_____ ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ____ ТЕХНИКА

УДК 535.241.13:534

АКУСТООПТИЧЕСКИЙ ДЕФЛЕКТОР НА ПАРАТЕЛЛУРИТЕ – ПОВЫШЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ПАРАМЕТРОВ

© 2021 г. С. Н. Антонов^{*a*,*}, Ю. Г. Резвов^{*b*,**}

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

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

> *e-mail: olga-ant@yandex.ru **e-mail: rezvovyug@mail.ru Поступила в редакцию 16.01.2021 г. После доработки 05.02.2021 г. Принята к публикации 07.02.2021 г.

Экспериментально исследованы явления, возникающие при внутреннем нагреве (выделении управляющей радиомощности) акустооптического дефлектора на основе парателлурита с отводом тепла от пьезопреобразователя через жидкостный контакт. Установлено, что, кроме температурного дрейфа скорости звука и показателей преломления, существенное влияние на характеристики дефлектора оказывает температурная неоднородность. При этом объем кристалла ведет себя как оптический клин – более оптически плотный у преобразователя, и менее плотный – при удалении от него. Обнаружен эффект внутренней компенсации тепловой девиации положения дифрагированного луча при определенной ориентации дефлектора.

DOI: 10.31857/S0032816221040017

1. ВВЕДЕНИЕ

Прикладная акустооптика (а.о.) – это управление параметрами светового излучения и создание устройств для этих целей. Теория а.о.-дифракции и ряд практически интересных приборных реализаций описаны достаточно подробно в работах [1-7]. Особую нишу в современных лазерных системах занимают а.о.-дефлекторы (а.о.д.) – устройства для углового сканирования лазерного луча. Совокупность таких параметров, как управление интенсивным (десятки и сотни киловатт на квадратный сантиметр) лазерным излучением, высокое быстродействие, отсутствие механически перемещаемых элементов, малые вносимые световые потери, небольшие габариты и масса, делают а.о.д. перспективным элементом в различных лазерных системах [8-10].

Доминирующим материалом современных а.о.д. является монокристалл парателлурита (TeO₂). Кристалл обладает феноменально большой величиной а.о.-качества – $M_2 = 1000 \cdot 10^{-18} \text{ c}^3/\text{г}$ (при дифракции на медленной сдвиговой акустической моде), широким диапазоном прозрачности – от 0.35 до 5 мкм, высокой лучевой стойкостью. Развита технология производства больших (со стороной более 20 мм) однородных кристаллов TeO₂.

Дефлектор на базе парателлурита – объект данной работы.

Акустооптические дефлекторы находят широкое применение в лазерных системах вывода (нанесения) изображения, маркировки узлов и деталей, в 3-D принтерах как в комбинации с электромеханическими сканерами, так и самостоятельно [11]. Одной из задач в таких системах является повышение кратковременной и долговременной стабильности основных параметров а.о.д. Так, нестабильность положения лазерного луча и изменение эффективности дифракции снижают качество выводимого изображения. Это происходит, в том числе, из-за тепловых эффектов [12-20]. Нестабильность параметров связана с температурой как а.о.-ячейки в целом, так и отдельных ее элементов - кристалла ТеО₂ и пьезопреобразователя. Стабилизация температуры а.о.д. в целом достаточно очевидна, технически несложна, но, как будет показано в данной работе, полностью не решает задачу стабилизации параметров.

Внимание данной работы акцентируется на исследовании эффектов, возникающих при внутреннем нагреве, в частности выделении подводимой управляющей радиомощности, и их влиянии на стабильность основных параметров а.о.д. Задача работы — определение численных значений



Рис. 1. Схема а.о.д. *1* – кристалл TeO₂, *2* – пьезопреобразователь, *3* – жидкостный слой, *4* – тело теплоотвода, *5* – поглотитель отраженной волны.

приемлемого (компромиссного) соотношения между основными параметрами (эффективность, полоса сканирования) и максимальным уровнем управляющей мощности.

2. КОНСТРУКЦИЯ ДЕФЛЕКТОРА

Электрическая мощность, подводимая к а.о.д., вызывает повышение температуры в различных областях а.о.-кристалла. Основные механизмы выделения тепла следующие. Первый – это нагрев области, прилежащей к пьезопреобразователю, в силу потерь на преобразование электричество–звук. Оценки в диапазоне акустической частоты до 100 МГц составляют 2–4 дБ. Второй – затухание (диссипация) в теле кристалла TeO₂. Диссипация для медленной сдвиговой моды равна 2.4 дБ/см на частоте 100 МГц, поэтому на частоте около 40 МГц при длине кристалла 15 мм такие потери составят около 2 дБ. Третий – выделение тепла на тыльном торце звукопровода – в поглотителе звука.

Особенностью разработанной конструкции а.о.д. является использование технологии отвода тепла от пьезопреобразователя через жидкостный контакт [21–23]. Суть в том, что значительное различие комплексного импеданса для сдвиговых акустических колебаний жидкостей и твердого тела (пьезопреобразователя) обеспечивает акустическую изоляцию последнего от теплоотвода при хорошей передаче тепла. Принципиальная схема конструкции приведена на рис. 1.

Внешний вид а.о.д. представлен на рис. 2.

Кристалл TeO₂ (1) приклеен к латунному корпусу 2, и через слой жидкости 3 (d = 5-10 мкм) торец пьезопреобразователя находится в контакте с вертикальной стенкой держателя. В качестве жидкостного слоя используется глицерин — невысыхающая жидкость с малым давлением насыщенного пара при высокой температуре.



Рис. 2. Внешний вид а.о.д. Плата электрического согласования снята. *1* – кристалл TeO₂, *2* – латунный корпус, *3* – жидкостный контакт.

Параметры а.о.д. (используемого далее в экспериментах) следующие: пьезопреобразователь сдвиговых колебаний из LiNbO₃ длиной 5 мм и высотой 4 мм, наклон акустического вектора 6° к оси [110]. Технология акустического контакта (акустического согласования преобразователя и TeO₂) обеспечивала акустическую полосу 20–50 МГц при КСВ < 2 и потери на преобразования 2.4–2.6 дБ.

Длительная эксплуатация данной конструкции показала, что управляющие мощности непрерывного радиосигнала не приводят к деградации дефлектора.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА И УСТАНОВКА

На рис. 3 показаны измеряемые параметры а.о.д.

Излучение *I* лазера с расходимостью α на выходе а.о.д. преобразуется в лучи нулевого I_0 и дифракционного I_1 порядка с углом межу ними θ . В зависимости от подводимой мощности *P* измерялись девиация дифрагированного луча $\Delta \theta$ и его измененная расходимость α_1 . Измерения проводились в двух геометрических конфигурациях (см. вставки на рис. 3): I — когда свет падал на набегающий акустический фронт и II — на развернутый на 180° акустический фронт. Тепловая модификация лазерных лучей на выходе а.о.д. измерялась на установке, схема которой представлена на рис. 4.

Измерялись абсолютные величины светового диаметра D и смещение луча Δd , данные регистрировались в 2-D и 3-D виде и пересчитывались в углы.



Рис. 3. Измеряемые параметры а.о.д. Положительное направление лучей показано знаком "+".



Рис. 4. Схема установки. 1 -а.о.д., 2 -линза, 3 -измеритель профиля луча; I -входной луч, I_0 и $I_1 -$ лучи соответственно нулевого и дифракционного порядка дифракции.

4. ДАННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТА. ЭФФЕКТ КОМПЕНСАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ

Эксперимент с а.о.д. (параметры см. выше) проводился на частоте звука 42 МГц при подводимой непрерывной мощности управления в диапазоне до 5 Вт. Лазерный луч с длиной волны $\lambda =$ 0.63 мкм на входе а.о.д. имел апертуру 2.5 мм и расходимость $\alpha = 0.7$ мрад. Полный угол отклонения $\theta = 41$ мрад.

Рис. 5 показывает изменение температуры поверхности кристалла а.о.д. в экспериментальном диапазоне непрерывной мощности управления.

На рис. 6 представлено изменение относительного положения дифрагированного луча от температуры кристалла при малых управляющих мощностях (без внутреннего нагрева) [23]. Отметим, что абсолютная величина угла отклонения с ростом температуры уменьшается. Поскольку $\theta = \lambda f/v$, где f и v — соответственно частота и скорость звуковой волны, это однозначно связано с тем, что с ростом температуры скорость звука возрастает.



Рис. 5. Зависимость температуры грани кристалла TeO_2 от подводимой мощности при точности измерений температуры 3%, мощности – 5%.



Рис. 6. Зависимость относительной девиации (отклонения) первого брэгговского порядка от температуры кристалла при точности измерений $\Delta\theta/\alpha$ 5%, температуры – 3%.

Дальнейшие измерения проводились в зависимости от подводимой управляющей радиомощности. На рис. 7 показана относительная девиация (отклонение) нулевого и первого брэгговского порядков.

Абсолютная девиация дифракционного порядка составила ≈ 0.06 мрад/Вт (для случая на рис.7а) и ≈ 0.1 мрад/Вт (для случая на рис. 7б).

На рис. 8 представлена зависимость относительного уширения дифрагированного луча от подводимой мощности управления. Абсолютное уширение составило (в линейном приближении зависимости) ≈0.35 мрад/Вт.

Анализ результатов показывает, что наблюдаемая зависимость углового положения лучей от мощности ультразвука линейна и имеет специфические особенности. Первая — это различие знака отклонения нулевого и 1-го дифракционных порядков для противоположных положений а.о.д. относительно падающего луча (0 или 180°). Вторая особенность — различие абсолютных величин температурной девиации 1-го дифракци-



Рис. 7. Зависимости относительной девиации угла отклонения дифракционного (*1*) и нулевого (*2*) порядка от подводимой к а.о.д. электрической мощности: **а** – свет падает на "набегающий" акустический фронт, **б** – на "убегающий". Точность измерений $\Delta\theta/\alpha$ 10%, *P* – 5%.

онного порядка для противоположных положений а.о.д. Существенно, что при равных мощностях сигнала отношение девиаций оставляет ~1.5 и, по сути, является эффектом компенсации температурной зависимости угла отклонения.

Качественное объяснение наблюдаемым эффектам следующее. Пренебрегая затуханием звука в TeO₂, положим, что основной источник тепла – область кристалла вблизи преобразователя. Рассмотрим два независимых температурных механизма, приводящих к изменению угловых положений лучей на выходе а.о.д. Первый – это положительное температурное изменение оптической плотности [24]. Вследствие того что нагрев максимален около преобразователя и спадает при удалении от него, объем кристалла можно представить в виде оптического клина – более оптически плотного у преобразователя и менее – при удалении от него.

Следовательно, отклонение луча (по этому механизму) будет происходить в сторону основания клина, т.е. в сторону преобразователя (см. вставки I и II на рис. 3), величину отклонения обозначим как $\Delta \theta_{\kappa}$. Данное воздействие происходит как



Рис. 8. Относительное уширение дифрагированного луча при точности измерений α_1/α 10%, мощности – 5%.

на падающий луч, так и на дифрагированный с одним знаком отклонения: на рис. 7а – против угла дифракции, на рис. 76 – в направлении дифракции.

Второй механизм — это изменение (увеличение) скорости звука, которое влияет только на дифрагированный луч, уменьшая угол дифракции на величину $\Delta \theta_{\rm T}$. Таким образом, в зависимости от положения а.о.д. относительно падающего луча лазера суммарная величина девиации первого порядка дифракции составит: $\Delta \theta = \Delta \theta_{\rm K} - \Delta \theta_{\rm T}$ (см. рис. 7а) и $\Delta \theta = \Delta \theta_{\rm K} + \Delta \theta_{\rm T}$ (см. рис. 7б).

Обнаруженный эффект можно охарактеризовать как внутреннюю компенсацию тепловой зависимости положения дифрагированного луча и следует учитывать (использовать) при конструировании систем, содержащих а.о.д. на основе TeO₂.

Также наблюдается линейно-зависимое от мощности звука уширение дифрагированного порядка, причиной которого является оптическая неоднородность кристалла в области а.о.-взаимодействия, что также необходимо учитывать.

выводы

1. Разработана конструкция а.о.д. на основе кристалла TeO_2 с отводом тепла от тыльной поверхности пьезопреобразователя через тонкий жидкостный контакт, который обеспечивает хороший отвод тепла при акустической изоляции. Конструкция обеспечивает возможность непрерывной работы при управляющей мощности до 5 Вт. Это позволяет существенно уменьшить длину преобразователя, что расширяет полосу сканирования а.о.д.

2. Измерена зависимость углового положения дифрагированного излучения от управляющей радиомощности и получены соотношения между величиной тепловой девиации и уровнем мощности. Установлено, что величина отклонения зависит от расположения а.о.д. относительно входного лазерного луча (0 или 180°), что имеет значение для повышения стабильности параметров устройств на основе а.о.д.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. Акустооптические устройства и их применение. М.: Сов. радио, 1978.
- Балакший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985.
- 3. Корпел А. Акустооптика. М.: Мир, 1993.
- 4. Xu J., Stroud R. Acousto-optic devices. N.Y.: Wiley, 1992.
- 5. Задорин А.С. Динамика акустооптического взаимодействия. Томск: Томский гос. ун-т, 2004.
- 6. 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.
- 7. Design and fabrication of acousto-optic devices / Ed. *A.P. Goutzoulis* and *D.R. Pape*. N.Y.: Marcel Dekker, 1988.
- Romer G.R.B.E., Bechtold P. // Physics Procedia. 2014. V. 56. P. 29.
 - https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.08.092
- Гуляев Ю.В., Казарян М.А., Мокрушин Ю.М., Шакин О.В. Акустооптические лазерные системы формирования телевизионных изображений. М.: Физматлит, 2016.
- 10. *Антонов С.Н.* // ПТЭ. 2019. № 3. С. 89. https://doi.org/10.1134/S0032816219020174
- 11. Антонов С.Н., Резвов Ю.Г. // ПТЭ. 2020. № 6. С. 46. https://doi.org/10.31857/S0032816220050262

- Морозова К.А., Каплунова Е.И., Рыбина С.С., Шмелева Е.В., Костюк А.В., Самохвалов Н.Е. // Вестник ТвГУ. Серия Физика. 2015. № 1. С. 38.
- Tretiakov S., Grechishkin R., Kolesnikov A., Kaplunov I., Yushkov K., Molchanov V., Linde B.B.J. // Acta Physica Polonica A. 2017. V. 127. № 1. P. 72. https://doi.org/10.12693/APhysPolA.127.72
- 14. Белоусов А.П., Белоусов П.Я., Борыняк Л.А. // Известия Томского политехнического университета. 2014. Т. 325. № 2. С. 137.
- 15. Манцевич С.Н., Юхневич Т.В., Волошинов В.Б. // Оптика и спектроскопия. 2017. Т. 122. № 4. С. 694. https://doi.org/10.7868/S003040341704016X
- Zarubin V., Yushkov K., Chizhikov A., Molchanov V., Tretiakov S., Kolesnikov A., Cherepetskaya E., Karabutov A. // Proceedings of Meetings on Acoustics. 2018. V. 32. № 1. P. 032002-1. https://doi.org/10.1121/2.0000722
- 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.A. // NDT and E International. 2018. V. 98. P. 171. https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2018.05.010
- Mantsevich S.N., Kostyleva E.I. // Ultrasonics. 2019. V. 91. P. 45. https://doi.org/10.1016/i.ultras.2018.07.016
- 19. Tretiakov S., Kolesnikov A., Kaplunov I., Grechishkin R., Yushkov K., Shmeleva E. // International Journal of Thermophysics. 2016. V. 37. № 1. Article number 6. https://doi.org/10.1007/s10765-015-2017-x
- Гук А.С., Гуляев Ю.В., Евстигнеев В.Л., Казарян М.А., Мокрушин Ю.М., Талалаев М.А., Шакин О.В. Температурные эффекты в акустооптических дефлекторах на парателлурите. М.: РАН, 2017. ISBN: 978-5-906906-41-0
- 21. Антонов С.Н., Таешников А.Б. // Акустический журнал. 1991. Т. 37. № 5. С. 837.
- 22. Антонов С.Н. // ПТЭ. 2019. № 6. С. 82. https://doi.org/10.1134/S0032816219060016
- Антонов С.Н. // Акустический журнал. 2019. Т. 65. № 5. С. 588. https://doi.org/10.1134/S0320791919050034
- 24. Stefanskii I.V., Mikhalevich S.E., Burak Y.V., Sapovskii V.M. // Journal of Applied Spectroscopy. 1989. T. 51. № 2. C. 790. https://doi.org/10.1007/BF00659956