

УДК 534.2:535.42

ВНУТРЕННИЕ ТЕПЛОВЫЕ ЭФФЕКТЫ В АКЦИАЛЬНОМ АКУСТООПТИЧЕСКОМ ДЕФЛЕКТОРЕ НА БАЗЕ ПАРАТЕЛЛУРИТА

© 2022 г. С. Н. Антонов^а, *, Ю. Г. Резвов^б, **

^аФрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, пл. Введенского 1, Московская обл., Фрязино, 141190 Россия

^бНовомосковский институт Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева, ул. Дружбы 8, Тульская обл., Новомосковск, 301665 Россия

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

**e-mail: rezvovyug@mail.ru

Поступила в редакцию 24.04.2021 г.

После доработки 19.11.2021 г.

Принята к публикации 26.05.2022 г.

Экспериментально исследована тепловая угловая девиация нулевого и рабочего порядков в аксиальном акустооптическом дефлекторе на базе парателлуриита при управляющей мощности до 6.5 Вт в непрерывном режиме. Зональные измерения (у преобразователя, в середине и у поглотителя звука) проведены при вариантах дифракции в +1 и –1 рабочий порядки и показали линейную зависимость угловой девиации от управляющей мощности. Предложено качественное описание девиации рабочего порядка как совместного действия двух факторов: 1) отклонения нулевого порядка при прохождении двух тепловых оптически более плотных призм, прилегающих к преобразователю и поглотителю звука, 2) уменьшения угла дифракции из-за роста скорости звука при нагреве кристалла. При этом неоднородность температурного поля не позволяет однозначно разделить вклады этих факторов в усредненную девиацию рабочего порядка. Показано, что технология жидкостного контакта между тыльной поверхностью пьезопреобразователя и корпусом повышает стабильность параметров дефлектора при прохождении света в зоне, прилегающей к преобразователю. Обнаружено, что при дифракции в +1 порядок между пьезопреобразователем и поглотителем существует зона с минимальной величиной тепловой девиации. Это объясняется взаимной компенсацией девиации нулевого порядка (в поле теплового оптического клина от поглотителя) и фактором увеличения скорости звука.

Ключевые слова: анизотропная акустооптическая дифракция, акустооптический дефлектор, аксиальная геометрия, парателлуриит, тепловые эффекты

DOI: 10.31857/S0320791922050057

1. ВВЕДЕНИЕ

Для управления характеристиками оптического излучения используются разные физические эффекты. Акустооптические (АО) методы основаны на модуляции оптических параметров среды в поле акустической волны [1–8]. Принципиальными достоинствами АО-приборов являются: возможность управления интенсивным лазерным излучением, высокое быстродействие, отсутствие механически перемещаемых элементов, малые вносимые световые потери, небольшие габариты и вес. В настоящее время АО-технологии применяются для модуляции добротности лазерного резонатора, селекции импульсов фемтосекундных лазеров, переключения каналов в системах волоконно-оптической связи, углового сканирования (АО-дефлекторы), формирования много-

лучевого поля при лазерном нанесении изображений, сдвига оптической частоты и других задач.

Основным материалом современных АО-приборов является парателлуриит (α -TeO₂). Этот кристалл прозрачен в диапазоне от 0.35 до 5 мкм, имеет высокую лучевую стойкость и феноменально большую величину АО качества (при дифракции на медленной сдвиговой акустической моде). Развита технология производства больших однородных кристаллов размером до 50–80 мм [9–11]. Большая акустическая анизотропия парателлуриита вызывает ряд акустических эффектов и способна заметно влиять на характеристики АО-устройств [12–18].

Существенной проблемой в АО-системах (в том числе на основе парателлуриита) является влияние тепловых эффектов на стабильность основных параметров [19–28]. В частности, этот фак-

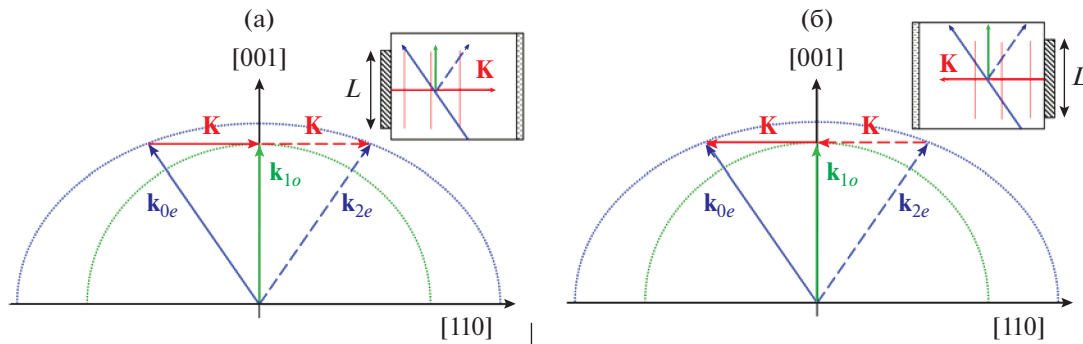


Рис. 1. Векторная диаграмма и условная схема аксиального АО-дефлектора на основе парателлуриита при дифракции (а) – в +1 и (б) – –1 порядок.

тор ухудшает качество при лазерной обработке материалов. В работе [29] исследована тепловая девиация параметров типичного неаксиального АО-дефлектора на базе парателлуриита. В этом случае волновой вектор ультразвукового пучка составляет небольшой угол ($\alpha = 6^\circ$ в цитируемой работе) с осью [110]. Так как фазовая скорость используемой звуковой моды сильно зависит от угла α , возникает явление “сноса” – отклонение направления распространения энергии от волнового вектора (при $\alpha = 6^\circ$ величина сноса равна 45°), что вынуждает увеличивать размеры кристалла TeO_2 .

Недавно показано [30], что для формирования многолучевого поля в системах лазерной обработки материалов перспективно использование аксиальной ($\alpha = 0^\circ$) геометрии АО взаимодействия в парателлуриите. Целью настоящей работы является исследование тепловой стабильности пространственных параметров аксиального АО-дефлектора на базе парателлуриита в одночастотном режиме.

2. МЕТОДЫ

2.1. Аксиальная дефлекторная геометрия в парателлуриите

При аксиальной АО-дифракции в парателлуриите звук направлен вдоль оси [110], а взаимодействующие световые волны распространяются под малыми углами к оптической оси [001]. Геометрия имеет следующие важные особенности. Во-первых, скорость используемой акустической моды уникально низкая ($v_s = 617$ м/с), что обеспечивает в этой геометрии наивысшее значение АО-качества M_2 . Во-вторых, звук распространяется без сноса, что уменьшает размер АО-устройства. Фактически, размер кристалла вдоль оси [001] определяется длиной преобразователя L . В-третьих, использование этой геометрии для углового сканирования ограничивает повторная

дифракция (двухфоновый процесс). На рис. 1 отражены эти основные особенности.

Парателлуриит является оптически активным кристаллом, поэтому вблизи оси [001] оптические моды “расщепляются”. Величина зазора между волновыми поверхностями в приосевой области почти постоянна, хотя сильно зависит от длины световой волны. Это дает возможность реализовать дефлекторную геометрию: волновые векторы звука (\mathbf{K}), падающего света (\mathbf{k}_{0e} – необыкновенная мода) и дифрагированного света ($\mathbf{k}_{\pm 1o}$ – обыкновенная мода) образуют прямоугольный треугольник в центре диапазона пропускания. На рисунке отражены два возможных варианта реализации дефлекторной геометрии, когда рабочим является +1 или –1 порядок. Для перехода от одного варианта к другому достаточно развернуть АО-дефлектор в плоскости дифракции на 180° . Повторная дифракция возникает, когда рабочий порядок направлен почти по оптической оси и между ним и следующим порядком ($\mathbf{k}_{\pm 2e}$ – необыкновенная мода) становится эффективной перекачка энергии [31]. Это приводит к падению эффективности для рабочего порядка в центре полосы пропускания.

2.2. Конструкция АО-дефлектора

Для экспериментов использовался акустооптический аксиальный дефлектор следующей конструкции (рис. 2). Звук возбуждает прямоугольный пьезопреобразователь сдвиговых колебаний из ниобата лития (LiNbO_3) с длиной $L = 5$ мм (размер по оси [001]) и шириной $H = 4$ мм. Технология акустического контакта (акустического согласования преобразователя и TeO_2) обеспечивает акустическую полосу 20–50 МГц при КСВ < 2 и потери на преобразование 2–2.4 дБ [32, 33]. Кристалл TeO_2 приклеен к латунному корпусу, вертикальная стенка держателя находится в контакте с тыльной поверхностью пьезопреобразователя через слой жидкости толщиной 5–10 мкм.

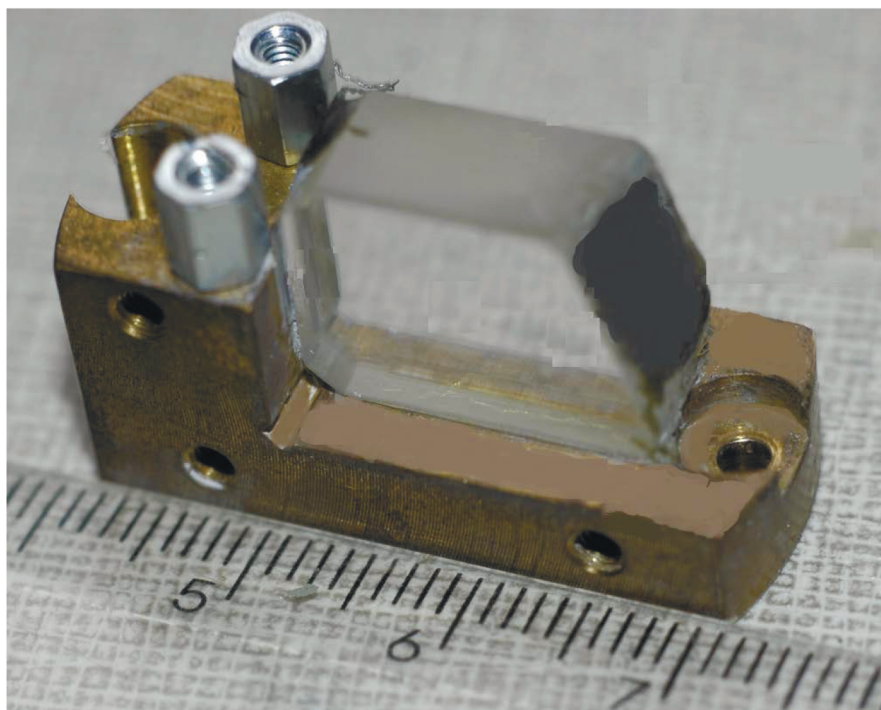


Рис. 2. Внешний вид АО-дефлектора.

Жидкостный контакт обеспечивает эффективный отвод тепла от пьезопреобразователя при его акустической изоляции [34, 35]. На противоположном торце кристалла нанесен поглотитель звука в виде эпоксидного слоя. Данная конструкция позволяет использовать АО-дефлектор в непрерывном режиме с мощностью радиосигнала до 7 Вт.

2.3. Измерительная установка

На рис. 3 представлена схема измерительной установки. Лазерный луч (длина волны $\lambda = 0.63$ мкм) на входе в АО-дефлектор имел апертуру 2.5 мм и расходимость $\Theta = 0.7$ мрад. Эксперимент проводился на фиксированной частоте звука $f = 33$ МГц, не попадающей в область эффективной повторной дифракции. С учетом геометрии взаимодействия угол (в воздухе) между падающим светом и рабочим порядком определяется соотношением $\varphi = \lambda f / v_s$, что составило в данном случае величину 34 мрад. Измеритель профиля мощности, расположенный в фокальной плоскости линзы, регистрировал диаметр светового пятна D и его смещение Δd , вызванное тепловыми эффектами. Измерения проводились для падающего и дифрагированного лучей в диапазоне подводимой непрерывной мощности управления до 6.5 Вт. По смещению пятна рассчитывалось угловое смещение $\Delta\theta$ каждого из лучей, что с учетом вариантов, представленных на рис. 1, дало четыре серии из-

мерений. Кроме того, в каждой серии для взаимодействия использовались три зоны кристалла: у преобразователя (1), в середине (2), у поглотителя звука (3). Условная схема измерений представлена на рис. 4. Знаки “+” и “-” отмечают положительную и отрицательную угловую девиацию лучей, при этом отклонение дифракционного порядка от падающего принято положительным.

В процессе измерений положения лазера и приемной аппаратуры были неизменными, менялось продольное положение дефлектора и его ориентация.

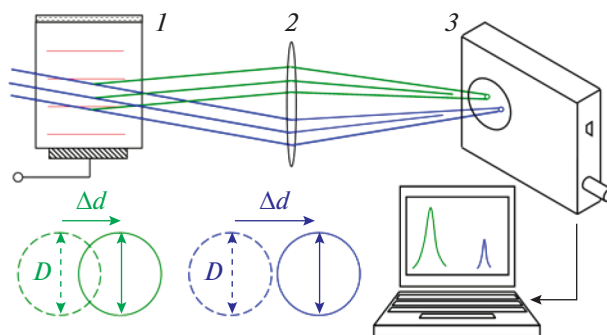


Рис. 3. Схема установки. 1 – АО-дефлектор, 2 – линза, 3 – измеритель профиля луча.

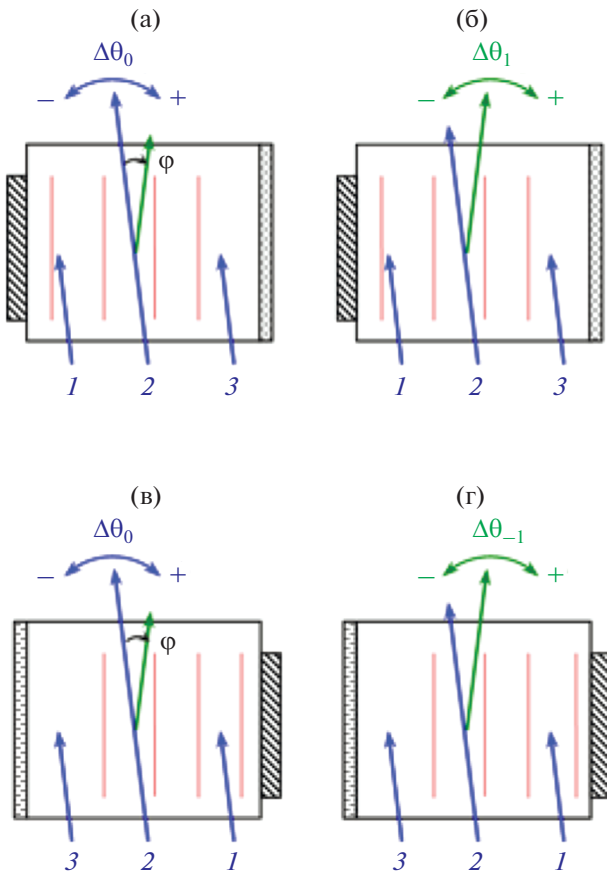


Рис. 4. (а, в) – Схема зональных измерений угловой девиации падающего и (б, г) – дифрагированного лучей при дифракции в +1 порядок (а, б) и –1 порядок (в, г).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Практически значимым является отношение углового смещения к полной расходимости света $\Delta\theta/\Theta$. Зависимость этого параметра от подводимой мощности P представлена на рис. 5.

Зональные измерения проводились с некоторой погрешностью положения, поэтому рис. 5а и 5в не являются полностью идентичными при замене знака девиации. Все представленные на рис. 5 данные хорошо аппроксимируются линейной зависимостью.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

При анализе и интерпретации экспериментальных данных будем считать, что наблюдаемые эффекты обусловлены температурной зависимостью показателей преломления и скорости звука, а также неоднородностью температурного поля в кристалле.

Значения термооптических и термоакустических коэффициентов разнятся [26, 36–42], но вполне определено в условиях эксперимента по-

казатели преломления и скорость звука растут при нагревании: $dn_{o,e}/dT > 0$, $dv_s/dT > 0$. Нагрев кристалла вызван выделением тепла у пьезопреобразователя и в поглотителе звука, при этом диссипацию звука в самом кристалле полагаем малой. Для оценки температуры в зонах кристалла, прилегающих к пьезопреобразователю и поглотителю, используем результаты работы [29, рис. 6]. В этом случае для неаксиального дефлектора на базе парателлурида была получена зависимость параметра $\Delta\theta_1/\Theta$ от температуры кристалла при внешнем нагреве и малой управляющей мощности $P = 0.1$ Вт. Предполагая определенную схожесть результатов, можно (из рис. 5б, 5г) оценить, что при мощности 6 Вт температура в зоне преобразователя около 28°C , а у поглотителя – 70°C . Видно, что основным источником нагрева кристалла является поглотитель звука, а не преобразователь. Очевидно, это следствие эффективного теплоотвода через жидкостный контакт.

Парателлурит имеет относительно небольшую теплопроводность, поэтому два торцевых источника тепла (с учетом теплового потока через боковые грани кристалла) вызывают образование двух тепловых оптических призм. Рост показателя преломления с температурой делает эти призмы оптически более плотными. Как видно из рис. 5а, 5в, из-за сильного нагрева у поглотителя (зона 3) возникает более протяженная призма, ее отклоняющий угол также больше. Как у преобразователя, так и у поглотителя нулевой порядок отклоняется в сторону торцов кристалла, что показано на рис. 6а, 6в.

Так как температурное поле неоднородное, возникающие оптические призмы также являются неоднородными. Поэтому парциальные лучи, составляющие сколиммированный падающий свет с большой апертурой, имеют разную величину девиации. В результате угол расходимости и нулевого и дифракционного порядков увеличивается, размер пятна в фокальной плоскости линзы растет, форма пятна искажается.

Рассмотрим дифракцию отдельного парциального луча. Так как отклонение рабочего ± 1 порядка от падающего света равно $\varphi = \lambda f/v_s$, то девиация $\Delta\theta_{\pm 1}$ этого порядка является суммой девиации $\Delta\theta_0$ нулевого порядка и величины $\Delta\varphi$, возникающей при тепловом изменении скорости звука: $\Delta\theta_{\pm 1} = \Delta\theta_0 + \Delta\varphi$. Вне зависимости от зоны и от ориентации кристалла, нагрев увеличивает скорость звука, и поэтому уменьшает угол φ , то есть $\Delta\varphi < 0$ (но величина уменьшения зависит от места прохождения света). В результате девиация рабочего порядка складывается из отрицательной величины $\Delta\varphi$, зависящей только от места входа светового пучка, и девиации $\Delta\theta_0$, величина и знак которой зависят как от положения пучка, так и от выбранного варианта дифракции. Следователь-

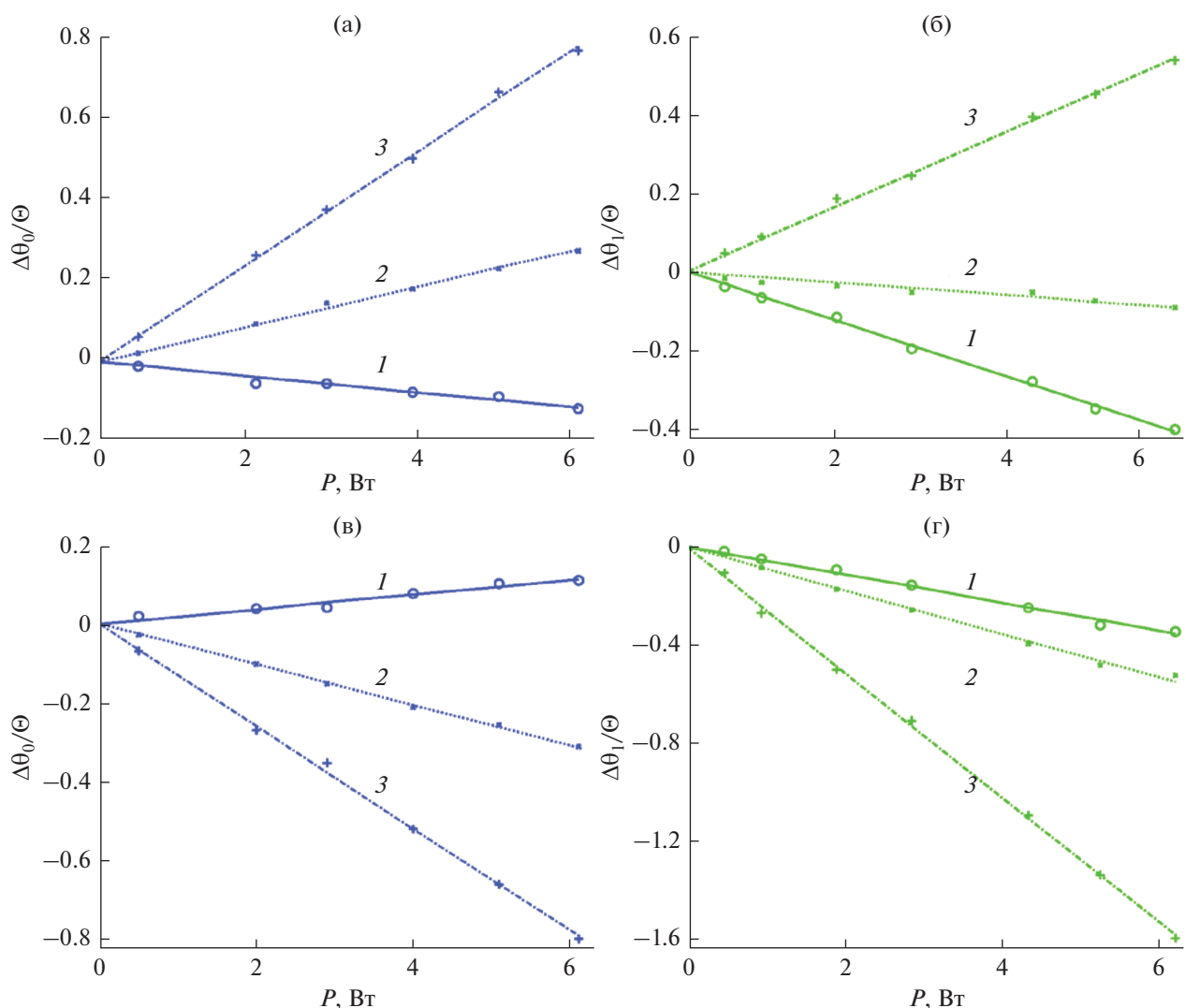


Рис. 5. (а, в) – Угловая девиация падающего и (б, г) – дифрагированного лучей при дифракции (а, б) – в +1 порядок и (в, г) – -1 порядок. 1, 2, 3 – номера зон, символы (о, ×, +) – экспериментальные данные, прямые – линейный тренд.

но, эти эффекты могут усиливать или ослаблять друг друга. Рис. 6б, 6г иллюстрирует девиацию рабочего порядка в крайних зонах кристалла. Отмеченная неоднородность температурного поля искажает результат дифракции широкого пучка, составленного из большого количества парциальных лучей. Поэтому далее величины $\Delta\theta_0$, $\Delta\phi$, $\Delta\theta_{\pm 1}$ следует понимать как результат усреднения по апертуре света.

Из рис. 5 и 6 следует, что зональное поведение различается при дифракции в +1 или в -1 рабочий порядок. В первом случае, в прилегающей к преобразователю области (зона 1) действие оптического клина суммируется с влиянием увеличения скорости звука. Девиация $\Delta\theta_1 = -|\Delta\theta_0| - |\Delta\phi|$ является отрицательной, при этом ее небольшая величина есть следствие хорошего теплоотвода через жидкостный контакт. При удалении падаю-

щего света от преобразователя воздействие фактора клина меняет знак, и у поглотителя девиация $\Delta\theta_1 = \Delta\theta_0 - |\Delta\phi|$ положительная (зона 3, плохой теплоотвод, высокая температура). Очевидно, что между преобразователем и поглотителем можно найти положение с близкой к нулю девиацией. Это можно объяснить следующим образом. Выделение тепла у торцов кристалла приводит к тому, что градиент температуры по ходу звуковой волны меняет знак и в какой-то точке обращается в ноль. Область за этой точкой (по ходу звука, ближе к поглотителю) ведет себя как слабый оптический клин, вносящий слабую положительную девиацию в нулевой порядок. В результате в этой области $\Delta\theta_0 - |\Delta\phi| \cong 0$, причем с ростом мощности оба фактора растут, сохраняя режим компенсации. Важно, что в этом режиме область взаимодействия имеет небольшую тепловую не-

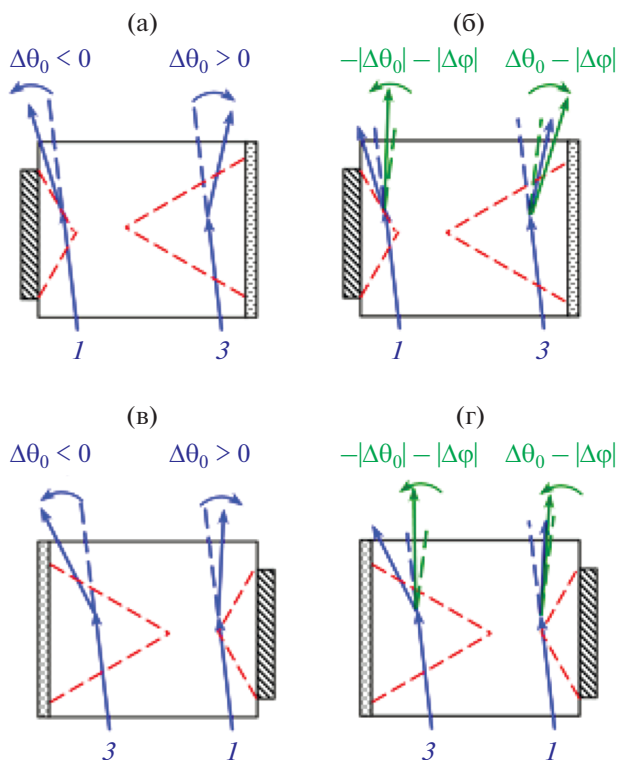


Рис. 6. (а, в) – Качественная схема зональной угловой девиации падающего и (б, г) – дифрагированного лучей при дифракции в +1 порядок (а, б) и –1 порядок (в, г).

однородность, и угловой спектр мощности взаимодействующих световых пучков будет искажен минимально.

Во втором случае, в первой зоне происходит частичная компенсация действия обоих факторов, при этом девиация $\Delta\theta_{-1} = \Delta\theta_0 - |\Delta\phi|$ остается отрицательной. При удалении луча от преобразователя, действие оптического клина меняет знак, отрицательная девиация $\Delta\theta_{-1}$ усиливается. Аналогично дифракции в +1 порядок, можно было ожидать области с нулевой девиацией ближе к преобразователю, если бы прилегающий оптический клин сильнее отклонял падающий свет. Очевидно, что этому препятствует хороший теплоотвод от преобразователя. Из этого можно заключить, что вариант дифракции в +1 порядок вносит меньшие искажения относительно другого варианта именно из-за особенностей конструкции АО-дефлектора.

Усредненный характер величин $\Delta\theta_0$, $\Delta\phi$, $\Delta\theta_{\pm 1}$ не позволяет однозначно разделить вклады двух рассмотренных факторов в девиацию рабочего порядка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экспериментально исследована тепловая угловая девиация нулевого и рабочего порядков в

аксиальном акустооптическом дефлекторе на базе парателлуриата при управляющей мощности до 6.5 Вт в непрерывном режиме. Измерения проведены в трех зонах кристалла (у преобразователя, в середине и у поглотителя звука) при вариантах дифракции в +1 и –1 рабочий порядок. Показано, что величина девиации во всех рассмотренных случаях линейно зависит от управляющей мощности.

2. Предложено качественное описание девиации рабочего порядка как совместного действия двух факторов. Первый – отклонение нулевого порядка при прохождении двух оптически более плотных призм, возникающих из-за выделения тепла в преобразователе и поглотителе звука. Как у преобразователя, так и у поглотителя нулевой порядок отклоняется в сторону торцов кристалла, поэтому знак и величина этого эффекта зависит от положения апертуры на входной грани кристалла. Второй – уменьшение угла дифракции из-за роста скорости звука при нагреве кристалла. В этом случае от положения зависит только величина эффекта, без изменения знака. Вследствие неоднородности температурного поля отдельные парциальные лучи, составляющие сколлимированный падающий свет, имеют разную величину девиации. В результате угол расходимости и нулевого и дифракционного порядков увеличивается, что не позволяет однозначно разделить вклады двух рассмотренных факторов в усредненную девиацию рабочего порядка.

3. Экспериментально подтверждены и качественно объяснены практически значимые факты. Во-первых, жидкостный контакт между тыльной поверхностью пьезопреобразователя и латунным корпусом обеспечивает эффективный отвод тепла от пьезопреобразователя при его акустической изоляции. Это уменьшает неоднородность температурного поля и повышает стабильность параметров АО-дефлектора в обоих вариантах дифракции при прохождении света через прилегающую к преобразователю область. Во-вторых, при дифракции в +1 порядок между пьезопреобразователем и поглотителем существует зона с минимальной величиной тепловой девиации. Это объясняется взаимной компенсацией положительной девиации нулевого порядка (в поле теплового оптического клина от поглотителя) и отрицательной девиации из-за увеличения скорости звука. При дифракции в –1 порядок такой зоны нет, так как эффективный теплоотвод через жидкостный контакт делает тепловой оптический клин, прилегающий к преобразователю, слишком слабым. Таким образом, в рассмотренной конструкции АО-дефлектора предпочтительным является вариант дифракции в +1 порядок.

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

Авторы благодарят Благотворительный Фонд Андрея Мельниченко (The Andrey Melnichenko Foundation) за помощь в проведении данного исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Магдич Л.Н., Молчанов В.Я.* Акустооптические устройства и их применение. М.: Сов. радио, 1978. 112 с.
2. *Sapriel J.* Acousto-Optics. N.Y.: Wiley, 1979. 126 p.
3. *Балакший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е.* Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985. 280 с.
4. *Корнел А.* Акустооптика. М.: Мир, 1993.
5. *Xu J., Stroud R.* Acousto-optic devices. N.Y.: Wiley, 1992.
6. Design and fabrication of acousto-optic devices / Ed. *Goutzoulis A.P.* and *Pape D.R.* N.Y.: Marcel Dekker, 1988. 496 p.
7. *Задорин А.С.* Динамика акустооптического взаимодействия. Томск: Томский гос. ун-т, 2004. 351 с.
8. *Молчанов В.Я., Китаев Ю.И., Колесников А.И., Нарвер В.Н., Розенштейн А.З., Солодовников Н.П., Шаповаленко К.Г.* Теория и практика современной акустооптики. М.: МИСиС, 2015.
9. *Yaoqing Chu, Yaogang Li, Zengwei Ge, Guoqing Wu, Hongzhi Wang.* Growth of the high quality and large size paratellurite single crystals // *J. Crystal Growth.* 2006. V. 295. № 2. P. 158–161. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2006.08.009>
10. *Скворцова Н.П., Ломонов В.А., Виноградов А.В.* Рост и механические свойства монокристаллов парателлурифта при высоких температурах // *Кристаллография.* 2011. Т. 56. № 1. С. 72–76.
11. *Kokh A.E., Shevchenko V.S., Vlezko V.A., Kokh K.A.* Growth of TeO₂ single crystals by the low temperature gradient Czochralski method with nonuniform heating // *J. Crystal Growth.* 2013. V. 384. P 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2013.08.027>
12. *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. № 4. С. 433–437.
13. *Белый В.Н., Казак Н.С., Павленко В.К., Катранжи Е.Г., Курилкина С.Н.* Особенности распространения пучков квазипоперечных упругих волн в кристалле парателлурифта // *Акуст. журн.* 1997. Т. 43. № 2. С. 156–161.
14. *Declercq N.F., Polikarpova N.V., Voloshinov V.B., Leroy O., Degrieck J.* Enhanced anisotropy in Paratellurite for inhomogeneous waves and its possible importance in the future development of acousto-optic devices // *Ultrasonics.* 2006. V. 44. Supplement. P. e833–e837. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2006.05.113>
15. *Антонов С.Н., Вайнер А.В., Проклов В.В., Резвов Ю.Г.* Влияние пространственной структуры звукового поля на брэгговскую акустооптическую дифракцию в условиях сильной акустической анизотропии // *Журн. техн. физ.* 2010. Т. 80. № 3. С. 97–106.
16. *Дьяконов Е.А., Волошинов В.Б., Поликарпова Н.В.* Акустооптическое исследование необычных случаев отражения объемных упругих волн в кристалле парателлурифта // *Акуст. журн.* 2012. Т. 58. № 1. С. 121–131.
17. *Балакший В.И., Манцевич С.Н.* Распространение акустических пучков в кристалле парателлурифта // *Акуст. журн.* 2012. Т. 58. № 5. С. 600–609.
18. *Naumenko N.F., Yushkov K.B., Molchanov V.Y.* Extreme acoustic anisotropy in crystals visualized by diffraction tensor // *The European Physical Journal Plus.* 2021. T. 136. № 1. Art. No 95. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01072-0>
19. *Balakshy V., Voloshinov V., Karasev V., Molchanov V., Semenov V.* Compensation of thermal effects in acousto-optic deflector // *Proceedings of SPIE.* V. 2713. The International Society for Optical Engineering Bellingham, 1996. P. 164–171.
20. *Tretiakov S., Grechishkin R., Kolesnikov A., Kaplunov I., Yushkov K., Molchanov V., Linde B.B.J.* Characterization of temperature field distribution in large-size paratellurite crystals applied in acousto-optic devices // *Acta Physica Polonica A.* 2015. V. 127. № 1. P. 72–74. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.127.72>
21. *Белюсов А.П., Белоусов П.Я., Борыняк Л.А.* Интерференционные измерения динамики температуры в твердотельных акустооптических модуляторах // *Известия Томского политехнического университета.* 2014. Т. 325. № 2. С. 137–142.
22. *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.
23. *Zarubin V., Yushkov K., Chizhikov A., Molchanov V., Tretiakov S., Kolesnikov A., Cherepetskaya E., Karabutov A.* Laser-ultrasonic imaging for evaluation of temperature fields in paratellurite optical crystal // *Proc. Meetings on Acoustics.* 2018. V. 32. № 1. P. 032002-1–032002-5. <https://doi.org/10.1121/2.0000722>
24. *Zarubin V.P., Yushkov K.B., Chizhikov A.I., Makarov O.Yu., Molchanov V.Ya., Tretiakov S.A., Kolesnikov A.I., Cherepetskaya E.B., Karabutov A.* Laser-ultrasonic temperature mapping of an acousto-optic dispersive delay line // *NDT and E International.* 2018. V. 98. P. 171–176. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2018.05.010>
25. *Mantsevich S.N., Kostyleva E.I.* Examination of the temperature influence on phase matching frequency in tunable acousto-optic filters // *Ultrasonics.* 2019. V. 91. P. 45–51. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2018.07.016>
26. *Tretiakov S., Kolesnikov A., Kaplunov I., Grechishkin R., Yushkov K., Shmeleva E.* Thermal imaging and conoscopic studies of working acousto-optical devices on the base of paratellurite // *Int. J. Thermophysics.* 2016. V. 37. № 1. Art. № 6. <https://doi.org/10.1007/s10765-015-2017-x>
27. *Гук А.С., Гуляев Ю.В., Евстигнеев В.Л., Казарян М.А., Мокрушин Ю.М., Талалаев М.А., Шакин О.В.* Тем-

- пературные эффекты в акустооптических дефлекторах на парателлурите. М.: РАН, 2017. ISBN: 978-5-906906-41-0
28. *Nikitin P.A., Gerasimov V.V., Khasanov I.S.* Temperature effects in an acousto-optic modulator of terahertz radiation based on liquefied SF₆ gas // *Materials*. 2021. Т. 14. № 19. P. 5519. <https://doi.org/10.3390/ma14195519>
29. *Антонов С.Н., Резвов Ю.Г.* Акустооптический дефлектор на парателлурите – повышение тепловой стабильности параметров // *Приборы и техника эксперимента*. 2021. № 5. С. 100–104. <https://doi.org/10.31857/S0032816221040017>
30. *Антонов С.Н., Резвов Ю.Г., Подольский В.А., Сивкова О.Д.* Акустооптическая многолучевая аксиальная дифракция в парателлурите // *Письма в Журн. техн. физ.* 2022. Т. 48. № 1. С. 43–46. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2022.01.51879.18860>
31. *Warner A.W., White D.L., Bonner W.A.* Acousto-optic light deflectors using optical activity in paratellurite // *J. Appl. Phys.* 1972. V. 43. № 11. P. 4489–4495. <https://doi.org/10.1063/1.1660950>
32. *Антонов С.Н.* Акустооптический дефлектор на кристалле парателлурита с использованием широкополосного клеевого акустического контакта // *Акуст. журн.* 2017. Т. 63. № 4. С. 364–370. <https://doi.org/10.7868/S0320791917030017>
33. *Антонов С.Н.* Базовая технология широкополосной высокоэффективной акустооптической ячейки (дефлектора) на кристалле парателлурита // *ПТЭ*. 2019. № 6. С. 82–89. <https://doi.org/10.1134/S0032816219060016>
34. *Антонов С.Н., Таешников А.Б.* Акустическая изоляция пьезопреобразователя и теплоотводящего устройства акустооптической ячейки посредством жидкостного слоя // *Акуст. журн.* 1991. Т. 37. № 5. С. 837–842
35. *Антонов С.Н.* Акустооптический дефлектор с отводом тепла от пьезопреобразователя при акустической изоляции теплоотвода // *Акуст. журн.* 2019. Т. 65. № 5. С. 588–595. <https://doi.org/10.1134/S0320791919050034>
36. *Uchida N., Ohmachi Y.* Elastic and photoelastic properties of TeO₂ single crystal // *J. Appl. Phys.* 1969. V. 40. № 12. P. 4692–4695. <https://doi.org/10.1063/1.1657275>
37. *Uchida N.* Optical properties of single-crystal paratellurite (TeO₂) // *Phys. Rev. B*. 1971. V. 4. № 10. P. 3736–3745. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.4.3736>
38. *Ohmachi Y., Uchida N.* Temperature dependence of elastic, dielectric, and piezoelectric constants in TeO₂ single crystals // *J. Appl. Phys.* 1970. V. 41. № 6. P. 2307–2311. <https://doi.org/10.1063/1.1659223>
39. *Handbook of Optical Constants of Solids: Chapter 3 – Thermo-Optic Coefficients*, Ed. *Palik E.D.* Academic Press, 1997. P. 115–261. <https://doi.org/10.1016/B978-012544415-6.50150-3>
40. *Percy P.S., Fritz I.J., Samara G.A.* Temperature and pressure dependences of the properties and phase transition in paratellurite (TeO₂): Ultrasonic, dielectric and Raman and Brillouin scattering results // *J. Physics and Chemistry of Solids*. 1975. V. 36. № 10. P. 1105–1122. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(75\)90053-0](https://doi.org/10.1016/0022-3697(75)90053-0)
41. *Stefanskii I.V., Mikhalevich S.E., Burak Y.V., Sapovskii V.M.* Temperature dependence of the refractive index of α -TeO₂ crystals in the 350–800-nm region // *J. Appl. Spectroscopy*. 1989. Т. 51. № 2. С. 790–792. <https://doi.org/10.1007/BF00659956>
42. *Костылева Е.И., Манцевич С.Н.* Определение температурных зависимостей упругих модулей парателлурита акустооптическим методом // *Труды 24-й Международной научной конференции Волновая электроника и инфокоммуникационные системы*. Ч. 1. Санкт-Петербург, 2021. С. 5. <https://doi.org/10.31799/978-5-8088-1582-7-2021-1>