

07;08

## Высокоэффективная акустооптическая дифракция света на многочастотном звуке в геометрии неаксиального дефлектора

© С.Н. Антонов,<sup>1</sup> А.В. Вайнер,<sup>1</sup> В.В. Проклов,<sup>1</sup> Ю.Г. Резвов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт радиотехники и электроники РАН,  
141190 Фрязино, Московская область, Россия  
e-mail: olga-ant@yandex.ru

<sup>2</sup> Новомосковский институт Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева,  
301665 Новомосковск, Тульская область, Россия

(Поступило в Редакцию 23 мая 2007 г.)

Изучена многолучевая брэгговская дифракция света — формирование высокоэффективного многолучевого поля на сумме частотно эквидистантных монохроматических акустических волн с детерминированными фазами и амплитудами на базе неаксиального  $\text{TeO}_2$ -дефлектора. Теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что анизотропный характер взаимодействия существенным образом модифицирует основные параметры многолучевой дифракции (по сравнению с изотропным случаем): суммарная дифракционная эффективность увеличивается до 100%, значительно расширяется полоса частот. Создан модулятор, расщепляющий исходное лазерное излучение на пять равноинтенсивных лучей с суммарной эффективностью, близкой к 100%.

PACS: 78.20.Nr, 42.79.Jq

### Введение

Традиционно, до работ [1–3], предполагалось, что при акустооптическом (АО) взаимодействии на многочастотной акустической волне дифракционное световое поле адекватно отражает набор спектральных компонент в акустическом сигнале только при небольшом значении дифракционной эффективности. При большом значении эффективности в силу принципиальной нелинейности АО-взаимодействия в дифракционном поле возникают лучи, соответствующие не только частотам акустического сигнала, но и комбинационным частотам — интермодуляционные порядки [4], что иллюстрирует рис. 1.

Здесь падающий луч  $\mathbf{k}_0$ , под действием звуковой волны  $F$ , являющейся суммой частотных сигналов ( $f_1 + f_2 + \dots + f_i$ ), формирует многолучевую картину. Поле брэгговского порядка содержит как основные

(рабочие) лучи  $\mathbf{k}_d$ , так и „паразитные“  $\mathbf{k}_i$ , обусловленные интермодуляционными эффектами. Интермодуляционные лучи присутствуют как в поле нулевого порядка, так и в дифракционном поле, снижая эффективность дифракции в основных порядках и уменьшая контраст в дифракционном поле.

В работе [1] впервые установлено, что даже при больших значениях дифракционной эффективности АО-нелинейность (интермодуляционные искажения) проявляется весьма незначительно, если брэгговская дифракция света происходит на модулированном по частоте акустическом сигнале, при этом пространственный период модулирующей функции меньше апертуры света. Иными словами, возникает ситуация, когда пространственный спектр интенсивности дифрагированного света близок к энергетическому спектру акустического сигнала. Особенно интересен следующий факт: если параметры частотной модуляции выбраны так, что энергетический спектр сигнала состоит из  $N$  равных компонент, то происходит расщепление брэгговского порядка на  $N$  равноинтенсивных отдельных лучей с суммарной эффективностью порядка 100%. Феноменологически можно говорить о новом АО-эффекте — высокоэффективной многолучевой брэгговской дифракции, что имеет не только познавательное, но и прикладное значение: мультипликация каналов связи, деление мощного лазерного луча в системах обработки материалов и т. д.

В работах [2,3] было развито теоретическое описание многолучевой брэгговской дифракции при взаимодействии световых пучков и плоских акустических волн в акустически и оптически изотропной среде, получены основные соотношения. Было показано, что данный тип дифракции может быть реализован на поличастотной акустической волне возбуждением монохроматических частотно эквидистантных сигналов при том, чтобы их

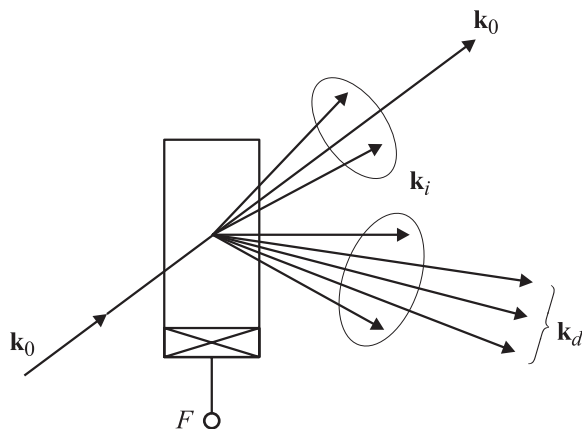


Рис. 1. Иллюстрация возникновения интермодуляционных порядков.

суперпозиция была наиболее близка к частотно(фазово)-модулированному виду. Иными словами, амплитудно-фазовые соотношения частотных компонент в идеальном случае должны быть такими же, как и для комплексного спектра, модулированного по частоте (фазе) сигнала. Результаты численных расчетов показали, что предельная суммарная дифракционная эффективность многолучевого равноинтенсивного поля зависит от числа лучей, на которое расщепляется брэгговский порядок. В частности, при 3 лучах суммарная эффективность не должна превышать 80%, а при 7 — 84%. Было установлено, что ограничение дифракционной эффективности связано с „перекачкой“ света в значительно ослабленные, но все же существующие, интермодуляционные порядки.

Задача, решаемая в данной работе, обусловлена наблюдавшимися значительными количественными расхождениями между экспериментальными результатами и теорией. Интермодуляционные лучи практически не наблюдались и, как следствие, суммарная дифракционная эффективность значительно превышала расчетную и была близка к 100%. При этом существенно, что в экспериментах использовался анизотропный неаксиальный дефлектор на монокристалле  $\text{TeO}_2$  [5]. Использование такого типа дефлектора связано с тем, что он обеспечивает большой угол сканирования, что, очевидно, приводит к максимальному числу лучей и максимальной суммарной эффективности многолучевой дифракции.

Таким образом, целью работы явились:

- 1) изучение основных закономерностей высокоэффективной многолучевой брэгговской дифракции в условиях оптически анизотропного характера взаимодействия (в геометрии неаксиального дефлектора);
- 2) расчет предельных характеристик АО-анизотропного дефлектора, работающего в режиме многолучевой дифракции;
- 3) экспериментальное подтверждение теоретических положений.

## Изотропная и анизотропная геометрия дифракции

Отличия в условиях возникновения интермодуляционных лучей в изотропной и анизотропной дифракциях будем анализировать с помощью векторных диаграмм рис. 2. На рис. 2, *a* представлен изотропный характер дифракции, на рис. 2, *b* — анизотропный, соответствующий реализации неаксиального дефлектора, когда брэгговский угол падения неаксиального света на звук слабо зависит от частоты звука. Звуковая волна  $\mathbf{q}$  генерируется одним преобразователем и содержит набор монохроматических частотно-эквидистантных компонент единого направления (количество частот пока не конкретизируем). В результате дифракции исходного луча света  $\mathbf{k}_0$  возникает набор лучей в поле брэгговского порядка  $\mathbf{k}_d$  (основных и интермодуляционных) и набор интермодуляционных лучей вблизи нулевого порядка  $\mathbf{k}_i$ . Качественно процесс

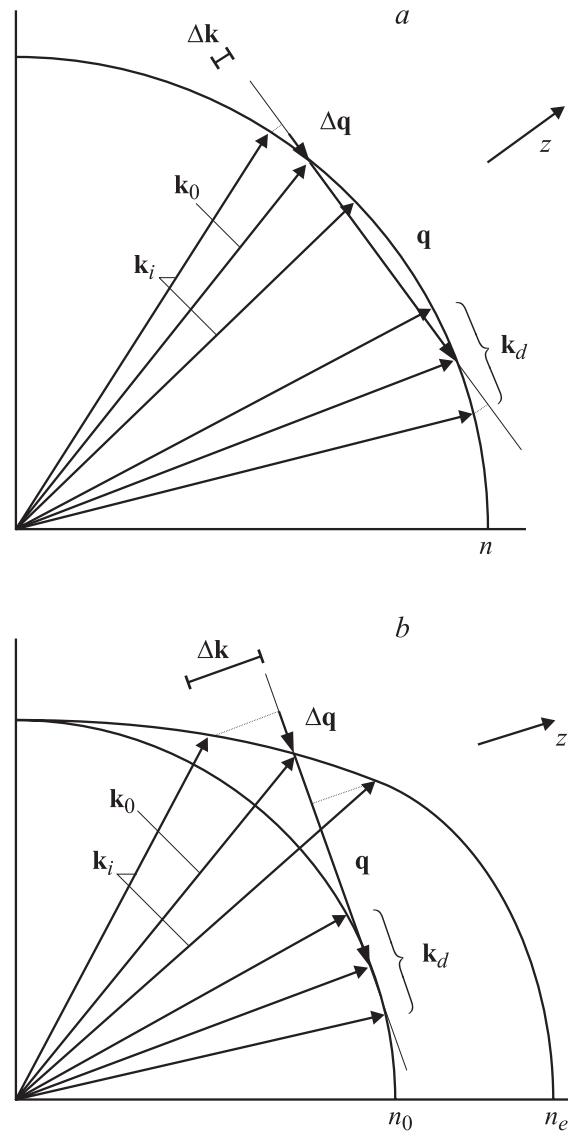


Рис. 2. Векторная диаграмма дифракции: *a* — изотропной, *b* — анизотропной.

возникновения интермодуляционных лучей можно представить следующим образом. При малой эффективности дифракции каждая из звуковых частот образует отдельный луч в основном брэгговском порядке. Повышение интенсивности звука вызывает вторичные процессы — дифракцию этих лучей в область падающего луча; далее процессы третьего этапа взаимодействия образуют дополнительные лучи в основном дифракционном поле и т.д. Кроме того, интенсивность интермодуляционных лучей (эффективность процессов вторичной дифракции) связана с величиной расстройки фазового синхронизма между лучами. Величину расстройки можно записать как  $\eta = \Delta k L$ ,  $\Delta k = k_{iz} - k_{dz}$ , где  $k_{iz}$  и  $k_{dz}$  — проекции соответствующих взаимодействующих векторов ( $\mathbf{k}_i$  и  $\mathbf{k}_d$ ) на ось  $Z$ , перпендикулярную направлению звука;  $L$  — длина области взаимодействия вдоль оси  $Z$ . Очевидно,

что чем больше  $\eta$ , тем менее эффективны процессы образования интермодуляционных порядков.

Из рис. 2, *a* видно, что в изотропном случае вследствие симметрии волновой поверхности величины расстройек в первом и в нулевом порядках одинаковы. Следовательно, процессы первичной и вторичной дифракций имеют равную эффективность. Иначе обстоит дело при анизотропной дифракции в режиме неаксиального дефлектора (рис. 2, *b*), когда волновые векторы звука, отложенные от конца вектора  $\mathbf{k}_0$ , касательно падают на волновую поверхность, соответствующую основному дифракционному полю. При этом в широком диапазоне длин волн звука (направлений дифракционных лучей первого порядка) расстройка лучей первого порядка остается малой, в то время как в нулевом порядке она линейно зависит от угла отклонения от вектора  $\mathbf{k}_0$  (так же, как и в изотропном случае). Это означает, что если компоненты звука отличаются друг от друга на достаточно большое значение  $\Delta q$ , то интермодуляционные лучи в нулевом порядке будут ослаблены из-за большой величины их расстроек при сохранении высокой эффективности дифракции первого порядка. Таким образом, сама геометрия взаимодействия ограничивает проявление интермодуляционных эффектов в нулевом порядке.

## Методика расчета

Влияние свойств анизотропного АО-взаимодействия на интермодуляционные эффекты в условиях поличастотной акустической волны ранее изучалось: в [6] рассматривался анизотропный АО-спектроанализатор радиосигналов. В нашем случае задача существенно усложняется большой величиной дифракционной эффективности, поэтому решение находилось численным расчетом, основанным на уравнениях Рамана–Ната в приближении плоских волн света и прямоугольного однородного акустического столба. Если сигнал, подводимый к АО-ячейке, является суммой эквидистантных по частоте компонент, то эти уравнения представляют собой линейную систему связанных дифференциальных уравнений вида

$$\frac{dC_{1k}}{dz} = \sum_n V_n C_{0,k-n} \exp(j\eta_{k-n,k}z),$$

$$\frac{dC_{0k}}{dz} = - \sum_n V_n^* C_{1,k+n} \exp(-j\eta_{k,k+n}z),$$

где  $C_{0k}(z)$  — комплексная амплитуда  $k$ -го луча нулевого порядка,  $C_{1k}(z)$  —  $k$ -го луча брэгговского порядка,  $z$  — нормированная координата,  $V_n = \frac{1}{2} v_n \exp(j\varphi_n)$ ,  $v_n$  — индекс фазовой модуляции при дифракции на звуковой волне с номером  $n$ ,  $\varphi_n$  — фаза этой волны,  $\eta_{n,k}$  — расстройка фазового синхронизма между лучом  $n$  нулевого порядка и лучом  $k$  брэгговского порядка. Аналогичные уравнения использованы в [7] в случае изотропной среды.

Параметры взаимодействия, использованные в расчетах

Параметр	Величина
Длина волны света	1.06 $\mu\text{m}$
Длина области взаимодействия	3, 6 и 12 mm
Плоскость дифракции	(110)
Направление звука	под углом $6^\circ$ к направлению [110]
Центральная частота звука	39 MHz
Количество частотных компонент звука	5
Полоса (разность частот крайних компонент)	от 0.1 до 40 MHz

Существенной мощностью обладают лишь те лучи, которые, во-первых, возникают на этапе дифракции не слишком большого порядка, а во-вторых, величина  $\eta$  которых не является значительной. Расчеты ограничивались пятым этапом дифракции и учитывались только те лучи, расстройка которых была меньше  $10\lambda$ .

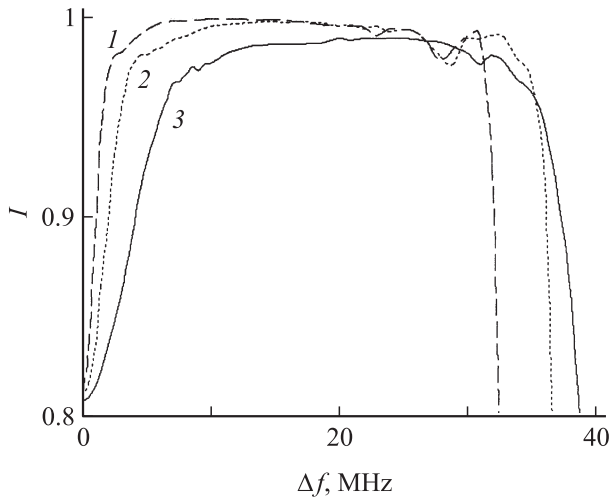
Целью расчета было вычисление максимальной дифракционной эффективности в заданное количество равноинтенсивных лучей (совпадающее с количеством подаваемых частотных компонент). Рассматривалась дифракция в парателлурите на медленной сдвиговой волне при геометрии, подобной рис. 2, *b*. И использованные при расчете параметры взаимодействия перечислены в таблице. По всем остальным параметрам — амплитудам и фазам компонент звука и углу падения света — проводилась оптимизация для достижения максимальной дифракционной эффективности  $I$  — отношения суммы интенсивностей основных дифракционных лучей к интенсивности падающего света.

## Результаты расчета

Эксперимент позволял получать высокоэффективное дифракционное поле с количеством лучей от 3 до 11. Однако расчеты и последующее сопоставление с экспериментом были сделаны для 5 лучей. Такое ограничение обусловлено значительным возрастанием времени расчета для большего количества лучей. Расчетные зависимости максимальной дифракционной эффективности от полосы частот (разности частот крайних компонент сигнала) приведены на рис. 3. Кривые соответствуют трем значениям длины области взаимодействия  $L$ .

Проанализируем полученные зависимости.

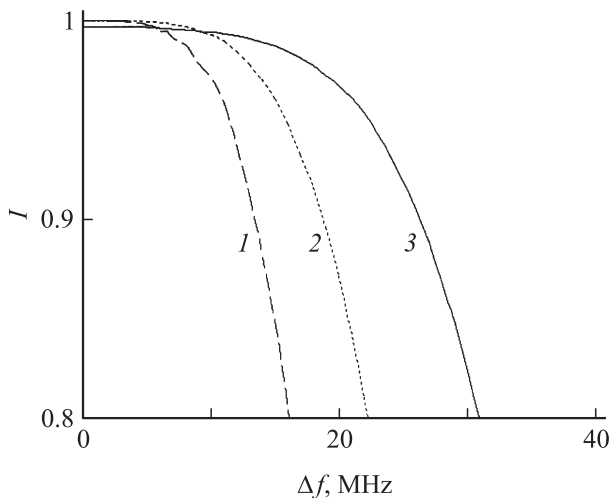
Первое — величина эффективности многолучевой дифракции вблизи нулевого значения полосы частот. В этом пределе углы между лучами внутри одного порядка стремятся к нулю и расстройки этих лучей становятся равными, следовательно, при соответствующем значении угла падения света все расстройки обращаются в нуль, т.е. исчезает различие между анизотропной и изотропной геометрией, рассмотренной в [2,3]. При этом отсутствует зависимость от величины длины взаимодействия, и значение дифракционной эффективности равно найденному в [3] для изотропного случая — 82%.



**Рис. 3.** Зависимость эффективности многолучевой дифракции от полосы частот при различных длинах области взаимодействия,  $L$ : 1 — 12, 2 — 6, 3 — 3 мм.

Второе — возрастание эффективности при увеличении полосы частот. Это обусловлено тем, что при увеличении полосы начинают сказываться расстройки, которые в первую очередь приводят к резкому уменьшению интенсивностей интермодуляционных лучей нулевого порядка, что повышает интенсивность основных лучей.

Третье — участок (относительно ровное плато), в котором интенсивность максимальна и не зависит от рабочей полосы частот. Видно, что значение полосы максимальной дифракционной эффективности зависит от длины взаимодействия — чем уже преобразователь, тем шире полоса частот. С другой стороны, при большей длине преобразователя предельное значение эффективности выше. Этому можно дать следующее качественное объяснение. У лучей нулевого порядка расстройка ли-



**Рис. 4.** Зависимость эффективности однолучевой (одночастотной) дифракции от полосы частот при различных длинах области взаимодействия,  $L$ : 1 — 12, 2 — 6, 3 — 2 мм.

нейно возрастает при отклонении от исходного луча света, т.е. пропорциональна произведению полосы на длину взаимодействия:  $\eta \propto \Delta f L$ . В первом порядке слагаемое, линейное по полосе, отсутствует, и расстройка пропорциональна квадрату полосы:  $\eta \propto \Delta f^2 L$ . Следовательно, при увеличении  $L$  и таком уменьшении  $\Delta f$ , чтобы ситуация в первом порядке не изменялась, расстройки в нулевом порядке нарастают и мощности интермодуляций падают, что приводит к увеличению дифракционной эффективности.

Спад эффективности при дальнейшем увеличении полосы частот связан с тем, что становятся существенными и расстройки основных лучей. Здесь следует отметить, что некоторая немонотонность зависимости в районе полосы частот  $\sim 30$  MHz, по-видимому, связана с ограниченностью точности расчета и не рассматривается как обнаруженный факт.

Сравним полосу частот многолучевой дифракции с полосой дефлектора в классическом однолучевом (одночастотном) режиме, которая представлена на рис. 4. Видно, что при одинаковой дифракционной эффективности полоса в многочастотном случае существенно больше, что качественно можно объяснить следующим: чем выше дифракционная эффективность, тем меньше полоса частот. В многолучевом режиме дифракционная эффективность каждого луча значительно меньше, чем в однолучевом, что и определяет расширение полосы.

## Экспериментальная часть

Эксперименты проводились на базе неаксиального дефлектора из  $\text{TeO}_2$ , параметры которого соответствовали приведенным в таблице. В качестве источника света использовался одномодовый волоконный лазер с длиной волны  $1.06 \mu\text{m}$ , диаметр светового пучка в зоне АО-взаимодействия был равен  $0.6 \text{ mm}$  (дифракционная расходимость  $\approx 2 \text{ mrad}$ ). При такой апертуре света соседние лучи брэгговского порядка полностью разделялись при достижении разницы частотных компонент сигнала  $1.5 \text{ MHz}$ . Экспериментальная установка помимо лазера и АО-ячейки включала в себя оптико-механический сканер, который осуществлял временную развертку углового спектра дифрагированного поля на фотоприемнике, таким образом и производились относительные измерения интенсивностей дифрагированных лучей. Сигналы, подаваемые на преобразователь ячейки, синтезировались цифровым генератором.

На рис. 5 представлены экспериментальные зависимости относительной дифракционной эффективности от частоты. Кривые 1 и 2 — одночастотная (однолучевая) дифракция при двух различных углах падения света на АО-кристалл (разных угловых расстройках). Настройка, соответствующая кривой 1, производилась по критерию максимальной широкополосности, кривой 2 — максимальной эффективности. Линии I и II — полосы частот при данном уровне эффективности. Видно, что при настройке, соответствующей кривой 1, полоса

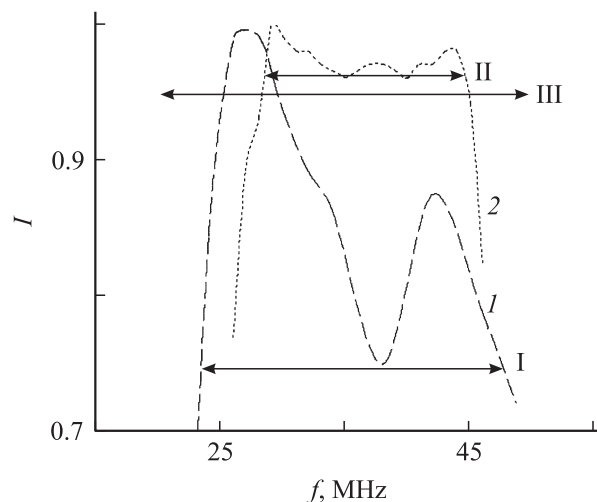


Рис. 5. Экспериментальные частотные зависимости дифракционной эффективности.

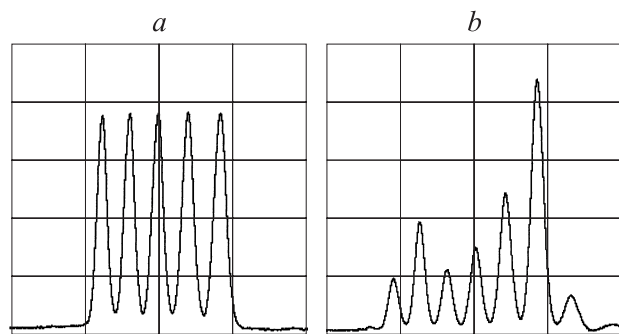


Рис. 6. Дифракционное поле на выходе 5-лучевого АО-расщепителя: *a* — фазы и амплитуды сигнала настроены на максимальную эффективность при равных лучах; *b* — амплитуды те же, фазы выбраны случайным образом.

равна 25 МГц, а дифракционная эффективность  $\approx 74\%$ ; при настройке для кривой 2 — 16 МГц и 96% соответственно. На этом же рисунке приведены значения достигнутых полосы частот и эффективности при дифракции пяти лучей равной интенсивности — линия III: эффективность 95% в полосе частот 30 МГц.

Таким образом, видно, что дефлектор реализует более широкую полосу при практически неизменной эффективности в многолучевом режиме по сравнению с однолучевым.

Иллюстрация чувствительности высокоэффективной многолучевой брэгговской дифракции к фазовым соотношениям между частотными компонентами акустической волны приведено на рис. 6 — сигналы на экране осциллографа. Здесь по горизонтальной оси — временная развертка, соответствующая угловому распределению интенсивностей дифракционных лучей (клетка 8 мрад), по вертикальной оси — относительная интенсивность. На рис. 6, *a* показана интенсивность лучей при оптимальных фазовых и амплитудных соотношениях между частотными компонентами звука для достижения равенства пяти

лучей и максимальной суммарной эффективности (95%). Рис. 6, *b* выполнен в том же масштабе и показывает распределение интенсивностей между лучами при тех же амплитудах, но случайно выбранных фазах. Видно, что нарушение фазовых соотношений кардинальным образом меняет ситуацию: возникают дополнительные интермодуляционные лучи, а интенсивности основных лучей становятся существенно неравными, и снижается суммарная дифракционная эффективность.

## Заключение

1. Параметры многолучевой брэгговской АО-дифракции существенным образом модифицируются при анизотропном характере взаимодействия (по сравнению с изотропным). При реализации на основе анизотропного неаксиального дефлектора такая модификация связана с существенным ослаблением интермодуляционных лучей и, как следствие — повышением суммарной дифракционной эффективности практически до 100%.

2. При реализации многолучевой дифракции на базе анизотропного неаксиального дефлектора рабочий частотный диапазон существенно расширяется по сравнению с работой дефлектора в одночастотном (однолучевом) режиме.

3. На основе кристалла  $\text{TeO}_2$  разработан и создан пятилучевой модулятор — расщепитель лазерного излучения со следующими параметрами: суммарная дифракционная эффективность составляет 95%, полный угловой диапазон — 49 мрад, угол между лучами — 12 мрад, частотный диапазон — 20–50 МГц.

Работа поддержана проектами РФФИ: 06-02-08019 и 07-02-00414.

## Список литературы

- [1] Антонов С.Н. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 4. С. 122–124.
- [2] Антонов С.Н., Резвов Ю.Г. // Радиотехника и электроника. 2005. Т. 50. № 3. С. 1–7.
- [3] Антонов С.Н., Резвов Ю.Г. // ЖТФ. 2007. Вып. 8. С. 93–100.
- [4] Hecht D.L. // Ultrasonics. 1977. N 1. P. 7–18.
- [5] Семенов В.П. // ЖТФ. 1981. Т. 51. Вып. 10. С. 2090–2095.
- [6] Kastelik J.C., Pommeray M., Kab A., Gzalet M.G. // Pure Appl. Opt. 1998. Vol. 7. N 3. P. 467–474.
- [7] Балакиев В.И., Сливинский А., Толкин К.А. // Опт. и спектр. 1999. Т. 87. № 6. С. 1010–1016.