

Акустооптический дефлектор неполяризованного лазерного излучения

© С.Н. Антонов

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

(Поступило в Редакцию 22 января 2015 г.)

Разработан акустооптический дефлектор на основе анизотропной дифракции в кристалле парателлуриата. Особенностью является высокоэффективная дифракция неполяризованного света лазерного излучения. Дефлектор состоит из двух последовательно включенных акустооптических ячеек. Каждая из ячеек отклоняет одну из ортогональных поляризационных компонент исходно неполяризованного света. Первая ячейка сканирует низкочастотную часть всего углового диапазона, вторая — высокочастотную. Ячейки работают независимо и одновременно, чем достигается полное использование световой (лазерной) мощности. Для неполяризованного света с длиной волны $1.06 \mu\text{m}$ практически достигнута частотная полоса 32 MHz, что соответствует абсолютному угловому диапазону 50 mrad, при суммарной эффективности не менее 70%.

Введение

Акустооптика (АО) в практическом смысле это управление параметрами оптического излучения ультразвуковыми волнами в прозрачных средах. Бурное развитие лазеров и их применение в науке и технике „высветило“ важную особенность АО-приборов. Это возможность управления очень интенсивным лазерным излучением (киловатты и более на см кв), достаточно высокое быстродействие (вплоть до десятков нс) при отсутствии механически перемещаемых в работе элементов. Наряду с модуляторами интенсивности света широкое применение находят АО дефлекторы (АОД), осуществляющие угловую развертку лазерного излучения. Сканирование угла распространения лазерного света позволяет, в частности, создавать устройства нанесения „прожига“ изображений на различные материалы. Один из классических примеров — это аппаратура для вывода флексоформ, заменяющая фотохимическую процедуру (так называемые граверы). На рис. 1 приведен общий принцип работы таких устройств. Здесь на вращающийся барабан (Б) нанесен материал, на котором „выжигается“ изображение. Входное лазерное излучение (ВЛ) с помощью АОД развертывается по координате X , координата Y — вращение

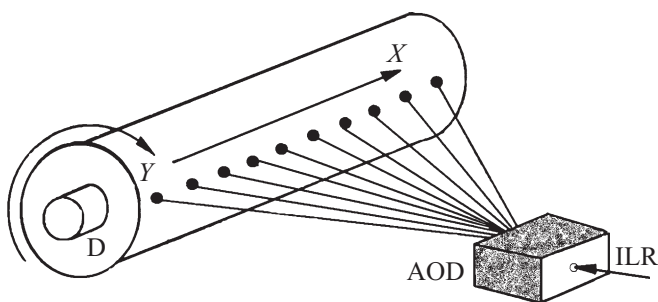


Рис. 1. Пример работы системы лазерного вывода изображения.

барабана. Очевидно, что угловой диапазон сканирования, число разрешимых состояний, эффективность (малые дифракционные потери) являются основными параметрами используемых АОД.

В таких системах наибольшее использование находят высокоэффективные одномодовые волоконные лазеры с мощностями несколько десятков ватт (длина волны света $1.06 \mu\text{m}$). То, что излучение таких лазеров в подавляющем большинстве неполяризованное, и является одним из аспектов настоящей работы. Основным материалом, на котором разрабатываются и производятся АО-приборы (модуляторы и дефлекторы), является монокристалл парателлуриата (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, когда поляризации входного и, следовательно, дифрагированного света строго заданы. Тем самым создание дефлекторов для широкоугольной развертки неполяризованного света без потери эффективности дифракции (максимального использования исходной мощности лазера) и является нашей задачей.

Общие положения для анизотропного дефлектора

Дефлекторы на основе кристалла TeO_2 реализуются в основном по следующей схеме. Медленная сдвиговая акустическая волна в кристалле распространяется под некоторым углом к направлению $[110]$ в плоскости (001) [1]. Векторная диаграмма такого вида АО-дифракции — неаксиальный анизотропный дефлектор, характеризующейся сменой поляризационной моды света при дифракции, — приведена на рис. 2.

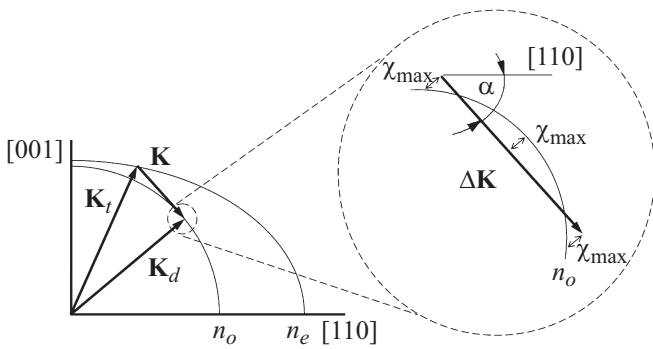


Рис. 2. Геометрия АО-взаимодействия.

Здесь \mathbf{K} — волновой вектор звука, \mathbf{K}_t и \mathbf{K}_d — падающий и дифрагированный свет, соответственно $n_o n_e$ — индикатрисы кристалла. $\Delta\mathbf{K}$ — изменение модуля вектора звука при перестройке его частоты. Ультразвук распространяется под углом α к оси $[110]$, и его волновой вектор направлен по углу по касательной к волновой поверхности дифрагированного света, благодаря чему синхронизм сохраняется в большой полосе частот. Зависимость эффективности от частоты имеет два максимума, поскольку точный синхронизм реализуется при двух значениях частоты. Точный брэгговский синхронизм (максимумы) достигается при пересечении вектора \mathbf{K} индикатрисы n_o . Варьируя угол падения исходного светового луча, можно выбирать компромисс между шириной полосы и глубиной снижения эффективности в центре полосы (между двумя максимумами). Принято пользоваться термином и величиной расстройки брэгговского синхронизма χ , которая определяется несовпадением волновых векторов:

$$\chi = |\mathbf{K}_d - \mathbf{K}_t - \mathbf{K}|.$$

При заданной предельной допустимой расстройке χ_{\max} полоса составляет

$$\Delta f = V_s \frac{\Delta\mathbf{K}}{2\pi} = V_s \sqrt{\frac{8\chi_{\max} n_o}{\pi\lambda}},$$

где V_s — скорость звука, n_o — показатель преломления обыкновенной световой моды, λ — длина волны света в вакууме.

Рассмотрим расчетные значения центральной частоты дефлектора и полосы частот (углового диапазона сканирования) от значения угла α . Расчет был сделан на основе уравнений связанных волн, учитывавших высшие дифракционные порядки. Под эффективностью дифракции подразумевалась доля мощности, отклоненная в плюс первый порядок относительно падающего на кристалл излучения. Звуковое поле считалось однородным. Для учета угловой расходимости излучения эффективность, полученная для плоских волн, усреднялась по угловому спектру излучения, который считался гауссовым. В расчете использовались параметры: длина волны излучения — $1.06 \mu\text{m}$; расходимость излучения —

1 mrad (полная, по уровню e^{-2} , в кристалле), размер преобразователя, излучающего звук, в плоскости дифракции — 6 mm .

В практически работающих дефлекторах используют скос звуковой грани (величину угла α) от 4° до 6° . На рис. 3 наложены друг на друга три частотные характеристики дефлекторов с разным направлением звука α : 4° , 5° и 6° соответственно. Расчет производился таким образом, чтобы в каждом случае минимальная эффективность была равна 80%. Видно, что при $\alpha = 4^\circ$ центральная частота равна 25 МГц, при 5° — 32 МГц и при 6° — 37 МГц.

Из каких соображений изготавливают АОД с тем или иным скосом звуковой грани. Кристалл TeO_2 имеет значительную величину акустической анизотропии — угол сноса энергии примерно в 50 раз больше, чем

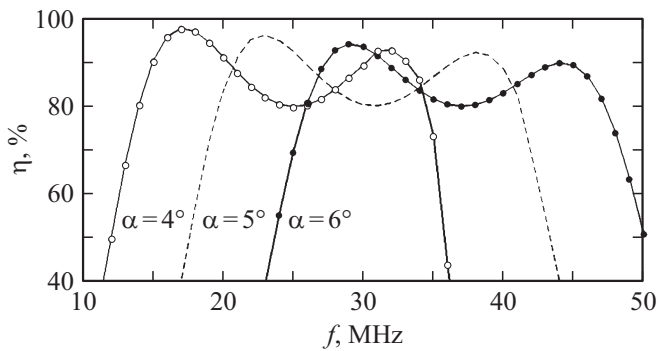


Рис. 3. Три частотные характеристики дефлекторов с разным направлением звука.

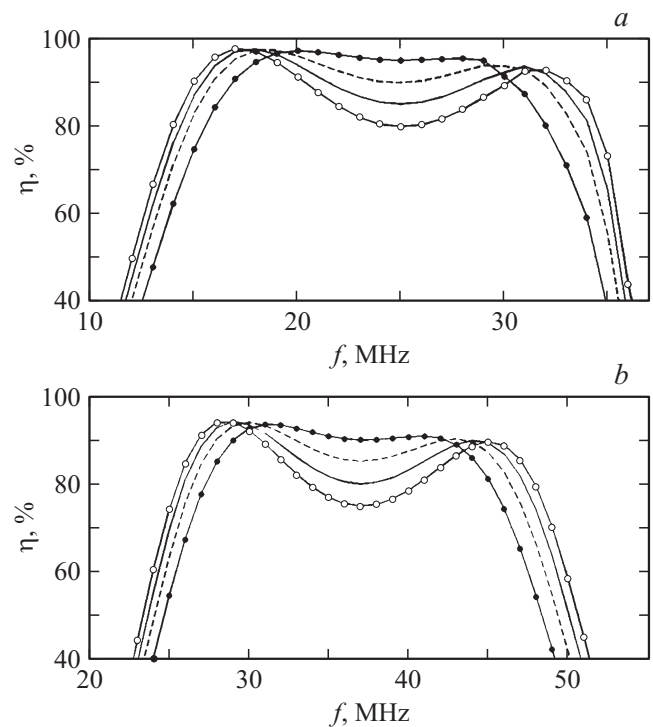


Рис. 4. Зависимости эффективности дифракции от частоты ультразвука.

скос звуковой грани. Тем самым, чем больше α , тем объемнее требуется кристалл. Однако при этом расширяется диапазон сканирования и увеличивается средний угол отклонения, что повышает контраст в зоне записи изображения.

Исходя из анализа результатов рис. 3 будем использовать АО-ячейки с величиной α 4° и 6° , как обеспечивающих суммарно максимальную частотную полосу.

На рис. 4 приведены зависимости эффективности дифракции η от частоты ультразвука при различных вариантах настройки одной и той же АО-ячейки относительно падающего оптического луча. Рис. 4, *a* — для ячейки с $\alpha = 4^\circ$, рис. 4, *b* — 6° . Кривая с прозрачными точками — максимальная полоса, но большой провал в эффективности, далее непрерывная, штрихи и, наконец, черные точки — сужение полосы, но высокая эффективность. Проявляется известный компромисс — полоса и эффективность. Тем самым хорошо видна зависимость: уменьшение модуля вектора звука ΔK приводит к повышению максимальной эффективности, но к сужению рабочей полосы частот.

Идея метода

Идея метода есть продолжение работы [2], которая состоит в последовательном использовании двух АОД и фазовой пластины $\lambda/2$ между ними, что демонстрируется на рис. 5. Очевидно, что ход лучей не более, чем иллюстрация, ибо в координатном пространстве лучи практически не разделяются. Падающее неполяризованное излучение I поступает на первый дефлектор (АОД1), затем на фазовую пластину ($\Pi \lambda/2$) и на второй дефлектор (АОД2). Интенсивность остаточного излучения на выходе АО-системы I_0 . На первом дефлекторе происходит высокоэффективная дифракция одной линейной поляризационной компоненты входного света. Таким образом, выходные лучи: дифрагированный и прошедший, после АОД1 имеют линейную ортогональную поляризацию. Фазовая пластина „поворачивает“ поляризации обоих лучей на 90° . На входе АОД2 поляризация недифрагированного излучения становится соответствующей для работы его как дефлектора, а поворот поляризации нулевого порядка выводит его из АО-взаимодействия.

Весь рабочий угловой диапазон работы от Φ_1 до Φ_3 . Дефлекторы отличаются тем, что первый низкочастотный „обслуживает“ угловой диапазон сканирования от Φ_1 до Φ_2 , а второй высокочастотный от Φ_2 до Φ_3 . Частота сигнала, подаваемого на первый дефлектор, сканируется в диапазоне Δf_1 от f_1 до f_2 , второго в диапазоне Δf_2 от f_2 до f_3 . Существенно, что дефлекторы могут работать одновременно и независимо друг от друга.

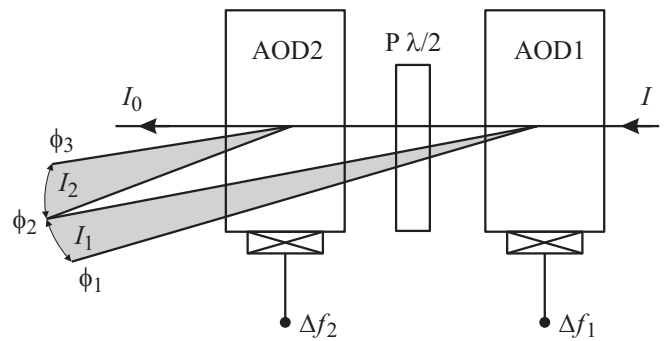


Рис. 5. Оптическая схема составного двухкристального АОД.

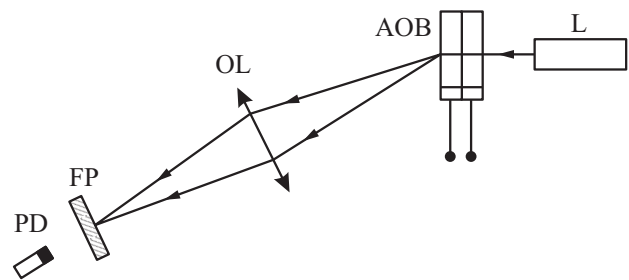


Рис. 6. Схема измерительной установки.

Экспериментальные результаты

Для экспериментов и измерений были изготовлены два дефлектора из монокристалла парателлуриата (TeO_2) с возбуждением медленной сдвиговой волны с волновым вектором, лежащим в плоскости $(1\bar{1}0)$. В первом „скос“ звуковой грани был под углом $\alpha_1 = 4^\circ$ к направлению (110) , во втором $\alpha_2 = 6^\circ$. Пьезопреобразователи изготовлены из LiNbO_3 с размерами: 6 mm длина, 4 mm высота, соответственно их толщины связаны с различными центральными рабочими частотами. Материалом фазовой пластины $\lambda/2$ являлся кристаллический кварц.

На рис. 6 схематично показана измерительная установка. В качестве источника света (Л) использовался одномодовый волоконный лазер неполяризованного света с длиной волны $1.06 \mu\text{m}$, диаметром пучка 0.6 mm и полной расходимостью 2.4 mrad. Испытав дифракцию в АО-блоке (АОБ), свет падал на линзу (ОЛ) и затем на матовую пластину (МП), после которой детектировался фотоприемником (ФП). Линза располагалась софокусно между дефлекторами и матовой пластиной.

Методика измерений заключалась в следующем. Первоначально включался первый дефлектор, и снималась зависимость максимальной эффективности дифракции от частоты сигнала. Учитывая некоторую неравномерность импеданса преобразователя от частоты, в каждой точке измерений подбирались оптимальное значение величины амплитуды. То же производилось и со вторым дефлектором отдельно. В описании экспериментальных

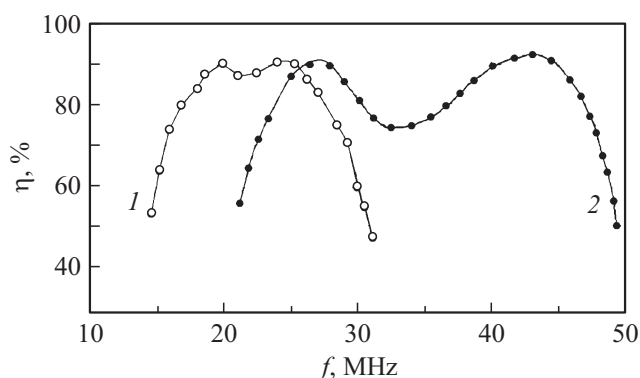


Рис. 7. Зависимость эффективности дифракции от частоты звуковой волны.

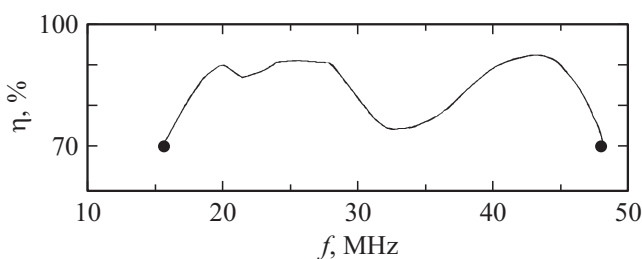


Рис. 8. Эффективность дифракции при совместной работе двух дефлекторов. Точки — края частотного диапазона.

данных под эффективностью дифракции на каждом отдельном дефлекторе η будем понимать отношение интенсивности дифрагированного света к соответствующей поляризационной компоненте входного неполяризованного света. Например, мы указываем эффективность дифракции на первом АОД равной 90%. В действительности, испытает дифракцию только половина энергии падающего света и в этом смысле эффективность равна 45%.

На рис. 7 представлены результаты измерений. Кривая 1 — работа первого „низкочастотного“ дефлектора, кривая 2 — второго „высокочастотного“.

На рис. 8 — результат совместной работы первого и второго дефлекторов. Как указывалось, существует компромисс между полосой сканирования и эффективностью дифракции. Из практических соображений нами был выбран уровень эффективности в 70%, что приводит к следующей полосе частот. Для „низкочастотного“ дефлектора с 16 до 25 МГц, а для „высокочастотного“ с 25 до 48 МГц. Данная девиация частоты соответствует (обеспечивает) угловой диапазон сканирования в 50 mrad.

Выводы

Предложен АО-метод управления неполяризованным лазерным излучением с целью широкополосного дефлек-

тора. Реализация основана на использовании последовательно включенных двух АО-ячеек. Ячейки изготовлены из кристалла TeO_3 в режиме высокоэффективной анизотропной дифракции на медленной акустической моде. Каждая из ячеек независимо друг от друга отклоняет одну из ортогональных поляризационных компонент исходно неполяризованного света. Первая ячейка сканирует низкочастотную часть всего углового диапазона, вторая — высокочастотную. Ячейки работают независимо и одновременно, чем достигается полное использование световой (лазерной) мощности. Практически следующие параметры: для неполяризованного света с длиной волны $1.06 \mu\text{m}$ достигнута частотная полоса 32 МГц, что соответствует абсолютному угловому диапазону 50 mrad, при суммарной эффективности не менее 70%.

Автор выражает благодарность А.В. Вайнеру за помощь в расчетах и графическом отображении результатов.

Список литературы

- [1] Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. Акустооптические устройства и их применение. М.: Советское радио. 1978. 111 с.
- [2] Антонов С.Н. // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 10. С. 84–89.