

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по учебной работе  
Ю.А.Самарский  
\_\_\_ декабря 2011 г.

**ПРОГРАММА**

по курсу: ВОЛНОВАЯ ОПТИКА  
по направлению: 010900  
факультет: ФНБИК  
кафедра: физики и физического материаловедения  
курс: 2  
семестр: 4  
лекции: 32 часа  
практические (семинарские) занятия: 32 часа  
лабораторные занятия: 64 часа  
самостоятельная работа: 4 часа в неделю  
экзамен: 4 семестр  
зачет: нет

ВСЕГО ЧАСОВ: 128

Программу и задание составили:  
д.ф.-м.н., доцент Барабанов Алексей Леонидович  
к.ф.-м.н. Ситников Михаил Геннадьевич

Программа утверждена на заседании кафедры физики и  
физического материаловедения \_\_\_ декабря 2011 года

Заведующий кафедрой

В.Г. Вакс

## ТЕМЫ И ИХ КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

- Тема 1.** *Электромагнитные волны. Основы геометрической оптики.* Волновое уравнение как следствие уравнений Максвелла. Плоские электромагнитные волны. Законы отражения и преломления. Преломление света на сферической поверхности раздела двух диэлектрических сред. Параксиальное приближение. Тонкая и толстая линзы. Оптические приборы: лупа, телескоп, микроскоп.
- Тема 2.** *Основы фотометрии.* Световой поток, сила света, яркость, светимость, освещённость.
- Тема 3.** *Квазимонохроматические волны.* Плоские и сферические монохроматические электромагнитные волны. Квазимонохроматические волны – волновые пакеты. Длина пространственной когерентности и время когерентности квазимонохроматической волны. Соотношение неопределённостей ”частота-время”. Статистическая природа ”обычного” света. Лазеры как источники когерентного светового излучения.
- Тема 4.** *Временная когерентность и интерференция волн.* Принцип суперпозиции и интерференция волн. Интерференционные опыты и схемы. Интерференция монохроматических волн, ширина интерференционных полос. Интерференция квазимонохроматических волн: временная когерентность и видность интерференционных полос. Максимальная разность хода в интерференционных опытах с квазимонохроматическими волнами.
- Тема 5.** *Пространственная когерентность и интерференция волн.* Интерференционные явления для волн, испускаемых протяжёнными источниками: пространственная когерентность и видность интерференционных полос. ”Ширина” (”радиус”) пространственной когерентности.
- Тема 6.** *Дифракция Френеля.* Принцип Гюйгенса—Френеля. Граничные условия Кирхгофа. Дифракционные задачи с осевой симметрией. Спираль Френеля и зоны Френеля. Зонные пластинки. Линза как дифракционный прибор. Дифракция Френеля на щели. Зоны Шустера. Интегралы Френеля. Спираль Корню.

**Тема 7.** *Дифракция Фраунгофера.* Критерий подобия дифракционных задач. Волновой параметр и число Френеля. Различие между дифракцией Френеля и дифракцией Фраунгофера. Границы применимости геометрической оптики. Дифракция Фраунгофера на круглом отверстии и на щели. Поле в фокальной плоскости линзы. Дифракционный предел разрешения телескопа и микроскопа.

**Тема 8.** *Спектральные приборы.* Дифракционная решетка, интерферометр Фабри—Перо, призма. Характеристики спектральных приборов: разрешающая способность, область дисперсии. Дифракционный предел разрешения спектральных приборов. Дифракция рентгеновских волн, условие Брэгга—Вульфа.

**Тема 9.** *Метод Релея в задачах дифракции (принципы фурье-оптики).* Волновое поле как суперпозиция плоских волн разных направлений (пространственное фурье-разложение). Пространственная частота, пространственный спектр. Дифракция на синусоидальных решетках. Теория Аббе формирования оптического изображения (принцип двойной дифракции). Явление саморепродукции. Методы наблюдения фазовых структур: метод тёмного поля и метод фазового контраста. Представление о фурье-спектроскопии.

**Тема 10.** *Голография.* Принципы голографии. Голограмма Габо́ра. Голограмма с наклонным опорным пучком. Действительные и мнимые изображения. Разрешающая способность голограмм. Понятие об объёмных голограммах Денисюка.

**Тема 11.** *Элементы кристаллооптики и нелинейной оптики.* Дисперсия света. Диэлектрическая поляризация плазмы. Фазовая и групповая скорости волн. Поляризация света при отражении и преломлении. Явление Брюстера. Оптические явления в одноосных кристаллах. Интерференция поляризованных волн. Нелинейная поляризация среды. Генерация гармоник. Самофокусировка.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бутиков Е.И.* Оптика. – Москва, Высшая школа, 1986.
2. *Кингсеп А.С., Локшин Г.Р., Ольхов О.А.* Основы физики. Курс общей физики. Т. 1. Часть 1: Механика. Часть 2: Электричество и магнетизм. Часть 3: Физика колебаний и волн. Волновая оптика. / Под ред. А.С. Кингсепа. – Москва, Физматлит, 2001.
3. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Т.4. Оптика. – Москва, Наука, 1980.
4. *Козел С.М., Лейман В.Г., Локшин Г.Р., Овчинкин В.А., Прут Э.В.* Сборник задач по общему курсу физики. Часть 2. Электричество и магнетизм. Оптика. / Под ред. В.А. Овчинкина. – Москва, Изд-во МФТИ, 2000.

### Дополнительная литература

5. *Горелик Г.С.* Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику. – Москва, Физматлит, 1959, 2007.
6. *Иродов И.Е.* Волновые процессы. основные законы. — Москва, ЛБЗ, 1999.
7. *Ландсберг Г.С.* Оптика. – Москва, Наука, 1976 (5-е изд.).
8. *Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.* Фейнмановские лекции по физике. Т. 1, Вып.3 (Излучение, волны, кванты). — Москва, Мир, 1977.
9. *Иродов И.Е.* Задачи по общей физике. – Москва, НТЦ ВЛАДИС, 1997.

**ПЛАН ЗАНЯТИЙ**  
**в весеннем семестре 2011/2012 учебного года**

Недели	Лекции	Семинары
1.	Тема 1	Тема 1
2.	Тема 2	Тест по теме 1. Тема 2
3.	Тема 3	Тест по теме 2. Тема 3
4.	Тема 4	Тест по теме 3. Тема 4
5.	Тема 5	Тест по теме 4. Тема 5
6.	Тема 6	Тест по теме 5. Тема 6
7.	Контр. работа 1	Тест по теме 6. Сдача задания 1
8.	Тема 7	Тема 7
9.	Тема 8	Тест по теме 7. Тема 8
10.	Тема 9	Тест по теме 8. Тема 9
11.	Тема 10	Тест по теме 9. Тема 10
12.	Тема 11	Тест по теме 10. Тема 11
13.	Контр. работа 2	Тест по теме 11. Сдача задания 2

**Пояснение:** В конце семестра преподаватель, ведущий семинары, выставляет студентам 10-бальные оценки за работу в семестре. Оценка за работу в семестре выставляется с учётом результатов тестирования, результатов контрольных работ и результатов сдачи задания. Эта оценка учитывается при выставлении экзаменационной оценки.

**Правила тестирования**

Тестирования проводятся на семинарах, как правило, в начале семинара. На каждом тестировании предлагается письменно ответить на 5 простых вопросов по курсу. На ответы отводится по минуте на вопрос, всего, следовательно, 5 минут на тестирование.

Список тестовых вопросов составляется в течение семестра: после каждой лекции лектор предлагает студентам 10 вопросов. К концу семестра после 11 лекций появится список из 110 вопросов. На каждом тестировании преподаватель предлагает 5 вопросов, выбранных им по своему усмотрению из соответствующих 10 вопросов по теме. При ответах на тестовые вопросы никакими письменными (печатными) материалами и электронными приборами пользоваться нельзя.

За ответ на каждый вопрос преподаватель ставит либо 2 балла (правильный ответ), либо 1 балл (немного неточный ответ), либо 0

баллов (неправильный ответ). Преподаватель возвращает студентам проверенные работы с выставленными баллами (как правило, через неделю после тестирования) и тем самым информирует их о количестве набранных ими баллов. Таким образом, за 11 тестирований можно набрать от 0 до 110 баллов.

В конце семестра для недовольных своим итоговым результатом по тестированию будет проведено "итоговое тестирование". Будет предложено письменно ответить на некоторые 25 вопросов из списка тех же 110 вопросов. Время тестирования - примерно 30 минут. За каждый ответ ставится, как и ранее, от 0 до 2 баллов. Результирующая оценка получается умножением суммы полученных баллов на 2. Таким образом, в этом итоговом тестировании можно набрать от 0 до 100 баллов.

### **Контрольные работы**

На каждой контрольной работе предлагаются 2-3 задачи. Время выполнения работы – одна пара. Каждая контрольная работа будет оцениваться 10-бальной оценкой. Таким образом, за 2 контрольные работы можно набрать от 0 до 20 баллов.

### **Сдача заданий**

Задачи задания должны быть представлены в отдельной тетради или на сброшюрованных листах. Выполнение задач без звёздочек является обязательным. Задание 1 сдаётся в середине семестра, задание 2 – в конце семестра.

За сдачу всех задач задания в срок, определённой программой, выставляется 10 баллов. Если все задачи не удалось сдать в срок, но "отложенные" задачи были сданы с недельным опозданием, то за сдачу задания выставляется 8 баллов. Более поздняя сдача задания (уже всё равно в какие сроки, но до начала экзаменационной сессии) оценивается в 6 баллов. Если последняя задача задания принимается после начала экзаменационной сессии, то за задание ставится не выше 4 баллов. Задание может быть засчитано без 1, 2... задач, при этом за каждую несданную задачу из 6 или 4 баллов вычитается 1 балл.

За каждую выполненную задачу со звёздочкой (до 10 задач) прибавляется 1 балл. Не важно, в какие сроки сдаются эти необязательные задачи. Если число выполненных задач со звёздочкой превысит 10, то дополнительные баллы не прибавляются (к уже набранным 10 баллам), но в экзаменационной ведомости делается отметка о по-

лучении дополнительной "зачётной единицы".

Таким образом, за сдачу двух домашних заданий можно набрать от 0 до 30 баллов. Студенты, не сдавшие задание хотя бы на 0 баллов, не допускаются до экзамена.

### Оценка за работу в семестре

Студентам, набравшим за тестирование 70 или более баллов, оценка за работу в семестре выставляется в соответствии со следующей таблицей:

Сумма баллов за две к.р.:	20–15	14–10	9–5	4–0
Тесты $\geq 94$	10/9/8	9/8/7	8/7/6	7/6/5
$82 \leq$ Тесты $< 94$	9/8/7	8/7/6	7/6/5	6/5/4
$70 \leq$ Тесты $< 82$	8/7/6	7/6/5	6/5/4	5/4/3

В каждой клетке таблицы стоят 3 оценки, соответствующие следующим суммам баллов за сдачу домашних заданий: от 30 до 20/ от 19 до 10/ от 9 до 0.

Пусть, для примера, тесты написаны на 93 балла, сумма баллов за две контрольные работы 9, за сдачу домашних заданий получено 8 баллов. Тогда 10-бальная оценка за работу в семестре – 5 (или хор (5)).

Студенты, набравшие за тестирование менее 70 баллов, не допускаются до экзамена.

## ПЛАН ПРОВЕДЕНИЯ СЕМИНАРОВ в весеннем семестре 2011/2012 учебного года

**Пояснение:** Всюду, где возможно, приведены ссылки на номера задач в сборниках [4]≡[O2] и [9]≡[И] (по теме "Оптика") для того, чтобы результаты могли быть (при необходимости) сверены с ответами. Формулировки некоторых задач изменены, в ряде случаев поставлены дополнительные вопросы. Помимо задач, рекомендованных для обсуждения на семинаре, преподаватель может разбирать и другие задачи по своему усмотрению.

### Семинар по теме 1. *Геометрическая оптика.*

1) [O2, 1.7] Плоская стеклянная пластинка толщиной  $d = 3$  мм рассматривается в микроскоп. Сначала микроскоп устанавливают для наблюдения верхней поверхности пластинки, а затем смещают тубус микроскопа вниз до тех пор, пока не будет отчётливо видна

нижняя поверхность пластинки (для удобства наблюдения на поверхностях пластинки сделаны метки). Смещение тубуса оказалось равным  $l = 2$  мм. Найдите показатель преломления пластинки  $n$ .

2) [О2, 1.38] Зрительная труба с фокусным расстоянием объектива  $f = 50$  см установлена на бесконечность. На какое расстояние  $\Delta l$  нужно передвинуть окуляр трубы, чтобы ясно видеть предметы на расстоянии  $L = 50$  м?

3) [И, 4.55] Оптические силы объектива и окуляра микроскопа равны 100 и 20 диоптрий. Линейное увеличение микроскопа  $\alpha = 50$ . Расстояние  $d$  между объективом и окуляром микроскопа увеличили на 2 см. Каким стало линейное увеличение  $\beta$  этого микроскопа?

### Семинар по теме 2. Основы фотометрии.

1) [О2, 1.47, 1.48] Примем, что небо представляет собой ламбертовский источник с яркостью  $B$ . Найдите освещённость  $E$  небольшой площадки на Земле, считая небо: (1) бесконечной плоскостью, находящейся на высоте  $H$  над Землёй; (2) полусферой радиуса  $R$  с центром на площадке. Докажите, что в обоих случаях небо с площадки на Земле выглядит одинаково.

2) [О2, 1.51] При нормальном падении солнечных лучей на поверхность Земли освещённость этой поверхности примерно равна  $E = 10^5$  лк. Считая, что Солнце представляет собой ламбертовский источник и пренебрегая поглощением света в атмосфере, определите яркость Солнца. Известно, что радиус орбиты Земли  $R = 1.5 \cdot 10^8$  км, а диаметр Солнца  $D = 1.4 \cdot 10^6$  км.

3) [О2, 1.56] Действительное изображение, сформированное собирающей линзой, рассматривается сначала непосредственно, а затем на белом экране. Как зависит в обоих случаях яркость изображения от диаметра линзы?

### Семинар по теме 3. Интерференция монохроматических волн.

1) [О2, 3.5] Между точечным источником света и экраном находится тонкая стеклянная бипризма (схема представлена на рис. 1). Расстояние от бипризмы до источника света  $a$ , а до экрана —  $b$ . Показатель преломления стекла  $n$ . Угол при острых вершинах бипризмы равен  $\alpha$ . Источник испускает монохроматический свет с длиной волны  $\lambda$ . Вследствие малости угла  $\alpha$  интерферирующие лучи, падающие на экран, приблизительно перпендикулярны ему. Найдите



расстояние  $x_m$  от центра интерференционной картины до  $m$ -й светлой полосы.

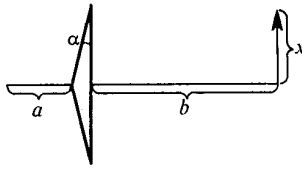


Рис. 1: к задаче [O2, 3.5]

2) [O2, 3.18] Спутник Земли излучает радиоволны с длиной  $\lambda = 10$  см. Микроволновый детектор, расположенный на берегу озера на высоте  $h = 1$  м над уровнем воды, принимает волны со спутника, который поднимается над горизонтом (схема представлена на рис. 2). Рассматривая поверхность воды как идеальный проводник, определите, при каких углах  $\alpha$  спутника над горизонтом детектор зарегистрирует 1-й и 2-й максимумы интенсивности сигнала. Рассмотрите случаи горизонтальной и вертикальной поляризации.

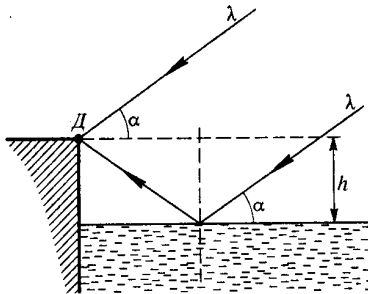


Рис. 2: к задаче [O2, 3.18]

3) [O2, 3.25] Кольца Ньютона наблюдаются в отражённом свете с помощью плосковыпуклой стеклянной линзы. Длина волны света  $\lambda = 589$  нм. Показатель преломления стекла  $n = 1.6$ . Найдите фокусное расстояние  $f$  линзы, если известно, что радиус третьего светлого кольца равен  $r_3 = 1.1$  мм.

**Семинар по теме 4. Временная когерентность и интерференция волн.**

1) [O2, 4.2] D-линия натрия не монохроматична, а представляет собой две очень близкие спектральные линии с длинами волн  $\lambda_1 = \lambda - \Delta\lambda/2$  и  $\lambda_2 = \lambda + \Delta\lambda/2$ , где  $\lambda = 589.3$  нм. Найдите  $\Delta\lambda$ , если

известно, что резкость интерференционной картины, наблюдаемой в интерферометре с двумя лучами, максимальна у 0-й, 980-й и т. д. полос, и минимальна у 490-й, 1470-й и т. д. полос.

2) [O2, 4.3\*] Вдоль оси располагаются последовательно плоскопараллельная стеклянная пластинка  $\Pi$  толщиной  $d = 1.6$  мм, источник  $S$  света с длиной волны  $\lambda = 600$  нм, линза  $L$  с фокусным расстоянием  $f = 40$  см и экран  $\mathcal{E}$  (схема представлена на рис. 3). Показатель преломления стекла  $n = 1.5$ . Экран находится в фокальной плоскости линзы. Свет, идущий от источника к линзе, задерживается небольшим экраном, расположенным вблизи источника; поэтому интерференционная картина на экране формируется лучами, которые идут от источника к стеклянной пластинке, отражаются от граней этой пластинки и проходят вслед за тем через линзу. Центр интерференционных колец на экране является тёмным. Найдите радиус  $r$  первого видимого на экране тёмного интерференционного кольца. При какой максимально допустимой ширине линии  $\Delta\lambda$ , испускаемой источником, всё ещё видны интерференционные кольца?

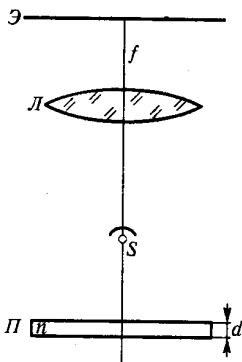


Рис. 3: к задаче [O2, 4.3\*]

3) [O2, 4.10] На воздушном клине между двумя стеклянными пластинками с углом при вершине  $\alpha = 1'$  можно наблюдать интерференционные полосы равной толщины. Полосы наблюдаются в отражённом от клина свете зелёной линии ртути с длиной волны  $\lambda = 546.10$  нм и шириной  $\Delta\lambda = 0.01$  нм. Найдите: (1) расстояние  $\Delta x$  между полосами; (2) максимальное число  $N$  полос, которые можно было бы увидеть на клине, если бы его размеры не были ограничены; (3) расстояние  $x$  последней наблюдаемой полосы от вершины клина и толщину  $h$  клина в этом месте.

**Семинар по теме 5. Пространственная когерентность и интерференция волн.**

1) [O2, 5.3] В фокальной плоскости собирающей линзы с фокусным расстоянием  $f = 50$  мм размещён экран с отверстием. Размер отверстия равен размеру изображения Солнца на экране. Свет Солнца, собранный линзой и прошедший через отверстие в экране, используется далее в интерференционной схеме Юнга для получения интерференционных полос. При этом две узкие параллельные щели, через которые проходит свет, находятся на расстоянии  $D = 1$  мм друг от друга и на расстоянии  $l$  от отверстия в экране. Угловой диаметр Солнца  $\alpha \simeq 0.01$  рад. При каких расстояниях  $l$  будут наблюдаться интерференционные полосы?

2) [O2, 5.8] Источником монохроматического света является отрезок нити длиной  $b$ . Свет этого источника  $S$  падает на непрозрачный экран  $\mathcal{E}$ , в котором имеются два маленьких отверстия. Интерференция света, прошедшего через отверстия, наблюдается в точке  $P$  (схема представлена на рис. 4). Источник света  $S$  и точка  $P$  находятся на одинаковом расстоянии  $L$  от экрана с отверстиями. При увеличении расстояния  $d$  между отверстиями изменение интенсивности в точке  $P$  имеет осциллирующий характер. Найдите линейный размер  $b$  источника света, если первый минимум интенсивности в точке  $P$  наблюдается при  $d = d_1 = 1$  см, а амплитуда осцилляций становится равной нулю при  $d = d_2 = 20$  см (условие  $d \ll L$  всегда выполняется).

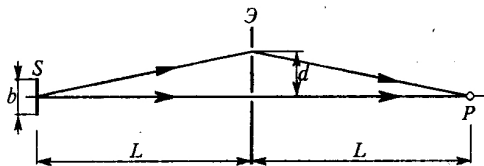


Рис. 4: к задаче [O2, 5.8]

3) [O2, 5.18] Схема установки Майкельсона, предназначенной для измерения угловых диаметров звёзд, представлена на рис. 5. Зеркала  $M_1, M_2, M_3, M_4$  направляют в объектив телескопа два пучка света, интерферирующие друг с другом в фокальной плоскости объектива. При измерении углового диаметра красной звезды Бетельгейзе Майкельсон нашёл, что интерференционные полосы исчезли, когда расстояние между внешними зеркалами  $M_1$  и  $M_2$  стало равным  $L = 306.5$  см. Вычислите угловой диаметр звезды  $\psi$ , приняв, что

эффективная длина волны света от Бетельгейзе равна  $\lambda = 575.0$  нм.

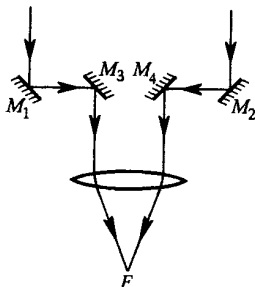


Рис. 5: к задаче [O2, 5.18]

### Семинар по теме 6. Дифракция Френеля.

1) [O2, 6.15\*] Яркий источник можно сфотографировать, поместив между ним и фотопластинкой гладкий непрозрачный шар (почему?). Определите размер  $y'$  изображения, если диаметр шара  $D = 40$  мм, расстояние от источника до шара  $a = 12$  м, расстояние от шара до изображения  $b = 18$  м, размер источника  $y = 7$  мм. Будет ли изображение испорчено, если поверхность шара испещрена множеством неправильных царапин, глубина  $h$  которых порядка 0.1 мм? Можно ли шар заменить диском?

2) [O2, 6.20] Свет с длиной волны  $\lambda$  падает нормально на плоскопараллельную стеклянную пластинку; показатель преломления стекла  $n$ . В пластинке вырезано круглое отверстие размером в одну зону Френеля для некоторой точки  $P$ , лежащей на оси системы. При какой толщине пластинки  $h$  интенсивность света  $J$  в точке  $P$  будет максимальной? Найдите  $J_{max}$ , если в отсутствие пластинки интенсивность равна  $J_0$ .

3) [O2, 6.43] Свет с длиной волны  $\lambda = 630$  нм проходит через линзу диаметром  $D = 5$  см с фокусным расстоянием  $f = 50$  см. Найдите, во сколько раз интенсивность света  $J$  в фокусе линзы превышает интенсивность света  $J_0$ , падающего на линзу. Оцените диаметр пятна  $b$  в фокальной плоскости (на линзу падают параллельные лучи).

### Семинар по теме 7. Дифракция Фраунгофера.

1) [O2, 7.9] С искусственного спутника Земли, движущегося по круговой орбите на высоте  $h = 250$  км, проводится фотографирование земной поверхности. Разрешающая способность светочувстви-

тельной матрицы  $N = 500$  линий/мм. Какими параметрами должен обладать объектив (диаметр  $D$ , фокусное расстояние  $f$ ), чтобы при фотографировании разрешались детали с линейными размерами  $l \simeq 1$  м?

2) [O2, 7.13] Для локации Луны свет рубинового лазера ( $\lambda = 0.7$  мкм) отправлялся и принимался с помощью телескопа Симеизской обсерватории (диаметр зеркала  $D = 2.6$  м). Отражение света осуществлялось 14-ю призмами, установленными на Луноходе-1. Каждая призма отражала свет точно на  $180^\circ$ ; отражение от одной призмы эквивалентно отражению от плоского зеркала диаметром  $d = 6$  см. При приёме мог быть обнаружен сигнал, состоящий из двух фотонов. Оцените минимально необходимую для локации Луны энергию  $E$  одной световой вспышки.

3) [O2, 7.54] В фокальной плоскости объектива телескопа помещена фотопластинка. Освещённость изображения звезды на фотопластинке в  $\alpha = 10$  раз меньше освещённости дневного неба. Во сколько раз нужно увеличить диаметр объектива, чтобы освещённость изображения звезды на фотопластинке стала в  $\beta = 10$  раз больше освещённости изображения неба?

4) [O2, 7.59] Определите минимально разрешаемое расстояние  $\delta$  микроскопа при наилучших условиях освещения для (1) безымерсионного объектива с числовой апертурой  $a = 0.9$  (числовая апертура  $a = \sin \alpha$ , где  $\alpha$  – угол полураствора конуса, вершиной которого является точка на объекте наблюдения, а основанием – объектив микроскопа); (2) того же объектива, но с масляной иммерсией ( $n = 1.6$ ). Длина волны при визуальных наблюдениях  $\lambda = 550$  нм.

**Семинар по теме 8. Разрешающая способность спектральных приборов.**

1) [O2, 8.2] Призма изготовлена из стекла, дисперсия которого вблизи  $D$ -линии натрия равна  $dn/d\lambda = 956 \text{ см}^{-1}$ . При каком наименьшем основании  $b$  призмы с её помощью можно разрешить жёлтый дублет натрия (составляющие  $D$ -линии, соответствующие  $\lambda_1 = 589.0$  нм и  $\lambda_2 = 589.6$  нм).

2) [O2, 8.37] Коллиматорная щель, освещаемая источником света, находится в главном фокусе линзы с фокусным расстоянием  $f = 20$  см. Пройдя через линзу, свет падает на дифракционную решётку, плоскость которой перпендикулярна к главной оптической оси линзы. Число штрихов решётки  $N = 1000$ , период решётки  $d = 0.001$  см.

Найдите максимальную ширину коллиматорной щели  $b$ , позволяющую полностью использовать разрешающую способность решётки в окрестности длины волны  $\lambda = 500$  нм.

3) [O2, 8.78] Зеркала интерферометра Фабри–Перо, имеющие коэффициент отражения  $\rho = 99\%$  (по интенсивности), расположены на расстоянии  $L = 1$  м друг от друга. Эталон используется в качестве оптического резонатора на длине волны  $\lambda = 0.63$  мкм. Пользуясь аналогией с колебательным контуром, найдите добротность резонатора и ширину  $\delta\nu$  резонансной кривой (в МГц). Найдите также частотный интервал  $\Delta\nu$  между соседними резонансами.

**Семинар по теме 9. Принципы фурье-оптики.**

1) [O2, 9.2] Синусоидальная дифракционная решётка освещается нормально падающей плоской волной с амплитудой  $E_0$  и круговой частотой  $\omega$ . Амплитудный коэффициент пропускания решётки  $\tau(x) = 1 + a \cos \Omega x$  ( $a < 1$ ). Найдите пространственный спектр  $F(u)$  плоских волн за решёткой. Получите явное выражение для суперпозиции плоских волн за решёткой.

2) [O2, 9.11] Две плоские монохроматические ( $\lambda = 600$  нм) волны с равными амплитудами  $A_0$  распространяются в пространстве так, что их волновые векторы лежат в плоскости  $XZ$  и составляют углы  $\pm \alpha = \pm 0.06$  рад с осью  $Z$  (схема представлена на рис. 6). Волны падают на плоскость  $z = 0$ , в которой располагается синусоидальная дифракционная решётка, при этом в точке  $x = 0$  колебания волн синфазны. Амплитудный коэффициент пропускания решётки  $\tau(x) = (1 + \sin \Omega x)/2$ . Период решётки  $d = 2\pi/\Omega = 10^{-3}$  см. Найдите пространственный спектр  $F(u)$  плоских волн за решёткой. Получите явное выражение для суперпозиции плоских волн за решёткой.

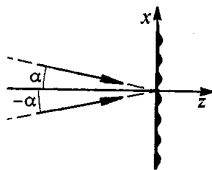


Рис. 6: к задаче [O2, 9.11]

3) [O2, 9.17] Один из методов наблюдения фазовых (прозрачных) объектов заключается в следующем. Плоская волна с длиной  $\lambda$  распространяется вдоль оси  $Z$  и дифрагирует на фазовой (прозрачной)

периодической структуре, вытянутой вдоль оси  $X$  (схема представлена на рис. 7). Далее свет проходит через линзу  $L_1$ , тонкую прозрачную пластинку  $\Pi$ , линзу  $L_2$  и попадает на экран  $\mathcal{E}$ . Расстояния между всеми элементами схемы равны  $f$ , где  $f$  – фокусное расстояние обеих линз. Пластинка вносит фазовую задержку в  $\pi/2$  и ослабляет в  $n$  раз проходящую через неё волну. Пусть прозрачной периодической структурой является фазовая синусоидальная решётка с "коэффициентом пропускания"  $\tau(x) = e^{im \cos \Omega x}$  ( $m \ll 1$ ). Найдите распределение интенсивности  $J(x)$  на экране и видность интерференционной картины. Как изменится картина интенсивности, если использовать пластинку с фазовой задержкой  $3\pi/2$ ?

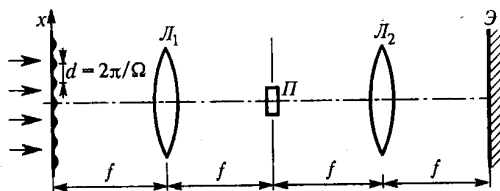


Рис. 7: к задаче [O2, 9.17]

**Семинар по теме 10. Явление саморепродукции. Голография.**

1) [O2, 9.26] Дифракционная решётка длиной  $L$  с периодом  $d$  освещается нормально падающей плоской волной (длина волны  $\lambda \ll d$ ). В плоскостях саморепродукции наблюдаются изображения решётки. Оцените число изображений, в которых ещё различима структура решётки.

2) [O2, 9.35] Создано голографическое изображение небольшого предмета на фотопластинке, расположенной на расстоянии  $L = 50$  см от него. Для создания и просмотра голограмм используется свет с длиной волны  $\lambda = 0.5$  мкм. Каким должен быть размер (диаметр)  $D$  фотопластинки, чтобы на голограмме оказались записанными детали предмета размером  $b = 0.01$  мм? Какая некогерентность света  $\Delta\lambda$  при этом допустима?

3) [O2, 9.40] При записи объёмной голограммы на фотопластинку, покрытую фотоэмульсией толщиной  $h = 5$  мкм, падают две плоские монохроматические волны ( $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$  см) с равными амплитудами. Одна из волн (опорная) падает нормально на фотопластинку, другая (предметная) – под углом  $\alpha = 60^\circ$  к нормали. Предполагая, что показатель преломления фотоэмульсии  $n = 1$ , найдите расстояние  $d$  между слоями с максимальным почернением фотоэмульсии (интер-

ференционные максимумы). Сколько таких слоёв  $N$  пересечёт луч света, пронизывающий фотопластинку по нормали?

**Семинар по теме 11. Дисперсия. Поляризация света. Элементы кристаллооптики и нелинейной оптики.**

1) [O2, 10.4] Плоское волновое возмущение распространяется в среде с законом дисперсии:  $v = a + b\lambda$ , где  $v$  – фазовая скорость,  $a$  и  $b$  – постоянные,  $\lambda$  – длина волны. Покажите, что каким бы ни было возмущение, его форма, непрерывно изменяясь, будет восстанавливаться с периодом  $T = d\lambda/dv = 1/b$ . Покажите, что отношение пути  $s$ , пройденного возмущением за время  $T$ , ко времени  $T$  равно групповой скорости.

2) [O2, 11.9] В интерференционном опыте Юнга свет сначала проходит сквозь длинную и узкую щель  $S$  в первом экране, потом через аналогичные щели  $S_1$  и  $S_2$  во втором экране (схема представлена на рис. 8). В пространство между первым и вторым экранами вводится полярироид  $P$ , пропускающий свет, линейно поляризованный вдоль щелей. Как изменится наблюдаемая интерференционная картина, если щели  $S_1$  и  $S_2$  прикрыть пластинками в полволны, ориентированными взаимно перпендикулярно друг другу, параллельно и перпендикулярно щелям? Что произойдёт, если полярироид  $P$  повернуть на  $90^\circ$  так, чтобы он пропускал свет, линейно поляризованный поперёк щелей? Что произойдёт, если убрать полярироид? Рассмотрите эту же задачу, заменив пластики в полволны пластинками в четверть волны. Щели  $S_1$  и  $S_2$  считайте узкими, а расстояние между ними – большим по сравнению с их шириной.

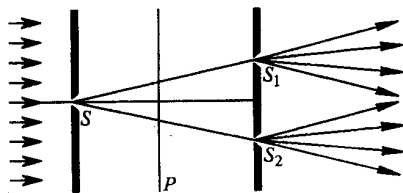


Рис. 8: к задаче [O2, 11.9]

3) [O2, 11.89] Явление самофокусировки объясняется зависимостью показателя преломления среды от интенсивности распространяющегося в этой среде света ( $n = n_0 + n_2 E_0^2$ , где  $E_0$  – амплитуда напряжённости электрического поля в световой волне). Одним из самых больших значений  $n_2$  обладает сероуглерод ( $n_2 =$



$2 \cdot 10^{-11}$  ед. СГСЭ). Мощный пучок лазерного излучения с параболической зависимостью интенсивности от расстояния от центра пучка ( $J = J_0(1 - r^2/r_0^2)$  при  $r < r_0$  и  $J = 0$  при  $r > r_0$ ) проходит сквозь слой сероуглерода толщиной  $L = 5$  см. Найдите, на каком расстоянии  $F$  от кюветы с сероуглеродом сфокусируется лазерный пучок, если  $J_0 = 5 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> и  $r_0 = 5$  мм. Под интенсивностью здесь понимается средняя по времени плотность потока энергии:  $J = cE_0^2/8\pi$ .

## ЗАДАНИЕ ПО ВОЛНОВОЙ ОПТИКЕ на весенний семестр 2011/2012 учебного года

**Пояснение:** Всюду, где возможно, приведены ссылки на номера задач в сборниках [4]≡[O2] (по теме "Оптика") и [9]≡[И] для того, чтобы результаты могли быть (при необходимости) сверены с ответами. Формулировки некоторых задач изменены, в ряде случаев поставлены дополнительные вопросы. Решения задач, входящих в задание, должны быть своевременно представлены преподавателю в отдельной тетради.

### ЗАДАНИЕ 1

**Задание по теме 1. Геометрическая оптика.**

1-1) [O2, 1.15] Непосредственно у торца стеклянного цилиндрического световода на его оси расположен точечный источник света. Показатель преломления стекла равен  $n$ . Найдите угловую апертуру  $\alpha$  пучка света, проходящего через световод. *Пояснение:* Угловая апертура – это угол между крайними лучами конического светового пучка на входе (выходе из) оптической системы.

1-2) [O2, 1.22] Светочувствительный элемент (плёнка или матрица) в фотоаппарате установлен в такое положение, что резким выходит изображение предмета, находящегося на расстоянии  $l = 5$  м. До какого диаметра  $D$  нужно задиафрагмировать объектив с фокусным расстоянием  $f = 20$  см, чтобы не было заметной нерезкости в изображении предметов, находящихся на  $\Delta l = 0.5$  м ближе снимаемого? Считайте, что нерезкость незаметна, если размытость деталей не превышает  $d = 0.1$  мм.

1-3) [O2, 1.41] Микроскоп имеет объектив с фокусным расстоянием  $f_1 = 1$  см и окуляр с фокусным расстоянием  $f_2 = 3$  см. Расстояние между объективом и окуляром  $d = 20$  см. На каком расстоянии  $l$  от объектива должен находиться объект, чтобы его изображение полу-

чилося на расстоянии  $D = 25$  см от глаза? Каким будет линейное увеличение микроскопа  $\alpha$ ?

1-4)\* [O2, 1.37] Галилеева труба 9-кратного увеличения имеет длину  $l = 40$  см. После того как объектив и окуляр трубы заменили собирающими линзами, труба стала давать то же увеличение. Определите фокусные расстояния  $f'_1$  и  $f'_2$  этих линз, а также фокусные расстояния  $f_1$  и  $f_2$  объектива и окуляра галилеевой трубы.

### Задание по теме 2. Основы фотометрии.

2-1) [И, 4.7] Над центром круглого стола радиусом  $R = 1.0$  м подвешен небольшой светильник в виде плоского горизонтального диска площадью  $S = 100$  см<sup>2</sup>. Яркость светильника не зависит от направления и равна  $B = 1.6 \cdot 10^4$  кд/м<sup>2</sup>. На какой высоте  $h$  от поверхности стола нужно подвесить светильник, чтобы освещённость крайних точек стола была максимальной? Найдите эту освещённость  $E_m$ .

2-2) [O2, 1.49] Какую освещённость  $E$  следует создать на белом листе бумаги с коэффициентом отражения  $k = 0.85$ , чтобы его яркость была  $B = 3 \cdot 10^4$  кд/м<sup>2</sup>? Считайте, что бумага рассеивает свет по закону Ламберта.

2-3) [O2, 1.57] Найдите яркость изображения Луны, наблюдаемой в телескоп с объективом диаметром  $D = 75$  мм, при увеличениях: (1) 20-кратном; (2) 25-кратном; (3) 50-кратном. Яркость Луны, видимой невооружённым глазом, примите за единицу. Диаметр зрачка глаза считайте равным  $d = 3$  мм.

2-4)\* [O2, 1.52] Найдите освещённость поверхности Земли у экватора светом, отражённым Луной в полночь в полнолуние. Примите, что Солнце представляет собой ламбертовский источник, а Луна – ламбертовский отражатель. Яркость Солнца  $B_C = 1.5 \cdot 10^9$  кд/м<sup>2</sup>, радиус Солнца  $R_C = 7 \cdot 10^8$  м, расстояние от Солнца до Земли (и до Луны)  $L_0 = 1.5 \cdot 10^{11}$  м, расстояние от Луны до Земли  $L_1 = 3.8 \cdot 10^8$  м, радиус Луны  $R_1 = 1.7 \cdot 10^6$  м. Коэффициент отражения лунной поверхности  $k = 0.07$  (7%).

### Задание по теме 3. Интерференция монохроматических волн.

3-1) [O2, 3.10] Свет от двух точечных когерентных источников  $S_1$  и  $S_2$  формирует систему интерференционных полос на экране  $AB$ ,

удалённом от источников на расстояние  $a = 2$  м (схема представлена на рис. 9). Во сколько раз изменится ширина интерференционных полос, если между источниками и экраном поместить собирающую линзу с фокусным расстоянием  $f = 25$  см? Рассмотрите два случая: (1) расстояние линзы от источников  $2f$ ; (2) источники находятся в фокальной плоскости линзы.

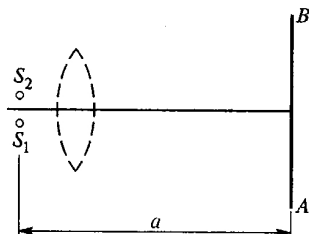


Рис. 9: к задаче [O2, 3.10]

3-2) [O2, 3.20] Две одинаковые антенны, расположенные вдоль экватора Земли на расстоянии  $L = 200$  м друг от друга, принимают радиоизлучение с длиной волны  $\lambda = 1$  м от далёкого точечного космического источника, находящегося в плоскости экватора. На входной контур приёмника подаётся сумма сигналов, приходящих от обеих антенн по кабелям одинаковой длины. Как меняется во времени амплитуда напряжения  $U_0$  на входном контуре приёмника в результате вращения Земли?

3-3) [И, 4.97] Плоско-выпуклая стеклянная линза с радиусом кривизны  $R = 40$  см соприкасается выпуклой поверхностью со стеклянной пластинкой. При этом в отражённом свете радиус некоторого интерференционного кольца  $r = 2.5$  мм. Наблюдая за этим кольцом, линзу осторожно отодвинули от пластинки на  $h = 5.0$  мкм. Каким стал радиус кольца?

3-4)\* [O2, 3.35] В интерферометр Майкельсона попадает свет лазера, круговая частота которого меняется во времени по линейному закону  $\omega = \omega_0(1 + \alpha t)$ , где  $\lambda_0 = 1$  мкм,  $\alpha = 0.1$  с<sup>-1</sup>. Разность хода в плечах интерферометра  $L = 1$  м. Найдите частоту  $\nu$  (Гц) изменения тока фотоприёмника, регистрирующего интерференционную картину.

**Задание по теме 4. Временная когерентность и интерференция волн.**

4-1) [И, 4.95] Свет с длиной волны  $\lambda = 550$  нм падает нормаль-

но на тонкую клиновидную стеклянную пластинку. Показатель преломления стекла  $n = 1.5$ . В свете, отражённом от пластинки, наблюдаются интерференционные полосы. Расстояние между соседними тёмными полосами  $\Delta x = 0.21$  мм. Найдите угол  $\alpha$  между гранями клиновидной пластинки. При какой степени немонахроматичности света  $\Delta\lambda/\lambda$  исчезновение интерференционных полос будет наблюдаться на расстоянии  $l = 1.5$  см от тонкого края пластинки (от вершины клина)?

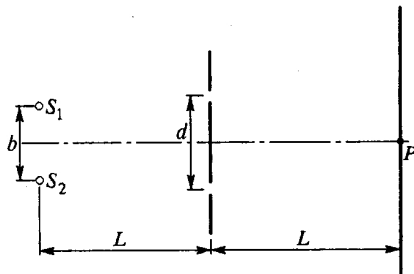


Рис. 10: к задаче [O2, 4.6]

4-2) [O2, 4.6] Свет от двух одинаковых когерентных немонахроматических ( $\lambda = 500$  нм,  $\Delta\lambda = 50$  нм) точечных источников  $S_1$  и  $S_2$  падает на непрозрачный экран с двумя отверстиями, расстояние между которыми  $d = 1$  см (схема представлена на рис. 10). Интерференция света, прошедшего через отверстия, наблюдается вблизи точки  $P$ , лежащей на оси системы. Источники и точка наблюдения находятся на одинаковом расстоянии  $L = 2$  м от экрана. При симметричном удалении источников от оси (т.е. при увеличении расстояния  $b$  между источниками) интерференционная картина в окрестности точки  $P$  периодически возникает и исчезает. Оцените число периодов восстановления интерференционной картины при увеличении расстояния  $b$  от нуля до  $d$  ( $0 \leq b \leq d$ ).

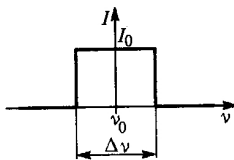


Рис. 11: к задаче [O2, 4.11]

4-3) [O2, 4.11] Найдите видность  $V$  интерференционной картины от двух точечных когерентных источников, спектр излучения которых одинаков. Этот спектр изображён на рис. 11. Как зависит

видность  $V$  от ширины спектра  $\Delta\nu$ ?

4-4)\* [O2, 4.7] Фотоприёмник, расположенный на высоте  $h = 1$  см над отражающей плоскостью, регистрирует свет от далёкого точечного источника света (например, от звезды). Угол между направлением на источник и плоскостью есть  $\alpha$  (схема представлена на рис. 12). В фотоприёмник попадает как свет, непосредственно исходящий от источника, так и свет источника, отразившийся от плоскости. При изменении угла  $\alpha$  фотоприёмник регистрирует изменение интенсивности попадающего в него света. Оцените максимальный угол  $\alpha$ , при котором ещё заметны изменения фототока, если перед фотоприёмником установлен светофильтр с полосой пропускания  $\Delta\nu = 3 \cdot 10^{11}$  Гц.

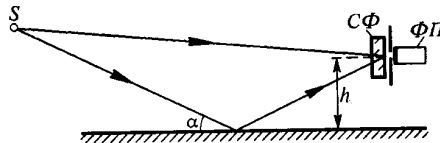


Рис. 12: к задаче [O2, 4.7]

4-5)\* [O2, 4.13] Два пучка белого света от одного источника приходят в точку наблюдения  $P$  с разностью хода  $\Delta$  (схема представлена на рис. 13а). С помощью спектроскопа высокой разрешающей способности в точке  $P$  исследуется зависимость энергии колебаний от частоты. Наблюдаемые чередующиеся максимумы и минимумы спектральной интенсивности  $I(\nu)$  представлены на рис. 13б. Интервал между соседними максимумами  $\Delta\nu = 10$  МГц. Найдите разность хода  $\Delta$ .

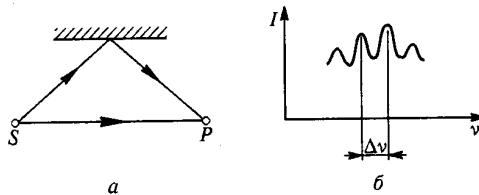


Рис. 13: к задаче [O2, 4.13]

**Задание по теме 5. Пространственная когерентность и интерференция волн.**

5-1) [O2, 5.1\*] В интерференционном опыте Юнга используется протяжённый источник света. Размер источника света  $b$ , расстояние от источника до экрана с двумя щелями  $L$ , расстояние между

щелями  $d$ . Средняя длина волны  $\lambda = 500$  нм. Найдите видность  $V$  интерференционной картины.

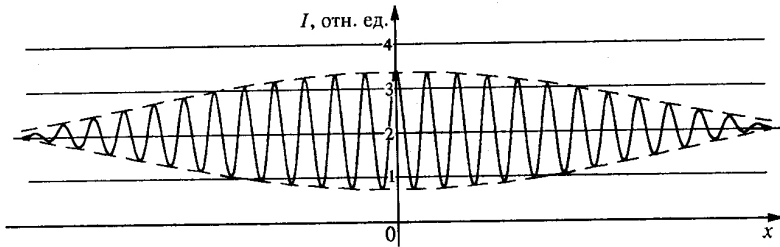


Рис. 14: к задаче [O2, 5.15\*]

5-2) [O2, 5.15\*] На рис. 14 изображена интерференционная картина, полученная при наложении двух пучков света одинаковой интенсивности в опыте Юнга. Апертура интерференции  $\Omega = 10^{-3}$  рад. Средняя длина волны света  $\lambda = 500$  нм. Оцените линейный размер  $b$  источника и его некогерентность  $\Delta\lambda$ . *Пояснение:* Апертура интерференции – это угол между лучами, исходящими от источника к двум щелям интерферометра.

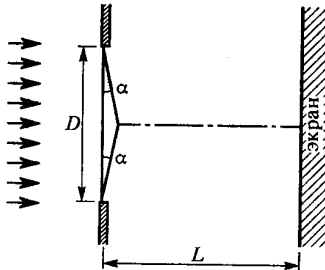


Рис. 15: к задаче [O2, 5.19]

5-3) [O2, 5.19] Свет от удалённого источника (практически параллельные лучи) с длиной волны  $\lambda = 500$  нм падает нормально на плоскую грань бипризмы с малыми углами  $\alpha = 10^{-2}$  рад при острых вершинах, проходит через бипризму и формирует интерференционную картину на экране, расположенном на расстоянии  $L$  от бипризмы (схема представлена на рис. 15). Вследствие малости угла  $\alpha$  интерферирующие лучи, падающие на экран, приблизительно перпендикулярны ему. Ширина стеклянной бипризмы, встроенной в непрозрачный экран, равна  $D = 2$  см; показатель преломления стекла  $n = 1.5$ . Найдите: (1) расстояние  $L$ , при котором наблюдает-

ся максимальное число интерференционных полос; (2) допустимую некогерентность  $\Delta\lambda$  света, позволяющую наблюдать все полосы; (3) допустимый угловой размер  $\psi$  источника, позволяющий наблюдать все полосы.

5-4)\* [O2, 5.9] На воздушном клине между двумя стеклянными пластинками с малым углом при вершине можно наблюдать интерференционные полосы равной толщины. Клинок освещается рассеянным светом. Наблюдение в отражённом свете ведётся невооружённым глазом с расстояния наилучшего зрения  $L = 25$  см в направлении, перпендикулярном поверхности клина. При этом глаз может смещаться в направлении, перпендикулярном ребру клина. Оцените максимальное число полос  $N$ , которое может видеть глаз в монохроматическом свете при таком способе наблюдения, если диаметр зрачка глаза  $d = 5$  мм. Оцените степень монохроматичности света, необходимую для того, чтобы такое максимальное число полос могло наблюдаться.

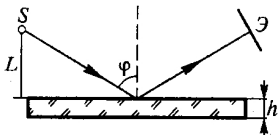


Рис. 16: к задаче [O2, 5.12]

5-5)\* [O2, 5.12] Свет с длиной волны  $\lambda = 560$  нм, исходящий от небольшого источника, падает на тонкую слюдяную пластинку толщиной  $h = 0.1$  мм, отражается от её поверхностей и формирует на экране интерференционные полосы (схема представлена на рис. 16). Показатель преломления слюды  $n = 1.4$ . Угол падения и отражения лучей (угол между лучами и нормалью к пластинке) равен  $\varphi = 60^\circ$ . Источник света и экран находятся на расстоянии  $L = 1$  м от пластинки; экран ориентирован перпендикулярно лучам, отражённым от пластинки. Найдите порядок  $m$  интерференционной полосы в центре наблюдаемой интерференционной картины и ширину  $\Delta l$  интерференционных полос. Оцените допустимый размер  $b$  и допустимую монохроматичность  $\Delta\lambda$  источника.

**Задание по теме 6. Дифракция Френеля.**

6-1) [O2, 6.17] Радиоизлучение с длиной волны  $\lambda = 3$  см падает нормально на диск, изготовленный из диэлектрика с показателем преломления  $n = 1.5$ . Диаметр диска  $D = 20$  см. При какой толщине диска  $h$  и на каком расстоянии  $b$  от диска вдоль его оси будет

наблюдаться максимальная интенсивность излучения? Отражением излучения от диска пренебрегите.

6-2) [O2, 6.25] Точечный источник света с двумя монохроматическими линиями  $\lambda_1 = 660$  нм и  $\lambda_2 = 440$  нм одинаковой интенсивности расположен на расстоянии  $L = 1$  м от экрана. Перед экраном на расстоянии  $a = 0.2$  м от него расположен прозрачный диск диаметром  $D = 0.92$  мм, вносящий фазовую задержку  $\pi$  в волны, соответствующие обеим линиям. Источник света, центры диска и экрана лежат на одной прямой. Найдите отношение интенсивностей света  $J_1/J_2$  в центре экрана при наличии ( $J_1$ ) и в отсутствие ( $J_2$ ) прозрачного диска.

6-3) [O2, 6.33] Точечный источник и точка наблюдения  $P$  расположены на оси круглого отверстия в непрозрачном экране по разные стороны от экрана на одинаковом расстоянии  $L$  от центра отверстия. Отверстие оставляет открытой только одну зону Френеля для данного источника и точки  $P$ ; интенсивность света в точке  $P$  равна  $J_1$ . Далее к отверстию без нарушения осевой симметрии прикладывают тонкую линзу с фокусным расстоянием  $f = L$ . Найдите интенсивность света  $J_2$  в точке  $P$ .

6-4)\* [O2, 6.31] Перед тонкой линзой с оптической силой  $D = 2.5$  дптр расположен непрозрачный экран с круглым отверстием; радиус отверстия равен  $r = 1.1$  мм. На экран параллельно оптической оси падает свет с длиной волны  $\lambda = 550$  нм. Интенсивность света в фокусе линзы (точке  $P$ ) равна  $J_1$ . Далее линзу убирают. Найдите интенсивность света  $J_2$  в той же точке  $P$ .

6-5)\* [O2, 6.44] Зонная пластинка с радиусом первой зоны Френеля  $r_1 = 0.5$  мм помещена перед отверстием в экране диаметром  $D = 1$  см. Пластинка освещается параллельным монохроматическим пучком света с длиной волны  $\lambda = 500$  нм и интенсивностью  $J_0$ . Найдите интенсивность  $J$  волны в фокусе пластинки. Оцените размер пятна  $b$  в фокальной плоскости.

## ЗАДАНИЕ 2

**Задание по теме 7. Дифракция Фраунгофера.**

7-1) [O2, 7.10] С самолёта, летящего на высоте  $H = 5$  км, производится аэрофотосъёмка местности. Какими следует выбрать фокусное расстояние  $f$  и диаметр объектива  $D$  фотоаппарата, чтобы сфотографировать объекты размером  $l \simeq 2.5$  см на фотоплёнку



(или светочувствительную матрицу) с разрешающей способностью  $n = 500$  штрих/мм? На какое время  $\tau$  следует открывать затвор фотоаппарата (во время экспозиции), чтобы движение самолёта со скоростью  $V = 360$  км/час не приводило к размытию изображения?

7-2) [O2, 7.16] Камера-обскура длиной  $L = 10$  см с малым отверстием предназначена для фотографирования удалённых предметов. Оцените диаметр  $D$  отверстия камеры, при котором она имеет наибольшую разрешающую способность. Длина волны  $\lambda = 500$  нм.

7-3) [O2, 7.47] Каково должно быть минимальное расстояние  $b$  между двумя точками на поверхности Марса, чтобы их изображение в телескопе (рефракторе) с диаметром объектива  $D = 60$  см можно было отличить от изображения одной точки? Примите, что Марс наблюдается в момент "великого противостояния", когда расстояние до него от Земли минимально и равно  $L = 56 \cdot 10^6$  км.

7-4)\* [O2, 7.48] Космонавты прибыли на Луну. Чтобы сообщить об этом на Землю, они растягивают на поверхности Луны чёрный круглый тент. Каким должен быть радиус  $r$  этого тента, чтобы его можно было заметить с Земли в телескоп с объективом  $D = 5$  м? Контрастная чувствительность приёмника 0.01 (т.е. приёмник "замечает" уменьшение освещённости изображения, если оно равно или превышает 1%). Расстояние от Земли до Луны  $L \simeq 400$  тыс. км.

7-5)\* [O2, 7.55] При наблюдении в телескоп с нормальным увеличением освещённость изображения звезды на сетчатке глаза в  $\alpha = 10$  раз меньше освещённости дневного неба, рассматриваемого в тот же телескоп. Во сколько раз нужно увеличить диаметр объектива, для того чтобы освещённость изображения звезды на сетчатке стала в  $\beta = 10$  раз больше освещённости изображения неба, если вместе с объективом телескопа заменён и окуляр таким образом, что увеличение телескопа осталось нормальным?

**Задание по теме 8. Разрешающая способность спектральных приборов.**

8-1) [O2, 4.12] Два пучка белого света, полученные от одного точечного источника, сходятся на входные щели оптического спектрального прибора. Разность хода пучков  $\Delta = 300$  м. Оцените разрешающую способность  $R$  спектрального прибора, с помощью которого может быть обнаружена интерференция этих пучков.

8-2) [O2, 8.36] Какова ширина спектральной линии атома водорода ( $\lambda = 656.3$  нм) на экране спектрографа, если в нём использована

дифракционная решётка шириной  $l = 3$  см и объектив с фокусным расстоянием  $f = 15$  см? *Пояснение:* Свет от удалённого источника проходит сначала через дифракционную решётку, потом – через объектив спектрографа и попадает на экран, расположенный в фокальной плоскости объектива.

8-3) [O2, 8.41] Удалённый протяжённый источник испускает две узкие спектральные линии  $\lambda_1 = 500$  нм и  $\lambda_2 = 500.2$  нм равной интенсивности. Свет от источника падает на дифракционную решётку. Оцените максимальный угловой размер источника  $\psi$  (если смотреть от дифракционной решётки), при котором ещё можно разрешить эти две линии.

8-4)\* [O2, 8.42] Параллельный пучок монохроматического излучения с частотой  $\nu = 10^{15}$  Гц падает нормально на дифракционную решётку с числом штрихов  $N = 1.5 \cdot 10^4$ . Во сколько раз изменится угловая расходимость в 1-м порядке (за дифракционной решёткой), если падающее излучение промодулировать так, чтобы были сформированы короткие импульсы длительностью  $\tau = 10^{-12}$  с?

8-5)\* [O2, 8.80\*] С помощью интерферометра Фабри–Перо исследуется выделенный системой фильтров участок спектра шириной  $\Delta\lambda = 0.2$  нм. Минимальная разность длин волн соседних спектральных линий  $\delta\lambda = 0.001$  нм. Оцените максимальное значение коэффициента пропускания  $\tau = 1 - \rho$  (где  $\rho$  – коэффициент отражения зеркал по энергии), при котором разрешаются соседние линии.

**Задание по теме 9. Принципы фурье-оптики.**

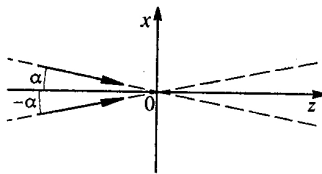


Рис. 17: к задаче [O2, 9.1]

9-1) [O2, 9.1] Три плоские монохроматические волны с длиной  $\lambda$  с амплитудами 1,  $b$  и  $b$  ( $b \ll 1$ ) распространяются в пространстве так, что их волновые векторы лежат в плоскости  $XZ$  и составляют углы  $0$ ,  $\alpha$  и  $-\alpha$  с осью  $Z$  (схема представлена на рис. 17). Волны падают на плоскость  $z = 0$  так, что в точке  $x = 0$  колебания оказываются синфазными. При смещении плоскости наблюдения в область

$z > 0$  происходит периодическое изменение контраста (видности) интерференционной картины. Объясните это явление. При каких положениях плоскости наблюдения видность картины максимальна и минимальна? Чему равны эти максимальная и минимальная видности?

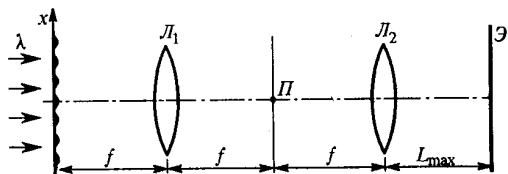


Рис. 18: к задаче [O2, 9.15]

9-2) [O2, 9.15] Метод тёмного поля, использующийся для наблюдения фазовых (прозрачных) объектов, заключается в следующем. Плоская волна с длиной  $\lambda = 0.5$  мкм распространяется вдоль оси  $Z$  и дифрагирует на фазовой (прозрачной) периодической структуре, вытянутой вдоль оси  $X$  (схема представлена на рис. 18). Далее свет проходит через линзу  $L_1$ , проволоку  $\Pi$  (вытянутую вдоль оси  $Y$ ), линзу  $L_2$  и попадает на экран  $\mathcal{E}$ . Расстояния между элементами схемы указаны на рис. 18, где  $f$  – фокусное расстояние обеих линз. Пусть фазовая решётка (прозрачная периодическая структура) создаётся в жидкости стоячей ультразвуковой волной с частотой  $\nu = 20$  МГц. Скорость звука в жидкости  $v = 1.5$  км/сек. Найдите расстояние  $\Delta l$  между интерференционными полосами на экране, если расстояние между линзой  $L_2$  и экраном равно  $L$ . Найдите также максимально допустимое удаление  $L_{max}$  экрана от линзы  $L_2$ , при котором всё ещё возможно наблюдение интерференционной картины при условии, что диаметр меньшей из линз  $L_2$  равен  $D = 4$  см.

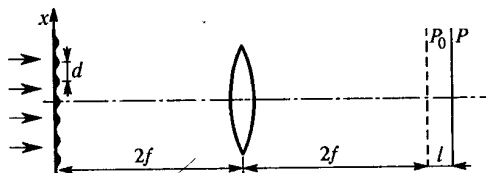


Рис. 19: к задаче [O2, 9.22]

9-3) [O2, 9.22] Один из методов наблюдения фазовых (прозрачных) объектов состоит в том, что плоскость наблюдения  $P$  смещается на некоторое расстояние  $l$  относительно плоскости  $P_0$ , сопряжённой с объектом, т.е. плоскости, в которой в соответствии с гео-

метрической оптикой располагается его изображение (схема представлена на рис. 19). При этом контрастность наблюдаемой картины периодически изменяется с ростом  $l$ . Найдите период  $d$  фазовой синусоидальной решётки, если в схеме, представленной на рис. 19, её контрастное изображение в первый раз возникло при  $l = \Delta L$ ? При каких других значениях  $l$  изображение будет контрастным? Длина волны падающего света  $\lambda$ .

9-4)\* [O2, 9.13] Плоская волна с длиной  $\lambda$  распространяется вдоль оси  $Z$  и дифрагирует на двух последовательно расположенных синусоидальных решётках, перпендикулярных оси  $Z$ . Амплитудные коэффициенты пропускания решёток  $\tau_1(x) = \tau_2(x) = (1 + \cos \Omega x)/2$ . При движении второй (по ходу оси  $Z$ ) решётки со скоростью  $v$  вдоль оси  $Z$  (схема представлена на рис. 20) интенсивность нулевого дифракционного максимума периодически меняется. Найдите частоту  $\omega_0$  этих изменений, а также отношение максимальной и минимальной интенсивностей.

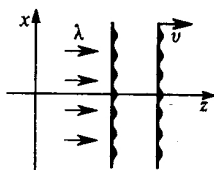


Рис. 20: к задаче [O2, 9.13]

9-5)\* [O2, 9.28] Две последовательно расположенные вплотную друг к другу решётки с функциями пропускания  $\tau_1(x) = (1 + \cos \Omega x)/2$  и  $\tau_2(x) = e^{im \cos \Omega x}$ ,  $m \ll 1$ , освещаются плоской нормально падающей монохроматической волной. Как изменится отношение интенсивностей волн, дифрагировавших в  $\pm 1$ -е порядки дифракции, если сдвинуть первую решётку вдоль оси  $X$  на четверть периода? Найдите разность фаз колебаний поля в  $\pm 1$ -х порядках дифракции.

### Задание по теме 10. Голография.

10-1) [O2, 9.34] Голограмма записана на пластинке радиусом  $r = 5$  см. Она освещается плоской монохроматической ( $\lambda = 0.5$  мкм) световой волной. Мнимое изображение формируется на расстоянии

$L = 1$  м от голограммы. Найдите допустимую некогерентность света  $\Delta\lambda$ , при которой ещё полностью используется теоретическая разрешающая способность голограммы.

10-2) [O2, 9.36] Создано голографическое изображение небольшого предмета на фотопластинке, расположенной на расстоянии  $L = 1$  м от него, с использованием излучения He–Ne лазера с длиной волны  $\lambda \simeq 630$  нм. Изображение восстанавливается с помощью протяжённого квазимонохроматического источника с угловым размером (если смотреть от голограммы)  $\alpha = 10^{-4}$  рад. Оцените минимальный размер  $b_{min}$  деталей в восстановленном изображении и допустимую для восстановления этих деталей некогерентность света  $\Delta\lambda$ .

10-3) [O2, 9.37] Создано голографическое изображение небольшого предмета на фотопластинке, расположенной на расстоянии  $L = 1$  м от него, с использованием излучения He–Ne лазера с длиной волны  $\lambda \simeq 630$  нм. Изображение восстанавливается с помощью квазимонохроматического света. Оцените минимальный размер  $d_{min}$  деталей в восстановленном изображении, если некогерентность света равна  $\Delta\lambda = 0.9$  нм. Каким должен быть необходимый для восстановления этих деталей размер (диаметр)  $D$  голограммы?

10-4)\* [O2, 9.33] Фотопластинка расположена в плоскости  $XU$ . Монохроматический свет точечного источника  $A$ , расположенного в точке  $(0, 0, -L)$ , интерферирует с когерентной плоской волной, в результате чего на фотопластинке формируется голографическое изображение точечного источника. Направление распространения плоской волны, лежащее в плоскости  $XZ$ , составляет угол  $\theta$  с осью  $Z$ . Считая, что прозрачность голограммы пропорциональна интенсивности света при записи, найдите амплитудный коэффициент пропускания  $\tau(\rho, x)$ , где  $\rho$  – расстояние от точки голограммы до начала отсчёта  $O$ , а  $x$  – координата  $X$  точки голограммы. Для просмотра изображения голограмма просвечивается нормально падающей плоской монохроматической волной. Где при этом расположены прямое и мнимое изображения? Оцените минимальный размер  $a_{min}$  голограммы, при котором полностью используется разрешающая способность фотоэмульсии, равная  $n$  линий/мм. Найдите размер  $b$  восстановленного изображения источника света.

10-5)\* [O2, 9.38] Точечный объект движется параллельно фотопластинке, на которую записывается его голограмма. Оцените скорость  $v$  объекта, при которой голограмма будет иметь максимальное

число колец. Объект и фотопластинка освещаются плоской волной с длиной  $\lambda = 0.5$  мкм, нормальной к плоскости фотопластинки. Размер фотопластинки  $D = 0.1$  м, расстояние между объектом и фотопластинкой  $L = 1$  м, время экспозиции  $\tau = 0.01$  с. Найдите также разрешающую способность голограммы  $\Delta l$  в направлении движения объекта.

**Задание по теме 11. Дисперсия. Поляризация света. Элементы кристаллооптики.**

11-1) [O2, 10.15] Концентрация электронов в некоторой области фотосферы Солнца равна  $N = 2 \cdot 10^8$  см<sup>-3</sup>. Могут ли радиоволны из этой области достигнуть Земли, если длина волны (в вакууме) равна: (1)  $\lambda = 1$  м, (2)  $\lambda = 10$  м, (3)  $\lambda = 50$  м?

11-2) [O2, 10.16] В ионосфере Земли (плотность свободных электронов  $N$ ) распространяется электромагнитная волна с длиной  $\lambda$  (в ионосфере). Выразите фазовую  $v_1$  и групповую  $v_2$  скорости этой волны через  $\lambda$ .

11-3) [O2, 11.1] На пластинку кварца, грани которой параллельны оптической оси, падает плоскополяризованный свет. При какой наименьшей толщине  $d$  пластинки свет, прошедший через пластинку, окажется поляризованным по кругу? Длина волны света  $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$  см, обыкновенный и необыкновенный показатели преломления кварца  $n_o = 1.5442$  и  $n_e = 1.5533$ .

11-4) [O2, 11.17] Параллельный пучок монохроматического света с длиной волны  $\lambda$ , поляризованный по правому кругу, падает нормально на пластинку в полволны. Найдите состояние поляризации света, прошедшего через эту пластинку.

11-5) [O2, 11.60] Показатель преломления кристаллического кварца для длины волны  $\lambda = 589$  нм равен  $n_o = 1.544$  для обыкновенного луча и  $n_e = 1.533$  для необыкновенного луча. На пластинку из кварца, вырезанную параллельно оптической оси, нормально падает линейно поляризованный свет указанной длины волны, занимающий спектральный интервал  $\Delta\lambda = 40$  нм. Найдите толщину пластинки  $d$  и направление поляризации падающего света, если известно, что свет после прохождения пластинки оказался неполяризованным.

11-6)\* [O2, 11.54] Параллельный пучок естественного света интенсивностью  $J_0$  с длиной волны  $\lambda$  проходит через систему из двух скрещенных поляроидов  $P_1$  и  $P_2$ , между которыми находится клин

$K$  из кварца с малым преломляющим углом  $\alpha$  (схема представлена на рис. 21). Показатели преломления кварца  $n_e$  и  $n_o$ . Оптическая ось клина параллельна его ребру и составляет угол  $45^\circ$  с разрешёнными направлениями поляроидов. Пройдя через систему, свет падает на экран  $\mathcal{E}$ . Найдите распределение интенсивности света  $J(x)$  на экране. Что увидит наблюдатель на экране, если между экраном и поляридом  $P_2$  расположить линзу так, чтобы экран оказался в её фокальной плоскости?

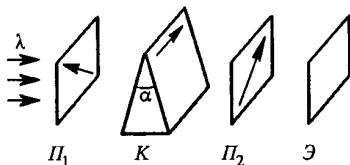


Рис. 21: к задаче [O2, 11.54]