



**Мартемьянова Татьяна Юрьевна**

*Кандидат педагогических наук,  
учитель физики ГБОУ  
“Президентский ФМЛ №239”*



**Маркушев Дмитрий Сергеевич**

*Учитель физики  
ГБОУ “Президентский ФМЛ №239”*

## Измеряем постоянную Планка

Идеи квантовой теории, на заре возникновения казавшиеся противоречивыми и оторванными от реальности, сегодня применяются в различных технологических сферах: от мобильных телефонов до самых современных научных приборов. Уже сейчас научная мысль превосходит квантовые компьютеры, способные предоставить своим создателям небывалые вычислительные мощности, разрешить проблемы криптографии и искусственного интеллекта.

Одним из проявлений квантовой природы является фотоэффект. Фотоэффект – это явление вырывания электронов из вещества под действием света. Фотоэффект был открыт Г. Герцем в 1887 году и тщательно исследован А.Г. Столетовым в серии экспериментов в 1888-1890 годах. Напомним основную суть экспериментов.

Имеется колба, из которой откачан воздух. В колбу введены два металлических электрода, один из которых освещается ультрафиолетовым излучением. Электроды присоединены к схеме, показанной на рис. 1, которая позволяет получить зависимость тока в цепи от напряжения, приложенного к электродам. Эскиз графика этой зависимости представлен на рис. 2. В результате освещения катода ультрафиолетовым излучением миллиамперметр

фиксирует ток (в данном случае этот ток принято называть фототоком) в анодной цепи. При увеличении напряжения между катодом и анодом величина тока меняется, пока не достигнет значения, называемого током насыщения ( $I_H$ ). Если изменить полярность источника, то при достижении значения напряжения, называемого запирающим ( $U_3$ ), фототок прекращается. Это можно объяснить тем, что электрическое поле между электродами совершает

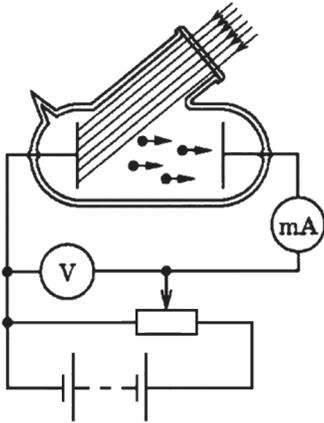


Рис. 1. Схема установки в опытах Столетова [3].

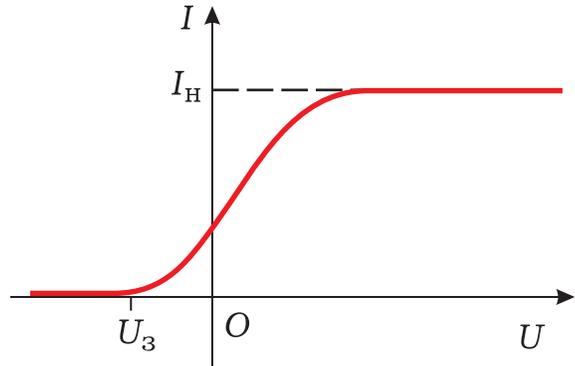


Рис. 2. ВАХ колбы при освещении катода светом достаточной частоты [3].

работу по торможению электронов. При значении напряжения, равном  $U_з$ , даже самые быстрые электроны не могут достигнуть анода. Тогда можно утверждать, что  $eU_з = \frac{mv^2}{2}$ .

Величина задерживающего напряжения позволяет определить максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов.

Совокупность опытов позволила сформулировать следующие эмпирические законы, называемыми законами фотоэффекта или законами Столетова:

1. Число электронов, выбиваемых из катода за секунду, пропорционально интенсивности падающего на катод излучения (при его неизменной частоте).

2. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с частотой света и не зависит от его интенсивности.

3. Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта – наименьшая частота света  $\nu_0$ , при которой фотоэффект ещё воз-

можен. При  $\nu < \nu_0$  фотоэффект не наблюдается ни при какой интенсивности света.

Законы классической физики не позволили в полной мере объяснить фотоэффект. Уравнение, описывающее его, было найдено А. Эйнштейном в 1905 году. Для объяснения Эйнштейн привлек гипотезу о квантах, высказанную М. Планком в 1900 году.

Согласно Планку, электромагнитная энергия излучается и поглощается не непрерывно, а отдельными неделимыми порциями – квантами. Энергия кванта пропорциональная частоте излучения:  $W = h\nu$ . Коэффициент пропорциональности называется постоянной Планка. Гипотеза позволила Планку построить теорию теплового излучения, прекрасно согласующуюся с экспериментом. По известным спектрам теплового излучения Планк вычислил значение постоянной

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

Планк говорил о дискретности излучения и поглощения электро-

магнитных волн, при этом считая, что распространение света – непрерывный процесс. Эйнштейн же предположил, что свет в принципе обладает прерывистой структурой: не только поглощение и излучение, но и распространение света происходит отдельными порциями – квантами, обладающими энергией  $W = h\nu$ . Свет, таким образом, можно рассматривать, как поток особых частиц – фотонов, движущихся в вакууме со скоростью  $c$  и обладающих энергией  $h\nu$ . Фотоны могут обмениваться энергией и импульсом с частицами вещества, можно говорить о столкновении фотона и частицы.

По Эйнштейну, при фотоэффекте энергия порции света идет на совершение работы выхода электрона из металла и на сообщение электрону кинетической энергии:

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}.$$

В рамках теории можно предложить способ измерения постоянной Планка. Поскольку

$$eU_3 = \frac{mv^2}{2},$$

зависимость запирающего напряжения от частоты будет представлена в виде:

$$U_3 = \frac{h}{e}\nu - \frac{A}{e}.$$

График этой зависимости имеет линейный характер с угловым коэффициентом  $k = \frac{\Delta U_3}{\Delta \nu} = \frac{h}{e}$  и пересекается с осью частот в точке  $\nu = \nu_{\min}$ , соответствующей красной границе фотоэффекта (рис. 3).

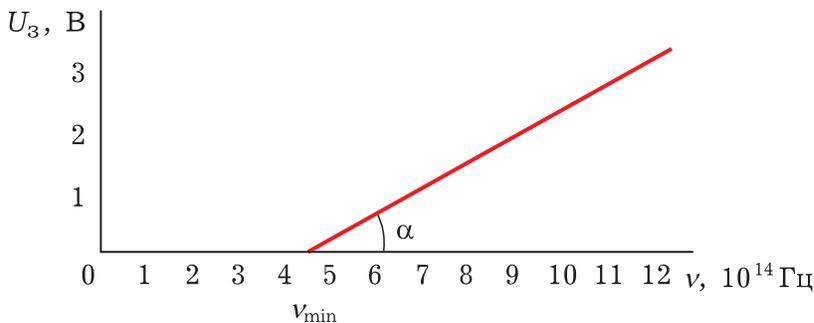


Рис. 3. Зависимость запирающего напряжения от частоты падающего света [1].

При этом произвести измерения постоянной Планка при помощи такого подхода не представляется возможным вследствие отсутствия в школах оборудования, подобного тому, что использовалось в классических опытах по исследованию фотоэффекта.

Однако, существует метод, позволяющий определить постоянную

Планка при помощи фотодиодов [2]. Но при этом также должно быть использовано оборудование, обычно отсутствующее в школе.

В курсе физики упоминается и про внутренний фотоэффект, наблюдаемый в полупроводниковых приборах – фоторезисторах и фотоэлементах [3]. Поглощение квантов света

этими устройствами вызывает изменение их свойств: у фоторезистора изменяется сопротивление, а на контактах фотоэлемента возникает ЭДС.

Полупроводниковый прибор, способный, напротив, излучать свет – светодиод.

Соотношение между напряжением зажигания светодиода (напряжение, при котором светодиод начинает излучать свет) и частотой излучаемого светодиодом света выглядит следующим образом:

$$U_{\text{заж}} \cdot e = h \cdot \nu,$$

где  $e$  – заряд электрона.

Покажем, как на основе этой особенности работы светодиода можно, произведя необходимые измерения, определить постоянную Планка при помощи доступного оборудования. Эта работа включена в экспериментальный практикум Президентского ФМЛ №239.

### Постановка задачи

Произвести измерение постоянной Планка при помощи предложенного оборудования.

Оборудование и материалы: источник постоянного напряжения, резистор с подвижным контактом, резистор с известным сопротивлением, мультиметр в режиме вольтметра, соединительные провода, линейка, дифракционная решетка, светодиоды различных цветов. Примечание: цвет светодиода должен быть обусловлен не светофильтром, наложенным на белый светодиод, а именно свойствами р-п перехода.

### Возможное решение

Снимем ВАХ светодиода. Поскольку в условии задачи запрещено пользоваться мультиметром в

режиме амперметра, для определения тока через светодиод будем измерять напряжение на эталонном резисторе, включенном последовательно со светодиодом. Собирав цепь из источника и резистора с подвижным контактом, включенным как делитель напряжения (рис. 4), будем изменять напряжение на светодиоде.

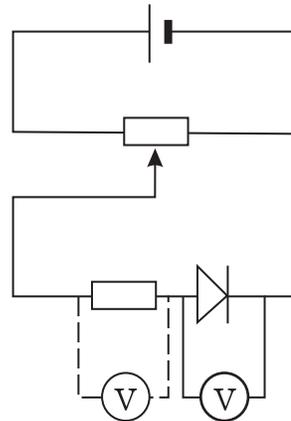


Рис. 4. Схема снятия ВАХ диода

Определим напряжения зажигания светодиода, проведя касательную к его линейному участку и найдя ее пересечение с горизонтальной осью (рис. 6). Будем пользоваться моделью идеализированного диода, ВАХ которого представлена на рисунке 5.

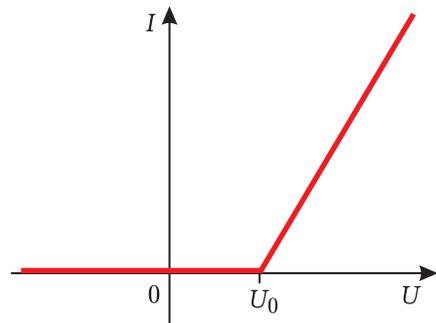


Рис.5. ВАХ идеализированного диода

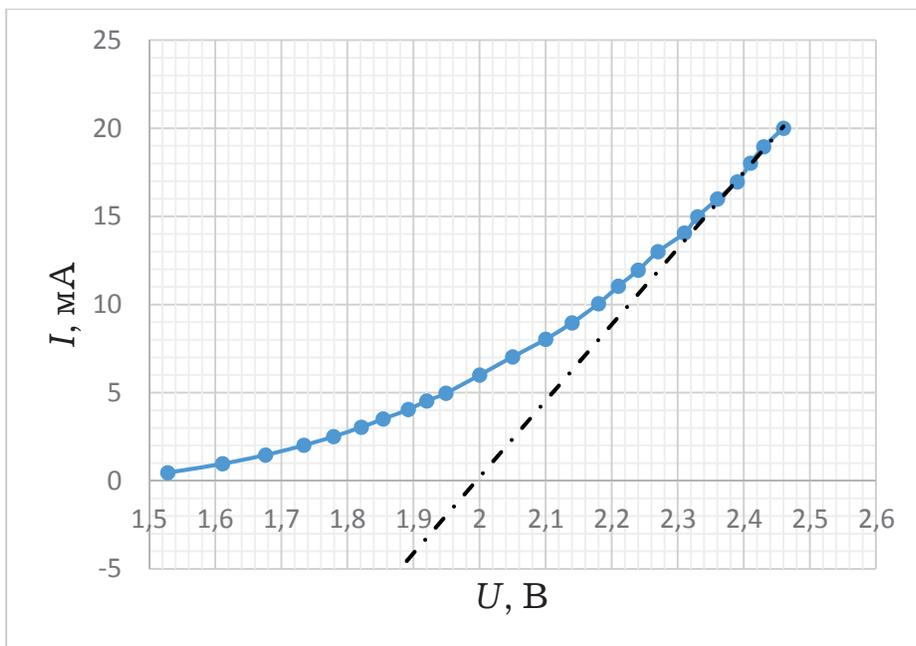


Рис. 6. ВАХ зеленого светодиода  $U_{\text{заяж}} = 2,0$  В.

Измерим длину волны светодиода. Известно, что для получения дифракционных максимумов от на экране, расположенном близко к дифракционной решетке необходимо воспользоваться собирающей линзой, поместив ее между решеткой и экраном таким образом, чтобы экран находился в фокальной плоскости линзы. Когда источник света достаточно яркий, можно поместить экран на большое расстояние от решетки, тогда дифракционные максимумы можно будет разрешить и без линзы. В предлагаемом оборудовании линза отсутствует, а источник света недостаточно яркий. Тогда воспользуемся способностью самого глаза работать, как собирающая линза. Оптическая система глаза будет собирать дифракционные максимумы на сет-

чатке. С точки зрения смотрящего это выглядит, как находящиеся рядом со светодиодом «изображения» светодиода (рис. 7). Угол направления на  $N$ -й максимум  $\varphi_N$  — это угол между светодиодом и его  $N$ -м «изображением». Совместим нулевое деление линейки со светодиодом и определим, напротив какого деления мы видим изображение светодиода. Измерим расстояние между дифракционной решеткой и светодиодом и определим

$$\sin(\varphi_N) = \frac{x_N}{\sqrt{L^2 + x_N^2}}.$$

В опыте использована дифракционная решетка с известным периодом решетки  $d = \frac{1}{75}$  мм.

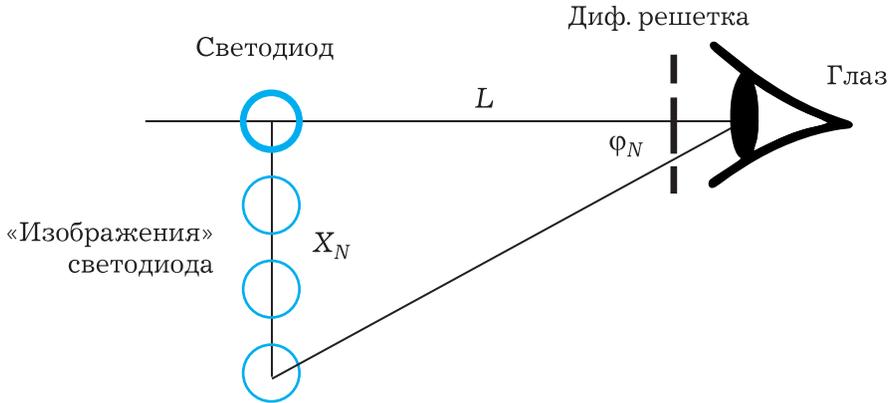


Рис. 7. Схема для определения длины волны дифракционной решетки

Для зеленого светодиода получим:

$$\lambda = \frac{d \cdot \sin(\varphi_N)}{N} = 560 \text{ нм};$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = 5,4 \cdot 10^{14} \text{ Гц.}$$

Для постоянной Планка получим значение:

$$h = \frac{e \cdot U_{\text{зак}}}{\nu} = 5,9 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с.}$$

Проведем аналогичные измерения для красного и желтого светодиодов, результаты вычислений постоянной Планка усредним. Получим значение, близкое к табличному.

## Заключение

Этот метод определения постоянной Планка находится на стыке различных разделов физики: квантовой физики, волновой оптики и электричества. При проведении из-

мерений нам пригодились навыки работы с дифракционной решеткой, снятия ВАХ нелинейного элемента. Нам удалось соприкоснуться с квантовым миром.

## Литература

1. Козел С.М. Физика. Пособие для учащихся и абитуриентов. 2 часть. – М.: Мнемозина, 2010
2. Семиколонов А.В., Фетисов И.Н. Фотоэффект и определение постоянной Планка. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014
3. Мякишев Г.Я., Синяков А.З., Слободсков Б.А. Физика. Электродинамика. – М.: Дрофа, 2010