

Краткие сообщения

07;08;12

Двухкоординатное рассеивание оптического пучка акустооптическим раман-натовским модулятором на основе кристалла парателлуриита

© С.Н. Антонов

Институт радиотехники и электроники РАН,
141190 Фрязино, Московская область, Россия
e-mail: olga-ant@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 18 февраля 2004 г.)

Исследуются особенности акустооптической раман-натовской дифракции в кристалле парателлуриита в условиях стоячей акустической волны. Звукопровод выполнен в виде отполированного куба и является высокодобротным акустическим резонатором. Медленная сдвиговая волна возбуждается единственным пьезопреобразователем. Многократное отражение звука без потерь акустической энергии приводит к двухкоординатному рассеянию света. При интенсивности вводимого в кристалл звука порядка 2 W/cm^2 с частотой 7 МГц возникает дифракционная картина в виде однородного светового пятна с телесным углом около 0.5 sr . Дается интерпретация наблюдаемым особенностям АО взаимодействия. Показано, что данный тип дифракции может быть использован для создания акустооптического двухкоординатного рассеивателя светового пучка.

Подавляющее большинство акустооптических (АО) приборов реализуют брэгговский режим АО дифракции, при котором возникает единственный дифракционный порядок, и достаточно мало находится применений раман-натовскому режиму, характеризующемуся появлением нескольких дифракционных порядков [1]. Настоящая работа посвящена экспериментально обнаруженной возможности использования режима раман-натовской дифракции для создания АО рассеивателей (diffusers) оптического излучения.

Эксперименты проводились на АО ячейке из монокристалла парателлуриита (TeO_2) при дифракции света на медленной сдвиговой акустической волне. Этот кристалл является рекордсменом по широте практической применимости среди многообразия известных АО материалов, что связано как с феноменально большой величиной АО качества, так и с хорошими оптическими, акустическими и технологическими свойствами. Эффективность данного типа АО дифракции такова, что на длинах взаимодействия порядка сантиметра при мощностях звука несколько десятков милливольт индекс фазовой модуляции света может составлять 2π , или, иными словами, приближаться к 100% эффективности. Экспериментальная установка показана на рис. 1. Здесь излучение одномодового полупроводникового лазера 1 (с длиной волны $0.65 \mu\text{m}$ и апертурой луча 0.7 mm) проходило через АО модулятор 2 с пьезопреобразователем 3. Распределение светового поля за модулятором наблюдалось в фокальной плоскости линзы 4 на экране 5. В экспериментах использовался монокристалл TeO_2 , изготовленный в виде куба с размерами граней 12 mm . Все поверхности кристалла были ориентированы относительно кристаллографических направлений $[110]$, $[1\bar{1}0]$ и $[001]$ с

точностью не хуже $5''$ и имели оптическую полировку. Пьезопреобразователь размером $7 \times 7 \text{ mm}$ находился в акустическом контакте с гранью $(1\bar{1}0)$. Таким образом, медленная сдвиговая волна с частотой вблизи 7 МГц первоначально возбуждалась вдоль направления $[1\bar{1}0]$, а вектор сдвига был параллелен направлению $[110]$. Во всех экспериментах свет распространялся вдоль оси $[001]$. Как было указано, изготовленный образец TeO_2 имел высокую степень параллельности всех граней и являлся высокодобротным акустическим резонатором. Межмодовое расстояние резонатора $\Delta f = v/2L$, где v — скорость звука ($0.617 \cdot 10^6 \text{ mm/s}$), L — расстояние между гранями (12 mm), в нашем случае $\Delta f \approx 26 \text{ kHz}$. Добротность данного акустического резонатора была порядка $Q \sim 20$. Тем самым интенсивность дифракционной картины достигает максимумов на резонансных частотах кратных Δf .

На рис. 2 приведена дифракционная картина, наблюдаемая на экране в условиях указанного резонанса при трех различных мощностях сигнала, подводимого к пьезопреобразователю: 0.1 (a), 0.5 (b), 0.8 W (c). Видно, что

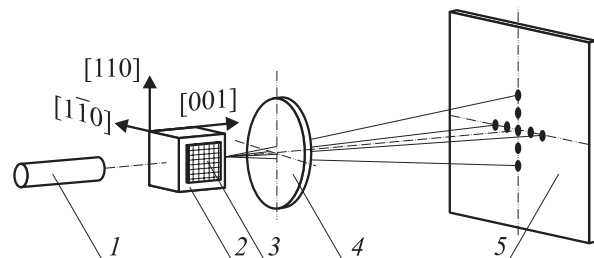


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

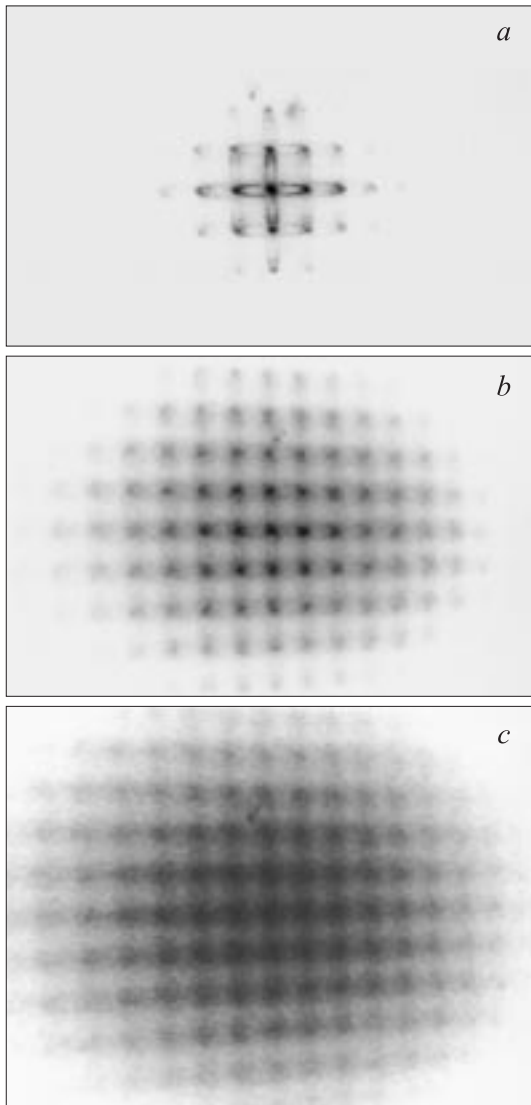


Рис. 2. Дифракционное поле в условиях лазерной засветки АО модулятора.

во всех случаях дифракционное поле является двухкоординатным, т. е. возникают дифракционные порядки как в плоскости, параллельной направлению распространения первоначально возбуждаемой акустической волны, так и в ортогональной плоскости. Угловое расстояние между дифракционными порядками (в каждой плоскости) равно $\Delta\alpha = 0.42^\circ$. Повышение мощности акустической волны приводит к увеличению количества дифракционных максимумов и к увеличению углового размера самих максимумов — к их „размытию“. Наиболее интересная и неожиданная ситуация возникает при увеличении этой мощности до 1.5 W (фотография не приведена), когда дифракционная картина превращается в одно однородное световое пятно без видимой внутренней структуры с телесным углом около 0.5 sr. Отметим, что в этом последнем случае интенсивность вводимого в кристалл звука составляла порядка 2 W/cm^2 , а интенсивность

стоячей в кристалле волны (по осям $[1\bar{1}0]$ и $[110]$) может быть оценена как $20\text{--}30 \text{ W/cm}^2$.

Для интерпретации наблюдаемой картины проведем следующие оценки. При небольших мощностях акустической волны (рис. 2, *a, b*) наблюдаемая картина (в ортогональных дифракционных плоскостях) хорошо соответствует раман-натовской дифракции. Действительно, из соотношений длин волн света и звука и размеров пьезопреобразователя получим, что безразмерный параметр Клейна–Кука равен $Q = 1.6$, что и позволяет отнести реализованный режим дифракции к раман-натовскому [1]. Появление двухкоординатной дифракционной картины связано со следующими особенностями распространения медленной акустической моды в кристалле TeO_2 . Первая — это небольшая величина коэффициента поглощения звука на данной частоте около 0.01 dB/cm [2]. Следовательно, звуковая волна испытывает значительное количество переотражений без снижения мощности. Вторая — это наличие значительной акустической анизотропии [3], приводящей к тому, что поток энергии расходится под углом $\Delta\theta$, значительно превышающим начальную дифракционную расходимость ($\Delta\theta = 50\lambda/d$, где λ — длина волны звука, d — апертура преобразователя по направлению $[110]$). В условиях эксперимента $\Delta\theta \approx 34^\circ$. Таким образом, уже при нескольких отражениях появляются акустические волны, распространяющиеся под углом 90° к первоначальному направлению. При этом только направления $[1\bar{1}0]$ и $[110]$ являются „резонансными“ и интенсивность звука по ним возрастает на величину акустической добротности — возникают две устойчивые ортогональные стоячие моды высокой интенсивности. Третья — это то, что акустические и АО свойства кристалла эквивалентны для этих двух ортогональных кристаллографических направлений. Причина „размытия“ дифракционных порядков связана с тем, каждый порядок испытывает многократное взаимодействие с набором волновых векторов звука с несколькими отличающимися скоростями.

Обсудим практическую значимость обнаруженного режима АО дифракции. В оптической технике используются рассеиватели (diffusers) на основе матовых либо голографических пластин [4]. С помощью этих пластин уширяется угловая диаграмма света и устраняется структура в изображении источника света. Такие пластины широко используются в проекционных устройствах, когда изображение нити накаливания необходимо преобразовать в однородное световое пятно. Кроме того, подобные методы используются для устранения спеклов в излучении на выходе волоконных световодов. Понятно, что каждый экземпляр пластины изготавливается на заданные параметры — определенный угол индикатрисы рассеяния.

Рис. 3 демонстрирует использование раман-натовского АО рассеивателя для устранения структуры в изображении нити накаливания проекционной лампы. Модель

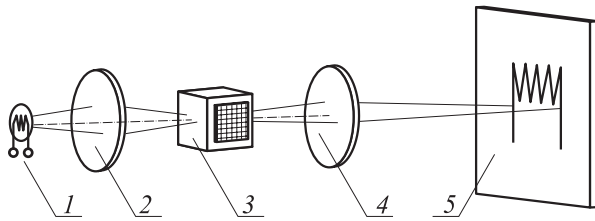


Рис. 3. Модель проектора.

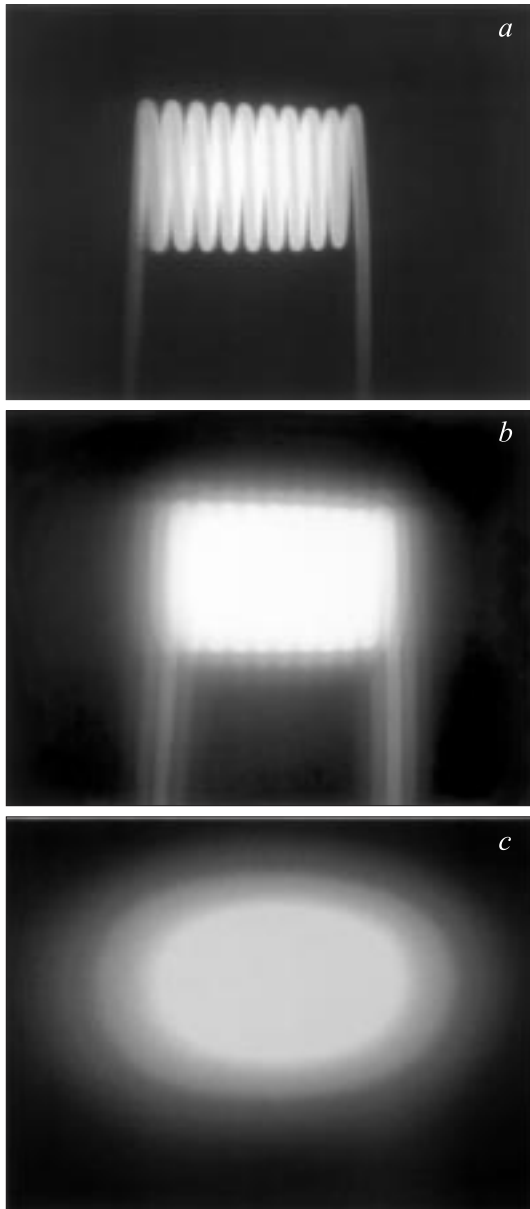


Рис. 4. Изображение нити накаливания.

нала, подводимого к пьезопреобразователю: *a* — на АО модулятор сигнал не подается, *b* — мощность равна 0.3, *c* — 1.5 W. Хорошо видно, что увеличение мощности звука в модуляторе приводит к пропорциональному „размытию“ изображения.

Таким образом, обнаруженный и исследованный режим АО дифракции позволяет создавать рассеиватели световых пучков, принципиальное отличие которых от известных заключается в возможности регулировки величины угла рассеивания. Это может быть полезным при подборе оптимальных параметров для различных типов изображений. Кроме того, появляется возможность быстропеременного управления величиной индикатрисы рассеяния. Скорость управления определяется скоростью звука, размерами кристалла и акустической добротностью. Время τ , за которое будет образовываться (либо спадать) стационарное дифракционное поле при включении управляющего сигнала, может быть оценено как $\tau \approx (L/v) \cdot Q$, в условиях эксперимента оно составило порядка 0.4 ms. Кроме того, голографическим рассеивателям присущи некоторые потери света (от 10 до 15%) и определенные ограничения на предельно допустимую интенсивность падающего света. Очевидно, что для АО модулятора в данном использовании оптические потери вообще отсутствуют, а лучевая стойкость кристалла TeO_2 очень высока.

Список литературы

- [1] Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. Акустооптические устройства и их применение. М., 1978. 112 с.
- [2] Антонов С.Н., Проклов В.В., Миргородский В.И. // Акуст. журн. 1982. Т. 28. Вып. 4. С. 433–437.
- [3] Семенов В.П. // ЖТФ. 1981. Т. 51. Вып. 10. С. 2090–2095.
- [4] Edmund Industrial Optics. 2000 Optics and Optical Instruments Catalog. N007A. 60 p.

проектора состоит из: лампы накаливания *I*, коллиматора 2, АО раман-натовского модулятора 3 (идентичного рис. 1), объектива 4 и экрана 5. Рис. 4 показывает изображение нити накаливания при различных мощностях сиг-