

АКУСТООПТИЧЕСКИЙ ДЕФЛЕКТОР С ОТВОДОМ ТЕПЛА ОТ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПРИ АКУСТИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ ТЕПЛОТВОДА

© 2019 г. С. Н. Антонов*

Фрязинский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, пл. Введенского 1, г. Фрязино, Московская обл., 141190 Россия

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

Поступила в редакцию 29.10.2018 г.

После доработки 29.03.2019 г.

Принята к публикации 07.05.2019 г.

Предложен метод отвода тепла от преобразователя акустооптического дефлектора без существенно акустического демпфирования. Тыльная поверхность преобразователя и поверхность поглотителя тепла находятся в контакте через тонкий акустически изолирующий слой жидкости. Метод основан на значительном различии комплексного акустического импеданса для сдвиговых колебаний жидкостей и твердого тела (пьезопреобразователя) при хорошей передаче тепла через жидкость. В эксперименте достигнут непрерывный режим работы акустооптического дефлектора при интенсивностях акустической волны более 20 Вт/см^2 . Создан акустооптический дефлектор, работающий в режиме, в котором индекс фазовой модуляции при брэгговской дифракции достигает 3π при подводимой непрерывной управляющей электрической мощности 3 Вт. Параметры дефлектора на длине волны света 1.06 мкм: эффективность дифракции более 90% в частотной полосе 25 МГц и при абсолютном угле сканирования 40 мрад.

Ключевые слова: анизотропная акустооптическая дифракция, акустооптический дефлектор, пьезопреобразователь, акустическое согласование, акустические свойства жидкости

DOI: 10.1134/S0320791919050034

ВВЕДЕНИЕ

Управление положением лазерного луча — важная техническая задача, методы решения которой требуют постоянного совершенствования. Световые дефлекторы (сканеры) основаны на различных физических принципах и используются в системах лазерного формирования изображений, переключения каналов при оптической передаче данных, устройствах навигации и позиционирования элементов конструкций и др. Акустооптические (АО) дефлекторы (АОД) обладают рядом важных свойств. Они обеспечивают управление интенсивным лазерным излучением с плотностью мощности несколько кВт/см^2 , их отличает высокое быстродействие вплоть до сотен наносекунд, отсутствие механически перемещаемых элементов, малые вносимые световые потери не более нескольких процентов, а также небольшие габариты и вес.

Основным материалом АОД является монокристалл парателлуриата (TeO_2). Кристалл обладает феноменально большой величиной АО качества, прозрачностью в широком диапазоне длин волн света от 0.38 до 4.4 мкм и высокой лучевой

стойкостью, а также развитой технологией роста и обработки больших однородных образцов (кубик более 20 мм). Оптическая и акустическая анизотропия данного кристалла определяет важные особенности работы дефлекторов. Теория работы анизотропных АОД на кристалле TeO_2 и ряд практически интересных реализаций изучены и описаны весьма полно [1–7].

Предельные параметры АО устройств, как правило, ограничены максимальной подводимой к преобразователю высокочастотной электрической мощностью (RF). Например, частотная полоса АОД и быстродействие АО модуляторов увеличиваются при уменьшении длины взаимодействия света и звука (длины преобразователя), что требует увеличения управляющей мощности звука. При этом превышение допустимой RF мощности приводит к нестабильности параметров приборов, а в крайнем случае к выходу их из строя.

Цели и задачи данной работы:

1) разработка метода отвода тепла от пьезопреобразователя для обеспечения возможности под-

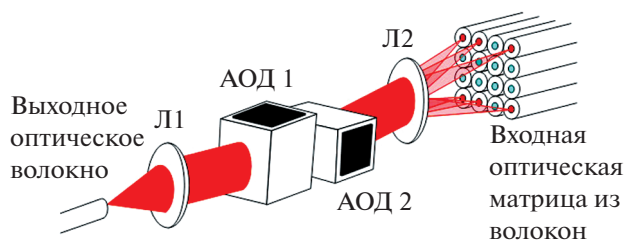


Рис. 1. Принципиальная схема АО переключателя волоконно-оптических каналов.

вода к пьезопреобразователю высокой RF мощности без возникновения тепловых эффектов;

2) изучение температурной зависимости основных параметров АОД, определение тепловых ограничений;

3) разработка эффективного прибора сканирования света;

4) создание образца АОД на базе данного метода.

Соответственно, работа состоит из следующих разделов:

1) формулировка и анализ проблемы отвода тепла в АО приборах на примере АО переключателя волоконно-оптических каналов;

2) описание метода отвода тепла от преобразователя АОД с использованием промежуточного жидкостного слоя;

3) разработка экспериментального образца АОД, описание методики измерений, экспериментальной установки, изложение результатов измерений;

4) исследование характеристик разработанного АОД с жидкостным тепловым контактом.

1. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ АКУСТО-ОПТИЧЕСКОГО КРИСТАЛЛА НА ПАРАМЕТРЫ ДЕФЛЕКТОРА

В данном разделе на примере АО переключателя волоконных каналов, изображенного на рис. 1 [8], иллюстрируется влияние температурной нестабильности на характеристики устройства в целом.

Переключатель предназначен для оптического соединения (адресации) одного входного канала с N выходными (алгоритм $1 \times N$) с помощью двухкоординатного дефлектора, состоящего из двух секций АОД 1 и АОД 2.

Рис. 2 показывает особенности ввода лазерного излучения в матрицу световодов. На рисунке d – апертура световедущей жилы световода, D – расстояние между центрами соседних световодов. Каждому адресуемому элементу матрицы соответствует определенный дифракционный угол отклонения излучения на выходе дефлекторов

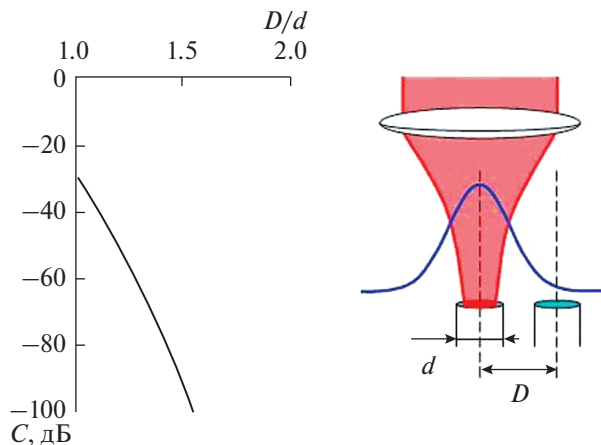


Рис. 2. Зависимость паразитной засветки C от диаметра волокна и расстояния между волокнами при вводе гауссова пучка в волокно.

$\Theta = f\lambda/v$, где f – частота ультразвука в АОД, λ – длина волны света, v – скорость звука в TeO_2 .

Известно, что изменение скорости звука из-за температуры приводит к изменению угла Θ . В силу пропорциональности координатного смещения ΔD угловой девиации $\Delta\Theta$ изменение температуры вызовет падение мощности в адресуемом световоде и увеличение паразитного проникновения в один из соседних. Температурные механизмы изменения скорости звука в АО кристалле заключаются в следующем [9, 10]. Первый механизм – это изменение температуры окружающей среды. Второй – поглощение ультразвука при его распространении в теле АО кристалла. Как установлено в [11], коэффициент поглощения медленной акустической моды в TeO_2 описывается выражением $\alpha = \alpha_0(f/f_0)^{1,9}$, где $\alpha_0 = 2.4$ дБ/см, $f_0 = 100$ МГц. Из соотношения следует, что до частот 50 МГц, на которых работает создаваемый дефлектор, затухание звука незначительно. Третий механизм – выделение тепла в АО кристалле, связанное с нагревом пьезопреобразователя и поглотителя ультразвука. Этот механизм связан с параметрами конкретного АО устройства: частотой ультразвука, размерами АО кристалла и преобразователя, технологией акустического контакта. На практике потери при преобразовании из электрического сигнала в звуковой, а, следовательно, и уровень выделяемого тепла, имеют величину 2–5 дБ. В частности, в созданном дефлекторе эти потери равны 2 дБ. Таким образом, основным влияющим на температуру АОД фактором, ограничивающим его параметры, можно считать именно третий эффект, степень влияния которого определяется величиной предельной подводимой к АОД мощности.

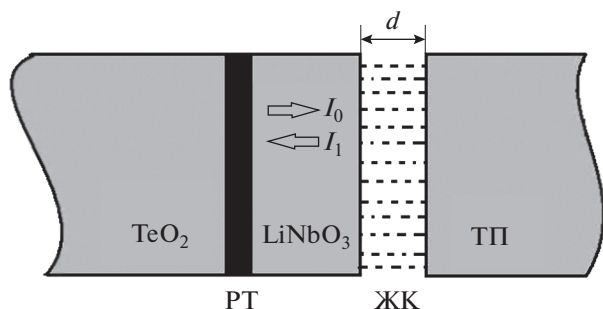


Рис. 3. Схема АО ячейки. РТ – контакт между преобразователем из LiNbO_3 и АО кристаллом, ЖК – жидкостной контакт, ТП – тело поглотителя тепла, d – толщина теплопроводящего слоя.

Помимо зависимости угла дифракции (рассеяния) от температуры, имеет место и изменение уровня акустической мощности, вводимой в АО кристалл, что будет также описано ниже.

2. ЖИДКОСТНАЯ АКУСТИЧЕСКАЯ ИЗОЛЯЦИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ И ПОГЛОТИТЕЛЯ ТЕПЛА

Данный раздел, основной в настоящей работе, посвящен разработанному методу отвода тепла от преобразователя АОД без существенного акустического демпфирования теплоотводом.

Ниже рассматривается типичный вариант АО взаимодействия, когда в кристалле TeO_2 дифракция происходит на медленной сдвиговой акустической моде, для которой акустический импеданс равен $Z = 3.6 \times 10^5 \text{ г/с см}^2$, тогда как импеданс пьезопреобразователя из LiNbO_3 равен $21.4 \times 10^5 \text{ г/с см}^2$.

Охлаждение преобразователя путем контакта тыльной его стороны с поглотителем тепла из меди, алюминия и т.д. не эффективно по следующей причине. Импеданс меди равен $20.2 \times 10^5 \text{ г/с см}^2$, а алюминия $8.4 \times 10^5 \text{ г/с см}^2$. Поскольку импеданс пьезопреобразователя намного ближе к импедансу поглотителя тепла, чем к импедансу TeO_2 , то звуковая энергия, в основном, будет распространяться именно в тело поглотителя, а не в АО кристалл. Идея предложенного метода охлаждения преобразователя состоит в том, чтобы соприкосновение тыльной стороны пьезопреобразователя и поглотителя тепла осуществлялось через слой жидкого контакта [12]. Следует ожидать, что значительное различие комплексного импеданса для сдвиговых колебаний жидкости и твердого тела (пьезопреобразователя) обеспечит акустическую изоляцию последнего от поглотителя. При этом будет обеспечена хорошая передача тепла в поглотитель. На рис. 3 показана схема такой АО ячейки.

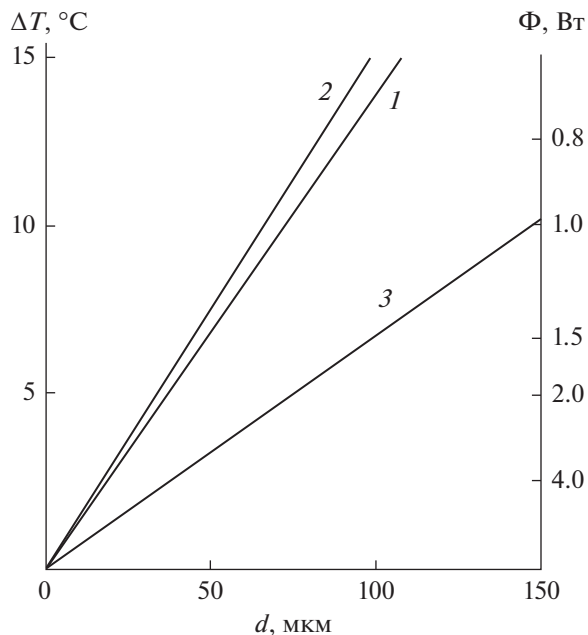


Рис. 4. Зависимость от толщины слоя жидкостного контакта d перепада температур ΔT при заданном тепловом потоке ($\Phi = 1 \text{ Вт}$) и мощности теплового потока Φ при фиксированной разности температур ($\Delta T = 10^\circ\text{C}$) для разных жидкостей: 1 – этиленгликоль, 2 – глицерин, 3 – вода.

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 Φ – мощность теплового потока при разности температур ΔT на границах жидкости, χ – коэффициент теплопроводности жидкости, S – поперечное сечение жидкостного слоя.

На рис. 3 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 $S = 3 \times 7 \text{ мм}$.

Для анализа были выбраны три известные жидкости, использование которых не представляет сложности и параметры которых хорошо известны: этиленгликоль, глицерин и вода. Из графиков рис. 4 видно, что для переноса от пьезопреобразователя тепловых потоков мощностью несколько ватт при разности температур в несколько десятков градусов между пьезопреобразователем из ниобата лития и поглотителем тепла слой жидкости должен быть тонким, не более десятков микрон. Для таких толщин наряду с учетом поглощения звука жидким слоем следует оценить влияние процессов, связанных с отражением звуковой волны от торца поглотителя.

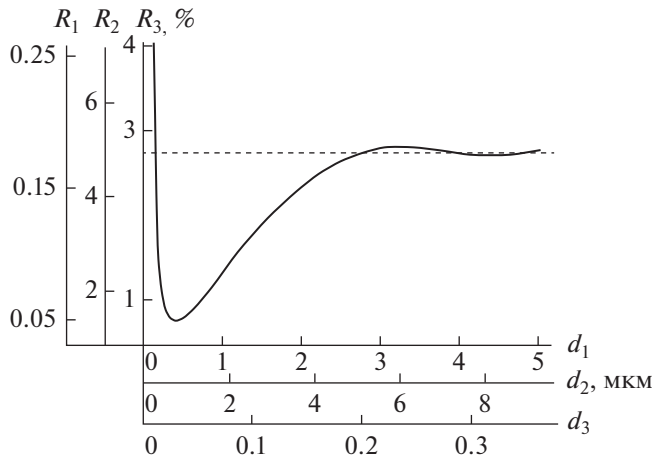


Рис. 5. Потери акустической энергии в жидкостном слое в зависимости от толщины зазора d : R_1 – этиленгликоль, R_2 – глицерин и R_3 – вода. Пунктир – значение R при $d \rightarrow \infty$.

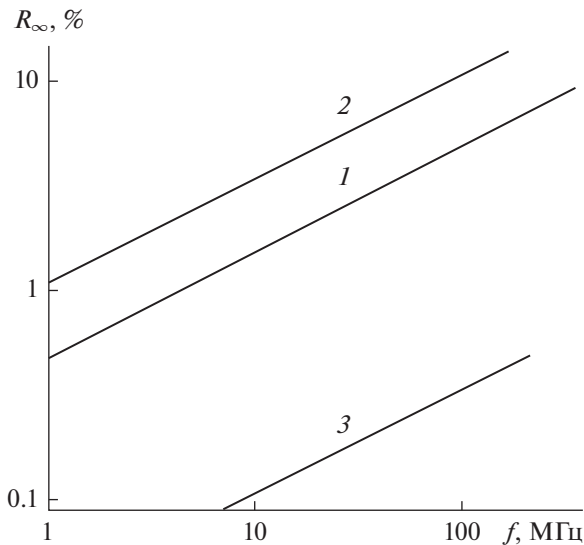


Рис. 6. Потери акустической мощности при большой толщине жидкостного слоя R_∞ в зависимости от частоты f : 1 – этиленгликоль, 2 – глицерин, 3 – вода.

Рассмотрим уменьшение интенсивности звука за счет влияния системы жидкость–торец поглотителя, а именно, величину потерь R :

$$R = 1 - I_1/I_0 = 1 - v_1^2/v_0^2, \tag{1}$$

где I_1 и I_0 – амплитуды волн в соответствии с рис. 3, v_0 и v_1 – акустические скорости падающей и отраженной волн, соответственно.

При использовании импедансной методики [14] записывается соотношение между амплитудой скорости движения частиц падающей

волны $I_0 - v_0$ и амплитудой скорости результирующей волны $I_1 - v_1$ (рис. 3):

$$v_1/v_0 = \frac{Z_{23}^+ Z_{21}^- \Psi + Z_{32}^- Z_{12}^+}{Z_{32}^+ Z_{12}^- \Psi + Z_{32}^- Z_{21}^+}, \tag{2}$$

где $Z_{in}^\pm = Z_i \pm Z_n$, $i, n = 1, 2, 3$, Z_1 и Z_3 – импедансы для сдвиговой акустической волны материалов преобразователя и поглотителя тепла соответственно. При анализе затуханием звука в этих материалах можно пренебречь и учесть, что $Z_2 = (1 + j)(G\rho\omega/2)^{1/2}$ – сдвиговый импеданс жидкости, ω – угловая частота звука, G и ρ – сдвиговая вязкость жидкости и ее плотность, j – мнимая единица, $\Psi = \exp[2kd(1 - j)]$ – фазовый множитель, $k = (\rho\omega/2G)^{1/2}$ – 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. 5 представлены зависимости $R(d)$ на частоте звука 30 МГц, рассчитанные по формулам (1) и (2). Из этого рисунка видно, что при малых зазорах d влияние торца поглотителя тепла весьма существенно, а при d , больших 5–10 мкм, торец поглотителя практически не влияет на величину потерь акустической энергии. Абсолютная величина потерь, связанных с акустической нагрузкой жидкостью на данной частоте, невелика для глицерина (~4%) и мала для воды (~0.2%). Наблюдаемый минимум потерь 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. 6 даны зависимости от частоты предельного значения коэффициента R при $d \rightarrow \infty$. Вода обеспечивает весьма малые дополнительные потери в частотном диапазоне вплоть до частот 1 ГГц, а в низкочастотном диапазоне пригодны и органические жидкости, хотя в ряде случаев могут иметь значение их диэлектрические свойства.

На рис. 7 представлены результаты измерений коэффициента стоячей волны (КСВ) преобразователя АОД со свободной тыльной стороной 1 и с жидкостным охлаждением 2 (глицерин). Данные измерения показывают степень изменения электрического импеданса пьезопреобразователя и, соответственно, изменение величины акустической мощности, вводимой в АО кристалл. Из определения КСВ как связи между RF мощностью, поступающей в нагрузку (в пьезопреобразователь), и отраженной мощностью следует, что

в данном частотном диапазоне дополнительный отток акустической мощности в поглотитель тепла не превышает 4%, что достаточно хорошо согласуется с проведенным расчетом.

3. КОНСТРУКЦИЯ ДЕФЛЕКТОРА, МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В данном разделе представлена конструкция АОД с жидкостным охлаждением, описана методика измерений, экспериментальная установка, приведены результаты измерений. Показано существенное снижение температурной нестабильности АОД при использовании жидкостного отвода тепла.

На рис. 8 представлена фотография АОД. Кристалл TeO_2 1 приклеен к латунному держателю 2 и через жидкостной контакт 3 торец пьезопреобразователя размещается на расстоянии $d = 5-10$ мкм от вертикальной стенки держателя. В качестве жидкостного контакта использовался глицерин, имеющий малое давление насыщающего пара при высокой температуре, так как глицерин – не высыхающая жидкость.

В работе использовался дефлектор TeO_2 с дифракцией на медленной акустической волне, распространяющейся под углом 6° к кристаллографической оси [110]. Преобразователь из LiNbO_3 имел следующие размеры: длина 3 мм, высота 7 мм. Технология акустического согласования преобразователя и АО кристалла обеспечивала широкую полосу частот ультразвука 25–55 МГц [18].

Источником света являлся волоконный лазер с длиной волны $\lambda = 1.06$ мкм и параметром $M_2 = 1.05$. На рис. 9 показаны световые пучки, параметры которых указаны на рисунке. Здесь D – апертура света на входе АОД, α – его угловая расходимость, $\Delta\theta(T)$ – девиация угла отклонения при изменении температуры, $v(T)$ – скорость звука, T – температура АО кристалла, P_0 и P_d – мощности падающего и дифрагированного пучков света, соответственно. Следует отметить, что при измерениях оценивалось число адресуемых положений $\Delta\theta(T)/\alpha$ как величина, имеющая практическое значение. Действительно, абсолютное значение $\Delta\theta(T)$, а следовательно, и смещение светового пятна на проецируемой поверхности, в частности, на волоконно-оптической матрице, не является определяющим. И именно отношение величины смещения луча к размеру единичного элемента матрицы имеет физическое и практическое значение, см. рис. 2.

Схема измерительной установки представлена на рис. 10. Здесь указаны: ЛЗ – лазер, Т × 3 – телескоп, обеспечивающий трехкратное увеличение линейной апертуры пучка, АОД – дефлектор, Л – линза, ВР – измеритель пространственного

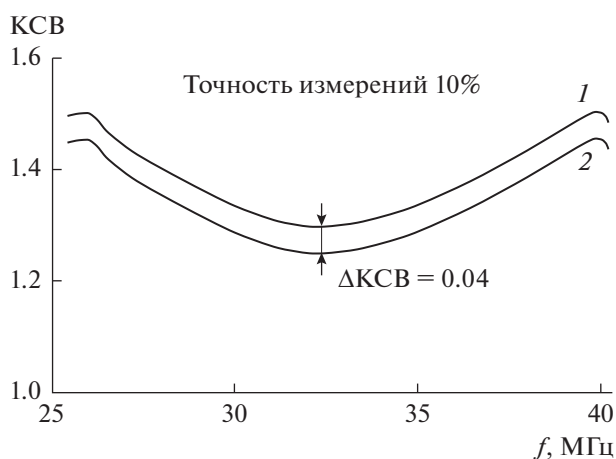


Рис. 7. Результаты измерения КСВ, 1 – свободная тыльная поверхность пьезопреобразователя, 2 – преобразователь с жидкостным охлаждением.

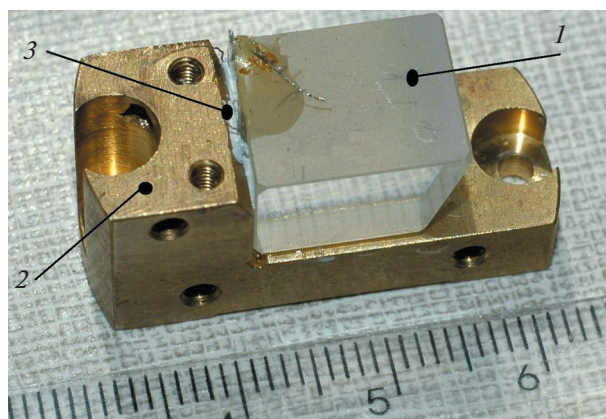


Рис. 8. Внешний вид акустооптического дефлектора на кристалле парателлурита.

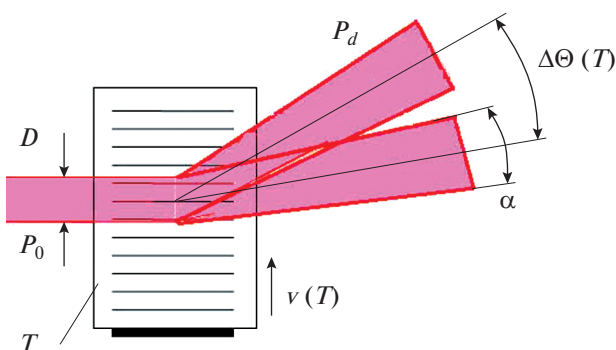


Рис. 9. Обозначения измеряемых параметров при сканировании света.

профиля оптического излучения. Расходимость света, падающего на АОД, – 1 мрад.

На первом этапе исследования проводился внешний нагрев и охлаждение кристалла TeO_2 .

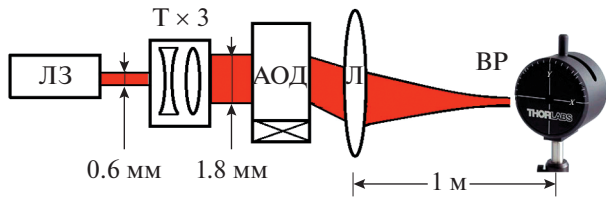


Рис. 10. Схема измерительной установки.

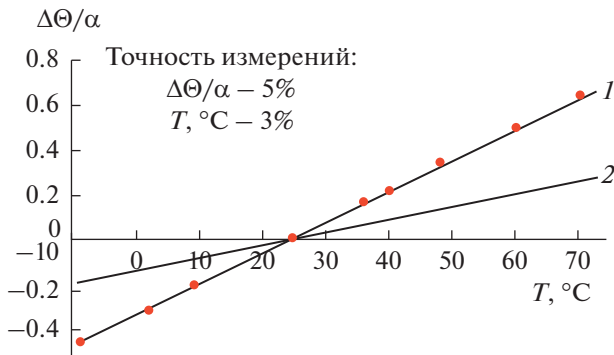


Рис. 11. Экспериментальные и расчетные зависимости угла дифракции от температуры: 1 – измерения с жидкостным отводом тепла, 2 – данные расчета по работе [19].

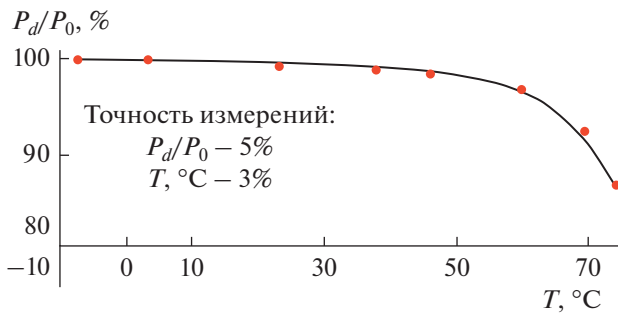


Рис. 12. Температурная зависимость коэффициента дифракции. P_d/P_0 – отношение мощности дифрагированного света к падающему.

Измерению подлежали температурная зависимость положения дифрагированного луча в фокальной плоскости линзы и его мощность. Измерения проводились при фиксированной частоте электрического сигнала 42 МГц, небольшой подводимой RF мощности (0.2 Вт), что исключало внутренний нагрев АО ячейки.

Данные рис. 11 показывают результаты измерений тепловой девиации угла дифракции $\Delta\theta(T)/\alpha$. Из экспериментальных данных следует, что в диапазоне температур от -10 до $+70^\circ\text{C}$ величина $\Delta\theta(T)/\alpha = 0.014\Delta T$, где ΔT – изменение температуры. Линия 2 на рисунке представляет данные расчета, проведенного для сравнения с результатами

работы [19], в которой использована следующая температурная зависимость скорости медленной акустической моды в кристалле TeO_2 :

$$v(T) = v_0 + v'(T - T_0),$$

где $v_0 = 6.571 \times 10^4 \text{ см/с}$, $v' = 7.67 \text{ см/с К}^{-1}$, $T_0 = 20^\circ\text{C}$.

Причина различия измеренных и расчетных данных, по-видимому, заключается в том, что при расчетах не были учтены температурные зависимости показателя преломления, фотоупругой константы, возникающие механические напряжения кристалла TeO_2 и другие факторы.

На рис. 12 представлены изменения величины максимальной эффективности дифракции в дефлекторе в зависимости от внешней температуры. Данные рис. 12 показывают, что до температуры около 60° эффективность дифракции практически неизменна. При дальнейшем увеличении температуры наблюдается спад в дифракционной эффективности. Причина, по-видимому, заключается в том, что акустический контакт на базе эпоксидного компаунда с температурой меняет физические и акустические свойства.

На рис. 13 представлены результаты второго этапа измерений, когда нагрев кристалла TeO_2 был обусловлен выделением тепла на пьезопреобразователе. На данном рисунке частота управляющего сигнала была равна 42 МГц. Видно, что без теплоотвода влияние нагрева пьезопреобразователя существенно, что приводит к значительному изменению угла дифракции. В тоже 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° .

4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕФЛЕКТОРА С ИНДЕКСОМ ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ 3π

Здесь представлено одно из возможных практических применений метода отвода тепла от преобразователя дефлектора посредством жидкостного теплового контакта.

К настоящему времени разработано несколько методов расширения частотной полосы и повышения эффективности дефлекторов на кристалле TeO_2 [3, 7, 20]. В рассматриваемом ниже случае расширение функциональных возможностей дефлектора основано на использовании режима брэгговской дифракции с индексом фазовой модуляции, равным 3π .

Известно, что коэффициент дифракции $\eta = P_d/P_0$ описывается формулой [2, 6]

$$\eta = \frac{\gamma^2}{\gamma^2 + \chi^2} \sin^2 \sqrt{\frac{\gamma^2 + \chi^2}{4}}, \quad (3)$$

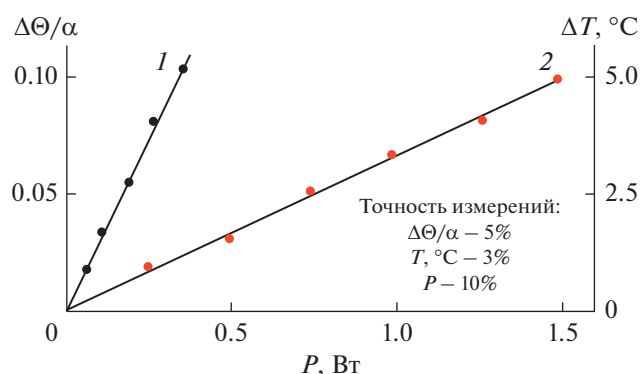


Рис. 13. Изменение угла дифракции в зависимости от подводимой к АОД RF мощности. Левая ось – относительное изменение угла дифракции, правая – изменение температуры кристалла TeO_2 : 1 – тыльная сторона преобразователя свободна, 2 – тыльная сторона с жидкостным теплоотводом.

где γ – индекс фазовой модуляции, а χ – расстройка брэгговского синхронизма. Соответственно, максимум коэффициента дифракции $\eta = 1$ соответствует отсутствию расстройки ($\chi = 0$). При этом максимальная интенсивность дифрагированного света реализуется при разных значениях индекса фазовой модуляции $\gamma = \pi, 3\pi$ и т.д.

Поскольку при работе с индексом модуляции $\gamma = 3\pi$ требуется почти десятикратное увеличение мощности звука по сравнению с классическим режимом $\gamma = \pi$, данный режим дифракции практически не использовался. Однако при $\gamma = 3\pi$ проявляется интересная особенность АО взаимодействия – модификация углового спектра дифрагированного излучения [21]: при значительной расходимости падающего оптического излучения угловой спектр дифрагированного света оказывается намного шире, чем при $\gamma = \pi$, что представляет практический интерес.

Для проведения дальнейших исследований был изготовлен АОД, показанный на рис. 8, со следующими характеристиками: длина преобразователя – 6 мм, ширина – 1.5 мм, толщина – 55 мкм и с использованием жидкостного охлаждения. На рис. 14 приведены расчетные зависимости коэффициента дифракции от частоты звука.

Результаты расчета показывают, что в режиме $\gamma = 3\pi$ высокая эффективность дифракции, близкая к 100%, сохраняется в значительной полосе частот (от 25 до 50 МГц), что на длине волны света 1.06 мкм обеспечивает угол сканирования света 40 мрад.

Для проведения экспериментов установка рис. 10 была модернизирована, при этом телескоп не использовался, и световой пучок, падающий на АОД, имел диаметр 0.8 мм и полную расходимость 2.4 мрад, а линза 1 имела фокусное расстояние 100 мм. Данные параметры пучка

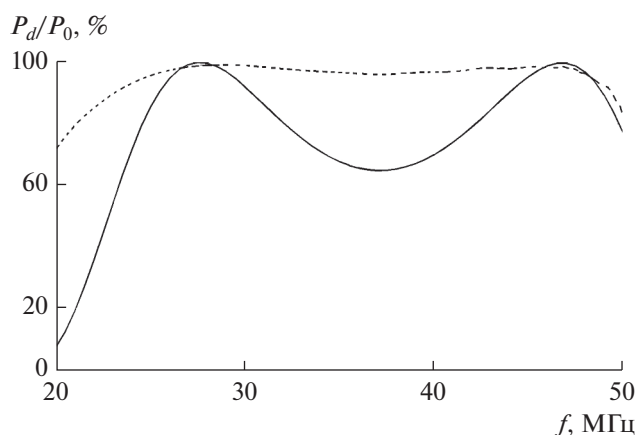


Рис. 14. Зависимость коэффициента дифракции от частоты звука. Непрерывная кривая относится к дефлектору в режиме $\gamma = \pi$, а пунктир соответствует случаю $\gamma = 3\pi$ при амплитуде звука, увеличенной в 3 раза.

выбирались с таким расчетом, чтобы полное поле сканирования дефлектора не превышало апертуры измерителя профиля.

Рис. 15 показывает результаты измерений. Кривая 1 соответствует режиму $\gamma = \pi$, причем подводимая к АОД мощность составила около 300 мВт, а кривая 2 – режиму $\gamma = 3\pi$, когда подводимая к АОД мощность составила примерно 3 Вт. С учетом потерь преобразования электрической мощности в звук (2 дБ), интенсивность акустической волны достигала порядка 20 Вт/см². При этом нагрев кристалла TeO_2 составил 10°, что слабо сказывалось на угле отклонения света, т. к. приводило к относительному смещению $\Delta\theta/\alpha = 0.2$.

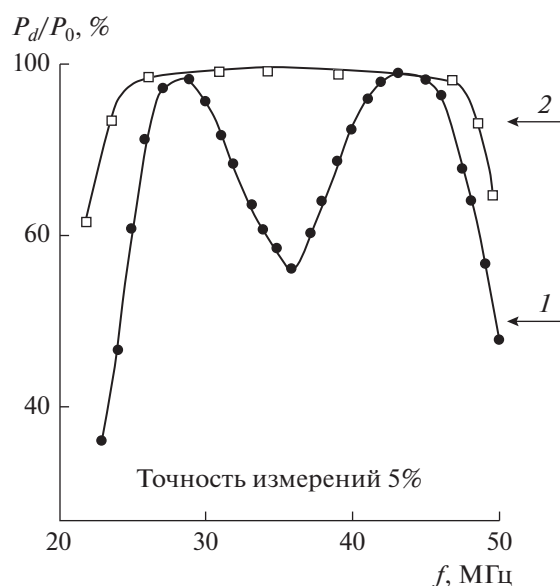


Рис. 15. Результаты измерения эффективности дифракции АОД.

Из рис. 15 видно, что в режиме $\gamma = 3\pi$ в центре диапазона сканирования отсутствует провал эффективности дифракции. Более того, в непрерывном режиме работы преобразователя эта эффективность на длине волны света 1.06 мкм в полосе частот около 25 МГц не опускалась ниже 90%. При указанных параметрах угол сканирования света достигал величины 40 мрад.

Отметим, что АОД на базе описанной технологии в настоящее время используются в системах лазерного формирования (вывода) изображения индивидуальной страницы заграничных паспортов РФ.

ВЫВОДЫ

1. Предложен, исследован и практически реализован метод отвода тепла от преобразователя АОД при высоком уровне управляющей акустической мощности, вводимой в АО кристалл. Основой метода является 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, больших 5–10 мкм, его влияние на акустические свойства пьезопреобразователя незначительно и не превышает 4%.

2. Разработана конструкция АОД с жидкостным охлаждением пьезопреобразователя. Экспериментально обоснован способ существенного повышения эффективности работы дефлектора и расширения его углового диапазона сканирования в режиме с индексом фазовой модуляции $\gamma = 3\pi$. Коэффициент дифракции составил не менее 90% в диапазоне углов сканирования 40 мрад на длине волны 1.06 мкм.

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.* TeO₂ anisotropic Bragg light deflector without mid-band degeneracy // *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. 111 с.
3. *Антонов С.Н., Вайнер А.В., Проклов В.В., Резвов Ю.Г.* Расширение углового диапазона сканирования акустооптического дефлектора с двухэлементным фазированным пьезопреобразователем // *ЖТФ*. 2013. Т. 83. № 9. С. 108–113.
4. *Антонов С.Н.* Акустооптический дефлектор неполяризованного лазерного излучения // *ЖТФ*. 2016. Т. 86. № 1. С. 136–139.
5. *Aboujeib J., Perennou A., Quintard V., Bihan J.L.* Planar phased-array transducers associated with specific electronic command for acousto-optic deflectors // *J. Opt. A.: Pure Appl. Opt.* 2007. V. 9. P. 463–469.
6. *Балакиев В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е.* Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985.
7. *Антонов С.Н.* Акустооптический дефлектор – новый метод повышения эффективности и широкополосности // *ЖТФ*. 2016. Т. 86. № 10. С. 155–158.
8. *Antonov S., Vainer A., Proklov V., and Rezvov Y.* Switch multiplexer of fiber-optic channels based on multibeam acousto-optic diffraction // *Applied Optics*. 2009. V. 48. № 7. P. 171–181.
9. *Balakshy V.I., Voloshinov V.B., Karasev V.A., Molchanov V.Ya. and Semenov V.P.* Compensation for thermal effects in acousto-optic deflector // *Proc. SPIE*. 1995. V. 2713. P. 164–171.
10. *Манцевич С.Н., Юхневич Т.В., Волошинов В.Б.* Исследование влияния температуры на функционирование акустооптических фильтров // *Оптика и спектроскопия*. 2017. Т. 122. № 4. С. 694–700.
11. *Антонов С.Н., Кузнецова Е.В., Миргородский В.И., Проклов В.В.* Акустооптические исследования распространения медленной акустической волны в TeO₂ // *Акуст. журн.* 1982. Т. 28. В. 4. С. 433–437.
12. *Антонов С.Н., Таешников А.Б.* Акустическая изоляция пьезопреобразователя и теплоотводящего устройства акустической ячейки посредством жидкостного слоя // *Акуст. журн.* 1991. Т. 37. В. 5. С. 837–842.
13. *Михеев М.А.* Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1973. 320 с.
14. *Бреховских Л.М., Годин О.А.* Акустика слоистых сред. М.: Наука, 1989. 416 с.
15. *Рощина Г.Л., Юрилова Д.К., Кинзерская Г.П., Руденко А.П.* Исследование гиперзвуковых свойств жидкостей // *Межведомственный научный сборник. Физика жидкого состояния*. В. 3. Киев: Вища школа, 1975.
16. *Литовиц Т., Дэвис К.* Структурная и сдвиговая релаксация в жидкостях / *Физическая акустика*. Под ред. Мезона У. Т. 2. Ч. А. М.: Мир, 1968.
17. *Красильников В.А., Крылов В.В.* Введение в физическую акустику. М.: Наука, 1984.
18. *Антонов С.Н.* Акустооптический дефлектор на кристалле парателлурита с использованием широкополосного клеевого акустического контакта // *Акуст. журн.* 2017. Т. 63. № 4. С. 364–370.
19. *Морозова Е.И. и др.* Температурные поля в светозвукопроводах акустооптических устройств на основе парателлурита // *Вестник ТвГУ. Серия “Физика”*. 2015. № 1. С. 38–39.
20. *Антонов С.Н.* Акустооптический дефлектор с высокой дифракционной эффективностью и широким угловым диапазоном сканирования // *Акуст. журн.* 2018. Т. 64. № 4. С. 432–236.
21. *Антонов С.Н., Козлов М.Р., Проклов В.В.* Угловые спектры дифрагированного света при сильном акустооптическом взаимодействии // *Оптика и спектроскопия*. 1991. Т. 50. В. 4. С. 805–807.