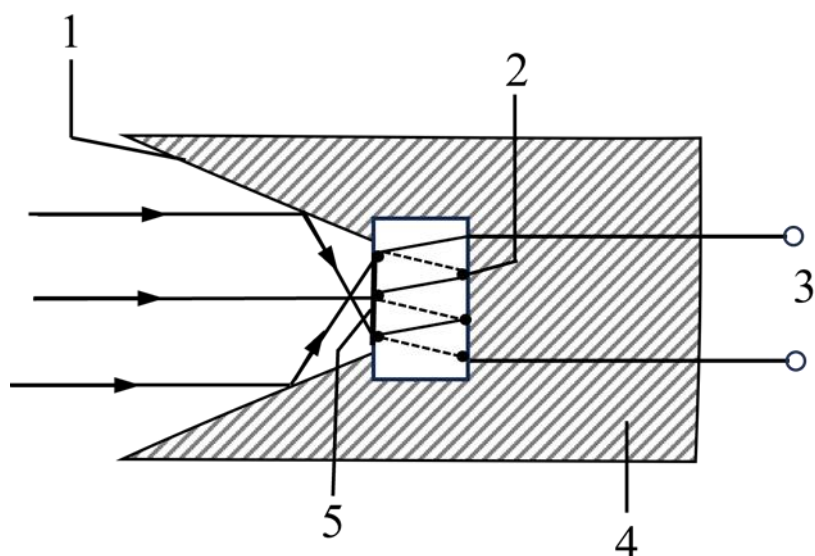


Рис. 8. Продольное сечение термоэлектрической батареи:

- 1 – Конический отражатель;
- 2 – Точка спаивания двух соединений;
- 3 – Измерительный выход;
- 4 – Твердый корпус;
- 5 – Зачерненная площадь с измерительным паяным соединением.

При измерении интенсивности светового потока с помощью термоэлектрической батареи ее используют совместно с универсальным измерительным усилителем (позиция 3, рис. 7) или с мультиметром типа АМ-1109.

2.4. Измерение потока излучения, напряжения холостого хода и тока короткого замыкания солнечной батареи при разной интенсивности излучения.

Задание 1. Снять зависимость потока излучения Φ на ТЭБ от расстояния l между источником излучения и солнечной батареей. Вычислить поток интенсивность светового потока и потока излучения на СБ.

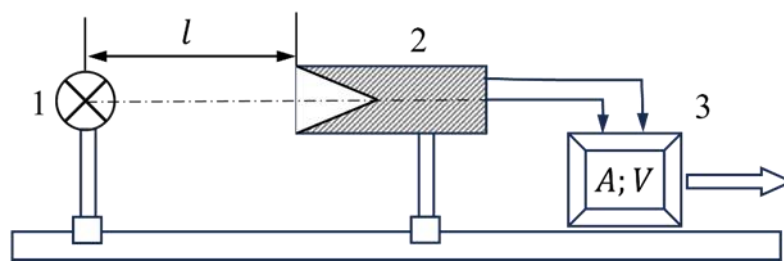


Рис. 9. Измерение интенсивности светового потока с мультиметром.

- 1 – источник света;
- 2 – термоэлектрическая батарея;
- 3 – мультиметр.

Для выполнения этого задания собрать установку, включающую источник света (1), термоэлектрическую батарею (2), мультиметр типа АМ-1109 (3) (рис.9). На рис.9: l - расстояние между источником света и термоэлектрической батареей.

Мультиметр имеет два канала измерений «CH1» и «CH2». В работе используются гнезда «COM» и «VΩ» («CH1») или «COM» и «V» для «CH2». Для измерения напряжения с помощью канала «CH1» установить правый поворотный переключатель из положения «OFF» в положение «—V», что позволит проводить измерения постоянных напряжений в единицах «Вольт».

Входное отверстие задает положение термобатареи и впоследствии СБ. Расстояние между лампой и термобатареей должно быть не менее 50 см, так как угловая апертура термобатареи составляет всего 20 °.

Данные показаний для напряжения, вырабатываемое термобатареей $U_{TЭ}$ при расстояниях между источником излучения и термобатареей, следует занести в таблицу 1.

Количество экспериментальных точек значений $U_{TЭ}$ в каждой серии – 3. Результаты измерений $U_{TЭ}$ для каждого положения термобатареи следует занести в таблицу 1.

Среднее значение напряжения $\langle U_{TЭ} \rangle$ для каждого положения термобатареи относительно источника излучения определяют на основании трех измеренных значений $U_{TЭ}$ вырабатываемое термобатареей и заносят его в таблицу 1.

По формуле (7) рассчитывается поток излучения Φ , полученные результаты заносятся в таблицу 1. В итоге получается зависимость светового потока $\Phi_{TЭ}(l)$ на ТЭБ при различном расстоянии l между источником и солнечной батареей.

Таблица 1. Результаты измерения потока излучения.

l , см	60	70	80	90	100
$U_{TЭ}$, мВ					

Среднее значение $\langle U_{ТЭ} \rangle$, мВ					
Поток излучения на ТЭБ $\Phi_{ТЭ}$, Вт					
Интенсивность излучения J , Вт/м ²					
Поток излучения на СБ $\Phi_{СБ}$, Вт					

Поток излучения (мощности излучения) на ТЭ:

$$\Phi_{ТЭ} = \frac{U_{ТЭ}}{\delta}, \quad (7)$$

где δ – коэффициент чувствительности термоэлектрической батареи, согласно паспорту составляет $\delta = 67$ мВ/Вт.

Используя значения потока излучения от источника $\Phi_{ТЭ}$ на ТЭБ (таблица 1), рассчитывается интенсивность излучения:

$$J = \frac{\Phi_{ТЭ}}{S_T} \quad (8)$$

Здесь S_T – площадь измерительной поверхности термоэлектрической батареи, м². Согласно паспортным данным, $S_T = 4,9 \cdot 10^{-4}$ м².

Поток излучения, падающий на СБ – $\Phi_{СБ}$, определяется с учетом площади поверхности СБ:

$$\Phi_{СБ} = J \cdot S_{СБ} \quad (9)$$

Здесь $S_{СБ}$ – площадь поверхности солнечной батареи. При расчете $S_{СБ}$ следует учитывать характер соединения солнечных элементов. Данная экспериментальная установка содержит четыре солнечных элемента, которые включены последовательно. Если площадь одного солнечного элемента составляет 2,5х5,0 см² (или 3,0х7,5 см²), то общая площадь солнечной батареи составит $S_{СБ} = 50 \cdot 10^{-4}$ м² (или 90·10⁻⁴ м²).

Результаты расчета интенсивности излучения J и потока излучения $\Phi_{СБ}$ на СБ следует занести в таблицу 1.

По результатам, полученным в таблице 1, необходимо построить зависимости

интенсивности излучения источника света $J(l)$ и потока излучения $\Phi_{\text{СБ}}(l)$ от расстояния l до источника.

Задание 2. Измерение тока короткого замыкания и напряжения холостого хода солнечной батареи при различном расстоянии от источника света.

Собрать установку, включающую источник света, солнечную батарею, переменный резистор, мультиметры для измерения силы тока, вырабатываемого СБ и напряжения на СБ. Электрическая схема для измерения тока короткого замыкания и напряжения холостого хода солнечной батареи при различном расстоянии от источника света представлена на рис. 10. СБ установить на оптической скамье, на месте расположения термобатареи (рис. 9) и на расстояниях, указанных в таблице 2.

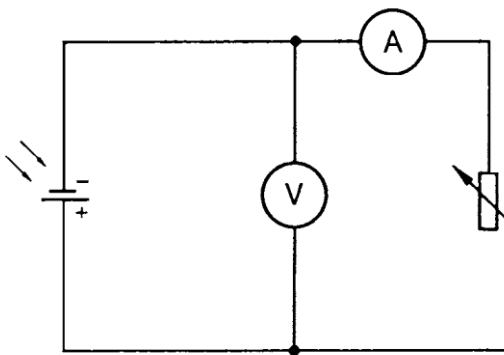


Рис. 10. Электрическая схема для измерения ВАХ солнечной батареи.

Для измерения напряжения на СБ рекомендуется использовать канал «CH1». Следует установить правый поворотный переключатель из положения «OFF» в положение - «—V» и провести измерения напряжения в Вольтах, используя точность показаний до второго знака после запятой.

Для измерения силы тока на СБ используется канал «CH2» мультиметра; гнезда «COM» и «mA». Для активизации режима измерения силы тока на СБ в миллиамперах поворотный переключатель канала «CH2» мультиметра следует перевести из положения «OFF» в положение «mA». Значение силы тока в миллиамперах записывать с точностью до единиц.

Для измерения тока короткого замыкания $I_{\text{кз}}$, реостат следует перевести в крайнее положение так, чтобы сопротивление нагрузки было равно нулю. Напряжение холостого хода $U_{\text{хх}}$ измеряется при положении реостата, когда сопротивление нагрузки максимально. Полученные результаты для $I_{\text{кз}}$ и $U_{\text{хх}}$ следует занести в таблицу 2 и построить зависимости $I_{\text{кз}}$ и $U_{\text{хх}}$ от светового потока $\Phi_{\text{СБ}}$ (данные для $\Phi_{\text{СБ}}$ см. в табл. 1).

Таблица 2. Результаты измерения тока короткого замыкания и напряжения

холостого хода СБ.

l , см	60	70		80	90	100
$I_{кз\text{ э}}, \text{ мА}$						
$U_{xx}, \text{ В}$						
$I_{кз\text{ р}}, \text{ мА}$						
$J, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ (табл. 1)						
$\Phi_{\text{СБ}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ (табл. 1)						

С учетом материала и характера соединения солнечных элементов максимальное напряжение холостого хода U_{xx} составляет примерно 2 В. Ток короткого замыкания пропорционален интенсивности света. Для используемой конструкции СБ его можно рассчитать по формуле:

$$I_{кз\text{ р}} = 1,84 \cdot 10^{-4} \cdot J \text{ (мА)} \quad (10)$$

Расчетные значения тока короткого замыкания $I_{кз\text{ р}}$, полученные по формуле (10), занести в таблицу 2. Данные для интенсивности светового потока J и потока излучения $\Phi_{\text{СБ}}$ на разных расстояниях от источника освещения следует брать из таблицы 1. Используя данные таблицы 2, построить экспериментальные зависимости $I_{кз}(J)$ и $U_{xx}(J)$. Сравнить полученные экспериментальные результаты $I_{кз\text{ э}}(J)$ с расчетными зависимостями $I_{кз\text{ р}}(J)$, полученными по формуле (10). Сделать выводы на соответствие измеренных и расчетных зависимостей.

2.5. ВАХ и КПД солнечной батареи при разной интенсивности излучения.

Задание 1. Измерение вольтамперных характеристик солнечной батареи и расчет ее КПД.

Для проведения этого задания необходимо собрать установку, включающую источник света, солнечную батарею, переменный резистор, мультиметры для измерения тока и напряжения (рис. 10).

Мультиметр имеет два канала измерений. Для измерения напряжения на СБ используется канал «СН1» и гнезда «СОМ», и «VΩ». Для измерения напряжения в Вольтах установить правый поворотный переключатель из положения «OFF» в положение «—V». Значение напряжения в Вольтах записывать с точностью до второго знака после запятой.

Для измерения силы тока на СБ используется канал «CH2» мультиметра; гнезда «СOM» и «mA». Для измерения силы тока на СБ в миллиамперах левый поворотный переключатель из положения «OFF» перевести в положение «mA». Значение силы тока в миллиамперах записывать с точностью до единиц.

Измерить ВАХ солнечной батареи при различной интенсивности светового потока, а именно при трех положениях источника света относительно поверхности СБ: $l = 60$ см, 70 см, 80 см (значения потока излучения на солнечную батарею Φ_{CB} взять из таблицы 1).

Если в работе используется переменное сопротивление типа «магазин сопротивлений», то при измерении ВАХ рекомендуется изменять сопротивление с шагом 5 Ом в пределах от 0 Ом до 30 Ом, далее взять 50 Ом и максимально возможное значение переменного сопротивления.

Если в работе используется переменное сопротивление (реостат), которое изменяется непрерывно, то при измерении ВАХ рекомендуется изменять напряжение на СБ с шагом не более 0,2 В. В области резкого уменьшения тока шаг изменения напряжения уменьшить до 0,1 В. Оптимальное количество экспериментальных точек ВАХ (U, I) составляет 15-20 штук.

Переводя реостат в крайние положения – сопротивление нагрузки равно нулю, измеряем ток короткого замыкания $I_{кз}$, а когда сопротивление нагрузки максимально, измеряем напряжение холостого хода U_{xx} (рис. 10). Записать эти значения в соответствующих строках таблицы 3.

Таблица 3. Результаты измерения ВАХ СБ и расчет ее КПД.

$l = 60$ см, $T = \dots K$, $I_{кз} = \dots mA$, $U_{xx} = \dots B$, $\Phi_{CB} = \dots$																			
I , mA																			
U , B																			
R , Ω																			
P , mBt																			
$P_{max} = \dots mBt$, $\eta = \dots$																			
$l = 70$ см, $T = \dots K$, $I_{кз} = \dots mA$, $U_{xx} = \dots B$, $\Phi_{CB} = \dots$																			

$I,$ mA																			
U, B																			
$R,$ Om																			
$P,$ $мВт$																			
$P_{max} = ...мВт, \eta = ...$																			
$l = 80 \text{ см}, T = ...K, I_{кз} = ...mA, U_{xx} = ...B, \Phi_{CB} = ...$																			
$I,$ mA																			
U, B																			
$R,$ Om																			
$P,$ $мВт$																			
$P_{max} = ...мВт, \eta = ...$																			

Результаты измерений силы тока и напряжения на СБ при разном сопротивлении нагрузки занести в таблицу 3. По результатам построить зависимость $ВАХ$ солнечной батареи $I(U)$.

Вычислить мощность P , вырабатываемую солнечной батареей при разном сопротивлении нагрузки, и занести расчеты в таблицу 3:

$$P = I \cdot U \quad (11)$$

По рассчитанным значениям мощности, определить максимальную мощность P_{max} .

Построить график зависимости мощности от напряжения на СБ, $P(U)$.

Вычислить $KПД$ солнечного элемента по формуле (6), используя совместно результаты таблиц 1 и 3.

Используя результаты таблицы 3 и график $P(U)$, определить при каком сопротивлении R СБ вырабатывает максимальную мощность и выделить это значение сопротивления цепи R в таблице 3.

2.6. Расчет погрешности измерений

Относительную погрешность косвенных измерений электрической

мощности СБ рассчитать по формуле:

$$\frac{\Delta P}{P} = \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2} \quad (12)$$

Здесь ΔI , ΔU – абсолютные погрешности измерения силы тока и напряжения.

Для расчета ΔI , ΔU рекомендуется использовать результаты измерения ВАХ и методическое пособие [5].

Относительную погрешность косвенных измерений потока излучения на СБ рассчитать по формуле:

$$\frac{\Delta \Phi_{\text{СБ}}}{\Phi_{\text{СБ}}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta U_{\text{тэ}}}{U_V}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S_T}{S_T}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S_C}{S_C}\right)^2} \quad (13)$$

Здесь $\Delta U_{\text{тэ}}$ – относительная погрешность измерения напряжения с помощью ТЭБ. При расчетах принять $\frac{\Delta S_T}{S_T} \approx \frac{\Delta S_C}{S_C} = 5\%$, для расчета $\Delta U_{\text{тэ}}$ рекомендуется использовать данные из таблицы 1 и методическое пособие [5].

Также для расчета диапазона допустимых погрешностей измерения мощности, вырабатываемой СБ, можно использовать линейный участок ВАХ. Максимальные отклонения значений тока и напряжения от линейного участка ВАХ принять за полуширину интервала, определяющего диапазон погрешности для данной величины. Для расчета диапазона допустимых погрешностей измерения мощности излучения, падающего на СБ следует использовать зависимость $\Phi_{\text{СБ}}(I)$. Максимальное отклонение значений потока излучения от их линейной аппроксимации принять за полуширину интервала, определяющего диапазон погрешности для данной величины.

Относительную погрешность КПД СБ рассчитать, как:

$$\frac{\Delta \eta}{\eta} = \sqrt{\left(\frac{\Delta P}{P}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \Phi_{\text{СБ}}}{\Phi_{\text{СБ}}}\right)^2} \quad (14)$$

Сделать выводы по результатам эксперимента. Проанализировать соответствие измеренных и расчетных зависимостей, представленных в таблицах 1, 2, 3, а также вклад физических величин, влияющих на погрешность измерений КПД СБ.

3. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Что называют солнечным элементом и как он устроен?
2. Что называют внутренним фотоэффектом?

3. Какие материалы используются для производства солнечных элементов?
4. Как создают полупроводники p - и n – типа?
5. Структура энергетических зон в полупроводниках p - и n – типа.
6. Почему возникает контактная разность потенциалов? Как можно оценить и измерить данную величину?
7. Какие токи протекают через освещенный p - n -переход?
8. Принцип работы полупроводникового солнечного элемента. Как возникает фото ЭДС? Какова природа сторонних сил в солнечном элементе?
9. Пояснить физическую природу внутреннего сопротивления солнечного элемента. Оценить внутреннее сопротивление СБ, используя результаты эксперимента.
10. Объяснить физическую природу зависимости выходной мощности солнечного элемента от температуры.
11. Почему нагрев солнечной батареи, приводит к изменению напряжения холостого хода?
12. Пояснить физический принцип работы термоэлектрической батареи.
13. Что такое мультиметр и какие функциональные возможности и характеристики он имеет?
14. Принцип расчета электрической мощности, вырабатываемой СЭ.
15. От каких факторов зависит погрешность расчета КПД солнечной батареи?
16. Почему КПД СБ зависит от температуры?
17. Какова плотность потока излучения, если при площади поверхности СБ – 2 м², КПД СБ составляет 10 %, и она вырабатывает электрическую мощность равную 190 Вт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Винтайкин Б.Е. Физика твердого тела. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 2007. – 360 с.
2. Мартинсон Л.К., Смирнов Е.В. Квантовая физика. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 2009. – 532 с.

3. Савельев И.В. Курс общей физики. В 3-х т. Т. 3. – М.: Наука. 1987. – 320 с.
4. Распределение Ферми-Дирака. Явление Зеебека. Методические указания/Н.А. Задорожный, А.В. Семиколонов, С.Л. Тимченко, А.В. Кравцов, В.Г. Голубев – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – 27 с.
5. Савельева А.И., Фетисов И.Н. Обработка результатов эксперимента при проведении физического эксперимента: Методические указания к лабораторной работе М1 по курсу «Общей физики»/под ред. С.П. Ерковича – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1990 – 32 с.