



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Белорусский национальный
технический университет**

Кафедра «Экспериментальная и теоретическая физика»

ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ

*Методические указания
к выполнению лабораторной работы № 7
по физике*

**Минск
БНТУ
2014**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Экспериментальная и теоретическая физика»

ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ

Методические указания
к выполнению лабораторной работы № 7 по физике
для студентов инженерных специальностей

Минск
БНТУ
2014

УДК 537.533(076.5)

ББК 22.31я7

ИЗ9

С о с т а в и т е л и :

В. В. Черный, Ю. В. Развин, С. А. Манего

Р е ц е н з е н т ы :

Р. И. Воробей, Г. Н. Блинков

Методические указания содержат описание (теоретическую часть, схему экспериментальной установки и задание) лабораторной работы, посвященной изучению термоэлектронной эмиссии. На основании полученных результатов определяется работа выхода из материала катода электровакуумного диода.

Методические указания предназначены для студентов инженерных специальностей, изучающих раздел «Электричество и магнетизм» общей физики.

© Белорусский национальный
технический университет, 2014

ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ

Цель работы: ознакомиться с явлением термоэлектронной эмиссии, понятием работы выхода и способом ее определения, работой вакуумного диода и его характеристиками.

Задачи работы: измерить вольтамперные характеристики электровакуумного диода при различных температурах катода, определить работу выхода для вольфрама

Теоретические сведения

Работа выхода электронов из металла

Высокая электропроводность металлов обусловлена наличием в них большого числа свободных электронов, оторвавшихся от атомов. Эти электроны – электроны проводимости – в металле образуют так называемый электронный газ. Свободные электроны совершают тепловое движение и обладают кинетической энергией, но удерживаются внутри металла вследствие их кулоновского взаимодействия с положительно заряженными ионами, расположенными в узлах кристаллической решетки. Для выхода электрона из металла необходимо совершить работу против этих сил, которая называется **работой выхода электронов**.

Существует две причины, приводящие к возникновению работы выхода. Первая заключается в следующем. При попытке электрона покинуть металл на его поверхности появляется наведенный (индуцированный) положительный заряд (так называемое электростатическое зеркало). В результате между электроном и металлом возникает сила притяжения \vec{F} , направленная к металлу, препятствующая выходу электрона и проявляющаяся вне кристалла (рис. 1). **Работа против силы притяжения к положительно заряженному телу и составляет основную часть работы выхода.** Данная часть работы выхода аналогична энергии ионизации атомов или молекул.

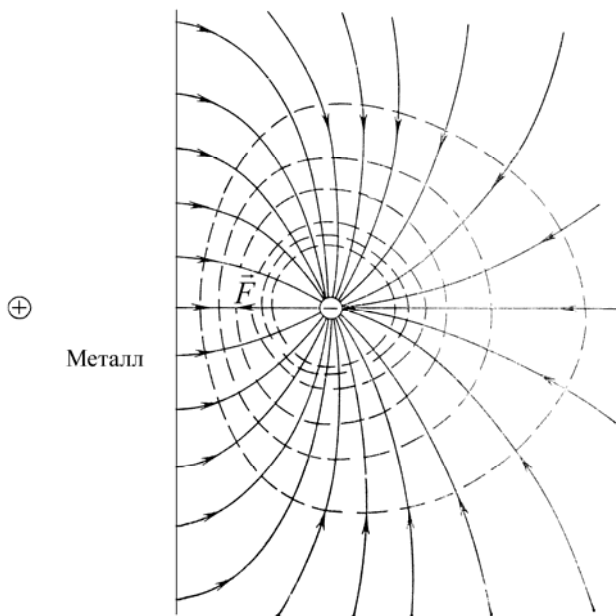


Рис. 1. Взаимодействие электрона с индуцированным положительным зарядом внутри металла (электростатическое зеркало)

Кроме того, имеется вклад в работу выхода, связанный с наличием в приповерхностной области любого тела двойного электрического слоя (рис. 2). Он возникает даже на идеально правильной и чистой поверхности кристалла. Отдельные электроны все время покидают поверхность металла, удаляются от него на несколько межатомных расстояний, а затем останавливаются под действием некомпенсированного заряда положительно заряженных ионов и поворачивают обратно. В результате металл оказывается окруженным тонким облаком электронов (рис. 2).

Толщина двойного слоя составляет порядка нескольких межатомных расстояний ($10^{-10} \dots 10^{-9}$ м). За счет электрического поля двойного слоя на электроны действует сила, направленная внутрь кристалла. **Работа по преодолению силы, действующей за счет электрического поля двойного слоя на**

границе тела, является *второй составляющей работы выхода*. За область двойного слоя вне кристалла на электроны действует только кулоновская сила притяжения, о которой говорилось выше.

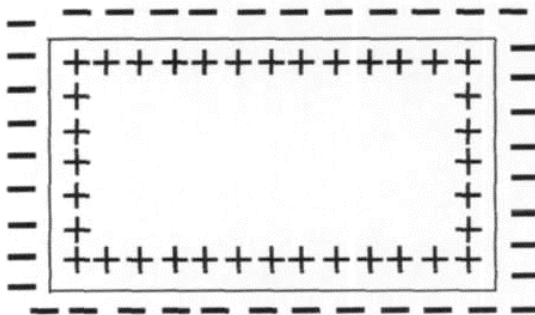


Рис. 2. Двойной электрический слой на границе металл-вакуум

При переходе через поверхность в вакуум потенциал электрона возрастает по сравнению с потенциалом внутри металла на некоторую величину ϕ , которую называют **поверхностной разностью потенциалов**. Она связана с работой выхода следующим соотношением

$$A = e\phi, \quad (1)$$

где e – модуль заряда электрона.

Обычно работу выхода выражают в электронвольтах (эВ): **1 эВ = $1,6 \cdot 10^{-19}$ джоуля (Дж)**. Для удаления электрона из объема металла за его пределы кинетическая энергия электрона должна превышать работу выхода:

$$\frac{mv^2}{2} > A, \quad (2)$$

где m – масса электрона;

v – его скорость.

При выполнении условия (2) наблюдается явление *электронной эмиссии*, т. е. испускания электронов с поверхности металла. Для наблюдения электронной эмиссии необходимо сообщить электронам энергию.

В зависимости от способа сообщения энергии различают четыре вида эмиссии:

1. Термоэлектронная эмиссия – испускание электронов нагретыми металлами. С повышением температуры резко увеличивается число электронов, кинетическая энергия теплового движения которых больше работы выхода и явление термоэлектронной эмиссии становится более заметным.

2. Фотоэлектронная эмиссия. Эмиссия электронов из металла под действием излучения. В этом случае электрон получает дополнительную энергию за счет энергии фотона: $E = h\nu$, где h – постоянная Планка, ν – частота падающего излучения.

3. Вторичная электронная эмиссия – испускание электронов при бомбардировке поверхности извне пучком электронов или других частиц.

4. Автоэлектронная эмиссия – эмиссия электронов из поверхности металла под действием сильного внешнего электрического поля.

В различных электронных приборах применяются все виды эмиссии, но чаще всего используется наиболее управляемая термоэлектронная эмиссия.

Работа выхода является характеристикой поверхности тела. Грани одного и того же кристалла, образованные различными кристаллографическими плоскостями или покрытые различными веществами, имеют различную работу выхода. Например, для снижения работы выхода поверхность вольфрама покрывают тонким слоем тория, цезия, бария или окислов некоторых металлов (активированные катоды). Толщина слоя составляет несколько десятков тысяч межатомных расстояний.

Термоэлектронная эмиссия и ее применение

Исследование закономерностей термоэлектронной эмиссии можно провести с помощью двухэлектродной лампы (электривакуумного диода), представляющего собой стеклянный или металлический баллон, из которого откачан воздух. Внутри находятся два электрода – катод (К) и анод (А). Катодом служит нить из тугоплавкого металла (обычно вольфрама), нагреваемая (накаливаемая) электрическим током. Часто используются катоды косвенного накала. В них катод нагревается от отдельной нити накала, по которой пропускают ток. Вывод катода в таких диодах электрически изолирован от выводов нити накала. Нагретый катод испускает (эмиттирует) электроны – имеет место термоэлектронная эмиссия. Анод чаще всего имеет форму металлического цилиндра, окружающего катод. Излученные катодом электроны движутся к аноду, создавая ток в вакууме.

Включим диод в электрическую цепь, как показано на рис. 3. В этой схеме ток источника E_1 нагревает катод до высокой (более $1000\text{ }^\circ\text{C}$) температуры. Источник E_2 создает разность потенциалов между катодом и анодом, измеряемую вольтметром V . Анодное напряжение считается положительным, если потенциал анода выше потенциала катода. Ток в анодной цепи измеряется миллиамперметром (mA).

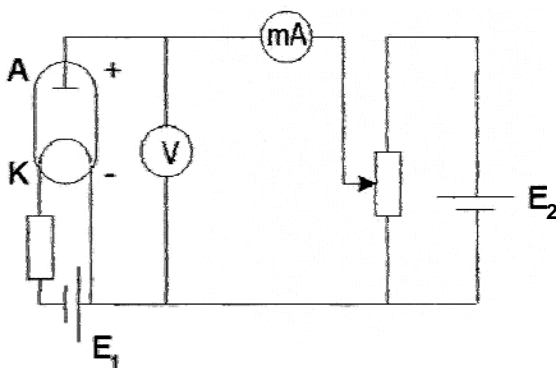


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

Обычно при постоянной температуре накаливаемого катода определяют зависимость анодного тока I_a от анодного напряжения U_a . Данная зависимость называется **вольт-амперной характеристикой (ВАХ)** диода. Она представлена на рис. 4. Как видно, ВАХ электровакуумного диода является нелинейной (т. е. I_a не является прямо пропорциональной функцией анодного напряжения U_a). Следовательно, для электровакуумного диода закон Ома не выполняется.

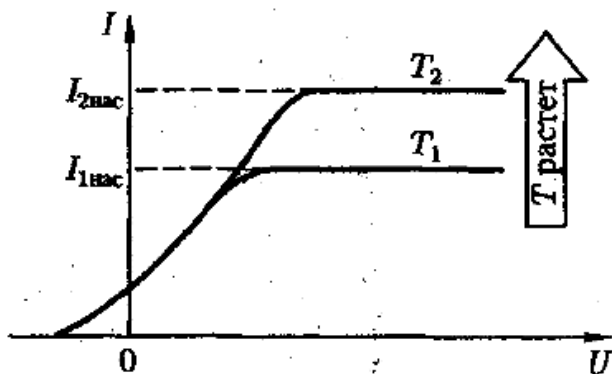


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика электровакуумного диода

При $U_a = 0$ анодный ток $I_a = I_0$ мал, но отличен от нуля. Вылетевшие в результате термоэлектронной эмиссии из катода электроны образуют вокруг него отрицательный пространственный заряд — электронное облако, которое отталкивает вылетающие из катода электроны и возвращает большинство из них обратно к катоду. Образование электронного облака над поверхностью раскаленного металла представляет собой явление, аналогичное испарению жидкости. Но все же небольшое число электронов обладают энергией, достаточной для преодоления как работы выхода, так и отталкивающего действия электронного облака. Такие электроны достигают

анода даже без приложения электрического поля между анодом и катодом. Именно они и создают ток I_0 .

В области малых положительных значений U_a анодный ток I_a резко возрастает. Этот участок вольтамперной характеристики описывается *законом трех вторых*, полученным теоретически Богуславским и и Ленгмюром:

$$I_a = k_U U_a^{3/2}, \quad (3)$$

где k_U – коэффициент, зависящий от формы и размеров электродов и их взаимного расположения.

На данном участке зависимости происходит быстрое рассасывание основной массы электронного облака. При дальнейшем увеличении анодного напряжения наблюдается слабый рост анодного тока, соответствующий плавному рассасыванию оставшейся массы электронного облака. Этот рост постепенно замедляется, и при некотором значении анодного напряжения ток достигает значения I_n , называемого током насыщения, и не изменяется при дальнейшем росте анодного напряжения. Это означает, что электронное облако полностью рассосалось и не оказывает никакого тормозящего действия на электроны, эмитированные с катода. Поэтому они все достигают анода, а дальнейшее увеличение напряжения не может привести к увеличению силы тока. Плотность тока насыщения характеризует эмиссионную способность катода, которая зависит от природы катода и его температуры.

При дальнейшем увеличении U_a до нескольких сотен вольт плоский участок ВАХ сменяется слабым ростом анодного тока I_a . Это обусловлено уменьшением работы выхода электрона из металла под действием электрического поля и носит название эффекта Шоттки.

Как отмечалось выше, применяя активированные катоды, удается снизить работу выхода и получить необходимую ве-

личину тока насыщения при значительно более низких температурах катода, что приводит к значительному увеличению срока его работы. Это явление используется в приборах, в которых необходимо получить поток электронов в вакууме: в электронных лампах, электронно-лучевых трубках, рентгеновских трубках, электронных микроскопах и т. д.

С увеличением температуры катода увеличивается число эмитированных в единицу времени электронов и ток насыщения возрастает. При этом увеличивается и значение анодного напряжения, при котором наступает насыщение (рис. 4).

При отрицательном напряжении (потенциал катода выше потенциала анода) ток в анодной цепи быстро уменьшается и в дальнейшем прекращается, т. е. вакуумный диод обладает односторонней проводимостью, что позволяет применять его в качестве выпрямителя.

Зависимость тока эмиссии от температуры. Определение работы выхода

Эмиссионную способность материала катода характеризует плотность тока насыщения j_n . Формула для j_n впервые была получена О. У. Ричардсоном из следующих соображений.

Представим, что в накаливаемом металле у его поверхности имеется полуоткрытая полость (рис. 5). При статистическом равновесии концентрация электронов n в этой полости в соответствии с распределением Больцмана, будет равна

$$n = n_0 e^{-\frac{A}{kT}}, \quad (4)$$

где n_0 – концентрация свободных электронов в металле,

A – работа выхода электронов из металла;

k – постоянная Больцмана;

T – температура по шкале Кельвина;

e – основание натуральных логарифмов ($e \approx 2,718$).

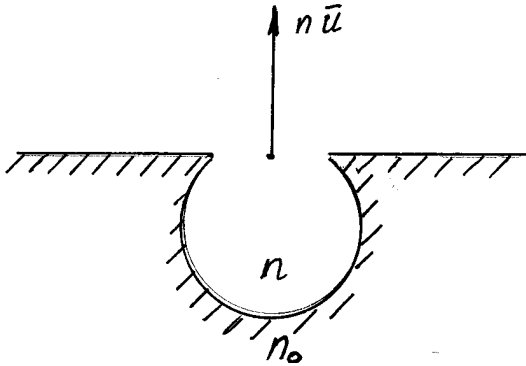


Рис. 5. Эмиссия электронов с поверхности металла

Плотность тока термоэлектронной эмиссии равна отношению числа электронов, ежесекундно вылетающих из отверстия рассматриваемой полости, отнесенному к площади отверстия.

Величина j_H пропорциональна произведению средней скорости теплового движения электронов в полости на концентрацию электронов в полости.

Так как средняя скорость теплового движения электронов пропорциональна \sqrt{T} , то, в соответствии с формулой (4), получим

$$j_H = B' \sqrt{T} e^{-\frac{A}{kT}}, \quad (5)$$

где B' – постоянная величина.

Это и есть формула Ричардсона.

Однако из опыта следовало, что плотность тока эмиссии возрастает с ростом температуры быстрее, чем по закону Ричардсона. Основываясь на квантовой теории, С. Дешман показал, что формула (5) должна быть заменена следующей формулой:

$$j_H = C_1 T^2 e^{-\frac{A}{kT}}. \quad (6)$$

где A – работа выхода электронов из металла;

T – абсолютная температура катода;

C_1 – постоянная, которая для всех металлов с совершенно чистой поверхностью должна иметь одно и то же значение;

k – постоянная Больцмана, $k = 1,3807 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

Данная формула, называемая формулой Ричардсона–Дешмана, хорошо согласуется с экспериментом.

Аналогичная формула имеет место и для тока насыщения j_H , определяемого экспериментально

$$I_H = CT^2 e^{-\frac{A}{kT}}. \quad (7)$$

Здесь $C = C_1 \cdot S$, где S – площадь поверхности катода.

Логарифмируя обе части формулы (7), имеем:

$$\ln I_H = \ln C + 2 \ln T - \frac{A}{kT}.$$

Первое слагаемое $\ln C$ в правой части последней формулы для данного диода представляет собой постоянную величину, не зависящую от T . Так как второе слагаемое $2 \ln T$ изменяется с изменением T очень медленно по сравнению с $A/(kT)$, то с большой степенью точности можно записать

$$\ln I_H = B - \frac{A}{k} \frac{1}{T}, \quad (8)$$

где B – постоянная величина.

Уравнение (8) представляет собой линейную зависимость логарифма тока насыщения от обратной величины абсолютной температуры катода $1/T$. Поэтому экспериментальные точки на графике зависимости $\ln I_H$ от $1/T$ должны хорошо укладываться на усредняющую прямую линию (рис. 6).

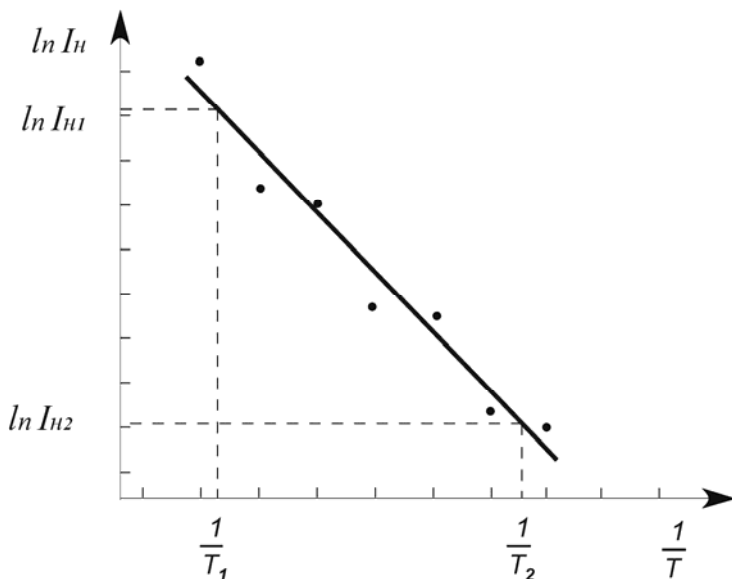


Рис. 6. Определение работы выхода по экспериментальным данным

Величину работы выхода можно определить по модулю тангенса угла наклона α этой прямой к оси обратных температур (оси абсцисс):

$$A = k \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (9)$$

где

$$\operatorname{tg} \alpha = \left| \frac{\ln I_{H1} - \ln I_{H2}}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}} \right|. \quad (10)$$

Следует иметь в виду, что величина $\operatorname{tg} \alpha$ определяется не путем непосредственного измерения угла на графике (этот угол зависит от масштаба по координатным осям), а как отношение модуля приращения логарифма тока насыщения ($|\ln I_{H1} - \ln I_{H2}|$) к модулю приращению обратной тем-

пературы $\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)$. Это видно из формулы (10). Данное от-

ношение не зависит от масштабов по осям. Обе эти величины определяются из графика (рис. 6). Для этого через экспериментальные точки проводится усредняющая прямая. На прямой выбираются две точки, как показано на рис. 6, и определяются абсциссы $1/T_1$, $1/T_2$ и ординаты $\ln I_{н1}$, $\ln I_{н2}$ этих точек. По ним и определяются соответствующие приращения:

$$\Delta \ln I_{н} = |\ln I_{н1} - \ln I_{н2}|; \quad (11)$$

$$\Delta\left(\frac{1}{T}\right) = \left|\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right|. \quad (12)$$

Полученные значения $\Delta \ln I_{н}$ и $\Delta\left(\frac{1}{T}\right)$ подставляют в формулу (10). При этом значение $\operatorname{tg} \alpha$ не зависит от масштаба по осям. В качестве точек 1 и 2 не следует брать крайние экспериментальные точки, так как при этом может возникнуть дополнительная погрешность, которая значительно уменьшается при проведении усредняющей прямой.

Для определения температуры катода используется зависимость его сопротивления от температуры по известному закону:

$$R_{к} = R_0(1 + \alpha t) \quad (13)$$

или

$$\frac{R_{к}}{R_0} = (1 + \alpha t), \quad (14)$$

где R_0 – сопротивление катода при 0°C ;

$R_{к}$ – сопротивление катода при $t^\circ\text{C}$;

α – температурный коэффициент сопротивления материала катода.

Из формулы (14) по известной величине α и измеренным значениям R_0 и R_k можно определить температуру по шкале Цельсия, а затем и по шкале Кельвина. Величина R_k определяется из отношения напряжения на катоде U_k к току I_k , протекающему по нему. Под напряжением на катоде U_k (или напряжением накала катода) подразумевается разность потенциалов между двумя выводами катода, один из которых имеет нулевой потенциал. Обе эти величины, I_k и U_k , определяются путем прямых измерений. Величина R_0 приводится в рабочей инструкции. Там же приведен график зависимости отношения R_k / R_0 от температуры по шкале Цельсия.

Ход работы

Задания

1. Используя рабочую инструкцию, ознакомиться с экспериментальной установкой.
2. Установить значение напряжения на катоде $U_k = 4$ В. Когда ток катода I_k стабилизируется (через 3–4 мин), занести его значение в табл. 1.
3. При фиксированной величине U_k снять зависимость анодного тока I_a от напряжения на аноде U_a (для указанных в табл. 1 значений U_a). Результаты измерений внести в табл. 1.
4. Пункты 2, 3 повторить для $U_k = 4,5; 5,0; 5,5; 6,0$ В.
5. Для каждого значения напряжения на катоде определить сопротивление катода R_k и отношение R_k / R_0 . С помощью графика определить температуру катода T по шкале Кельвина. Данные внести в табл. 1.
6. Для каждого значения напряжения на катоде построить график зависимости I_a от U_a .

7. Для каждого значения напряжения на катоде U_k определить обратную температуру $1/T$ и ток насыщения I_n . За величину I_n принять величину I_a , соответствующую максимальной величине U_a . Далее определить значение натурального логарифма тока насыщения $\ln I_n$. **Величины $1/T$ и $\ln I_n$ определить с точностью до трех значащих цифр.** Данные внести в табл. 2.

8. Построить график зависимости натурального логарифма тока насыщения $\ln I_n$ от обратной температуры $1/T$, аналогичный рис. 6. На усредненной прямой выбрать точки 1 и 2 и из графика определить значения абсцисс ($1/T_1, 1/T_2$) и ординат ($\ln I_{n1}, \ln I_{n2}$) этих точек. По формуле (10) определить величину тангенса угла, а по формуле (9) определить величину работы выхода в джоулях (Дж). Полученное значение перевести в электронвольты (эВ).

Таблица 1

Вольт-амперные характеристики
при различных температурах катода

$U_k, В$	$I_k, А$	$R_k, Ом$	R_k / R_0	$T, К$	$U_a, В$	$I_a, мА$
4В					0	
					5	
					10	
					15	
					20	
					25	
					30	
					40	
Аналогично для $U_k = 4,5 В; 5,0 В; 5,5 В; 6,0 В$						

Таблица 2

Данные для определения работы выхода

$U_k, \text{В}$	$T, \text{К}$	$1/T, \text{К}^{-1}$	$I_H, \text{мА}$	$\ln I_H$
4				
4,5				
5,0				
5,5				
6,0				

Литература

1. Савельев, И. В. Курс общей физики : в 3 т. / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1987. – Т. 3. – С. 208–215.
2. Савельев, И. В. Курс физики : в 3 т. / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1989. – Т. 3. – С. 116–118.
3. Наркевич, И. И. Физика / И. И. Наркевич, Э. И. Волмянский, С. И. Лобко. – Минск : Новое знание, 2004. – С. 325–335.
4. Трофимова, Т. И. Курс физики / Т. И. Трофимова. – М. : Высшая школа, 2007. – С. 191–194.
5. Детлаф, А. Я. Курс физики / А. Я. Детлаф, Б. М. Яворский. – М. : Высшая школа, 2001. – С. 243–246.

Учебное издание

ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ

Методические указания
к выполнению лабораторной работы № 7 по физике
для студентов инженерных специальностей

Составители:

ЧЁРНЫЙ Владимир Владимирович
РАЗВИН Юрий Владимирович
МАНЕГО Сергей Анатольевич

Редактор *Т. А. Зезюльчик*

Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 27.02.2014. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 1,10. Уч.-изд. л. 0,86. Тираж 100. Заказ 514.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.