

## Краткие сообщения

10

### Акустооптический модулятор неполяризованного лазерного излучения на кристалле парателлурита

© С.Н. Антонов

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 141190 Фрязино, Московская область, Россия  
e-mail: olga-ant@ya.ru.

(Поступило в Редакцию 25 декабря 2014 г. В окончательной редакции 30 апреля 2015 г.)

Разработан акустооптический модулятор неполяризованного лазерного излучения на основе кристалла парателлурита в режиме анизотропной дифракции на медленной акустической волне. Используется одна акустооптическая ячейка, в которой одновременно возбуждались две акустические волны с разными частотами. На выходе ячейки образуются два дифракционных порядка ортогональных поляризацій, отстоящих в противоположных направлениях относительно нулевого порядка. Установленная непосредственно за ячейкой поляризационная призма собирает дифракционные порядки в один выходной неполяризованный луч. Суммарная эффективность составила 96%.

#### Введение

Акустооптика (АО) — взаимодействие света с ультразвуковыми волнами в прозрачных средах исследовалась как с теоретической стороны, так и с прикладной многие десятилетия. Однако особый практический интерес в последнее время АО приобрела в связи с бурным развитием и созданием мощных, в частности, волоконных лазеров. В РФ промышленно выпускаются (НТО ИРЭ „Полюс“) одномодовые лазеры мощностью 50 W и многомодовые до десятков киловатт, большинство на длину волны света  $1.06 \mu\text{m}$ . Важно, что столь большие мощности достигаются для неполяризованного света.

И здесь неоспоримо важна комбинация свойств АО — возможность управление очень интенсивным лазерным излучением (киловатты и более на  $\text{cm}^2$ ), достаточно высокое быстродействие (вплоть до десятков наносекунд) при отсутствии механически перемещаемых в работе элементов. Одним из основных материалов, на котором разрабатываются и производятся АО-приборы (модуляторы и дефлекторы), является монокристалл парателлурита ( $\text{TeO}_2$ ). Кристалл обладает феноменально большой величиной АО-качества, высокой прозрачностью (лучевой стойкостью) в диапазоне длин волн света от 0.3 до  $5 \mu\text{m}$  и развитой технологией роста и обработки больших однородных (до 20 mm размеров куба) образцов.

Однако высокая величина АО-эффективности реализуется в режиме анизотропной АО-дифракции, для входного света строго определенной поляризации. Тем самым управление (модуляция) мощным неполяризованным светом с эффективностью, близкой к 100%, и является задачей работы.

#### Проблема, идея и метод решения

Будет рассмотрена ситуация, когда медленная сдвиговая акустическая волна в кристалле  $\text{TeO}_2$  распространяется по направлению [110] со скоростью звука, равной  $V = 0.617 \cdot 10^6 \text{ mm/s}$ . Свет падает под значительным углом к оптической оси [001], этот режим дифракции принято обозначать как „far off axis“ [1]. Он характеризуется чисто брэгговским режимом (отсутствуют дополнительные порядки дифракции) и тем, что падающие и дифрагированные порядки линейно поляризованы. Отметим, что мы не будем приводить какие-либо теоретические и расчетные подходы и выводы, так как АО-особенности дифракции в  $\text{TeO}_2$  многократно и подробно описаны, например [1–3].

На рис. 1 иллюстративно представлены зависимости углов падения света на звук  $\sigma$  (угол между падающим светом и оптической осью кристалла) от частоты звука, при которых выполняются брэгговские условия.

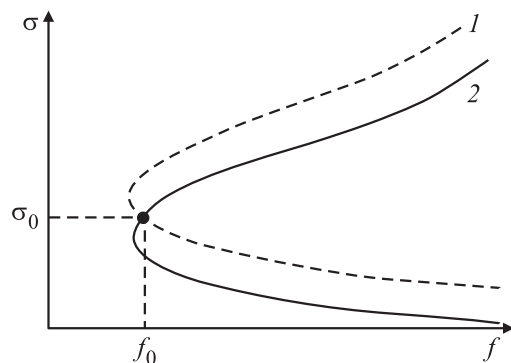


Рис. 1. Зависимость угла падения света  $\sigma$  на звуковую волну от частоты ее частоты  $f$ .

В силу анизотропного характера дифракции в  $\text{TeO}_2$  на одной частоте звука существуют два решения: кривые: 1 и 2 для ортогональных по поляризациям оптических мод, здесь и далее рассматриваются только две верхние ветви кривых. В общем случае на одной частоте дифракции отклонение света может происходить как по часовой стрелке, так и против относительно нулевого порядка (при перестройке положения АО-кристалла). Интересен в плане дальнейшего повествования частный случай, когда существует частота звуковой волны  $f_0$ , на которой обеспечивается одновременная дифракция двух ортогонально поляризованных компонент неполяризованного света — угол падения  $\sigma_0$  при неизменном положении АО-кристалла. По сути, такой акустооптический модулятор (АОМ) является поляризационной призмой, разбивающей неполяризованное излучение на два поляризованных луча. Для используемой в работе задачи — управление лазерами с длиной волны света  $1.06 \mu\text{m}$  расчетное значение  $f_0 = 4.5 \text{ MHz}$ , а минимальная длина преобразователя должна быть не менее  $24 \text{ mm}$  для обеспечения брэгговской дифракции (выполнение неравенства для параметра Клейна–Кука:  $Q \geq 4\pi$ ) [3]. В принципе все работает, но есть неприятные моменты (преодоление которых и есть цель работы). Во-первых, большая длина взаимодействия и следствие большой кристалл  $\text{TeO}_2$ , во-вторых углы между отклоненными лучами малы — около  $18 \text{ mrad}$  и, наконец, невозможно независимое управление каждым из дифракционных порядков. Решению этих проблем и посвящена настоящая работа.

На рис. 2, а приведена описываемая дифракция в виде векторной диаграммы. Здесь [001] и [110] кристалли-

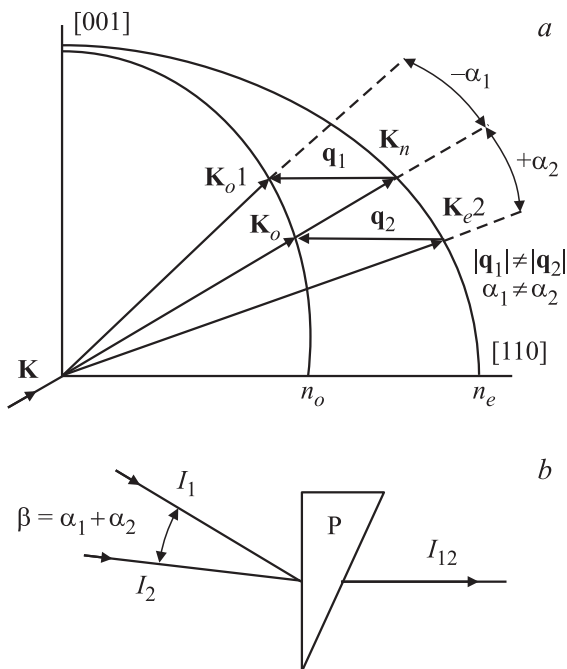


Рис. 2. Векторная диаграмма АО взаимодействия (а) и ход лучей в призме (b).

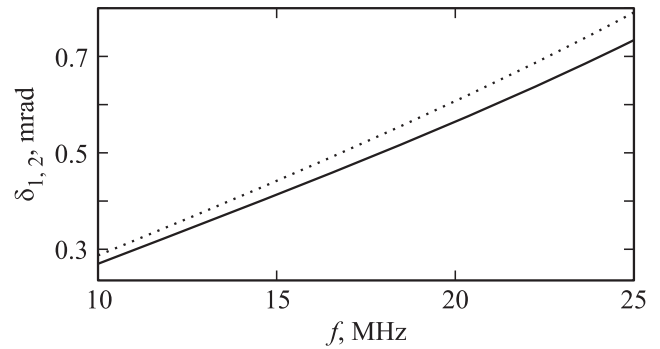


Рис. 3. Расчетные значения углов падения  $\sigma_1$  (непрерывная кривая) и  $\sigma_2$  (штрихи) для ортогональных поляризаций (углы к оптической оси) в рабочем диапазоне частот ультразвуковых волн.

ческие оси  $\text{TeO}_2$ , оптические индикатрисы кристалла обозначены как  $n_o$  и  $n_e$ . На кристалл падает неполяризованное излучение с вектором  $K$ , которое „разбивается“ в среде на собственные моды  $K_o$  и  $K_e$ , соответствующие показателям преломления кристалла в данной плоскости. Ультразвуковая волна направлена по оси [110]. Ультразвук состоит из двух независимых частот  $f_1$  и  $f_2$  с независимо устанавливаемыми амплитудами. На рисунке ультразвуковые волны соответствуют волновым векторам  $q_1$  и  $q_2$ . Отметим, что масштабы всех углов, естественно, не соответствуют реалиям — это иллюстрация.

Для справки, паять ничего не пришлось. Функцию генерации двух независимых частот на одном выходе обеспечивал генератор Tektronix AFG3000.

Из геометрии графика видно, что при одном падающем луче возможны такие значения частот звука, чтобы образовалось два дифракционных порядка:  $K_{o1}$  и  $K_{e2}$ , отстоящих от первоначального направления на углы  $-\alpha_1$  и  $\alpha_2$ . Для малых значений углов (а они не большие) можно пользоваться простым соотношением:  $\alpha = \lambda_{\text{св}}/\lambda_{\text{зв}}$ , т.е. отношение длин света и звука. Поляризации этих дифракционных порядков линейны и ортогональны, абсолютные значения углов различны.

Дальнейшая идея довольно проста (рис. 2, b). На выходе АО-модулятора устанавливается поляризационная призма (П), которая объединяет два ортогонально поляризованных луча с разными углами в один луч. При этом параметры призмы должны быть таковыми, чтобы входные лучи  $I_1$  и  $I_2$  „сливались“ в один  $I_{12}$ . То есть угол между лучами  $\beta$  должен быть равен сумме абсолютных значений углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ .

Далее приведем конкретные (расчетные) значения углов падения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  для ортогональных поляризаций в рабочей частоте ультразвуковых волн на кристалл (углы к оптической оси) (рис. 3) (это часть иллюстрации рис. 1).

Здесь непрерывная кривая и штрихи — это углы падения для двух ортогональных поляризаций света.

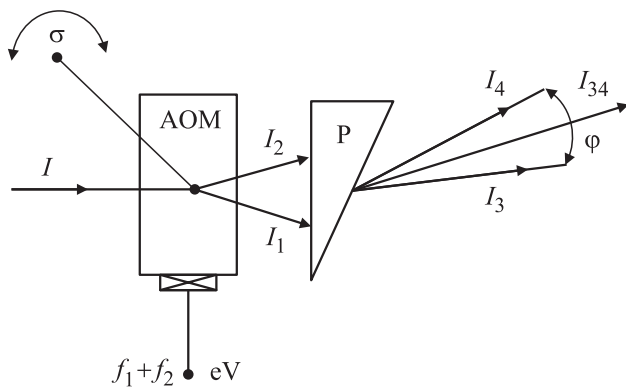


Рис. 4. Оптическая схема устройства — ход оптических лучей до АОМ, после него и на выходе призмы.

### Эксперимент, данные измерений

Оптическая схема состояла из неполяризованного волоконного лазера с длиной волны света  $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$  (диаметр светового пятна 0.6 мм, расходимость 2.4 mrad). АОМ изготовлен из кристалла  $\text{TeO}_2$ . Ширина по свету 6 мм, высота 14 мм, длина 16 мм. Пьезопреобразователь был изготовлен из  $\text{LNbO}_3$  для генерации сдвиговых акустических волн с размерами: высота 3 мм, длина 6 мм. Возможен вопрос о значительном превышении размеров кристалла  $\text{TeO}_2$  над световым пучком. Ответ в следующем — чем больше кристалл, тем более однородно звуковое поле.

Рабочий диапазон преобразователя 10–20 МГц. Поляризационная призма также была изготовлена из кристалла  $\text{TeO}_2$ , с квадратными оптическими гранями размерами  $14 \times 14 \text{ mm}$ , оптическая ось кристалла ориентировалась по диагонали квадрата. Самостоятельно призма обеспечивала „разбиение“ неполяризованного света на два ортогонально поляризованных углом между ними  $\beta = 46 \text{ mrad}$ .

На рис. 4 показана оптическая схема описываемого устройства — ход оптических лучей до АОМ, после него и на выходе призмы.

Здесь АОМ — акустооптический модулятор, П — поляризационная призма, расположенная в непосредственной близости от выходной грани АОМ. Лучи:  $I$  — входной луч,  $I_1$  и  $I_2$  — дифракционные порядки на выходе ячейки,  $I_3$  и  $I_3$  — преломленные призмой выходные лучи, угол между которыми в общем случае —  $\varphi$ .  $I_{34}$  — итог их совместного совмещения. Как и ранее, угловое положение элементов и соотношение в направлениях лучей сугубо иллюстративное. На электрический вход ячейки ЭВ подавались две независимо перестраиваемые частоты  $f_1$  и  $f_2$ . В измерениях диапазон частот был установлен в пределах от 10 до 22 МГц. Процедура измерений состояла в следующем. Выбиралась и включалась одна первая частота сигнала —  $f_1$ , затем изменением углового положения АОМ (по углу  $\sigma$ ) подстраивался брэгговский угол АОМ до максимальной

эффективности дифракции одного дифракционного порядка. Затем подключалась вторая частота и перестройкой ее значения достигался максимум эффективности во втором луче при фиксированном положении АОМ. Последний этап — измерение угла между выходными лучами  $I_3$  и  $I_4$  как функция частот звуковых волн. Оптические измерения производились с использованием измерителя профиля оптического излучения ВР109-VIS. Измеритель находился в фокусе однометровой линзы и позволял измерять как угловое положение лучей, так и их интенсивность.

На рис. 5 представлена зависимость угла  $\varphi$  между лучами от частоты  $f_1$  в виде экспериментальных точек.

В диапазоне измерений разность частот составила:  $f_2 - f_1 \approx 1.1 \text{ MHz}$ . Из результатов измерений видно, что при частоте  $f_1 = f_0 = 15 \text{ MHz}$  угол  $\varphi$  между лучами равен нулю, т.е. образован один неполяризованный дифракционный порядок. Что, собственно, и является итогом работы. Суммарная эффективность составила 96% при подводимой электрической мощности

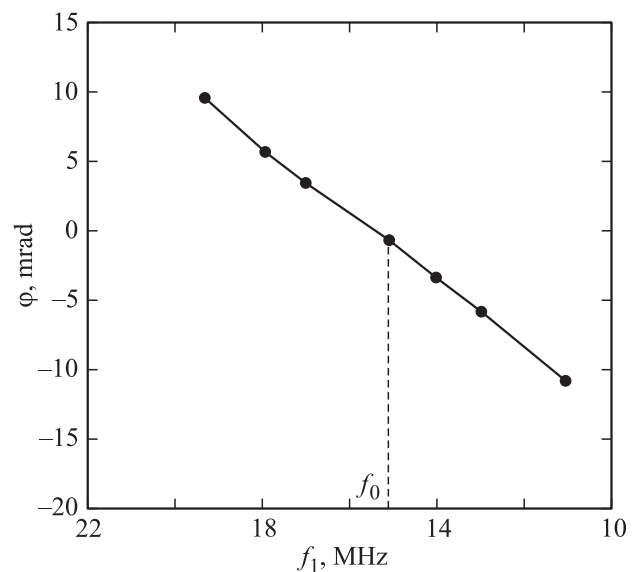


Рис. 5. Зависимость угла  $\varphi$  между лучами на кристалл от частоты  $f_1$  в виде экспериментальных точек.

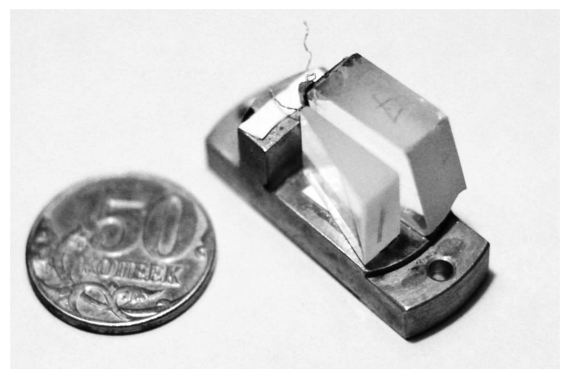


Рис. 6. Фотография изготовленного модулятора.

к АОМ 0.8 W. Отметим, что точность измерений углов для лучей  $I_3$  и  $I_4$  была не хуже 5%.

Из известного соотношения для угла рассеяния (отклонения дифракционного брэгговского порядка) можно легко связать частоту сигнала  $f_1$ , скорость  $V$  ультразвука, длиной волны света  $\lambda$  с параметром призмы:  $\beta \approx 2(\lambda \cdot f_1)/V$ .

Следует указать еще на одну практически важную особенность предложенного устройства. В ряде случаев необходимо не объединять выходные лучи в один, а отклонять их в два, независимо от направления луча. При этом, с одной стороны, можно управлять угловой разницей в их распространении при независимом изменении интенсивности каждого из лучей.

На рис. 6 показана фотография внешнего вида АОМ с призмой (корпус и плата согласования сняты).

## Выводы

Рассмотрена возможность высокоэффективной дифракции неполяризованного света в кристалле  $\text{TeO}_2$  в режиме анизотропной, чисто брэгговской дифракции. Используется дифракция на медленной сдвиговой акустической волне типа „far off axis“ — свет падает под значительным углом к оптической оси [001]. Показано, что объединение АОМ с дополнительной пассивной поляризационной призмой позволяет сформировать единственный выходной дифракционный неполяризованный луч. Помимо этого, устройство позволяет независимо управлять положением и интенсивностями выходных дифракционных порядков. Создан модулятор неполяризованного света на длину волны света  $1.06 \mu\text{m}$  с эффективностью 96%.

Автор выражает признательность к.ф.-м.н. А.В. Вайнеру за помощь в математической обработке материалов.

## Список литературы

- [1] Warner A.W., White D.L., W.A. Bonner W.A. // J. Appl. Phys. 1972. Vol. 43. N 11. P. 4489–4495.
- [2] Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. Акустооптические устройства и их применение. М.: Советское радио, 1978. 111 с.
- [3] Антонов С.Н. // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 10. С. 84–89.