



**«Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)**

Московский государственный технический университет

имени Н.Э. Баумана

Факультет «Фундаментальные науки»

Кафедра ФН-4 «Физика»

О.Ю. Дементьева, С.Л. Тимченко

Характеристические кривые солнечных батарей

Методические указания к выполнению лабораторной работы

Под редакцией Б.Е. Винтайкина

Москва

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана

Москва, 2014

ВВЕДЕНИЕ

Солнечная батарея (СБ) - устройство, непосредственно преобразующее энергию солнечного излучения в электрическую энергию. СБ состоит из нескольких солнечных элементов. Действие солнечного элемента (СЭ) основано на использовании внутреннего фотоэффекта в неоднородных полупроводниковых структурах. Получили распространение конструкции СЭ с $p-n$ - переходами. При облучении 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 фото ЭДС.

Цель работы - ознакомиться с процессом преобразования световой энергии в электрическую, определить электрические характеристики и КПД преобразователя.

Лабораторная работа включает следующие темы: полупроводники, полупроводники p и n - типа, $p-n$ -переход, внутренний фотоэффект, вольтамперная характеристика (ВАХ) солнечного элемента (СЭ), энергетические диаграммы полупроводников p - и n - типа, уровень Ферми, диффузионный потенциал, внутреннее сопротивление.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Возможность преобразования световой энергии в электрическую основана на внутреннем фотоэффекте – переходе электронов, поглотивших квант излучения, из валентной зоны в зону проводимости (рис. 1).

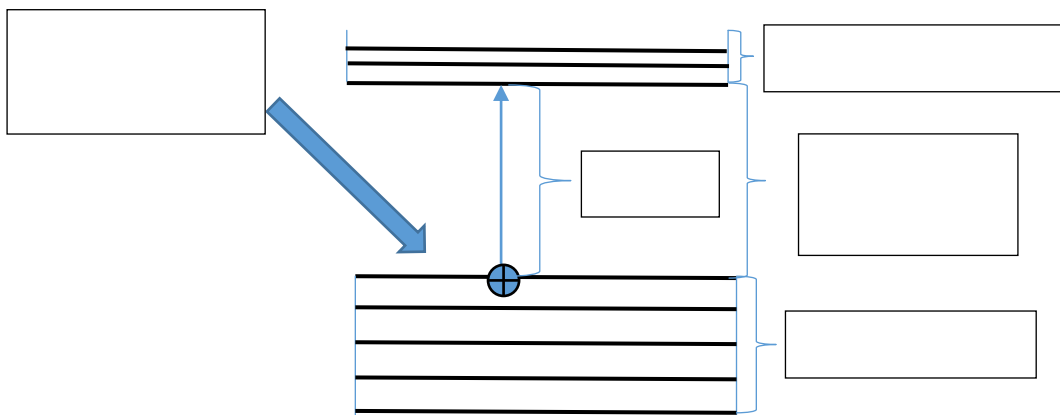


Рис. 1. Схема энергетических зон в беспримесном полупроводнике.

Внешние, валентные электроны атомов полупроводника принадлежат кристаллу в целом, при этом они имеют дискретные значения энергии, объединенные в энергетические зоны. Поглощая квант света, электрон занимает более высокий энергетический уровень в кристалле, например, переходит из валентной зоны в зону проводимости, создавая в валентной зоне вакансию (дырку, рис. 1), то есть происходит внутренний фотоэффект. В результате появляются дополнительные носители тока -

электроны проводимости и дырки. Внутренний фотоэффект имеет "красную границу": энергия кванта света (фотона) должна превышать ширину запрещенной зоны E_g , разделяющей валентную зону и зону проводимости, т.е.

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} \geq E_g,$$

где h - постоянная Планка, ν - частота света, λ - длина волны. В кремнии внутренний фотоэффект имеет место для волн с длиной $\lambda \leq 1,1$ мкм. т. е. для ближнего инфракрасного излучений, видимого и ультрафиолетового.

Для преобразования световой энергии в электрическую используются фотоэлектронные преобразователи (ФЭП). Принцип действия ФЭП основан на фотовольтаическом эффекте в неоднородных полупроводниковых структурах при воздействии на них солнечного излучения. Предшественником современных солнечных фотопреобразователей является кремниевый солнечный элемент.

Использовать энергию солнечных элементов можно так же, как и энергию других источников питания, с той разницей, что солнечные элементы не боятся короткого замыкания. Каждый из них предназначен для поддержания определенной силы тока при заданном напряжении. Но в отличие от других источников тока характеристики солнечного элемента зависят от количества, падающего на его поверхность света. Например, набежавшее облако может снизить выходную мощность более чем на 50%.

Ниже рассматриваются особенности устройства и принцип работы солнечных батарей (СБ), которые представляют эффективный фотоэлектрический преобразователь солнечной энергии. В качестве элементной базы для СБ используют полупроводники. Солнечная батарея представляет собой несколько объединённых фотоэлектрических преобразователей (фотоэлементов), преобразующих непосредственно солнечную энергию в постоянный электрический ток. Преобразование света в электроэнергию с помощью солнечных батарей оказалось эффективным способом иметь надежный источник энергии. Солнечные батареи являются одним из основных устройств, которые используются для получения электрической энергии на космических аппаратах (КА). В отличие от ядерных и радиоизотопных источников энергии СБ представляет собой экологически безопасный источник энергии, работающий долгое время без расхода каких-либо дополнительных материалов.

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. При полётах на большом удалении от Солнца (за орбитой Марса) их использование становится 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).

Количество наземного и космического оборудования, требующего электропитания от солнечных батарей, увеличивается. Солнечные батареи имеют уникальные вольтамперные (ВАХ) и выходные характеристики, которые могут меняться в

зависимости от окружающей среды и условий эксплуатации, таких как температура, освещенность, скорость вращения, затенение. Солнечные батареи КА работают в условиях быстрых и значительных изменений освещенности и температуры, оказывающих сильное влияние на их производительность и КПД. При этом температура является фактором окружающей среды, а затенение — рабочим фактором, вызванным условиями полета.

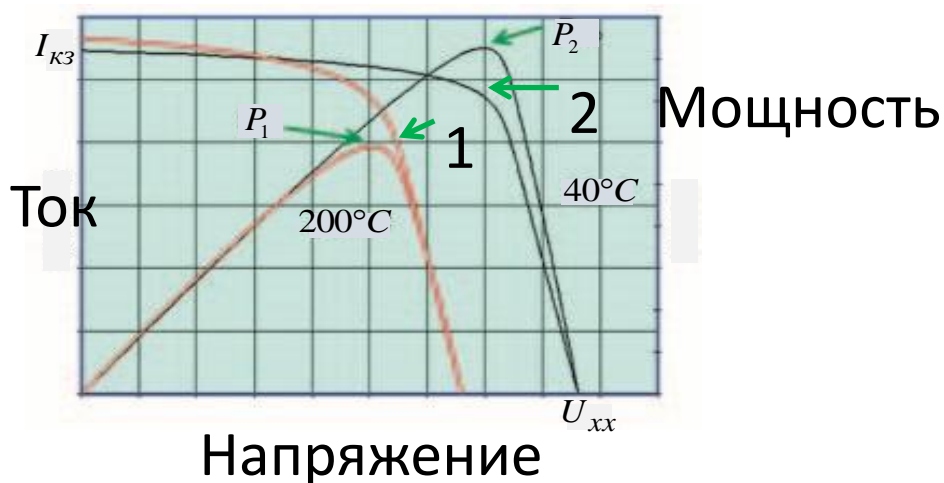


Рис.2. Влияние температуры на выходную мощность СБ:

- 1 – ВАХ при $T = 200^{\circ}\text{C}$;
- 2 – ВАХ при $T = 40^{\circ}\text{C}$

На рис. 2 показано, как уменьшается выходная мощность при увеличении температуры. Также известно, что изменения освещенности оказывают сильное влияние на ток короткого замыкания $I_{кз}$ и слабое — на напряжение $U_{хх}$. Это вызвано увеличением плотности потока фотонов, падающих на солнечную панель при усилении солнечного излучения. В космосе объем падающего излучения зависит от угла падения, расстояния до Солнца и затенения, вызванного космическими телами и вращением КА.

Типичная конструкция СЭ показана на рис. 3, а схема подключения на рис. 4. На

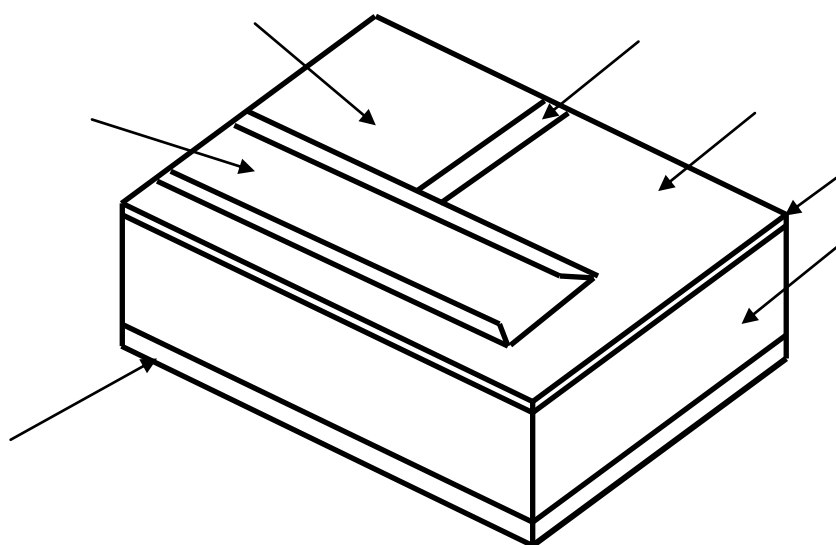


Рис. 3. Устройство кремниевого солнечного элемента.

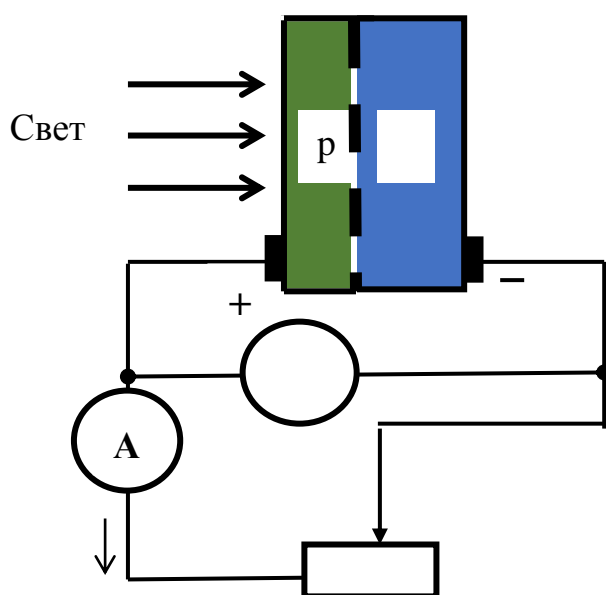


Рис. 4. Схема подключения СЭ.

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 и по периферии - с освещаемой стороны.

Рассмотрим p - n -переход в отсутствие света и внешнего источника напряжения. В области p - n -

перехода образуется двойной электрический слой из положительных и отрицательных ионов примесных атомов (рис. 5), в результате между p и n -областями возникает контактная разность потенциалов U_k . Значение U_k для p - n перехода зависит от количества легирующих примесей в контактирующих полупроводниках и соответствует разности энергетических уровней Ферми, разделенных p - и n - областями.

Расстояние 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 ... 0,7 В. При этом через переход протекают два небольших, равных по величине и противоположных по направлению тока: неосновных носителей $-I_{os}$ и основных носителей $+I_{os}$. Итак, в результате суммарный ток через переход равен нулю. 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 электрический ток отсутствует в соответствии с законом сохранения энергии.

Рассмотрим, что происходит в СЭ при освещении. Элемент солнечной батареи представляет собой пластинку кремния n -типа, окруженную тонким слоем кремния p -типа толщиной около одного микрона, с контактами для присоединения к внешней цепи. Солнечные элементы являются нелинейными устройствами и их поведение нельзя описать линейным законом Ома. Излучение поглощается в p -области и генерирует в ней неравновесные электронно-дырочные пары, образующиеся вблизи p - n -перехода. Электроны (неосновные носители в p -области) перебрасываются контактным полем в n -

область, заряжая ее отрицательно. Аналогично и избыточные дырки, созданные в n-слое, частично переносятся в p-слой. Подавляющая часть дырок не способна преодолеть потенциальный барьер и остается в p - области, заряжая ее положительно (рис. 5). Снижается первоначальная контактная разность потенциалов между p- и n-слоями полупроводника, и во внешней цепи появляется напряжение.

Отрицательному полюсу источника тока соответствует n-слой, а p-слой – положительному. Электрическое поле контакта пространственно разделяет отрицательные электроны и положительные дырки, образующиеся под действием света. Вследствие этого на переходе формируется прямое смещение U , понижающее потенциальный барьер на величину eU , где e - заряд электрона по модулю. Перемещение электронов через p-n переход создает ток $-I_\Phi = I_S$, называемый *первичным фототоком*, которому, как и току не основных носителей, приписывают отрицательный знак $-I_S$.

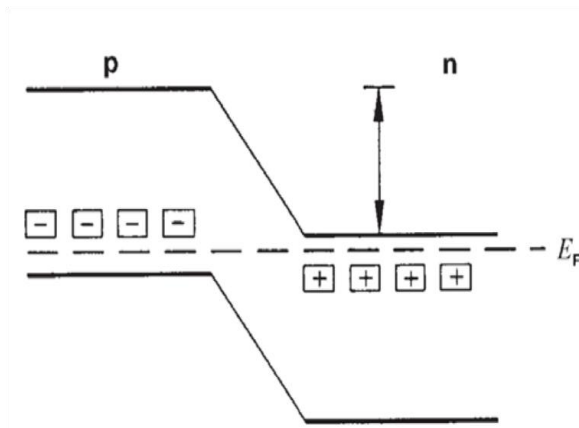


Рис. 5. Схема энергетических уровней p-n контакта.

Таким образом, понижение контактной разности потенциалов ведет к возникновению прямого смещения U на концах солнечного элемента и, следовательно, к возрастанию тока основных носителей, который становится равным $I_{0S} \exp(eU/(kT))$. Таким образом, через переход протекают следующие токи: не основных носителей $-I_{0S}$, основных носителей $+I_{0S} \exp(eU/(kT))$ и первичный фототок $-I_S$. Полный ток через p- n- переход равен:

$$I = I_{осн} - I_{неосн} - I_\Phi = I_{0S} \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right) - I_S \quad (1)$$

При отсутствии внешнего освещения, $I_S = 0$ и формула (1) принимает вид:

$$I = I_{0S} \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right) \quad (2)$$

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

Из формулы, описывающей вольт - амперную характеристику (ВАХ) идеального СЭ, можно определить прямое смещение:

$$U = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I + I_S}{I_{0S}} + 1 \right) \quad (3)$$

Таким образом, при освещении p-n-перехода контактная разность потенциалов в нем

уменьшается на величину U , а другие контактные разности потенциалов не изменяются. В результате на клеммах СЭ появляется напряжение U , называемое фото ЭДС, а через сопротивление течет ток I . На сопротивлении R выделяется электрическая энергия. Следовательно, p - n - переход стал источником тока, в котором энергия света преобразуется непосредственно в электрическую энергию. Так как фото ЭДС равна понижению контактного напряжения, она не может превысить само контактное напряжение U (для кремния примерно 1В).

Как во всяком другом источнике тока в СЭ должны быть сторонние силы, природа которых отличается от сил электростатического поля. Под действием электростатических сил заряды перемещаются в направлении уменьшения потенциальной энергии. Для непрерывного протекания тока по замкнутой цепи необходимо, чтобы хотя бы на одном участке цепи заряды перемещались в направлении от меньшей к большей потенциальной энергии, т.е. поднимались на потенциальный барьер. Это участок действия сторонних сил. Их физическая природа может быть различной. В гальванических элементах сторонние силы возникают в результате химических реакций на электродах, а энергия, освобождаемая в реакциях, превращается в работу тока. В условиях явления электромагнитной индукции сторонние силы - это силы вихревого электрического поля. В СЭ потенциальная энергия электронов повышается за счет энергии фотонов, когда электроны переходят на более высокий энергетический уровень в кристалле - из валентной зоны в зону проводимости.

Первичный фототок пропорционален потоку излучения (мощности излучения) Φ , падающему на СЭ: $I_s = \alpha \Phi$, где α - коэффициент пропорциональности. Результирующий ток I в нагрузке зависит от I_s и от сопротивления нагрузки R . При коротком замыкании СЭ, когда $R = 0$, напряжение на сопротивлении $U = IR = 0$, а ток, как следует из (1), равен - I_s . Это означает, что все генерированные светом носители поступают во внешнюю цепь, а высота барьера в p - n -переходе не изменяется. Если внешняя цепь разомкнута, то $I = 0$. При этом напряжение, вырабатываемое СЭ и называемое напряжением холостого хода U_{xx} , как следует из (3), равно:

$$U = U_{xx} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_s}{I_{0s}} + 1 \right) \quad (4)$$

Из (4) видно, что напряжение логарифмически (слабо) растет с ростом первичного фототока.

Подбор требуемой мощности, вырабатываемой СБ можно осуществить за счет соединений СЭ. Часто солнечные элементы включают в батареи: последовательно - для увеличения напряжения, параллельно - для увеличения тока.

Зависимость тока от напряжения, т.е. вольтамперная характеристика идеального СЭ, показана на рис. 6. Каждой точке кривой соответствует определенное сопротивление нагрузки: с увеличением R напряжение растет, а ток падает. В нагрузке выделяется электрическая мощность $P = IU$.

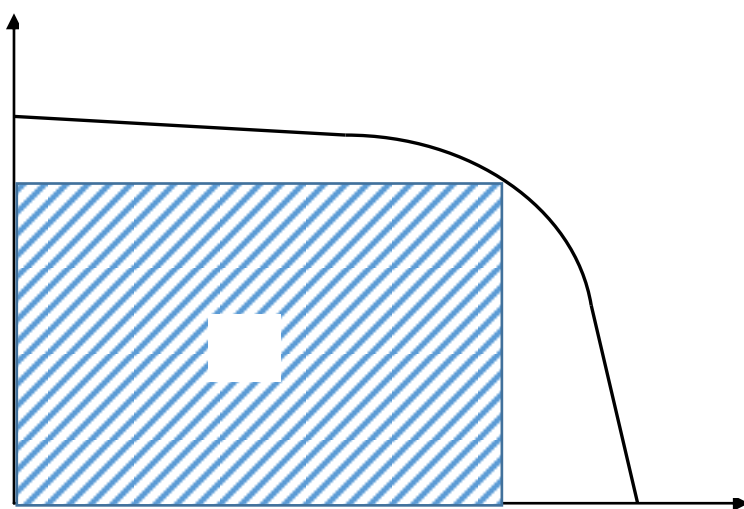


Рис. 6. ВАХ солнечного элемента.

Мощность зависит от сопротивления нагрузки R и при некотором его значении R_m достигает максимального значения $P_m = I_m \cdot U_m$, где I_m и U_m - ток и напряжение при максимальной мощности (максимальная мощность равна площади заштрихованного прямоугольника на рис. 6). При изменении интенсивности излучения ВАХ изменяются так, как показано на рис. 7. С ростом J увеличиваются напряжение, ток и мощность, а оптимальное сопротивление R_m , то есть сопротивление, при котором мощность, вырабатываемая СБ максимальна, уменьшается. На рис.7 штриховой линией показана

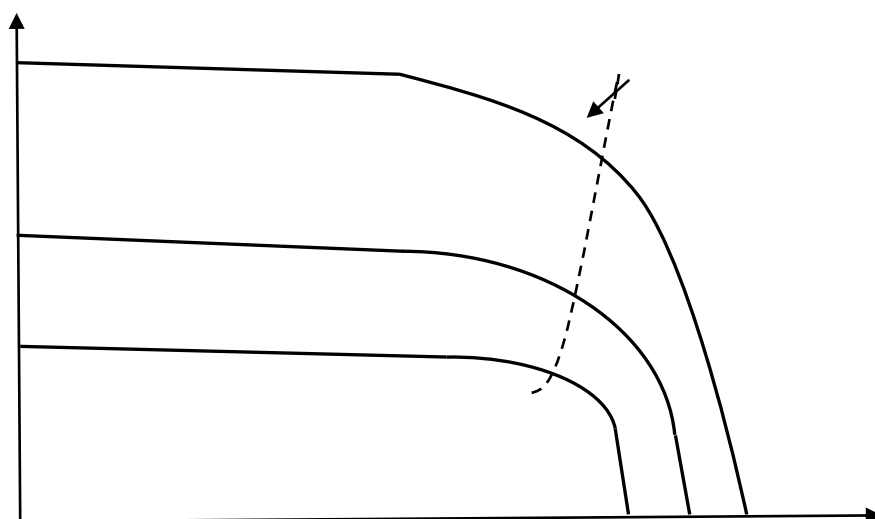


Рис. 7. ВАХ солнечного элемента при различной интенсивности $J_1 > J_2 > J_3$.

максимальная мощность при различной интенсивности светового потока на СБ.

Коэффициент полезного действия (КПД) СБ рассчитывают по формуле:

$$\eta = \frac{P_m}{\Phi_{CB}} 100\%, \quad (5)$$

- Φ_{CB} поток излучения, падающий на поверхность СБ.

Многие процессы уменьшают КПД, отметим некоторые из них. Частично свет отражается от поверхности полупроводника, поэтому для уменьшения отражения СЭ покрывают интерференционным просветляющим слоем. Фотоны, энергия которых недостаточна для внутреннего фотоэффекта, не дают вклада в электрическую энергию. Некоторые пары электрон - дырка рекомбинируют и не дают вклада в фототок. Мощность теряется при прохождении тока через полупроводник, за счет его собственного сопротивления. Согласно теории, солнечный элемент из кремния имеет КПД не более 20%, а на практике - менее 10 %. Ведутся исследования с целью уменьшения стоимости и повышения коэффициента полезного действия СЭ.

В данной работе мы будем определять КПД в случае, когда источником света является лампа накаливания, спектр которой отличается от солнечного. Поэтому полученный в опыте КПД может отличаться от КПД при освещении солнцем. За пределами земной атмосферы плотность потока солнечного излучения составляет 1353 Вт/м², а на поверхности земли меньше вследствие поглощения света в атмосфере, зависящего от высоты солнца над горизонтом и состояния атмосферы. Приняв ориентировочно плотность потока 850 Вт/м², получим, что солнечная батарея площадью 1 м² при КПД 10 % вырабатывает электрическую мощность 85 Вт.

Помимо использования СЭ (фотоэлемента) в качестве источника электрической энергии его применяют также в качестве фотоприемника для обнаружения и измерения количественных характеристик света, например, в фотографии.

Экспериментальная часть

Цель экспериментальной части работы:

Исследовать и изучить особенности работы солнечной батареи. Получить экспериментально вольтамперные характеристики солнечного элемента при различной интенсивности источника света и температурные зависимости напряжения холостого хода и тока короткого замыкания. Рассчитать КПД солнечной батареи.

Основные экспериментальные задачи

1. Определение интенсивности света с помощью термобатареи на различных расстояниях от источника света.
2. Измерение тока короткого замыкания и напряжения холостого хода солнечной батареи при различном расстоянии от источника света.
3. Продемонстрировать и оценить зависимость напряжения холостого хода, и тока короткого замыкания от температуры.
4. Получить экспериментальные ВАХ солнечной батареи при различной интенсивности света и определить коэффициент полезного действия СБ.
5. Получить экспериментальные ВАХ солнечной батареи при различных режимах работы: охлаждение солнечной батареи вентилятором, без охлаждения, при освещении солнечной батареи светом, прошедшим через стеклянную пластинку.

- Получить экспериментальную характеристическую кривую солнечной батареи при освещении солнечным светом.

Указания к проведению измерений:

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.

На рис. 8 показан внешний вид экспериментальной установки, расположение ее основных составляющих.

Основное оборудование

- Кремниевая солнечная батарея (4 ячейки по $2,50 \times 5,00 \text{ см}^2$ каждая).
- Термоэлектрическая батарея.
- Универсальный измерительный усилитель.
- Реостат.
- Комплект ламп.
- Вентилятор.
- Цифровые мультиметры.
- Термометр.
- Стекло́нные пластинки.

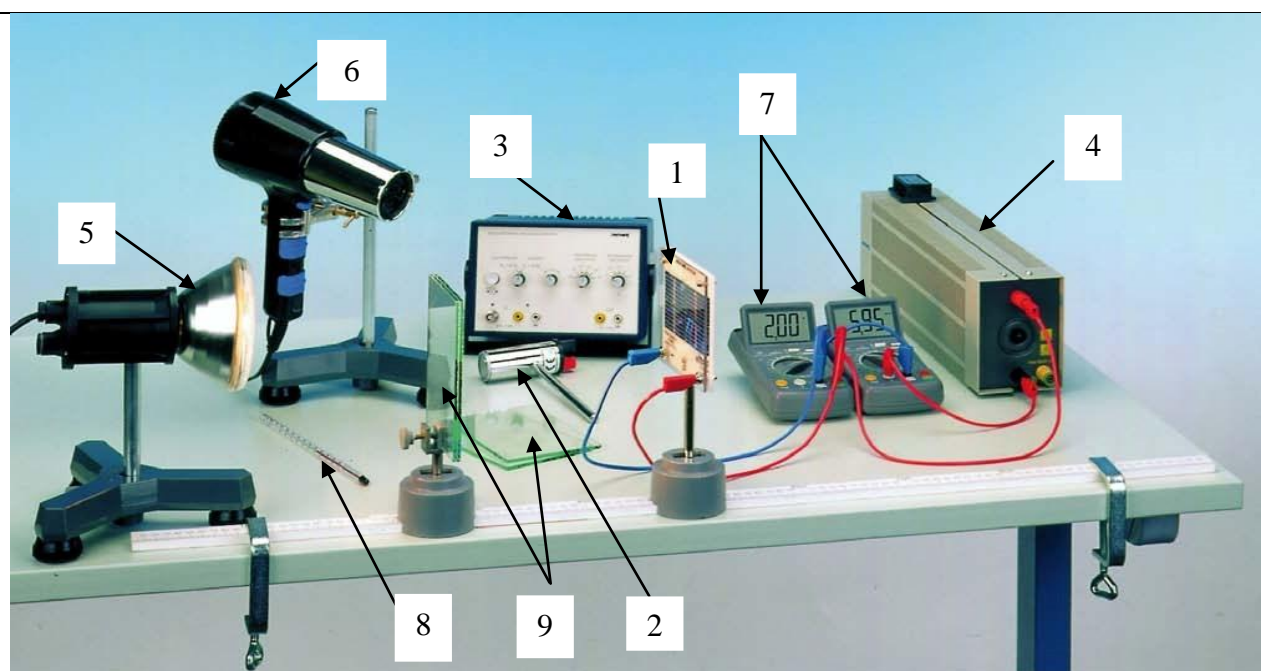


Рис. 8. Внешний вид экспериментальной установки.

Термоэлектрическая батарея

Принцип работы

Термоэлектрическая батарея работает совместно с универсальным измерительным усилителем и предназначена для измерения интенсивности светового потока.

Термоэлектрическая батарея служит датчиком 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. На рис. 9 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. Термоэлектрическая батарея работает на эффекте Зеебека [6]: 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 температуры 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.

Так как защитное стекло на входном отверстии термоэлектрической батареи имеет низкую проникающую способность преимущественно в ИК и УФ диапазоне, то оно должно быть удалено при проведении измерений в указанном спектральном диапазоне. Когда проводятся измерения с мощными источниками света в видимой области спектра, защитное стекло следует использовать для устранения влияния теплового излучения.

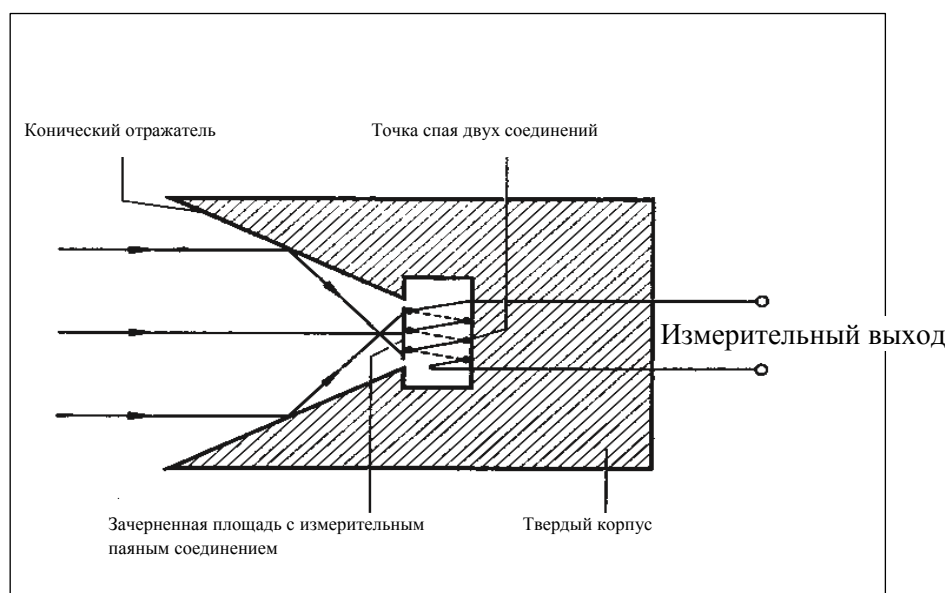


Рис. 9. Продольное сечение термоэлектрической батареи.

Для получения качественных результатов рекомендуется соблюдать следующие условия и выполнять следующие действия:

1. Ограничить пространственный угол захвата за счет использования экранирующей трубки.

2. Перед и при выполнении измерений следует убедиться, что влияние окружения на тепловой баланс системы минимально, а также установлен «ноль» и точка «ноль» имеет минимальный дрейф или вообще отсутствует.

3. Для регулировки использовать ручку «Компенсация» и «0» на усилителе.

4. При отсутствии источника излучения, необходимо подождать не менее 60 с перед началом измерений, чтобы система (датчик) пришла в термодинамическое равновесие с сенсорной областью термоэлектрической батареи.

5. При многочисленной серии измерений необходимо регулярно повторять процедуру компенсации и установки «0».

Универсальный измерительный усилитель (УИУ)

Применение и описание устройства

Усилитель (УИУ) используется для усиления электрических сигналов, которые не могут быть измерены непосредственно, либо вследствие высокого сопротивления источника сигнала или низкой амплитуды самого сигнала.

Панель прибора представлена на рис. 10.

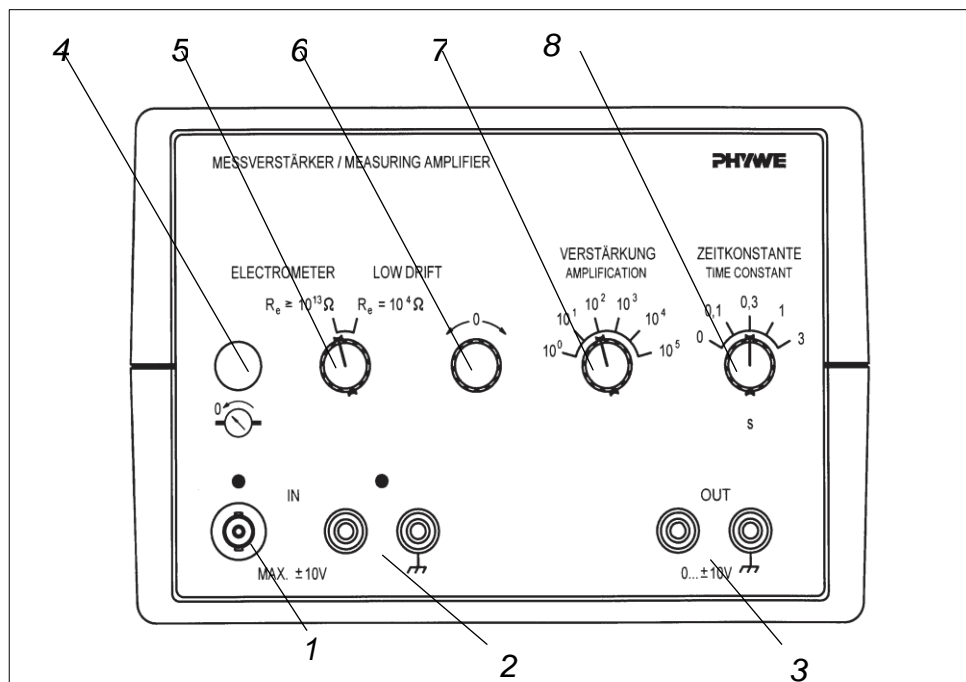


Рис. 10. Внешний вид панели универсального измерительного усилителя.

1 – BNC разъем. Предназначен для работы в режиме «Электронметр».

Когда переключатель 5 установлен в положение «Электронметр» загорается соответствующий светодиод.

2 – штыревые гнезда - 4 мм. Пара входных разъемов для режима работы «Low Drift». Когда переключатель 5 установлен в положение «Low Drift» загорается соответствующий светодиод.

3 - Гнезда 4 мм. Пара выходных разъемов для подключения, указывающее вольтметр или записывающего устройства. Выходное сопротивление $R_a \leq 0,5$ кОм

4 - Клавиша сброса. Эффективно использовать только в режиме «Электронметр».

5 – Выбор режима усиления.

В позиции «Электрометр» входное сопротивление - $R_i \leq 10^{13}$ Ом.

В позиции “Low Drift”: низкое входное сопротивление $R_i = 10^4$ Ом, с низким выходным сопротивлением дрейфа.

6 – Установка «Ноль».

7 – Поворотная ручка регулировки уровня усиления сигнала: $V = 10^0; 10^1; 10^2; 10^3; 10^4; 10^5$

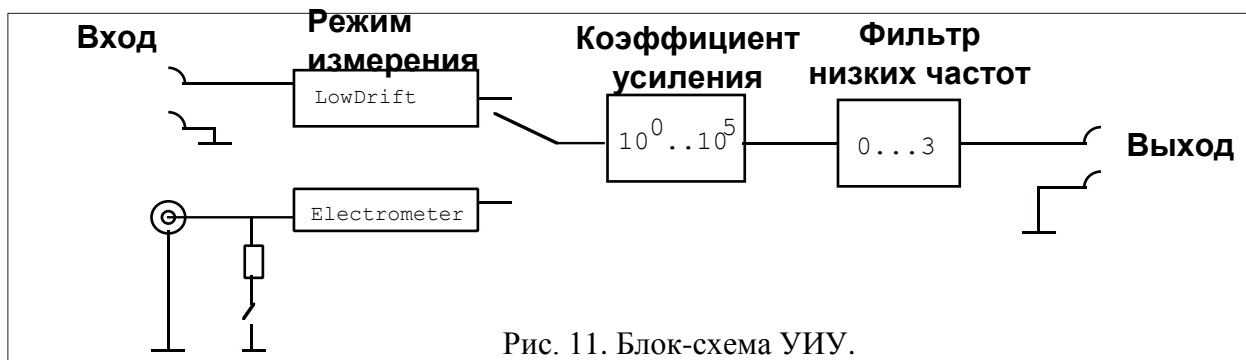
8 – Поворотная ручка для выбора постоянной времени фильтра низких частот: $\tau = 0; 0.1$ с; 0.3 с; 1 с; 3 с.

Доступны два режима работы УИУ:

Режим "Электрометр" предназначен для высокорезистивных источников напряжения. В этом случае входное сопротивление усилителя выбирается 10^{13} Ω .

Если измеряемые сигналы очень малы (мкВ), он работает в режиме “Low Drift” - "низкий дрейф". В этом режиме, сигнал может быть усилен на несколько порядков, принимая, в частности, во внимание стабильное нулевое положение сигнала.

Блок-схема УИУ показана на рис. 11.



Общие указания по работе с УИУ.

После включения в сеть УИУ готов к работе. Если измерения проводятся в режиме «Low Drift», желательно включить прибор за 5 минут до измерения, чтобы убедиться, что стабильные температурные условия преобладают внутри блока.

Перед измерением интенсивности светового потока необходимо установить «ноль» на усилителе. Для этого вход усилителя необходимо закоротить прилагаемым шунтом (рис. 12).

К выходу УИУ подсоединить вольтметр в режиме постоянного напряжения, выбрав предел измеряемого напряжения не более 2 В. При выбранном диапазоне усиления 7 поворотом ручки 6 установить ноль на вольтметре. Входное сопротивление вольтметра должно составлять примерно 10 кОм. Выход должен быть защищен от короткого замыкания и перегрузок.

Диапазоны входных и выходных напряжения -10 В ... +10 В. Если выбран слишком

УИУ

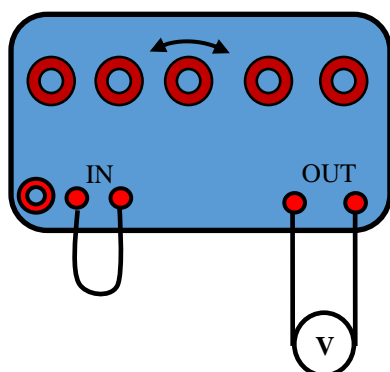


Рис. 12. Регулировка «ноля» на УИУ.

высокий коэффициент усиления, выходное напряжение поднимается примерно до 13 В. В этом случае выходной сигнал является насыщенным. Это не повредит устройство, но результаты измерений будут искажены. Как только увеличивается выходное напряжение выше 10 В, коэффициент усиления должен быть снижен на один шаг.

Выходное напряжение имеет тот же знак, что и входное напряжения.

Содержание экспериментальных заданий

Часть А

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

Для проведения измерений необходимо собрать установку, включающую источник света (1), термоэлектрическую батарею (2), усилитель (3) (рис. 13). На рис. 13 l - расстояние между источником и термоэлектрической батареей.

УИУ (3) соединен с мультиметром (4).

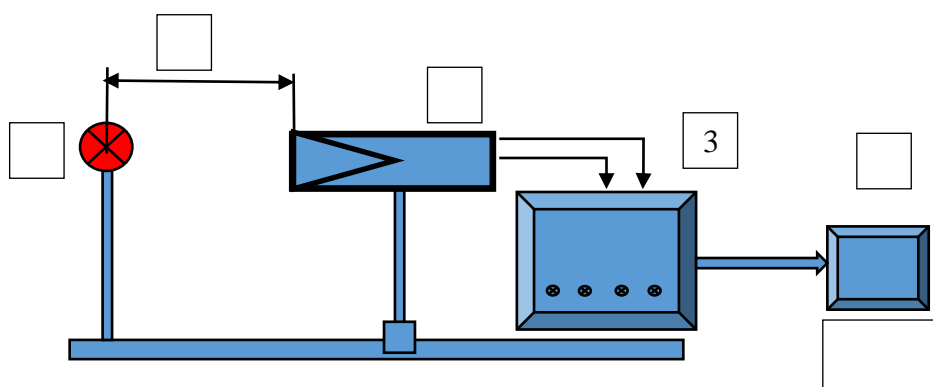


Рис. 13. Измерение интенсивности светового потока.

Внимание! При проведении измерения потока излучения светового источника следует снять защитное стекло с термоэлектрической батареей.

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

Минимальное расстояние до измерительного элемента термоэлектрической батареи составляет 50 см.

Количество экспериментальных точек в каждой серии – 10.

Измеряя напряжение на выходе термобатареи U_V и занося их в таблицу 1, получить зависимость светового потока Φ при различном расстоянии l между источником и солнечной батареей $\Phi(l)$.

Для расчета потока излучения (мощности излучения) использовать формулу:

$$\Phi = \frac{U_V}{K_y \delta}, \quad (6)$$

где K_y – коэффициент усиления напряжения (рекомендуется использовать $K_y = 10^2$), δ – коэффициент чувствительности термоэлектрической батареи, согласно паспорту составляет $\delta = 0,067$ В/Вт.

Используя значения потока излучения от источника Φ , рассчитать его интенсивность:

$$J = \frac{\Phi}{S_T} \quad (7)$$

Здесь S_T – площадь измерительной поверхности термоэлектрической батареи, м^2 . Согласно паспортным данным, $S_T = 4,9 \cdot 10^{-4} \text{м}^2$.

Поток излучения, падающий на СБ, определяется с учетом площади поверхности СБ:

$$\Phi_{\text{СБ}} = J \cdot S_c \quad (8)$$

При расчете интенсивности излучения, приходящейся на СБ, следует учитывать площадь поверхности СБ, а при расчете фототока характер соединения солнечных элементов. Данная экспериментальная установка содержит четыре солнечных элемента, которые включены последовательно. Площадь одного солнечного элемента составляет $2,5 \times 5,0 \text{ см}^2$. Общая площадь солнечной батареи $S_c = 50 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

Результаты расчета занести в таблицу 1.

Таблица 1.

l , см	50	60	70	80	90
U_V , мВ					
Поток излучения на ТЭ Φ , Вт					
Интенсивность излучения J , Вт/м ²					
Поток излучения на СБ $\Phi_{\text{СБ}}$, Вт					

По результатам, полученным в таблице 1, построить зависимости интенсивности излучения светового источника от расстояния до источника $J(l)$ и потока излучения $\Phi_{\text{СБ}}(l)$.

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

Для проведения этого задания использовать схему, представленную на рис. 14.

СБ установить на оптической скамье на расстояниях, указанных в таблице 2. Переводя реостат в крайние положения - сопротивление нагрузки равно нулю, измеряем ток короткого замыкания I_S , а когда сопротивление нагрузки максимально, измеряем напряжение холостого хода U_{xx} (рис. 14) при различной интенсивности светового потока. Полученные результаты занести в таблицу 2 и построить зависимости I_S и U_{xx} от расстояния l между солнечной батареей и источником излучения.

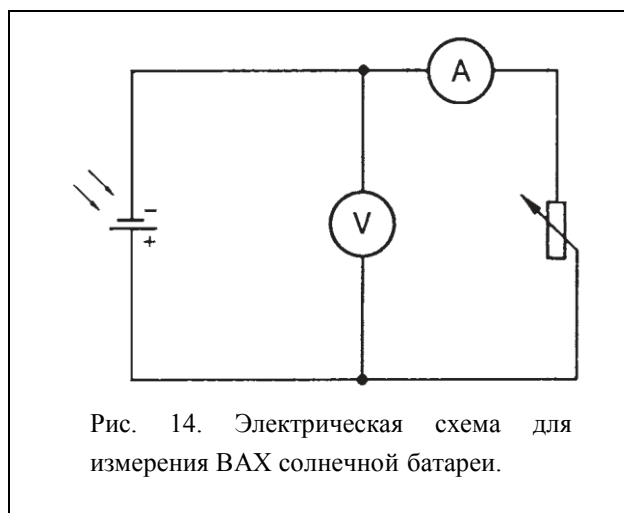


Таблица 2

l , см	50	60	70	80	90
I_S , мА					
U_{xx} , В					

С учетом характера соединения солнечных элементов максимальное напряжение холостого хода U_{xx} должно составлять примерно 2 В. Ток короткого замыкания пропорционален интенсивности света:

$$I_S = 1,84 \cdot 10^{-4} \cdot J \quad (9)$$

Построить экспериментальные зависимости $I_S(J)$ и $U_{xx}(J)$ или $I_S(\Phi_{СБ})$ и $U_{xx}(\Phi_{СБ})$.

Сравнить полученные экспериментальные результаты $I_S(J)$ с расчетными полученными по формуле (9).

Часть Б

Задание 3. Демонстрация теплового эффекта.

Установить солнечную батарею на расстоянии более 50 см (рекомендуется 60-70 см) от источника света. Использовать схему соединения элементов на рис. 14.

Измерить ток короткого замыкания I_S и напряжение холостого хода U_{xx} при трех различных температурах поверхности СБ. Температуру измерять непосредственно у поверхности СБ с помощью лабораторного термометра, не касаясь поверхности солнечного элемента.

Использовать следующие тепловые режимы:

- обдув холодным воздухом поверхности СБ;

- обдув горячим воздухом поверхности СБ в двух температурных режимах.

Указание: Количество измерений U_{xx} и I_S при каждой температуре - 3. На основании трех измерений определить среднее арифметическое указанных величин и результат занести в таблицу 3.

Таблица 3.

$l = \dots \text{ см}$

Физическая величина	$T_1 = \dots, \text{ К}$	$T_2 = \dots, \text{ К}$	$T_3 = \dots, \text{ К}$
$U_{xx}, \text{ В}$			
$I_S, \text{ мА}$			

Для данной солнечной батареи результаты измерений показали, что тепловое влияние для напряжения холостого хода СБ составляет:

$$\frac{\Delta U}{\Delta T} = -8 \text{ мВ/К.}$$

Таким образом, тепловой эффект для U_{xx} в расчете на одну солнечную ячейку равен – 2 мВ/К.

Замечание: Влияние нагрева солнечной панели на ток короткого замыкания I_S очень мало и в данных экспериментальных условиях наблюдение эффекта является затруднительным. Оценить влияние нагрева поверхности СБ на напряжение холостого хода и ток короткого замыкания.

Задание 4. Измерение вольтамперных характеристик солнечной батареи и определение ее КПД.

Использовать схему, представленную на рис. 14.

- Измерить ВАХ солнечной батареи при различной мощности светового потока, а именно при трех положениях источника света относительно поверхности СБ: $l = 50$ см, 60 см, 70 см. При измерении ВАХ рекомендуется использовать шаг не более 0,2 В. В области резкого уменьшения тока шаг изменения напряжения уменьшить до 0,1 В.
- Количество экспериментальных точек в каждой серии – не менее 10.
- При измерении ВАХ контролировать температуру поверхности СБ, используя термометр.
- Результаты занести в таблицу 4. По результатам построить зависимость ВАХ солнечной батареи.
- Вычислить мощность СБ:

$$P = I \cdot U \quad (10)$$

Рассчитать максимальную мощность P_m .

- Построить график зависимости мощности от напряжения на СБ, $P(U)$.
- Вычислить КПД солнечного элемента по формуле (5), используя результаты таблиц 1, 4.

Таблица 4.

$l = 50 \text{ см}, T = \dots \text{ К}, I_S = \dots \text{ мА}, U_{xx} = \dots \text{ В}$										
$I, \text{ мА}$										

$U, В$										
$R, Ом$										
$P, мВт$										
$P_m = ...мВт, \eta = ...$										
$l = 60 \text{ см}, T = ... К, I_S = ...мА, U_{xx} = ...В$										
$I, мА$										
$U, В$										
$R, Ом$										
$P, мВт$										
$P_m = ...мВт, \eta = ...$										
$l = 70 \text{ см}, T = ...К, I_S = ...мА, U_{xx} = ...В$										
$I, мА$										
$U, В$										
$R, Ом$										
$P, мВт$										
$P_m = ... мВт, \eta = ...$										

- Используя результаты таблицы 4 и график $P(U)$, определить при каком сопротивлении R СБ вырабатывает максимальную мощность.

Задание 5. Исследовать влияние температуры на ВАХ солнечной батареи.

Использовать схему, представленную на рис. 14.

Снять ВАХ в различных температурных режимах при заданной и фиксированной освещенности, задаваемой расстоянием в диапазоне 60 – 70 см между СБ и источником излучения:

- а) без охлаждения;
- б) с охлаждением;
- в) с обдувом горячим воздухом;
- г) со стеклянной пластинкой.

Охлаждение и дополнительный нагрев поверхности солнечной батареи осуществляется с помощью внешнего вентилятора.

Количество экспериментальных точек в каждой серии – 10.

Продemonстрировать уменьшение температуры нагрева солнечной батареи за счет использования стеклянной пластинки. Для этого на пути светового потока от источника разместить стеклянные пластинки и менять толщину пластинок, но, не меняя освещенность, снять ВАХ солнечной батареи. Результаты эксперимента занести в таблицу 5.

Построить ВАХ солнечной батареи.

По формуле (10) рассчитать мощность, найти максимальную мощность и КПД СБ (5). Результаты расчета занести в таблицу 5.

Построить график зависимости мощности от напряжения на СБ - $P(U)$ при различной температуре поверхности СБ и со стеклянной пластинкой.

Используя данные исследования ВАХ СБ при различных температурах (табл. 5),

определить среднее арифметическое значение КПД:

$$\langle \eta \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N \eta_i}{N} \quad (11)$$

Используя методическое пособие [7], рассчитать погрешность измерений светового потока, электрической мощности, вырабатываемой СБ и ее КПД.

Таблица 5.

$l = \dots$ см

<i>Без охлаждения, $T_1 = \dots K$, $I_S = \dots mA$, $U_{xx} = \dots B$</i>										
<i>I, mA</i>										
<i>U, B</i>										
<i>R, Ом</i>										
<i>P, мВт</i>										
<i>$P_m = \dots$, $\eta = \dots$</i>										
<i>С охлаждением, $T_2 = \dots K$, $I_S = \dots mA$, $U_{xx} = \dots B$</i>										
<i>I, mA</i>										
<i>U, B</i>										
<i>R, Ом</i>										
<i>P, мВт</i>										
<i>$P_m = \dots мВт$, $\eta = \dots$</i>										
<i>С обдувом горячим воздухом, $T_3 = \dots K$, $I_S = \dots mA$, $U_{xx} = \dots B$</i>										
<i>I, mA</i>										
<i>U, B</i>										
<i>R, Ом</i>										
<i>P, мВт</i>										
<i>$P_m = \dots мВт$, $\eta = \dots$</i>										
<i>Со стеклянной пластинкой, $T_4 = \dots K$, $I_S = \dots mA$, $U_{xx} = \dots B$</i>										
<i>I, mA</i>										
<i>U, B</i>										
<i>R, Ом</i>										
<i>P, мВт</i>										
<i>$P_m = \dots мВт$, $\eta = \dots$</i>										

Рекомендации: для расчета диапазона допустимых погрешностей измерения мощности, вырабатываемой СБ, 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 $\Phi_{CB}(l)$. Максимальное отклонение значений потока излучения от их линейной аппроксимации принять за полуширину интервала, определяющего диапазон погрешности для данной величины.

Относительную погрешность косвенных измерений электрической мощности СБ рассчитать по формуле:

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

Относительную погрешность косвенных измерений потока излучения на СБ рассчитать по

формуле:

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

При расчетах принять $\frac{\Delta S_T}{S_T} \approx \frac{\Delta S_C}{S_C} = 5\%$.

Относительную погрешность КПД СБ рассчитать, как:

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

Задание 6. Анализ эффективности использования солнечного света при работе солнечных батарей по сравнению с другими источниками излучения.

(Данное задание выполняется по усмотрению преподавателя.).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Уровень Ферми, энергия Ферми.
2. Структура энергетических зон в полупроводниках p - и n – типа.
3. Почему возникает контактная разность потенциалов? Как можно оценить и измерить данную величину?
4. Как устроен полупроводниковый солнечный элемент?
5. Какие токи протекают через освещенный p - n -переход?
6. Принцип работы солнечного элемента. Как возникает фото ЭДС? Какова природа сторонних сил в солнечном элементе?
7. Пояснить физическую природу внутреннего сопротивления солнечного элемента. Оценить внутреннее сопротивление СБ, используя результаты эксперимента.
8. Объяснить физическую природу зависимости выходной мощности солнечного элемента от температуры.
9. Почему нагрев солнечной батареи приводит к изменению напряжения холостого хода?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Савельев И.В. Курс общей физики. В 3-х т. Т. 3. - М.: Наука . 1987. - 320 с.
2. Епифанов Г.И., Мома Ю.А. Твердотельная электроника. - М.: Высшая школа, 1986. – 304 с.
3. Бушманов Б.Н. Хромов Ю.А. Физика твердого тела. - М.: Высшая школа, 1971. - 224 с.
4. Мартинсон Л.К., Смирнов Е.В. Квантовая физика. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 2009. – 532 с.
5. Винтайкин Б.Е. Физика твердого тела. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 2007. – 360 с.

6. 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.
 7. 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.
-