

УДК 534.2.535.42

АКУСТООПТИЧЕСКИЙ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-НЕЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ДВУХКООРДИНАТНЫЙ ДЕФЛЕКТОР

© 2021 г. С. Н. Антонов^а, *, Ю. Г. Резвов^б, **

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

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

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

**e-mail: rezvovyuug@mail.ru

Поступила в редакцию 24.07.2020 г.

После доработки 14.11.2020 г.

Принята к публикации 22.12.2020 г.

Разработана новая схема поляризационно-независимого двухкоординатного акустооптического дефлектора на базе кристаллов парателлуриата. Особенностью оптической схемы является использование только трех единичных кристаллов без дополнительных фазовых пластин. Создана практическая модель дефлектора для длины волны света 1.06 мкм, обеспечивающего суммарную эффективность более 80%. Устройство стало основой в переключателе неполяризованных волоконно-оптических каналов с алгоритмом переключения 1 в 25. Основные параметры: суммарные потери – от 3.8 до 5.3 дБ, развязка между каналами от -45 до -60 дБ, время переключения 7 мкс.

Ключевые слова: анизотропная акустооптическая дифракция, акустооптический дефлектор, пьезопреобразователь, эффективность дифракции, поляризация света, волоконная оптика, переключатель оптических каналов

DOI: 10.31857/S0320791921020015

1. ВВЕДЕНИЕ

Акустооптика (АО) основана на фотоупругом эффекте, возникающем при распространении ультразвуковой волны в прозрачной среде [1–9]. Принципиальными достоинствами АО приборов являются: возможность управления интенсивным (десятки и сотни киловатт на квадратный сантиметр) лазерным излучением, малые вносимые световые потери (единицы процентов), высокое быстродействие (до десятков наносекунд), отсутствие механически перемещаемых элементов, небольшие габариты и вес.

Основным материалом современных АО приборов является монокристалл парателлуриата (TeO₂). Кристалл обладает феноменально большой величиной АО качества – $M_2 \approx 1000 \times 10^{-18} \text{ с}^3/\text{г}$ (дифракция на медленной сдвиговой акустической моде) [10, 11]; широким диапазоном прозрачности, от 0.35 до 5 мкм [12]; высокой лучевой стойкостью; развитой технологией производства больших однородных кристаллов со стороной до 50 мм [13]. Большая акустическая анизотропия парателлуриата является причиной необычных акустических эффектов [14–19].

Принципиальным для высокоэффективной дифракции света в TeO₂ является необходимость строго определенной (круговой либо линейной) входной поляризации лазерного излучения. В то же время, как правило, мощные промышленные лазеры имеют неполяризованное излучение. Известны методы и схемы создания поляризационно-независимых однокоординатных дефлекторов (АОД) на TeO₂, основанные на использовании двух последовательно включенных дефлекторов с фазовой полуволновой пластиной между ними [20, 21]. Очевидная схема двухкоординатного дефлектора заключается в последовательном ортогональном расположении двух однокоординатных дефлекторов и, следовательно, четырех кристаллов TeO₂ и двух фазовых пластин. Видно, что такое решение достаточно сложно.

Настоящая работа посвящена разработке и созданию простой оптической схемы высокоэффективного поляризационно-нечувствительного двухкоординатного АОД, состоящего только из трех кристаллов TeO₂, использованию дефлектора в системе оптического переключателя каналов связи.

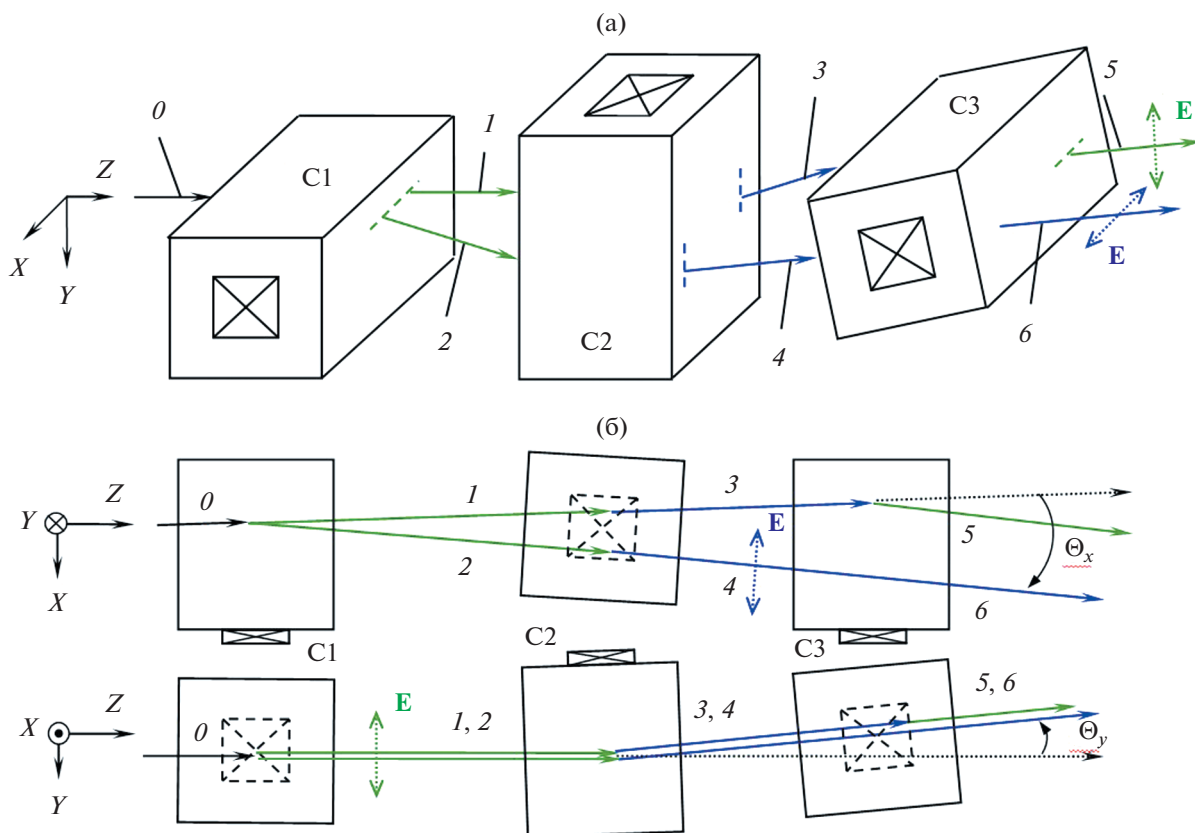


Рис. 1. (а) – Объемная схема дефлектора, (б) – ход лучей в ортогональных проекциях. Изображение лучей, как имеющих различное пространственное положение, – условное.

2. ПРИНЦИП ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТРЕХКРИСТАЛЬНОЙ СХЕМЫ ДЕФЛЕКТОРА

В разработанной схеме используются три АО кристалла (единичные дефлекторы) без фазовых пластин. Принципиальным является то, что при АО дифракции происходит поворот плоскости поляризации света на 90° градусов. Принцип работы схематично показан на рис. 1.

Дефлектор содержит три последовательно расположенных кристалла: C1, C2 и C3. Исходный неполяризованный луч 0 направлен по оси Z и может быть представлен как суперпозиция двух линейно поляризованных лучей. Первый из них, поляризованный вдоль оси Y , не испытывает дифракции и проходит кристалл C1 без отклонения – луч 1 . Второй, с поляризацией вдоль оси X , претерпевает дифракцию в кристалле C1, меняет поляризацию на ортогональную (т.е. вдоль оси Y) и отклоняется в плоскости XZ на угол, пропорциональный частоте акустической волны – луч 2 . Лучи 1 и 2 одинаково поляризованы и распространяются под небольшим углом друг к другу. Оба луча падают на второй кристалл C2 под углом Брэгга, совместно отклоняются в плоскости YZ на одинаковый угол и меняют поляризацию на ортогональную, образуя лучи 3 и 4 . Кристалл C3

ориентирован так, что луч 4 не дифрагирует, а луч 3 испытывает брэгговскую дифракцию и меняет поляризационную моду – луч 5 . Если частоты акустических волн в кристаллах C1 и C3 одинаковы, то выходные лучи 5 и 6 параллельны друг другу.

Таким образом, исходный неполяризованный луч 0 после прохождения трехкристального дефлектора преобразуется в совокупность двух параллельных лучей, имеющих ортогональные поляризации, и немного сдвинутых друг относительно друга. Звуковые частоты задают угловое отклонение Θ_x и Θ_y составного выходного луча в некотором диапазоне, а управляющие напряжения определяют его мощность (вплоть до мощности входного луча).

3. ОСОБЕННОСТИ ТРЕХКРИСТАЛЬНОГО ДЕФЛЕКТОРА НА TeO_2

Основой устройства являются единичные неаксиальные АОД на основе TeO_2 , предложенные в работе [22]. В настоящее время такие АОД широко используются, при этом новые идеи позволяют улучшить их характеристики [23–28]. Принцип дифракции иллюстрирует рис. 2. Плоскость АО взаимодействия содержит оптическую ось и

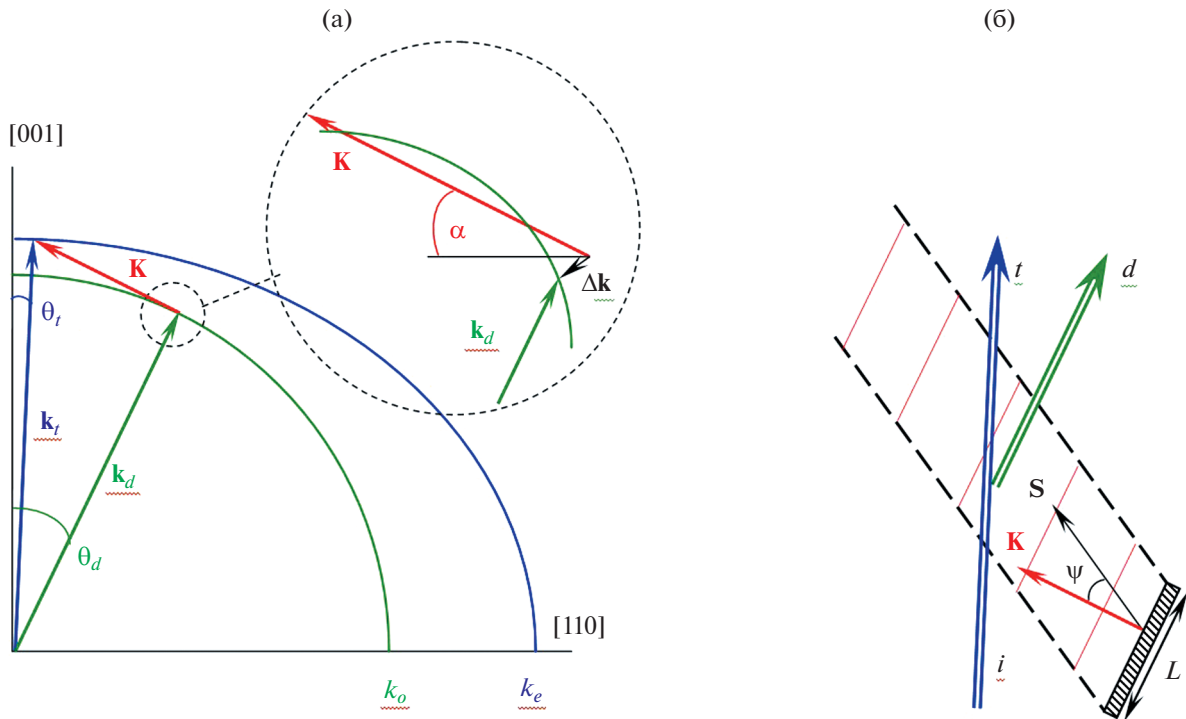


Рис. 2. (а) – Векторная диаграмма и (б) – геометрия АО взаимодействия.

ось $[110]$. Преобразователь длиной L возбуждает поперечную медленную звуковую волну, волновой вектор \mathbf{K} которой составляет небольшой угол $\alpha = 4^\circ \dots 6^\circ$ с осью $[110]$. Вследствие сильной акустической анизотропии направление распространения энергии (вдоль групповой скорости \mathbf{S}) отклонено на угол ψ . Представленный вариант реализует дифракцию в -1 порядок, при котором волновые векторы взаимодействующих волн образуют практически прямоугольный треугольник: $\mathbf{k}_d = \mathbf{k}_t - \mathbf{K} + \Delta\mathbf{k}$. Вектор расстройки $\Delta\mathbf{k}$ направлен по нормали к возмущенному акустическому слою. Обычно геометрия является не строго касательной, и при изменении частоты звука вектор \mathbf{K} пересекает волновую поверхность в двух близких точках. Это позволяет расширить диапазон сканирования за счет незначительной потери эффективности. В центре диапазона угол θ_d между оптической осью и вектором \mathbf{k}_d равен углу α .

Пусть падающее излучение (“ i ”) принадлежит к необыкновенной моде. Тогда в зависимости от акустической мощности и параметра $\Delta k L \cos \psi$ падающее излучение делится между проходящим (“ t ”) той же оптической моды и дифрагированным (“ d ”, обыкновенная мода). Изменение частоты (при необходимом уровне акустической мощности) приводит к практически полному отклонению падающего света в некотором угловом диапазоне вместе со сменой поляризационной моды.

Если входной луч неполяризован (совокупность двух ортогонально поляризованных лучей одного направления), то дифрагировать будет только один луч с “ e ”-поляризацией, образуя отклоненный и неотклоненный лучи одинаковой “ o ”-поляризации.

Существенными, в плане реализации разработанной схемы АОД, являются параметры “дефлекторной” геометрии, когда падающий свет распространяется в плоскости, отклоненной на угол β от оптической оси – рис. 3. Волновой вектор звука не лежит в этой плоскости, но поскольку $K \ll k_{t,d}$, то дифрагированный свет распространяется практически в этой же плоскости. Рис. 4 показывает, как при этом меняются угол θ_t и частота звука f_{s0} , соответствующие центру диапазона дефлектора.

Расчеты проведены для экспериментальной ситуации: длина световой волны $\lambda = 1.064$ мкм, угол $\alpha = 6^\circ$, длина преобразователя $L = 5$ мм. Для упрощения расчетов использован прием, предложенный в работе [29]. Из-за наличия оптической оси эти зависимости симметричны относительно значения $\beta = 0$. Отклонение от этого значения приводит к уменьшению угла θ_t и росту звуковой частоты. Однако в существенном для дальнейшего рассмотрения диапазоне $|\beta| < 2^\circ$ эти изменения незначительны.

Рис. 5 иллюстрирует эффективность дифракции в пределах акустической полосы преобразо-

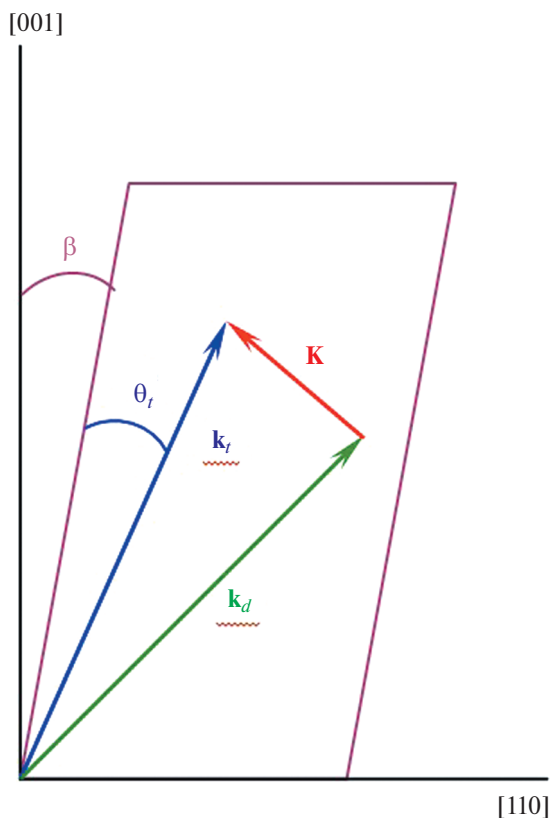


Рис. 3. Векторная диаграмма при отклонении плоскости АО взаимодействия от оптической оси.

вателя. При этом угол отклонения света пропорционален звуковой частоте. Линия 1 соответствует геометрии взаимодействия в плоскости, содержащей оптическую ось. Параметры подобраны таким образом, что в центре диапазона эффективность дифракции составляет $\eta = 90\%$. Близкая линия 2 отражает аналогичную зависимость, но в плоскости, отклоненной на небольшой фиксированный угол β . Линии 3–4 отражают изменение функции пропускания при небольшом изменении угла β вблизи центрального значения 0.78° и фиксированном угле θ_r . Важно, что в этом случае наблюдается асимметрия: при уменьшении угла β эффективность в центре диапазона уменьшается (линия 3), при увеличении растет (линия 4, диапазон при этом сужается).

Эти особенности определяют эффективность трехкристального дефлектора (см. рис.1). Падающий неполяризованный луч θ мощностью W_0 можно представить как совокупность двух совпадающих лучей с ортогональными поляризациями, каждый мощностью $W_0/2$. Только один из них (X -поляризация) способен дифрагировать, так как является необыкновенным в кристалле С1. Пусть η_1 – эффективность дифракции в первом кристалле, при этом линия 1 на рис. 5 дает частот-

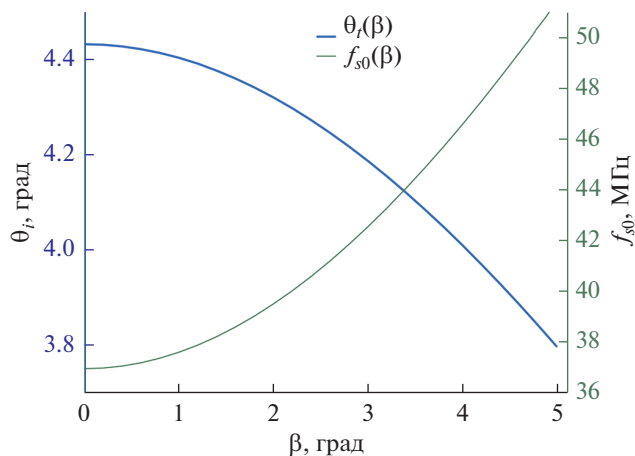


Рис. 4. Зависимость центральных параметров полосы пропускания при изменении плоскости АО взаимодействия.

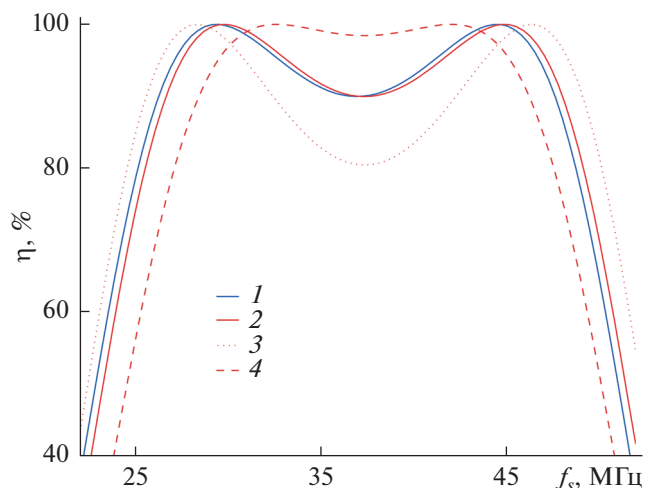


Рис. 5. Зависимость эффективности дифракции от частоты звука. 1 – плоскость АО-дифракции содержит оптическую ось ($\beta = 0, \theta_r = 4.2^\circ$); 2–4 дифракция в плоскости, образующей угол β с оптической осью ($\theta_r = 4.4^\circ, \beta = 0.78^\circ$ (2), 0.50° (3), 1.10° (4)).

ную зависимость эффективности. Тогда мощность луча 2 дает выражение $W_2 = \eta_1 W_0/2$. Вследствие этого луч 2 несет не только половину мощности луча θ (Y -поляризация), но и небольшую неиспользованную при дифракции долю луча ортогональной поляризации: $W_1 = (1 + \eta_1) W_0/2$.

Лучи 1 и 2 направляют на кристалл С2, повернутый относительно кристалла С1 на угол, близкий к 90° . Оба луча, за исключением небольшой доли в луче 1, поляризованы одинаково, в кристалле С2 являются необыкновенными и способны дифрагировать. Кристалл также повернут на небольшой угол в плоскости XZ таким образом, что оба луча падают не в плоскости, содержащей

оптическую ось. Очевидно, что для луча 1 угол β_1 фиксирован, а угол β_2 сканирует некоторый интервал в зависимости от частоты звука в кристалле С1. Кристалл С2 ориентирован так, что для лучей 1 и 2, образующихся при подаче центральной частоты в кристалле С1, выполняется условие $\beta_1 = -\beta_2$. Иначе говоря, лучи 1 и 2 во втором кристалле распространяются почти симметрично относительно плоскости, содержащей оптическую ось.

Дифрагируя, оба этих луча синхронно отклоняются и меняют свои поляризации, превращаясь в лучи 3 и 4 (на рис. 1 не показано, что меньшая часть лучей 1 и 2, не испытавшая дифракции, не меняет направления распространения). Эффективность дифракции луча 1 передает линия 2 на рис. 5, а для луча 2 эффективность зависит также от частоты в кристалле С1 и поэтому ее поведение меняется в диапазоне между линиями 3 и 4 на рис. 5. С учетом доли луча 2, неспособной к дифракции, а также зависимости эффективности дифракции $\eta_2(\beta)$ во втором кристалле, мощности лучей 3 и 4 удовлетворяют соотношениям: $W_3 = \eta_2(\beta_1)W_0/2$, $W_4 = \eta_1\eta_2(\beta_2)W_0/2$.

Эти одинаково поляризованные лучи направляются в кристалл С3, ориентированный так, что плоскость АО взаимодействия содержит оптическую ось, но только луч 3 падает на акустическую волну под углом Брэгга. Поэтому он дифрагирует (теперь это луч 5), отклоняясь в сторону луча 4, который проходит кристалл без дифракции (луч 6). Если частоты сигналов, подаваемых на кристаллы С1 и С3, одинаковы, то лучи 5 и 6 параллельны. Их мощности имеют вид: $W_5 = \eta_3W_3$, $W_6 = W_4$, где η_3 – эффективность дифракции в этом кристалле.

Если после рассмотренной схемы установлена линза, то эти лучи будут сфокусированы в одно пятно с той же поляризацией, что и исходный луч. Положением пятна в фокальной плоскости линзы можно управлять, меняя частоты сигналов, подаваемых на кристаллы. Лучи можно пространственно совместить и без использования линзы, выбрав частоты сигналов, подаваемых на кристаллы С1 и С3 с такой разницей, чтобы угол между лучами обеспечил их пересечение на заданном расстоянии.

Рис. 6 демонстрирует расчетную эффективность рассмотренной схемы двухкоординатного отклонения (в воздухе). Центру картины соответствуют центральные частоты всех трех дефлекторов. Существенно, что эффективность сканирования не обладает симметрией по углу $\delta\Theta_x$, что объясняется рассмотренными особенностями взаимодействия в кристалле С2. По нанесенным уровням эффективности видно, что с эффективностью не менее 80% диапазон сканирования со-

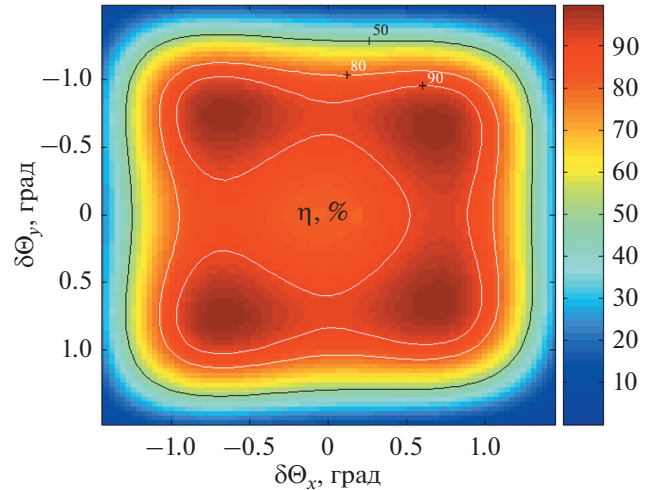


Рис. 6. Эффективность двухкоординатного сканирования в воздухе.

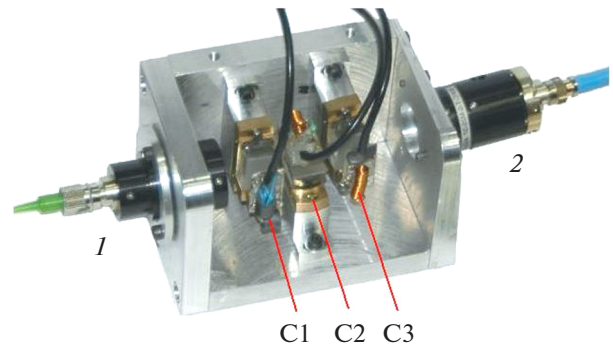


Рис. 7. Внешний вид изготовленного дефлектора. С1, С2 и С3 – единичные дефлекторы на TeO_2 , 1 – входной коллиматор, 2 – выходной, габариты устройства: $100 \times 65 \times 65$ мм.

ставляет $\pm 1^\circ$ по каждому измерению относительно центра картины.

4. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ДЕФЛЕКТОРА

Конструкция трехкристального дефлектора – переключателя волоконных каналов [30] показана на рис. 7. Использовались три идентичных дефлектора с параметрами: $\alpha = 6^\circ$, пьезопреобразователь из LiNbO_3 имел размеры: $L = 5$ мм (длина взаимодействия), $H = 6$ мм (высота). Акустическая полоса преобразователя: 20–50 МГц, длина волны света 1.06 мкм. Дефлектор сопряжен с разъемами типа FC-PC. Вход – одно волокно, выход квадратная матрица, содержащая 25 световодов (5×5) и вмонтированная в один разъем. Устройство в сборе с волоконными световодами представлено на рис. 8.

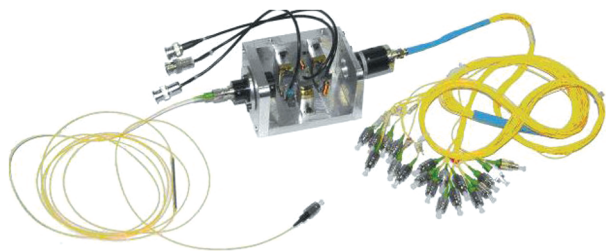


Рис. 8. Внешний вид переключателя волоконных каналов.

Измерения основных параметров дефлектора показали:

- суммарные потери света от 3.8 до 5.3 дБ;
- развязка между каналами от –45 до –60 дБ;
- время переключения 7 мкс;
- при изменении поляризации входного излучения в диапазоне 90° коэффициент передачи световой мощности изменяется от 100 до 92%.

Число каналов может быть увеличено при более плотной упаковке световодов, но при этом ухудшается развязка между каналами. Например, при использовании матрицы 10×10 (всего 100 световодов) развязка составит около –30 дБ.

Известно, что для увеличения числа разрешимых угловых положений необходимо уменьшать расходимость света на входе дефлектора. В частности, разрешение каждого из использованных единичных дефлекторов (при расширении пучка света) может достигать порядка 200 значений. При этом увеличение ширины пучка ухудшает быстродействие. Таким образом, с учетом ограничений по времени переключения рассмотренная схема может обеспечить несколько десятков тысяч разрешимых положений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена новая схема высокоэффективного поляризационно-независимого двухкоординатного АО дефлектора. Дефлектор состоит только из трех оптических элементов – единичных АО кристаллов. Изучены и рассчитаны основные характеристики дефлектора на базе кристалла парателлуриита. Установлено, что для длины волны света 1.06 мкм в диапазоне акустических частот 25–45 МГц дефлектор обеспечивает двухкоординатное сканирование не менее 1° с эффективностью более 80%.

2. Создана практическая модель дефлектора – переключателя волоконных каналов, объединенного с одномодовыми волоконными световодами – одним на входе и матрицей 5×5 на выходе, с паразитной засветкой соседних каналов не хуже 45 дБ.

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 при проведении данного исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Магдич Л.Н., Молчанов В.Я.* Акустооптические устройства и их применение. М.: Сов. радио, 1978.
2. *Sapriel J.* Acousto-Optics. N.Y.: Wiley, 1979.
3. *Балакшиев В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е.* Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985.
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.
7. *Задорин А.С.* Динамика акустооптического взаимодействия. Томск: Томский гос. ун-т, 2004.
8. *Гуляев Ю.В., Казарян М.А., Мокрушин Ю.М., Шакин О.В.* Акустооптические лазерные системы формирования телевизионных изображений. Москва: Физматлит, 2016.
9. *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.
10. *Uchida N., Ohmachi Y.* Elastic and photoelastic properties of TeO_2 single crystal // J. Appl. Phys. 1969. V. 40. № 12. P. 4692–4695. <https://doi.org/10.1063/1.1657275>
11. *Yano T., Watanabe A.* Acousto-optic figure of merit of TeO_2 for circularly polarized light // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. № 3. P. 1243–1245. <https://doi.org/10.1063/1.1663396>
12. *Uchida N.* Optical Properties of Single-Crystal Paratellurite (TeO_2) // Phys. Rev. B. 1971. V. 4. № 10. P. 3736–3745. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.4.3736>
13. *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. pp. 158–161. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2006.08.009>
14. *Антонов С.Н., Кузнецова Е.В., Миргородский В.И., Проклов В.В.* Акустооптические исследования распространения медленной акустической волны в TeO_2 // Акуст. журн. 1982. Т. 28. № 4. С. 433–437.
15. *Волошинов В.Б., Поликарпова Н.В., Можяев В.Г.* Близкое к обратному отражение объемных акустических волн при скользящем падении в кристалле парателлуриита // Акуст. журн. 2006. Т. 52. № 3. С. 297–305.
16. *Дьяконов Е.А., Волошинов В.Б., Поликарпова Н.В.* Акустооптическое исследование необычных случаев отражения объемных упругих волн в кристал-

- ле парателлурита // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 1. С. 121–131.
17. Балакий В.И., Манцевич С.Н. Распространение акустических пучков в кристалле парателлурита // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 5. С. 600–609.
18. Балакий В.И., Ермаков А.А., Манцевич С.Н. Акустические лучевые спектры в кристалле парателлурита // Физические основы приборостроения. 2013. Т. 2. № 2 (7). С. 70–81.
19. Поликарпова Н.В., Волошинов В.Б., Иванова П.А. Отражение плоских акустических волн при наклонном падении на грань кристалла диоксида теллура // Акуст. журн. 2019. Т. 65. № 6. С. 740–750.
20. Антонов С.Н. Акустооптические устройства управления неполяризованным светом и модуляторы поляризации на основе кристалла парателлурита // Журн. техн. физ. 2004. Т. 74. № 10. С. 84–89.
21. Антонов С.Н. Акустооптический дефлектор неполяризованного лазерного излучения // Журн. техн. физ. 2016. Т. 86. № 1. С. 136–139.
22. Yano T., Kawabuchi M., Fukumoto A., Watanabe A. TeO₂ anisotropic Bragg light deflector without mid-band degeneracy // Appl. Phys. Lett. 1975. V. 26. № 12. P. 689–691.
<https://doi.org/10.1063/1.88037>
23. Антонов С.Н. Акустооптический дефлектор – новый метод повышения эффективности и широкополосности // Журн. техн. физ. 2016. Т. 86. № 10. С. 155–158.
24. 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>
25. Антонов С.Н. Акустооптический дефлектор с высокой дифракционной эффективностью и широким угловым диапазоном сканирования // Акуст. журн. 2018. Т. 64. № 4. С. 432–436.
<https://doi.org/10.1134/S0320791918040019>
26. Антонов С.Н. Акустооптические дефлекторы на кристалле парателлурита. Методы увеличения эффективности и расширения угла сканирования // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 3. С. 89–95.
<https://doi.org/10.1134/S0032816219020174>
27. Антонов С.Н. Акустооптический дефлектор с отводом тепла от пьезопреобразователя при акустической изоляции тепловода // Акуст. журн. 2019. Т. 65. № 5. С. 588–595.
<https://doi.org/10.1134/S0320791919050034>
28. Антонов С.Н. Базовая технология широкополосной высокоэффективной акустооптической ячейки (дефлектора) на кристалле парателлурита // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 6. С. 82–89.
<https://doi.org/10.1134/S0032816219060016>
29. Проклов В.В., Резвов Ю.Г., Подольский В.А., Сивкова О.Д. Инвариантность функции пропускания акустооптического устройства при изменении угла сноса акустического пучка // Акуст. журн. 2019. Т. 65. № 4. С. 484–489.
30. Antonov S., Vainer A., Proklov V., Rezvov Yu. Switch multiplexer of fiber-optic channels Based on multi-beam acousto-optic diffraction // Applied Optics. 2009. V. 48. № 7. P. C171–C181.
<https://doi.org/10.1364/AO.48.00C171>