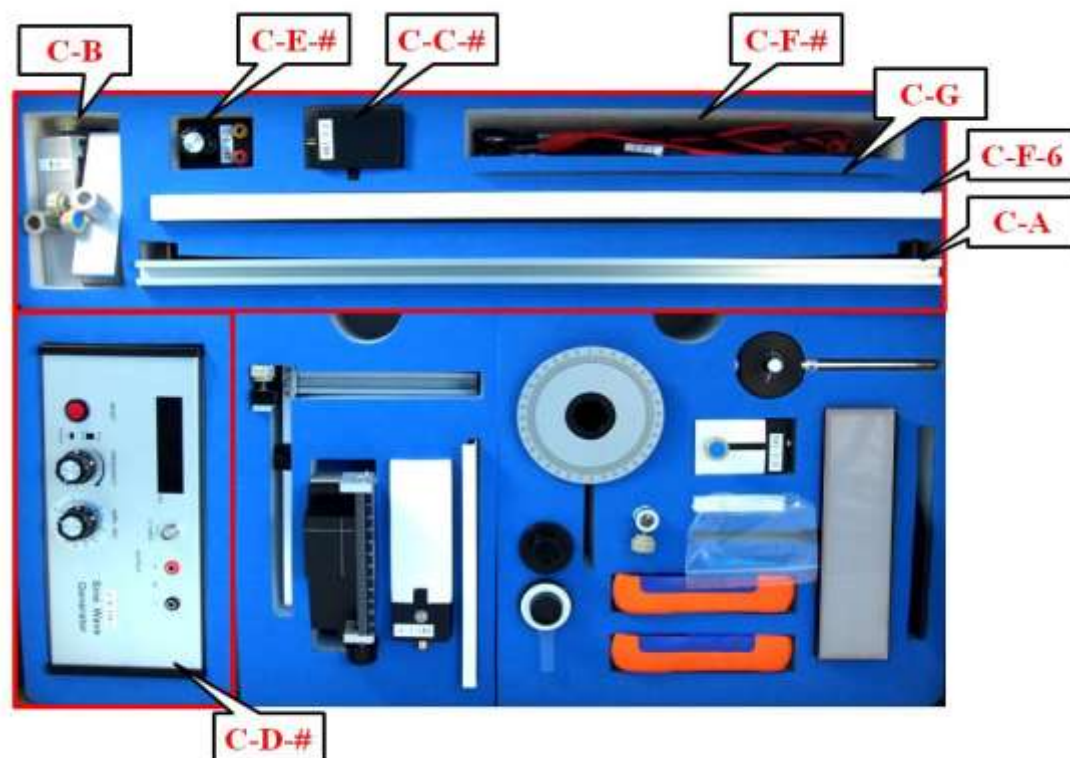


Экспериментальное оборудование

Набор-С общего оборудования для всех экспериментов:

Маркировка	Наименование	Количество
С-А	Оптическая скамья (60 см)	1
С-В	Оптические держатели	4
С-С-#	Коллимированный (сфокусированный) лазерный диод (CLD)	1
С-Д-#	Генератор напряжения (синусоидальный, постоянного напряжения (DC) 5В)	1
С-Е-#	Переменный резистор (5 кОм)	1
С-Ф-#	Соединительные провода	4
С-Ф-6	Стойка для установки оборудования	1
С-Г	Линейка	1

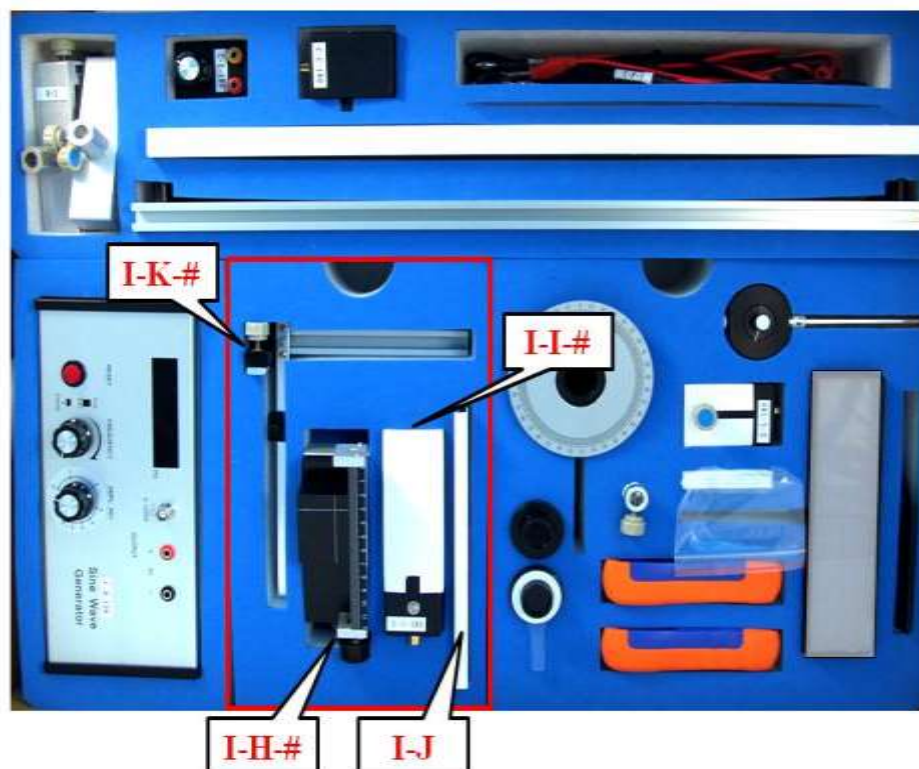
Внимание: вместо знака “#” у вас будет стоять регистрационный номер оборудования. Этот номер используется при проверке вашей работы (проверяющими).



Набор -I для Экспериментального задания-I

Маркировка	Наименование	Количество
I-H-#	Черный ящик с возможностью его перемещения в одном направлении	1
I-I-#	Латунная колеблющаяся пластинка, прикрепленная к источнику колебаний (коробке)*	1
I-J	Экран для измерения амплитуды колебаний	1
I-K-#	Стойка с вертикальной муфтой-держателем (с линейкой и магнитом)	1

* Латунная колеблющаяся пластинка прикрепленная к коробке соединяется с пьезоэлектриком, колебания которого возбуждаются переменным током (AC).



©Инструкция для генератора напряжения:

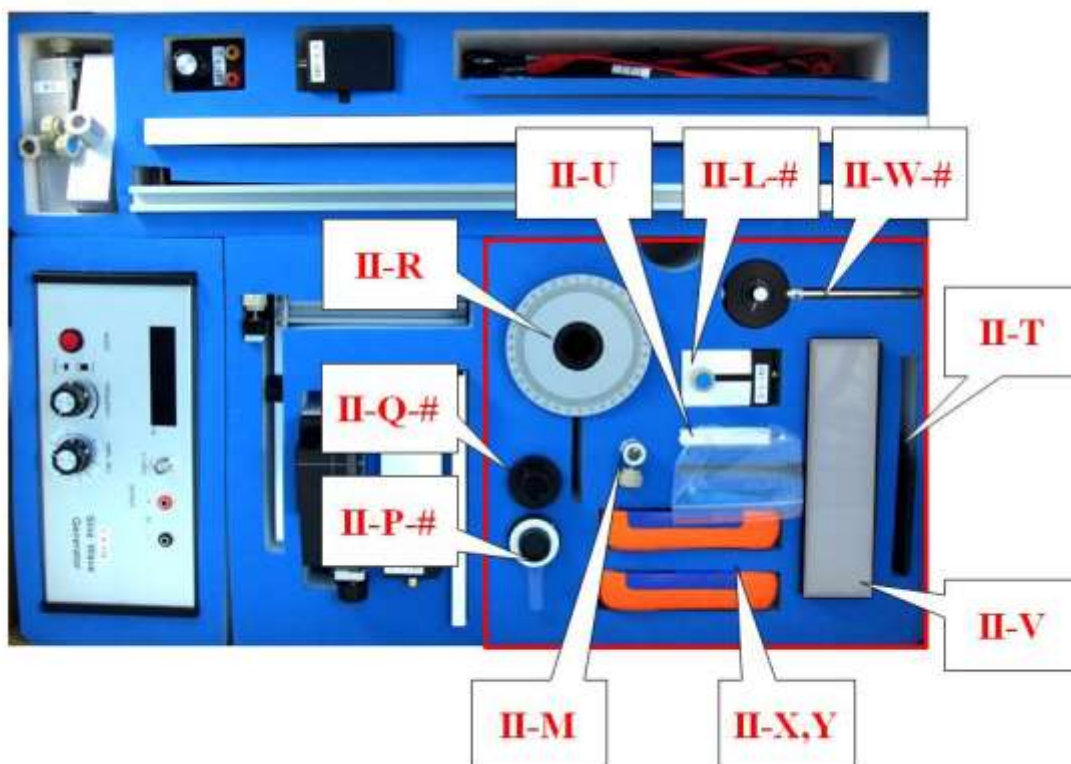
- Кнопка включения/выключения питания (**Power**), не показанная на картине, находится на правой стороне генератора.
- Дисплей (“Display Panel”) показывает частоту напряжения генератора.
- Используйте выход “Sine Wave” BNC для подачи переменного напряжения.
- Используйте выход “5V DC” для подачи постоянного напряжения 5В.
- Частота генератора изменяется вращением ручки “FREQUENCY”. Нажмите и крутите эту ручку для грубой настройки частоты, и просто крутите для тонкой настройки частоты.
- Амплитуду подаваемого переменного напряжения можно менять поворачивая ручку “AMPL ADJ”.
- Нажимайте кнопку “RESET” для сбрасывания подаваемой частоты до 0.00 Гц.



Набор-II для Экспериментального задания-II

Маркировка	Наименование	Количество
II-P-#	Поляризатор с индикатором угла поворота (PR2)	1
II-Q-#	Поляризатор (PR1)	1
II-R	Держатели для PR1 и PR2	1
II-T	Держатель светового фильтра	1
II-U	Световой фильтр	4
II-W-#	Фоторезистор (PC)	1
II-X	Цифровой мультиметр	1
II-Y	Цифровой мультиметр	1

Оборудование, маркированное II-L-# и II-V здесь не используется.



©Инструкция для цифрового мультиметра:

- Вы можете включить/выключить цифровой мультиметр кнопкой “**power button**”.
- Используйте входы “V Ω ” и “COM” для измерения напряжения и сопротивления.
- Используйте входы “mA” и “COM” для измерения малых токов.
- Используйте круглую ручку (Function Dial) мультиметра, чтобы выбрать надлежащую функцию и предел измерений. “V” для использование в качестве вольтметра, “A” для использование в качестве амперметра и “ Ω ” для использование в качестве омметра.
- Не нажимайте кнопку “HOLD”, потому что она зафиксирует показания мультиметра. Если вы ее нажали случайно, то для возобновления измерений нажмите эту кнопку еще раз.



Экспериментальное задание I. Исследование магнитных сил

⊙ Введение

Как показано на рис. I-1, колеблющаяся пластинка может колебаться в вертикальном направлении. Пусть эти колебания возбуждаются внешним источником некоторой частоты. Если построить график зависимости средней мощности, рассеиваемой колеблющейся пластинкой из-за наличия в ней некоторых механизмов потери энергии, как функцию частоты, то на графике будет наблюдаться максимум рассеиваемой энергии при определенной частоте f_R , называемой *резонансной частотой* (см. рис.I-2). Ширина резонанса описывается добротностью Q :

$$Q = \frac{f_R}{\Delta f},$$

где Δf - ширина полумаксимума резонансной кривой (см. рис.I-2), т.е. $\Delta f = f_2 - f_1$, где f_1 и f_2 соответствуют высоте $P_{\max}/2$ слева и справа от резонансной частоты.

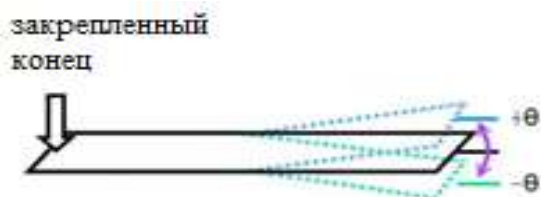


Рис.I-1. Колеблющаяся пластинка.

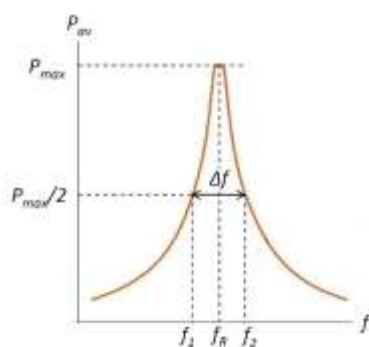


Рис.I-2. Зависимость рассеиваемой средней мощности от внешней частоты.

Если помимо внешней переменной силы на конец колеблющейся пластинки действует однородная сила, то ее резонансная частота, амплитуда и добротность остаются неизменными. Наоборот, под действием неоднородной силы свойства колеблющейся пластинки, такие как резонансная частота f_R , максимальная амплитуда A , и добротность Q

могут изменяться в зависимости от положения ее свободного конца.

В этом экспериментальном задании к свободному концу колеблющейся пластинки прикреплен маленький магнит (называемый исследовательским), как показано на рис. I-3. Исследуемый магнит, располагаемый под этим исследовательским магнитом, создает неоднородное магнитное поле, которое в свою очередь приводит к воздействию неоднородной силы на исследовательский магнит. Когда исследовательский магнит приближается к расположенному снизу исследуемому магниту одинаковыми магнитными полюсами, то это приводит к увеличению силы отталкивания между ними. При этом резонансная частота f_R колеблющейся пластинки изменяется в зависимости от расстояния между магнитами. Если исследовательский магнит сдвинуть в горизонтальном направлении как показано на рис. I-4, то может появиться слабая сила притяжения между магнитами. Это приводит к уменьшению резонансной частоты. Так как резонансная частота очень чувствительна к изменению расстояния между магнитами, то мы используем это для нахождения положения магнитов, скрытых внутри черного ящика.

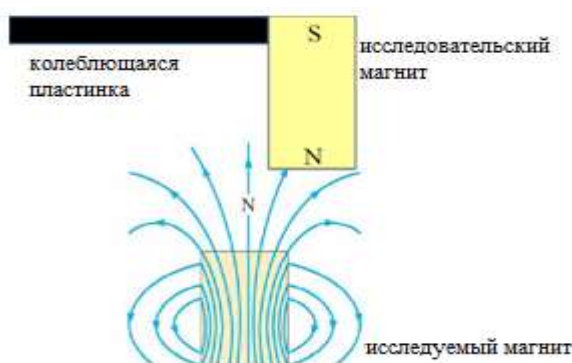


Рис. I-3. Возле магнитного полюса исследуемого магнита магнитное поле неоднородно.

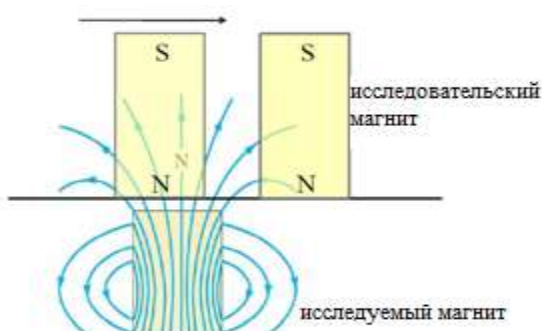


Рис. I-4. Перемещение исследовательского магнита в горизонтальном направлении может приводить как отталкиванию так и к притяжению

⊙ Выполнение эксперимента

На протяжении всего Эксперимента I не нужно вычислять погрешность

Эксперимент I-A Измерение резонансной частоты

Аккуратно вытащите экспериментальное оборудование, обозначенное выше как набор-I, из коробки общего оборудования набор-С. Соберите экспериментальную установку как показано на фотографии, приведенной на рис. I-A-1. На рис. I-A-2 схематически изображена та же самая установка. Соедините источник постоянного напряжения на 5В к лазеру (С-С-#). Соедините выход переменного напряжения генератора с источником колебаний (коробкой) (I-I-#), к которой прикреплена колеблющаяся пластинка. Включите питание генератора и зафиксируйте амплитуду его напряжения. Направьте лазерный луч на зеркало свободного конца колеблющейся пластинки таким образом, чтобы отраженный луч давал пятнышко на экране (I-J). Используйте это для измерения амплитуды колебаний пластинки.

Предупреждение: 1) Осторожно удалите защитную бумагу, прежде чем использовать колеблющуюся пластинку (I-J-#) в эксперименте. Резонансная частота колеблющейся пластинки очень чувствительная к изменению ее формы и ее деформация может привести к неправильному результату.
2) Не допускайте попадания лазерного пучка непосредственно в глаза, это может их повредить.

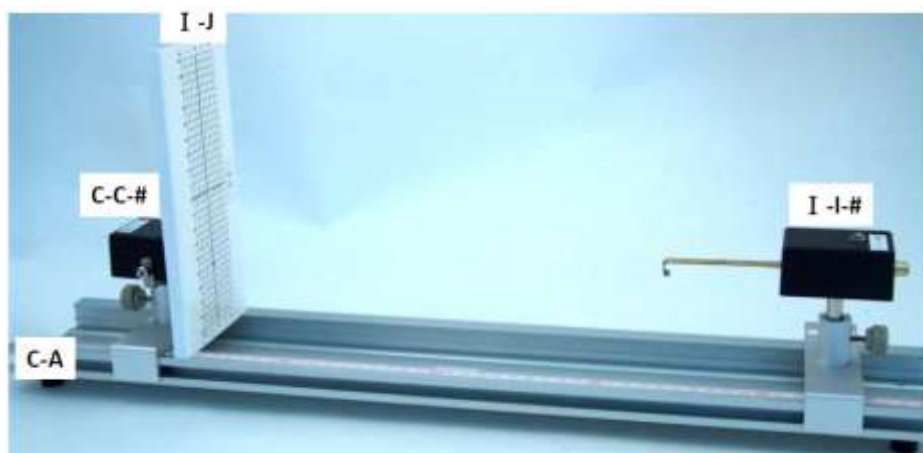


Рис. I-A-1. Экспериментальная установка для нахождения резонансной частоты.

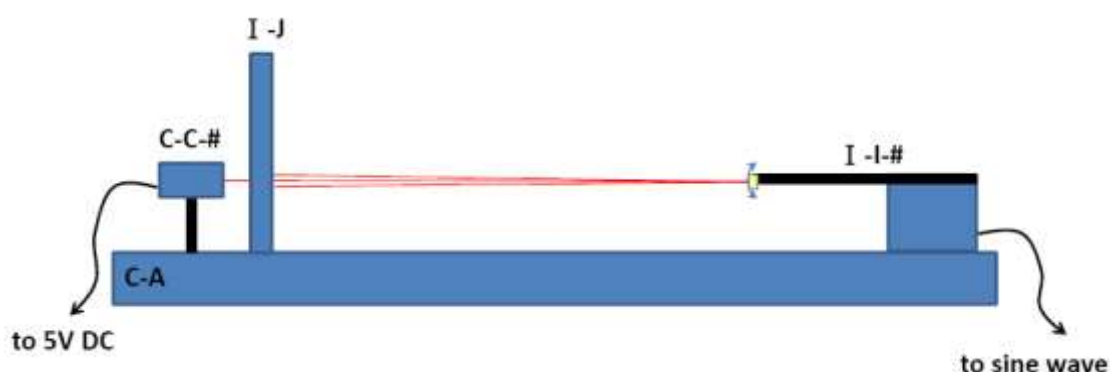


Рис. I-A-2. Схема экспериментальной установки показанной на рис.I-A-1.

- (1) Измерьте амплитуду A колебаний лазерного пятнышка, изменяя частоту генератора. Запишите измеренные значения амплитуды как функцию частоты в таблицу, приведенную в лист ответов (Answer Sheet). **(0.8 балла)**
- (2) На листе миллиметровой бумаги постройте график для определения резонансной частоты f_{RO} и добротности Q . Занесите полученные значения f_{RO} и Q в лист ответов (Answer Sheet). **(1.2баллов)**

Экспериментальное задание I-B. Зависимость резонансной частоты от внешней силы.

В этой части экспериментального задания исследуется зависимость резонансной частоты от воздействия внешней неоднородной силы. Неоднородная сила генерируется маленьким 3 мм цилиндрическим магнитом M_C , называемым калибровочным и фиксированным на стойке с вертикальной муфтой-держателем (I-K-#) таким образом, что северный полюс N магнита направлен вертикально вверх. Исследовательский магнит M_T , прикрепленный к свободному концу осциллирующей пластинки, ориентирован северным полюсом N вниз. Оси, проходящие через полюса обоих магнитов, должны лежат в одной вертикальной прямой.

Соберите установку, фотография которой приведена на рис.I-B-1. На рис.I-B-2 схематически изображена та же самая установка.

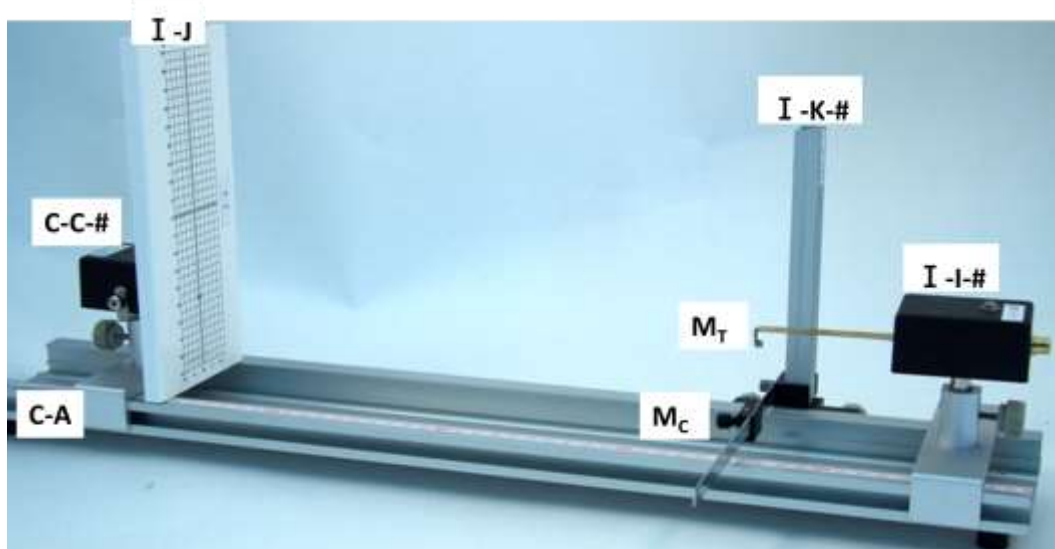


Рис. I-B-1. Экспериментальная установка для нахождения зависимости резонансной частоты от расстояния между двумя магнитами M_C и M_T .

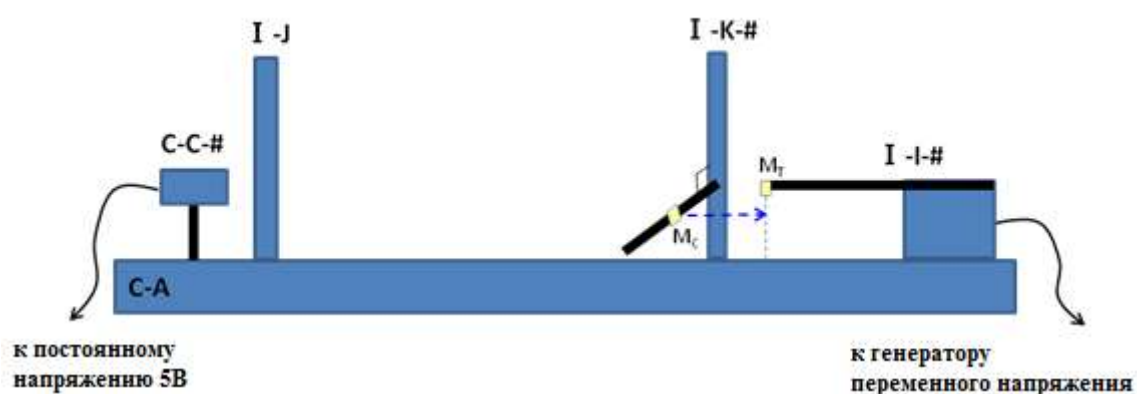


Рис. I-B-2. Схематическое изображение установки, фотография которой приведена на рис. I-B-1.

- (1) Поверните калибровочный магнит M_C подальше от исследовательского магнита M_T (см. рис. I-B-2). По шкале стойки с вертикальной муфтой-держателем определите положение z_0 нижнего конца исследовательского магнита M_T и запишите полученные значения z_0 в лист ответов (Answer Sheet). (0.2 балла)
- (2) Теперь поверните магнит M_C таким образом, чтобы он был прямо под магнитом M_T . **Оси, проходящие через полюса обоих магнитов должны, лежат в одной вертикальной прямой.** Определите положение z_0 верхнего конца северного полюса N магнита M_C .

Вычислите расстояние d по формуле $d = z_0 - z$. Запишите значение z и d в таблицу

листа ответов (Answer Sheet).

(3) Определите резонансную частоту f_R для расстояния d изменяя частоту генератора пока амплитуда колебаний не станет максимальной. Для определения f_R не требуется построение графиков зависимости амплитуды от частоты. Занесите определенную резонансную частоту f_R в таблицу листа ответов (Answer Sheet).

(4) Изменяя вертикальное положение магнита M_C повторите пункты (2) и (3) и для нескольких значений расстояния d , определите резонансную частоту f_R . Полученные данные занесите в таблицу листа ответов (Answer Sheet).

(1.2 балла)

(5) На миллиметровой бумаге постройте график зависимости f_R от расстояния d .

(1.2 балла)

(6) Пусть $\Delta f_R = f_R - f_{R0}$. На другом листе миллиметровой бумаги постройте график зависимости $\ln(\Delta f_R)$ как функцию расстояния d . Проведите на глаз наилучшую кривую проходящую через экспериментальные точки.

(1.0 балла)

Экспериментальное задание I-C. Определение положения и глубины магнитов внутри черного ящика.

Внутри черного ящика (I-H-#), закрепленного на подвижной одномерной подставке, находятся два магнита M_A и M_B . Северные магнитные полюса N обоих магнитов направлены вертикально вверх. Магниты M_A , M_B , и магнит M_C , использованный в эксперименте I-B, очень близки по размерам, форме и магнитным свойствам. Глубина расположения магнитов M_A и M_B в черном ящике различна. Магнит M_A расположен под точкой пересечения двух линий, нарисованных на поверхности черного ящика. Магнит M_B расположен где-то, вдоль более длинной линии, как показано на рис. I-C-1. Горизонтальное расстояние между магнитами M_A и M_B обозначается \overline{AB} .

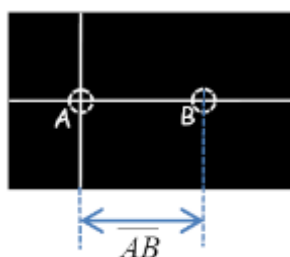


Рис. I-C-1. Магнит M_A расположен под точкой пересечения двух линий, нарисованных на поверхности черного ящика. Магнит M_B расположен где-то, вдоль более длинной линии.



- (1) По шкале вертикальной стойки муфтой-держателем определите положение z_0 (в этой части z_0 может отличаться от z_0 в части Эксперимент I-B) нижнего края исследовательского магнита M_T без его взаимодействия с черным. По шкале вертикальной стойке муфтой-держателем определите положение z_{box} верхнего края черного ящика. Запишите z_0 и z_{box} в лист ответов.

(0.2 балла)

- (2) Двигайте черный ящик вдоль нарисованной на нем длинной линии, принимаемый за ось y , и наблюдайте, как изменяется резонансная частота f_R с тем, чтобы определить положение магнита M_B . Запишите измеренное расстояние y и резонансную частоту f_R в таблицу в листе ответов.

(1.4 балла)

- (3) На миллиметровой бумаге постройте график f_R как функцию y . Отметьте положение магнитов M_A и M_B на оси y вашего графика. Запишите полученную величину \overline{AB} в лист ответов.

(1.2 балла)

- (4) Используя результаты эксперимента I-B определите глубины d_A и d_B магнитов M_A и M_B , расположенных под поверхностью черного ящика. Запишите полученные величины d_A и d_B в лист ответов.

(1.6 балла)

Эксперимент II Исследование полупроводниковых лазеров

Целью данного эксперимента является исследование основных характеристик полупроводниковых лазеров. Мы будем измерять и вычислять степень линейной поляризации коллимированного (сфокусированного) лазерного пучка используя два поляризатора и один фоторезистор. Мы также определим максимальную величину увеличения мощности при изменении тока в лазере.

Предостережение: Не допускайте попадания лазерного пучка непосредственно прямо в глаза, это может их повредить!!!

⊙ Теоретическое описание

В этом эксперименте, в качестве светочувствительного элемента используется фоторезистор, сделанный из полупроводника, который имеет так называемую запрещенную зону с шириной $E_G = (E_C - E_V)$ (см.рис II-1). Когда энергия падающих фотонов становится больше ширины этой запрещенной зоны, полупроводник начинает поглощать фотоны образуя свободные электроны и дырки. При этом плотность переносчиков заряда, включающая электроны и дырки, увеличивается, что приводит к увеличению проводимости полупроводника. В данном эксперименте с помощью мультиметра измеряется сопротивление, т.е. величина обратная проводимости.

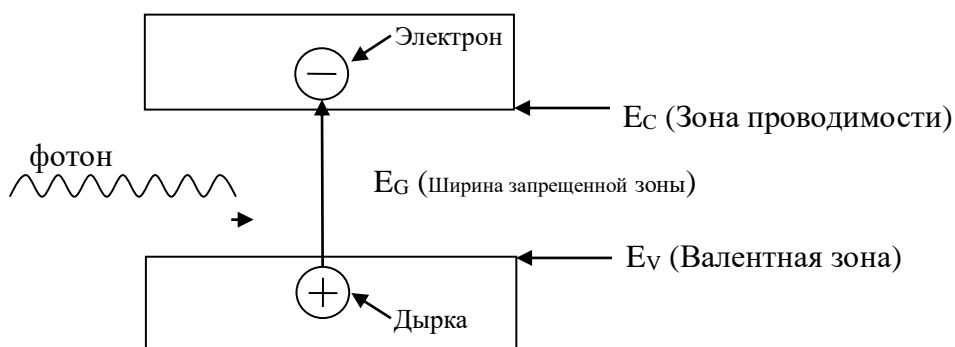


Рис. II-1 Схематическая диаграмма рождения электрон-дырочной пары при поглощении полупроводником единичного фотона

В качестве источника света в данном эксперименте используется полупроводниковый лазер. Если внешний источник тока инжектирует в лазер электроны и дырки, они могут взаимно уничтожаться и излучать фотоны, что схематически показано на рис. II-2. В

идеале при взаимном уничтожении одного электрона и одной дырки может быть излучен один фотон. В действительности есть так называемые нерадиационные процессы, при которых рекомбинация электрона и дырки происходит без излучения фотона. Таким образом, количество излучаемых фотонов не равно количеству рекомбинировавших электрон-дырочных пар. Средняя доля фотонов излучаемых одной электрон-дырочной пары называется квантовым выходом.

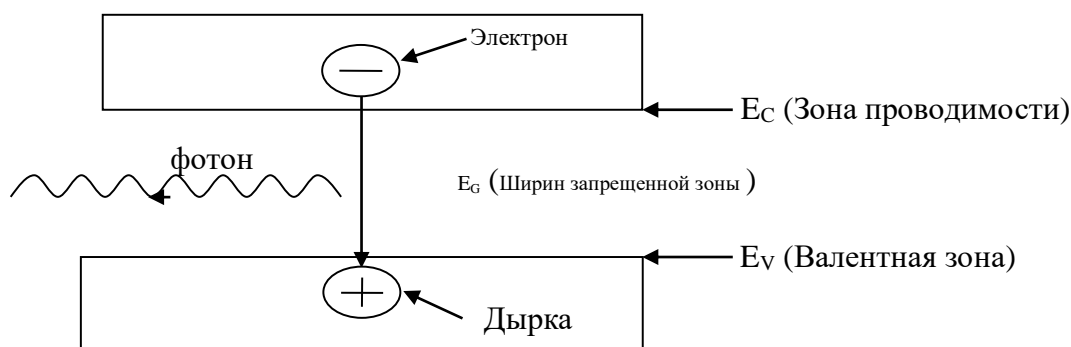


Рис. П-2 Схематическая диаграмма излучения единичного фотона при рекомбинации электрон-дырочной пары в полупроводнике

Полупроводниковый лазер может излучать монохроматический, частично поляризованный и когерентный свет. Частично поляризованный свет состоит из двух частей – линейно поляризованной и неполяризованной. Интенсивность света поляризованной компоненты обозначается J_p , а неполяризованной - J_u . Когда частично поляризованный свет падает на поляризатор, интенсивность линейно поляризованной компоненты, проходящей через поляризатор, зависит от угла между плоскостью поляризации и плоскостью поляризатора. А неполяризованная компонента проходит через поляризатор вне зависимости от угла его ориентации.

⊙ **Выполнение эксперимента**

Эксперимент II-A: Воздействие света на фоторезистор

В качестве источника света в этом эксперименте используется коллимированный (сфокусированный) лазерный диод (CLD). Для обеспечения питания CLD используйте электрическую схему, показанную на рис. II-A-1. Значение символов, использованных на рис. II-A-1, показаны в таблице II-A-1.

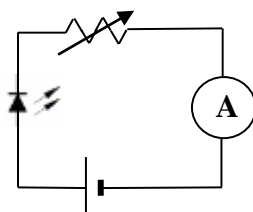


Рис. II-A-1 Электрическая схема для питания CLD.

Таблица II-A-1 Значение символов использованных на рис. II-A-1

Приборы	Коллимированный лазерный диод CLD	Источник постоянного напряжения 5В	Переменный резистор	Амперметр (мультиметр)
Символы				
Маркировка	II-L-#	C-D-#	C-E-#	II-X, II-Y

Используйте CLD при максимальном значении тока. Лазерное излучение регистрируется фоторезистором (РС). Когда световое излучение попадает на фоторезистор, его проводимость возрастает с увеличением интенсивности света. Вы должны минимизировать эффекты, обусловленные наличием окружающего вас света. В данном эксперименте мы фактически измеряем сопротивление, т.е. величину обратную проводимости. Интенсивность лазерного излучения, достигающего фоторезистора, может изменяться использованием предоставляемых поляризаторов и фильтров. Обозначение других оптических компонент дано в таблице II-A-2. Частичную поляризацию лазерного света можно наблюдать используя экспериментальную установку изображенную на рис. II-A-2.

Таблица ПА-2 Обозначение оптических компонентов.

Приборы	Коллимированный лазерный диод	Поляризатор	Фоторезистор	Световой фильтр
Символы				 По необход имости
Маркировка	C-C-#	II-P-# II-Q-#	II-W-#	II-U

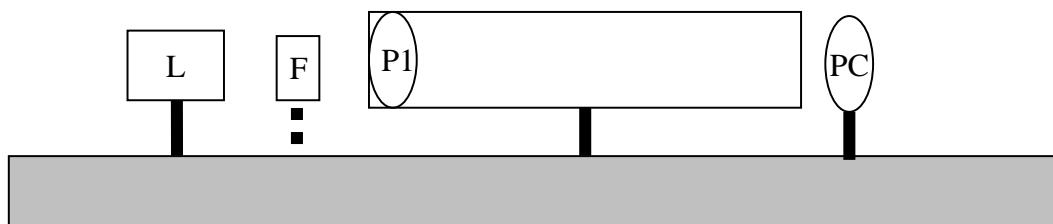


Рис.ПА-2 Экспериментальная установка для наблюдения частично поляризованного света

Поворачивая P1, наблюдайте изменения сопротивления фоторезистора PC. Поворачивая P1, добейтесь того, чтобы сопротивление фоторезистора PC достигло минимального значения. Если минимум сопротивления наблюдается при угле поворота P1 10° и выше, тогда фоторезистор насыщается. В этом случае вам необходимо использовать световые фильтры, уменьшающие интенсивность света с тем, чтобы избежать насыщения фоторезистора.

Зафиксируйте положение P1 в соответствии с описанием предыдущего абзаца (минимальное сопротивление). Исследуйте проводимость фоторезистора PC от относительной интенсивности падающего света, используя экспериментальную установку, показанную на рис. ПА-3.

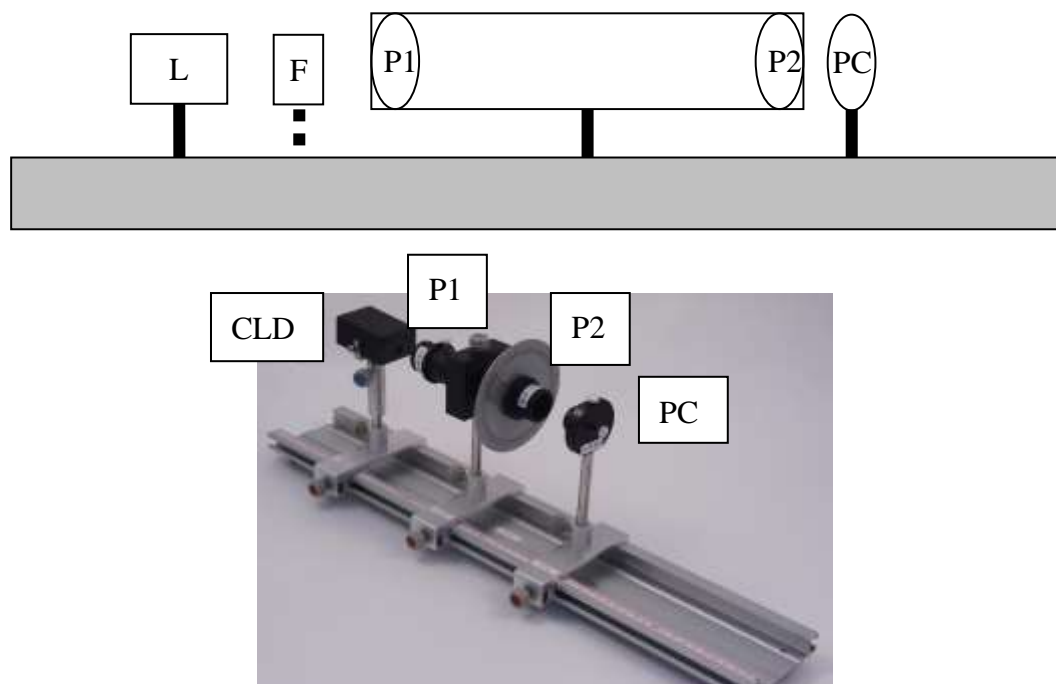


Рис.ПА-3 Экспериментальная установка для исследования проводимости фоторезистора PC

- (1) Пусть θ_p - это угол между плоскостями поляризации P1 и P2. Изменяя угол θ_p от 0° до 180° через 5° , запишите измеренные значения сопротивлений фоторезистора PC и соответствующих углов θ_p в таблицу в листе ответов. Переведите измеренные значения сопротивлений в проводимость и занесите их в таблицу в листе ответов. **Вычисление погрешностей не требуется.** (1.2 балла)
- (2) На миллиметровой бумаге постройте график зависимости проводимости PC как функцию угла θ_p . **Вычисление погрешностей не требуется.** (1.2 балла)

Эксперимент II-B: Степень поляризованности лазерного излучения

Источником излучения в этой части служит коллимированный (сфокусированный) лазерный диод (CLD), питаемый постоянным током 15 мА от источника. Задача этой части состоит в определении степени поляризованности β лазерного излучения, используя экспериментальную установку, показанную на рис.ПА-2. **Вычисление погрешностей не требуется.**

Степень поляризованности определяется следующим выражением:

$$\beta = \frac{J(\text{линейно поляризованный})}{J(\text{неполяризованный}) + J(\text{линейно поляризованный})} = \frac{J_{\max} - J_{\min}}{J_{\max} + J_{\min}}$$

где J_{\max} и J_{\min} – это максимальная и минимальная интенсивность света, регистрируемая фоторезистором РС при различных углах поворота P1.

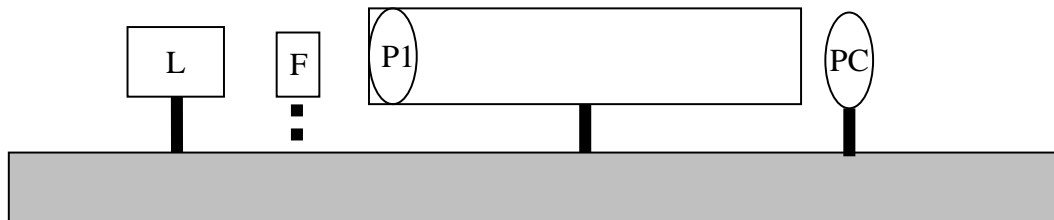


Рис.ПА-2 Экспериментальная установка для определения степени поляризованности

- (1) Найдите максимальное и минимальное значение сопротивления фоторезистора (R_{\max} и R_{\min}), поворачивая P1 на 360° . Переведите величины R_{\max} и R_{\min} в минимальные и максимальные величины проводимости фоторезистора C_{\min} и C_{\max} . Занесите данные в таблицу в листе ответов. (0.8 балла)
- (2) Используя график зависимости проводимости от угла θ_p , полученный в эксперименте II-A-(2), определите относительные интенсивности J_{\max} и J_{\min} соответствующие C_{\max} и C_{\min} . Результаты внесите в листы ответов. (1.6 балла)
- (3) Вычислите β и запишите результат в листе ответов. (0.2 балла)



Эксперимент II-C: Дифференциальный квантовый выход коллимированного лазерного диода

Задача этой части состоит в исследовании зависимости относительной интенсивности света от электрического тока, протекающего через коллимированный лазерный диод (CLD), а также в определении *дифференциального квантового выхода* η , который будет определен ниже. Изменяйте электрический ток через CLD в интервале от 5 мА до 20 мА. Убедитесь в том, что фоторезистор РС не насыщен когда сила тока близка 20 мА. Во избежании насыщения используйте фильтры и поляризаторы.

(1) Изменяя ток через CLD, измерьте соответствующие сопротивления фоторезистора РС. Запишите данные в таблицу в листе ответов. Переведите ваши данные в проводимость и постройте график ее зависимости от тока на миллиметровой бумаге. **Вычисление погрешностей не требуется.** (1.3 балла)

(2) Используя график из пункта (1), выберите область шириной $\Delta I \sim 3$ мА с максимальным наклоном. Используя график зависимости проводимости от угла θ_p , полученный в Части II-A-(2), переведите и запишите данные этой области в относительную интенсивности (J) с использованием таблицы пункта (1). На миллиметровой бумаге постройте график зависимости относительной интенсивности (J) от тока (I) фоторезистора CLD. **Вычисление погрешностей не требуется.** (0.8балла)

(3) Максимальная мощность излучения CLD полагается точно равной $P_{\max} = 3$ мВт. Определите максимальный наклон графика, построенного в пункте (2), и переведите эту величину в $G \equiv \left. \frac{\Delta P}{\Delta I} \right|_{\max}$, которая представляет собой максимальное отношение увеличения мощности излучения к изменению входного тока. Запишите свой вывод и величину G в лист ответов. Оцените ошибку величины G , не учитывая ошибку в P_{\max} . Запишите свой вывод и вычисленную величину ΔG в лист ответов. (2.0балла)

(4) Квантовый выход равен вероятности излучения одного фотона на один инжектируемый электрон. При некотором изменении тока лазера, увеличение количества инжектируемых электронов приводит к соответствующему увеличению числа излучаемых фотонов. *Дифференциальный квантовый выход* η определяется как отношение увеличения числа



фотонов к увеличению числа инжектируемых электронов. Определите η вашего CLD используя величину G , полученную в пункте (3). Запишите свой вывод и вычисленную величину η в лист ответов. Оцените ошибку величины η . Запишите свой вывод и вычисленную величину $\Delta\eta$ в лист ответов. (Длина волны лазерного излучения = 650 нм.

Постоянная Планка = 6.63×10^{-34} Дж·с. Скорость света в вакууме = 3.0×10^8 м/с).

(0.9 балла)