

Эксперимент 1: Левитация проводников в переменном магнитном поле

В достаточно сильном переменном магнитном поле становится возможной левитация (свободное парение в воздухе) металлического проводника. Она происходит благодаря тому, что **средняя** магнитная сила, действующая на электрический ток в проводнике, отлична от нуля. При этом сам ток индуцируется тем же переменным магнитным полем. Очевидно, что сила Ампера в среднем не равна нулю, только если есть сдвиг фаз по времени между колебаниями электрического тока и магнитного поля. Этот сдвиг фаз появляется как результат наличия индуктивности проводника.

В данном эксперименте мы изучим это явление и найдем индуктивность алюминиевого кольца по измерению вертикальной силы, возбуждаемой соленоидом с переменным током. Для удобства проведения измерений средняя сила, действующая на кольцо, будет всегда направлена вниз, так что сама левитация наблюдаться не будет.

На вашем столе имеется следующее оборудование (рисунок 1):

- (1) Источник переменного тока частотой 50 Гц. У этого источника есть две пары гнезд (выводов). Два меньших гнезда (1a) дают напряжение приблизительно 24 В; **используйте их только для создания тока в соленоиде.** Два больших гнезда (1b) дают напряжение приблизительно 0.7 В. Питание источника включается нажатием зеленой кнопки (1c), которая необходима для того, чтобы предотвратить перегревание системы, если вы случайно оставили источник питания включенным на длительное время. Лампочка красного света указывает, что источник питания включен.
- (2) Цилиндрически симметричный соленоид, заполненный железными стержнями. Соленоид подсоединяется к гнездам источника питания, дающим напряжение 24 В. Соленоид можно поднимать и опускать, вращая длинную рукоятку, расположенную сверху установки. При полном обороте рукоятки вертикальный шаг составляет $h = 1.41$ мм.
- (3-5) Три металлических кольца, сделанные из точно того же самого материала (сплав алюминия). Одно широкое кольцо цельное. Второе широкое кольцо идентично первому, за исключением короткого сегмента, который был удален. В третьем кольце, которое значительно тоньше первых двух, также удален небольшой сегмент.
- (6-7) Два мультиметра. Они будут использоваться в качестве вольтметра и амперметра. Чувствительность вольтметра переменного тока 0.1mV. Амперметр может измерить токи до 20А (также в режиме переменного тока). **Внимание:** мультиметры в режиме переменного тока показывают **ДЕЙСТВУЮЩЕЕ ЗНАЧЕНИЕ** (среднеквадратичное) измеряемой величины, то есть амплитудное значение, деленное на $\sqrt{2}$. См. рисунки 3 и 4 в качестве инструкций по использованию мультиметров.
- (8) Цифровые весы чувствительностью 0.01г, питающиеся от батареек. Когда весы подвергаются быстро колеблющейся силе, то они показывают усредненную по времени величину. **Внимание:** у весов есть кнопка "TARE", которая обнуляет показания даже при наличии на них груза. См. рисунок 2.
- (9) Параллелепипед из пенопласта с размерами 8 см×7 см×7 см, который может использоваться в качестве подставки для колец.
- (10) Соединительные провода с различными типами соединений.
- (11) Линейка.
- (12) Миллиметровая бумага.

(13) Настольная лампа, которая может быть включена или выключена для того, чтобы лучше видеть.

Предостережение: когда цельное кольцо подвергается воздействию магнитного поля соленоида, то через него протекают достаточно большие электрические токи, и оно разогревается. Как следствие, электрические свойства кольца могут изменяться. Чтобы избежать этого, не пропускайте ток через соленоид в течение длительных промежутков времени, а выключайте источник питания зеленой кнопкой.

Ускорение силы тяжести в Тель-Авиве примите равным $g = 9.80 \pm 0.01 \text{ Н/кг}$.

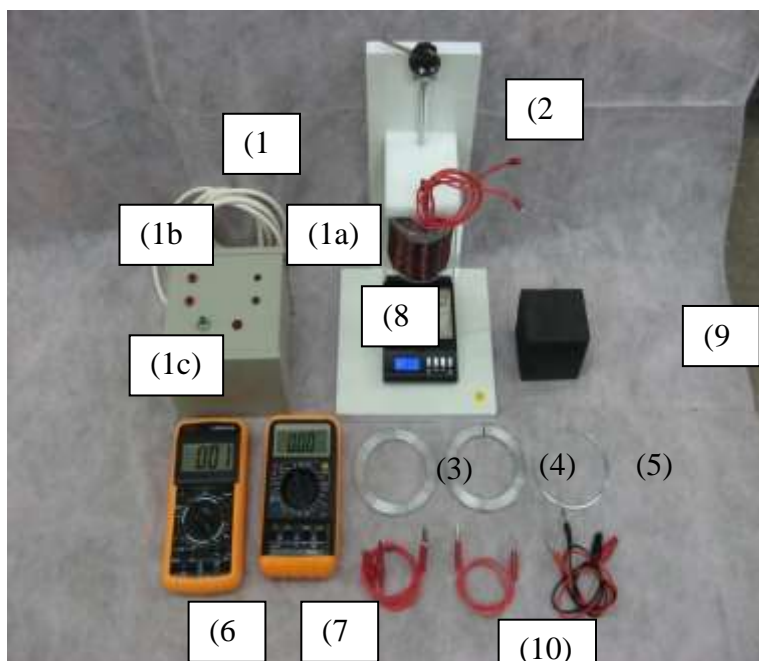


Рисунок 1 - Предоставленное оборудование.

- (1) Источник питания на 50 Гц.
(1a) гнезда на 24 В
(1b) гнезда на 0.7 В
(1c) Зеленая кнопка включения/выключения питания.
- (2) Соленоид в вертикальной подставке.
- (3) Широкое цельное кольцо.
- (4) Широкое кольцо с вырезанным сегментом.
- (5) Тонкое кольцо с вырезанным сегментом..
- (6) Вольтметр.
- (7) Амперметр.
- (8) Весы.
- (9) Параллелепипед из пенопласта.
- (10) Соединительные провода.



Рисунок 2: Цифровые весы

- (1) Кнопка включения/выключения On/Off
- (2) Кнопка "TARE" - сбрасывает текущие показания на ноль.

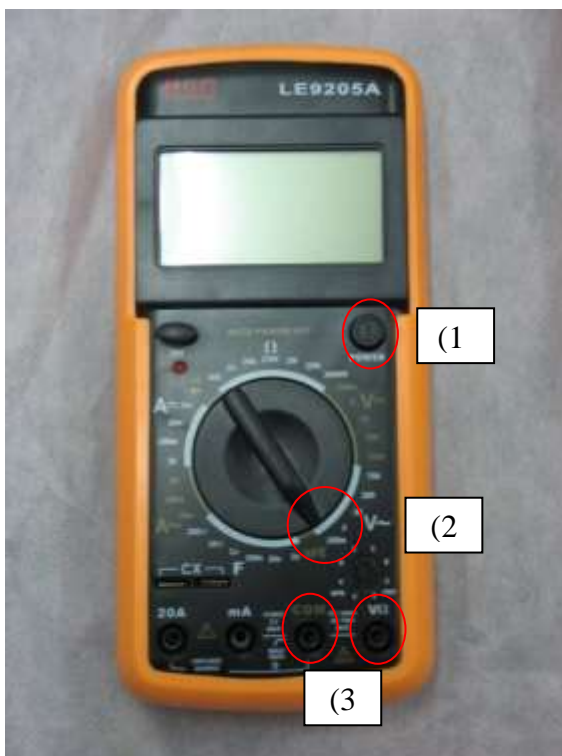


Рисунок 3: Вольтметр.

- (1) Кнопка включения/выключения.
- (2) Ручка смены предела измерения, установленная на 200 мВ переменного тока AC.
- (3) Подсоединяйте провода к выводам "COM" и "V / Ω".

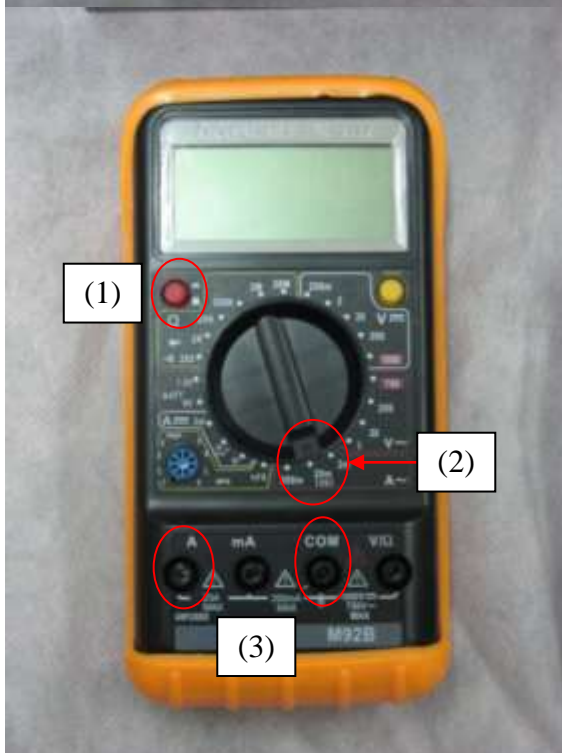


Рисунок 4: Амперметр.

- (1) Кнопка включения/выключения.
- (2) Ручка смены предела измерения, установленная на пределы 20мА/20А переменного тока AC.
- (3) Подсоединяйте провода к выводам "COM" и "A".

Теория (1.3 б.)

Рассмотрим проводящее кольцо радиуса r , помещенное в магнитное поле соленоида. Ось симметрии соленоида и центр кольца совпадают. Обозначим индуктивность кольца L и сопротивление R , круговую частоту переменного тока в соленоиде ω . Направим ось z вдоль общей оси симметрии соленоида и кольца (смотри рисунок 5).

Вы можете пренебречь влиянием магнитного поля кольца на соленоид. Кроме того, пренебрегите толщиной кольца.

Для аналитических вычислений используйте закон Фарадея, и теорему Гаусса для магнитного поля:

- Закон Фарадея: индуцированная ЭДС (электродвижущая сила) в контуре пропорциональна скорости изменения магнитного потока $\epsilon = -d\Phi_B/dt$.
- Теорема Гаусса для магнитного поля: полный магнитный поток через замкнутую поверхность всегда равен нулю.

На контур с током, помещенный в цилиндрически симметричное магнитное поле \vec{B} , действует полная сила

$$F(t) = -2\pi r I(t) B_r(t)$$

где I - ток в контуре, а B_r - радиальная компонента (в направлении радиуса петли) внешнего магнитного поля в месте нахождения контура. За положительное направление силы F принято направление вниз, по оси z . Положительное направление тока I показано на рисунке 5.

- a. (0.2 б.) Пусть через кольцо проходит переменный магнитный поток $\Phi_B(t) = \sqrt{2}\Phi_B^{\text{rms}} \sin(\omega t)$. Найдите ЭДС $\epsilon(t)$, индуцированную только внешним магнитным потоком, и ток $I(t)$, появляющийся в кольце, как функции Φ_B^{rms} , L , R и t .

Подсказка: амплитуда ЭДС ϵ_0 и амплитуда тока I_0 на элементе цепи переменного тока и с сопротивлением и индуктивностью связаны соотношением $\epsilon_0 = I_0 \sqrt{\omega^2 L^2 + R^2}$, а сила тока отстает по фазе на $\delta = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}$ относительно ЭДС.

- b. (0.6 б.) Найдите аналитическую формулу для B_r и выразите его через r и $\frac{d}{dz} \Phi_B$.
- c. (0.5 б.) Найдите $\langle F \rangle$ - среднее по времени значение действующей на кольцо силы F и выразите его через $\frac{d(\epsilon_{\text{rms}})^2}{dz}$, L , R и ω , где $\epsilon_{\text{rms}}(z)$ - ДЕЙСТВУЮЩЕЕ ЗНАЧЕНИЕ (среднеквадратичное, то есть амплитуда, деленная $\sqrt{2}$) ЭДС в кольце на высоте z . Покажите, что $\langle F \rangle = \alpha \frac{L}{(R^2 + \omega^2 L^2)} \cdot \frac{d(\epsilon_{\text{rms}})^2}{dz}$ и найдите константу α (если не найдете, то в более поздних частях, возьмите величину α равной 1).

Подсказка: Вы можете использовать следующие тождества:

$$\begin{aligned} \sin(\alpha + \beta) &= \sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta \\ \cos(\alpha + \beta) &= \cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta \\ \langle (\sin(\omega t))^2 \rangle &= \langle (\cos(\omega t))^2 \rangle = \frac{1}{2} \end{aligned}$$

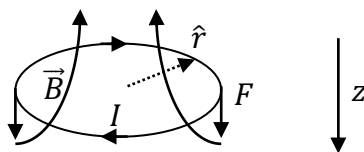


Рисунок 5: Металлическое кольцо в магнитном поле соленоида.

Измерения (5.1 б.)

Во всех последующих измерениях и анализе, примите во внимание, что измерения и результаты с более высокой точностью получают более высокие оценки. Во всех ваших измерениях и результатах определите погрешности.

Измерения сопротивления (2.6 пункта)

В этой части Вы должны использовать гнезда источника переменного тока на 0.7 В. При коротком замыкании источника тока на 0.7 В через предоставленные соединительные провода ток должен достигать величин 5А – 15А, в зависимости от контактов. Заметьте, что три более коротких провода дают лучший контакт с амперметром, чем два более длинных. ПРЕДОСТЕРЕЖЕНИЕ: не используйте гнезда на 24 В, чтобы избежать перегрева компонентов схемы.

d. (1.3 б.) Измерьте сопротивление R_{thin} тонкого кольца. Нарисуйте электрическую схему в листе ответов.

Подсказка: сопротивление каждого из колец намного меньше чем 0.1 Ом. Для тонкого кольца Вы можете пренебречь индуктивным сопротивлением относительно активного сопротивления.

e. (1.3 б.) Найдите сопротивление R цельного кольца. В случае необходимости сделайте дополнительные измерения.

Измерения индуцированной ЭДС (1.5 б.)

f. (1.5 б.) Подсоедините соленоид к гнездам 24 В источника питания. Поместите широкое кольцо с вырезанным сегментом так, чтобы его ось совпала с осью соленоида. Измерьте индуцированную ЭДС ϵ_{rms} в кольце на различных высотах z , то есть, на различных расстояниях от соленоида. Запишите результаты измерений в таблицу на листе ответов. Постройте график зависимости ϵ_{rms} как функцию z и проведите сглаженную линию.

Измерения силы (1 б.)

g. (1 б.) Поместите широкое цельное кольцо так, чтобы его ось совпала с осью соленоида. Измерьте усредненную по времени магнитную силу $\langle F \rangle$, действующую на кольцо на различных высотах z , то есть на различных расстояниях от соленоида. Запишите результаты измерений в таблицу на листе ответов.

Анализ (3.6 б.)

h. (1.4 б.) Найдите абсолютное значение производной $|d\epsilon_{rms}^2/dz|$ ϵ_{rms}^2 для тех значений z , при которых вы измерили силу в пункте (g). Запишите результаты измерений в таблицу на листе ответов. Оценка погрешности в этом пункте не требуется.

i. (2.2 б.) Используя линеаризованный график, найдите индуктивность замкнутого кольца L . Вы можете использовать тот факт, что $\omega L < R$.

Замечание: Несмотря на значительную толщину цельного кольца, формула, полученная в части (c), применима с достаточно высокой точностью. Используйте ее в качестве основной для определения индуктивности широкого кольца.

Подсказка: Когда кольцо будет слишком близко к железному сердечнику соленоида, измерения будут искажены. Попытайтесь избежать этого осложнения в своем анализе.

Задача 2: Оптический "Черный ящик"

Экраны телевизоров и мониторы сильно изменились за последние годы. Сегодня, большинство дисплеев состоит из цветной жидкокристаллической матрицы, фильтра и подложки для белого света. В этом эксперименте мы изучим образец пленки, который был использован в качестве подложки для жидкокристаллических экранов.

Оборудование

В вашем распоряжении находятся следующие предметы, лежащие на столе (см. рисунок 1):

- (1) Образец пленки, зафиксированный на подставке. **Пленка чувствительна - не касайтесь ее руками. Фиксируйте положение образца, используя штатив.**
- (2) Штатив с пленкой и ручкой. Штатив имеет ручку, которая может использоваться для вращения пленки. **Не вынимайте пленку из штатива.**
- (3) Фонарик с лампой белого света. Он включается и выключается кнопкой, расположенной сзади. **Не путайте фонарик с лазером (см. рисунок 2).**
- (4) Лазер с излучением красного света. **Лазер отмечен этикеткой. Не путайте лазер с фонариком (см. рисунок 2). Для включения лазера плотно наденьте черный колпачок на металлический цилиндр, а для его выключения слегка отодвиньте колпачок от металлического цилиндра. Не снимайте колпачок с лазера полностью – он сломается! Чтобы батарея лазера не разрядилась (время разрядки около часа), не держите лазер включенным без необходимости. Длина волны лазера $\lambda = 652\text{nm} \pm 2\text{nm}$.**
- (5) Штатив для лазера и фонарика (используется поочередно, сначала на нем устанавливается фонарик, затем лазер).
- (6) Белый экран на деревянных подставках с приклеенной миллиметровой бумагой и отверстием в центре. На экране разрешается наносить любые отметки.
- (7) Деревянный стержень, который можно перемещать по горизонтальной деревянной рейке. На рейку также можно наносить любые отметки.
- (8) Рулетка.
- (9) Линейка.
- (10) Миллиметровая бумага.
- (11) Настольная лампа, которая может быть включена или выключена для того, чтобы лучше видеть.

ЛАЗЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ:

1. **Не направляйте луч лазера прямо в глаза!**
2. **Остерегайтесь отражения лазерного луча от металлических поверхностей.**
3. **Не наводите лазер на других.**
4. **Не пытайтесь отремонтировать или демонтировать лазер. Позовите дежурного, если Вам потребуется помощь.**

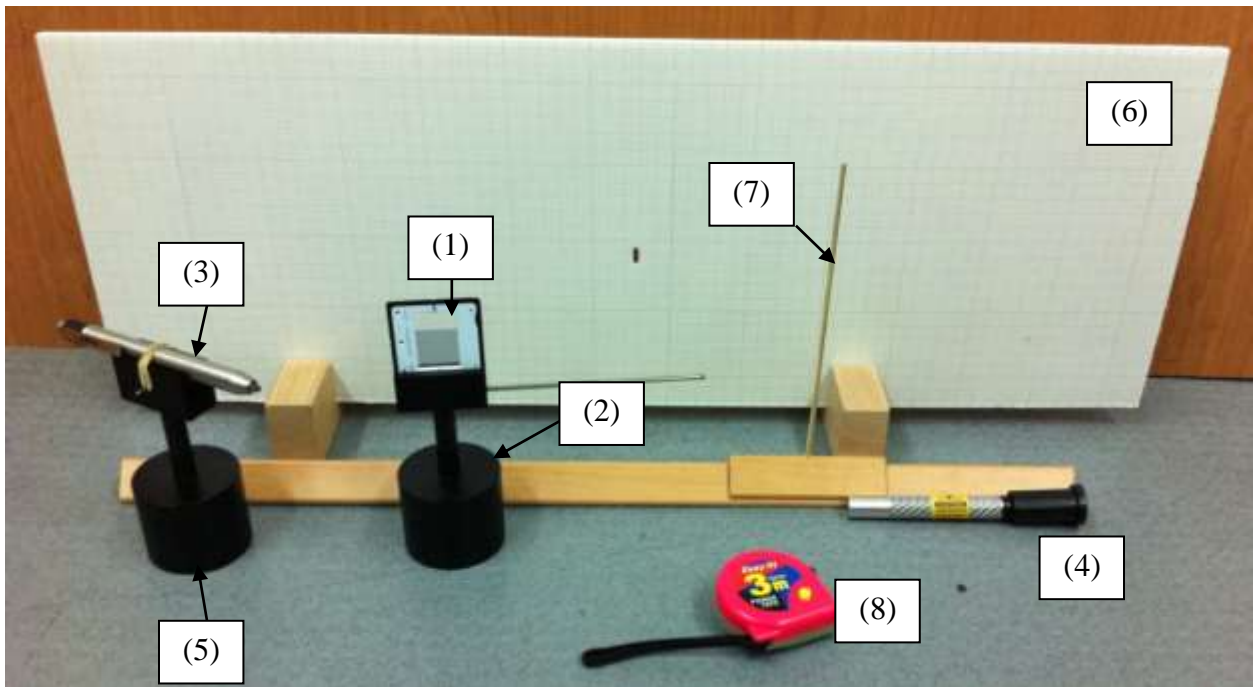


Рисунок 1: Предоставленное оборудование.

- (1) Пленка.
- (2) Штатив для пленки.
- (3) Фонарик, дающий белый свет.
- (4) Красный лазер.
- (5) Штатив для источника света.
- (6) Экран с приклеенной миллиметровой бумагой.
- (7) Деревянный стержень с подставкой.

Рисунок 2: Источники света.



(4)
Красный
лазер

(3) Белый
фонарь

Первая часть – Теория (0.4 б.)

- а. (0.4 б.) Световой луч отражается от двух зеркал, образующих угол φ (рисунок 3). Найдите угол γ между падающим и отраженным лучами. Считайте, что все световые лучи лежат в плоскости, перпендикулярной линии пересечения зеркал.

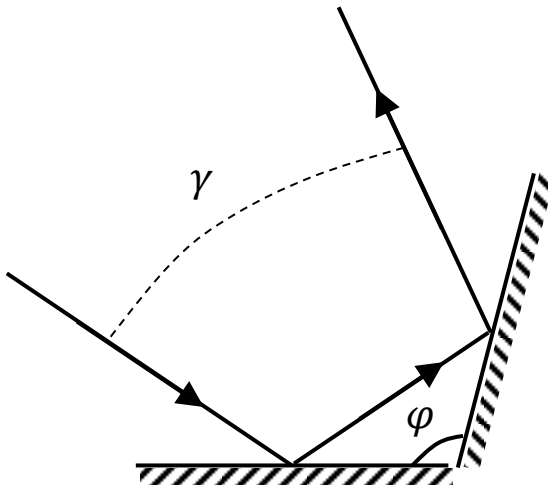
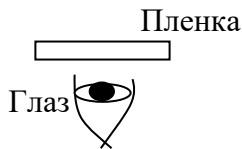
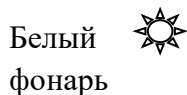


Рисунок 3: Луч, отраженный от двух зеркал.

Вторая часть – Измерения с источником белого света (6.1 пунктов)

Используя в качестве источника света фонарик, исследуйте отражательную и пропускную способность пленки. На рисунке 4 изображены соответствующие схемы установок. **Внимание:** вы можете получить различные результаты, освещая пленку с разных сторон.

Пропускание:



Отражение:

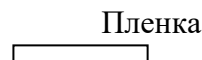


Рисунок 4: Схемы установок для работы с источником белого света

ПРЕДОСТЕРЕЖЕНИЕ: Для того, чтобы наблюдать картину в проходящем свете, вы должны будете непосредственно смотреть на луч фонарика, прошедший через пленку. **Не делайте этого с лазером!** Также избегайте смотреть на белый фонарик продолжительное время.

- b. (0.5 б.) На рисунке 5 схематично изображены четыре возможные микроструктуры пленки (n - показатель преломления ее материала). Выберите структуру пленки, наилучшим образом удовлетворяющую проведенным вами наблюдениям и отметьте свой вариант в листе ответов. Внимание: с целью иллюстрации на рисунке изображены всего 5 периодов микроструктуры пленки, в действительности расстояние d мало и таких периодов в пленке очень много.

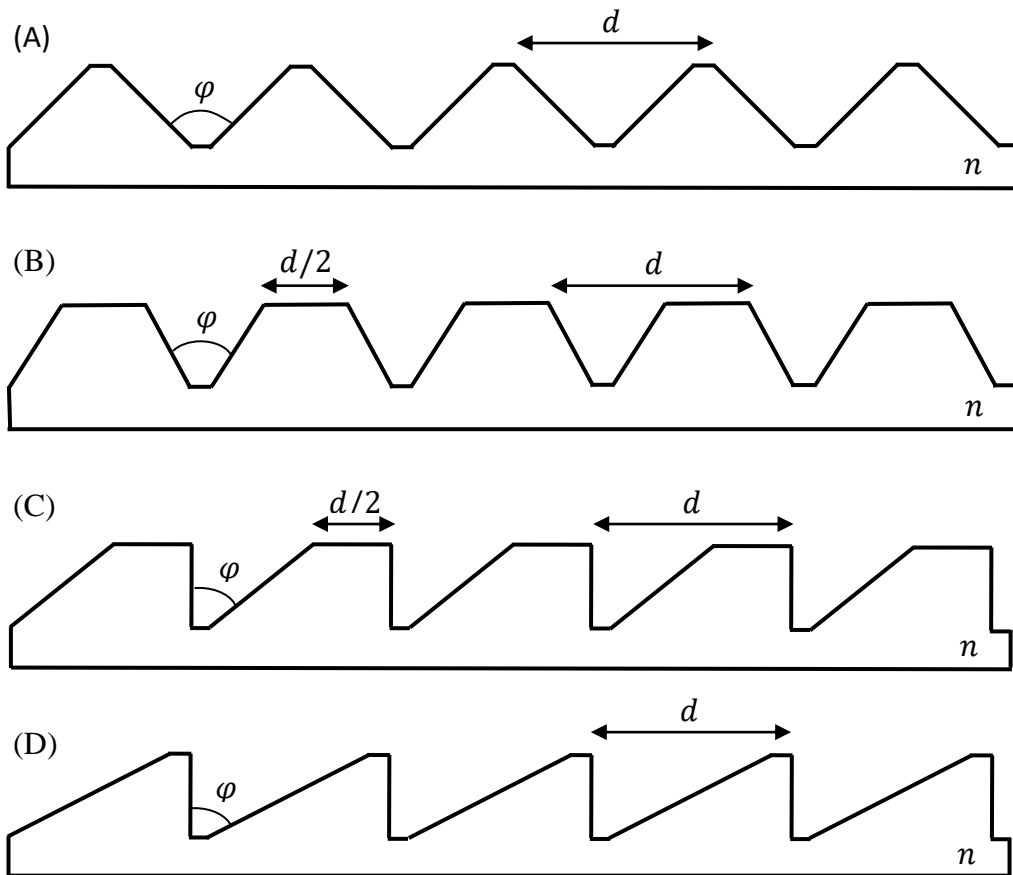


Рисунок 5: Варианты структуры пленки.

- c. (0.8 б.) Определите угол φ в структуре пленки и оцените его погрешность.
- d. (0.5 б.) Когда луч белого света падает перпендикулярно на плоскость пленки с одной из его сторон, то в проходящем свете немного правее от источника наблюдается следующая слабо видимая картина (рисунок 6). “R”, “G” и “B” обозначают красный, зеленый и синий соответственно. Отметим, что эта наблюдаемая картина имеет слабую освещенность, поэтому измерения для нее проводить не требуется.

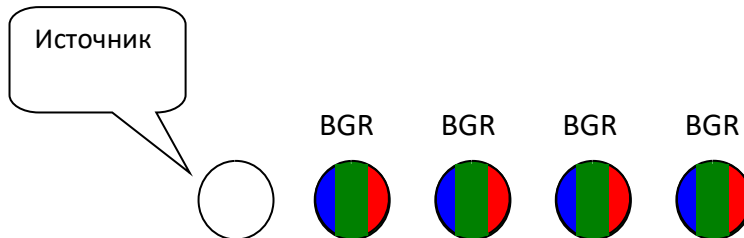


Рисунок 6: Слабо видимая картина правее источника света

Еще правее этой слабо видимой картинке вы можете наблюдать более яркую область, называемую главным максимумом (рисунок 7):

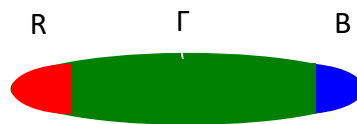


Рисунок 7: Области яркой освещенности (главный максимум) правее источника света.

Выберите верное утверждение:

- A. Все цветные области появляются из-за интерференции.
 - B. Все цветные области появляются из-за зависимости показателя преломления n от длины волны.
 - C. Область, изображенная на рисунке 6, появилась из-за интерференции, в то время как область, изображенная на рисунке 7, появилась из-за зависимости показателя преломления n от длины волны.
 - D. Область, изображенная на рисунке 6, появилась из-за зависимости показателя преломления n от длины волны, в то время как область, изображенная на рисунке 7, появилась из-за интерференции.
- e. (1.4 б.) Используя ту же установку с источником белого света (фонариком), как и в части (d), измерьте угол отклонения δ_0 фиолетового света (на дальнем краю синей области спектра) главного максимума, изображенного на рисунке 7. Угол отклонения показан на рисунке 8. Сделайте запись всех промежуточных измерений. Оцените погрешность измерений.

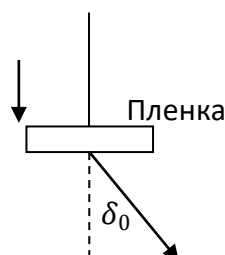


Рисунок 8: угол отклонения δ_0 .

- f. (1.4 б.) Освещение пленки под различными углами падения приводит к различным углам отклонения главных максимумов. Вращая пленку, измерьте минимальный угол преломления δ_{min} главного максимума фиолетового света (этот угол единственный). Сделайте запись всех промежуточных измерений. Укажите погрешность измерений.
- g. (0.8 б.) Используя результаты части (с) для угла φ , выразите показатель преломления материала пленки n через δ_0 или через δ_{min} . Вы можете использовать обратимость световых лучей и тот факт, что существует единственный минимальный угол δ_{min} .
- h. (0.7 б.) Найдите показатель преломления n_v материала пленки для фиолетового света и укажите его погрешность.

Часть III - Лазерные измерения (3.5 б.)

Замените фонарик в штативе на лазер. Используйте сетку на экране, чтобы исследовать отражение и пропускание пленки, как показано на рисунке 9. Батарейка лазера может разрядиться, не держите его включенным без надобности. Установив лазер, вы можете вращать его вокруг оси на штативе для точного построения всех компонентов оптической системы вдоль одной линии. **ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ: не направляйте луч лазера в глаза, используйте экран с миллиметровой бумагой.**

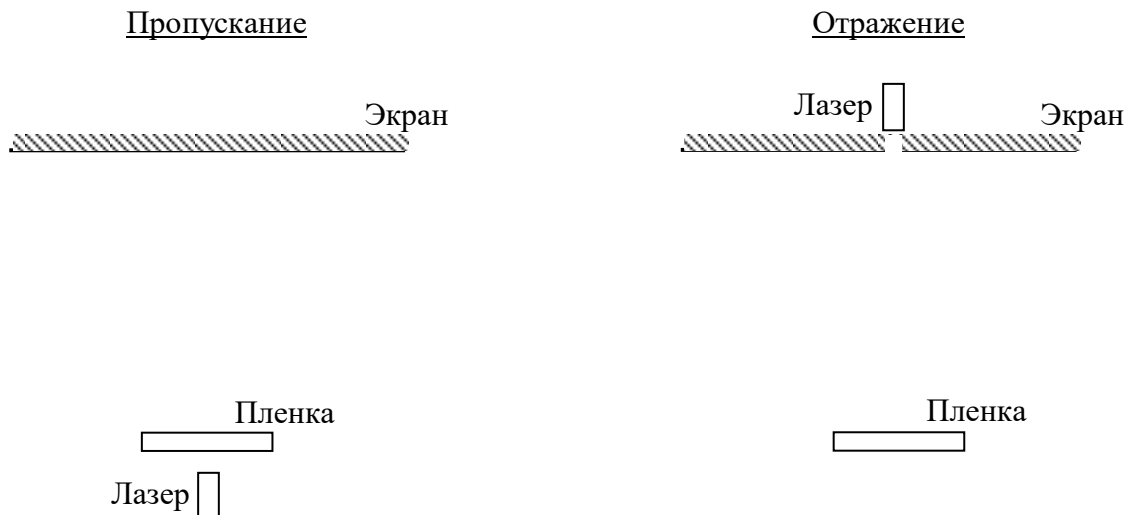


Рисунок 9: Установка для наблюдения света от лазера.

Пронаблюдайте группу чередующихся светлых и темных полос на экране, вращая пленку на штативе. Потемнение некоторых из краев происходит из-за интерференции, происходящей между различными частями каждого "зуба" пленки.

- i. (1 балл.) Используя одну из установок, изображенных на рисунке 9, осветите пленку лучом лазера, направив его перпендикулярно плоскости пленки. Запишите углы отклонения θ наблюдаемых пиков освещенности как функции номера полосы m . Центральная полоса имеет номер $m = 0$. Занесите полученные данные в таблицу, приведенную в листе ответов. Сделайте запись всех промежуточных измерений. Укажите погрешность измерений.
- j. (1.5 б.) Используя линеаризацию, графически определите расстояние d между двумя соседними "зубами" в структуре пленки. Погрешности на графике не указывайте.
- k. (1 балл.) Используя формулу, полученную в части (g), определите показатель преломления n_r пленки на длине волны лазера. Запишите все дополнительные измерения. Укажите погрешность. **Внимание: Не смотрите при этом сквозь пленку! Используйте экран!**