

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Кафедра прикладной физики

КВАЗИОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ

Часть I

Учебно-методическое пособие

МОСКВА
МФТИ
2013

УДК 537.87:537.86.029
538.958

Рецензент

////////////////////////////////////

Квазиоптические измерения на миллиметровых волнах: учебно-методическое пособие / сост.: В. Б. Анзин, А.А. Волков, В.В. Глушков, Б.П. Горшунов, С.В. Демишев, Е.С. Жукова, Г.В. Козлов, Н.Е. Случанко.— М. : МФТИ, 2013. — 43 с.

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

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

УДК 537.87:537.86.029
538.958

© Федеральное государственное, автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Московский физико-технический институт
(государственный университет)», 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ.....	3
ПРЕДИСЛОВИЕ	5
I. ВВЕДЕНИЕ.	6
II. ОПИСАНИЕ ПРИБОРОВ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА	9
1. Генератор электромагнитных волн миллиметрового диапазона.....	9
2. Пирозлектрический приемник.	10
3. Интерферометр Фабри-Перо миллиметрового диапазона длин волн.....	11
4. Преобразователь поляризации.....	13
5. Дифракционная решетка.	14
6. Приборы для измерения углового распределения дифрагирующего излучения.....	15
6.1. Универсальный измеритель.	15
6.2. Гониометр.....	16
7. Пластина переменной толщины.....	16
8. Пленочный аттенюатор миллиметрового излучения.	17
9. Поглощающая диафрагма.....	18
10. Поглощающий экран.	19
11. Оправа для сеток.	19
12. Держатель образцов.....	21
13. Электронный блок.....	22
14. Исследуемые образцы.	23
III. УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ.....	24
IV. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ.....	25
РАБОТА № 1. ИНТЕРФЕРОМЕТР ФАБРИ-ПЕРО.	25
1.1. Теория интерферометра Фабри-Перо.	25
1.2. Подготовка к проведению эксперимента.....	29
РАБОТА №2. ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕЛОМЛЕНИЯ ПЛАВЛЕННОГО КВАРЦА НА МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ.	31
2.1. Теория метода.....	31

РАБОТА №3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИКА.	33
3.1. Теория метода	33
3.2. Подготовка к проведению измерений.....	35
РАБОТА №4. ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА.	37
4.1. Теория дифракции на решетке	37
РАБОТА №5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ N И K ТВЕРДЫХ ТЕЛ.....	42
5.1. Диэлектрические параметры материалов.	42
5.2. Определение показателей преломления и экстинкции стекла.	42
5.3. Измерение коэффициента отражения слабо поглощающих материалов.	43
5.4. Оптические свойства тонких металлических пленок	44
V. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОБРАБОТКЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ.....	47
ЛИТЕРАТУРА	49

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 комплекта «Оптик», являющегося совместной разработкой ведущих специалистов Института общей физики РАН и МФТИ. Применяемая квазиоптическая методика позволяет осуществить большинство традиционных, а также ряд оригинальных оптических лабораторных экспериментов, включая задачи интерференции/дифракции электромагнитных волн и спектроскопии конденсированных сред.

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

I. ВВЕДЕНИЕ.

Лабораторный практикум “Квазиоптические измерения на миллиметровых волнах” предназначен для студентов физических специальностей, изучающих оптику в курсе общей физики.

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 можно было бы 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 расстояние 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 $10 \div 20$ см.

Необходимо отметить, что перенесение оптических элементов в субмиллиметровый 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 навык 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 занимает 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 охва-

тывают всего многообразия явлений, с которыми придется столкнуться студенту-экспериментатору. Для ответов на поставленные вопросы в ряде случаев потребуются самостоятельное изучение рекомендованной и другой специальной литературы. Мы полагаем, 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 $\lambda \cong 2$ мм (частота 140 ГГц $\pm 1\%$). Ширина диаграммы направленности на выходе из рупора (рупорной антенны) составляет 20° на уровне половины 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 расположен разъем для соединения с источником питания постоянного тока (24В ± 2 В/0,25А). Источник питания входит в состав электрического блока, включающего систему регистрации (см. п. 13 настоящего раздела).

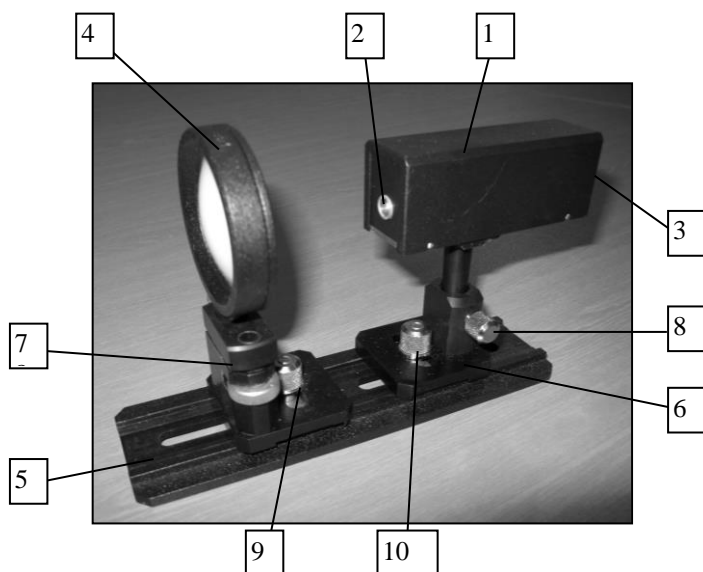


Рис. 1. Генератор с линзой на рельсах. 1 - корпус генератора, 2 - рупор, 3 - разъем, 4 - линза, 5 - рельсы, 6, 7 - рейтеры, 8, - фиксирующая гайка, 9, 10 - фиксирующие винты.

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 тефлоновой линзой диаметром 50 мм и фокусным расстоянием 60 мм. Конструкция допускает перемещение как вдоль рельс (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.

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.

2. Пирозлектрический приемник.

Пирозлектрический приемник (рис. 2) на основе кристалла LiTaO_3 предназначен для регистрации модулированного электромагнитного излучения в области от миллиметрового 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 (или прямоугольном) 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 подсоединения к электронному блоку питания и детектирования (см. п. 13 данного раздела). Пироприемник устанавливается на стержне рейтера с помощью винта М5; рейтер перемещается по рельсам длины 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.

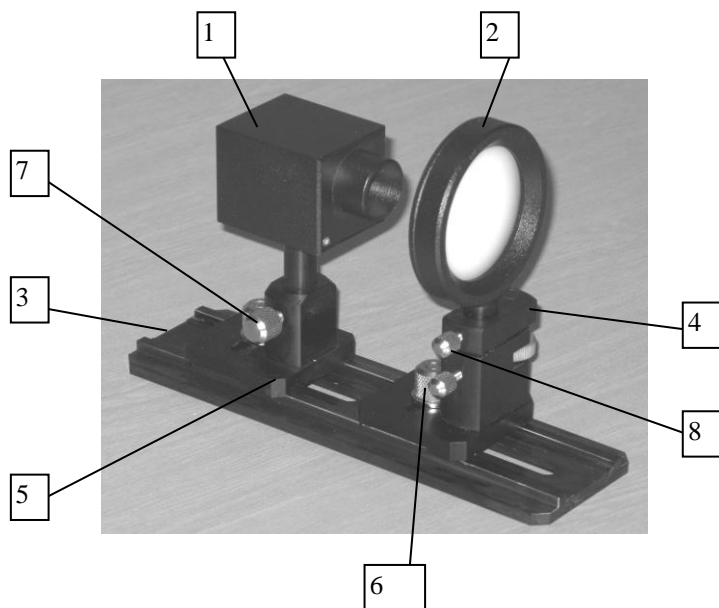


Рис. 2. Пироприемник с линзой на рельсах. 1 - пироприемник; 2 - линза; 3 - рельсы; 4, 5 - рейтеры; 6 - фиксирующая гайка; 7, 8 - фиксирующие винты.

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 до 12 мм.

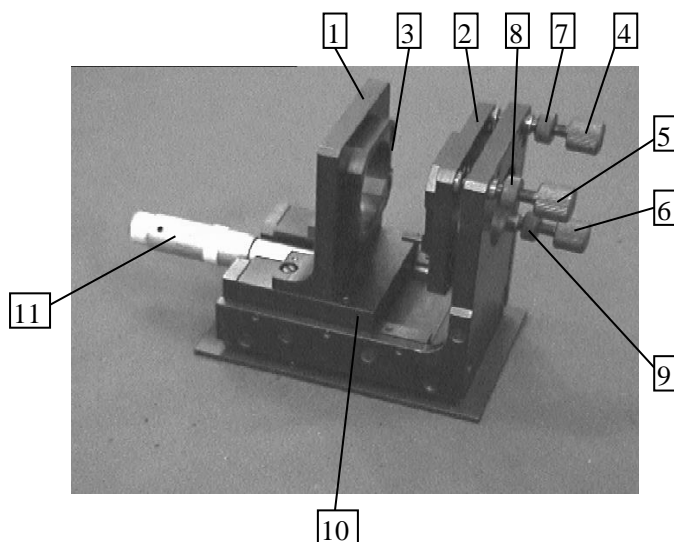


Рис. 3. Интерферометр Фабри-Перо (без зеркал): 1 - подвижный держатель; 2 - неподвижный держатель; 3 - паз с магнитами; 4, 5, 6 - юстировочные винты; 7, 8, 9 - гайки фиксации юстировочных винтов; 10 - салазки; 11 - микрометрический винт.

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 зеркал интерферометра равен 40 мм, что при используемой длине волны ($\lambda \cong 2$ 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 зеркал. Контраст ИФП составляет не менее 10.

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

Габариты интерферометра: 215 мм x 90 мм x 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 падет 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 $d\sqrt{2}$. Таким образом, пучок, отраженный преобразователем в направлении к приемнику, состоит из двух волн с взаимно перпендикулярными поляризациями, с равными амплитудами и разностью фаз $\Delta\phi = 2\pi d\sqrt{2}/\lambda$. Поэтому, меняя расстояние d и, следовательно, разность фаз $\Delta\phi$, можно получить любую поляризацию в этом пучке – линейную, эллиптическую, или круговую.

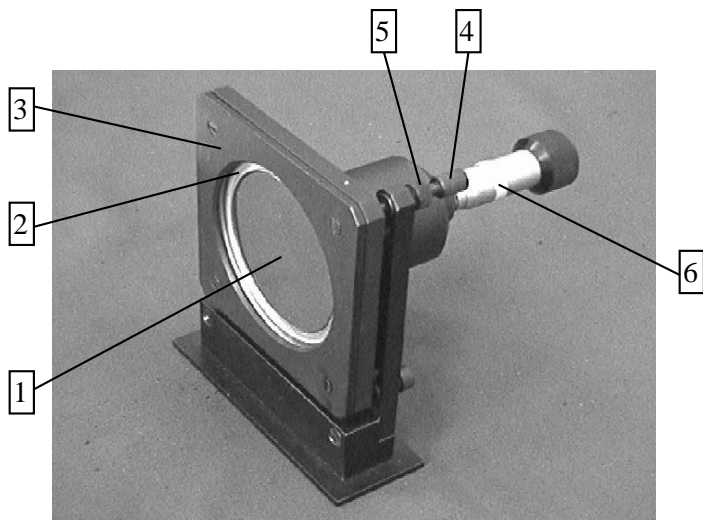


Рис. 4. Преобразователь поляризации. 1 - сплошное металлическое подвижное зеркало, 2 - неподвижное сетчатое зеркало, 3 - держатель сетки, 4 - юстировочный винт, 5 - гайка фиксации юстировочного винта, 6 - микрометрический винт.

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 x 120 мм x 160 мм.

5. Дифракционная решетка.

Дифракционная решетка представляет собой лавсановую пленку с напылёнными металлическими полосками, образующими систему щелей с шагом $d=6$ мм и шириной щели $a=2$ мм (рис. 5). Пленка приклеена к оправке диаметра 98 мм, которая вставлена в круглую рамку. В нижней части рамки имеется отверстие с резьбой М4 для установки на стержень, и прозрачной шкалы, штрих которой перпендикулярен плоскости решетки.

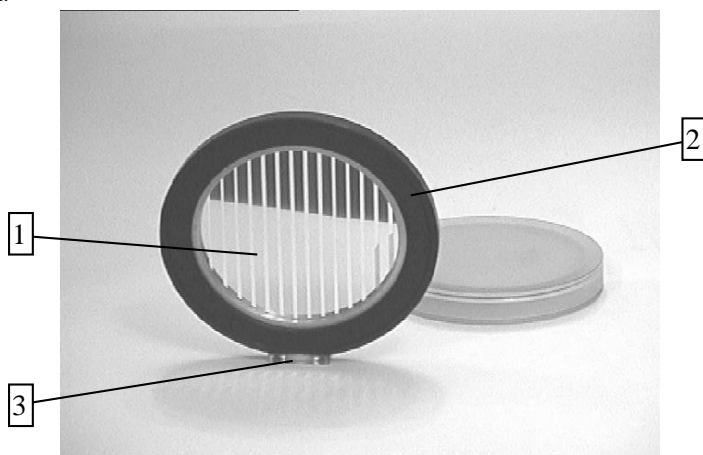


Рис.5. Дифракционная решетка в сборном виде. 1 - решетка, 2 - рамка, 3 - прозрачная шкала.

6. Приборы для измерения углового распределения дифрагирующего излучения.

6.1. Универсальный измеритель.

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

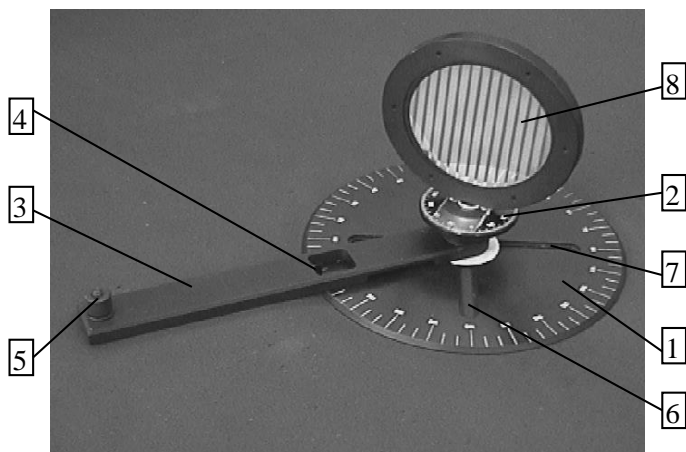


Рис. 6. Прибор для измерения углового распределения дифрагирующего излучения с установленной в нем дифракционной решеткой. 1 - основание с большим лимбом; 2 - маленький лимб на стойке; 3 - направляющая для пироприемника; 4 - указатель угла поворота направляющей; 5 - гайка крепежного болта; 6, 7 - крепежные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

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

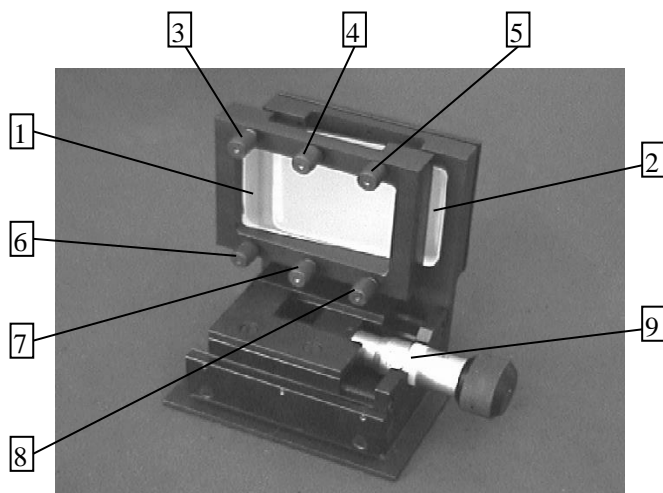


Рис. 7. Пластина переменной толщины. 1 - подвижный клин; 2 - неподвижный клин; 3, 4, 5, 6, 7, 8 - гайки регулировки натяжения пружин; 9 - микрометрический винт.

7. Пластина переменной толщины.

Прибор представляет собой плоскопараллельную пластину, образованную двумя взаимодополняющими клиньями из плавленого кварца. Для уменьшения паразитных отражений соприкасающиеся поверхности клиньев матированы. 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 x 54 мм, максимальное изменение толщины равно 2 мм.

Габариты прибора: 100 мм x 170 мм x 130 мм.

8. Пленочный attenuator миллиметрового излучения.

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

Attenuator рекомендуется помещать в оптическом тракте 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.

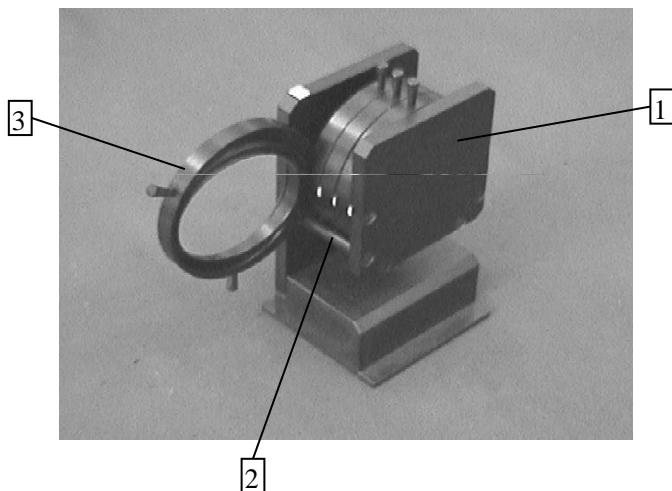


Рис. 8. Пленочный attenuator излучения. 1 - магазин attenuатора, 2 - общая ось крепления рамок с ослабляющими пленками, 3 - пленка в рамке в рабочем положении.

В магазине аттенюатора (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.

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

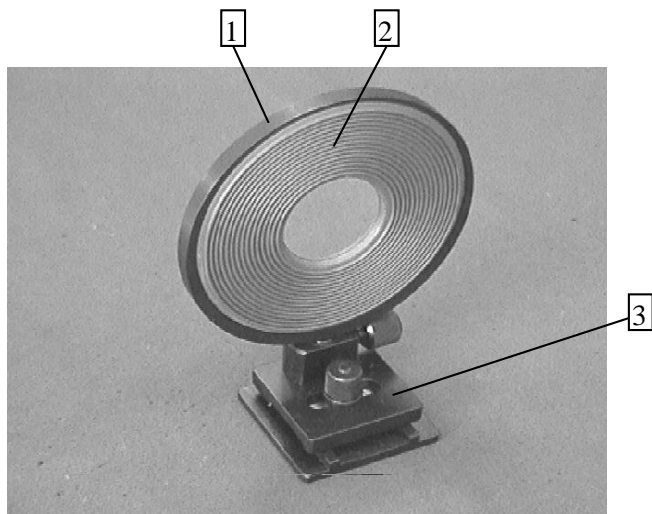


Рис. 9. Поглощающая диафрагма на рейтере. 1 - металлическая апертура, 2 - специальная поглощающая резина, 3 - регулятор.

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

Габариты аттенюатора с пленками, вставленными в магазин: 80 мм х 80 мм х 140 мм.

9. Поглощающая диафрагма.

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

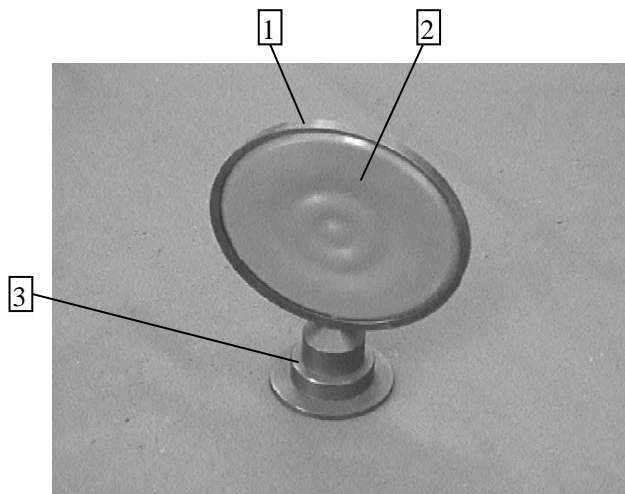


Рис. 10. Поглощающий экран на опоре. 1 - металлический экран, 2 - покрытие из специальной резины, 3 - опора.

Для регулировки плоскости квадратной рамки необходимо:

- ослабить гайку фиксации юстировочного винта;
- с помощью юстировочных винтов установить сетку в необходимое положение;
- зафиксировать положение винтов гайками.

Сетки используются в качестве поляризаторов, анализаторов, зеркал и делителей пучка миллиметрового излучения и представляют собой проволоки диаметром 15 мкм, укрепленные на диафрагме диаметра 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 проволок. Для того, чтобы при помощи сетки изменить (или проанализировать) поляризацию излучения, необходимо вращать ручку сетки, расположенную на задней части рамки, контролируя угол поворота по белой риске, расположенной против круговой шкалы.

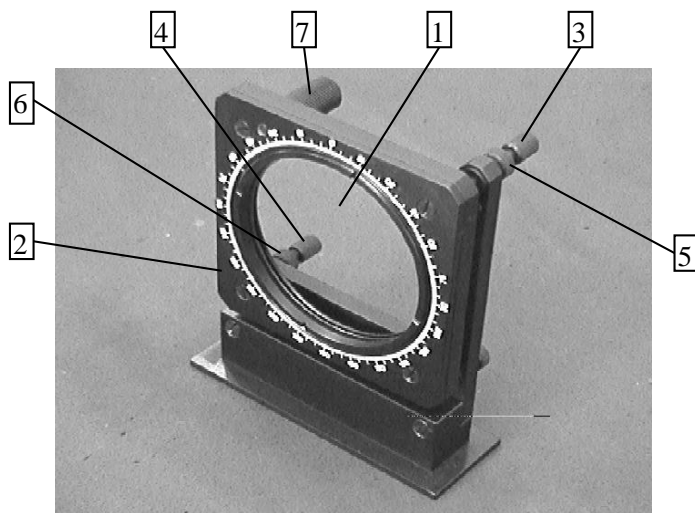


Рис. 11. Оправа с сеткой в собранном виде. 1 - сетка; 2 - квадратная рамка; 3, 4 - юстировочные винты; 5, 6 - гайки фиксации юстировочных винтов; 7 - ручка поворота сетки.

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

Габариты рамки для сеток: 140 мм x 48 мм x 160 мм.

12. Держатель образцов.

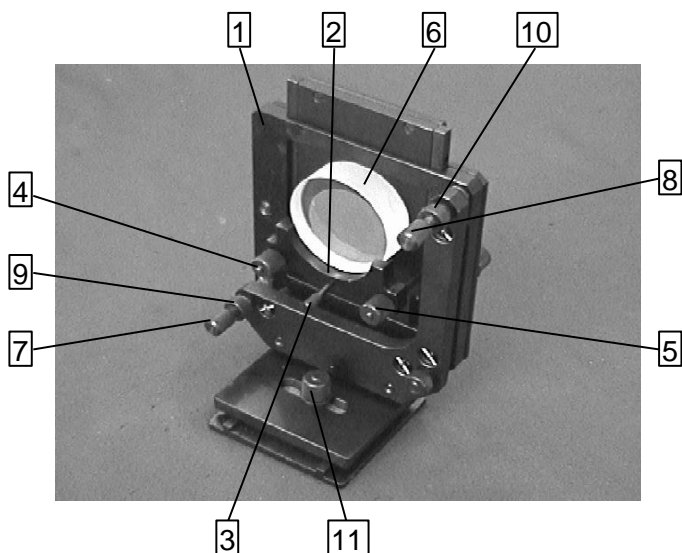


Рис. 12. Держатель образцов для экспериментов на пропускание/отражение. 1 - подвижная пластина с диафрагмой; крепежный узел; 3 - ручка крепежного узла; 4, 5 - юстировочные гайки; 6 - образец; 7, 8 - юстировочные винты; 9, 10 - гайки фиксации юстировочных винтов; 11 - гайка фиксации рейтера.

Держатель образцов состоит из подвижной пластины с диафрагмой и крепежным узлом для установки исследуемых образцов. Держатель снабжен юстировочной системой, аналогичной той, которая используется в оправе для сеток (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 образцов 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 x 80 мм x 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 регулировки 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 с шагом 1, 10 – нажатием соответствующих кнопок на передней панели блока (рис. 13). На этой панели также расположен кнопка включения и цифровой индикатор сигнала.



Рис. 13. Общий вид электронного блока.

На задней панели электронного блока (рис. 14) имеется коаксиальный разъем для питания генератора, штырьковый разъем для подключения кабеля пироприемника и стандартный разъем интерфейса USB для подключения к компьютеру.

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

Габариты блока: 200 мм х 160 мм х 65 мм.

14. Исследуемые образцы.

Лабораторный практикум укомплектован следующими образцами:

а) 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.

б) Образцы стекла К8. Толщины двух плоскопараллельных образцов равны $d_1 = 11,72$ мм, $d_2 = 17,58$ мм, их диаметры составляют 56 мм.



Рис. 14. Задняя панель электронного блока: USB - разъем интерфейса, IMPATT diode generator - коаксиальный разъем для питания генератора, Detector - разъем для пироприемника, разъем подключения шнура питания.

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

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: перегораживать 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 используемых 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. Ремонт этих 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 выключите блок и только после этого произведите подключение.

Использование криостата требует соблюдения техники безопасности при работе с жидким азотом. Основными опасными факторами при работе с этим хладагентом являются возможность асфиксии и 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 работы в практикуме студенты должны пройти инструктаж по технике безопасности и получить допуск к работе 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 расположенной 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

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

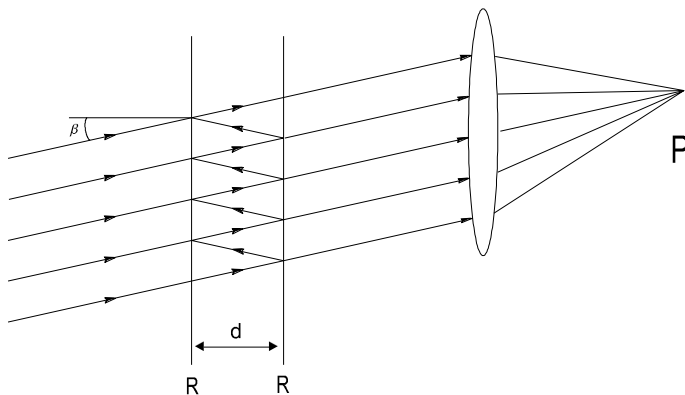


Рис. 1.1. Интерферометр Фабри-Перо.

Здесь $\Delta\varphi$ - скачок фазы при отражении. При изменении расстояния d (или длины волны λ) конструктивная интерференция прошедших волн возникает, когда разность фаз кратна 2π :

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

(целое число t 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 $\sqrt{T}\sqrt{T}E_0 = TE_0$. При каждом двукратном отражении амплитуда E_{0i} превращается в $\sqrt{R}\sqrt{R}E_{0i} = RE_{0i}$. 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

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

и для интенсивности результирующей прошедшей волны $I_t \propto EE^*$ получим

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

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

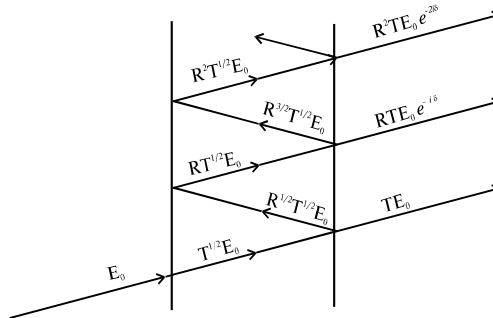


Рис. 1.2. К теории интерферометра Фабри-Перо.

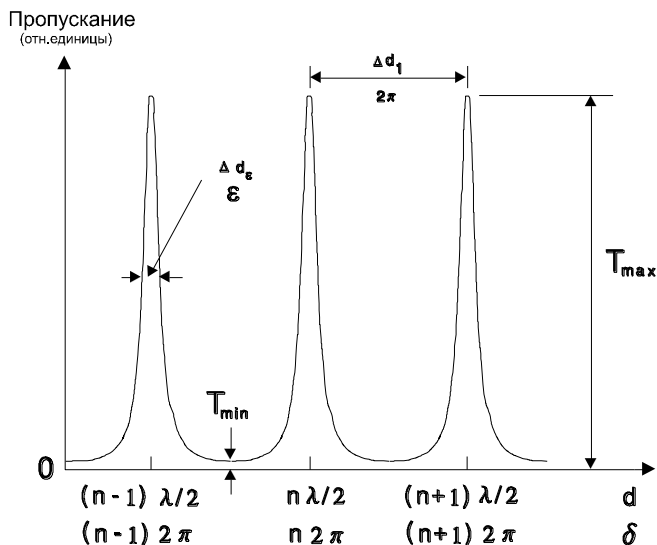


Рис. 1.3. Пропускание интерферометра Фабри-Перо в зависимости от расстояния d между зеркалами и фазы δ .

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

где $T_{\text{ИФП}}$ - коэффициент пропускания интерферометра. На рис. 1.3 приведена соответствующая зависимость $T_{\text{ИФП}}$ от δ и пропорционального ему d ($\delta = 4\pi d / \lambda$). Обращает на себя внимание, что форма кривой $T_{\text{ИФП}}(\delta)$ существенно отличается от синусоидальной.

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

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

или

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

При достаточно больших R

$$\varepsilon \cong 2(1-R) / \sqrt{R}. \quad (1.8)$$

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 «резкостью» интерферометра (*finesse*), определяемую как отношение расстояния между пиками (2π) к их ширине

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

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 $\Delta\delta$ с $\Delta\lambda$:

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

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

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

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 $T_{ИФП}^{\max} = \left(1 - \frac{A}{1-R}\right)^2$, а контраст ин-

терферометра равный по определению отношению $\frac{T_{ИФП}^{\max}}{T_{ИФП}^{\min}} = \zeta$ 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) используется в качестве селективного элемента, пропускающего излучение с длиной волны $\lambda = 2d/m$. При этом к точности изготовления прибора предъявляются высокие требования: необходимо жестко выдерживать плоскопараллельность зеркал и обеспечить условие $d = \text{const}$. Кроме того, след-

ствие малости длины волны света необходимо вводить поправку на тепловое расширение держателя зеркал или термостатировать 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 не прикасайтесь к зеркалам ИФП. Переносите ИФП только за основание.

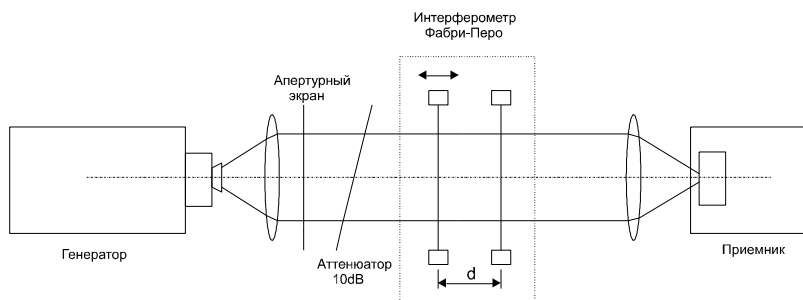


Рис. 1.4. Квазиоптическая схема для измерений длины волны и характеристик интерферометра Фабри-Перо.

Соберите установку по схеме рис. 1.4 в следующем порядке:

а) С помощью линейки отрегулируйте высоту расположения генератора, тефлоновой линзы и приемника в их подставках так, чтобы центры рупора и тефлоновых линз были на высоте 80 мм от основания.

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

в) Закрепите на этой же «оси» на расстоянии $\cong 40$ см от тефлоновой линзы генератора приемный узел так, чтобы ось симметрии приемного узла совпадала с осью всей системы.

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

д) Включите электронный блок. Мигание светодиода на корпусе генератора свидетельствует о нормальной работе прибора. Поставьте пе-

реключатель входного аттенюатора в положение 1:1, а ручку «плавно» - в положение максимального усиления.

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

ж) Ослабьте гайку на корпусе приемного узла и, вращая оправу линзы приемника, подъюстируйте ее до получения максимального сигнала. Зафиксируйте положение линзы барашком.

з) 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 загораживать рукой пучок излучения, иначе показания прибора будут искажены.

Сблизьте 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 максимумам 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 сблизьте 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), выберите коэффициент поглощения так, чтобы теоретическая зависимость наилучшим образом описывала экспериментальную кривую $I(L)$. Постройте график теоретической зависимости $I(L)$, отвечающий наилучшей аппроксимации, проанализируйте полученный результат.

РАБОТА №2. ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕЛОМЛЕНИЯ ПЛАВЛЕННОГО КВАРЦА НА МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ.

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

2.1. Теория метода.

В данном методе используется интерференция в плоскопараллельной 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. 2.1. Параллельный пучок излучения миллиметрового диапазона проходит сквозь пластину переменной толщины и попадает на приемник. В эксперименте регистрируется интенсивность проходящего излучения в зависимости от толщины d пластины. Для уменьшения амплитуды стоячих волн в схему вводятся аттенюатор 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, причем расстояние Δd между соседними максимумами определяется условием

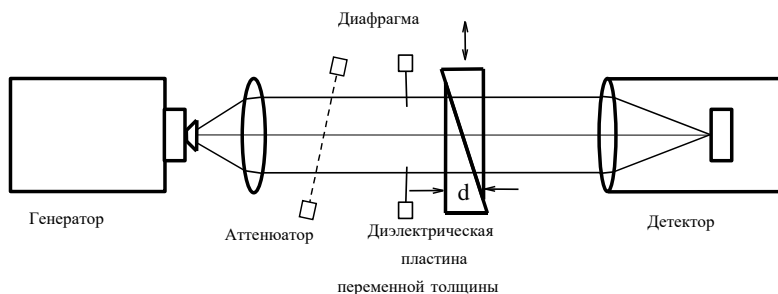


Рис. 2.1. Оптическая схема для измерения коэффициента пропускания пластины переменной толщины.

$$\Delta d n - \lambda / 2, \quad (2.1)$$

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

$$R = (n - 1)^2 / (n + 1)^2, \quad (2.2)$$

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 (2.1) коэффициент преломления n .

Упражнение 2.1. Определение коэффициента преломления плавленого кварца.

а) Соберите установку по схеме рис. 2.1. Отъюстируйте положение генератора и приемника таким образом, чтобы интенсивность прошедшего излучения была наибольшей (клинья пластины должны быть максимально раздвинуты). Вставьте в пучок излучения пленку аттенюатора.

б) Вращая микрометрический винт пластины, снимите зависимость сигнала на приемнике от толщины пластины $I(d)$. 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 найденную величину n с результатом интерференционного измерения. Объясните результат.

в) Проведите измерения $I(d)$ для случая, когда в оптическом тракте отсутствует аттенюатор. Сравните формы кривых $I(d)$, полученных с аттенюатором и без него. Проанализируйте причины расхождения.

РАБОТА №3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИКА.

Метод основан на измерении коэффициента пропускания плоскопараллельной пластинки из исследуемого материала в зависимости от угла падения θ параллельного пучка излучения миллиметровых волн.

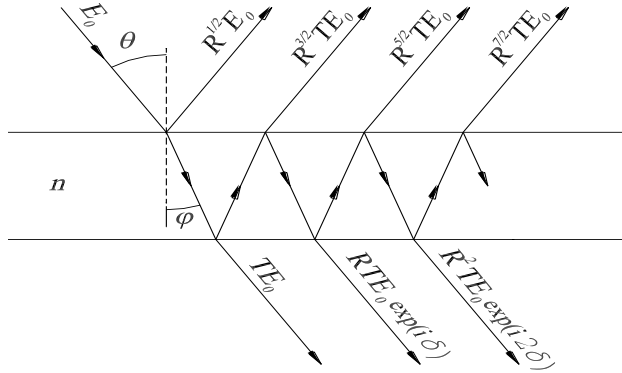


Рис. 3.1 Отражение плоской волны в плоскопараллельной пластинке.

3.1. Теория метода.

Для каждого члена совокупности отраженных или прошедших волн на рис. 3.1 переменная часть фазы волновой функции отличается от такой же части фазы предыдущего члена на величину, соответствующую двукратному прохождению луча в пластинке. Эта разность фаз равна

$$\delta = (4\pi/\lambda)nd \cos(\varphi), \quad (3.1)$$

где d - толщина пластинки, n - показатель преломления пластинки, а λ - длина волны в вакууме.

При суперпозиции первых p прошедших волн амплитуда $E^t(p)$ электрического вектора прошедшего излучения дается выражением

$$\begin{aligned} E^t(p) &= T \left(1 + R \exp(i\delta) + \dots + R^{(p-1)} \exp[i(p-1)\delta] \right) E_0 = \\ &= (1 - R^p \exp(ip\delta)) / (1 - R \exp(i\delta)) TE_0. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Если пластинка достаточно длинна, число отраженных волн велико, то в пределе при $p \rightarrow \infty$ получим

$$E^t = E_0 T (1 - R \exp(i\delta)). \quad (3.3)$$

Соответствующая интенсивность $I' = E' (E')^8$ прошедшего света равна

$$I' = I_0 T^2 / (1 + R^2 - 2R \cdot \cos(\delta)) = I_0 T^2 / ((1 - R)^2 + 4R \cdot \sin^2(\delta/2)). \quad (3.4)$$

В соответствии с этой формулой максимумы интенсивности будут тогда, когда порядок интерференции m , определяемый выражением

$$m = \delta / (2\pi) = 2nd \cos(\varphi) / \lambda, \quad (3.5)$$

равен целым числам 1, 2, ..., минимумы - когда он равен полуцелым числам 1/2, 3/2, 5/2,

В отсутствии поглощения $T = 1 - R$, поэтому распределение интенсивности в интерференционной картине прошедшего излучения будет описываться формулой

$$I' / I_0 = 1 / (1 + F \sin^2(\delta/2)), \quad (3.6)$$

где параметр F определяется соотношением

$$F = 4R / (1 + R)^2. \quad (3.7)$$

Коэффициент отражения R для интенсивности отраженного излучения дается формулами Френеля:

$$R_{\perp} = \sin^2(\theta - \varphi) / \sin^2(\theta + \varphi), \quad (3.8)$$

$$R_{\parallel} = \operatorname{tg}^2(\theta - \varphi) / \operatorname{tg}^2(\theta + \varphi), \quad (3.9)$$

а углы θ и φ связаны соотношением

$$\sin(\theta) / \sin(\varphi) = n. \quad (3.10)$$

Распределение интенсивности (3.6) с учетом коэффициента отражения R_{\perp} для поляризации, перпендикулярной плоскости падения, приведено на рис. 3.2.

Для двух соседних максимумов пропускания имеем систему уравнений

$$(n^2 - \sin^2 \theta_m)^{1/2} = m\lambda / 2d, \quad (3.11)$$

$$(n^2 - \sin^2 \theta_{m-1})^{1/2} = (m-1)\lambda / 2d. \quad (3.12)$$

Исключая n из системы, получаем для порядка интерференции m уравнение

$$2m-1 = (2d / \lambda)^2 (\sin^2 \theta_{m-1} - \sin^2 \theta_m). \quad (3.13)$$

Таким образом, измеряя углы θ_m и θ_{m-1} для двух соседних максимумов пропускания, из (3.13) можно найти порядок m , а затем из уравнения (3.11) показатель преломления

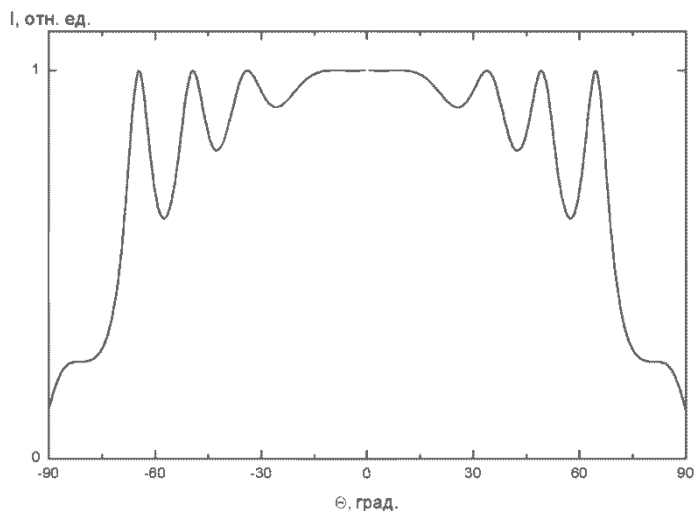


Рис. 3.2. Распределение интенсивности излучения, прошедшего через плоскопараллельную пластинку с $n = 1.4$, $d = 10$ мм, $\lambda = 2.14$ мм.

$$n = \left(m^2 \left(\lambda / 2d \right)^2 + \sin^2 \theta_m \right)^{1/2}. \quad (3.14)$$

3.2. Подготовка к проведению измерений.

Соберите установку, как показано на схеме рис. 3.3.

Прикрепите к измеряемой пластинке держатель со штоком. Установите шток пластинки в центральное отверстие лимба. Поверните пластинку так, чтобы плоскость пластинки была перпендикулярна оси симметрии, и закрепите фиксирующим винтом.

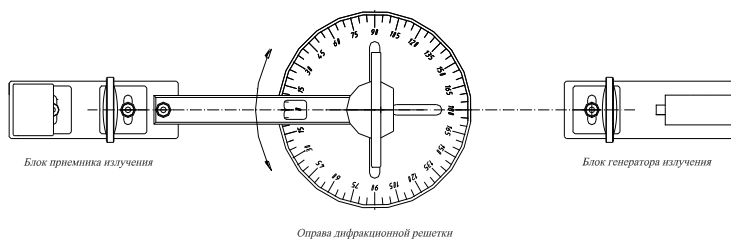


Рис. 3.3. Расположение измерительных узлов для измерения показателя преломления плоскопараллельной пластинки

Упражнение 3.1. Измерение показателя преломления пластинки.

Поворачивая лимб с пластинкой, убедитесь в изменении показаний дисплея электронного блока.

Проведите измерения интенсивности прошедшего излучения, поворачивая пластинку с шагом 1° . Постройте кривую пропускания - зависимость интенсивности излучения от угла поворота пластинки. Тщательно определите для двух соседних максимумов углы наклона пластинки. Это лучше сделать математическими методами при аппроксимации кривой пропускания. По формулам (3.13) и (3.14) определите порядок отражения и показатель преломления. Для полученного показателя преломления постройте теоретическую кривую пропускания. Объясните расхождения.

РАБОТА №4. ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА.

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

4.1. Теория дифракции на решетке.

Рассмотрим решетку, состоящую из ряда длинных эквидистантных щелей (см. описание решетки в разделе II, п. 5). Если период решетки, состоящей из N щелей равен d , а расстояние между щелями равно a (рис. 4.1), то угловое распределение интенсивности прошедшего излучения I дается формулой

$$I = I_0 \left(\frac{\sin(Nkd/2)}{\sin(kd/2)} \right)^2 \left(\frac{\sin(ka/2)}{ka/2} \right)^2, \quad (4.1)$$

где

$$p \equiv \sin \theta - \sin \theta_0; \quad (4.2)$$

$$k = 2\pi / \lambda. \quad (4.3)$$

Формулы (4.1) – (4.3) соответствуют случаю дифракции Фраунгофера, т. е. описывают ситуацию в дальнем поле, когда выполняется условие $R > \sqrt{4D^3/\lambda}$ (здесь R - расстояние от точки наблюдения до дифракционного объекта, имеющего характерный размер D).

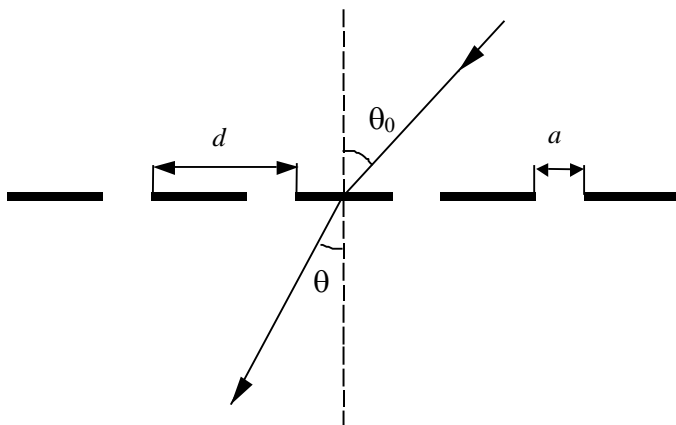


Рис. 4.1. Дифракционная решетка.

Первый из сомножителей в формуле (4.1) описывает интерференцию N дифрагированных волн от N щелей, а второй – дифракцию на одной щели. Максимумы интенсивности $I(\theta)$ определяются из условия

$$p \equiv \sin \theta - \sin \theta_0 = \frac{m\lambda}{d} \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots). \quad (4.4)$$

Целое число m называется порядком интерференции.

В случае нормального падения $\theta_0 = 0$ формула (4.1) принимает вид

$$I(\theta) \propto \frac{\sin^2 u}{u^2} \frac{\sin^2 v}{\sin^2 v}, \quad (4.5)$$

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

Если ширина щели $a \ll \lambda$, то первый множитель равен 1 и распределение интенсивности (4.5) соответствует полю антенной системы из эквидистантных синфазных диполей. График зависимости интенсивности дифрагированного излучения от угла θ , рассчитанный по формуле (4.5) при $N = 7$ для решетки, используемой в задаче, приведен на рис. 4.2.

Из выражения (4.5) видно, что острота максимумов возрастает с ростом N , соответственно растет и разрешающая сила решетки $\lambda/\Delta\lambda = mN$. Видно также, что при $d \sin \theta = \pm m\lambda$ имеются главные максимумы, между которыми находятся $(N - 1)$ минимумов, разделенных $(N - 2)$ вторичными максимумами (см. рис. 4.2). Эти вторичные максимумы и минимумы образуются вследствие интерференции волн от соответственных точек щелей, расположенных на расстояниях $2d, 3d, \dots, (N-1)d$ друг от друга. Минимумы получаются 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

$$\lambda = d \sin \theta_m / m, \quad (4.6)$$

где θ_m – направление на главный максимум m -го порядка. Для решетки, используемой в задаче, у которой $a = 2$ мм, $d = 6$ мм $\cong 3\lambda$, максимально возможный порядок $m = 3$ (при $\theta_3 \cong 90^\circ$). Однако вследствие того, что $d = 3a$, как видно из (4.5), максимум третьего порядка отсутствует. Численно из формулы (4.5) следует, что интенсивности максимумов для нашей решетки соотносятся следующим образом: $I_0:I_1:I_2:I_3 = 1:0,685:0,172:0$.

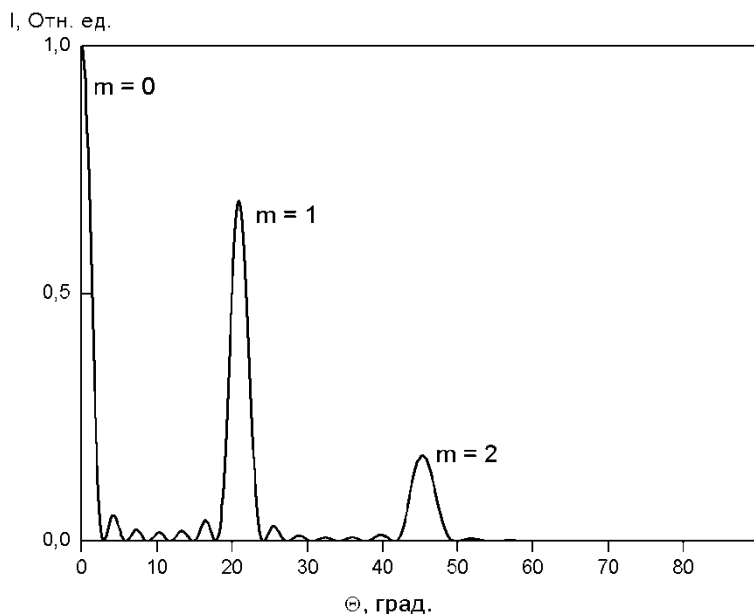


Рис. 4.2. Дифракция на решетке, рассчитанная для $d = 6$ мм, $a = 2$ мм, $\lambda = 2,14$ мм, $N = 7$.

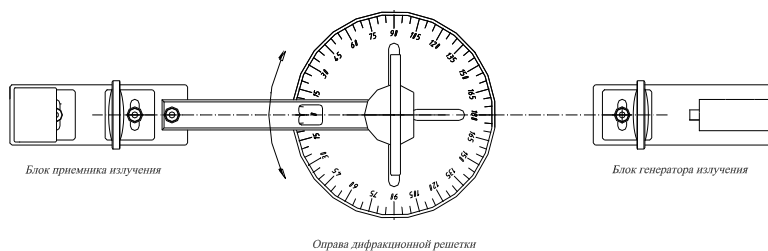
Упражнение 4.1. Изучение дифракции на решетке в проходящих лучах.

а) Используя микроскоп МБС-10 и окуляр со шкалой, точно измерьте параметры a и d дифракционной решетки. Соберите установку по схеме, показанной на рис. 4.3. На подвижную направляющую поворотного устройства установите узел приемника с линзой и закрепите его винтом.

б) Выньте дифракционную решетку и расположите направляющую с приемником и генератор вдоль одной прямой (рис. 4.3). 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.

в) Вращая подвижную направляющую, снимите зависимость $I(\theta)$ и постройте график. Рассчитайте по графику $I(\theta)$ длину волны излучения генератора λ . Сравните полученное значение с результатом, полученным с помощью интерферометра Фабри-Перо. Объясните, чем определяется погрешность определения λ с помощью дифракционной решетки. Срав-

ните экспериментальную зависимость $I(\theta)$ с теоретической (формула (4.5)). Определите эффективное число щелей N , участвующих в образовании дифракционной картины. Объясните возможные причины рас-



хождения расчетных и экспериментальных данных.

Рис. 4.3 Изучение дифракции на решетке в геометрии пропускания.

Упражнение 4.2. Изучение дифракции на решетке в отраженных лучах.

- Установите решетку под углом 45° к оси пучка (рис. 4.4).
- Снимите зависимость $I(\theta)$ в геометрии отражения.

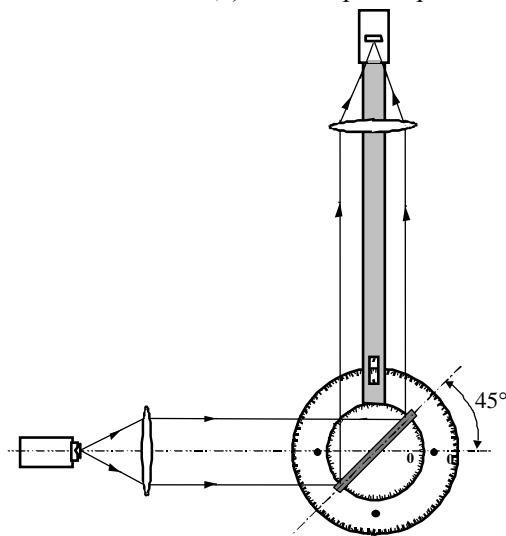


Рис. 4.4. Изучение дифракции на решетке в геометрии отражения.

в) Повторите эксперимент для случая, когда решетка образует с пучком излучения угол в 30° . Выполните расчет ожидаемой теоретической угловой зависимости интенсивности излучения для геометрии отражения.

г) Сравните полученные экспериментальные зависимости $I(\theta)$ с расчетными (формула (4.1)). Объясните возможные причины расхождения расчетных и экспериментальных данных. Объясните, как связаны параметры дифракционной решетки в случаях пропускания и отражения.

РАБОТА №5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ n И k ТВЕРДЫХ ТЕЛ.

Целью работы является определение диэлектрических параметров n и k различных образцов

5.1. Диэлектрические параметры материалов.

Для того чтобы определить два диэлектрических параметра – коэффициент преломления n , и экстинкции k любого вещества, необходимо измерить, по крайней мере, две оптические характеристики. В данном эксперименте оптические параметры n и k определяются из измерений коэффициента пропускания двух плоскопараллельных пластин из одного и того же материала – оконного стекла, но различной толщины.

Если взять образец с относительно большим коэффициентом поглощения и достаточной толщиной, чтобы не наблюдались многократные переотражения излучения от его границ, то коэффициент пропускания можно записать в виде:

$$T = (1 - R)^2 \exp(-4\pi k d / \lambda), \quad (5.1)$$

где k – коэффициент экстинкции, d – толщина образца, λ – длина волны излучения, а R – коэффициент отражения от границы образца с воздухом, который имеет знакомое выражение:

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2}. \quad (5.2)$$

(Если в формуле (5.2) взять $k = 0$, то получим формулу (2.2.)). Таким образом, выражение (5.1) содержит две неизвестные величины n и k . Измерив коэффициенты пропускания 2-х образцов из одного и того же материала, но с разными толщинами d_1 и d_2 , мы получим 2 уравнения типа (5.1), которые позволят определить диэлектрические параметры n и k образца.

5.2. Определение показателей преломления и экстинкции стекла.

Соберите установку, как показано на схеме рис. 5.1.

Измерьте коэффициент пропускания T_1 первой стеклянной пластинки:

а) снимите показания на детекторе пустого тракта, без образца, I_0 .

б) вставьте в тракт образец толщины d_1 и измерьте интенсивность на детекторе прошедшего излучения - $I_{обр.}$. Коэффициент пропускания стеклянной пластинки вычисляется по формуле $T_1 = I_{обр.}/I_0$.

в) Повторите ту же процедуру для образца толщины d_2 . Получите коэффициент пропускания T_2

г) Используя формулы (5.1), (5.2), посчитайте пару диэлектрических параметров n и k стекла.

Сравните коэффициенты преломления плавленого кварца и стекла.

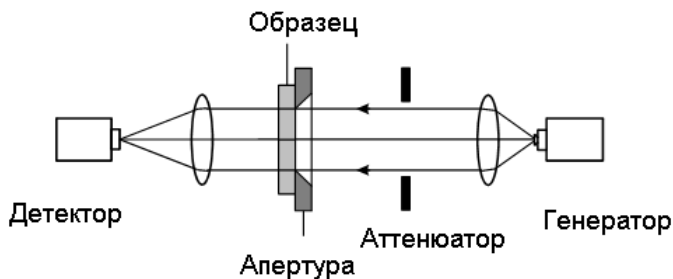


Рис. 5.1. Схема измерения коэффициента пропускания плоскопараллельного образца.

5.3. Измерение коэффициента отражения слабо поглощающих материалов.

Для слабо поглощающих сред ($k \ll n$) формулу (5.2) можно записать в виде :

$$R = (n - 1)^2 / (n + 1)^2. \quad (5.3)$$

Схема для измерения коэффициента отражения приведена на рис.

5.2.

Соберите установку, как показано рис. 5.2.

Найдите оптимальное положение держателя образца:

а) подвиньте пустой держатель образца на несколько мм вправо, влево, назад и вперед относительно оптической оси так, чтобы сигнал на детекторе был минимальный;

б) закрепите на держателе алюминиевое зеркало. Используя юстировочные винты, измените наклон зеркала так, чтобы сигнал на детекторе стал максимален;

с) найдите отношение сигнала без зеркала, I_h , к сигналу с зеркалом, I_z . Отношение должно быть лучше, чем 0,1.

Процедура измерения коэффициента отражения различных образцов аналогична процедуре измерения коэффициента пропускания:

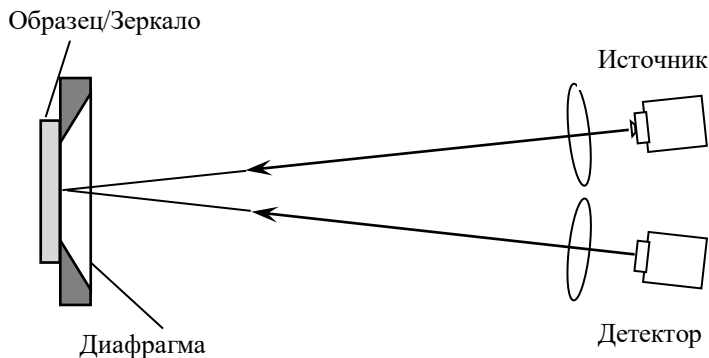


Рис. 5.2. Схема измерения коэффициента отражения.

а) измеряется интенсивность отраженного от алюминиевого зеркала излучения, I_z ;

б) зеркало заменяется исследуемым образцом и измеряется интенсивность излучения отраженного уже от образца, $I_{обр.}$;

в) коэффициент отражения вычисляется по формуле $R = I_{обр.}/I_z$.

Проведите измерение коэффициента отражения и вычислите, используя соотношение (5.3), значение n для различных материалов:

- стеклянных образцов с толщинами d_1 , d_2 , d_1+d_2 . Сравните полученные значения коэффициентов преломления. Объясните разницу;

- тонких металлических пленок, различных толщин, нанесённых на лавсановую пленку;

- любых других образцов: бумага, дерево, пластик.

5.4. Оптические свойства тонких металлических пленок

По сравнению с диэлектриками у металлов довольно большая проводимость σ ($\sigma \sim 10^5 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$) поэтому металлы практически непрозрачны для электромагнитного излучения вплоть до ультрафиолета. Обычные диэлектрики характеризуются довольно небольшим коэффициентом преломления $n = 2 \div 3$. У металлов же значения n и k намного больше и могут быть вычислены с использованием довольно простой формулы Друде для электродинамической проводимости $n \approx k \approx \sqrt{\sigma/\nu}$, где ν - частота излучения.

Для $\sigma = 10^5 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$ и $\nu = 140 \text{ ГГц}$ получим $n \approx k \approx 800$. Если подставить эти значения в формулу (5.2), то коэффициент отражения для металлов будет близок к 1, $R \approx 99.8 \%$!

Тем не менее, тонкие металлические пленки могут быть прозрачны для миллиметровых волн, если их толщина меньше толщины скин-слоя δ_{skin} . В гигагерцовом диапазоне частот типичные значения толщин скин-слоя металлов составляют ~ 0.1 мкм и, следовательно, тонкие металлические пленки с толщиной $d \ll \delta_{\text{skin}}$ должны быть прозрачны для миллиметрового излучения.

Формулы для коэффициентов пропускания (5.1) и отражения (5.2) в случае тонкой проводящей пленки толщиной d можно переписать в виде:

$$T = \frac{1}{\left(1 + \frac{2\pi d\sigma}{c}\right)^2}, \quad (5.4)$$

$$R = \frac{1}{\left(1 + \frac{c}{2\pi d\sigma}\right)^2}, \quad (5.5)$$

$$A = \frac{c}{\pi d\sigma} \left(1 + \frac{c}{2\pi d\sigma}\right)^{-2}, \quad (5.6)$$

где c – скорость света, σ – проводимость пленки, A – коэффициент поглощения – $A = 1 - R - T$. На рис. 5.3 построены графики зависимостей A , R и T от толщины металлической пленки.

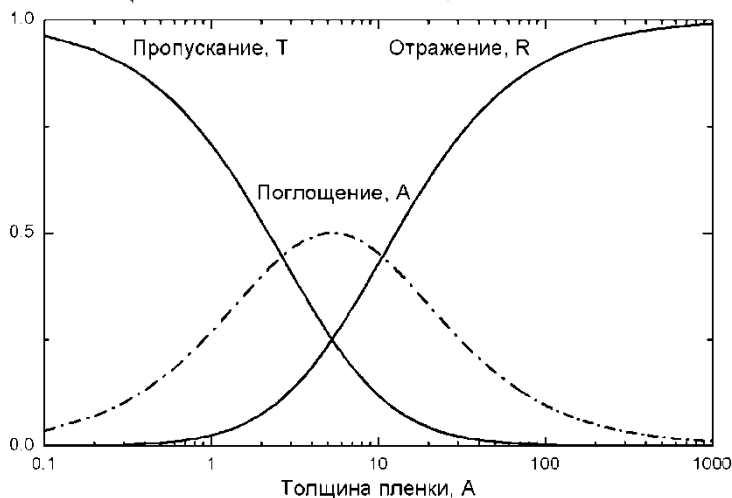


Рис. 5.3. Зависимости коэффициентов пропускания, отражения и поглощения от толщины металлической пленки. Проводимость пленки выбрана равной проводимости меди $\sim 10^5$ Ом $^{-1}$ см $^{-1}$.

Таким образом, измеряя коэффициенты пропускания или отражения металлической пленки и зная ее толщину, можно посчитать проводимость σ .

В эксперименте необходимо измерить коэффициенты пропускания и отражения нескольких пленок с различными толщинами.

Схема эксперимента такая же, как в пп. 5.2 – 5.3.

1. Измерьте коэффициенты пропускания и отражения набора пленок. По формуле (5.6) посчитайте соответствующие коэффициенты поглощения.

2. Постройте графики $T(d)$, $R(d)$ и $A(d)$.

3. Используя формулы (5.4) – (5.6), постройте теоретические кривые так, чтобы они хорошо описывали полученные экспериментальные точки.

4. По методу наименьших квадратов, определите проводимость каждой пленки. Сравните полученные значения со значением проводимости «массивного» металла, из которого изготовлены пленки. Объясните расхождение экспериментальных и табличных значений.

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 удачным программам, приспособленным к задачам 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 назначение, 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, символьные точки) можно изменить, дважды щелкнув по экспериментальной 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 сверху 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 развитая 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.

ЛИТЕРАТУРА

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 спецпрактикума СВЧ. - М.: Наука, 1972. -
11. Лебедева В. В. Экспериментальная оптика. - М.: МГУ, 1994. - гл. 5, §5.4.
12. Кунце Х.-И. Методы физических измерений. - М.: Мир, 1989. - §7.3.5.
13. Керолл Дж. СВЧ-генераторы на горячих электронах. - М.: Мир, 1972.

—

Учебное издание

КВАЗИОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ

Учебно-методическое пособие

Составители: **Анзин Владимир Борисович,
Волков Александр Александрович,
Глушков Владимир Витальевич,
Горшунов Борис Петрович,
Демишев Сергей Васильевич,
Жукова Елена Сергеевна,
Козлов Геннадий Викторович,
Случанко Николай Ефимович**

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

Подписано в печать 30.05.2013. Формат 60 × 84 ¹/₁₆. Усл. печ. л. 3,0. Уч.-изд. л. 2,0.

Тираж 50 экз. Заказ №

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)»
141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
Тел. (495) 408-5822. E-mail: rio@mail.mipt.ru

Отдел оперативной полиграфии «Физтех-полиграф»
141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
Тел. (495) 408-8430. E-mail: polygraph@mipt.ru