

## БАЗОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ШИРОКОПОЛОСНОЙ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЙ АКУСТООПТИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ (ДЕФЛЕКТОРА) НА КРИСТАЛЛЕ ПАРАТЕЛЛУРИТА

© 2019 г. С. Н. Антонов\*

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН  
Россия, 141190, Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1*

*\*e-mail: olga-ant@yandex.ru*

Поступила в редакцию 25.04.2019 г.

После доработки 25.04.2019 г.

Принята к публикации 03.05.2019 г.

Технология создания широкополосного высокоэффективного пьезопреобразователя для генерации медленной акустической моды в акустооптическом кристалле парателлуриата основана на акустическом согласовании преобразователя из ниобата лития с парателлуриатом методом гальванического нанесения промежуточного слоя олова. Для отвода тепла от преобразователя без акустического демпфирования используется тонкий теплопроводящий слой жидкости между теплоотводом и пьезопреобразователем. Создан широкополосный высокоэффективный дефлектор с центральной частотой ультразвука 37 МГц, частотной полосой более 30 МГц и эффективностью дифракции более 90% на длине волны 1.06 мкм. Достигнут стабильный непрерывный режим работы дефлектора при интенсивностях акустической волны более 20 Вт/см<sup>2</sup>.

DOI: 10.1134/S0032816219060016

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Акустооптика (а.о.) – это управление параметрами оптического излучения ультразвуковыми волнами, распространяющимися в прозрачных средах [1, 2]. На практике акустический диапазон частот составляет от единиц до сотен мегагерц, а оптический – от ультрафиолета до десятков микрон. Хорошо изучено использование а.о. в анализаторах радиосигналов, приборах спектральной обработки оптических изображений, в оптических процессорах и др. Однако можно утверждать, что благодаря технологической революции в оптоэлектронике на сегодняшний день осталось только два практически значимых а.о.-направления: управление интенсивностью лазерного луча (модуляторы) и его угловым положением (дефлекторы). Принципиальными особенностями а.о.-приборов являются: возможность управления интенсивным лазерным излучением с плотностью мощности десятки и сотни киловатт на квадратный сантиметр, достаточно высокое быстродействие (вплоть до десятков наносекунд), отсутствие механически перемещаемых элементов, малые вносимые световые потери (единицы процентов), небольшие габариты и вес.

Акустооптические модуляторы используются для модуляции добротности лазеров, внешней модуляции излучения, а.о.-дефлекторы – для

сканирования лазерного луча в системах обработки материалов и вывода изображений. Как пример, оригинальная страница зарубежного паспорта РФ изготавливается именно лазером с использованием а.о.-дефлектора (разработанного автором статьи).

Основным материалом современных а.о.-приборов является монокристалл парателлуриата (TeO<sub>2</sub>). Кристалл обладает феноменально большой величиной а.о.-качества, прозрачностью в широком диапазоне длин волн света, от 0.35 до 5 мкм, и высокой лучевой стойкостью. Развита технология роста и обработки больших однородных образцов (более 20 мм<sup>3</sup>). Закономерности акустооптического взаимодействия в кристалле TeO<sub>2</sub> и ряд важных реализаций на основе этого кристалла изучены и описаны весьма полно [3–8]. С теоретической и практической (технологической) сторон можно выделить две составляющие а.о.-прибора: собственно а.о.-кристалл и систему генерации ультразвука – пьезопреобразователь. Именно вторая и определяет в основном практически достижимые характеристики: максимальную эффективность и широкополосность, быстродействие, стабильность и др. Существенно, что именно с учетом возможностей преобразователя и рассчитывают реально достижимые параметры а.о.-прибора в целом.

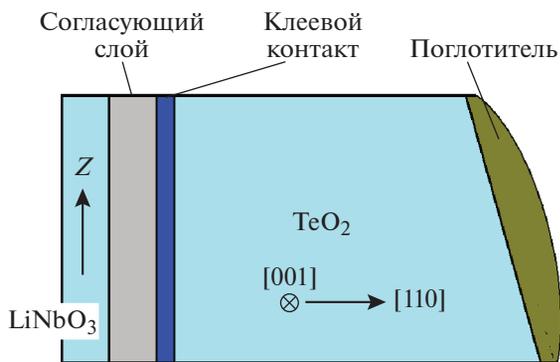


Рис. 1. Схема а.о.-ячейки.

Данная работа посвящена технологии создания широкополосного высокоэффективного пьезопреобразователя а.о.-ячейки – устранению ограничений, связанных с полосой акустического преобразования и возникающими тепловыми эффектами.

Первая часть данной работы связана с технологией изготовления акустического контакта в системе “пьезопреобразователь–а.о.-кристалл”. Совершенный широкополосный акустический контакт в дефлекторе расширяет частотный диапазон работы пьезопреобразователя, значительно упрощает электрическое согласование преобразователя с генератором, снижает потери высоко-частотной электрической мощности в элементах согласования.

Вторая часть работы связана с разработкой метода отвода тепла от преобразователя с целью повышения уровня мощности акустической волны, генерируемой в а.о.-кристалле. Предельные параметры а.о.-устройств, как правило, ограничены максимальной подводимой к преобразователю электрической мощностью. Например, частотная полоса а.о.-дефлекторов и быстродействие а.о.-модуляторов возрастают при уменьшении длины взаимодействия света и звука (длины преобразователя), что требует увеличения управляющей мощности звука. При этом превышение допустимой электрической мощности приводит к нестабильности параметров приборов и даже к выходу их из строя.

## 2. АКУСТИЧЕСКИЙ СОГЛАСУЮЩИЙ КОНТАКТ МЕЖДУ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ LiNbO<sub>3</sub> И А.О.-КРИСТАЛЛОМ TeO<sub>2</sub>

Для генерации объемных сдвиговых ультразвуковых волн, как правило, используется кристалл ниобата лития (LiNbO<sub>3</sub>), характеризующийся большим коэффициентом электро-механической связи, малыми потерями на высоких частотах, стабильностью параметров и имеющий

развитую технологию производства. В а.о.-приборах на основе TeO<sub>2</sub> используются пластины “косого” среза кристалла ухл/-17° (иное обозначение Y + 163), генерирующие чистую поперечную акустическую моду. Параметры данного среза кристалла: скорость звука  $v_p = 4.5 \cdot 10^5$  см/с, плотность  $\rho_p = 4.65$  г/см<sup>3</sup> и акустический импеданс  $Z_p = 22.2 \cdot 10^5$  г/(с · см<sup>3</sup>) [9]. Соответствующие параметры кристалла TeO<sub>2</sub>: скорость звука  $v_k = 0.65 \cdot 10^5$  см/с, плотность  $\rho_k = 6$  г/см<sup>3</sup> и акустический импеданс  $Z_k = 3.9 \cdot 10^5$  г/(с · см<sup>3</sup>) [9].

Очевидно, что шестикратное различие акустических импедансов без акустического согласования не может обеспечить широкополосность возбуждения ультразвука. Классическое решение проблемы заключается в использовании четвертьволнового промежуточного слоя с импедансом  $Z_c = (Z_p Z_k)^{1/2}$  [10], т.е. необходим материал с импедансом  $Z_c = 9.3 \cdot 10^5$  г/(с · см<sup>3</sup>).

Существует ставшая общепринятой технология создания акустического контакта между LiNbO<sub>3</sub> и TeO<sub>2</sub> – холодная вакуумная термокомпрессия с помощью индия. Пластины LiNbO<sub>3</sub> значительной толщины полируют с одной стороны. Пластины и кристалл TeO<sub>2</sub> помещают в вакуумную камеру и на них наносят адгезионные слои и слой индия заданной толщины. Затем, не извлекая из камеры, совмещают пластину и TeO<sub>2</sub> и сдавливают их. В вакууме не образуются оксидные пленки, поэтому индий диффундирует в единый и однородный слой. Существенно, что импеданс индия  $Z_1 = (5.5–6.9) \cdot 10^5$  г/(с · см<sup>3</sup>) отличен от оптимального, составляющего  $Z_c = 9.3 \cdot 10^5$  г/(с · см<sup>3</sup>). Это является фактором, ограничивающим частотную полосу акустического согласования. Кроме того, компрессионная индиевая вакуумная технология достаточно сложна для широкого применения.

## 3. КЛЕЕВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТАКТА

Известное многие годы клеевое соединение пьезопреобразователя и а.о.-кристалла в последнее время было вытеснено вакуумным индиевым контактом и отнесено к разряду менее перспективных соединений. В данной работе будет показано, что это неверно, во всяком случае для частот менее 100 МГц. Разработанная технология представлена на примере изготовления а.о.-ячейки, которую можно рассматривать как основу для изготовления модуляторов и дефлекторов.

На рис. 1 представлена схема а.о.-ячейки.

Кристалл TeO<sub>2</sub> и пьезопреобразователь изготавливались по отдельности. TeO<sub>2</sub> оптически обрабатывался, просветлялся и не подвергался вакуумной металлизации. Процесс изготовления со-

стоял в следующем. Изначально пластины  $\text{LiNbO}_3$  размером 4 мм по высоте и 6 мм по длине шлифовались, полировались и доводились до необходимой толщины (в нашем случае 60 мкм). Затем на них вакуумной металлизацией наносились электроды из золота толщиной 0.1 мкм с адгезионным подслоем хрома. Важно, что в одном технологическом процессе одновременно изготавливалось достаточно большое число пластин  $\text{LiNbO}_3$  (до 20 штук). На этом этапе технологии, связанный с применением вакуума, заканчивался.

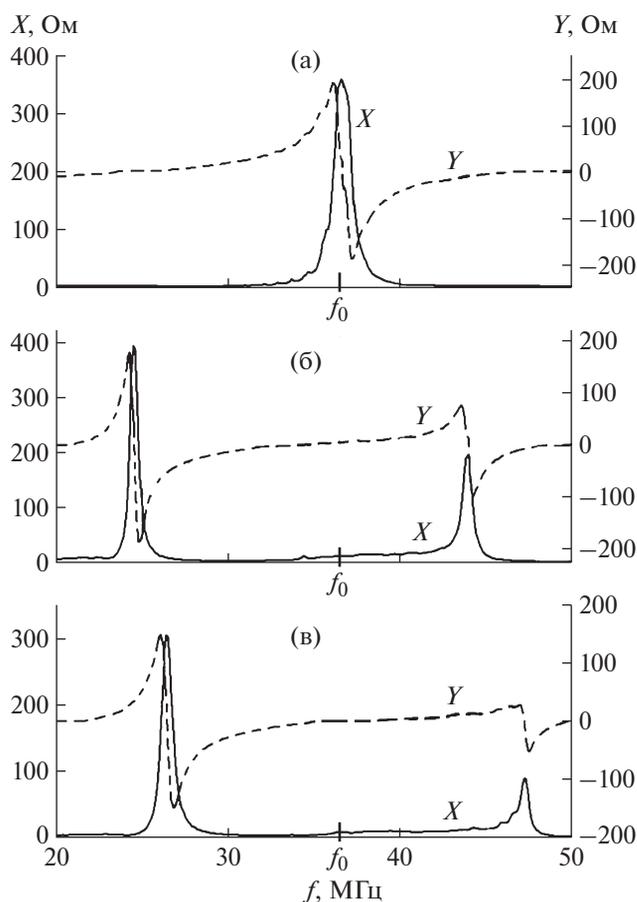
Принципиальной особенностью технологии является гальванический способ “наращивания” согласующего металлического слоя на одну поверхность пластины. Заключительный этап сборки дефлектора состоит в клеевом соединении преобразователя и кристалла. Исследовано применение различных металлов в качестве согласующего слоя. В итоге выбрано олово, поскольку оно обеспечивает максимальную широкополосность. В литературе приведены следующие параметры олова: плотность  $\rho_o = 7.3 \text{ г/см}^3$ , сдвиговая скорость  $v_o = 1.67 \cdot 10^5 \text{ см/с}$  и акустический импеданс  $Z_o = (8-12) \cdot 10^5 \text{ г/(с} \cdot \text{см}^3)$ . Однако указанные параметры относятся к металлу макроскопического объема, а не к тонкой пленке, поэтому потребовался экспериментальный подбор необходимой толщины. Экспериментальный анализ позволил сделать вывод, что олово предпочтительнее для применения, чем иные материалы, в частности индий.

Контроль оптимальной толщины согласующего акустического слоя проводился перманентно, непосредственно во время роста пленки, измерением электрического импеданса пьезопреобразователя – активной  $X$ - и реактивной  $Y$ -составляющей. Измерения начинались с момента, когда на преобразователе отсутствовало олово. Критерий, по которому принималось решение о завершении роста пленки, являлся одним из основных (оригинальным) аспектов технологической задачи.

На рис. 2 представлено семейство графиков электрического импеданса преобразователя.  $f_0$  соответствует начальной частоте резонанса пластины без согласующего слоя.

На рис. 2а приведены электрические характеристики пьезопреобразователя без согласующего слоя. По мере роста пленки олова на частотной зависимости импеданса появляются два резонансных пика, как показано на рис. 2б. Итоговый результат, соответствующий оптимальной толщине пленки олова, представлен на рис. 2в.

Частотное положение резонансных пиков определяется толщинами пластины преобразователя и согласующей пленки олова. Высокочастотный пик связан с резонансом только пленки олова, а низкочастотный – с резонансом кристалла и



**Рис. 2.** Электрический импеданс преобразователя: а – без согласующего слоя; б – с согласующим слоем промежуточной толщины; в – с согласующим слоем оптимальной (итоговой) толщины.  $f_0$  – начальная частота резонанса пластины без согласующего слоя.

нанесенной на него пленки. В результате проведенных исследований был экспериментально определен критерий окончания процесса роста пленки олова. Для этого необходимо выполнение следующего равенства:  $(f_v - f_1)/(f_1 - f_n) \approx 0.6$ , где  $f_1$  – начальная резонансная частота пластины преобразователя без пленки, а  $f_v$  и  $f_n$  – частоты верхнего и нижнего резонансных пиков. Дополнительным критерием окончания процесса роста пленки является достижение примерно двукратного соотношения между активными частями импеданса низкочастотного и высокочастотного пиков.

Для склейки использовался двухкомпонентный высокотемпературный эпоксидный компаунд. Экспериментально установлено, что для частот менее 100 МГц при толщине клеящего слоя менее 0.5 мкм влияние на импеданс эпоксидного компаунда достаточно мало.

Электрический импеданс изготовленной а.о.-ячейки (без электрического согласования) приведен на рис. 3. Видно, что в заданной полосе аку-

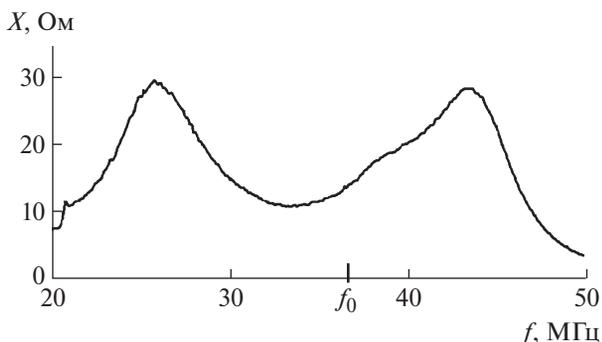


Рис. 3. Изменение активной части импеданса пьезопреобразователя без электрического согласования.

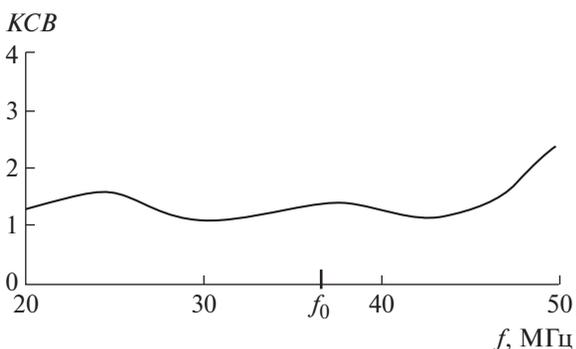


Рис. 4. KCB дефлектора после акустического и электрического согласований.

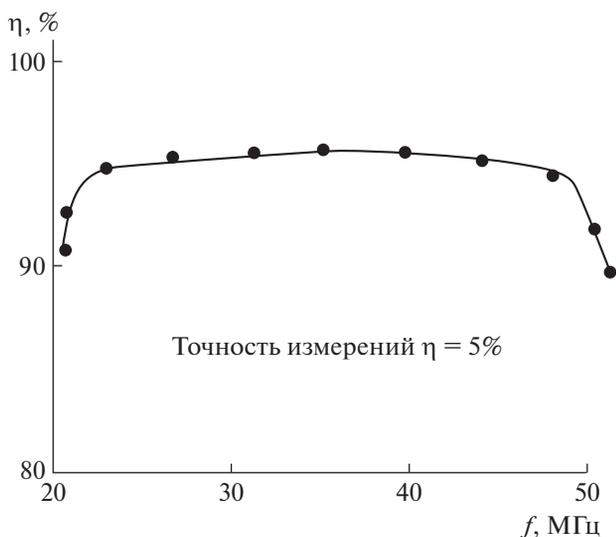


Рис. 5. Частотная полоса дефлектора.  $\eta$  — относительная эффективность дифракции.

стических частот активная часть импеданса близка к 50 Ом.

Для электрического согласования пьезопреобразователя с 50-омным радиотрактом использовалась П-схема электрического фильтра, состоящая из двух индуктивностей и конденсатора. На рис. 4 представлен итоговый результат электрического согласования преобразователя с генератором радиосигнала — частотная зависимость коэффициента стоячей волны (КСВ). Видно, что в полосе частот не менее 30 МГц достигнуто хорошее согласование,  $КСВ < 1.5$ . Эксперимент показал, что дефлектор высокоэффективно работает в полосе частот от 15 до 48 МГц, а дифракционная эффективность на длине волны света 1.06 мкм была не ниже 90% [11].

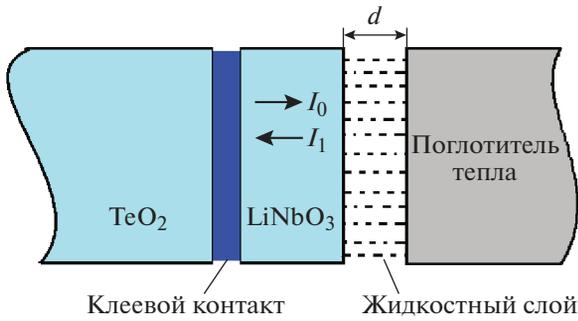
### 3.1. Дефлектор на базе клеевого акустического контакта

В работе [3] был предложен метод расширения полосы а.о.-дефлектора на основе кристалла  $TeO_2$ . В результате частотно-зависимого и фазированного управления двухэлементным пьезопреобразователем были существенно ослаблены ограничения полосы частот дифракции, обусловленные селективностью а.о.-взаимодействия. При этом эффективная частотная полоса дефлектора в основном определялась полосой преобразования электрической энергии в акустическую — полосой пьезопреобразователя.

На рис. 5 представлены результаты измерения эффективности дефлектора в зависимости от частоты управляющего электрического сигнала. По оси абсцисс отложена частота, а по оси ординат — эффективность дифракции, т.е. отношение интенсивности дифракционного порядка  $I_d$  к интенсивности падающего на а.о.-дефлектор света  $I_0$ . Согласно рис. 5, полоса рабочих частот дефлектора определяется частотной полосой преобразователя и коррелирует с данными по измерению KCB (см. рис. 4). Реально достигнутая эффективность дифракции в полосе частот от 20 до 50 МГц составила более 90%. Важно, что клеевой акустический контакт не снижает ресурс работы а.о.-прибора, на что указывает более чем десятилетний опыт. Наконец, нагрев всего а.о.-прибора до температуры 100°C не изменяет его параметры.

## 4. ЖИДКОСТНАЯ АКУСТИЧЕСКАЯ ИЗОЛЯЦИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ И ПОГЛОТИТЕЛЯ ТЕПЛА

Предельные параметры а.о.-устройств, как правило, ограничены максимальной, подводимой к преобразователю электрической мощностью, превышение которой допустимого уровня



**Рис. 6.** Схема а.о.-ячейки:  $d$  — толщина теплопроводящего слоя,  $I_1$  — акустическая волна в направлении склейки,  $I_0$  — отраженная от нее.

приводит к нестабильности параметров а.о.-приборов вплоть до выхода их из строя.

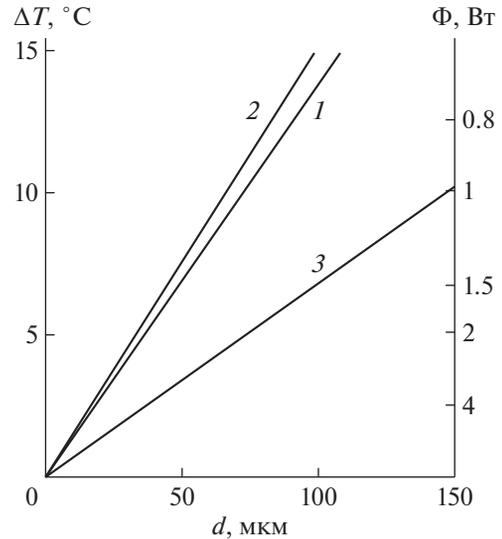
Охлаждение преобразователя путем непосредственного контакта его тыльной стороны с поглотителем тепла из меди, алюминия и т.д. неэффективно по следующей причине. Акустический импеданс меди равен  $20.2 \cdot 10^5 \text{ г/(с} \cdot \text{см}^2)$ , а алюминия —  $8.4 \cdot 10^5 \text{ г/(с} \cdot \text{см}^2)$ . Поскольку импеданс пьезопреобразователя намного ближе к импедансу поглотителя тепла, чем к импедансу  $\text{TeO}_2$ , то значительная часть звуковой энергии будет распространяться именно в тело поглотителя, а не в а.о.-кристалл.

Идея метода охлаждения преобразователя состоит в том, чтобы соприкосновение тыльной стороны пьезопреобразователя и поглотителя тепла осуществлять через слой жидкого контакта [12]. В силу значительного различия комплексного импеданса для сдвиговых колебаний жидкости и твердого тела (пьезопреобразователя) обеспечивается акустическая изоляция последнего от поглотителя при хорошей передаче в него тепла. На рис. 6 показана схема такой а.о.-ячейки.

Ниже рассматривается вопрос о соотношении тепловых и акустических свойств системы “пьезопреобразователь—тонкий слой жидкости—торец поглотителя”. Основные тепловые характеристики жидкостного слоя можно найти из уравнения для стационарной теплопроводности [13]:  $\Phi = \chi S \Delta T / d$ , где  $\Phi$  — мощность теплового потока при разности температур  $\Delta T$  на границах жидкости;  $\chi$  — коэффициент теплопроводности жидкости;  $S$  — поперечное сечение жидкостного слоя.

На рис. 7 представлены результаты расчета по этой формуле, при этом левая ордината соответствует зависимости  $\Delta T(d)$  при  $\Phi = 1 \text{ Вт}$ , а правая —  $\Phi(d)$  при  $\Delta T = 10^\circ\text{C}$  и  $S = 3 \times 7 \text{ мм}^2$ .

Для анализа были выбраны три жидкости, параметры которых хорошо известны: этиленгликоль, глицерин и вода. Согласно графикам на рис. 7, для переноса от пьезопреобразователя теп-



**Рис. 7.** Зависимости от толщины  $d$  слоя жидкостного контакта перепада температур  $\Delta T$  при заданном тепловом потоке ( $\Phi = 1 \text{ Вт}$ ) и мощности теплового потока  $\Phi$  при фиксированной разности температур ( $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ ) для разных жидкостей: 1 — этиленгликоля, 2 — глицерина, 3 — воды.

ловых потоков мощностью несколько ватт при разности температур в несколько десятков градусов между пьезопреобразователем из ниобата лития и поглотителем тепла толщина слоя жидкости не должна превышать нескольких десятков микрометров. Для таких толщин, наряду с учетом поглощения звука жидким слоем, следует оценить влияние процессов, связанных с отражением звуковой волны от торца поглотителя.

Рассмотрим уменьшение интенсивности звука за счет влияния системы “жидкость—торец поглотителя”, а именно величину потерь  $R$ :

$$R = 1 - I_1/I_0 = 1 - v_1^2/v_0^2, \quad (1)$$

где  $I_1$  и  $I_0$  — амплитуды волн (см. рис. 6),  $v_0$  и  $v_1$  — акустические скорости падающей и отраженной волн соответственно.

При использовании импедансной методики [14] записывается соотношение между амплитудами колебаний скоростей движения частиц падающей волны  $v_0$  и результирующей волны  $v_1$  (см. рис. 6):

$$v_1/v_0 = (Z_{23}^+ Z_{21}^- \psi + Z_{32}^- Z_{12}^+) / (Z_{32}^+ Z_{12}^- \psi + Z_{32}^- Z_{21}^+). \quad (2)$$

Здесь  $Z_{in}^\pm = Z_i \pm Z_n$ , где  $i, n = 1, 2, 3$ ;  $Z_1$  и  $Z_3$  — импеданс для сдвиговой акустической волны материалов преобразователя и поглотителя тепла соответственно. При анализе можно пренебречь затуханием звука в этих материалах и учесть, что  $Z_2 =$

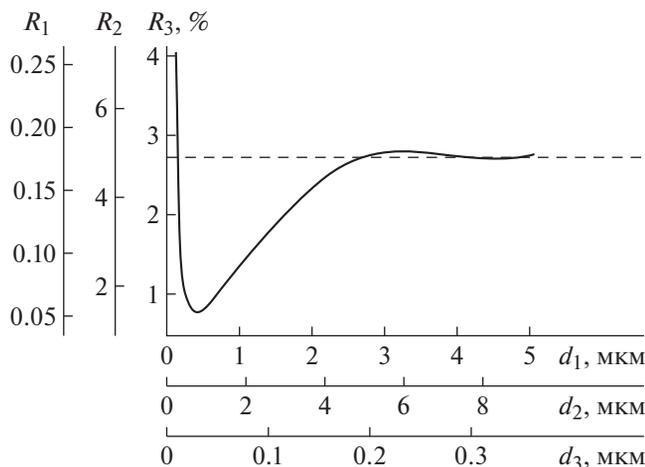


Рис. 8. Потери  $R$  акустической энергии в жидкостном слое в зависимости от толщины зазора  $d$  для: этиленгликоля ( $R_1$ ), глицерина ( $R_2$ ) и воды ( $R_3$ ). Штриховая линия – значение  $R$  при  $d \rightarrow \infty$ .

$= (1 + j)(G\rho\omega/2)^{1/2}$  – сдвиговой импеданс жидкости;  $\omega$  – угловая частота звука;  $G$  и  $\rho$  – сдвиговая вязкость жидкости и ее плотность;  $\psi = \exp[2kd(1 - j)]$  – фазовый множитель;  $k = (\rho\omega/G2)^{1/2}$  – волновой вектор сдвиговых колебаний в жидкости.

Необходимо отметить, что при анализе учитывались процессы релаксации вязкости, которые, очевидно, при определенных частотах звука будут влиять на величину коэффициента потерь  $R$  [15, 16]. Для глицерина и этиленгликоля предельная частота находится в диапазоне 500 ГГц, для воды – существенно ниже, порядка 100 ГГц [17].

На рис. 8 представлены зависимости  $R(d)$  на частоте звука 30 МГц, рассчитанные по формулам (1) и (2). Согласно рис. 8, при малых зазорах  $d$  влияние торца поглотителя тепла на величину потерь акустической энергии весьма существенно, а при  $d > 5-10$  мкм такого влияния практически нет. Абсолютная величина потеря, обусловленных акустической нагрузкой жидкостью на данной частоте, невелика для глицерина (~4%) и мала для воды (~0.2%). Наблюдаемый минимум на зависимости потерь акустической энергии от толщины слоя жидкости, по-видимому, связан с тем, что данная толщина эквивалентна изолирующему размеру  $\lambda/4$ . Однако столь малые зазоры трудны для практической реализации.

На рис. 9 показано изменение предельного значения коэффициента  $R$  при  $d \rightarrow \infty$  в зависимости от частоты.

Вода обеспечивает весьма малые дополнительные потери в частотном диапазоне вплоть до 1 ГГц, а в низкочастотном диапазоне пригодны и органические жидкости, хотя в ряде случаев могут иметь значение их диэлектрические свойства.

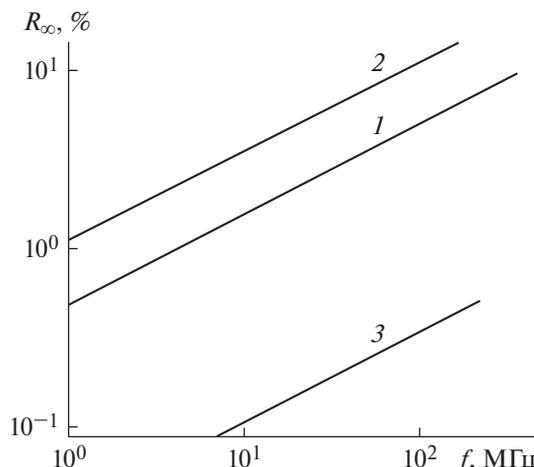


Рис. 9. Потери  $R_\infty$  акустической мощности при большой толщине жидкостного слоя в зависимости от частоты  $f$  для: этиленгликоля (1), глицерина (2), воды (3).

На рис. 10 представлены результаты измерений  $KCB$  преобразователя а.о.-ячейки со свободной тыльной стороной (кривая 1) и с жидкостным охлаждением (кривая 2) (глицерин).

Данные измерения показывают степень изменения электрического импеданса пьезопреобразователя и, следовательно, акустической мощности, вводимой в а.о.-кристалл. Из определения  $KCB$  как связи между электрической мощностью, поступающей в нагрузку (в пьезопреобразователь), и отраженной следует, что в данном частотном диапазоне дополнительный “отток” акустической мощности в поглотитель тепла не превышает 4%, что достаточно хорошо согласуется с проведенным расчетом.

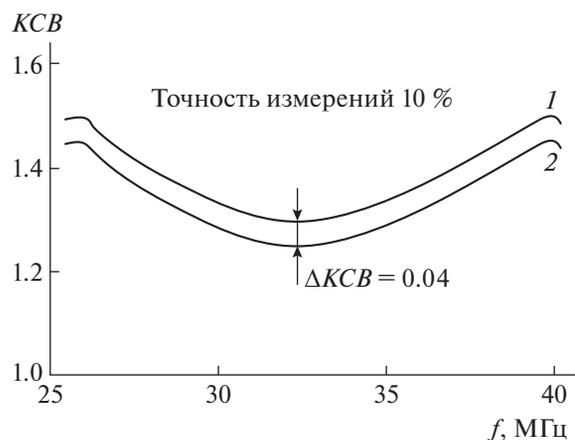
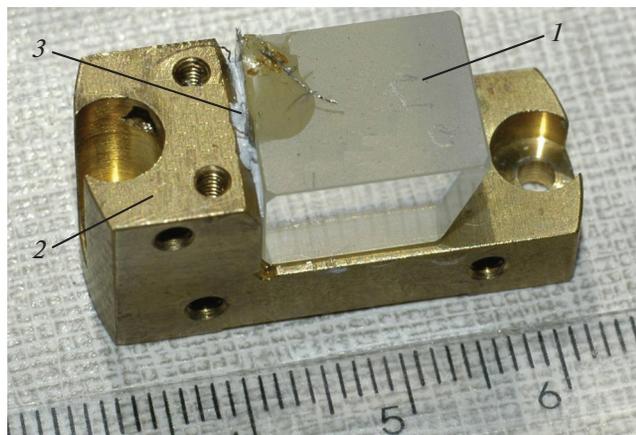
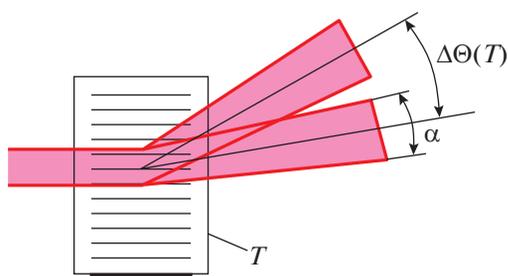


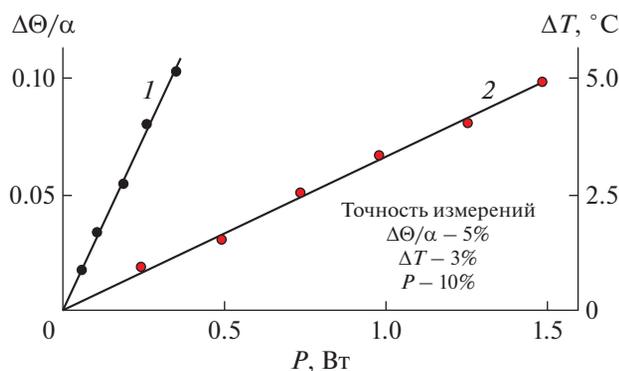
Рис. 10. Изменение  $KCB$  в зависимости от частоты для свободной тыльной поверхности пьезопреобразователя (1) и для преобразователя с жидкостным охлаждением (2).



**Рис. 11.** Внешний вид а.о.-ячейки с жидкостным отводом тепла от кристалла  $\text{TeO}_2$ . 1 – кристалл  $\text{TeO}_2$ ; 2 – латунный держатель; 3 – жидкостный контакт (глицерин).



**Рис. 12.** Схема дифракции.  $\Delta\Theta(T)$  – девиация угла дифракции при изменении температуры,  $\alpha$  – его угловая расходимость,  $T$  – температура а.о.-кристалла.



**Рис. 13.** Изменение угла дифракции в зависимости от подводимой к а.о.-ячейке электрической мощности: 1 – тыльная сторона преобразователя свободна, 2 – тыльная сторона с жидкостным теплоотводом. По левой оси отложено относительное изменение угла дифракции, по правой – изменение температуры кристалла  $\text{TeO}_2$ .

#### 4.1. Конструкция и параметры а.о.-ячейки

Конструкция разработанной а.о.-ячейки представлена на рис. 11.

Кристалл  $\text{TeO}_2$  (1) приклеен к латунному держателю 2 так, что между торцом пьезопреобразователя и вертикальной стеной держателя образуется зазор  $d = 5\text{--}10$  мкм. Зазор заполнен глицерином, имеющим малое давление насыщающего пара (невывсыхающая жидкость) и высокую температуру кипения, для создания жидкостного контакта 3.

Использовался а.о.-кристалл  $\text{TeO}_2$  с дифракцией на медленной акустической волне, распространяющейся под углом  $6^{\circ}$  к кристаллографической оси [110]. Преобразователь из  $\text{LiNbO}_3$  имел длину 3 мм и высоту 7 мм. В качестве источника света использовался волоконный лазер с длиной волны  $\lambda = 1.06$  мкм, с параметром  $M^2 = 1.05$ . На рис. 12 показаны измеряемые параметры световых лучей.

Следует отметить, что измерялось относительное число положений – отношение  $\Delta\Theta(T)/\alpha$  как величина, имеющая практическое значение. Измерения проводились в зависимости от подводимой мощности электрического сигнала к а.о.-ячейке на частоте 42 МГц, результаты представлены на рис. 13. Видно, что без теплоотвода влияние нагрева пьезопреобразователя существенно, что приводит к значительному изменению угла дифракции. В то же время использование теплоотвода значительно (примерно в 5 раз) снижает данный эффект, и во всем рабочем диапазоне при мощности управляющего сигнала 1.5 Вт нагрев не превышает  $5^{\circ}\text{C}$ , что приводит к относительному изменению положения дифрагированного луча  $\Delta\Theta/\alpha$  не более чем на 0.1. Измерения показали, что стабильный непрерывный режим работы а.о.-ячейки сохраняется при интенсивностях акустической волны более  $20$  Вт/см $^2$ .

## 5. ВЫВОДЫ

1. Предложен метод изготовления широкополосных а.о.-устройств на основе кристалла  $\text{TeO}_2$  и пьезопреобразователя из  $\text{LiNbO}_3$  с использованием олова в качестве согласующего акустического слоя между ними. Оловянный согласующий слой наносится гальваническим путем. В процессе роста согласующего слоя осуществляется контроль электрических параметров преобразователя. Установлены количественные критерии окончания технологического процесса роста слоя: соотношение частот резонансных пиков и величин активной части импеданса низкочастотного и высокочастотного. Метод акустического согласования имеет общий характер и применим к другим акустическим и а.о.-материалам.

2. Предложен метод отвода тепла от преобразователя а.о.-ячейки, позволяющий существенно повысить уровень управляющей акустической мощности, вводимой в а.о.-ячейку. В основе метода — использование тонкого слоя жидкости между тыльной стороной пьезопреобразователя и поглотителем тепла, что возможно в силу значительного различия комплексного акустического импеданса для сдвиговых колебаний жидкостей и твердого тела пьезопреобразователя. Показано, что в частотном диапазоне в несколько десятков мегагерц при толщинах жидкостного слоя, превышающих 5–10 мкм, влияние последнего на акустические свойства пьезопреобразователя незначительно и не превышает 4%. Экспериментально установлено, что использование теплоотвода примерно в 5 раз снижает тепловые эффекты, вызванные нагревом пьезопреобразователя.

3. Изготовлен широкополосный а.о.-дефлектор с полосой частот высокоэффективной дифракции 30 МГц и центральной частотой 37 МГц.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания по теме 0030-2019-0014.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Yano T., Kawabuichi M., Fukumoto A., Watanabe A.* // Appl. Phys. Letters. 1975. V. 26. № 12. P. 689.
2. *Магдич Л.Н., Молчанов В.Я.* Акустооптические устройства и их применение. М.: Советское радио, 1978.
3. *Антонов С.Н., Вайнер А.В., Проклов В.В., Резвов Ю.Г.* // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 9. С. 108.
4. *Антонов С.Н.* // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 1. С. 136.
5. *Aboujeib J., Perennou A., Quintard V., Bihan J.L.* // J. Opt. A.: Pure Appl. Opt. 2007. V. 9. P. 463.
6. *Балакшиев В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е.* Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985.
7. *Антонов С.Н.* // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 10. С. 155.
8. *Антонов С.Н.* // ПТЭ. 2019. № 3. С. 89. <https://doi.org/10.1134/S0032816219020174>
9. Акустические кристаллы. Справочник. М.: Наука, 1982.
10. *Augustine L.J., Andersen J.* // J. Acoust. Soc. Am. 1979. V. 66. № 3. P. 629. <https://doi.org/10.1121/1.383687>
11. *Антонов С.Н.* // Акустический журнал. 2018. Т. 64. Вып. 4. С. 432. <https://doi.org/10.1134/S0320791918040019>
12. *Антонов С.Н., Таешников А.Б.* // Акустический журнал. 1991. Т. 37. Вып. 5. С. 837.
13. *Михеев М.А.* Основы теплопередачи / Под ред. М.А. Михеева. М.: Энергия, 1973.
14. *Бреховских Л.М., Гордин О.А.* Акустика слоистых сред. М.: Наука, 1989.
15. *Рощина Г.Л., Юрилова Д.К., Кинзерская Г.П., Руденко А.П.* Исследование гиперзвуковых свойств жидкостей // Межведомственный научный сборник. Физика жидкого состояния. Вып. 3. Киев: Вища школа, 1975. Т. 3. С. 112.
16. *Литовиц Т., Дэвис К.* Структурная и сдвиговая релаксация в жидкостях. Физическая акустика / Под ред. У. Мезона. Т. 2. Ч. А. М.: Мир, 1968.
17. *Красильников В.А., Крылов В.В.* Введение в физическую акустику. М.: Наука, 1984.