

И. Н. Фетисов

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ

Методические указания к лабораторной работе Ф-62
по курсу общей физики.

Под редакцией Л. К. Мартинсона

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 солнечных элементов (СЭ) с $p-n$ - переходами. В полупроводнике при его освещении 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.

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 чего между p - и n -областями возникает контактная разность потенциалов U_k , близкая к 1 В (для СЭ из кремния). При этом через переход протекают два небольших, равных по величине и противоположных по направлению тока: неосновных носителей ($-I_s$) и основных носителей $+I_s$. Суммарный ток через переход равен нулю. Если к $p-n$ -переходу подключить резистор, то ток в нем будет отсутствовать. Хотя в контуре имеется контактная

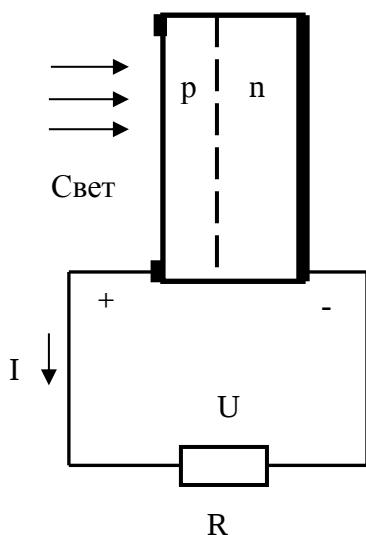


Рис. 1

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 электродами. Таким образом, в отсутствие света и при одинаковой температуре всех участков замкнутой цепи электрический ток отсутствует, в согласии с законом сохранения энергии.

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, называемую дыркой. 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:

$$\frac{hc}{\lambda} \geq E_g,$$

где h – постоянная Планка, λ – длина волны, c – скорость 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 (неосновные 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 разделяет в пространстве отрицательные электроны и положительные дырки, образующиеся под действием света. Вследствие этого, на переходе формируется прямое смещение U , понижающее потенциальный барьер на энергетическую 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 неосновных носителей, приписывают отрицательный знак. Понижение барьера ведет к возрастанию положительного тока основных носителей, который становится равным

$$I_s \exp \frac{qU}{kT}.$$

Таким образом, через переход протекают следующие токи: неосновных носителей $(-I_s)$, основных носителей $I_s \exp \frac{qU}{kT}$, а также первичный фототок $(-I_\phi)$. Таким образом, 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 легко определить прямое смещение U :

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

Таким образом, при освещении p - n -перехода контактная разность потенциалов в нем уменьшается на величину U , а другие контактные разности потенциалов не изменяются. В результате на клеммах СЭ появляется напряжение U , называемое фотоЭДС, а в нагрузочном сопротивлении – ток I . Следовательно, p - n -переход становится 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_k (для кремния примерно 1В).

В солнечном элементе, как и во всех других источниках тока, должны быть сторонние силы, природа которых отличается от сил электростатического поля. Под действием электростатических сил заряды перемещаются в направлении уменьшения потенциальной энергии. Однако, 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} , а также 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_{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 формулы (3) видно, что напряжение логарифмически (т.е., слабо) растет с ростом первичного фототока, следовательно, и потока излучения.

Зависимость тока от напряжения, т.е. вольт-амперная характеристика (ВАХ) идеального СЭ, показана на рис. 2. Каждой точке кривой соответствует определенное сопротивление нагрузки (R). При увеличении R напряжение растет, а ток – уменьшается.

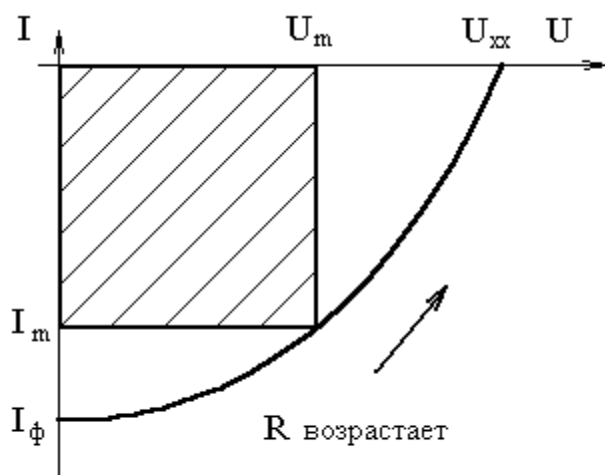


Рис. 2

В нагрузке выделяется электрическая мощность $P = UI$. Мощность зависит не только от величины светового потока, но также от нагрузочного сопротивления R . Электрическая мощность мала как при малом, так и при очень большом сопротивлении. Мощность достигает максимального значения (P_m) при некотором сопротивлении нагрузки (R_m), которому

соответствует напряжению U_m , а ток – I_m . Максимальная мощность $P_m = U_m I_m$ равна площади заштрихованного прямоугольника на рис. 2.

При изменении светового потока ВАХ изменяются так, как показано на рис. 3. С ростом Φ увеличиваются напряжение, ток и мощность, а оптимальное сопротивление нагрузки (R_m) – уменьшается.

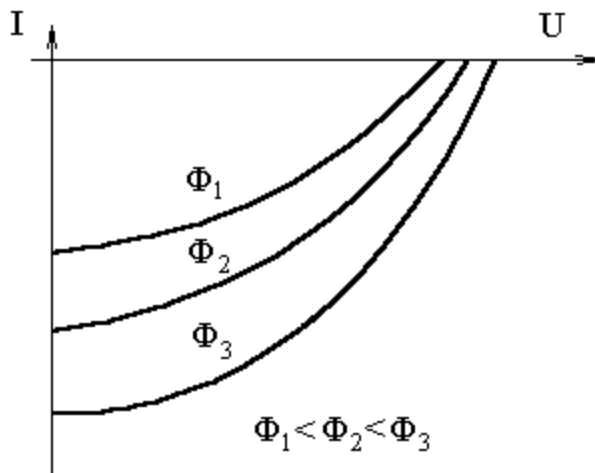


Рис. 3

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

Коэффициентом полезного действия (коэффициентом фотоэлектрического преобразования) солнечной батареи называют отношение максимальной электрической мощности (т.е., при оптимальной нагрузке) к потоку падающего излучения:

$$\eta = \frac{P_m}{\Phi}. \quad (4)$$

КПД зависит от многих факторов, как физических, так и технологических. В частности, КПД зависит от спектра излучения, который для Солнца и лампы накаливания – различный. Спектр лампы накаливания смещен в сторону инфракрасного излучения, для которого, при $\lambda > 1,1$ мкм (красная граница для кремния), энергия излучения не преобразуется в электрическую энергию. Поэтому КПД, определяемый в настоящей работе для света лампы, должен быть меньше, чем для солнечного света.

Солнечные батареи в зависимости от типа бывают монокристаллическими (как в настоящем описании), поликристаллическими, аморфными. Распространенные промышленно производимые солнечные батареи имеют КПД $\eta = 9\text{--}24\%$. Активно ведутся работы, направленные на повышение КПД, а также – на уменьшение их стоимости.

В данной лабораторной работе для солнечной батареи из монокристаллического кремния при освещении лампой накаливания получают КПД $\sim 1\%$. Для солнечного света КПД должен быть больше. Заметим, что батарея была произведена в 1990 г. и предназначалась для питания переносного радиоприемника. Из сравнения с КПД современных батарей виден большой прогресс в улучшении характеристик солнечных батарей.

За пределами земной атмосферы плотность потока солнечного излучения составляет 1366 Вт/м^2 , а на поверхности земли – меньше, вследствие поглощения и рассеяния света в атмосфере.

Помимо использования СЭ в качестве источника электрической энергии, его применяют также в качестве фотоприемника для обнаружения и измерения количественных характеристик света, например, в фотографии. Как было отмечено выше, ток короткого замыкания, равный первичному фототоку, пропорционален потоку излучения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Описание лабораторной установки

Солнечная батарея 1, расположенная в камере с защитным окном, составлена из 20 последовательно включенных солнечных элементов из монокристаллического кремния (рис. 4). Активную нагрузку (резистор R) подключают к солнечной батарее тумблером $S1$. Нагрузка выполнена в виде декадного магазина сопротивлений. Напряжение солнечной батареи (U) измеряют цифровым вольтметром постоянного тока – мультиметром (V). Ток (I) и электрическую мощность (P) в нагрузке находят по результатам измерения U при известном R по формулам:

$$I = \frac{U}{R},$$
$$P = IU = \frac{U^2}{R}. \quad (5)$$

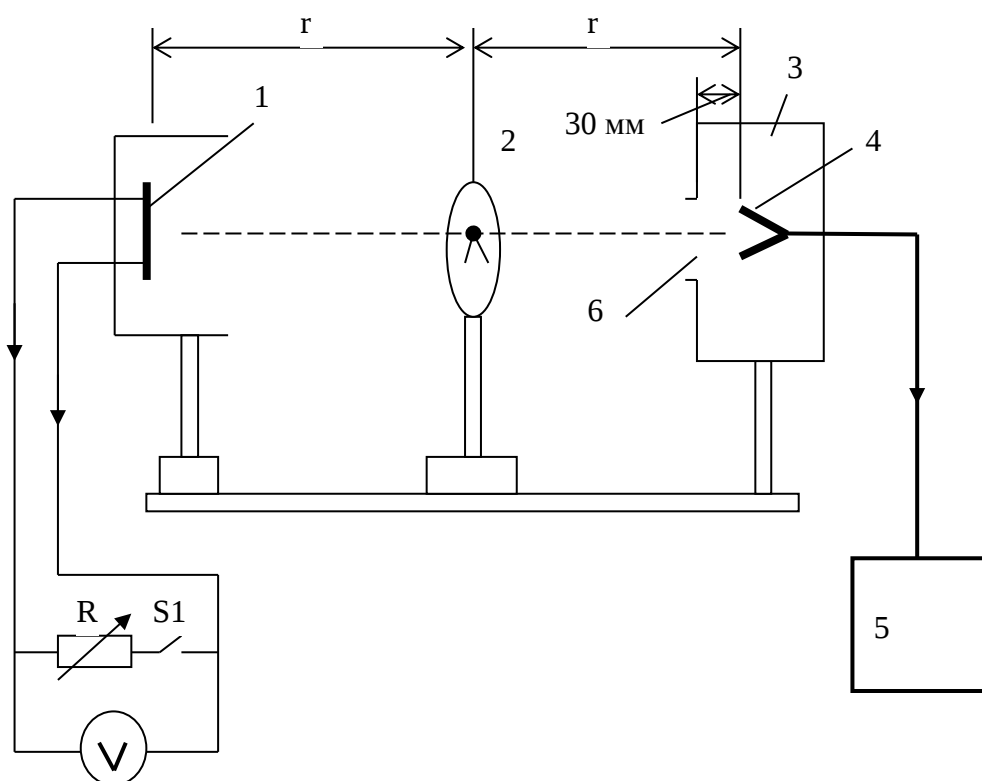


Рис. 4

Источником света служит галогенная лампа накаливания 2, расположенная на оптической оси установки на одинаковых расстояниях от солнечной батареи и устройства 4 для измерения потока излучения.

Лампу напряжением 12 В и мощностью 20 Вт питают от стабилизированного источника напряжения (12 В, 2 А макс.), встроенного в лабораторную установку. Предусмотрены два режима накала – нормальный и уменьшенный; в последнем случае включают гасящее сопротивление тумблером на пульте установки.

Поток излучения (мощность) измеряют прибором "Измеритель средней мощности и энергии лазерного излучения ИМО-2Н" (далее "измеритель мощности"), состоящим из измерительной

головки 3 и блока регистрации 5. По принципу действия, измеритель мощности – приемник теплового типа (в отличие от солнечной батареи, работа которой основана на внутреннем фотоэффекте). Измеряемое излучение через отверстие 6 (см. рис. 4) попадает в полый зачерненный металлический конус 4 и, поглощаясь, нагревает его. Приращение температуры, пропорциональное мощности поглощенного излучения, с помощью электрического термометра (термопары) преобразуется в напряжение. Стрелочный показывающий прибор проградуирован в ваттах.

Приемник оптического излучения теплового типа имеет ценное для настоящей работы качество – его чувствительность практически не зависит от длины волны, он измеряет полную мощность излучения во всем спектральном диапазоне, включая видимое, инфракрасное и ультрафиолетовое излучения лампы.

Приемник имеет значительную инерцию – его показания устанавливаются через несколько минут после начала освещения.

Лампа излучает практически одинаково как в сторону солнечной батареи, так и измерителя мощности. Поэтому, при одинаковых расстояниях, потоки излучения, падающие на солнечную батарею (Φ) и на конус измерителя мощности (Φ_0) относятся как их площади, соответственно, S и S_0 :

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = \frac{S}{S_0}. \quad (6)$$

Площадь входного отверстия конуса $S_0 = 1,54 \text{ см}^2$, а площадь солнечной батареи (S) указана на установке.

Задания и порядок выполнения работы

Задание 1. Измерить поток излучения.

1. Ознакомиться с панелью прибора (рис. 5). Переключатель рода работ (1) можно установить либо в режим измерения мощности, либо – измерения энергии отдельных импульсов излучения (в работе не используется). В каждом случае имеются режимы измерения и калибровки. Числа над

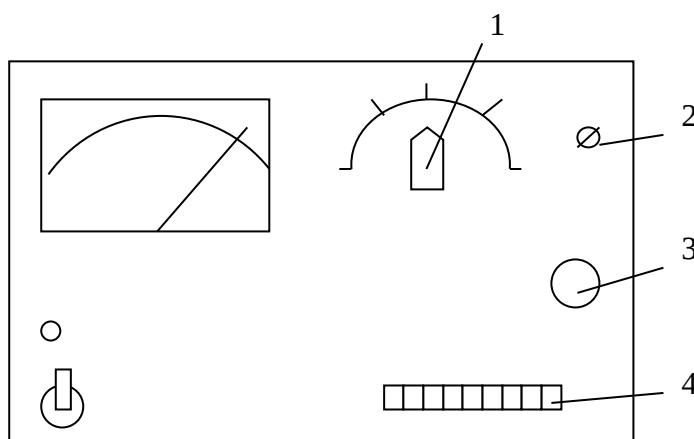


Рис. 5

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 0,03 стрелка отклонилась на 20 делений, то измеряемая мощность равна:

$$\Phi_0 = \frac{20}{30} 0,03 = 0,02 \text{ Вт}.$$

2. Перед включением прибора поставить тумблер "СЕТЬ" в нижнее положение, а переключатель рода работ (1) – в положение "АРРЕТИР".

3. Включить вилку прибора в сеть, выключатель поставить в положение "СЕТЬ". При этом должна загореться индикаторная лампа.

4. Переключатель пределов измерения (4) поставить в положение "0,03" по верхнему ряду чисел, а переключатель рода работ – в положение "МОЩНОСТЬ, ИЗМЕРЕНИЕ".

5. Не включая лампы, установить нулевое показание стрелочного прибора ручкой (3) "УСТАНОВКА НУЛЯ". *Примечание:* если ручкой (3) нуль установить невозможно, использовать дополнительную регулировку "Уст. 0" на задней панели прибора.

6. Вставить вилку источника питания лампы в сетевую розетку, при этом лампа должна загореться. Установить нормальный накал тумблером на панели лабораторной установки.

7. Через несколько минут, когда показание прибора установится, результат измерения (Φ_0) записать в табл. 1.

Площадь солнечной батареи $S = \dots$

Таблица 1

Накал лампы	Φ_0 , Вт	Φ , Вт
Нормальный		
Уменьшенный		

8. Уменьшить накал и произвести аналогичные измерения Φ_0 .

9. По результатам измерения Φ_0 вычислить по формуле (6) поток излучения (Φ), падающий на солнечную батарею. Результат вычисления записать в табл. 1.

Задание 2. Измерить напряжение холостого хода и ток короткого замыкания солнечной батареи.

Напряжение холостого хода (U_{xx}) и ток «короткого замыкания» ($I_{кз}$) являются основными характеристиками источника тока. В частности, произведение $U_{xx} I_{кз}$ характеризует порядок величины мощности источника.

Напряжение U_{xx} измеряют при отключенной нагрузке вольтметром постоянного тока на пределе 20 В. Отключение нагрузки производят тумблером, установленным в магазине сопротивлений.

Ток $I_{кз}$ определяют косвенно – по напряжению U на маленьком ($R = 5$ Ом) сопротивлении нагрузки: $I_{кз} = U/R$. Небольшое напряжение U измеряют на пределе 200 мВ.

Указанные характеристики батареи измерить при двух накалах лампы, результаты измерений записать в табл. 2.

Таблица 2

Накал лампы	Φ , Вт (взять из табл. 1)	U_{xx} , В	$I_{кз}$, мА
Нормальный			
Уменьшенный			

Задание 3. Изучить зависимости напряжения, силы тока и электрической мощности от сопротивления нагрузки.

1. Указанные характеристики изучают при нормальном накале лампы в диапазоне изменения сопротивления 5 – 9000 Ом, а также при сопротивлении 10 Мом (холостой ход).
2. Включить нагрузку тумблером в магазине сопротивлений и установить сопротивление 5 Ом.
3. Измерить напряжение U и записать результат в табл. 3.

Таблица 3

R , Ом	U , В	$I = \frac{1000U}{R}$, мА	$P = UI$, мВт

Примечание: в таблице примерно 25 строк.

4. Предварительные измерения показали, что можно *рекомендовать* следующий *примерный* порядок дальнейшей работы.

Второе измерение – при 50 Ом. Далее, до $R = 400$ Ом, с каждым шагом увеличивать сопротивление в 2 раза.

Затем сопротивление увеличивать с шагом 300 Ом до примерно 4000 Ом; в этой области будет находиться максимальная электрическая мощность.

В области 4000 – 9000 Ом шаг увеличить до 1000 Ом.

5. Последнее измерение выполнить при отключенном магазине сопротивлений, когда нагрузкой является большое входное сопротивление вольтметра (10 Мом).
6. Выключить лампу, вольтметр. Переключатель рода работ измерителя мощности установить в положение "АРРЕТИР", выключить тумблер "СЕТЬ".

Обработка результатов измерений

1. По результатам измерений R и U рассчитать силу тока I и мощность P . Результаты записать в табл. 3.
2. По данным табл. 3 определить максимальную электрическую мощность P_m и соответствующие ей значения I_m , U_m и R_m . Полученные значения записать в табл. 4.

Таблица 4

P_m , мВт	R_m , Ом	U_m , В	I_m , мА	КПД η , %

3. По формуле (4) вычислить коэффициент полезного действия солнечной батареи.
4. По данным табл. 3 построить графическую зависимость I от U .
5. На полученном графике построить прямоугольник максимальной мощности (см. рис. 2).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие процессы происходят при внутреннем фотоэффекте в полупроводнике?
2. Объяснить «красную границу» внутреннего фотоэффекта и ее зависимость от характеристики полупроводника.
3. Как устроен полупроводниковый солнечный элемент?
4. Какие токи протекают через p - n -переход при его освещении?
5. Как возникает фотоЭДС?
6. Что такое сторонние силы и какова их природа в солнечном элементе?
7. Что принимают за КПД солнечной батареи?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Винтайкин Б.Е. Физика твердого тела. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2006. 360 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. В 3-х т. Т. 3. М.: Наука. 1987. 320 с.
3. Епифанов Г.И. , Мома Ю.А. Твердотельная электроника. М.: Высшая шк., 1986. 304 с.
4. Бушманов Б.Н. Хромов Ю.А. Физика твердого тела. М.: Высшая шк., 1971. 224 с.