

Экспериментальная оценка структуры динамических дифракционных решёток в акустооптических приборах

* С.А. ТИТОВ¹, В.Э. ПОЖАР¹, В.А. ЛОМОНОВ²

¹ Научно-технологический центр уникального приборостроения (НТЦ УП) РАН, Москва

² ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва

* E-mail: titov.sa@ntcup.ru

Аннотация

Представлен метод исследования динамических дифракционных решёток, создаваемых в акустооптических устройствах. С помощью сканирующего акустического микроскопа, работающего на приём, исследованы одинаковые по форме акустооптические модуляторы из кварцевого стекла и кристаллического кварца. Выявлены эффекты размытия формы решётки и появления паразитных решёток, обусловленных переотражением волн. Показано, что в кварцевом стекле структура решёток демонстрирует хорошее соответствие теоретической форме, а в кристаллическом кварце проявляются отличия, связанные с анизотропией материала. Обсуждается связь структуры динамических дифракционных решёток с характеристиками акустооптических устройств.

Ключевые слова: акустооптическое взаимодействие, динамическая дифракционная решётка, характеристики акустооптических устройств.

Введение

Акустооптика – важная современная оптическая технология, используемая в модуляции, отклонении, спектральной и пространственной фильтрации электромагнитного излучения [1, 2]. Являясь компактными и монолитными, акустооптические (АО) устройства в настоящее время широко применяются в промышленных, биомедицинских и научных задачах.

В основе АО устройств лежит селективная дифракция световых пучков на динамической движущейся решётке, индуцируемой в фотоупругой среде при помощи ультразвуковых волн. Качество решётки определяется качеством возбуждённого акустического поля: кроме периодичности, которая обеспечивается автоматически в одно-

родной среде при одночастотном возбуждении, необходима однородность по длине, ширине и толщине решётки. Именно для такого случая применимы классические теории «брэгговской» дифракции, позволяющие определить характеристики дифрагированного на такой решётке света. Таким образом идеальную решётку могла бы возбудить только идеальная плоская акустическая волна.

Однако в связи с тем, что возбуждение акустической волны происходит с границы рабочей среды посредством пьезоизлучателя конечных размеров, создаваемое поле не является плоской волной. Как и при прохождении света через отверстие, возбуждаемая акустическая волна имеет расходимость, а в ограниченном объёме она к тому же испытывает отражение от стенок. Кроме того, в реальной среде имеет место поглощение, а в анизотропной среде – ещё и снос волны (распространение энергии под углом к направлению распространения волнового фронта).

В принципе, в конкретных кристаллических ячейках все эти эффекты численно рассчитываемы, а их влияние оцениваемо теоретически, но сложность таких расчётов велика, а точность таких оценок не слишком высока. Поэтому развитие методов и средств контроля структуры динамических дифракционных решёток, возбуждаемых в рабочих ячейках АО устройств, служит важной задачей для их использования в оптических излучателях и других приборах.

Существует несколько подходов к экспериментальному определению этой структуры. В качестве стандартного оптического метода визуализации акустических полей в однородных прозрачных средах, в том числе в АО кристаллах, принят шлирен-метод [1, 3, 4], обеспечивающий проекционное изображение, формируемое за счёт рассеяния света на акустиче-

ском столбе. В интерферометрическом [5, 6] и голографическом [7] методах пространственно-временное распределение зондирующего широкого лазерного луча регистрируется цифровой камерой. Акустическое поле также можно визуализировать с помощью сканирования лазерным лучом, наблюдая его отклонение [8, 9]. Для всех этих методов результат измерения определяется акустооптическим взаимодействием, усреднённым по всей траектории прохождения оптического пучка через звуковое поле. Поэтому на практике они применимы к простым звуковым полям с плоскими или симметричными волновыми фронтами. Однако в реальных АО устройствах распространяющиеся акустические волны обычно имеют сложное распределение.

Ранее была продемонстрирована эффективность применения метода на основе акустической микроскопии для визуализации акустического поля в АО устройствах [10]. Этот метод сходен с оптической конфокальной микроскопией, отличаясь только физической природой волн (акустические вместо световых) и, соответственно, технической реализацией. При этом акустический микроскоп использовался для определения амплитуд продольных и поперечных волн в центральном сечении АО модулятора из кварцевого стекла: там, где поле обычно близко к идеальному. Данная работа посвящена развитию этого метода в плане регистрации двумерного распределения поля и демонстрации его применения как к изотропной среде (кварцевое стекло), так и к анизотропному материалу (кристаллический кварц).

Методы и объекты

Объектами применения методических разработок были АО ячейки, в которых происходит дифракция (трансформация) света на акустическом поле (рис. 1). Они изготавливались из оптического кварцевого стекла и кристаллического кварца (SiO_2) в виде прямой призмы и имели одинаковую форму и размеры. Протяжённость нижней грани призмы составляла 44,6 мм, толщина призмы – 12 мм, а длина левой боковой грани $L_0 = 28,3$ мм. Во избежание образования стоячих акустических волн верхняя и нижняя плоскости составля-

ли клин с углом $\alpha = 6,5^\circ$. Для генерации продольных акустических волн на нижней плоскости располагался ультразвуковой пьезоизлучатель, состоящий из двух прямоугольных секций $17,5 \times 3,5$ мм, разделённых зазором в 4 мм. Поглотитель, наносимый на верхнюю грань для предотвращения отражения волн в АО ячейках, в ходе исследований отсутствовал. Боковые грани служили для ввода монохроматического светового пучка и вывода модулированного по амплитуде излучения.

Регистрация двумерного распределения амплитуды решёток и ультразвукового поля в верхней плоскости (x, y) осуществлялась с помощью акустического микроскопа следующим образом (рис. 1). Обе секции пьезоизлучателя возбуждались последовательностью коротких электрических импульсов длительностью 10 нс с амплитудой 15 В, вырабатываемой генератором. Такое ударное возбуждение пьезоизлучателя приводило к генерации короткого импульса волнового пакета длительностью около 50 нс, что примерно соответствует двум периодам свободных колебаний пьезопластины излучателя на её резонансной частоте. Использование импульсного режима работы позволяло выделять в принимаемом сигнале отклик, соответствующий однократному прохождению импульса, на фоне многократных переотражений внутри ячейки.

Ультразвуковые импульсы, генерируемые двумя секциями пьезоизлучателя, частично отражались от верхней грани, а частично проходили в иммерсионную жидкость (воду), где регистрировались сфокусированным ультразвуковым приёмником (рис. 1), который представлял собой акустическую линзу 3, выполненную в виде сферического углубления в стержне из кварцевого стекла, к противоположному торцу которой прикреплена регистрирующая пьезопластина. Апертурный угол приёмника θ_m и его фокусное расстояние составляли 40° и 3,4 мм. При измерениях фокус F перемещался по поверхности АО ячейки. При такой широкой угловой апертуре пространственное разрешение устройства ультразвуковой визуализации сопоставимо с характерной длиной волны ультразвука в иммерсионной среде [11], что для рабочей частоты

Рис. 1. Схема измерений структуры динамических дифракционных решёток: виды сбоку (а) и с торца (б): 1 – светозвуковод АО модулятора; 2 – двухсекционный пьезоизлучатель; 3 – акустическая линза; 4 – пьезоприёмник; 5 – генератор импульсов; 6 – усилитель; 7 – аналого-цифровой преобразователь; 8 – компьютер; 9 – устройство перемещения; X, Y – кристаллографические оси кристалла кварца, α – угол клина АО ячейки

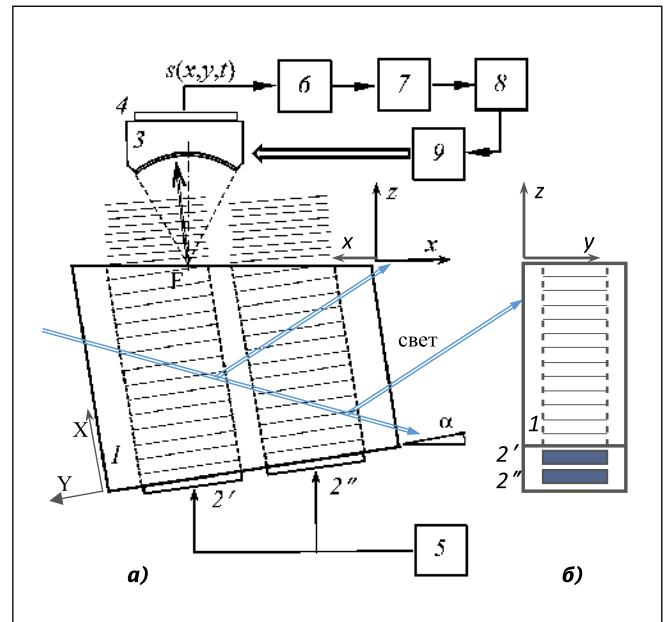


Рис. 2. Пространственно-временные сигналы вдоль центральной оси излучателя $s(x, y_0, t)$: кварцевое стекло, $y_0 = 6,5$ мм (а); кварц, $y_0 = 6$ мм (б)

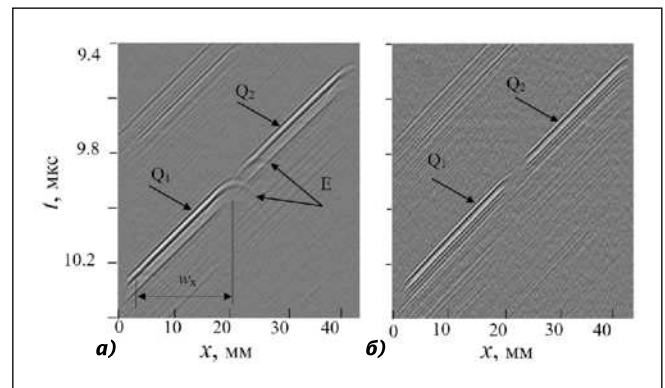
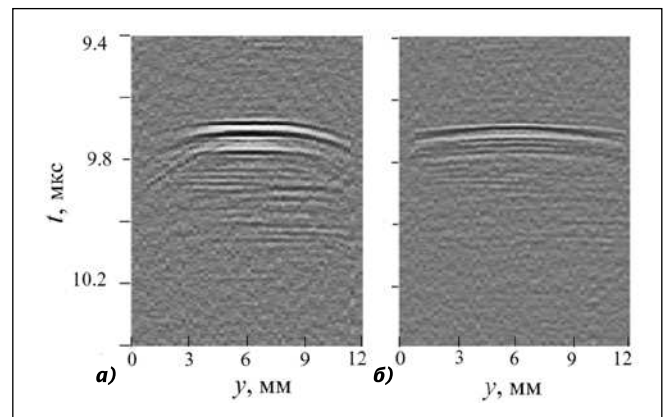


Рис. 3. Пространственно-временные сигналы в поперечном сечении излучателя $s(x_0, y, t)$: кварцевое стекло (а), кварц (б), $x_0 = 32$ мм



50 МГц даёт оценку 30 мкм. Принимаемые преобразователем сигналы обрабатывались усилителем с регулируемым коэффициентом усиления (0–40 дБ) и поступали на аналого-цифровой преобразователь с частотой преобразования 500 МГц и разрешением 12 бит (субмодуль FM412×500M, ЗАО «Инструментальные системы»), сохраняясь в компьютере для каждого положения приёмника. Для записи простран-

ственного распределения поля (амплитуды решётки) осуществлялось механическое перемещение сфокусированного преобразователя в плоскости (x, y) с помощью двухкоординатного сканера, построенного на базе моторизованного транслятора. Полученные пространственно-временные сигналы $s(x, y, t)$ сохранялись в компьютере и обрабатывались для представления данных в разных форматах и анализа.

Рис. 4. Структура дифракционной решётки в АО ячейках из кварцевого стекла (а) и кварца (б). Амплитуда (контраст) решётки отображена уровнем яркости. Пунктиром показаны границы электродов, а штрих-пунктиром – направления, вдоль которых представлены распределения на рис. 2 и 3

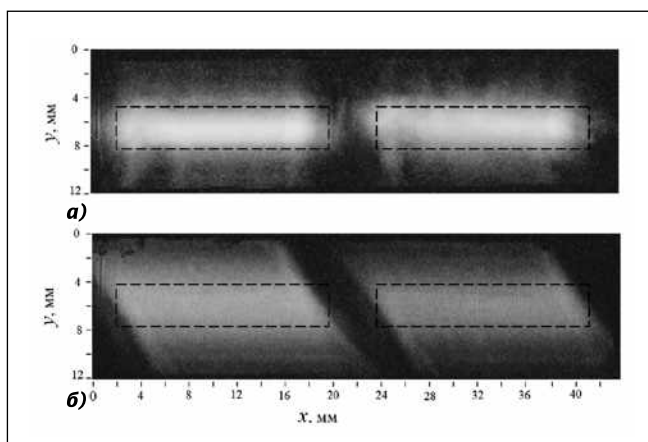


Рис. 5. Структура паразитной дифракционной решётки в АО ячейке из кварцевого стекла, образованная трёхкратно прошедшей волной

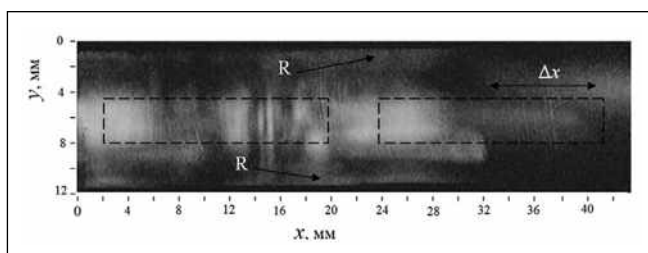
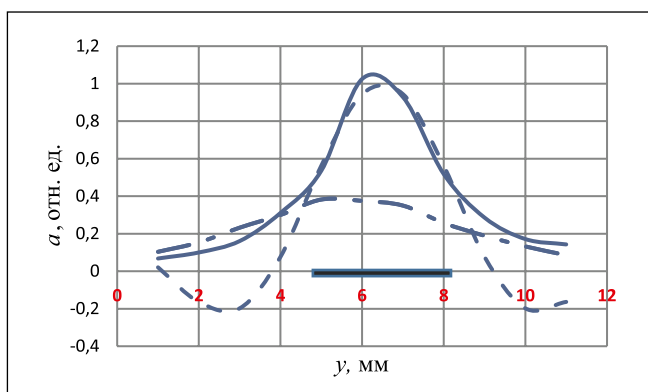


Рис. 6. Распределение амплитуды решётки в поперечном направлении $a(y)$: эксперимент (сплошная кривая) и расчёт (пунктирная) для кварцевого стекла; эксперимент (штрих-пунктирная) для кварца



Результаты

По результатам измерений сигналов, регистрируемых акустическим микроскопом в каждой точке верхней грани, проводилась оценка пространственной структуры решётки. Основной задачей была проверка однородности решётки и размытия её границ.

Для использования в качестве основы определялась амплитуда решётки вдоль центральной оси пьезоизлучателей $y = y_0$ (рис. 2). Упомянутые знакопеременные сигналы $s(x, y_0, t)$ отображаются на диаграммах градициями серого, причём основной фон соответствует нулевому уровню сигнала, светлые и тёмные области – положительным и отрицательным значениям, а контраст пропорционален амплитуде волны. Вследствие клиновидной формы АО ячейки в разные точки импульс приходит неодновременно, что выра-

жается в линейном наклоне регистрируемых сигналов. Двум секциям преобразователя соответствуют две составляющие сигнала – Q_1, Q_2 , которые выглядят идентично для кристаллического кварца и кварцевого стекла. Сигналы за пределами отрезков (E) связаны с краевыми эффектами и не несут информации о решётке.

Аналогично определялось поперечное распределение амплитуды решётки в центральном сечении правой секции излучателя $x = x_0$ (рис. 3). Видно, что фронт ультразвуковой волны оказывается искривлённым, причём степени кривизны для кварцевого стекла и кристаллического кварца заметно различаются.

Сканирование фокуса микроскопа по всей верхней грани позволяет построить двумерное распределение амплитуды волн $a(x, y)$, а соответственно, и контраста решётки (рис. 4).

Амплитуда представлена также градициями серого цвета, причём нулевому значению соответствует чёрный цвет. Видно, что распределения амплитуды заметно различаются в кристаллическом и кварцевом стекле: в первом оно вследствие анизотропии имеет форму параллелограмма (рис. 4, б).

Используемый метод визуализации динамической дифракционной решётки в АО устройствах подходит и для выявления волн, испытавших многократные отражения внутри кристалла, которые создают «паразитные» решётки для света. Даже при нанесённом поглотителе имеет место частичное отражение волн, а потому структура отражённых волн представляет интерес. В качестве примера на рис. 5 приведён результат измерения амплитуды продольной волны, трижды прошедшей через АО ячейку из кварцевого стекла, которая легко отделяется от основной по времени прихода. Структура создаваемой ею паразитной решётки оказалась более неоднородной, а её «центр тяжести» расположен левее вследствие смещения волны при преотражении в клиновидной ячейке. Оценка величины смещения Δx составляет $2 L_0 \operatorname{tg}(2\alpha) \approx 7$ мм, что согласуется с экспериментальными наблюдениями.

Другая особенность паразитной решётки – более высокая яркость участков вблизи краёв АО ячейки (R). Их появление объяснимо расплыванием решётки в поперечном направлении и отражением волн от боковых граней.

Обсуждение

Для анализа полученных экспериментальных данных необходимо сравнить их с результатами теоретического расчёта. Характер поля, создаваемого поршневым прямоугольным преобразователем на расстоянии X , определяется параметром Френеля [14], зависящим от соотношения его размера w и характерной длины волны λ : $N = 4\lambda X / (w^2)$. Распределение вдоль оси x определяется длиной большей стороны пьезоизлучателя $w_x = 17,5$ мм, что при $\lambda = 0,1$ мм и даёт на расстоянии $X = 26$ мм значение параметра $N_x \approx 0,035 \ll 1$, соответствующую ближней зоне излучателя. Соответственно, в этой зоне решётка примерно однородна по сечению. В поперечном направлении

при размере пьезоизлучателя $w_y = 3,5$ мм значение параметра Френеля $N_y \approx 1$ соответствует переходной зоне, в которой решётка уже начинает расплываться.

Оценочное расчётное значение амплитуды $a(y)$ для кварцевого стекла в сечении $x = 32$ мм приведено на рис. 6, откуда следует, что поле сконцентрировано в основном в центре, приблизительно в интервале $4,5 < y < 8$ (по уровню 10 дБ), т.е. в пределах излучателя. В этой же области наблюдается хорошее согласие между экспериментом и расчётом по форме распределения амплитуды $a(y)$. Расхождение в периферийной области объясняется тем, что расчёт проведён для гармонического случая, а эксперимент выполнялся в импульсном режиме. В кристаллическом кварце амплитуда $a(y)$ меняется более полого, чем в кварцевом стекле. Данный эффект свидетельствует о существенном влиянии акустической анизотропии материала на ультразвуковое поле в АО приборах.

Распределение на верхней грани характеризует и решётку в целом, которая внутри АО ячейки постепенно меняется от исходного (идеального) профиля на нижней грани, повторяющего форму двух секций пьезоизлучателя, к найденному слабо неоднородному расплывающемуся виду.

Заключение

Структура динамических дифракционных решёток, создаваемых в АО устройствах, может контролироваться посредством сканирующей акустической микроскопии. Возникновение сопутствующих волн вследствие переотражения ведёт к появлению паразитных решёток, которые ухудшают параметры АО устройств. Например, для АО модуляторов лазерного излучения это приводит к увеличению времени выключения, размытию фронта переключения, а для АО дефлекторов и АО фильтров – к появлению в их аппаратных функциях угловых и спектральных, соответственно, паразитных максимумов; так что дефлектор, кроме отклонения лазерного луча в заданное направление, будет создавать посторонние лучи, а фильтр, кроме излучения на заданной длине волны, будет пропускать иные спектральные компоненты. Неоднородность решётки может приводить, с одной сторо-

ны, к уширению полосы АО фильтра, а с другой – к сглаживанию осцилляций функции пропускания по спектру.

Выявленные отклонения дифракционной решётки от идеальной формы необходимо учитывать при разработке приборов, анализе их работы и оценке характеристик. Полученные распределения могут использоваться как «образцовые» для контроля качества АО устройств на разных этапах их производства.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания FFNS-2022–0010.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Goutzoulis A.P., Rape D.R. Design and Fabrication of Acousto-Optic Devices. – Boca Raton, USA: CRC Press, 2004. – 520 p.
2. Xu J., Stroud R. Acousto-Optic Devices: Principles, Design, and Applications. – N.Y: Wiley, 1992. – 672 p.
3. Kudo N. Optical methods for visualization of ultrasound fields // Japanese Journal of Applied Physics. – 2015. – Vol. 54, No. 7S1. – Art.n. 07HA01.
4. Koponen E., Leskinen J., Tarvainen T., Pulkkinen A. Acoustic pressure field estimation methods for synthetic schlieren tomography // JASA. – 2019. – Vol. 145, No. 4. – P. 2470–2479.
5. Ishikawa K., Yatabe K., Oikawa Y. Physical-model-based reconstruction of axisymmetric three-dimensional sound field from optical interferometric measurement // Meas. Sci. Technol. – 2021. – Vol. 32, No. 4. – Art.n. 045202.
6. Bertling K., Perchoux J., Taimre T. et al. Imaging of acoustic fields using optical feedback interferometry // Opt. Express. – 2014. – Vol. 22, No. 24. – P. 30346–30356.
7. Rajput S. K., Matoba O., Takase Y. et al. Multimodal sound field imaging using digital holography // Appl. Opt. – 2021. – Vol. 60. – B49–B58.
8. Wu J., Xu Z., Li K., Lv G., Li X., Wang C. Analysis of Acoustic Near Field Characteristics in Acousto-Optic Modulator // IEEE Photonics Technology Lett. – 2021. – Vol. 33, No. 4. – P. 201–204.
9. Verburg S.A., Fernandez-Grande E. Acousto-Optical Volumetric Sensing of Acoustic Fields // Phys. Rev. Applied. – 2021. – Vol. 16. – Art.n. 044033.
10. Titov S.A., Machikhin A.S., Pozhar V.E. Evaluation of Acoustic Waves in Acousto-Optical Devices by Ultrasonic Imaging // Materials. – 2022. – Vol. 15, No. 5. – P. 1792.

11. Briggs G.A.D., Kolosov O.V. Acoustic microscopy / 2nd ed. – New York, USA: Oxford university press, 2010. – 387 p.

12. Oppenheim A.V., Schaffer R.W. Discrete-time Signal Processing / 3rd ed. – Upper Saddle River, N.J.; London: Pearson, 2010. – 1144 p.

13. Auld B.A. Acoustic fields and waves in solids. Vol. 2. – Malabar, FL, USA: Krieger Publ. Comp., 1990. – 432 p.

14. Kino G.S. Acoustic waves: devices, imaging and analog signal processing. – Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall Inc.: 1987. – 601 p.



Титов Сергей Александрович, кандидат техн. наук, доцент. Окончил в 1980 г. физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова. Старший научный сотрудник лабора-

тории наноградиентной оптики, магнитных материалов и структур НТЦ УП РАН. Область научных интересов: акустооптика, обработка сигналов, неразрушающий контроль



Пожар Витольд Эдуардович, доктор физ.-мат. наук. Окончил в 1981 г. МФТИ. Заведующий отделом акустооптических информационных систем НТЦ УП РАН. Профессор МГТУ им.

Н.Э. Баумана и НИЯУ «МИФИ». Область научных интересов: акустооптика, спектроскопия, адаптивная спектроскопия, гиперспектрометрия, дистанционное зондирование, спектральное приборостроение



Ломонов Владимир Алексеевич, кандидат хим. наук. Окончил в 1972 г. кафедру материалов квантовой электроники МХТИ им. Д.И. Менделеева. Ведущий научный сотрудник ФНИЦ

«Кристаллография и фотоника» РАН. Область научных интересов: выращивание кристаллов