

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 44**

### **ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ**

Лабораторная работа разработана следующими преподавателями кафедры физики МГУЛ:

- аспирант Усатов И.И.,

доц. Царьгородцев Ю.П.

проф. Полуэктов Н.П.



## ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- Знакомство с квантовой моделью внешнего фотоэффекта.
- Экспериментальное определение постоянной Планка.

### Введение:

ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ есть явление вылета электронов из вещества при его облучении электромагнитным излучением (ЭМИ), например, светом. Вылетевшие электроны называются ФОТОЭЛЕКТРОНАМИ. Далее для краткости указанное явление будем называть просто фотоэффектом.

**Фотоэлектрический эффект** был открыт в 1887 году немецким физиком Г.Герцем и в 1888–1890 годах экспериментально исследован А.Г.Столетовым. Наиболее полное исследование явления фотоэффекта было выполнено Ф.Ленардом в 1900 г. К этому времени уже был открыт электрон (1897 г., Дж. Томсон), и стало ясно, что фотоэффект (или точнее – внешний фотоэффект) состоит в вырывании электронов из вещества под действием падающего на него света.

Схема экспериментальной установки для исследования фотоэффекта изображена на рис. 1.

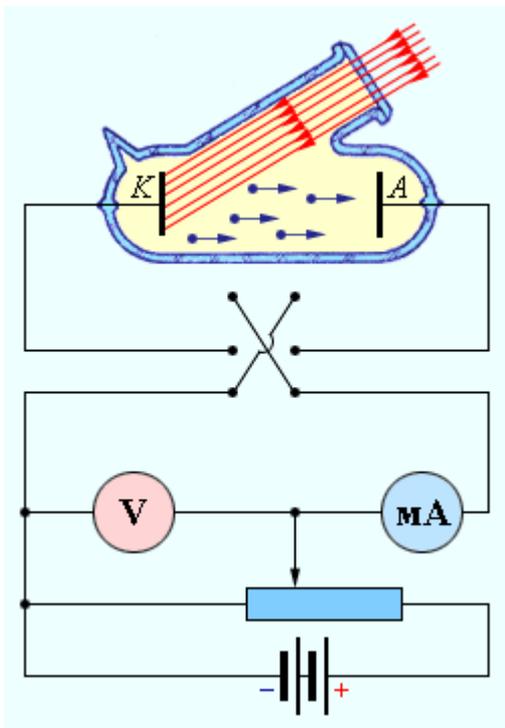


Рис.1. Схема экспериментальной установки для изучения фотоэффекта

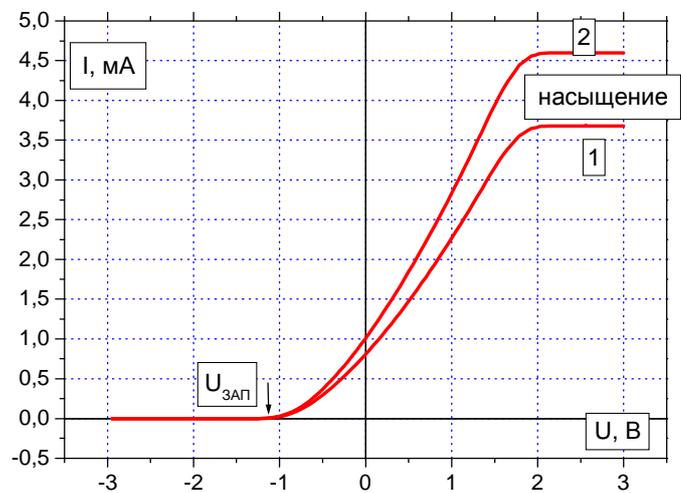


Рис.2. Зависимость силы фототока от приложенного напряжения. Кривая 2 соответствует большей интенсивности светового потока.  $U_{\text{зап}}$  – запирающий потенциал.

В экспериментах использовался стеклянный вакуумный баллон с двумя металлическими электродами, поверхность которых была тщательно очищена. К электродам прикладывалось некоторое напряжение  $U$ , полярность которого можно было изменять с помощью двойного ключа. Один из электродов (катод К) через кварцевое окошко освещался монохроматическим светом некоторой длины волны  $\lambda$ . При неизменном световом потоке снималась зависимость силы фототока  $I$  от приложенного напряжения. На рис.2 изображены типичные кривые такой зависимости, полученные при двух значениях интенсивности светового потока, падающего на катод. По мере увеличения напряжения  $U$  фототок постепенно возрастает, т.е. все большее количество 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:

$$I_{\text{нас}} = en, \text{ где } n \text{ – число электронов, испускаемых катодом в 1 секунду.}$$

Столетовым были установлены три закона:

1. при фиксированной частоте падающего света число фотоэлектронов, вырываемых из катода в единицу времени, пропорционально интенсивности света (сила фототока насыщения пропорциональна энергетической освещенности  $E_e$  катода).
2. максимальная начальная скорость (максимальная начальная кинетическая энергия) фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а определяется только его частотой  $\nu$ .
3. Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, т. е. минимальная частота  $\nu_0$  света (зависящая от химической природы вещества и состояния его поверхности), ниже которой фотоэффект невозможен.

Тщательные измерения показали, что ток насыщения  $I_n$  прямо пропорционален интенсивности падающего света.

Явление фотоэффекта и его закономерности были объяснены А.Эйнштейном в 1905 г. на основе предложенной им **квантовой теории фотоэффекта**. Согласно Эйнштейну, свет частотой  $\nu$  не только испускается, как это предполагал Планк, но и распространяется в пространстве и поглощается веществом отдельными порциями (квантами), энергия которых  $\epsilon_0 = h\nu$ . Таким образом, распространение света нужно рассматривать не как непрерывный волновой процесс, а как поток локализованных в пространстве дискретных световых квантов, движущихся со скоростью  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с распространения света в вакууме. Кванты электромагнитного излучения получили название фотонов.

$$\text{ЭНЕРГИЯ ФОТОНА} - E_\phi = h\nu, \quad (1)$$

$\nu$  - частота излучения,  $h$  - постоянная Планка,  $h = 6.62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.

ЭНЕРГИЯ часто измеряется во внесистемных единицах «электрон-вольтах».

$$1 \text{ эВ} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

ЭФФЕКТИВНАЯ МАССА ФОТОНА связана с его энергией соотношением Эйнштейна

$$E_\phi = m_\phi c^2, \quad m_\phi = \frac{h\nu}{c^2} \quad (2)$$

$$\text{ИМПУЛЬС ФОТОНА} \quad p_\phi = m_\phi c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} = \frac{E_\phi}{c}, \text{ где } \lambda = \frac{c}{\nu} - \text{длина волны} \quad (3)$$

По Эйнштейну, каждый квант поглощается только одним электроном. Энергия подающего фотона расходуется на совершение электроном работы выхода  $A_{\text{ВЫХ}}$  из металла и сообщение вылетевшему электрону кинетической энергии. По закону сохранения энергии,

$$h\nu = A_{\text{ВЫХ}} + \frac{m_e V^2}{2} \quad (4)$$

Это соотношение называют формулой (законом) ЭЙНШТЕЙНА ДЛЯ ФОТОЭФФЕКТА.

КРАСНАЯ ГРАНИЦА фотоэффекта есть минимальная частота ЭМИ, при которой еще наблюдается фотоэффект, т.е. для которой энергия фотона равна работе выхода:

$$h\nu_{\text{кр}} = A_{\text{ВЫХ}} \quad (5)$$

ЗАПИРАЮЩИМ (ЗАДЕРЖИВАЮЩИМ) НАПРЯЖЕНИЕМ называется минимальное тормозящее напряжение между анодом вакуумной лампы (фотоэлемента) и фотокатодом, при котором отсутствует ток в цепи этой лампы, т.е. фотоэлектроны не долетают до анода. При таком

напряжении кинетическая энергия электронов у катода равна потенциальной энергии электронов у анода,

$$\frac{m_e V^2}{2} = eU_{\text{зап}}, \text{ где } e - \text{ заряд электрона. Тогда (4) преобразуется к виду:}$$

$$eU_{\text{зап}} = h\nu - A_{\text{выл}} = \frac{hc}{\lambda} - A_{\text{выл}} \quad (6)$$

$$U_{\text{зап}} = \frac{1}{e}(h\nu - A_{\text{выл}}) = \frac{hc}{e\lambda} - \frac{A_{\text{выл}}}{e} \quad (7)$$

Когда напряжение на аноде отрицательно, электрическое поле между катодом и анодом тормозит электроны. Анода могут достичь только те электроны, кинетическая энергия которых превышает  $|eU|$ . Если напряжение на аноде меньше, чем  $-U_3$ , фототок прекращается. Измеряя  $U_{\text{зап}}$ , можно определить максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов:

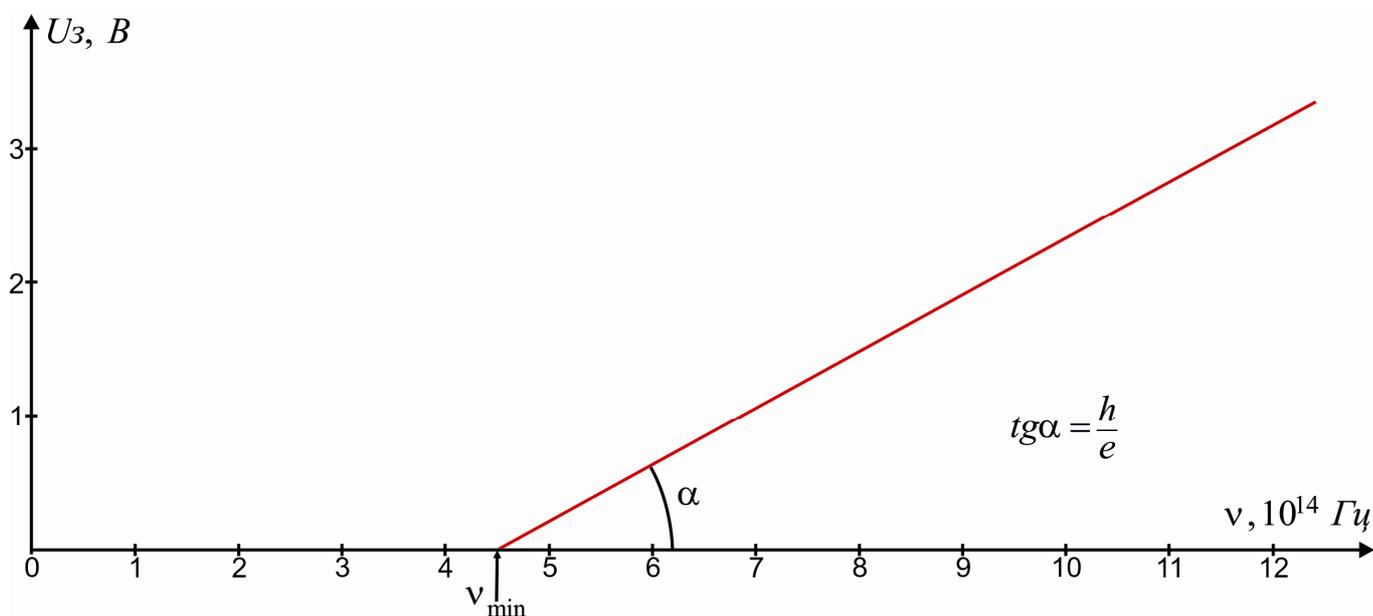


Рис.3. Зависимость запирающего потенциала  $U_3$  от частоты  $\nu$  падающего света

$$\left( \frac{mV^2}{2} \right)_{\text{MAX}} = eU_{\text{зап}} \quad (8)$$

Величина  $U_{\text{зап}}$  оказалась независимой от интенсивности падающего светового потока. Тщательные измерения показали, что запирающий потенциал линейно возрастает с увеличением частоты  $\nu$  света (рис.3).

### Выполнение лабораторной работы.

1. Запустите программу **Постоянная планка.exe**.
2. Ознакомьтесь с теорией лабораторной работы. После ознакомления нажмите кнопку **START**.
3. Ответьте на вопросы теста. Вы допускаетесь к выполнению работы, если все ответы на вопросы верны. В случае неправильных ответов программа закроется и нужно будет запустить её заново.
4. По указанию преподавателя выберите материал катода.
5. На панели **lambda** ползунком выбирайте в фиолетовой области некоторую длину волны.
6. Передвигая курсор на графике  $I(U)$ , найдите положение, когда ток становится равным нулю (контролировать по показаниям амперметра на схеме).

7. Произведите запись в таблицу при помощи клавиши ADD. При неверном вводе значение можно удалить при помощи кнопки DELETE
8. Увеличьте значение длины волны при помощи ползунка на панели **lambda** и повторите пункты 6-7 для 6 -10 длин волн.
9. Результаты измерений занесите в таблицу в лабораторном журнале, а также материал катода и работу выхода катода.

Материал катода, :		$A_{вых} =$	
	$Y$		$X$
№	$U_{зап}, В$	$\lambda, нм$	$1/\lambda, нм^{-1}$
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

В уравнении (7) сделаем переобозначения:  $U_{зап} = Y$ ,  $\frac{1}{\lambda} = X$ ,  $A = -\frac{A_{вых}}{e}$ ,  $B = \frac{hc}{e}$ . Тогда это уравнение преобразуется к виду:  $Y = A + BX$ . Мы аппроксимировали измеренные данные линейной функцией (прямой линией), т.е. провели прямую между точками так, что они отстоят от нее на .

минимальном расстоянии сверху и снизу. Здесь  $B = \frac{\Delta Y}{\Delta X}$  – тангенс угла наклона этой прямой.

Отсюда среднее значение постоянной Планка будем определять по формуле:

$$\langle h \rangle = \frac{Be}{c} \quad (9)$$

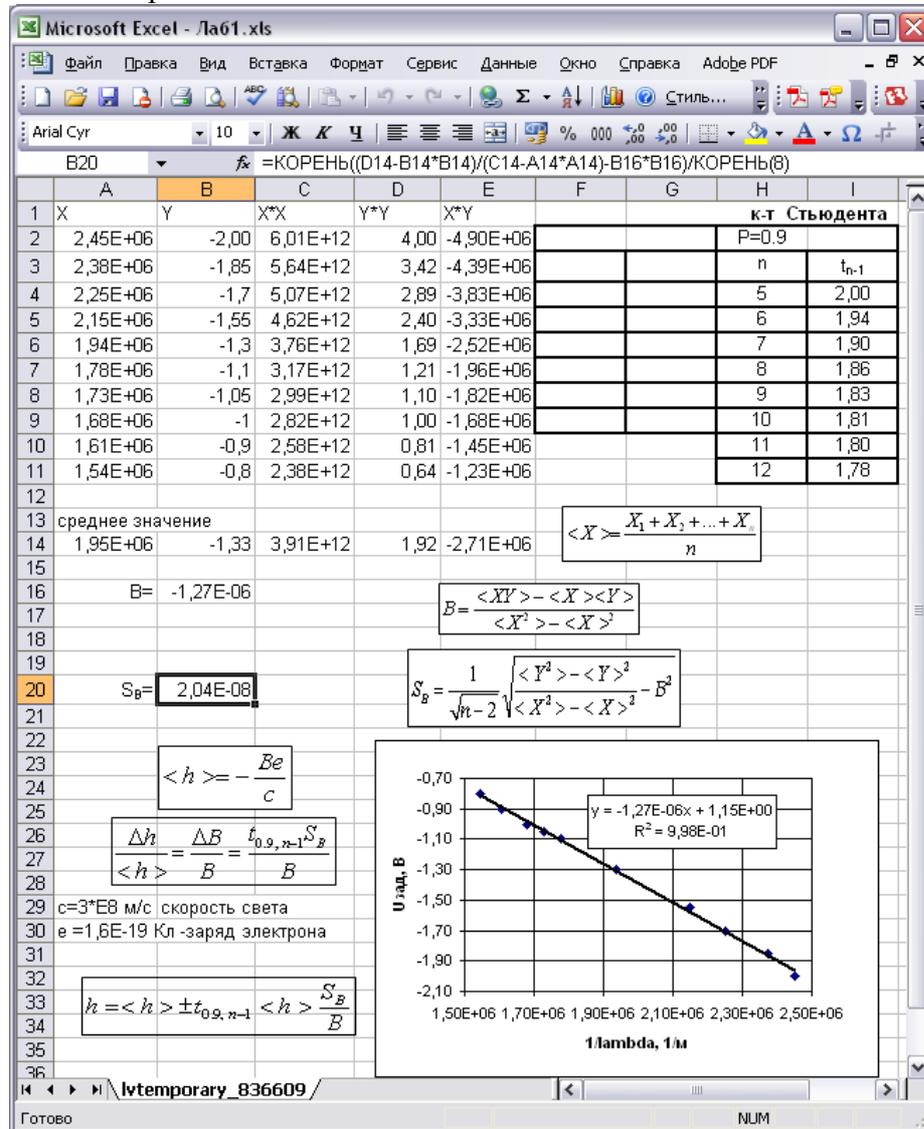
**Далее построение графика и определение величины и погрешности постоянной Планка проведем с помощью программы Excel.**

1. Запустите программу **Excel**.
2. Наведите курсор на ячейку A1 (столбец A, строка1) и нажмите левой клавишей мышки. Ячейка выделится жирной рамкой. В ячейку A1 запишите X, в B1 – Y, в C1 –X\*X, в D1 –Y\*Y, в ячейку E1 – X\*Y.
3. Занесите в столбцы A и B, начиная со 2-й строки данные  $1/\lambda$  и  $U_{зап}$ . Для этого выделите ячейку A2 и нажмите правую кнопку мышки. В появившемся окне выберите пункт «формат ячейки», нажмите ее и в новом окне выберите «числовой» формат с 3-мя десятичными знаками после запятой (десятичные знаки отделяются не точкой, а запятой). Затем вводите данные измерений в последующие строки. В ячейке B2 выбирайте формат «экспоненциальный».
3. В ячейку C2 запишите = A2\*A2, (использовать латинскую клавиатуру, все формулы начинать со знака равенства) и нажмите «ОК». Выделите эту ячейку. На рамке, выделяющей активную ячейку, справа внизу имеется жирный квадратик. Протягивание рамки этой ячейки за этот квадратик вниз позволяет распространить записанные в активной ячейке действия на необходимое количество ячеек. выделите ее и протяните вниз. В столбце C будут расположены квадраты X.
7. Подобную процедуру произведите с ячейками D2 = B2\*B2, и E2 = A2\*B2, где будут находиться значения Y\*Y и X\*Y соответственно.
8. Определение среднего значения постоянной Планка и ее погрешностей измерений будем производить **графическим методом**. В этом методе полученные данные аппроксимируются линейной функцией  $Y = BX + A$ . Здесь B – тангенс угла наклона прямой, из которого будем определять среднее значение искомой величины, а погрешность искомой величины из среднеквадратичного отклонения величины  $B - S_B$ . Они выражаются следующими формулами:

$$B = \frac{\langle XY \rangle - \langle X \rangle \langle Y \rangle}{\langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2} \quad (10)$$

$$S_B = \frac{1}{\sqrt{n-2}} \sqrt{\frac{\langle Y^2 \rangle - \langle Y \rangle^2}{\langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2} - B^2} \quad (11)$$

Здесь n – количество измерений.



- Выделите столбцы с данными X и Y. Для этого навести курсор на середину ячейки A2, нажмите левой кнопкой мыши и, не отпуская ее, протянуть по всем ячейкам A и B.
- Над таблицей расположено несколько панелей инструментов. На одной из них расположена кнопка «Вставка». Нажмите кнопку «Вставка» и в раскрывающемся меню выберите «диаграмма».
- Откроется окно «мастер диаграмм (шаг 1 из 4)». В окне «Тип» выбираем тип «точечная». На соседнем поле нажмите самый верхний рисунок и затем кнопку «далее».
- Откроется окно «мастер диаграмм (шаг 2 из 4)». Появится график, состоящий из точек. Нажмите кнопку «далее».
- Откроется окно «мастер диаграмм (шаг 3 из 4)». В окне «Заголовки» в рамках «Ось X» и «Ось Y» внести необходимые записи. В окне «Линии сетки» поставить галочки в каждую клетку. Нажмите кнопку «далее».
- На полученном графике наведите курсор на любую точку и нажмите правой клавишей мышки. В раскрывшемся окне нажмите «Добавить линию тренда».
- В окне «Тип» выбрать «Линейная». На верхней панели нажать «Параметры».
- В раскрывшемся окне «Параметры» поставить галочки в квадратиках «показывать уравнение на диаграмме» и «поместить на диаграмму величину достоверности аппроксимации  $R^2$ ». Нажать «ОК».

16. На графике появится формула  $Y=Bx+A$ . Постоянная Планка (ее среднее значение) вычисляется из коэффициента  $B$  согласно формуле (9). Далее находим погрешность измерений, а именно среднеквадратичную ошибку по формуле (11).

17. Рассчитайте среднее значение постоянной Планка ( $h = \frac{B \cdot e}{c}$ ).

18. Для вычисления погрешности измерений используем аналитический метод. Для расчета среднеквадратичной погрешности тангенса угла наклона используем выражение:

$$S_B = \frac{1}{\sqrt{N-2}} \sqrt{\frac{\langle y^2 \rangle - \langle y \rangle^2}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} - B^2}, \text{ где } \langle \rangle - \text{ средние значения величин, } N - \text{ количество измерений.}$$

Тогда погрешность измерения длины волны определить по формуле:  $\Delta h = \frac{S_B}{B} \langle h \rangle$ .

Конечный результат необходимо представить в виде:

$h = \langle h \rangle \pm t_{N-1, P} \Delta h$ , где  $t_{N-1, P}$  – коэффициент Стьюдента (таблица на стене).

### Контрольные вопросы.

1) Как зависит скорость вылетающих из металла фотоэлектронов от интенсивности света?

1. с увеличением интенсивности света скорость электронов увеличивается;
2. с увеличением интенсивности света скорость электронов уменьшается;
3. скорость электронов не зависит от интенсивности света.

2) Введение в полупроводник донорных примесей приводит:

1. к снижению красной границы фотоэффекта  $\nu_0$ ,
2. к увеличению красной границы фотоэффекта  $\nu_0$ ,
3. не изменяет красной границы  $\nu_0$  фотоэффекта.

3) Какая из указанных частот  $\nu_0$  является «красной границей» фотоэффекта?

1.  $\nu_0 = h/A_{\text{вых}}$  ;
2.  $\nu_0 = A_{\text{вых}}/h$  ;
3.  $\nu_0 = h \cdot A_{\text{вых}}$  ;
4.  $\nu_0 = c/\lambda$  .

4) Какова связь между максимальной скоростью фотоэлектрона и разностью потенциалов  $U$  тормозящего электрического поля?

1.  $V = \sqrt{\frac{eU}{2m}}$  ;
2.  $V = \sqrt{\frac{eU}{m}}$  ;
3.  $V = \sqrt{\frac{meU}{2}}$  ;
4.  $V = \sqrt{\frac{2eU}{m}}$  .

5) Незаряженная изолированная металлическая пластинка облучается рентгеновскими лучами.

При этом пластинка:

1. зарядится положительно,
2. зарядится отрицательно,
3. останется незаряженной.

6) Что изменится в процессе внешнего фотоэффекта при увеличении интенсивности света?

1. увеличивается скорость фотоэлектронов;
2. уменьшается работа выхода фотоэлектронов;
3. увеличивается количество вылетающих фотоэлектронов;
4. никаких изменений не наблюдается.

7) Какие факторы влияют на максимальную начальную скорость фотоэлектронов для данного фотокатода?

1. интенсивность падающего светового потока;
2. длина волны падающего света;
3. освещённость поверхности фотокатода;
4. мощность источника света.

8) Величина задерживающего потенциала зависит от:

1. интенсивности светового потока;
2. работы выхода электронов из фотокатода;
3. площади фотокатода;
4. освещённости фотокатода.

9) Какое из равенств является уравнением Эйнштейна для внешнего фотоэффекта?

- |    |   |    |  |
|----|---|----|--|
| 1. | $h\nu = \frac{mv^2}{2} - A_{\text{вых}}$ ;  | 2. | $h\nu = \frac{mv^2}{2} + A_{\text{вых}}$ ;     |
| 3. | $\frac{mv^2}{2} = h\nu - 2A_{\text{вых}}$ ; | 4. | $h\lambda = \frac{mv^2}{2} + A_{\text{вых}}$ . |

10) Фотокатод освещается один раз красным светом, другой раз – синим. В каком случае скорость вышедших с поверхности катода электронов больше, если фотоэффект наблюдается в обоих случаях?

1. при освещении красным светом;
2. при освещении синим светом;
3. скорость фотоэлектронов одинакова в обоих случаях;
4. скорость фотоэлектронов не зависит от частоты света.

## Скриншоты программы

постоянная планка\_5.vi

File Edit View Project Operate Tools Window Help

### Лабораторная работа № Определение постоянной Планка

Описание лабораторной работы  
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 44  
**ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ**

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:**

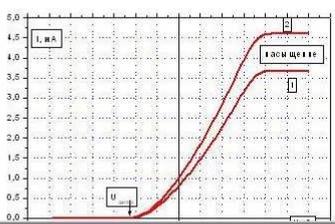
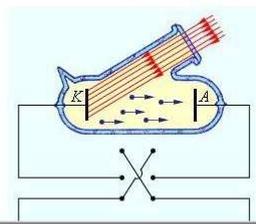
- \* Знакомство с квантовой моделью внешнего фотоэффекта.
- \* Экспериментальное определение постоянной Планка.

**КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:**

**ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ** есть явление вылета электронов из вещества (металла, фотокатода) при его облучении электромагнитным излучением (ЭМИ), например, светом. Вылетевшие электроны называются **ФОТОЭЛЕКТРОНАМИ**. Далее для краткости указанное явление будем называть просто фотоэффектом.

**Фотоэлектрический эффект** был открыт в 1887 году немецким физиком Г. Герцем и в 1888–1890 годах экспериментально исследован А.Г. Столетовым. Наиболее полное исследование явления фотоэффекта было выполнено Ф. Ленардом в 1900 г. К этому времени уже был открыт электрон (1897 г., Дж. Томсон), и стало ясно, что фотоэффект (или точнее – внешний фотоэффект) состоит в вырывании электронов из вещества под действием падающего на него света.

Схема экспериментальной установки для исследования фотоэффекта изображена



**START**

постоянная планка\_5.vi

File Edit View Project Operate Tools Window Help

### Чтобы начать работу, ответьте правильно на все вопросы теста, после чего нажмите на кнопку **Check up the test.**

Как зависит скорость вылетающих из металла фотоэлектронов от интенсивности света?

- 1) с увеличением интенсивности света скорость электронов увеличивается;
- 2) с увеличением интенсивности свет скорость электронов уменьшается;
- 3) скорость электронов не зависит от интенсивности света.

**1**

Какова связь между максимальной скоростью фотоэлектрона и разностью потенциалов  $U$  тормозящего электрического поля?

- 1)  $V = \sqrt{\frac{eU}{2m}}$ ;
- 2)  $V = \sqrt{\frac{eU}{m}}$ ;
- 3)  $V = \sqrt{\frac{meU}{2}}$ ;
- 4)  $V = \sqrt{\frac{2eU}{m}}$ .

**1**

Незаряженная изолированная металлическая пластинка облучается рентгеновскими лучами. При этом пластинка:

- 1) зарядится положительно;
- 2) зарядится отрицательно;
- 3) останется незаряженной.

**1**

Password

Zoom Text

**Check up the test**

