

УДК 681.7.015.4

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ TeO_2 В АКУСТООПТИЧЕСКИХ ДЕФЛЕКТОРАХ УФ ДИАПАЗОНА

В.Я. Молчанов, О.Ю. Макаров, А.И. Колесников, Ю.М. Смирнов
Кафедра прикладной физики

Показано, что на основе малодислокационных монокристаллов парателлуриита, имеющих достаточно высокое пропускание вблизи края собственного поглощения, возможно создание эффективных дефлекторов излучения твердотельных лазеров, работающих на третьей гармонике основного излучения 1064 нм. Теоретически исследованы особенности дефлектора на парателлуриите с учетом аномально высокого вращения плоскости поляризации и феномена деформаций волновых поверхностей обыкновенного и необыкновенного лучей. Приведены характеристики разработанного, изготовленного и испытанного двухкоординатного дефлектора для длины волны 355 нм.

Технические применения акустооптических приборов в УФ диапазоне длин волн весьма многообразны. К ним относятся как традиционные инженерные направления, такие как лазерная обработка материалов, литография, системы оптической памяти, так и медико-биологические направления, использующие эффект лазерной флюоресценции биологических объектов для медицинской клинической диагностики. Наиболее перспективными для данных задач представляются УФ системы двухкоординатного сканирования лазерного луча на основе акустооптических дефлекторов. Выбор материалов УФ направления акустооптики достаточно ограничен. Такие традиционные УФ материалы, как KDP и SiO_2 вследствие чрезвычайно низкого акустооптического качества практически непригодны для создания многопозиционных акустооптических двухкоординатных дефлекторов с числом разрешимых позиций в несколько сотен точек. Вместе с тем прогресс в области лазерной физики последнего времени привел к созданию промышленных твердотельных лазеров с диодной накачкой, работающих на третьей гармонике основного излучения 1064 нм, а именно, на УФ длине волны 355 нм. Эти лазеры являются мощными и компактными приборами, что предопределяет их широкое прикладное использование в названных ранее направлениях. Поэтому исследование возможности создания акустооптических двухкоординатных дефлекторов на классическом материале акустооптики – парателлуриите – а именно, на длину волны 355 нм, представляется весьма актуальным.

Для решения задачи создания дефлектора, работающего в УФ диапазоне, необходимы кристаллы, обладающие достаточно высоким оптическим пропусканием на требуемой длине волны. Однако известно, что парателлуриит прозрачен в диапазоне 350-50000 нм, и длина волны 355 нм вплотную примыкает к ультрафиолетовому (фундаментальному) краю собственного поглощения. Тем не менее, у некоторых кристаллов,

выращенных в ТвГУ и обладающих максимальным структурным совершенством (плотность дислокаций - менее 10^3 см^{-2}) зафиксировано достаточно высокое пропускание - 76,04 %, в то время как у кристаллов с низким структурным совершенством (плотность дислокаций - более 10^5 см^{-2}) пропускание составляет всего 47,77 %. Коэффициенты пропускания измерены у образцов толщиной 1,5 см для света, идущего в направлении оптической оси [001]. При этом суммарные коэффициенты ослабления (экстинкции), включающие потери на поглощение и рассеяние света, оказались равными соответственно у лучших образцов - $0,02 \text{ см}^{-1}$, а у худших - $0,22 \text{ см}^{-1}$, т.е. отличались на порядок. Таким образом, технологии, обеспечивающие выращивание малодислокационных кристаллов парателлурита, в принципе дают материал для производства дефлекторов, работающих на длине волны 355 нм. Парателлурит в ультрафиолетовой области имеет две главные особенности: резкую границу поглощения и аномально высокое удельное вращение плоскости поляризации или аномально большую эффективную компоненту псевдотензора гирации G_{33} [1] вдоль оптической оси кристалла. Поскольку в УФ акустооптических дефлекторах и падающий и дифрагированный лучи распространяются под малыми углами ($1-3^\circ$) к оптической оси, то эффект вращения плоскости поляризации может влиять или даже превалировать над эффектом двулучепреломления. Эта особенность приводит к тому, что рабочими состояниями поляризации дефлекторов УФ и сине-зеленого диапазона длин волн являются уже не ортогональные линейные поляризации (что имеет место в акустооптических дефлекторах красной и ИК области длин волн) а, вообще говоря, ортогональные эллипсы. В УФ области может произойти вырождение эллиптических ортогональных собственных поляризаций в ортогональные круги. Другим принципиальным следствием аномально высокого эффекта вращения плоскости поляризации является феномен «деформации» поверхностей волновых векторов обыкновенного и необыкновенного лучей, формирующих векторные диаграммы, по которым традиционно рассчитываются зоны Брэгговского синхронизма и, соответственно, определяются рабочие частоты и геометрия акустооптического взаимодействия в акустооптических приборах [2; 4]. Теоретическому и экспериментальному исследованию названных проблем и посвящена настоящая работа. Результаты исследования легли в основу создания экспериментального образца акустооптического двухкоординатного дефлектора на длину волны 355 нм.

Теоретическое исследование угло-частотных характеристик дефлектора УФ диапазона. Мы будем рассматривать анизотропное акустооптическое взаимодействие в одноосном кристалле с обыкновенным n_o и необыкновенным n_e показателями преломления. Решение основано на формализме векторных диаграмм для главной оптической плоскости (когда плоскость акустооптического взаимодействия содержит оптическую ось [4]).

Здесь и далее использована следующая номенклатура обозначений: λ -

длина волны в вакууме; V – скорость звука; φ - угол падения света (угол между волновым вектором падающего света и осью [110] кристалла); $n_o^*(\varphi)$ и $n_e^*(\varphi)$ - показатели преломления для обыкновенного и необыкновенного лучей падающих под углом φ в кристалле; V_{110} – скорость звука в направлении оси [110]; V_{001} – скорость звука в направлении оси [001]; G_{33} – эффективная компонента псевдотензора гирации вдоль оси [001].

Следуя [3; 4] можно показать, что частоты акустооптического взаимодействия $f_2(\varphi)$ и $f_1(\varphi)$ для верхней и нижней ветвей дифракции зависят от угла падения света φ следующим образом:

$$f_2(\varphi) = \frac{V}{\lambda} \left[n_e^*(\varphi) \cdot \cos(\varphi + \alpha) - \sqrt{n_o^*(\varphi)^2 - (n_e^*(\varphi) \cdot \sin(\varphi + \alpha))^2} \right], \quad (1)$$

$$f_1(\varphi) = \frac{V}{\lambda} \left[n_e^*(\varphi) \cdot \cos(\varphi + \alpha) + \sqrt{n_o^*(\varphi)^2 - (n_e^*(\varphi) \cdot \sin(\varphi + \alpha))^2} \right], \quad (2)$$

где

$$n_e^*(\varphi) = \frac{1 + \tan(\pi/2 - \varphi)^2}{\sqrt{\frac{1}{n_o^2} + \frac{\tan(\pi/2 - \varphi)^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{n_o^2} + \frac{1}{n_e^2} \right) - \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\tan(\pi/2 - \varphi)^4 \cdot \left(\frac{1}{n_o^2} - \frac{1}{n_e^2} \right)^2} + 4 \cdot G_{33}^2}}, \quad (3)$$

$$n_o^*(\varphi) = \frac{1 + \tan(\pi/2 - \varphi)^2}{\sqrt{\frac{1}{n_o^2} + \frac{\tan(\pi/2 - \varphi)^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{n_o^2} + \frac{1}{n_e^2} \right) + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\tan(\pi/2 - \varphi)^4 \cdot \left(\frac{1}{n_o^2} - \frac{1}{n_e^2} \right)^2} + 4 \cdot G_{33}^2}}. \quad (4)$$

Значения n_o и n_e определяются дисперсионной формулой

$$n_o = \sqrt{1 + \frac{2.5844 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - 0.1342^2} + \frac{1.1557 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - 0.2638^2}},$$

$$n_e = \sqrt{1 + \frac{2.8525 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - 0.1342^2} + \frac{1.5141 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - 0.2631^2}}. \quad (5)$$

Значение скорости звука V в данном направлении равно

$$V = V_{110} \cdot \sqrt{\cos(\alpha)^2 + \left(\frac{V_{001}}{V_{110}} \right)^2 \cdot \sin(\alpha)^2} \quad (6)$$

Дисперсионная формула дает значения $n_o = 2.568$ и $n_e = 2.773$ для длины волны 355 нм. Значения материальных констант кристалла парателлурита взяты следующими [1]: $V_{001} = 1,104 \cdot 10^5$ см/сек, $V_{110} = 0,616 \cdot 10^5$ см/сек, $G_{33} = 1,1 \cdot 10^{-4}$, при этом следует учесть соотношение $G_{33} = \rho \cdot \frac{\lambda}{\pi \cdot n_o^3}$, где ρ -

удельное вращение плоскости поляризации в рад/сек.

Следует отметить, что система уравнений (5, 6) строго справедлива

только при условии, что величины обыкновенного показателя преломления вдоль направления падающего света и вдоль направления дифрагированного света равны между собой. Иными словами, в пределах малого угла между падающим и дифрагированным пучком предполагается, что величина $n^*(\varphi) = const$. Вообще говоря, это не так. Поэтому для повышения точности расчета последний производится в три этапа по следующему алгоритму. На I этапе решается система уравнений (1-6) как обычно. На этапе II вычисляется угол β между падающим и дифрагированным пучком по формуле:

$$\beta = a \sin \left(\frac{\lambda \cdot f}{n_o \cdot V} \cdot \sin(\varphi + \alpha) \right) \quad (7)$$

На III заключительном этапе уравнение (5) для $n_o^*(\varphi)$ решается для нового аргумента $\varphi - \beta$ для нижней ветви и для нового аргумента $\varphi + \beta$ для верхней ветви дифракции.

На рис. 1 приведена зависимость частоты Брэгговского синхронизма f для низкочастотной ветви акустооптического взаимодействия, полученная из решения уравнений (1-6) для $\alpha = 4,5^\circ$ и для гипотетического случая $G_{33} = 0$ (кривая 1) от угла падения φ лазерного излучения. Там же даны аналогичные зависимости для трех значений эффективной компоненты псевдотензора гирации $G_{33} = 1,1 \cdot 10^{-4}$ (кривая 2) и значений, отличающихся примерно на $\pm 10\%$: $G_{33} = 1,0 \cdot 10^{-4}$ и $1,2 \cdot 10^{-4}$ (кривые 3 и 4 соответственно). Это сделано с целью оценить возможное смещение угло-частотной характеристики дефлектора, вследствие неточности в аппроксимации величины G_{33} для длины волны 355 нм по данным [1].

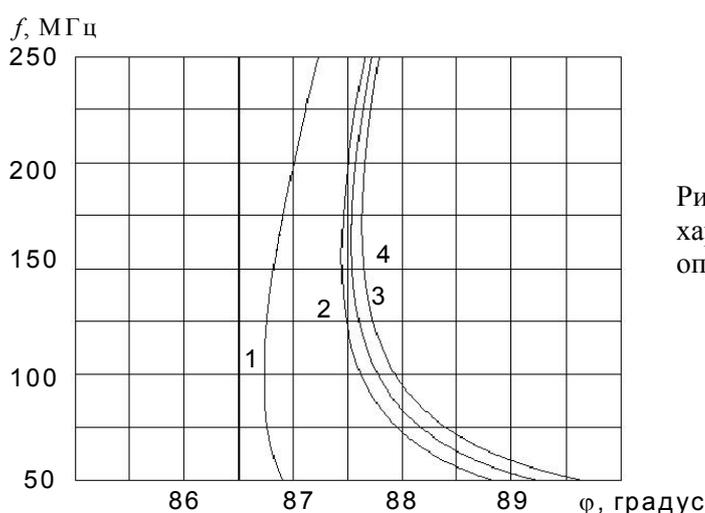


Рис. 1. Угло-частотные характеристики акустооптического дефлектора

Из рис. 1 следует, что нижняя рабочая частота и верхняя рабочая частота дефлектора резко зависят от величины G_{33} , в то время как диапазон рабочих частот практически не меняется. Для повышения точности расчетов необходима организация экспериментального исследования и измерения удельного вращения плоскости поляризации на длине волны 355 нм в монокристалле TeO_2 , поскольку эти данные в литературе отсутствуют. Также изменяется оптимальный угол падения лазерного излучения на дефлектор на центральной рабочей частоте, а именно: $86,73^\circ$ на центральной рабочей частоте 98 МГц при $G_{33} = 0$ (кривая 1) и $87,69^\circ$ на центральной рабочей частоте 177 МГц при $G_{33} = 1,1 \cdot 10^{-4}$ (кривая 2). Эта разница должна быть учтена при разработке оптимальной конструкции светозвукопровода дефлектора

Экспериментальный прототип дефлектора. На основе проведенных расчетов был разработан и изготовлен экспериментальный прототип двухкоординатного дефлектора на длину волны 355 нм с разрешением 350×350 позиций по критерию Рэлея. В таблице приведены основные характеристики одного из каскадов дефлектора. Характеристики второго каскада идентичны.

угол среза кристалла	4,5 градуса
длина волны излучения	355 нм
входная поляризация	линейная
собственное состояние поляризации дефлектора	круговая
полный угол отклонения	1,6 градуса
диаметр лазерного пучка	4 мм
диаметр оптической апертуры дефлектора	6 мм
полоса рабочих частот	50 МГц
центральная частота*	163 МГц
нижняя рабочая частота*	138 МГц
верхняя рабочая частота*	188 МГц
эффективность отклонения **	более 80%
управляющая мощность **	0,9 Вт
входное сопротивление	50 Ом
КСВ	менее 3
диапазон согласования (по уровню КСВ менее 3)	125-205 МГц
число разрешенных позиций (по критерию Рэлея)	350

* определено расчетным путем

** измерено на длине волны 532 нм и пересчитано на 355 нм

Следует отметить, что в отличие от стандартных дефлекторов видимого – ближнего ИК диапазонов в данном дефлекторе дифрагированная после первого каскада круговая поляризация не является рабочей для второго каскада. Оптическая схема разработанного двухкоординатного дефлектора с собственными круговыми поляризациями с точки зрения трансформации поляризаций построена по нижеприведенному принципу.

Входное лазерное излучение с линейной поляризацией преобразуется в излучение с правой круговой поляризацией, которая является собственной рабочей поляризацией для оптимальной геометрии АО дефлектора, с помощью фазовой четвертьволновой пластинки, расположенной перед I каскадом (на корпусе I каскада). Главная ось четвертьволновой пластинки составляет угол 45 градусов с плоскостью дифракции. После отклонения в I каскаде выходит круговая левая поляризация. Круговая левая поляризация преобразуется в круговую рабочую правую поляризацию для II каскада с помощью полуволновой фазовой пластинки, расположенной перед II каскадом (на корпусе II каскада). Главная ось полуволновой пластинки составляет угол 45 градусов с плоскостью дифракции.

Электрическое согласование импеданса пьезопреобразователей выполнено в соответствии с феноменологическим методом [5] с помощью 4-х элементной LC-цепи. Следует отметить, что полоса согласования значительно превышает полосу рабочих частот дефлектора 50 МГц и составляет 80 МГц по уровню КСВ 3:1. Это было специально предпринято с целью компенсации возможного отклонения границ экспериментального рабочего диапазона от расчетного вследствие неточности в определении величины G_{33} .

Заключение. Проведенные исследования показывают, что кристаллы парателлурита могут с успехом применяться в многопозиционных акустооптических дефлекторах УФ диапазона вплоть до длины волны 355 нм включительно. Разработан и создан экспериментальный образец дефлектора на длину волны 355 нм. Экспериментальное определение эффективной компоненты псевдотензора гирации G_{33} и соответствующее уточнение параметров экспериментального акустооптического дефлектора будут предметом последующих публикаций.

Авторы выражают благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований за поддержку настоящей работы в части создания алгоритма расчета грантом РФФИ № 02-07-990448.

Литература

1. Блистанов А.А., Бондаренко В.С., Переломова Н.В. и др. Акустические кристаллы: Справочник. М.: Наука, 1982.
2. Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. Акустооптические устройства и их применение. М.: Советское радио, 1978.
3. Котов В.М. Умножение сдвигаемой частоты оптического излучения посредством акустооптического взаимодействия // Квантовая электроника. 2004 (в печати).
4. Molchanov V.Ya. and Makarov O.Yu. Achromatic acousto-optical frequency shifter for tunable lasers // Proc. Intern. Forum on Wave Electronics and its Applic. 2000. P. 78-82.
5. Molchanov V.Ya. and Makarov O.Yu. Phenomenological method for broadband electrical matching of acousto-optical device piezotransducers // Optical Engineering. 1999. N. 38. P. 1127-1135.