

## ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС. ОПИСАНИЕ.

Данный физический практикум по волновой оптике реализован на базе комплекта оборудования, разработанного на кафедре общей физики МФТИ совместно с НПФ «Эклус». Модульный принцип, лежащий в основе лабораторного комплекса, позволяет выполнять на этом оборудовании разнообразные лабораторные работы по оптике. Использование когерентного лазерного света в качестве источника делает эксперименты весьма наглядными, явно демонстрирующими сущность физического явления.

В качестве источника излучения применяется полупроводниковый лазер мощностью 6 мВт. Длина волны излучения составляет 650 нм, что соответствует красному свету. Излучатель лазера, имеющий небольшие размеры 15x15x25 мм, подключается через адаптер к сети 220 В.

Кроме полупроводникового лазера комплекс включает в себя: оптическую скамью (направляющую) длиной 93 см, держатели – *стойки*, экран со стойкой для наблюдения, плоские дифракционные голографические решетки, имеющие 50, 100 и 350 штрихов на миллиметр, бипризму Френеля, столик вращающийся, поляроиды в оправе, толстую стеклянную пластину, щели для наблюдения дифракции Френеля и Фраунгофера, линейку для измерений, магниты для крепления бумаги на экране, сетку с мелкими и средними ячейками в оправе для наблюдения дифракции, фотоприемное устройство с датчиком, экран со стойкой и оправой для короткофокусной линзы, набор короткофокусных линз,



заклученных в оправу, параметры которых приведены в таблице.

Дополнительно в состав комплекса включена *мира* –

№	Диаметр линзы, мм	Диаметр оправы, мм	Длина оправы, мм	Тип линзы
1	17	24	57	двояковыпуклая
2	25	30	33	двояковыпуклая
3	27	35	38	плосковыпуклая

заклученная в оправу прозрачная пленка с нанесенной на нее миллиметровой шкалой.

В процессе выполнения лабораторной работы принадлежности и оборудование монтируются на оптической скамье. Наблюдение ведется на экране. Элементы оптического изображения переносятся карандашом на бумагу, закрепленную на экране магнитами. В качестве альтернативного способа регистрации оптического изображения предлагается фотографировать экран, используя для этих целей разнообразные держатели. Обработка полученных изображений со снятием количественных характеристик возможна в любом графическом редакторе. Кроме того такой способ позволяет надежно документировать результаты измерений.

### ***ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ И ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТ***

***Внимание!*** Лазерное излучение мощностью 6 мВт опасно для сетчатки глаза! Категорически запрещается направлять лазерный луч в глаз! Излучение, отражённое от гладких поверхностей (зеркальных, полированных и пр.), не должно попадать в глаз! Перемещение оптической скамьи, монтаж/демонтаж приспособлений на нее должны осуществляться при выключенном лазере.

***Внимание!*** В процессе выполнения работы категорически запрещается касаться руками или посторонними предметами оптических поверхностей элементов системы: линз, призм, пластин, стекол, поляроидов и пр.

Оптические детали можно держать только за неоптические шлифованные поверхности и ребра. Перед работой оптические детали должны быть заключены в оправы и кассеты. При загрязнении наружных поверхностей оптических систем следует протереть их мягкой чистой тряпочкой.

Используя оптический прибор, необходимо оберегать его от толчков, ударов, падений. Запрещается прилагать значительные усилия при работе с оптическими деталями.

При обнаружении каких-либо неисправностей необходимо обратиться к преподавателю.

## Лабораторная работа № ОК-2

# ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ЛАЗЕРНОГО СВЕТА В ТОЛСТОЙ СТЕКЛЯННОЙ ПЛАСТИНЕ

**Цель работы:** получить интерференционную картину при отражении лазерного света от толстой плоскопараллельной стеклянной пластины. Проверить теоретическую зависимость радиусов интерференционных колец от номера кольца и расстояния между пластиной и экраном. Определить толщину стеклянной пластины и порядок интерференции в центральной точке.

### Полосы равного наклона

Падающий на прозрачную пластину или пленку свет отражается от передней и задней поверхности. Наложение отраженных волн, в случае, если они когерентны, порождает интерференционную картину.

Когерентными называются волны, разность фаз которых не изменяется со временем. Только монохроматические волны могут быть когерентными. Монохроматическое излучение от таких источников света как лампа накаливания или Солнце получают с помощью светофильтра. Однако длина когерентности (расстояние, при прохождении которого две волны утрачивают когерентность) таких волн невелика. Наблюдение интерференции от таких источников возможно лишь на тонких пластинах или пленках.

При освещении плоскопараллельной пластины монохроматическим светом результат интерференции отраженных волн в различных точках плоскости наблюдения зависит только от угла падения света на пластину. Интерференционная картина имеет вид чередующихся темных и светлых полос. Каждая полоса сформирована пучком равно наклоненных к пластине лучей. Поэтому интерференционная картина носит название *полос равного наклона*.

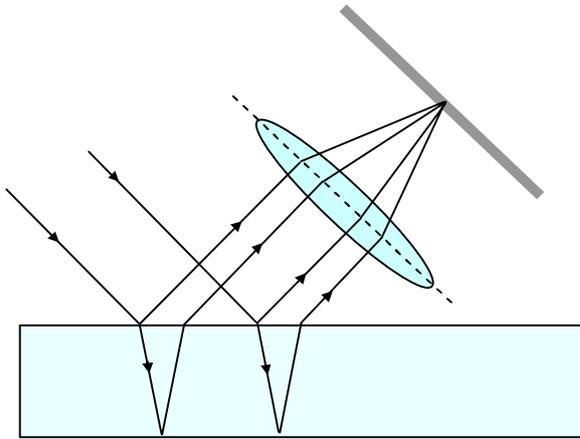


Рис. 1

бесконечности.

Многочисленные отражения в стеклянной пластине можно не учитывать, поскольку даже при двукратном отражении света от задней плоскости стеклянной пластины его интенсивность падает в сто раз. Такая интерференция называется двухлучевой.

Использование точечного источника света незначительно изменит картину. Точечный источник монохроматического света излучает сферические волны. Падающая на плоскопараллельную стеклянную пластину, такая волна образует две отраженные волны, распространяющиеся в сторону источника. Эти лучи не параллельны, а, следовательно, пересекаются. Устойчивая интерференция наблюдается в каждой точке пространства. Интерференция локализована всюду и ее наблюдение возможно без собирающей линзы.

Если плоскость наблюдения параллельна пластине, то интерференционная картина имеет вид системы концентрических темных и светлых колец, что следует из соображений симметрии.

Рассмотрим ход лучей, Рис. 2. Точечный источник монохроматического света  $S$  находится на расстоянии  $L$  от стеклянной плоскопараллельной пластины толщиной  $H$ . Там же находится экран, плоскость которого параллельна плоскости пластины.

Пусть на пластину падает плоская световая волна, Рис. 1. Лучи света, отраженные от верхней и нижней грани пластины, параллельны. Оптическая разность хода этих лучей определяется углом падения. Для наблюдения интерференции на экране используется собирающая линза. Говорят, что полосы равного наклона локализованы в

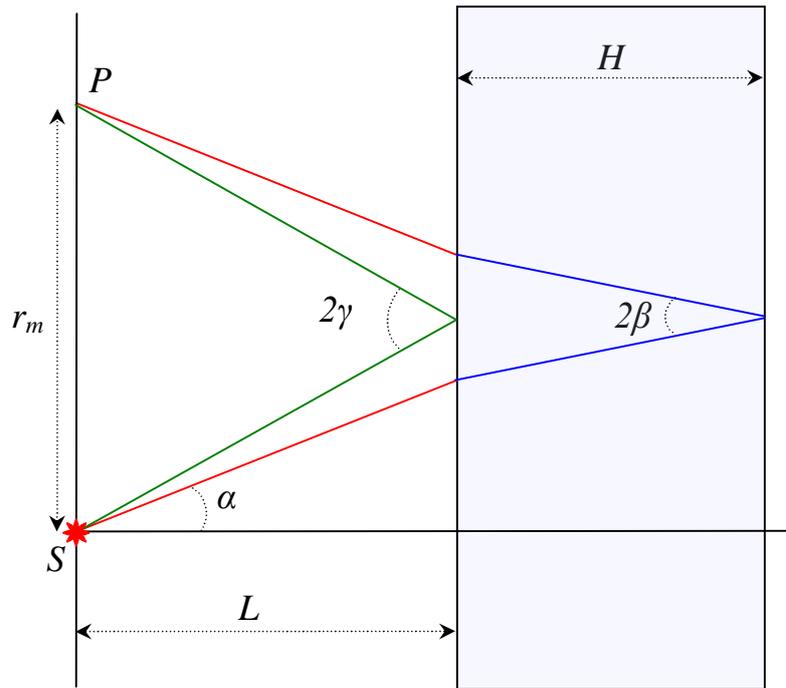


Рис. 2

Один луч, падая на пластину под углом  $\alpha$ , преломляется. Отразившись от задней плоскости пластины и вновь преломившись на передней, он попадает в точку  $P$ , расположенную на экране. Другой луч падает на пластину под углом  $\gamma$  и, отражаясь от нее, так же достигает точки  $P$ .

Простые геометрические построения позволяют записать оптическую длину пути этих лучей

$$L_1 = 2 \left( \frac{L}{\cos \alpha} + \frac{Hn}{\cos \beta} \right), \quad L_2 = \frac{2L}{\cos \gamma} + \frac{\lambda}{2}.$$

Слагаемое  $\lambda/2$  возникает вследствие изменения фазы волны при отражении от оптически более плотной среды. Тогда оптическая разность хода волн

$$\Delta = L_1 - L_2 = 2L \left( \frac{1}{\cos \alpha} - \frac{1}{\cos \gamma} \right) + \frac{2Hn}{\cos \beta} - \frac{\lambda}{2}.$$

Поскольку  $r_m \ll L$ , то углы падения, преломления и отражения малы, а для малых углов  $\alpha \ll 1$  справедливо

$$\frac{1}{\cos \alpha} \approx \frac{1}{1 - \alpha^2/2} \approx 1 + \alpha^2/2.$$

Тогда, для оптической разности хода волн получаем

$$\Delta = 2Hn + Hn\beta^2 - L(\gamma^2 - \alpha^2) - \lambda/2.$$

Запишем расстояние от источника до точки  $P$

$$r_m = 2Ltg\alpha + 2Htg\beta.$$

Воспользовавшись законом Снеллиуса  $\sin\alpha = n\sin\beta$  и малостью углов  $\sin\alpha \approx tg\alpha \approx \alpha$ , получаем, что  $r_m \approx 2\beta(Ln + H)$ .

С другой стороны,  $r_m = 2Ltg\gamma$ , но тогда  $L\gamma = L\alpha + H\beta$ . Возводя последнее выражение в квадрат, получаем

$$L^2(\gamma^2 - \alpha^2) = 2LH\alpha\beta + H^2\beta^2 \approx \beta^2H(2Ln + H).$$

Подставляя в выражение для оптической разности хода, получаем

$$\Delta = 2Hn - \beta^2(Ln + H)H/L - \lambda/2 = 2Hn - r_m^2 H / (4L(Ln + H)) - \lambda/2.$$

Для интерференционного минимума (темного кольца радиуса  $r_m$ ), оптическая разность хода волн составит  $\Delta = m\lambda + \lambda/2$ , где  $m$  – порядок интерференционного максимума.

Радиус темного кольца уменьшается с ростом интерференционного порядка

$$r_m^2 = 4L(Ln + H)(2Hn - m\lambda) / H.$$

Для заданных значений длины волны излучения, толщины пластины и показателя преломления существует максимальное значение интерференционного порядка, обозначим его как  $p$ , при котором  $r_p \geq 0$ . Если в центре экрана находится интерференционный минимум (темное пятно), то  $2Hn = p\lambda$ . Если на удвоенной оптической толщине пластины не укладывается целое число длин волн, то в центре наблюдается светлое пятно, а минимум имеет вид кольца самого малого радиуса. Оптическая разность хода до следующего темного кольца будет меньше на длину волны (с увеличением угла оптическая разность хода уменьшается).

Пронумеруем темные кольца в порядке возрастания их радиусов. Если  $k \geq 0$  – номер темного кольца, то его интерференционный порядок  $m = p - k$ .

Учитывая, что  $H \ll L$ , получаем линейную зависимость квадрата радиуса темного кольца от его номера

$$r_k^2 = r_0^2 + 4k\lambda nL^2/H, \quad r_0^2 = 4L^2n(2Hn - p\lambda)/H, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

Если  $\beta = \Delta r_k^2 / \Delta k$  – угловой коэффициент этой прямой, то  $\beta = 4\lambda nL^2/H$ .

Заметим, что разность квадратов радиусов соседних колец не зависит от их порядковых номеров

$$f_k = r_{k+1}^2 - r_k^2 = 4n\lambda L^2/H. \quad (2)$$

Интерференционная картина на толстых прозрачных пластинах возможна лишь в случае, когда длина когерентности больше разности хода интерферирующих волн. Этому условию отвечает лазерный свет.

### Описание лабораторной установки

Принадлежности: полупроводниковый лазер, толстая стеклянная пластина, направляющая, набор рейтеров (зажимов), короткофокусная линза с вмонтированным в оправу экраном с отверстием для луча лазера, защитный экран, магниты для крепления бумаги, линейка. С помощью рейтеров лазер, линза и экраны могут устанавливаться в положениях 1-7 на направляющей, Рис. 3.

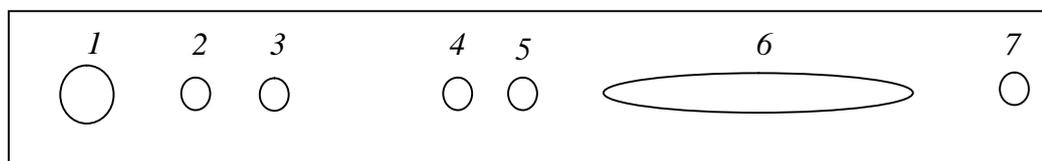


Рис. 3

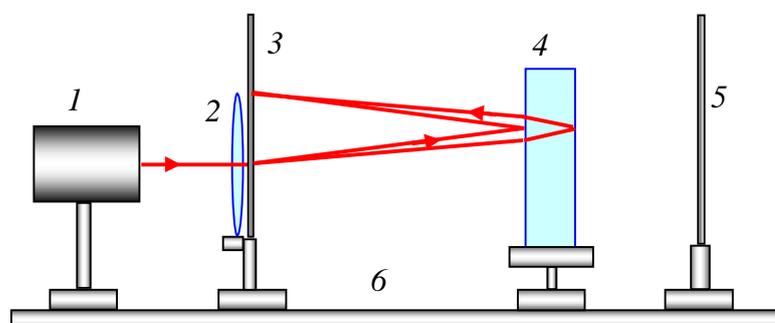
Мощность лазера 6 мВт, длина волны излучения 650 нм, что соответствует красному свету. Толщина пластины 19,5 мм, коэффициент преломления 1,51.

**Внимание, перед выполнением лабораторной работы следует ознакомиться с разделом «Техника безопасности и требования к выполнению работ» и получить разрешение преподавателя на выполнение работы.**

### Методика измерений

Установка собирается на направляющей в соответствии с Рис. 4. Лазерный луч, проходя через короткофокусную линзу, собирается в ее фокусе. После фокуса формируется расходящийся пучок света. Фокус линзы выступает как точечный

источник света. Проходя через отверстие в экране наблюдения, расходящийся пучок света падает на толстую стеклянную пластину. Отражения от граней пластины формируют на экране наблюдения интерференционную картину чередующихся темных и светлых колец. Излучение, прошедшее через пластину, задерживается защитным экраном.



1 – лазер; 2 – короткофокусная линза; 3 – экран наблюдения; 4 – толстая стеклянная пластина; 5 – защитный экран; 6 – направляющая

Рис. 4

Для измерения параметров интерференционной картины на экране наблюдения магнитами закрепляется белый лист бумаги. На листе бумаги чертятся два взаимно перпендикулярных отрезка. В точке пересечения отрезков вырезается небольшое отверстие диаметром  $\sim 4$  мм. Вырезанное отверстие и отверстие в экране наблюдения совмещаются.

Получив на экране интерференционную картину концентрических колец, необходимо отметить точки пересечения нескольких темных колец с начерченными на бумаге перпендикулярными отрезками. Расстояния между отмеченными точками соответствуют диаметру кольца. Каждому кольцу соответствуют два значения диаметра.

Возможен альтернативный вариант измерений. Нанесенные перпендикулярные отрезки измеряются. Или на бумагу наносится масштабный отрезок длиной 3-5 см. Полученная интерференционная картина фотографируется. Измерения диаметров колец, с учетом масштаба, можно проводить в любом графическом редакторе, либо распечатав изображение на бумаге формата А4. Результаты измерений позволяют проверить справедливость полученных выше формул.

## Задание 1

1. Соберите лабораторную установку на направляющей согласно Рис. 4. Лазер, закрепленный в оправе на рейтере, размещается в положение 1. Защитный экран ставится в положение 7. Экран наблюдения с короткофокусной линзой помещается в положение 2. Лист бумаги с предварительно вырезанным отверстием и начерченными взаимно перпендикулярными отрезками закрепляется на экране наблюдения магнитами. Стеклопластиковая пластина в оправе на рейтере помещается в положение 6 направляющей. Пластина располагается так, чтобы ее отражающие поверхности находились в плоскости, перпендикулярной к направляющей.

2. Включите лазер, и отъюстируйте установку. Все элементы схемы выставите соосно. Линзу установите так, чтобы луч лазера проходил через отверстие в экране наблюдения и попадал в то же место, что и луч лазера без линзы. Необходимо, чтобы отраженный от линзы луч лазера не попадал назад в излучатель, так как при этом резко падает мощность излучения лазера. Пластину по высоте установите так, чтобы расширенный лазерный пучок симметрично охватывал ее. В отраженном свете в центре экрана наблюдения должна появиться система концентрических колец. Центры колец должны совпадать или располагаться близко к отверстию в экране наблюдения.

3. Измерьте линейкой расстояние от экрана наблюдения до стеклопластиковой пластины. Занесите результат измерения в таблицу измерений.

4. Карандашом отметьте точки пересечения нескольких темных колец с начерченными на бумаге перпендикулярными отрезками. Можно также проделать это на распечатанной фотографии интерференционной картины. На каждое кольцо будет приходиться четыре точки.

5. Измерьте расстояния между соответствующими парами точек. Занесите полученные значения диаметров колец в таблицу. Количество колец должно быть не менее восьми.

6. На миллиметровой бумаге постройте график зависимости квадрата радиуса темного кольца от его номера,  $r_k^2 = r_k^2(k)$ , формула (1). Постройте аппроксимирующую прямую. Рассчитайте угловой коэффициент.

7. Полагая известными длину волны лазерного излучения и коэффициент преломления пластины, рассчитайте ее толщину. Сравните с известным значением. Вычислите максимальное значение интерференционного порядка.

**Таблица измерений**

№ опыта	$L, \text{ см}$	№ кольца	$d, \text{ мм}$ ↔	$d, \text{ мм}$ ↕	$r, \text{ мм}$	$r^2, \text{ мм}^2$	$f, \text{ мм}^2$
1		1					
		2					
		...					
		10					
2		$k$					
		$k+1$					
3		$k$					
		$k+1$					

### Задание 2

1. Выполните пункты 1-3 первого задания.
2. Выполните пункты 4-5, выбирая для измерения любые два соседних кольца.
3. Сместите стеклянную пластину на 5-8 см ближе к экрану наблюдения и выполните измерения. Выполните измерения для четырех положений.
4. На миллиметровой бумаге постройте график зависимости разности квадратов радиусов соседних темных колец от квадрата расстояния между пластиной и экраном наблюдения, формула (2). Постройте аппроксимирующую прямую. Рассчитайте угловой коэффициент. Полагая известными длину волны лазерного

излучения и коэффициент преломления пластины, рассчитайте ее толщину. Сравните с известным значением.

### Контрольные вопросы

1. Каким образом можно получить интерференционную картину от источника естественного света?
2. Почему говорят, что полосы равного наклона локализованы в бесконечности?
3. Зачем в выражение для оптической разности хода интерферирующих волн вводят слагаемое, равное по модулю половине длины волны света?
4. На какую величину изменяется оптическая разность хода при переходе от одной интерференционной полосы к соседней полосе?
5. Какой области получаемой интерференционной картины соответствует максимальный порядок интерференции?
6. Выведите формулу зависимости радиуса темного кольца от его номера.

### Литература

1. Сарина М.П. Колебания, волны, оптика: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – Ч. 2. Оптика. – 116 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. В 5-и тт. Том 4. Волны. Оптика [Электронный ресурс]: учебное пособие / И.В. Савельев. – Электрон. дан. – Санкт-Петербург: Лань, 2011. – 256 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/707>.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том 4. Оптика [Электронный ресурс]: учебное пособие / Д.В. Сивухин. – Электрон. дан. – Москва : Физматлит, 2002. – 792 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/2314>.