

## Акустооптический дефлектор — новый метод повышения эффективности и широкополосности

© 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 29 июля 2015 г. В окончательной редакции 29 декабря 2015 г.)

Разработан новый тип акустооптического дефлектора на основе анизотропной дифракции в кристалле парателлурита. Особенностью метода и разработанного прибора является расширение углового диапазона сканирования при сохранении высокой эффективности дифракции. Основой метода является использование свойств брэгговской дифракции при индексах фазовой модуляции равных  $3\pi$ . Установлено, что при больших индексах фазовой модуляции наблюдается существенное расширение полосы частот при сохранении высокого значения эффективности дифракции. Комбинация в одном дефлекторе режимов индексов, равных  $\pi$  и  $3\pi$ , позволяет снизить мощность управления до практически приемлемых значений, обеспечивающих непрерывные режимы работы.

### Введение

Акустооптика (АО) — это раздел физики, изучающий взаимодействие электромагнитного излучения с дифракционными решетками, созданными акустическими волнами в прозрачной для излучения среде. На практике акустический диапазон занимает от единиц МГц до нескольких GHz, а оптический — от ультрафиолета до десятков  $\mu$ .

Изучались самые разнообразные возможности использования АО-эффекта: анализаторы радиосигналов, приборы спектральной обработки изображений, оптические процессоры и др. Основываясь на свой опыт, могу утверждать, что многосторонняя технологическая революция, с практической точки зрения, оставила только два практических АО-направления: дефлекторы — приборы для управления угловым положением света и модуляторы (сдвигатели частоты света). Несколько примеров. Дифракционные решетки и современные многоэлементные линейки фотоприемников широко используются для спектрального анализа. Современные фото- и телеустройства (размеры матриц и оптики, число элементов, динамический диапазон) не оставляют „ниши“ для АО-методов обработки изображения — слишком малы апертурные и угловые характеристики АО-фильтров. АО-приборы обработки радиосигналов — уже история (дешевый мобильный телефон мощнее компьютера, который американцы брали при полете на Луну). Причем это естественно — в редком доме сейчас можно увидеть кинескопный телевизор (или монитор). И все это за не полные 10 лет!

Выживание, и можно сказать, даже „ренессанс“ АО связан с революцией в лазерной технике: созданием мощных (более десятков kW), компактных, с потрясающим КПД (вплоть до 50%) волоконных лазеров. Тут и понадобились особенности АО: управление очень интенсивным лазерным излучением ( $\text{kW} \cdot \text{cm}^{-2}$  и более), достаточно высокое быстродействие (вплоть до десят-

ков ns), отсутствие механически перемещаемых элементов, малые вносимые световые потери (до единиц процентов), практически неограниченный ресурс работы.

АО-модуляторы используются в импульсных волоконных лазерах — формируют „гигантский“ импульс. Дефлекторы применяются в системах обработки материалов, устройствах лазерного вывода изображений, переключателях каналов при оптической передаче данных, устройствах навигации и позиционирования элементов конструкций.

Работа посвящена АО-дефлектору — устройству для управления угловым положением лазерного луча. Основные параметры дефлекторов: число разрешимых состояний, абсолютный угол сканирования, вносимые потери, быстродействие, потребляемая электрическая мощность (следовательно, тепловые эффекты и как результат нестабильность), поляризационные характеристики, геометрическая и угловая апертуры света. Практически все предельные параметры находятся в противоречии друг с другом. Как пример: чем выше угол сканирования, тем больше вносимые потери, больше число разрешимых состояний — меньше быстродействие.

Теория АО-дефлекторов и ряд частных, практически интересных особенностей изучены и описаны весьма полно [1–4]. В настоящей работе заявляется еще об одной новой возможности — повышение эффективности дефлектора и расширение углового диапазона сканирования.

### Анизотропный дефлектор на парателлурите

Достаточно давно и до настоящего времени одним из основных материалов, на котором разрабатываются и производятся АО-приборы, является монокристалл парателлурита ( $\text{TeO}_2$ ). Кристалл обладает феноменально большой величиной АО-качества, высокой прозрачностью (лучевой стойкостью) в диапазоне длин волн света

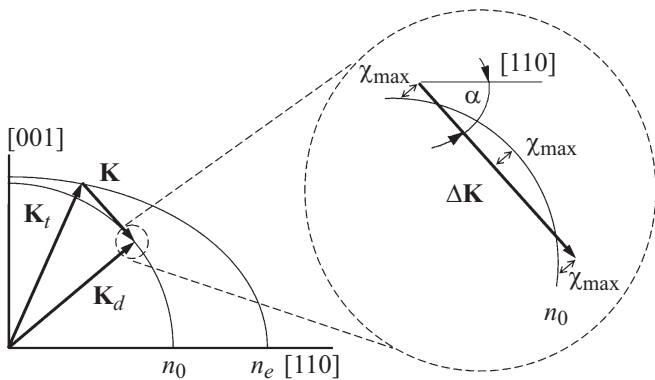


Рис. 1. Векторная диаграмма анизотропного АО-дефлектора.

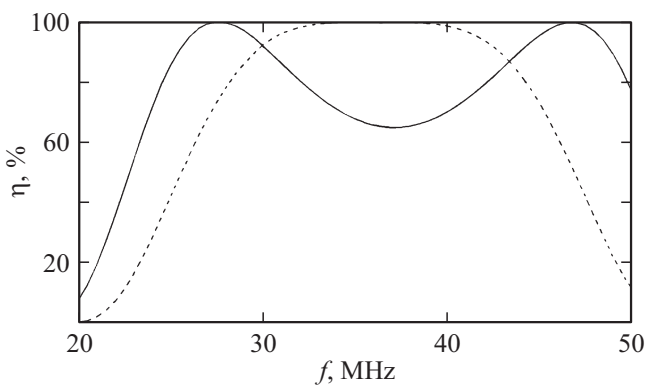


Рис. 2. Расчетные зависимости эффективности дифракции при индексе фазовой модуляции  $\gamma = \pi$ . Штриховая — узкополосный режим, непрерывная — широкополосный.

от 0.3 до 5  $\mu$ , развитой технологией роста и обработки больших однородных образцов (ребро куба до 20 mm). Оптическая и акустическая анизотропия кристалла TeO<sub>2</sub> определяет важные особенности АО-взаимодействия.

Дефлекторы на TeO<sub>2</sub>, как правило, работают в режиме брэгговской неаксиальной анизотропной дифракции. Медленная сдвиговая акустическая волна в кристалле распространяется в плоскости (001) под некоторым углом к направлению [110]. Векторная диаграмма такого вида АО-дифракции приведена на рис. 1.

Здесь  $\mathbf{K}$  — волновой вектор звука,  $\mathbf{K}_t$  и  $\mathbf{K}_d$  — вектора падающего и дифрагированного света соответственно,  $n_o, n_e$  — поверхности показателей преломления кристалла.  $\Delta\mathbf{K}$  — изменение модуля вектора звука при перестройке его частоты.

Волновой вектор звука направлен под углом  $\alpha$  к оси [110] и является касательной к поверхности показателей преломления дифрагированного света. Принято пользоваться термином и величиной расстройки брэгговского синхронизма  $\chi$ :

$$\chi = |\mathbf{K}_d - \mathbf{K}_t - \mathbf{K}|. \quad (1)$$

Известно [1], что брэгговский синхронизм в анизотропном дефлекторе при оптимальной (широкополос-

ной) настройке реализуется на двух акустических частотах, которым соответствуют два, предельно возможных, максимума дифракции (рис. 1).

Варьируя угол падения светового луча на АО-ячейку, можно изменить соотношение между шириной полосы и глубиной снижения эффективности (провала) в центре полосы между двумя максимумами.

Величина  $\chi$  определяется несовпадением волновых векторов и заданная предельная расстройка  $\chi_{\max}$  определяет максимальную частотную полосу:

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

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

Методика исследования имеет общий характер, однако для наглядности расчет будем приводить для конкретных экспериментальных условий. Угол „наклона“ звука  $\alpha = 6^\circ$ , длина преобразователя равна 6 mm, высота 4 mm, апертура света 0.6 mm, а его расходимость близка к дифракционной — около 2 mrad. Длина волны света равна 1.06  $\mu$ , на которой работают современные волоконно-оптические лазеры, — основа многих технологических установок.

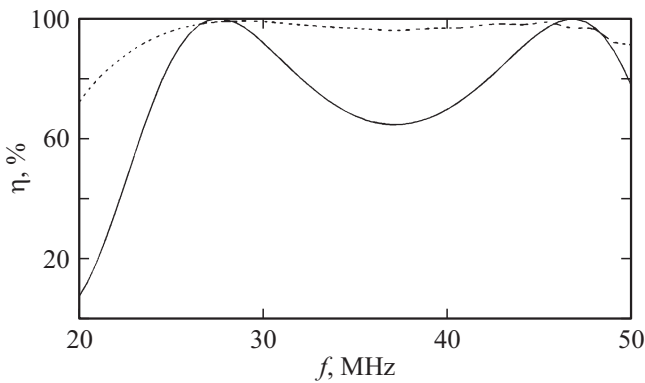
На рис. 2 приведены результаты расчета: частота звука ( $f$ ) и эффективность дифракции ( $\eta$ ) — отношение интенсивности дифрагированного светового луча к падающему.

Штриховая линия соответствует углу точного брэгговского синхронизма, когда волновой вектор звука в единственной центральной точке „соприкасается“ с волновой поверхностью дифрагированного света. Непрерывная кривая — это и есть характеристика широкополосного режима анизотропного дефлектора: пересечение вектора звука с волновой поверхностью света осуществляется в двух точках (рис. 1). Расчет сделан без учета расходимости оптического излучения и высших порядков дифракции. Здесь существенно, что максимум искался вблизи индекса фазовой модуляции  $\gamma = \pi$ , отдельно для каждой частоты.

Собственно, о чем говорят графики. Тенденция очевидна: чем больше „раздвигаются“ максимумы, тем больше провал эффективности в центре. Частотная полоса (угловой диапазон сканирования) и эффективность находятся в компромиссе: падение эффективности при расширении полосы. Повторим, что в плане настоящей работы все эти результаты получены для режима первого максимума эффективности как функции мощности звука. Именно в этом режиме и работают все известные АО-приборы, в частности, дефлекторы.

### Идея метода

Коэффициент связи АО-дифракции (индекс фазовой модуляции) описывается выражением (3), а эффектив-



**Рис. 3.** Расчетные зависимости эффективности дифракции дефлектора в широкополосном режиме. Непрерывная кривая при индексе фазовой модуляции  $\gamma = \pi$ , штриховая —  $\gamma = 3\pi$ .

ность дифракции (4):

$$\gamma = \frac{\pi}{\lambda \cos \theta} \sqrt{M_2 P_s \frac{L}{H}}, \quad (3)$$

$$\eta = \frac{\gamma^2}{\gamma^2 + \chi^2} \sin^2 \sqrt{\frac{\gamma^2 + \chi^2}{4}}, \quad (4)$$

$M_2$  — акустооптическое качество материала,  $P_s$  — мощность звука,  $L, H$  — длина и высота преобразователя,  $\theta$  — угол падения света на акустический волновой фронт.

Максимумы эффективности дифракции будут наблюдаться при мощностях ультразвука, соответствующих индексам фазовой модуляции:  $\gamma = \pi, 3\pi$  и т. д.

Режим  $\gamma = 3\pi$  исследовался достаточно мало (по меньшей мере, на практике). Одно из объяснений: почти десятикратное увеличение мощности звука по сравнению с режимом  $\gamma = \pi$ . Однако уже достаточно давно было установлено, что в этом режиме появляются интересные особенности АО-модификация углового спектра дифрагированного излучения. Так, в (3) было показано, что при  $\gamma = 3\pi$  модулятор с высокой эффективностью отклоняет свет со значительно большей расходимостью, чем при  $\gamma = \pi$ .

Исследование характеристик анизотропного дефлектора в режиме  $\gamma = 3\pi$  и есть суть работы.

На рис. 3 приведены расчетные зависимости, полученные методом, аналогичным рис. 2. Здесь непрерывная кривая — характеристика дефлектора в режиме  $\gamma = \pi$ , а штриховая — при амплитуде звука, увеличенной в 3 раза ( $\gamma = 3\pi$ ), все остальные параметры одинаковы.

Результаты расчета являются весьма интересными. Высокая эффективность (близка к 100%) сохраняется в значительной полосе частот: от 25 до 50 МГц и отсутствует характерный для дефлекторов такого типа провал в центре. Данный частотный диапазон в нашем конкретном случае обеспечивает угол сканирования около 40 мрад.

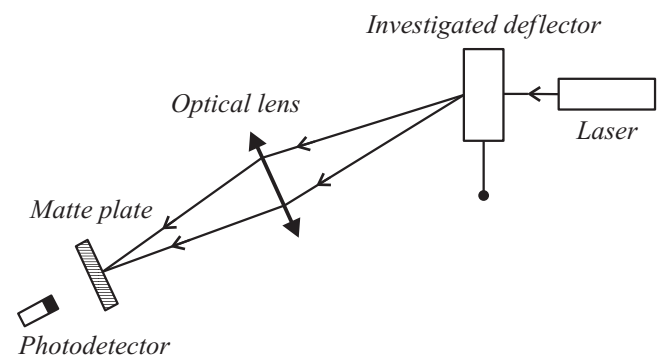
### Экспериментальные результаты

Эксперимент соответствовал расчету: пьезопреобразователь из  $\text{LiNbO}_3$  с размерами: 6 мм длина, 4 мм высота, толщина 55 мкм. Согласование акустических импедансов  $\text{TeO}_2$  и пьезопреобразователя осуществлялось дополнительным акустическим слоем между ними, что обеспечивало эффективное возбуждение звука от 20 до 50 МГц. Использовался импульсный одномодовый волоконный лазер с длиной волны 1.06 мкм, диаметр пучка 0.8 мм, полная расходимость  $\approx 2.4$  мрад, поляризация — линейная.

Рис. 4. Схема эксперимента. Здесь Л — лазер, АОД — исследуемый дефлектор, ОЛ — линза, МП — матовая пластина и ФП — фотоприемник. Линза располагалась софокусно между дефлектором и матовой пластиной.

Измерения эффективности дифракции от частоты проводились по следующей методике. Дефлектор устанавливался под определенным углом к падающему свету, и затем на каждой частоте ультразвука подбиралось оптимальное напряжение сигнала, соответствующее максимальной величине эффективности дифракции. Матовая пластина устраняла влияние положения светового луча на результаты измерений. Искажения, вызванные тепловыми эффектами, в АО-ячейке отсутствовали в силу импульсного режима измерений — скважность 20, тем самым подводимая к ячейке средняя мощность управления не превышала 400 мВт во всех режимах.

На рис. 5 приведены экспериментально полученные зависимости максимальной эффективности дифракции от частоты ультразвука. Зависимость 1 — режим  $\gamma = \pi$  (пиковая мощность ультразвука около 400 мВт), видна классическая зависимость с провалом эффективности в центре. Кривая 2 —  $\gamma = 3\pi$  (пиковая мощность ультразвука около 4 Вт). Хорошо наблюдается, что в режиме  $\gamma = 3\pi$  исчезает провал эффективности в центральной частотной области и несколько расширяется весь частотный диапазон. Заметно определенное количественное несоответствие экспериментальных результатов (зависимость 2 на рис. 5) и расчета (рис. 3) — практическая эффективность несколько меньше. Одно из возможных объяснение этого — неоднородность акустического поля, что не учитывалось в расчете [4].



**Рис. 4.** Схема эксперимента.

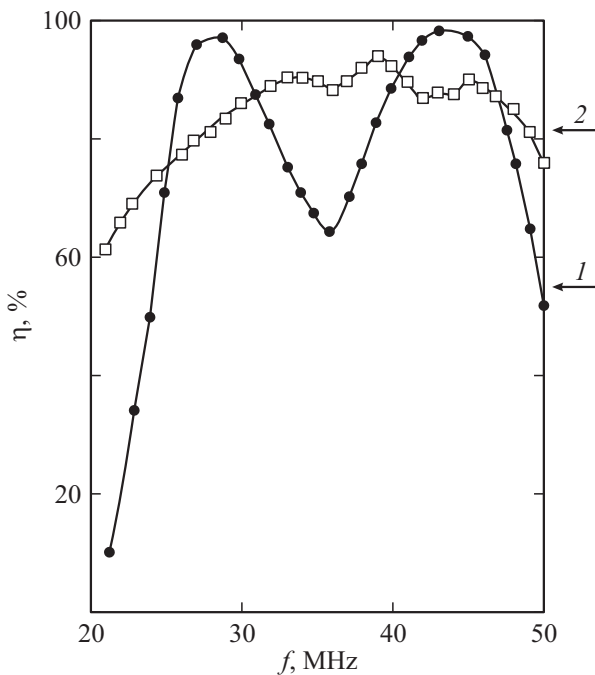


Рис. 5. Экспериментальные зависимости для режимов  $\gamma = \pi$  (кривая 1), и  $\gamma = 3\pi$  (кривая 2).

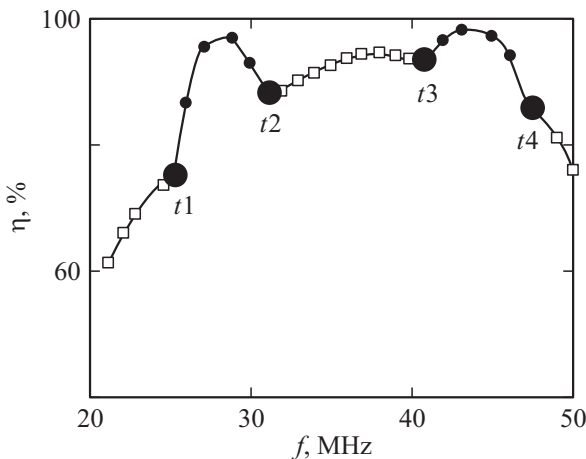


Рис. 6. Суммарная эффективность дифракции от частоты при „сшивании“ режимов  $\gamma = 3\pi$  и  $\gamma = \pi$ .

Рис. 6 — по сути итог работы, когда на разных участках частотного диапазона включался то один, то другой мощностной режим. С начала диапазона до узловой точки  $t_1$  режим  $\gamma = 3\pi$ , затем до точки  $t_2$  режим  $\gamma = \pi$ , затем до точки  $t_3$  режим  $\gamma = 3\pi$ , затем до точки  $t_4$  режим  $\gamma = \pi$  и с точки  $t_4$  и до конца диапазона  $\gamma = 3\pi$ .

Из экспериментальных результатов видно, что в полосе частот около 25 МГц, реально достигнутая эффективность составила около 85%.

Конечно, метод имеет и негативное свойство: требуется существенное увеличение мощности звука. Ограничением не является сама необходимость повышения

управляющей мощности — для современной электронной базы это не проблема.

В большинстве случаев предельные параметры АО-приборов ограничены именно тепловыми эффектами в ячейке. В нашем конкретном случае в дефлекторе, работающем в классическом режиме  $\gamma = \pi$ , мощность звука около 400 мВт, а в режиме  $\gamma = 3\pi$  примерно в 10 раз больше. Однако в силу того, что в половине диапазона работает то один, то другой режим, суммарное увеличение уже не в 10, а в 5 раз. Таким образом, средняя потребляемая мощность составляет около 2 Вт. Как установлено практически, в нашем случае это не приводит к негативным тепловым эффектам в ячейке и тем самым обеспечивается непрерывный режим работы. Проблема вообще отсутствует, если работа ведется в импульсном режиме — когда звук подается только тогда, когда „светит“ лазер. Еще раз отметим, что большой класс современных лазеров именно импульсные (условия эксперимента).

Для сравнения приведем параметры современного функционально аналогичного дефлектора фирмы Gooch & Housego, модель MD035-3S2B53-5-6.5DEG [5]. Частотный диапазон 25–45 МГц, эффективность 70%, спад эффективности в рабочей полосе 2 дБ, потребляемая мощность 2 Вт. Видно, что предлагаемый дефлектор лучше.

Автор выражает глубокую признательность к.ф.-м.н. Вайнеру А.В. за помощь в расчетах и внимание к работе.

## Выводы

Заявлен новый способ существенного повышения эффективности АО-дефлекторов при сохранении и расширении частотной полосы. Метод основан на том, что в режиме второго (по мощности) брэгговского максимума происходит существенное повышение эффективности дифракции. Объединение в одном дефлекторе (одном частотном диапазоне) режимов первого и второго дифракционных максимумов (как функции мощности звука) позволяет снизить управляющую мощность до приемлемой с повышением эффективности дифракции и частотной полосы. Практически на кристалле парателлуриата достигнута эффективность более 85% в полосе частот около 25 МГц, что обеспечивает абсолютный угол сканирования около 40 мрад.

## Список литературы

- [1] Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. Акустооптические устройства и их применение. М.: Советское радио, 1978. 111 с.
- [2] Балакиев В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985. 280 с.
- [3] Антонов С.Н., Козлов М.Р., Проклов В.В. // Опт. и спектр. 1991. Т. 50. Вып. 4. С. 805–807.
- [4] Антонов С.Н., Вайнер А.В., Проклов В.В., Резвов Ю.Г. // ЖТФ. 2010. Т. 80. № 3. С. 97–106.
- [5] Проспект фирмы Gooch & Housego. <http://www.goochandhousego.com>