

Московский государственный технический университет
имени Н. Э. Баумана

И. Н. Фетисов

ИЗУЧЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ

Методические указания к лабораторной работе Ф-2б
по курсу общей физики.

Под редакцией Л. К. Мартинсона
Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999

Рассмотрен процесс преобразования энергии света в электрическую энергию с помощью электронно-дырочного перехода. Описана методика экспериментального определения характеристик солнечной батареи. Для студентов 2-го курса.

ВВЕДЕНИЕ

Солнечная батарея (батарея солнечных элементов) - устройство, непосредственно преобразующее энергию солнечного излучения в электрическую. Действие солнечного элемента (СЭ) основано на использовании явления внутреннего фотоэффекта. Получили распространение конструкции СЭ с $p-n$ - переходами. При облучении в полупроводнике генерируются дополнительные носители заряда, которые перемещаются под действием электрического поля $p-n$ -перехода и создают на внешних выводах фотоЭДС.

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

Данная работа является продолжением работы "Изучение электронно-дырочного перехода" (Ф-2а), описание которой рекомендуем предварительно изучить.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Типичная конструкция СЭ показана на рис. 1. 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 и по периферии - с освещаемой стороны.

Напомним, что происходит в $p-n$ -переходе в отсутствие света и внешнего источника напряжения. В области $p-n$ -перехода образуется двойной электрический слой из положительных и отрицательных ионов примесных атомов, в результате между p и n -областями возникает контактная разность потенциалов U близкая к 1 В в переходе из кремния. При этом через переход протекают два небольших, равных по величине и противоположных по направлению тока: не основных носителей $-I_S$ и основных носителей $+I_S$, 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 от-

сутствие света и при одинаковой температуре всех участков замкнутой цепи электрический ток отсутствует в соответствии с законом сохранения энергии.

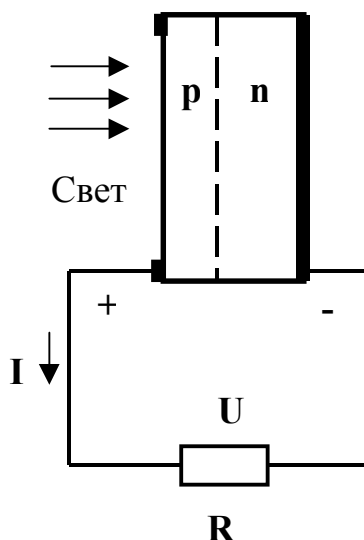


Рис. 1

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). В результате появляются дополнительные носители тока - электроны проводимости и дырки. Это явление называется внутренним фотоэффектом

Внутренний фотоэффект имеет "красную границу": энергия кванта света (фотона) должна превышать ширину запрещенной зоны E_g , разделяющей валентную зону и зону проводимости, т.е. $h\nu \geq E_g$, где h - постоянная Планка, ν - частота света. В кремнии внутренний фотоэффект имеет место для волн с длиной $\lambda \leq 1,1$ мкм. т. е. для видимого, ультрафиолетового и ближнего инфракрасного излучений.

Рассмотрим, что происходит в СЭ при освещении. Излучение поглощается в p -области и генерирует в ней электронно-дырочные пары, образующиеся вблизи p - n -перехода. Электроны (не основные носители в p -области) перебрасываются контактным полем в n -область, заряжая ее отрицательно. Подавляющая часть дырок не способна преодолеть потенциальный барьер и остается в p -области, заряжая ее положительно. 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 qU , где q - заряд электрона по модулю. Перемещение электронов через p - n -переход создает ток $-I_\phi$, называемый первичным фототоком, которому, как и току не основных носителей, приписывают отрицательный знак. Понижение барьера ведет к возрастанию тока основных носителей, который становится равным $I_s \exp(qU/(kT))$. Таким образом, через переход протекают следующие токи: не основных носителей $-I_s$, основных носителей $+I_s \exp(qU/(kT))$ и первичный фототок $-I_\phi$. Полный ток через p - n -переход равен

$$I = I_s \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) - I_\phi \quad (1)$$

Эта формула описывает вольт - амперную характеристику (ВАХ) идеального СЭ. Из нее лег-

ко определить прямое смещение

$$U = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_\phi + I}{I_s} + 1 \right) \quad (2)$$

Таким образом, при освещении p - n -перехода контактная разность потенциалов в нем уменьшилась на величину U , а другие контактные разности потенциалов не изменились. В результате на клеммах СЭ появилось напряжение U , называемое фотоЭДС, в сопротивлении – ток I . Следовательно, p - n -переход стал источником тока, в котором энергия света преобразуется непосредственно в электрическую энергию. Так как фотоЭДС 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 явлении электромагнитной индукции сторонние силы – это силы электрического поля, однако не электростатического, а вихревого. 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: $I_\phi = \alpha \Phi$, где α – коэффициент пропорциональности. Ток I в нагрузке зависит от I_ϕ и сопротивления нагрузки R . При коротком замыкании СЭ, когда $R = 0$, напряжение на сопротивлении $U = IR = 0$, а ток, как следует из (1), равен I_ϕ . 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, называемое напряжением холостого хода U_{xx} , как следует из (2), равно

$$U = U_{xx} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_\phi}{I_s} + 1 \right) \quad (3)$$

Из (3) видно, что напряжение логарифмически (слабо) растет с ростом первичного фототока или потока излучения.

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

Зависимость тока от напряжения, т.е. вольт – амперная характеристика идеального СЭ, показана на рис. 2. Каждой точке кривой соответствует определенное сопротивление нагрузки: с увеличением R напряжение растет, а ток падает. В нагрузке выделяется электрическая мощность $R = IU$. Она зависит от R и при некотором его значении R_m достигает максимального значения $P_m = I_m U_m$, где I_m и U_m – ток и напряжение при максимальной мощности (максимальная мощность равна площади заштрихованного прямоугольника на рис. 2). При изменении потока излучения ВАХ изменяются так, как показано на рис. 3. С ростом Φ увеличиваются напряжение, ток и мощность, а оптимальное сопротивление R_m уменьшается.

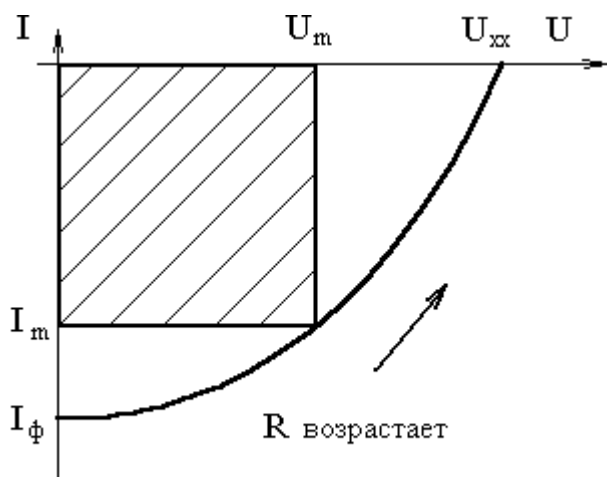


Рис. 2

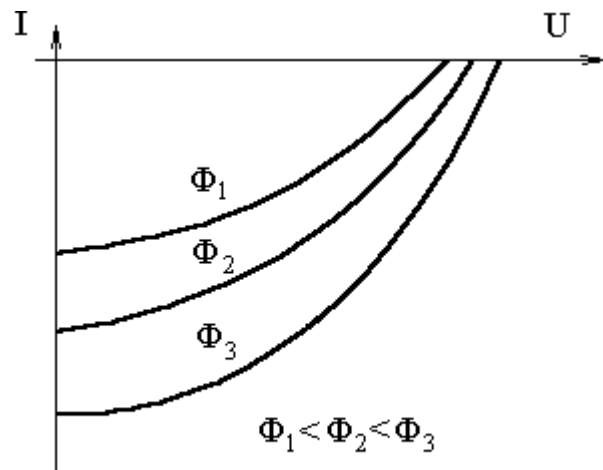


Рис. 3

Коэффициентом полезного действия СЭ называют отношение максимальной электрической мощности к потоку падающего излучения

$$\eta = P_m / \Phi \quad (4)$$

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 объемное сопротивление полупроводника. Согласно теории, солнечный элемент из кремния имеет КПД не более 20%, а практически - меньше. 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 1м² 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

Описание лабораторной установки

Схема установка дана на рис. 4. Солнечный элемент 1 из кремния площадью 2...3 см² расположен в светонепроницаемой камере с отверстием, которое можно закрыть крышкой. К солнечному элементу тумблером S1 можно подключать резистор с различным сопротивлением R. Он представляет собой декадный магазин сопротивлений. Напряжение U солнечного элемента измеряем цифровым вольтметром, а ток через резистор и электрическую мощность

рассчитываем по формулам

$$I=U/R,$$

$$P=IU=U^2/R$$

(5)

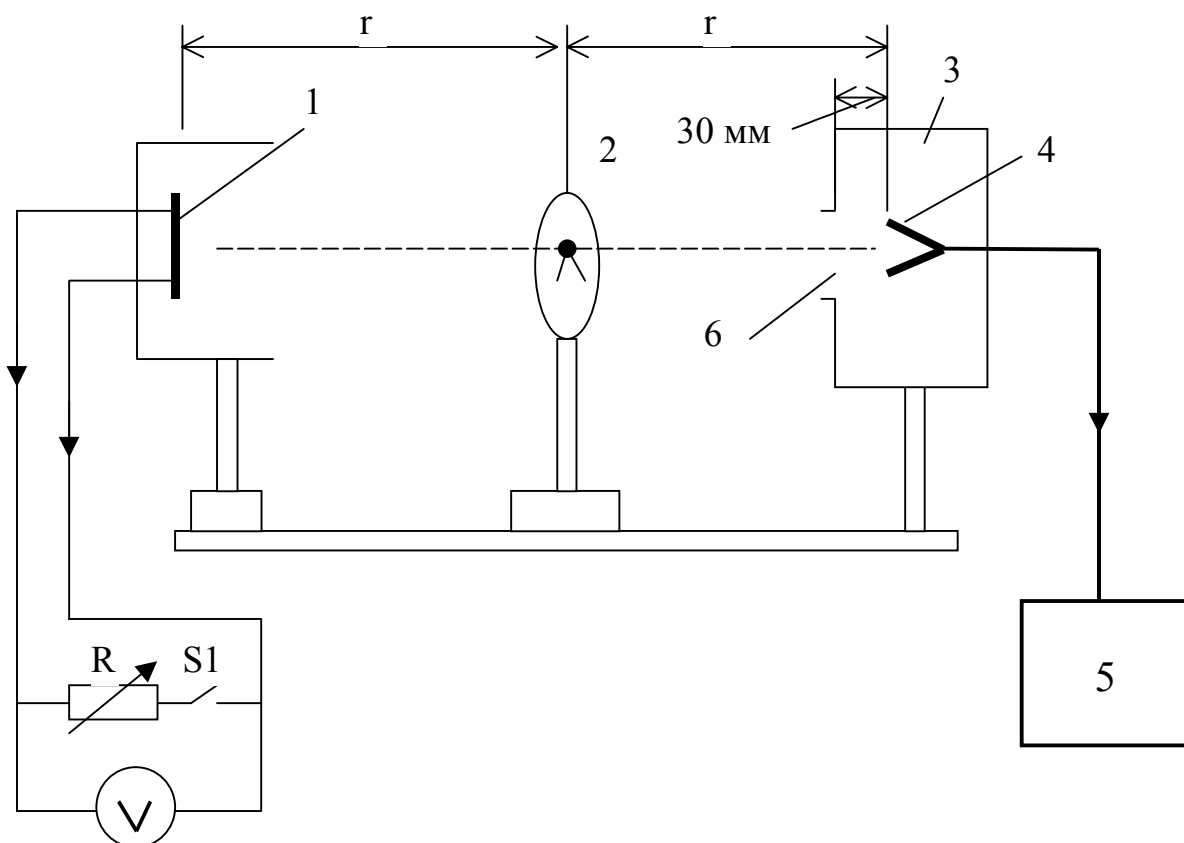


Рис. 4

Напряжение может достигать десятых долей вольта. Источником света служит лампа накаливания 2 (12 В, 30 Вт), питаемая через понижающий трансформатор от сети.

Поток излучения определяем с помощью прибора "Измеритель средней мощности и энергии лазерного излучения ИМО-2Н" (далее "измеритель мощности"), состоящего из измерительной головки 3 и блока регистрации 5. По принципу действия - это тепловой приемник. Излучение через окно 6 попадает в полый зачерненный металлический конус 4 и, поглощаясь, нагревает его. Приращение температуры, пропорциональное мощности излучения, с помощью электрического термометра (термопары) преобразуется в напряжение. Показывающий прибор проградуирован в единицах мощности излучения - ваттах. С помощью теплового приемника, поглощающего излучение с различной длиной волны, мы определяем полную мощность излучения во всем спектральном диапазоне, включая видимое и инфракрасное излучения лампы. Приемник имеет значительную инерцию - его показания устанавливаются через несколько минут после начала освещения. Приемник можно калибровать; для этого через нагреватель, намотанный на конусе, пропускают электрический ток определенной мощности.

Хотя прибор предназначен для измерений с узкими пучками лазеров, так как имеет малый рабочий угол (примерно 2°), с некоторыми предосторожностями его можно использовать в данной работе. Для этого нить лампы должна быть короткой и находиться на оптической оси приемника, показанной штрихами на рис. 4.

Передняя панель прибора ИМО-2Н изображена на рис. 5. Переключателем рода работ 1 можно установить либо режим измерения мощности, либо - энергии отдельных импульсов излучения (в работе не используется). В каждом случае имеются режимы измерения и калиб-

ровки. Числа над клавишами переключателя пределов измерения 4 указывают мощность излучения в ваттах при отклонении стрелки прибора на всю шкалу. Верхняя шкала из 100 делений используется на пределах 0,001, 0,01 и т.д., нижняя шкала из 30 делений - на пределах, оканчивающихся цифрой 3. Например, если на пределе 0,01 было 60 делений, то мощность равна $60 \cdot 0,01 / 100 = 0,006$ Вт.

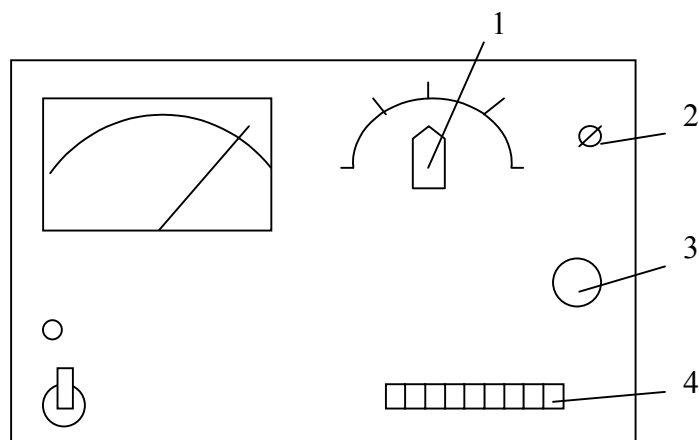


Рис. 5

Солнечный элемент и лампу, установленные на подставках можно перемещать вдоль установки и по высоте.

Для измерения потока излучения Φ , падающего на СЭ, необходимо установить нить лампы перпендикулярно оси установки и на равном расстоянии от СЭ и конуса теплового приемника (см. рис.4). Мы предполагаем, что излучение лампы одинаково в обоих направлениях. Поэтому из показания Φ_0 измерителя мощности находим

$$\Phi = \Phi_0 S / S_0, \quad (6)$$

где $S_0 = 1,54 \text{ см}^2$ - площадь входного отверстия конуса;

S - площадь СЭ (указана на камере элемента).

Задание и порядок выполнения работы

Задание 1. Ознакомиться с измерителем мощности излучения и подготовить его к работе.

1. Перед включением прибора поставить тумблер "СЕТЬ" в нижнее положение, переключатель рода работ 1 (см. рис. 5) - в положение "АРРЕТИР".
2. Включить вилку прибора в сеть, выключатель поставить в положение "СЕТЬ". При этом должна загореться индикаторная лампа.
3. Переключатель пределов измерения 4 (см. рис. 5) поставить в положение "0,01" по верхнему ряду чисел, а переключатель рода работ - в положение "МОЩНОСТЬ, ИЗМЕРЕНИЕ".
4. Закрыть крышкой окно 6 измерительной головки (см. рис. 4). Выставить нуль измерителя мощности ручкой 3 "УСТАНОВКА НУЛЯ" на передней панели прибора. В случае, если регулировки нуля не хватает, добиться установления нуля регулировкой "Уст. 0" на задней панели прибора.
5. Прокалибровать прибор. Для этого переключатель рода работ установить в положение калибровки. Через 3...5 мин. на блоке регистрации должно установиться $100 \pm 0,5$ делений. В противном случае добиться этого регулировкой резистора 2 (см. рис. 5).
6. Переключатель рода работ установить в положение "ИЗМЕРЕНИЕ". Снять крышку с окна 6 измерительной головки (см. рис. 4). Продемонстрировать, что прибор регистрирует тепловое излучение руки, испускаемое в ИК-диапазоне (воспользовавшись законом смещения Вина, легко получить, что наиболее интенсивная часть этого излучения имеет длину волны 10 мкм). Для наблюдения излучения поднести ладонь на расстояние несколько сантиметров от

окна.

7. Проверить, находится ли нить лампы на оси измерительной головки прибора ИМО-2Н. Если нить отклонена от оси больше, чем на 5...10 мм, отрегулировать положение лампы.

Задание 2. Подготовить вольтметр к работе и продемонстрировать работу солнечного элемента.

1. В разных экземплярах установки используются цифровые вольтметры различных типов; ниже даны указания для вольтметра В7-22А. Переключатель рода работ (справа на панели) установить в изложение " -V " для измерения постоянного напряжения. Переключатель пределов измерения (слева) установить в положение "2", при этом можно измерять напряжение до 2 В. Включить тумблер "СЕТЬ", при этом должно появиться свечение индикатора. Проверить нуль прибора: при закрытой камере СЭ напряжение должно быть равно нулю (или не превышать двух-трех единиц младшего разряда).

Снять крышку с камеры СЭ, включить лампу и продемонстрировать появление фотоЭДС при различных значениях сопротивления и расстояния от лампы.

Задание 3. Измерить вольт - амперную характеристику СЭ и определить его КПД.

1. Выключить лампу, закрыть окно приемной головки измерителя мощности, установить нуль прибора.

2. Включить лампу, открыть окно приемной головки измерителя мощности. Перемещая лампу вдоль установки, найти такое положение, когда стрелка прибора отколется на 80...100 делений, зафиксировать это положение лампы. Через несколько минут результат измерения потока излучения Φ_0 записать в табл. 1. Измерить линейкой расстояние r от нити лампы до конуса приемного элемента, как показано на рис. 4 (расстояние от входного окна до конуса 30 мм). Установить такое же расстояние между нитью и СЭ. Результат измерения расстояния записать в табл. 1.

Таблица 1

Площадь СЭ $S = \dots$

№ опыта	r	Φ_U	Φ	P_m	U_m	I_m	R_m	η
1								
2								

Таблица 2

Расстояние $r = \dots$

R	U	$I=U/R$	$P=IU=U^2/R$

Примечание. В таблице примерно 35 строк.

3. Для получения вольт - амперной характеристики измерить напряжение U солнечного элемента при различных сопротивлениях нагрузки R , результаты измерений записать в таблицу 2. Для этого включить тумблер $S1$ на магазине сопротивлений, установить минимальное сопротивление 10 Ом, измерить U . Далее с каждым шагом увеличивать сопротивление примерно в 1,5 раза по сравнению с предыдущим значением, пока оно не достигнет примерно 10^4 Ом. Выключить тумблер $S1$, измерить напряжение U , равное напряжению холостого хода U_{xx} , так как при этом нагрузкой служит очень большое сопротивление вольтметра (10^7 Ом).

4. Прделанный опыт повторить при освещенности СЭ примерно в 2 раза меньшей. Для этого расстояние r от нити до СЭ и от нити до конуса измерителя мощности увеличить примерно в 1,5 раза. Значение r записать в таблицу 1.
5. Повторить измерения п. 4 задания 1. Измерить Φ_0 .
6. Повторить измерения п.3 задания 3.
7. Выключить лампу, вольтметр. Переключатель рода работ измерителя мощности установить в положение "АРРЕТИР", выключать тумблер "СЕТЬ".

Обработка результатов измерений

1. По результатам измерений R и U рассчитать по формулам (5) силу тока I и мощность P , результаты записать в табл. 2.
2. По данным табл. 2 определить максимальную электрическую мощность P_m и соответствующие ей значения I_m , U_m и R_m .
3. По формуле (6) вычислить коэффициент полезного действия СЭ для двух значений освещенности.
4. На одном графике построить зависимости I от U для двух значений освещенности. На каждом графике построить прямоугольник максимальной мощности.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как устроен полупроводниковый солнечный элемент?
2. Какие токи протекают через освещенный p - n -переход?
3. Как возникает фотоЭДС?
4. Какова природа сторонних сил в солнечном элементе?

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 шк., 1986. 304 с.
- 3.Бушманов Б.Н. Хромов Ю.А. Физика твердого тела. М.: Высш. шк. , 1971. 224 с.