

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

**ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ФИЗИКИ КОЛЕБАНИЙ**

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ФАЗОВЫХ ОБЪЕКТОВ

Курсовая работа
студента 2-го курса
Постникова Н.С.

Научный руководитель:
доктор физ-мат наук, профессор
В.И. Балакший

Работа допущена к защите
« 7 » мая 2009 года
зав. кафедрой физики колебаний
профессор _____ *А.С. Логгинов*

МОСКВА
2009

Содержание

Введение	3
Пространственная фильтрация изображений	4
Передаточные функции АО ячейки	6
Традиционные методы визуализации фазовых объектов ...	11
АО визуализация фазовых объектов	13
Одномерный фазовый объект	14
Двумерный фазовый объект	17
Заключение	20
Список литературы	21

Введение

Несмотря на огромные успехи цифровой вычислительной техники, внимание ученых и инженеров все более привлекают оптические методы обработки, предоставляющие ряд уникальных возможностей, которыми цифровые методы в принципе не обладают. Основными из таковых являются: возможность параллельной обработки информации, возможность построения устройств, в которых скорость обработки определяется только скоростью распространения оптических сигналов, и, конечно же, в первую очередь здесь следует назвать возможность выполнения «сверхбыстрого» преобразования Фурье над огромными массивами информации, содержащимися в оптических изображениях. Причем, в отличие от компьютерных методов, скорость вычисления фурье-образа в оптической системе одинакова для любого количества разрешаемых элементов в изображении, а сама оптическая схема состоит в принципе всего из одного элемента – линзы.

Среди известных в настоящее время методов оптической обработки информации важное место занимают методы, основанные на пространственной фильтрации оптического изображения [1-3]. К этой группе можно отнести и акустооптические (АО) методы обработки изображений. Впервые на возможность управления структурой оптических изображений с помощью АО взаимодействия было указано в работе [4]. Было показано, что АО ячейка действует на входной оптический сигнал (оптическое изображение) как фильтр пространственных частот. Передаточная функция такого фильтра отражает селективные свойства АО взаимодействия. Конкретный вид передаточной функции зависит от структуры акустического поля в АО ячейке и от геометрии АО взаимодействия. Также было показано, что с помощью АО ячейки могут быть выполнены такие классические операции над оптическими изображениями, как их дифференцирование и интегрирование, а также визуализация фазовых объектов [5-13]. По сравнению с другими известными методами обработки изображений [1-3], АО метод обладает рядом преимуществ. АО пространственные фильтры не чувствительны к их положению в оптической системе, они не требуют точной юстировки и дополнительной оптики для формирования фурье-спектра. Такие устройства способны обрабатывать как когерентные, так и некогерентные изображения. Но главное достоинство АО фильтров заключается в возможности их быстрой электронной перестройки (путем изменения параметров акустической волны), что обеспечивает обработку поступающей информации в реальном времени.

Целью данной курсовой работы являлось знакомство с проблемой визуализации фазовых объектов и детальное изучение АО метода визуализации.

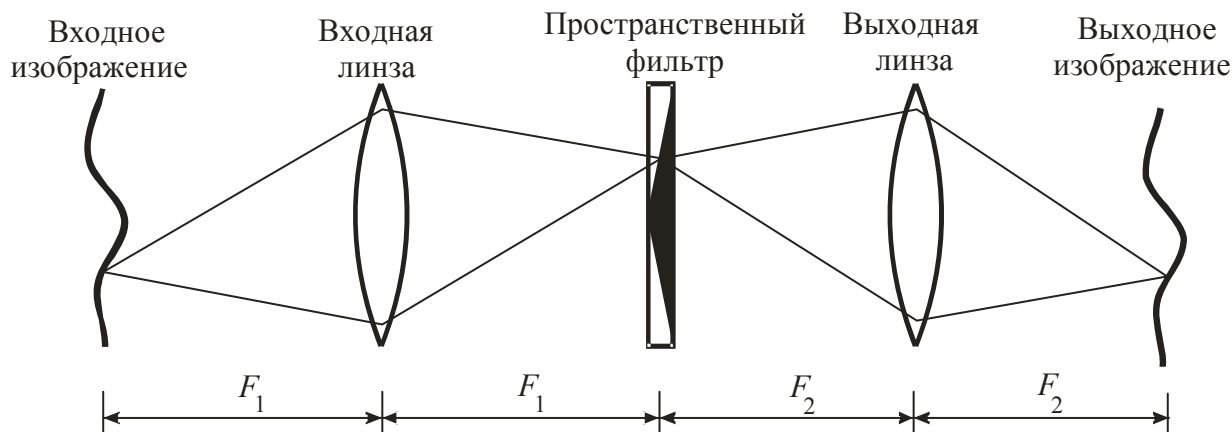
Пространственная фильтрация изображений

В оптической обработке информации под пространственной фильтрацией понимается сознательное воздействие на пространственный спектр оптического сигнала (изображения) с помощью пространственных фильтров с целью видоизменения этого спектра и соответствующего ему изображения. В отличие от других методов преобразования и обработки изображений (в частности, с помощью компьютеров) метод пространственной фильтрации позволяет воздействовать через составляющие спектра на изображение предмета в целом, т.е. осуществлять параллельную обработку всех точек изображения.

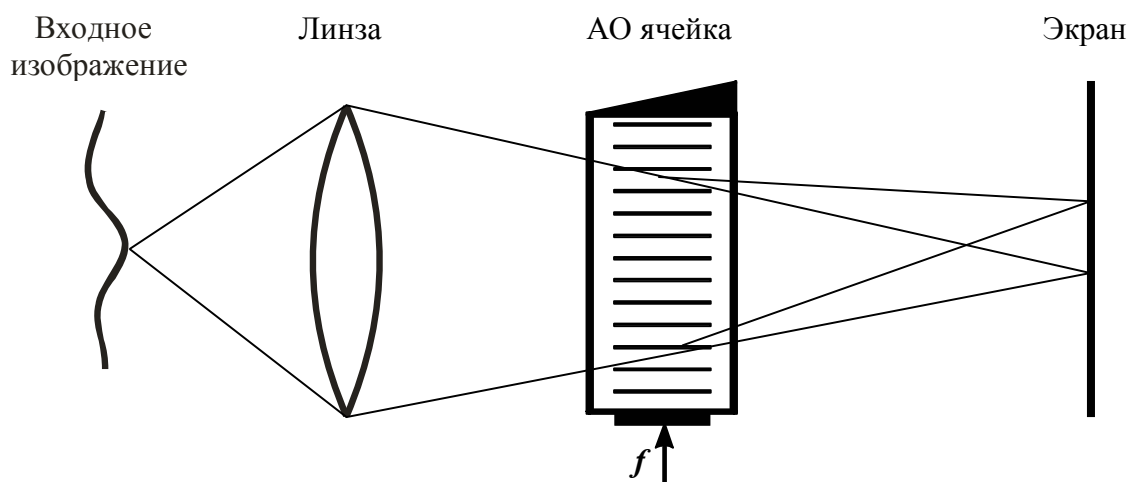
Большинство систем оптической обработки информации использует свойство линзы совершать фурье-преобразование оптического сигнала. Базовая схема такой системы показана на рис. 1а [1,3]. Обрабатываемое изображение формируется в передней фокальной плоскости входной фурье-линзы. В этом случае, в задней фокальной плоскости возникает оптическое поле, которое представляет собой пространственный спектр входного оптического сигнала. В эту плоскость помещается транспарант (пространственный фильтр), производящий определенное воздействие на пространственный спектр. Вторая линза производит обратное фурье-преобразование сигнала, создавая таким образом в своей задней фокальной плоскости отфильтрованное изображение. Выбирая транспаранты с различными функциями пропускания, которые здесь и являются передаточными функциями, можно выполнять различные виды оптической обработки информации. Например, в случае транспаранта, имеющего линейную передаточную функцию вида $T(y, z) = ayz$, выходное изображение будет представлять собой производную от распределения амплитуды поля $u_i(y, z)$ во входном изображении, а в случае гиперболической функции $T(y, z) = a/yz$ – интеграл. Следует отметить, что рассматриваемая система требует очень точной настройки. Это особенно важно в отношении транспаранта, чье положение должно быть точно зафиксировано как в плоскости yz , так и по оси x .

АО ячейка может работать как фильтр пространственных частот с передаточной функцией $T_a(\vartheta_i, \chi)$, зависящей от структуры акустического поля и геометрии АО взаимодействия [14]. Здесь ϑ_i и χ – углы соответственно в плоскостях xz и xy , определяющие пространственные частоты $f_z = \vartheta_i n / \lambda$ и $f_y = \chi n / \lambda$ (n – показатель преломления материала АО ячейки, λ – длина волны света в вакууме). Однако принцип действия АО ячейки существенно отличается от выше описанного и является уникальным среди всех других методов обработки изображений. Дело в том, что АО ячейка непосредственно воздействует на пространственный спектр оптического сигнала

$U_i(f_y, f_z)$, а не на световое поле $u_i(y, z)$. Поэтому ячейка может быть расположена в любой плоскости yz на пути светового пучка. Надо лишь следить за тем, чтобы не происходило виньетирования светового пучка из-за конечных размеров ячейки (точнее, размеров акустического поля).



(a)



(б)

Рис. 1. Схемы пространственной фильтрации изображений
(а) – классическая, (б) – АО метод.

На рис. 1б показана простейшая схема АО обработки изображений. Здесь нет ни одной фурье-линзы, поскольку нет необходимости в формировании фурье-спектра. Единственная линза в системе служит для переноса изображения из входной плоскости в выходную. Ее положение определяется обычной формулой линзы. АО ячейка располагается на пути светового пучка так, чтобы весь пучок проходил через акустическое поле. В ячейке, благодаря селективным свойствам АО взаимодействия, происходит одновременно

дифракция света на акустической волне и пространственная фильтрация оптического сигнала. Такая система не требует точной настройки и юстировки. Роль транспаранта и фурье-линз на рис. 1а играет здесь всего лишь одна АО ячейка. Передаточная функция ячейки определяет закон преобразования изображения в системе. Разнообразие видов передаточных функций АО взаимодействия, продемонстрированное в работе [14], предоставляет широкие возможности для обработки изображений.

Хотя теоретически реализация АО метода обработки изображений возможна в однолинзовой системе, показанной на рис. 1б, однако из практических соображений (удобства юстировки системы, согласования размеров выходного изображения и приемного фоторегистрирующего устройства, оптимизации размеров АО ячейки с целью минимизации потребляемой ячейкой мощностью и др.) удобнее использовать двухлинзовую систему [12,13]. В такой системе входная линза переносит изображение в центральную плоскость ячейки, а выходная формирует обработанное изображение в плоскости фотоприемного устройства.

Передаточные функции АО ячейки

В процессе дифракции света на ультразвуке в дифрагированный пучок переносится информация, содержащаяся как в падающей световой волне, так и в электрическом сигнале, подаваемом на пьезопреобразователь ячейки. При этом характеристики ячейки существенно сказываются на процессе АО взаимодействия. АО ячейку можно рассматривать как элемент оптической обработки информации, т.к. АО ячейка работает как фильтр пространственных частот с передаточной функцией, зависящей от структуры акустического поля и геометрии АО взаимодействия. Передаточная функция $T_a(\vartheta_i, \chi)$ характеризует действие АО ячейки на каждую плоскостную компоненту светового поля, распространяющуюся под углами ϑ_i и χ к оптической оси системы x . Поэтому если известен пространственный спектр входного оптического сигнала (т.е. исходного изображения) $U_i(\vartheta_i, \chi)$, то, умножив его на передаточную функцию $T_a(\vartheta_i, \chi)$, можно найти выходной спектр $U_d(\vartheta_i, \chi)$, а затем, с помощью обратного преобразования Фурье, рассчитать распределение амплитуды светового поля в выходном изображении.

В работе [14] показано, что в одноосных кристаллах можно выделить три принципиально разных варианта передаточных функций. Для большинства случаев двумерная передаточная функция имеет форму дуги, показанной на рис. 2. Такой вид передаточной функции характерен для всех вариантов изотропной дифракции. При этом дуга ориентирована перпендикулярно плоскости АО взаимодействия.

На рис. 2а представлена передаточная функция первого дифракционного порядка. Расчет здесь выполнен для случая, когда световой пучок с длиной волны $\lambda = 0.6328$ мкм

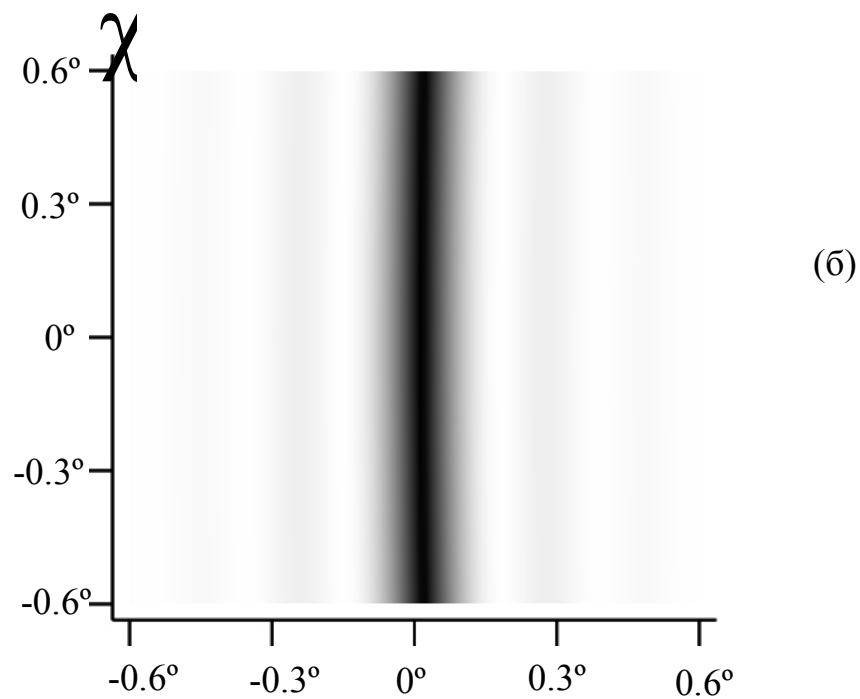
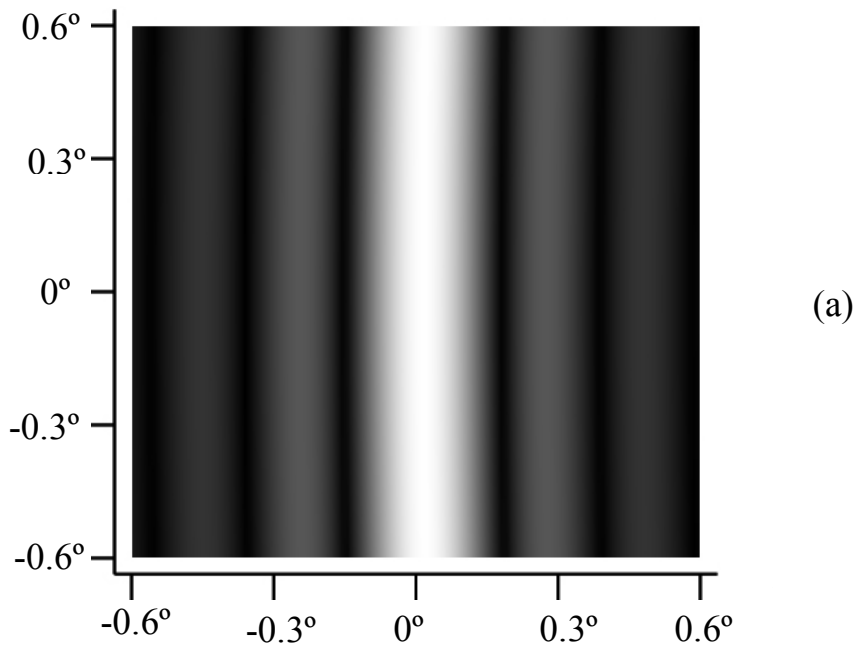


Рис. 2. Передаточные функции АО ячейки на основе молибдата кальция для первого (а) и нулевого (б) дифракционных порядков в случае квазиортогональной геометрии

распространяется в кристалле молибдата кальция (CaMoO_4) на частоте ультразвука $f = 42.6$ МГц. Направление светового пучка совпадает с осью x . Яркость картины в каждой точке пропорциональна $|T_a^{(1)}|$. Центру картины соответствуют нулевые пространственные частоты $f_y = f_z = 0$ (ось пучка). Светлая дугообразная полоса на рис. 2а показывает область пространственных частот $f_z = n\vartheta_i/\lambda$ и $f_y = n\chi/\lambda$, пропускаемых АО ячейкой. Видно, что в данном случае пространственный фильтр не проявляет селективных свойств по пространственным частотам f_y , тогда как область пропускания пространственных частот f_z ограничена углом примерно в $\Delta\vartheta_i = 0.2^\circ$, что говорит о разрешении примерно в 5.5 лин/мм.

В случае, представленном на рис. 2б, ситуация обратная. Здесь яркость картины в каждой точке пропорциональна $|T_a^{(0)}|$. Передаточная функция нулевого дифракционного порядка $T_a^{(0)}$ инвертирована по отношению к передаточной функции первого порядка. Таким образом, в данном случае существует полоса непропускания пространственных частот f_z той же ширины $\Delta\vartheta_i = 0.2^\circ$, что и полоса пропускания в первом порядке дифракции.

В обоих случаях с уменьшением частоты ультразвука дуга передаточной функции будет перемещаться вправо, а с увеличением - влево вдоль оси ϑ_i в область более высоких пространственных частот, позволяя селективно воздействовать на компоненты f_z пространственного спектра.

Совсем другой вид имеют передаточные функции в случае коллинеарной дифракции [14,15]. На рис. 3 представлены двумерные передаточные функции первого дифракционного порядка, рассчитанные для кристалла CaMoO_4 в случае, когда световой пучок и ультразвуковая волна распространяются вдоль кристаллографической оси X . Расчет выполнен для углового диапазона $\Delta\vartheta_i = \Delta\chi = 10^\circ$. Если акустическая частота равна частоте коллинеарного фазового синхронизма $f_c = 46.62$ МГц, то передаточная функция имеет крестообразную форму с лучами, ориентированными приблизительно под углом 45° к осям Y и Z кристалла (рис. 3а). форму с лучами, ориентированными приблизительно под углом 45° к осям Y и Z кристалла (рис. 19а). При уменьшении частоты крест расщепляется на две дуги, смещающиеся по оси ϑ_i в противоположных направлениях (рис. 3б). Если же частота увеличивается, то крест разделяется на две дуги, перемещающиеся по оси χ (рис. 3в).

Коллинеарная дифракция предоставляет более широкие возможности для пространственной фильтрации, чем изотропная фильтрация. Видно, что для выполненного расчета полоса фильтрации пространственных частот будет ограничиваться углами в

диапазоне приблизительно от 1° до 5° как для f_y , так и для f_z , что соответствует разрешению системы от 28 до 140 лин/мм. Таким образом, появляется возможность различного рода симметричных селективных воздействий (относительно какой-либо из пространственных частот f_y или f_z) на пространственный спектр проходящего через ячейку оптического сигнала.

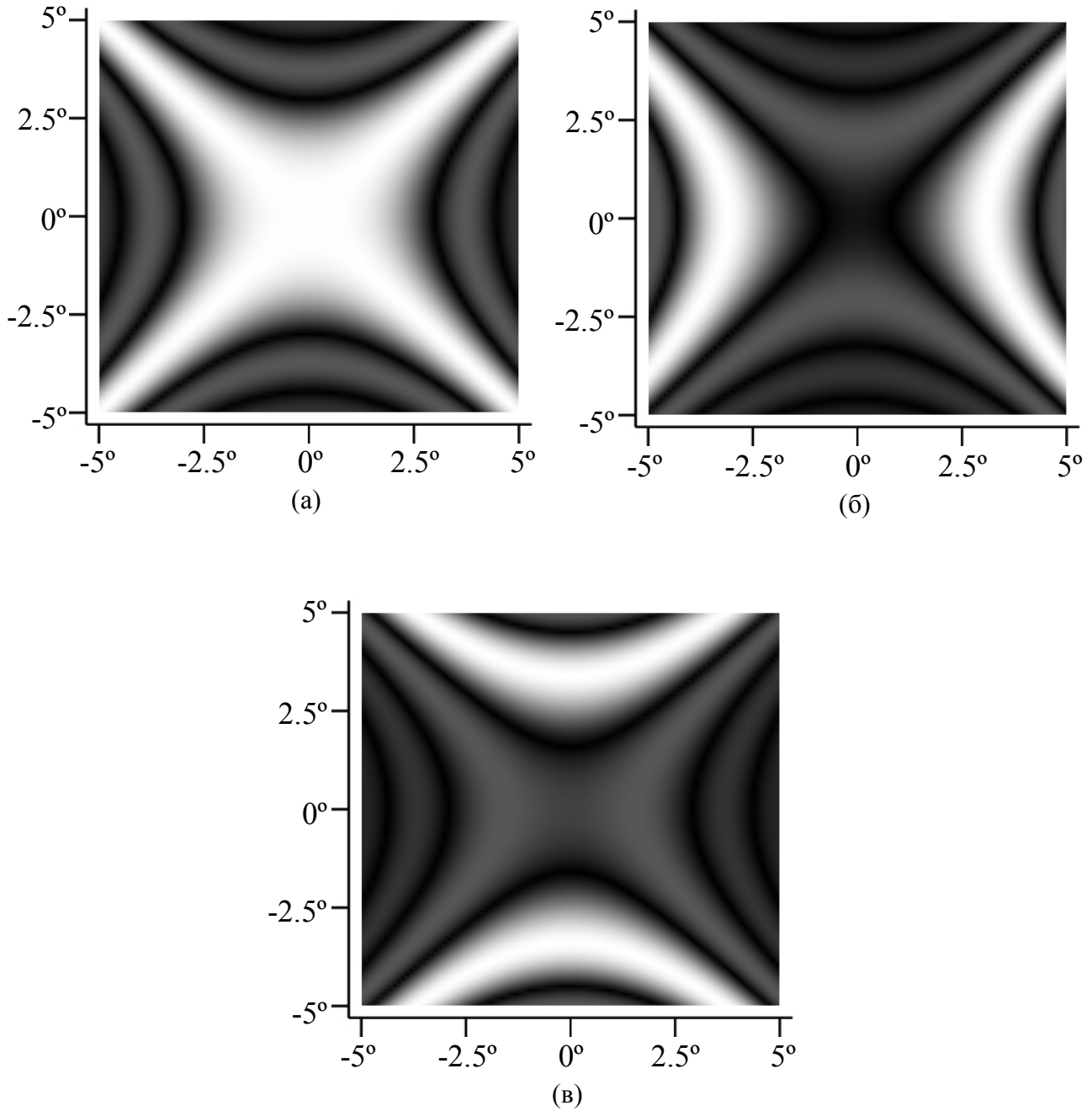


Рис. 3. Передаточные функции первого порядка коллинеарной дифракции в CaMoO_4 .

а: $f = f_c = 46.62$ МГц; б: $f = 46.55$ МГц, в: $f = 46.7$ МГц.

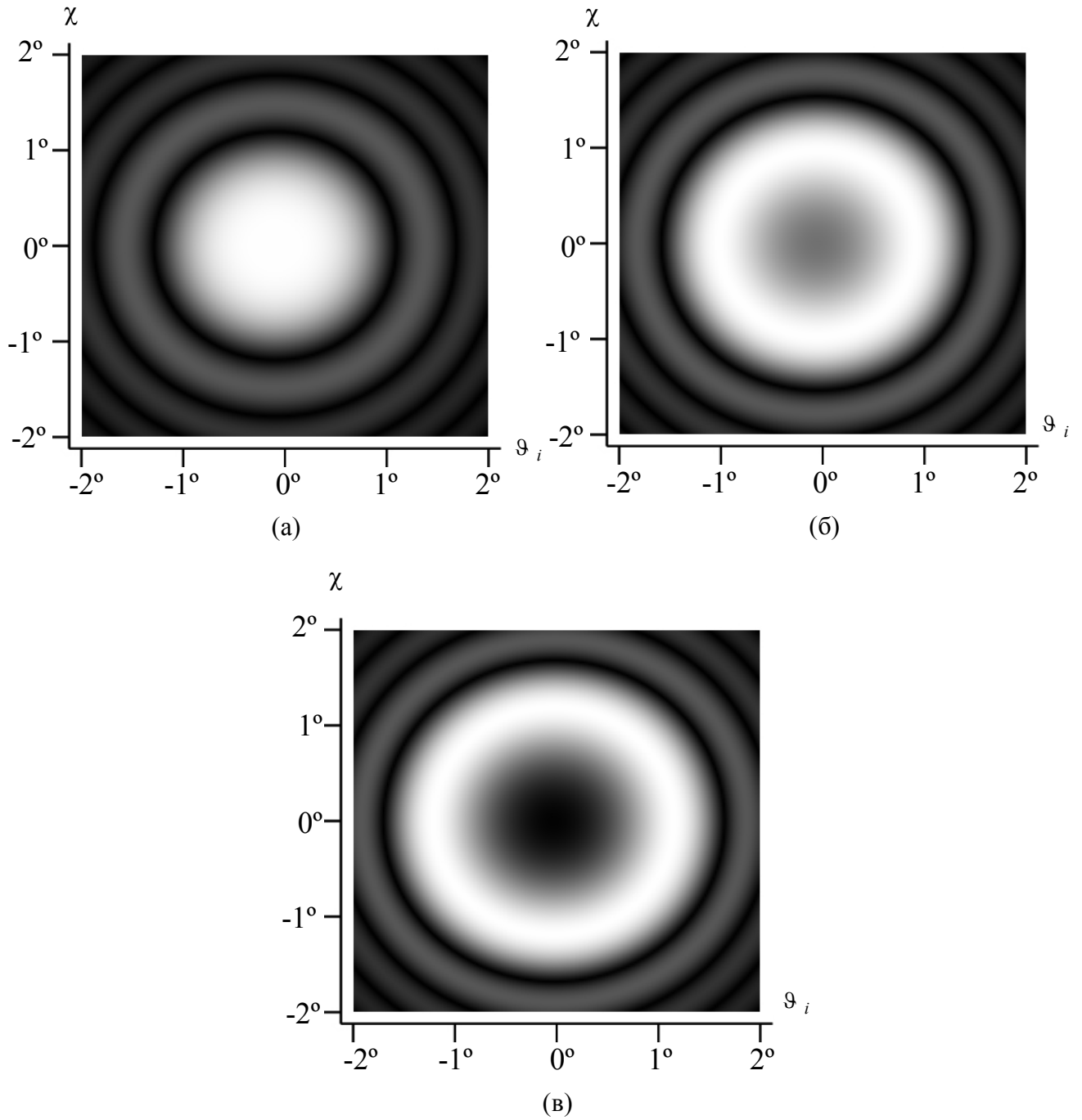


Рис. 4. Передаточные функции первого порядка дифракции при тангенциальной геометрии АО взаимодействия в TeO_2 .
 а: $f = f_i = 119.5$ МГц; б: $f = 119.7$ МГц, в: $f = 119.8$ МГц.

Третий вариант передаточных функций реализуется в области тангенциальной геометрии АО взаимодействия [14,15]. Передаточные функции $T_a^{(1)}(\vartheta_i, \chi)$ этого варианта, рассчитанные для ячейки на основе кристалла парателлуриата (TeO_2), показаны на рис. 4. Расчет выполнен для геометрии взаимодействия, когда главной плоскостью АО взаимодействия является плоскость $(1\bar{1}0)$, а вектор ультразвуковой волны \mathbf{K} составляет

угол 80° с оптической осью. В случае рис. 4а АО ячейка работает как фильтр низких частот, пропускающий спектральные компоненты с частотами от нуля до $f_z = f_y = 78.4 \text{ мм}^{-1}$ по первым нулям функции $T_a^{(1)}(\vartheta_i, \chi)$ или до 52.9 мм^{-1} по уровню 3 дБ. При уменьшении частоты ультразвука форма передаточной функции сохраняется, но пропорционально уменьшаются амплитуды дифрагированных компонент спектра (рис. 4б). Иная картина наблюдается при $f > f_t$ (рис. 4в): в центре передаточной функции появляется провал, а сама функция приобретает кольцеобразную форму. В этом случае ячейка работает как полосовой фильтр.

Традиционные методы визуализации фазовых объектов

Проблема визуализации фазовых объектов относится к классическим задачам волновой оптики. Световая волна, проходя через объект или отражаясь от него, испытывает в общем случае амплитудную и фазовую пространственную модуляцию. Однако глаз или любой другой фоточувствительный прибор регистрируют только распределение амплитуды (точнее – распределение интенсивности). Вся информация об объекте, содержащаяся в фазовой модуляции полностью теряется, хотя эта информация может быть очень важной, а иногда (в случае чисто фазовых объектов) и единственной информацией об объекте. Фазовые объекты широко встречаются не только в оптике и лазерной физике (линзы, призмы, зеркала и т.д.), но также, например, в биологии и в медицине. В более широкой постановке проблема, сформулированная как регистрация оптического волнового фронта, является ключевой для систем адаптивной оптики [16,17].

Фазово-модулированную световую волну можно записать в виде

$$u_{in} = u_0 \exp [j\gamma(z)], \quad (1)$$

где u_0 - амплитуда, а $\gamma(z)$ - функция, описывающая фазовую структуру волны. Предположим, что глубина фазового рельефа в волне (1) мала и выполняется условие $|\gamma| \ll 1$. Тогда, разлагая экспоненту в ряд и оставляя только два первых члена разложения, получим:

$$u_{in}(z) \approx u_0 [1 + j\gamma(z)]. \quad (2)$$

При прямом наблюдении фазовый объект не виден, т.к. интенсивность света в любой точке светового поля одна и та же:

$$I_{in} = |u_{in}(z)|^2 = u_0^2 = const. \quad (3)$$

Для того чтобы зарегистрировать и измерить фазово-модулированное световое поле (2), фазовая модуляция должна быть переведена в амплитудную. На сегодняшний момент

известно несколько методов визуализации фазовых объектов [1,3,18]. Некоторые из них основаны на пространственной фильтрации спектра оптического изображения в фурье-плоскости. Такая обработка требует высококачественной оптики и очень точной настройки и юстировки системы.

Метод темного поля

Одним из классических методов визуализации фазовых объектов является метод темного поля. В этом методе, реализуемом по схеме рис. 1а, в фурье-плоскости помещается транспарант в виде экрана, закрывающего только центральную спектральную компоненту, несущую информацию о постоянной составляющей поля (1). В результате в отфильтрованном сигнале возникает визуализированное изображение фазового объекта с распределением интенсивности

$$I_{out} = |u_0 j\gamma(z)|^2 = u_0^2 \gamma^2(z). \quad (4)$$

Таким образом, здесь реализуется закон преобразования фазы в интенсивность вида $I_{out} \sim \gamma^2$. Поскольку $|\gamma| \ll 1$, то визуализированное изображение получается очень неярким и плохо различимым.

Нож Фуко (метод свилей)

Это исторически первый (1859 г.) метод наблюдения фазовых объектов [18]. В этом методе, также реализуемом по схеме рис. 1а, в фурье-плоскости помещается транспарант, который загораживает не центральную, а боковые спектральные компоненты в полуплоскости $z > 0$. Можно также вырезать не только боковые, но и часть центральной спектральной компоненты. Это повышает контраст картины.

Фазово-контрастный метод Цернике

Картины, полученные при использовании двух приведенных выше методов, неадекватно передают вариации фазы. Кроме того, теряется много света. В фазово-контрастном методе Цернике транспарант представляет собой маленькую фазовую пластинку $\lambda/4$, через которую проходит излучение только центральной составляющей спектра [1]. Такая пластинка сдвигает фазу центральной компоненты на $\pm \pi/2$, в результате чего распределение выходной интенсивности принимает вид:

$$I_{out} = |u_0 [\pm j + j\gamma(z)]|^2 \approx u_0^2 [1 \pm 2\gamma(z)]. \quad (5)$$

Здесь знаку «+» соответствует так называемый положительный фазовый контраст, а знаку «-» – отрицательный. Как следует из (5), здесь реализуется закон преобразования вида $I_{out} \sim \gamma$.

АО визуализация фазовых объектов

Во всех вышеприведенных методах визуализации фазовая модуляция превращается в амплитудную путем определенного воздействия на пространственный спектр светового сигнала. Поскольку АО ячейка тоже меняет спектр проходящей через нее световой волны, то можно ожидать появления эффекта визуализации и в процессе АО взаимодействия. В работах [8-11, 19-21] этот эффект исследован теоретически и экспериментально.

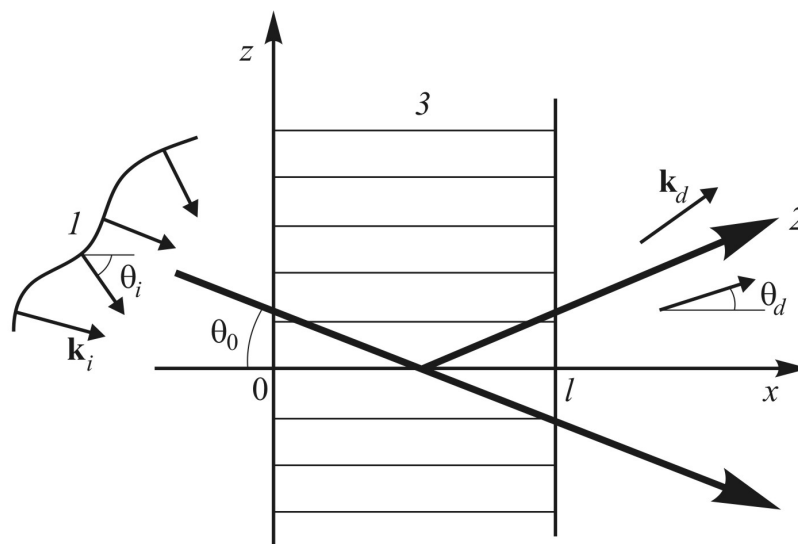


Рис. 5. Геометрия АО взаимодействия при дифракции фазово-модулированной световой волны на монохроматическом акустическом пучке.
1 - падающая световая волна; 2 - дифрагированный пучок; 3 - акустический пучок.

Сущность АО метода визуализации фазовых объектов поясняет рис. 5. В фазово-модулированной световой волне 1, которую можно записать в виде (1) направление волновой нормали меняется вдоль волнового фронта по закону

$$\vartheta_i(z) = \frac{1}{k_0} \frac{d\gamma}{dz} \equiv \frac{\gamma'}{k_0}, \quad (6)$$

где k_0 – волновое число, а $\gamma'(z) = \frac{d\gamma}{dz}$ – фазовый градиент. При прохождении такой волны через АО ячейку, работающую в брэгговском режиме дифракции, который, как известно, отличается высокой угловой селективностью, разные участки светового пучка, благодаря различию в углах падения ϑ_i , дифрагируют с различной эффективностью. В результате дифрагированная волна оказывается промодулированной по интенсивности пропорционально локальным значениям фазового градиента $\gamma'(z)$. Можно сказать, что АО ячейка в этом случае выполняет функцию углового дискриминатора. Закон преобразования фазы в интенсивность имеет специфический характер: $I_{out} \sim \gamma'$. Таким образом, в АО методе

непосредственно визуализируется распределение не фазы γ , а фазового градиента γ' . Как и в случае пространственной фильтрации амплитудных изображений, при АО визуализации фазовых объектов на результирующее изображение сильное влияние оказывает геометрия АО взаимодействия и, следовательно, форма передаточной функции АО ячейки.

Одномерный фазовый объект

Предположим для определенности, что визуализируемое поле промодулировано по фазе по гармоническому закону с периодом d и амплитудой γ_0 :

$$\gamma(z) = \gamma_0 \cos\left(\frac{2\pi z}{d}\right). \quad (7)$$

Если световой пучок падает на АО ячейку под углом ϑ_0 , то, предполагая малую глубину фазовой модуляции ($\gamma_0 \ll 1$), оптическое поле на входе АО ячейки может быть записано в виде:

$$u_i(z) = u_0 \exp[j\gamma(z)] \exp(-jk_i z \vartheta_0) \approx u_0 [1 + j\gamma(z)] = u_0 \left[1 + j \frac{\gamma_0}{2} \exp\left(j \frac{2\pi z}{d}\right) + j \frac{\gamma_0}{2} \exp\left(-j \frac{2\pi z}{d}\right) \right] \exp(-jk_i \vartheta_0 z). \quad (8)$$

Пространственный спектр сигнала (8) имеет вид:

$$U_i(\vartheta_i) = \frac{u_0 \lambda}{n} \left[\delta(\vartheta_0 - \vartheta_i) + j \frac{\gamma_0}{2} \delta\left(\vartheta_0 + \frac{\lambda}{nd} - \vartheta_i\right) + j \frac{\gamma_0}{2} \delta\left(\vartheta_0 - \frac{\lambda}{nd} - \vartheta_i\right) \right]. \quad (9)$$

В работе [20] показано, что распределение интенсивности света в дифрагированном пучке описывается выражением:

$$I_d(z) = u_d u_d^* = u_0^2 \left[T_0^2 + \gamma_0 T_0 (T_{-1} - T_{+1}) \sin \frac{2\pi z}{d} \right] \equiv u_0^2 \left[I_0 + I_1 \sin \frac{2\pi z}{d} \right]. \quad (10)$$

Первое слагаемое в формуле (10) представляет собой постоянную засветку выходного поля, а второе описывает синусоидальное изменение интенсивности с периодом d . Сравнивая (10) с (7), можно отметить, что распределение интенсивности смещено по оси z на величину $d/4$ относительно распределения фазы. Причина заключается в том, что АО ячейка визуализирует непосредственно не фазу $\gamma(z)$, а фазовый градиент $\gamma'(z)$. Еще одна важная особенность АО метода заключается в том, что выходной сигнал пропорционален γ_0 , как в фазовоконтрастном методе, а не γ_0^2 , как в методе темного поля.

Из (10) следует, что контраст визуализированного изображения (глубина модуляции интенсивности) равен

$$\mu^{(1)} = \left| \frac{I_{\sim}}{I_{=}} \right| = \gamma_0 \left| \frac{T_{+1} - T_{-1}}{T_0} \right| = \gamma_0 \left| \frac{\operatorname{sinc} \left[\frac{\sqrt{A^2 + Q^2 (\Delta\Theta - 2F_z)^2}}{4} / 2\pi \right] - \operatorname{sinc} \left[\frac{\sqrt{A^2 + Q^2 (\Delta\Theta + 2F_z)^2}}{4} / 2\pi \right]}{\operatorname{sinc} \left[\frac{\sqrt{A^2 + Q^2 \Delta\Theta^2}}{4} / 2\pi \right]} \right| \quad (11)$$

где $Q = \lambda K_0^2 / 2\pi$ – параметр Кляйна-Кука, $F_z = f_z V / f_0$ – нормированная пространственная частота, $\Delta\Theta = (\vartheta_0 - \vartheta_B) / \left| \vartheta_B^{(i)} \right|$ – нормированная расстройка от угла Брэгга, $\vartheta_B^{(i)} = -\lambda f_0 / 2nV$ – угол Брэгга при изотропной дифракции.

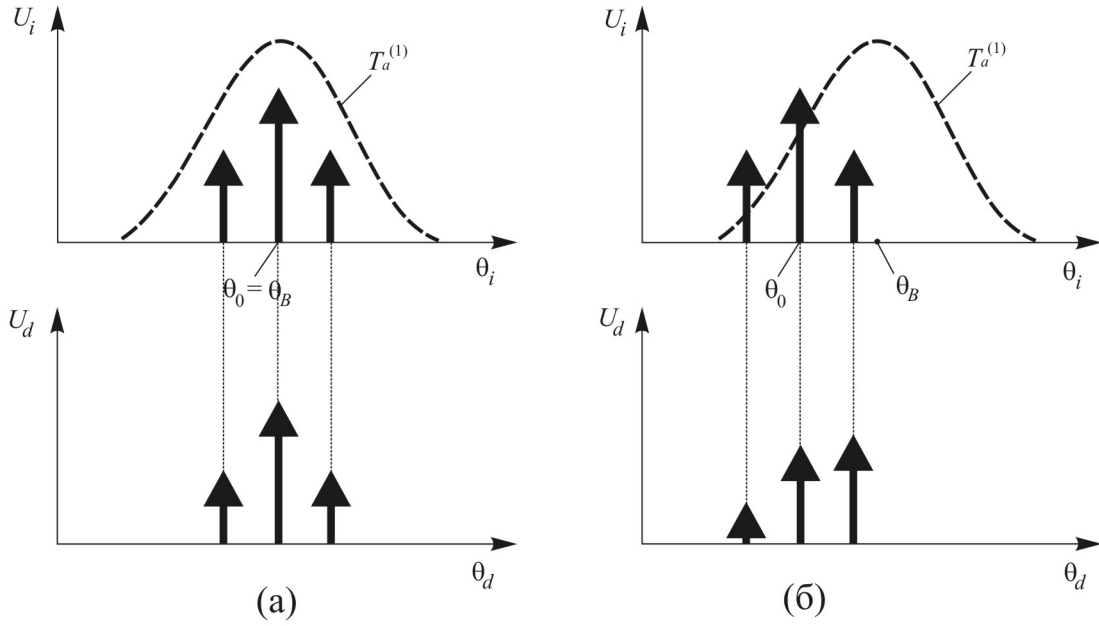


Рис. 6. Падающий (U_i) и дифрагированный (U_d) спектры при различных углах падения θ_0 .

- (а) - рабочая точка приходится на максимум передаточной функции: $\theta_0 = \theta_B$.
(б) - рабочая точка приходится на левый склон передаточной функции: $\theta_0 < \theta_B$.

Контраст существенно зависит от геометрии АО взаимодействия. При падении света под углом Брэгга расстройка $\Delta\Theta = 0$. Поэтому $\mu^{(1)} \equiv 0$ и визуализация отсутствует. Объясняется это тем, что боковые составляющие спектра поля (9) располагаются симметрично относительно максимума передаточной функции T_a . Они в одинаковой степени ослабляются в процессе дифракции, что приводит лишь к уменьшению глубины фазовой модуляции в дифрагированной волне (рис. 6а). Визуализация происходит, когда рабочая точка, задаваемая углом падения ϑ_0 , выбирается на склоне передаточной функции. В этом случае симметрично расположенные спектральные составляющие дифрагируют с разной эффективностью, благодаря чему и возникает эффект визуализации (рис. 6б). Нетрудно заметить, что АО метод визуализации фазовых объектов имеет прямую аналогию с

радиофизическим методом детектирования частотно-модулированных сигналов при помощи колебательного контура. Там также рабочая точка выбирается на склоне резонансной кривой контура.

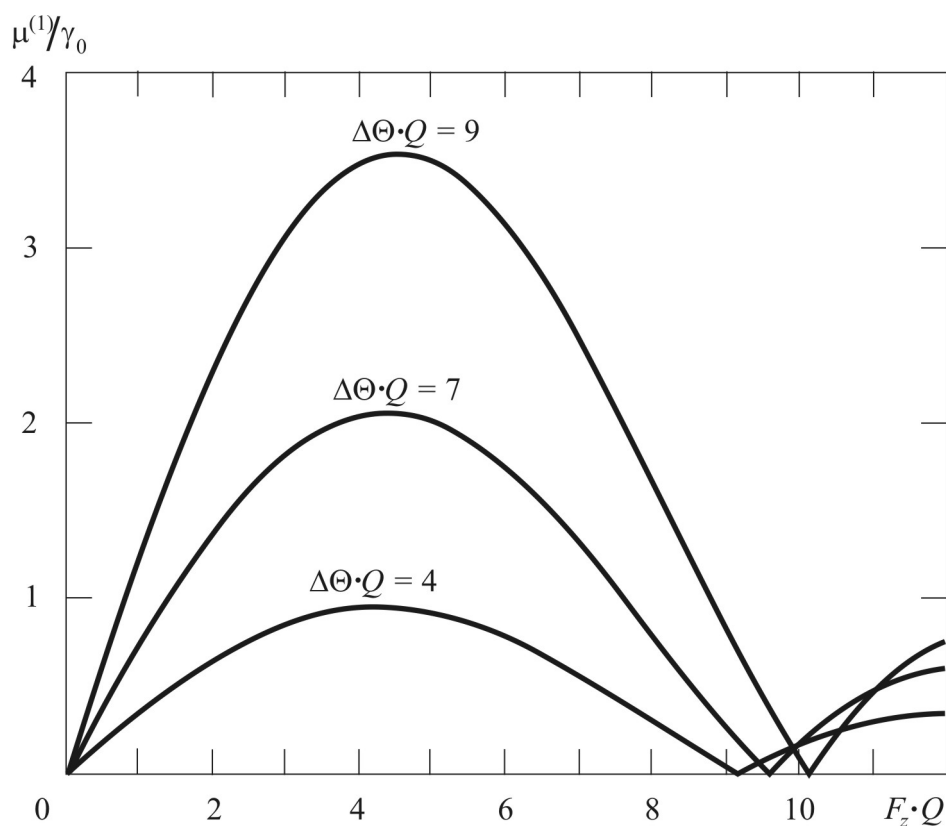


Рис. 7. Частотно-контрастные характеристики

Полоса визуализируемых частот определяется шириной главного максимума функции $T_a^{(1)}(\Theta_i)$, т.е. в конечном итоге - расходимостью акустического пучка. Таким образом, при увеличении длины АО взаимодействия или частоты ультразвука контраст возрастает, но при этом пропорционально уменьшается полоса визуализируемых пространственных частот. На рис. 7 представлены частотно-контрастные характеристики АО визуализации, рассчитанные для разных положений рабочей точки $\Delta\Theta$. Из графиков следует, что АО ячейка плохо визуализирует как низкие, так и высокие пространственные частоты: низкие - из-за малых вариаций угла Θ_i вдоль волнового фронта, а высокие - вследствие конечной ширины углового диапазона ячейки. Максимум частотно-контрастной характеристики располагается вблизи частоты $F_{z0} = 4.5/Q$, т.е. при $f_{z0} = 0.7 nV / \lambda l f_0$. Как пример, для параметров АО ячейки, использовавшейся в эксперименте: $l = 0.98$ см, $f_0 = 50$ МГц, $n = 2.26$, $V = 0.632 \cdot 10^5$ см/с, $\lambda = 0.6328$ мкм, получаем $f_{z0} = 32$ лин/мм.

На начальном участке характеристики контраст увеличивается пропорционально пространственной частоте. Линейная зависимость $\mu^{(1)}$ от f_z характерна для систем дифференцирующих изображение. Это приводит к тому, что в визуализированном изображении оказываются подчеркнуты мелкие детали, границы объектов.

Двумерный фазовый объект

Для иллюстрации потенциальных возможностей АО визуализации фазовых объектов было проведено компьютерное моделирование, в котором учитывались все этапы преобразования оптического сигнала в процессе визуализации [21]. При этом на первом этапе с помощью быстрого преобразования Фурье находился пространственный спектр $U_{in}(\theta_i, \lambda)$ исходного светового поля $u_{in}(x, y)$. Затем для заданной геометрии АО взаимодействия рассчитывалась передаточная функция $T_a(\theta_i, \lambda)$, которая умножалась на спектр входного сигнала $U_{in}(\theta_i, \lambda)$. После этого с помощью обратного преобразования Фурье от функции $U_{in}T_a$ находилось распределение амплитуды света в дифрагированном пучке $u_{out}(x, y)$.

Квазиколлинеарная геометрия АО взаимодействия дает возможность визуализировать фазовый градиент избирательно по различным направлениям. В этом случае моделирования предполагалось, что фазовый объект представляет собой однородную прозрачную пластинку, на которой концентрически расположены плоские кольцо и диск, сделанные из того же материала. Толщины кольца и диска предполагались такими, что скачок фазы $\Delta\gamma$ в световом поле представлял 1 радиан. Передаточная функция, использовавшаяся для визуализации, представлена на рис. 8а. Как было показано выше, при АО визуализации фазового градиента рабочая точка должна быть выбрана на склоне передаточной функции. Рис. 8б,в показывают визуализированные изображения объекта для разных положений рабочих точек, которые указаны точками 1 и 2 на рис. 8а. В первом случае рабочая точка расположена так, чтобы визуализировать фазовый градиент в направлении горизонтальной оси, а во втором – вертикальной. Благодаря особенностям АО визуализации, на выходе получается псевдообъемное изображение волнового фронта, словно подсвеченное слева в случае рис. 8б и снизу – в случае рис. 8в.

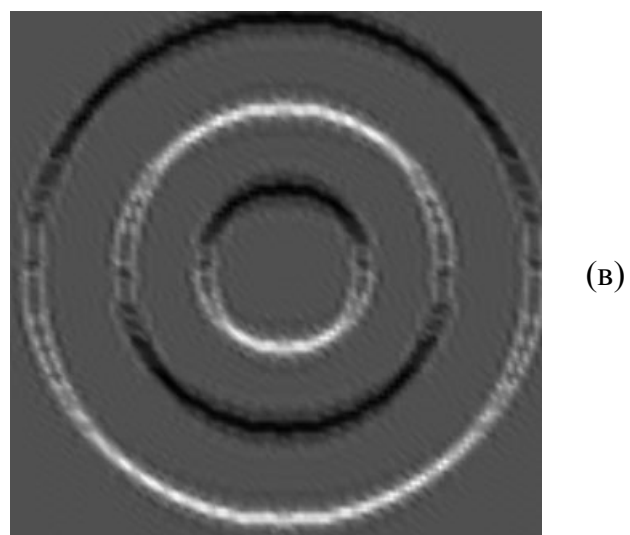
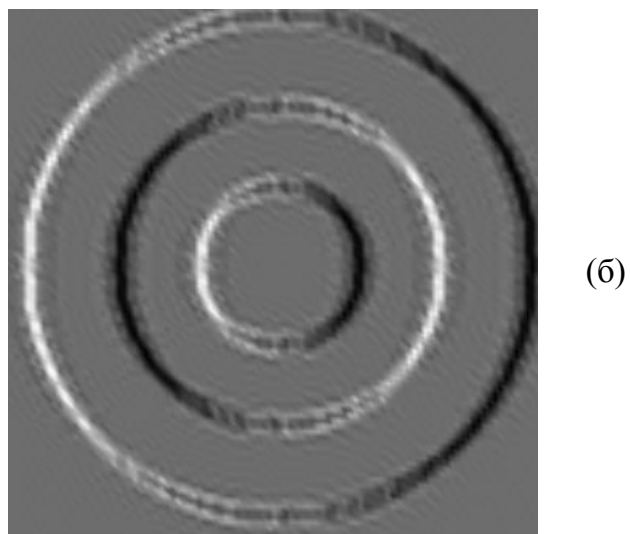
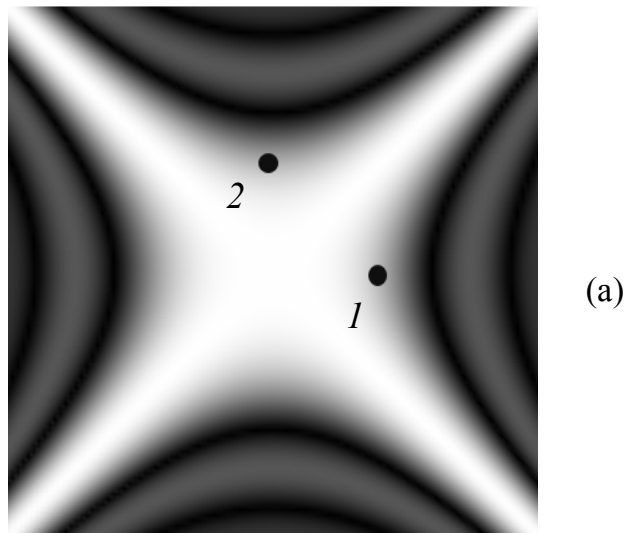
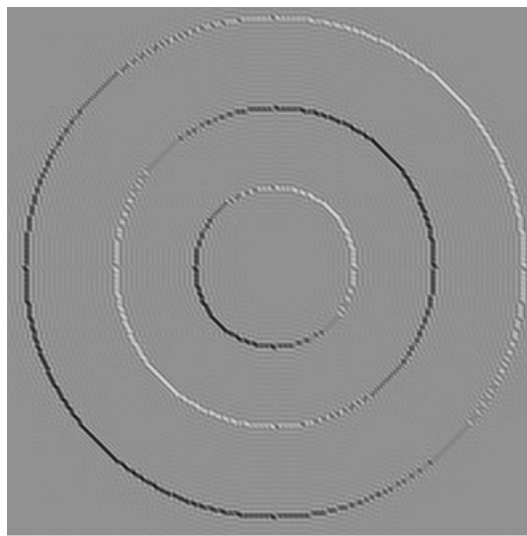
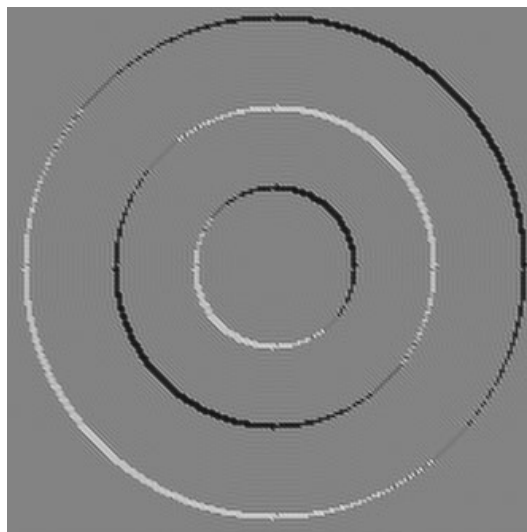


Рис. 8. АО визуализация фазового объекта с использованием передаточной функции квазилинейной геометрии.
(а) - передаточная функция; (б),(в) - выходные изображения

(a)



(б)



(в)

Рис. 9. АО визуализация фазового объекта с использованием передаточной функции тангенциальной геометрии.
(а) - передаточная функция; (б), (в) - выходные изображения

На рис. 9 представлены результаты моделирования визуализации в первом порядке тангенциальной геометрии АО взаимодействия. Моделирование выполнено для такого же объекта, что и в предыдущем случае. Для визуализации использовался передаточная функция, показанная на рис. 9а. Рис. 9б,в демонстрируют визуализированные изображения объекта для разных положений рабочих точек, показанных цифрами 1 и 2 на рис. 9а. В обоих случаях рабочие точки расположены на склоне передаточной функции так, чтобы визуализировать фазовый градиент в направлении под углом 45° к осям y и z . Благодаря особенностям АО визуализации, получается псевдообъемное изображение волнового фронта, словно подсвеченное сверху и справа – в случае рис. 9б и слева и снизу в случае рис. 9в. Так происходит потому, что при смещении рабочей точки с одного склона на другой имеет место инверсия контраста из-за изменения знака γ' .

Заключение

В курсовой работе рассмотрены различные методы визуализации фазовых объектов или, другими словами, оптического волнового фронта. Основное внимание уделено АО методу визуализации. Эффект визуализации в этом случае возникает, когда свет падает на ячейку под углом, отличающимся от угла Брэгга, а оптимальным является угол падения, соответствующий участку с наибольшей крутизной склона передаточной функции АО ячейки. Главные особенности АО визуализации заключаются в следующем:

- непосредственно визуализируется не фаза светового поля, а ее градиент в направлении распространения ультразвука;
- контраст визуализированного изображения пропорционален глубине фазового рельефа исходного изображения;
- разрешение и контраст определяются расходимостью акустического пучка: при увеличении частоты ультразвука или длины АО взаимодействия контраст возрастает, но разрешение падает.

Для визуализации фазовых объектов рассмотренным методом могут применяться любые объемные дифракционные решетки, в том числе и статические, созданные, например, голографическим методом. Однако наибольший интерес представляет именно АО вариант метода, поскольку в этом случае имеется возможность быстрого электрического управления характеристиками визуализированного изображения путем изменения параметров акустической волны и проведение измерений, таким образом, в режиме реального времени.

Список литературы

1. Гудмен Дж. *Введение в фурье-оптику*. - М.: Мир, 1970.
2. *Оптическая обработка информации*. / Под ред. Д. Кейсесента - М.: Мир, 1980.
3. Парыгин В.Н., Балакший В.И. *Оптическая обработка информации*. - М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1987.
4. Балакший В.И. Применение акустооптического взаимодействия для пространственной фильтрации оптических сигналов. // *Труды сем. "Методы и средства обработки оптической информации"*, М., 1983, с.139-144.
5. Балакший В.И. Акустооптическая ячейка как фильтр пространственных частот. // *Радиотехн. и электрон.*, 1984, т.29, №8, с.1610-1616.
6. Xia J., Dunn D., Poon T.-C., Banerjee P.P. Image edge enhancement by Bragg diffraction. // *Opt. Commun.*, 1996, v.128, №1, pp.1-7.
7. Banerjee P.P., Cao D., Poon T.-C. Basic image processing operations by use of acousto-optics. // *Appl. Opt.*, 1997, v.36, pp.3086-3089.
8. Балакший В.И., Парыгин В.Н., Упасена Х.А. О возможности регистрации фазовой структуры светового поля акустооптическим методом. // *Квант. электрон.*, 1981, т.8, №4, с.865-872.
9. Балакший В.И., Кукушкин А.Г., Торговкин М.Ю. Регистрация фазовой структуры светового поля с использованием селективных свойств анизотропной брэгговской дифракции. // *Радиотехн. и электрон.*, 1987, т.32, №4, с.724-731.
10. Балакший В.И., Кукушкин А.Г. Визуализация фазовых объектов при брэгговской дифракции света. // *Опт. и спектр.*, 1988, т.64, №1, с.99-103.
11. Balakshy V.I. Application of acoustooptic interaction for holographic conversion of light fields. // *Optics & Laser Techn.*, 1996, v.28, №2, pp.109-117.
12. Voloshinov V.B., Babkina T.M. A new method of acousto-optic image processing and edge enhancement. // *Pure and applied optics.*, 2001, v.3, №4, pp.S54-S61.
13. Balakshy V.I., Voloshinov V.B., Kostyuk D.E., Babkina T.M. Optical image processing by means of acousto-optic spatial filtration. // *J. Modern Optics*, 2004, v.52, №1, pp.1-20.
14. Балакший В.И., Костюк Д.Е. Пространственная структура акустооптического фазового синхронизма в одноосных кристаллах. // *Оптика и спектроскопия*, 2006, т.101, №2, с.283-289.
15. Балакший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. *Физические основы акустооптики*. - М.: Радио и связь, 1985.
16. *Адаптивная оптика*. / Под ред. Э.А. Витриченко. – М.: Мир, 1980.

17. **Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И.** *Принципы адаптивной оптики.* – М.: Наука, 1985.
18. **Сороко Л.М.** *Гильберт-оптика.* - М.: Наука, 1981.
19. **Балакший В.И., Костюк Д.Е.** Применение тангенциальной геометрии акустооптического взаимодействия для визуализации фазовых объектов. // *Оптика и спектроскопия*, 2008, т.104, №4, с.680-686.
20. **Balakshy V.I., Kostyuk D.E.** Application of Bragg acousto-optic interaction for optical wavefront visualization. // *Proc. SPIE*, 2005, v.5953, pp.136-147.
21. **Balakshy V.I., Kostyuk D.E.** Acousto-optic image processing. // *Appl. Opt.*, 2009, v.48, №7, pp.C24-C32.