

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-07-99-108

УДК 535.4:535.6.08

Исследование характеристик поглотителя в акустооптических ячейках

СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ ТИТОВ¹✉, ВИТОЛЬД ЭДУАРДОВИЧ ПОЖАР²,
МИЛАНА ОЛЕГОВНА ШАРИКОВА³, ЕВГЕНИЯ АЛЕКСАНДРОВНА ДАВЫДОВА⁴

Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук,
Москва, Россия

¹titov.sa@ntcup.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4621-8940>

²vitold@ntcup.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0553-5410>

³sharikova@ntcup.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5593-6170>

⁴zhedavydova@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0007-8668-7649>

Аннотация

Предмет исследования. Эффективность поглотителя *s*-поляризованных поперечных ультразвуковых волн. **Цель работы.** Определение структуры акустического поля в акустооптических устройствах. Разработка методики оценки эффективности и качества ультразвуковых поглотителей акустооптических приборов, основанной на анализе эхо-импульсных ультразвуковых сигналов. **Метод.** Использование рассеяния на поверхности для определения степени поглощения/отражения ультразвука. **Основные результаты.** Разработан метод определения качества наносимого поглощающего покрытия. **Практическая значимость.** Метод дополняет комплекс ранее разработанных методов определения структуры акустической брэгговской дифракционной решетки, определяющей характеристики акустооптических устройств.

Ключевые слова: акустооптические устройства, отражение волн, акустический поглотитель

Благодарность: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания FFNS-2022-0010. В исследованиях использовалось оборудование Центра коллективного пользования Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН.

Ссылка для цитирования: Титов С.А., Пожар В.Э., Шарикова М.О., Давыдова Е.А. Исследование характеристик поглотителя в акустооптических ячейках // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 7. С. 99–108. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-07-99-108>

Коды OCIS: 050.7330, 230.1040

Absorber characteristics study in acousto-optical cells

SERGEY A. TITOV¹, VITOLD E. POZHAR², MILANA O. SHARIKOVA³✉, EVGENIYA A. DAVYDOVA⁴

Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹titov.sa@ntcup.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4621-8940>

²vitold@ntcup.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0553-5410>

³sharikova@ntcup.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5593-6170>

⁴zhedavydova@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0007-8668-7649>

Abstract

Subject of study. Efficiency of an absorber of *s*-polarized transverse ultrasonic waves is considered. **Aim of study.** Determination of the structure of the acoustic field in acousto-optical devices. Development of a methodology for assessing the efficiency and quality of ultrasonic absorbers of acousto-optical devices, based on the analysis of echo-pulse ultrasonic signals. **Method.** Using surface scattering to determine the degree of absorption/reflection of ultrasound. **Main results.** Developed method for determining the quality of the applied absorbent coating. **Practical significance.** The method complements a set of previously developed methods for determining the structure of an acoustic Bragg diffraction grating, which determines the characteristics of acousto-optical devices.

Keywords: acousto-optical devices, wave reflection, acoustic absorber

Acknowledgment: the work was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the State Task FFNS-2022-0010. The research used the equipment of the Center for Collective Use of the Scientific and Technological Center for Unique Instrumentation of the RAS.

For citation: Titov S.A., Pozhar V.E., Sharikova M.O., Davydova E.A. Absorber characteristics study in acousto-optical cells [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 7. P. 99–108. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-07-99-108>

OCIS codes: 050.7330, 230.1040

ВВЕДЕНИЕ

Акустооптические (АО) устройства используют дифракцию света на акустическом поле, образующем периодическую структуру (решетку) [1–4]. Хотя это поле, как правило, создается бегущей акустической волной определенной частоты, что обеспечивает его периодичность, оно в принципе не может считаться идеальным, как это заложено в теоретических моделях дифракции света на ультразвуке. Возбуждающая акустическая волна, во-первых, имеет ограниченное поперечное сечение и, соответственно, угловую расходимость. Во-вторых, она может затухать и рассеиваться на дефектах среды. А в-третьих, из-за преотражений на границах кристалла она порождает отраженные волны, которые фактически создают дополнительные брэгговские решетки, что приводит к появлению паразитных окон в частотной характеристике АО устройств. Задача учета влияния реальной структуры рабочей области устройств, определяемой технологией их создания, на их рабочие характеристики возникает во многих областях техники [5]. Для оценки влияния каждого из этих факторов на оптические характеристики АО устройства необходимо уметь определять реальную структуру акустического поля, что можно сделать только экспериментально [6–9]. Поэтому разработка методов определения параметров акустического поля в АО устройствах является важной

задачей, позволяющей частично протестировать АО устройство еще на этапе изготовления его АО ячейки — кристаллического светозвукпровода.

Оптический бесконтактный анализ является наиболее распространенным подходом и включается в разные взаимодополняющие методы [10]. В частности, структуру акустического поля в кристалле можно оценить по распределению волновых смещений на границах АО ячейки, расположенных напротив пьезопреобразователя или рядом с ним. Такое измерение можно выполнить лазерными ультразвуковыми (УЗ) методами [11–16], но это требует наличия хорошо отражающей грани, которая обычно отсутствует. Золотым стандартом измерения акустического поля является использование игольчатых гидрофонов [17, 18]. Однако они не могут быть размещены непосредственно на грани АО ячейки и имеют низкую чувствительность из-за своих малых размеров.

Ранее было показано, что можно оценивать коэффициент отражения от поверхности раздела звукопровод–поглотитель путем частичного вывода пучка во внешнюю среду (иммерсионную жидкость) с его регистрацией дополнительным УЗ приемником [19, 20]. Кроме этого, также используется метод, основанный на анализе параметров акустического импульса, испускаемого пьезопреобразователем и регистрируемого им же после прохождения

по разным траекториям в АО ячейке [21]. Первый из них эффективно работает в случае продольных УЗ волн. Он также применим для поперечных волн, поляризованных в плоскости падения (*p*-поляризация). Однако поперечные волны со смещениями, параллельными грани кристалла (*s*-поляризация), не проникают во внешнюю жидкую среду, а потому указанный подход на основе акустической микроскопии не применим.

В этом случае остается оценивать эффективность поглотителя в эхо-импульсном режиме, когда УЗ излучатель АО прибора используется как на излучение, так и на прием [19, 20]. Этот метод основан на измерении амплитуды импульсов, прошедших внутри ячейки по сложным траекториям с многократными переотражениями. Однако анализ прошедших импульсов довольно труден и не всегда однозначен особенно, когда в АО ячейке присутствуют скошенные грани, используемые для подавления эффекта стоячих волн в кристалле. Поэтому в данной работе проанализирована возможность оценить компоненту акустического поля *s*-поляризации и, в частности, эффективность поглотителя по значениям УЗ сигналов, возникающих в результате рассеяния на шероховатостях грани, на которую нанесен поглотитель.

Целью работы являются определение структуры акустического поля в АО устройствах, разработка методики оценки эффективности и качества УЗ поглотителей АО приборов, основанной на анализе эхо-импульсных УЗ сигналов.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

В работе использовались две близкие по форме АО ячейки (рис. 1) с одинаковыми нижними гранями, на которых расположены пьезопреобразователи, и с различающимися верхними гранями. В первой (далее № 1) АО ячейке верхняя грань полированная и располагается параллельно нижней грани, а во второй (далее № 2) она выполнена шероховатой (с параметром шероховатости 1 мкм) и наклонена на угол $\alpha = 4,5^\circ$. Оптическое излучение проходит через пару боковых граней, дифрагируя на УЗ пучке. Акустооптические ячейки вырезаны из кристаллов парателлурита (TeO_2), оптическая ось [001] которых составляет угол 6° с нижней гранью, а ось [110] лежит в вертикальной плоскости, в которой происходит распространение волн и их дифракция.

Пьезопреобразователи имеют рабочую полосу частот приблизительно 60–100 МГц и излучают поперечные волны, направление

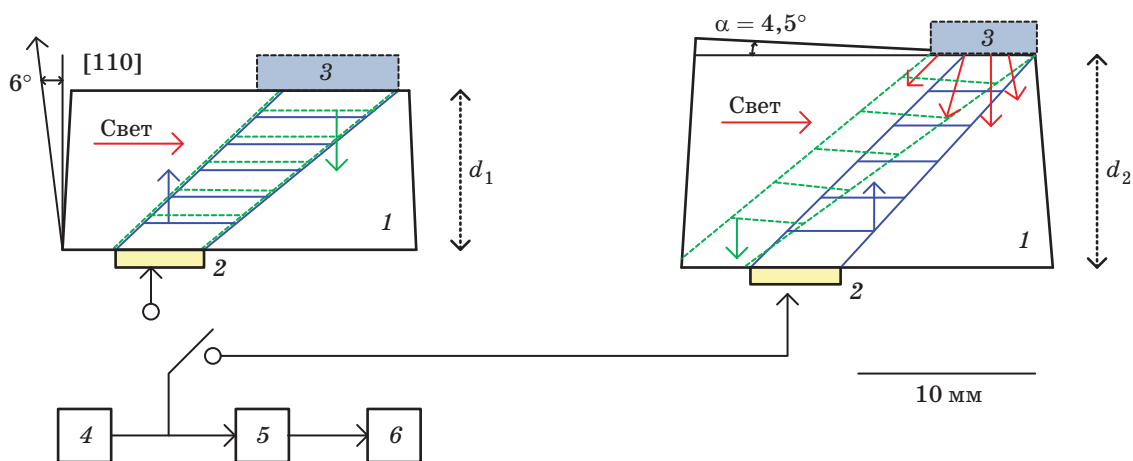


Рис. 1. Схема измерений в эхо-импульсном режиме. 1 — кристалл, 2 — пьезопреобразователь, 3 — поглотитель, 4 — генератор импульсов, 5 — усилитель, 6 — аналого-цифровой преобразователь. Стрелки указывают направление распространения УЗ волн, ось их поляризации перпендикулярна рисунку. *d* — высота (толщина) кристалла

Fig. 1. Scheme of measurements in echo-pulse mode. (1) Crystal, (2) piezoelectric transducer, (3) absorber, (4) pulse generator, (5) amplifier, (6) analog-to-digital converter. The arrows indicate the direction of propagation of ultrasonic waves, their polarization axis is perpendicular to the figure. *d* is the crystal height (thickness)

поляризации которых [–110] параллельно и нижней, и боковым граням. При выбранной ориентации кристалла фазовая скорость излучаемой поперечной волны составляет $V_{ph} = 650$ м/с, а угол ее сноса (отклонения групповой скорости от фазовой) — $51,3^\circ$ [1]. В АО ячейке № 1 излученная УЗ волна отражается назад и с тем же углом сноса, образуя в режиме непрерывного излучения стоячую волну, тогда как в АО ячейке № 2 падающая волна отражается от верхней грани под другим углом. Фазовый фронт такой отраженной волны оказывается не параллельным поверхности преобразователя, а УЗ пучок не попадает в апертуру преобразователя, поэтому отраженная от наклонной гладкой грани волна не может приниматься преобразователем. Однако он может принимать часть УЗ волны, рассеянной на шероховатостях грани в разных направлениях.

В работе излучение ультразвука и регистрация отраженной или рассеянной волн выполняются одним пьезопреобразователем, а для разделения этих сигналов используется импульсный режим. Пьезопреобразователи возбуждаются высокочастотным генератором, который создает электрические импульсы длительностью 5 нс и амплитудой 30 В. Отраженные сигналы регистрируются приемником-усилителем, соединяемым с исследуемой АО ячейкой посредством ключа. Усилитель, имеющий защиту от зондирующих импульсов, обеспечивает регулируемый коэффициент усиления от 0 до 40 дБ в полосе рабочих частот 10–120 МГц. Усиленный сигнал после аналого-цифрового преобразователя поступает в компьютер.

В ячейке № 1 излученный акустический импульс многократно переотражается между параллельными гранями, вызывая последовательность затухающих импульсов в принятом сигнале. Задержка n -го импульса ($n = 1, 2, 3, \dots$) составляет

$$\tau_n = 2d_1 n / V_{ph}, \quad (1)$$

где d_1 — высота (толщина) кристалла, V_{ph} — фазовая скорость излучаемой волны. Амплитуда n -го импульса может задаваться выражением

$$A_n = K_0 K_p^n K_t^{n-1} R_1^n, \quad (2)$$

где K_0 — коэффициент, учитывающий эффективность излучения и приема, K_p — коэффи-

циент ослабления волны за счет поглощения в объеме кристалла и дифракционной расходимости пучка, K_t — коэффициент отражения от нижней грани (поверхности раздела кристалл–пьезопреобразователь), R_1 — коэффициент отражения от верхней грани, покрытой поглотителем. В отсутствие поглотителя коэффициент отражения $R_1 = 1$, а нанесение поглотителя уменьшает этот коэффициент ($R_1 < 1$), причем чем меньше его значение, тем более эффективным является поглотитель. Для оценки коэффициента отражения поглотителя R_1 в работе использовалось отношение амплитуд однократно отраженных импульсов A_1 , измеренных в одной и той же АО ячейке с поглотителем и без него при одинаковых условиях.

Рассеянная волна в случае ячейки № 2 с наклонной гранью регистрировалась только однократно. Вследствие наклона грани расстояние от неоднородности, на которой происходит рассеяние, до преобразователя не является постоянным. Время прихода отклика t_2 из точки, находящейся на расстоянии r от правого края верхней грани ячейки (рис. 1), может быть оценено по формуле

$$t_2(r) \approx 2(d_2 + r \operatorname{tg} \alpha) / V_{ph}. \quad (3)$$

Поскольку параметр r меняется в пределах порядка ширины преобразователя, время прихода от разных точек различается и принимаемый сигнал имеет вид пачки шумоподобных импульсов.

Амплитуда принимаемого отклика записывается аналогично (2)

$$A_2 = K_0 K_p K_s R_2, \quad (4)$$

где K_s — коэффициент, описывающий эффект рассеяния, а R_2 — коэффициент отражения от верхней грани. При этом, поскольку принимаемый сигнал имеет шумоподобный характер, в качестве значения A_2 используется среднеквадратическое значение сигнала, вычисленное в некотором временном окне.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение УЗ импульсных сигналов при отражении от чистой грани и от грани с поглотителем в АО ячейке № 1 приведено на рис. 2. Для наглядности регистрируемые сигналы s приведены к сопоставимому масштабу по амплитуде

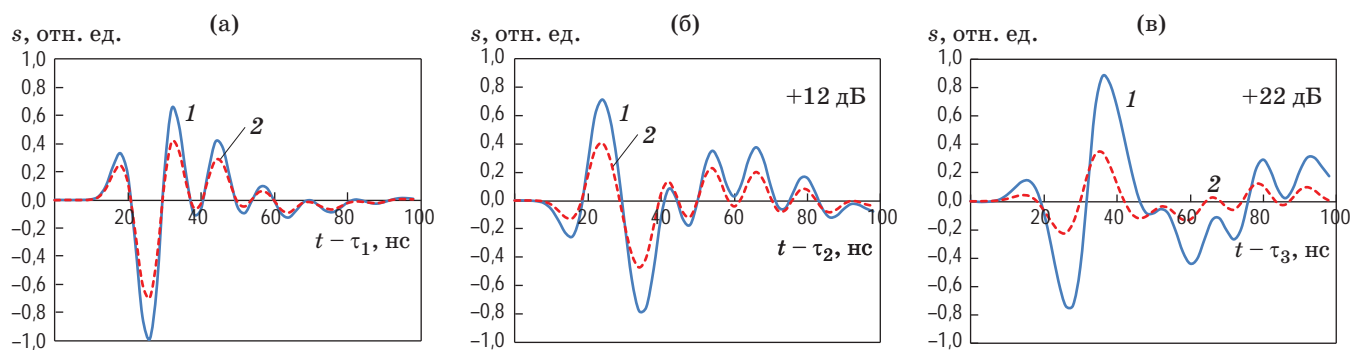


Рис. 2. Импульсы, принятые в ячейке № 1 после $n = 1$ (а), $n = 2$ (б), $n = 3$ (в) отражений без поглотителя (1) и с поглотителем (2). Для наглядности сигналы увеличены на 12 (б) и 22 дБ (в). В качестве поглотителя использовался слой меда

Fig. 2. Pulses received in cell № 1 after (a) $n = 1$, (б) $n = 2$, (в) $n = 3$ reflections (1) without an absorber and (2) with an absorber. For clarity, the signals are increased by (б) 12 and (в) 22 dB. A layer of honey was used as an absorber

и к эквивалентным интервалам времени путем вычитания времени распространения волн через кристалл τ_n . Время t отсчитывается от фронта сигнала запуска импульсного генератора. С учетом высоты АО ячейки $d_1 = 9,00$ мм рассчитанные по формуле (1) задержки составляют $\tau_1 = 27,7$ мкс, $\tau_2 = 55,4$ мкс и $\tau_3 = 82,1$ мкс. Видно, что экспериментально наблюдаемые задержки импульсов соответствуют расчетным значениям. Согласно выражению (2) влияние поглотителя тем больше, чем больше отражений испытала волна. Изменение формы импульсов при возрастании числа отражений может быть объяснено частотно зависимым ослаблением волны в кристалле.

Оценка коэффициента отражения поглотителя в виде слоя меда по нескольким импульсам дает близкие значения 0,69 ($n = 1$), 0,72 ($n = 2$), 0,69 ($n = 3$), что свидетельствует о справедливости модельного выражения (2). В дальнейшем для оценки коэффициента отражения использовалось однократное отражение сигнала. Многократное нанесение и удаление поглотителя в виде капли меда на всю поверхность кристалла позволило оценить неопределенность измерений коэффициента отражения указанного вещества: $R_1 = 0,67 \pm 0,04$.

В отличие от плоскопараллельной АО ячейки № 1 сигнал, регистрируемый в АО ячейке № 2 с наклонной гранью, имеет форму пачки шумоподобных импульсов (рис. 3). Время прихода начала пачки определяется сигналом, возвращающимся на пьезопреобразователь из правого верхнего угла ячейки $\tau_0 = t_2(0)$ (рис. 1),

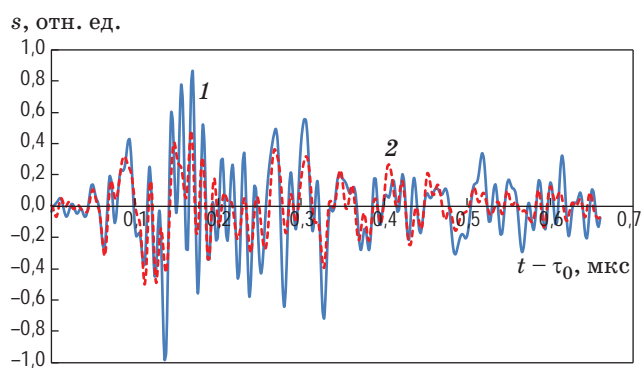


Рис. 3. Импульсы, принятые в ячейке № 2, без поглотителя (1) и со слоем меда в качестве поглотителя (2)

Fig. 3. Pulses received in cell № 2, (1) without an absorber and (2) with a layer of honey as an absorber

что при высоте грани 12,1 мм дает задержку $\tau_0 = 37,2$ мкс. Длительность пачки определяется шириной УЗ излучателя $l_t = 2,5$ мм и углом наклона грани кристалла $4,5^\circ$

$$\Delta t \approx 2l_t \operatorname{tg} \alpha / V_{\text{ph}} = 0,6 \text{ нс}. \quad (5)$$

Полученные оценки задержки и длительности пачки импульсов, рассеянных на шероховатостях наклонной грани, согласуются с экспериментом (рис. 3).

Также была проведена проверка зависимостей оценки R_2 от положения временного окна, в пределах которого рассчитывались средние квадратические значения принятых сигналов, и от области нанесения поглотителя (табл. 1). При нанесении поглотителя (ме-

Таблица 1. Оценки ослабления сигнала при разных положениях временного окна и области нанесения поглотителя**Table 1.** Signal attenuation estimates for different positions of the time window and area of absorber application

Область нанесения поглотителя, мм	Положение временного окна, мкс			
	0,05–0,2	0,2–0,35	0,35–0,5	0,5–0,65
$0 < r < 10$	0,65	0,64	0,61	0,51
$2 < r < 10$	1,06	0,52	0,66	0,3
$0 < r < 0,5$	0,74	0,96	0,99	0,9

Таблица 2. Коэффициенты отражения R_1 , R_2 , измеренные для разных поглотителей**Table 2.** Reflectance coefficients R_1 , R_2 measured for different absorbers

Поглотитель	R_1 , ячейка № 1	R_2 , ячейка № 2	Примечание
Вода	$0,99 \pm 0,02$	$1,0 \pm 0,03$	–
Этиловый спирт	$0,97 \pm 0,02$	$0,98 \pm 0,03$	–
Мед	$0,67 \pm 0,04$	$0,61 \pm 0,06$	–
Эпоксидный клей (жидкий)	0,65	0,7	Свежеприготовленный
Эпоксидный клей	0,61	0,7	После отверждения через 24 ч
Раствор гудрона в уайт спирите	1	0,95	–
Гудрон отвердевший	0,57	0,6	После высыхания через 20 мин
Герметик силиконовый (жидкий)	0,93	0,9	–
Герметик силиконовый	0,9	0,85	После застывания через 24 часа
Пленка индия толщиной 2 мкм	0,88	–	Напылена на кристалл
Пластинка индия толщиной 1 мм через мед	0,6	–	Пластинка прижата через слой меда
Пластинка индия толщиной 1 мм через слой силиконового герметика	0,9	–	Застывание под нагрузкой в течение 4 дней

да) на всю предполагаемую область рассеяния на наклонной грани ($0 < r < 10$ мм) (рис. 1) полученные значения R_2 практически не зависят от положения временных окон. При нанесении поглотителя с небольшим отступом от края ($2 \text{ мм} < r < 10$ мм) ослабления принимаемого сигнала в первом окне не наблюдалось. Наоборот, при нанесении поглотителя на самый край кристалла ($0 < r < 0,5$ мм) ослабление наблюдается только в первом временном окне. Полученные результаты подтверждают теоретическую модель, использованную для расчета коэффициента отражения.

Измеренные коэффициенты отражения R_1 и R_2 в случаях различных поглотителей на ячейках № 1 и № 2 представлены в табл. 2. Первые три поглотителя многократно наносились и удалялись с поверхностей кристаллов,

что позволило провести статистическую обработку результатов. Остальные поглотители наносились однократно, однако расчет коэффициентов проводился по 100–500 раз усредненным осциллограммам.

Результаты измерений показывают, что маловязкие жидкости, такие как вода или спирт, практически не поглощают падающую поперечную волну. Заметное ослабление вносят вязкие жидкости (мед, эпоксидный клей, герметик). Переход в твердое состояние не всегда приводит к уменьшению коэффициента отражения. Коэффициент отражения поглотителя в виде индиевой пластинки, присоединяемой к кристаллу через тонкий слой, определяется коэффициентом отражения материала этого слоя, а наличие самой пластинки не улучшает поглощение.

Значения коэффициентов R_1 и R_2 , полученные на ячейках № 1 и № 2, примерно совпадают в случае одинаковых поглотителей. Таким образом, можно сделать вывод, что коэффициент отражения поглотителя, нанесенного на шероховатую наклонную грань ячейки, можно оценивать по рассеянной ею УЗ волне, принимаемой пьезопреобразователем в эхоимпульсном режиме.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СТРУКТУРЫ В КРИСТАЛЛЕ

Для оценки эффективности поглотителей АО приборов была собрана экспериментальная установка, основанная на конфокальной

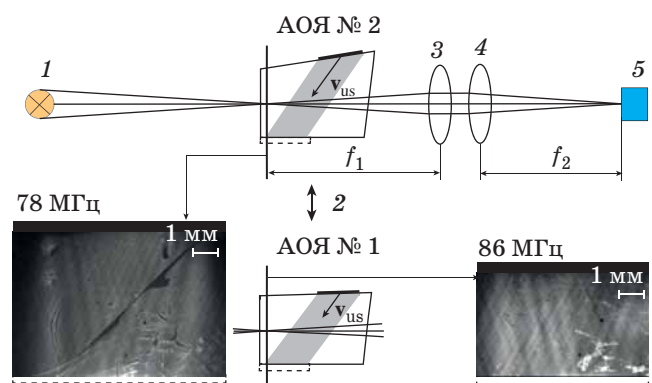
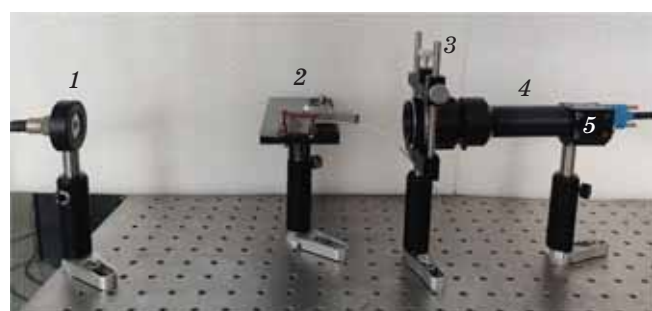


Рис. 4. Схема оптической визуализации УЗ структуры внутри АО ячейки (АОЯ). Источник широкополосного излучения — 1, экспериментальные АО ячейки — 2, объективы — 3 и 4, приемник излучения — 5. f_1, f_2 — фокусные расстояния первого и второго объективов, v_{us} — скорость УЗ волны

Fig. 4. Experimental design for optical visualization of the ultrasonic structure inside the acousto-optical cell (АОЯ). (1) Broadband radiation source, (2) experimental acousto-optical cells, (3) and (4) are lenses, (5) radiation receiver. f_1, f_2 are the focal lengths of the first and second lenses, v_{us} is the speed of the ultrasonic wave

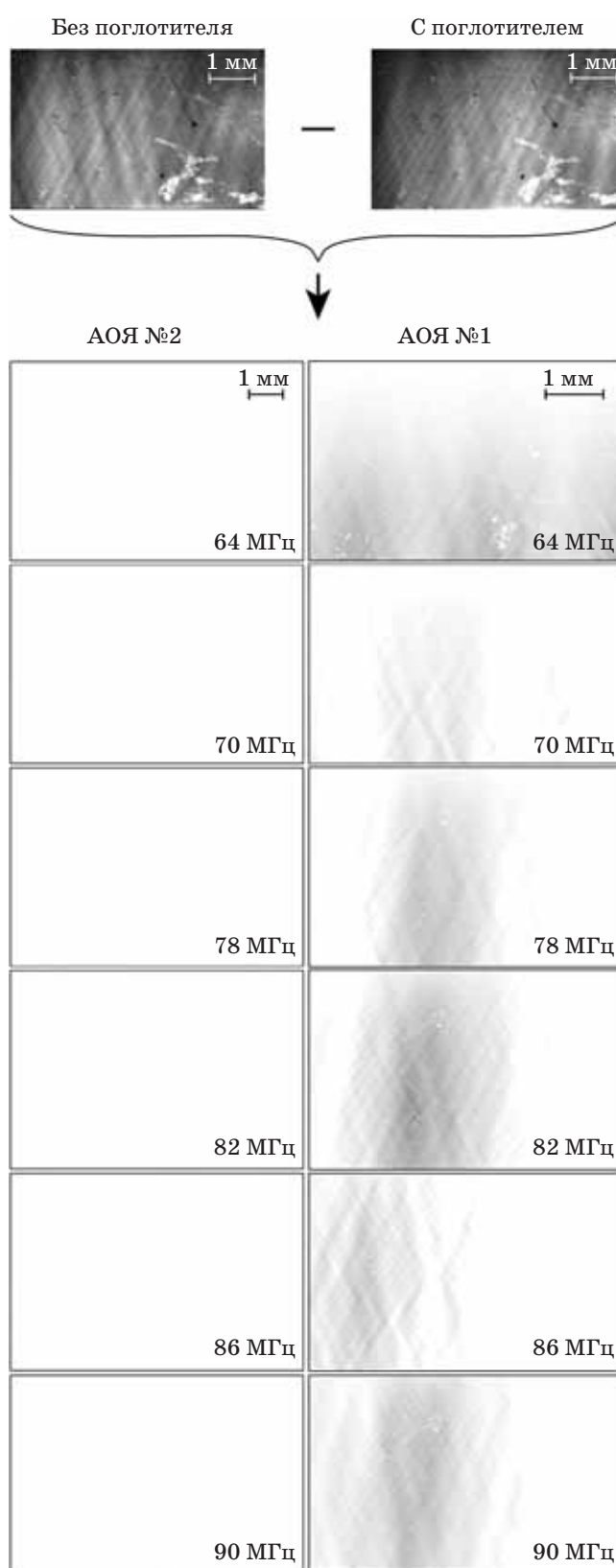


Рис. 5. Разностные изображения, визуализирующие УЗ структуру

Fig. 5. Difference images visualizing ultrasonic structure

оптической схеме АО фильтрации (рис. 4). Она состоит из источника широкополосного излучения, двух объективов и приемника излучения.

Такая конфигурация позволяет фокусироваться в конкретной области внутри исследуемого кристалла и визуализировать УЗ структуру. С помощью такой оптической системы были получены серии кадров при разных подаваемых УЗ частотах в диапазоне 64–90 МГц с шагом 2 МГц, так как в этом диапазоне у данных АО ячеек наилучшее акустическое согласование. После съемки ячейки без поглотителя на нее аккуратно наносился мед в качестве поглотителя. При этом было важно не изменить положение исследуемой АО ячейки и условий съемки, так как в дальнейшем при анализе эффективности данного поглотителя рассматривались разностные изображения, получаемые путем «вычитания» изображения кристалла с поглотителем из изображения без поглотителя (рис. 5).

В результате данного эксперимента в случае АО ячейки № 1 с параллельными гранями видна сильная разница изображений с поглотителем и без него при разных УЗ частотах.

Это доказывает, что при нанесении поглотителя на АО кристалл большая часть УЗ сигнала им поглощается. Используемый метод визуализации в случае АО ячейки № 2 с наклонной гранью заметной разницы не выявил.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика оценки эффективности и качества УЗ поглотителей АО приборов, основанная на анализе эхо-импульсных УЗ сигналов. В тестовой АО ячейке с параллельными гранями сравнение амплитуд сигналов до и после нанесения поглотителя позволяет определить коэффициент отражения поперечной s-поляризованной волны от границы раздела кристалл–поглотитель и оценить эффективность используемого материала и конструкции поглотителя. В рабочих АО приборах, в которых поглотитель нанесен на шероховатую наклонную грань, качество поглотителя можно оценить аналогичным образом — путем измерения амплитуды волны, рассеянной на шероховатости наклонной грани до и после нанесения поглотителя.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Балакший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Н. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985. 280 с.
2. Молчанов В.Я., Китаев Ю.И., Колесников А.И. и др. Теория и практика современной акустооптики. М.: МИСиС, 2015. 459 с.
3. Goutzoulis A.P., Rape D.R. Design and fabrication of acousto-optic devices. Boca Raton: CRC Press, 2004. 520 p.
4. Котов В.М., Аверин С.В., Карачевцева М.В. и др. Акустооптический фильтр пространственных частот, оперирующий в промежуточной области акустооптического взаимодействия // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 1. С. 54–62. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-01-54-62>
5. Леонов М.Б., Терлецкий Е.С., Серегин Д.А. Влияние материала подложек и геометрических характеристик измерительных диафрагм на результаты измерения характеристик качества оптических систем инфракрасного диапазона спектра // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 7. С. 51–59. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-07-51-59>
6. Voloshinov V., Polikarpova N. Acousto-optic investigation of propagation and reflection of acoustic waves in paratellurite crystal // Appl. Opt. 2009. V. 48. P. 55–66. <https://doi.org/10.1364/AO.48.000C55>
7. Maak P., Takács T., Barocsi A., et al. Thermal behavior of acousto-optic devices: Effects of ultrasound absorption and transducer losses // Ultrasonics. 2011. V. 51. P. 441–451. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2010.11.010>

REFERENCES

1. Balakshiy V.I., Parygin V.N., Chirkov L.N. Physical foundations of acousto-optics [in Russian]. Moscow: "Radio i sviaz" Publ., 1985. 280 p.
2. Molchanov V.Ya., Kitaev Yu.I., Kolesnikov A.I., et al. Theory and practice of modern acousto-optics [in Russian]. Moscow: MISiS Press, 2015. 459 p.
3. Goutzoulis A.P., Rape D.R. Design and fabrication of acousto-optic devices. Boca Raton: CRC Press, 2004. 520 p.
4. Kotov V.M., Averin S.V., Karachevzeva M.V., et al. Acousto-optic spatial frequency filter operating in the intermediate region of acousto-optic interaction // J. Opt. Technol. 2022. V. 89. № 1. P. 38–43. <http://dx.doi.org/10.1364/JOT.89.000038>
5. Leonov M.B., Terletskiy E.S., Seregin D.A. Substrate material and geometry features of measurement slits influence on infrared optical systems quality characteristics measurement // J. Opt. Technol. 2023. V. 90. № 7. P. 51–59. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-07-51-59>
6. Voloshinov V., Polikarpova N. Acousto-optic investigation of propagation and reflection of acoustic waves in paratellurite crystal // Appl. Opt. 2009. V. 48. P. 55–66. <https://doi.org/10.1364/AO.48.000C55>
7. Maak P., Takács T., Barocsi A., et al. Thermal behavior of acousto-optic devices: Effects of ultrasound absorption and transducer losses // Ultrasonics. 2011. V. 51. P. 441–451. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2010.11.010>

- tion and transducer losses // *Ultrasonics*. 2011. V. 51. P. 441–451. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2010.11.010>
8. Балакший В.И., Волошин А.С., Молчанов В.Я. Анизотропная дифракция света на кристаллах с большим сносом энергии // *Опт. и спектроск.* 2014. Т. 117. № 5. С. 827–832. <https://doi.org/10.7868/S003040341411004X>
 9. Voloshin V., Polikarpova N., Ivanova P., et al. Acousto-optic control of internal acoustic reflection in tellurium dioxide crystal in case of strong elastic energy walkoff [Invited] // *Appl. Opt.* 2018. V. 57. № 10. P. 19–25. <https://doi.org/10.1364/AO.57.000C19>
 10. Швец В.А., Марин Д.В., Кузнецова Л.С., и др. Анализ морфологии поверхности буферных слоев CdTe с помощью эллипсометрии и интерференционной профилометрии для создания методики контроля роста буферных слоев // *Оптический журнал*. 2024. Т. 91. № 2. С. 50–58. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-02-50-58>
 11. Kudo N. Optical methods for visualization of ultrasound fields // *Japan. J. Appl. Phys.* 2015. V. 54. № 7S1. P. 07HA01-1–07HA01-6. P. 07HA01. <https://doi.org/10.7567/JJAP.54.07HA01>
 12. Ishikawa K., Yatabe K., Oikawa Y. Physical-model-based reconstruction of axisymmetric three-dimensional sound field from optical interferometric measurement // *Meas. Sci. Technol.* 2021. V. 32. № 4. Art. 045202. P. 1–8. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/abce73>
 13. Rajput S.K., Matoba O., Takase Y., et al. Multimodal sound field imaging using digital holography [Invited] // *Appl. Opt.* 2021. V. 60. № 10. P. B49–B58. <https://doi.org/10.1364/AO.415162>
 14. Ortiz P.F.U., Perchoux J., Arriaga A.L., et al. Visualization of an acoustic stationary wave by optical feedback interferometry // *Opt. Eng.* 2018. V. 57. № 5. P. 051502. <https://doi.org/10.1117/1.OE.57.5.051502>
 15. Wu J., Xu Z., Li K., et al. Analysis of acoustic near field characteristics in acousto-optic modulator // *IEEE Photonics Technol. Lett.* 2021. V. 33. № 4. P. 201–204. <https://doi.org/10.1109/lpt.2021.3051648>
 16. Verburg S.A., Fernandez-Grande E. Acousto-optical volumetric sensing of acoustic fields // *Phys. Rev. Appl.* 2021. V. 16. № 4. P. 044033. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.16.044033>
 17. Hill C.R., Bamber J.C., ter Haar G.R. Physical principles of medical ultrasonics. John Wiley & Sons, 2004. 528 p.
 18. Harris G.R. Hydrophone measurements in diagnostic ultrasound fields // *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr.* 1988. V. 35. № 2. P. 87–101. <https://doi.org/10.1109/58.4157>
 19. Титов С.А., Пожар В.Э., Ломонов В.А. Экспериментальная оценка структуры динамических дифракционных решеток в акустооптических приборах // *Светотехника*. 2022. № 5. С. 48–51.
 20. Титов С.А., Мачихин А.С., Пожар В.Э. и др. Исследование ультразвукового поля в акустооптическом кристалле акустическими методами // *Радиотехника и электроника*. 2022. Т. 67. № 12. С. 1192–1199. <https://doi.org/10.31857/S0033849422120221>
 21. Titov S.A., Machikhin A.S., Pozhar V.E. Evaluation of acoustic waves in acousto-optical devices by ultrasonic imaging // *Materials*. 2022. V. 15. № 5. P. 1792. <https://doi.org/10.3390/ma15051792>
 8. Balakshy V., Voloshin A., Molchanov V. Anisotropic light diffraction in crystals with a large acoustic-energy walk-off // *Opt. and Spectrosc.* 2014. V. 117. P. 801–806. <https://doi.org/10.1134/S0030400X14110046>
 9. Voloshin V., Polikarpova N., Ivanova P., et al. Acousto-optic control of internal acoustic reflection in tellurium dioxide crystal in case of strong elastic energy walkoff [Invited] // *Appl. Opt.* 2018. V. 57. № 10. P. 19–25. <https://doi.org/10.1364/AO.57.000C19>
 10. Shvets V.A., Marin D.V., Kuznetsova L.S., et al. Surface morphology analysis of CdTe buffer layers using ellipsometry and interference profilometry to create a technique for monitoring the growth of buffer layers // *J. Opt. Technol.* 2024. V. 91. № 2. P. 00–00. <http://dx.doi.org/10.1364/JOT.91.000000>
 11. Kudo N. Optical methods for visualization of ultrasound fields // *Japan. J. Appl. Phys.* 2015. V. 54. P. 07HA01-1–07HA01-6. <https://doi.org/10.7567/JJAP.54.07HA01>
 12. Ishikawa K., Yatabe K., Oikawa Y. Physical-model-based reconstruction of axisymmetric three-dimensional sound field from optical interferometric measurement // *Meas. Sci. Technol.* 2021. V. 32. № 4. P. 045202. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/abce73>
 13. Rajput S.K., Matoba O., Takase Y., et al. Multimodal sound field imaging using digital holography [Invited] // *Appl. Opt.* 2021. V. 60. № 10. P. B49–B58. <https://doi.org/10.1364/AO.415162>
 14. Ortiz P.F.U., Perchoux J., Arriaga A.L., et al. Visualization of an acoustic stationary wave by optical feedback interferometry // *Opt. Eng.* 2018. V. 57. № 5. P. 051502. <https://doi.org/10.1117/1.OE.57.5.051502>
 15. Wu J., Xu Z., Li K., et al. Analysis of acoustic near field characteristics in acousto-optic modulator // *IEEE Photonics Technol. Lett.* 2021. V. 33. № 4. P. 201–204. <https://doi.org/10.1109/lpt.2021.3051648>
 16. Verburg S.A., Fernandez-Grande E. Acousto-optical volumetric sensing of acoustic fields // *Phys. Rev. Appl.* 2021. V. 16. P. 044033. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.16.044033>
 17. Hill C.R., Bamber J.C., ter Haar G.R. Physical principles of medical ultrasonics. John Wiley & Sons, 2004. 528 p.
 18. Harris G.R. Hydrophone measurements in diagnostic ultrasound fields // *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr.* 1988. V. 35. № 2. P. 87–101. <https://doi.org/10.1109/58.4157>
 19. Titov S.A., Pozhar V.E., Lomonov V.A. Experimental evaluation of the structure of dynamic diffraction gratings in acousto-optic devices // *Light & Eng.* 2022. V. 30. № 6. P. 55–59. <https://doi.org/10.33383/2022-079>
 20. Titov S.A., Machikhin A.S., Pozhar V.E., et al. Study of the ultrasonic field in an acousto-optic crystal using acoustic methods // *Commun. Technol. Electron.* 2022. V. 67. № 12. P. 1443–1449. <https://doi.org/10.31857/S0033849422120221>
 21. Titov S.A., Machikhin A.S., Pozhar V.E. Evaluation of acoustic waves in acousto-optical devices by ultrasonic imaging // *Materials*. 2022. V. 15. № 5. P. 1792. <https://doi.org/10.3390/ma15051792>

АВТОРЫ

Сергей Александрович Титов — доктор технических наук, старший научный сотрудник, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, 117342, Россия; Scopus ID: 7007011894; <https://orcid.org/0000-0002-4621-8940>; titov.sa@ntcup.ru

Витольд Эдуардович Пожар — доктор физико-математических наук, заведующий отделом акустооптических информационных систем, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, 117342, Россия; Scopus ID: 6603147714; <https://orcid.org/0000-0003-0553-5410>; vitold@ntcup.ru

Милана Олеговна Шарикова — младший научный сотрудник, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, 117342, Россия; Scopus ID: 57218281289; <https://orcid.org/0000-0001-5593-6170>; sharikova@ntcup.ru

Евгения Александровна Давыдова — аспирант, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, 117342, Россия; <https://orcid.org/0009-0007-8668-7649>; zhedavydova@yandex.ru

*Статья поступила в редакцию 22.01.2024
Одобрена после рецензирования 26.03.2024
Принята к печати 30.05.2024*

AUTHORS

Sergey A. Titov — Dr. Sci. (Engineering), Senior Researcher, Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow, 117342, Russia, Scopus ID: 7007011894; <https://orcid.org/0000-0002-4621-8940>; titov.sa@ntcup.ru

Vitold E. Pozhar — Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Head of Acousto-Optic Systems Department, Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow, 117342, Russia; Scopus ID: 6603147714; <https://orcid.org/0000-0003-0553-5410>; vitold@ntcup.ru

Milana O. Sharikova — Junior Researcher, Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow, 117342, Russia; Scopus ID: 57218281289; <https://orcid.org/0000-0001-5593-6170>; sharikova@ntcup.ru

Evgeniya A. Davydova — PhD Student, Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow, 117342, Russia; <https://orcid.org/0009-0007-8668-7649>; zhedavydova@yandex.ru

*The article was submitted to the editorial office 22.01.2024
Approved after review 26.03.2024
Accepted for publication 30.05.2024*