

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра физики и методики преподавания физики

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТЫ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ МЕТАЛЛА

Методические указания

Составители: О.Г. Белокопытова, Е.В. Цветкова

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки, входящим в образовательные области «Математические и естественные науки» и «Инженерное дело, технологии и технические науки»

Оренбург
2020

УДК 537.5(076.5)

ББК 22.333я7

О-62

Рецензент – доцент, кандидат педагогических наук А.В. Дудко

О-62 **Определение работы выхода электронов из металла:** методические указания / составители: О.Г. Белокопытова; Е.В. Цветкова; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2020. – 15 с.

Методические указания содержат требования и необходимый вспомогательный материал для выполнения лабораторной работы по курсу «Электричество».

Методические указания предназначены для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки, входящим в образовательные области "Математические и естественные науки" и "Инженерное дело, технологии и технические науки".

УДК 537.5(076.5)

ББК 22.333я7

© Белокопытова О.Г.,

Цветкова Е.В.,

составление 2020

© ОГУ, 2020

Содержание

1 Работа выхода электронов из металла	4
2 Метод измерения.....	9
3 Порядок выполнения работы	12
Контрольные вопросы	14
Список использованных источников	15

1 Работа выхода электронов из металла

Свойства металлов в значительной степени определяются состоянием электронов проводимости, т.е. электронов способных перемещаться в металле.

Распределение энергии электронов для ограниченного металла изображено на энергетической диаграмме (рисунок 1). За нулевую энергию здесь выбрана энергия свободного электрона вне металла с кинетической энергией, равной нулю.

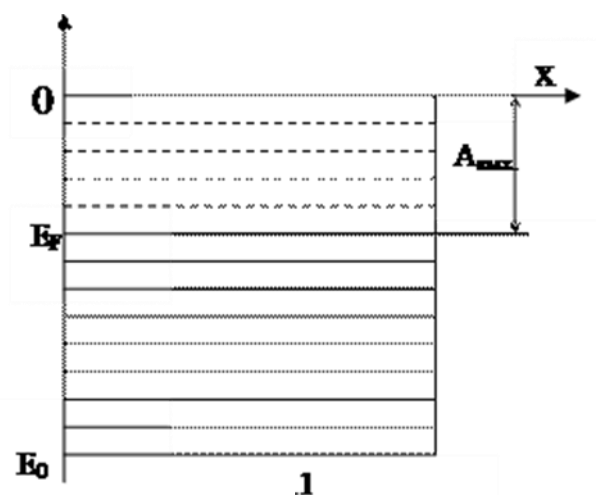


Рисунок 1 – Энергетическая диаграмма

Пунктиром изображены незанятые энергетические уровни при $T=0$ К. Энергетические уровни электронов обозначены тонкими горизонтальными линиями, заполняющими интервал энергий от дна потенциальной ямы до энергии E_F . E_F – энергия Ферми, максимальная кинетическая энергия которой может обладать электрон при $T=0$ К.

Электронам, находящимся в потенциальной яме на разных энергетических уровнях, для выхода за пределы металла необходимо сообщить разную энергию. Минимальная кинетическая энергия, необходимая для удаления электрона из металла,

$$A_{\text{вых}} = E_0 - E_F \quad (1)$$

называется работой выхода электрона из металла в вакуум при $T=0$ К.

При температуре $T > 0$ К электроны находятся в тепловом равновесии, поэтому к энергии Ферми прибавляется еще некоторая тепловая энергия. Величина работы выхода зависит от состояния поверхности металла. Положение уровня Ферми при нагреве металла, вплоть до расплавления, практически не меняется, но при этом возникает некоторое число (не большой процент) быстрых электронов, которые способны преодолеть работу выхода и выйти из металла.

Рассмотрим природу сил, препятствующих выходу электронов из металла и образующих работу выхода $A_{\text{вых}}$. Отдельные электроны проводимости, двигаясь внутри металла с большими скоростями, могут пересекать поверхность металла. Вылетевший из металла электрон удаляется от поверхности до тех пор, пока кулоновское взаимодействие с избыточным положительным зарядом, возникшем на месте, которое покинул электрон, не заставит его вернуться обратно.

Постоянно одни электроны «испаряются» с поверхности металла, другие возвращаются обратно. Поэтому металл оказывается окутанным облаком электронов, образующих совместно с наружным слоем положительных ионов двойной электрический слой, подобно плоскому конденсатору. Поле двойного слоя препятствует выходу электронов из металла.

Другой силой, препятствующей выходу электрона из металла, является кулоновская сила индуцированного им положительного заряда (рисунок 2). Эта сила носит название «силы электрического изображения», так как действие распределенного по поверхности проводника заряда эквивалентно действию равного по величине положительного заряда, являющегося зеркальным изображением электрона в плоскости РР. Оба этих физических процесса и определяют величину $A_{\text{вых}}$. При комнатной температуре практически все свободные электроны заперты в пределах проводника, имеется лишь небольшое количество электронов, энергия которых достаточна для того, чтобы преодолеть потенциальный барьер и выйти из металла.

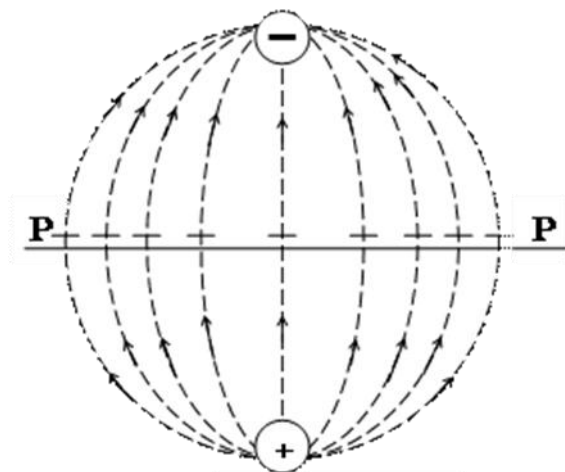


Рисунок 2 – Сила электрического изображения

Однако, электронам можно различными способами сообщить дополнительную энергию. В этом случае часть электронов получает возможность покинуть металл и наблюдается испускание электронов – электронная эмиссия. В зависимости от того, каким способом сообщена электронам энергия, различают типы электронной эмиссии. Если электроны получают энергию за счет тепловой энергии тела при повышении его температуры, можно говорить о термоэлектронной эмиссии. Если энергия подводится светом, имеем явление фотоэлектронной эмиссии. Если энергия сообщается электронам при бомбардировке извне какими-то другими частицами, наблюдается вторичная эмиссия.

Для наблюдения термоэлектронной эмиссии можно использовать пустотную лампу, содержащую два электрода: накаливаемый током катод и холодный электрод, собирающий термоэлектроны – анод. Такие лампы носят название вакуумных диодов. На рисунке 3 изображена схема включения такого диода. Ток в этой цепи появляется только в том случае, если положительный полюс батареи соединен с анодом, а отрицательный – с катодом. Это подтверждает, что катод испускает отрицательные частицы, электроны. Сила термоэлектрического тока в диоде зависит от величины потенциала анода относительно катода.

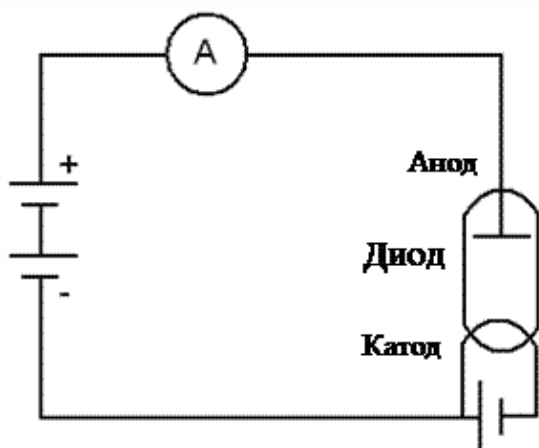


Рисунок 3 - Вакуумный диод

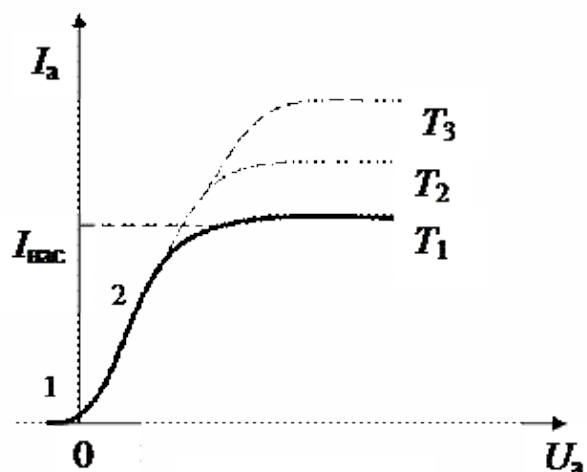


Рисунок 4 – Вольт-амперная характеристика

Кривая, изображающая зависимость силы тока в диоде от анодного напряжения, называется вольт-амперной характеристикой (ВАХ).

На рисунке 4 показаны ВАХ диода при разных температурах катода. Когда потенциал анода равен нулю, сила тока мала (но отлична от нуля), она определяется лишь самыми быстрыми термоэлектронами, способными достигнуть анода. При увеличении положительного потенциала анода сила тока возрастает и затем достигает насыщения, т.е. почти перестает зависеть от анодного напряжения.

При увеличении температуры катода увеличивается и значение тока, при котором достигается насыщение. Одновременно увеличивается и то анодное напряжение, при котором увеличивается ток насыщения.

Таким образом, ВАХ диода оказывается *не линейной*, т.е. не выполняется закон Ома. Это объясняется тем, что при термоэлектронной эмиссии у поверхности катода создается довольно большая плотность электронов. Они создают общий отрицательный заряд, и электроны, вылетающие с малой скоростью, не могут его проскочить. С увеличением анодного напряжения концентрация электронов в облаке пространственного заряда уменьшается. Поэтому и тормозящее действие пространственного заряда делается меньше, а анодный ток растет быстрее, чем в прямой зависимости от анодного напряжения.

Таким образом, главным физическим фактором, влияющим на нелинейность ВАХ диода, является объемный заряд в прикатодном пространстве.

Теоретически зависимость анодного тока от анодного напряжения на участке 1-2 (рисунок 4) была получена русским физиком С. А. Богуславским и американским физиком И. Ленгмюром. Она называется «законом трех вторых». Это закон описывает зависимость термоэлектронного тока от анодного напряжения в области малых положительных значений:

$$I = C U^{3/2} \quad , \quad (2)$$

где C — коэффициент, зависящий от формы и размеров электродов, а также их взаимного расположения.

При увеличении анодного напряжения U_a при данной температуре ток возрастает до некоторого максимального значения, называемого *током насыщения* и далее не увеличивается при последующем повышении напряжения на аноде. При этом практически все электроны, покидающие катод, поглощаются анодом, поэтому дальнейшее увеличение напряжённости поля между анодом и катодом не может привести к увеличению тока.

На практике точного совпадения с законом «трех вторых» не наблюдается. При малых напряжениях закон «трех вторых» дает заниженное значение термоэлектронного тока, так как при выводе закона не учитывался разброс тепловых скоростей электронов. При больших напряжениях наблюдается отклонение от закона «трех вторых», потому что эмиссионная способность катода не бесконечно велика. При больших напряжениях ток в конце концов достигает насыщения, закон перестает работать.

Плотность тока насыщения может быть легко найдена, если количество электронов, испаряющихся ежесекундно с единицы площади, умножить на заряд электрона:

$$j_{нас} = n \cdot e = \frac{4\pi m k^2 e}{h^3} \cdot T^2 \cdot e^{-\frac{A_{вых}}{kT}}$$

При повышении температуры увеличивается скорость хаотического (теплового) движения электронов в металле. При этом число электронов, способных покинуть металл, резко возрастает. Плотность тока насыщения, т.е. сила тока насыщения на каждую единицу площади поверхности катода S , вычисляется по формуле Ричардсона-Дешмена:

$$j_{\text{нас}} = B T^2 e^{-A_{\text{вых}}/kT} \quad , \quad (3)$$

где B —эмиссионная постоянная для данного материала катода параметры, определяемые из опыта, k — постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К. Плотность тока насыщения характеризует эмиссионную способность катода, которая зависит от природы катода и его температуры.

Уменьшение работы выхода приводит к быстрому увеличению плотности тока насыщения. Поэтому практически катоды из чистых металлов применяются редко и используют оксидные катоды (например, никель, покрытый тонким слоем оксидов щёлочноземельных металлов), работа выхода электронов у которых мала (1—1,5 эВ).

Термоэлектронный диод также может использоваться для преобразования разности температур в электроэнергию напрямую, без движущихся частей — термоэлектронный преобразователь, разновидность теплового двигателя.

2 Метод измерения

Измеряя на опыте зависимость тока насыщения от температуры, можно определить работу выхода для данного металла.

В нашем случае для определения работы выхода используем метод прямых Ричардсона. Поясним идею метода.

Для этого прологарифмируем уравнение (3):

$$\ln \frac{j_{\text{нас}}}{T^2} = \ln B - \frac{A_{\text{ВЫХ}}}{k} \cdot \frac{1}{T} \quad (4)$$

Переходя к десятичным логарифмам, находим

$$\lg \frac{j_{\text{нас}}}{T^2} = \lg B - \frac{A_{\text{ВЫХ}}}{k} \cdot \lg e \cdot \frac{1}{T} \quad (5)$$

Подставляя $\lg e = 0,43$, имеем

$$\lg \frac{j_{\text{нас}}}{T^2} = \lg B - \frac{0,43}{k} \cdot A_{\text{ВЫХ}} \cdot \frac{1}{T} \quad (6)$$

Такой вид уравнения удобен для его экспериментальной проверки.

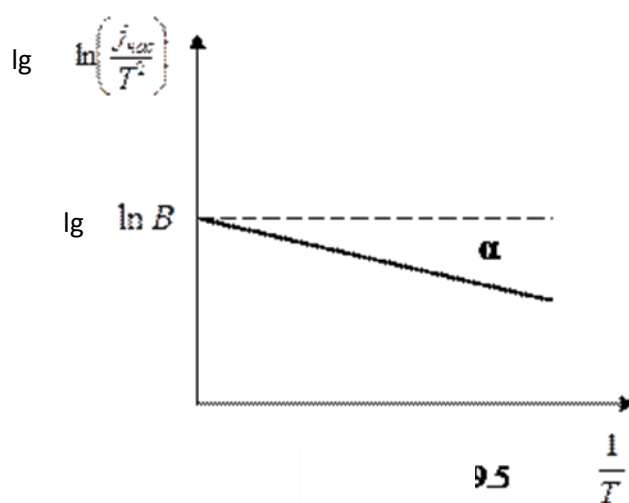


Рисунок 5 - График зависимости $\lg \frac{j_{\text{нас}}}{T^2}$ от $\frac{1}{T}$

График зависимости $\lg \frac{j_{\text{нас}}}{T^2}$ от $\frac{1}{T}$ является прямой линией (рисунок 5) с угловым коэффициентом $\frac{0,43}{k} \cdot A_{\text{ВЫХ}}$. Определив тангенс наклона прямой к оси абсцисс, рассчитаем работу выхода:

$$A_{\text{вых}} = \frac{k \operatorname{tg} \alpha}{0,43} \quad (7)$$

Для построения графика необходимо знать плотность анодного тока насыщения $j_{\text{нас}}$ и температуру катода. Температуру рассчитаем следующим образом. Подводимая к катоду мощность расходуется в вакуумной лампе в основном на тепловое излучение. Для вольфрама была экспериментально определена зависимость температуры катода от расходуемой на его нагрев джоулевой мощности, приходящейся на единицу площади поверхности катода. На графике (рисунок 8), который прилагается к работе, приведены результаты этих измерений. По этому графику, зная мощность, подводимую к катоду, можно определить его температуру.

Приборы и оборудование:

1. ИП – источник питания
2. 06 – модуль ФПЭ-06
3. PV – вольтметр
4. PA – амперметр.

Электрическая схема для проведения опыта представлена на рисунках 6 и 7. В качестве диода в работе используется радиолампа с вольфрамовым катодом прямого накала. Нагрев катода осуществляется постоянным током. Амперметр и вольтметр в цепи накала служат для определения мощности, расходуемой на нагрев катода, что необходимо для определения температуры.

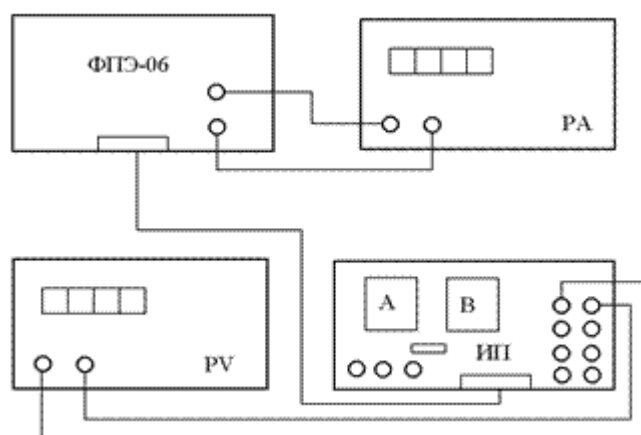


Рисунок 6 – Электрическая схема 1

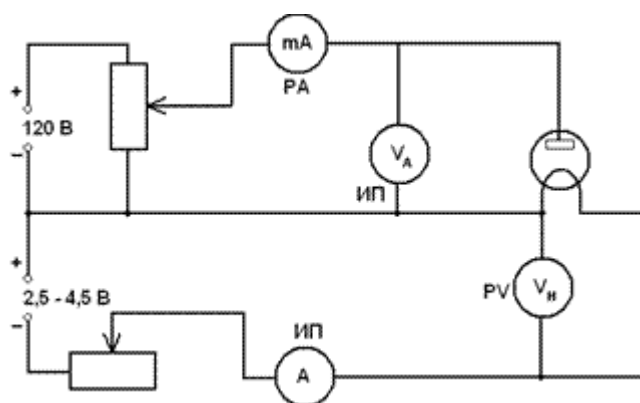


Рисунок 7 – Электрическая схема 2

3 Порядок выполнения работы

1. Подключить модуль ФПЭ-06 соединительным кабелем к источнику питания (ИП на рисунок 6). Амперметр на панели источника питания служит для контроля тока накала I_n , максимальное значение которого не должно превышать 2,2 А. Плавная регулировка напряжения накала осуществляется ручкой, расположенной под амперметром.

Напряжение накала U_n измеряется вольтметром (PV на рисунке 7), который подключается к тем клеммам на источнике питания, где указано напряжение 2,5 – 4,5 В.

Вольтметр на панели источника питания измеряет анодное напряжение U_a , регулировка которого осуществляется ручкой на панели источника питания, расположенного под вольтметром.

Для измерения анодного тока I_a , используется амперметр (РА на рисунке 7), который подключается на модуле ФПЭ-06 к клеммам РА. Он должен работать в режиме миллиамперметра, измеряя ток до 20 мА.

2. Установить напряжение накала $U_n = 3,7$ В и, увеличивая анодное напряжение U_a от 10 до 100 В через каждые 10 В, записать значения анодного тока I_a в таблицу 1.

Таблица 1

$U_a, \text{В}$	10	20	...	100
I_a				

3. Провести измерения (пункт 2) для 4-5 любых значений напряжения накала U_n в интервале от 3,7 до 4,3 В.

4. Для каждого значения тока накала I_n построить ВАХ и точку перегиба полученной кривой считать точкой насыщения.

5. Для всех значений напряжения накала U_n рассчитать мощность, выделяемую на катоде, по формуле $P = I_n U_n$, а так же мощность, приходящуюся на единицу площади поверхности катода P_{S_n} . Для данной лампы площадь поверхности катода принять $S_n = 3,52 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$.

6. По графику (рисунок 8) зависимости температуры катода $T(\text{К})$ от P_{S_n} (Вт/см^2) расходуемой на его нагрев мощности определить температуру катода для каждого значения мощности нагрева.

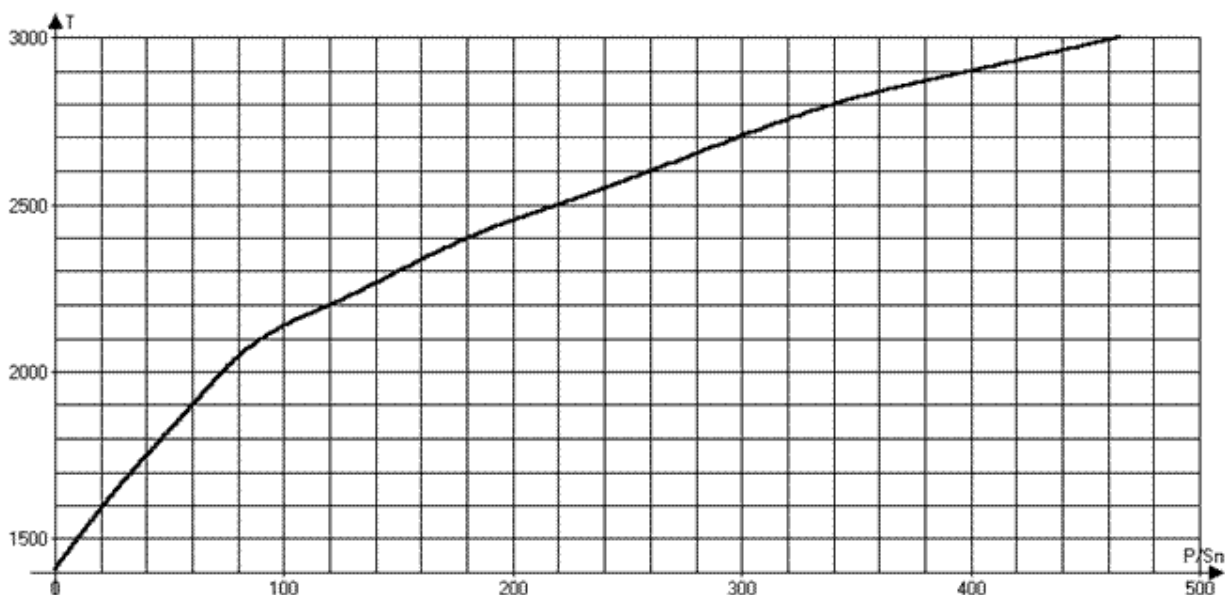


Рисунок 8 – График зависимости температуры катода $T(K)$ от P/S_{π} ($Вт/см^2$)

7. Рассчитать плотность анодного тока насыщения по формуле $j_{нас} = \frac{I_{нас}}{S}$, принять $S = 11 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$.

8. Полученные данные занести в таблицу 2.

Таблица 2

№	$I_{нас},$ мА	I_n, A	U_n, B	$P/S_{\pi},$ Вт/см ²	T, K	$1/T,$ К ⁻¹	$j_{нас},$ мА/м ²	$j_{нас}/T^2,$ мА/м ² К ²	$\lg \frac{j_{нас}}{T^2}$

9. Построить график зависимости $\lg \frac{j_{нас}}{T^2}$ от $\frac{1}{T}$, откладывая по оси абсцисс $x = (\frac{1}{T})$, а по оси ординат $y = (\lg \frac{j_{нас}}{T^2})$.

10. Определить тангенс угла наклона α полученной прямой к оси абсцисс ($\text{tg} \alpha = \frac{\Delta y}{\Delta x}$) и рассчитать работу выхода по формуле 7.

11. Сделайте выводы.

Контрольные вопросы

1. Что называется работой выхода электрона из металла? От чего она зависит?
2. Какова природа сил, препятствующих выходу электрона из металла?
3. Что такое термоэлектронная эмиссия?
4. Что такое вакуумный диод? Из чего он состоит?
5. Нарисуйте схему включения диода.
6. Нарисуйте и объясните вольтамперные характеристики диода. Почему характеристики не линейны?
7. Что такое ток насыщения и как он зависит от температуры?
8. Сформулируйте закон «трех вторых». Объясните его физическую природу и область применения.
9. Напишите формулу Ричардсона-Дешмана, объясните ее смысл и характер выражаемой ею зависимости, а также область ее применимости.

Список использованных источников

1. Детлаф, А.А. Курс физики / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский.- М.: Высшая школа, 2000. – 718 с.
2. Калашников, С.Г. Электричество: учебное пособие / С.Г. Калашников. – М: ФИЗМАТЛИТ, 2003. - 624 с. – ISBN 5-9211-0312-1.
3. Савельев, И.В. Курс общей физики: В 5 кн.: Кн. 1, кн. 2, кн. 3, кн. 4, кн.5: Учеб. пособие для втузов / И.В. Савельев. – М.: ООО «Издательство Астрель»: ООО «Издательство АСТ», 2003.
4. Телеснин, Р.В. Курс физики. Электричество / Р.В. Телеснин, В.Ф. Яковлев – М.: Просвещение, 1970. – 488 с.
5. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова - М.: Высшая школа, 2004. – 544 с.