

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
Кафедра радиотехники

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

Лабораторные работы

Составители А.М. Сержантов, А.С. Волошин

2022

ВВЕДЕНИЕ

В современных технологиях важное место отводится методам и устройствам, которые, опираясь на достижения лазерной и микроволновой техники, голографии, оптоэлектроники, цифровой техники, открыли возможность нового подхода к решению ключевых проблем информатики, вычислительной техники и радиофизики. Устойчивой тенденцией является проникновение методов радиотехники в оптический диапазон, с одной стороны, и внедрение оптических методов в вычислительную технику, излучающие и канализирующие устройства СВЧ-диапазона и т.п. – с другой. Оптические методы обработки информации используют как преимущества оптического канала передачи информации (возможность параллельной обработки, высокое быстродействие, помехозащищенность и т. п.), так и преимущества, присущие собственно оптическим интегральным схемам (высокая надежность и компактность, малая подводимая мощность, возможность монолитного исполнения). Перечисленные выше вопросы рассматриваются в таких специальных дисциплинах, как «Оптические устройства в радиотехнике», «Волоконно-оптические устройства и системы», «Оптические методы и устройства обработки информации», введенные недавно для расширения кругозора современного радиоинженера.

Одними из важнейших элементов систем оптической обработки информации являются устройства управления характеристиками оптического излучения (интенсивность, пространственное положение, поляризация и т.д.). При этом в настоящее время наилучшими параметрами и технологичностью обладают устройства, в принципе работы которых лежит акустооптический эффект. Целью настоящих практических занятий является знакомство с устройством и принципом работы акустооптического модулятора и акустооптического дефлектора, которые являются важнейшими элементами оптических систем передачи, обработки и хранения информации, а также ознакомление с принципами пространственной фильтрации изображений на основе пространственного преобразования Фурье. В соответствии с этим, в практикуме приведены работы, с которыми студентам нужно познакомиться в течение семестра при изучении дисциплины «Оптические методы и устройства обработки информации».

Каждая работа содержит теоретический материал, в котором кратко изложены принципы работы рассматриваемого устройства, а также суть и актуальность проводимого исследования. Кроме того, во всех работах подробно раскрывается экспериментальная часть метода, положенного в основу изучения каждого опыта, а также приводится порядок выполнения работы и техника обработки результатов. Для детальной проработки пройденного материала и закрепления полученных знаний в конце каждой работы приведены контрольные вопросы. С целью помочь студентам найти ответы на контрольные вопросы в завершении описания к каждой из работ также приведен соответствующий библиографический список рекомендуемой литературы.

Общие теоретические сведения

Работа акустооптических устройств основывается на взаимодействии одновременно распространяющихся в веществе оптических и акустических волн (последние называются также звуковыми или упругими волнами). Еще в начале XIX в. Т. Зеебеком и Д. Брюстером было обнаружено изменение показателя преломления вещества n под действием упругого механического напряжения, что приводит к искусственной оптической анизотропии, проявляющейся в двойном лучепреломлении. Это так называемая *фотоупругость* (*пьезооптический* или *упругооптический эффект*), объясняемая смещением атомов и молекул относительно положения равновесия и деформацией их электронных оболочек под действием механических напряжений. Благодаря этому эффекту в веществе возникают чередующиеся области с различными показателями преломления n , распространяющиеся со звуковой частотой. При повышении частоты акустических колебаний, свет испытывает на чередующихся слоистых областях с различным показателем преломления n дифракцию, аналогичную дифракции рентгеновских лучей на атомных плоскостях в кристалле.

Физическая картина дифракции света на акустической волне может быть описана следующим образом. Распространение акустической волны в упруго-оптической среде сопровождается появлением в этой среде бегущей периодической последовательности изменения показателя преломления. Если период этой последовательности меньше размеров поперечного сечения светового пучка, то в среде происходит дифракция света на бегущей со скоростью звука фазовой дифракционной решетке. Фазовая дифракционная решетка отличается от обычной – амплитудной – тем, что в ней пространственная модуляция осуществляется не по амплитуде, а по фазе. Характер этой дифракции существенно зависит от длины области взаимодействия света и звука L , длины волны света λ , длины акустической волны Λ и определяется параметром дифракции Q , который можно рассчитать по формуле:

$$Q = 2\pi\lambda L / \Lambda^2.$$

Рассмотрим два предельных случая:

1. Если выполняется условие $Q \ll 1$, т.е. при достаточно малом L , дифракционная картина представляет собой набор значительного числа дифракционных максимумов, расположенных симметрично относительно направления падающего света. Такая дифракция называется дифракцией Рамана-Ната и происходит она при любом угле падения света на акустический столб. Дифракционная решетка, образованная бегущей акустической волной при этом, может рассматриваться как плоская (двумерная).

Пусть когерентный оптический луч распространяется нормально к направлению распространения звуковой волны (рис. 1, а), тогда на выходе световая волна разбивается на серию пучков, симметрично расходящихся под углами θ_m к падающему лучу, величины которых определяются условием:

$$\sin \theta_m = m\lambda/\Lambda \quad (1)$$

где λ – длина волны света, Λ – длина волны звука, $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ – порядок дифракционного максимума. Условию $m=0$ соответствует нулевой порядок дифракции, $m=\pm 1$ – первый порядок и т. д. Таким образом, энергия падающего луча распределяется среди множества пучков. Соотношение интенсивностей дифрагированных пучков между собой зависит от частоты и интенсивности звука, длины пути, пройденного светом в зоне действия звуковой волны (длины взаимодействия L).

2. Если выполняется условие $Q \gg 1$, т.е. при достаточно большом L , наблюдается другой тип дифракции, для которого характерно наличие лишь одного бокового дифракционного максимума. Дифракционная решетка в этом случае является трехмерной, а режим дифракции носит название дифракции Брэгга. Такая дифракция происходит только при определенном угле падения света на ультразвуковой столб, удовлетворяющем так называемому условию Брэгга-Вульфа. Если угол θ_b между направлением падающего светового луча и нормалью к поверхности, вдоль которой распространяется звуковая волна (рис. 1, б), удовлетворяет условию, аналогичному условию Брэгга-Вульфа для дифракции рентгеновских лучей на системе атомных плоскостей:

$$2\Lambda \sin \theta_b = \Lambda, \quad (2)$$

то практически вся энергия светового луча сосредотачивается в пучке, соответствующем первому порядку дифракции.

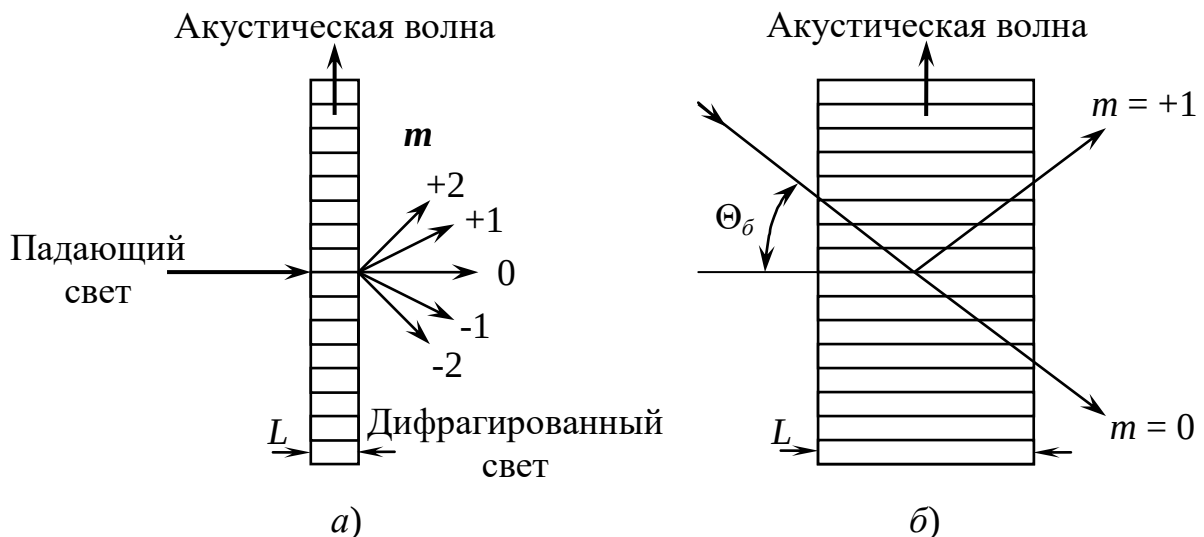


Рис. 1. Схема дифракции света на ультразвуке: а – дифракция Рамана-Ната, б – дифракция Брэгга

Режимы дифракции Рамана – Ната и Брэгга представляют собой два предельных случая, соответствующих малой и большой длине области взаимодей-

ствия света и звука. Плавный переход между этими режимами происходит при непрерывном изменении L . Таким образом, по мере увеличения L происходит уменьшение числа дифракционных максимумов и сужение допустимых пределов углов падения света. Строгие границы режимов дифракции не могут быть установлены по той причине, что число дифракционных максимумов существенно зависит от мощности ультразвуковой волны. С ее увеличением число дифракционных максимумов растет.

В общем случае соотношение между интенсивностями дифрагированного луча и луча, вышедшего из кристалла параллельно падающему, зависит от длины взаимодействия и амплитуды звуковой волны. Чтобы значительная часть падающего светового потока оказалась дифрагированной при интенсивности звука 1 Вт/см^2 , длина взаимодействия для различных веществ должна по порядку величины составлять $0.1 - 10 \text{ см}$.

Лабораторная работа №1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА

Цель: познакомиться с явлением поляризации света, изучить прохождение плоско-поляризованного света через поляризатор.

Краткие теоретические сведения

Волной называют процесс распространения колебаний. Если происходит распространение механических колебаний в упругой среде, то мы имеем дело с механическими или упругими волнами, частным случаем которых являются звуковые волны. Независимо от природы волны бывают продольными, если колебания происходят в направлении распространения волны, и поперечными, если колебания происходят в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны.

Для упругой волны существенное значение имеет направление колебаний, так как от этого зависят вид деформации среды и скорость распространения волны. При продольной волне происходит деформация сжатия среды, в результате чего скорость распространения определяется модулем сжатия (модулем Юнга). При поперечной волне происходит деформация сдвига и скорость распространения волны определяется модулем сдвига, который обычно меньше модуля сжатия, поэтому продольные упругие волны распространяются с большей скоростью, чем поперечные упругие волны.

Для продольной волны поворот вокруг направления распространения не меняет направления колебаний и поэтому скорость распространения остается неизменной.

Для поперечной волны поворот вокруг направления распространения волны изменяет направление колебаний и, если среда анизотропная, т.е. обладает различным модулем сдвига в разных направлениях, скорость распространения волны меняется. Для описания этого свойства поперечной волны, т.е. определенной направленности колебаний в пространстве и вводится понятие поляризации волны. Таким образом, свойство поляризации присуще только поперечным волнам.

Процесс распространения электромагнитных колебаний, как совокупности связанных друг с другом быстропеременных электрического и магнитного полей представляет собой электромагнитную волну, частным случаем которой является свет ($\lambda = 0,4 \text{ мкм} \dots 0,7 \text{ мкм}$ в вакууме). Электромагнитные волны поперечны. Это значит, что перпендикулярные друг другу переменные электрическое и магнитное поля одновременно перпендикулярны направлению распространения волны. На рис.1 показана графическая модель плоской электромагнитной волны. При распространении волны слева направо электрическое поле при своем изменении остается направленным вертикально, а магнитное поле — горизонтально.

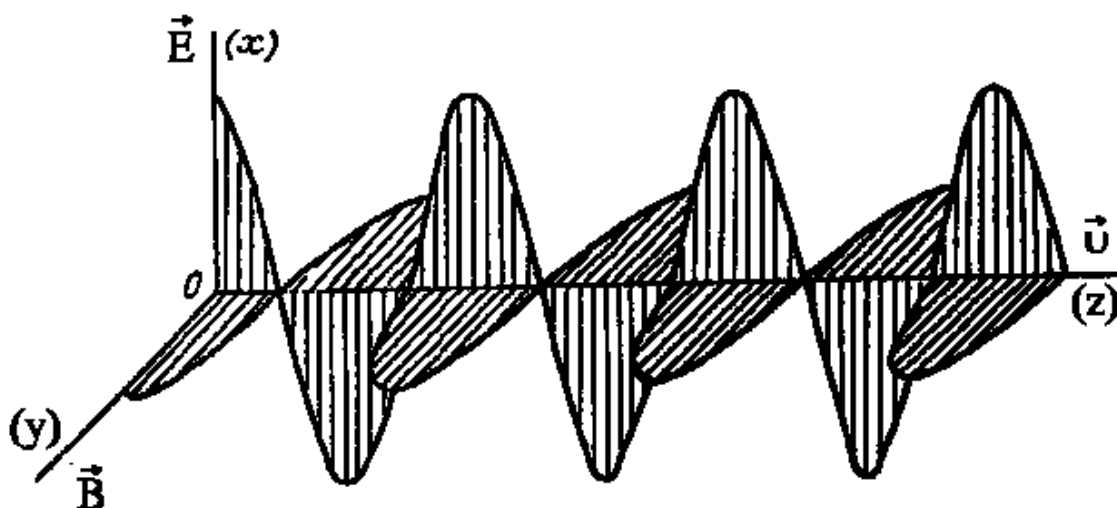


Рис.1. Плоская электромагнитная волна.

В отрыве друг от друга в электромагнитной волне электрическое и магнитное поля существовать не могут. Однако ввиду того, что основные световые воздействия осуществляются электрическим полем волны, а также для удобства объяснения на рисунках изображают только электрическое поле, точнее изменение напряженности электрического поля, называя ее иногда световым вектором. Поперечность электромагнитной волны приводит к тому, что понятие поляризации для нее имеет существенное значение. Электромагнитную волну называют плоско или линейно поляризованной, если при ее распространении колебания вектора E происходят в одном, строго определенном, направлении.

Плоскость, проходящую через направление распространения волны и направление колебаний, называют плоскостью колебаний. Для электромагнитной волны, (показанной на рис.1. — это плоскость XOZ).

Поляризация света — упорядоченность в ориентации вектора напряженности электрического E и магнитного H полей световой волны в плоскости, перпендикулярной распространению света. Различают линейную поляризацию света, когда E сохраняет постоянные направления (плоскость, в которой лежит E и световой луч, называется плоскостью поляризации), эллиптическую, при которой конец E описывает эллипс, и круговую (конец E описывает круг). Обычный (естественный) свет не поляризован. Поляризация света возникает при отражении, преломлении света, прохождении через анизотропную среду. Первые указания на поперечную анизотропию светового луча получены Х. Гюйгенсом в 1690; понятие "поляризация света" было введено И. Ньютоном в 1705, а объяснена поляризация света электромагнитной теорией света Дж. К. Максвелла. Поляризованный свет широко используется во многих областях техники (например, для плавной регулировки света, при исследовании упругих напряжений и т.д.) Человеческий глаз не различает поляризацию света, а глаза некоторых насекомых, например пчел, воспринимают ее.

Следствием теории Максвелла является поперечность световых волн: в изотропных средах векторы напряженностей электрического E и магнитного H

полей волны взаимно перпендикулярны и колеблются перпендикулярно вектору скорости распространения волны v (перпендикулярно лучу). Согласно электромагнитной теории свет представляет собой суммарное электромагнитное излучение множества атомов. Поскольку атомы излучают электромагнитные волны независимо друг от друга, световая волна, излучаемая источником в целом, характеризуется всевозможными равновероятными направлениями колебаний вектора E . Это так называемый естественный свет.

Поляризованным называется свет, в котором направления колебаний вектора E упорядочены каким-либо образом. Электромагнитная волна называется линейно или плоско-поляризованной, если в процессе ее распространения вектор E (и, следовательно, вектор H) лежит в одной и той же плоскости. Плоскостью поляризации называется плоскость, в которой расположены векторы E и v .

Упорядоченность направлений колебаний вектора E может заключаться в том, что вектор E , изменяясь по модулю, поворачивается вокруг вектора v . В результате конец вектора E описывает в пространстве спираль, проекция которой на плоскость, перпендикулярную лучу представляет собой эллипс. Такой свет называется эллиптически поляризованным. Частным случаем является поляризованный по кругу или циркулярно-поляризованный свет (при этом полуоси эллипса равны друг другу).

Свет, в котором колебания одного направления преобладают над колебаниями других направлений, называется частично поляризованным.

Линейно поляризованный свет можно получить, пропуская естественный свет через поляризатор, действие которого может быть основано на различных физических явлениях. Поляризатор пропускает колебания только определенного направления. Если линейно поляризованный свет интенсивности I_0 пропустить через поляризатор, то интенсивность I вышедшего света, определяется соотношением:

$$I = I_0 \cos^2 \Theta, \quad (1)$$

где Θ - угол между плоскостью пропускания поляризатора и вектором E падающей волны. Равенство (1) выражает собой закон Малюса.

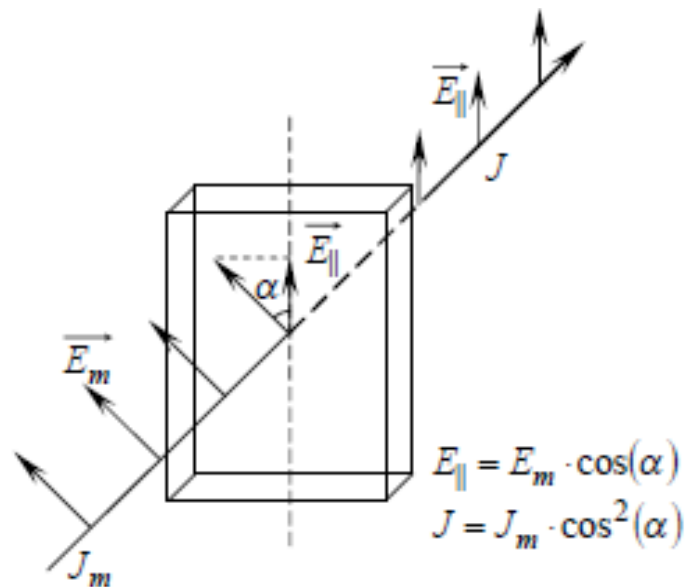


Рис.2. Прохождение плоско (линейно) поляризованного света через поляризатор.

Поляризация при отражении и преломлении. Угол Брюстера.

Если угол падения света на границу раздела двух диэлектриков (например, на поверхность стеклянной пластинки) отличен от нуля, отраженный и преломленный лучи оказываются частично поляризованными). В отраженном луче преобладают колебания, перпендикулярные к плоскости падения (на рис. 3 эти колебания обозначены точками), в преломленном луче — колебания, параллельные плоскости падения (на рисунке они изображены двусторонними стрелками). Степень поляризации зависит от угла падения. Обозначим через $\alpha_{бр}$ угол, удовлетворяющий условию

$$\operatorname{tg} \alpha_{бр} = n_{12},$$

где n_{12} — показатель преломления второй среды относительно первой. При угле падения равном $\alpha_{бр}$, отраженный луч полностью поляризован (он содержит только колебания, перпендикулярные к плоскости падения).

Степень поляризации преломленного луча при угле падения, равном $\alpha_{бр}$ достигает наибольшего значения, однако этот луч остается поляризованным только частично.

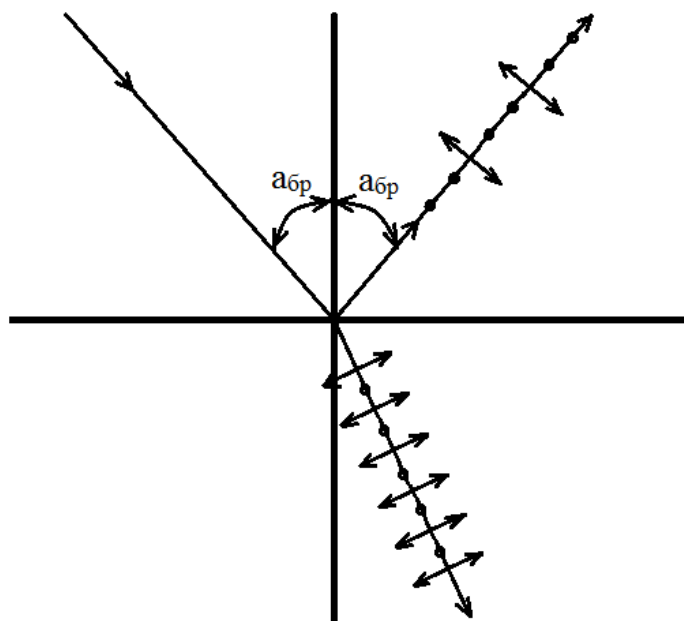


Рис. 3. Угол Брюстера.

Соотношение носит название закона Брюстера (Дэвид Брюстер — шотландский физик).

Угол $\alpha_{бр}$ называют углом Брюстера. Легко убедиться в том, что при падении света под углом Брюстера отраженный и преломленный лучи взаимно перпендикулярны.

Существует яркий пример поляризации света в естественных природных условиях - поляризация дневного света неба. Причина этого явления, впервые рассмотренного Рэлеем в 1871 г., поляризация при молекулярном рассеянии. Свет, испускаемый Солнцем, не имеет какой-либо определенной плоскости поляризации. Однако, проходя через земную атмосферу, солнечный свет претерпевает рассеяние на ее молекулах и других частицах, имеющих размеры меньше длины волны. Вследствие поперечности световых волн солнечные лучи, рассеянные изотропными молекулами в направлении, нормальном к первоначальному, должны быть линейно поляризованы. В результате каждая точка неба над нами превращается во вторичный источник света, который оказывается уже частично поляризованным. Степень поляризации света голубого неба сильно различается в разных точках небосвода (от 0 примерно до 80%). При этом ось поляризации (преимущественное направление E) всегда перпендикулярна плоскости треугольника, в вершинах которого находится наблюдатель, Солнце и наблюдаемая точка неба. Зная оси поляризации для двух точек неба, можно найти направление на Солнце. Очевидно, что направлением на Солнце будет прямая, образованная пересечением двух плоскостей, каждая из которых переходит через наблюдателя и данную точку неба перпендикулярно оси поляризации в этой точке. По-видимому, таким образом и находят направление на солнце насекомые, глаза которых чувствительны к направлению поляризации света.

Одним из способов получения поляризованного света в лабораторных условиях является пропускание света через устройство, обладающее оптической анизотропией. (Оптически анизотропными называют среды, свойства которых, т.е. показатели преломления и поглощения, не одинаковы для разных направлений распространения световой волны и состояний ее поляризации). Анизотропными свойствами обладают прежде всего кристаллы всех сингоний, кроме кубической, а также природные и искусственные пленки и волокна, состоящие из длинных упорядоченных макромолекул. Анизотропия кристалла обусловлена строением его решетки. Атомы и молекулы, из которых построен кристалл, расположены в определенном порядке, но этот порядок не обязательно одинаков в разных направлениях. Только в кристаллах самой простой системы кубической период кристаллической решетки одинаков по всем трем главным осям. Поэтому кубические кристаллы изотропны и, в частности, не обладают линейным двулучепреломлением света.

В кристаллах тетрагональной и гексагональной систем имеется только одно направление, в котором не происходит двойного преломления, одна оптическая ось. В кристаллах ромбической, моноклинной и триклинной систем таких направлений два. Они имеют, таким образом, две оптические оси. Интересно отметить, что при распространении света вдоль биссектрисы угла между осями двухосного кристалла все происходит так, как при распространении света в одноосном кристалле в направлении, перпендикулярном его оптической оси. Это имеет место, например, при нормальном падении света на пластинку слюды.

Оптическая анизотропия в прозрачных изотропных веществах может быть создана искусственно, например, механической деформацией (сжатием, растяжением), с помощью электрического и магнитного полей, ориентацией молекул в потоке жидкости (эффект Максвелла).

При входе света в одноосный кристалл (например, кварца или исландского шпата) световой луч "разделяется" на два: обыкновенный и необыкновенный лучи. Причина этого явления - зависимость показателя преломления (диэлектрической проницаемости) от направления электрического поля $\mathbf{E}$. В обыкновенном луче поле $\mathbf{E}$ перпендикулярно оптической оси и волновому вектору $\mathbf{k}$.

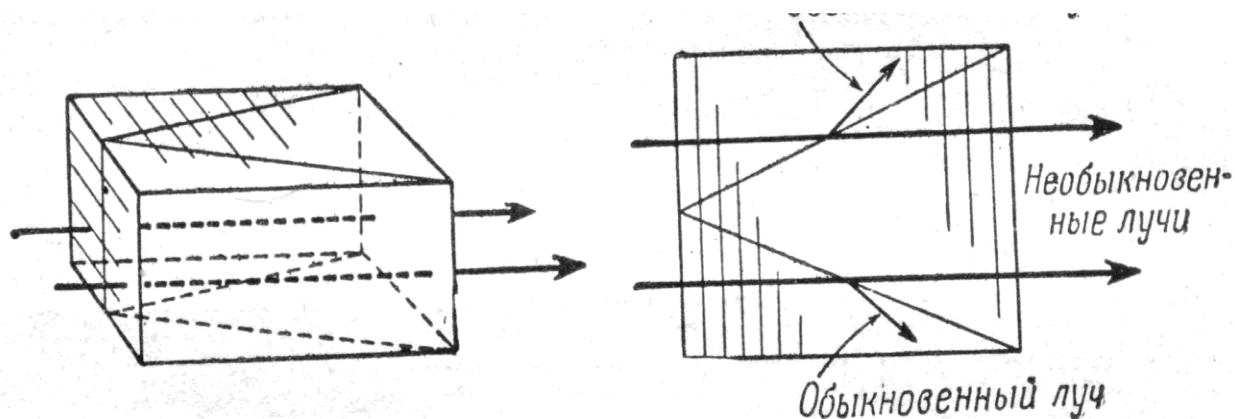
Среды, которым свойственно двойное преломление света, в той или иной степени обладают и *дихроизмом* - свойством по разному поглощать ортогонально поляризованные световые лучи. Например, одноосный кристалл турмалина очень сильно поглощает один из лучей — обыкновенный.

После краткого введения в оптику кристаллов мы можем перейти к обсуждению получения поляризованного света с помощью специальных устройств - поляризаторов. В зависимости от типа получаемой поляризации поляризаторы делятся на линейные, циркулярные и эллиптические. Циркулярные и эллиптические поляризаторы, как правило, содержат линейный поляризатор и так называемые фазовые кристаллические пластинки.

Принцип действия линейного поляризатора основан на разделении света с произвольной степенью поляризации на две ортогональные компоненты, одну из которых поляризатор пропускает, а другую отклоняет или поглощает. Для разделения света на составляющие используется одно из следующих явлений: двойное лучепреломление, отражение или преломление света на границах диэлектриков (рассмотренный ранее эффект Брюстера), дихроизм, а также поляризующие свойства узких щелей и решеток малого периода. Двухлучепреломляющие поляризаторы изготавливают в виде кристаллических призм, например, из исландского шпата. К ним относятся призмы Николя, Глана-Фуко, Аренса, Волластона. Рассмотрим некоторые из них:

Призма Аренса

Рисунок 4. Устройство призмы Аренса



Это прямоугольный блок, склеенный из трех кальцитовых призм, оптические оси в которых направлены, как показано на рисунке. Призмы склеены клеем, показатель преломления которого по величине занимает промежуточное значение между показателями преломления обыкновенного и необыкновенного луча исландского шпата, поэтому обыкновенный луч, показатель преломления которого больше, претерпевает полное внутренне отражение на склейке, а необыкновенный луч проходит призму без изменений. Боковые стенки призмы красятся специальной черной краской, которая полностью поглощает обыкновенный луч. Поляризующая способность поляризатора Аренса очень высока: 0.99999, кроме того, он имеет очень большую угловую апертуру, поэтому его используют в поляризационных микроскопах.

Призма Волластона

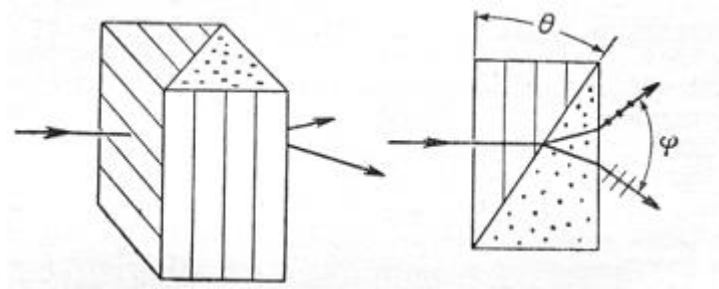


Рисунок 5. Устройство призмы Волластона

Прямоугольный блок, склеенный из двух призм, оптические оси в которых направлены, как показано на рисунке. Выходят под углом φ друг к другу два ортогонально поляризованных луча. Угол φ зависит от угла θ . Чем больше один, тем больше другой. Эта призма часто используется в оптических системах информации как расщепитель луча. Аналог делителя мощности в СВЧ технике.

Примером дихроичного поляризатора служит монокристаллическая пластинка уже упоминавшегося турмалина, не нашедшего широкого применения в основном из-за трудностей, связанных с получением кристаллов необходимых размеров. Более популярной оказалась другая разновидность дихроичных поляризаторов, а именно, анизотропные полимерные пленки, активированные (пропитанные) анизотропными же молекулами или микрокристаллами, так называемые пленочные поляроиды. Если полимерную пленку, состоящую из весьма длинных, линейных вытянутых макромолекул полимера в нагретом и размягченном состоянии подвергнуть механическому растяжению, то полимерные молекулы ориентируются своими длинными осями вдоль направления растяжения и пленка, таким образом, становится анизотропной. Если при этом в полимере растворено вещество, молекулы которого анизотропны по форме и обладают высоким дихроизмом (например, игольчатые микрокристаллы герпатита), то

упорядоченная, ориентированная матрица молекул полимера ориентирует и примесные молекулы. Таким путем изготавливаются поляроиды высокого качества и достаточно большого размера.

Эллиптически поляризованный свет можно получить из линейно поляризованного, пропустив его через прозрачную двулучепреломляющую пластинку, которая вырезана из кристалла таким образом, что плоскости среза параллельны оптической оси.

ОПИСАНИЕ РАБОТЫ

Цель работы: изучить на практике явление поляризации света, получить графическую зависимость интенсивности света, прошедшего через скрещенные поляризаторы, от угла Θ (угла между плоскостями поляризации первого и второго поляризаторов).

Оборудование и приборы: источник монохроматического излучения (лазер) 1, два поляризатора (статичный 2 и с изменяющимся углом поляризации 3), фотодетектор, выполненный на основе фотодиода 4 и подключённого к нему амперметр 5.

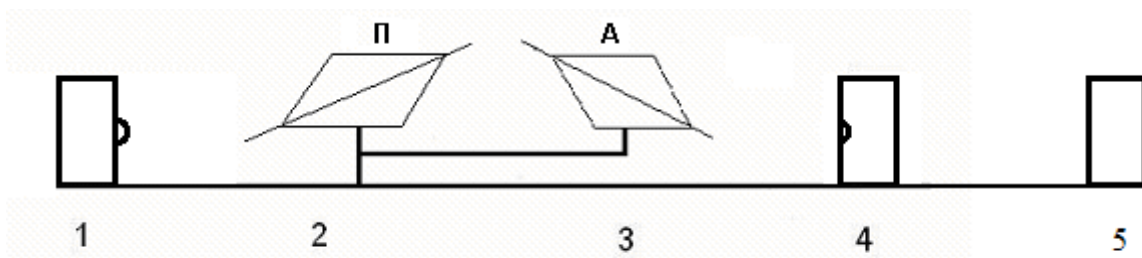


Рисунок 6. Структурная схема лабораторной установки.

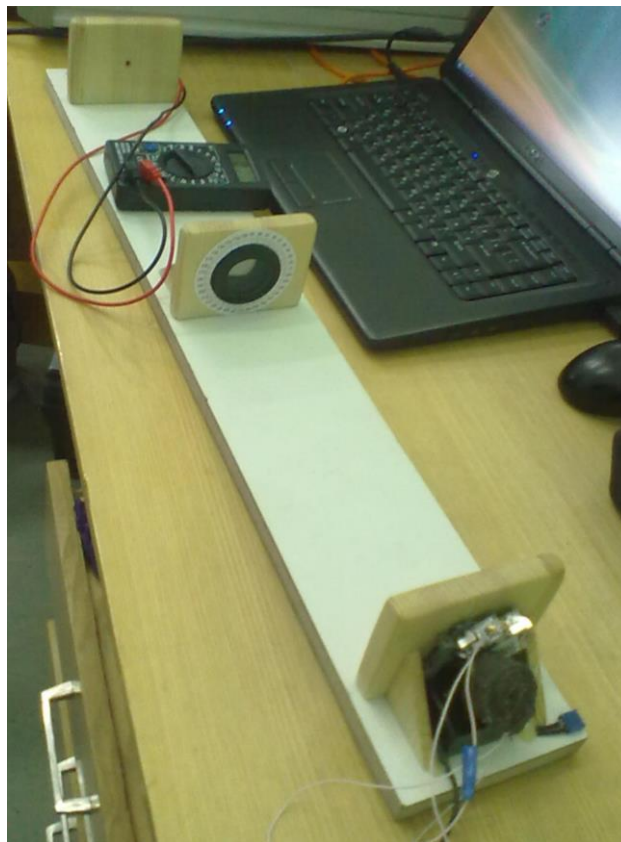


Рисунок 7. Лабораторная установка.

Задание: получите зависимость тока фотодетектора $I_{\text{фд}}$ от угла поворота второго поляризатора Θ . Измерения производить с интервалом 10° .

Содержание отчёта: таблица с экспериментальными данными, графики теоретически рассчитанной и экспериментальной зависимости, полученные в ходе выполнения лабораторной работы, выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы:

- 1) Дать определение поляризации света, назвать виды поляризации.
- 2) Для каких волн имеет смысл понятие поляризации?
- 3) Каким образом может происходить поляризация света естественного света?
- 4) Какой свет называется поляризованным, частично поляризованным и естественным? Как их различить?
- 5) Закон Малюса. Его вывод.
- 6) Принцип работы и устройство поляризаторов света. Материалы, применяющиеся для изготовления поляризаторов света.
- 7) Применение поляризаторов в оптических устройствах и системах обработки информации.
- 8) Оптически анизотропные среды, причины возникновения анизотропии?
- 9) Двойное лучепреломление. Обыкновенный и необыкновенный лучи в кристаллах. Причина их возникновения, свойства.
- 10) Фазовые пластинки. Принцип их работы, применение.
- 11) Можно ли с помощью только линейного поляризатора отличить эллиптически поляризованный свет от частично линейно поляризованного света и циркулярно поляризованный свет от естественного света?

Лабораторная работа №2

ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТООПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА

Цель работы: ознакомиться с устройством, принципом работы и основными характеристиками акустооптического модулятора.

Общие сведения об акустооптических модуляторах света

С помощью акустических волн можно управлять любыми параметрами световой волны: амплитудой, фазой, частотой, поляризацией. В соответствии с этим возможны различные виды акустооптических модуляторов: амплитудные, фазовые и т. д.

Из всего возможного многообразия акустооптических модуляторов к настоящему времени детально исследованы и находят применение лишь некоторые виды.

Рассмотрение акустооптических модуляторов начнем с наиболее важного вида таких устройств – широкополосных модуляторов, в которых используется бегущая ультразвуковая волна. Принцип их действия основан на зависимости интенсивности прошедшего через акустооптическую ячейку светового излучения от амплитуды упругой волны. В соответствии с этим схема модулятора (рис. 1.1) включает генератор высокой частоты (1) и акустооптическую ячейку (2).

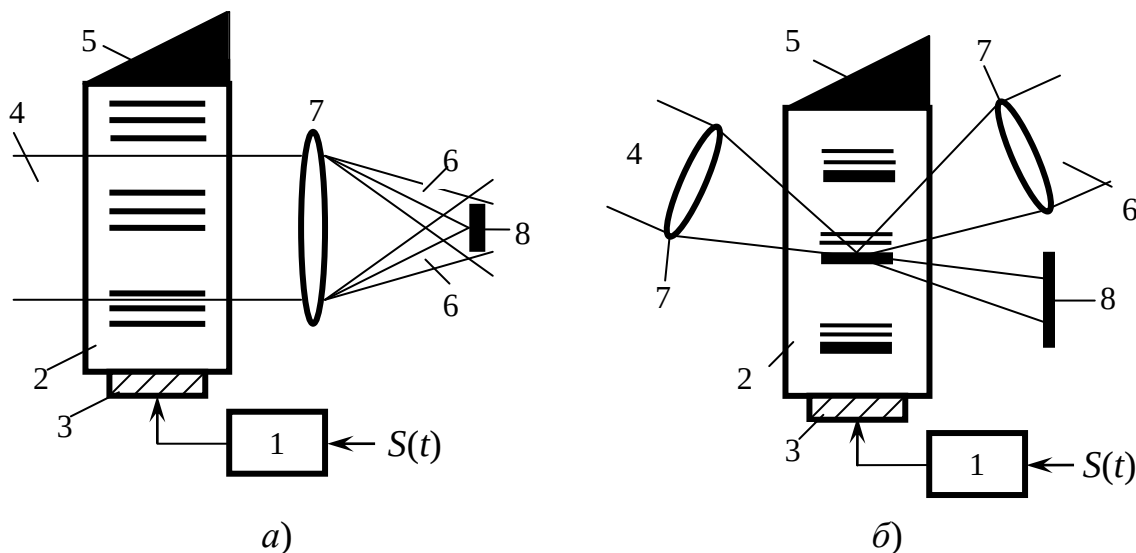


Рис. 1.1. Принципиальные схемы модуляторов, работающих в Раман-Натовском (а) и Брэгговском (б) режимах дифракции

Электрические колебания модулируются по амплитуде информационным сигналом $S(t)$ и затем поступают на преобразователь (3). Частота несущих колебаний f_0 выбирается равной центральной частоте преобразователя.

В ячейке возбуждается амплитудно-модулированная упругая волна, на которой дифрагирует световой пучок (4). Режим бегущих акустических волн обеспечивается поглотителем (5). Дифракционные модуляторы традиционно делят на две группы: Раман-Натовские и Брэгговские. Раман-Натовские модуляторы работают на частотах ультразвука, не превышающих обычно 10 МГц и используют Раман-Натовский режим дифракции. При изменении амплитуды упругой волны модулируется интенсивность всех максимумов. Если рабочими максимумами являются боковые (6), то в фокальной плоскости выходной линзы (7) располагается экран (8), задерживающий непродифрагировавший свет. Используется и другая схема модулятора, где через отверстие в экране пропускается нулевой дифракционный максимум, являющийся рабочим, а остальные — задерживаются. Недостатком этой схемы является невысокий контраст модуляции. (Контрастом модуляции, или коэффициентом экстинкции акустооптического модулятора, называется максимальное значение отношения интенсивностей света в рабочем максимуме при наличии и отсутствии акустического сигнала в ячейке).

Общим недостатком Раман-Натовских модуляторов является неширокая полоса модуляции Δf . Стремление увеличить Δf автоматически приводит к Брэгговскому режиму дифракции. Отличительная особенность схемы Брэгговского модулятора заключается лишь в том, что угол падения выбирается равным углу Брэгга. В качестве рабочих можно использовать максимумы, как первого, так и нулевого порядков.

Описание установки

Структурная схема установки представлена на рис. 1.2.

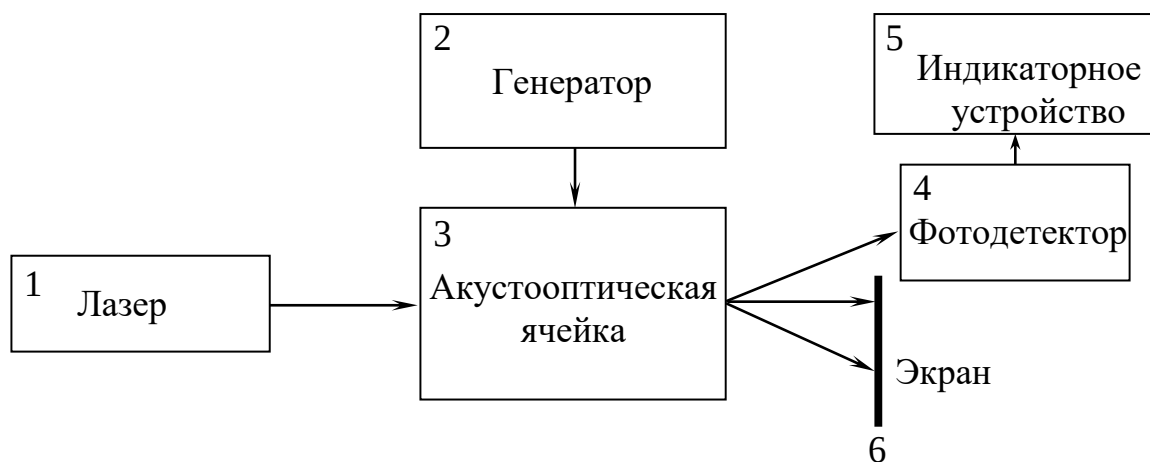


Рис. 1.2. Структурная схема установки

Она состоит из следующих основных частей: источника когерентного оптического излучения 1, который представляет собой полупроводниковый лазер; генератора высокой частоты 2, с выхода которого сигнал подается на акустооптическую ячейку 3; фотодетектора 4; индикаторного устройства 5 и экрана 6, задерживающего побочные дифракционные максимумы.

Порядок выполнения работы

Получив допуск у преподавателя, приступить к выполнению работы в следующем порядке:

1. Расположить источник лазерного излучения таким образом, чтобы световой поток, пройдя акустооптическую ячейку, попал на экран.

2. Включить генератор высокой частоты, установив выходную мощность на 75% от максимальной.

3. Перемещением фотодетектора добиться попадания на него первого дифракционного максимума и появления показаний на индикаторном устройстве.

4. Снять зависимость тока фотодетектора $I_{\delta\ddot{a}}$, который пропорционален интенсивности светового потока первого дифракционного максимума, от тока генератора ВЧ $I_{вч}$, которому пропорциональна интенсивность акустической волны, возбуждаемой в акустопроводе. Используя полученные данные построить модуляционную характеристику $I_{\delta\ddot{a}} = f(I_{\ddot{a}\div})$ акустооптического модулятора.

5. Измерить значение интенсивности света в рабочем дифракционном максимуме при наличии I_1 и отсутствии I_2 акустического сигнала в ячейке. По полученным данным определить контраст модуляции I_1/I_2 .

Содержание отчета

1. Структурная схема установки.
2. Таблица значений и график модуляционной характеристики.
3. Рассчитанное значение контраста модуляции.
4. Краткая сводка результатов всех проведенных измерений и расчетов.
5. Выводы по полученным результатам.

Контрольные вопросы

1. Объясните физические явления, лежащие в основе акустооптического эффекта.
2. Объясните различие между дифракцией Рамана-Ната и дифракцией Брэгга.

3. Получите выражение для угла отклонения дифракционных максимумов при дифракции Рамана-Ната.
4. Получите выражение для угла отклонения дифракционных максимумов при дифракции Брэгга.
5. Нарисуйте схему акустооптической ячейки, объясните назначение элементов.
6. Нарисуйте структурную схему акустооптического модулятора, поясните принцип работы.
7. Назовите основные параметры, характеризующие работу акустооптических модуляторов, и пути их улучшения.
8. Дифракционные максимумы каких порядков в акустооптическом модуляторе могут быть использованы в качестве рабочих?
9. Сравните акустооптический модулятор с модуляторами света, работа которых основана на других физических принципах.
10. Назовите области применения акустооптических модуляторов.

Лабораторная работа №3

ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ДЕФЛЕКТОРА

Цель работы: знакомство с устройством, принципом работы и основными характеристиками акустооптического дефлектора.

Общие сведения об акустооптических дефлекторах

Решение многих задач оптической обработки и хранения информации связано с необходимостью пространственного управления световыми пучками, что необходимо для формирования изображения в системах лазерного телевидения, в системах поиска и слежения за движущимися объектами, в блоках оптической памяти ЭВМ и т. д.

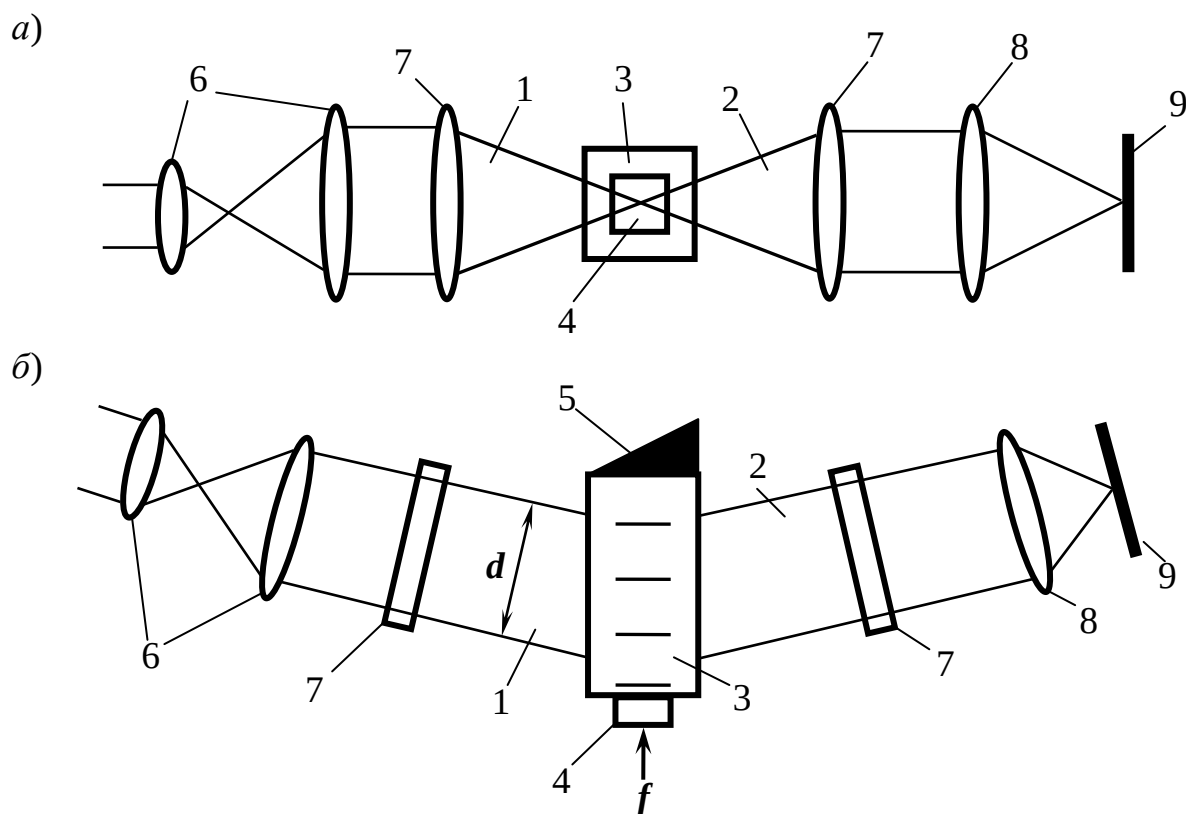


Рис. 2.1. Принципиальная схема однокоординатного дефлектора: а – вид сбоку, б – вид сверху. 1 – падающий световой пучок; 2 – дифрагированный пучок; 3 – акустооптическая ячейка; 4 – пьезопреобразователь; 5 – поглотитель; 6 – коллиматор; 7 – цилиндрические линзы; 8 – сферическая линза; 9 – выходная плоскость (экран)

Среди всех известных в настоящее время отклоняющих устройств особое место занимают акустооптические дифракционные дефлекторы, рис. 2.1, обладающие высоким разрешением и хорошим быстродействием. Они позволяют осуществлять как непрерывное сканирование луча по произвольному закону, так и дискретное переключение в любое из разрешимых положений. Все это, наряду с простотой конструкции и управления, низким энергопотреблением, небольшими размерами, обеспечивает таким дефлекторам самое широкое применение. Из всех акустооптических устройств дефлекторы исследованы наиболее детально.

Принцип действия дифракционных дефлекторов основан на зависимости угла дифракции от частоты акустической волны. При изменении частоты все дифракционные максимумы, за исключением нулевого, сканируют по углу. Практически в дефлекторах используется геометрия взаимодействия, близкая к ортогональной, а режим дифракции промежуточный между режимами Рамана – Ната и Брэгга. Угол сканирования, как правило, не превышает десяти градусов. Поэтому можно пользоваться линейным приближением, откуда следует, что угол сканирования пропорционален диапазону изменения частоты:

$$\Delta\theta = (m\lambda/V_{\text{а\acute{e}}}) \cdot \Delta f_{\text{а\acute{e}}} \quad (2.1)$$

Обычно рабочим является первый дифракционный максимум.

В принципе, для сканирования можно использовать как Раман-Натовскую, так и Брэгговскую дифракцию. Но поскольку дифракция Рамана – Ната наблюдается на низких частотах и диапазон $\Delta f_{\text{зв}}$ для нее обычно не превышает нескольких десятков мегагерц, то создать дефлектор с высокими разрешением и быстродействием в этом случае не представляется возможным. Кроме того, в дефлекторе с Раман-Натовской дифракцией неизбежны большие световые потери, так как в рабочий максимум перекачивается не более 33 % падающего света. Недостатком Брэгговской дифракции является ее угловая селективность. При Брэгговской дифракции расширение диапазона отклонения луча можно достичь при использовании расходящейся, а не плоской, звуковой волны. Такую волну можно рассматривать как совокупность плоских волн направленных в пределах некоторого углового интервала. Для заданной частоты звука дифракция будет наблюдаться на той компоненте звуковой волны, для которой выполняется условие Брэгга. Очевидно, что чем больше расходимость звуковой волны, тем в большем угловом интервале можно отклонять световой луч, изменяя частоту звука. При этом, однако, уменьшается длина акустооптического взаимодействия и для получения той же интенсивности дифрагированного луча приходится увеличивать интенсивность звуковой волны.

Для наблюдения акустооптического эффекта звуковую волну в кристалле возбуждают при помощи акустоэлектрического преобразователя, представляющего собой пьезоэлектрическую пластинку, прикрепленную к кристаллу. Приложение к преобразователю переменного электрического напряжения вы-

зывает механические колебания пластинки и может возбуждать в кристалле звуковые волны в широком диапазоне частот, вплоть до десятков гигагерц, уходящие в акустический поглотитель на противоположном конце кристалла (например, эпоксидная смола с наполнителем, сплав висмута с индием и т. п.). В настоящее время наилучшие характеристики имеют дефлекторы, работающие в промежуточном режиме дифракции.

Одной из важнейших характеристик сканирующего устройства является число разрешимых положений светового пучка N . Для одномерного (однокоординатного) дефлектора справедливо соотношение:

$$N = \Delta\theta/\varphi \quad (2.2)$$

где φ — угловая ширина светового пучка на выходе из дефлектора. Используется и другое, но вполне адекватное определение N как числа разрешимых световых пятен, укладываемых вдоль линии сканирования на экране. Следует подчеркнуть, что число разрешимых положений является более важной характеристикой, чем угол сканирования, так как $\Delta\theta$ можно увеличить или уменьшить пассивными оптическими элементами (линзами, призмами), но N при этом в лучшем случае не изменится.

Если угол φ обусловлен только дифракционными эффектами, связанными с конечной шириной пучка d , то для него можно записать:

$$\varphi = \mu\lambda/d, \quad (2.3)$$

где μ — коэффициент, зависящий от структуры пучка и выбранного критерия разрешения. Обычно используется критерий Рэлея, и тогда для однородного пучка прямоугольного сечения $\mu = 1$. Отметим также, что в телевидении разрешение принято оценивать количеством черно-белых пар линий. Каждый разрешимый по Рэлею элемент соответствует одной черно-белой паре, или двум линиям по телевизионной терминологии.

После подстановки формул (2.1) и (2.3) в (2.2) получаем:

$$N = \Delta f_{\text{ае}} d / V_{\text{ае}} = \Delta f_{\text{ае}} \tau, \quad (2.4)$$

где $\tau = d/V_{\text{ае}}$ — время прохождения акустической волны через апертуру светового пучка.

Величина τ определяет быстродействие дефлектора, поскольку нельзя перевести сканирующий луч из одного положения в другое быстрее, чем за время, необходимое для того, чтобы по всей апертуре установилась акустическая волна новой частоты.

Соотношение, связывающее две важнейшие характеристики — разрешение и быстродействие, является основным в теории дифракционных дефлекто-

ров. Из него следует, что есть два пути повышения разрешения: увеличение ширины светового пучка d и расширение диапазона $\Delta f_{\text{ае}}$. Первый путь является более простым, хотя он и связан с ухудшением быстродействия. Для расширения пучка используется телескопическая система или призмы, которые располагаются на входе отклоняющей ячейки. На выходе ячейки ставится либо еще один телескоп, сужающий пучок света, либо линза, фокусирующая дифрагированное излучение в пятно на экране.

Таким образом, дефлекторы являются широкоапертурными устройствами. Диапазон $\Delta f_{\text{сд}}$ на практике нередко ограничивается системой возбуждения ультразвука. Однако существуют и принципиальные ограничения полосы рабочих частот дефлектора, обусловленные природой акустооптического взаимодействия.

Если в качестве рабочего тела акустооптической ячейки использовать анизотропный кристалл, картина происходящих явлений усложняется по сравнению с рассмотренной, условия дифракции становятся зависимыми от взаимной ориентации направления распространения звука и оптической оси кристалла, положения плоскости поляризации света и т. п. При этом, однако, может быть заметно расширен диапазон изменения частоты звука, в котором выполняется условие Брэгга, а значит, и увеличен интервал углового положения дифрагированного луча при той же потребляемой мощности.

При помощи акустооптических устройств можно осуществлять не только однокоординатное, но и двухкоординатное отклонение светового луча. При этом дефлекторы с взаимно перпендикулярными плоскостями развертки могут быть совмещены в одной акустооптической ячейке. Число разрешимых положений акустооптического дефлектора может составлять $10^3 - 10^4$, время переключения светового луча может составлять менее чем 1 мкс, причем развертка может осуществляться не только по набору фиксированных направлений, но и при непрерывном сканировании, что достигается ступенчатым или плавным изменением частоты акустических колебаний.

В акустооптических дефлекторах могут использоваться многие материалы, слабо поглощающие звуковые колебания и прозрачные в соответствующей области оптического спектра: плавленый кварц, халькогенидные и другие стекла различного химического состава, диоксид теллура (парателлурит), молибдат свинца, а также кристаллы KDP (калий дигидрофосфат).

Описание установки

Структурная схема установки представлена на рис. 2.2. Она состоит из следующих основных частей: источника когерентного оптического излучения 1; генератора высокой частоты 2, с выхода которого сигнал подается на акустооптическую ячейку 3; экрана 4 с нанесенными на нем измерительными линиями.

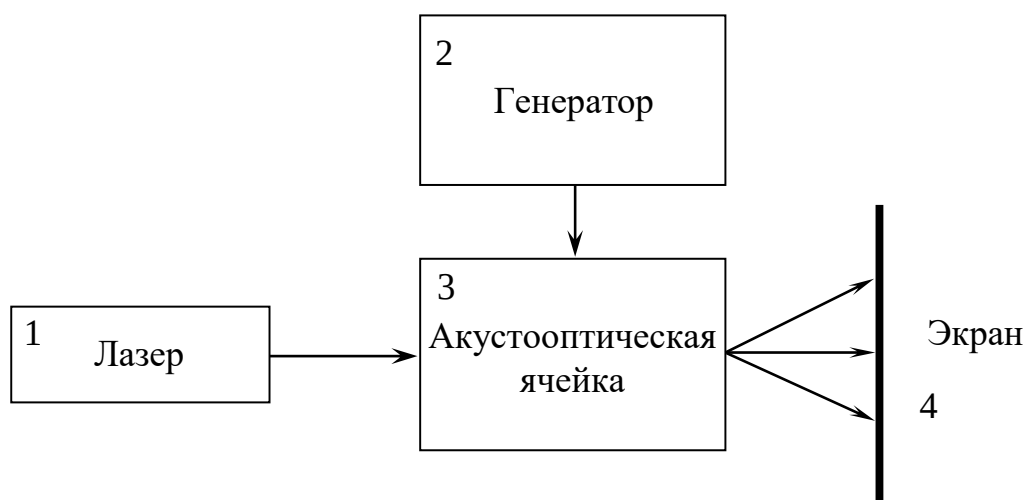


Рис. 2.2. Структурная схема установки

Перед тем, как приступить к работе следует расположить источник лазерного излучения 1 таким образом, чтобы световой поток попал на экран 4. Иначе говоря, необходимо подобрать соответствующий угол, при котором

Порядок выполнения работы

Получив допуск у преподавателя, приступить к выполнению работы в следующем порядке:

1. Расположить источник лазерного излучения таким образом, чтобы световой поток, пройдя акустооптическую ячейку, попал на экран с измерительными линиями.

2. Установив частоту около 30 МГц и выходную мощность на минимальное значение, включить генератор высокой частоты. Постепенно увеличивая выходную мощность добиться появления дифракционных максимумов первого порядка.

3. Снять зависимость смещения одного из двух первых дифракционных максимумов от частоты генератора. Используя полученные данные и зная расстояние от экрана до акустооптической ячейки, построить зависимость угла отклонения первого дифракционного максимума от частоты акустической волны $\theta(f_{\text{аэ}})$.

4. Измерить угловую ширину светового пучка первого дифракционного максимума φ . Пользуясь полученным значением и измеренной величиной сектора сканирования $\Delta\theta = (\theta_{\text{max}} - \theta_{\text{min}})$, рассчитать число разрешимых положений исследуемого акустооптического дефлектора по формуле (2.2).

5. Используя результаты измерений, по формуле (2.1) рассчитать скорость акустической волны в акустопроводе (длину световой волны при этом считать равной 700 нм).

Содержание отчета

1. Структурная схема установки.
2. Таблица значений и график зависимости угла отклонения рабочего дифракционного максимума от частоты генератора $\theta(f_{\text{аэ}})$.
3. Рассчитанное значение числа разрешимых положений дефлектора N .
4. Рассчитанное значение скорости акустической волны в акустопроводе $V_{\text{аэ}}$.
5. Краткая сводка результатов всех проведенных измерений и расчетов.
6. Выводы по полученным результатам (краткое сравнение теоретических и экспериментальных данных с необходимыми пояснениями).

Контрольные вопросы

1. Нарисуйте схему акустооптической ячейки, объясните назначение элементов.
2. Нарисуйте структурную схему акустооптического дефлектора, поясните принцип работы.
3. Назовите основные параметры, характеризующие работу акустооптических дефлекторов и пути их улучшения.
4. Каким образом можно увеличить сектор сканирования акустооптического дефлектора? Изменится ли при этом разрешающая способность?
5. Сравните между собой режимы дифракции, в которых может работать акустооптический дефлектор. Какой из режимов дифракции предпочтительнее?
6. Назовите материалы, используемые для создания акустопроводов и требования предъявляемые к ним.
7. Каким образом можно осуществить двухкоординатное отклонение светового луча?
8. Назовите области применения акустооптических дефлекторов.
9. Назовите другие физические явления, на которых может быть основана работа оптических дефлекторов, проведите их сравнительный анализ.

Лабораторная работа №4

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Цель работы: ознакомление с принципами пространственной фильтрации изображений на основе пространственного преобразования Фурье.

Краткие теоретические сведения

Из геометрической оптики известно, что линза собирает параллельный пучок света в точку, расположенную в фокальной плоскости (рис. 3.1). Произвольное световое поле можно представить как совокупность плоских волн (параллельных пучков), падающих на линзу под разными углами. Каждой такой волне линза ставит в соответствие определенную точку в фокальной плоскости. При этом распределение света в фокальной плоскости приобретает форму *пространственного спектра* поля, падающего на линзу. В этом смысле линза действует как элемент, выполняющий пространственное спектральное разложение света, или *пространственное преобразование Фурье*.

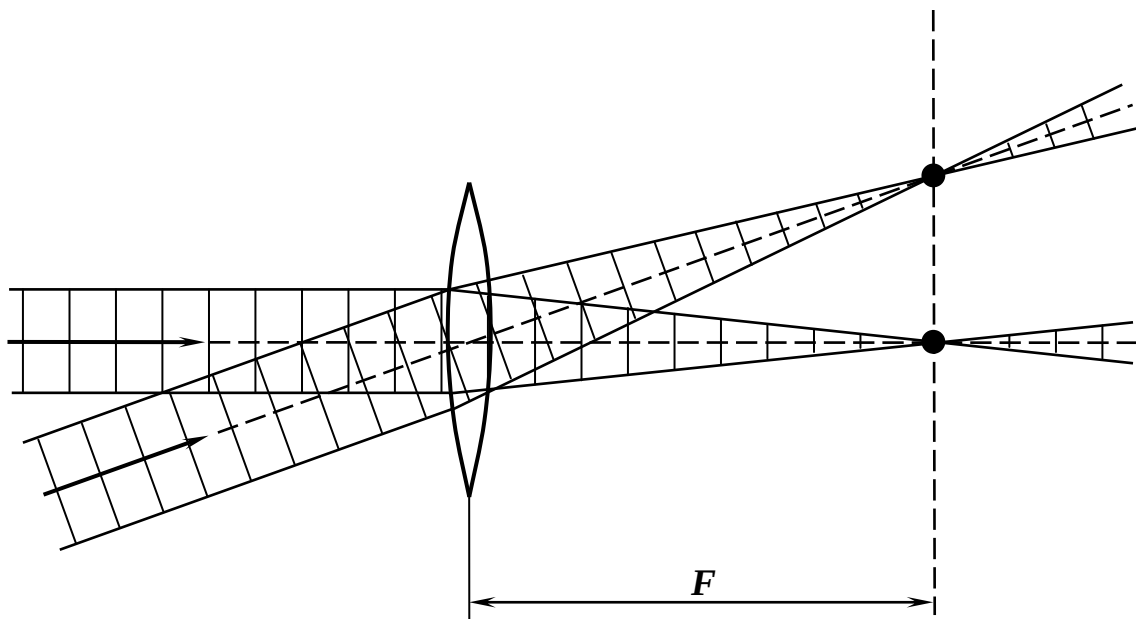


Рис. 3.1. Формирование линзой пространственного спектра светового поля

Спектральный анализ оптических изображений. Тот факт, что в фокальной плоскости образуется распределение интенсивности света, имеющее форму пространственного спектра поля, падающего на линзу, можно использовать для получения фурье-спектров оптических изображений. Для этого достаточно поместить транспарант с изображением непосредственно перед линзой, направить на него пучок когерентного света и поместить фотопластинку в зад-

ней фокальной плоскости линзы. Записанное на фотопластинке изображение будет иметь форму пространственной спектральной плотности изображения на транспаранте. Указанную процедуру иллюстрирует рис. 3.2, на котором показаны пример оптического изображения и его фурье-спектр, полученный оптическим способом.

Формирование оптического изображения. Теория Аббе. Согласно теории, развитой Аббе, процесс формирования линзой оптического изображения можно разбить на два этапа: фурье-анализ волнового поля объекта и фурье-синтез изображения. В фокальной плоскости линзы образуется распределение поля, пропорциональное фурье-образу поля источника.

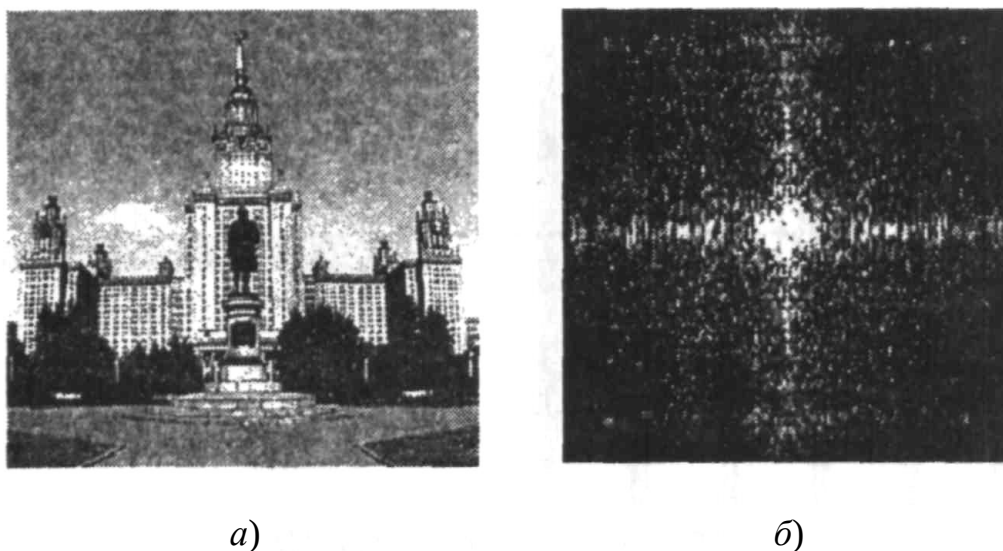


Рис. 3.2. Пример оптического изображения (а) и его пространственный спектр (б)

Схема формирования изображения по Аббе показана на рис. 3.3. В качестве объекта, изображение которого строит линза, выбрана дифракционная решетка. Так как свет, прошедший через решетку, имеет дискретный угловой спектр, имеется возможность проследить ход отдельных спектральных компонент пространственного спектра поля. Как видно из рисунка, на первом этапе линза осуществляет фурье-анализ волнового поля, испускаемого объектом. Эта операция осуществляется в области пространства между линзой и ее задней фокальной плоскостью и математически выражается преобразованием Фурье. Распределение интенсивности света в задней фокальной плоскости линзы представляет собой фурье-образ поля, испускаемого объектом. На втором этапе в процессе свободной дифракции осуществляется фурье-синтез изображения. Эта операция происходит в области пространства между задней фокальной плоскостью линзы и плоскостью изображения, и математически также выражается преобразованием Фурье. В итоге в плоскости изображения формируется световое поле, структура которого повторяет структуру объекта.

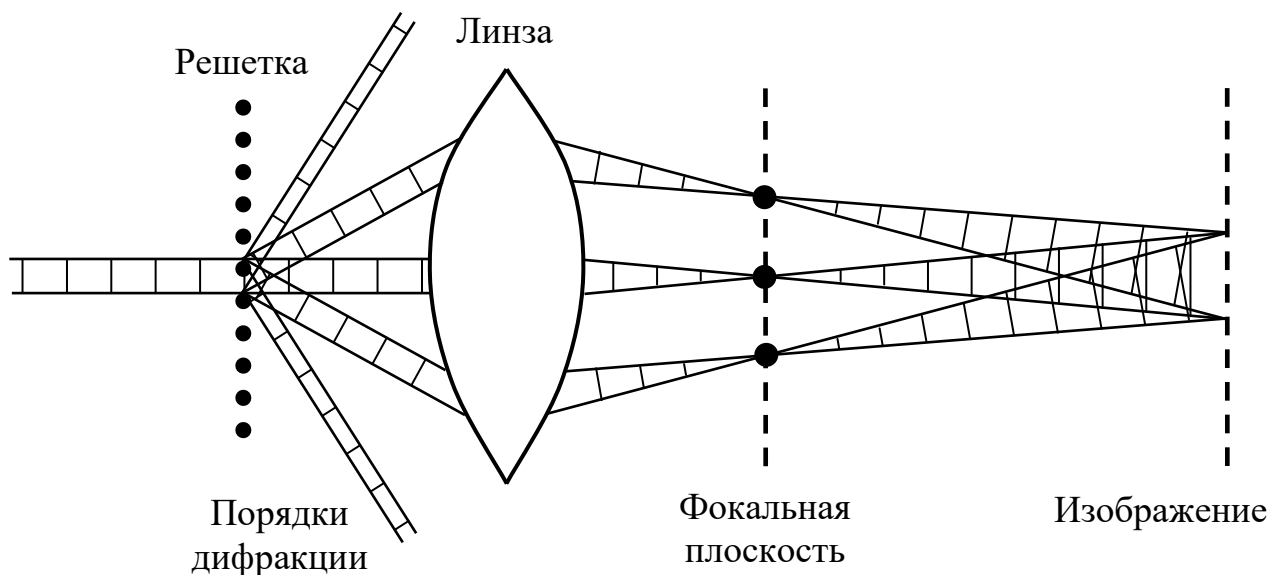


Рис. 3.3. Формирование изображения по Аббе

Помещая в фокальной плоскости линзы диафрагму, экран или фазовую пластину, можно осуществить такое преобразование углового спектра излучения, при котором нужные детали изображения будут подчеркнуты, а помехи удалены. Таким образом, в оптике удастся реализовать частотную фильтрацию оптических полей – операцию, аналогичную фильтрации электрических колебаний, применяемой в радиотехнике. Рассмотрим несколько примеров, иллюстрирующих принципы фурье-оптики.

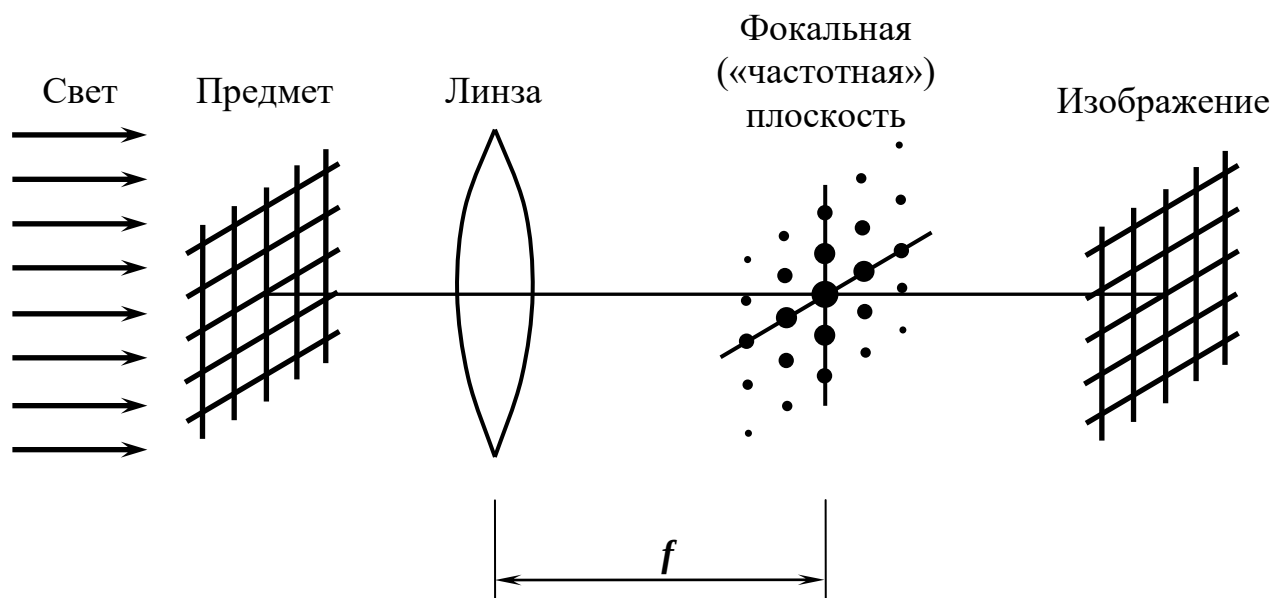


Рис. 3.4. Схема опыта Аббе-Портера

Опыты Аббе-Портера. Схема эксперимента показана на рис. 3.4. Предмет, которым служит сетка из тонкой проволоки, освещается когерентным све-

том. Свет, прошедший через сетку, падает на линзу, которая строит изображение сетки на экране. На рис. 3.5 *а* приведена фотография исходного спектра сетки, а на рис. 3.5 *б* показано соответствующее изображение. Из-за периодичности структуры сетки ее фурье-спектр имеет вид системы пятен. При этом размер отдельного пятна определяется размером сетки, а расстояние между пятнами определяется периодом сетки. Вертикальные столбцы пятен соответствуют вертикальной неоднородности сетки, т. е. системе проволок, вытянутых в горизонтальном направлении. Горизонтальные «строки» пятен соответствуют системе проволок, вытянутых по вертикали.

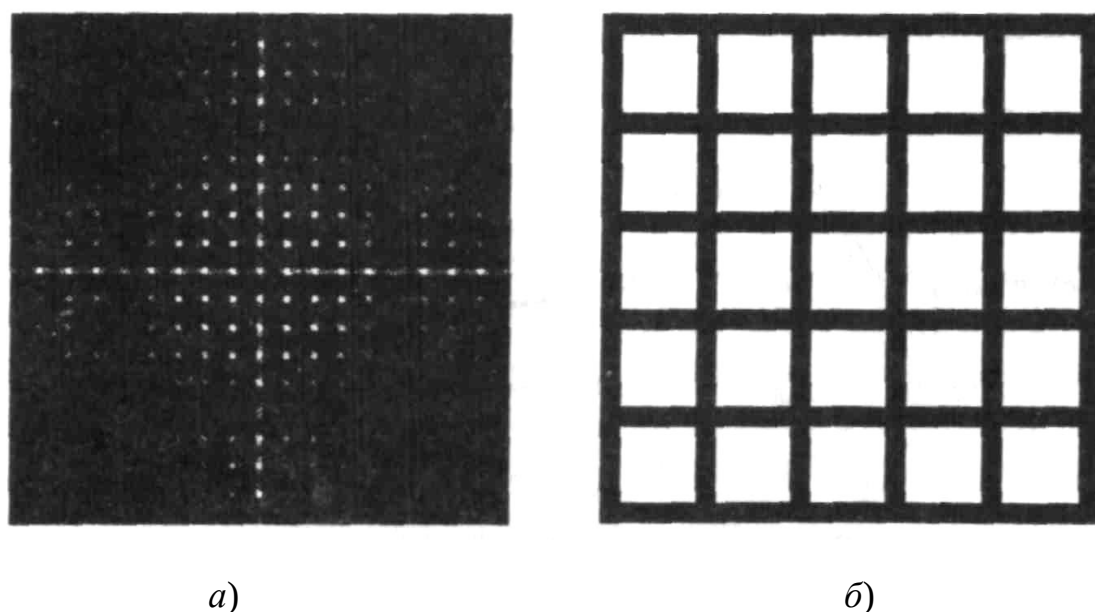


Рис. 3.5. Фурье-спектр (*а*) и изображение (*б*) проволочной сетки

Возможности спектральной фильтрации изображения хорошо видны на примере эксперимента, в котором в заднюю фокальную плоскость линзы помещают узкую щель, которая пропускает только один ряд спектральных компонент. На рис. 3.6 *а* показан спектр, пропускаемый горизонтальной щелью. Соответствующее изображение, показанное на рис. 3.6 *б*, содержит систему проволок, вытянутых по вертикали. Горизонтально вытянутые проволоки исчезают из изображения. Если повернуть щель на 90° так, чтобы она пропускала лишь вертикальный ряд пятен (рис. 3.7 *а*), то получившееся изображение будет содержать лишь систему горизонтальных линий (рис. 3.7 *б*).

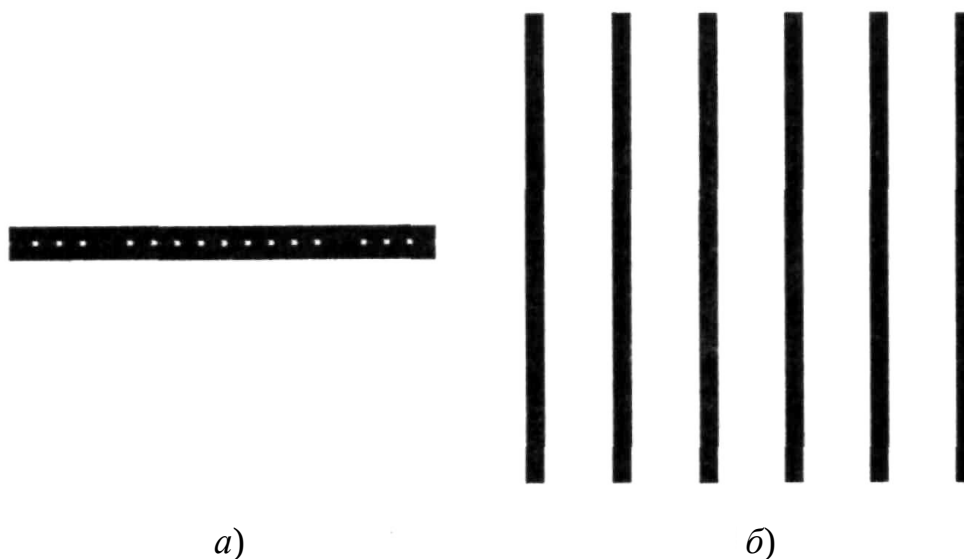


Рис. 3.6. Спектр сетки, отфильтрованный горизонтальной щелью (а)
и соответствующее изображение (б)

Можно наблюдать и другие интересные эффекты. Например, если в фокальную плоскость линзы поместить ирисовую диафрагму и установить ее так, чтобы через нее проходила только осевая фурье-компонента спектра, то при постепенном расширении диафрагмы можно шаг за шагом проследить фурье-синтез сетки. Если же вместо диафрагмы поместить в фокальной плоскости маленький экран, который закрывал бы центральное пятно фурье-спектра, то получим изображение сетки с обращенным контрастом.

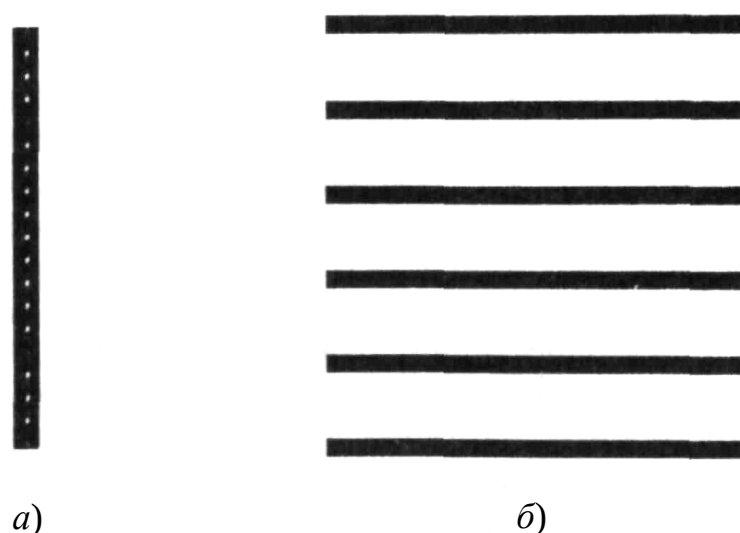


Рис. 3.7. Спектр сетки, отфильтрованный вертикальной щелью (а)
и соответствующее изображение (б)

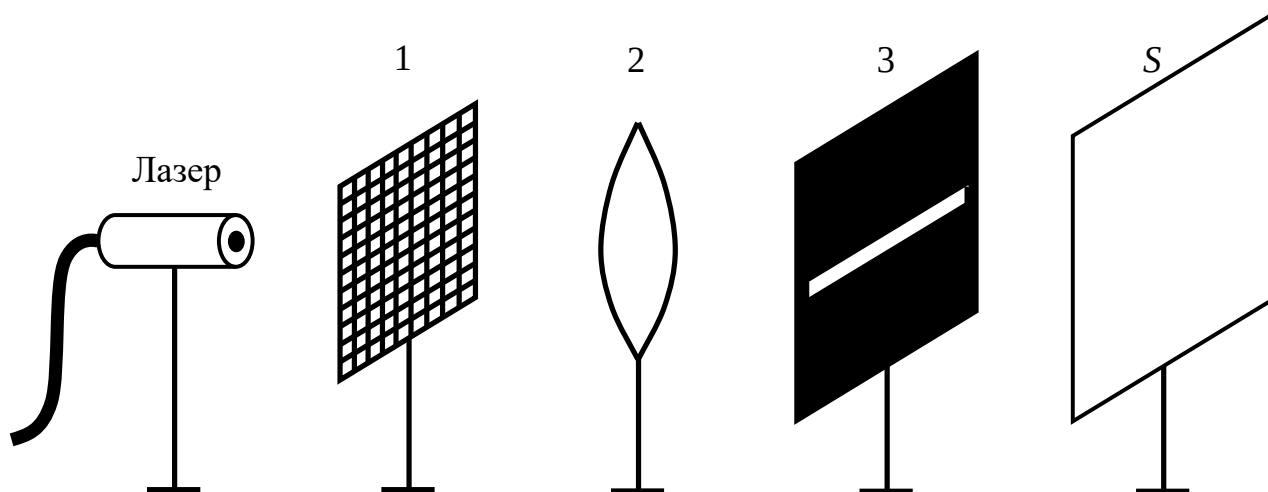


Рис. 3.8. Схема лазерной установки для демонстрации опытов Аббе-Портера

Опыт Аббе-Портера демонстрируется с помощью установки, схема которой показана на рис. 3.8. Излучение гелий-неонового лазера падает нормально на проволочную сетку 1, изготовленную из проволоки толщиной 0,1 мм. Элементарная ячейка сетки представляет собой квадрат со стороной 0,4 мм. Сеточка выполняет роль оригинала. В непосредственной близости от нее размещается собирающая линза 2 с фокусным расстоянием $f = 5 \text{ м}$, дающая на экране S, удаленном на 5 м, увеличенное изображение сетки. В процессе эксперимента линза 2 может перемещаться вдоль оптической скамьи для получения резкого изображения сетки. В фокальной плоскости линзы устанавливается раздвижная щель 3, ширину которой можно менять при помощи микрометрического винта. Смонтированная в круглой вращающейся оправе, щель может осуществлять фильтрацию пространственных частот по различным направлениям.

В начале демонстрации щель устанавливают вертикально и, постепенно уменьшая ее ширину, наблюдают размывание изображения сетки в горизонтальном направлении. При достаточно малой ширине щели на экране формируется изображение, показанное на рис. 3.7 б. Затем, не меняя ширину щели, постепенно поворачивают ее в обойме. При этом изображение на экране меняется. Наконец, при горизонтальном положении щели на экране наблюдается картина, показанная на рис. 3.6 б.

Физические и математические основы оптической обработки информации

Одним из важнейших направлений реализации потенциальных возможностей оптической обработки информации является использование аналоговых оптических процессоров. Алгоритмическую основу этого направления составляет тот факт, что волновой фронт потока излучения, проходя через линейную оптическую систему, подвергается интегральному преобразованию в пространстве координат.

Рассмотрим следующую оптическую схему. Пусть свет от очень маленького источника (который можно считать точечным), расположенного в точке P_0 на плоскости X_0OY_0 , освещает плоскость апертуры $\xi O\eta$ в точке Q и затем распространяется к точке P , лежащей в плоскости наблюдения XOY . Найдем значение комплексной амплитуды в плоскости XOY .

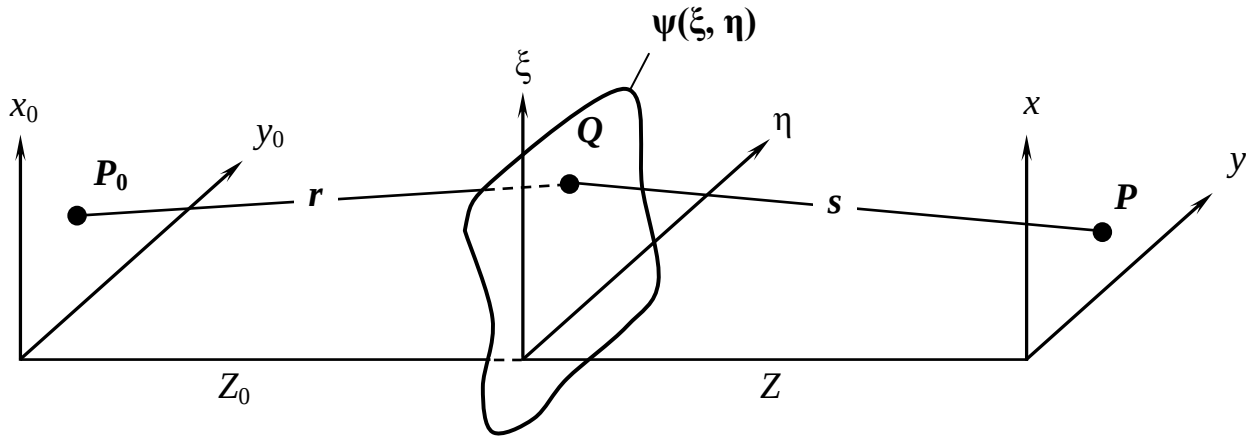


Рис. 3.9. К описанию дифракции Френеля

Если углы малы, а апертура задана функцией $\psi(\xi, \eta)$, то дифракцию можно описать следующим интегралом:

$$\psi(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi(\xi, \eta) \frac{\exp[ik(r+s)]}{rs} d\xi d\eta \quad (3.1)$$

где A – постоянная, r и s – расстояния, указанные на рис. 3.9. Выражение представляет собой дифракционную формулу Кирхгофа для случая скалярной волны. Его физический смысл можно легко объяснить следующим образом: точечный источник, расположенный в точке P_0 , излучает сферическую волну $\exp(ikr)/r$ и заполняет ею всю апертуру $\psi(\xi, \eta)$, которая в свою очередь вырезает часть сферической волны. В апертуре каждая точка волнового фронта становится новым источником расходящихся сферических волн вида $\exp(iks)/s$. Затем берется интеграл по всем таким точкам в плоскости апертуры.

Если рассматривать дифракционное поле в области, удаленной от экрана на расстояние, значительно превышающее максимальный размер апертуры, то интеграл можно упростить. При этом делаются следующие допущения для знаменателя:

$$r = \sqrt{Z_0^2 + (\xi - x_0)^2 + (\eta - y_0)^2} = Z_0 \sqrt{1 + \frac{(\xi - x_0)^2}{Z_0^2} + \frac{(\eta - y_0)^2}{Z_0^2}} \gg Z_0;$$

$$s \approx Z$$

Однако для экспоненты такая замена r и s недопустима т.к. на экспоненту влияет даже малое их изменение. Для получения более точного приближения воспользуемся членами разложения:

$$\sqrt{1+\alpha} = 1 + \frac{1}{2}\alpha - \frac{1}{2}\alpha^2 \dots; \quad |\alpha| < 1.$$

$$r \approx Z_0 + \frac{(\xi - y_0)^2}{2Z_0} + \frac{(\eta - y_0)^2}{2Z_0};$$

$$s \approx Z + \frac{(x - \xi)^2}{2Z} + \frac{(y - \eta)^2}{2Z}.$$

С учетом этого интеграл (3.1) запишется в виде:

$$\psi(x, y) = \frac{\exp[ik(Z_0 + Z)]}{Z_0 Z} \exp\left[\frac{ik}{2Z_0}(x_0^2 + y_0^2)\right] \exp\left[\frac{ik}{2Z}(x^2 + y^2)\right] \times$$

$$\times \iint \psi(\xi, \eta) \exp\left[\frac{ik}{2}(\xi^2 + \eta^2)\left(\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{Z}\right)\right] \exp\left[-ik\xi\left(\frac{x_0}{Z_0} + \frac{x}{Z}\right)\right] \exp\left[-ik\eta\left(\frac{y_0}{Z_0} + \frac{y}{Z}\right)\right] d\xi d\eta$$

В классической терминологии это выражение описывает дифракцию Френеля на апертуре $\psi(\xi, \eta)$, при этом должно выполняться условие, называемое приближением Френеля.

$$\begin{cases} Z_0 \gg |\xi - x_0| \\ Z_0 \gg |\eta - y_0| \end{cases} \text{ — приближение Френеля;}$$

$$\begin{cases} Z_0 \gg |\xi^2 - \eta^2|/\lambda \\ Z \gg |\xi^2 - \eta^2|/\lambda \end{cases} \text{ — условие дальней зоны или приближение Фраунгофера.}$$

В случае выполнения условия Френеля расстояния Z и Z_0 оказываются бесконечно большими по сравнению с максимальными размерами апертуры и тогда квадратичные множители исчезают, и распределение комплексных амплитуд запишется в виде:

$$\begin{aligned}\psi(x, y) &= A_0 \iint \psi(\xi, \eta) \exp\left[\frac{-ik}{Z}(x\xi + y\eta)\right] d\xi d\eta = \\ &= A_0 \iint \psi(\xi, \eta) \exp[-i2\pi(U\xi + V\eta)] d\xi d\eta\end{aligned}$$

Здесь U и V – так называемые пространственные частоты, величины обратно пропорциональные пространственным периодам распределения амплитуд светового поля в плоскости апертуры. Причем пространственные частоты связаны с координатами в плоскости преобразования следующим образом:

$$U = \frac{x}{\lambda Z}; \quad V = \frac{y}{\lambda Z}. \quad (3.2)$$

Данное выражение описывает дифракцию Фраунгофера, в которой имеет место постоянная функциональная связь между апертурной функцией $\psi(\xi, \eta)$ и полем $\psi(x, y)$. В данном случае $\psi(x, y)$ и $\psi(\xi, \eta)$ образуют пару функций, связанных преобразованием Фурье. Таким образом, в классической дифракции Фраунгофера распределение комплексных амплитуд в плоскости наблюдения есть Фурье-образ функции распределения светового поля в плоскости апертуры. Часто экспериментальные значения величин, удовлетворяющих выполнению условия дальней зоны для Z_0 , достигаются освещением апертуры светом от точечного источника, удаленного на бесконечность, или плоским волновым фронтом, например, от лазера.

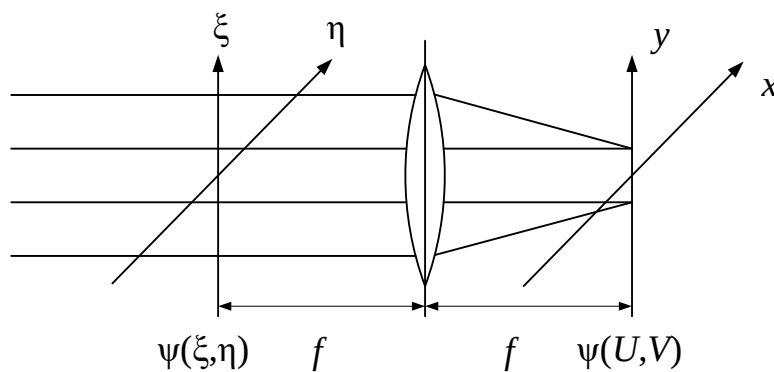


Рис. 3.10. К описанию дифракции Фраунгофера

Приближение дальней зоны для Z выполняется, если картину дифракции Фраунгофера отобразить с помощью линзы, дающей изображение дальнего по-

ля. При этом картина дифракции Фраунгофера или Фурье-образ апертурной функции локализуется в фокальной плоскости линзы. Таким образом, говорят, что оптическая система, состоящая из источника когерентного оптического излучения, дающего плоский волновой фронт транспаранта и линзы, осуществляет в фокальной плоскости линзы Фурье-преобразование двумерной функции пропускания оптического транспаранта.

Функция $\psi(x, y)$, описывающая результат дифракции, в пространственных частотах U и V после соответствующего преобразования будет иметь вид:

$$\psi(U, V) = A_0 \iint \psi(\xi, \eta) \exp[-i2\pi(U\xi + V\eta)] d\xi d\eta;$$

$$U = \frac{x}{\lambda f}; \quad V = \frac{y}{\lambda f}.$$

где f – фокусное расстояние линзы согласно рис. 3.10.

Описание установки

Структурная схема установки для Фурье-анализа волнового поля представлена на рис. 3.11. Она состоит из следующих основных частей: полупроводникового лазера 1, оптического транспаранта 2, проходя который сигнал поступает на линзу 3. Расстояние между линзой и транспарантом $s = 10 - 15$ см. Затем линза формирует на экране 4 изображение, которое показывает распределение интенсивности света в задней фокальной плоскости линзы, представляющее собой Фурье-образ поля, испускаемого объектом (транспарантом). Экран находится в фокальной плоскости линзы, т. е. расстояние между экраном и линзой равно f .

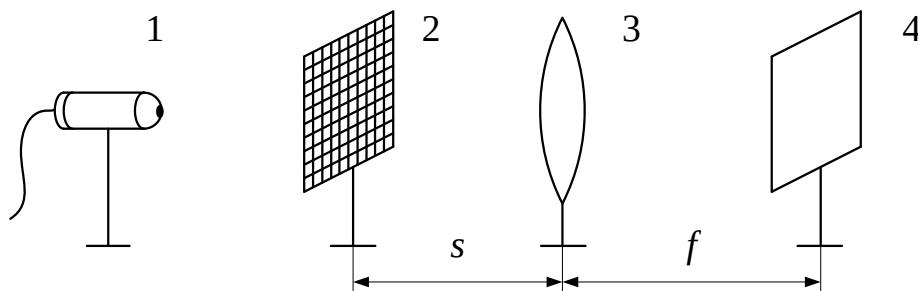


Рис. 3.11. Структурная схема для анализа волнового поля

Структурная схема установки для Фурье-синтеза волнового поля представлена на рис. 3.12. Она состоит из следующих основных частей: полупроводникового лазера 1, дифракционной решётки 2, проходя которую сигнал поступает на линзу 3. Расстояние между линзой и транспарантом 10 – 15 см. За-

тем световая волна попадает на пространственный фильтр 4, после прохождения которого световая волна формирует на экране 5 изображение. Расстояние между фильтром и экраном подбирают самостоятельно в зависимости от интенсивности источника излучения и чёткости наблюдаемого изображения (примерно 1 м).

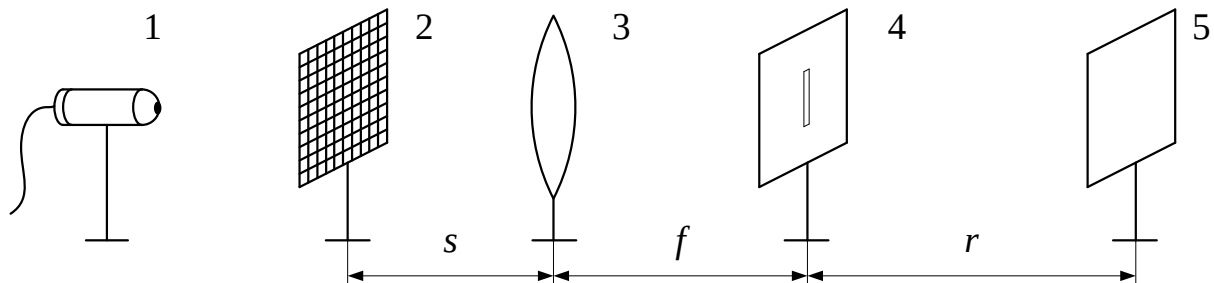


Рис. 3.12. Структурная схема для синтеза волнового поля.

Известно, что в дальней зоне распределение интенсивности является Фурье-образом поля, испускаемого транспарантом. Таким образом, изображение на экране будет являться обратным Фурье-преобразованием светового поля.

Домашнее задание

При помощи ЭВМ произвести расчёт распределения светового поля для оптического транспаранта:

1. Создать *bmp*-изображение оптического транспаранта (разрешением 200×200 точек, 24 бит). Изображение должно представлять собой сетку, наподобие изображённой на рис 3.13.

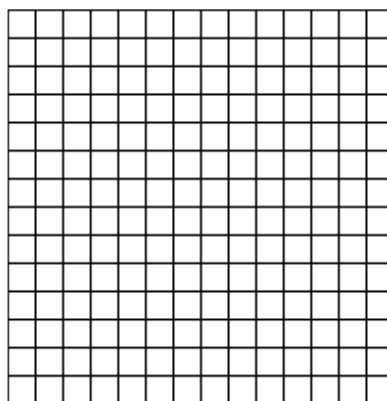


Рис 3.13. Рисунок оптического транспаранта

2. Открыть изображение в программе «*турорир.exe*».
3. Вычислить Фурье-преобразование изображения (используя кнопки «*FFT*» и «Показать»).
4. Сохранить результат.
5. Для результата, полученного в п. 3, вычислить обратное преобразование Фурье. Проверить, совпадает ли результат с исходным изображением? Сохранить изображение.
6. Открыть полученный в п.4 файл в графическом редакторе и произвести фильтрацию вручную: очистить весь рисунок кроме вертикальной (горизонтальной) срединной полосы, подобно тому, как происходит фильтрация в эксперименте.
7. Повторить действия пп. 2 – 4 для полученного изображения, вычислив таким образом обратное Фурье-преобразование.
8. Представить результаты расчётов преподавателю.

Порядок выполнения работы

Получив у преподавателя допуск и резонатор для исследований, приступить к выполнению работы в следующем порядке:

1. Расположить лазер таким образом, чтобы световой поток, пройдя оптический транспарант, попал в линзу, а затем на экран.
2. Перемещением линзы и экрана добиться чёткого изображения для наблюдения Фурье-образа на экране. Данное положение экрана соответствует фокальному расстоянию f .
3. Зарисовать (сфотографировать) распределение интенсивности волнового поля, испускаемого транспарантом.
4. Поместить в фокальной плоскости линзы пространственный фильтр.
5. Разместить экран на расстоянии приблизительно 1 м от фильтра и добиться чёткого изображения на экране.
6. Изменяя ширину щели, пронаблюдать изменение изображения на экране.
7. Зарисовать 3–4 изображения, соответствующие различной ширине щели.

Содержание отчета

1. Результаты выполнения домашнего задания.
2. Структурная схема установки.
3. Рисунки распределения волнового поля, полученные в ходе работы.
4. Краткая сводка результатов всех проведенных измерений и расчетов.
5. Выводы по полученным результатам.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой распределение света в фокальной плоскости линзы и для чего оно используется?
2. Что такое Фурье-анализ светового поля?
3. Нарисуйте схему Фурье-анализа, поясните назначение элементов и принцип действия.
4. Что такое Фурье-синтез светового поля?
5. Нарисуйте схему Фурье-синтеза, поясните назначение элементов, принцип действия.
6. В опыте по Фурье-синтезу осуществляются прямое и обратное Фурье-преобразования. Почему в таком случае используется одна линза?
7. В чём назначение и каков принцип действия пространственного фильтра?
8. Почему поле излучения, прошедшего через транспарант, в дальней зоне без линзы идентично световому полю в фокальной плоскости линзы?
9. Пояснить результаты опытов Аббе-Портера для фильтров с вертикальной и горизонтальной щелью.

Библиографический список

1. Балакший, В. И. Физические основы акустооптики / В. И. Балакший, В. Н. Парыгин, Л. Е. Чирков. М.: Радио и связь, 1985.
2. Магдич, Л. Н. Акустооптические устройства / Л. Н. Магдич, В. Д. Молчанов. М.: Сов. радио, 1978.
3. Оптические устройства в радиотехнике: Учеб. пособие для вузов / Под ред. В. Н. Ушакова. М.: Радиотехника, 2005.
4. Егоров, Ю. В. Акустооптические процессоры / Ю. В. Егоров, К. П. Наумов, В. Н. Ушаков. М.: Радио и связь, 1991.
5. Носов, Ю. Р. Оптоэлектроника / Ю. Р. Носов. М.: Радио и связь, 1989.
6. Воскресенский, Д. И. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование антенных решеток: Учеб. пособие для вузов / Д. И. Воскресенский. М: Радиотехника, 2003.
7. Справочник по элементам радиоэлектронных устройств / Под ред. В. Н. Дулина. М: Энергия, 1977.
8. Скляров, О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи / О. К. Скляров. М.: СОЛОН-Пресс, 2004.
9. Акаев, А. А. Оптические методы обработки информации / А. А. Акаев, С. А. Майоров. М: Высш. шк, 1988.