



Московский физико-технический институт
(государственный университет)

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

КВАЗИОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ

МОСКВА 2003

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Московский физико-технический институт
(государственный университет)

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

КВАЗИОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением
Московского физико-технического института
(государственного университета)
в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений
по направлению "Прикладные математика и физика"*

МОСКВА 2003

А в т о р ы:

Волков А.А., Глушков В.В., Горшунов Б.П., Демишев С.В.,
Козлов Г.В., Ритус А.И., Случанко Н.Е.

Р е ц е н з е н т

Доктор физико-математических наук, профессор К.А. Воротилов

Л12 **Лабораторный практикум. Квазиоптические измерения на миллиметровых волнах: Учебное пособие /**
Волков А.А., Глушков В.В., Горшунов Б.П., Демишев С.В.,
Козлов Г.В., Ритус А.И., Случанко Н.Е. — М.: МФТИ,
2003. — 86 с.

Включены описания работ, задачи и контрольные вопросы лабораторного практикума шестого семестра 3-го курса факультета проблем физики и энергетики МФТИ. В практикуме предусматривается выполнение исследований оптических явлений и свойств веществ в миллиметровом диапазоне длин волн с использованием приборов и устройств современного автоматизированного лабораторного комплекса «Оптик».

Для студентов физических специальностей, изучающих оптику в курсе общей физики.

УДК 537.87:621.371.029.65
537.958

© Московский физико-технический институт
(государственный университет), 2003

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
I. ВВЕДЕНИЕ	6
II. ОПИСАНИЕ ПРИБОРОВ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА	10
1. Генератор электромагнитных волн миллиметрового диапазона	10
2. Пирозлектрический приемник	11
3. Интерферометр Фабри–Перо миллиметрового диапазона длин волн	13
4. Преобразователь поляризации	15
5. Дифракционная решетка	17
6. Приборы для измерения углового распределения дифрагирующего излучения	17
6.1. Универсальный измеритель	17
6.2. Гониометр	19
7. Пластина переменной толщины	19
8. Плеченный аттенуатор миллиметрового излучения	20
9. Поглощающая диафрагма	21
10. Поглощающий экран	22
11. Оправа для сеток	23
12. Держатель образцов	25
13. Электронный блок	26
14. Исследуемые образцы	28
III. УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ	29
IV. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ	31
Работа № 1. ИНТЕРФЕРОМЕТР ФАБРИ–ПЕРО	31
1.1. Теория интерферометра Фабри–Перо	31
1.2. Подготовка к проведению эксперимента	36

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебное пособие содержит описание работ лабораторного практикума, разработанного и используемого при обучении студентов на факультете проблем физики и энергетики Московского физико-технического института (государственного университета). Практикум включает набор лабораторных работ по исследованию оптических явлений и свойств веществ в миллиметровом диапазоне длин волн и предусматривает использование приборов и устройств современного автоматизированного лабораторного комплекса «Оптик», являющегося совместной разработкой ведущих специалистов Института общей физики РАН и МФТИ. Проводимая квазиоптическая методика позволяет осуществлять большинство традиционных, а также ряд оригинальных оптических лабораторных экспериментов, включая задачи интерференции/дифракции электромагнитных волн и спектральной конденсированных сред.

Лабораторный практикум предназначен для студентов физических специальностей, изучающих оптику в курсе общей физики.

Работа № 2. ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ТИПА ПОЛЯРИЗАЦИИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	39
2.1. Поляризационные элементы миллиметрового диапазона длин волн	39
Работа № 3. ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА	44
3.1. Теория дифракции на решетке	44
Работа № 4. ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕЛОМЛЕНИЯ ПЛАВЛЕННОГО КВАРЦА НА МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ	49
4.1. Теория метода	49
Работа № 5. ИНТЕРФЕРОМЕТР МАХА-ЦАНДЕРА: ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕЛОМЛЕНИЯ	52
5.1. Описание интерферометра	52
Работа № 6. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФРАКЦИИ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН	57
6.1. Теория дифракции рентгеновских лучей в кристаллах	57
6.2. Экспериментальная установка (модель кристалла, устройство гониометра)	64
Работа № 7. ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ТИТАНАТА СТРОНЦИЯ SrTiO_3 В МИКРОВОЛНОВОЙ ОБЛАСТИ	69
7.1. Сегнетоэлектрики	69
7.2. Описание криостата	71
7.3. Установка для исследования оптических характеристик в миллиметровом диапазоне длин волн	74
7.4. Оптическая схема	74
7.5. Исследование зависимости показателя преломления кристалла SrTiO_3 от температуры	79
V. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОБРАБОТКЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ	82
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	85

I. ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум "Квазиоптические изменения на миллиметровых волнах" предназначен для изучения явлений интерференции и дифракции электромагнитных волн, а также спектроскопии конденсированных сред в миллиметровом диапазоне длин волн.

Особенностью практикума является использование квазиоптических элементов: линз, диафрагм, зеркал, поляризаторов и т. п., позволяющих формировать квазипараллельные пучки в открытом пространстве без использования волноводов. "Квазиоптичность" элементов определяется тем, что хотя их размер L и превышает существенно длину волны излучения λ ($L/\lambda \sim 10 \div 100$), но все же это превышение не столь велико, чтобы пренебречь дифракционными явлениями, как в оптике, где $L/\lambda \sim 10^5 \div 10^6$.

Несмотря на некоторую непараллельность пучков, создаваемых квазиоптическими элементами, и невозможность сфокусировать излучение в "точку", квазиоптическая методика позволяет осуществить большинство традиционных оптических лабораторных экспериментов, включая задачи интерференции, дифракции и спектроскопии. Квазиоптические элементы и пучки позволяют передавать с малыми потерями и расходимостью миллиметровое излучение на расстояния порядка нескольких метров, что вполне достаточно для большинства экспериментальных установок, работающих в миллиметровом диапазоне длин волн. При этом размеры квазиоптических элементов остаются в разумных пределах 10–20 см.

Необходимо отметить, что перенесение оптических элементов в диапазон длин волн имеет важное преимущество, поскольку это существенно облегчает юстировку оптических схем и не требует использования точной механики. Поэтому работы практикума позволяют студентам приобрести

"чувство оптического эксперимента" и "потрогать руками" сложные оптические явления, не опасаясь перекрутить винт тонкой регулировки на пол-оборота. Кроме того, при изучении практикума студенты приобретают навыки настройки оптических схем в диапазоне длин волн недоступных человеческому глазу.

В курсе общей физики существенное место отводится изучению шкалы электромагнитных волн, причем акцентируется единая природа различных электромагнитных излучений — от рентгеновского до радиоволн. Практикум "Квазиоптические измерения на миллиметровых волнах" материализует этот теоретический принцип, поскольку, несмотря на изменение длины волны в 1000 раз и более, оказывается возможным наблюдать те же оптические явления и реализовать те же оптические эксперименты, что и в видимом диапазоне. Поэтому данный практикум может рассматриваться как полезное дополнение к стандартным лабораторным работам при изучении курса оптики.

Вместе с тем переход к миллиметровому диапазону длин волн не сводится только к масштабированию оптических экспериментов и представляет самостоятельный интерес. Во-первых, миллиметровый диапазон длин волн позволяет легко моделировать такие сложные задачи, как дифракция рентгеновских лучей в кристаллах. При этом студенты получают возможность изучать основные принципы рентгеноструктурного анализа, не прибегая к сложным установкам повышенной опасности и не расходуя время на обработку фотоматериалов и фотометрирование.

Во-вторых, миллиметровый диапазон длин волн представляет собой исключительный интерес для физики конденсированного состояния и молекулярной физики. В этот диапазон попадают характерные частоты вращательных движений молекул газов и паров, колебаний атомов в ионных и молекулярных кристаллах. К этой же области частот относятся характерные энергии электронных переходов и

фазовых переходов в сегнетоэлектриках, магнетиках и сверхпроводниках. Поэтому ряд задач практикума ориентирован на измерение характеристик твердых тел в миллиметровом диапазоне длин волн.

В-третьих, миллиметровый диапазон длин волн является важным не только для фундаментальных задач спектроскопии, но и для ряда прикладных задач. В частности, весьма перспективным является применение миллиметровых волн в радиолокации, космической связи, в задачах контроля технологических процессов и мониторинга окружающей среды. Современный физик или инженер, работающий в этой области, должен хорошо владеть основными закономерностями явлений и методами работы в данном диапазоне длин волн, в том числе и квазиоптическими методами.

Следует подчеркнуть, что в области фундаментальной и прикладной физики микроволн, и в том числе в физике волн миллиметрового диапазона, российская наука занимала и продолжает занимать лидирующие позиции. Практикум "Квазиоптические измерения на миллиметровых волнах" не имеет зарубежных аналогов и опирается на самые современные отечественные технологии.

При выполнении задач практикума необходимо внимательно изучить методическую сторону лабораторной работы, в том числе ознакомиться с описанием приборов и устройств практикума, вынесенного в специальный раздел. Необходимо тщательно соблюдать рекомендации по технике безопасности, являющиеся залогом длительной и успешной карьеры физика-экспериментатора и продлевающие жизнь лабораторного оборудования. Следует иметь в виду, что теоретические сведения в описании задач носят «минимально необходимый» характер и не охватывают всего многообразия явлений, с которыми придется столкнуться студенту-экспериментатору. Для ответов на поставленные вопросы в ряде случаев потребуется самостоятельное изучение рекомендованной и другой специальной литературы. Мы полага-

ем, что самостоятельная попытка осмысления полученных экспериментальных данных является абсолютно необходимым элементом обучения и должна способствовать более глубокому пониманию физики миллиметрового диапазона длин волн.

II. ОПИСАНИЕ ПРИБОРОВ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА

1. Генератор электромагнитных волн миллиметрового диапазона

Источник электромагнитных волн на лавинно-пролетном диоде (рис. 1) генерирует излучение мощностью 5–10 мВт с длиной $\lambda \approx 2$ мм (частота 140 ГГц $\pm 1\%$). Ширина диаграммы направленности на выходе из рупора (рупорной антенны) составляет 20° на уровне половине интенсивности. Поляризация излучения линейная, электрический вектор перпендикулярен широкой стенке волновода, примыкающего к рупору. Излучение монохроматично со спектральной шириной линии не более чем 1 МГц. Рупор расположен на передней части корпуса генератора. На корпусе также расположены светоизлучающий диод, предназначенный для индикации подачи напряжения на генератор, и разъем для соединения с источником питания постоянного тока ($24 \text{ В} \pm 2 \text{ В}/0,25 \text{ А}$). Источник питания входит в состав электрического блока, включающего систему регистрации (см. п. 13 настоящего раздела).

Генератор установлен на стержне рейтера с помощью винта М5; рейтер может перемещаться по рельсам длины 180 мм, (см. рис. 1), на которых расположен другой рейтер с тefлоновой линзой диаметром 50 мм и фокусным расстоянием 60 мм. Конструкция допускает перемещение как вдоль рельса (в пределах 55 мм), так и в поперечном направлении (в пределах 20 мм), что позволяет расположить рупор генератора в фокусе линзы для формирования квазипараллельного пучка излучения на необходимой высоте над плоскостью оптического стола.

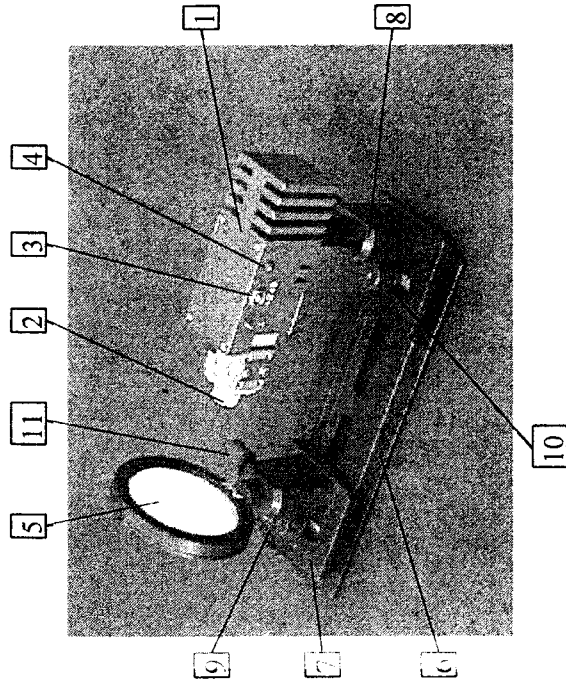


Рис. 1. Генератор с линзой на рельсах. 1 – корпус генератора, 2 – рупор, 3 – разъем, 4 – светоизлучающий диод, 5 – линза, 6 – рельсы, 7, 8 – рейтеры, 9, 10 – фиксирующие гайки, 11 – фиксирующий винт

Для перемещения генератора и линзы в горизонтальном направлении необходимо ослабить фиксирующие гайки, расположенные на квадратном основании рейтера. Для перемещения генератора или линзы в вертикальном направлении следует ослабить фиксирующий винт рейтера, который позволяет менять высоту оптической оси прибора в пределах 25 мм.

Габариты генератора: 100 мм \times 32 мм \times 35 мм.

2. Пирозлектрический приемник

Пирозлектрический приемник (рис. 2) на основе кристалла LiTaO_3 предназначен для регистрации модулированного электромагнитного излучения в области от милли-

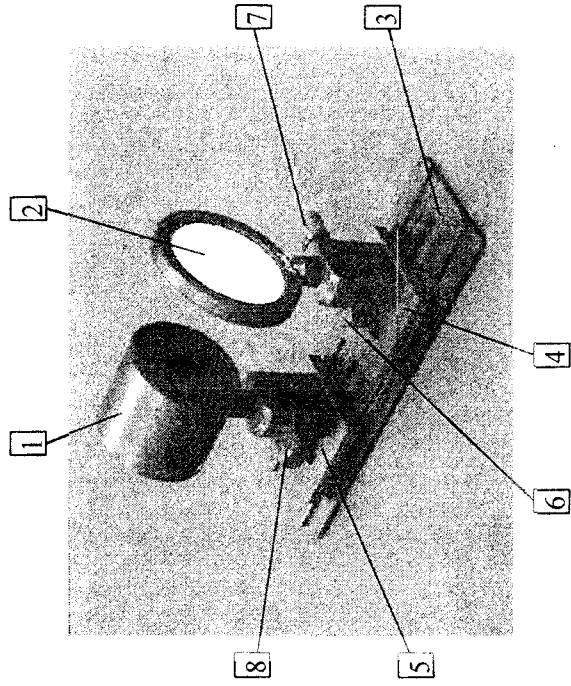


Рис. 2. Пироприемник с линзой на рельсах. 1 — пироприемник; 2 — линза; 3 — рельсы; 4, 5 — рейтеры; 6 — фиксирующая гайка; 7, 8 — фиксирующие винты

метрового диапазона до оптического диапазона. При прямоугольной модуляции мощности излучения с периодом, много меньшим времени тепловой релаксации кристалла ($\sim 0,3$ с), сигнал с приемника имеет пилообразную форму. Амплитуда сигнала пропорциональна интенсивности излучения.

Пирозлектрический кристалл и электронная схема предварительного усилителя расположены в алюминиевом цилиндрическом корпусе диаметром 54 мм и длиной 43 мм (рис. 2), что обеспечивает защиту от электромагнитных помех. Фильтры, вырезающие оптическое излучение, расположены непосредственно перед кристаллом LiTaO_3 . От перепадов атмосферного давления кристалл пироприемника защищен герметичным кварцевым окном. Миллиметровое излучение фокусируется на пирокристалл тефлоновой линзой

(рис. 2). На задней панели расположен разъем для подключения к электронному блоку питания (см. п. 13 данного раздела). Пироприемник устанавливается на стержне рейтера с помощью винта М5; рейтер перемещается по рельсам длиной 180 мм, на которых расположен другой рейтер с тефлоновой линзой диаметра 50 мм и с фокусным расстоянием 60 мм (рис. 2).

Конструкция допускает перемещение как вдоль рельс (в пределах 55 мм), так и в поперечном направлении (в пределах 20 мм), что позволяет расположить пирокристалл в фокусе линзы для получения максимального сигнала.

Для перемещения пироприемника и линзы в горизонтальном направлении необходимо ослабить фиксирующие гайки квадратного основания рейтера. Для перемещения пироприемника или линзы в вертикальном направлении следует ослабить фиксирующий винт на соответствующем рейтере, который позволяет регулировать высоту оптической оси прибора в пределах 25 мм.

3. Интерферометр Фабри–Перо миллиметрового диапазона длин волн

Интерферометр Фабри–Перо (ИФП) (рис. 3) предназначен для измерения длины волны электромагнитного излучения. ИФП состоит из полупрозрачных параллельных сетчатых зеркал, расположенных на расстоянии d друг от друга. Зеркала приклеены к стальным оправкам, которые удерживаются магнитными держателями (рис. 3).

Регулировка параллельности зеркал ИФП производится с помощью трех юстировочных винтов с гайками фиксации, расположенных на одном из держателей (см. рис. 3); существенно, чтобы параллельность зеркал была не хуже, чем 0,02 мм.

Держатель подвижного зеркала перемещается по салазкам, при помощи микрометрического винта, причем расстояние между зеркалами d варьируется в пределах от 0

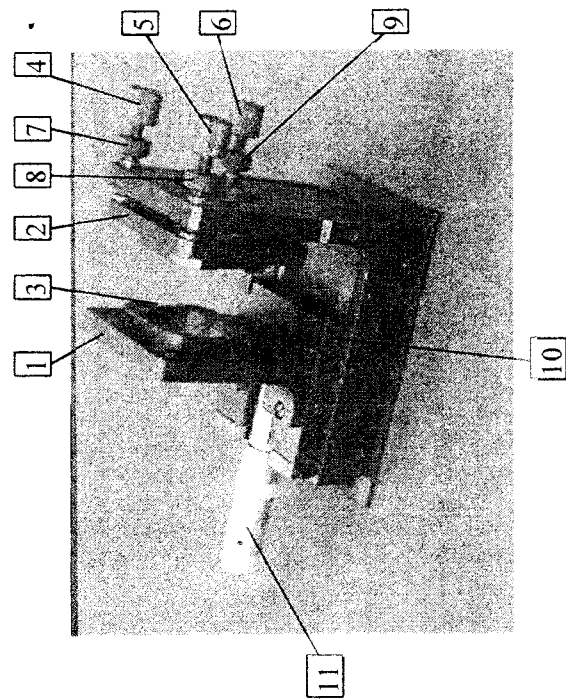


Рис. 3. Интерферометр Фабри-Перо (без зеркала): 1 – подвижный держатель; 2 – неподвижный держатель; 3 – паз с магнитами; 4, 5, 6 – юстировочные винты; 7, 8, 9 – гайки фиксации юстировочных винтов; 10 – салазки; 11 – микрометрический винт

до 12 мм. Отсчет перемещения подвижного зеркала по шкале микрометра производится с точностью 0,01 мм. При хорошей юстировке ИФП точность измерения длины волны составляет порядка 0,005 мм.

Диаметр зеркала интерферометра равен 40 мм, что при используемой длине волны ($\lambda \approx 2$ мм) и расстоянии между зеркалами $d \leq 12$ мм позволяет пренебречь дифракционными потерями. Таким образом, добротность резонатора, образованного двумя зеркалами, определяется в основном коэффициентом отражения зеркала. Контраст ИФП составляет не менее 10.

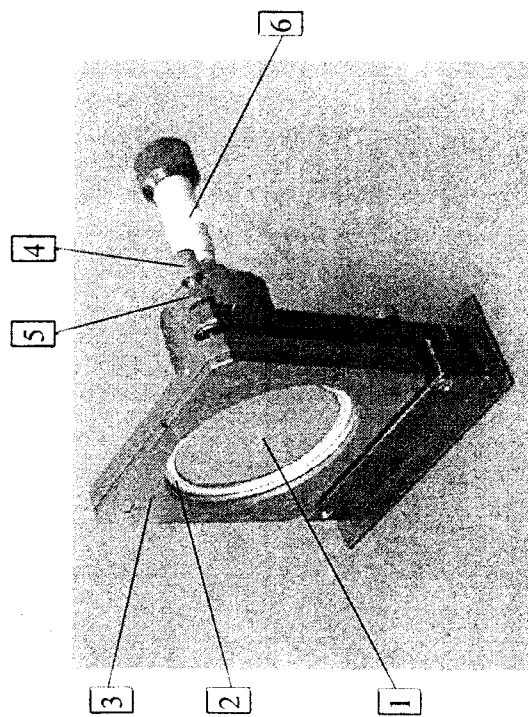


Рис. 4. Преобразователь поляризации. 1 – сплошное металлическое подвижное зеркало, 2 – неподвижное сетчатое зеркало, 3 – держатель сетки, 4 – юстировочный винт, 5 – гайка фиксации юстировочного винта, 6 – микрометрический винт

Для устранения нежелательных отражений держатели зеркал ИФП снабжены кольцевыми вставками из специальной резины, поглощающей электромагнитное излучение в миллиметровом диапазоне длин волн.

Габариты устройства: 215 мм × 90 мм × 135 мм.

4. Преобразователь поляризации

Преобразователь поляризации представляет собой два параллельных зеркала, расположенных на расстоянии d друг от друга, одно из которых, подвижное, – сплошное металлическое, а другое, неподвижное, – сетчатое, проволоки которого вертикальны (рис. 4).

Линейно поляризованное излучение падает на преобразователь поляризации с электрическим вектором E , направленным под углом 45° к проволокам сетки. Составляющая вектора E , параллельная проволокам сетчатого зеркала, отражается в направлении приемника. Перпендикулярная же составляющая проходит сетчатое зеркало, затем отражается от сплошного зеркала и снова проходит сквозь сетку в направлении приемника, преодолев по отношению к первой составляющей дополнительный путь, равный $d/2$. Таким образом, пучок, отраженный преобразователем в направлении к приемнику, состоит из двух волн с взаимно перпендикулярными поляризациями, равными амплитудами и разностью фаз $\Delta\varphi = \frac{2\pi d\sqrt{2}}{\lambda}$. Поэтому, меняя расстояние d и, следова-

тельно, разность фаз $\Delta\varphi$, можно получить любую поляризацию в этом пучке — линейную, эллиптическую или круговую.

Сплошное металлическое зеркало преобразователя поляризации (рис. 4) перемещается при помощи микрометрического винта таким образом, что расстояние между зеркалами может меняться в пределах от 0 до 6 мм. Рабочий диаметр сплошного металлического зеркала составляет 75 мм. Параллельность зеркал должна быть не хуже, чем 0,02 мм. Преобразователь поляризации снабжен юстировочными винтами с гайками фиксации, позволяющими производить в небольших пределах регулировку положения вокруг вертикальной и горизонтальных осей.

Габариты преобразователя поляризации: 180 мм × 120 мм × 160 мм.

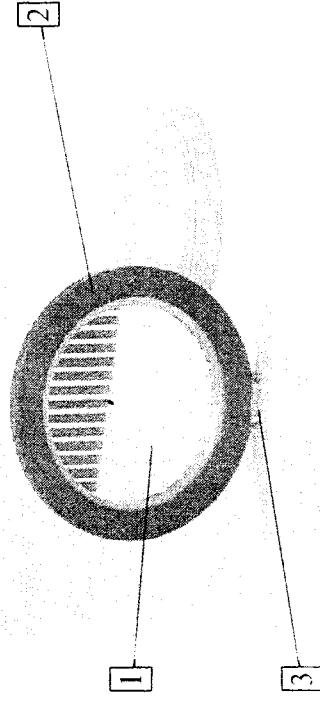


Рис. 5. Дифракционная решетка в сборном виде. 1 — решетка, 2 — рамка, 3 — прозрачная шкала

5. Дифракционная решетка

Дифракционная решетка представляет собой лавсановую пленку с напыленными металлическими полосками, образующими систему щелей с шагом $d = 6$ мм и шириной щели $a = 2$ мм (рис. 2). Пленка приклеена к оправке диаметром 98 мм, которая вставлена в круглую рамку. В нижней части рамки имеются отверстия с резьбой М4 для установки на стержень и прозрачная шкала, штрих которой перпендикулярен плоскости решетки.

6. Приборы для измерения углового распределения дифрагирующего излучения

6.1. Универсальный измеритель

Прибор состоит из круглого основания диаметром 200 мм с лимбом, цена деления которого равна 1° , цилиндрической стойки с втулкой $\varnothing 12,7$ мм, снабженной меньшим лимбом диаметром 60 мм с ценой деления 1° и подвижной

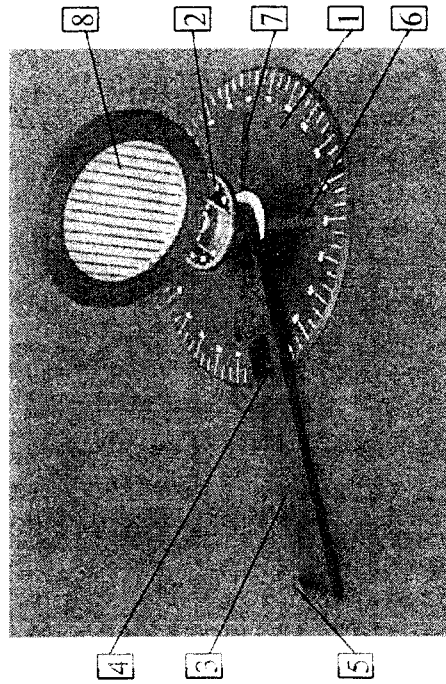


Рис. 6. Прибор для измерения углового распределения дифрагирующего излучения с установленной в нем дифракционной решеткой. 1 – основание с большим лимбом; 2 – маленький лимб на стойке; 3 – направляющая для пироприемника; 4 – указатель угла поворота направляющей; 5 – гайка крепежного болта; 6, 7 – крепежные щели; 8 – дифракционная решетка в собранном виде

направляющей длиной 235 мм, вращающейся вокруг общей оси (рис. 6). В средней части направляющей имеется вырез со стрелкой, указывающей угол поворота по большому лимбу. На свободном конце направляющей сделано отверстие для болта с круглой гайкой, предназначенное для крепления на направляющей рельса с пироприемником и фокусирующей линзой (для этого в рельсе имеется соответствующий паз).

Стержень с дифракционным объектом (например, с дифракционной решеткой) вставляется в отверстие стойки, причем высоту объекта и угол его поворота можно фиксиро-

вать винтом, расположенным в стойке. Основание крепится к оптическому столу с помощью винтов.

6.2. Гониометр

Гониометр имеет вид, аналогичный показанному на рис. 6. Особенностью конструкции гониометра является синхронизация вращения направляющей и дифракционного объекта с помощью специальной зубчатой передачи. Механизм устроен таким образом, что при повороте направляющей на угол φ дифракционный объект поворачивается на угол $\varphi/2$. Гониометр используется в задаче, моделирующей рассеяние рентгеновских лучей в кристаллах.

7. Пластина переменной толщины

Прибор представляет собой плоскопараллельную пластину, образованную двумя взаимодополняющими клиньями из плавленого кварца. Для уменьшения паразитных отражений соприкасающиеся поверхности клиньев матируются. Один из клиньев установлен в неподвижную рамку (см. рис. 7), другой – в рамку, перемещающуюся по салазкам. Положение подвижной рамки изменяется с помощью микрометрического винта с точностью 0,01 мм. При перемещении салазок один из клиньев скользит по поверхности другого, при этом толщина пластины d плавно меняется. Угол клина выбран таким, чтобы при его сдвиге на величину Δx изменение толщины пластины составило $\Delta d = 0,1 \Delta x$. Постоянный прижим одного клина к другому обеспечивается шестью пружинами, расположенными на рамке подвижного клина под гайками регулировки натяжения пружин (рис. 7).

Рабочая апертура пластины переменной толщины составляет 54 мм \times 54 мм, максимальное изменение толщины равно 2 мм.

Габариты прибора: 100 мм \times 170 мм \times 130 мм.

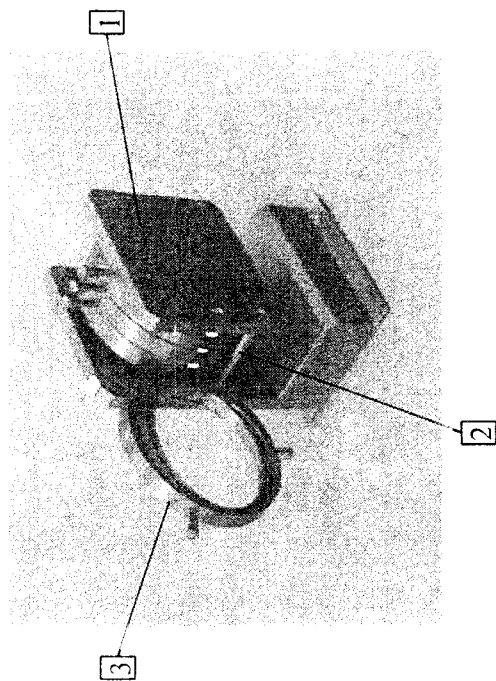


Рис. 8. Пленочный аттенуатор излучения. 1 – магазин аттенуатора, 2 – общая ось крепления рамок с ослабляющими пленками, 3 – пленка в рамке в рабочем положении

Для предотвращения нежелательных резонансных отражений при одновременном использовании нескольких ослабляющих пленок пленки смонтированы таким образом, что их плоскости не параллельны друг другу.

Пленки изготовлены путем напыления металла на лантановую пленку. Ослабление каждой пленки составляет 8 – 10 дБ. Рабочий диаметр пленок равен 60 мм.

Габариты аттенуатора с пленками, вставленными в магазин: 80 мм × 80 мм × 140 мм.

9. Поглощающая диафрагма

Поглощающая диафрагма служит для устранения висосевых пучков излучения. Она изготовлена из металла с покрытием из специальной резины, поглощающей электромагнитное излучение в миллиметровом диапазоне длин волн.

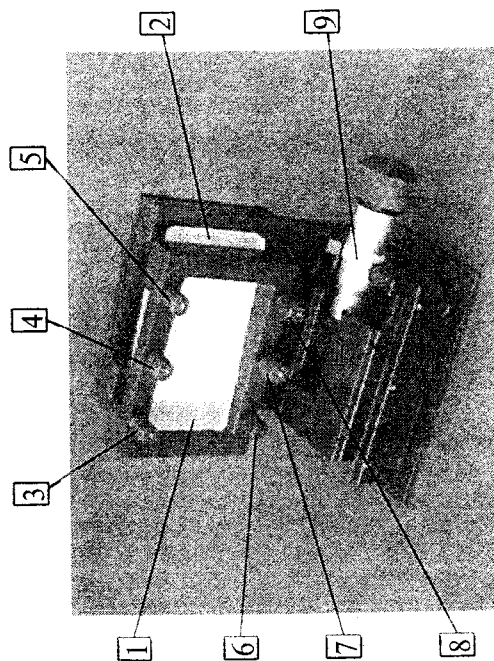


Рис. 7. Пластина переменной толщины. 1 – подвижный клин; 2 – неподвижный клин; 3, 4, 5, 6, 7, 8 – гайки регулировки натяжения пружин; 9 – микрометрический винт

8. Пленочный аттенуатор миллиметрового излучения

Пленочный аттенуатор ослабляет интенсивность излучения, защищая тем самым приемник от перегрузки, а также уменьшает влияние на генератор резонансных приборов, например интерферометра Фабри–Перо.

Аттенуатор рекомендуется помещать в оптический трапек при измерении коэффициента пропускания материала (например, плавленого кварца в пластине переменной толщины) с целью устранения паразитных отражений от поверхности пирокристалла приемника и стоячих волн в области перед приемником.

В магазине аттенуатора (рис. 8) имеются 4 пленки в рамках, закрепленных на общей оси. Поворотом вокруг этой оси пленки выдвигаются в пучок излучения, обеспечивая необходимое ослабление интенсивности на выходе прибора.

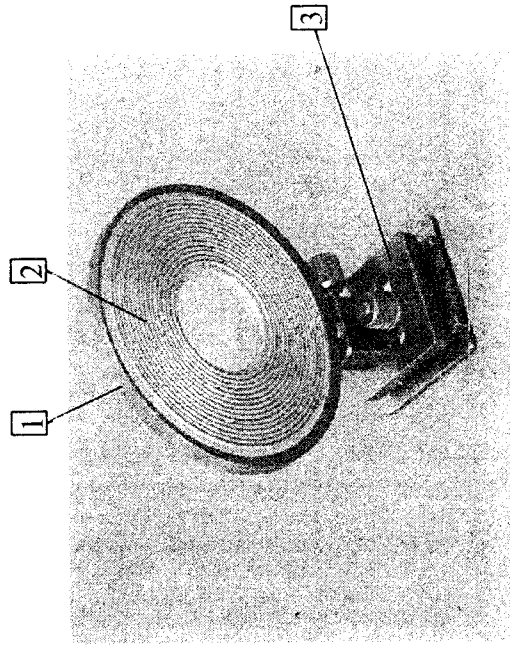


Рис. 9. Поглощающая диафрагма на рейтере. 1 – металлическая апертура, 2 – специальная поглощающая резина, 3 – регулятор

Для подавления прямых слабых отражений от резины диафрагма имеет гофрированную поверхность.

Диафрагма крепится на стержне рейтера с помощью винта М5 (рис. 9).

Рабочая апертура диафрагмы составляет 40 мм, внешний диаметр равен 118 мм.

10. Поглощающий экран

Поглощающий экран используется для перекрытия пучка излучения и практически полного его поглощения.

В качестве экрана используется металлическая пластина с покрытием из специальной резины, поглощающей излучение в миллиметровом диапазоне длин волн. Для уст-

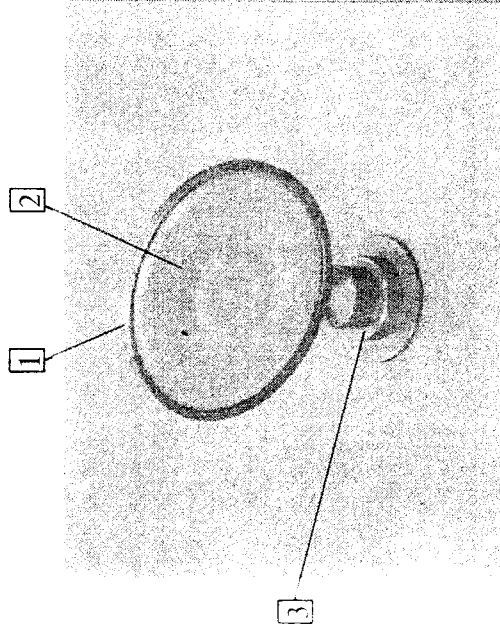


Рис. 10. Поглощающий экран на опоре. 1 – металлический экран, 2 – покрытие из специальной резины, 3 – опора

ранения слабых отражений от резины экран имеет гофрированную поверхность.

Экран крепится на опоре при помощи винта М5 (рис. 10). Диаметр экрана равен 120 мм.

11. Оправа для сеток

Оправа для сеток состоит из держателя сетки, расположенного в квадратной рамке с круговой шкалой, цена деления которой составляет 1°. Квадратная рамка снабжена юстировочными винтами регулировки наклона вокруг вертикальной и горизонтальной осей и ручку поворота держателя сетки на заданный угол (рис. 11).

Для регулировки плоскости квадратной рамки необходимо

- ослабить гайку фиксации юстировочного винта;

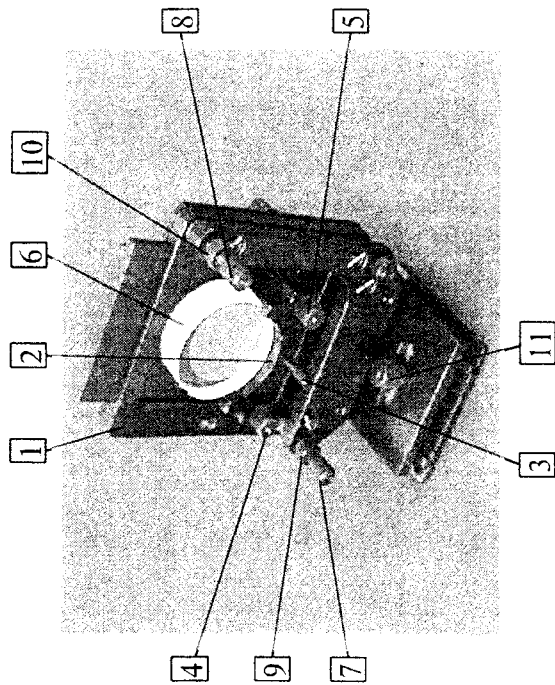


Рис. 12. Держатель образцов для экспериментов на пропускание/отражение. 1 – подвижная пластина с диафрагмой; 2 – крепежный узел; 3 – ручка крепежного узла; 4, 5 – юстировочные гайки; 6 – образец; 7, 8 – юстировочные винты; 9, 10 – гайки фиксации юстировочных винтов; 11 – гайка фиксации рейтера

женную на задней части рамки, контролируя угол поворота по белой риске, расположенной против круговой шкалы.

Рамка предназначена для использования сеток с внешним диаметром 98 мм. Центр рабочей апертуры рамки расположен на высоте 100 мм.

Габариты оправы: 140 мм × 48 мм × 160 мм.

12. Держатель образцов

Держатель образцов состоит из подвижной пластины с диафрагмой и крепежным узлом для установки исследуемых образцов. Держатель снабжен юстировочной систе-

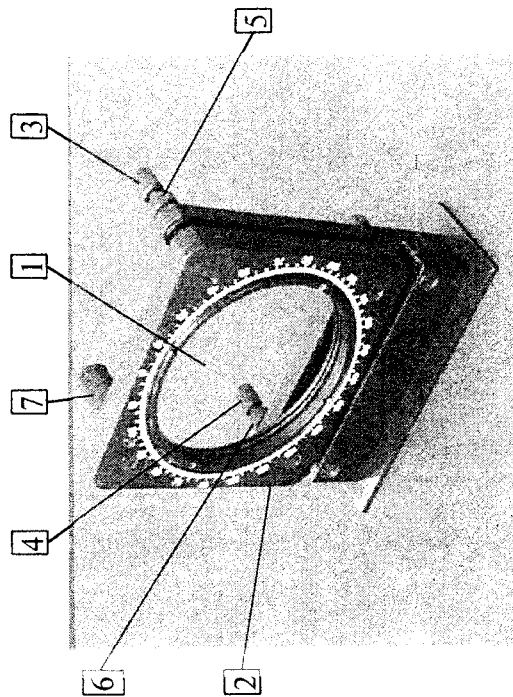


Рис. 11. Оправа с сеткой в собранном виде. 1 – сетка; 2 – квадратная рамка; 3, 4 – юстировочные винты; 5, 6 – гайки фиксации юстировочных винтов; 7 – ручка поворота сетки

- с помощью юстировочных винтов установить сетку в необходимое положение;

- зафиксировать положение винтов гайками.

Сетки используются в качестве поляризаторов, анализаторов, зеркал и расщепителей пучка миллиметрового излучения и представляют собой проволоки диаметром 15 мкм, укрепленные на диафрагме диаметром 86 мм с шагом 60 мкм, много меньшим длины волны излучения. Сетка пропускает излучение с электрическим вектором *E*, направленным перпендикулярно проволокам, и отражает излучение, вектор *E* которого направлен вдоль проволоок. Для того чтобы при помощи сетки изменить (или проанализировать) поляризацию излучения, необходимо вращать ручку сетки, располо-

мой, аналогичной той, которая используется в оправе для секток (рис. 12).

Для установки образца в крепежный узел необходимо потянуть за ручку узла, расположенную в центре (между двумя юстировочными винтами с пружинами), и плотно прижать образец к плоскости с диафрагмой. Степень прижима образца различной толщины регулируются юстировочными гайками с пружинами.

Положение подвижной пластины с образцом относительно пучка можно менять в пределах 40 мм по вертикали (фиксация осуществляется винтом на подвижной плоскости) и в пределах 30 мм по горизонтали (фиксация осуществляется гайкой рейтера).

Диаметр рабочей апертуры держателя составляет 45 мм.

Габариты держателя: 120 мм × 80 мм × 168 мм.

13. Электронный блок

Электронный блок предназначен для усиления и регистрации сигнала с пироприемника, а также для питания генератора миллиметровых волн и пироприемника.

Питание генератора (0,25 А, 24 В) может осуществляться как в импульсном режиме с частотой повторения 8 Гц, так и в непрерывном режиме, который используется для регистрации питающего напряжения 24 В. При прямоугольной модуляции мощности излучения с частотой 8 Гц напряжение на пироприемнике имеет пилообразную форму той же частоты. В электронном блоке это напряжение дополнительно усиливается, затем производится синхронное детектирование и интегрирование сигнала.

Коэффициент усиления можно менять как плавно, потенциометром, расположенным на задней панели электронного блока, так и с шагом 1, 10, 100, 1000 — нажатием соответствующих кнопок на верхней наклонной панели бло-

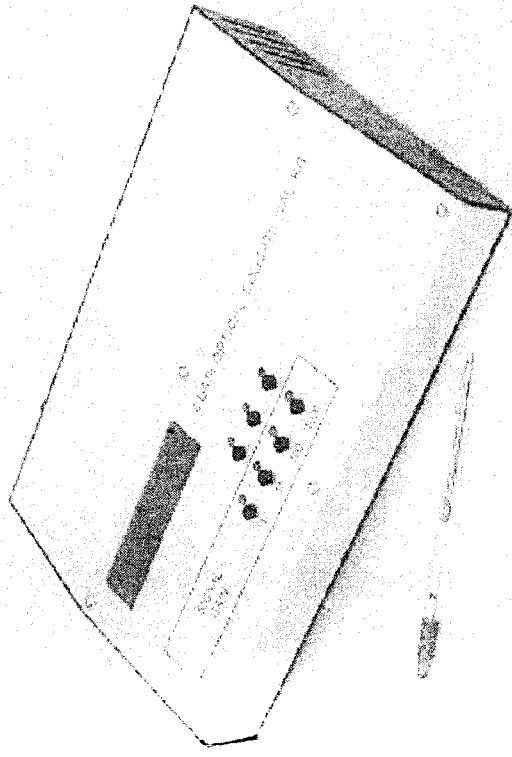


Рис. 13. Общий вид электронного блока

ка (рис. 13). На этой панели также расположен цифровой индикатор сигнала.

На задней панели электронного блока (рис. 14) имеется кнопка включения, коаксиальный разъем для питания генератора, 7-штырьковый разъем для подключения кабеля пироприемника и стандартный разъем интерфейса RS-232 для подключения к компьютеру. Кроме этого, на задней панели имеются разъемы для выхода аналогового сигнала и для подключения шагового двигателя. Блок с шаговым двигателем позволяет автоматизировать ряд лабораторных экспериментов, включающий интерферометр Фабри-Перо, пластину переменной толщины, преобразователь поляризации и дифракционную решетку.

Потребляемая мощность блока составляет 60 Вт при переменном токе 50–60 Гц, 220 В.

Габариты блока: 300 мм × 230 мм × 70 мм.

III. УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Уровень мощности генератора, используемого в лабораторном практикуме, безопасен для человека. Вместе с тем не следует без необходимости подвергать тело экспериментатора воздействию миллиметрового излучения: переключив луч рукой, направлять луч от генератора в глаза и т. п. Для того чтобы перекрыть луч, используйте специальный экран. Отметим, что использование юстировочных элементов при аккуратной работе сводит к минимуму возможный контакт с миллиметровым излучением.

При работе следует избегать действий, которые могут привести к повреждению устройств и квазиоптических элементов практикума. Крайне осторожного обращения требуют сетки и поверхности зеркал. *Запрещается трогать поверхность сеток и зеркал пальцами.* Для хранения зеркал и сеток, не применяемых в данный момент, следует использовать защитные элементы.

Располагать устройства практикума на оптическом столе необходимо аккуратно, избегая ударов и падений, которые могут привести к выходу из строя точной механики.

Электронный блок должен быть включен в сеть с защитным занулением. Металлический оптический стол должен быть заземлен.

Категорически запрещается снимать крышку блока, а также разбирать корпус генератора и приемника. Ремонтных элементов практикума должен производиться только квалифицированным персоналом.

Запрещается отключать и подключать соединительные шнуры генератора и приемника при включенном электронном блоке, так как это может привести к его повреждению. При необходимости подключить генератор, приемник или другое внешнее устройство, вначале следует

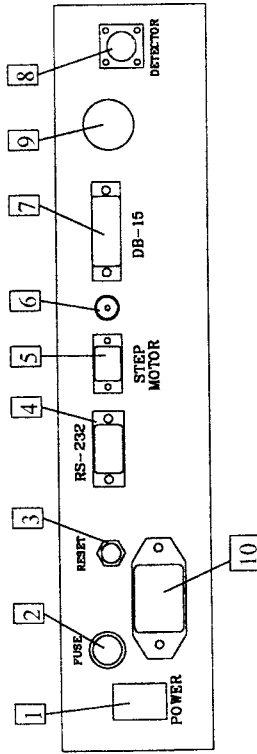


Рис. 14. Задняя панель электронного блока. 1 — кнопка включения, 2 — предохранитель, 3 — кнопка сброса, 4 — разъем интерфейса RS-232, 5 — разъем для шагового двигателя, 6 — коаксиальный разъем для питания генератора, 7 — разъем для аналогового выхода, 8 — разъем для пироприемника, 9 — ручка плавной регулировки усиления, 10 — разъем подключения шнура питания

14. Исследуемые образцы

Лабораторный практикум укомплектован следующими образцами.

1. Металлические пленки, напыленные на лавсановую подложку (5 пленок с различным пропусканием от 3 % до 80 % и с одной и той же проводимостью). Диаметр рамок пленок составляет 56 мм.

2. Образцы стекла К8. Толщины двух плоскопараллельных образцов равны $d_1 = 10,6$ мм, $d_2 = 17,7$ мм, их диаметры составляют 56 мм.

3. Модели двухмерных кристаллических решеток. Роль «кристалла» играет пространственная решетка, состоящая из параллельных металлических проволок. Проекция проволок на перпендикулярную плоскость образуют квадратную решетку.

выключить блок и только после этого произвести его подключение.

Использование криостата требует соблюдения техники безопасности при работе с жидким азотом. Основными опасными факторами при работе с этим хладагентом являются возможность асфиксии и возможность ожога при попадании жидкого азота на незащищенную поверхность тела.

Работы с жидким азотом следует проводить в проветриваемом или вентилируемом помещении. При заполнении объема криостата из сосуда Дьюара необходимо использовать специальную воронку, а также применять индивидуальные средства защиты: очки и перчатки.

Перед началом выполнения задач практикума студенты должны пройти инструктаж по технике безопасности и получить допуск к работам на установках.

IV. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

РАБОТА № 1. ИНТЕРФЕРОМЕТР ФАБРИ-ПЕРО

Цель эксперимента – изучение работы интерферометра Фабри–Перо (ИФП), измерение длины волны излучения с помощью интерферометра и определение его резкости и контраста.

1.1. Теория интерферометра Фабри–Перо

Интерферометр Фабри–Перо состоит из двух частично отражающих параллельных зеркал, расположенных на расстоянии d друг от друга. Обозначим коэффициенты отражения, пропускания и поглощения зеркал по интенсивности соответственно через R , T и A ; из закона сохранения энергии следует соотношение $T = 1 - R - A$ между этими величинами. Амплитудные коэффициенты отражения и преломления соответственно равны $R^{1/2}$ и $T^{1/2}$. Пусть на зеркала под углом β к нормали падает параллельный пучок монохроматического излучения с длиной волны λ , а прошедшее излучение расположеной позади интерферометра линзой фокусируется в точку P (рис. 1.1). Волна между зеркалами многократно частично отражается от каждого зеркала, а все прошедшие волны в точке P интерферируют.

Наименьшая разность хода между двумя прошедшими волнами составляет

$$\Delta s = 2d \cos \beta, \quad (1.1)$$

а соответствующая разность фаз равна

$$\delta = 2\pi \Delta s / \lambda + 2\Delta\varphi = 4\pi d \cos \beta / \lambda + 2\Delta\varphi. \quad (1.2)$$

Здесь $\Delta\varphi$ – скачок фазы при отражении. При изменении расстояния d (или длины волны λ) конструктивная интерферен-

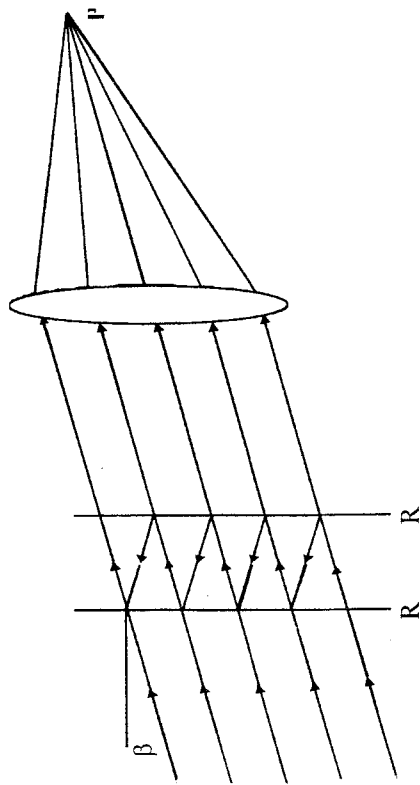


Рис. 1.1. Интерферометр Фабри-Перо.

ция прошедших волн возникает, когда разность фаз кратна 2π :

$$\delta = 2\pi m, \quad (1.3)$$

(целое число m называется порядком интерференции) и в точке P с изменением d будут периодически возникать максимумы интенсивности. Для вычисления зависимости интенсивности от d необходимо сложить комплексные амплитуды всех волн, прошедших интерферометр. Если падающая на интерферометр волна имеет амплитуду E_0 , то по прохождении двух зеркал ее амплитуда будет $T \sqrt{T} E_0 = T E_0$. При каждом двукратном отражении амплитуда E_0 превращается в $\sqrt{R} \sqrt{R} E_0 = R E_0$. Таким образом, для результирующей комплексной амплитуды получается геометрическая прогрессия (см. рис. 1.2):

$$E = TE_0(1 + Re^{-i\delta} + R^2 e^{-2i\delta} + R^3 e^{-3i\delta} + \dots). \quad (1.4)$$

В пределе бесконечно широких зеркал или для нормального падения пучка ($\beta = 0$), когда поперечное «убегание» пучка отсутствует, для бесконечно большого числа прошедших пучков

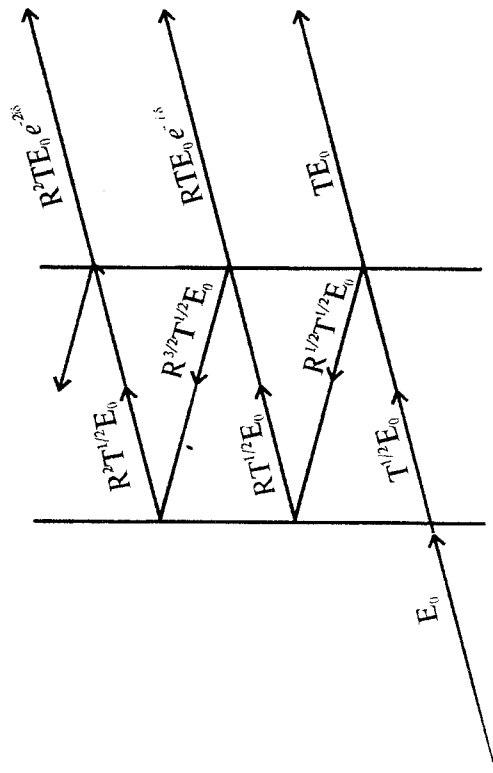


Рис. 1.2. К теории интерферометра Фабри-Перо

$$E = E_0 T / (1 - R e^{-i\delta}), \quad (1.5)$$

и для интенсивности результирующей прошедшей волны $I_t = E E^*$ получим

$$I_t = I_0 T^2 / (1 - R e^{-i\delta})(1 - R e^{i\delta}) = \frac{I_0 T^2}{(1 - R)^2 + 4R \sin^2(\delta/2)}.$$

С учетом соотношения $T = 1 - R - A$ выражение для интенсивности принимает вид

$$\frac{I_t}{I_0} = T_{\text{эфф}} = \left(1 - \frac{A}{1 - R}\right)^2 / \left(1 + \frac{4R}{(1 - R)^2} \sin^2(\delta/2)\right), \quad (1.6)$$

где $T_{\text{эфф}}$ — коэффициент пропускания интерферометра. На рис. 1.3 приведены соответствующая зависимость $T_{\text{эфф}}$ от $\delta = 4\pi d/\lambda$. Обращает на себя внимание, что форма кривой $I_{\text{эфф}}(\delta)$ существенно отличается от синусоидальной.

Ширину пиков пропускания ε на половине интенсивности можно найти из формулы (1.6), учитывая, что для $\varepsilon = 2\pi \pm \varepsilon/2$ $T_{\text{эфф}} = \pi/2$. Тогда из (1.6) следует, что

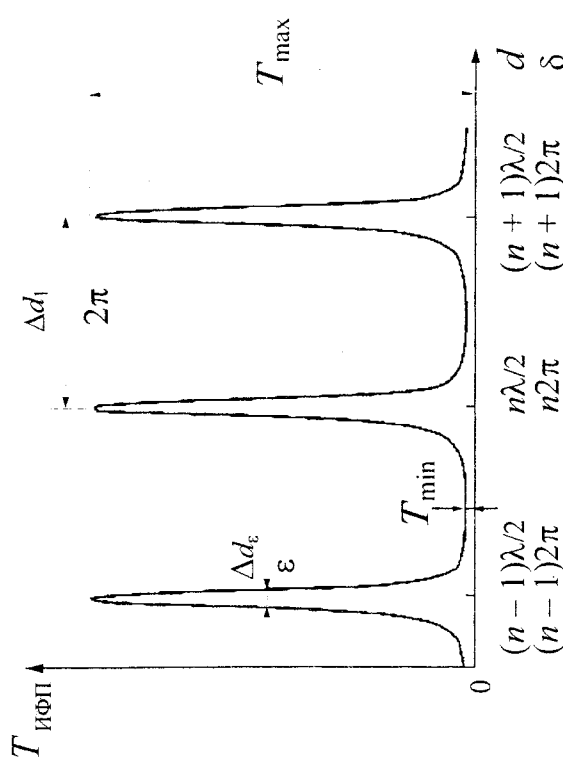


Рис. 1.3. Пропускание интерферометра Фабри-Перо в зависимости от расстояния d между зеркалами и фазы δ

$$\frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2(\epsilon/4) = 1,$$

или

$$\epsilon = 4 \arcsin \left(\frac{1-R}{2\sqrt{R}} \right). \quad (1.7)$$

При достаточно больших R

$$\epsilon \approx 2(1-R)/\sqrt{R}. \quad (1.8)$$

Таким образом, острота пиков пропускания растет с увеличением R , поскольку увеличивается показатель геометрической прогрессии (1.4), т.е. возрастает количество эффективно взаимодействующих пучков при многолучевой интерференции. Обычно в спектроскопии для ширины интерференционных пиков интерферометра Фабри-Перо используют безразмерную величину F , называемую «остротой» или «рез-

костью» интерферометра (finesse), определяемую как отношение расстояния между пиками (2π) к их ширине:

$$F = \frac{2\pi}{\epsilon} \approx \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}. \quad (1.9)$$

Найдем связь между резкостью F и добротностью резонатора $Q = \omega/\Delta\omega_p = -\lambda/\Delta\lambda_p$, где $\Delta\omega_p, \Delta\lambda_p$ — ширина резонансного пика. Дифференцируя (1.2), получаем связь $\Delta\delta$

$$\Delta\delta = -\frac{4\pi d}{\lambda} \frac{\Delta\lambda}{\lambda}. \quad (1.10)$$

При $\Delta\delta = \epsilon$ из (1.9) и (1.10) следует

$$\epsilon = \frac{2\pi}{F} = -\frac{4\pi d}{\lambda} \frac{\Delta\lambda_p}{\lambda}, \text{ или } \frac{\lambda}{\Delta\lambda_p} = -\frac{2dF}{\lambda} \approx -mF.$$

Таким образом,

$$Q = \omega/\Delta\omega_p = mF, \quad (1.11)$$

и добротность резонатора Фабри-Перо равна произведению резкости и порядка интерференции.

Из формулы (1.6) видно, что $T_{\max} = \left(1 - \frac{A}{1-R}\right)^2$, а

контраст интерферометра равный по определению отноше-

$$\frac{T_{\max}}{T_{\min}} = \zeta \text{ равен}$$

$$\zeta = \left(\frac{1-R}{1+R} \right)^2. \quad (1.12)$$

Таким образом, резкость и контрастность интерферометра не зависят от коэффициента поглощения зеркал, а определяются только их коэффициентом отражения.

В классической оптике ИФП (эталон Фабри-Перо) не используется в качестве селективного элемента, пропускающего излучение с длиной волны $\lambda = 2d/m$. При этом к точно-

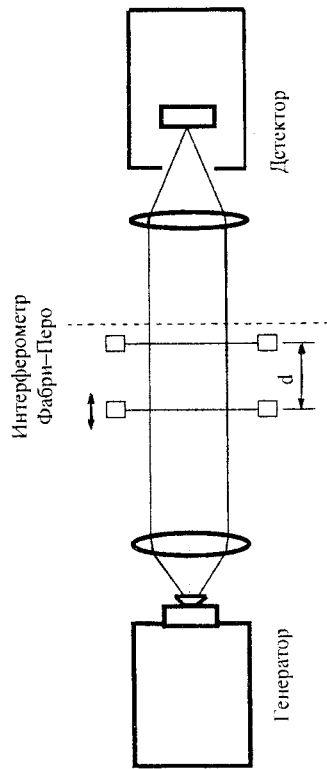


Рис. 1.4. Квазиоптическая схема для измерений длины волны и характеристик интерферометра Фабри-Перо

сти изготовления прибора предьявляются высокие требования: необходимо жестко выдерживать плоскопараллельность зеркал и обеспечить условие $d = \text{const}$. Кроме того, вследствие малости длины волны света необходимо вводить поправку на тепловое расширение держателя зеркал или термостабильный эталон.

В миллиметровом диапазоне длин волн применение ИФП существенно расширяется. Легко можно реализовать ситуацию, когда расстояние между зеркалами является не постоянным, а переменным. Такое устройство можно использовать, например, для прецизионного измерения длины волны излучения.

1.2. Подготовка к проведению эксперимента

ВНИМАНИЕ! Во избежание повреждения ИФП не прикасайтесь к зеркалам ИФП. Переносите ИФП только за основание.

Соберите установку по схеме рис. 1.4 в следующем порядке.

1. С помощью линейки отрегулируйте высоту расположения генератора, тefлоновой линзы и приемника в их подставках так, чтобы центры рупора и тefлоновых линз были на высоте 80 мм от основания.

2. Закрепите генератор и линзу вдоль «оси», образующей одним из рядов отверстий в плите-основании так, чтобы расстояние от плоскости симметрии линзы до узкого места рупора генератора было 60 мм (используйте линейку).

3. Закрепите на этой же «оси» на расстоянии 40 см от тefлоновой линзы генератора приемный узел так, чтобы ось симметрии приемного узла совпала с осью всей системы.

4. Соедините генератор и приемный узел кабелями с электронным блоком (см. описание электронного блока).

5. Включите электронный блок. Мигание светодиода на корпусе генератора свидетельствует о нормальной работе прибора. Поставьте переключатель входного аттенуатора в положение 1:1, а ручку «плавно» — в положение максимального усиления.

6. Медленно передвигая линзу генератора перпендикулярно оси системы в небольших пределах, добейтесь максимального показания прибора электронного блока. Проверьте расстояние между линзой и рупором. При необходимости восстановите его и повторите юстировку.

7. Ослабьте гайку на корпусе приемного узла и, вращая оправу линзы приемника, подюстируйте ее до получения максимального сигнала. Зафиксируйте положение линзы сканером.

8. Поставьте между линзой генератора и приемником интерферометр Фабри-Перо так, чтобы его ось совпадала с осью системы. Закрепите интерферометр на плите.

Упражнение 1.1. Измерение длины волны излучения

Вращая микрометрический винт ИФП, убедитесь в периодическом изменении показаний электронного блока. Это свидетельствует о работе интерферометра.

ВНИМАНИЕ! При работе следите за тем, чтобы не направлять рукой пучок излучения, иначе показания прибора будут искажены.

Сближьте максимально зеркала интерферометра, затем, медленно раздвигая их, найдите первый максимум сигнала с приемника и определите по шкале микрометра его положение L_1 . Продолжая вращать микрометрический винт, найдите положения $d = L_2, L_3, \dots, L_m$, отвечающие максимумами с номерами 2, 3, ..., m ($m \leq 12$).

По наклону прямой $L = f(m)$ рассчитайте длину волны излучения и определите погрешность нахождения λ . Для анализа используйте метод наименьших квадратов.

Упражнение 1.2. Измерение характеристик ИФП

Медленно сближьте зеркала. Вращая микрометрический винт, снимите зависимость интенсивности прошедшего сигнала $I(L)$; постройте график. Кривая $I(L)$ должна содержать несколько (5–10) интерференционных максимумов. Рассчитайте контраст и резкость интерферометра; найдите коэффициент отражения R .

Используя формулу (1.6), подберите коэффициент поглощения так, чтобы теоретическая зависимость наилучшим образом описывала экспериментальную кривую $I(L)$. Постройте график теоретической зависимости $I(L)$, отвечающей наилучшей аппроксимации, проанализируйте полученный результат.

РАБОТА № 2. ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ТИПА ПОЛЯРИЗАЦИИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В рамках данного эксперимента мы выполним ряд исследований по исследованию поляризации электромагнитного излучения ММ диапазона, используя квазиоптические методы.

2.1 Поляризационные элементы миллиметрового диапазона длин волн

Тип поляризации электромагнитного излучения описывается траекторией, которую описывает в плоскости поперечного фронта конец электрического вектора E . Рассмотрим две волны с одинаковой частотой, распространяющиеся в одном направлении, электрические векторы которых направлены вдоль осей x и y , соответственно:

$$E_x = E_{0x} \cos \omega t; \quad E_y = E_{0y} \cos(\omega t - \Delta\varphi), \quad (2.1)$$

где $\Delta\varphi$ — разность фаз колебаний в этих волнах.

Исключая время из этой системы уравнений, можно получить уравнение для траектории конца вектора E результирующей волны в координатах E_x, E_y :

$$\left(\frac{E_x}{E_{0x}} \right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{0y}} \right)^2 - 2 \frac{E_x E_y}{E_{0x} E_{0y}} \cos \Delta\varphi = \sin^2 \Delta\varphi, \quad (2.2)$$

или уравнение эллипса. Форма эллипса и его ориентация зависят от величин E_{0x}, E_{0y} и $\Delta\varphi$. В частности, при $\Delta\varphi = m\pi, m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ эллипс вырождается в прямую $E_x = 0$ или $E_y = 0$, и поляризация называется линейной, при $\Delta\varphi = (m + 1/2)\pi$ эллипс становится кругом $E_x = E_y$, и соответствующая поляризация называется

круговой. В этом случае $E_{0x} = E_{0y} = E_0$ и эллипс становится кругом $E_x = E_y = E_0 \cos(\omega t - \Delta\varphi)$ и соответствующая поляризация называется

круговой, во всех остальных случаях поляризация — эллиптическая.

Основным поляризационным элементом ММ и СВММ диапазонов является проволочная сетка. Сетка состоит из натянутых на (обычно) круглую металлическую оправку тонких (порядка 10 мкм) проводников с периодом, много меньшим длины волны излучения (на практике — обычно от 30 мкм и более). Излучение с поляризацией E , параллельной проволочкам, будет индуцировать токи в проводниках и эффективно отражаться от сетки. Это так называемый случай E -поляризации (индуктивная сетка). В случае H -поляризации, когда вектор E волны перпендикулярен проволочкам (емкостная сетка), коэффициент отражения будет мал, и волна будет проходить сквозь сетку практически без возмущенной. В промежуточном случае, когда вектор E направлен под углом α по отношению к проводникам, компонента $E \cos \alpha$ отразится от сетки, а компонента $E \sin \alpha$ пройдет сквозь сетку.

На основе сеток строятся самые различные приборы, предназначенные для анализа, управления и преобразования миллиметрового и субмиллиметрового излучения: поляризаторы, анализаторы, делители пучка, зеркала, компенсаторы, преобразователи поляризации.

Упражнение 2.1. Изучение работы сетки в качестве анализатора излучения

Соберите квазиоптическую схему, показанную на рис. 2.1.

Поскольку на выходе генератора излучение поляризовано, интенсивность, прошедшая через сетку анализатора I , будет зависеть от угла поворота сетки α . Снимите зависимость $I(\alpha)$ и постройте график в полярных координатах. Проанализируйте полученный результат. Определите углы α_0 , отвечающие максимуму прошедшего сигнала для двух

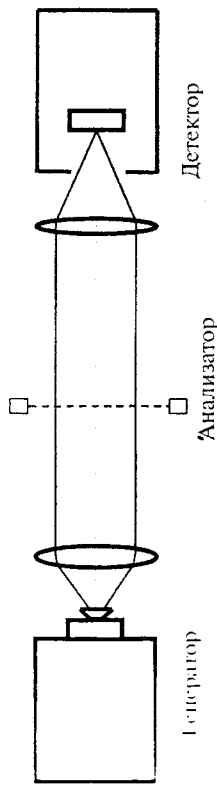


Рис. 2.1 Квазиоптическая схема для изучения работы анализатора сеток, которые будут использоваться в следующем упражнении

Упражнение 2.2. Изучение работы преобразователя поляризации

Преобразователь поляризации представляет собой два параллельных зеркала с расстоянием d между ними, одно из которых подвижное, — сплошное металлическое, а другое, — сплошное сетчатое, проволочки которого вертикальны. Пучок падает на преобразователь под углом 45° к плоскости зеркала, причем оно линейно поляризовано с вектором E направленным под углом 45° к проволочкам сетки преобразователя поляризации. Это достигается установкой в пучок перед преобразователем поляризатора, проводники которого направлены под углом 45° к вертикали.

Составляющая вектора E , параллельная проволочкам сетчатого зеркала, отразится в направлении приемника, а перпендикулярная составляющая пройдет сетчатое зеркало, затем отразится от сплошного зеркала и снова пройдет сетчатую сетку в направлении приемника, преодолев по отношению к первой составляющей дополнительный путь, равный $d/2$. Таким образом, пучок, отраженный преобразователем, состоит из двух волн с разным направлением к приемнику, состоит из двух волн с разными перпендикулярными поляризациями, равными амплитудам и разностью фаз $\Delta\phi = 2\pi d/2/\lambda$. Поэтому, изменив расстояние d , и следовательно, $\Delta\phi$, в соответствии с (2.2)

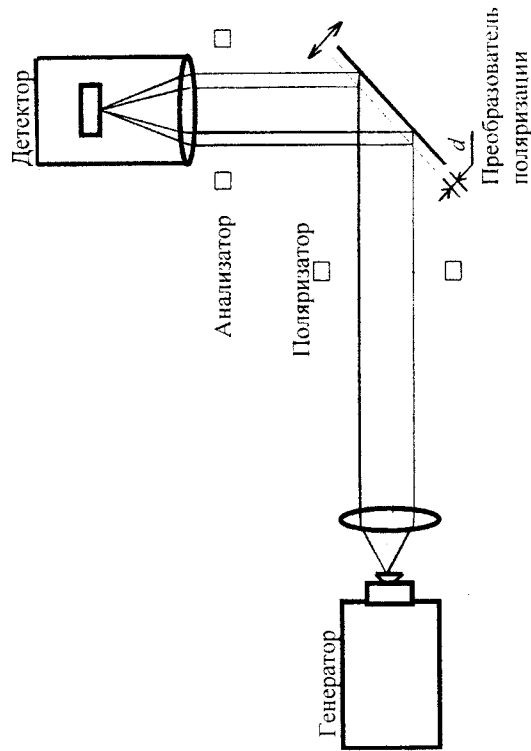


Рис. 2.2. Квазиоптическая схема для изучения преобразования типа поляризации миллиметрового излучения

можно получить любую поляризацию в этом пучке — линейную, эллиптическую или круговую.

Упражнение 2.3. Получение различных типов поляризации с помощью преобразователя поляризации

1. Соберите схему рис. 2.2 без поляризатора и анализатора. Подвижное зеркало расположите вплотную к сетчатому, плоскость зеркала должна образовывать с осью пучка излучения угол в 45° . Перемещая линзу генератора и приемника, добейтесь максимального сигнала (ось пучка должна при этом попадать на середину зеркала).

2. Вставьте в схему поляризатор (провода должны быть повернуты на угол $\alpha = 45^\circ$ относительно направления, отвечающего максимуму проходящего сигнала (см. упражнение 2.1)).

3. Вставьте в схему анализатор. Вращая анализатор, проверьте характер проходящего излучения.

УКАЗАНИЕ. Для уменьшения амплитуды стоячих волн в тракте рекомендуется располагать плоскости поляризатора и анализатора под небольшим ($5^\circ - 10^\circ$) углом к оси пучка излучения.

4. Поверните анализатор на угол 45° относительно оси пучка.

5. Перемещая микрометрический винт, снимите зависимость интенсивности от положения подвижного зеркала $I(d)$.

6. Выбрав 5–6 характерных точек по d между минимумом и максимумом кривой $I(d)$ определите характер поляризации, отвечающий этим точкам. Для этого установите фиксированное значение d и с помощью микрометрического винта снимите зависимость $I(\alpha)$, вращая анализатор. Повторите эксперимент для каждого выбранного положения d . Постройте семейство кривых $I(\alpha)$ для различных d в полярных координатах. Объясните полученный результат.

7. Рассчитайте значение d , соответствующее круговой поляризации. Установив подвижное зеркало, проверьте правильность расчета (регистрируется зависимость $I(\alpha)$ как в пункте 6. Оптимизируйте оптическую схему путем небольших перемещений подвижного зеркала и поворотов анализатора $I(d)$ добейтесь того, чтобы отношение $I(\alpha)$ в максимуме и минимуме было бы возможно близким к единице. Снимите и постройте в полярных координатах оптимизированную кривую $I(\alpha)$ (объясните влияние юстировки на качество полученной круговой поляризации).

РАБОТА № 3. ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА

Цель эксперимента – изучение дифракции электромагнитных волн ММ диапазона на системе эквидистантных щелей в плоском непрозрачном экране (дифракционная решетка) и определение длины волны излучения с помощью решетки.

3.1. Теория дифракции на решетке

Рассмотрим решетку, состоящую из ряда длинных эквидистантных щелей (см. описание решетки в гл. II, п. 5). Если период решетки, состоящей из N щелей равен d , а расстояние между щелями равно a (рис. 3.1), то угловое распределение интенсивности прошедшего излучения I дается формулой

$$I = I_0 \left(\frac{\sin(Nkd p / 2)}{\sin(kd p / 2)} \right)^2 \left(\frac{\sin(kap / 2)}{kap / 2} \right)^2 \quad (3.1)$$

где

$$p \equiv \sin \theta - \sin \theta_0; \quad (3.2)$$

$$k = 2\pi / \lambda. \quad (3.3)$$

Формулы (3.1 – 3.3) соответствуют случаю дифракции Фраунгофера, т. е. описывают ситуацию в дальнем поле, когда выполняется условие $R \gg \sqrt{4D^3 / \lambda}$ (здесь R – расстояние от точки наблюдения до дифракционного объекта, имеющего характерный размер D).

Первый из множителей в формуле (3.1) описывает интерференцию N дифрагированных волн от N щелей, а второй – дифракцию на одной щели. Максимумы интенсивности $I(\theta)$ определяются из условия

$$p \equiv \sin \theta - \sin \theta_0 = \frac{m\lambda}{d} \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (3.4)$$

Целое число m называется порядком интерференции.

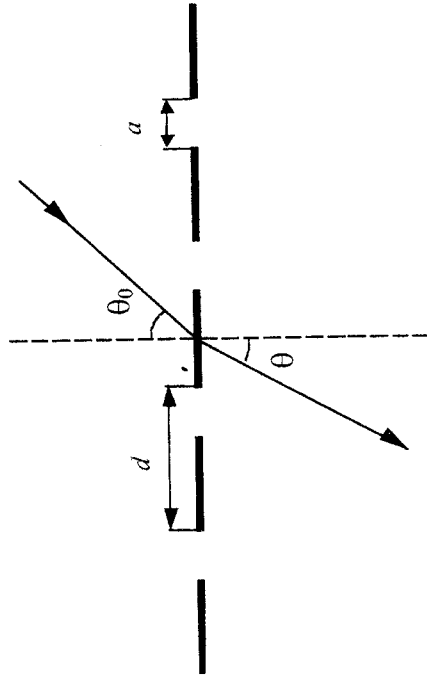


Рис. 3.1. Дифракционная решетка

В случае нормального падения $\theta_0 = 0$ формула (3.1) принимает вид

$$I(\theta) \propto \frac{\sin^2 u \sin^2 Nv}{u^2 \sin^2 v}, \quad (3.5)$$

$$u = \pi a \sin \theta / \lambda, \quad v = \pi d \sin \theta / \lambda.$$

Если ширина щели $a \ll \lambda$, то первый множитель равен 1, и распределение интенсивности (3.5) соответствует полю из эквидистантных синфазных источников. График зависимости интенсивности дифрагированного излучения от угла θ , рассчитанный по формуле (3.5) при $\lambda = 1$ для решетки, используемой в задаче, приведен на рис. 3.2.

Из выражения (3.5) видно, что острота максимумов возрастает с ростом N , соответственно растут и разрешающая способность решетки $\lambda / \Delta \lambda = mN$. Видно также, что при $\sin \theta = \pm m\lambda / d$ имеются главные максимумы, между которыми находятся $(N-1)$ минимумов, разделенных $(N-2)$ вторичными максимумами (см. рис. 3.2). Эти вторичные максимумы и минимумы образуются вследствие интерференции волн от соответствующих точек щелей, расположенных на расстояниях $d, 2d, 3d, \dots, (N-1)d$ друг от друга. Минимумы получаются

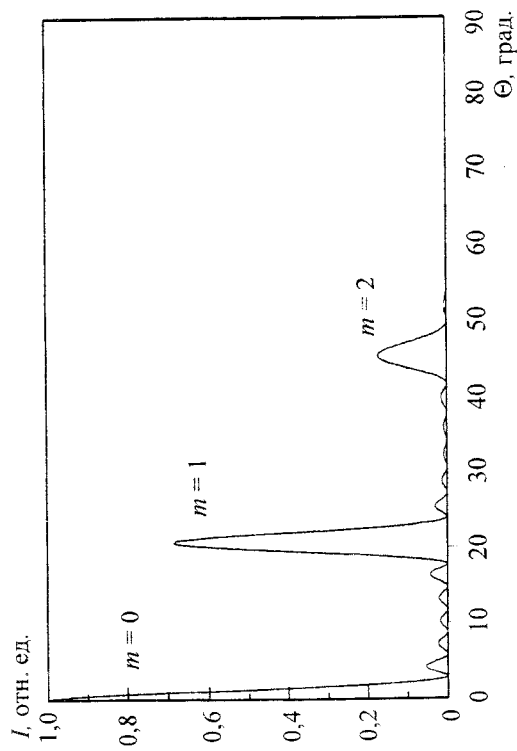


Рис. 3.2. Дифракция на решетке, рассчитанная для $d = 6$ мм, $a = 2$ мм, $\lambda = 2,14$ мм, $N = 7$

при $d \sin \theta = \lambda / N, 2\lambda / N, 3\lambda / N, \dots, (N-1)\lambda / N$. Вторичные максимумы имеют интенсивность, не превышающую нескольких процентов от интенсивностей главных максимумов.

С помощью дифракционной решетки можно определять длину волны излучения, пользуясь условием интерференции для нормального падения:

$$\lambda = d \sin \theta_m / m, \quad (3.6)$$

где θ_m — направление на главный максимум m -го порядка. Для решетки, используемой в задаче, у которой $a = 2$ мм, $d = 6$ мм $\approx 3\lambda$, максимально возможный порядок $m = 3$ (при $\theta_3 \approx 90^\circ$). Однако вследствие того, что $d = 3a$, как видно из (3.5), максимум третьего порядка отсутствует. Численно из формулы (3.5) следует, что интенсивности максимумов для нашей решетки соотносятся следующим образом:

$$I_0 : I_1 : I_2 : I_3 = 1 : 0,685 : 0,172 : 0.$$

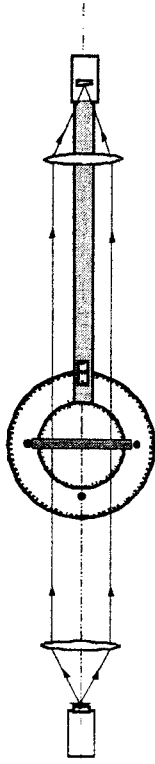


Рис. 3.3 Изучение дифракции на решетке в геометрии пропускания

Упражнение 3.1. Изучение дифракции на решетке в проходящих лучах

1. Используя микроскоп МБС-10 и окуляр со шкалой, точно измерьте параметры a и d дифракционной решетки. Соберите установку по схеме, показанной на рис. 3.3. Направляющую направляющую поворотного устройства установите у края приемника с линзой и закрепите его винтом.
2. Выньте дифракционную решетку и расположите направляющую с приемником и генератор вдоль одной прямой (рис. 3.3). Отъюстируйте оптическую схему, добившись максимального сигнала. Высота пучка излучения должна соответствовать середине дифракционной решетки. Вставьте дифракционную решетку так, чтобы ее плоскость была бы перпендикулярна пучку излучения.
3. Вращая подвижную направляющую, снимите зависимость $I(\theta)$ и постройте график. Рассчитайте по графику длину волны излучения генератора λ . Сравните вычисленное значение λ с результатом, полученным с помощью интерферометра Фабри–Перо. Объясните, чем определяется погрешность определения λ с помощью дифракционной решетки. Сравните экспериментальную зависимость $I(\theta)$ с теоретической (формула (3.5)). Определите эффективное число волн N , участвующих в образовании дифракционной картины. Объясните возможные причины расхождения расчетных и экспериментальных данных.

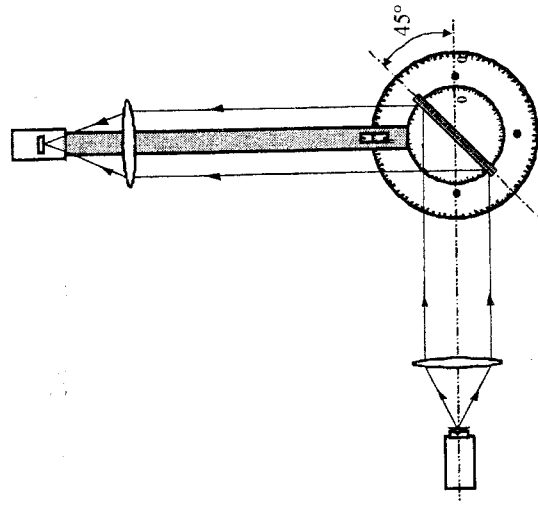


Рис. 3.4. Изучение дифракции на решетке в геометрии отражения

Упражнение 3.2. Изучение дифракции на решетке в отраженных лучах

1. Установите решетку под углом 45° к оси пучка (рис. 3.4).
2. Снимите зависимость $I(\theta)$ в геометрии отражения.
3. Повторите эксперимент для случая, когда решетка образует с пучком излучения угол в 30° . Выполните расчет ожидаемой теоретической угловой зависимости интенсивности излучения для геометрии отражения.
4. Сравните полученные экспериментальные зависимости $I(\theta)$ с расчетными (формула (3.1)). Объясните возможные причины расхождения расчетных и экспериментальных данных. Объясните, как связаны параметры дифракционной решетки в случаях пропускания и отражения.

РАБОТА № 4. ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕЛОМЛЕНИЯ ПЛАВЛЕННОГО КВАРЦА НА МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ

Эксперимент посвящен одному из интерферометрических методов определения показателя преломления прозрачного материала на ММ волнах – с помощью измерения пропускания пластинки переменной толщины из этого материала. В качестве образца выбран плавленый кварц.

1.1. Теория метода

В данном методе используется интерференция в тонкой параллельной диэлектрической пластине, образованной двумя взаимодополняющими клиньями из исследуемого материала. При перемещении одного из клиньев по поверхности другого изменяется суммарная толщина диэлектрической пластины.

Для измерений собирается схема в соответствии с рис. 1.1. Параллельный пучок излучения миллиметрового диапазона проходит сквозь пластину переменной толщины и попадает на приемник. В экперименте регистрируется интенсивность проходящего излучения в зависимости от толщины d пластины. Для уменьшения амплитуды стоячих волн в пучку вводятся аттенуатор и диафрагма.

Вследствие интерференции пучков, образованных многократными отражениями от параллельных поверхностей пластины, как в интерферометре Фабри–Перо, в прошедшем излучении наблюдаются периодические максимумы и минимумы. При этом расстояние Δd между соседними максимумами определяется условием

$$\Delta d n = \lambda/2, \quad (4.1)$$

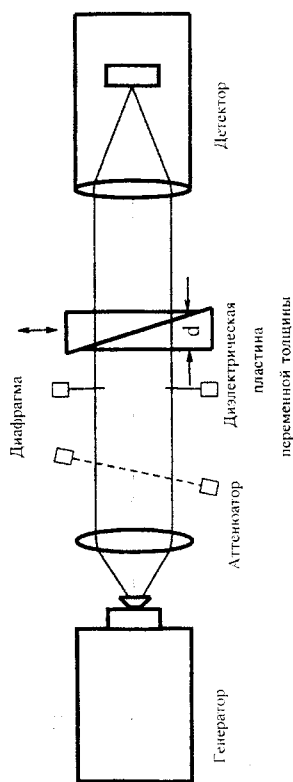


Рис. 4.1. Оптическая схема для измерения коэффициента пропускания пластины переменной толщины

где n — коэффициент преломления пластины. Появление множителя n связано с тем, что теперь в «интерферометре» пространство между отражающими поверхностями заполнено средой, где скорость распространения электромагнитной волны и длина волны уменьшаются в n раз. Соответственно набег фазы на пути d возрастает в n раз и во всех формулах теории ИФП в случае диэлектрической пластины надо заменить d на nd .

Коэффициент отражения R зеркал ИФП в случае диэлектрической пластины есть коэффициент френелевского отражения от поверхности раздела воздух/диэлектрик, и для нормального падения

$$R = (n-1)^2 / (n+1)^2, \quad (4.2)$$

а контраст интерференции, как и прежде, равен

$$\zeta = (R-1)^2 / (R+1)^2.$$

В миллиметровом диапазоне частот коэффициент R в несколько раз выше, чем в оптическом вследствие большего значения коэффициента преломления, поэтому контраст ζ также значительно больше. Определив из эксперимента Δd , и зная длину волны излучения, можно найти с помощью (4.1) коэффициент преломления n .

Упражнение 4.1. Определение коэффициента преломления плавленого кварца

1. Соберите установку по схеме рис. 4.1. отъюстируйте положение генератора и приемника таким образом, чтобы интенсивность прошедшего излучения была наибольшей (концы пластины должны быть максимально раздвинуты). Вставьте в пучок излучения пленку аттенуатора.
2. Вращая микрометрический винт пластины, снижайте интенсивность сигнала на приемнике от толщины пластины $h(d)$. Рассчитайте коэффициент преломления n исходя из положения интерференционных максимумов. Из экспериментального графика $I(d)$ найдите контраст интерференции и рассчитайте коэффициент отражения R и величину n . Сравните полученную величину n с результатом интерференционных измерений. Объясните результаты.
3. Проведите измерения $I(d)$ для случая, когда в оптическом тракте отсутствует аттенуатор. Сравните формы кривых $I(d)$, полученных с аттенуатором и без него. Проанализируйте причины расхождения.

РАБОТА № 5. ИНТЕРФЕРОМЕТР МАХА-ЦАНДЕРА: ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕЛОМЛЕНИЯ

5.1. Описание интерферометра

Интерферометр Маха-Цандера – это пример двухлучевого интерферометра, который может быть использован для измерения коэффициента преломления плоскопараллельных образцов.

На рис. 5.1 представлена схема интерферометра. Зеркала (Z_1 , Z_2) и (Z_3 , Z_4) попарно параллельны, и пучки от двух плеч интерферометра совмещаются за зеркалом Z_3 . Поляризатор повернут так, что проволоки сетчатых полупрозрачных зеркал Z_1 и Z_3 направлены вертикально для отражения вертикальной компоненты электромагнитной волны, прошедшей через поляризатор. Горизонтальная компонента, прошедшая через зеркало Z_1 отражается от сплошного металлического зеркала Z_2 и, пройдя зеркало Z_3 , падает на сетчатый анализатор, проволоки которого направлены под углом 45° к вертикали. Анализатор пропускает перпендикулярные к проволокам компоненты волн от двух плеч интерферометра, обеспечивая тем самым интерференцию. Зеркало Z_4 можно перемещать вдоль нормали к ее плоскости. В качестве подвижного зеркала Z_4 используется зеркало преобразователя поляризации без передней сетки.

При смещении зеркала Z_4 оптическая разность хода Δ между двумя лучами плеч интерферометра изменяется. При $\Delta = m\lambda$, где m – целое число, наблюдаются максимумы интенсивности излучения, прошедшего через анализатор (конструктивная интерференция), а при $\Delta = (2m + 1)\lambda / 2$ – минимумы (деструктивная интерференция).

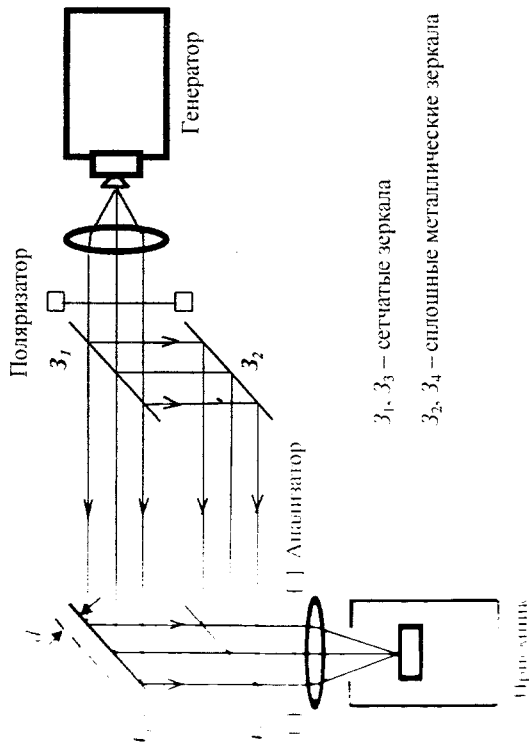


Рис. 5.1 Схема интерферометра Маха-Цандера

Однозначим амплитуды волн от двух плеч интерферометра за анализатором через E_1 и E_2 . Если интерферометр ориентирован относительно волн (фронты волн параллельны), то интерференция за анализатором будет определяться соотношением

$$I = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos(2\pi\Delta / \lambda). \quad (5.1)$$

При соблюдении равенства $E_1 = E_2$, которого можно добиться вращением анализатора, выражение для интенсивности принимает вид

$$I = 4E_1^2 \cos^2(\pi\Delta / \lambda) = 4I_1 \cos^2(\pi\Delta / \lambda), \quad (5.2)$$

и интерференционная картина максимальна. Из формулы (5.2) следует, что для двухлучевой интерференции ширина интерференционного максимума равна половине периода, в то время как для многолучевой интерференции максимумы гораздо резче – их полуширина составляет $1/N$ часть периода, где N – число интерферирующих лучей.

$I(\Delta)$, отн. ед.

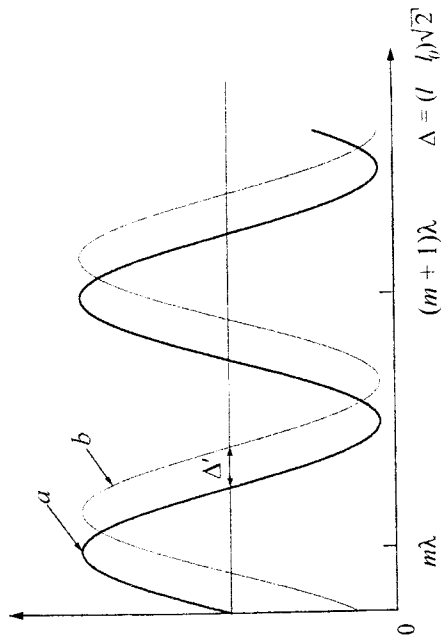


Рис. 5.2. Зависимость интенсивности излучения на выходе интерферометра Маха-Цандера от оптической разности хода Δ

На рис. 5.2 показана зависимость интенсивности прошедшего через интерферометр излучения от разности хода $\Delta = \Delta l \sqrt{2}$, где $\Delta l = l - l_0$, l и l_0 — первоначальное и конечное положения зеркала Z_4 . Множитель $\sqrt{2}$ появляется в результате того, что зеркало смещается под углом 45° к падающему и отраженному лучам.

Если мы вставим пластину толщиной d и с коэффициентом преломления n в одно из плеч интерферометра, то появится дополнительная разность хода $\Delta' = nd - d = (n - 1)d$, и положение интерференционных максимумов сдвинется на величину $\sqrt{2} \Delta' = (n - 1)d$. Измерив величину Δ' , можно вычислить значение коэффициента преломления по формуле

$$n = 1 + \Delta'/d. \quad (5.3)$$

Так как интерференционная картина периодична, то такие измерения дадут однозначный результат, когда вели-

чина $(n - 1)d$ превышает $\lambda/2$. Например, пластины, дающие разность хода $\Delta'_{\text{м}} = m\lambda + q\lambda$, где $0 < q < 1/2$, а m любое целое число $(m = 0, 1, 2, \dots)$, создадут один и тот же сдвиг $\Delta' = q\lambda$ интерференционной кривой на графике. Чтобы исключить неоднозначность, следует иметь несколько пластин, изготовленных из одного и того же материала, но разной толщины d_i , и найти n измерив соответствующее q_i и подгоняя целое m_i . В этом эксперименте используется достаточно тонкие пластины $(n - 1)d_i \approx \lambda/2$.

Упражнение 5.1. Сборка схемы

- а) соберите схему измерений согласно рис. 5.1;
- б) осторожно снимите сетчатое зеркало с преобразователя поляризации;
- в) установите преобразователь поляризации под углом 45° к падающему пучку, зеркало преобразователя поляризации поместите в положение Z_4 ;
- г) установите блок приемника под углом 90° относительно распространяющегося пучка;
- д) включите электронный блок. Отъюстируйте детектор (вправо-влево, вверх-вниз) и зеркало преобразователя поляризации (вправо-влево, вперед-назад, вокруг горизонтальной и вертикальной осей) при помощи юстировочных винтов до получения максимального сигнала. Убедитесь, что пучок не падает на металлический держатель зеркала преобразователя поляризации (для этого проследите за сигналом, перекрыв экраном пучок перед зеркалом);
- е) установите сетчатые зеркала Z_1 , Z_3 и сплошное зеркало Z_2 ; плоскости зеркал должны быть под углом 45° по отношению к пучку, а расстояние между зеркалами Z_4 и Z_1 должно быть не больше 40 см;
- ж) установите проволоки зеркал Z_1 и Z_3 вертикально;
- з) установите сетку поляризатора рядом с линзой детектора, а сетку анализатора за линзой приемника;

- з) установите сетки поляризатора и анализатора под углом 45° к вертикали;
- и) установите пустой держатель образцов в оптический тракт (путь) между зеркалами Z_1 и Z_4 , центр диафрагмы держателя должен находиться на оси пучка.

Упражнение 5.2. Юстировка интерферометра

Отъюстируйте интерферометр. Для этого при смещении зеркала Z_4 микрометрическим винтом измеряются величины сигналов, соответствующих максимуму и минимуму прошедшего через интерферометр излучения; затем зеркала Z_1 , Z_2 и Z_3 последовательно юстируются до получения максимальной контрастности (это удобно делать в интерференционном минимуме). Дополнительное увеличение контраста достигается вращением анализатора в небольших пределах около положения в 45° .

Упражнение 5.3. Изучение интерферометра

Измерьте интенсивность прошедшего через интерферометр излучения I как функцию положения l зеркала Z_4 . Постройте график зависимости I от разности хода $\Delta = \Delta l \sqrt{2}$, где $\Delta l = l - l_0$, l и l_0 — первоначальное и конечное положения зеркала Z_4 .

Упражнение 5.4. Определение коэффициента преломления образца

Последовательно установите исследуемые образцы в держатель и для каждого образца измерьте интенсивность прошедшего через интерферометр излучения как функцию положения l зеркала Z_4 . Постройте на том же графике зависимости интенсивности от оптической разности хода Δ . Найдите коэффициент преломления.

РАБОТА № 6. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФРАКЦИИ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

Изучение дифракции рентгеновских лучей является одним из экспериментальных методов, позволяющих исследовать структуру кристаллов, жидкостей и аморфных тел. При этом в процессе работы заключается в моделировании дифракции в кристалле в миллиметровом диапазоне длин волн. Роль «кристалла» играет пространственная структура, состоящая из параллельных металлических проволок на перпендикулярную плоскость образуют квадратную решетку.

6.1. Теория дифракции рентгеновских лучей в кристаллах

Формула Лауэ

Рассмотрим кристалл в виде параллелепипеда, состоящего из атомов, вызывающих рассеивание рентгеновских лучей. Пусть элементарная ячейка этого кристалла определяется тремя взаимными векторами a , b , c (рис. 6.1), и ряды, содержащие параллельные векторы N_1 , N_2 и N_3 рассеивающих центров, полное число рассеивающих центров равно $N = N_1 N_2 N_3$.

Пусть из бесконечности на кристалл падает плоская дифрагирующая волна с длиной волны λ . Каждый узел решетки является центром вторичной сферической волны. Результирующая интенсивность I этих рассеянных волн в любом направлении находится вне кристалла, на расстоянии, много меньшем, чем расстояние с его линейными размерами, описывается формулой Лауэ:

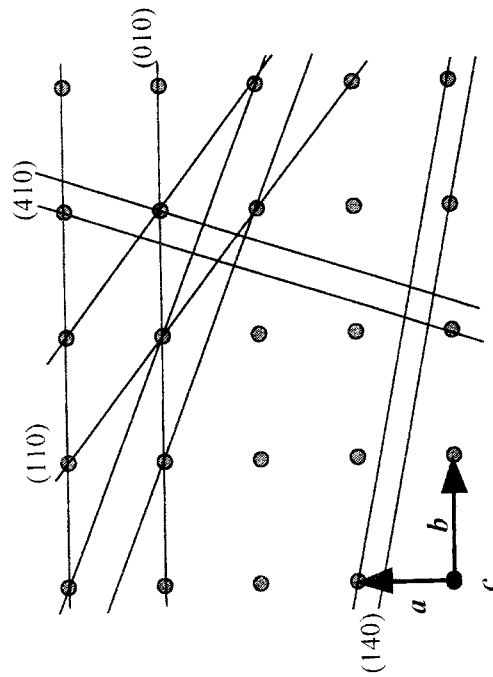


Рис. 6.1. Некоторые системы отражающих плоскостей в кристаллической решетке. Плоскости отмечены соответствующими индексами Миллера.

Трансляционными векторами решетки являются вектора a , b и c , где вектор c направлен перпендикулярно плоскости рисунка

$$I = I_0 \frac{\sin^2 N_1 \Psi_1 \sin^2 N_2 \Psi_2 \sin^2 N_3 \Psi_3}{\sin^2 \Psi_1 \sin^2 \Psi_2 \sin^2 \Psi_3}, \quad (6.1)$$

где

$$\Psi_1 = \frac{\pi}{\lambda} (S, a), \quad \Psi_2 = \frac{\pi}{\lambda} (S, b), \quad \Psi_3 = \frac{\pi}{\lambda} (S, c), \quad S = S_1 - S_0. \quad (6.2)$$

В формуле (6.2) S_1 и S_0 — единичные вектора падающей и отраженной волн.

При выводе формул (6.1 — 6.2) предполагается, что все рассеивающие центры идентичны и находятся в строго фиксированных местах решетки, а также пренебрегается взаимодействием между рассеянной и падающей волнами и эффектами поглощения и многократного рассеяния.

Проанализируем выражение для интенсивности, рассматривая отдельно любой из сомножителей в (6.1). Рассмотрим Ψ_1 для h — целое число или нуль, множитель

$$\sin^2 N_1 \Psi_1$$

принимает максимально возможное значение,

равное по величине $(N_1')^2$. При значениях параметра

$$\Psi_1 = \left(h + \frac{2p+1}{2N_1} \right) \pi, \quad p = \pm 1, \pm 2, \dots$$

этот сомножитель имеет

максимумы меньшей амплитуды, не превышающие 0,05 от максимума главного максимума. Отметим, что аналогичный эффект справедлив и в случае обычной дифракционной решетки.

Если выполняются условия Лауэ

$$(S, a) = H\lambda, \quad (S, b) = K\lambda, \quad (S, c) = L\lambda, \quad (6.3)$$

то H , K , L — целые числа, то интенсивность рассеянной волны (6.1) максимальна:

$$I_{\max} = I_0 (N_1')^2 (N_2')^2 (N_3')^2 = I_0 N^2. \quad (6.4)$$

При этом каждый из сомножителей в формуле (6.1) достигает своего максимального значения.

Условия (6.3) имеют простой геометрический

смысл. Пусть α , β и γ — углы, которые образует вектор S с трансляционными векторами a , b , c . Если n является общим делителем чисел H , K , L , так что $H = nh$, $K = nk$, $L = nl$, то

$$\cos \alpha : \cos \beta : \cos \gamma = \frac{H}{a} : \frac{K}{b} : \frac{L}{c} = \frac{h}{a} : \frac{k}{b} : \frac{l}{c}.$$

Поскольку h , k , l — целые числа, то S является нормалью к семейству плоскостей, параллельных с индексами h , k , l . В теории рассеяния рентгеновских лучей расположение кристаллических плоскостей принято характеризовать индексами Миллера, состоящими из трех целых чисел. Чтобы получить индексы Миллера, нужно провести нормаль к исследуемым плоскостям и сиректиро-

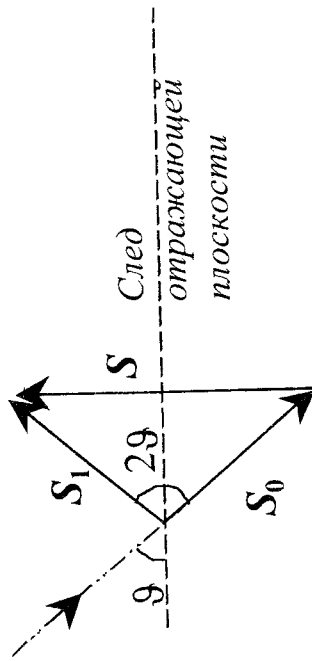


Рис. 6.2. Взаимное расположение отражающей плоскости и векторов S_1 , S_0 и S

вать ее на трансляционные вектора решетки. Полученные проекции следует умножить на некоторое число, подобранное так, чтобы все проекции выражались целыми числами (рис. 6.1).

Условия (6.3) определяют не только направление, но и величину вектора S при выполнении условий дифракции. Межплоскостное расстояние для плоскостей типа (hkl) равно $d(hkl) = \frac{a}{h} \cos \alpha = \frac{b}{k} \cos \beta = \frac{c}{l} \cos \gamma$. Легко видеть, что плоскость (hkl) можно рассматривать как плоскость, которая отражает падающую волну S_0 в направлении S_1 (рис. 6.2).

Модуль вектора $S = S_1 - S_0$ можно записать в виде $S = 2 \sin \theta$. Тогда условия дифракции Лауэ (6.3) можно переписать в виде

$$(S, a) = 2a \sin \theta \cos \alpha = 2d(hkl) \sin \theta = n\lambda, \quad (6.5)$$

Уравнение (6.5) представляет собой известный закон Вульфа-Брэгга. Отметим, что часто формула (6.5) выводится в модели, описывающей рассеяние рентгеновских лу-

чей как интерференцию волн, отраженных различными плоскостями.

Таким образом, дифракционный луч заметной интенсивности возникает в том случае, когда вектор S оказывается направленным по нормали к некоторому семейству плоскостей типа (hkl) в кристалле. Кроме того, одновременно должно соблюдаться условие (6.5), связывающее между собой величину межплоскостного расстояния этого семейства и длину волны излучения.

Обратная решетка

Если кристаллическая решетка является решеткой в обычном пространстве, то обратная решетка — это решетка в пространстве Фурье. Связь между радиусом-вектором обычной решетки $\rho_{mp} = ma + nb + pc$ и радиусом-вектором обратной решетки $H_{hkl} = \xi a^* + \eta b^* + \zeta c^*$ имеет вид $\exp(i2\pi H_{hkl} \rho_{mp}) = 1$. (6.6)

Можно показать, что обратная решетка обладает следующими свойствами:

1) радиус-вектор $H_{hkl} = ha^* + kb^* + lc^*$ узла (hkl) обратной решетки перпендикулярен к плоскостям (hkl) прямой решетки;

2) по абсолютной величине вектор обратной решетки H_{hkl} (с целочисленными индексами h, k, l) равен обратной величине межплоскостного расстояния плоскостей (hkl) прямой решетки.

С учетом этих свойств обратной решетки уравнение (6.5) можно представить в компактном виде:

$$\frac{S}{\lambda} \cdot \frac{S_1 - S_0}{\lambda} = H_{hkl} \quad \text{или} \quad 2 \sin \theta = H_{hkl}. \quad (6.7)$$

Чтобы графически выразить уравнение (6.7) можно пользоваться построением Эвальда (рис. 6.3). Отложим от начала координат обратной решетки (точки O) отрезок длиной $1/\lambda$ в направлении, противоположном вектору S_0 , и построим

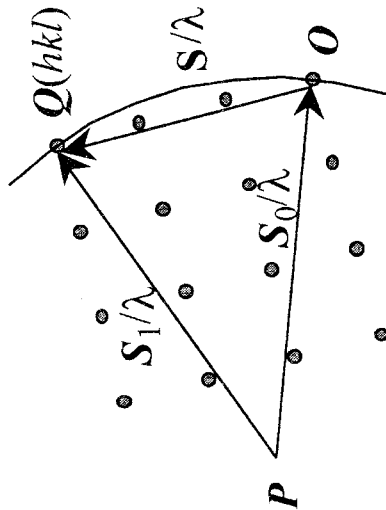


Рис. 6.3. Нахождение дифракционного максимума с помощью обратной решетки и сферы Эвальда. Точками изображены узлы обратной решетки

точку P . Вектор PO , очевидно, равен вектору S_0/λ и определяет направление распространения падающей волны. Опишем вокруг точки P сферу радиусом $1/\lambda$. Если какой-либо узел $Q(hkl)$ обратной решетки попадет на эту сферу, то для треугольника POQ удовлетворится условие (6.7). Вектор PQ по длине равен $1/\lambda$, а направление его находится из соотношения

$$PQ = \frac{S_1}{\lambda} + \frac{S_0}{\lambda}.$$

Формула Селякова–Дебая–Шерера. Ширина дифракционного пика

Пусть при некотором угле ϑ_0 (см. рис. 6.2) наблюдается пик интенсивности (рефлекс), тогда ширина этого рефлекса $\Delta(2\vartheta)$ дается формулой Селякова–Дебая–Шерера:

$$\Delta(2\vartheta) = \frac{\lambda}{D \cos \vartheta_0}, \quad (6.8)$$

где D — ширина размер кристалла. Выбор масштаба независимой переменной 2ϑ поясняется в следующем разделе о статистическом экспериментальной установки.

Рассмотрим вывод формулы (6.8). Соотношение между интенсивностью рассеяния в направлении λ и координатами точек, через координаты ξ , η и ζ обратных узлов кристалла

$$I = I_0 \sin^2 N_1 \pi \xi \sin^2 N_2 \pi \eta \sin^2 N_3 \pi \zeta, \quad (6.9)$$

можно получить очевидные соотношения

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{\pi}{\lambda} (S, a) = \pi \xi, \\ V_2 &= \frac{\pi}{\lambda} (S, b) = \pi \eta, \\ V_3 &= \frac{\pi}{\lambda} (S, c) = \pi \zeta. \end{aligned} \quad (6.10)$$

Соотношения дифракционный максимум в форме (6.3) можно записать в виде условия, что ξ , η , ζ представляют целые числа h , k , l , где hkl — индексы узла обратной решетки. При целочисленных значениях ξ , η , ζ равенство (6.9) дает выражение для интенсивности в точке ξ , η , ζ дифракционного пространства, лежащей между его узлами.

Возьмем ось a' первый минимум будет наблюдаться при $V_1 = \pi$, $N_1 h = \pi$. Тогда полуширину основного максимума можно найти из соотношения $\Delta \xi = \xi - h = 1/N_1$.

Таким образом, с каждой точкой обратной пропорции может быть сопоставлена интенсивность рассеяния. При этом интенсивность может заметно отличаться от нуля не только точно в узле обратной решетки, но и в некоторой области вблизи этого узла:

$$\Delta \xi = \frac{1}{N_1}, \quad \Delta \eta = \frac{1}{N_2}, \quad \Delta \zeta = \frac{1}{N_3}. \quad (6.11)$$

Таким образом, ширина дифракционного максимума определяется характерными размерами кристалла, то есть полным числом рассеивающих центров N_1 , N_2 и N_3 вдоль осевых кристаллографических направлений.

Рассмотрим отражение от системы плоскостей ($h00$) кристалла. Согласно формуле (6.7) и выражению для радиуса-вектора обратной решетки мы имеем

$$\frac{S_1 - S_0}{\lambda} = H_{\xi 00} = \frac{2 \sin \vartheta}{\lambda}, \quad (6.12)$$

$$H_{\xi 00} = \xi a_1^*.$$

Продифференцировав левую и правую части формулы (6.12), получим

$$\Delta H_{\xi 00} = \Delta \xi \cdot a_1^* = \frac{1}{N_1} \cdot a_1^* \cdot 2 \cos \vartheta \cdot \Delta \vartheta.$$

Обозначая линейный размер кристалла через $D = N_1 / a_1^*$, после несложных преобразований получим искомое соотношение (6.8).

6.2. Экспериментальная установка (модель кристалла, устройство гониометра)

Модель кристалла

Моделью кристалла служит пространственная решетка из металлических проволок (диаметр проволок составляет $d_w = 420$ мкм). В отличие от реального кристалла, модельный кристалл в задаче рассеяния является двумерным, элементарная ячейка которого представляет собой квадрат со стороной $d = 2.29$ мм (рис. 6.4).

Для того чтобы электромагнитное излучение эффективно рассеивалось моделью кристалла, необходимо ориентировать вектор электрического поля в волне параллельно проволокам. В этом случае в каждой проволоке будет наводиться переменный ток, и она будет представлять собой вто-

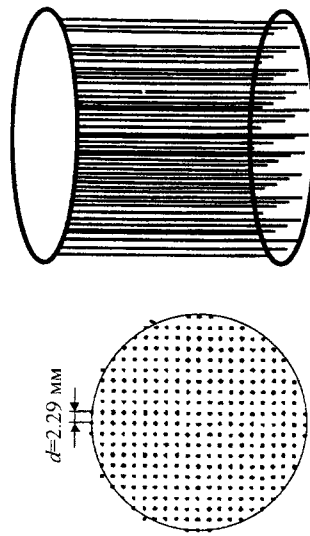


Рис. 6.4. Модель кристалла

ринный диполь. Если рассматривать поле излучения в плоскости, перпендикулярной проволокам, то задача рассеяния будет аналогична описанной в предыдущем разделе. При этом формула (6.1) будет содержать два сомножителя.

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка (рис. 6.5) состоит из генератора электромагнитного излучения, приемника, двух фокусировочных линз с фокусными расстояниями $F = 60$ мм и гониометра с кристаллом. Излучение от генератора фокусируется линзой, формирующей квазипараллельный пучок, падает на модель кристалла, установленный на гониометре. Приемник и вторая линза расположены на подвижной направляющей, вращением которой можно менять угол наблюдения дифракции.

В эксперименте снимается зависимость рассеянного кристаллом излучения I от угла поворота подвижной направляющей 2θ . Угол 2θ изменяется в пределах $180^\circ \pm 20 \leq 180^\circ$. Гониометр устроен таким образом, что при повороте направляющей на угол 2θ кристалл поворачивается в ту же сторону на угол θ , причем изначально кристалл можно ориентировать на некоторый угол ϕ относительно подвижной шкалы гониометра. Это обеспечивает соответствие геометрии опыта, показанной на рис. 6.6: модель

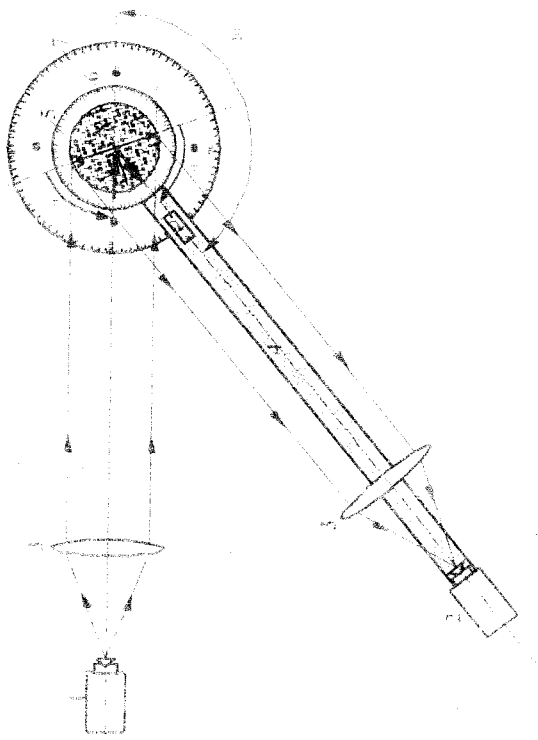


Рис. 6.5. Схема экспериментальной установки. 1 – генератор,

2 – приемник, 3 – тefлоновые линзы ($F = 60$ мм),

4 – подвижная направляющая, 5 – гониометр,

6 – подвижная шкала (θ , $-90^\circ \leq \theta \leq +90^\circ$), 7 – неподвижная шкала (2θ , $-180^\circ \leq 2\theta \leq +180^\circ$), 8 – кристалл

кристалла фиксирована относительно горизонтальной оси (ось $O-O$ повернута на угол ϕ); излучение от генератора падает на кристалл под углом θ к оси $O-O$, а приемник регистрирует сигнал под тем же углом θ .

Упражнение 6.1. Изучение дифракции на кристалле

1. Соберите установку по схеме рис. 6.5 без кристалла, отъюстируйте установку до получения максимального сигнала на приемнике, при этом направляющая должна находиться в нулевом положении ($\theta = 0^\circ$).

2. Установите кристалл, под углом $\phi = 0^\circ$. Вращая руку гониометра с приемником, регистрируйте интенсив-

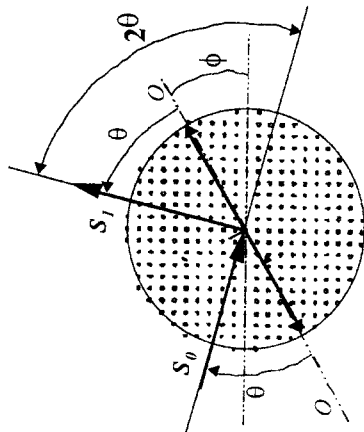


Рис. 6.6. Измерения $I(\theta)$

ность излучения, падающего на приемник как функцию угла 2θ .

ВНИМАНИЕ! При работе следите за тем, чтобы не загораживать рукой пучок излучения, иначе показания будут искажены.

3. Постройте график зависимости интенсивности I от угла θ .

Упражнение 6.2. Изучение дифракции на кристалле

Снимите аналогичные зависимости $I(\theta)$ при значении углов $\phi = 30^\circ; 45^\circ$.

Упражнение 6.3. Обработка экспериментальных данных

1. По данным, полученным в упражнениях 1 и 2, произведите идентификацию отражающих плоскостей для данного рефлекса θ_0 .

УКАЗАНИЕ. Учтите, что положение плоскостей известно (они параллельны оси $O-O$). При этом межплоскостное расстояние d ратно некоторому минимальному межплоскостному расстоянию: $d = md_{\min}$. Поэтому величина d может

быть найдена путем варьирования m и n (n — порядок дифракции) в условии Вульфа-Брегга (6.5):

$$\frac{m}{n} = \frac{\lambda}{2d_{\min} \sin \theta_0}$$

2. Для наиболее сильных рефлексов (для данного ϕ) подсчитайте значения интенсивностей, используя формулу (6.1). Сравните вычисленные отношения с экспериментальными значениями, определенными из графиков $I(\theta)$. Объясните полученные результаты.

3. Используйте формулу Селякова-Дебая-Шерера (6.8), рассчитайте полуширину $\Delta(2\theta)$ рефлексов максимальной амплитуды и сравните это значение с экспериментальным. Проанализируйте, какие факторы могут влиять на ширину дифракционного пика.

РАБОТА № 7. ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ТИТАНАТА СТРОНЦИЯ SrTiO_3 В МИКРОВОЛНОВОЙ ОБЛАСТИ

7.1. Сегнетоэлектрики

Некоторые диэлектрические кристаллы в определенной области температур спонтанно поляризованы в отсутствие электрического поля. На границе этой температурной области они испытывают фазовый переход в кристаллические модификации, в которых спонтанная поляризация не наблюдается. Такие диэлектрики называются сегнетоэлектриками.

Особенностью сегнетоэлектрических фазовых переходов является такое изменение взаимного расположения ионов, составляющих кристалл, которое приводит к возникновению или исчезновению в кристалле спонтанной поляризации.

Поясним это на классическом примере сегнетоэлектрика — титанате бария (BaTiO_3). Элементарная ячейка высоко симметричной (кубической) фазы BaTiO_3 , изображенная на рис. 7.1а, содержит одну “молекулу” BaTiO_3 , которая не обладает дипольным моментом. Поэтому кристалл не имеет поляризации в кубической фазе.

При понижении температуры в точке фазового перехода II-го рода BaTiO_3 $T_C \approx 120^\circ\text{C}$ симметрия кристалла понижается от кубической до тетрагональной, сопровождаясь смещением ионов Ti^{4+} вдоль оси четвертого порядка. Такое изменение кристаллической структуры приводит к возникновению поляризации, величина которой пропорционально величине сдвига иона Ti^{4+} из симметричного положения, и появлению связанных зарядов на поверхности образца, создающих внешнее электрическое поле. Эту поля-

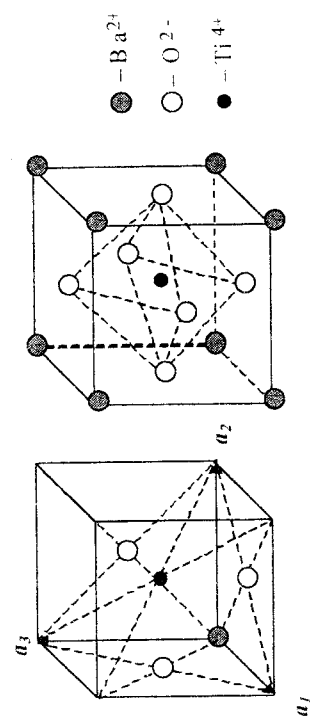


Рис. 7.1. Элементарная ячейка (а) и элемент структуры (б) кристалла BaTiO₃.

ризацию называют спонтанной (самопроизвольной), а сегнетоэлектрическим фазовым переходом — переход, сопровождающийся появлением спонтанной поляризации.

Одна из характерных особенностей сегнетоэлектриков связана с аномально большими значениями диэлектрической проницаемости ϵ в полярной фазе. В неполярной фазе сегнетоэлектрик ведет себя как обычный диэлектрик, в котором поляризация пропорциональна электрическому полю.

Поляризуемость α и диэлектрическая проницаемость ϵ сегнетоэлектриков в неполярной фазе меняются с температурой. В области температур выше точки фазового перехода, называемой точкой Кюри, зависимость диэлектрической проницаемости ϵ сегнетоэлектрика от температуры T определяется законом Кюри-Вейсса:

$$\epsilon = \frac{\text{const}}{T - T_C}, \quad (7.1)$$

где T_C — температура Кюри.

Соотношение (7.1) показывает, что в окрестности точки фазового перехода величина ϵ , характеризующая сегнетоэлектрик, аномально велика и в неполярной фазе. Таким образом, фазовый переход в сегнетоэлектрике сопровождается значительной аномалией диэлектрической проницаемости

ϵ . Количественное описание сегнетоэлектрических явлений дает феноменологическая теория фазовых переходов второго рода в кристаллах.

В данной лабораторной работе на примере кристалла титаната стронция SrTiO₃ изучаются оптические свойства сегнетоэлектриков, определяется зависимость показателя преломления сегнетоэлектрика в неполярной фазе от его температуры.

7.2. Описание криостата

Криостат, используемый в настоящей работе, предназначен для исследования квазиоптических характеристик (миллиметровый диапазон длин волн) различных образцов в диапазоне температур $77 \text{ K} < T < 300 \text{ K}$ (от температуры жидкого азота до комнатной температуры).

Схема криостата приведена на рис. 7.2. В качестве хладагента в криостате используется жидкий азот, заливаемый в азотный объем 1 через заливочную горловину 2. Пары из азотного объема отводятся через клапан 3. Подача жидкого азота в рабочую камеру 4 производится через перепускную трубку 5 и регулируется игольчатым вентилем 6. Клапан 3 обеспечивает небольшое избыточное давление в азотном объеме, которое необходимо для эффективного перетекания азота в рабочий объем.

Для уменьшения подвода тепла от окружающей среды к азотному объему и рабочей камере используется экранно-вакуумная теплоизоляция. Откачка вакуумной полости производится вакуумным насосом через вентиль 7.

Вставка с образцом помещается в рабочую камеру 4. Вакуумное уплотнение 8 предотвращает конденсацию воздуха в рабочей камере. Возможность перемещения вставки в вертикальном направлении позволяет выдвигать образец из оптического тракта при юстировке схемы, герметичность рабочей камеры при этом обеспечивается с помощью сальникового уплотнения 9.

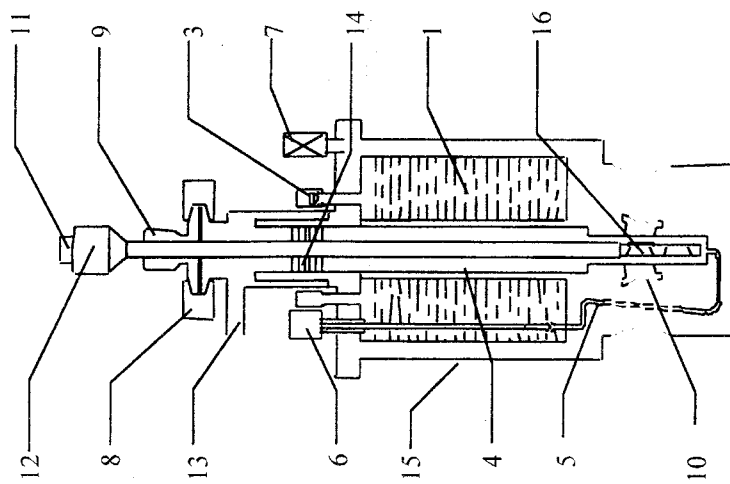


Рис. 7.2. Схема криостата. 1 – азотный объем, 2 – заливочная горловина, 3 – клапан, 4 – рабочая камера, 5 – перепускная трубка, 6 – игольчатый вентиль, 7 – вентиль вакуумной откачки, 8 – вакуумное уплотнение, 9 – сальниковое уплотнение, 10 – лавсановые окна, 11 – электрический разъем 12 – вставка с образцом, 13 – патрубок для отвода паров, 14 – теплоизоляционные экраны, 15 – корпус, 16 – ячейка с образцом

Для ввода излучения в криостат используются две пары окон 10 из лавсановой пленки.

Вставка с образцом изображена на рис. 7.3. Для удобства юстировки оптической схемы в ней предусмотрено

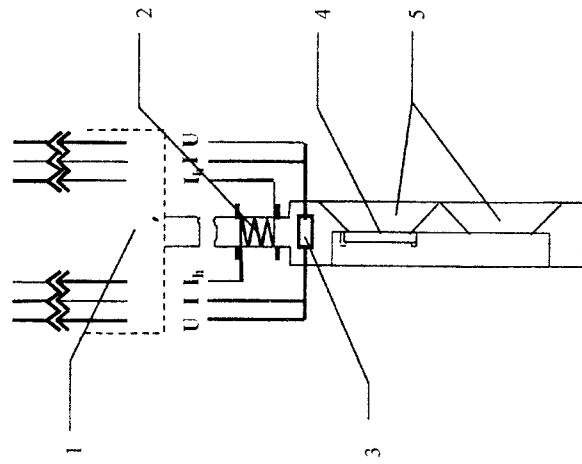


Рис. 7.3. Схема вставка с образцом. 1 -- электрический разъем, 2 -- нагревательная катушка, 3 -- термометр сопротивления, 4 -- образец, 5 -- диафрагмы

две диафрагмы 1, одна из которых пустая, а в другой помещен образец 2.

В качестве нагревателя 3 используется катушка из константанового провода.

Температура образца измеряется платиновым термометром сопротивления 4, принцип работы которого основан на зависимости электрического сопротивления проводников от температуры (в рабочем диапазоне температур $77 \div 300$ К сопротивление платины приблизительно пропорционально абсолютной температуре).

Сопротивление термометра при температуре T определяется как

$$R_T = \frac{U}{I}, \quad (7.2)$$

где U – разность потенциалов на выводах термометра сопротивления, В; I – сила тока, протекающего через термометр сопротивления, А.

Использование четырехточечной схемы измерения сопротивления позволяет исключить влияние подводящих проводов на точность определения температуры. Абсолютное значение температуры находится по таблице, прилагаемой к установке.

Провода от вставки с образцом (2 провода от нагревателя и 4 от термометра сопротивления) выводятся из криостата через электрический разъем 5 для подключения к измерительным приборам:

- вольтметру (для измерения разности потенциалов на выводах термометра сопротивления);
- источнику тока термометра сопротивления;
- амперметру (для измерения силы тока);
- источнику тока нагревателя.

7.3. Установка для исследования оптических характеристик в миллиметровом диапазоне длин волн

Схема установки изображена на рис. 7.4. Излучение от генератора 1 фокусируется на образец тефлоновой линзой 2 и затем, пройдя сквозь криостат 3 и систему фокусирующих линз, попадает в приемник 4. Сигнал с приемника регистрируется электронным блоком 5. Измерительные приборы 6 подключаются к криостату через электронный разъем 7.

В эксперименте регистрируется зависимость пропускания образца от его температуры.

7.4. Оптическая схема

Многолучевая интерференция

Рассмотрим плоскопараллельную пластину толщиной d и с показателем преломления n .

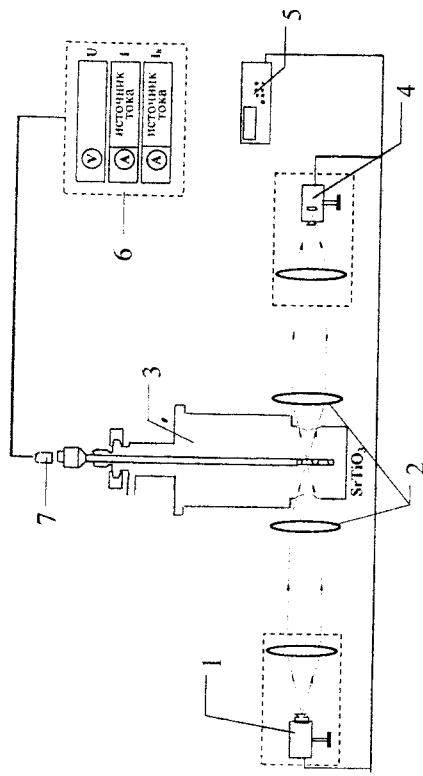


Рис. 7.4. Схема установки. 1 – генератор с линзой $F = 60$ мм, 2 – тефлоновые линзы $F = 80 \div 120$ мм, 3 – криостат,

4 – приемник с линзой $F = 60$ мм, 5 – электронный блок,

6 – измерительные приборы, 7 – электронный разъем

Пусть на пластину падает плоская монохроматическая волна с длиной волны λ . На поверхностях пластины будут возникать многократные отражения, и все отраженные лучи будут интерферировать между собой.

В результате такой интерференции интенсивность прошедшего через пластину излучения $I^{(0)}$, определяется соотношением

$$I^{(0)} = \frac{T^2}{(1-R)^2 + 4R\sin^2 \delta} I^{(i)},$$

а пропускание пластины $T^{(np)}$ выражением

$$T^{(np)} = \frac{I^{(0)}}{I^{(i)}} = \frac{T^2}{(1-R)^2 + 4R\sin^2 \delta}, \quad (7.3)$$

где $I^{(i)}$ и $I^{(0)}$ – интенсивности падающей и прошедшей волн; R и T – соответственно коэффициенты отражения и пропускания поверхностей пластины (R – квадрат отношения ампли-

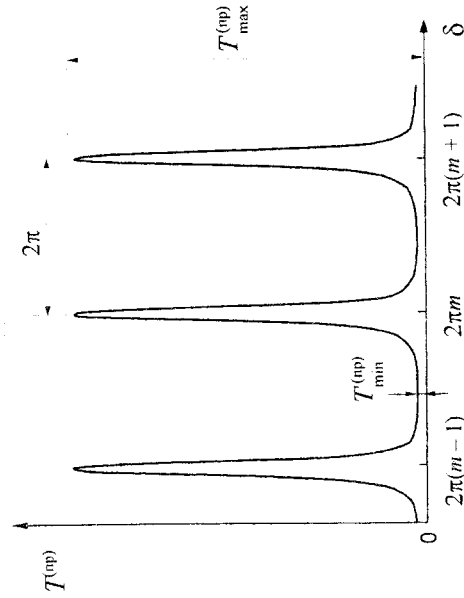


Рис. 7.5. График зависимости пропускания пластины $T^{(op)}$ от разности фаз δ

туд отраженной и падающей волн, T – квадрат отношения амплитуд прошедшей и падающей волн). В отсутствие поглощения на поверхности R и T связаны соотношением $R + T = 1$, а разность фаз δ дается формулой

$$\delta = \frac{4\pi d n}{\lambda} \quad (7.4)$$

График зависимости пропускания пластины $T^{(op)}$ от разности фаз δ изображен на рис. 7.5. Отметим, что интенсивность прошедшего через пластину излучения достигает максимального значения при условии $\delta/2 = \pi m$, $m = 1, 2, 3, \dots$

Зависимость показателя преломления сегнетоэлектрика от температуры

Поскольку в данном эксперименте изучается сегнетоэлектрик – кристалл SrTiO_3 , то его показатель преломления n связан с диэлектрической проницаемостью ϵ соотношением $n = \sqrt{\epsilon}$, которое вместе с формулой (7.1) принимает вид

$$n = \sqrt{\frac{C}{T - T_c}} \quad (7.5)$$

где C – некоторая постоянная. При изменении температуры образца, мы варьируем значение показателя преломления n согласно формуле (7.5), и, следовательно, мы изменяем величину разности фазы δ . Следует заметить, что входящие в выражение (7.3) величины R и T также в действительности зависят от температуры образца.

В данном эксперименте измеряется зависимость пропускания $T^{(op)}$ от температуры образца T (температура образца меняется от $T_1 \approx 77$ К до $T_2 \approx 300$ К). Вид этой зависимости изображен на рис. 7.6. Отметим, что интенсивность прошедшего через пластину излучения достигает максимального значения при условии $\delta/2 = \pi m$, $m = 1, 2, 3, \dots$

Используя выражение для разности фаз (7.4) условие интерференционных максимумов примет вид

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{4\pi d}{\lambda} n(T) = \pi m, \quad m = 1, 2, 3, \dots,$$

или

$$n(T) = \frac{\lambda}{2d} m, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (7.6)$$

С учетом закона Кюри–Вейсса (7.5) выражение (7.6) преобразуется к виду

$$m = f\left(\frac{1}{\sqrt{T - T_c}}\right) = \left(\frac{\lambda}{2d} C\right)^{1/2} \frac{1}{\sqrt{T - T_c}} = A \frac{1}{\sqrt{T - T_c}}, \quad (7.7)$$

где

$$A = \frac{\lambda}{2d} C.$$

Для выполнения работы необходимо построить график температурной зависимости показателя преломления $n(T)$ образца и сравнить его с теоретической зависимостью (7.5).

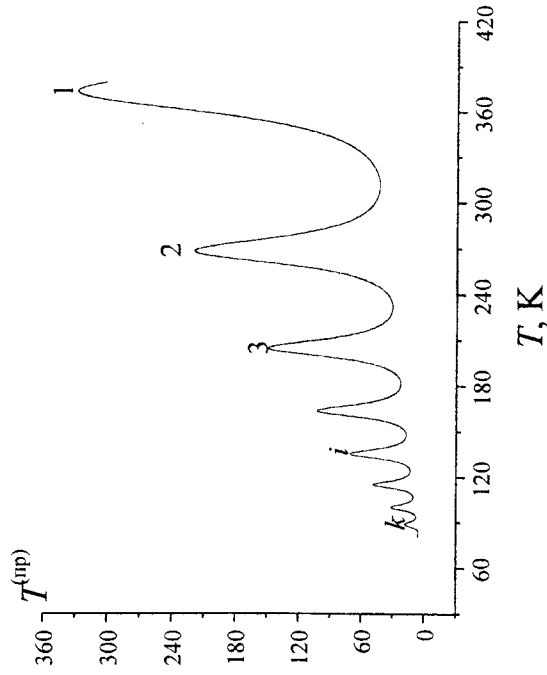


Рис. 7.6. График зависимости пропускания пластины $T^{(пр)}$ от температуры образца T

Пусть температурная зависимость интенсивности прошедшего через пластину излучения имеет k максимумов (рис. 7.6), каждому из которых соответствуют определенные значения температуры T_i и параметра m_i . Пронумеруем максимумы индексом i таким образом, что 1-му пика будет отвечать максимальная температура, а k -му – минимальная (рис. 7.6). Согласно соотношению (7.7) имеем

$$m_i = A \frac{1}{\sqrt{T_i - T_c}} \quad (7.8)$$

Если мы определим истинное значение параметра m_i для каждой точки T_i , то тем самым получим k точек дискретной зависимости $n = f(T_i)$, $i = 1, 2, \dots, k$.

Для этого поступим следующим образом. Истинное значение параметра m равно

$$m_i = i + m^*, \quad i = 1, 2, \dots, k, \quad (7.9)$$

где m^* – неизвестная поправка. Согласно формуле (7.8) соотношение (7.9) преобразуется к виду

$$i = A \frac{1}{\sqrt{T_i - T_c}} - m^*, \quad i = 1, 2, \dots, k. \quad (7.10)$$

Из (7.10) следует, что линейная аппроксимация зависимости параметра i от величины $1/\sqrt{T_i - T_c}$ позволяет определить как величину m^* , равную модулю наименьшего значения целочисленного параметра i при $1/\sqrt{T_i - T_c} \rightarrow 0$, так и постоянную C ($A = \frac{\lambda}{2d} C = \text{tg} \alpha$, где α – угол наклона прямой).

При этом предполагается, что толщина пластины d , длина волны λ и температура T_c известны (см. упр. 7.3).

Таким образом, используя описанную выше последовательность действий, можно получить истинное значение параметра $m_i = i + m^*$ для i -го пика ($i = 1, 2, \dots, k$) и, как следствие, зависимость показателя преломления от температуры

$$n(T_i) = \left(\frac{\lambda}{2d} \right) \cdot m_i = f(T_i).$$

7.5. Исследование зависимости показателя преломления кристалла SrTiO_3 от температуры

Упражнение 7.1

1. Соберите установку по схеме рис. 7.4. Рекомендуемая последовательность юстировки:

- а) генератор 1 – приемник 4;
- б) тефлоновые линзы 2;

в) криостат 3.

2. При поднятой вставке (в оптическом тракте находится пустая диафрагма) отъюстируйте установку до получения максимального сигнала. Обратите внимание на то, что диафрагма вставки должна находиться в фокальной плоскости тefлоновых линз 2.

Упражнение 7.2

1. Подсоедините к электрическому разъему криостата кабель. Соберите электрическую схему измерений.

2. Через заливочную горловину залейте в криостат жидкий азот.

3. Опустите образец в оптический тракт.

4. Следуя за показаниями термометра, медленно откройте игольчатый вентиль. Степень открытия вентиля определяет скорость охлаждения образца. Поддерживая скорость охлаждения в пределах $2 \div 3$ К/мин, снимите зависимость пропускания $I(T)$ образца от температуры, периодически контролируя величину регистрируемого сигнала без образца $I^{(0)}$. Проведите измерения до температуры жидкого азота.

ВНИМАНИЕ! При измерениях в процессе охлаждения ток через нагреватель должен быть выключен.

5. Закройте игольчатый вентиль 6. Включите ток, через нагреватель. Регулируя величину тока, снимите зависимость интенсивности излучения, прошедшего через образец, от температуры при нагреве $2 \div 3$ К/мин.

Упражнение 7.3

1. Постройте график зависимости пропускания $T^{(np)} = \frac{I^{(0)}}{I^{(0)}}$ от температуры образца.

2. Следуя указаниям пункта 7.4, постройте график зависимости $n = f(T)$. Определите значения показателя преломления SrTiO_3 при $T = 77$ К, 300 К.

УКАЗАНИЕ. Длина волны излучения $\lambda = 2,14$ мм, толщина пластины: $d = 0,4$ мм, температура Кюри для кристалла SrTiO_3 : $T_C = 40$ К.

3. Сравните полученную кривую с теоретической зависимостью (7.5).

4. Объясните экспериментальные результаты.

V. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОБРАБОТКЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Одной из целей настоящего практикума является обучение студентов "технологии" сравнения полученных в ходе выполнения работ экспериментальных данных с результатами теоретических расчетов. Поскольку большинство данных представляется в виде соответствующих зависимостей, при оформлении работ практикума рекомендуется использовать современные пакеты для обработки данных на персональных компьютерах. К числу удачных программ, приспособленных для решения задач экспериментальной физики, следует отнести программу Origin фирмы Microcal Software (рекомендуется использовать версии 3.5 и старше), работающую в среде Microsoft Windows. Программа Origin позволяет заносить экспериментальные данные в таблицы (worksheets), столбцы которых играют роль независимых и зависимых переменных, а строка с номером i дает координаты точек $X_i, Y_{1i}, Y_{2i}, \dots, Y_{ni}$, причем каждая из зависимостей $Y_1(X), Y_2(X), \dots, Y_n(X)$ может быть построена и математически обработана независимым образом. Выделив столбец щелчком мыши на его заглавной ячейке, можно изменить его значение, сделав его независимой или зависимой переменной (пункт меню "set as..."). После выделения столбца зависимой переменной Y_k вызов пункта меню "Plot" позволяет немедленно получить график функции $Y_k(X)$, который можно распечатать на принтере.

Каждый элемент графика, включая диапазон, тип, подпись и масштаб оси можно изменить, дважды щелкнув мышью по соответствующему элементу, после чего будет отображено контекстное меню. Характер отображения данных (точки, линия, точки и соединительная линия, символы-точки) можно изменить, дважды щелкнув по экспери-

ментальной кривой или по соответствующему символу легенды.

В основе отображения графиков в программе Origin используется концепция слоев. Каждый слой можно представить себе в виде прозрачной пленки, на которой нарисован график (или несколько графиков) $Y(X)$. Существенно, что X и Y в различных случаях могут быть как связанными (linked) (например, общая ось X), так и независимыми. В последнем случае возможно независимое масштабирование картинок, отвечающих различным слоям. Это позволяет представлять сложные наборы данных.

Номера слоев отображаются на функциональных кнопках вверху окна Graph; дважды щелкнув на кнопке соответствующего слоя можно получить доступ к его содержанию и выбрать или изменить наборы данных, которые будут отображаться на картинке слоя в виде графиков. Предусмотрены различные настройки свойств слоя и его трансформации при масштабировании.

При моделировании различных теоретических зависимостей полезным может оказаться пункт меню Set Column Value, который позволяет задавать значение ячейке столбца как функции номера i и (или) по значениям ячеек, отвечающих различным столбцам таблицы.

Сильной стороной программы Origin является широкий набор возможностей математической обработки данных (численное интегрирование и дифференцирование, метод наименьших квадратов, приближение полиномом, приближение нелинейными функциями). В случае необходимости пользователь имеет возможность запрограммировать свою собственную функцию для аппроксимации экспериментальных данных.

Программа Origin содержит также разнообразные оформительские элементы и позволяет снабжать графики подписями, стрелками и линиями и т. п. Интуитивно понятный Windows – подобный интерфейс (выдели объект, после

чего настрой его или трансформируй), а также развивая справочная система делает эту программу легкой в освоении даже без специальных руководств. Некоторые сложности на начальном этапе освоения могут создать не всегда рациональное и "прозрачное" распределение пунктов меню (как правило, относящихся к обработке данных). Однако этот недостаток искупается гибкостью работы с экспериментальными данными и "быстротой" перехода от таблицы данных к готовому графику.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сивухин Д.В.* Оптика. - М.: Наука, 1980. Гл. III, § 36; гл. IV, § 47, 52, 61; гл. IV, § 46.
2. *Сивухин Д.В.* Электричество. - М.: Наука, 1983. Гл. I, § 39.
3. *Лансберг Г.С.* Оптика. - М.: Наука, 1976. Гл. VII, § 30; гл. IX, § 46.
4. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. - М.: Наука, 1973. Гл. 7, § 7.6.
5. *Киттель Ч.* Введение в физику твердого тела. - М.: Наука, 1978. - 620 с.
6. *Иверонова В.И., Ревкевич Г.П.* Теория рассеяния рентгеновских лучей. - М.: МГУ, 1978. Гл. 3, § 1.
7. *Струков Б.А., Леванюк А.П.* Физические основы сегнетоэлектрических явлений в кристаллах. - М.: Наука, 1983. Гл. II.
9. *Техника спектроскопии в дальней инфракрасной, субмиллиметровой и миллиметровой областях спектра / Под ред. Т.М. Лифшица.* - М.: Мир, 1970. Гл. 7.
10. *Девятков М.Н.* Генератор на лавиннопролетном диоде, описание задачи специализированного СВЧ. - М.: Наука, 1972.
11. *Лебедева В.В.* Экспериментальная оптика. - М.: МГУ, 1994. Гл. 5, § 5.4.
12. *Кулиц Х.-И.* Методы физических измерений. - М.: Мир, 1989. § 7.3.5.
13. *Керош Дж.* СВЧ-генераторы на горячих электронах. - М.: Мир, 1972.

Учебное издание

Волков Александр Александрович
Глушков Владимир Витальевич
Горшунов Борис Петрович
Демишев Сергей Васильевич
Козлов Геннадий Викторович
Ритус Александр Иванович
Случанко Николай Ефимович

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

КВАЗИОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ
НА МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ

Редактор *О.П. Котова*
Корректор *И.А. Волкова*

Подписано в печать 25.04.2003. Формат 60 × 84 ¹/₁₆. Бумага офсетн.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 5,3. Уч.-изд. л. 4,6. Тираж 50 экз. Заказ № 304
Московский физико-технический институт
(государственный университет)
НИИ МФТИ

141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9