

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Курганский государственный университет

Кафедра «Общая физика»

ИЗУЧЕНИЕ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА

Методические указания
к выполнению лабораторной работы № 39
для студентов направлений 231000.62, 151900.62, 150700.62,
220700.62, 220400.62, 280700.62, 221700.62, 140400.62, 190600.62,
190700.62, 090303.65, 190110.65, 190109.65

Курган 2014

Кафедра: «Общая физика»

Дисциплина: «Физика»
(направления 231000.62, 151900.62, 150700.62, 220700.62,
220400.62, 280700.62, 221700.62, 140400.62, 190600.62,
190700.62; специальности 090303.65, 190110.65, 190109.65).

Составили: канд. физ.-мат. наук, доц. Т.Н. Новгородова, канд. физ.-мат. наук,
доц. В.М. Овсянов.

Утверждены на заседании кафедры «14» мая 2014 г.

Рекомендованы методическим советом университета «17» июня 2014 г.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В 1887 г. Герц обнаружил, что ультрафиолетовое облучение искрового промежутка облегчает разряд. Последующие опыты Столетова, Ленарда и Томсона показали, что под действием света с поверхности металла вырываются электроны. Данное явление получило название внешнего фотоэффекта.

В настоящее время принято выделять три основных вида фотоэффекта: внешний, внутренний и вентильный.

Внешним фотоэлектрическим эффектом (фотоэффектом) называется явление испускания электронов веществом под действием электромагнитного излучения (света).

Внутренний фотоэффект заключается в повышении электропроводности полупроводника или диэлектрика при его освещении. Концентрация носителей тока внутри вещества увеличивается в результате переходов электронов внутри полупроводника или диэлектрика из связанных состояний в свободные без вылета наружу.

Вентильный фотоэффект, являющийся разновидностью внутреннего фотоэффекта, – возникновение ЭДС (фотоэдс) при освещении контакта двух разных полупроводников или полупроводника и металла (при отсутствии внешнего электрического поля).

Принципиальная схема для исследования внешнего фотоэффекта приведена на рисунке 1.

Два электрода в вакуумной трубке подключены к батарее так, что с помощью потенциометра R можно изменять подаваемое на них напряжение. Ток, возникающий при освещении катода монохроматическим светом (через кварцевое окно), измеряется включенным в цепь миллиамперметром.

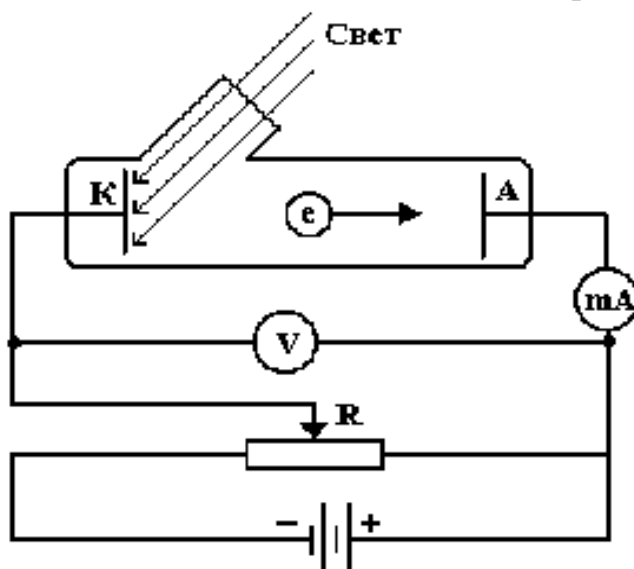


Рисунок 1 – Схема исследования фотоэффекта

Вольт-амперные характеристики фотоэлемента – зависимости фототока I от напряжения U между электродами, соответствующие двум различным освещенностям катода E_1 и E_2 (частота света в обоих случаях одинакова), приведены на рисунке 2.

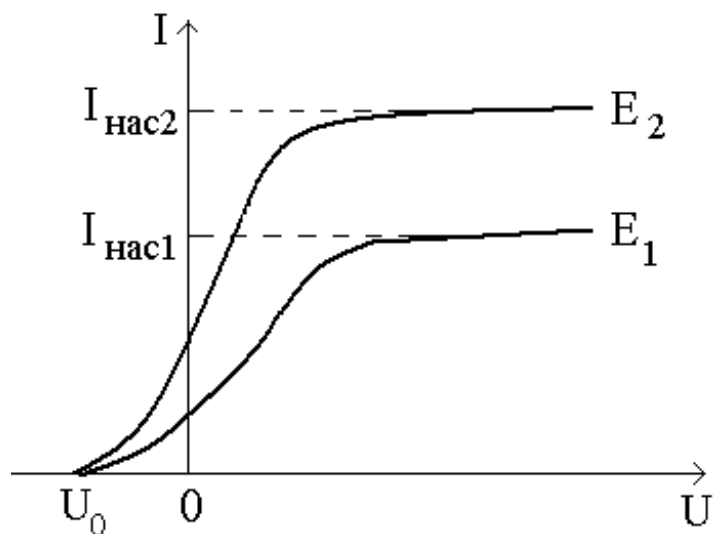


Рисунок 2 – Вольт-амперные характеристики вакуумного фотоэлемента

При увеличении напряжения U фототок постепенно возрастает, т.е. все большее число фотоэлектронов достигает анода. Пологий характер кривых показывает, что электроны вылетают из катода с различными скоростями. Максимальное значение тока $I_{\text{нас}}$ – фототок насыщения определяется таким значением U , при котором все электроны, испускаемые катодом, достигают анода:

$$I_{\text{нас}} = en,$$

где n – число электронов, испускаемых катодом в 1с.

При $U=0$ фототок не исчезает, следовательно, электроны, выбитые светом из катода, обладают некоторой начальной скоростью v , а значит, и отличной от нуля кинетической энергией и могут достигнуть анода без внешнего поля. Для того, чтобы фототок стал равным нулю, необходимо приложить задерживающее напряжение U_0 . При $U = U_0$ ни один из электронов, даже обладающий при вылете из катода максимальной скоростью v_{max} , не может преодолеть задерживающего поля и достигнуть анода. Следовательно,

$$\frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = eU_0, \quad (1)$$

т.е., измерив задерживающее напряжение U_0 , можно определить максимальное значение скорости и кинетической энергии фотоэлектронов.

При изучении вольт-амперных характеристик разнообразных материалов при различных частотах падающего на катод излучения и различных энергетических

ческих освещенностях катода были установлены следующие **три закона фотоэффекта**.

I При фиксированной частоте падающего света число фотоэлектронов, вырываемых из катода в единицу времени, пропорционально интенсивности света (сила фототока насыщения пропорциональна энергетической освещенности катода).

II Максимальная начальная скорость (максимальная начальная кинетическая энергия) фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а определяется только его частотой ν .

III Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, т.е. минимальная частота ν_0 , ниже которой фотоэффект невозможен.

Законы фотоэффекта невозможно объяснить с точки зрения волновой теории света.

А. Эйнштейн в 1905 г. показал, что явление фотоэффекта и его закономерности могут быть объяснены на основе предложенной им квантовой теории фотоэффекта. Согласно Эйнштейну, свет частотой ν не только *испускается*, как это предполагал Планк, но и *распространяется* в пространстве и *поглощается* веществом отдельными порциями (квантами), энергия которых $\epsilon_{\phi} = h\nu$, где h – постоянная Планка. Таким образом, распространение света нужно рассматривать не как непрерывный волновой процесс, а как поток локализованных в пространстве дискретных световых квантов. Кванты электромагнитного излучения получили название **фотонов**.

По Эйнштейну, каждый квант поглощается только одним электроном. Так как интенсивность света прямо пропорциональна числу фотонов, падающих на катод в единицу времени, то и число вырванных фотоэлектронов должно быть пропорционально интенсивности света (I закон фотоэффекта).

Энергия падающего фотона расходуется на совершение электроном работы выхода $A_{\text{в}}$ из металла и на сообщение вылетевшему фотоэлектрону кинетической энергии $\frac{mv_{\text{max}}^2}{2}$. По закону сохранения энергии

$$h\nu = A_{\text{в}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2} . \quad (2)$$

Это уравнение называется **уравнением Эйнштейна для внешнего фотоэффекта**.

Используя (1) и связь частоты ν с длиной волны λ , уравнение (2) можно записать в виде:

$$\frac{hc}{\lambda} = A_{\text{в}} + eU_0, \quad (3)$$

где c – скорость света в вакууме;
 λ – длина волны падающего на катод света;
 h – постоянная Планка;
 $A_{\text{в}}$ – работа выхода фотоэлектронов;
 e – элементарный заряд;
 U_0 – задерживающее напряжение.

Уравнение Эйнштейна позволяет также объяснить II и III законы фотоэффекта. Из него непосредственно следует, что максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона линейно возрастает с увеличением частоты падающего излучения и не зависит от его интенсивности (числа фотонов), так как ни $A_{\text{в}}$, ни ν от интенсивности света не зависят (II закон фотоэффекта). Так как с уменьшением частоты света кинетическая энергия фотоэлектронов уменьшается (для данного металла $A_{\text{в}} = \text{const}$), то при некоторой частоте $\nu = \nu_0$ кинетическая энергия фотоэлектронов станет равной нулю и фотоэффект прекратится (III закон фотоэффекта). Уравнение (2) показывает, что для вылета электрона из металла полученная им от фотона энергия должна быть не меньше, чем работа выхода. То есть должны выполняться условия: $h\nu \geq A_{\text{в}}$, $\frac{hc}{\lambda} \geq A_{\text{в}}$. Отсюда для красной границы фотоэффекта получим

$$\nu_0 = \frac{A_{\text{в}}}{h}, \quad \lambda_0 = \frac{hc}{A_{\text{в}}}. \quad (4)$$

Таким образом, видно, что красная граница фотоэффекта для данного металла зависит лишь от работы выхода электрона, т.е. от химической природы вещества и состояния его поверхности.

Явление фотоэффекта широко используется в технике для регистрации и измерения световых потоков, освещенности поверхностей, для преобразования энергии света в энергию электрического тока и т.д. Приборы, действие которых основано на явлении фотоэффекта, называются фотоэлементами.

Фотоэлементы, в которых используется внешний фотоэффект, бывают вакуумные и газонаполненные. Вакуумный фотоэлемент представляет собой пустотный стеклянный баллон. Фоточувствительный слой наносится либо непосредственно на стеклянный баллон, либо на металлический слой (подложку), предварительно осажденный на стекло, либо на поверхность металлической пластинки, смонтированной внутри баллона. В качестве анода используется металлическое кольцо, металлическая рамка или тонкая сетка.

Для регистрации видимого света и инфракрасного излучения применяют фотоэлементы с серебряно-кислородно-цезиевым катодом (Ag-O-Cs), а для ре-

гистрации коротковолновой части видимого спектра и ультрафиолетового излучения применяют фотоэлементы с сурьмяно-цезиевым катодом (Sb-Cs).

Лабораторная работа № 39

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- 1 Изучение явления внешнего фотоэффекта.
- 2 Исследование вольт-амперной характеристики вакуумного фотоэлемента.
- 3 Проверка законов фотоэффекта.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

- 1 Вакуумный фотоэлемент.
- 2 Люксметр.
- 3 Выпрямитель.
- 4 Реостат.
- 5 Вольтметр: $U_{\text{пред}} =$, $C_0 =$
- 6 Микроамперметр: $I_{\text{пред}} =$, $C_0 =$
- 7 Лампа накаливания

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Электрическая схема установки приведена на рисунке 3.

Вакуумный фотоэлемент ФЭ освещается светом лампы Л. Освещенность катода фотоэлемента можно регулировать, изменяя либо расстояние до осветителя, либо диаметр диафрагмы осветителя.

Потенциометр П позволяет регулировать напряжение, подаваемое на фотоэлемент с выпрямителя. Напряжение и ток фотоэлемента измеряются с помощью вольтметра и микроамперметра, соответственно.

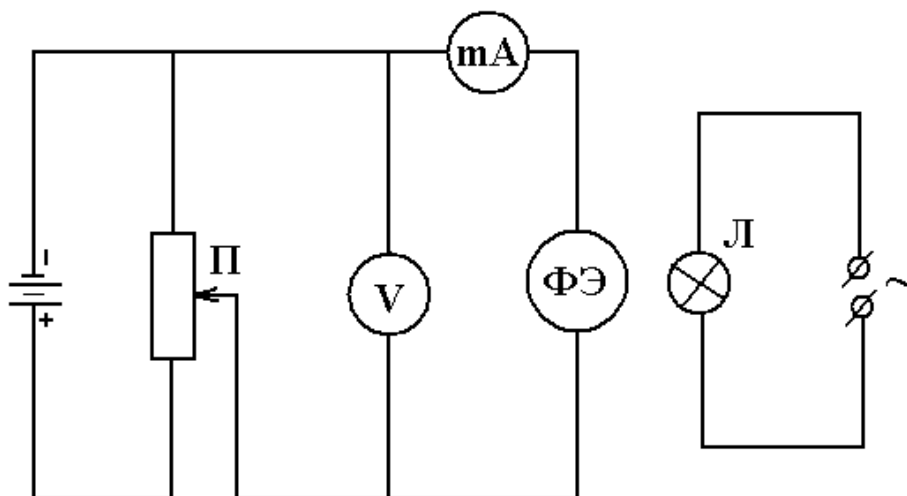


Рисунок 3 – Электрическая схема установки

Для определения освещенности поверхности катода исследуемого фотоэлемента в данной работе используется люксметр.

Принцип действия люксметра основан на явлении фотоэлектрического эффекта. При освещении поверхности селенового фотоэлемента люксметра в замкнутой цепи прибора, включающей магнитоэлектрический измеритель, возникает ток, который отклоняет подвижную часть измерителя, снабженную стрелкой. Величина тока, а следовательно и угол поворота стрелки пропорциональны освещенности рабочей поверхности селенового фотоэлемента люксметра.

К люксметру прилагаются насадки КМ, КР и КТ, являющиеся поглотителями части светового потока. Без насадок предельные значения освещенности, которые могут быть измерены люксметром, составляют 30 лк и 100 лк, при цене деления 1 лк. Насадка КМ увеличивает диапазон измерения освещенности в 10 раз, насадка КР – в 100 раз, а насадка КТ – в 1000 раз.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Задание 1. Исследование вольт-амперной характеристики вакуумного фотоэлемента

1. Собрать схему рисунка 3.
2. Включить лампу осветителя. С помощью люксметра измерить освещенность катода фотоэлемента. Результат измерения записать в таблицу 1.
3. Включить источник питания. Потенциометром П постепенно увеличивать напряжение и через равные значения напряжения (по указанию преподавателя) регистрировать соответствующие значения фототока. Результаты измерений записать в таблицу 1. Измерения проводить до обнаружения явления насыщения фототока (сила тока остается постоянной при увеличении анодного напряжения).
4. Повторить измерения зависимости фототока от напряжения (пункт 3) при двух других освещенностях катода. Результаты измерений записать в таблицу 1.
5. По результатам таблицы 1 построить вольтамперные характеристики фотоэлемента при различных освещенностях катода.

Таблица 1 – Результаты измерений вольт-амперных характеристик вакуумного фотоэлемента

$E_1 =$, лк		$E_2 =$, лк		$E_3 =$, лк	
U, В	I, мкА	U, В	I, мкА	U, В	I, мкА
0		0		0	

Задание 2. Проверка первого закона фотоэффекта

- 1 Установить значение анодного напряжения U , при котором заведомо достигается насыщение фототока.
- 2 Измерить силу фототока при пяти различных значениях освещенности катода. Результаты измерений занести в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты измерений зависимости силы тока насыщения от освещенности катода

E , лк					
I_n , мкА					

- 3 Построить график зависимости фототока насыщения от величины освещенности катода.
- 4 Сделать вывод по работе.

Лабораторная работа № 39К

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- 1 Изучение явления внешнего фотоэффекта.
- 2 Экспериментальное подтверждение закономерностей внешнего фотоэффекта.
- 3 Экспериментальное определение красной границы фотоэффекта, работы выхода и постоянной Планка.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ:

- 1 «Открытая физика 1.1» – лицензионная программа.
- 2 Персональный компьютер.

МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ.

Для начала работы необходимо запустить программу «**Открытая физика**», открыть раздел «**Квантовая физика**», компьютерная модель – «**Фотоэффект**».

Вид рабочего поля приведен на рисунке 4.

В левой части рабочего поля изображена схема опыта, справа – график вольт-амперной характеристики. В нижней части рабочего поля расположены регуляторы, позволяющие изменять длину волны (λ) падающего на катод света, мощность светового потока (P) и напряжение между катодом и анодом (U). Величина силы тока (I) выводится непосредственно на экран под графиком вольт-амперной характеристики.

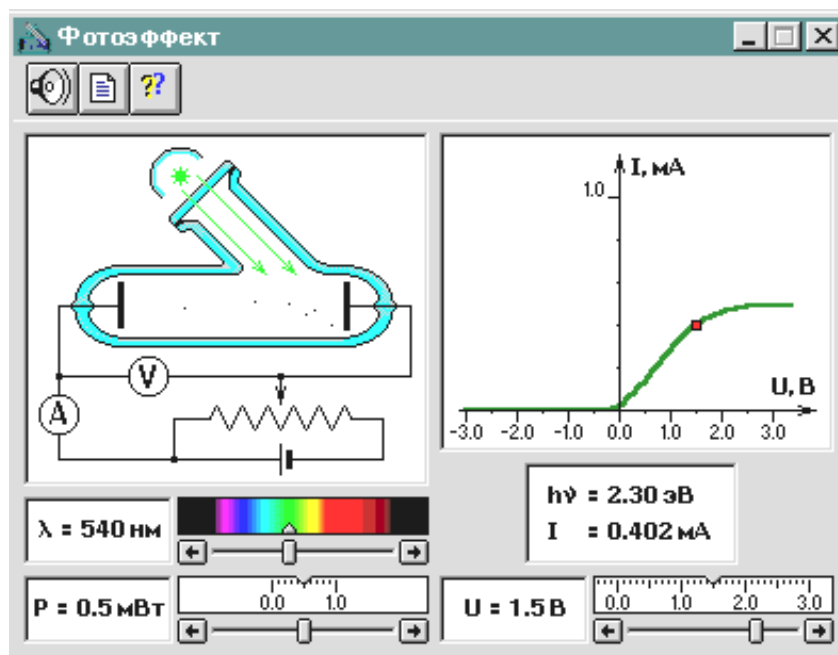


Рисунок 4 – Рабочее поле модели «Фотозффект»

Задание 1. Определение красной границы фотозффекта и работы выхода

- 1 Зацепив мышью движок реостата, установите максимальное значение мощности светового потока $P = 1,0$ мВт.
- 2 Аналогичным образом установите максимальное напряжение между анодом и фотокатодом $U = 3,0$ В.
- 3 Установите минимальную длину волны электромагнитного излучения. Наблюдайте движение электронов в фотозэлементе.
- 4 Постепенно увеличивая длину волны, добейтесь **прекращения вырывания электронов с поверхности катода.**
- 5 Зафиксируйте **наибольшую** длину волны, при которой фототок еще **существует.** По определению она равна красной границе фотозффекта λ_0 :

$$\lambda_0 = \quad \text{нм} = \quad \cdot 10^{-9} \text{ м} .$$

- 6 Рассчитайте работу выхода фотозэлектронов по формуле

$$A_{\text{в}} = \frac{hc}{\lambda_0} .$$

- 7 Найдите работу выхода в электрон-вольтах ($1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$):

$$A_{\text{в}} = \frac{A_{\text{в}} [\text{Дж}]}{1,6 \cdot 10^{-19}} = \quad \text{эВ}$$

- 8 Используя данные таблицы 3, определите материал, из которого изготовлен катод.

Таблица 3 – Значения работы выхода для некоторых материалов

Материал	калий	литий	платина	рубидий	серебро	цезий	цинк
$A_{\text{в}}, \text{эВ}$	2.2	2.3	6.3	2.1	4.7	2.0	4.0

Задание 2. Экспериментальное определение постоянной Планка

- 1 Установите первое значение запирающего напряжения U_0 из таблицы 4 для вашей бригады.

Таблица 4 – Значения запирающего напряжения

№ бригады	$U_{01}, \text{В}$	$U_{02}, \text{В}$	$U_{03}, \text{В}$	$U_{04}, \text{В}$
1, 5, 9	-0,1	-0,3	-0,6	-0,8
2, 6, 10	-0,2	-0,4	-0,7	-0,9
3, 7, 11	-0,3	-0,5	-0,8	-1,0
4, 8, 12	-0,4	-0,6	-0,9	-1,1

- 2 Установите минимальное значение длины волны света (фиолетовая область спектра).
- 3 Перемещая метку на спектре, т.е. постепенно увеличивая длину волны, добейтесь полного отсутствия фототока ($I=0$).
При визуальном наблюдении движения электронов в фотоэлементе вы видите, что электроны долетают до анода, но не касаются его и после этого движутся обратно к катоду.
- 4 Зафиксируйте и занести в таблицу 5 значение минимальной длины волны, соответствующей полному отсутствию фототока ($I=0$).

Таблица 5 – Результаты измерений

$U_0, \text{В}$				
$\lambda, \text{нм}$				

- 5 Повторите измерения пункт 2-4 для трех других значений запирающего напряжения, указанных для вашей бригады. Результаты занесите в таблицу 5.
- 6 Используя данные таблицы 5, рассчитайте значение постоянной Планка по формуле

$$h = \frac{\lambda}{c} (A_{\text{в}} + |eU_0|).$$

- 7 Найдите среднее значение $\langle h_{\text{эксп}} \rangle$.
- 8 Рассчитайте относительную погрешность измерений:

$$\gamma = \frac{|h_{\text{табл}} - \langle h_{\text{эксп}} \rangle|}{h_{\text{табл}}} \cdot 100\% .$$

Задание 3. Проверка первого закона фотоэффекта (выполняется по усмотрению преподавателя)

- 1 Установите максимальное значение анодного напряжения $U=3$ В, длину волны λ по указанию преподавателя.
- 2 Измерьте силу фототока насыщения при пяти различных значениях мощности светового потока P . Результаты измерений занесите в таблицу 6.

Таблица 6 – Результаты измерений зависимости силы тока насыщения от мощности светового потока

P , мВт	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
I_n , мкА					

- 3 Постройте график зависимости силы фототока насыщения от мощности светового потока.
- 4 Сделайте вывод по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1 В чем заключается явление фотоэффекта?
- 2 Сформулируйте законы фотоэффекта.
- 3 Что такое фотоны? Чему равна энергия фотона?
- 4 Запишите уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта.
- 5 Как на основании уравнения Эйнштейна объясняются законы фотоэффекта?
- 6 Объясните вид вольт-амперной характеристики фотоэлемента:
 - а) почему в отсутствие напряжения сила тока не равна нулю?
 - б) почему с ростом напряжения ток сначала растет, а затем достигает насыщения?
 - в) что необходимо сделать, чтобы фототок прекратился?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Трофимова, Т. И. Курс физики [Текст] / Т. И. Трофимова. – М. : Высшая школа, 2003.
- 2 Детлаф, А. А. Курс физики [Текст] / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – М. : Издательский центр «Академия», 2003.
- 3 Савельев, И. В. Курс физики [Текст] / И. В. Савельев. – Т. 1-5. – М. : АКТ, 2005.

Новгородова Татьяна Назаровна
Овсянов Виктор Михайлович

ИЗУЧЕНИЕ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА

Методические указания
к выполнению лабораторной работы № 39
для студентов направлений 231000.62, 151900.62, 150700.62,
220700.62, 220400.62, 280700.62, 221700.62, 140400.62, 190600.62,
190700.62, 090303.65, 190110.65, 190109.65

Редактор Е.А. Могутова

Подписано в печать 14.08.14	Формат 60x84 1/16	Бумага 65 г/м ²
Печать цифровая	Усл. печ.л. 1,0	Уч.-изд. л. 1,0
Заказ 226	Тираж 100	Не для продажи

РИЦ Курганского государственного университета.
640000, г. Курган, ул. Советская, 63/4.
Курганский государственный университет.