

РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ
В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ И ПЛАЗМЕ

УДК 534:621.382,681.883

ИССЛЕДОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПОЛЯ
В АКУСТООПТИЧЕСКОМ КРИСТАЛЛЕ
АКУСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ¹

© 2022 г. С. А. Титов^а *, А. С. Мачихин^а, В. Э. Пожар^а, М. Ф. Булатов^а

^аНаучно-технологический центр уникального приборостроения РАН,
ул. Бутлерова, 15, Москва, 117342 Российская Федерация

*E-mail: sergetitov@mail.ru

Поступила в редакцию 14.05.2022 г.

После доработки 04.08.2022 г.

Принята к публикации 09.08.2022 г.

Представлены два метода оценки структуры акустического поля, создаваемого в рабочей среде акустооптического (АО) модулятора его ультразвуковым излучателем. В первом методе в качестве чувствительного инструмента используется акустический микроскоп, фокусируемый на торцевую грань кристалла, противоположную той, на которой расположен пьезопреобразователь. Второй метод основан на использовании самого излучателя в качестве приемного элемента коротких акустических импульсов. Методы протестированы на рабочих образцах серийных АО-модуляторов. В результате проведенных экспериментальных исследований выявлены особенности поля акустического излучателя, в частности, наличие переотраженных волн и различие амплитуд волн, возбуждаемых разными секциями излучателя. Показано, что исследованные методы могут эффективно использоваться для контроля структуры акустических полей в рабочей среде АО-устройств.

DOI: 10.31857/S0033849422120221

ВВЕДЕНИЕ

Акустооптические (АО) устройства широко используются в современной технике для управления световыми потоками [1, 2]. В основе их работы лежит дифракция света на ультразвуковой волне, образующей за счет упругооптического эффекта в рабочей среде динамическую дифракционную решетку в виде периодической вариации диэлектрической проницаемости. Характеристики АО-устройств напрямую зависят от свойств этой решетки, повторяющей структуру акустического поля в среде [1, 2], а потому контроль этой структуры является важной задачей.

В то время как в теоретических моделях, как правило, предполагается идеальная форма поля в виде плоской волны, в реальных АО-устройствах возбуждаемый акустический пучок подвержен расходимости, затуханию и отражению от границ ячейки [3]. В частности, любая отраженная волна образует дифракционную решетку, а происходящая на ней дифракция света носит характер паразитного процесса. Для оценки степени влияния всех этих факторов следует иметь средства опре-

деления реальной структуры акустических пучков в среде.

Для контроля акустического поля часто используют дифракцию пробного лазерного пучка в направлении, ортогональном акустическому столбу, со стороны боковых граней [4]. Это позволяет исследовать затухание и расходимость акустической волны, ее снос, а также неоднородность, связанную в том числе с размерами и формой акустического излучателя. Однако на практике эти боковые грани, как правило, недоступны для проведения такого исследования, поскольку это требует их специальной полировки и в рабочем состоянии они зачастую перекрыты конструктивными элементами АО-устройств, например, теплоотводом.

Иным подходом, использованным в данной работе, является исследование акустической волны, прошедшей через АО-ячейку, акустическими датчиками. В этом качестве был использован акустический микроскоп, приемный элемент которого может быть сфокусирован в произвольную точку среды, и эта точка фокусировки может перемещаться по пространству [5]. Этот способ требует наличия доступа к соответствующим граням АО-ячейки, а потому в случае исследования действующего АО-устройства требует дополнитель-

¹ Работа доложена на Пятой Международной молодежной конференции «Информационные технологии и технологии коммуникации: современные достижения» (Астрахань, 4–7 октября 2021 г.).

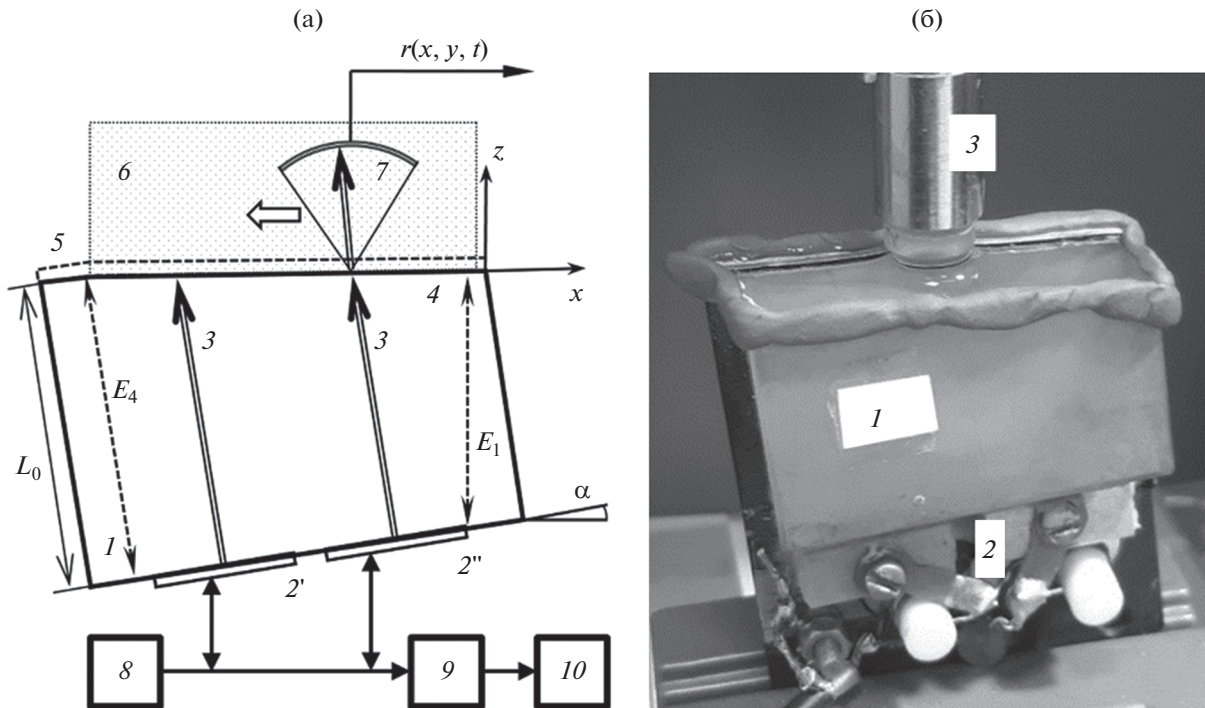


Рис. 1. Измерение акустического поля в АО-модуляторе: а – схема измерений; б – измерительная установка; 1 – рабочий кристалл, 2 – двухсекционный пьезопреобразователь АО-модулятора, 3 – направления акустических пучков; 4 – торцевая плоскость; 5 – поглотитель; 6 – иммерсионная жидкость; 7 – приемный элемент акустического микроскопа; 8 – ВЧ-генератор; 9 – ВЧ-приемник-усилитель; 10 – осциллограф.

ной подготовки, например, удаления защитного корпуса.

Другим способом анализа, при этом не требующим разборки действующего устройства, является эхо-импульсный метод [6], в котором акустический излучатель используется как в качестве источника ультразвука, так и в качестве его приемника.

В работе протестированы оба этих метода исследований акустического поля в рабочей среде АО-устройств и описаны возможные их применения.

1. МЕТОД АКУСТИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ

Этот метод предполагает поточечный анализ акустического поля на противоположной от излучателя грани рабочего кристалла. Принцип определения поля (рис. 1) заключается в последовательной регистрации распределения его амплитуды путем пошагового сканирования фокуса акустического микроскопа вдоль оси x . Для использования этого метода поглотитель был удален с исследуемой грани АО-устройства. Измерения осуществлялись в импульсном режиме и при этом ультразвуковой излучатель АО-устройства возбуждался электри-

ческим импульсом от генератора акустического микроскопа, что обеспечивало синхронизацию излучателя и приемника. Реализация этой схемы базируется на том, что рабочие полосы частот используемого приемного элемента акустического микроскопа и АО-излучателя в значительной степени перекрывались (50...100 МГц). В ходе измерений акустический импульс возбуждается на нижней грани, проходит по рабочей области кристалла, достигает верхнего торца кристалла ($z = 0$), частично проходит в иммерсионную жидкость и принимается приемником акустического микроскопа, имеющим форму участка сферы.

Сигнал микроскопа фактически является сверткой по пространственным (x, y) и временной (t) переменным поля $u(x, y, t)$ в иммерсионной среде в плоскости $z = 0$ с функцией импульсного отклика приемного акустического элемента $h(x, y, t)$. Параметры последней определяют поперечную разрешающую способность, которая для использованного в эксперименте приемного элемента составляла приблизительно 30 мкм. Диапазон углов, в пределах которого данный элемент может принимать плоские волны в иммерсионной жидкости, ограничен в пределах $\pm 30^\circ$ от нормали, что определяется конструкцией приемного ультразвукового преобразователя.

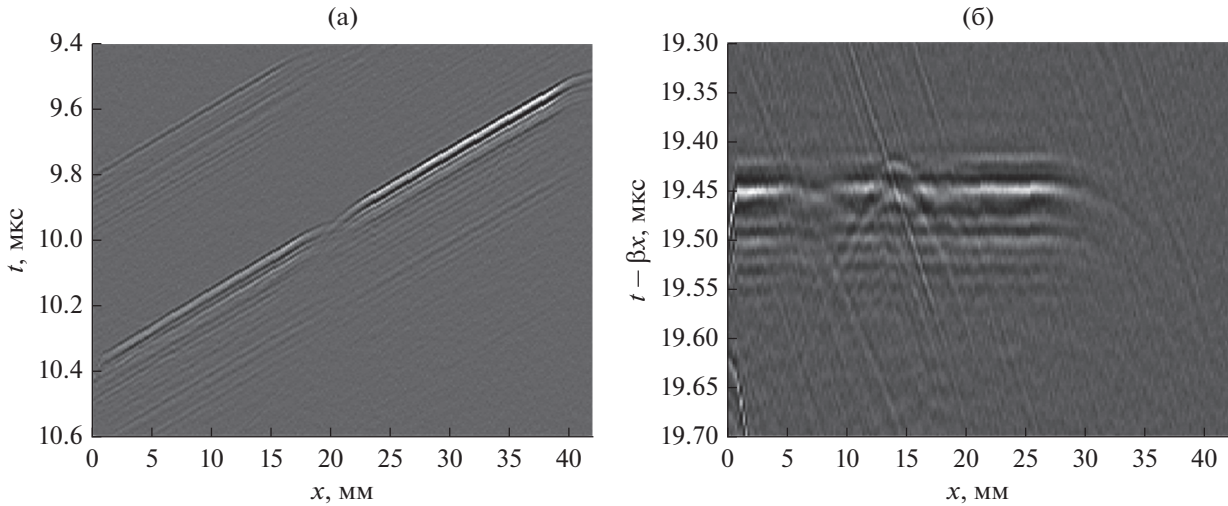


Рис. 2. Диаграммы сигналов, пришедших на торец кристалла ($z = 0$): а – однократный пробег, в координатах (x, t) ; б – трехкратный пробег, в координатах $(x, t - \beta x)$, $\beta = 0.06$ мкс/мм.

2. СТРУКТУРА ПРОШЕДШЕЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ

Исследование метода проводили с использованием серийно выпускавшегося АО-модулятора МЗ-305-1, который содержит АО-ячейку из оптического плавяного кварца, схема которой представлена на рис. 1а. Светозвукопровод I выполнен в виде прямой призмы, верхняя грань которой наклонена на угол $\alpha = 6.5^\circ$ по отношению к нижней и имеет небольшой (3 мм) скос (излом) на углу призмы, так что скошенный участок параллелен нижней грани. Поперечный и продольный размеры ячейки составляют $L_0 = 28.3$ мм и $L_x = 44.6$ мм соответственно. На нижней грани (основании) расположен ультразвуковой преобразователь 2 продольных волн из ниобата лития, состоящий из двух секций $2'$ и $2''$. Секции преобразователя имеют размеры 17.5×3.5 мм и расположены с зазором 4.0 мм. Они включены параллельно, а центральная частота и полоса частот преобразователя составляют 50 и 30 МГц соответственно.

При работе АО-ячейки в штатном режиме лазерное излучение проходит через оптические боковые грани кристалла. Световой пучок дифрагирует на ультразвуковой волне с изменением поляризации и направления распространения. При этом коэффициент дифракции пропорционален мощности возбужденной ультразвуковой волны [1, 2]. В функции оптического затвора используется прошедший без дифракции пучок. Изменение мощности ультразвуковой волны позволяет регулировать добротность лазерного резонатора и управлять временем появления лазерных импульсов.

Регистрируемый акустическим микроскопом пространственно-временной сигнал содержит

множество составляющих, вызванных волнами различных мод и переотраженными волнами в кристалле, что видно из представленных полутонковых диаграмм (рис. 2). Отклик $r(x, t)$ в виде наклонной прямой на рис. 2а образован акустическим импульсом продольной волны, излученным пьезопреобразователем: в каждом сечении ($x = \text{const}$) он представляет собой короткий импульс в виде примерно одного периода. При этом, поскольку верхняя грань кристалла наклонена по отношению к плоскости излучателя, задержка отклика, определяемая временем пробега, линейно зависит от x . На диаграмме выделяются две составляющие, соответствующие двум секциям преобразователя, причем правая секция дает заметно больший по амплитуде сигнал (проявляющийся на изображении в большем контрасте). Это различие не сводится к большему поглощению, вызванному различным расстоянием, проходимым волной от излучателя до выходной грани, а связано, вероятно, с неодинаковой амплитудой возбуждения двух секций излучателя. Отклик имеет плоский участок, протяженность которого примерно равна размеру преобразователя, и закругленные концы, образованные волнами, излученными краем излучателя и идущими под небольшим углом, а потому проходящими с соответствующей задержкой. Такая форма является характерной для широкополосного “поршневого” ультразвукового преобразователя [7]. Вычисленная фазовая скорость распространения волны составила приблизительно $V = 5.97$ км/с, что соответствует продольной моде для кварца, из которого изготовлена АО-ячейка [8].

Представляет интерес и изучение сигнала, соответствующего трехкратному прохождению продольной волны с отражением от верхней и нижней грани (рис. 2б). Для удобства визуализации его

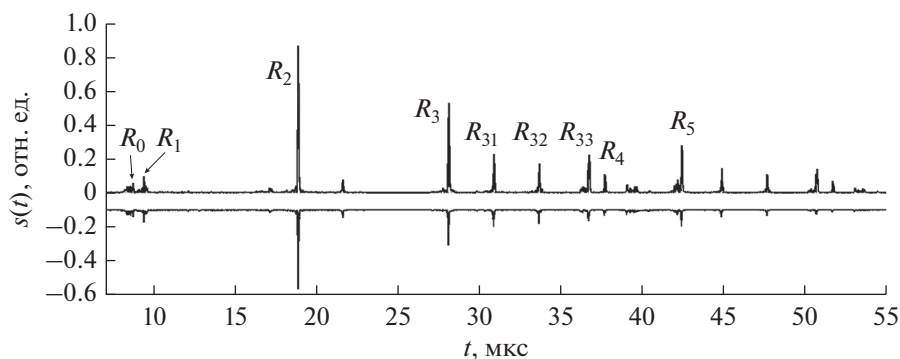


Рис. 3. Акустические хронограммы в АО ячейке с поглотителем (внизу) и без него (вверху); для наглядности сигнал с поглотителем инвертирован и смещен вниз на величину 0.1.

структуры он представлен на диаграмме в координатах, компенсирующих наклон: $(x, t - \beta x)$, где $\beta = 0.06$ мкс/мм. На диаграмме наблюдается существенное (примерно на 10 мм) смещение отклика влево, вызванное клиновидностью АО-ячейки, и различаются две области, соответствующие двум секциям излучателя. На диаграмме видна только та часть волны левой секции, которая непосредственно достигает торцевой поверхности ячейки, тогда как остальная часть, отражающаяся от боковой грани, приходит на эту поверхность с дополнительной задержкой. В целом в структуре поля также наблюдаются как плоский участок, так и “краевые волны”. Вместе с тем в поле правой секции видны существенные искажения в виде нарушения регулярности отклика в области $x \approx 14$ мм, вызванные, видимо, тенью от зазора между секциями преобразователя.

3. ЭХО-ИМПУЛЬСНЫЙ МЕТОД

В этом методе для исследований используется собственный пьезопреобразователь АО-ячейки, т.е. не требуется разборка АО-устройства. Также этот метод не требует удаления поглотителя 5 (см. рис. 1а) и позволяет исследовать свойства отраженной волны.

Поскольку эта волна вызывает паразитные эффекты, для ее подавления используется поглотитель в виде поглощающей пасты (сплавы Розе и Вуда) или прикрепленной поглощающей пластины (индий). Чтобы в АО-ячейке не возникала стоячая акустическая волна, нижняя и верхняя грани кристалла, на которых размещены излучатель и поглотитель, делаются непараллельными.

Оценить коэффициент отражения можно путем сравнения эхо-сигналов, измеренных на двух идентичных АО-модуляторах — с поглотителем и без него. Следует отметить, что аналогичная схема использовалась для измерения акустического импеданса по изменению коэффициента отражения волны при приведении в соприкосновение

твердотельного звукопровода с исследуемой жидкостью [6]. Однако в данной работе, поскольку противоположные грани не параллельны, в регистрируемые эхо-сигналы вносят дополнительный вклад волны, распространяющиеся в АО-ячейке по сложным траекториям и испытывающие многократные отражения. Ниже проведен анализ распространения ультразвуковых волн в АО-модуляторе МЗ-305-1 и оценен коэффициент отражения от торца, покрытого поглотителем ультразвука.

Поскольку в исследовании структуры ультразвукового поля излучатель выполняет функции источника и приемника, то для разделения сигналов используется импульсный режим. Импульсы длительностью 5 нс возбуждались ВЧ-генератором, а отраженные сигналы регистрировались приемником-услителем 9, который имел полосу частот 10...120 МГц, регулируемый коэффициент усиления от 0 до 40 дБ и защиту от зондирующих импульсов. Усиленный аналоговый сигнал регистрировался цифровым осциллографом 10.

Результатом измерения являются хронограммы $s(t)$ (рис. 3), отображающие последовательность эхо-импульсов. При этом время t отсчитывалось от начала зондирующего импульса, а огибающие вычислялись из зарегистрированного пьезопреобразователем знакопеременного сигнала с использованием преобразования Гильберта [9].

Каждая из зарегистрированных хронограмм содержит множество эхо-импульсов, вызванных отражениями в светозвукопроводе. При этом центральная частота эхо-импульсов составляет 51 МГц, а хронограммы для АО-ячеек с поглотителем и без него совпадают по форме и по времени прихода эхо-импульсов, но различаются по амплитуде. Таким образом, поглотитель не меняет радикальным образом картину распространения волн и, измеряя уменьшение амплитуды импульсов вследствие нанесения поглотителя, можно оценить его эффективность.

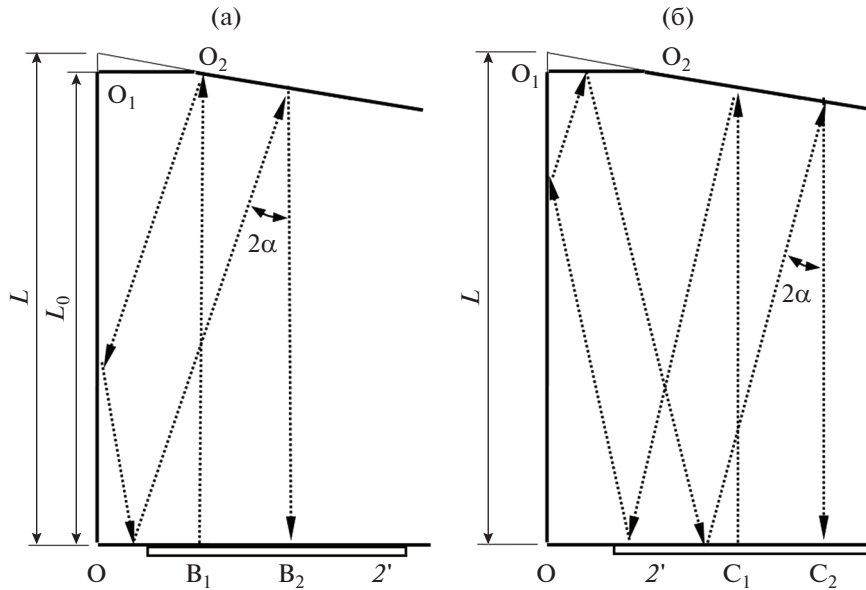


Рис. 4. Траектории распространения волн при формировании эхо-импульсов R_2 (а) и R_3 (б).

Сравниваемые хронограммы получены при возбуждении обеих секций ультразвукового излучателя. Следует, однако, отметить, что при отключении левой секции не наблюдается никаких откликов с заметной амплитудой, т.е. правая секция не дает значительного вклада в хронограмму. Это объясняется тем, что излученная ею плоская волна после отражения от наклонной верхней грани падает на поверхность преобразователя под углом 2α , превышающим угловую ширину его диаграммы направленности (см. рис. 1а).

4. АНАЛИЗ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ХРОНОГРАММЫ

Идентификация эхо-импульсов осуществлялась посредством сравнения времени их прихода с величинами времени пробега волн по разным траекториям, рассчитанным на основе геометрических размеров АО-ячейки и известных величин скорости звука ультразвука в плавном кварце для продольной и поперечной волн $C_L = 5.96$ км/с и $C_T = 3.76$ км/с [8].

В дальнейшем анализе следует учесть, что регистрируемый пьезопреобразователем сигнал является суммой парциальных вкладов от разных точек излучателя. И поскольку вследствие клиновидности рабочего кристалла волна, испущенная плоским участком излучателя и отразившаяся от верхней грани, падает на приемник под углом, а потому достигает его в разной фазе, то она фактически гасится. Существенный отклик будут давать лишь волны, падающие на приемник нормально.

Слабый отклик R_0 , содержащий нескольких импульсов и имеющий минимальную задержку (см. рис. 3), вызван, очевидно, однократным отражением продольных волн от верхней грани при распространении параллельно кратчайшей линии E_1 (см. рис. 1а). Он может быть порожден либо испускаемой левым краем излучателя цилиндрической волной, часть которой после отражения падает перпендикулярно его поверхности, либо участком плоской волны, падающим после отражения на правый край преобразователя. В обоих случаях доля таких волн в общем излучаемом потоке хотя и мала, с чем и связана низкая эффективность излучения или приема волн краем преобразователя [7], но достаточна для обнаружения этих эхо-импульсов. Оценка времени распространения дает значение $t_0 \approx 7.9$ мкс, что согласуется с хронограммой.

Следующий эхо-импульс R_1 образован плоской волной, распространяющейся по траектории E_4 от левой части левой секции до небольшого участка верхней грани, параллельного основанию. Время распространения составляет

$$t_1 = \frac{2L_0}{C_L} \approx 9.4 \text{ мкс.} \quad (1)$$

Так как размер фаски относительно мал, то и амплитуда отклика R_1 также мала, а поскольку отражение происходит от параллельной излучателю плоскости, этот отклик сосредоточен во времени.

Существенно большую амплитуду имеет отклик R_2 , образованный четырехкратно отраженными лучами (рис. 4а). В этом случае при последовательном отражении от верхней, боковой,

нижней и снова верхней граней длина траектории оказывается одинаковой для всех лучей, излученных участком секции 2' между точками B_1 и B_2 . Время пробега составляет:

$$t_2 = \frac{2L(1 + \cos 2\alpha)}{C_L} \approx 18.8 \text{ мкс}, \quad (2)$$

что хорошо согласуется с хронограммой. В силу того, что в генерации и приеме импульса принимает участие заметная площадь преобразователя и принимаемая волна на участке B_1B_2 падает перпендикулярно на его поверхность, амплитуда отклика R_2 значительна.

Образование второго по величине эхо-импульса R_3 объясняется аналогичным образом. В этом случае общее число отражений достигает шести, причем имеет место в том числе отражение от верхнего прямого угла OO_1O_2 (см. рис. 4б). На схеме показан один из лучей, участвующих в формировании этого импульса. Время прохождения этого импульса составляет

$$t_3 = 2 \frac{L_0}{C_L \cos 2\alpha} [1 + (1 - \sin 2\alpha \operatorname{tg} \alpha)(1 + \cos 2\alpha)] \quad (3)$$

и для небольшого угла наклона α мало отличается от времени шестикратного прохождения расстояния L_0 . Так, для $\alpha = 6.5^\circ$ расчет по формуле (3) дает: $t_3 = 6.03L_0C_L^{-1} = 28.33 \text{ мкс}$.

Следующие три импульса, R_{31} , R_{32} и R_{33} , расположены эквидистантно с интервалом $dt \approx 2.7 \text{ мкс}$. Возникновение этих откликов вызвано трансформацией волн, возможной при наклонном падении волны на границу. Если при отражении возникает поперечная волна, которая на другой границе трансформируется обратно в продольную, то траектория распространения волн сохраняется, но при этом возникает дополнительная задержка на величину

$$dt = L_0 \left(\frac{1}{C_T} - \frac{1}{C_L} \right). \quad (4)$$

В случае плавленого кварца численная оценка (4) дает значение $dt \approx 2.75 \text{ мкс}$, что равно наблюдаемой задержке импульса R_{31} относительно R_3 . Импульсы R_{32} и R_{33} соответствуют двум и трем прохождениям поперечных волн из общих шести проходов. Следует отметить, что, несмотря на наличие трансформации мод, падение принимаемой волны происходит перпендикулярно поверхности преобразователя.

Происхождение импульса R_4 аналогично R_2 (см. рис. 4). В этом случае также происходит отражение продольной волны от нижнего прямого угла, но число отражений достигает восьми, что дает оценку времени задержки $t_4 \approx 2t_2 = 37.6 \text{ мкс}$. Амплитуда импульса R_4 меньше, чем у импульсов R_2 и R_3 , вследствие увеличения длины пути и допол-

нительного влияния неполного отражения от ультразвукового преобразователя.

Из множества последующих откликов выделяется эхо-импульс R_5 (см. рис. 3), запаздывающий относительно R_4 примерно на время $2dt$. Это позволяет предположить, что данный импульс формируется аналогично R_4 , но в двух проходах из восьми волна имеет поперечную поляризацию. Общее время его задержки составляет $t_5 = t_4 + 2dt \approx 43 \text{ мкс}$, что наблюдается на хронограмме (см. рис. 3). За этим эхо-импульсом следует ряд эквидистантных откликов с периодом, равным приблизительно dt , что указывает на возрастающее число проходов в виде поперечной волны. Амплитуда этих импульсов оказывается малой, особенно при наличии поглотителя, поэтому включать их в дальнейший анализ представляется нецелесообразным.

5. СТРУКТУРА ОТРАЖЕННОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ

Проведенный выше анализ распространения импульсов в светозвукопроводе АО-модулятора позволяет утверждать, что для импульсов R_i ($i = 1 \dots 5$) число отражений от верхней границы (n_i) составляет 1, 2, 4, 4 и 4 раза соответственно. Кроме того, направления распространения волн и размеры волновых пучков не меняются при изменении свойств среды, контактирующей с верхней гранью. Эффективность поглотителя можно оценить, сравнивая амплитуды A_{oi} откликов без поглотителя с амплитудами A_i при наличии поглотителя и учитывая число отражений n_i :

$$K_i = \left(\frac{A_i}{A_{oi}} \right)^{1/n_i}. \quad (5)$$

Этот коэффициент показывает примерно, во сколько раз уменьшается амплитуда паразитной однократно отраженной волны при нанесении поглотителя. В этих расчетах потерями на распространение можно пренебречь, поскольку декремент затухания продольных волн в плавленом кварце на частоте 50 МГц составляет лишь 0.325 дБ/м [8]. Кроме того, поскольку падение волны на торец близко к нормальному, модуль коэффициента отражения от границы раздела звукопровод–воздух приблизительно равен 1 и величина K является оценкой коэффициента отражения от границы звукопровод–поглотитель.

Результаты измерений и расчетов приведены в табл. 1. Амплитуда отклика R_4 мала, что не дает возможности получить состоятельную оценку коэффициента отражения. Также в силу малости амплитуды отклика R_1 относительная погрешность K является весьма значительной. Кроме того, отклик R_1 получен при отражении от малого плоского участка O_1O_3 (см. рис. 1), где структура

Таблица 1. Коэффициент отражения ультразвуковой волны от поглотителя

Импульс	n_i	A_{0i} , отн. ед.	A_0 , отн. ед.	K_i
R_1	1	0.08 ± 0.02	0.11 ± 0.02	0.6 ± 0.15
R_2	2	0.46 ± 0.02	0.87 ± 0.03	0.73 ± 0.04
R_3	4	0.20 ± 0.03	0.51 ± 0.02	0.78 ± 0.06
R_4	4	0.04	0.1	–
R_5	4	0.1 ± 0.03	0.28 ± 0.03	0.8 ± 0.2

поглотителя может быть особой. Невысокая точность соответствует коэффициенту отражения K_5 , это связано кроме малой амплитуды A_{05} с трансформацией продольной моды в поперечную на границе поглотителя, что делает оценку K_5 не вполне корректной. В целом наиболее надежными представляются оценки, полученные по откликам R_2 и R_3 .

Экспериментальные исследования показывают, что полученное оценочное значение коэффициента отражения продольной ультразвуковой волны от границы с поглотителем находится в пределах 0.7...0.8. Интересно сравнить это значение с оценками, рассчитанными для некоторых материалов по справочным данным. Амплитудный коэффициент отражения при нормальном падении на плоскую границу раздела равен [10]:

$$K = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (6)$$

где Z_1 и Z_2 – акустические импедансы звукопровода и поглотителя соответственно, а импеданс определяется плотностью материала ρ и скоростью звука. Для уменьшения коэффициента отражения целесообразно использовать материал с импедансом, близким к импедансу среды. В случае плавленного кварца ($Z_1 = \rho C_L = 13.1 \text{ кг м}^{-2} \text{ с}^{-1}$) в качестве такого материала часто используется индий с импедансом $Z = 16.2 \text{ кг м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ [8]. В этом случае оценка коэффициента отражения дает $K = 0.11$, что значительно отличается от результатов эксперимента. С другой стороны, нанесение достаточно толстого слоя индия на поверхность светозвукопровода является сложной технологической задачей, поэтому для присоединения поглотителя используется клеевое соединение. В этом случае коэффициент отражения на границе с эпоксидным компаундом, характерный импеданс которого равен $Z = 3 \text{ кг м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ [8], составляет $K = 0.63$, что намного ближе к полученным результатам. Некоторое различие может быть объяснено нестабильностью акустических свойств клея, влиянием

толщины клеевого слоя и частичной потерей адгезии на границе раздела.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанные методы оценки структуры ультразвукового поля в кристалле позволяют получать прямую информацию о его характеристиках и оценить однородность поля, относительную эффективность возбуждения ультразвука, расходимость пучка, наличие переотражений, степень затухания или ослабления ультразвуковой волны. С помощью описанных методов представляется возможным осуществлять контроль структуры ультразвукового поля в отсутствие акустического поглотителя в ходе изготовления АО-ячеек, а также на стадии согласования пьезопреобразователя с ВЧ-генератором. Сравнение полученных данных с результатами измерений при установленном поглотителе позволяет оценить его эффективность. Кроме того, акустические поля могут исследоваться и со стороны боковых граней, пока АО-ячейка не заключена в корпус. Регистрация ультразвуковых волн на границах ячейки в импульсном режиме может быть использована для оценки пространственно-временного распределения волн в объеме светозвукопровода и для выявления особенности полей, связанных со структурой источника ультразвука, формой АО-ячейки и другими факторами.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания НТЦ УП РАН (FFNS-2022-0010).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балакий В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Н. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985.
2. Молчанов В.Я., Китаев Ю.И., Колесников А.И. и др. Теория и практика современной акустооптики. М.: МИСиС, 2015.
3. *Shutilov V.A.* Fundamental Physics of Ultrasound. London: CRC Press, 1988.
4. *Settles G.S.* Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualizing Phenomena in Transparent Media. Berlin: Springer-Verlag, 2001.
5. *Титов С.А.* // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. № 1. С. 22.
6. Физическая акустика. Т. 1. Методы и приборы ультразвуковых исследований. Часть А. / Под ред. У. Мэзона. М.: Мир, 1966.
7. *Кайно Г.* Акустические волны: Устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов. М.: Мир, 1990.
8. *Birks A.S., Green R.E., McIntire P.* Ultrasonic Testing (Nondestructive Testing). Handbook. V. 7. Columbus: Amer. Soc. Nondestructive Testing, 1991.
9. *Oppenheim A.V., Schaffer R.W.* Discrete-time Signal Processing. Upper Saddle River, Pearson Higher Education, Inc, 2010.
10. *Бреховских Л.М., Годин О.А.* Акустика слоистых сред. М.: Наука, 1989.