

ТОП-25 лабораторных установок по ФИЗИКЕ для университетов

Механика | Термодинамика | Электричество | Оптика | Атомная физика | Био- и Медицинская Физика

Полный перечень лабораторных установок на сайте www.3bscientific.ru

УВАЖАЕМЫЕ ПРЕПОДАВАТЕЛИ,



Это издание содержит 25 самых популярных экспериментов по физике университетского уровня. Мы создали этот ТОП-25, основываясь на нашем большом опыте сотрудничества с российскими высшими учебными заведениями. Лабораторные установки очень востребованы преподавателями. Сборник написан доступным языком и предназначен для изучения основных разделов классической и современной физики. Каждый опыт сопровождается следующей информацией:

- Цель упражнения
- Иллюстрация установки для проведения опыта
- Рассмотрение теоретических и экспериментальных основ опыта
- Выводы по результатам опыта
- Подробный список необходимого оборудования

На сайте www.3bscientific.ru Вы можете найти полный перечень наших лабораторных установок, которые помогут Вам в преподавании и изучении физики. Также будем рады ответить на любые вопросы по телефону или посредством электронной почты.

Кроме того, мы всегда с интересом рассматриваем любые замечания, вопросы или предложения, поступающие от наших клиентов. Мы с готовностью учтем ваши пожелания для включения в сборник новых тематических материалов. Это поможет нам в создании продуктов, максимально соответствующих Вашим потребностям.

С уважением,
Александр Мамаев
Руководитель отдела продаж учебного оборудования по физике

СВЯЖИТЕСЬ С НАМИ!



WWW.3BSCIENTIFIC.RU

Сделайте заказ онлайн, сэкономьте время и найдите полную информацию по товарам.



Отправьте нам e-mail по почте:
sales.spb@3bscientific.com



Позвоните нам.
Мы с радостью ответим на Ваши вопросы!
+7 (812) 334-22-23





Лабораторная установка «Колесо Максвелла»
с новым датчиком регистрации данных, работает в паре
с телефонами, планшетами, ноутбуками.



НОВАЯ лабораторная установка «Эффект Фарадея»



НОВАЯ лабораторная установка «Допплерография»

UE1040320 | МАЯТНИК МАКСВЕЛЛА



ЦЕЛЬ ОПЫТА
Подтверждение сохранения
энергии с помощью маятника
Максвелла

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ

Диск маятника Максвелла подвешен на нитях за оба конца его оси так, что нити могут наматываться на ось диска. В ходе движения потенциальная энергия маятника переходит в кинетическую и обратно. Процесс перемещения маятника вверх и вниз повторяется до тех пор, пока потенциальная энергия, полученная за счет начальной высоты диска, не будет полностью потеряна за счет отражения и трения. В этом опыте движение маятника Максвелла регистрируется ультразвуковым датчиком движения. Из полученного графика движения в зависимости от времени можно определить мгновенную скорость диска и вычислить его кинетическую энергию.

› ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

- Построить график перемещения в зависимости от времени и график зависимости скорости от времени для начального движения вниз.
- Определить ускорение и момент инерции.
- Определить кинетическую энергию и потенциальную энергию при движении вверх и вниз.
- Подтвердить сохранение энергии с учетом потерь на отражение и трение.

ТРЕБУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Кол-во	Наименование	№ по каталогу
1	Маятник Максвелла	1000790
1	WiLab *	1022284
1	Датчик движения для WiLab *	1022288
1	Стойка на H-образном основании	1018874
2	Стержень из нержавеющей стали длиной 1500 мм	1002937
2	Универсальный зажим	1002830

Дополнительно требуется

1	Лицензия инструктора 7
---	------------------------

Дополнительно рекомендуемое оборудование

1	Электронные весы, 5000 г	1003434
1	Штангенциркуль, 150 мм	1002601

* Варианты замены: 1 EMotion 1021673 или 1 VinciLab 1021477 и 1 датчик движения 1021683

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ

Диск маятника Максвелла подвешен на нитях за оба конца его оси так, что нити могут наматываться на ось диска. Когда он движется, потенциальная энергия все в большей и большей степени переходит в кинетическую энергию вращающегося диска. После полного разматывания нитей они начинают наматываться в противоположном направлении, и диск поднимается, при этом кинетическая энергия преобразуется обратно в потенциальную, пока вся кинетическая энергия не передаст в потенциальную. Затем диск опять устремляется вниз и обратно, до тех пор пока потенциальная энергия, полученная за счет начальной высоты маятника, не будет полностью потеряна за счет отражения и трения.

При вращении диск движется вверх и вниз со скоростью v . Скорость определяется следующей заданной зависимостью от угловой скорости ω , с которой диск вращается вокруг своей оси:

$$(1) \quad v = \omega \cdot r, \text{ где } r: \text{радиус оси.}$$

Таким образом, общая энергия определяется выражением

$$(2) \quad E = m \cdot g \cdot h + \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \\ = m \cdot g \cdot h + \frac{1}{2} \cdot m \cdot \left(\frac{I}{m \cdot r^2} + 1 \right) \cdot v^2$$

m : масса, I : момент инерции,

h : высота над нижней точкой обратного хода,

g : ускорение свободного падения

Эта формула описывает поступательное движение с направленным вниз ускорением, которое определяется выражением

$$(3) \quad \ddot{v} = a = \frac{g}{\frac{I}{m \cdot r^2} + 1}$$

Это ускорение определяется в опыте по расстоянию, пройденному за время t

$$(4) \quad s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$$

Его также можно определить по мгновенной скорости, достигаемой по истечении времени t

$$(5) \quad v = a \cdot t$$

В этом опыте движение маятника Максвелла регистрируется ультразвуковым датчиком движения. Из полученного графика движения в зависимости от времени можно определить мгновенную скорость диска и вычислить его кинетическую энергию.

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Если масса диска маятника m и радиус его оси r известны, момент инерции можно определить по ускорению a .

В соответствии с уравнением (3) справедливо следующее:

$$I = m \cdot r^2 \cdot \left(\frac{g}{a} - 1 \right).$$

Мгновенные скорости v можно определить, построив график перемещения в зависимости от времени. Кинетические энергии $E_{\text{кин}}$ вычисляются следующим образом:

$$E_{\text{кин}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \left(\frac{I}{m \cdot r^2} + 1 \right) \cdot v^2.$$

Потенциальная энергия определяется по формуле

$$E_{\text{пот}} = m \cdot g \cdot h.$$

Потери энергии, которые ясно видны на Рис. 3, описываются достаточно хорошо, если учитывать постоянную силу трения, действующую в направлении, противоположном направлению движения, и значительную потерю энергии при изменении направления в нижней точке.

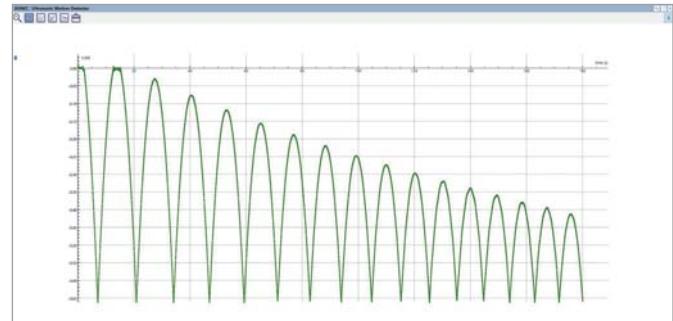


Рис. 1: График перемещения в зависимости от времени

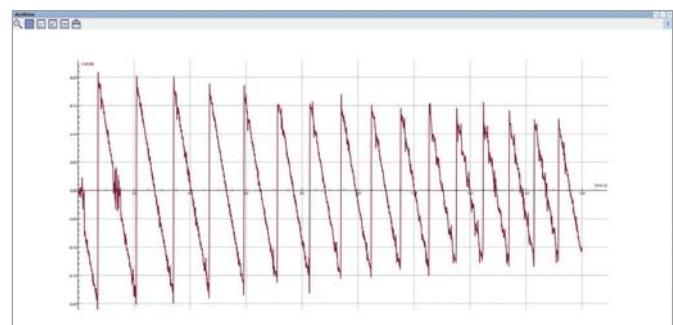


Рис. 2: График скорости в зависимости от времени

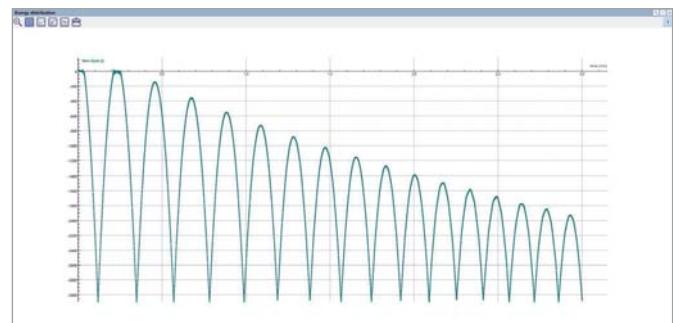
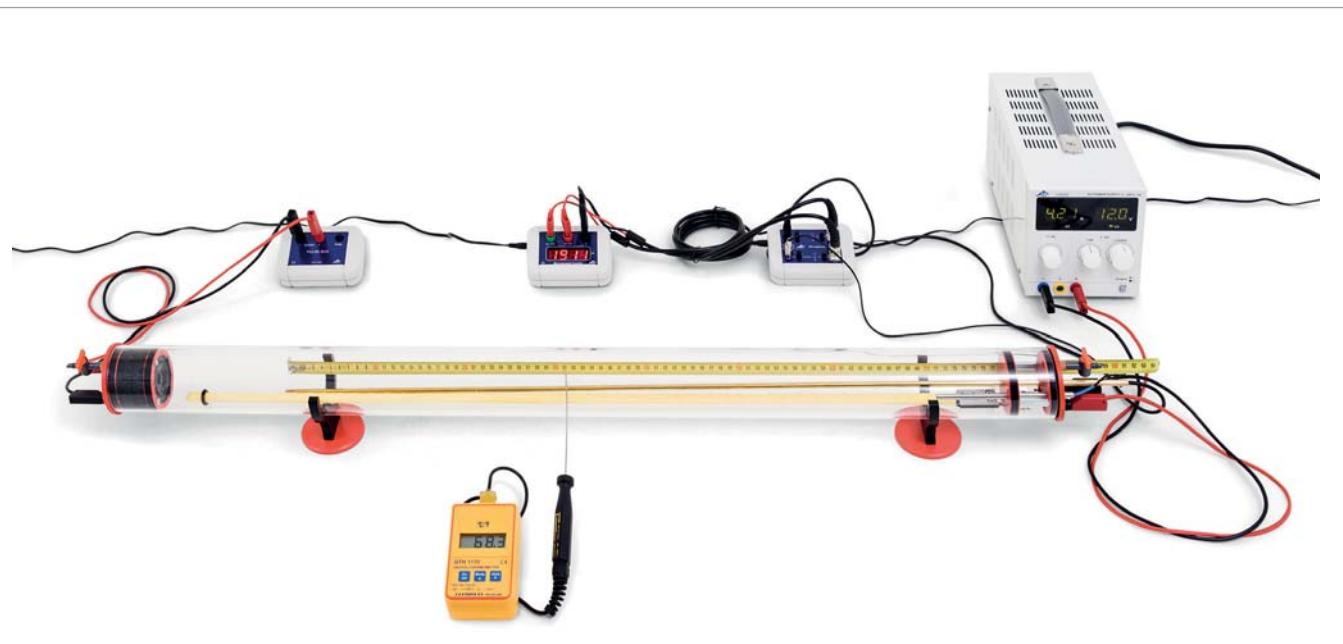


Рис. 3: Распределение энергии как функция времени

UE1070310 | СКОРОСТЬ ЗВУКА В ВОЗДУХЕ



› ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

- «Измерение зависимости времени распространения t звукового импульса в воздухе при комнатной температуре от расстояния s между двумя акустическими зондами.
- Подтверждение линейного характера взаимосвязи между s и t .
- Измерение зависимости времени распространения t звукового импульса в воздухе от температуры T при фиксированном расстоянии между двумя акустическими зондами.
- Определение зависимости скорости звука (групповой скорости) от температуры.
- Сравнение результата с выводами Лапласа.

ЦЕЛЬ ОПЫТА

Измерение времени распространения звуковых импульсов в трубке Кундта

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ

Звуковые волны в газах являются продольными. В этом случае групповая скорость равна фазовой скорости. В этом опыте мы проведем измерение времени распространения звукового импульса между двумя акустическими зондами в трубке Кундта и используем результат для расчета скорости звука. Зависимость скорости звука от температуры исследуется в диапазоне от комнатной температуры до 50°C. Результат измерения согласуется с результатом, полученным Лапласом.

НЕОБХОДИМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Кол-во	Наименование	№ по каталогу
1	Трубка Кундта модели Е	1017339
1	Блок формирования импульсов модели К	1017341
1	Длинный акустический зонд	1017342
1	Короткий акустический зонд	4008308
1	Блок усилителя для акустических зондов (230 В, 50/60 Гц)	1014520 или
	Блок усилителя для акустических зондов (115 В, 50/60 Гц)	1014521
1	Микросекундный счетчик (230 В, 50/60 Гц)	1017333 или
	Микросекундный счетчик (115 В, 50/60 Гц)	1017334
1	Нагревательный стержень модели К	1017340
2	Высокочастотный соединительный шнур, байонетный разъем / 4-мм штекер	4008293
1	Источник питания постоянного тока с напряжением 0–20 В, 0–5 А (230 В, 50/60 Гц)	1003312 или
	Источник питания постоянного тока с напряжением 0–20 В, 0–5 А (115 В, 50/60 Гц)	1003311
1	Цифровой быстродействующий карманный термометр	1002803
1	Никель-хром-никелевый погружной датчик типа K с диапазоном измерения от -65°C до 550°C	1002804
1	Пара безопасных соединительных проводов для опытов длиной 75 см	1002849

Дополнительно рекомендуется иметь

Различные технические газы

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ

Звуковые волны являются упругими волнами в деформируемой среде. Скорость волны зависит от упругих свойств среды. В простых газах звук распространяется исключительно в виде продольных волн, при этом групповая скорость равна фазовой скорости.

При выводе по Лапласу звуковые волны в газах рассматриваются как адиабатические изменения давления или плотности. Скорость звука определяется как:

$$(1) \quad c = \sqrt{\frac{C_p}{C_v} \cdot \frac{p}{\rho}}$$

p : давление, ρ : плотность,
 C_p, C_v : теплоемкости газа

В случае идеального газа при абсолютной температуре T :

$$(2) \quad \frac{p}{\rho} = \frac{R \cdot T}{M}$$

$R = 8,314 \frac{\text{J}}{\text{Mol} \cdot \text{K}}$: универсальная газовая постоянная.

M : молярная масса

Тогда скорость звука в этом газе:

$$(3) \quad c = \sqrt{\frac{C_p}{C_v} \cdot \frac{R \cdot T}{M}}$$

Если разницы температур ΔT не слишком велики по сравнению с эталонной температурой T_0 , скорость звука линейно зависит от изменения температуры ΔT :

$$(4) \quad c = \sqrt{\frac{C_p}{C_v} \cdot \frac{R \cdot T_0}{M}} \cdot \left(1 + \frac{\Delta T}{2 \cdot T_0} \right)$$

Если в качестве идеального газа используется сухой воздух, скорость звука, соответственно, часто выражают следующим образом:

$$(5) \quad c(T) = \left(331,3 + 0,6 \cdot \frac{\Delta T}{\text{K}} \right) \frac{\text{м}}{\text{s}}$$

$T_0 = 273,15 \text{ K} = 0^\circ\text{C}$

В этом опыте мы измерим время распространения звукового импульса t между двумя акустическими зондами, находящимися на расстоянии s друг от друга. Звуковой импульс создается резким движением диффузора громкоговорителя, управляемым импульсом напряжения с крутым фронтом. Измерение времени распространения с высоким разрешением с помощью микросекундного счетчика начинается, когда звуковой импульс достигает первого акустического зонда, и заканчивается, когда он достигает второго акустического зонда, находящегося на расстоянии s .

Нагревательный элемент используется для нагрева воздуха в трубке Кундта до 50°C для измерения зависимости времени распространения звука от температуры. Распределение температуры во время охлаждения является достаточно равномерным. Поэтому достаточно измерить температуру в одной точке трубы Кундта.

Для подачи в трубку Кундта технических газов, отличных от воздуха, можно использовать трубный соединитель.

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Скорость звука рассчитывается как частное от деления пройденного расстояния s на время распространения t :

$$c = \frac{s}{t}$$

На Рис. 2 это показано прямой, наклон которой представляет собой величину, обратную вышеуказанному отношению.

Зависимость скорости звука от температуры описывается уравнением (3) со следующими параметрами:

$$M = 28,97 \text{ г/моль}, \frac{C_p}{C_v} = \frac{7}{5}$$

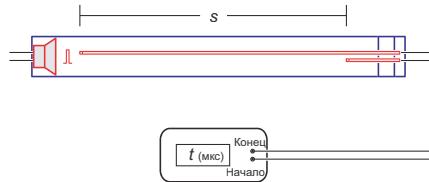


Рис. 1: Схема установки для проведения опыта

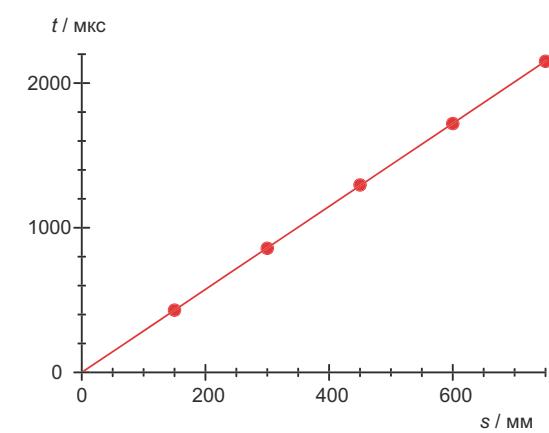


Рис. 2: Зависимость времени распространения звука в воздухе t от пройденного расстояния s при комнатной температуре

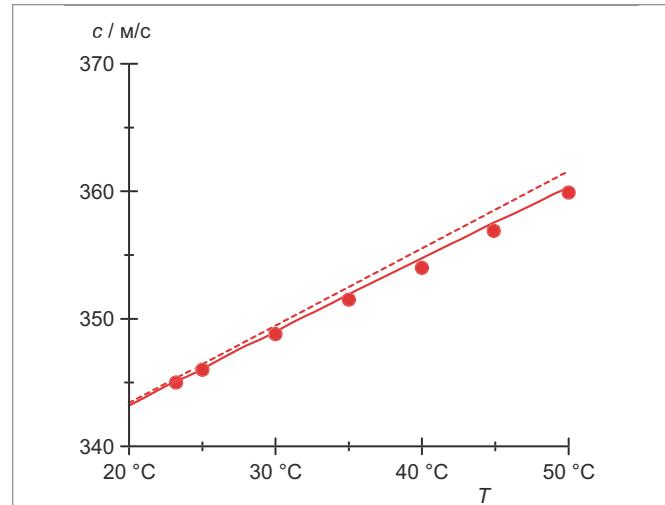


Рис. 3: Зависимость скорости звука в воздухе от температуры T .
 Сплошная линия: Результат расчета согласно уравнению (3).
 Пунктирная линия: Результат расчета согласно уравнению (5)

UE3020200 | ПРОВОДНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА



› ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

- Измерение зависимости падения напряжения U от расстояния d между точками контакта при постоянной силе тока I .
- Измерение зависимости падения напряжения U от силы тока I для фиксированного расстояния d между точками контакта.
- Определение электропроводности меди и алюминия и сравнение полученных результатов со значениями, указанными в литературе.

ЦЕЛЬ ОПЫТА

Определение электропроводности меди и алюминия

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ

Электрическая проводимость в значительной степени зависит от природы материала. Она определяется как постоянная пропорциональности плотности тока и напряженности электрического поля в исследуемом материале. В этом опыте используется четырехточечное измерение для определения силы тока и напряжения в металлических стержнях известного поперечного сечения и длины.

НЕОБХОДИМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Кол-во	Наименование	№ по каталогу
1	Теплопроводящий стержень из алюминия	1017331
1	Теплопроводящий стержень из меди	1017330
1	Источник питания постоянного тока, 1–32 В, 0–20 А (115 В, 50/60 Гц)	1012857 или
	Источник питания постоянного тока, 1–32 В, 0–20 А (230 В, 50/60 Гц)	1022289
1	Усилитель сигналов измерения U (230 В, 50/60 Гц)	1020742 или
	Усилитель сигналов измерения U (115 В, 50/60 Гц)	1020744
2	Цифровой универсальный измерительный прибор модели Е	1018832
1	Набор из 15 соединительных проводов для опытов длиной 75 см и сечением 2,5 мм ²	1002841

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ

Электрическая проводимость в значительной степени зависит от природы материала. Она определяется как постоянная пропорциональности плотности тока и напряженности электрического поля в соответствующем материале. В металлах она определяется численной плотностью и подвижностью электронов в зоне проводимости, а также зависит от температуры.

В случае длинного металлического проводника площадью поперечного сечения A и длиной d , взаимосвязь между силой тока I , протекающего в проводнике, и падением напряжения U на отрезке d этого проводника можно получить из следующей формулы:

$$(1) \quad j = \sigma \cdot E$$

j : плотность тока, E : напряженность электрического поля

Эта взаимосвязь выглядит следующим образом:

$$(2) \quad I = j \cdot A = A \cdot \sigma \cdot \frac{U}{d}$$

в опыте эта взаимосвязь используется для определения проводимости металлических стержней с помощью четырехточечного измерения. Для этого ток I подается по двум проводам, и измеряется падение напряжения U между двумя контактными точками, находящимися на расстоянии d друг от друга. Так как площадь поперечного сечения A известна, можно рассчитать проводимость σ . В этом опыте используются те же металлические стержни, что и в опыте по теплопроводности, UE2020100. Два измерительных зонда используются для измерения падения напряжения между контактными точками. Их же можно использовать для измерения температуры вдоль стержней.

ПРИМЕЧАНИЕ

Сравнив результаты измерений со значениями теплопроводности, которые получены при проведении опыта UE2020100, можно проверить справедливость закона Видемана-Франца. Он гласит, что теплопроводность металлов пропорциональна электропроводности и коэффициент пропорциональности является универсальной величиной, зависящей от температуры.

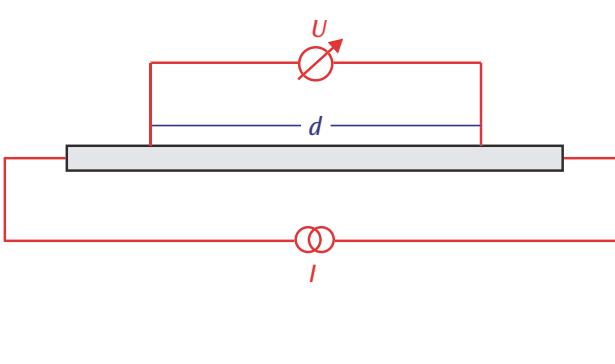


Рис. 3: Схема измерения с использованием четырех клемм

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

По измеренным значениям при постоянной силе тока I строится график зависимости U от d . Контактные напряжения между измерительными зондами и металлическим стержнем могут проявляться в том, что прямые линии графиков оказываются сдвинуты и не проходят через начало координат. Согласно уравнению (2) справедливо следующее:

$$\alpha = \frac{I}{A \cdot \sigma}.$$

Так как I и A известны, можно рассчитать проводимость:

$$\sigma = \frac{I}{A \cdot \alpha}$$

Наклон графика U - I составляет:

$$\beta = \frac{d}{A \cdot \sigma}$$

$$\text{Отсюда получаем: } \sigma = \frac{d}{A \cdot \beta}$$

Сравнив результаты со значениями, указанными в литературе для чистой меди и чистого алюминия, можно увидеть, что эти стержни сделаны не из чистых металлов, а на самом деле изготовлены из сплавов меди и алюминия.

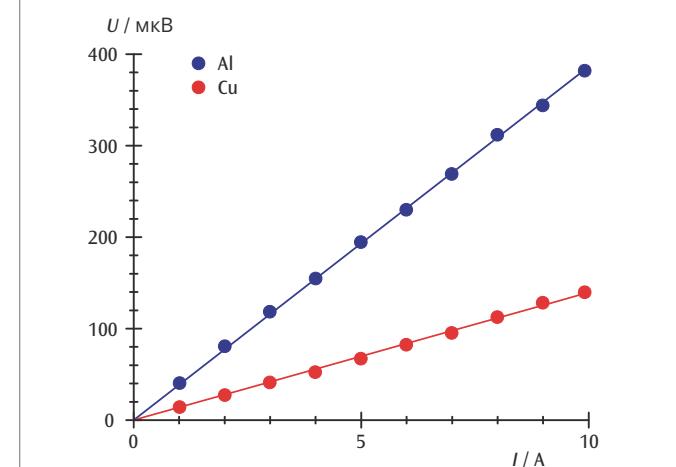


Рис. 1: График зависимости U от d для меди и алюминия

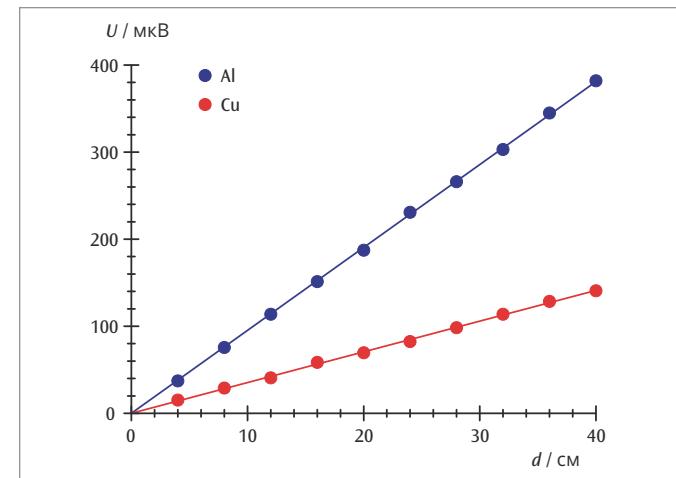


Рис. 2: График зависимости U от d для меди и алюминия

UE3020700 | ЭЛЕКТРОЛИЗ



› ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

- Получение водорода путем электролиза и измерение объема водорода V .
- Измерение электрической работы W , необходимой для получения водорода при постоянном напряжении U_0 .
- Расчет постоянной Фарадея F .

ЦЕЛЬ ОПЫТА

Определение постоянной Фарадея

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ

Постоянная Фарадея определяется путем измерения количества водорода и кислорода, образующегося в результате электролиза воды, и электрического заряда, переносимого в ходе этого процесса.

НЕОБХОДИМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Кол-во	Наименование	№ по каталогу
1	Аппарат электролиза	1002899
1	Цифровой мультиметр Р3415	1008631
1	Источник питания постоянного тока, 0–20 В, 0–5 А (230 В, 50/60 Гц)	1003312 или
	Источник питания постоянного тока, 0–20 В, 0–5 А (115 В, 50/60 Гц)	1003311
1	Набор из 15 соединительных проводов для опытов длиной 75 см и сечением 1 мм ²	1002840

Дополнительно потребуется

Серная кислота, 1 моль/л

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ

Электролиз – это разложение химического соединения под действием электрического тока. Когда это происходит, процесс протекания электрического тока сопровождается выделением вещества, и количество выделившегося вещества n пропорционально перенесенному заряду Q . Коэффициент этой пропорциональности называется постоянной Фарадея F и является универсальной постоянной окружающего мира.

Чтобы полнее и точнее охарактеризовать пропорциональность между зарядом Q и молярным количеством выделяющегося вещества n , необходимо учесть валентность выделяющихся ионов z . Тогда:

$$(1) \quad Q = F \cdot n \cdot z$$

Таким образом, постоянную Фарадея можно определить путем измерения заряда Q и молярного количества n электролитического процесса, при условии, что валентность известна. В этом опыте вода подвергается электролизу для получения определенного количества водорода и кислорода. Чтобы определить перенесенный заряд Q , измеряется электрическая работа:

$$(2) \quad W = Q \cdot U_0$$

которая выполняется при постоянном напряжении U_0 , чтобы добиться электролиза.

Молярное количество ионов водорода n_H которое выделяется при комнатной температуре T и внешнем давлении p , определяется по измеренному объему газа V_{H_2} . Однако необходимо учесть тот факт, что водород собирается в виде молекул, и на каждую собранную молекулу водорода приходится два высвобожденных иона водорода. Таким образом, из уравнения состояния идеального газа имеем:

$$(3) \quad n_H = 2 \cdot \frac{p \cdot V_{H_2}}{R \cdot T}$$

$R = 8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{Моль} \cdot \text{К}}$: универсальная газовая постоянная.

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Валентность ионов водорода $z_H = 1$. Поэтому из уравнений (1), (2) и (3) получаем следующее уравнение для определения постоянной Фарадея:

$$F = \frac{W}{U_0} \cdot \frac{R \cdot T}{2 \cdot p \cdot V_{H_2} \cdot n_H} = \frac{W}{U_0} \cdot \frac{R \cdot T}{2 \cdot p \cdot V_{H_2}}$$

Для сравнения мы можем также измерить объем полученного кислорода, V_{O_2} . Он составляет лишь половину объема водорода, потому что каждая молекула воды, подвергшаяся электролизу, высвобождает два иона водорода и один ион кислорода. Однако валентность ионов кислорода $z_O = 2$.

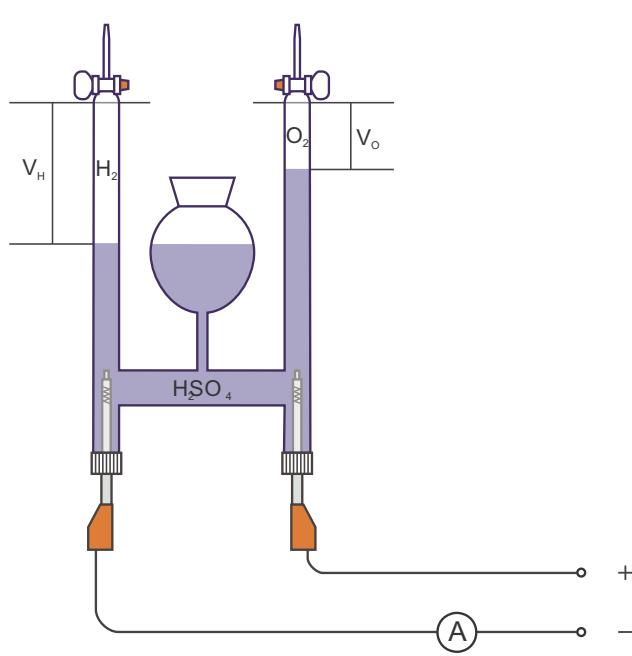


Рис. 1: Схема опыта

UE3030300 | СИЛА ЛОРЕНЦА



› ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

- Определение направления силы Лоренца.
- Измерение зависимости силы от тока.
- Измерение зависимости силы от эффективной длины проводника.
- Измерение зависимости силы от расстояния между полюсными наконечниками постоянного магнита.

ЦЕЛЬ ОПЫТА

Измерение силы, действующей на проводник с током в магнитном поле

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ

В этом опыте измеряется сила Лоренца, действующая на медный стержень с током, подвешенный в горизонтальном положении на паре вертикальных проводов (подобно качелям) и помещенный в магнитное поле. При включении тока «качели» отклоняются от вертикального положения, и силу Лоренца можно рассчитать по углу отклонения. Ток, протекающий в стержне, напряженность магнитного поля и эффективную длину проводника в магнитном поле можно изменять и измерять получаемые результаты.

НЕОБХОДИМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Кол-во	Наименование	№ по каталогу
1	Комплект оборудования для опытов по электромагнетизму	1002661
1	Постоянный магнит с регулируемым расстоянием между полюсами	1002660
1	Источник питания постоянного тока, 0–20 В, 0–5 А (230 В, 50/60 Гц)	1003312 или
	Источник питания постоянного тока, 0–20 В, 0–5 А (115 В, 50/60 Гц)	1003311
1	Пара безопасных соединительных проводов для опытов длиной 75 см, красный/синий	1017718

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ

Электроны, движущиеся в магнитном поле, отклоняются в направлении, перпендикулярном силовым линиям магнитного поля, а также перпендикулярном направлению движения. Однако отклоняющую силу, действующую на один электрон – силу Лоренца – нелегко измерить на практике, так как она очень мала, даже в случае электрона, который движется очень быстро в очень сильном магнитном поле. Иная ситуация имеет место, когда проводник с током помещаются в однородное магнитное поле. В проводнике имеется большое количество носителей заряда, которые движутся с одной и той же скоростью дрейфа v . На проводник действует сила, которая является результатом сложения составляющих силы Лоренца, действующих на все отдельные носители заряда.

В прямолинейном проводнике длиной L и площадью поперечного сечения A общее количество электронов равно:

$$(1) \quad N = n \cdot A \cdot L$$

n : количество электронов в единице объема

Если электроны движутся со скоростью дрейфа v направлении длины проводника, ток I в проводнике выражается следующим образом:

$$(2) \quad I = n \cdot e \cdot A \cdot v$$

e : элементарный заряд электрона.

Если проводник находится в магнитном поле с плотностью потока B , совокупная сила Лоренца, действующая на все «дрейфующие» электроны, выражается следующим образом:

$$(3) \quad F = N \cdot e \cdot v \times B$$

Если ось проводника перпендикулярна направлению магнитного поля, выражение (3) можно упростить следующим образом:

$$(4) \quad F = I \cdot B \cdot L$$

Тогда сила F перпендикулярна оси проводника и направлению силовых линий магнитного поля.

В этом опыте измеряется сила Лоренца F , действующая на медный стержень с током, подвешенный в горизонтальном положении на паре вертикальных проводов (подобно качелям) и помещенный в магнитное поле (см. Рис. 1). Когда включается ток, «качели» отклоняются на угол φ от вертикального положения под действием силы Лоренца F , которую можно рассчитать из уравнения (5):

$$(5) \quad F = m \cdot g \cdot \tan \varphi$$

$m = 6,23$ г, масса медного стержня.

Магнитное поле B создается постоянным магнитом и может изменяться путем изменения расстояния d между полюсными наконечниками магнита. Можно также поворачивать полюсные наконечники на 90° , изменяя таким образом ширину b в направлении проводника и, следовательно, эффективную длину L , проводника, т.е. ту его часть, которая находится в магнитном поле. Эта эффективная длина L несколько больше, чем ширина b между полюсными наконечниками, так как магнитное поле «выступает», образуя неоднородную область за краями полюсных наконечников. Протяженность этой неоднородной части поля возрастает с увеличением расстояния d между полюсными наконечниками. Хорошим приближением является следующее:

$$(6) \quad L = b + d$$

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Угол φ можно определить по длине маятника s (длине проводов, на которых подвешен медный стержень) и горизонтальному отклонению медного стержня x :

$$\frac{x}{\sqrt{s^2 - x^2}} = \tan \varphi$$

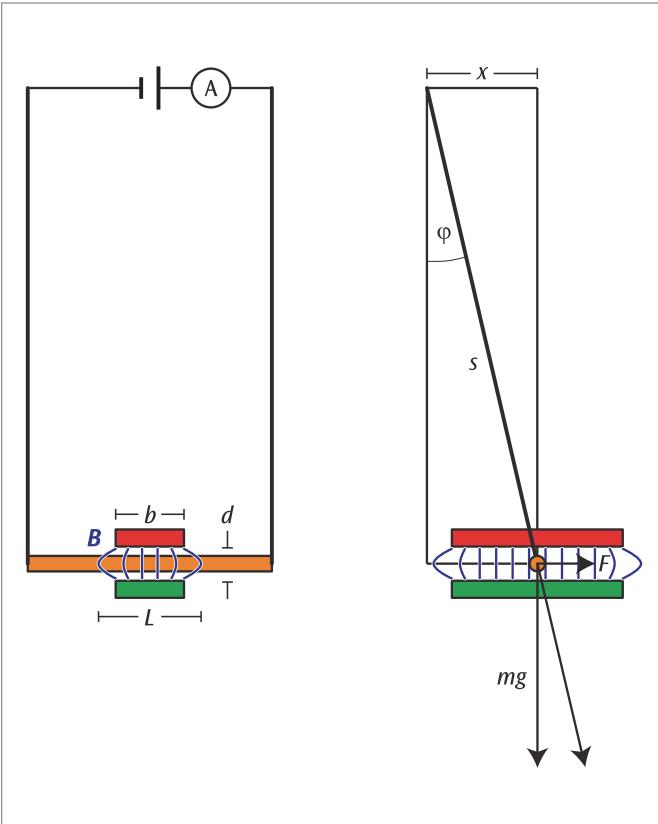


Рис. 1: Установка для постановки опыта, вид сбоку и сверху

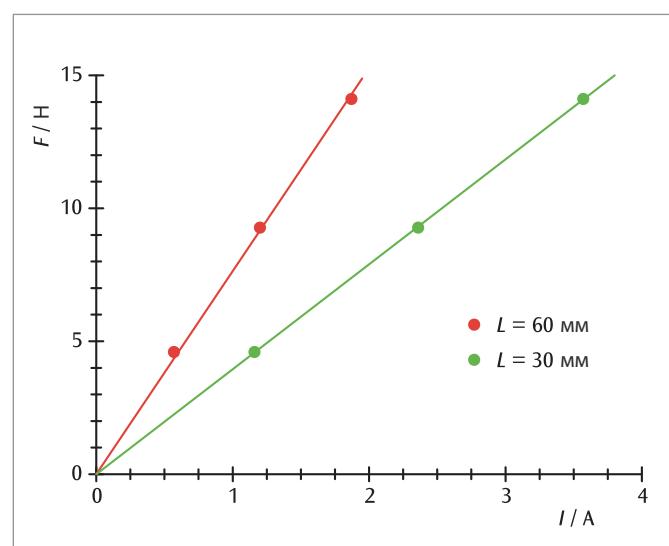


Рис. 2: Зависимость силы, действующей на проводник с током, от силы тока I при двух различных эффективных длинах проводника L . Наклоны прямых линий, проходящих через начало координат, пропорциональны L

UE3030350 | ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВЕСЫ



› ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

- Измерение силы, действующей на проводник с током, как функции величины тока.
- Измерение силы, действующей на проводник с током, как функции его длины.
- Калибровка магнитного поля.

ЦЕЛЬ ОПЫТА

Измерение силы, действующей на проводник с током, расположенный в магнитном поле

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ

Токовые весы основаны на опытах Андре Мари Ампера с электрическим током. При этом с помощью весов измеряется электродинамическая сила, иногда называемая силой Лоренца, действующая на проводник с током, расположенный в магнитном поле. В этом опыте проводник с током подвешен на жесткой системе подвеса и прикладывает равное и противоположно направленное усилие к постоянным магнитам, когда магнитным полем создается электродинамическая сила. В результате возникает очевидное изменение веса постоянного магнита.

НЕОБХОДИМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Кол-во	Наименование	№ по каталогу
1	Набор оборудования для токовых весов	1021822
1	Электронные весы Scout SKX на 420 г	1020859
1	Источник питания постоянного тока, 0–20 В, 0–5 А (230 В, 50/60 Гц)	1003312 или
	Источник питания постоянного тока, 0–20 В, 0–5 А (115 В, 50/60 Гц)	1003311
1	Стержень из нержавеющей стали, длина 250 мм	1002933
1	Основание стойки, треножник, размер 150 мм	1002835
1	Двухполюсный переключатель	1018439
3	Пара соединительных проводов для опытов, 75 см	1002850

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ

Электрические весы основаны на экспериментах **Андре Мари Ампера** с электрическим током. При этом с помощью весов измеряется сила, действующая на проводник с током в магнитном поле. В опыте современными электронными точными весами взвешивается постоянный магнит.

Измеренный вес меняется в соответствии с третьим законом Ньютона, когда электродинамическая сила действует на проводник с током при его введении в магнитное поле. На весах находится постоянный магнит, создающий горизонтальное магнитное поле B . В этом устройстве горизонтальный проводник длиной L с током, подвешенный на жесткой перекладине, погружается вертикально в магнитное поле.

Электродинамическая сила магнита действует на проводник:

$$(1) \quad F_L = N \cdot e \cdot v \times B$$

e : элементарный заряд

N : общее количество электронов, участвующих в электропроводимости

Средняя дрейфовая скорость v тем больше, чем больше ток I , протекающий через проводник:

$$(2) \quad I = n \cdot e \cdot A \cdot v$$

n : количество электронов, участвующих в электропроводимости,
 A : поперечное сечение проводника

Из

$$(3) \quad N = n \cdot A \cdot L$$

L : длина проводника

получаем:

$$(4) \quad F_L = I \cdot L \cdot e \times B$$

или

$$(5) \quad F_L = I \cdot L \cdot B$$

поскольку единичный вектор e , направленный к проводнику, расположен перпендикулярно магнитному полю. В соответствии с третьим законом Ньютона, равная и противоположно направленная сила F действует на постоянный магнит. В зависимости от знака веса G постоянного магнита, измеренный весами, увеличивается или уменьшается. Благодаря функции тарировки весов вес G можно электронно сместить так, что весы немедленно покажут противоположно направленную силу F .

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Было показано, что зависимость электродинамической силы, или силы Лоренца, оттока точно описывается прямой линией, проходящей через начало координат (Рис. 2). Это не так для зависимости от длины проводника (Рис. 3), в связи проявлением краевых эффектов на концах проводника. Магнитное поле полностью собранного постоянного магнита рассчитывается по линейным градиентам $a_2 = B/L$ на Рис. 2 и $a_3 = B/I$ на Рис. 3.

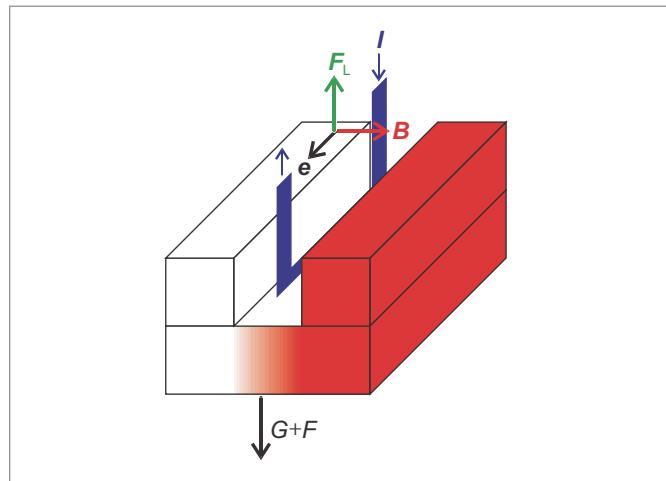


Рис. 1: Схематическое изображение электродинамической силы F_L , действующей на проводник с током, и общей силы $G + F$, действующей на весы

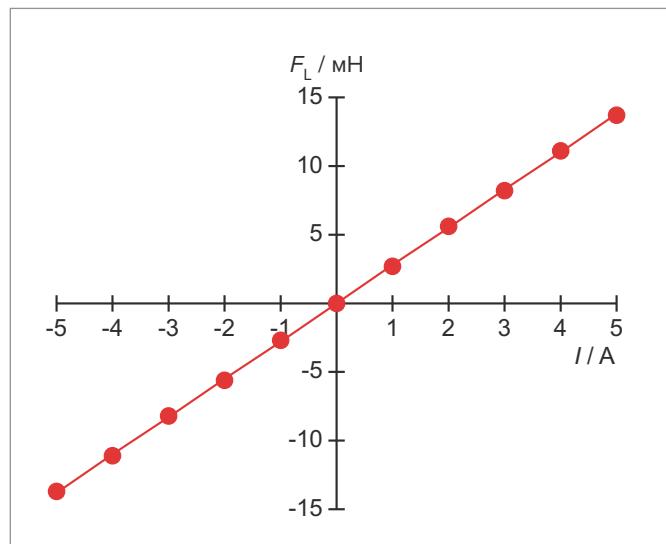


Рис. 2: Сила F_L как функция силы тока I

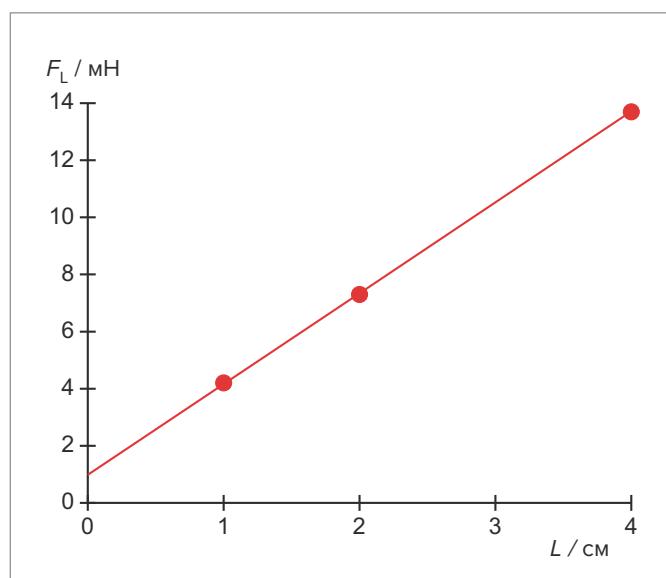


Рис. 3: Сила F_L как функция длины проводника L

UE3030700 | МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ



› ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

- Измерение угла поворота стрелки компаса, которая изначально занимает положение, параллельное горизонтальной составляющей магнитного поля Земли, когда налагается второе горизонтальное магнитное поле, создаваемое с помощью пары катушек Гельмгольца.
- Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли.
- Измерение наклонения и вертикальной составляющей и расчет общей величины магнитного поля Земли.

ЦЕЛЬ ОПЫТА

Определение горизонтальной и вертикальной составляющих магнитного поля Земли

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ

В этом опыте определяется наклонение и величина магнитного поля Земли, а также его горизонтальная и вертикальная составляющие в точке проведения измерений. Горизонтальную составляющую магнитного поля Земли можно найти по повороту стрелки компаса, если на нее воздействует дополнительное магнитное поле, создаваемое парой катушек Гельмгольца. Измеряя угол наклонения, можно также определить вертикальную составляющую и рассчитать общую величину магнитного поля Земли.

НЕОБХОДИМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Кол-во	Наименование	Nº по каталогу
1	Катушки Гельмгольца размером 300 мм	1000906
1	Источник питания постоянного тока, 0–20 В, 0–5 А (230 В, 50/60 Гц)	1003312 или
	Источник питания постоянного тока, 0–20 В, 0–5 А (115 В, 50/60 Гц)	1003311
1	Цифровой универсальный измерительный прибор Р1035	1002781
1	Прибор для измерения магнитного наклонения и склонения	1006799
1	Реостат 100 Ом	1003066
1	Набор из 15 безопасных соединительных оводов для опытов длиной 75 см	1002843

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ

Вокруг Земли существует магнитное поле, создаваемое так называемым геодинамическим эффектом. Вблизи поверхности Земли это поле напоминает поле магнитного диполя, при этом силовые линии поля выходят из южного полюса планеты и входят в северный полюс. Угол между фактическим магнитным полем Земли и горизонтальной плоскостью в данной точке на поверхности Земли называется наклонением. Горизонтальная составляющая поля Земли примерно соответствует линии, проходящей между северным и южным географическими полюсами. Поскольку земная кора сама по себе обладает магнетизмом, имеется некоторая локальная разница между ними, которая называется «склонением».

В этом опыте проводится измерение наклонения и абсолютной величины магнитного поля Земли, а также его горизонтальной и вертикальной составляющих в точке проведения измерений.

Справедливы следующие соотношения:

$$(1) \quad B_v = B_h \cdot \tan \alpha$$

α : наклонение

B_h : горизонтальная составляющая,
 B_v : вертикальная составляющая

и

$$(2) \quad B = \sqrt{B_h^2 + B_v^2}$$

Поэтому достаточно определить значения B_h и α , так как другие величины можно просто рассчитать.

Наклонение определяется с помощью магнитной стрелки. Чтобы получить горизонтальную составляющую B_h , магнитная стрелка выравнивается в горизонтальной плоскости таким образом, что ее конец указывает на 0° , когда она параллельна горизонтальной составляющей 0° . Дополнительное горизонтальное магнитное поле B_{HH} , которое перпендикулярно B_h , создается парой катушек Гельмгольца, и это поле заставляет стрелку компаса поворачиваться на угол β . Согласно Рис. 1, справедливо следующее:

$$(3) \quad \frac{B_{HH}}{B_h} = \tan \beta$$

Чтобы повысить точность, это измерение проводится для нескольких углов β .

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Из выражения (3) можно получить следующее:

$$B_{HH} = B_h \cdot \tan \beta.$$

Тогда горизонтальная составляющая B_h равна наклону линии, проходящей через точки зависимости B_{HH} от $\tan \alpha$. Магнитное поле катушек Гельмгольца B_{HH} можно легко определить. Внутри пары катушек оно в значительной степени однородно и пропорционально току I , протекающему через любую из катушек:

$$B_{HH} = k \cdot I \quad \text{где} \\ k = \left(\frac{4}{5} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot \frac{N}{R}$$

$N = 124$: количество витков, $R = 147,5$ мм: радиус

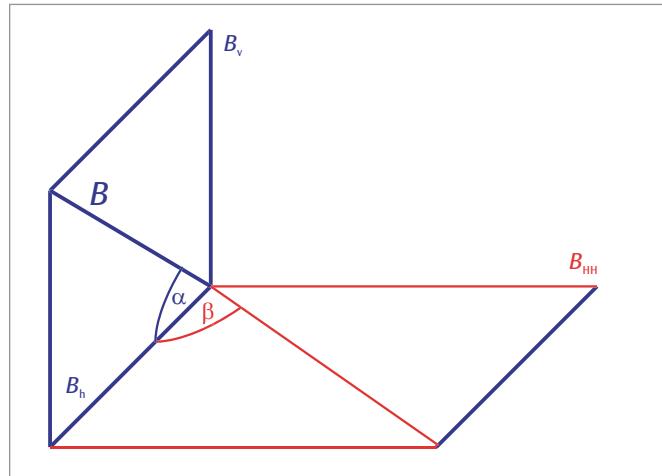


Рис. 1: Схема составляющих магнитного поля, наблюдаемых в опыте, и определение соответствующих углов

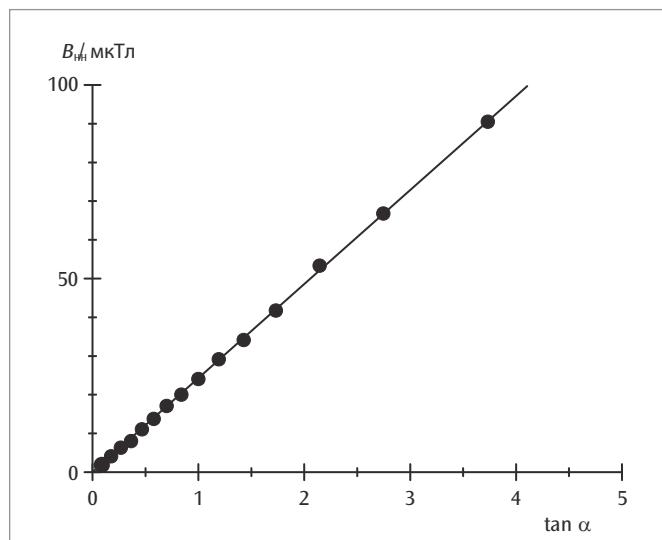
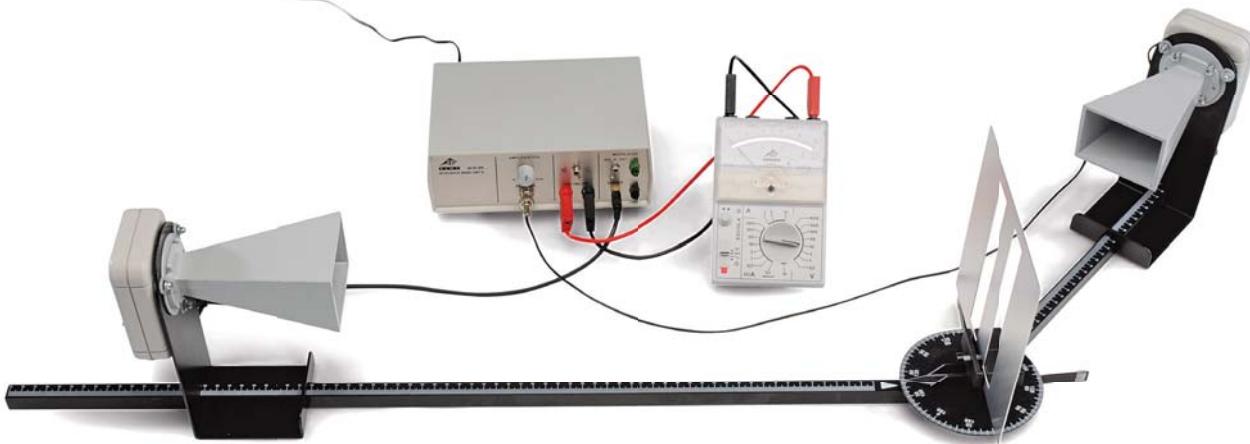


Рис. 2: B_{HH} от $\tan \alpha$ – график для определения горизонтальной составляющей магнитного поля Земли

UE3060300 | ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВОЙ ОПТИКИ С ПОМОЩЬЮ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ



› ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

- Выполните поточечное измерение интенсивности волн СВЧ-диапазона при их дифракции на паре щелей.
- Определите положения максимумов различных порядков дифракции.
- Определите длину волны при известном расстоянии между щелями.
- Исследуйте поляризацию излучаемых СВЧ-волн и измените ее.

ЦЕЛЬ ОПЫТА

Демонстрация и исследование явлений интерференции, дифракции и поляризации с помощью волн СВЧ

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ

С помощью волн СВЧ-диапазона можно провести ряд опытов по интерференции, дифракции и поляризации, которые помогают понять эти явления для видимого света. Можно использовать дифрагирующие объекты и поляризационные решетки, обладающие структурой, которую можно рассмотреть невооруженным глазом и легко понять. В случае дифракции на паре щелей максимальную интенсивность можно наблюдать в том месте, куда не могло бы попасть излучение, распространяющееся от источника волн по прямой.

НЕОБХОДИМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Кол-во	Наименование	№ по каталогу
1	Набор оборудования СВЧ-диапазона 9,4 ГГц (230 В, 50/60 Гц)	1009951 или
	Набор оборудования СВЧ-диапазона 10,5 ГГц (115 В, 50/60 Гц)	1009950
1	Универсальный аналоговый измерительный прибор ESCOLA 30	1013526
1	Пара безопасных соединительных проводов для опытов, 75 см, красный/голубой	1017718

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ

В волновой оптике свет рассматривается как излучение, состоящее из поперечных электромагнитных волн. Этим объясняются явления интерференции, дифракции и поляризации. СВЧ-волны тоже являются электромагнитными волнами и им присущи те же явления, однако длины волн в этом случае намного больше, чем у видимого света. Следовательно, опыты по волновой оптике можно также поставить, используя волны СВЧ-диапазона и дифрагирующие объекты и поляризационные решетки, внутреннее строение которых можно легко рассмотреть невооруженным глазом.

В этом опыте исследуется дифракция СВЧ-волн с длиной волны λ на паре щелей, расстояние d между которыми составляет несколько сантиметров. Измерьте характерное распределение интенсивности излучения при дифракции на паре щелей (см. Рис. 1) с максимумами на углах α_m , удовлетворяющих условию:

$$(1) \quad \sin\alpha_m = m \cdot \frac{\lambda}{d}, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Очевидно, максимальная интенсивность наблюдается тогда, когда чувствительный элемент располагается строго позади полосы между щелями ($\alpha = 0, m = 0$), где он не мог бы зафиксировать излучение, распространяющееся по прямой линии от источника. Это явление можно объяснить результатом интерференции парциальных лучей от этих двух щелей, и оно ясно указывает на волновую природу СВЧ-излучения.

Поворачивая чувствительный элемент вокруг оси, совпадающей с направлением на источник, можно убедиться в линейной поляризации излучаемых волн СВЧ. Когда плоскости источника излучения и чувствительного элемента повернуты друг относительно друга на угол 90° , наблюдаемая интенсивность излучения падет до нуля. Если затем одну из поляризационных решеток поместить на пути луча под углом 45° к другой решетке, чувствительный элемент вновь обнаруживает излучение, хотя и с меньшей, чем до этого, амплитудой. Решетка пропускает ту составляющую вектора электрического поля падающих волн СВЧ, которая колеблется параллельно направлению поляризационной. Таким образом можно измерить составляющую, колеблющуюся в направлении, параллельном плоскости чувствительного элемента.

ПРИМЕЧАНИЕ

Опыты по поглощению, отражению, преломлению и поляризации электромагнитных волн СВЧ-диапазона можно выполнить с помощью одного и того же оборудования.

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Измерьте углы дифракции α_m различных максимумов интенсивности и постройте график зависимости $\sin\alpha_m$ от порядка дифракции m . Результаты измерений в ходе опыта оказываются лежащими на прямой линии, проходящей через начало координат, наклон которой соответствует отношению λ/d .

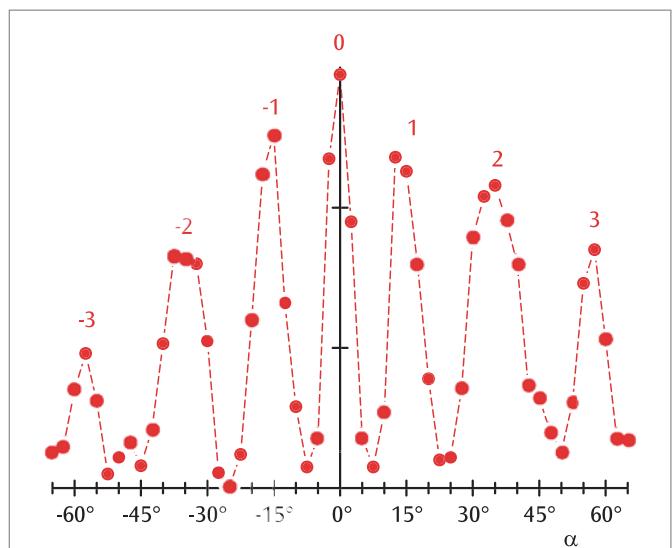


Рис. 1: Распределение интенсивности излучения в результате дифракции СВЧ-волн на паре щелей

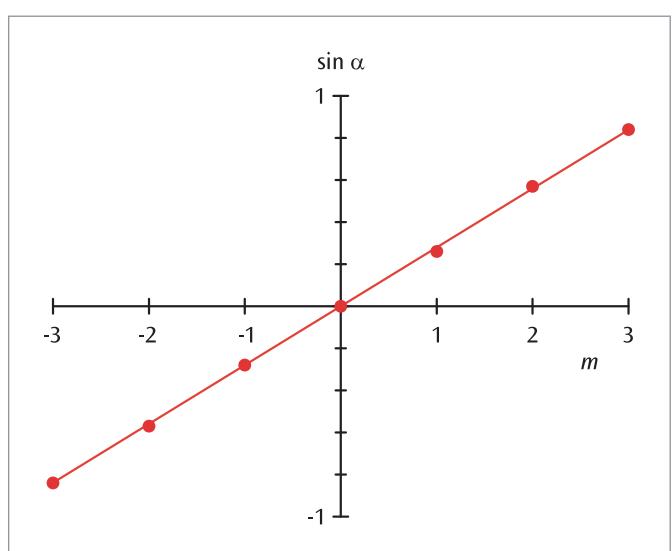


Рис. 2: Зависимость положений максимумов интенсивности от порядка дифракции m

UE3070100 | ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЙ ДИОД



› ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

- Регистрация характеристики электровакуумного диода при трех различных напряжениях катода накала.
- Определение областей объемного заряда и насыщения.
- Подтверждение закона Шоттки-Ленгмюра.

ЦЕЛЬ ОПЫТА

Регистрация характеристики электровакуумного диода

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ

В электровакуумном диоде свободные электроны создают электрический ток между катодом накала и анодом, если между катодом и анодом приложить положительное напряжение. С увеличением напряжения ток возрастает, пока не достигает точки насыщения. Однако если напряжение отрицательно, ток равен нулю.

НЕОБХОДИМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Кол-во	Наименование	№ по каталогу
1	Диод модели S *	1000613
1	Держатель электровакуумных приборов модели S	1014525
1	Источник питания постоянного тока с напряжением 0–500 В (230 В, 50/60 Гц)	1003308 или
	Источник питания постоянного тока с напряжением 0–500 В (115 В, 50/60 Гц)	1003307
1	Универсальный аналоговый измерительный прибор АМ50	1013527
1	Набор из 15 безопасных соединительных проводов для опытов длиной 75 см	1002843

Относительно версии с нашими электронными трубками D запрашивайте ценовое предложение.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ

Электровакуумный диод представляет собой стеклянную трубку, из которой выкачен воздух. В ней находятся два электрода – катод накала, который испускает электроны благодаря термоэлектрическому эффекту, и анод (см. Рис. 1). Положительное напряжение между катодом и анодом создает ток благодаря переносу этих вылетевших электронов от катода к аноду. Если напряжение низкое, анодный ток отсутствует, так как заряд вылетевших электродов вокруг катода, объемный заряд, экранирует поле самого катода. По мере увеличения напряжения на аноде, силовые линии поля глубже проникают в пространство вокруг катода и анодный ток возрастает. Он продолжает расти, пока пространство вокруг катода не потеряет весь заряд и анодный ток не достигнет уровня насыщения. Однако если напряжение имеет достаточную отрицательную величину, электроны вообще не могут достичь анода, и в этом случае анодный ток равен нулю.

Зависимость анодного тока I_A от анодного напряжения U_A называется вольтамперной характеристикой диода (см. Рис. 2). Различают три участка характеристики: область обратного смещения (a), область объемного заряда (b) и область насыщения (c). В области обратного смещения на аноде имеется отрицательное напряжение по отношению к катоду. В этом случае электрическое поле препятствует движению электронов.

В области пространственного заряда анодный ток зависит от напряжения на аноде в соответствии с законом Шопки-Ленгмюра:

$$(1) \quad I_A \sim U_A^{\frac{3}{2}}$$

В области насыщения анодный ток зависит от температуры катода. Повышенное напряжение накала U_F можно увеличивать анодный ток.

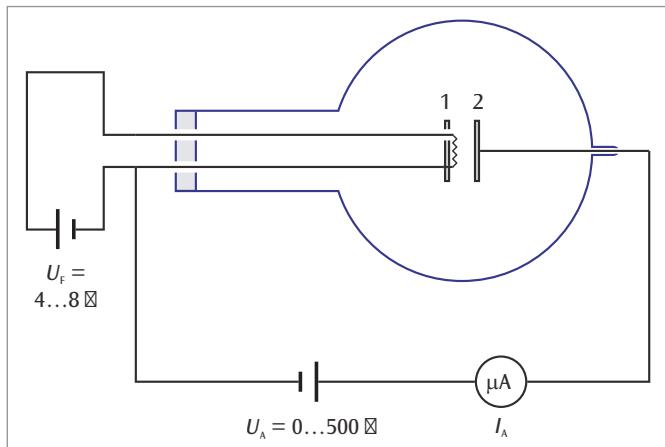


Рис. 1: Электрическая схема для регистрации характеристики электровакуумного диода.

1: катод, 2: анод

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Область объемного заряда:

Поскольку электроны вылетают из катода с кинетической энергией $E_{\text{кин}} > 0$, ток течет в аноде, только пока напряжение на аноде не приобретает достаточно большой отрицательной величины, не позволяющей даже самым быстрым из вылетевших электронов преодолеть поле, чтобы достичь анода.

Область обратного смещения:

При слабом поле не все электроны, вылетевшие из катода, переносятся на анод. Они занимают пространство вокруг катода в виде облака, создавая отрицательный объемный заряд. Если напряжение низкое, силовые линии поля анода достигают только электронов в облаке, а не самого катода. Последний, таким образом, оказывается экранирован от поля анода. Только когда напряжение возрастает, силовые линии поля проникают дальше в катод, вызывая увеличение анодного тока. Это увеличение продолжается, пока объемный заряд вокруг катода не рассеивается, после чего анодный ток входит в насыщение.

Область насыщения:

В области насыщения анодный ток вообще не зависит от напряжения на аноде. Тем не менее, его можно увеличить путем увеличения количества электронов, вылетающих из катода в единицу времени. Этого можно добиться путем повышения температуры катода. Поэтому ток насыщения зависит от напряжения накала.

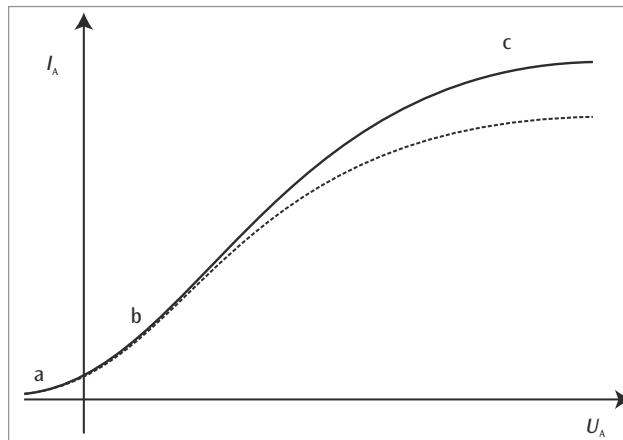


Рис. 2: Характеристика электровакуумного диода.
a: область обратного смещения, b: область объемного заряда, c: область насыщения

UE4030300 | БИПРИЗМА ФРЕНЕЛЯ



› ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

- Получение двух мнимых когерентных источников света из одного точечного источника при помощи бипризмы Френеля.
- Наблюдение картины интерференции двух разделенных лучей от мнимых источников света.
- Определение длины волны света гелий-неонового лазера по расстоянию между интерференционными кольцами.

ЦЕЛЬ ОПЫТА

Получение интерференции двух лучей с помощью бипризмы Френеля

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ

Преломление расходящегося светового луча бипризмой разделяет луч на две части, которые будут интерферировать друг с другом, поскольку являются когерентными. Длину волны света, используемого в этом опыте, можно определить с помощью расстояния между мнимыми источниками света и расстояния между соседними интерференционными кольцами.

НЕОБХОДИМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Кол-во	Наименование	№ по каталогу
1	Бипризма Френеля	1008652
1	Подставка для призм на ножке	1003019
1	Гелий-неоновый лазер	1003165
1	Ахроматический объектив 10x/0,25	1005408
1	Выпуклая линза на ножке, $f = +200$ мм	1003025
3	Рейтер модели D, 90/50	1002635
1	Прецизионная оптическая скамья модели D длиной 50 см	1002630
1	Проекционный экран	1000608
1	Тяжелая круглая опора весом 1000 г	1002834
1	Измерительная рулетка, 2 м	1002603

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ

В одном из своих опытов по интерференции **Огюстен Жан Френель** использовал бипризму, чтобы получить интерференцию двух лучей. Он разделил расходящийся луч света на две части, используя бипризму для их преломления. В результате были получены два луча, которые вели себя так, как если бы они исходили из двух когерентных источников, и которые в силу этого интерферировали друг с другом. Наблюдая изображение на экране, Френель смог увидеть ряд пиков интенсивности света, расстояние между которыми было одинаково.

Наличие или отсутствие пика интенсивности зависит от разности Δ путей, проходимых каждым из разделенных лучей света. Если источник света находится на большом расстоянии L от экрана, с достаточно хорошим приближением справедливо следующее:

$$(1) \quad \Delta = A \cdot \frac{x}{L}$$

Здесь X обозначает координату точки, наблюданной на экране, в направлении перпендикулярном оси симметрии. A – расстояние между двумя мнимыми источниками света, которое еще предстоит определить. Пики интенсивности возникают точно в тех точках, где разница путей, проходимых светом, кратна длине волны λ :

$$(2) \quad \Delta_n = n \cdot \lambda, \text{ где } n = 0, 1, 2, \dots$$

Сравнение (1) и (2) показывает, что пики будут в точках с координатами:

$$(3) \quad x_n = n \cdot D$$

Они также должны находиться на одинаковом расстоянии D друг от друга. Также справедливо следующее соотношение:

$$(4) \quad \lambda = A \cdot \frac{D}{L}$$

Уравнение (4) можно рассматривать как выражение для определения длины волны λ используемого света. Оно всегда применимо в случае интерференции двух лучей.

Однако остается еще установить, как можно измерить расстояние между двумя мнимыми источниками A . В этом может помочь простая оптическая установка, в которой изображение двух источников получается на экране с помощью собирающей линзы, так что расстояние B между изображениями двух источников можно измерить (см. Рис. 2). К нему применимо следующее выражение:

$$(5) \quad A = B \cdot \frac{a}{b}$$

a : расстояние до предмета, b : расстояние до изображения.

ПРИМЕЧАНИЕ

Вместо бипризмы для получения двух мнимых источников света можно также использовать зеркало Френеля (1002649). Соответствующий перечень принадлежностей содержится в описании опыта UE4030320.

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

В этом опыте в качестве источника света используется лазер. Его луч разделяется линзой. Положение источника света точно не известно, поэтому расстояние до предмета a также не известно. Таким образом, его необходимо рассчитать по фокусному расстоянию f линзы и легко измеряемому расстоянию b , используя закон формирования изображений: $\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}$

Следовательно, справедливо следующее выражение:

Расстояния D и L можно измерить напрямую. Это означает, что теперь известны все переменные для определения длины волны с помощью уравнения (3).

$$A = a \cdot \frac{B}{b} = \frac{f \cdot B}{b - f}$$

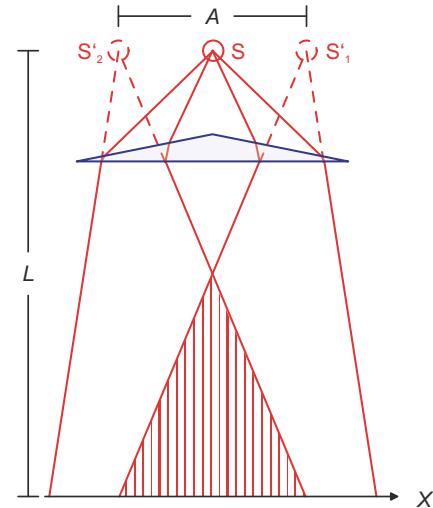


Рис. 1: Схема прохождения света через бипризму

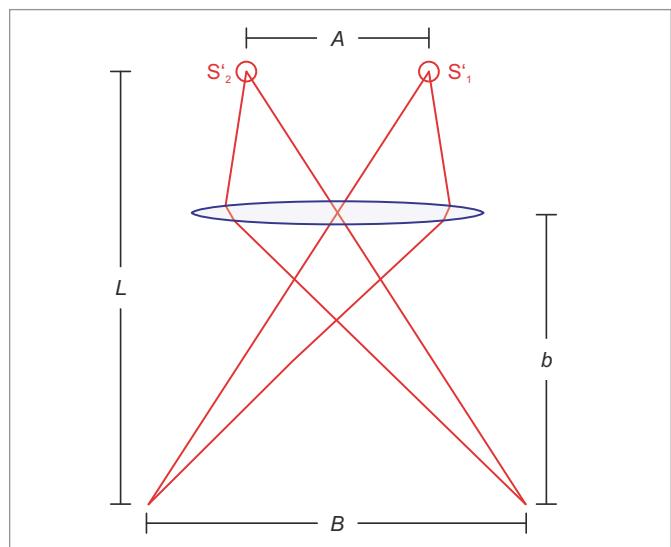


Рис. 2: Схема лучей для получения изображения двух мнимых источников на экране

UE4040100 | ЗАКОН МАЛЮСА



› ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

- Измерение зависимости интенсивности света I , проходящего через поляризационный фильтр, от угла поворота фильтра.
- Проверка закона Малюса.

ЦЕЛЬ ОПЫТА

Проверка закона Малюса для линейно поляризованного света

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ

Закон Малюса описывает зависимость интенсивности I поляризованного света с начальной интенсивностью I_0 после его прохождения через фильтр-анализатор от угла поворота фильтра. Интенсивность света измеряется с помощью датчика света.

НЕОБХОДИМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Кол-во	Наименование	№ по каталогу
1	Прецизионная оптическая скамья модели D длиной 50 см	1002630
4	Передвижное крепление оптической скамьи модели D, 90/50	1002635
1	Галогенная лампа для опытов	1020630
1	Датчик света, три диапазона	1021502
1	WiLab *	1022284
1	Держатель датчика света	1022269
2	Поляризационный фильтр на ножке	1008668
1	Датчик света	1021514

Дополнительно требуется

- 1 Лицензия Инструктора 7

* Варианты замены: 1 VinciLab 1021477

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ

Свет, будучи поперечной волной, может быть поляризованным, например, после прохождения его через поляризационный фильтр. В волне линейно поляризованного света и электрическое поле E , и магнитное поле B колеблются в определенных плоскостях. Ориентация направления колебаний электрического поля называется направлением поляризации.

В этом опыте свет пропускается через два фильтра, поляризатор и анализатор, которые установлены под углом φ друг к другу. Поляризатор пропускает только линейно поляризованную составляющую света. Предположим, напряженность электрического поля этой составляющей имеет амплитуду E_0 . Тогда амплитуда составляющей после прохождения через анализатор определяется выражением:

$$(1) \quad E = E_0 \cdot \cos\varphi$$

Это мера количества света, которое может пройти через анализатор. Интенсивность этого света соответствует квадрату напряженности электрического поля.

Тогда интенсивность света после анализатора выражается следующим образом:

$$(2) \quad I = I_0 \cdot \cos^2\varphi$$

где I_0 – интенсивность света после прохождения поляризатора. Уравнение (2) является выражением закона Малюса. Оно проверяется в опыте путем измерения интенсивности света с помощью датчика света. В этом опыте интенсивность света, измеряемая для угла $\varphi = 90^\circ$ должна быть равна интенсивности освещения окружающей среды. Это значение следует вычесть из всех других значений интенсивности, полученных при измерении.

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

После того, как интенсивность освещения окружающей среды вычтена из всех результатов измерения интенсивности, по этим результатам строится график их зависимости от φ . Этот график должен описываться уравнением (2).

Затем строится другой график – зависимость интенсивности I от $\cos^2\varphi$. В этом случае результаты измерений оказываются лежащими на прямой линии, проходящей через начало координат и имеющей наклон I_0 .

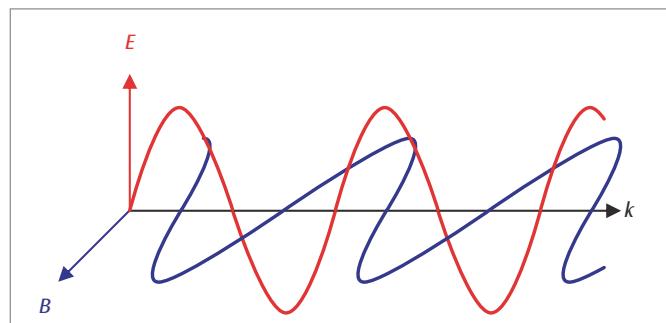


Рис. 1: Иллюстрация определения направления поляризации

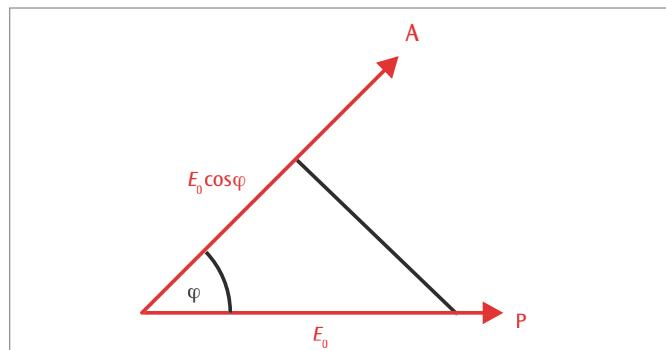


Рис. 2: Иллюстрация расчета электрического поля после анализатора

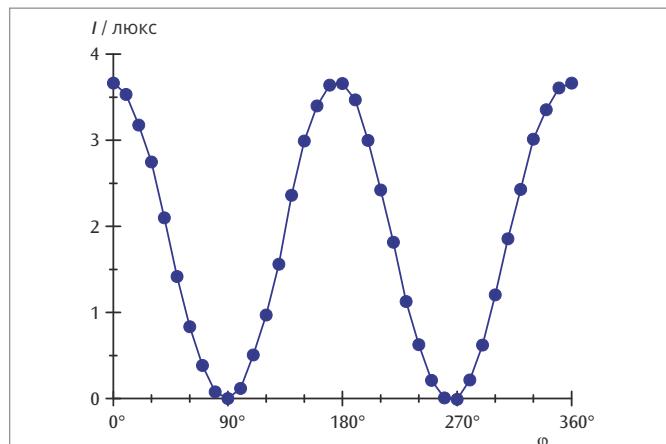


Рис. 3: Зависимость интенсивности света I от угла φ между поляризатором и анализатором

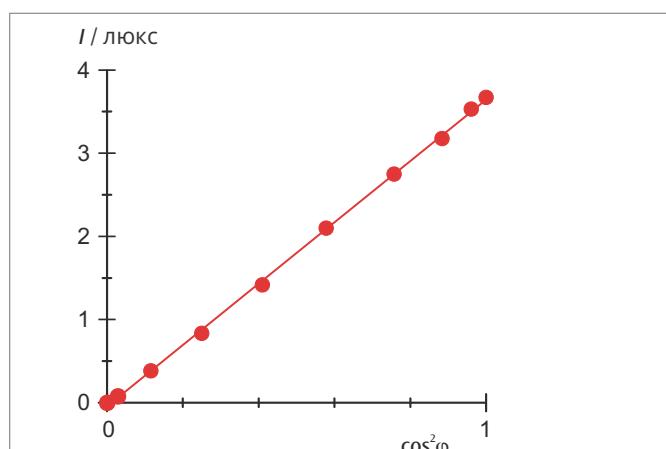
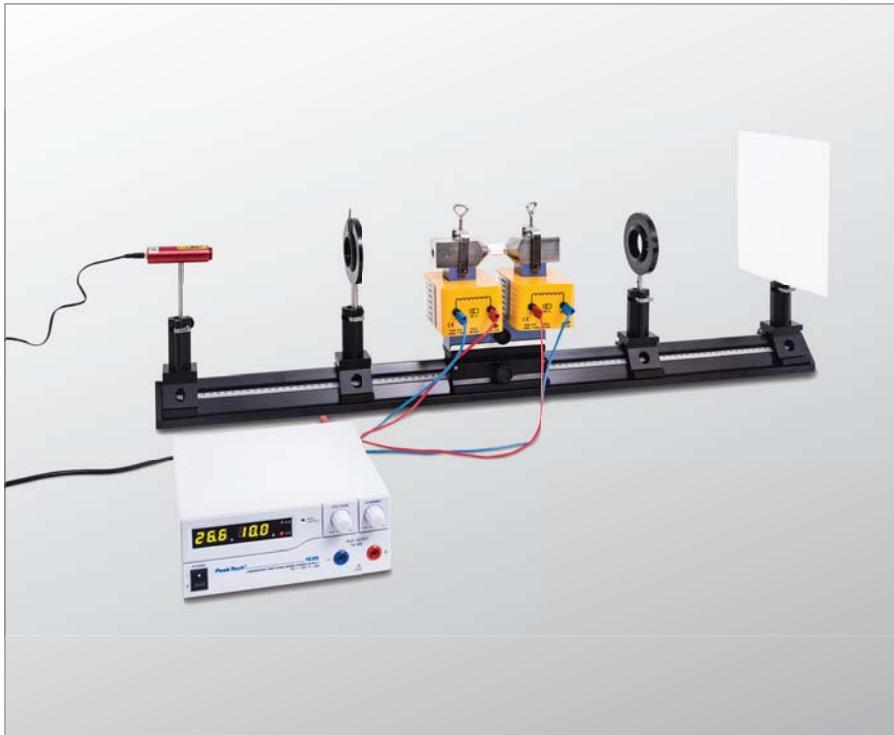


Рис. 4: Зависимость интенсивности света I от $\cos^2\varphi$

UE4040600 | ЭФФЕКТ ФАРАДЕЯ



ЦЕЛЬ ОПЫТА

Демонстрация эффекта Фарадея и определение постоянной Верде для флинтгласса

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ

Оптически изотропные, прозрачные, немагнитные материалы становятся оптически активными в магнитном поле. Они поворачивают плоскость поляризации линейно поляризованного света, проходящего сквозь них в направлении магнитного поля, потому что вращающимся по часовой стрелке и против часовой стрелки составляющим света, имеющего круговую поляризацию, требуется разное время, чтобы пройти через материал. Этот эффект известен как эффект Фарадея.

В данном опыте эффект Фарадея демонстрируется во флинтглasse. Этот особый вид стекла обладает высокой степенью очень равномерного оптического рассеяния. Характер зависимости этой частоты от показателя преломления n с достаточно высокой точностью аппроксимируется формулой Коши.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

- Демонстрация эффекта Фарадея во флинтглasse.
- Измерение угла поворота плоскости поляризации в магнитном поле.
- Определение постоянной Верде для красного и зеленого света.
- Определение коэффициента Коши b для показателя преломления.

НЕОБХОДИМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Кол-во	Наименование	№ по каталогу
1	Прецизионная оптическая скамья модели D длиной 100 см	1002628
4	Передвижное крепление оптической скамьи модели D, 90/50	1002635
1	Оптическое основание модели D	1009733
1	Красный лазерный диод	1003201 или
	Красный лазерный диод 115 В	1022208
1	Зеленый лазер	1003202
2	Поляризационный фильтр на ножке	1008668
1	Проекционный экран	1000608
1	Сердечник трансформатора модели D	1000976
2	Пара полюсных наконечников	1000978
2	Катушка модели D, 900 витков	1012859
1	Параллелепипед из флинтгласса для изучения эффекта Фарадея	1012860
1	Принадлежности для опыта по эффекту Фарадея	1012861
1	VinciLab	1021477
1	Датчик магнитного поля, аксиальный/тангенциальный +/- 2000 мТл	1021766
1	Тяжелая круглая опора весом 1000 г	1002834
1	Универсальный зажим с зажимными губами	1002833
1	Набор из 15 соед. проводов для опытов длиной 75 см и сечением 1 мм ²	1002840
1	Источник питания постоянного тока, 1–32 В, 0–20 А (230 В, 50/60 Гц)	1012857
	Источник питания постоянного тока, 0–40 В, 0–40 А (115 В, 50/60 Гц)	1022289

Дополнительно требуется

1	Лицензия Инструктора 7
---	------------------------

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ

Оптически изотропные, прозрачные, немагнитные материалы становятся оптически активными в магнитном поле. Они поворачивают плоскость поляризации линейно поляризованного света, проходящего сквозь них в направлении магнитного поля, потому что вращающимся по часовой стрелке и против часовой стрелки составляющим света, имеющего круговую поляризацию, требуется разное время, чтобы пройти через материал. Этот эффект известен как эффект Фарадея.

Разное время, которое требуется поляризованному свету для того, чтобы пройти через вещество, можно объяснить с точки зрения изменения частоты, которое испытывает поляризованный свет в магнитном поле, используя для этого простую модель. Свет с поляризацией, вращающейся по часовой стрелке, претерпевает небольшое увеличение частоты f на величину, называемую частотой Лармора

$$(1) \quad f_L = \frac{e}{4\pi \cdot m_e} \cdot B$$

$e = 1,6021 \cdot 10^{-19}$ As: заряд электрона

$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг: масса электрона в состоянии покоя

Частота света с поляризацией, вращающейся против часовой стрелки, уменьшается на такую же величину, т.е.

$$(2) \quad f_{\pm} = f \pm f_L$$

Эти отличающиеся частоты можно связать с отличающимися показателями преломления материалов. Это означает, что скорости распространения волн в материале также отличаются.

На основании этих выводов становится возможным определение поворота плоскости поляризации в оптически активных материалах следующим образом:

$$(3) \quad \varphi = 2\pi \cdot f \cdot (t_+ - t_-) = 2\pi \cdot f \cdot \frac{d}{c} \cdot (n(f_+) - n(f_-))$$

d : длина образца,

$c = 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$: скорость света

Поскольку частота Лармора f_L намного меньше f , из этого следует, что:

$$(4) \quad \varphi = 2\pi \cdot f \cdot \frac{d}{c} \cdot \frac{dn}{df} \cdot 2 \cdot f_L \\ = f \cdot \frac{dn}{df} \cdot \frac{e}{m_e \cdot c} \cdot B \cdot d$$

Угол поворота φ также пропорционален магнитному полю B и длине образца материала d , через который проходит свет:

$$(5) \quad \varphi = V \cdot B \cdot d$$

Коэффициент пропорциональности:

$$(6) \quad V = \frac{e}{m_e \cdot c} \cdot f \cdot \frac{dn}{df}$$

Называется постоянной Верде и зависит от рассеяния света в материале, через который он проходит, и от частоты f этого света.

В этом опыте проводятся измерения эффекта Фарадея во флинтглasse (F_2). Этот особый вид стекла обладает высокой степенью очень равномерного оптического рассеяния. Характер зависимости этой частоты от показателя преломления n с достаточно высокой точностью аппроксимируется формулой Коши:

$$(7) \quad n(f) = a + \frac{b}{c^2} \cdot f^2$$

где $a = 1,62$, $b = 8920 \text{ нм}^2$

Для повышения точности измерения при небольших углах поворота этот опыт проводится таким образом, что когда магнитное поле B положительно, поляризация света такова, что анализатор вызывает затемнение проходящего света точно при 0° . Когда магнитное поле становится отрицательным, $-B$, анализатор необходимо повернуть на угол 2φ , чтобы вновь погасить свет.

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Из выражений (6) и (7) можно получить следующее:

Это означает, что можно получить коэффициент Коши b для показателя преломления флинтгласса, используемого в опыте, на основании постоянной Верде, если известна длина волны света λ . $b = \frac{m_e \cdot c}{2 \cdot e} \cdot V \cdot \lambda^2$

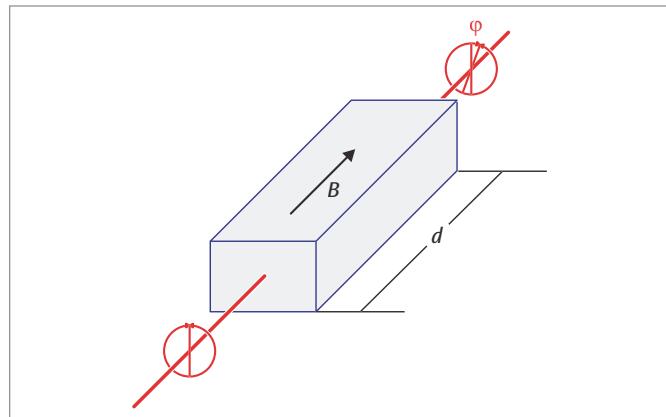


Рис. 1: Схема, иллюстрирующая эффект Фарадея

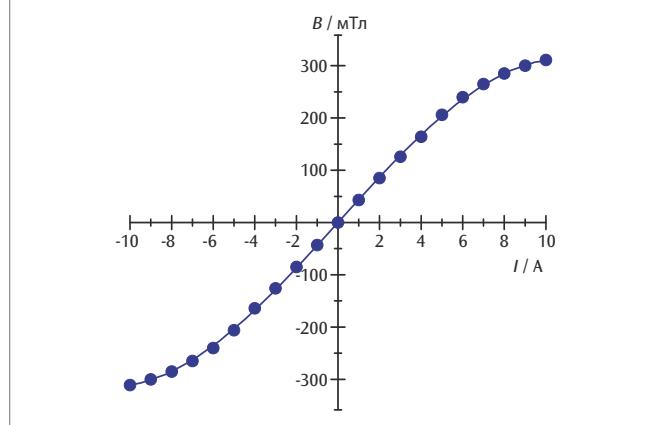


Рис. 2: Калибровочная характеристика

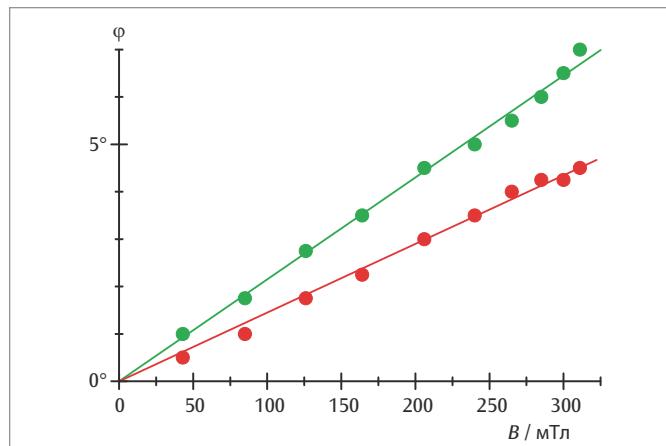


Рис. 3: Зависимость угла поворота от магнитного поля для света красного и зеленого лазеров

UE4080100 | ПРИЗМАТИЧЕСКИЙ СПЕКТРОМЕТР



ЦЕЛЬ ОПЫТА

Настройка и калибровка
призматического спектрометра

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ

Призматические спектрометры используются для измерения оптических спектров разложение света на спектральные компоненты призмой. Для измерения длины волн систему следует откалибровать, так как угловая дисперсия носит нелинейный характер. В этом опыте для калибровки используется известный спектр ртутной (Hg) лампы, далее выполняются измерения с кадмиевой (Cd) лампой.

› ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

- Отрегулировать призматический спектрометр и откалибровать его, используя спектральные линии ртутной лампы.
- Измерить минимальный угол отклонения при $\lambda = 546,07$ нм.
- Определить показатель преломления оптического стекла при $\lambda = 546,07$ нм, параметры Коши b и c для зависимого от длины волны показателя преломления.
- Рассчитать калибровочную кривую в соответствии с формулой дисперсии Хартманна.
- Выполнить измерения на линиях неизвестного спектра.

НЕОБХОДИМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Кол-во	Наименование	№ по каталогу
1	Гonioметр-спектрометр S	1008673
1	Блок управления для спектральных ламп (230 В, 50/60 Гц)	1021409 или
	Блок управления для спектральных ламп (115 В, 50/60 Гц)	1003195
1	Ртутьно-кадмиевая спектральная лампа	1003546
1	Ртутная спектральная лампа 100	1003545

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ

Призматические спектрометры используются для измерения оптических спектров на основании разложения света на спектральные компоненты при прохождении через призму. Разложение света происходит благодаря тому, что показатель преломления зависит от длины волны. В силу нелинейности призматический спектрометр для измерение длин волн следует откалибровать.

В спектрометре исследуемый свет проходит через щель S и попадает в объектив O_1 . Эти два компонента образуют коллиматор и дают широкий, параллельный пучок света (см. Рис. 1). После преломления на двух поверхностях призмы параллельный пучок выходит из призмы и фокусируется в изображение щели в фокусной плоскости объектива O_2 . Затем его можно рассматривать через линзу ОС окуляра. Телескоп, образуемый объективом O_2 и окуляром ОС, прикреплен к шарнирному рычагу, который жестко соединен со шкалой верньера N.

Двойное преломление света призмой описывается углами α_1 , α_2 , β_1 и β_2 (см. Рис. 2). Для равносторонней призмы справедливы следующие соотношения:

$$(1) \quad \sin\alpha_1 = n(\lambda) \cdot \sin\beta_1(\lambda) \quad n(\lambda) \cdot \sin\beta_2(\lambda) = \sin\alpha_2(\lambda) \cdot \beta_1(\lambda) + \beta_2(\lambda) = 60^\circ$$

Угол падения α_1 может быть изменен поворотом призмы относительно параллельного пучка, который входит в нее. Углы α_2 , β_1 и β_2 зависят от длины волны λ , поскольку показатель преломления n зависит от длины волны.

Угол отклонения между коллиматором и телескопом определяется на основании угла падения α_1 и угла выхода α_2 :

$$(2) \quad \delta(\lambda) = \alpha_1 + \alpha_2(\lambda) - 60^\circ$$

Угол имеет минимальное значение δ_{min} , когда путь пучка света симметричен относительно призмы. В то же время угловая дисперсия света $d\delta/d\lambda$ будет максимальной. Поэтому призматические спектрометры регулируются так, что для эталонной длины волны λ_0

обеспечивается симметричный путь пучка света. В этом опыте для этой цели выбрана зеленая спектральная линия ($\lambda_0 = 546,07 \text{ нм}$) ртутной лампы. Показатель преломления призмы для эталонной длины волны определяется по минимальному углу отклонения. Это вызвано тем, что симметрия подразумевает, что $\beta_1(\lambda_0) = \beta_2(\lambda_0) = 30^\circ$ и $\alpha_2(\lambda_0) = \alpha_1$, поэтому:

$$(3) \quad \sin \alpha_1 = n(\lambda_0) \cdot \frac{1}{2} \quad \text{где} \quad \alpha_1 = \frac{\delta_{\min}}{2} + 30^\circ$$

Дисперсия подразумевает смещение других спектральных линий от δ_{\min} на малые углы $\Delta\delta$. С помощью шкалы верньера можно считывать значения этих углов с точностью до нескольких минут. Поскольку изменения показателя преломления Δn остаются малыми по всей видимой части спектра, достаточно оценить только изменения линейных членов. Таким образом из уравнений 1–3 можно получить следующую зависимость между значениями длины волны и их отклонением:

$$(4) \quad \Delta\delta(\lambda) = \Delta\alpha_2(\lambda) = \frac{\Delta n(\lambda)}{\cos \alpha_1} = \frac{\Delta n(\lambda)}{\sqrt{1 - \frac{(n(\lambda_0))^2}{4}}}$$

В видимой части спектра показатель преломления n уменьшается по мере увеличения длины волны λ . Это описывается уравнением Коши в следующем виде:

$$(5) \quad n(\lambda) = a + \frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4}$$

В принципе, можно получить математическое описание калибровочной кривой из уравнений (4) и (5). Однако формула дисперсии Хартманна для этой цели подходит лучше:

$$(6) \quad \delta(\lambda) = \delta_H + \frac{K}{\lambda - \lambda_H}$$

Однако модифицирующие параметры δ_H , K и λ_H в приведенном выше не имеют специфического физического смысла. По этой причине в опыте спектральные линии ртутной лампы используются для калибровки с помощью уравнения (6), а затем можно измерять линии «неизвестного» спектра (см. Табл. 1).

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Показатель преломления $n(\lambda_0)$ определяется с помощью уравнения (3). Параметры Коши для показателя преломления рассчитываются путем сопоставления параболической кривой с уравнением: $\Delta n = n(\lambda) - n(\lambda_0) = f(1/\lambda^2)$.

Таблица 1. Длины волн линий спектра кадмия

Цвет	Результат измерения $\lambda / \text{нм}$	Табличное значение $\lambda / \text{нм}$
Синий (среднее отклонение)	466	466
Синий (большое отклонение)	468	468
Голубой (среднее отклонение)	479	480
Темно-зеленый (большое отклонение)	509	509
Темно-зеленый (большое отклонение)	515	516
Красный (большое отклонение)	649	644

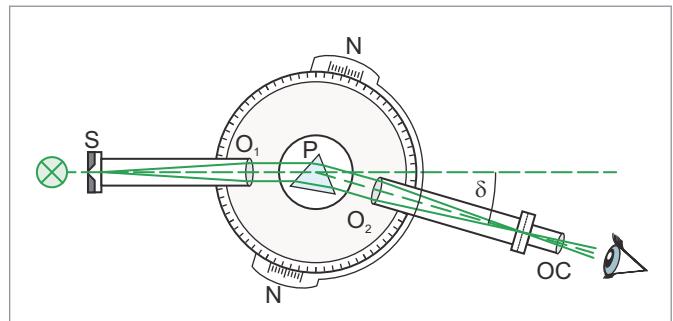


Рис. 1: Схема призматического спектрометра
S: входная щель, О1: объектив коллиматора, Р: призма, О2: объектив телескопа. ОС: окуляр телескопа, δ: угол отклонения

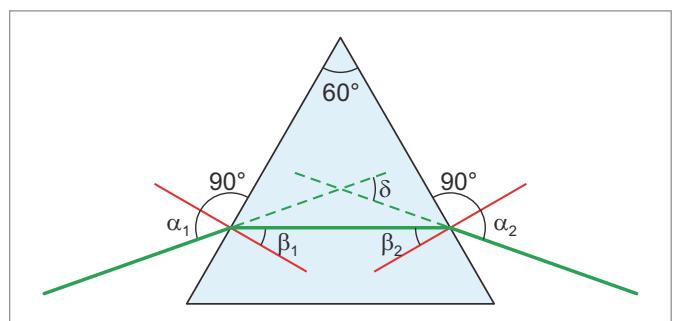


Рис. 2: Путь пучка света через призму

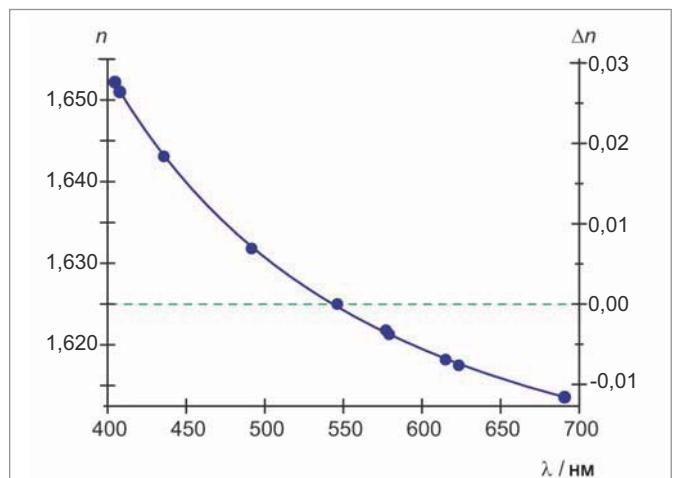


Рис. 3: Зависимый от длины волны показатель преломления призмы из оптического стекла

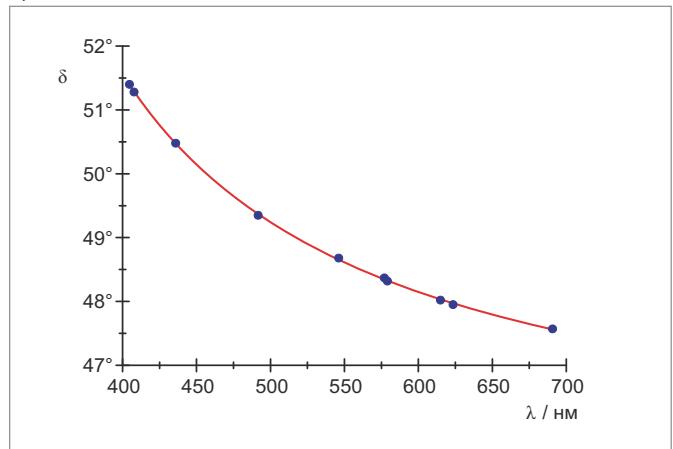


Рис. 4: Калибровочная кривая призматического спектрометра

UE5010500 | ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ



ЦЕЛЬ ОПЫТА

Наблюдение дифракции электронов на поликристаллическом графите и подтверждение волновой природы электронов

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

- Измерение диаметров двух дифракционных колец при различных напряжениях ускорителя.
- Определение длины волны электронов при различных напряжениях ускорителя путем применения условия Брэгга.
- Подтверждение уравнения де Бройля для длины волны.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ

Дифракция электронов на пленке поликристаллического графита свидетельствует о волновой природе электронов. На люминесцентном экране дифракционной трубы можно наблюдать два дифракционных кольца вокруг центрального пятна на оси пучка. Причиной этих колец является дифракция электронов на тех плоскостях кристаллической решетки микрокристаллов графитовой пленки, которые удовлетворяют условию Брэгга. Это явление подобно результатам, полученным при дифракции рентгеновских лучей Дебая-Шеррера на кристаллическом порошке.

НЕОБХОДИМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Кол-во	Наименование	№ по каталогу
1	Дифракционная электронная лампа модели S*	1013889
1	Держатель электровакуумных приборов модели S	1014525
1	Высоковольтный источник питания с напряжением 5 кВ (230 В, 50/60 Гц)	1003310 или
	Высоковольтный источник питания с напряжением 5 кВ (115 В, 50/60 Гц)	1003309
1	Набор из 15 безопасных соединительных проводов для опытов длиной 75 см	1002843

* Относительно версии с нашими электронными трубками D запрашивайте ценовое предложение.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ

В 1924 г. Лунде Бройль выдвинул гипотезу о том, что частицы могут, в принципе, тоже обладать волновыми свойствами, и что длина волны зависит от момента. Позже его теории были подтверждены К. Девиссоном и Л. Джермером путем наблюдения дифракции электронов на кристаллическом никеле.

Согласно де Бройлю, соотношение между длиной волны λ частицы и ее моментом p определяется выражением:

$$(1) \quad \lambda = \frac{h}{p}$$

h : постоянная Планка.

В случае электронов, которые получили ускорение напряжением U_A , это приводит к уравнению:

$$(2) \quad \lambda = \frac{h}{\sqrt{2 \cdot m \cdot e \cdot U_A}}$$

m: масса электрона, *e*: элементарный электрический заряд.
В этом опыте волновая природа электронов в стеклянной трубке, из которой откачен воздух, демонстрируется путем наблюдения их дифракции на поликристаллическом графите. На люминесцентном экране трубы можно наблюдать дифракционные кольца вокруг центрального пятна на оси пучка. Диаметр колец зависит от напряжения ускорителя. Их причиной является дифракция электронов на тех плоскостях кристаллической решетки микрокристаллов, которые удовлетворяют условию Брэгга (см. Рис. 2):

$$(3) \quad 2 \cdot d \cdot \sin \vartheta = n \cdot \lambda$$

ϑ : угол Брэгга, *n*: порядок дифракции,

d: расстояние между плоскостями кристаллической решетки (см. Рис. 2). Диаметр дифракционного кольца, соответствующего углу Брэгга ϑ , определяется выражением:

$$(4) \quad D = 2 \cdot L \cdot \tan 2\vartheta$$

L: расстояние между графитовой пленкой и люминесцентным.

Поскольку графит имеет кристаллическую структуру с двумя разными расстояниями между плоскостями кристаллической решетки, $d_1 = 123$ пм и $d_2 = 213$ пм (см. Рис. 3), дифракционная картина первого порядка (*n* = 1) состоит из двух дифракционных колец с диаметрами D_1 и D_2 .

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

По диаметрам двух дифракционных колец и расстояниям между плоскостями кристаллической решетки мы можем определить длину волны λ , применив условие Брэгга. При малых углах справедливо следующее равенство:

$$\lambda = 2 \cdot d_{1/2} \cdot \sin \left(\frac{1}{2} \cdot \arctan \left(\frac{D_{1/2}}{2 \cdot L} \right) \right)$$

Рассчитанные таким образом по результатам опыта длины волн можно сравнить со значениями, рассчитанными с помощью теоретического выражения (2).

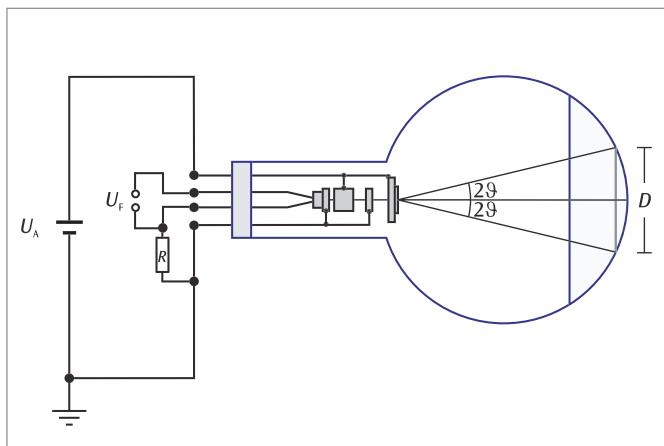


Рис. 1: Схема электронной дифракционной трубы

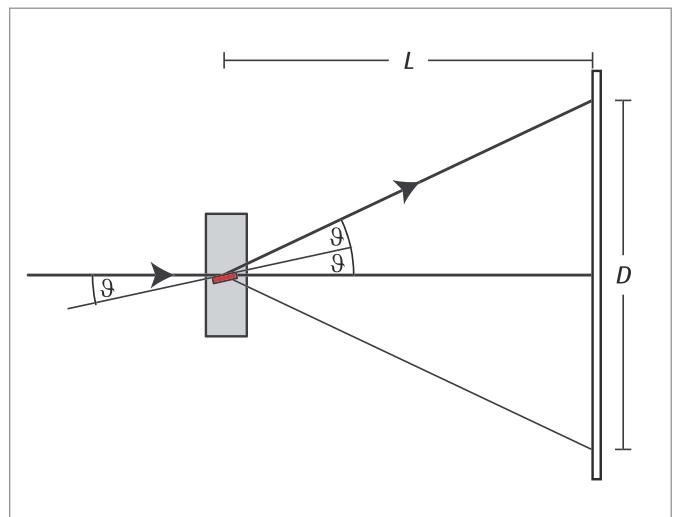


Рис. 2: Отражение Брэгга от «подходящей» группы плоскостей кристаллической решетки в типичной кристаллической решетке графитовой пленки

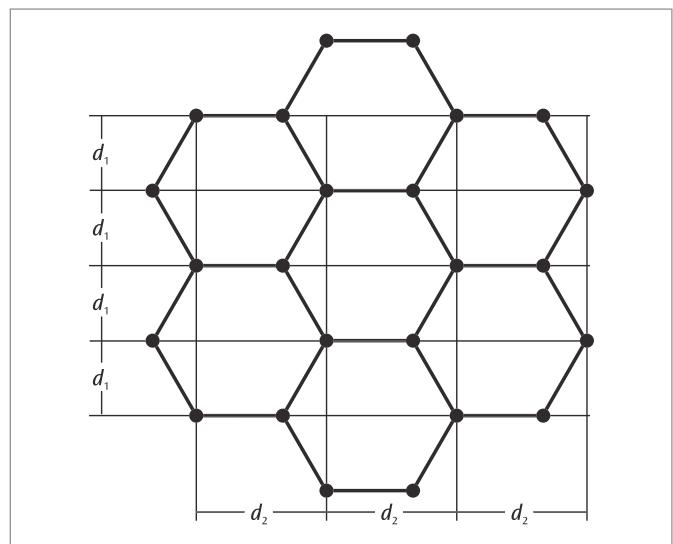


Рис. 3: Кристаллическая структура графита

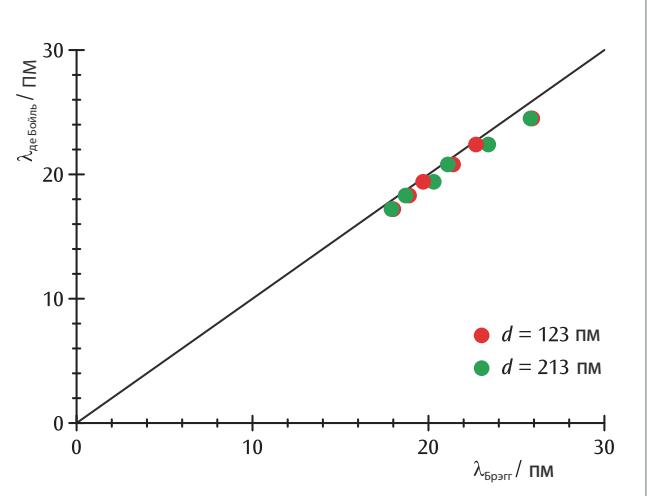


Рис. 4: Соотношение между длинами волн, определенными экспериментально с помощью условия Брэгга, и теоретическими длинами волн де Броиля

UE5020150 | ЛИНЕЙНЫЕ СПЕКТРЫ



› ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

- Демонстрация тонкой структуры D-линий натрия.
- Измерение линии поглощения в спектре Солнца.
- Выполнение высокоточных измерений для других атомов.

ЦЕЛЬ ОПЫТА

Проведение высокоточных измерений спектральных линий поглощения и испускания

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ

Разрешение спектрометра часто оценивают с точки зрения того, можно ли различить две D-линии натрия. В этом опыте используется цифровой спектрометр с разрешением, позволяющим это сделать.

НЕОБХОДИМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Кол-во	Наименование	№ по каталогу
1	Цифровой спектрометр высокого разрешения	1018104
1	Блок управления для спектральных ламп (230 В, 50/60 Гц)	1021409 или
	Блок управления для спектральных ламп (115 В, 50/60 Гц)	1003195
1	Натриевая спектральная лампа	1003541
2	Тяжелая круглая опора весом 1000 г	1002834

Дополнительно рекомендуется иметь:

1	Ртутная спектральная лампа 100	1003545
1	Ртутно-кадмиеовая спектральная лампа	1003546

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ

Разрешение спектрометра характеризует работу этого прибора. Это мера минимального различия длин волн, которое должно быть между двумя соседними спектральными линиями, чтобы их можно было различить. Одной из наиболее широко известных пар линий является пара, образующая спектр D-линий натрия. Различие длин волн между этими двумя линиями составляет 0,6 нм. Разрешение спектрометра часто оценивают по тому, можно ли различить эти две линии.

D-линия натрия существует благодаря переходу 3s электронов натрия из возбужденного состояния 3p в основное состояние. Так как спин электрона и орбитальный момент количества движения связаны между собой (спин-орбитальное взаимодействие), состояние 3p разделяется на два трудно различимых состояния с общим спином $j = 1/2$ и $j = 3/2$. Разность энергий между этими двумя соседними состояниями составляет 0,0021 эВ, а длины волн, соответствующие переходу в основное состояние, составляют 588,9950 нм (D2) и 589,5924 нм (D1).

В этом опыте используется цифровой спектрометр, позволяющий различить тонкую структуру D-линий натрия. Спектральная дисперсия падающего света осуществляется с помощью дифракционной решетки 1200 линий/мм, устанавливаемой в монохроматор Черни-Тернера. Можно проводить измерения в спектральном диапазоне от 400 нм до 700 нм на ПЗС-матрице с 3600 точками. Это означает, что на каждый интервал длин волн 0,08 нм приходится одна точка. Это позволяет добиться разрешения 0,5 нм, достаточного для того, чтобы измерять тонкую структуру спектра D-линий натрия.

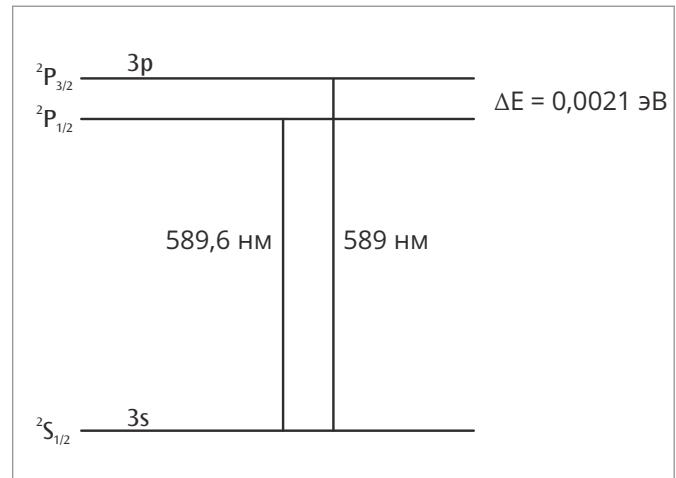


Рис. 1: Упрощенная схема энергетических уровней натрия

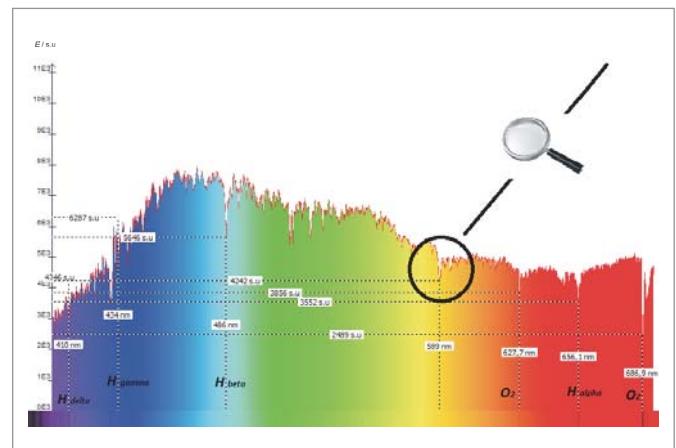


Рис. 2: Линии поглощения в спектре Солнца

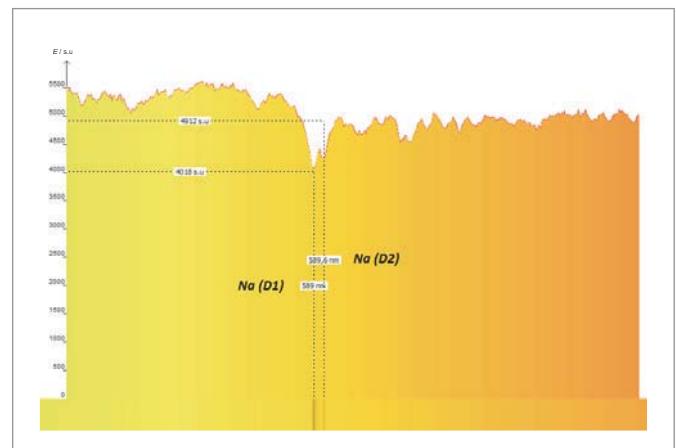


Рис. 3: Линии поглощения натрия в спектре Солнца

UE5020300

ОПЫТ ФРАНКА-ГЕРЦА С РТУТЬЮ



ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

- «Измерение зависимости тока мишени I от напряжения U между катодом и сеткой.
- «Определение разнесения ΔU максимумов или минимумов тока.
- «Сравнение интервалов напряжения с энергиями возбуждения атомов ртути.

ЦЕЛЬ ОПЫТА

Регистрация и оценка кривой Франка-Герца для ртути

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ

Опыт Франка-Герца с ртутью предполагает наблюдение того, как энергия передается от электронов в результате неупругого столкновения при пролете через пары ртути. Передача энергии происходит дискретно с дискретными соответствующими возбуждению таким столкновением определенных переходов между энергетическими уровнями в атомах ртути. Таким образом, данный опыт подтверждает модель атома Бора и дискретные энергетические уровни, описываемые этой моделью.

НЕОБХОДИМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Кол-во	Наименование	Nº по каталогу
1	Трубка Франка-Герца, заполненная ртутью, и нагревательная камера (230 В, 50/60 Гц)	1006795 или
	Трубка Франка-Герца, заполненная ртутью, и нагревательная камера (115 В, 50/60 Гц)	1006794
1	Блок питания для опыта Франка-Герца (230 В, 50/60 Гц)	1012819 или
	Блок питания для опыта Франка-Герца (115 В, 50/60 Гц)	1012818
1	Аналоговый осциллограф с частотой 2x30 МГц	1020910
1	Универсальный цифровой измерительный прибор Р3340	1002785
1	Высокочастотный соединительный шнур	1002746
2	Высокочастотный соединительный шнур, байонетный разъем/4-мм штекер	1002748
1	Набор из 15 безопасных соединительных проводов для опытов длиной 75 см	1002843

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ

Джеймс Франк и Густав Герц заявили, что электроны, проходящие через пары ртути, передают энергию дискретно, и что это сопровождается наблюдением эмиссии ультрафиолетовой спектральной линии ртути ($\lambda = 254$ 254 нм). Несколько месяцами позже Нильс Бор понял, что это было подтверждением разработанной им модели атома. Таким образом, опыт Франка-Герца с ртутью стал классическим опытом для подтверждения квантовой теории.

Стеклянная трубка, из которой откачен воздух, имеет катод накала С, сетку G и электрод-мишень А, размещенные именно в такой последовательности (см. Рис. 1). Электроны вылетают из катода и ускоряются напряжением U в направлении сетки. Проходя через сетку, они достигают мишени и, таким образом, вносят вклад в ток мишени I , если их кинетическая энергия достаточна, для того чтобы преодолеть замедляющее напряжение U_{GA} между сеткой и мишенью. Кроме того, имеется стеклянная трубка с небольшим количеством ртути, которая нагревается, чтобы получить давление паров приблизительно 15 гПа.

По мере возрастания напряжения U ток мишени I сначала увеличивается, так как все больше и больше атомов вытягивается электрическим полем из области объемного заряда вокруг катода. При определенном значении $U = U_1$ некоторые атомы приобретают достаточную кинетическую энергию непосредственно перед сеткой, так что могут обеспечить достаточную энергию для возбуждения атомов ртути при неупругом столкновении. Затем ток мишени падает почти до нуля, так как после такого столкновения электроны больше не обладают достаточной энергией, чтобы преодолеть замедляющее напряжение.

По мере дальнейшего возрастания напряжения электроны приобретают достаточную энергию для возбуждения атомов ртути, находящихся дальше от сетки. После таких столкновений они вновь ускоряются и снова способны приобрести достаточную энергию, чтобы достичь мишени, поэтому ток мишени вновь возрастает.

При еще большем напряжении $U = U_2$ электроны могут приобретать такую большую энергию после первого столкновения, что они способны возбудить другой атом ртути. Ток мишени вновь резко падает, но вновь увеличивается по мере дальнейшего возрастания напряжения. Это же происходит и в третий раз при еще более высоком напряжении, и опять ток мишени резко падает.

ПРИМЕЧАНИЕ

Первый минимум достигается не при 4,9 В, а сдвинут на величину, соответствующую так называемому контактному напряжению между катодом и сеткой.

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Все напряжения U_1, U_2, U_3, \dots , при которых ток регистрируемой характеристики $I(U)$ резко падает, появляются с постоянным интервалом $\Delta U = 4,9$ В. Этот интервал соответствует энергии возбуждения $E_{Hg} = 4,9$ эВ ($\lambda = 254$ нм), при которой атомы ртути поднимаются из основного состояния 1S_0 на первое состояние 3P_1 . Справедливо следующее равенство:

$$(1) \quad E_{Hg} = e \cdot \Delta U$$

е: элементарный заряд электрона

Таким образом, результаты можно свести к дискретному поглощению энергии атомами ртути вследствие неупругого столкновения и связанной с ним передачей фиксированного количества энергии от электронов.

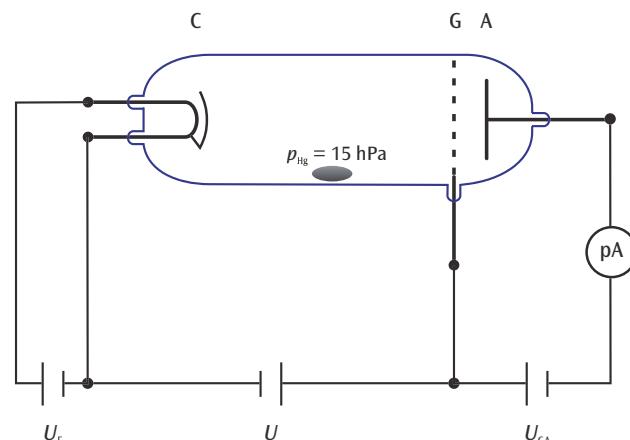


Рис. 1: Схема установки для измерения кривой Франка-Герца для ртути

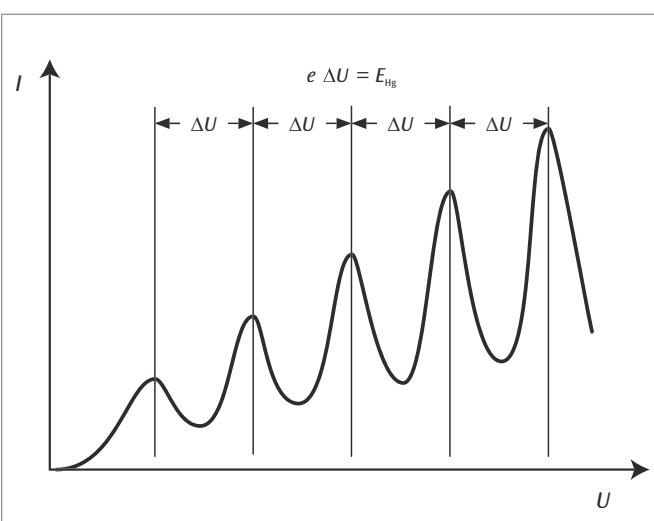
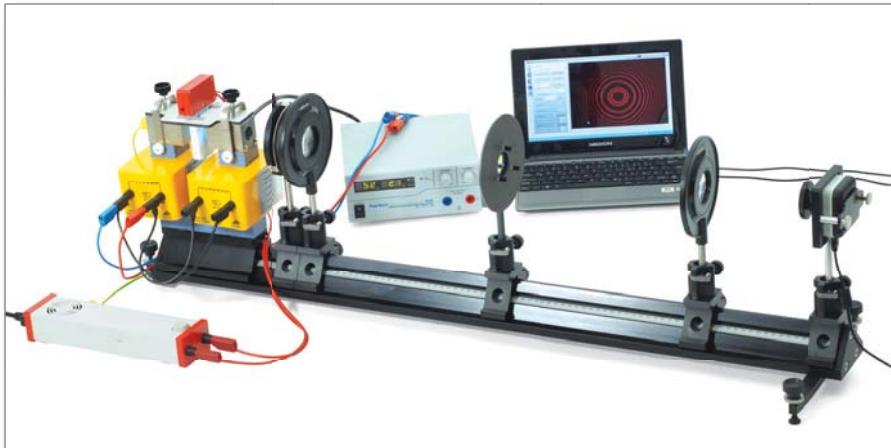


Рис. 2: Зависимость тока мишени I от ускоряющего напряжения U

UE5020700 | ПРОСТОЙ ЭФФЕКТ ЗЕЕМАНА



ЦЕЛЬ ОПЫТА

Наблюдение дублетного и триплетного расщепления красных линий спектра кадмия во внешнем магнитном поле вследствие простого эффекта Зеемана.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ

Наблюдается расщепление спектральных линий – дублетное (продольный эффект Зеемана) или триплетное (поперечный эффект Зеемана) – вследствие так называемого «простого» эффекта Зеемана. С этой целью кадмиевую лампу помещают в магнитное поле, а для анализа излучаемого света

используют интерферометр Фабри-Перо. При увеличении напряженности магнитного поля можно непосредственно видеть непрерывное расщепление в рисунке интерференционных колец. Кроме того, это оборудование позволяет проводить дополнительные исследования, подробно описанные в руководстве по проведению опытов. Они включают исследование свойств поляризации, измерение фактического энергетического сдвига спектральных линий и определение значения магнетона Бора.

НЕОБХОДИМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Кол-во	Наименование	№ по каталогу
1	Кадмиевая лампа с принадлежностями (230 В, 50/60 Гц)	1021366 или
	Кадмиевая лампа с принадлежностями (115 В, 50/60 Гц)	1021747
1	U-образный сердечник D	1000979
2	Катушка модели D, 900 витков	1012859
1	Вспомогательная принадлежность электромагнита для создания эффекта Зеемана	1021365
1	Источник питания постоянного тока, 32 В, 20 А (230 В, 50/60 Гц)	1012857 или
	Источник питания постоянного тока, 0–40 В, 0–40 А (115 В, 50/60 Гц)	1022289
1	Набор из 15 соединительных проводов для опытов, 75 см, 1 мм ²	1002840
1	Интерферометр Фабри-Перо	1020903
2	Выпуклая линза на ножке, f = 100 мм	1003023
1	Четвертьволновой фильтр на ножке	1021353
1	Поляризационное приспособление	1021364
1	Поляризационный фильтр на ножке	1008668
1	Прецизионная оптическая скамья модели D длиной 1000 мм	1002628
1	Оптическое основание D	1009733
5	Передвижное крепление оптической скамьи модели D, 90/36	1012401
1	Держатель и фильтр для камеры Moticam	1021367
1	Цифровая камера Moticam 1	1021162

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ

Эффект Зеемана касается расщепления уровней энергии атома или линий спектра под воздействием внешнего магнитного поля и назван по имени Л. Зеемана, ученого, который открыл его в 1896 г.

Простой эффект Зеемана наблюдается только при переходах между атомными состояниями с общим параметром вращения спина S = 0. Общий угловой момент J = L + S в этом случае соответствует орбитальному угловому моменту, т.е. J = L. Он создает создает магнитный момент

$$(1) \quad \mu = \frac{\mu_B}{\hbar} \cdot J$$

где магнетон Бора выражается

$$(2) \quad \mu_B = -\frac{1}{2} \cdot \frac{e}{m_e} \cdot \hbar$$

$\hbar = h/2 \pi$: приведенная постоянная Планка, e: элементарный заряд, m_e : масса электрона

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

- Не прикладывая магнитного поля, использовать интерферометр Фабри-Перо для наблюдения характерных интерференционных колец света, излучаемого атомами кадмия.
- Включить магнитное поле и наблюдать дублетное расщепление интерференционных колец, характерное для продольного эффекта Зеемана.
- Повернуть магнит вместе с кадмиевой лампой. Исследовать горизонтальный эффект Зеемана, наблюдая триплетное расщепление.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ:

- Исследовать поляризацию дублетных и триплетных компонентов с помощью четвертьволновой пластины с поляризующей приставкой и поляризационного фильтра.
- Спектроскопия с использованием интерферометра Фабри-Перо: Определить расщепление энергии в зависимости от внешнего магнитного поля путем измерения радиуса интерференционных колец (UE5020700–2).
- Определить значение магнетона Бора.

Во внешнем магнитном поле (рис. 3)

$$(3) \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ B \end{pmatrix}$$

магнитный момент обладает энергией

$$(4) \quad E = \mu \cdot B = \mu_z \cdot B$$

Вследствие пространственной квантизации значение компонента J_z общего углового момента, параллельного магнитному полю, может быть равно только

$$(4) \quad J_z = M_J \cdot \hbar \text{ при } M_J = -J, -(J-1), \dots, (J-1), J$$

J : квантовое число общего углового момента

В этом случае уровень энергии квантового числа общего углового момента J будет разделяться на $2J+1$ равноудаленных компонентов с различными значениями магнитного квантового числа M_J (Рис. 2). Из уравнения (1) следует, что

$$(6) \quad \mu_z = \frac{\mu_B}{\hbar} J_z,$$

таким образом, в соответствии с уравнением (3)

$$(7) \quad E = \mu_z \cdot B = \frac{\mu_B}{\hbar} J_z \cdot B$$

и, наконец, используя уравнение (4):

$$(8) \quad E = \mu_B \cdot M_J \cdot B$$

Следовательно, энергетический интервал между соседними энергетическими уровнями составляет:

$$(9) \quad \Delta E = \mu_B \cdot B$$

Простой эффект Зеемана может наблюдаться для красной линии спектра кадмия. Он соответствует переходу $^1D_2 \rightarrow ^1P_1$ с длиной волны $\lambda = 643,8$ нм (Рис. 2). В соответствии с уравнением (4), уровень 1D_2 разделяется на пять компонентов, а уровень 1P_1 разделяется на три компонента, каждый из которых имеет равное расстояние между энергетическими уровнями, определяемое уравнением (9).

В соответствии с правилами выбора для электрического дипольного излучения допустимыми переходами между этими уровнями являются переходы с

$$(10) \quad \Delta M_J = \begin{cases} +1 & (\text{световое излучение, циркулярно поляризованное по часовой стрелке, } \sigma^+) \\ 0 & (\text{линейное поляризованное световое излучение, } \pi) \\ -1 & (\text{световое излучение, циркулярно поляризованное против часовой стрелки, } \sigma^-) \end{cases}$$

при этом излучаемый свет поляризуется указанным выше образом. Таким образом, мы наблюдаем всего три спектральных линии (Рис. 2): один компонент π , который не сдвинут, и, в соответствии с $E = \hbar \cdot \omega$, два компонента π , сдвинутые на

$$(11) \quad \Delta \lambda = \pm \frac{\lambda^2}{2 \cdot \pi \cdot \hbar \cdot c} \cdot \Delta E$$

c : скорость света в вакууме,

соответственно, с большей или меньшей длиной волны. В магнитном поле с плотностью потока $B = 1$ Т, применяя уравнения (9) и (2) к уравнению (11), получаем сдвиг всего $|\Delta \lambda| = 0,02$ нм. Пространственное распределение излучаемого света для компонента π и двух компонентов σ оказывается различным. В классических условиях случай с $\Delta M_J = 0$ соответствует колебаниям диполя Герца, совершаемых параллельно магнитному полю. Соответственно, линейно поляризованный свет излучается перпендикулярно магнитному полю, а излучение света параллельно магнитному полю отсутствует (Рис. 3). Случай с $\Delta M_J = \pm 1$ соответствуют колебаниям двух диполей, совершаемых перпендикулярно друг другу со сдвигом по фазе на 90° . Соответственно, свет излучается и параллельно, и перпендикулярно направлению магнитного поля. Этот свет циркулярно поляризован параллельно направлению магнитного поля, т.е. циркулярно поляризован против часовой стрелки для случая с $\Delta M_J = -1$ и циркулярно поляризован по часовой стрелке для случая с $\Delta M_J = +1$.

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

В ходе проведения опыта расщепление наблюдается с помощью цифровой камеры, оснащенной интерферометром Фабри-Перо и формирующей изображение оптикой.

Интерферометр Фабри-Перо предназначен для обеспечения соответствия условиям резонанса для волн длиной 643,8 нм для красной линии спектра кадмия. При прохождении через интерферометр Фабри-Перо свет, излучаемый кадмиевой лампой, создает интерференционные кольца, разделяющиеся подобно спектральным линиям в зависимости от внешнего магнитного поля, и эти кольца регистрируются оптикой камеры. Для обеспечения обзора параллельно или перпендикулярно внешнему магнитному полю предусмотрена возможность вращения электромагнитов вокруг их осей.

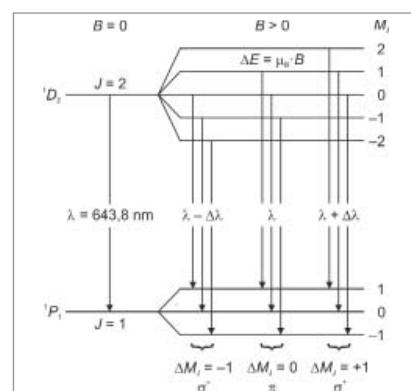


Рис. 1: Простой эффект Зеемана для красной линии спектра кадмия. Расщепление уровней энергии и переходы, допустимые в соответствии с правилами отбора для электрического дипольного излучения.

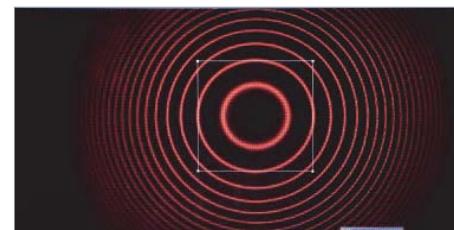


Рис. 2: При отсутствии внешнего магнитного поля: Наблюдение интерференционных колец красной кадмиевой линии, созданной интерферометром Фабри-Перо. Для помощи с ориентацией второе от центра интерференционное кольцо указывается в рамке.

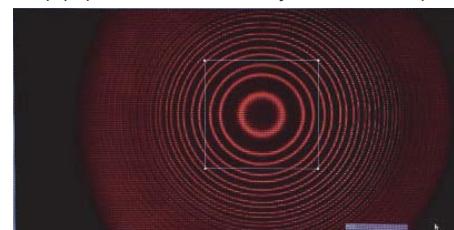


Рис. 3: Продольный эффект Зеемана: Наблюдение дублетного и триплетного расщепления красной линии спектра кадмия во внешнем магнитном поле.

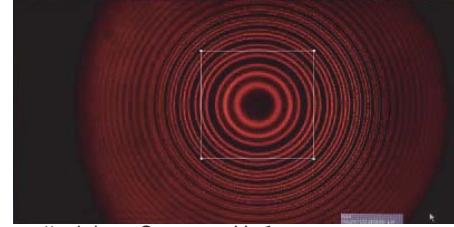


Рис. 4: Простой эффект Зеемана: Наблюдение триплетного расщепления красной линии спектра кадмия во внешнем магнитном поле.

UE5030100 |

ЭЛЕКТРОННЫЙ ПАРАМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС



› ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

- Наблюдение за резонансной характеристикой ДФПГ.
- Определение зависимости резонансной частоты от магнитного поля.
- Определение g -фактора Ланде для свободных электронов.

ЦЕЛЬ ОПЫТА

Демонстрация электронного парамагнитного резонанса в дифенилпикрилгидразиле (ДФПГ)

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ

Явление электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) основано на поглощении энергии веществами, имеющими неспаренные электроны, которые находятся во внешнем магнитном поле, создаваемом источником постоянного тока. Энергия поглощается от высокочастотного электромагнитного поля, создаваемого переменным током, которое направлено перпендикулярно полю от источника постоянного тока. Если частота переменного электромагнитного поля равна резонансной частоте, полное входное сопротивление возбуждающей катушки, заполненной испытательным материалом, меняется в соответствии с резонансной характеристикой, и на экране осциллографа будет наблюдаться пик. Одним из подходящих материалов для этого опыта является дифенилпикрилгидразил (ДФПГ).

НЕОБХОДИМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Кол-во	Наименование	№ по каталогу
1	Базовый комплект оборудования для опытов по ЭПР/ЯМР (230 В, 50/60 Гц)	1000638 или
	Базовый комплект оборудования для опытов по ЭПР/ЯМР (115 В, 50/60 Гц)	1000637
1	Дополнительный комплект оборудования для опытов по ЭПР	1000640
1	Аналоговый осциллограф с частотой 2x25 МГц	1020857
2	Высокочастотный соединительный шнур	1002746

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ

Явление электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) основано на поглощении энергии веществами, имеющими неспаренные электроны, которые находятся во внешнем магнитном поле, создаваемом источником постоянного тока. Энергия поглощается от высокочастотного электромагнитного поля, созданного переменным током, которое направлено перпендикулярно полю от источника постоянного тока. Если частота переменного электромагнитного поля равна резонансной частоте, полное входное сопротивление возбуждающей катушки, заполненной испытательным материалом, меняется в соответствии с резонансной характеристикой, и на экране осциллографа будет наблюдаться пик. Причина резонансного поглощения заключается в «переворачивании» магнитных моментов между спиновыми состояниями свободного электрона. Резонансная частота зависит от напряженности поля, созданного постоянным током, а ширина резонансного сигнала связана с однородностью поля.

Магнитный момент электрона, который обладает чисто спиновым магнетизмом, принимает дискретные значения в магнитном поле B :

$$(1) \quad E_m = -g_J \cdot \mu_B \cdot m \cdot B, \quad m = -\frac{1}{2}, \frac{1}{2}$$

магнетон Бора: $\mu_B = 9.274 \cdot 10^{-24} \frac{J}{T}$
 g -фактор Ланде: $g_J = 2,0023$

Тогда интервал между двумя уровнями составляет:

$$(2) \quad \Delta E = g_J \cdot \mu_B \cdot B$$

Resonance occurs when the frequency f of the alternating field being fed in meets the following condition:

$$(3) \quad h \cdot f = \Delta E$$

постоянная Планка: $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж,

В этом опыте электронный парамагнитный резонанс демонстрируется в дифенилпикрилгидразиле (ДФПГ) – органическом соединении, молекулы которого имеют в своем составе неспаренный электрон. Базовое магнитное поле создается внутри пары катушек Гельмольца и изменяется от нуля до максимального значения $B_{\max} = 3,5$ мТл с помощью пилообразного сигнала. В результате можно найти частоту f , при которой имеет место резонансное поглощение в определенной точке на пилообразной характеристике, т.е. при выбранном значении магнитного поля.

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Ниже следующую связь между резонансной частотой f и магнитным полем B можно получить из выражений (2) и (3):

$$f = g_J \cdot \frac{\mu_B}{h} \cdot B$$

Поэтому результаты измерения оказываются лежащими на прямой, проходящей через начало координат, в пределах погрешности измерения, g -фактор Ланде можно определить по наклону этого графика.

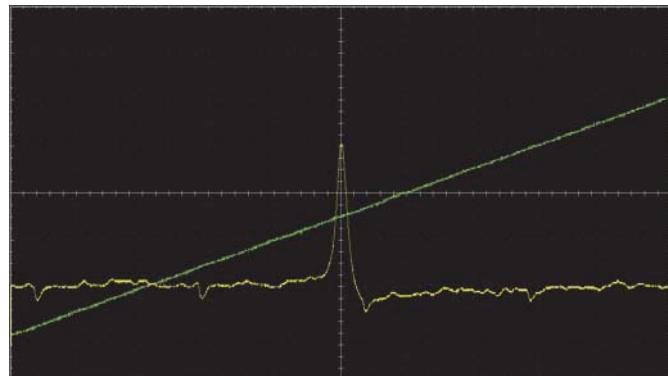


Рис. 1: Сигнал поглощения и изменение магнитного поля во времени при электронном парамагнитном резонансе в дифенилпикрилгидразиле (ДФПГ)

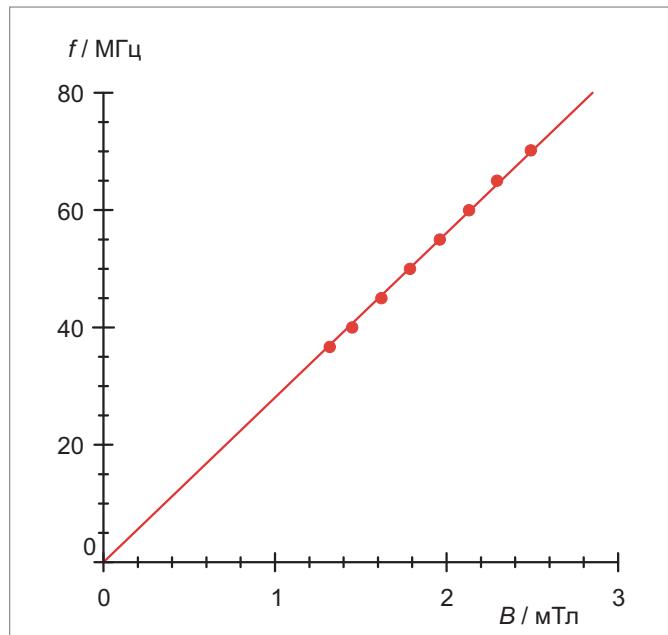


Рис. 2: Зависимость резонансной частоты f для магнитного поля B

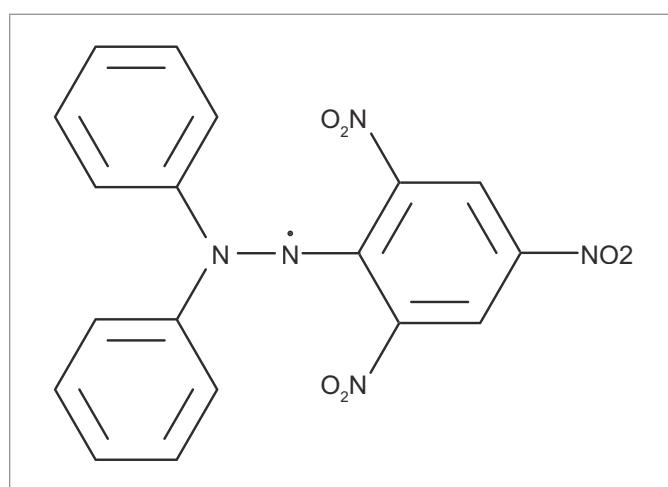
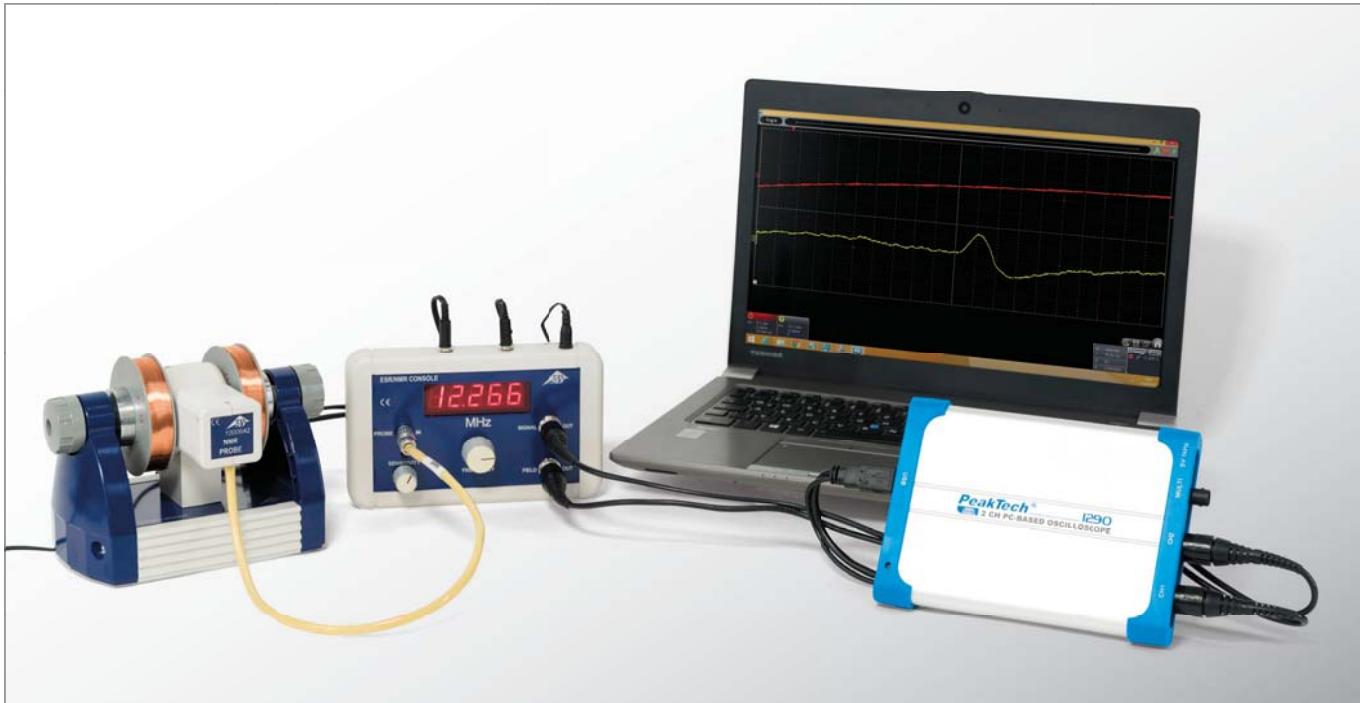


Рис. 3: Молекулярная структура дифенилпикрилгидразила (ДФПГ)

UE5030200 | ЯДЕРНЫЙ МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС



› ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

- Демонстрация и сравнение ядерного магнитного резонанса в глицерине, пенопласте и тефлоне.
- Определение резонансных частот в постоянном магнитном поле.
- Сравнение *g*-факторов ядер ^1H и ^{19}F .

ЦЕЛЬ ОПЫТА

Продемонстрировать и сравнить ядерный магнитный резонанс в глицерине, пенопласте и тефлоне

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ

Явление ядерного магнитного резонанса (ЯМР) основано на поглощении энергии веществами, имеющими ядерный магнетизм, которые находятся во внешнем магнитном поле, создаваемом источником постоянного тока. Энергия поглощается от высокочастотного электромагнитного поля, созданного переменным током, которое направлено перпендикулярно полю от источника постоянного тока. Если частота переменного электромагнитного поля равна резонансной частоте, полное входное сопротивление возбуждающей катушки, заполненной испытательным материалом, меняется в соответствии с резонансной характеристикой, и на экране осциллографа будет наблюдаться пик. Подходящими материалами для этого опыта являются глицерин,

НЕОБХОДИМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Кол-во	Наименование	Nº по каталогу
1	Базовый комплект оборудования для опытов по ЭПР/ЯМР (230 В, 50/60 Гц)	1000638 или 1000637
1	Дополнительный набор оборудования для опытов по ЯМР	1000642
1	Аналоговый осциллограф с частотой 2x25 МГц	1020857
2	Высокочастотный соединительный шнур	1002746

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ

Явление ядерного магнитного резонанса (ЯМР) основано на поглощении энергии веществами, имеющими ядерный магнетизм, которые находятся во внешнем магнитном поле, создаваемом источником постоянного тока. Энергия поглощается от высокочастотного электромагнитного поля, созданного переменным током, которое

направлено перпендикулярно полю от источника постоянного тока. Если частота переменного электромагнитного поля равна резонансной частоте, полное входное сопротивление возбуждающей катушки, заполненной испытательным материалом, меняется в соответствии с резонансной характеристикой, и на экране осциллографа будет наблюдаться пик. Причиной резонансного поглощения является переход из магнитного момента ядра из одного энергетического состояния в другое в магнитном поле. Резонансная частота зависит от напряженности поля, созданного постоянным током, а ширина резонансного сигнала связана с однородностью поля.

Магнитный момент ядра с ядерным спином I принимает дискретные значения в магнитном поле B :

$$(1) \quad E_m = -g_i \cdot \mu_k \cdot m \cdot B, \quad m = -I, -I+1, \dots, I$$

ядерный магнетон: $\mu_k = 5,051 \cdot 10^{-27} \frac{J}{T}$
 g -фактор атомного ядра: g_i

Тогда интервал между двумя уровнями составляет:

$$(2) \quad \Delta E = g_i \cdot \mu_k \cdot B$$

Если энергетические уровни удовлетворяют условию резонанса, другое магнитное поле частоты f , приложенное перпендикулярно к однородному полю, вызывает переход из одного энергетического состояния в другое. Резонанс происходит, когда частота f в точности соответствует следующему условию:

$$(3) \quad h \cdot f = \Delta E$$

постоянная Планка: $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж.

В этом опыте ядерный магнитный резонанс демонстрируется в глицерине, пенопласте и тефлоне, где он обусловлен изотопом 1H в глицерине и пенопласте и изотопом ^{19}F в тефлоне. Однородное магнитное поле создается преимущественно постоянными магнитами. К нему добавляется магнитное поле, меняющееся по пилообразному закону от нуля до максимального значения, которое создается в паре катушек Гельмгольца. В результате можно найти частоту f , при которой имеет место резонансное поглощение в заданном магнитном поле, которое, для простоты, берется в соответствующей середине пилообразной характеристики.

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

g -факторы ядер веществ, участвующих в опыте, указаны в литературе и составляют $g(^1H) = 5,5869$ и $g(^{19}F) = 5,255$.

Из (2) и (3) для резонансной частоты f в магнитном поле B получаем:

$$f = g_i \cdot \frac{\mu_k}{h} \cdot B$$

Поэтому отношение резонансных частот для различных ядер в одном и том же магнитном поле будет таким же, как отношение g -факторов:

$$\frac{f(^{19}F)}{f(^1H)} = \frac{g_i(^{19}F)}{g_i(^1H)} = 94\%$$

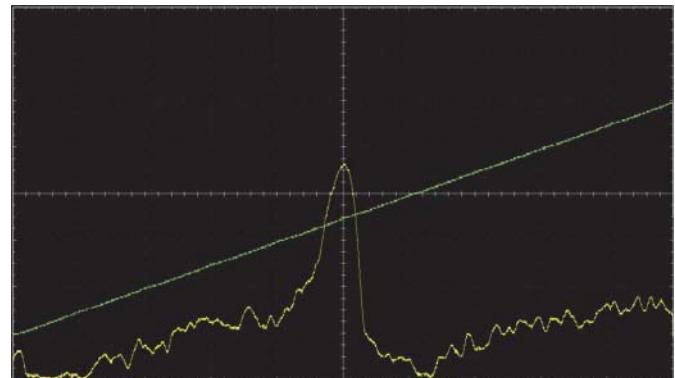


Рис. 1: Ядерный магнитный резонанс в глицерине
($f = 12,854$ МГц)

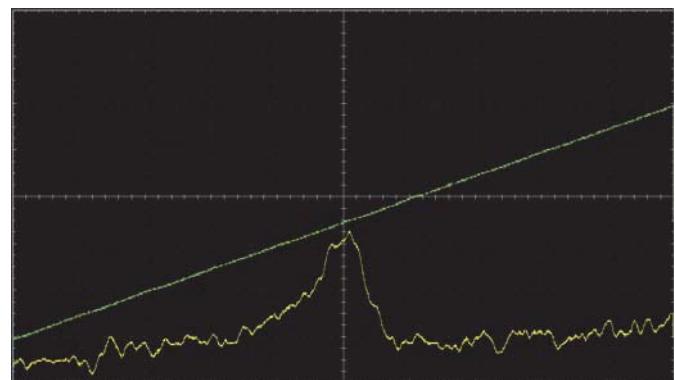


Рис. 2: Ядерный магнитный резонанс в пенопласте
($f = 12,854$ МГц)

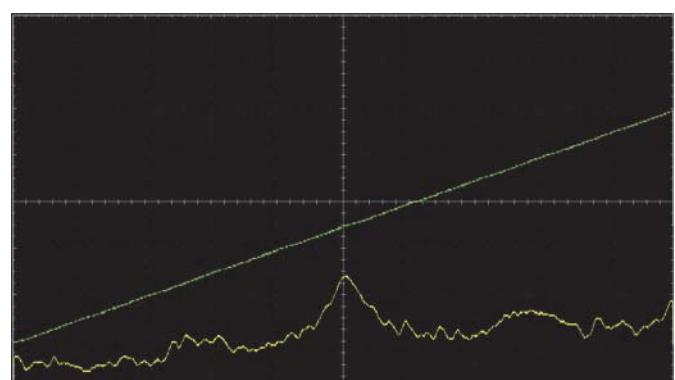


Рис. 3: Ядерный магнитный резонанс в тефлоне
($f = 12,1$ МГц)

UE6020200 | ЭФФЕКТ ХОЛЛА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ



ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

- Демонстрация эффекта Холла в легированном германии.
- Измерение зависимости напряжения Холла от тока и магнитного поля при комнатной температуре.
- Определение знака, плотности и мобильности носителей заряда при комнатной температуре.
- Измерение зависимости напряжения Холла от температуры образца.
- Определение температуры инверсии; установление различий между примесной и собственной проводимостью в случае германия, легированного акцепторной примесью.

ПРИМЕЧАНИЕ

Зависимость электрической проводимости от температуры используемых кристаллов германия исследуется в опыте UE6020100.

ЦЕЛЬ ОПЫТА

Исследование механизмов электрической проводимости в легированном германии с эффектом Холла

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ

Эффект Холла наблюдается в электропроводящих материалах, помещенных в магнитное поле B . Знак напряжения Холла меняется в зависимости от того, обусловлен ли один и тот же ток I положительными или отрицательными носителями заряда. Его значение зависит от плотности носителей заряда. Следовательно, эффект Холла представляет собой важное средство определения механизмов переноса зарядов в легированных полупроводниках. В этом опыте кристаллы легированного германия исследуются в диапазоне температур от 300 К до 450 К, чтобы убедиться в разнице проводимости, достигаемой за счет легирования, и собственной проводимости, получаемой за счет тепловой активации электронов, вызывающей их переход из валентной зоны в зону проводимости.

НЕОБХОДИМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Кол-во	Наименование	№ по каталогу
1	Базовый аппарат для изучения эффекта Холла	1009934
1	Легированный донорной примесью германий на печатной плате	1009760
1	Легированный акцепторной примесью германий на печатной плате	1009810
1	Датчик магнитного поля FW ±2000 мТл	1021766
2	Катушка модели D на 600 витков	1000988
1	U-образный сердечник	1000979
1	Пара полюсных наконечников и зажимных скоб для изучения эффекта Холла	1009935
1	Трансформатор с выпрямителем, 3/ 6/ 9/12 В, 3 А (230 В, 50/60 Гц)	1003316 или
	Трансформатор с выпрямителем, 3/ 6/ 9/12 В, 3 А (115 В, 50/60 Гц)	1003315
1	Источник питания постоянного тока, 0–20 В, 0–5 А (230 В, 50/60 Гц)	1003312 или
	Источник питания постоянного тока, 0–20 В, 0–5 А (115 В, 50/60 Гц)	1003311
1	Универсальный цифровой измерительный прибор Р3340	1002785
1	VinciLab	1021477
2	Кабель датчика	1021514
1	Датчик напряжения 500 мВ, дифференциальный	1021681
2	Датчик напряжения, 10 В, дифференциальный	1021680
2	Комплект из 15 безопасных проводов для проведения опытов, 75 см	1002843

Дополнительно рекомендуется иметь

- 1 Лицензия Инструктора 7

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ

Эффект Холла наблюдается в электропроводящих материалах, помещенных в магнитное поле B . Этот эффект обусловлен силой Лоренца, которая изменяет направление движения носителей заряда, создавая электрический ток I , протекающий в образце материала перпендикулярно по отношению к магнитному полю, и направлением тока. Разделение зарядов приводит к появлению электрического поля E_H , которое перпендикулярно направлению тока и компенсирует силу Лоренца, создавая напряжение Холла U_H между краями образца. Знак напряжения Холла меняется в зависимости от того, обусловлен ли один и тот же ток I положительными или отрицательными носителями заряда. Его значение зависит от плотности носителей заряда. Следовательно, эффект Холла представляет собой важное средство определения механизмов переноса зарядов в проводящих материалах и часто используется для изучения легированных полупроводников.

В этом опыте исследуются кристаллы легированного германия в диапазоне температур от 300 К до 450 К. Кристаллы представляют собой плоские образцы, которые имеют длину a , ширину b и толщину d , и проводят ток I в продольном направлении. Магнитное поле B пронизывает каждый образец перпендикулярно направлению тока. Возникающее в результате напряжение Холла равно:

$$(1) \quad U_H = R_H \cdot \frac{B \cdot I}{d}$$

Коэффициент Холла составляет:

$$(2) \quad R_H = \frac{1}{e} \cdot \frac{n_p \cdot \mu_p^2 - n_n \cdot \mu_n^2}{(n_p \cdot \mu_p + n_n \cdot \mu_n)^2}$$

$e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ ампер-секунд (элементарный заряд)

Плотности нп и np, соответственно, электронов в зоне проводимости и дырок в валентном слое, а также мобильности μ_n и μ_p , соответственно, электронов и соответствующих им дырок являются величинами, характеризующими данный материал, которые зависят от температуры образца T . Помимо напряжения Холла, в данном опыте измеряется падение напряжения в продольном направлении U в образце для определения электропроводности:

$$(3) \quad \sigma = e \cdot (n_n \cdot \mu_n + n_p \cdot \mu_p)$$

В процессе этого также определяется мобильность Холла:

$$(4) \quad \mu_H = R_H \cdot \sigma = \frac{n_p \cdot \mu_p^2 - n_n \cdot \mu_n^2}{n_p \cdot \mu_p + n_n \cdot \mu_n}$$

На плотности носителей заряда n_n и n_p влияет легирование, т.е. включение ионородных атомов в кристалл. В случае легирования акцепторной примесью атомы акцептора связывают электроны из валентной зоны и тем самым образуют дырки в этой зоне. В случае легирования донорной примесью каждый атом донора отдает один электрон в зону проводимости. Легированные кристаллы электрически нейтральны, т.е. их отрицательные и положительные заряды компенсируют друг друга. Соответственно:

$$(5) \quad n_n + n_A = n_p + n_D$$

n_A : концентрация акцепторов

n_D : концентрация доноров

Кроме того, n_n и n_p связаны законом действующих масс, количество пар «электрон-дырка», которые образуются и рекомбинируют в единицу времени, одинаково в состоянии равновесия, которое зависит от температуры. К нему применимо следующее выражение:

$$(6) \quad n_n \cdot n_p = n_i^2$$

n_i – плотность носителей заряда в случае только собственной проводимости (см. опыт UE6020100).

Поэтому в общем случае имеем:

$$(7) \quad n_n = \sqrt{n_i^2 + \frac{(n_A - n_D)^2}{4}} + \frac{n_D - n_A}{2}$$

$$(8) \quad n_p = \sqrt{n_i^2 + \frac{(n_A - n_D)^2}{4}} + \frac{n_A - n_D}{2}$$

При комнатной температуре концентрации n_A и n_D существенно выше плотности носителей заряда в случае только собственной проводимости n_i . Следовательно:

$$(9) \quad R_H = -\frac{1}{n_D \cdot e}, \quad \mu_H = -\mu_n$$

при добавлении донорной примеси при температуре 300 К,

$$(10) \quad R_H = \frac{1}{n_A \cdot e}, \quad \mu_H = \mu_p$$

при добавлении акцепторной примеси при температуре 300 К.

Тогда плотность и знак носителей заряда можно получить непосредственно из коэффициента Холла. Мобильность носителей заряда эквивалентна мобильности Холла.

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

По мере того, как с увеличением температуры появляется больше носителей, обеспечивающих электрический ток, напряжение Холла убывает, пока не достигнет нуля.

В случае германия, легированного акцепторной примесью, знак напряжения Холла меняется, потому что возрастающая собственная проводимость приводит к доминирующему влиянию электронов, мобильность μ_n которых выше. Проводимость, обусловленная легированием, преобладает при температурах ниже температуры инверсии, а собственная проводимость преобладает при температурах выше температуры инверсии.

При высоких температурах кристаллы, легированные донорными и акцепторными примесями, становятся неотличимы друг от друга, потому что:

$$n_n = n_p = n_i, \quad R_H = -\frac{1}{n_i \cdot e} \cdot \frac{\mu_n - \mu_p}{\mu_n + \mu_p}, \quad \mu_H = -(\mu_n - \mu_p)$$

Зависимость мобильности μ_n от температуры не видна явным образом в коэффициенте Холла, потому что в обоих случаях: $\mu \sim T^{-\frac{3}{2}}$ (см. также опыт UE6020100)

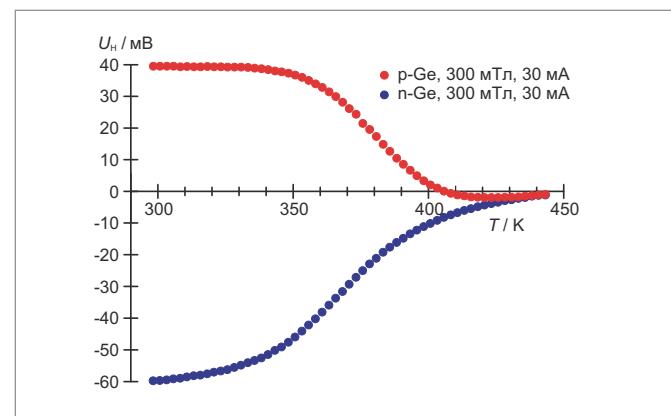
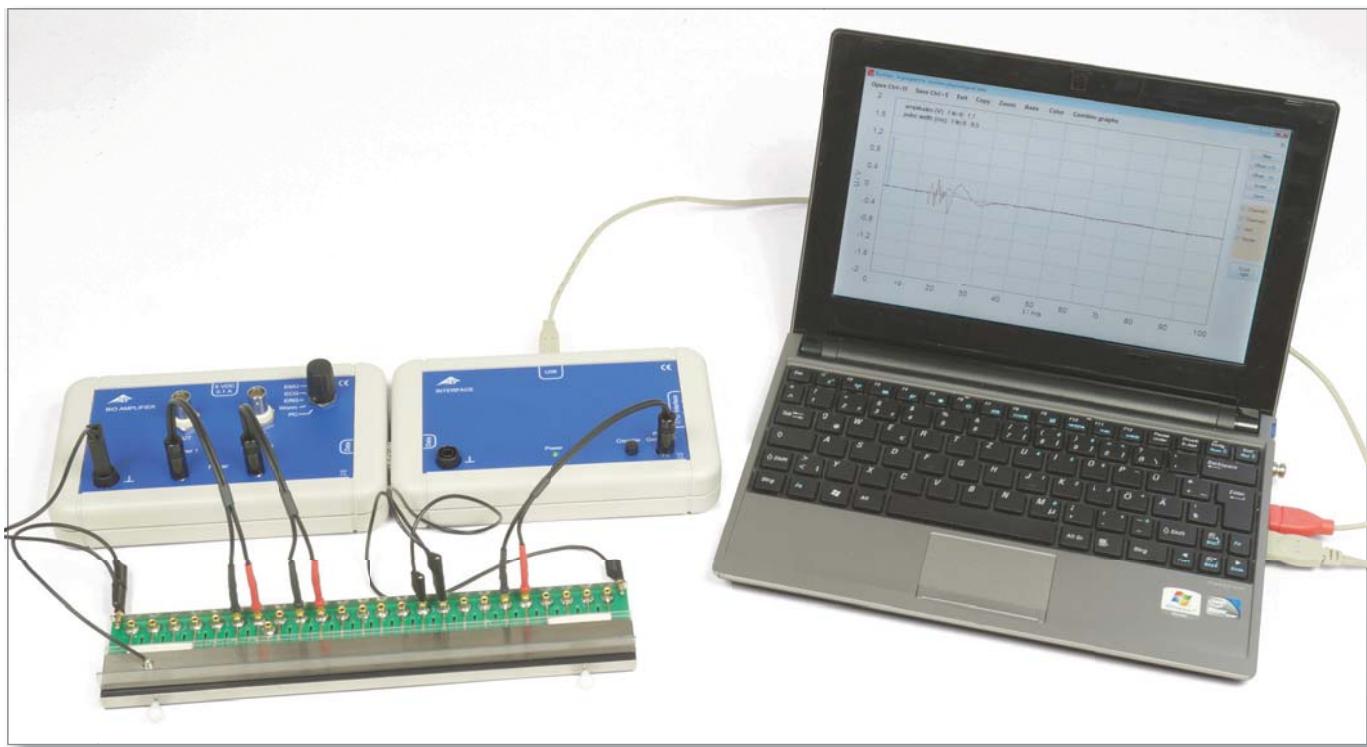


Рис. 1: Зависимость напряжения Холла в германии, легированном акцепторной и донорной примесями, от температуры T

UE9010100 | НЕЙРОФИЗИОЛОГИЯ



› ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

- Зарегистрировать потенциалы действия в нервных волокнах гигантского земляного черва после электрического и тактильного раздражения.
- При желании: Снять простую электромиограмму и электрокардиограмму человека.

ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ

Электрофизиологические опыты на людях нельзя выполнять без надежной изоляции от сетевого напряжения!

Используйте полученные значения и графики только для образовательных целей, никогда не используйте их для оценки состояния здоровья человека!

ЦЕЛЬ ОПЫТА

Исследовать потенциалы действия в нервных волокнах гигантского земляного черва после электрического и тактильного раздражения

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ

В этой адаптации знаменитого опыта Луиджи Гальвани с ногой лягушки производится электрическое раздражение нервного волокна гигантского земляного черва. Получаемые потенциалы действия усиливаются и измеряются с помощью измерительного интерфейса. На следующем этапе проводят тактильное раздражение земляного черва, что также приводит к потенциальному действию. При желании можно снять простую электрокардиограмму и простую электромиограмму человека.

ТРЕБУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Кол-во	Наименование	№ по каталогу
1	Измерительная камера для опытов с земляным червем	1020601
1	Биоусилитель (230 В, 50/60 Гц)	1020599 или
	Биоусилитель (115 В, 50/60 Гц)	1020600
1	Биоизмерительный интерфейс	1020602
1	Оборудование для стимуляции в опытах с земляным червем	1020603
	Гигантские земляные черви	
Дополнительно рекомендуемое оборудование		
1	Соединительный провод для снятия электрокардиограмм	1020605
1	Набор из 30 электродов для ЭКГ/ЭМГ	5006578

ОСНОВНОЙ ПРИНЦИП

Уже в 1790 году болонский исследователь *Луиджи Гальвани* показал на ноге лягушки, что в функционировании нервов и мышц участвуют электрические процессы. Даже в наши дни подобные образцы используются для исследований функционирования нервов и сокращения мышц. Одна из альтернатив этому – проводить эксперименты на живом земляном черве.

В первой части эксперимента гигантский земляной червь приводится в контакт с набором электродов, которые соединены с биоусилителем и биоизмерительным интерфейсом. Затем нервное волокно червя раздражают на одном конце сигналами различного напряжения. Как только напряжение превышает некоторый порог, наблюдается потенциал действия. На следующем этапе проводят тактильное раздражение переднего и заднего конца тела земляного червя, что также приводит к нарастанию потенциала действия. Так как толщина кожи на разных концах черва различна, можно наблюдать, что потенциалы действия также различаются.

У земляного червя строение нервов проще, чем у лягушки, и это позволяет измерять нервные импульсы в отдельных нервных волокнах. Можно продемонстрировать функционирование потенциалов нервов при получении рефлексов у цельного, неповрежденного червя. Можно также измерять клеточные механизмы привыкания к раздражению.

Во время опытов червь остается целым и невредимым. После этого его можно выпустить в естественную среду обитания.

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

На Рис. 1 показаны реакции земляного червя на электрическое раздражение. На верхнем графике раздражение было слишком слабым, чтобы вызвать потенциал действия нерва, но раздражения всего на 0,1 В выше оказалось достаточно для потенциала действия.

На Рис. 2 показаны потенциалы действия после тактильного раздражения переднего конца (нижний график) и хвоста (верхний график). Реакции после раздражения переднего конца регистрируются в дальних задних частях тела червя, а реакции после раздражения хвоста регистрируются в передних частях.

На Рис. 3 представлена электромиограмма медленно сокращающегося бицепса.

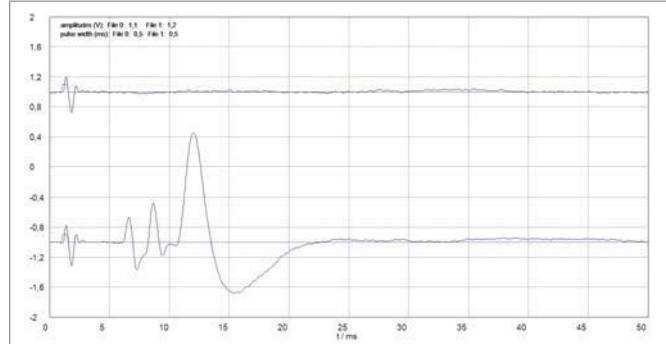


Рис. 1: Реакции на электрическое раздражение

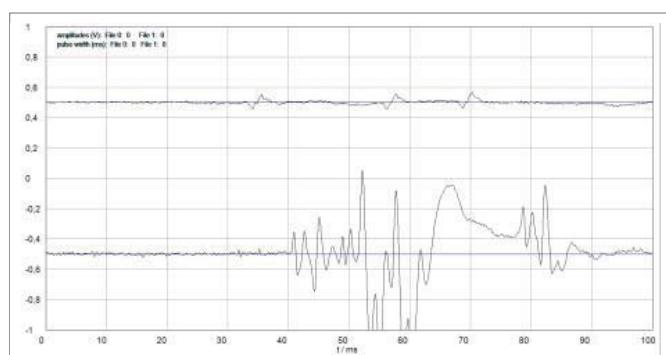


Рис. 2: Реакции на тактильное раздражение переднего конца (нижний график) и хвоста (верхний график)

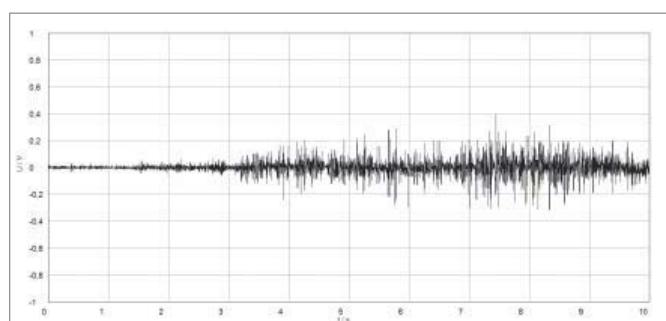
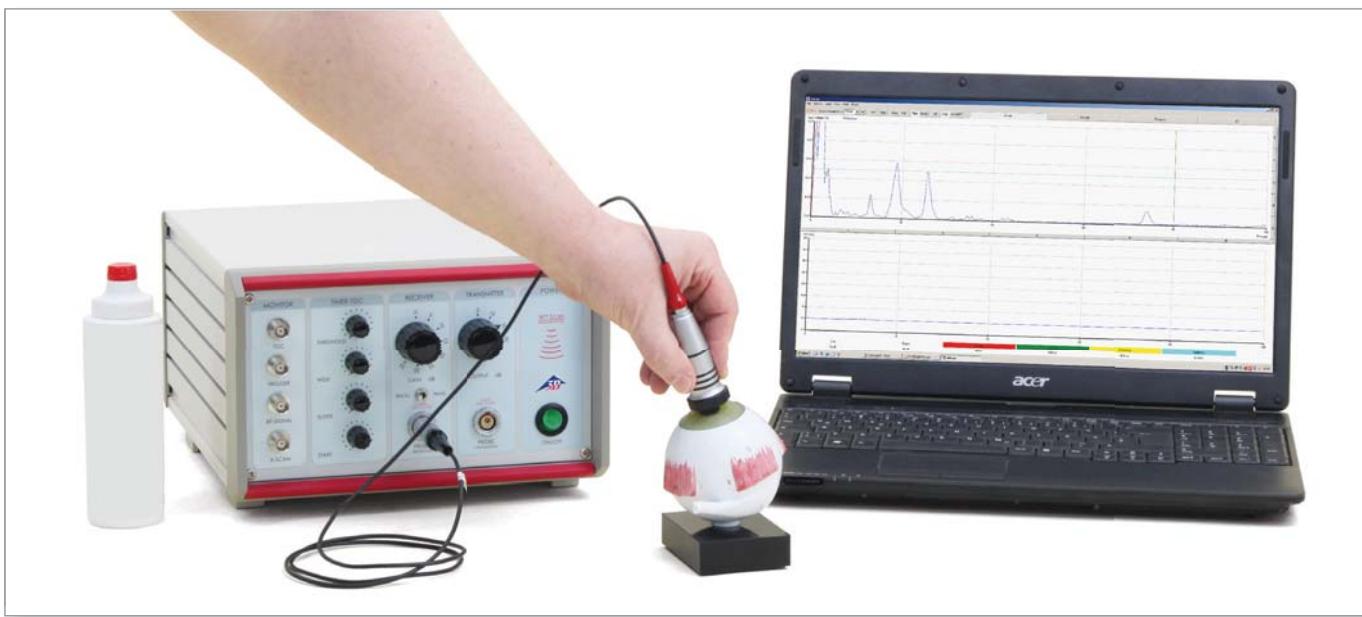


Рис. 3: Электромиограмма медленно сокращающегося бицепса

UE9020100 | УЛЬТРАЗВУКОВАЯ БИОМЕТРИЯ



› ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

- Измерить импульсно-эховым методом биометрические соотношения в модели человеческого глаза.
- Вычислить геометрию отдельных элементов глаза.

ЦЕЛЬ ОПЫТА

Определение внутренних расстояний в модели глаза

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ

В этом опыте демонстрируется типичное применение ультразвуковой биометрии с разверткой в А-режиме в медицинской диагностике, а именно в офтальмологии. На модели глаза измеряются все элементы здорового глаза и проводятся корректирующие расчеты.

ТРЕБУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Кол-во	Наименование	Nº по каталогу
1	Ультразвуковой эхоскоп GS200	1018616
1	Ультразвуковой датчик 2 МГц, GS200	1018618
1	Модель глаза для ультразвуковой биометрии	1012869
1	Контактный гель для опытов с ультразвуком	1008575

ОСНОВНОЙ ПРИНЦИП

Ультразвук используется также в офтальмологии. Важнейшая область его применения – биометрия, измерение расстояний в глазу. Расстояние между роговицей и сетчаткой имеет большое значение для расчета характеристик искусственного хрусталика, который имплантируется пациентам с катарактой. Ультразвуковая эхография необходима в этом случае потому, что мутность роговицы или хрусталика не позволяет использовать оптические методы. Для исследований внутриглазной жидкости, стекловидного тела, а также измерения толщины хрусталика в настоящее время применяются новые методы – лазерная или ультразвуковая (в В-режиме) визуализация.

Измеренное время пролета эхо-сигналов А-развертки нельзя просто перевести в расстояние, так как скорости различны в различных средах (роговица, хрусталик, жидкостная часть стекловидного тела). Поэтому необходимы корректирующие расчеты. Для модели даны две скорости: – хрусталик: 2500 м/с, – жидкости: 1410 м/с. Эти значения, а также время пролета сигналов от измеренного изображения А-развертки используются для определения расстояний с помощью следующего уравнения:

$$(1) \quad s = v \frac{\Delta t}{2}$$

В медицинской диагностике часто используются «средние значения», известные из опыта. Такую среднюю скорость для модели следует рассчитать по следующему уравнению:

$$(2) \quad v = \frac{v_1(t_1 + (t_3 - t_2) + v_2(t_2 - t_1))}{t_3}$$

Для соединения ультразвукового датчика с роговицей модели используется контактный гель. Медленно перемещайте датчик по роговице в поиске оптимальных сигналов (2 больших пика от хрусталика и один поменьше от сетчатки). После измерения времени пролета пиковых сигналов можно вычислить реальные расстояния.

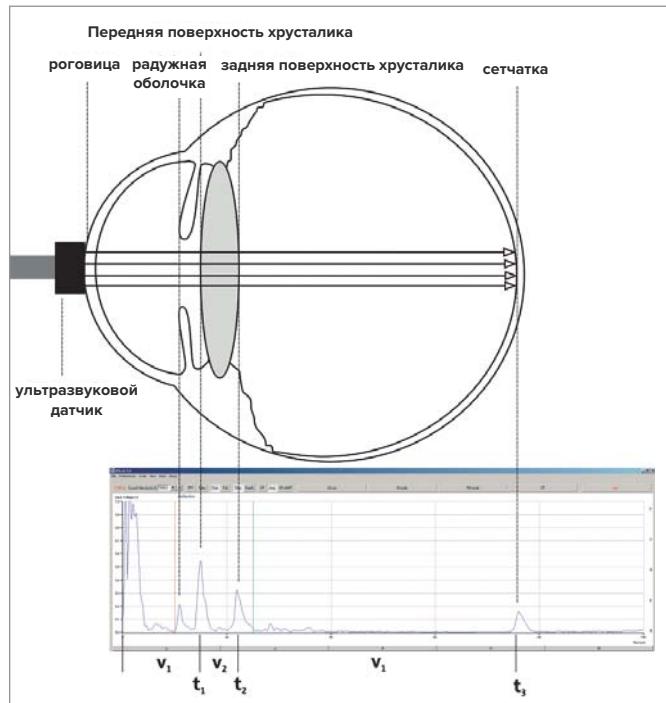


Рис. 1: Изображение А-развертки и схема человеческого глаза

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Измеряли время пролета сигналов каждого пика и вычисляли среднюю скорость по уравнению (2). Результат адаптировали к прибору в А-режиме, переключались на шкалу глубины и измеряли глубину каждого пика.

скорости в м/с			
(внутриглазная жидкость/жидкость стекловидного тела)			1410 м/с
(хрусталик)			2500 м/с
значения:	передняя поверхность хрусталика	задняя поверхность хрусталика	сетчатка
время в 10^{-6} с	13,7	21,1	74,8
средняя скорость			1518 м/с
измеренная глубина в мм	11,9	15,9	42,5
реальная глубина в мм	9,66	18,91	56,77
толщина/расстояние в мм	9,66	9,25	37,86

UE9020200

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ ТОМОГРАФИЯ



› ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

- Зарегистрировать изображение, получаемое в ультразвуковой КТ.
- Проанализировать различные параметры измерений.
- Исследовать влияние фильтрования и обработки изображения.

ЦЕЛЬ ОПЫТА

Исследовать формирование изображения в ультразвуковой КТ и связанных с ним параметров

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ

Показано несколько стадий формирования изображения в компьютерной томографии. Анализируется различие между ослаблением и скоростью звука. Исследуется влияние фильтрования и обработки изображения.

ТРЕБУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Кол-во	Наименование	№ по каталогу
1	Ультразвуковой эхоскоп GS200	1018616
1	Устройство управления КТ	1017783
1	Сканер КТ	1017782
1	Мерный лоток КТ	1017785
1	Образец для КТ	1017784
2	Ультразвуковой датчик 2 МГц, GS200	1018618
1	Контактный гель для опытов с ультразвуком	1008575

ОСНОВНОЙ ПРИНЦИП

Рентгеновская КТ, МРТ и ПЭТ – это компьютеризированные методы визуализации, применяемые в медицинской диагностике, промышленности и исследованиях. В них такие процессы, как поглощение рентгеновского излучения, ядерно-магнитный резонанс или эмиссия частиц используются для получения изображений поперечного сечения с помощью измеряемых соответствующим образом физических величин. Ультразвуковая компьютерная томография представляет собой еще один метод КТ. Она отличается от рентгеновской КТ тем, что вместо ослабления рентгеновского излучения измеряются затухание и время пролета ультразвуковых сигналов в исследуемом объекте. В ультразвуковой КТ регистрируются линейные развертки под разными углами, которые объединяются для формирования изображения поперечного сечения. При этом образец, расположенный между передающим и приемным преобразователем, перемещается и поворачивается под управлением компьютера. Наложение проекций отдельных разверток можно шаг за шагом прослеживать на ПК.

Для формирования изображения используются ослабление звука и скорость звука. Коэффициент ослабления звука μ получают из измеренной амплитуды A и амплитуды без образца A_0 по закону ослабления:

$$(1) \quad \mu \propto \ln \frac{A_0}{A}$$

Для получения томограммы скорости звука в качестве измеряемой величины используется время пролета, причем справедливо следующее выражение:

$$(2) \quad c \propto \frac{t_0}{t}$$

где t_0 – измеренное время пролета без образца (длина пути s постоянна).

Образец (образец для затухания или изменения скорости) прикрепляют к держателю образца и с помощью устройства управления томографом располагают точно между двумя датчиками. Затем держатель образца перемещают на половину пути сканирования, устанавливают количество угловых интервалов и начинают КТ-сканирование. Во время измерений наблюдают отдельные линейные развертки и изучают создание томограмм путем наложения проекций линейных разверток. Полученные изображения оптимизируют с помощью различных фильтров, а также регулировки яркости и контрастности, затем томограмму ослабления сравнивают с томограммой скорости.

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Передаваемый сигнал (схема вверху слева на Рис. 1) измерялся относительно максимальной амплитуды и времени пролета максимальной амплитуды, и на этом основании был построен линейный профиль (сканирование под одним углом, расстояние между точками 500 мкм) (схема внизу слева). Наложение посредством КТ-алгоритма (25 угловых интервалов) дает ослабление звука на изображении вверху слева (нефильтрованное, контрастность изменена) и скорость звука на изображении вверху справа (также нефильтрованное, контрастность изменена). Фильтрование изображения ослабления улучшает контрастность, так что становятся видны края (потери на отражение). Внутренняя часть почти не отличается от окружающей воды, на изображении скорости звука (справа) образец и включение ясно видны в виде однородных областей с различной скоростью звука.

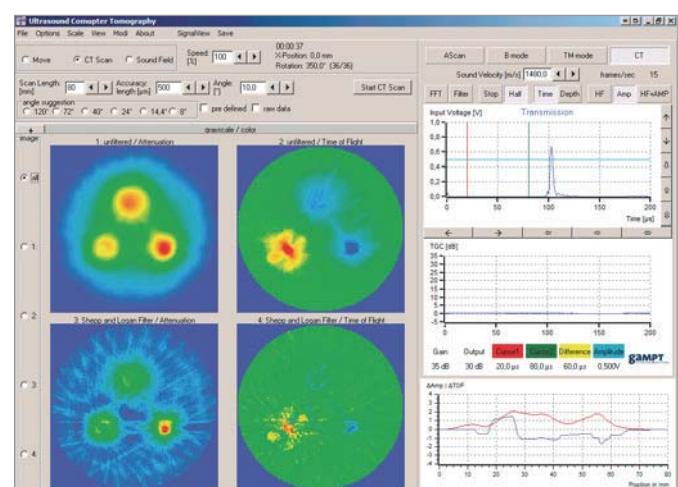
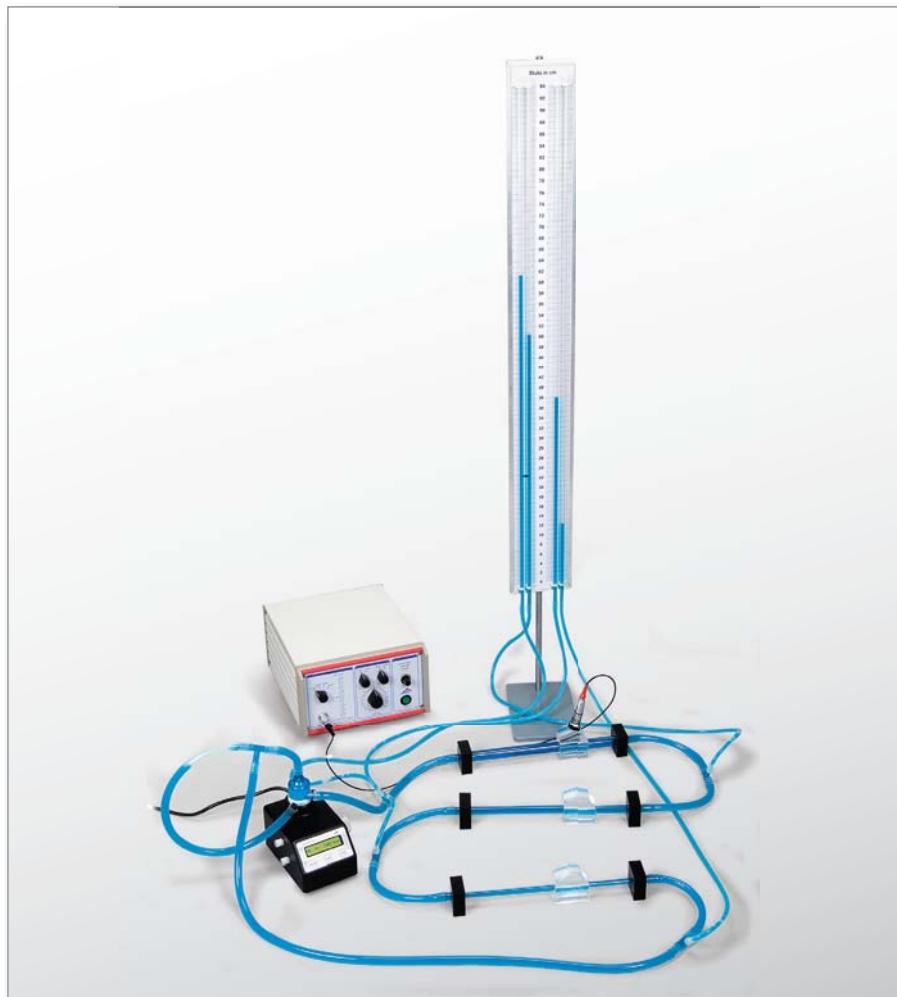


Рис. 1: Скриншот с томограммами ослабления и времени пролета звука для образца КТ

UE9020300 | МЕХАНИКА ЖИДКОСТЕЙ



ЦЕЛЬ ОПЫТА

Исследовать фундаментальные характеристики стационарных и ламинарных потоков жидкостей ультразвуковым доплеровским методом

› ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

- Измерить доплеровский сдвиг частоты для различных скоростей насоса и перепады давления с помощью вертикальных трубок.
- Определить расходы, сопротивления потоку и динамическую вязкость доплеровской жидкости, используя уравнение неразрывности, уравнение Бернулли и уравнение Хагена-Пуазейля.
- Вычислить числа Рейнольдса для различных скоростей потока и диаметров трубок.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ

Используются измерения потока ультразвуковым доплеровским методом для демонстрации фундаментальных законов, управляющих протеканием жидкости в трубах, и зависимости характеристик потока от его скорости и геометрии трубы. Исследуется соотношение между скоростью потока и поперечным сечением трубы (условие неразрывности), а также между сопротивлением потоку и диаметром трубы (закон Хагена-Пуазейля).

ТРЕБУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Кол-во	Наименование	№ по каталогу
1	Ультразвуковой доплеровский аппарат	1022330
1	Ультразвуковой преобразователь, 2 МГц	1018618
1	Набор доплеровских призм и трубок	1002572
1	Вертикальные трубки для измерения давления	1002573
1	Доплеровская искусственная текучая среда	1002574
1	Центробежный насос	1002575
1	Контактный гель для опытов с ультразвуком	1008575

ОСНОВНОЙ ПРИНЦИП

Доплеровский эффект применяется в медицинской диагностике для исследований кровотока и движения структур сердца в кардиологической диагностике, артериальных и венозных кровеносных сосудов, циркуляции крови в мозгу, а также для послеоперационного контроля кровеносных сосудов.

Стационарно текущая жидкость характеризуется постоянным расходом жидкости в каждой точке системы. Поэтому уравнение неразрывности для двух разных зон трубы A_1 и A_2 выглядит следующим образом:

$$(1) \quad A_1 v_1 = A_2 v_2 = \dot{V} = \text{const.}$$

где v_1 и v_2 – средние скорости в соответствующей зоне, а \dot{V} – расход (объем на единицу времени). Статическое давление в текущей жидкости всегда меньше, чем в неподвижной, и снижается тем больше, чем выше скорость потока (уравнение Бернулли). Для потока, текущего через горизонтальную трубу (без гравитационного давления) полное давление p_0 описывается следующим выражением:

$$(2) \quad p + \frac{1}{2} \rho v^2 = p_0$$

p_0 постоянно только в жидкости, в которой отсутствует трение. В потоке, где имеется трение, полное давление уменьшается в зависимости от вязкости η , длины l , поперечного сечения A проходимой зоны и расхода V . Для жидкостей с не слишком высокими скоростями потока (ламинарный поток) в узких трубах действует закон Хагена-Пуазейля, определяющий перепад давления Δp :

$$(3) \quad \Delta p = R \dot{V}$$

$$(4) \quad R = \frac{8 l}{\pi^4 \eta}$$

где r – радиус трубы, а l – ее длина. Это значит, что уменьшение диаметра кровеносного сосуда вдвое приводит к увеличению сопротивления кровотоку в 16 раз. Согласно этому принципу кровеносные сосуды регулируют распределение крови между конечностями и внутренними органами.

Создается модель циркуляции, состоящая из 3 трубок равной длины, но различных диаметров. В начале и в конце каждой трубы находятся точки измерения равного диаметра. С помощью призмы Доплера и прибора FlowDop измеряются средние скорости потока в трубках при 3 разных расходах (3 разных напряжениях на центробежном насосе). Зная измеренные скорости потока, можно определить расход по уравнению (1) и сравнить. В точках измерения можно измерить перепад давления вследствие сопротивления потоку. Вычислив расход из уравнения (1), можно определить сопротивление потоку по уравнению (4), а отсюда, используя известную геометрию, получить динамическую вязкость жидкости.

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Зная измеренные расходы и известные площади поперечного сечения, можно рассчитать соответствующий поток. В этой экспериментальной установке он почти эквивалентен для всех диаметров трубок при одинаковых настройках центробежного насоса, что удовлетворяет уравнению неразрывности. Еще один результат: на приведенном ниже графике показано сопротивление потоку R , определенное для различных диаметров трубок и различных расходов. Здесь видна сильная зависимость от радиуса трубы r , которую можно ожидать согласно уравнению Хагена-Пуазейля:

$$R \sim \frac{1}{r^4}$$

Рис. 1 демонстрирует, что расход, вычисленный из измеренной скорости и площади, почти одинаков для всех диаметров трубок при равных напряжениях; следовательно, уравнение неразрывности удовлетворяется.

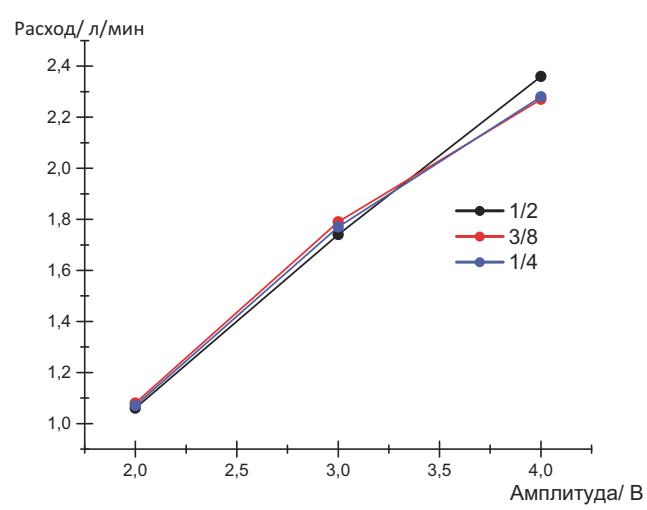


Рис. 1: Расходы для различных диаметров трубок

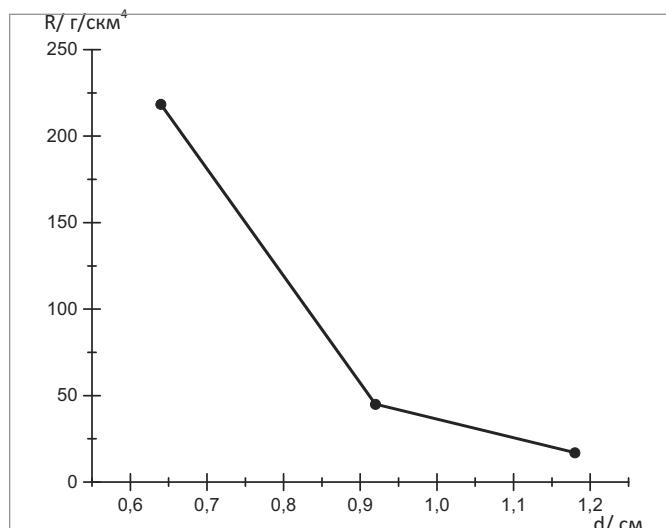


Рис. 2: Расходы для различных диаметров трубок

UE9020400 | ДОПЛЕРОВСКАЯ ЭХОГРАФИЯ



› ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

- Доплеровские эхографические исследования манекена руки.
- Измерение скорости кровотока.
- Диагностика стеноза (сужения сосудов) руки.
- Регистрация доплеровских спектров и сфигмограмм.

ЦЕЛЬ ОПЫТА

Исследование манекена руки

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ

Цель опыта – узнать, как проводить измерения кровотока доплеровским ультразвуковым методом. Используется реалистичный манекен руки, чтобы продемонстрировать различия между постоянным (венозным) и пульсирующим (артериальным) кровотоком, а также между нормальным кровотоком и стенозом.

ТРЕБУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Кол-во	Наименование	№ по каталогу
1	Ультразвуковой доплеровский аппарат	1022330
1	Комплект «Искусственная рука»	1022331
1	Центробежный насос	1002575
1	Контактный гель для опытов с ультразвуком	1008575

ОСНОВНОЙ ПРИНЦИП

В доплеровской эхографии используется эффект Доплера, чтобы определять, движется ли структура (обычно кровь) по направлению к ультразвуковому датчику или от него, а также ее относительную скорость. Вычислив сдвиг частоты для определенного объема образца, например, крови, протекающей через клапан сердца, можно определить и визуализировать скорость и направление этого объема. Доплеровский сдвиг частоты – это разность ультразвуковой частоты между передаваемыми и принимаемыми эхо-сигналами, т.е. частота эхо-сигнала минус передаваемая частота. Доплеровская частота пропорциональна скорости потока крови.

Доплеровская эхография особенно полезна в исследованиях сердечно-сосудистой системы (эхография сосудов и сердца) и существенно важна для многих областей, например, для определения обратного кровотока в сосудистой системе печени при портальной гипертензии. Информация, получаемая при доплеровском исследовании, отображается графически с помощью спектрального доплера или в виде изображения с помощью цветового доплера.

При проведении опыта включают насос и устанавливают его скорость в среднем диапазоне (около 4000 мин^{-1}). Режим – ГК (непрерывный, венозный). Сканируют сосуд манекена руки с помощью контактного геля и доплеровского датчика с аудиосигналом. Поток на спектральном изображении анализируют на отрицательные и положительные составляющие. Затем направление датчика изменяют на 180° . Сосуд сканируют для выявления изменений в спектральном изображении (стеноз) и характеризуют различия между изображениями «здорового» сосуда и сосуда со стенозом. Наконец, насос переключают на режим P_1 и P_2 (пульсирующий), анализируют изображения и определяют частоту пульса.

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

На Рис. 1 показан постоянный (венозный) поток со средним доплеровским сдвигом приблизительно -700 Гц . Минус в доплеровском сдвиге означает, что поток идет от датчика.

Рис. 2 – спектральное распределение при повернутом датчике. Поток идет к датчику (доплеровский сдвиг такой же, но положительный).

Рис. 3 – рисунок доплеровского спектра при стенозе.

Различия с нормальным (здравым) спектром, таким как показанный на Рис. 1, следующие:

1. Локальное увеличение максимального доплеровского сдвига (максимальная скорость потока).
2. Уменьшение средней частоты и расширение спектра.
3. Увеличение явления рефлюкса (отрицательные и положительные части спектра).

На Рис. 4 показан пульсирующий поток в режиме P_1 с частотой импульсов около 90 мин^{-1} .

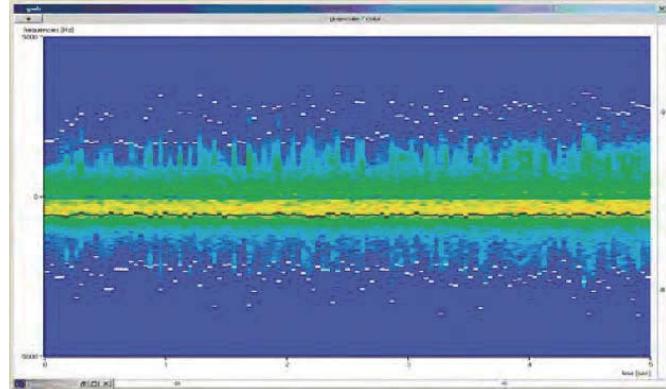


Рис. 1: Доплеровский спектр кровотока в венах

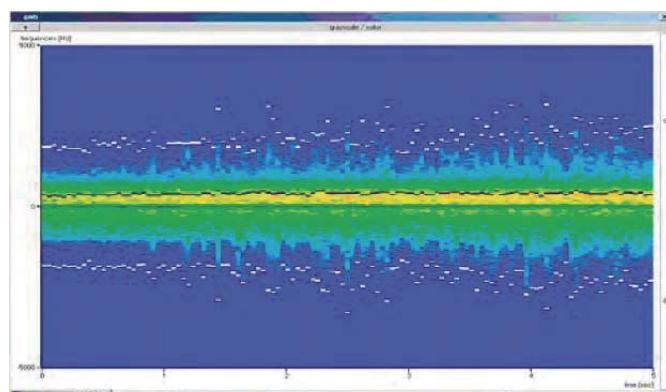


Рис. 2: Спектральное распределение при повернутом датчике

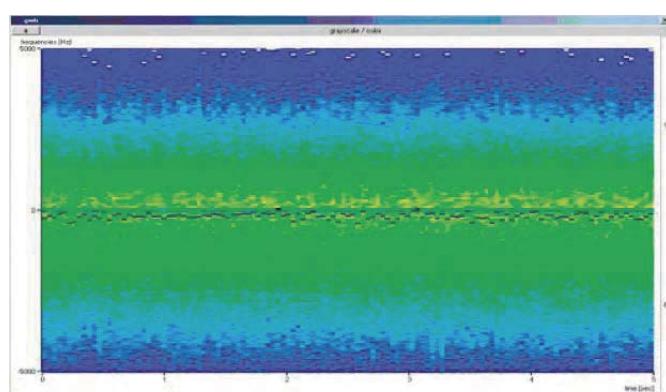


Рис. 3: Доплеровский спектр при стенозе

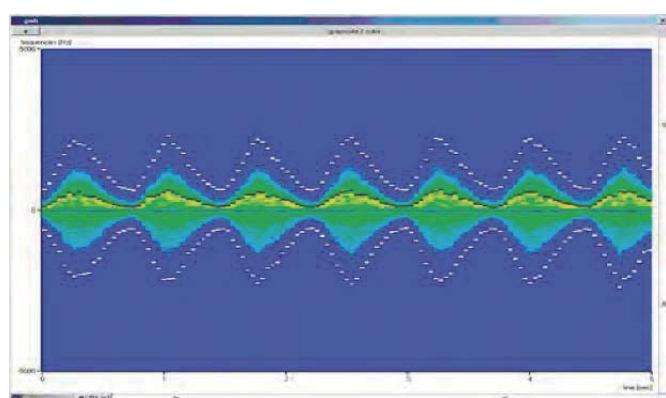


Рис. 4: Пульсирующий поток

ООО «ЗБ Сайнтифик»
196084, Россия, Санкт-Петербург,
Московский пр., 79А, лит. А, офис 400
Тел.: +7 812 3342223 • Факс: +7 812 3347150
www.3bscientific.ru; e-mail: sales.spb@3bscientific.com

Лабораторная установка «Электроваумный прибор с мальтийским крестом»

Демонстрация прямолинейного распространения электронов при отсутствии поля

