

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Национальный исследовательский университет
Учебно-научный и инновационный комплекс
«Физические основы информационно-телекоммуникационных систем»

Основная образовательная программа

011800.62 «Радиофизика», профили: «Фундаментальная радиофизика», «Электродинамика», «Квантовая радиофизика и квантовая электроника», «Физика колебаний и волновых процессов», «Радиофизические измерения», «Физическая акустика», «Физика ионосферы и распространение радиоволн, радиоастрономия», квалификация (степень) бакалавр

Учебно-методический комплекс по дисциплине
«Общая физика» («Колебания и волны, оптика»)

010300.62 «Фундаментальная информатика и информационные технологии», профили: «Физические основы и технологии беспроводной связи», «Помехоустойчивость и электромагнитная совместимость информационных систем», «Лазерные и оптические технологии», квалификация (степень) бакалавр

Учебно-методический комплекс по дисциплине
«Физика электромагнитных и оптических явлений»

011200.62 «Физика», профили: «Кристаллофизика», «Теоретическая физика», «Методика преподавания физики», квалификация (степень) бакалавр

Учебно-методический комплекс по дисциплине
«Общая физика («Электричество и магнетизм», «Оптика»))»

090302.65 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем», специализация «Системы подвижной цифровой защищенной связи», квалификация (степень) специалист

Учебно-методический комплекс по дисциплине
«Физика» («Колебания и волны»)

Услугин Н.Ф., Казарин П.В., Богатов Д.В., Сатинов А.Н.

КОМПЛЕКС ЛЕКЦИОННЫХ ОПЫТОВ ПО ДЕМОНСТРАЦИИ
ОСНОВНЫХ ВОЛНОВЫХ ЭФФЕКТОВ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
3-х САНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Электронное учебно-методическое пособие

Мероприятие 1.2. Совершенствование образовательных технологий, укрепление материально-технической базы учебного процесса

Нижний Новгород
2012

КОМПЛЕКС ЛЕКЦИОННЫХ ОПЫТОВ ПО ДЕМОНСТРАЦИИ ОСНОВНЫХ ВОЛНОВЫХ ЭФФЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 3-х САНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА. Услугин Н.Ф., Казарин П.В., Богатов Д.В., Сатинов А.Н. Электронное учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2012. – 50 с.

В учебно-методическом пособии рассматриваются лекционные эксперименты, демонстрирующие распространение, преломление и отражение электромагнитных волн 3-х сантиметрового диапазона. Особое внимание уделено демонстрации дифракционных явлений, которые в указанном диапазоне волн носят весьма наглядный характер. Приведены схемы и фотографии демонстрационных установок. Пособие содержит некоторые методические советы, которые могут быть полезными лекторам, особенно начинающим.

Электронное учебно-методическое пособие предназначено для преподавателей, читающих курсы лекций по физике на различных факультетах ННГУ, а также студентов, обучающихся по направлениям подготовки 010300.62 «Фундаментальная информатика и информационные технологии», 011800.62 «Радиофизика», 011200.62 «Физика», специальности 090302.65 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем», при изучении таких разделов курса общей физики, как: «Электричество и магнетизм», «Оптика», «Колебания и волны».

В 2010 году Нижегородский государственный университет приобрел по программе Национального исследовательского университета для Центра физических демонстраций кафедры общей физики (ЦФД) ряд демонстрационных установок для использования на лекциях по физике. В частности была приобретена установка для демонстрации свойств электромагнитных волн «ПЭВ-1», поставляемая ООО «Школьник». Установка рассчитана в первую очередь на использование в школьном курсе физики при первичном знакомстве с основными свойствами электромагнитных волн, такими как распространение, отражение, преломление, поляризация, интерференция и дифракция. Вместе с тем в арсенале ЦФД к тому времени уже имелось большое количество лекционных опытов по демонстрации колебательных и волновых явлений различной природы, в том числе и электромагнитных. Подавляющее большинство этих демонстраций создавались силами сотрудников демонстрационного кабинета и преподавателями кафедры общей физики и хорошо зарекомендовали себя за многие годы эксплуатации. С некоторой громоздкостью и изношенностью установок приходилось мириться, что компенсировалось высокой квалификацией персонала ЦФД.

Следует отметить, что вопросы повышения эффективности различных форм учебного процесса, активизации «соучастия» обучающихся в нём представляют собой «известную» проблему педагогической науки – как вузовской, так и школьной. В последнее время, в связи с бурным развитием науки и техники, в учебных планах появляется много новых дисциплин, что приводит к сокращению количества часов, отводимых, в частности, на физику,

при этом количество учебного материала с которым надо познакомить студентов только увеличивается. Все это приводит к интенсификации учебного процесса и, следовательно, к уменьшению времени, которое лектор может выделить на проведение лекционного физического эксперимента (демонстрации).

Основной целью приобретения нового оборудования для ЦФД было стремление модернизировать существующие демонстрационные установки с использованием современной приемо-передающей техники, достаточно безопасной, компактной и надежной. При этом предполагалось, что в результате такой модернизации установки станут более мобильными и наглядными, а сами демонстрации будут требовать меньше времени, как на стадии подготовки, так и в процессе проведения опытов.

Предлагаемое учебно-методическое пособие предназначено как для лекторов, читающих курс общей физики, особенно молодых, которые, опасаясь больших и сложных установок и ради экономии лекционного времени, зачастую вообще отказываются от физических демонстраций на лекциях, так и для студентов, причем и тех, которые эти демонстрации увидят на лекциях, и тех, которые на данной лекции отсутствовали.

В пособии рассматриваются методика и техника демонстрации ряда лекционных опытов с использованием радиоволн СВЧ диапазона, которые иллюстрируют как свойства электромагнитных волн, так и общие положения волновой теории безотносительно к природе самих волн. Несмотря на то, что большинство упоминаемых в настоящем пособии явлений (поляризация, интерференция, дифракция) были открыты и получили объяснение в оптике, с точки зрения демонстрации их на лекции электромагнитные волны СВЧ диапазона оказываются зачастую более удобными. Особенно это относится к дифракции. Поскольку дифракционные эффекты становятся заметными при размерах препятствий порядка длины волны, то для наблюдения этих эффектов в оптическом диапазоне приходится использовать «мелкие» экраны и наблюдение вести через микроскоп или другие, увеличивающие изображения

приспособления. Для сантиметрового диапазона электромагнитных волн такой проблемы нет, поскольку препятствия, на которых происходит дифракция, имеют размеры сантиметров и десятков сантиметров и хорошо видны в лекционной аудитории. В отличие от световых волн, радиоволны не видны невооруженным глазом и для них не существует матричных приемников излучения, которые позволили бы «визуализировать» распределение СВЧ поля. Выход найден давно – сканирующее устройство с «точечным» приемником СВЧ излучения и регистрация протектированного сигнала, например, на экране осциллографа с памятью.

Следует отметить, что вопросам лекционного физического эксперимента, посвящено большое количество публикаций (литературы), описано множество конкретных установок, в демонстрационных кабинетах вузов изготовлено много оригинальных устройств, иллюстрирующих различные физические эффекты, многие из таких устройств изготавливаются серийно. Сказанное в полной мере относится и к устройствам, использующим СВЧ излучение. Можно отметить работы Б.Ш. Перкальскиса [1], Н.М. Шахмаева [2], Н.Я. Молоткова [3], в которых лекционные опыты с СВЧ излучением систематизированы, приведены рекомендации по технической реализации и методике их использования на лекциях. В некоторых вузовских учебниках по физике также описываются лекционные эксперименты с использованием СВЧ волн. Например, [4], [5].

Особо необходимо отметить вклад Г.С.Горелика – одного из организаторов радиофизического факультета ННГУ и первого заведующего кафедрой общей физики – в деле становления целого цикла демонстраций по колебаниям и волнам, в том числе и с использованием электромагнитных волн СВЧ диапазона. Описанные в его монографии «Колебания и волны» [6] эксперименты с 10-ти сантиметровыми электромагнитными волнами можно считать образцом для подражания, как с точки зрения постановки лекционного эксперимента, так и с точки зрения методики использования новейших для того времени достижений техники в учебном процессе. Кстати, сами 10-ти

сантиметровые генераторы работают, несмотря на более чем полувековой возраст, а поставленные Г.Гореликом демонстрации до сих пор вызывают неподдельный интерес у студентов.

Целью настоящего пособия является знакомство лекторов и студентов с имеющимся в ЦФД демонстрационными установками, в которых для иллюстрации различных волновых явлений используются электромагнитные волны СВЧ диапазона. Основной упор, при этом, делается на использование 3-х сантиметрового диапазона, однако ряд эффектов, связанных с вопросами излучения и приема электромагнитных волн, на наш взгляд, нагляднее демонстрировать в 10-ти сантиметровом диапазоне, поэтому там, где нам показалось уместным, очень коротко упоминаются классические опыты из монографии «Колебания и волны».

Пособие состоит из пяти разделов, в которых сгруппированы лекционные физические эксперименты по следующим темам:

1. излучение, распространение и прием электромагнитных волн, вопросы поляризации, влияние среды;
2. отражение электромагнитных волн от диэлектрических поверхностей, влияние поляризации при отражении, явление Брюстера;
3. интерференционные опыты (по схеме Юнга, по схеме «зеркало Ллойда», интерференция в «тонких» пленках, стоячие волны);
4. дифракция на круглом отверстии, зоны Френеля, дифракция на зонных пластинках, дифракция на «широкой» щели, «пятно Пуассона», как примеры дифракции Френеля;
5. дифракция на щели, на решетке из 2-х и 3-х щелей, как пример дифракции Фраунгофера;

Приводится краткое техническое описание отдельных узлов оборудования, методика проведения опытов.

Все приведенные в данном пособии опыты находятся в ЦФД в «рабочем» состоянии, т.е. по заявке преподавателя могут быть подготовлены

для демонстрации на лекции. Большинство опытов неоднократно демонстрировались студентам младших курсов различных факультетов и различных направлений подготовки (специальностей) изучающих физику в рамках учебных планов в соответствии Государственными образовательными стандартами (ГОС) и Федеральными государственными образовательными стандартами третьего поколения (ФГОС-3).

Часть 1. Демонстрация основных свойств электромагнитных волн (излучение, распространение и приём)

Существование электромагнитных волн было предсказано Д.Максвеллом¹ и являлось следствием его уравнений. Сами электромагнитные волны были открыты Г.Герцем². Свои эксперименты по изучению свойств электромагнитных волн Г.Герц выполнил в период между 1885 и 1887 год. С того времени многие из этих опытов были неоднократно повторены и усовершенствованы, чему способствовало как общее развитие техники в целом, так и радиотехники в частности.

¹ **Джеймс Клерк Максвелл** (*James Clerk Maxwell*; 1831 - 1879,) — британский физик и математик. Член Лондонского королевского общества (1861). Максвелл заложил основы современной классической электродинамики (уравнения Максвелла), ввёл в физику понятия тока смещения и электромагнитного поля, получил ряд следствий из своей теории (предсказание электромагнитных волн, электромагнитная природа света, давление света и другие). Кроме этого получил ряд важных результатов в молекулярной физике и термодинамике. Один из основателей кинетической теории газов (установил распределение молекул газа по скоростям). Пионер количественной теории цветов; автор принципа цветной фотографии.

² **Генрих Рудольф Герц** (*Heinrich Rudolf Hertz*; 1857, —1894) — немецкий физик. Окончил Берлинский университет, где его учителями были Герман фон Гельмгольц и Густав Кирхгоф. В 1886—87 гг. Герц впервые наблюдал и дал описание внешнего фотоэффекта, изучал свойства катодных лучей, исследовал влияние ультрафиолетовых лучей на электрический разряд. В ряде работ по механике дал теорию удара упругих шаров, но основным достижением Г.Герца признано экспериментальное подтверждение электромагнитной теории Джеймса Максвелла.

С 1885 по 1889 гг. Г.Герц был профессором физики Университета в Карлсруэ, где и провёл свои знаменитые опыты по распространению электрической силы, доказавшие реальность электромагнитных волн (результаты опубликованы в 1887 и 1888 годах). Источниками электромагнитного излучения у него были искры в разрядниках. Электромагнитные волны от разрядников вызывали искровые разряды между шариками в «приемниках» — расположенных в нескольких метрах контурах, настроенных в резонанс. Герцу удалось не только обнаружить волны, в том числе, и стоячие, но и исследовать скорость их распространения, отражение, преломление и даже поляризацию. Герц не только доказал существование, но и подробно исследовал отражение, интерференцию, дифракцию и поляризацию электромагнитных волн, доказал, что скорость их распространения совпадает со скоростью распространения света, и что свет представляет собой не что иное, как разновидность электромагнитных волн.

Герц считал, что его открытия были не практичнее максвелловских: «Это абсолютно бесполезно. Это только эксперимент, который доказывает, что маэстро Максвелл был прав. Мы всего-навсего имеем таинственные электромагнитные волны, которые не можем видеть глазом, но они есть».

Появление надежных и компактных генераторов СВЧ диапазона позволило проводить подобные эксперименты и в лекционных аудиториях. С точки зрения лекционных демонстраций хорошо зарекомендовали себя эксперименты с радиоволнами в сантиметровом диапазоне. Ставшие классическими опыты с 10-ти сантиметровыми волнами, описанные Г.Гореликом в монографии «Колебания и волны», наглядно демонстрируют такие свойства электромагнитных волн как поперечность, различие в прохождении через разные среды и отражении от разных материалов и др.

В настоящее время в лекционном эксперименте предпочитают использовать электромагнитные волны длиной 3 см. С одной стороны это обусловлено наличием относительно недорогой и надежной техники для генерации и приема таких волн, а с другой – уменьшением размеров самих установок по сравнению с установками, использующими 10-ти (или более) сантиметровые волны.

В арсенале Центра физических демонстраций кафедры общей физики имеются следующие лекционные установки для демонстрации свойств электромагнитных полей:

- демонстрация поперечности электромагнитных волн;
- демонстрация прохождения электромагнитных волн через различные среды;
- демонстрация преломления электромагнитных волн при прохождении через толстую плоскопараллельную пластину диэлектрика (оргстекло);
- демонстрация отражения электромагнитных волн от различных предметов (разной формы и изготовленных из разных материалов).

Эти установки могут использоваться преподавателями на лекциях по физике, при чтении курсов на любом факультете ННГУ, где учебными планами предусмотрены соответствующие разделы.

Демонстрация поперечности электромагнитных волн

Для демонстрации поперечности электромагнитных волн можно использовать как излучение в 10-ти сантиметровом диапазоне (опыты в постановке Г.Горелика и на аппаратуре, изготовленной его сотрудниками), а также в 3-х сантиметровом диапазоне волн (с использованием выпускаемой промышленностью установки ПЭВ-1). С первым вариантом можно познакомиться в упоминавшейся уже монографии «Колебания и волны» [6]. Рассмотрим подробнее второй вариант: с использованием 3-х сантиметровых электромагнитных волн.

Приемник и передатчик волн из стандартного комплекта ПЭВ-1 располагают на расстоянии примерно 1 м друг от друга рупорами навстречу друг другу (см. Рис. 1).

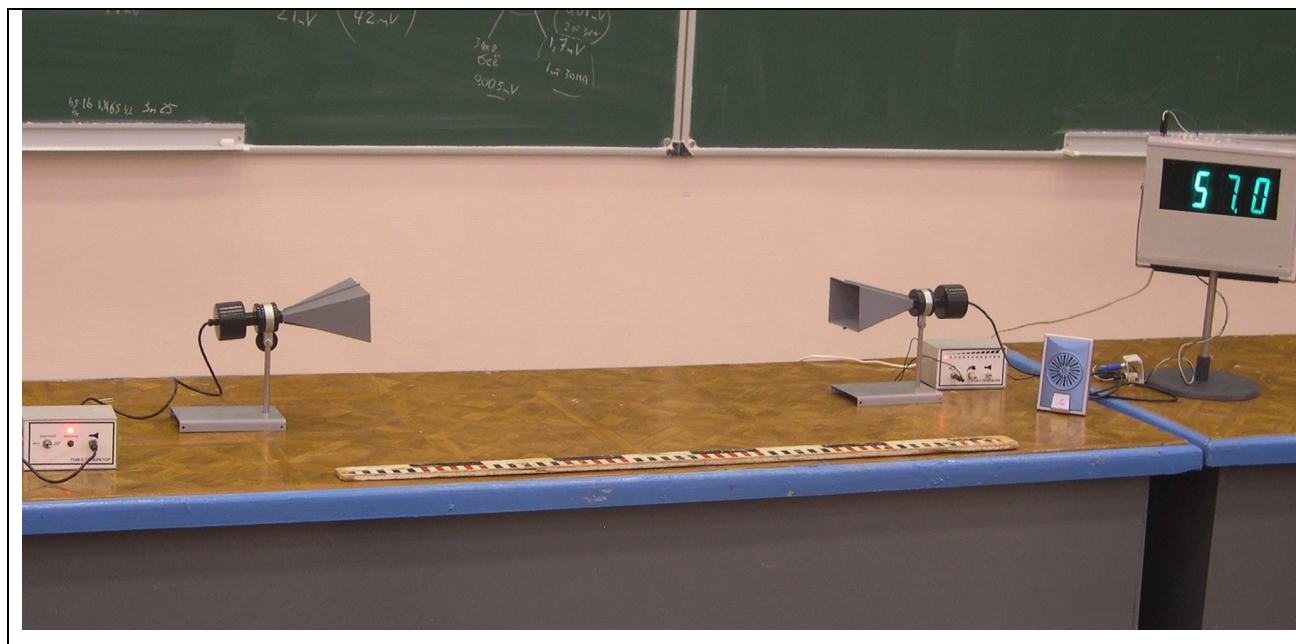


Рис. 1

Рупоры ориентированы одинаково относительно горизонта (широкая сторона рупора горизонтальна, при этом вектор напряженности электрического поля будет колебаться в вертикальной плоскости). В качестве индикатора приема используются динамик и светодиодный индикатор из того же комплекта или демонстрационный мультиметр с цифровым отсчетом типа Щ4313.1, либо осциллограф. В генераторе СВЧ излучения предусмотрена

модуляция волн сигналом типа «меандр» частотой 1000 Гц. В приемнике этот сигнал выделяется, усиливается и подается на динамик (либо внешний вольтметр), а также (после детектирования) на линейку светодиодов, причем разные светодиоды загораются при достижении сигналом разного уровня. При подаче питания на приборы, убеждаются в работоспособности установки, о чем «говорит» звук из динамика и свечение части светодиодов.

Между излучателем и приемником можно расположить решетку из комплекта (металлические стержни расположены на плоскости, параллельно и на расстояниях порядка 10 мм друг от друга). Такая решетка пропускает электромагнитную волну, если вектор напряженности электрического поля перпендикулярен стержням решетки (или имеет заметную проекцию на это перпендикулярное направление). В прошедшей волне вектор напряженности электрического поля будет перпендикулярен стержням решетки. Если вектор напряженности электрического поля в падающей на решетку волне будет параллелен стержням решетки, то такая волна отразится от решетки как от сплошной проводящей плоскости. Для прошедшей волны фактически мы имеем аналог оптического поляризатора в СВЧ диапазоне. Поворачивая решетку, можно убедиться в том, что при определенной ориентации решетки сигнал проходит практически без изменения, а при других ослабляется или даже полностью пропадает. С помощью зонда (дипольной антенны), входящего в комплект оборудования, легко можно убедиться в наличии и отсутствии волны и выяснить ее поляризацию.

Убираем решетку и поворачиваем приемник вместе с рупором вдоль оси на 90 градусов. Прием прекращается, о чем говорят прекращение звука из динамика и погасшие светодиоды.

Снова помещаем решетку между приемником и передатчиком. Фиксируем отсутствие сигнала при вертикальной и горизонтальной ориентации стержней и в появлении сигнала при других ориентациях (максимум при повороте решетки на 45 градусов). Показания вольтметра позволяют убедиться, что принятый сигнал не превышает половины от уровня сигнала при «прямой

передаче» (при одинаковой ориентации приемника и передатчика). Разные стадии эксперимента показаны на рис. 2, 3.

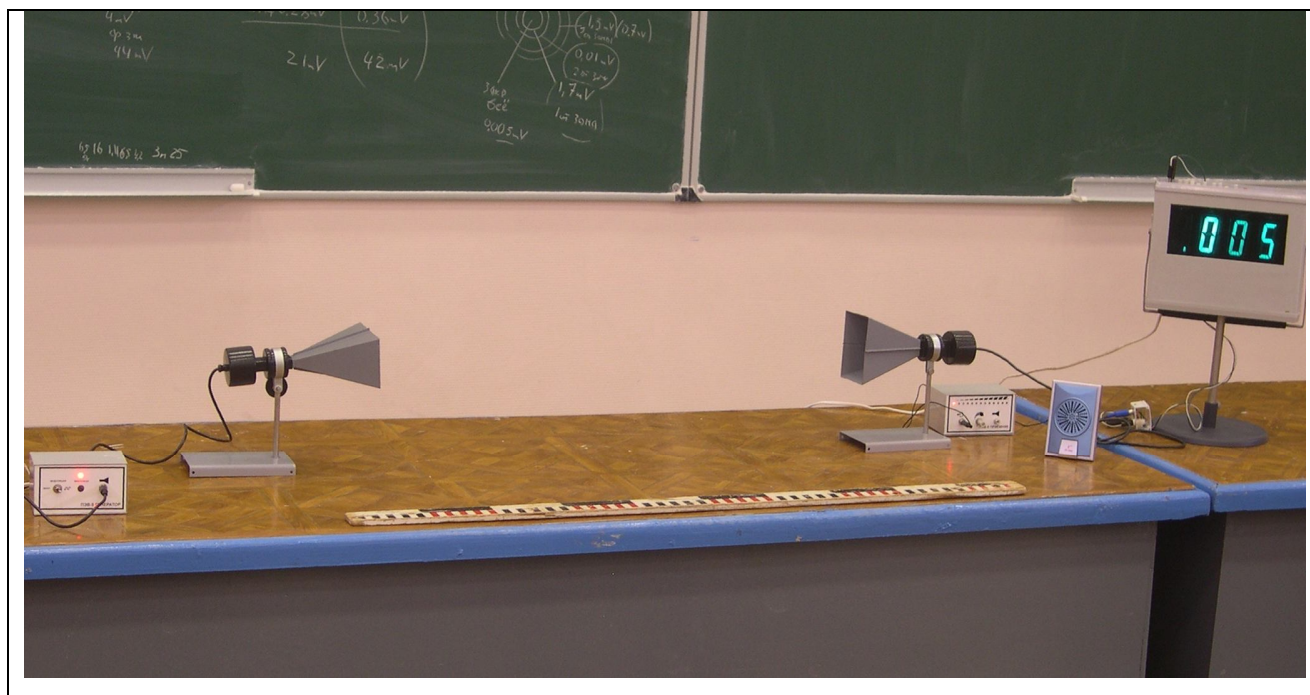


Рис. 2

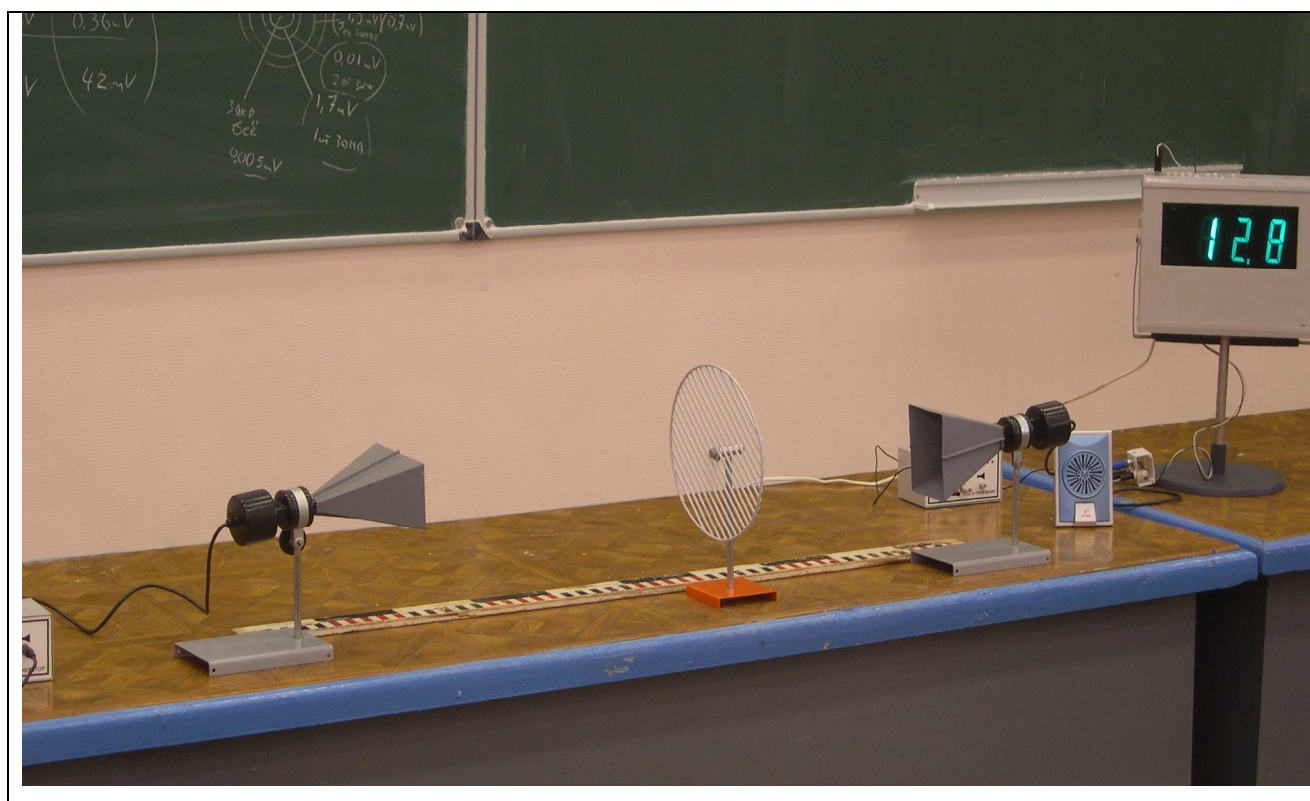


Рис. 3

Демонстрация прохождения электромагнитных волн через различные среды

Для демонстрации прохождения электромагнитных волн через различные среды собирается установка, описанная в предыдущем параграфе. Перпендикулярно оси антенн, ориентированных навстречу друг другу, поочерёдно ставят плоские предметы из различных материалов и различной толщины. Можно использовать, например, листы из оргстекла, эбонита, пенопласта, гетинакса, обыкновенного оконного стекла и оптического, а также из металла. Почти все диэлектрические среды, за исключением оптического стекла, являются «прозрачными» для данного диапазона волн, хорошо пропускают излучение, о чём свидетельствует интенсивность звуковой индикации, показания вольтметра и амплитуда синусоидального сигнала на экране электронного осциллографа. Тонкий металлический лист полностью прерывает связь приемника и передатчика. Практически такое же действие оказывает лист оптического стекла (вследствие экранирующего действия проводящего материала, который присутствует в сплаве оптических стёкол). Лист из диэлектрика, даже значительно толще, чем металлический, даёт лишь незначительное ослабление амплитуды сигнала. Тем не менее, с помощью вольтметра можно заметить, что один и тот же материал тем сильнее ослабляет сигнал, чем толще его слой. На основании этих опытов делаются выводы, что материалы, могут быть прозрачными или непрозрачными не только в оптике, но и в других диапазонах излучения (в частности в СВЧ диапазоне), а также, что вещества прозрачные для одного диапазона электромагнитных волн (оптического) могут быть непрозрачными для другого (СВЧ) и наоборот. Кроме этого можно отметить, что абсолютно прозрачных веществ нет, все зависит от толщины слоя, в котором распространяется волна.

Демонстрация преломления электромагнитных волн при прохождении через толстую плоскопараллельную пластину диэлектрика (оргстекло)

Явление преломления оптических волн на поверхностях раздела прозрачных диэлектриков наблюдается достаточно просто. С СВЧ излучением непосредственное наблюдение (глазом) невозможно, тем не менее, показать наличие преломления электромагнитных волн и в этом диапазоне можно, например, в следующей установке (см. рис. 4).

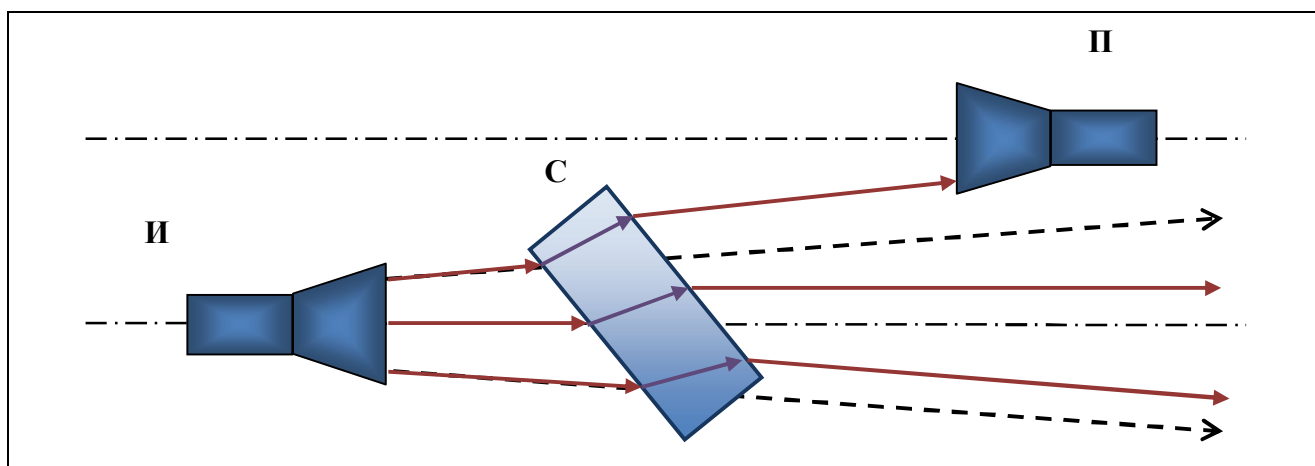


Рис. 4

Антенны передатчика и приёмника, направленные навстречу друг другу, разносят на расстояние примерно в 1 м с параллельным смещением их осей не менее чем на 35 см. Дистанцию и смещение тщательно подбирают, чтобы излучение передатчика (имеющего конечную диаграмму направленности) не захватывалось приёмным антенным рупором. В громкоговорителе не должно быть сколь угодно заметного сигнала даже при максимальном уровне усиления. Вдоль оси антенны передатчика, на половине пути распространения волны, устанавливают лист из органического стекла достаточно большой толщины (в нашем случае это пластина размером 7x15x25 см). Поворачивая лист, и, изменяя тем самым угол падения волны на плоскость диэлектрика, начиная от нормального, добиваются появления, а затем и уверенного приёма сигнала. Пройдя волна значительно «сместилась», вследствие преломляющих свойств среды. Необходимо отметить, что в данном случае амплитуда

принимаемого сигнала достаточно мала, поскольку приёмная антенна захватывает излучение, сосредоточенное на самом краю диаграммы направленности.

Демонстрация отражения от различных предметов (разной формы и изготовленных из разных материалов)

Передатчик и приёмник направляют в одну сторону и располагают так, чтобы оси антенн пересекались под некоторым небольшим углом. В месте пересечения осей вертикально устанавливается металлический экран. Уровень принимаемого сигнала практически не отличается от сигнала, полученного при прямом падении волны от передатчика на приемник, в свободном пространстве. Как и в оптике, несложно заметить (настраиваемся по максимуму в отраженном сигнале), что угол падения равен углу отражения. При замене металлического экрана на диэлектрическое зеркало наблюдается незначительное отражение электромагнитного излучения.

Используя вольтметр в качестве регистратора уровня отраженного сигнала можно провести опыты, иллюстрирующие некоторые принципы радиолокации. В качестве объектов, от которых принимается сигнал, берутся металлические предметы одинакового поперечного сечения, но разной формы: диск, шар и уголкового отражатель, либо объекты одинаковой формы, но разного размера: диски разного диаметра. По уровню принятого сигнала сравнивают отражательную способность разных тел. На рис. 5 показана фотография установки при измерении отражательной способности металлического шара, а на рис. 6 приведен весь комплект используемых в данном опыте тел. Для примера в таблице 1 приведены значения выходного сигнала приемника (измерения выполнены с помощью измерительного усилителя У2-6).

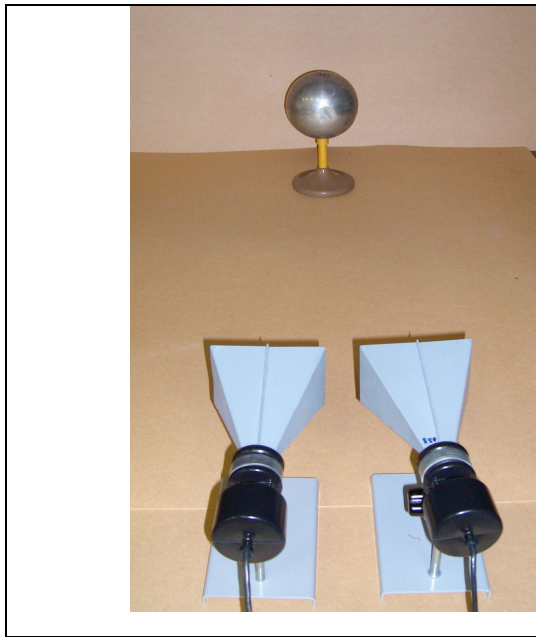


Рис. 5

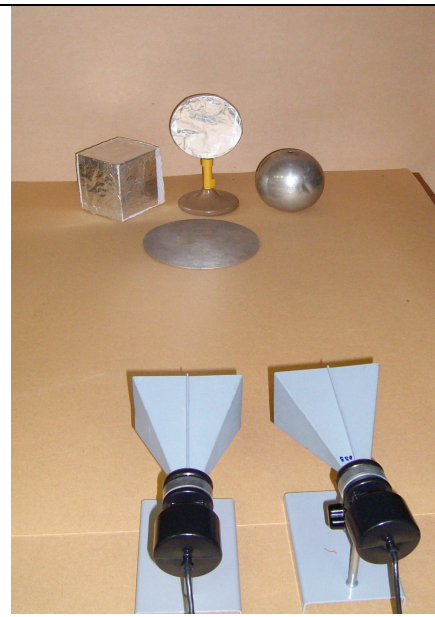


Рис. 6

Таблица 1

Объект	Диск диаметром 120 мм	Шар диаметром 120 мм	Угловый отражатель	Диск диаметром 180 мм
Уровень отраженного сигнала (мВ)	1.5	0.025	0.5	3.6

Часть 2. Отражение электромагнитных волн от диэлектрических поверхностей, явление Брюстера

Вопросы отражения и преломления поляризованного света интенсивно изучались в начале 19 века, параллельно со становлением волновой теории света. В 1808 г. Этьен Луи Малюс³, глядя сквозь кусок исландского шпата на блестящие в лучах заходящего солнца окна Люксембургского дворца в Париже, к своему удивлению заметил, что при определённом положении кристалла было видно только одно изображение. Опираясь на корпускулярную теорию света Ньютона, он предположил, что корпускулы в солнечном свете имеют «полюсы», как магниты и ориентированы беспорядочно, но после отражения от какой-либо поверхности или прохождения сквозь анизотропный кристалл отсортировываются лишь частицы света с определёнными направлениями полюсов, т.е. они приобретают определённую ориентацию. Такой «упорядоченный» свет он назвал поляризованным (от слова «полюс»).

В 1815 году Д. Брюстер⁴ установил связь между показателем преломления диэлектрика и углом падения света, при котором отраженный от поверхности этого диэлектрика свет полностью поляризован, а в 1823 году

³ **Этьен Луи Малюс** (*Étienne Louis Malus*, 1775 – 1812, французский инженер, физик и математик. Учился в Инженерном училище в Мезьере, затем в Политехническом училище. Служил в действующей армии и принимал участие в экспедиции Наполеона в Египет. С 1806 по 1809 гг. был помощником начальника крепости Страсбург. С 1800 г. занимался оптическими исследованиями. В 1808 году Малюс открыл явление поляризации света отражением. Одновременно с Ж.-Б. Био открыл поляризацию света при преломлении. В 1810 году создал теорию двойного лучепреломления света в кристаллах. Исследовал зависимость интенсивности поляризованного света, прошедшего через поляризатор от ориентации плоскости поляризации (закон Малюса). Был ярким приверженцем теории эмиссии (ньютоновой, корпускулярной теории света).

⁴ **Сэр Дэвид Брюстер** (*Sir David Brewster*, 1781 —1868) — шотландский физик. Изучал теологию в Эдинбургском университете, принял сан священника и стал одним из основателей Свободной шотландской церкви. Был фармацевтом, потом доктором прав и адвокатом; с 1801 года стал заниматься физикой, преимущественно оптикой. Впоследствии он был профессором физики, ректором Эдинбургского университета. Специализировался на изучении оптических явлений, прежде всего спектральных и поляризационных. Открыл закон, носящий его имя.

О.Френель⁵ вывел законы отражения и преломления света на плоской неподвижной границе раздела двух сред (формулы Френеля).

Демонстрация явления Брюстера со световыми волнами в лекционной аудитории, как правило, не вызывает затруднений. Предлагаемые опыты в трехсантиметровом диапазоне лишней раз позволяют подчеркнуть общность свойств СВЧ и оптического диапазона.

Демонстрация явления Брюстера

Демонстрационная установка для наблюдения явления Брюстера изготовлена в виде планшета, на котором расположены две рейки с возможностью поворота вокруг общей вертикальной оси (принципиальная схема изображена на рис. 7 (вид сверху)).

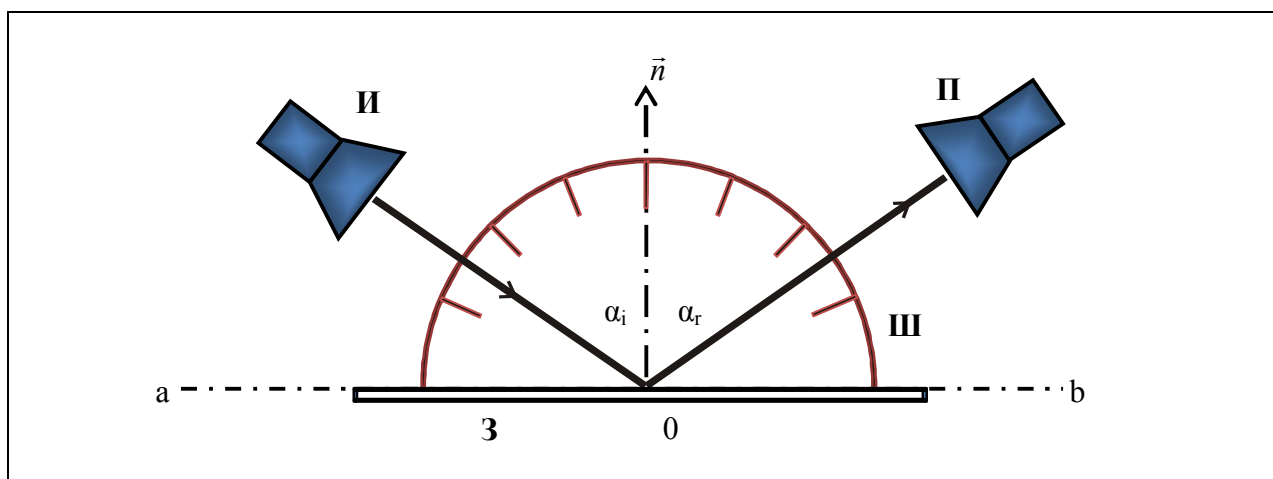


Рис. 7

На рейках закрепляются приёмник и излучатель. Перпендикулярно плоскости планшета установлено диэлектрическое зеркало (лист органического стекла) таким образом, чтобы центр вращения реек совпадал с плоскостью этого зеркала (на рисунке – плоскость ab). Конструкция установки

⁵ Огюстен Жан Френель (*Augustin-Jean Fresnel*, 1788 –1827), французский физик. Начал самостоятельно изучать физику после ознакомления с работами Э.Малюса. Также самостоятельно начал проводить эксперименты по оптике. В 1815 году переоткрыл принцип интерференции, проделав по сравнению с Т.Юнгом несколько новых опытов (в частности опыт с «бизеркалами Френеля»). В 1823 году установил законы изменения поляризации света при его отражении и преломлении (формулы Френеля)

несложна в изготовлении и понятна из фотографии, приведенной на рис. 8. Предварительная настройка заключается в получении необходимого уровня отражённого сигнала (контролируется по звуковому сигналу и по осциллограмме на экране осциллографа). Максимальный сигнал будет наблюдаться при максимально возможных углах падения и отражения (для данной установки около 85°), поэтому в этом положении и производится настройка чувствительности приемника (по максимуму).

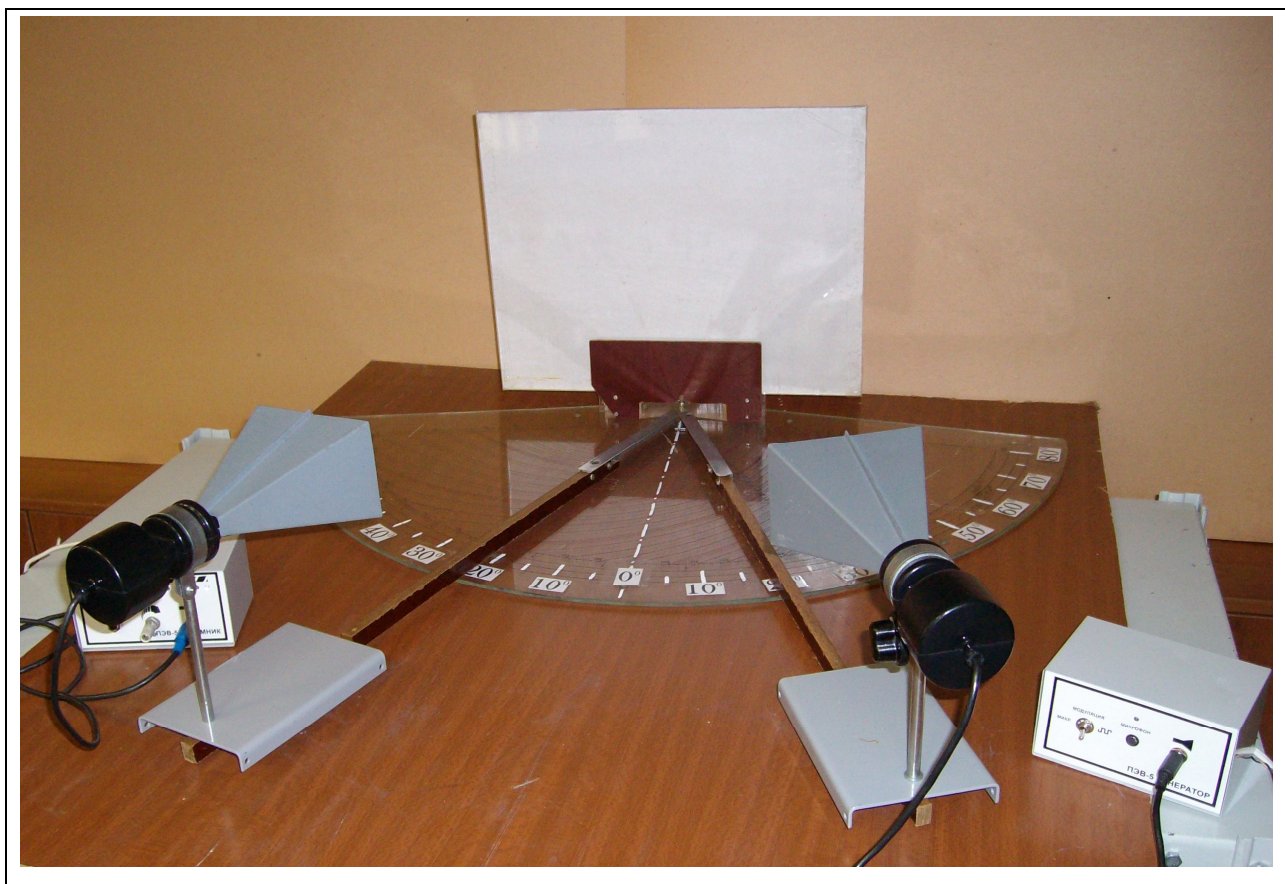


Рис. 8

Рассматривают два случая: вектор напряженности электрического поля перпендикулярен плоскости падения (ТЕ-поляризация), вектор напряженности электрического поля лежит в плоскости падения (ТМ-поляризация). Нужная поляризация выбирается соответствующей ориентацией рупоров передатчика и приемника. Сначала целесообразно провести наблюдения с ТЕ поляризацией (именно этой поляризации соответствует положение рупоров на фотографии, показанной на рис. 8). Изменяя угол падения (и, естественно, и угол

отражения) от самых маленьких в сторону увеличения, проводят несколько измерений уровня отраженного сигнала. Можно обратить внимание студентов на то, что с увеличением угла падения интенсивность отраженной волны монотонно увеличивается, причем при приближении к скользящим углам ($\alpha \sim 85^\circ$) очень сильно. Можно показать графики зависимости коэффициента отражения волны от угла падения для соответствующей поляризации (см. рис. 9).

Повторяют измерения для другой поляризации (ТМ поляризации), для этого приемный и передающий рупоры поворачивают вокруг их продольных осей (с известной осторожностью) на девяносто градусов, теперь вектор напряженности электрического поля лежит в плоскости

падения. Отмечают, что характер зависимости интенсивности отраженной волны от угла падения изменился. По мере увеличения угла падения интенсивность отраженной волны сначала медленно уменьшается и спадает до нуля, а затем резко возрастает. Угол, при котором электромагнитная волна ТМ поляризации не отражается от диэлектрического зеркала, называется углом

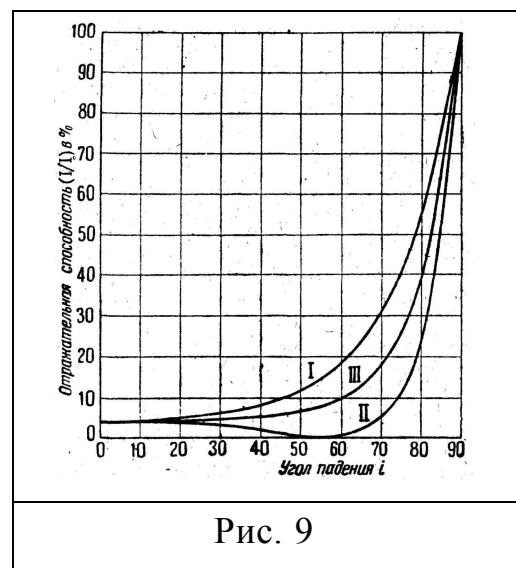


Рис. 9

Брюстера. В нашем случае (показатель преломления оргстекла на частоте 10^{10} ГГц равен $n=1.6$) этот угол равен $\alpha_B = 60^\circ$.

Можно снова показать графики зависимости коэффициента отражения волны от угла падения теперь уже для ТМ поляризации (см. рис. 9)

Часть 3. Интерференция электромагнитных волн СВЧ диапазона

Интерференция света – перераспределение интенсивности света в результате наложения (суперпозиции) нескольких световых волн. Это явление сопровождается, как правило, чередующимися в пространстве максимумами и минимумами интенсивности. Её распределение называется интерференционной картиной. Впервые явление интерференции было независимо обнаружено Робертом Бойлем⁶ и Робертом Гуком⁷. Они наблюдали возникновение разноцветной окраски тонких плёнок (интерференционных полос), подобных масляным или бензиновым пятнам на поверхности воды. В 1801 году Томас Юнг, введя «Принцип суперпозиции», первым объяснил явление интерференции света, ввел термин «интерференция» (1803) и объяснил «цветастость» тонких пленок. Он также выполнил первый демонстрационный эксперимент по наблюдению интерференции света, получив интерференцию от двух щелевых источников света (1802). Позднее этот опыт Юнга стал классическим.

⁶ **Роберт Бойль** (1627 - 1691) – ирландский физик, химик, богослов. Получил образование в Женеве, затем в Италии и Франции. В 1654 г. переселился в Оксфорд, где посвятил большую часть времени занятиям физикой и химией, получил степень почётного доктора физики Оксфордского университета (1665), и участвовал в основании Общества наук, которое потом в 1668 г. переместилось в Лондон и получило большую известность под названием Лондонского королевского общества. Основные достижения Бойля связаны с исследованиями строения вещества, однако Бойль производил и оптические исследования, в частности, исследовал цвета тонких пленок.

⁷ **Роберт Гук** (*Robert Hooke*; *Роберт Хук*, 1635 - 1703) — английский естествоиспытатель, учёный-энциклопедист. Гука можно смело назвать одним из отцов экспериментальной физики. Учился в Вестминстерской школе, где особенно интересовался математикой и выказал большую способность к изобретениям по физике и механике. С 1653 года стал заниматься, а затем и проводить исследования в Оксфордском университете. Некоторое время был помощником Р.Бойля. С 1664 профессор Лондонского университета. Среди основных результатов Р.Гука можно назвать: открытие пропорциональности между упругими растяжениями, сжатиями и изгибами, и производящими их напряжениями (закон Гука); правильная формулировка закона всемирного тяготения (приоритет Гука оспаривался Ньютоном, но, по-видимому, не в части формулировки (в письме 6 января 1680 года Ньютону Гук впервые ясно формулирует закон всемирного тяготения и предлагает Ньютону, как математически более компетентному исследователю, строго математически обосновать его, показав связь с первым законом Кеплера для некруговых орбит)); открытие цветов тонких пластинок (то есть, в конечном итоге, явления интерференции света); живая клетка (с помощью усовершенствованного им микроскопа; Гуку же принадлежит сам термин «клетка» — англ. cell) и многие другие.

С точки зрения лекционного эксперимента, способствующего лучшему усвоению студентами материала, следует признать, что оптические демонстрации, особенно в тонких пленках очень эффектны. Использование таких источников света, как лазеры и мощные светодиоды позволило наблюдать в больших аудиториях и другие интерференционные опыты. Тем не менее, применение СВЧ излучения имеет свои преимущества, которые связаны в первую очередь с изменением масштаба, с наглядностью установок. Кроме этого весьма важным представляется лишней раз подчеркнуть общность явления интерференции для различных диапазонов волн.

В распоряжении ЦФД имеются четыре установки, в которых в 3-х сантиметровом диапазоне электромагнитных волн можно наблюдать интерференцию:

демонстрация влияния толщины «тонкой» пленки на коэффициент отражения;

демонстрация интерференции от двух щелей по схеме Юнга;

демонстрация интерференции по схеме «зеркало Ллойда»

демонстрация стоячих электромагнитных волн.

Первые три фактически являются СВЧ-аналогами ставших классическими оптических интерференционных опытов, а идея четвертой – стоячие волны, напротив, была предложена и реализована раньше своего оптического аналога.

Демонстрация влияния толщины «тонкой» пленки на коэффициент отражения

Для наблюдения эффектов, возникающих при отражении от тонкой пленки, а точнее от плоско-параллельной пластины, толщина которой составляет несколько длин волн (до нескольких десятков, в зависимости от условий наблюдения), используется установка, фотография которой приведена на рис. 8 и применявшаяся при наблюдении явления Брюстера. Тонкая пленка имитируется двумя листами оргстекла, расположенными параллельно друг

другу. Расстояние между листами оргстекла можно плавно менять. Схема опыта приведена на рис. 10. На схеме буквами обозначены: «И» – излучатель СВЧ волн; «П» – приемник излучения; D_1 и D_2 – два слоя, от которых происходит отражение. Поскольку толщина оргстекла (6 мм) в нашем случае много меньше длины волны, то при почти нормальном падении волны на поверхность эффекты, связанные с конечной толщиной оргстекла, практически не сказываются. Интенсивность отраженной волны оценивается «на слух» по громкости звука из динамика и по показаниям вольтметра, включенного на выходе приемника излучения.

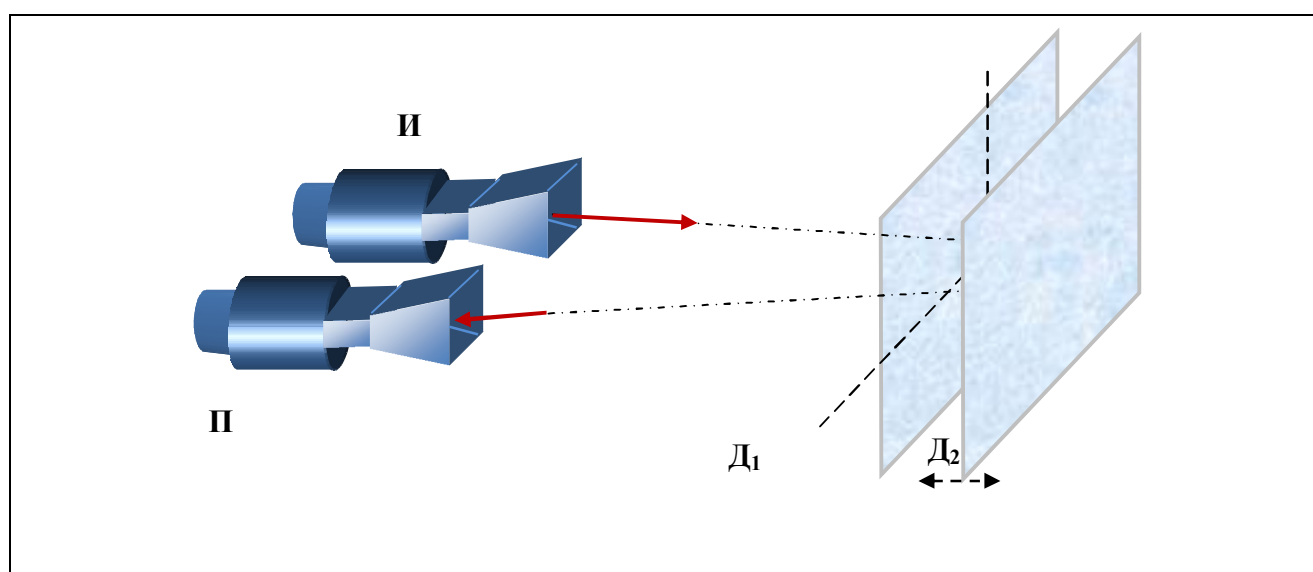


Рис. 10

Как видно из рисунка, измерения проводятся при почти нормальном падении волны на плоскость зеркал в следующей последовательности. Сначала устанавливают излучатель и приемник для наблюдения волны, отраженной от первого зеркала (листа оргстекла). Затем, за первым листом размещают (параллельно первому) еще один лист. Обращают внимание студентов, что произошло некоторое изменение в амплитуде сигнала приемника. Подбором расстояния между листами оргстекла добиваются максимального уровня отраженного сигнала и(или) минимального. По желанию лектора можно провести измерение расстояний между отражающими поверхностями (т.е.

толщину «пленки») и сравнить результаты измерений с результатами, получающимися из теории.

Разность фаз волн, отраженных от первой и второй поверхностей, можно записать как $\Delta\varphi = (2\pi/\lambda) \cdot 2h \cdot \cos\beta$ где β – угол преломления (в нашем случае равен углу падения) и учтено, что материал «пленки» воздух с показателем преломления равным единице. Потерю полволны в нашем случае учитывать не надо, поскольку условия отражения от первой поверхности и от второй совершенно одинаковые. Максимум интенсивности в отраженной волне получается при толщине пленки (расстоянии между листами) $h_m^{max} = \frac{m\lambda}{2 \cdot \cos\beta}$, а минимум при $h_m^{min} = \frac{(2m+1)\lambda}{4 \cdot \cos\beta}$.

Интерференция от двух щелей по схеме Юнга

Схема интерференции волн, распространяющихся от двух узких щелей, предложенная и продемонстрированная в свое время Т.Юнгом, повторялась потом многократно с волнами разной природы и в разных диапазонах длин волн. В нашем случае используются электромагнитные волны с периодом 3 см. Оптическая схема эксперимента приведена на рис. 11.

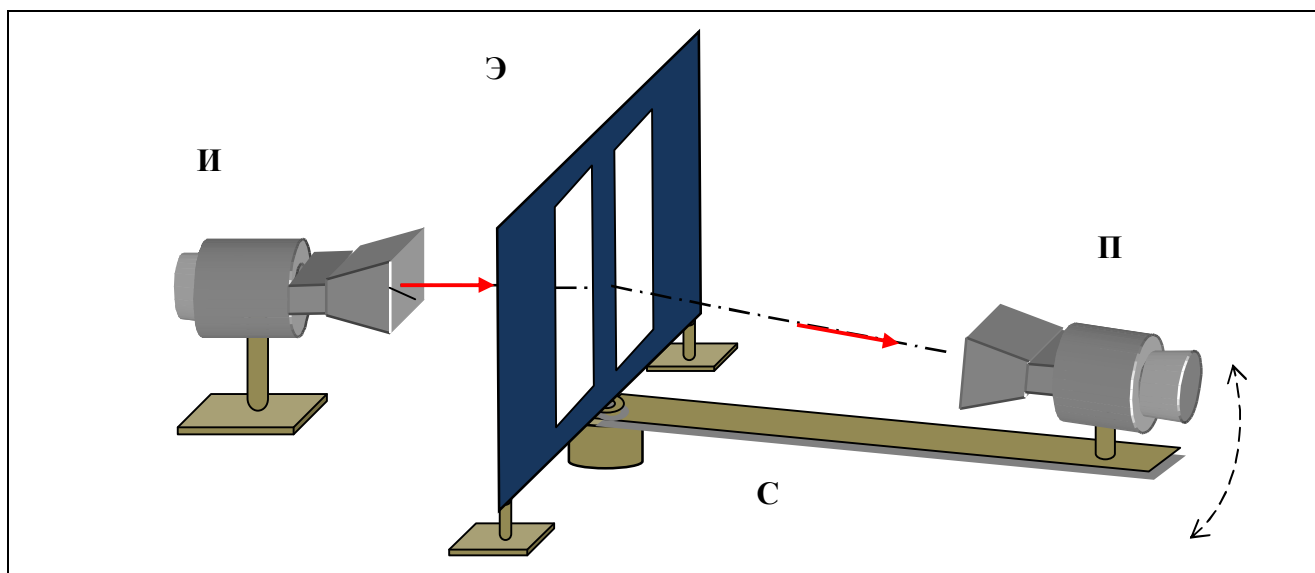


Рис. 11

Первичная волна, которая освещает щели, создается рупорным облучателем, расположенным на расстоянии примерно 2 м от металлического

экрана с щелями. При таком расстоянии первая зона Френеля в плоскости экрана равна примерно 50 см (по диаметру), что вполне достаточно для «освещения» двух щелей и создания тем самым двух когерентных источников. Распределение интенсивности в интерференционной картине регистрируется с помощью сканирующего устройства, которое хорошо видно на фотографии с общим видом установки. Фотография приведена на рис. 12.

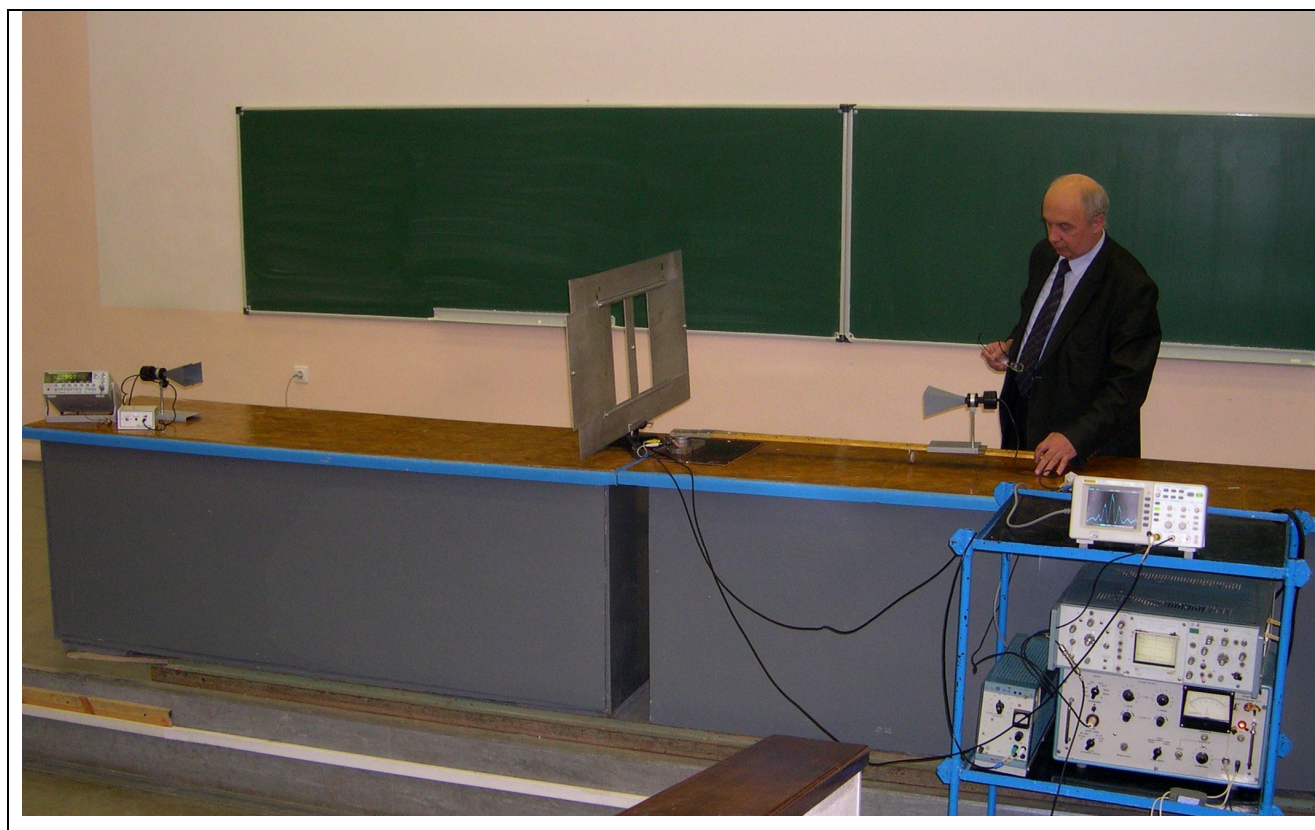
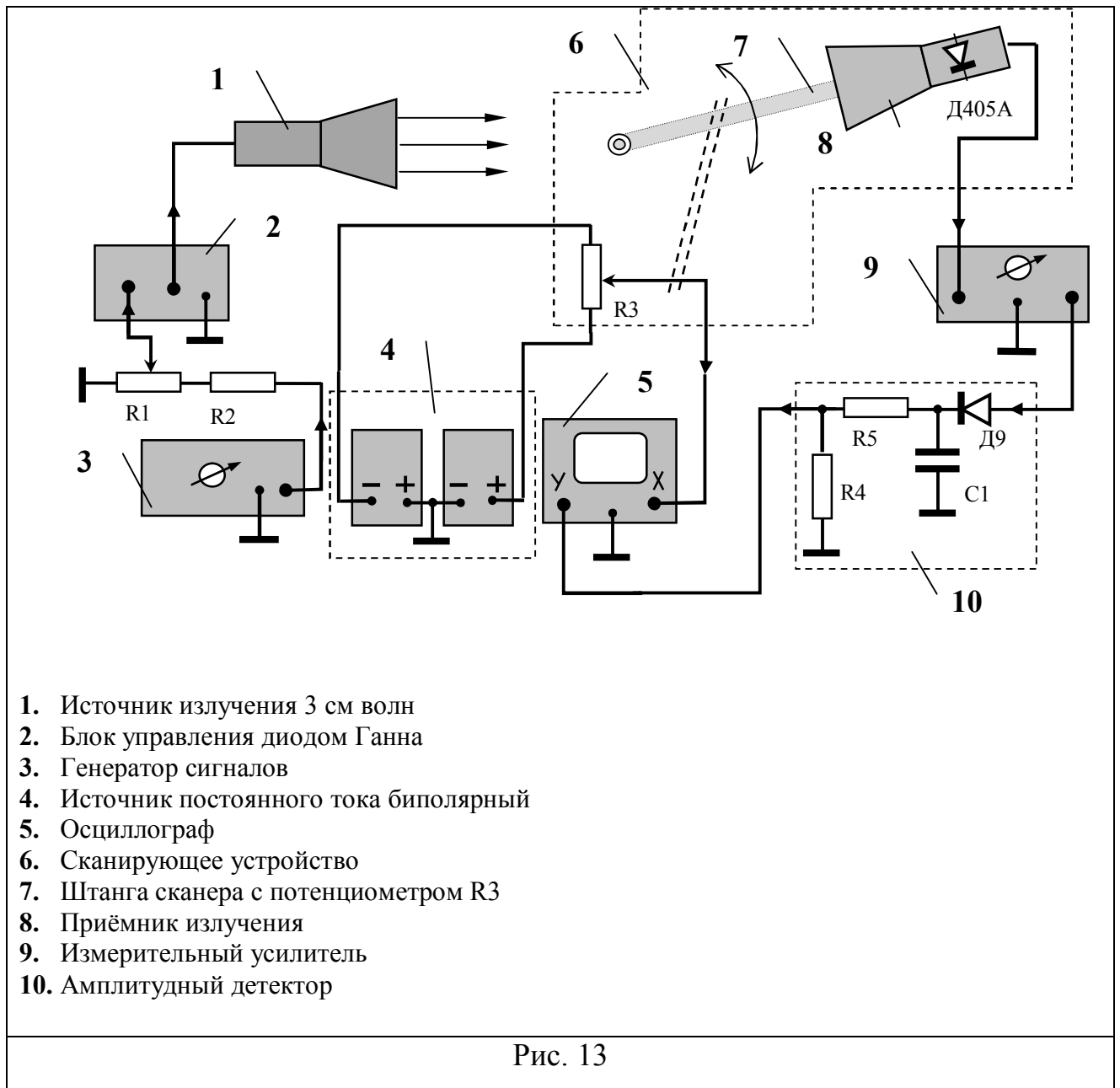


Рис. 12

Приемник СВЧ излучения располагается на штанге, которая может поворачиваться вокруг вертикальной оси, проходящей через один из концов штанги. Длина штанги равна одному метру, что определяет максимальный радиус окружности, по которой будет сканировать приемник. Сканирующее устройство расположено таким образом, чтобы ось поворота штанги находилась как можно ближе к центру экрана. Ось вращения штанги совмещена с осью потенциометра. Таким образом, при повороте штанги ось потенциометра поворачивается, и сопротивление последнего изменяется. Подавая на потенциометр напряжение с источника постоянного тока, удается

связать положение приемника, закрепленного на штанге, с напряжением, снимаемым с потенциометра.



Как видно из рисунка, общая длина установки, а, следовательно, и расстояние между приемником и излучателем составляет примерно 3 м. При таких расстояниях, принимаемый приемником сигнал, оказывается слабым и не позволяет проводить измерение формы интерференционного распределения мощности излучения. Повышать мощность передатчика не целесообразно из соображений безопасности, поэтому были приняты меры по повышению чувствительности приемника. Используя стандартный для передатчика микрофонный вход, несущую частоту промодулировали синусоидальным

сигналом, частота которого была выбрана равной 3кГц. Выходной сигнал приемника фильтровался и усиливался измерительным усилителем типа У2-6, а затем детектировался и наблюдался на экране осциллографа, при этом на вход X осциллографа подавалось напряжение с потенциометра, пропорциональное углу поворота сканирующего устройства. Электрическая блок-схема установки приведена на рис. 13.

На рис. 14 приведена фотография с экрана осциллографа, соответствующая интерференции от двух щелей размером (шириной) 7 см каждая, расположенных на расстоянии 14 см друг от друга.

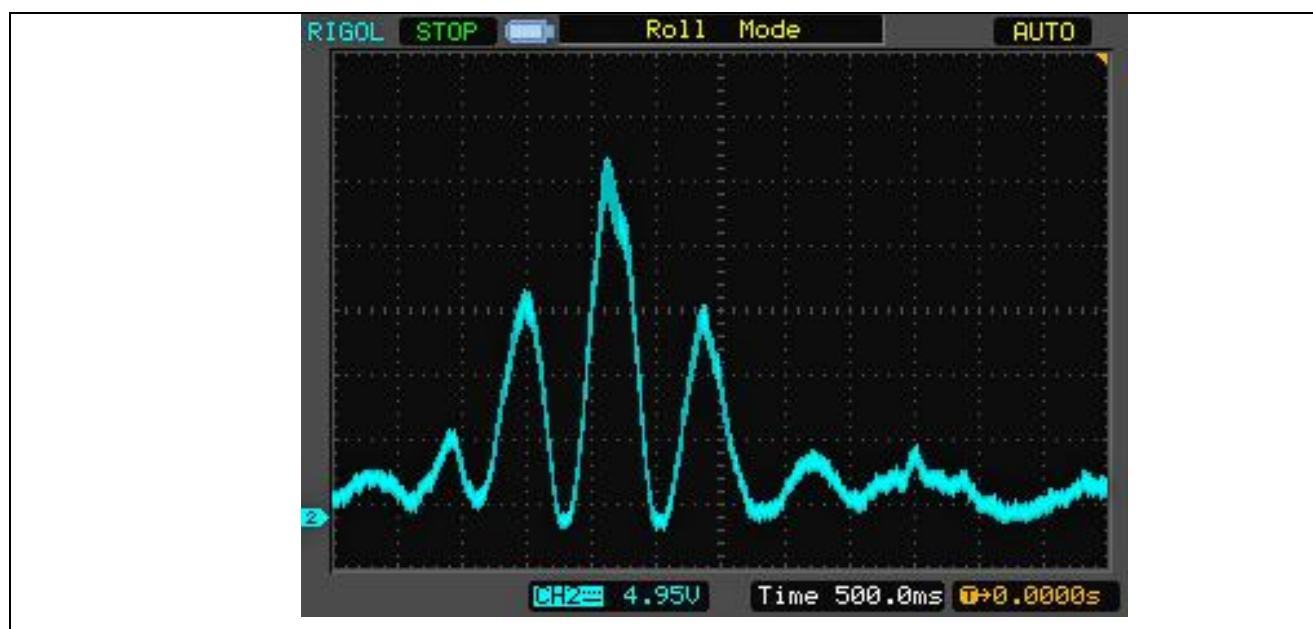


Рис. 14

Интерференция по схеме «зеркало Ллойда»

Схема интерференции с использованием одного зеркала была предложена Х.Ллойдом⁸ в 1837 году. Благодаря своей простоте эта схема часто используется для теоретического рассмотрения различных аспектов

⁸ **Ллойд Хэмфри** (*Lloyd Humphrey*, 1800 - 1881) — ирландский физик, Окончил Дублинский ун-т (1819), где и работал (с 1831 — профессор, с 1867 — президент). Работы относятся к механике, оптике, земному магнетизму. Предложил метод получения интерференционной картины от одного зеркала, показав, что оптическая интерференция может быть получена, если заставить интерферировать от зеркала прямой свет и отраженный (1837). Открыл (1832) явление конической рефракции, предсказанное ранее У. Гамильтоном.

интерференции (видность интерференционных полос, влияние некогерентности и размеров источника и т.п.), хотя как раз в оптике и не получила широкого применения. Зато в радиодиапазоне эта схема нашла применение, при этом в качестве зеркала может использоваться, в частности, поверхность моря.

Фото установки, которая предназначена для демонстрации интерференции по схеме «зеркало Ллойда», приведена на рис. 15.

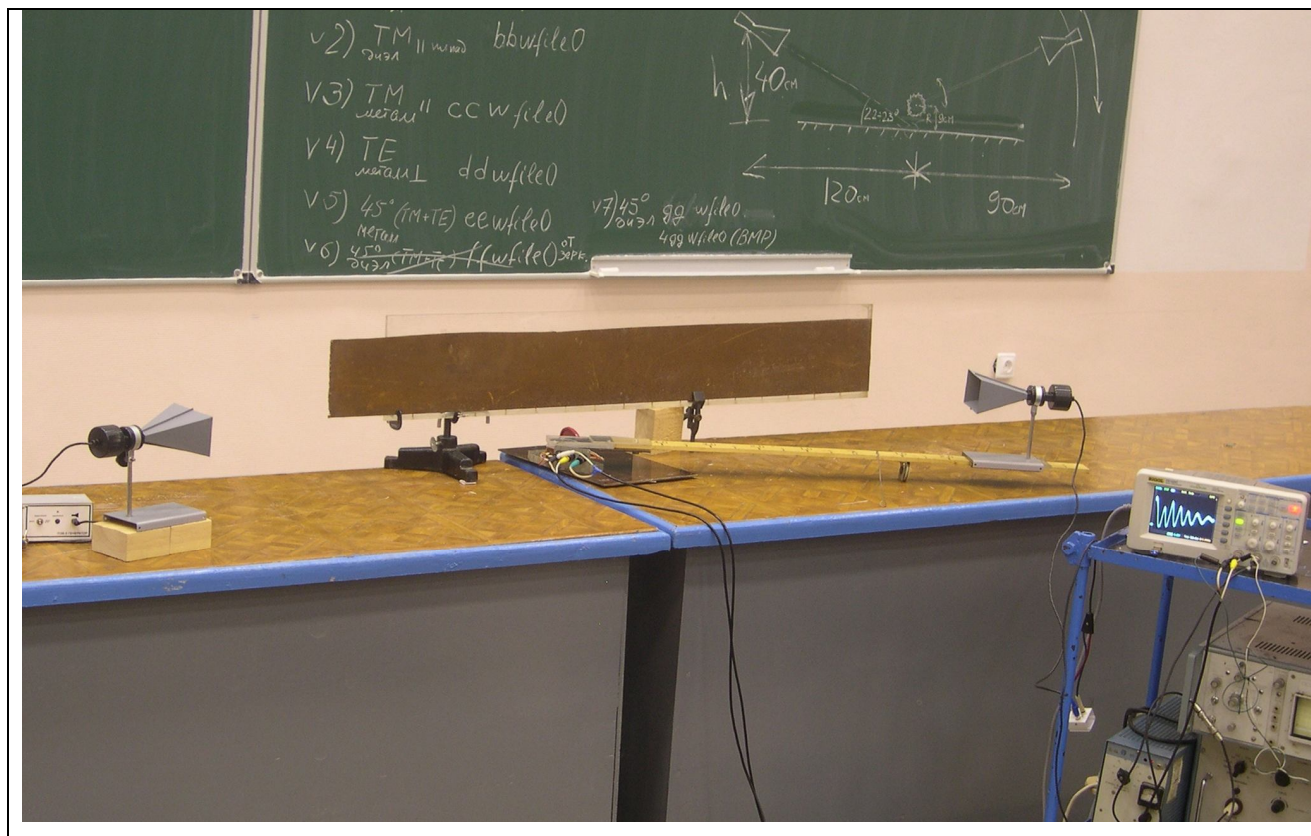


Рис.15

Как видно на фотографии, вся она располагается на лабораторном столе, в качестве зеркала может использоваться либо диэлектрик (оргстекло) либо проводник (металл). Распределение интенсивности в интерференционной картине регистрируется с помощью такого же сканирующего устройства, которое используется при наблюдении интерференции по схеме Юнга (фото на рис. 12), при этом центр вращения сканирующего устройства располагается перед плоскостью зеркала (на расстоянии примерно 10 см).

Установка позволяет наблюдать и обсуждать эффекты, связанные с использованием поляризованного излучения для наблюдения интерференционных полос по схеме «зеркало Ллойда».

Расчет интерференционной картины в различных оптических схемах с отражающими поверхностями обычно учитывает потерю пол волны («сбой фазы» на π), происходящую при отражении от оптически более плотной среды. Однако это правило не является универсальным [4, 5, 7] и может привести к неверному результату, например, в случае наклонного падения волны, с вектором напряжённости электрического поля, колеблющемся в плоскости падения (ТМ поляризация).

Из формул Френеля, позволяющих записать, в частности, коэффициенты отражения электромагнитных волн от границы раздела двух сред, следует, что для волны ТЕ поляризации (вектор напряженности электрического поля перпендикулярен плоскости падения), при отражении от оптически более плотной среды происходит сбой фазы на π . В то же время для ТМ волны, изменение знака коэффициента отражения не всегда можно трактовать как появление сбоя фазы при отражении. Неоднозначность возникает из-за неколлинеарности векторов \vec{E} в падающей и отраженной волнах. Однозначно судить о наличии (отсутствии) сбоя фазы можно лишь в случаях, когда угол падения волны на зеркало близок к нулю (нормальное падение) или 90 градусам (скользящее падение).

В интерференционной схеме Ллойда, падение волны на зеркало происходит под углом близким к 90^0 (скользящее падение) и, кажется, никаких сложностей с трактовкой формул Френеля возникнуть не может. Однако, следует помнить, что сбой фазы на π происходит при падении волн (на оптически более плотную среду) под углами большими чем угол Брюстера. Если подобрать материал с очень большим коэффициентом преломления, то угол Брюстера может оказаться больше чем угол падения волны в схеме Ллойда и тогда ТМ волна отразится без потери пол волны. Следовательно, интерференционные картины, полученные при использовании ТЕ и ТМ волн,

будут сдвинуты относительно друг друга на половину интерференционной полосы.

На практике такой, казалось бы, экзотический случай, может быть реализован именно в СВЧ диапазоне, при использовании металлического зеркала: идеальному проводнику, как известно, соответствует предельный переход $n \rightarrow \infty$ [4]. Поэтому, если в схеме «зеркало Ллойда» использовать металлическое зеркало, то можно ожидать, что расположение максимумов и минимумов будет различным для разных поляризаций (ТМ и ТЕ) [8].

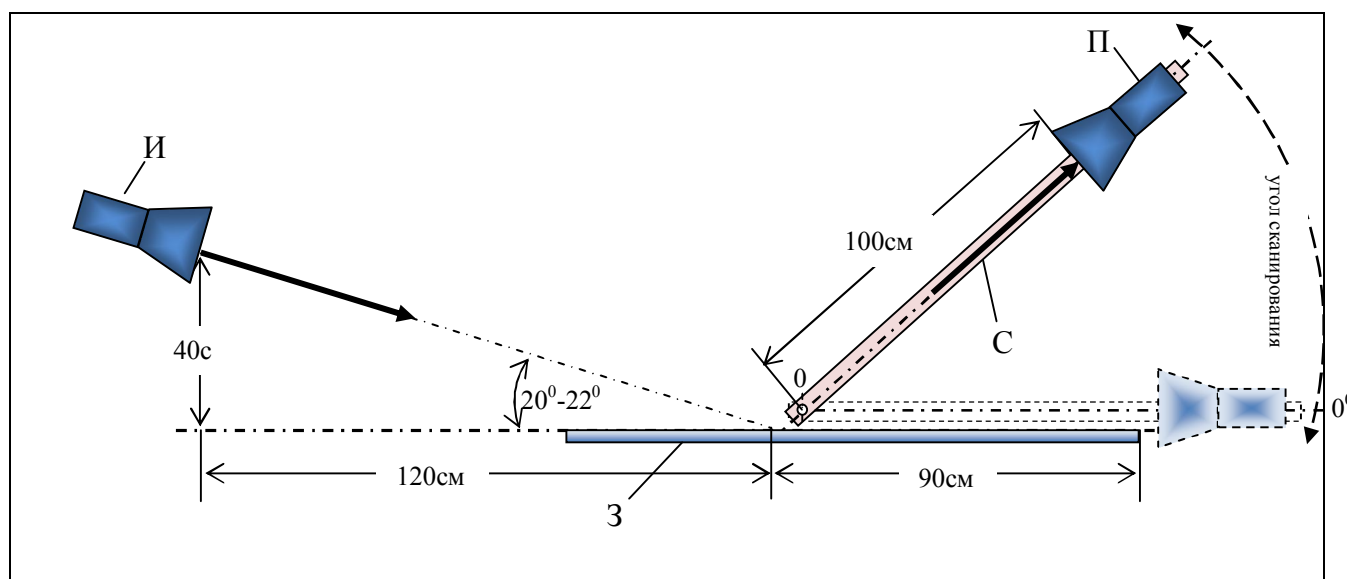


Рис.16

На рис. 16 приведена схема установки, использовавшейся для наблюдения интерференции по схеме Ллойда. На схеме изображены: излучатель И; зеркало З; приёмник П, укрепленный на рейке С сканера с центром вращения в точке «0», отстоящей от передней плоскости зеркала на расстояние 9 см. Фото установки показано на рис. 15. Источником линейно поляризованного излучения (с $\lambda = 3$ см) является рупорная антенна, возбуждаемая диодом Ганна. В качестве зеркала в одном случае использовался лист оргстекла длиной около 120 см, толщины 1 см ($n = 1.6$), в другом – алюминиевый лист ($|n| \gg 1$). Распределение интенсивности в интерференционной картине вдоль направления, перпендикулярного плоскости зеркала, регистрировалось перемещающейся рупорной антенной с детектором,

подключенной к регистрирующему прибору, например осциллографу DS 1022C фирмы RIGOL или DSO-2150 USB.

На рис. 17 представлены результаты наблюдений, в схеме Ллойда с диэлектрическим зеркалом (по оси абсцисс отложена координата, отсчитываемая в направлении, перпендикулярном плоскости зеркала). Из осциллограмм видно, что координаты максимумов и координаты минимумов в интерференционных картинах для ТМ и ТЕ поляризаций совпадают. Если в используемом излучении присутствуют и ТЕ и ТМ поляризации одновременно, то это не скажется на видности интерференционных полос. На рис. 17 с, показан результат интерференции в случае, когда падающая волна поляризована под углом 45^0 к плоскости падения

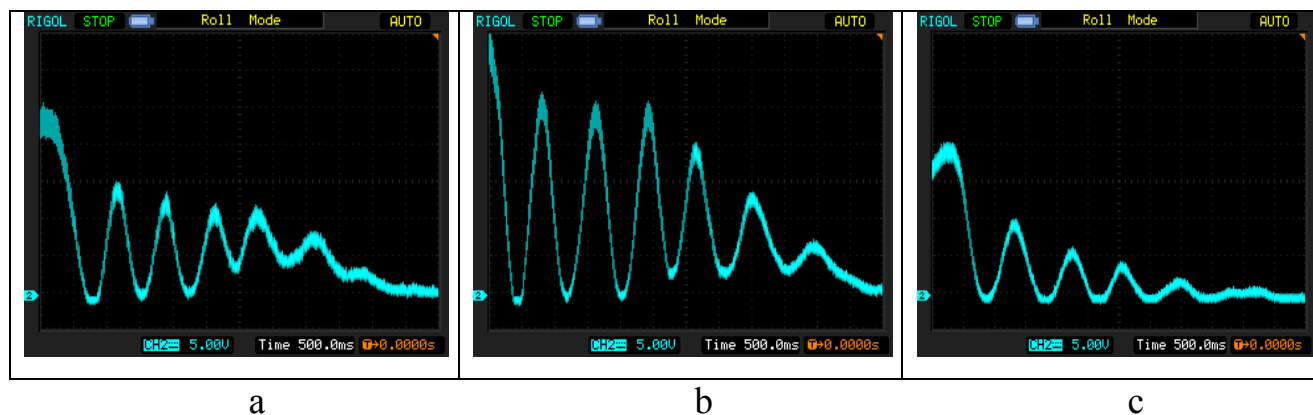


Рис. 17

Результаты аналогичных измерений с использованием металлического зеркала приведены на рис. 18. В данном случае интерференционные картины для волн ТЕ и ТМ поляризаций сдвинуты на полуширину интерференционной полосы (осциллограммы «а» и «b» рис. 18). Следствием последнего обстоятельства является то, что в случае поляризации падающей волны под углом 45^0 к плоскости падения, интерференция не наблюдается (осциллограмма «с» рис. 18).

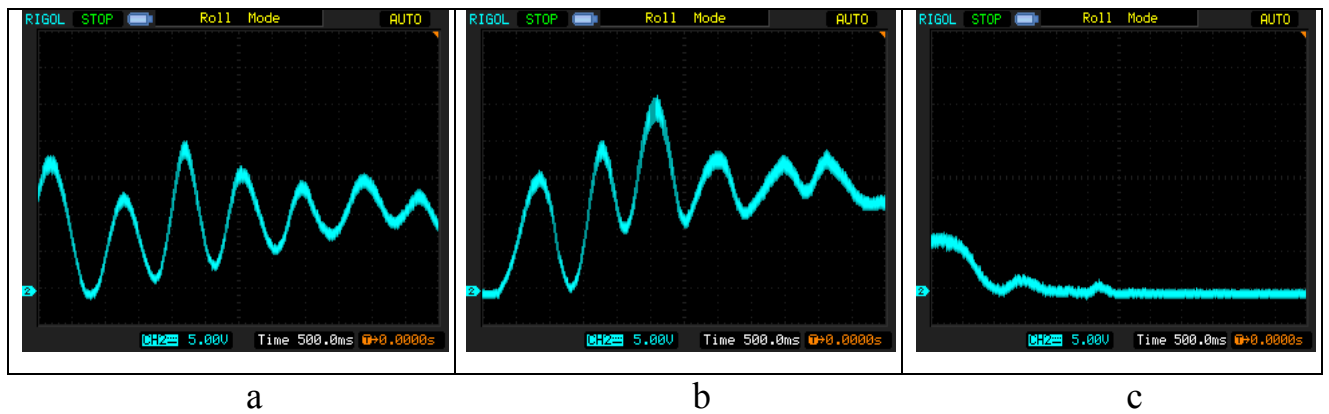


Рис. 18

Можно сделать вывод, что в случае отражения от металлического зеркала условия отражения ТЕ и ТМ волн оказываются разными: у ТМ-волны отсутствует сбой фазы при отражении (осциллограмма «b»).

К сожалению, конечные размеры входного раскрыва рупора приемника затрудняют измерение интенсивности в интерференционной картине в точках, непосредственно примыкающих к плоскости зеркала, и тем самым не позволяют однозначно ответить на вопрос максимум или минимум интерференции находится на поверхности зеркала. Однако смещение (или не смещение) интерференционных полос, соответствующих разным поляризациям, относительно друг друга хорошо заметно. В качестве дополнительной иллюстрации данного факта оцифрованные осциллограммы, соответствующие распределению интенсивности излучения в интерференционных картинах, полученных для разных поляризаций, совмещались на одном графике. Совмещение проводилось с точной привязкой к координатам сканирующего устройства и после некоторого усреднения (по нескольким соседним точкам) для уменьшения уровня шума.

На рис. 19 «a» показан результат интерференции с использованием диэлектрического зеркала, а на рис. 19 «б» с использованием металлического зеркала.

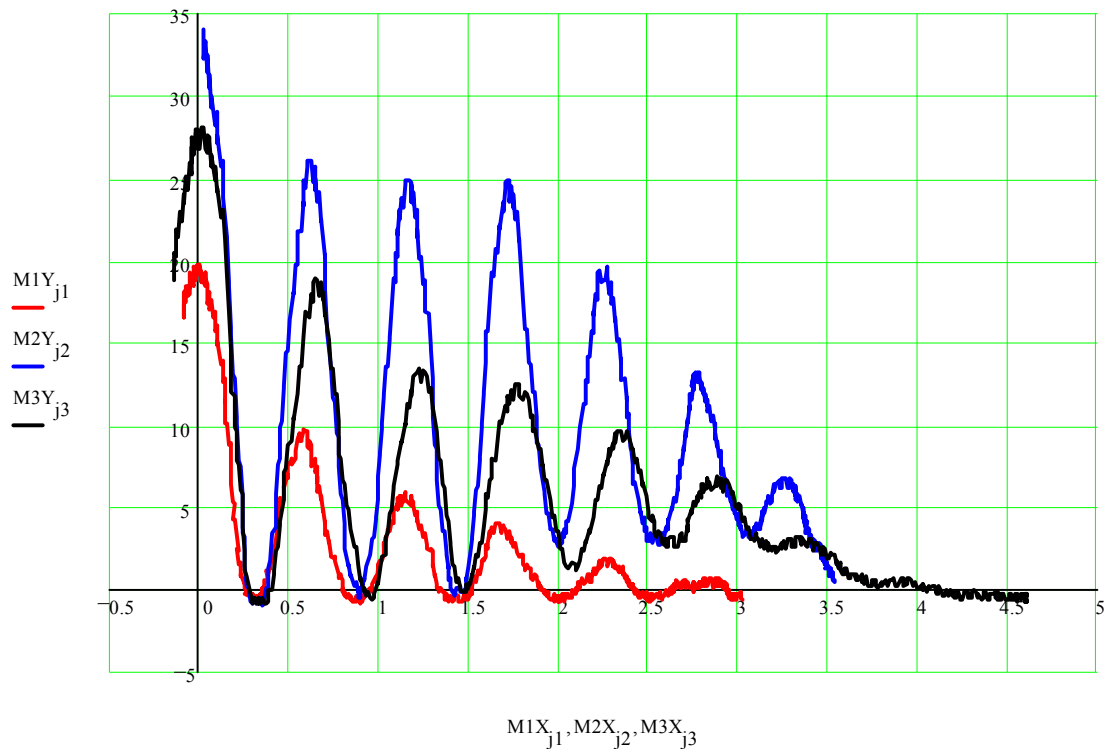


Рис. 19 «а»

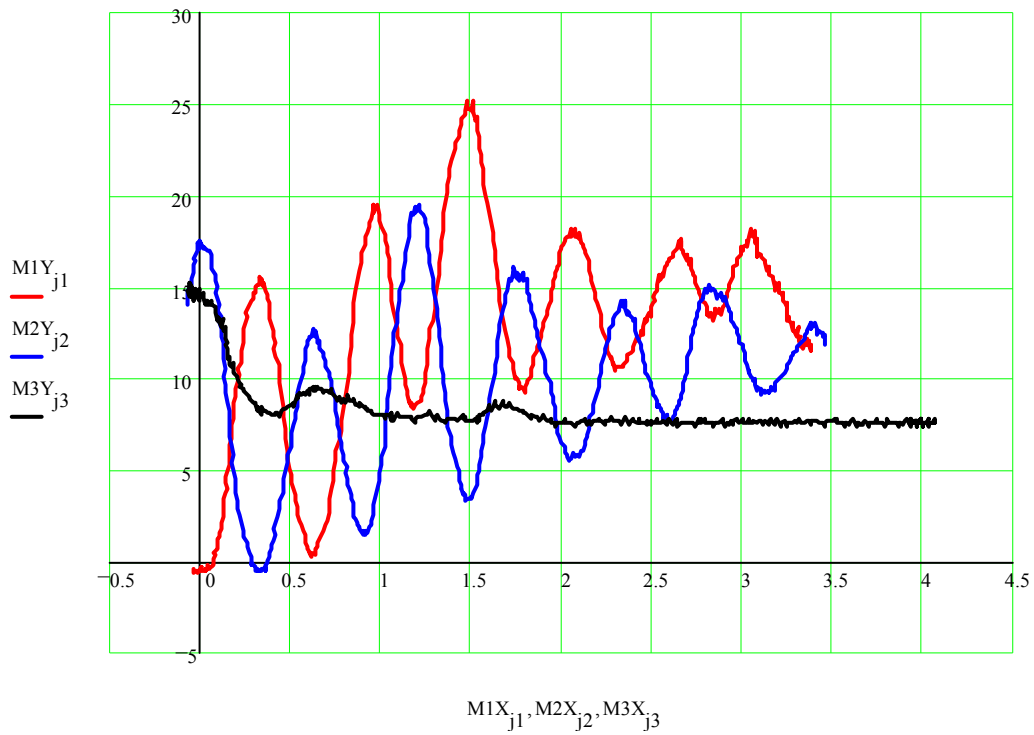


Рис. 19 «б»

Хорошо видно качественное отличие этих двух случаев друг от друга.

Наблюдение стоячих волн

Наиболее простой случай получения двух интерферирующих волн – это отражение электромагнитной волны при нормальном падении на плоскую проводящую поверхность (зеркалом). В пространстве между источником и проводящей поверхностью возникает стоячая волна (см., например, [6]) вследствие суперпозиции волн, излучаемых и отражаемых. Помещая приемную антенну в это пространство можно наблюдать увеличение и уменьшение амплитуды регистрируемого сигнала при небольших смещениях приемника. Поскольку, как известно, расстояния между соседними пучностями (или соседними узлами) равно половине длины волны, то таким образом можно измерить длину волны. Впервые такой метод применил Герц в своих классических экспериментах с дециметровыми волнами [4].

Относительно просто получить стоячую волну в СВЧ диапазоне, имея в распоряжении излучатель электромагнитных волн. Для проведения эксперимента напротив излучателя на расстоянии порядка одного метра устанавливают металлический экран (рис. 20).

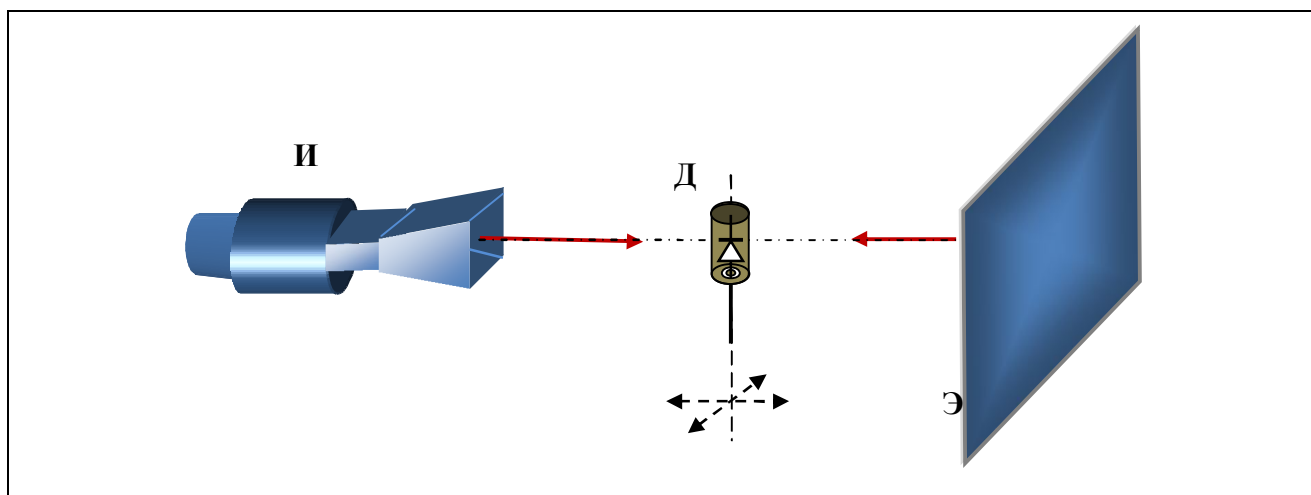


Рис. 20

При нормальном падении электромагнитной волны на отражательную поверхность с помощью зонда – полуволнового вибратора, нагруженного на диод, исследуют пространство перед зеркалом. Перемещая зонд поперек плоскости зеркала, наблюдаем периодическое чередование усиления и ослабления сигнала. Расстояния между положениями зонда, которым

соответствуют максимумы принимаемого сигнала, можно измерить. Как известно, оно равно половине длины волны используемого излучения.

Интересен опыт, в котором вместо сплошного экрана использована решетка из проводящих стержней (см. рис. 3). Наличие стоячих волн при ориентации стержней решетки параллельно вектору напряженности электрического поля, может служить доказательством эффективного отражения электромагнитной волны такой решеткой.

Часть 4. Дифракция Френеля

Дифракция (от лат. diffractus — разломанный) волн, явления, наблюдаемые при прохождении волн мимо края препятствия, связанные с отклонением волн от прямолинейного распространения при взаимодействии с препятствием. Из-за дифракции волны огибают препятствия, проникая в область геометрической тени. Дифракция волн — характерная особенность распространения волн независимо от их природы.

Дифракция волн существенно зависит от соотношения между длиной волны и размером объекта, вызывающего дифракцию. Наиболее отчетливо она обнаруживается в тех случаях, когда размер огибаемых препятствий соизмерим с длиной волны. Поэтому легко наблюдается дифракция звуковых, сейсмических и радиоволн, для которых это условие обычно выполняется. Например, именно дифракцией звуковых волн объясняется возможность слышать голос человека, находящегося за углом дома. Гораздо труднее наблюдать без специальных устройств дифракцию света, тем не менее, именно в результате оптических наблюдений появился и сам термин дифракция и было дано теоретическое объяснение этого явления.

Термин «Дифракция» (*diffractus*) был предложен Ф. Гримальди⁹ в работе, вышедшей в 1665 г., для обозначения наблюдавшегося им размытия узкого пучка солнечного света, пропускаемого через небольшое отверстие, а также тени от стержня, освещаемого узким пучком. Основы теории дифракции были заложены в первой половине 19 века в трудах Т. Юнга¹⁰ и О. Френеля. Первая волновая трактовка дифракции дана Т.Юнгом в 1800 году, другая – О.Френелем в 1815. Характерные черты объяснения, данного Т.Юнгом и О.Френелем, можно проследить (вслед за [9]) на простейшем примере дифракции за прямолинейным краем препятствия. В картине волнового поля, имеющей место за препятствием, Юнг усматривает сочетание двух явлений: собственно дифракции и интерференции. В дополнение к геометрическому принципу распространения локально плоских волн в направлении лучей, Юнг ввел принцип поперечной передачи амплитуды колебаний непосредственно вдоль волновых фронтов, указав, что скорость этой передачи, т.е. поток амплитуды, пропорционален длине волны и градиенту амплитуд на фронте. Согласно Юнгу возникновение дифрагированной волны имеет локальный характер и происходит в некоторой окрестности границы тени за краем экрана или на самом краю. Можно представить, что создается поле цилиндрических волн, испускаемых как бы краем экрана (см. рис. 21). Интерференция между дифрагированной волной и незаслоненной препятствием частью падающей волны объясняет появление на экране за

⁹ Ф.Гримальди(*Francesco Maria Grimaldi*, 1618-1663), итальянский физик и астроном. Профессор математики в иезуитской коллегии в Болонье. В труде «Физико-математический трактат о свете, цветах и радуге» (1665, посмертно) дал описание открытого им явления дифракции света. По его мнению, дифракция вызывается появлением волн в световой жидкости при ударе о края препятствия. Совместно с иезуитом Дж. Б. Риччоли составил карту Луны и ввёл названия лунных образований, сохранившиеся до сих пор. Был противником гелиоцентрической системы, принимал участие в составлении трактата Риччоли, направленного против Н. Коперника.

¹⁰ Т.Юнг (*Thomas Young*, 1773 –1829), английский физик, врач, астроном и востоковед, в Гёттингентском университете слушал лекции Г.К. Лихтенберга (того самого, который ввел обозначения «+» и «-» для двух родов электричества), а в Кембридже изучал медицину, в 1802-1829г. –секретарь Лондонского Королевского общества и одновременно (с 1811) врач в больнице Святого Георгия в Лондоне

препятствием интерференционных полос в области «геометрического света» и отсутствие интерференции в области «геометрической тени».

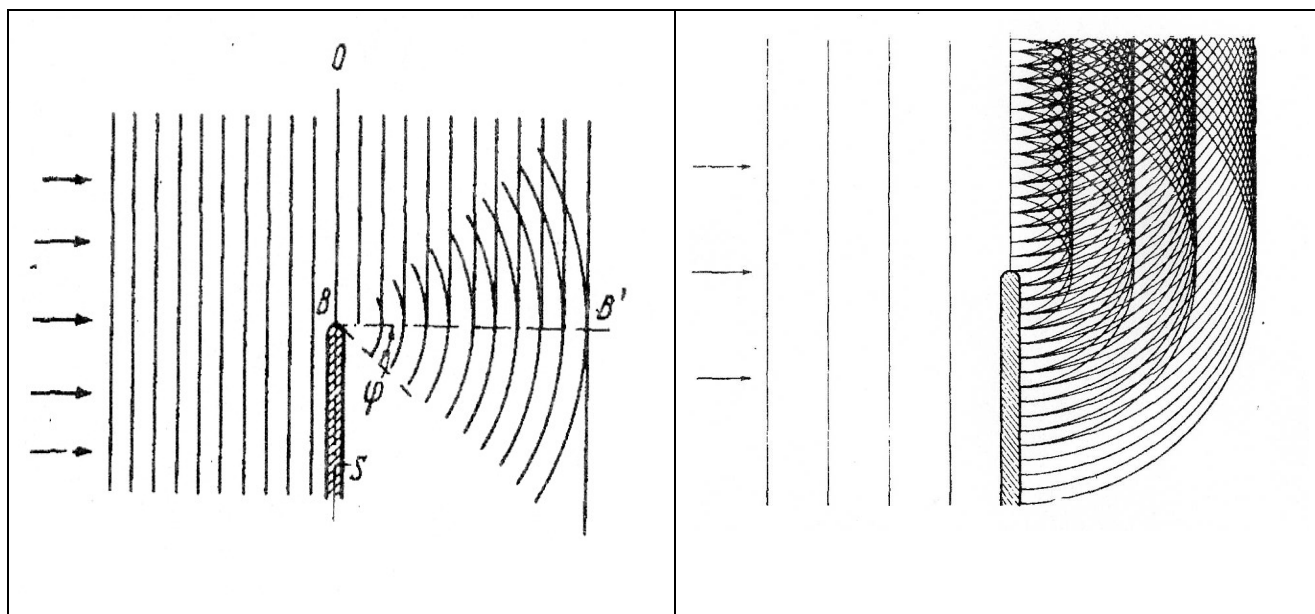


Рис. 21

Рис. 22

Не увидев возможности объяснить методом Юнга тот факт, что острые и закругленные края приводят к одинаковому дифракционному изображению на экране вблизи границ геометрической тени, О.Френель (1815) отказался от локальной трактовки дифракции как явления, происходящего в окрестности краев отверстия. Используя принцип Х.Гюйгенса¹¹, он представил дифракционные явления как результат интерференции полей бесконечного множества фиктивных элементарных источников (см. рис. 22), распределенных по всей плоскости отверстия. Для наглядности представления о величине дифракционного поля в некоторой произвольной точке A за большим по сравнению с длиной волны отверстием Френель ввел разбиение плоскости

¹¹ Х.Гюйгенс (*Christiaan Huygens*, 1629 –1695), нидерландский механик, физик, математик, астроном, изобретатель. Учился в Лейденском университете. Известность пришла к нему когда, усовершенствовав телескоп (доведя его до 92-кратного увеличения), открыл кольца Сатурна и спутник этой планеты Титан. В 1651 году опубликовал «Рассуждения о квадратуре гиперболы, эллипса и круга». В 1657 году получил голландский патент на конструкцию маятниковых часов. 15 лет (с 1666 г.) был президентом только что организованной Французской (Парижской) Академии наук. В 1673 году под названием «Маятниковые часы» выходит исключительно содержательный труд по кинематике ускоренного движения. Эта книга была настольной у И.Ньютона. В 1678 году публикует «Трактат о свете» с «наброском» волновой теории света.

отверстия на кольцеобразные полуволновые зоны. Последние строятся с помощью циркуля, начиная с первой зоны, так, как показано на рис. 23 для точки A , расположенной на оси системы (представлен случай сферической «освещающей» волны, падающей на отверстие радиуса a).

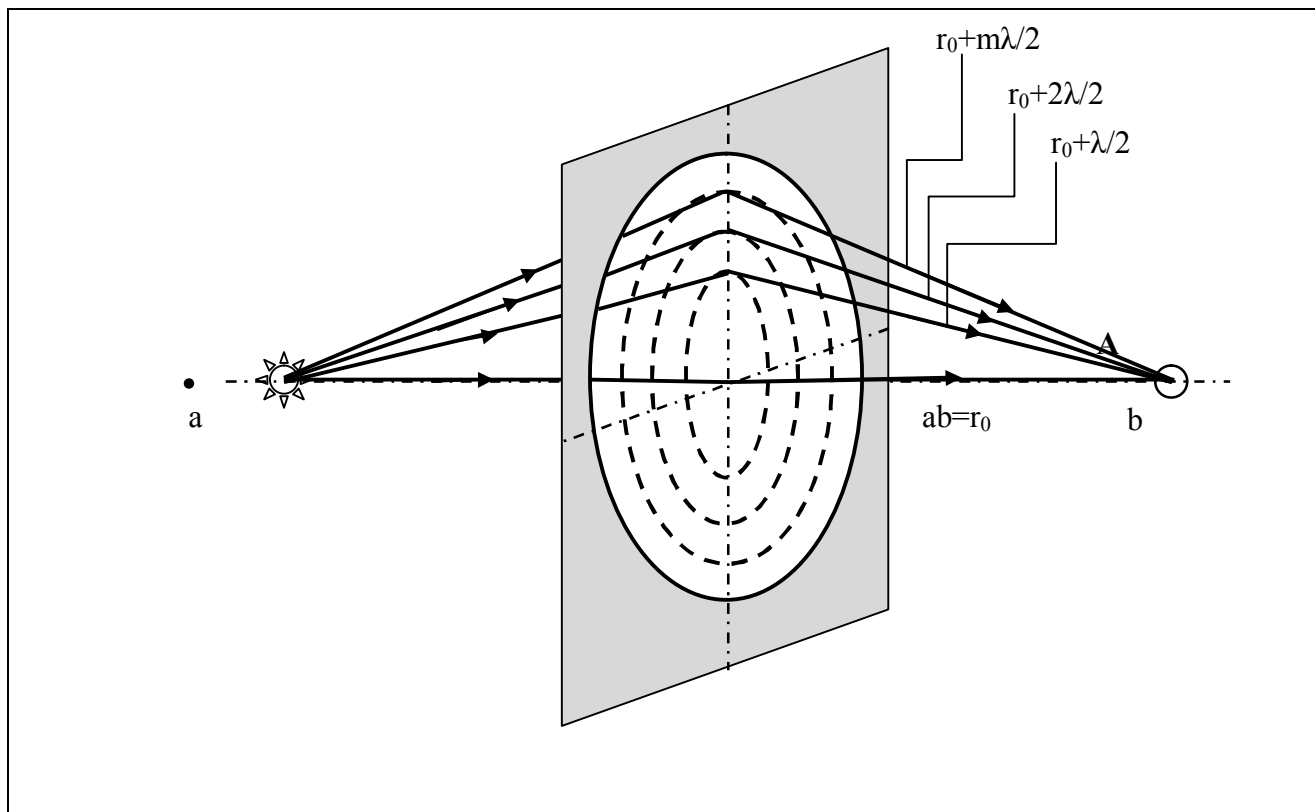


Рис. 23

Френелевское представление о дифракции вскоре получило преобладающее значение и привело к окончательной победе волновой теории света над господствовавшей в то время, ньютоновой эмиссионной теорией. Хотя френелевский метод является более формальным, поскольку для объяснения дифракции у края привлекаются к рассмотрению весьма удаленные от края источники, локальный подход Юнга, более адекватный физической сути явления, считался со времен Френеля неверным. В дальнейшем было показано, что результаты вычислений френелевским методом приводятся с помощью математических преобразований к форме, предсказанной Юнгом.

В строгой формулировке Гельмгольца¹² (1859) и Кирхгоффа¹³ (1882) принцип Гюйгенса представляет собой интегральное тождество, связывающее значение волнового поля в произвольной точке некоторой области с краевыми значениями поля и его производных на границе области. В таком виде этот принцип пригоден лишь для формулировки математической задачи дифракции в форме интегрального уравнения, решить которое в общем случае не удастся. Поэтому получить представление о дифракционном поле и вычислить его на основании принципа Гюйгенса можно, как правило, только если указанные краевые условия известны из других соображений. Для приближенных вычислений дифракции, следуя Кирхгоффу, принимают значения поля и его производных в плоскости отверстия такими, как если бы экран никак не искажал падающую волну, в тени же непосредственно за экраном эти значения принимаются равными нулю. Этим способом удобно получаются

¹² Г. Гельмгольц (*Hermann von Helmholtz*, 1821-1894), немецкий физик, врач, физиолог, психолог. Выпускник королевского медико-хирургического института, проходил военную службу, с 1843 года в Потсдаме, в качестве военного врача. Первые научные работы датируются 1847 годом. В 1848 году уходит с военной службы ради занятий преподавательской и научной работой. Деятельность Гельмгольца как профессора, распадается на деятельность профессора физиолога до 1871 года и профессора физики с 1871 до 1894 года. Однако, к физике он обращался постоянно, даже в пору до 1871 года. В книге «О сохранении силы» (1847) формулирует закон сохранения энергии строже и детальнее, чем Роберт Майер в 1842 году, и тем самым вносит существенный вклад в признание этого оспариваемого тогда закона. Параллельно Гельмгольц активно изучает физиологию зрения и слуха разрабатывает математическую теорию для объяснения оттенков звука с помощью обертонов, способствует признанию теории трёхцветного зрения Томаса Юнга. Ряд технических изобретений Гельмгольца носит его имя. Катушка Гельмгольца служит для создания открытого однородного магнитного поля. Резонатор Гельмгольца – полый шар с узким отверстием служит для анализа акустических сигналов

¹³ Г. Кирхгофф (*Gustav Robert Kirchhoff*, 1824-1887) — один из великих физиков XIX века. С 1842 по 1846 г. изучал математику и физику в Кёнигсбергском университете, преподавал в Берлине, Бреславле, Гейдельберге, снова в Берлине. С 1862 года состоял членом-корреспондентом Санкт-Петербургской академии наук. Будучи прекрасным математиком, обладал в то же время редким умением плодотворно прилагать эти знания к труднейшим вопросам математической физики, в области которой преимущественно работал. Уже первые его работы о распространении электричества по пластинкам (1845—1847) послужили исходным пунктом для множества работ других учёных. Целый ряд последующих работ по электричеству был посвящён вопросам распределения электричества на проводниках, разряду конденсаторов и другим вопросам электричества (1853 и 1876). Одновременно Кирхгофф обнаружил ряд основополагающих работ по механике, относящихся главным образом к теории деформации, равновесия и движения упругих тел.

приближенные формулы дифракционного поля для отверстий различной формы, как для конечных расстояний от отверстия (дифракция Френеля), так и для удаленной зоны (дифракция Фраунгофера). Сравнение с точным решением задачи дифракции на полуплоскости, полученным Зоммерфельдом (1896), показывает, что хотя приближенные формулы дифракции Френеля и приводят к преуменьшенным значениям поля для больших углов дифракции в зоне тени, но для малых углов дифракции, т. е. вблизи границы тени, эти формулы хорошо отображают дифракционную картину.

Метод Френеля встречает затруднения, когда не удастся заранее, хотя бы приближенно, угадать (подобно тому, как это делает Кирхгофф для больших отверстий) распределение элементарных источников на граничных поверхностях. Это относится, например, к огибанию волнами плавно выпуклого препятствия.

Демонстрация опытов с зонными пластинами Френеля

Изучению принципа Гюйгенса-Френеля в курсе общей физики способствуют лекционные опыты, которые в разных диапазонах и с волнами разной природы присутствуют в арсеналах большинства физических кабинетов вузов. В распоряжении лекторов, читающих курсы физики в ННГУ, имеются демонстрации, иллюстрирующие указанный принцип на примере дифракции, волн на поверхности воды, электромагнитных волн оптического диапазона и диапазона СВЧ [1, 6, 10, 11].

Если говорить о наглядности представления способа разбиения поверхности вторичных источников на кольцевые зоны (зоны Френеля), то без сомнения, наиболее эффектными являются демонстрации с электромагнитными волнами в СВЧ диапазоне [1]. Большая по сравнению со световой длина волны, делает наглядными сами зоны, а измерение мощности принятого СВЧ излучения позволяет непосредственно на лекции проводить простейшие количественные сравнения. Для трехсантиметрового диапазона волн довольно просто выполнить экраны с отверстиями в одну, две, три и т.д. зоны Френеля.

Например, для расстояний между источником и препятствием и между препятствием и приемником по одному метру и при длине волны, равной 3-м сантиметрам, радиусы первой зоны Френеля равны 12.3 см, второй – 17.3 см, третьей – 21.2 см, четвертой – 24.5 см и т.д. Препятствия таких размеров хорошо видны в лекционной аудитории, их удобно закрывать и открывать в процессе проведения эксперимента. Для сравнения: при тех же расстояниях в оптическом диапазоне площадь отверстия, соответствующего первой зоне Френеля, равна примерно 1 мм^2 .

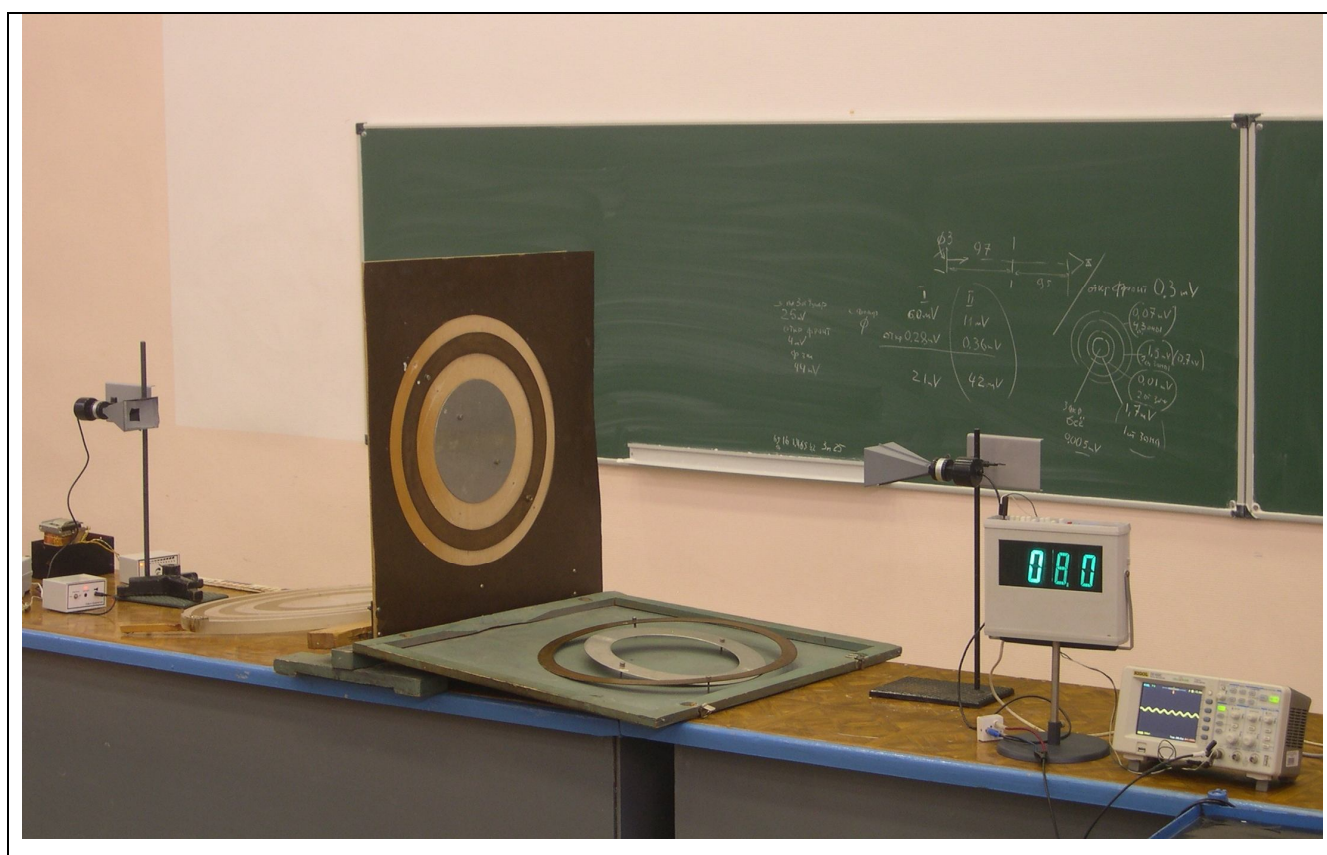


Рис. 24

Фотография демонстрационной установки приведена на рис. 24.

Для получения хороших количественных соотношений между интенсивностями излучения, принятого от разных зон, важно, чтобы препятствие (в данном случае отверстие, в котором «убирается» ровно четыре зоны Френеля) освещалось сферической волной. На фотографии видно, что рупор излучателя из стандартного набора приборов закрыт экраном с небольшим ($3 \times 3 \text{ см}^2$) отверстием. Размер и положение отверстия относительно

рупора излучателя подбирались экспериментально. Кроме этого, для повышения чувствительности установки, «первичная» волна модулировалась синусоидальным сигналом частотой 3 кГц (по амплитуде), а принятое приемником излучение после детектирования «по несущей» усиливалось полосовым усилителем, настроенным на частоту модуляции. Уровень принятого сигнала студенты могут наблюдать на демонстрационном вольтметре, либо на экране осциллографа.

При изложении материала целесообразно вначале провести опыты с «наборной» зонной решеткой, представляющей из себя металлический экран с отверстием равным радиусу четвертой зоны Френеля ($\rho_4=24,5$ см) для указанных расстояний между источником и приемником волн. Отверстие в экране закрыто прозрачным в трёхсантиметровом диапазоне волн материалом (фанера 10 мм), в котором имеются небольшие технологические отверстия для крепления металлических колец и диска. Диск и три кольца вырезаны по размерам первых четырех зон Френеля. Поэтому когда они все установлены в отверстии экрана, то полностью закрывают его. Очень эффектно и, как правило, производит на учащихся неизгладимое впечатление проведение опыта в следующей последовательности: первоначально поверхность отверстия экрана закрыта полностью и ни какого сигнала, естественно, приемник не принимает; снимаем диск (размером в первую зону) – появляется сигнал в приемнике (можно заметить уровень сигнала по показаниям вольтметра); снимаем кольцо, соответствующее второй зоне (предварительно можно задать вопрос студентам, например, «как изменится сигнал приемника, если площадь отверстия увеличить вдвое?» варианты ответов: «не изменится», «увеличится вдвое», «увеличится в 4 раза», уменьшиться») – наблюдаем почти полное ослабление сигнала; открываем третью зону; затем и четвертую. При желании можно открыть только четные (2-ю и 4-ю) зоны, или нечетные (1-ю и 3-ю). В конце опытов можно полностью убрать экран с отверстиями и измерить уровень сигнала, принятого через свободное

пространство. Теоретически, как известно [6], интенсивность колебаний, «сформированных» вторичными источниками одной зоны (или небольшого нечетного числа зон) должно быть в четыре раза больше, чем интенсивность в невозмущенной волне. На практике, из за не совсем точной юстировки, эти соотношения выполняются, во-первых приближенно, а во-вторых с тем большей точностью чем меньше зон «задействовано» в рассмотрении.

В качестве следующего «объекта» дифракции можно использовать экран, в котором открыты три четные зоны (2-я, 4-я, 6-я). Экран изготовлен из фольгированного гетинакса (изображен на рис. 25) и устанавливается вместо экрана с отверстием, рассмотренного в



Рис. 25

предыдущем опыте. По сравнению с отверстием в одну зону Френеля интенсивность принятого сигнала должна увеличиться в девять раз. По показаниям цифрового вольтметра можно убедиться, что имеется достаточно хорошее совпадение эксперимента с теорией.

В следующем опыте вместо зонных пластинок из фольгированного гетинакса можно использовать зонные пластинки, изготовленные из оргстекла [1], толщиной 27 мм (фотография установки с фазовыми зонными пластинами приведена на рис. 26). Толщина пластинок подобрана таким

образом, чтобы разность фаз между волнами, прошедшими через оргстекло, и прошедшими по свободному пространству, была равна π .

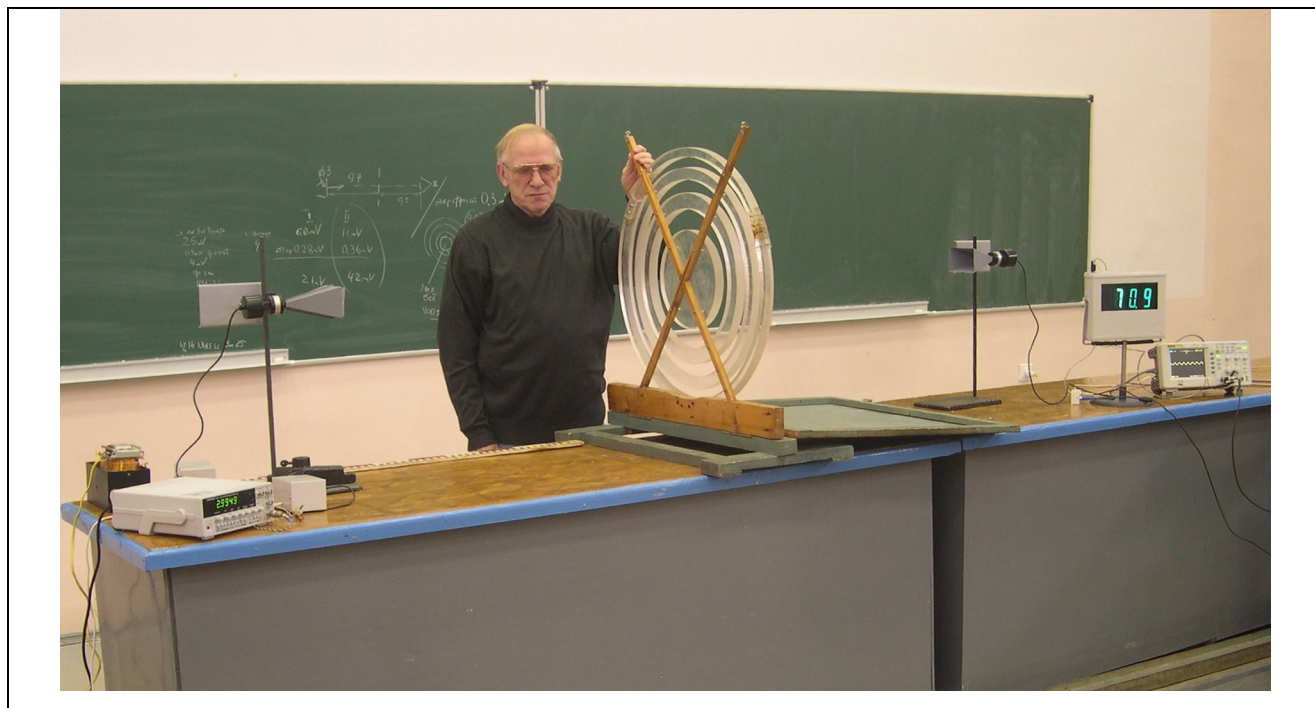


Рис. 26

Построение векторной диаграммы, которое позволяет рассчитать интенсивность дифрагировавшей волны (векторной диаграммы Френеля) подробно изложено в [6, 7]. В рассматриваемом случае фазовых зонных пластинок теоретически «выигрыш» по интенсивности получается в 49 раз по сравнению с интенсивностью за отверстием в одну зону Френеля и в почти 200 раз по сравнению с невозмущенной волной (в отсутствие экрана).

Демонстрация дифракции Френеля на «широкой» щели

Установка, с помощью которой наблюдалась интерференция от двух щелей (интерференционная схема Юнга, кстати, может рассматриваться как пример дифракции на двух щелях, правда наблюдаемой в «дальней зоне»: так называемая дифракция Фраунгофера), может быть использована для демонстрации дифракционной картины, характерной для дифракции Френеля. Единственное изменение, которое понадобится, это подбор размеров отверстий и расстояния от препятствия до приемника. На рис. 27 приведена фотография с экрана осциллографа, при наблюдении дифракции от двух

«широких» щелей, размером 12 см и промежутком между ними 14 см. Из-за особенностей сканирующего устройства наблюдается некоторое спадание уровня сигнала на краю дифракционной картины.

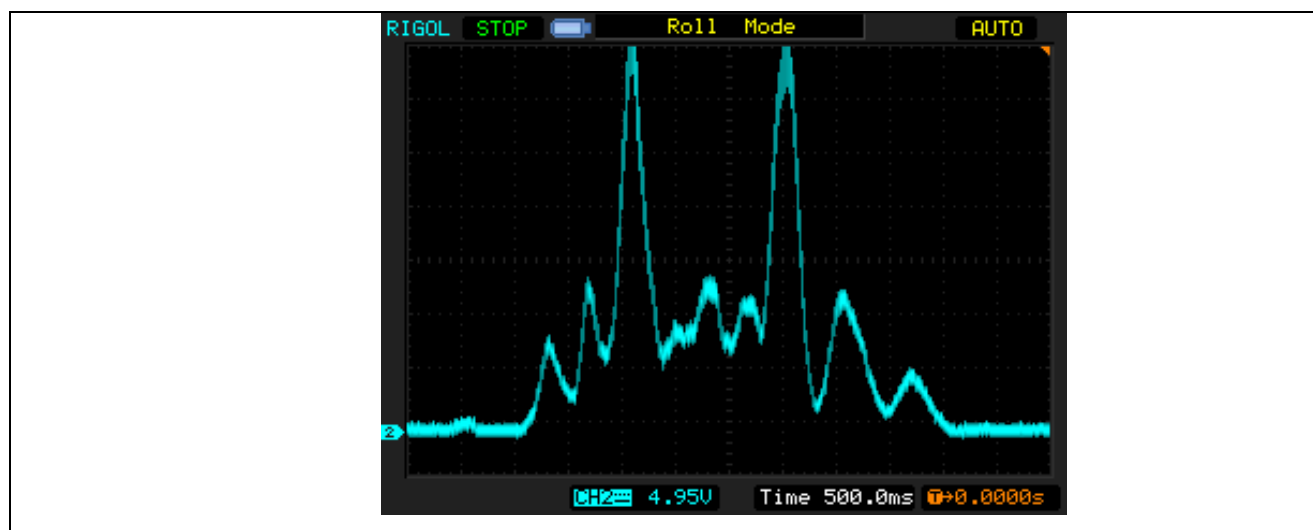


Рис. 27

Часть 5. Демонстрация дифракции Фраунгофера

Дифракция, при которой дифракционная картина наблюдается на значительном расстоянии от преграды, называется дифракцией в параллельных лучах или дифракцией Фраунгофера¹⁴. Указанное расстояние (z) должно быть таким большим (или препятствие таким маленьким), чтобы препятствие (размер препятствия d) «виделось» из точки наблюдения как малая часть первой зоны Френеля ($d^2 \ll \lambda z$, где λ – длина волны). С точки зрения математики, при выполнении данного условия в выражениях для разности фаз волн, пришедших в точку наблюдения от вторичных источников, можно пренебречь квадратичными членами и расчет дифракционной картины существенно упрощается [6].

¹⁴ **Йозеф Фраунгофер** (*Joseph Fraunhofer* [1787](#)—[1826](#)) — немецкий физик, знаменитый оптик. В двенадцать лет был отдан «в учение» в зеркальную и стекольную мастерскую в Мюнхене. В 1806 г. Фраунгофер был принят на оптическое отделение Мюнхенского механико-математического института, где начал работать под руководством известного швейцарского мастера телескопостроения – П. Гинана (1748-1824). Уже через год Фраунгофер мог шлифовать и полировать точные параболические и гиперболические поверхности, но затем перенес свое внимание на отливку и обработку линз. Фраунгофер сумел разгадать тайну производства стекла Гинана. Более того, он пошел значительно дальше своего учителя: улучшил стекловаренные печи, разработал методы строгого математического, химического и физического контроля за составом шихты для отливки стеклянных блоков, разработал новые, улучшенные методы обдирки, шлифовки, полировки стекла. В 1807 г., т. е. в возрасте 20 лет, Фраунгофер уже официально числился оптиком института. В 1809 г. он стал совладельцем фирмы и, наконец, с 1811 г. - руководителем фактически всей немецкой стекольной промышленности. В 1814 г. была основана знаменитая фирма "Утцшнейдер и Фраунгофер", давшая ученым ряд великолепных оптических приборов и инструментов, прежде всего телескопов. Фактическим руководителем фирмы был Фраунгофер. Фирма Утцшнейдера и Фраунгофера изготовила, в частности, несколько телескопов для России, в том числе ахроматические рефракторы для Москвы (диаметр объектива 27 см), для Пулкова (диаметр объектива 18 и 38 см). Изучая показатели преломления различных сортов стекла, в 1814 Фраунгофер открыл (независимо от английского физика У. Волластона) и описал линии поглощения в солнечном спектре (фраунгоферовы линии). В 1821 впервые применил дифракционную решётку для изучения спектров. Предложил метод наблюдения дифракции света в параллельных лучах.

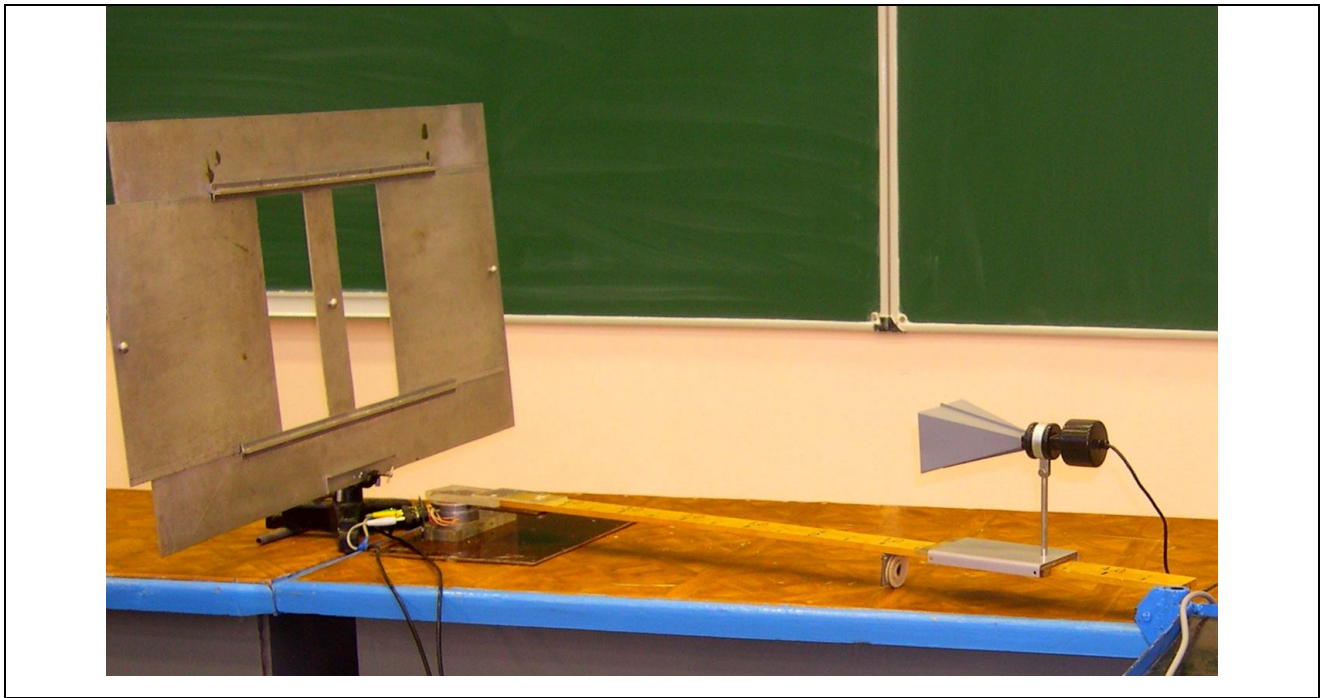


Рис. 28

Следует отметить, что описанная в Части 3 настоящего пособия интерференция по схеме Юнга, фактически является и примером дифракции на двух щелях. Естественно, что использовавшаяся там установка, может быть применена для наблюдения дифракции Фраунгофера и на других объектах. Ограничение, связанное с длиной штанги сканирующего устройства, не позволяет использовать препятствия больше 20 см.

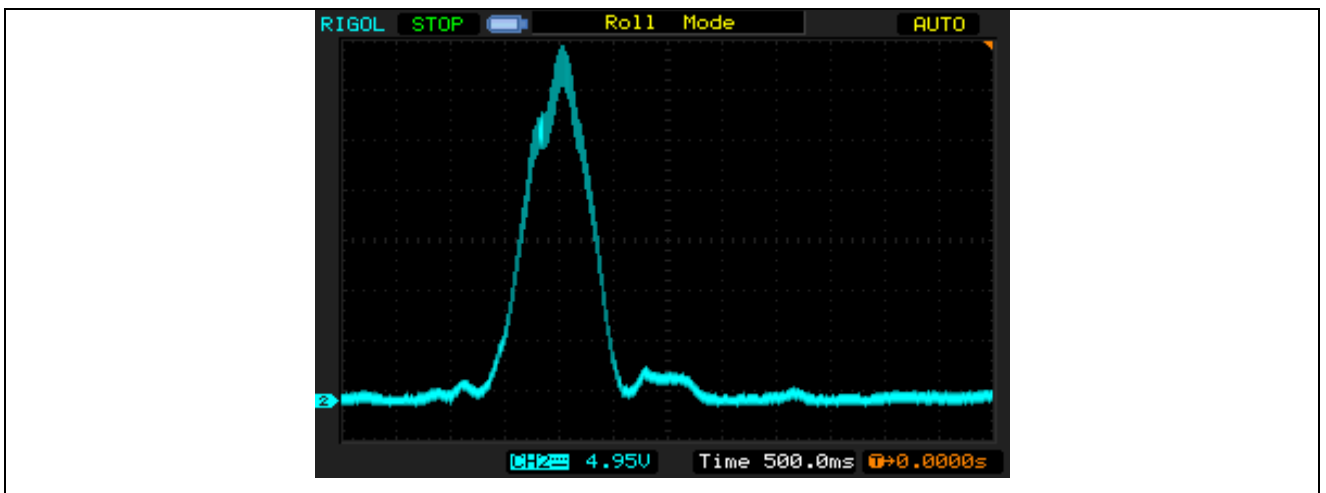


Рис. 29

Демонстрационную установку собирают аналогично, как и для интерференционного опыта Юнга (см. Часть 3 рис. 11, рис. 12). Используют тот же экран с раздвижными шторками, что и при демонстрации опыта Юнга.

Средняя шторка сдвигается на край и получается щель шириной 16 см., дифракцию на которой и регистрируют с помощью сканирующего устройства. На рис. 28 хорошо виден экран с раздвижными шторками, а на рис 29, 30 приведены фотографии с экрана осциллографа, зафиксировавшего распределение интенсивности прошедшей препятствие волны от угла, в области дифракции Фраунгофера. Рис 29 – дифракция на щели шириной 12 см, рис. 30 – дифракция на эквидистантной решетке из 3-х щелей (период решетки 9 см, ширина щели – 4.5 см). Качественно картины совпадает с теорией.

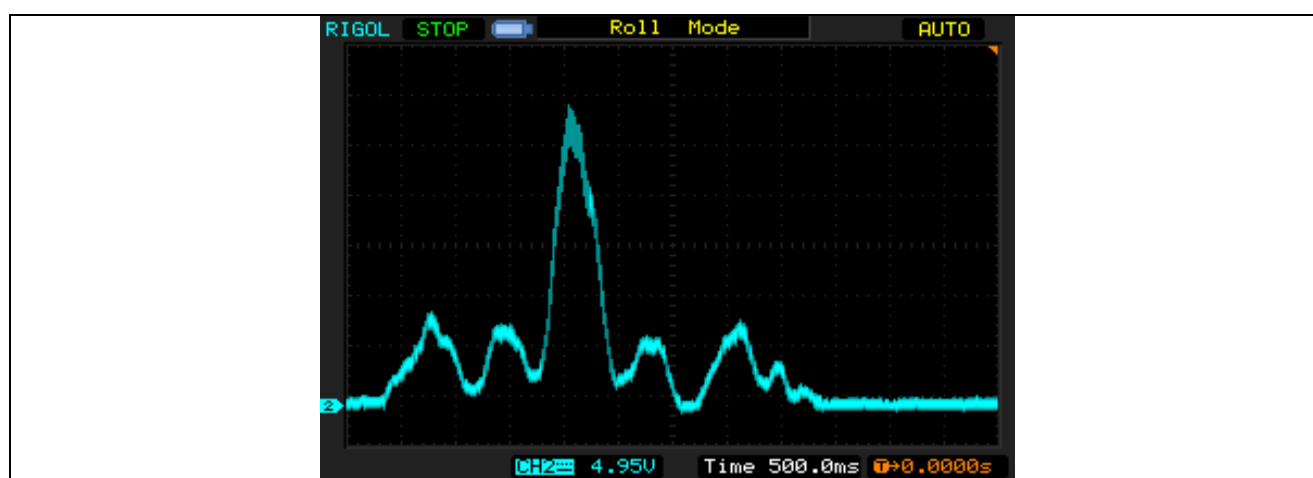


Рис. 30

Следует отметить, что демонстрация указанных опытов требует тщательной юстировки схемы и очень чувствительна к различным переотражениям (в этом смысле демонстрации в больших лекционных аудиториях проходят как правило лучше чем в маленьких аудиториях).

Литература

1. Перкальскис, Б.Ш. Использование современных научных средств в физических демонстрациях / Б.Ш. Перкальскис.- М.: Наука, 1971.- 208 с.
2. Шахмаев, Н. М. Демонстрационные опыты по разделу «Колебания и волны» / Н. М. Шахмаев. - М.: Просвещение, 1974. – 128 с.
3. Молотков, Н.Я. Радиоволны в демонстрационном эксперименте по оптике. Учебное пособие/ Н.Я. Молотков. - Киев: Вища школа, 1981. - 104 с.
4. Калитеевский, Н.И. Волновая оптика / Н.И. Калитеевский. - М.: Высш. школа, 1978. - 383 с.
5. Крауфорд, Ф. Волны. Берклевский курс физики. Т.3/ Ф. Крауфорд. - М.: Наука, 1976. – 528 с.
6. Горелик, Г.С. Колебания и волны / Г.С. Горелик. - М.: ГИФМЛ, 1959, - 572 с.
7. Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф.- М.: Наука, 1973.– 855 с.
8. Бакунов, М.И. Поляризационные эффекты в опыте с зеркалом Ллойда / М.И. Бакунов, С.Б. Бирагов, П.В. Казарин //Труды шестой научной конференции по радиофизике, 7 мая 2002 г./ Ред. А.В. Якимов. – Н. Новгород: ТАЛАМ. - С. 191-192. ISBN 5–93496-021-0.
9. УФН, т.69, вып.2, октябрь, 1959 Малюжинец, Г. Д. Развитие представлений о явлениях дифракции / Г. Д. Малюжинец // УФН, 1959. - №10. – Т. 69, вып.2 С. 321-334.
10. Казарин, П.В. Лекционные опыты, демонстрирующие интерференцию вторичных волн (принцип Гюйгенса-Френеля). / П.В. Казарин, С.Н. Менсов, Н.С. Степанов // Труды научной конференции по радиофизике, посвященной 80-летию ННГУ им. Н.И. Лобачевского 7 мая 1998 г. /Ред. А.В. Якимов. – Н. Новгород: ННГУ, 1998. - С. 70.

11. Волны. Методические указания к лекционным демонстрациям по физике / Под ред. Н.С. Степанова / Т.Г. Власова, Г.С. Егоров. – Горький: ГГУ, 1980. - 45 с.