

Определение постоянной Планка при помощи фотоэффекта (разделение полос дифракционной решеткой)



Физика

Современная физика

Квантовая физика



Уровень сложности

-



Размер группы

-



Время подготовки

-



Время выполнения

-

PHYWE
excellence in science

Общая информация

Описание

PHYWE
excellence in science

Фотоумножители

Практическое применение фотоэлектрических эффектов включает в себя:

- Фотоумножители: они значительно усиливают ток, производимый падающим светом, для измерения низкой интенсивности света. Они используются в технологиях визуализации, в спектроскопии низкого уровня освещенности, в медицинском оборудовании и оптической визуализации.
Фотоэлементы: воздействие света на фотоэлементы вызывает эмиссию электронов, которая, в свою очередь, вызывает ток. Их можно найти в люксметрах, фотоаппаратах и видеокамерах

Прочая информация (1/2)

Предварительные знания



Научный принцип



Каждая частица света, называемая фотоном, имеет характерную энергию, пропорциональную частоте света. Когда фотон попадает на электрон на поверхности, электрон испускается, если он приобретает больше энергии, чем работа выхода. Если энергия фотона слишком мала, электрон не может быть эжектирован. Излучаемые электроны называются фотоэлектронами.

Фотоэлектрический эффект - один из ключевых экспериментов в развитии современной физики. Фильтруют с помощью дифракционной решетки спектрометра и освещают фотоэлемент. Максимальная энергия испускаемых электронов зависит только от частоты падающего света и не зависит от его интенсивности. Этот закон кажется противоречит теории электромагнитных волн света, но становится понятным в рамках корпускулярной теории света. Запирающее напряжение U_0 на различных частотах света определяется I/U вольт-амперными характеристиками фотоэлемента и строится на соответствующей частоте света f . Затем по этому графику определяется квант действия Планка.

Прочая информация (2/2)

Цель обучения



Задачи



Студенты должны исследовать свойства фотоэлектрического эффекта в зависимости от частоты света.

1. Вычислите частоту света f в зависимости от угла спектрометра.
2. Экспериментально определите запирающее напряжение U_0 для различных частот света и нанесите его на график зависимости частоты f
3. Вычислите постоянную Планка из зависимости запирающего напряжения U_0 от частоты света f

Инструкции по технике безопасности

Для этого эксперимента применяются общие инструкции по безопасному проведению экспериментов при преподавании естественных наук.

Не используйте напряжение, выходящее за пределы рабочего диапазона напряжений.

Теория (1/7)

Внешний фотоэлектрический эффект был впервые описан в 1886 году Генрихом Герцем. Вскоре стало ясно, что этот эффект проявляет определенные характеристики, которые не могут быть объяснены классической волновой теорией света. Например, когда интенсивность света, падающего на металл значительно увеличивается, классическая волновая теория ожидает, что электроны, испускаемые из металла, будут поглощать больше энергии. Тем не менее, эксперименты показали, что максимально возможная энергия испускаемых электронов зависит только от частоты падающего света и не зависит от его интенсивности.

Теоретическое объяснение было дано Эйнштейном в 1905 году. Он предположил, что при некоторых условиях свет может вести себя как частицы, движущиеся с постоянной скоростью (скорость света в вакууме) и обладающие энергией: $E = hf$. Объяснение Эйнштейном фотоэлектрического эффекта, демонстрирующее поведение фотонов света подобно частицам, способствовало развитию квантовой теории.

Таким образом, внешний фотоэлектрический эффект является одним из ключевых экспериментов в развитии современной физики, и Эйнштейн получил Нобелевскую премию по физике "за открытие закона фотоэлектрического эффекта".

Теория (2/7)

Задача 1: Вычислите частоту света f в зависимости от угла спектрометра

Частота света f определяется с помощью следующего уравнения:

$$d \cdot \sin \alpha = n \cdot \lambda \quad (1)$$

$$\alpha = \arcsin(\lambda/d) \quad (2)$$

α - угол спектрометра, d - постоянная решетки (здесь: 1/600 мм), λ - длина волны излучаемого света и порядок дифракции n в этом случае равен 1 .

Частота света f может быть вычислена, по формуле $f = c/\lambda$, где λ - длина волны, а ($c = 299792458$ м/с - \) скорость света.

Теория (3/7)

Задача 2: Экспериментально определите запирающее напряжение U_0 для различных частот света и постройте его график зависимости от частоты света f .

Внутри фотоэлемента вместе с металлическим анодом в вакуумной трубке расположен катод со специальным покрытием с низкой работой выхода. Если фотон с частотой f ударяется о катод, то тогда электрон может быть освобожден из материала катода (внешний фотоэлектрический эффект), если фотон обладает достаточной энергией. Если испускаемые электроны достигают анода, они поглощаются им благодаря работе выхода анода, и в результате возникает фототок. Фотоэлектрический эффект - это взаимодействие фотона с электроном.

В результате этого взаимодействия импульс и энергия сохраняются, а электрон поглощает фотон и после этого имеет полную энергию фотона $h \cdot f$. Если энергия фотона $h \cdot f$ больше, чем работа выхода катода W_c , то электрон после взаимодействия может покинуть вещество с максимальной кинетической энергией $W_{kin} = h \cdot f - W_c$.

Теория (4/7)

Это называется внешним фотоэлектрическим эффектом и описывается как:

$$h \cdot f = W_c + W_{kin} \quad (\text{уравнение Эйнштейна}) \quad (3)$$

Кинетическая энергия W_{kin} для испускаемых электронов определяется с использованием метода задерживающего электрического поля: на анод фотоэлемента прикладывается по отношению к катоду отрицательное смещение.

Это замедляет электроны и, таким образом, снижает интенсивность фотоэлектрического тока I , так как не все электроны имеют максимальную энергию, но у них есть распределение энергии. Значение смещения, когда ни один электрон не достигает анода и I становится равным нулю называется запирающим напряжением и обозначается как U_0 .

График зависимости силы тока I от приложенного напряжения смещения U_{bias} показывает зависимость U_0 от длины волны λ падающего света.

Теория (5/7)

Задача 3: Вычислите постоянную Планка из зависимости запирающего напряжения от частоты света.

Электроны могут достигать анода только в том случае, если их кинетическая энергия W_{kin} больше, чем энергия, которую они теряют, противодействуя электрическому полю, установленному напряжением смещения U_{bias} и неизвестному электрическому полю из-за разности потенциалов U_{AC} между анодом и катодом, который имеет такое же направление, как и напряжение смещения.

Поскольку разность потенциалов имеет тот же порядок величины, что и напряжение смещения, мы не можем им пренебрегать. Следовательно, невозможно определить абсолютную кинетическую энергию электронов. Тем не менее, постоянная Планка может быть вычислена из зависимости запирающего напряжения от частоты света по следующим соображениям:

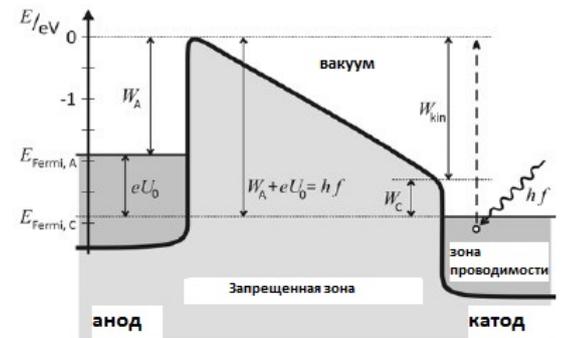
Теория (6/7)

При запирающем напряжении U_0 кинетическая энергия W_{kin} электрона равна энергии, потерянной в электрическом поле eU ($U =$ запирающее напряжение U_0 и разность потенциалов U_{AC}):

$$e(U_0 + U_{AC}) = W_{kin} \quad (4)$$

Разность потенциалов (контактное напряжение) вычисляется из электрохимических потенциалов анода U_A и катода U_C . При множении их обоих на заряд электрона $e = 1.602 \cdot 10^{-19}$ Кл получаем соответствующие работы выхода W_A и W_C . Уравнение (4) эквивалентно

$$eU_0 + W_A - W_C = W_{kin} \quad (5)$$



Принципиальная схема для эксперимента

Теория (7/7)

Чтобы вычислить постоянную Планка h , используя фотоэлектрический эффект, сравним формулу (5) с уравнением Эйнштейна (3):

$$W_{kin} = eU_0 + W_A - W_C = h \cdot f - W_C \quad (6)$$

Работа выхода катода не фигурирует в формуле для запирающего напряжения, и уравнение (6) можно записать как следующую линейную функцию

$$eU_0 = h \cdot f - W_A$$

или

$$U_0 = \frac{h}{e} f - U_A \quad (7)$$

Поскольку U_A является константой, то существует линейная зависимость между запирающим напряжением U_0 и частотой света f . Наклон линейной функции дает постоянную Планка h .

Оборудование

PHYWE
excellence in science

Позиция	Материал	Пункт No.	Количество
1	Источник питания пост. ток: 0...12 В, 2 А /пер. ток: 6 В, 12 В, 5 А	13506-93	1
2	Универсальный измерительный усилитель	13626-93	1
3	Фотоэлемент для определения постоянной Планка, с кожухом	06779-00	1
4	Щель, регулируемая	08049-01	1
5	Экспериментальная лампа	08130-99	1
6	Универсальный держатель	08040-02	1
7	Держатель для линзы	08012-01	2
8	Дифракционная решетка, 600 линий/мм	08546-00	1
9	Цветной светофильтр, 595 нм, красный	08416-00	1
10	Линза в оправе, f=+100 мм	08021-01	2
11	Оптическая скамья, l=600 мм	08283-00	2
12	Основание для оптической скамьи, регулируемое	08284-00	3
13	Шарнир для оптической скамьи	08285-01	1
14	Бортик для оптической скамьи с вертикальной трубкой, h=80 мм	08286-02	5

PHYWE
excellence in science



Подготовка и выполнение работы

Подготовка

PHYWE
excellence in science



Экспериментальная установка

Экспериментальная установка для демонстрации фотоэлектрического эффекта состоит из:

- фотоэлемент, катод которого облучается световым пучком, характеризующимся частотой f
- потенциометр, позволяющий подавать напряжение U (положительное или отрицательное по отношению к катоду),
- вольтметр для измерения этого напряжения,
- микроамперметр для измерения фотоэлектрического тока I .

Выполнение работы (1/4)

PHYWE
excellence in science

Установите две оптические скамьи с поворотным регулятором таким образом, чтобы установка устойчиво стояла на столе, а правую скамью можно было поворачивать.

Расположите лампу на расстоянии 9,0 см, щель на 34,0 см и первую линзу с фокусным расстоянием $f = +100\text{мм}$ на 44,0 см от левого края левой оптической скамьи и включите лампу.

Установите ширину щели примерно равной ширине входной щели фотоэлемента.

Переместите держатель лампы внутрь корпуса лампы, чтобы сфокусировать свет, выходящий из лампы, на плоскость щели.

Переместите линзу так, чтобы свет после линзы был параллелен.

Вставьте решетку 600 линий на мм в держатель диафрагмы по центру поворотного регулятора (кулачка).

Выполнение работы (2/4)

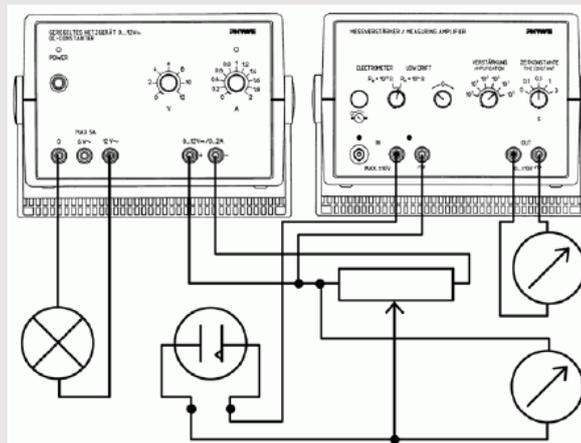
Выровняйте линии решетки по вертикали, наблюдая за спектрами на окружающих поверхностях - одинаковой высоты по обе стороны от решетки.

Поместите фотоэлемент в правый конец правой оптической скамейки, используя щель на корпусе.

Сфокусируйте осветительную щель во входную щель фотоэлемента со второй линзой с фокусным расстоянием $f = +100\text{мм}$, вставленной перед фотоэлементом.

Запишите угол, под которым весь нерассеянный свет попадает во входную щель фотоэлемента, как нулевой угол.

Выполните электрические соединения, как показано на рисунке.



Принципиальная схема для эксперимента

Выполнение работы (3/4)

Установите измерительный усилитель в режим малого дрейфа, усиление 10^5 и постоянную времени 0,3 с.

Проверьте обнуление универсального усилителя - при отсутствии подключения на входе установите выходное напряжение усилителя на ноль с контролем обнуления

Установите напряжение питания на потенциометре на 3 В, силу тока на 1 А.

Следите за выходом усилителя, который пропорционален фототоку в зависимости от напряжения смещения фотоэлемента.

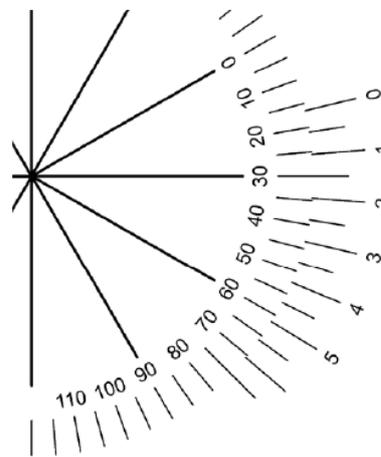
Измерьте напряжение смещения для нулевого тока для различных углов в дифракционном спектре первого порядка - для решетки 600 штрихов/мм от 13° - 25° . Как только свет сможет пройти через красный фильтр (угол дифракции около 21°), используйте фильтр, чтобы УФ-свет второго порядка не мешал измерению.

Выполнение работы (4/4)

Замечания по эксплуатации:

Вход измерительного усилителя имеет сопротивление 10000Ω . Если усилитель настроен на усиление 10^4 , то 1В на выходе усилителя соответствует 0.0001В на входе и, таким образом, сила тока равна 10нА .

Постоянная времени устанавливается, чтобы избежать ошибок из-за влияния шума сети. Шкала нониуса на поворотном кулачке может быть прочитана следующим образом: снимите следующее нижнее значение угла на шкале на внутренней стороне около нулевой отметки шкалы на внешней стороне и добавьте значение угла нониуса, где линии нониуса (снаружи, подвижная шкала) и линии шкалы на круглой пластине (неподвижно, в центре) совпадают.

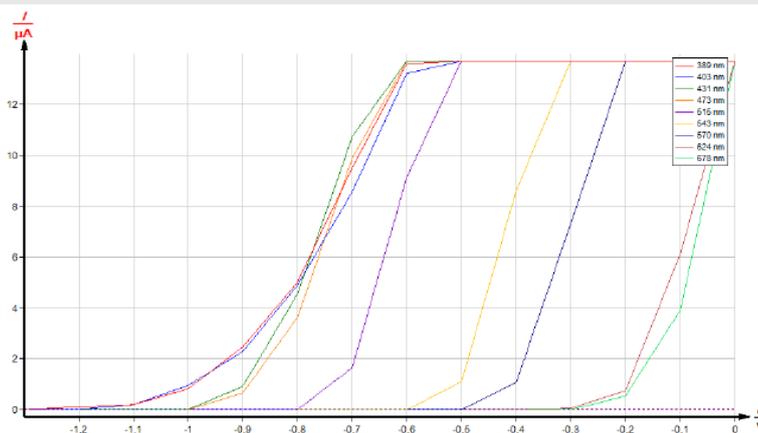


Пример чтения шкалы нониуса

Оценка (1/3)

Угол	λ , нм	f , 10^{12} Гц	U_0 , В
13.5	389	772	1.3
14	403	744	1.2
15	431	696	1.05
16.5	473	634	0.9
22	624	480	0.32

Результаты спектрометра



Сила фотоэлектрического тока I как функция напряжения смещения на разных частотах облучаемого света

Оценка (2/3)

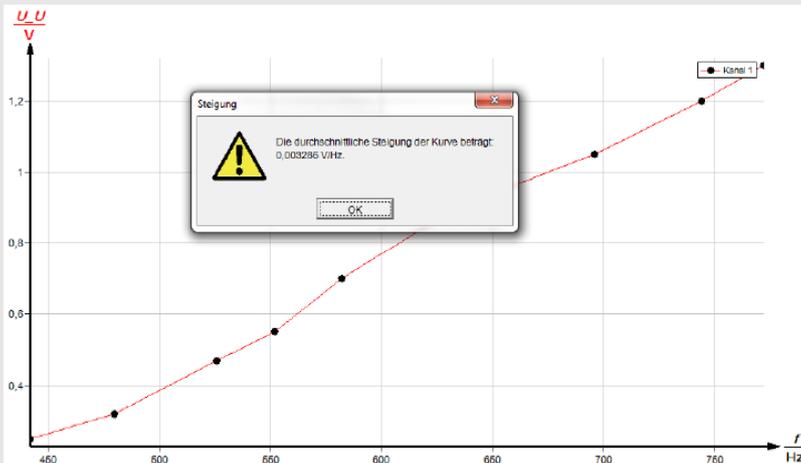
Наклон линейной функции равен постоянной Планка h :

Измеренный наклон составляет: 0,00329В/ТГц

Умножение на e дает: $h = 5.2710^{-34}$ Джс

Вычисленное значение может отклоняться на $\pm 25\%$ от табличного значения:

$$h = 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ Джс}$$



Запирающее напряжение U_0 в зависимости от частоты облучаемого света

Оценка (3/3)

Каковы причины погрешности измерения h ?

- Интенсивность излучаемого светового луча
- Разброс частот света
- Неопределённость запирающих напряжений

✓ Проверить

Какие величины влияют на фотоэлектрический эффект?

- Работа выхода вещества
- Частота падающего света
- Интенсивность падающего света

✓ Проверить

Слайд

Оценка/Всего

Слайд 22: Многочисленные задачи

0/4

Общий балл



 Показать решения

 Вспомнить