

Акустооптическая дифракция многоцветного излучения Ar-лазера в кристаллическом кварце

В.М.Котов, С.В.Аверин, А.И.Воронко, П.И.Кузнецов,
С.А.Тихомиров, Г.Н.Шкердин, А.Н.Булюк

Исследована акустооптическая брэгговская дифракция многоцветного излучения, генерируемого Ar-лазером в синезеленой области спектра, на распространяющейся в кристаллическом кварце акустической волне. Показано, что с точки зрения фазового синхронизма оптических лучей с одной акустической волной кристаллический кварц существенно превосходит широко используемый на практике парателлурит. Выполнены эксперименты по импульсной модуляции оптического излучения Ar-лазера. Показано, что искажения, вносимые в форму оптических импульсов при использовании кристаллического кварца, существенно меньше, чем при использовании парателлурита.

Ключевые слова: акустооптическая дифракция, брэгговский режим, многоцветное лазерное излучение.

1. Введение

Акустооптическая (АО) дифракция широко используется для управления оптическим излучением – его амплитудой, фазой, частотой и поляризацией [1–3]. Наиболее часто на практике применяют брэгговский режим, позволяющий отклонять падающее излучение в один дифракционный порядок с высокой (близкой к 100%) эффективностью. Однако высокая избирательность брэгговского взаимодействия по отношению к длине волны света затрудняла до недавнего времени его использование в задачах управления многоцветным лазерным излучением. Сравнительно недавно были предложены методы, позволяющие обеспечить брэгговский режим дифракции двухцветного излучения на одной акустической волне (см. напр., [4–6]). На основе этого подхода были предложены методы значительного увеличения оптической полосы модуляции. В этом случае две линии дифрагируют с высокой эффективностью, а остальные – с расстройкой брэгговского синхронизма, т.е. с меньшей эффективностью [7, 8]. Суммарная эффективность дифракции при этом может быть достаточно высокой. В настоящей работе описывается случай брэгговской дифракции излучения на одной акустической волне, распространяющейся в кристалле кварца (α -SiO₂). Этот вариант предназначен для управления многоцветным излучением Ar-лазера, генерирующего в синезеленой области спектра, при условии минимального искажения формы дифрагирующего излучения. В работе осуществляется сравнение характеристик модуляции многоцветного излучения с помощью АО ячеек из кварца и парателлурита (TeO₂). Достоинством АО ячеек из кварца является то, что кристаллический кварц широко используется в радиоэлектронной про-

мышленности, хорошо отлажена технология его изготовления, что существенно удешевляет его производство. Кроме того, кварц, в отличие, например, от парателлурита, в состав которого входит опасный для здоровья теллур, является экологически чистым продуктом.

2. Теория

Известно [1], что АО взаимодействие двух плоских волн, частоты которых отличаются на Ω , где Ω – частота звука, в брэгговском режиме дифракции описывается системой дифференциальных уравнений

$$2 \frac{dE_0}{dz} = -RE_1 \exp(-i\Delta kz), \quad 2 \frac{dE_1}{dz} = RE_0 \exp(i\Delta kz), \quad (1)$$

решение которой при граничных условиях $E_0 = 1$ и $E_1 = 0$ при $z = 0$ имеет следующий вид:

$$E_0 = \left[\cos\left(\sqrt{(\Delta k)^2 + R^2} \frac{L}{2}\right) + \frac{i\Delta k}{\sqrt{(\Delta k)^2 + R^2}} \times \sin\left(\sqrt{(\Delta k)^2 + R^2} \frac{L}{2}\right) \right] \exp\left(-\frac{i\Delta kL}{2}\right), \quad (2)$$

$$E_1 = -\frac{R}{\sqrt{(\Delta k)^2 + R^2}} \sin\left(\sqrt{(\Delta k)^2 + R^2} \frac{L}{2}\right) \exp\left(\frac{i\Delta kL}{2}\right), \quad (3)$$

где E_0, E_1 – амплитуды полей нулевого и первого дифракционных порядков соответственно; R – параметр, связанный с мощностью звука; Δk – величина вектора расстройки брэгговского синхронизма; z – координата, вдоль которой осуществляется АО взаимодействие; L – длина АО взаимодействия. Соотношения (1)–(3) справедливы и для дифракции многоцветного излучения в предположении, что монохроматические компоненты излучения дифрагируют на звуке независимо друг от друга. Тогда (1)–(3) записываются отдельно для каждой монохроматической составляющей. При этом надо помнить, что R , вообще говоря, зависит от длины волны света. Если длины волн расположены достаточно близко друг от друга, зависи-

В.М.Котов, С.В.Аверин, А.И.Воронко, П.И.Кузнецов, С.А.Тихомиров, Г.Н.Шкердин, А.Н.Булюк. Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, Фрязинский филиал, Россия, Московская обл., 141190 Фрязино, пл. Акад. Веденского, 1; e-mail: vmk277@ire216.msk.su

Поступила в редакцию 3 сентября 2014 г., после доработки – 29 июня 2015 г.

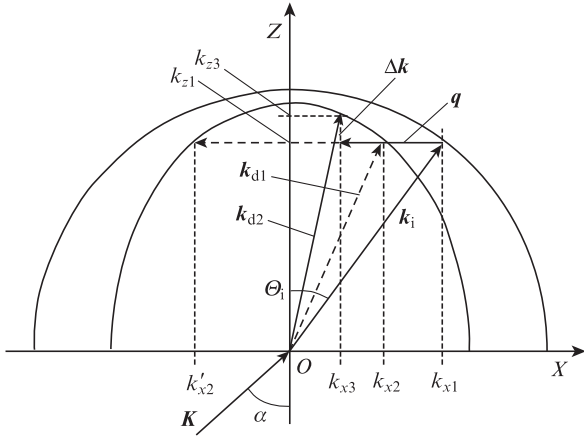


Рис.1. Векторная диаграмма АО взаимодействия в одноосном гиротропном кристалле.

мостью от длины волны можно пренебречь. Мы будем оперировать многоцветным лучом Аг-лазера, генерирующего в сине-зеленой области спектра. Будем считать, что R изменяется с длиной волны незначительно.

Важным параметром, влияющим на связь между величинами E_0 и E_1 , является, как нетрудно видеть из (2), (3), расстройка фазового синхронизма Δk , величина которой определяется на основе анализа поверхностей волновых векторов при заданном векторе акустической волны [1].

На рис.1 приведена векторная диаграмма АО взаимодействия. Оптическое излучение с волновым вектором $\mathbf{K} = 2\pi\lambda^{-1}$ (λ – длина волны света) падает на оптическую грань OX кристалла под углом α . Грань ориентирована ортогонально оптической оси OZ кристалла. Внутри кристалла излучение преломляется и распространяется с волновым вектором \mathbf{k}_i под углом Θ_i к OZ . Будем полагать, что дифракция происходит в одноосном положительном кристалле, а \mathbf{k}_i является необыкновенным лучом. Луч \mathbf{k}_i взаимодействует с акустической волной с волновым вектором \mathbf{q} . Звук распространяется ортогонально OZ . На рис.1 приведены два варианта дифракции: когда выполняется строгий брэгговский синхронизм (волновой вектор дифрагированного луча \mathbf{k}_{d1}) и дифракция с расстройкой синхронизма (вектор \mathbf{k}_{d2}). Полагаем, что происходит анизотропная дифракция с изменением поляризации, лучи \mathbf{k}_{d1} , \mathbf{k}_{d2} – обыкновенные. Вектор расстройки $\Delta\mathbf{k}$ замыкает концы векторов \mathbf{q} и \mathbf{k}_{d2} , при этом он направлен ортогонально акустическому потоку энергии [9]. Если «снос» акустического луча отсутствует, направление потока энергии совпадает с направлением \mathbf{q} . В геометрии, используемой нами, «сноса» акустического луча нет. На рисунке: k_{x1} и k_{z1} – проекции вектора \mathbf{k}_i на направления OX и OZ соответственно; k_{x2} – проекция вектора \mathbf{k}_{d1} на OX ; k_{x3} и k_{z3} – проекции вектора \mathbf{k}_{d2} на OX и OZ . Видно, что $|\Delta k| = |k_{z3} - k_{z1}|$.

Для получения конкретных значений Δk необходимо знать вид волновых поверхностей кристалла. Поверхности определяются из зависимости показателя преломления n от угла Θ_i . Показатели преломления одноосного гиротропного кристалла, к которым относится SiO_2 ,

$$n_{1,2}^2 = (1 + \tan^2 \Theta_i) \left[\frac{1}{n_o^2} + \frac{\tan^2 \Theta_i}{2} \left(\frac{1}{n_o^2} + \frac{1}{n_e^2} \right) \pm \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\tan^4 \Theta_i}{2} \left(\frac{1}{n_o^2} - \frac{1}{n_e^2} \right)^2 + 4G_{33}^2} \right]^{-1}, \quad (4)$$

где n_o и n_e – главные показатели преломления кристалла; G_{33} – компонента псевдотензора гирации [6]. Зависимости n_o , n_e и G_{33} от длины волны λ получены путем интерполяции табличных значений для SiO_2 [10, 11] и имеют вид

$$\begin{aligned} n_o &= \frac{0.003 \times 10^{-8}}{\lambda^2} + \frac{0.004 \times 10^{-4}}{\lambda} + 1.5287, \\ n_e &= \frac{0.0031 \times 10^{-8}}{\lambda^2} + \frac{0.0043 \times 10^{-4}}{\lambda} + 1.5371, \\ G_{33} &= \frac{0.0052 \times 10^{-12}}{\lambda^2} + \frac{0.1053 \times 10^{-8}}{\lambda} - 0.0007 \times 10^{-4}. \end{aligned} \quad (5)$$

Из соотношения (4) можно найти поверхности волновых векторов \mathbf{k} света в кристалле в декартовых координатах:

$$\begin{aligned} k_z^4 \left[\frac{1}{k_o^4} - \left(\frac{\lambda}{2\pi} \right)^4 G_{33}^2 \right] + k_x^2 \left(\frac{1}{k_o^2} + \frac{1}{k_e^2} \right) \left(\frac{k_z^2}{k_o^2} - 1 \right) + \frac{k_x^4}{k_o^2 k_e^2} - \frac{2k_z^2}{k_o^2} + 1 = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где $k_o = (2\pi/\lambda)n_o$; $k_e = (2\pi/\lambda)n_e$; k_x , k_z – проекции волнового вектора света, распространяющегося в кристалле, на оси OX , OZ соответственно, так что $|k|^2 = k_x^2 + k_z^2$. Согласно закону Снеллиуса, проекция k_i на направление OX есть $k_{x1} = K \sin \alpha$. Выразив k_z через k_x в (6), получим биквадратное уравнение вида

$$A_1 k_z^4 + B_1 k_z^2 + C_1 = 0, \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{1}{k_o^4} - \left(\frac{\lambda}{2\pi} \right)^4 G_{33}^2; \quad B_1 = \frac{1}{k_o^2} \left[k_x^2 \left(\frac{1}{k_o^2} + \frac{1}{k_e^2} \right) - 2 \right]; \\ C_1 &= \frac{k_x^4}{k_o^2 k_e^2} - k_x^2 \left(\frac{1}{k_o^2} + \frac{1}{k_e^2} \right) + 1. \end{aligned} \quad (8)$$

Подставив в (7), (8) $k_x = k_{x1} = K \sin \alpha$, получим проекцию k_{z1} излучения k_i на направление OZ :

$$k_{z1}^2 = -\frac{B_1}{2A_1} \pm \sqrt{\left(\frac{B_1}{2A_1} \right)^2 - \frac{C_1}{A_1}}. \quad (9)$$

Из четырех возможных корней k_{z1} берем максимальный, соответствующий необыкновенному лучу. Для получения частотно-угловых характеристик АО взаимодействия необходимо найти частоту звука при заданном угле падения света α и выполнении строгого брэгговского синхронизма. Для этого в (6) выразим k_x через k_z . Получим биквадратное уравнение вида

$$A_2 k_x^4 + B_2 k_x^2 + C_2 = 0, \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} A_2 &= \frac{1}{k_o^2 k_e^2}; \quad B_2 = \left(\frac{1}{k_o^2} + \frac{1}{k_e^2} \right) \left(\frac{k_z^2}{k_o^2} - 1 \right); \\ C_2 &= k_z^4 \left[\frac{1}{k_o^4} - \left(\frac{\lambda}{2\pi} \right)^4 G_{33}^2 \right] - \frac{2k_z^2}{k_o^2} + 1; \end{aligned} \quad (11)$$

$$k_{x2}^2 = -\frac{B_2}{2A_2} \pm \sqrt{\left(\frac{B_2}{2A_2} \right)^2 - \frac{C_2}{A_2}}. \quad (12)$$

Среди четырех возможных значений k_{x2} нужно выбрать два, которые описывают обыкновенный луч. Соответствующие корни $-k_{x2}$ и k'_{x2} равны и противоположны по знаку. Тогда высокочастотная и низкочастотная ветви частотно-угловых зависимостей находятся как

$$f_{\max} = \frac{V}{2\pi}(K \sin \alpha + |k_{x2}|), \quad f_{\min} = \frac{V}{2\pi}(K \sin \alpha - |k_{x2}|)$$

(V – скорость звука).

Нами была выбрана низкочастотная ветвь, поскольку в этом случае частотно-угловые характеристики линий излучения Аг-лазера наиболее плотно приближены друг к другу. Кроме того, угол между дифрагирующими лучами небольшой, так что все лучи достаточно просто собираются в один пучок с помощью призмы. Иными словами, предложенная конфигурация вносит минимальные искажения в составной полихроматический пучок. Верхняя граница низкочастотной ветви определяется частотой двукратной брэгговской дифракции, нижняя граница – условием существования брэгговского режима. Мы выбирали диапазон, лежащий достаточно близко к верхней границе. На рис.2,а приведены зависимости частоты звука f от угла α для пяти длин волн излучения Аг-лазера, распространяющегося в кристалле кварца, а на рис.2,б – те же зависимости для кристалла TeO_2 . Значения n_o , n_e и G_{33} при разных длинах волн λ для TeO_2 взяты из [12].

На приведенных зависимостях кривые 1–5 соответствуют длинам волн Аг-лазера 0.477, 0.488, 0.496, 0.501 и 0.514 мкм. Для SiO_2 рабочей частотой была выбрана частота 60 МГц (рис.2,а). Аналогичной частотой для TeO_2 , обеспечивающей близкие по характеру частотно-угловые

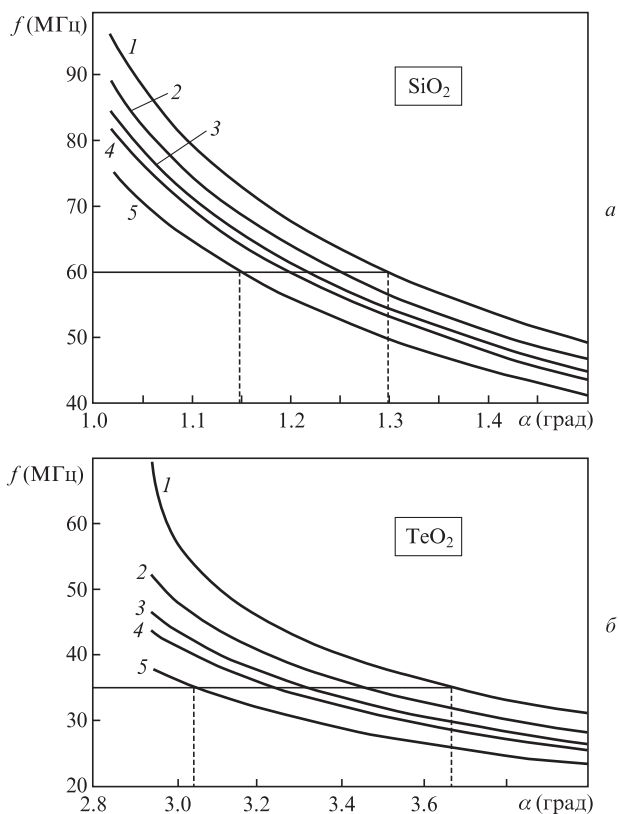


Рис.2. Зависимости частоты звука f от угла падения α света на кристаллы SiO_2 (а) и TeO_2 (б) для линий генерации Аг-лазера на длинах волн излучения 0.477 (1), 0.488 (2), 0.496 (3), 0.501 (4) и 0.514 мкм (5).

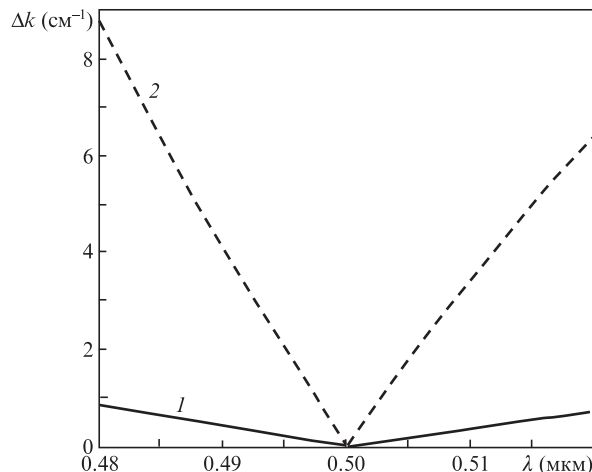


Рис.3. Зависимости вектора фазовой расстройки Δk от длины волны света λ для SiO_2 (1) и TeO_2 (2).

зависимости для SiO_2 , является, по нашему мнению, частота 35 МГц (рис.2,б). Из сравнения рисунков видно, что диапазон углов, охватываемых приведенными длинами волн, для SiO_2 на выбранной частоте примерно в четыре раза меньше аналогичного диапазона углов для TeO_2 . Еще большее различие возникает при нахождении расстройки $|\Delta k|$ для обоих кристаллов. Для нахождения $|\Delta k|$ из рис.1 заметим, что проекция $k_{x3} = K \sin \alpha - q$. Отсюда, подставив k_{x3} в (7)–(9), получим k_{z3} и $|\Delta k| = |k_{z3} - k_{z1}|$.

На рис.3 приведены зависимости $|\Delta k|$ от λ : для SiO_2 , построенная для частоты звука $f = 60$ МГц, и для TeO_2 , построенная для $f = 35$ МГц. Подбором угла падения света α обеспечивалась ситуация, когда $|\Delta k| = 0$ для $\lambda = 0.5$ мкм (средняя длина волны излучения Аг-лазера) для обоих кристаллов. Видно, что для TeO_2 величина $|\Delta k|$ меняется практически на порядок сильнее, чем для SiO_2 . Поэтому эффективность дифракции линий Аг-лазера в случае использования TeO_2 , как следует из (2), будет сильно неоднородной. Такая большая разница в частотно-угловых характеристиках и в поведении $|\Delta k|$, по нашему мнению, связана с более сильной оптической анизотропией TeO_2 (величиной $n_e - n_o/n_o$), чем анизотропия SiO_2 .

3. Эксперимент и обсуждение его результатов

Эксперимент выполнялся с помощью АО ячейки, изготовленной из SiO_2 . Грани кристалла ориентированы перпендикулярно направлениям (100), (010) и (001). К грани [010] приклеивался пьезопреобразователь из LiNbO_3 , генерирующий поперечную акустическую волну с центральной частотой 60 МГц и полосой 20%. Длина АО взаимодействия $L = 0.6$ см. В кристалле распространялась поперечная волна с направлением сдвига вдоль [100]. Скорость звука, измеренная экспериментально, равнялась 3.834×10^5 см/с, напряжение на преобразователе составляло 15 В. На ячейку направлялось многоцветное излучение Аг-лазера. Эффективность дифракции была равна ~5% во всех линиях, причем все линии дифрагировали практически синхронно: они одновременно появлялись и исчезали при изменении угла падения света на ячейку.

Для сравнения были выполнены эксперименты с ячейкой из TeO_2 , возбуждаемой на частоте звука 35 МГц. Подводимое напряжение составляло 4 В, скорость звука была равна 0.617×10^5 см/с. В экспериментах с TeO_2 уда-

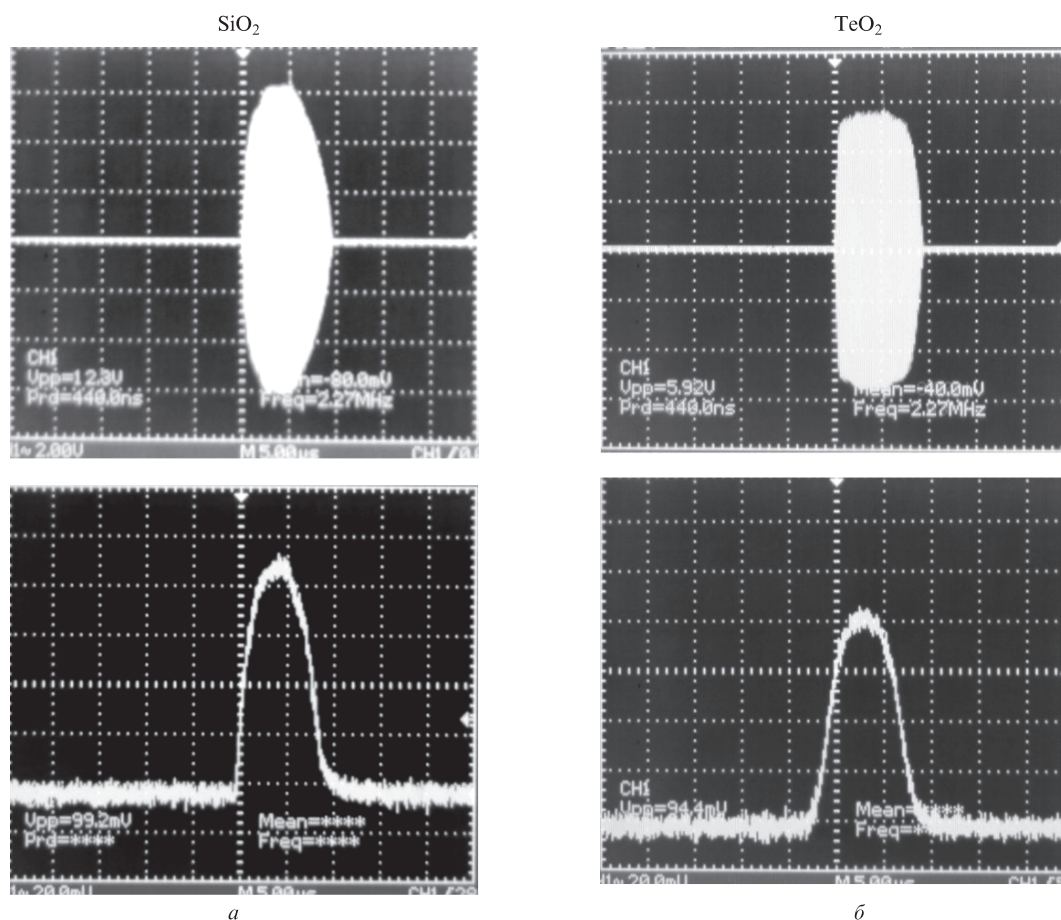


Рис.4. Электрический сигнал, подаваемый на АО ячейку из SiO_2 или из TeO_2 (*a, б*; сверху) и оптический сигнал, регистрируемый на выходе ячеек (*a, б*; внизу).

лось осуществить эффективную дифракцию малой части всего излучения, по сути – только одной линии излучения Аг-лазера. Нами исследовалась наиболее яркая линия – 0.514 мкм, эффективность дифракции для нее достигала 50%. Для дифракции излучения других длин волн необходимо было менять угол падения света на кристалл. Таким образом, экспериментально было подтверждено, что при одной и той же длине АО взаимодействия и одинаковой геометрии АО дифракции использование кристалла SiO_2 позволяет отклонять пять линий излучения Аг-лазера, тогда как с помощью TeO_2 – только одну. В последнем случае можно было бы охватить все линии путем существенного уменьшения длины АО взаимодействия, однако это приводит к искажениям формы дифрагирующих лучей [1,13], а также к появлению других, «нежелательных» порядков дифракции.

В следующей серии экспериментов изготовленные из SiO_2 и TeO_2 ячейки сравнивались в качестве АО модуляторов. Измерялись и сравнивались формы электрического и оптического сигналов при подаче электрического импульса на вход АО ячейки. На рис.4,*a* приведены фотографии электрического сигнала, подаваемого на ячейку из SiO_2 (сверху), и оптического сигнала, измеренного на ее выходе быстродействующим фотоприемником (внизу). Длительность электрического сигнала ~ 6 мкс, частота заполнения импульса 60 МГц, подводимое импульсное напряжение 40 В, скважность 100. Видно, что крутизна переднего и заднего фронтов оптического сигнала достаточно хорошо повторяет крутизну фронтов электрического импульса.

Аналогичные измерения были выполнены и с ячейкой из TeO_2 (рис.4,*б*) при той же длительности электрического сигнала, но с частотой заполнения 35 МГц при подводимом напряжении 4 В. Ввиду высокой селективности дифракции в TeO_2 к длине волны выбирались только одна линия генерации Аг-лазера – с $\lambda = 0.514$ мкм. Напряжение, подаваемое на ячейку из TeO_2 , было в 10 раз меньше напряжения на ячейке из SiO_2 . Это связано с тем, что коэффициент АО качества M_2 кристалла SiO_2 примерно в 1000 раз меньше M_2 кристалла TeO_2 . Импульсы генерировались одним и тем же генератором, но увеличение напряжения импульса приводило к его искажению. В нашем случае это было несущественным, поскольку важнее было сравнивать форму электрического сигнала, подаваемого на ячейку, с формой оптического сигнала на выходе. Из сравнения осциллограмм для TeO_2 -ячейки видно, что форма оптического сигнала не повторяет форму электрического: фронты оптического сигнала не такие крутые, как электрического. «Завал» фронтов вызван малой скоростью прохождения звукового импульса через апертуру светового пучка. В случае использования SiO_2 это не наблюдалось, поскольку скорость звука в SiO_2 примерно в шесть раз больше, чем в TeO_2 .

4. Заключение

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Для управления многоцветным оптическим излучением посредством АО дифракции в одноосном гиротроп-

ном кристалле предложено использовать низкочастотную ветвь частотно-угловой зависимости, что в совокупности с призмой, собирающей все дифрагировавшие лучи в единый пучок, вносит минимальные искажения в составной полихроматический пучок.

2. Показано, что с точки зрения фазового рассинхронизма использование кристалла кварца для модуляции многоцветного излучения предпочтительнее использования парателлуриита, что вызвано прежде всего большей, чем у SiO_2 , анизотропией TeO_2 .

3. Экспериментально показано, что на рабочей частоте звука дифракция многоцветного излучения Аг-лазера в кристалле SiO_2 происходит практически одновременно для всех лучей спектрального диапазона, тогда как в TeO_2 , имеющего ту же геометрию и ту же длину АО взаимодействия, наблюдается высокая селективность АО дифракции к длинам волн оптического излучения.

4. Проведено сравнение АО модуляторов из SiO_2 и TeO_2 . Показано, что фронты оптического импульса, получаемые с помощью модулятора из SiO_2 , гораздо лучше передают фронты электрического импульса, чем при использовании модулятора из TeO_2 . Это связано с существенным различием скоростей распространения звука в указанных кристаллах.

В заключение хотелось бы добавить, что окончательный выбор материала АО ячейки всегда остается за экспериментатором. Он определяется условиями и спецификой эксперимента, техническими требованиями, предпочтениями экспериментатора и т.п. Если, согласно требованиям, необходима высокая стойкость кристалла к воздействию лазерного излучения, то кварц здесь вне конкуренции. В нашей статье мы продемонстрировали еще одно достоинство кварца – минимальную рассинхрони-

зацию лучей полихроматического излучения с акустической волной. Ряд экспериментаторов, тем не менее, предпочитает использовать парателлуриит и в этих случаях, решая, в частности, проблему рассинхронизации лучей путем увеличения расходимости звуковой волны и повышения мощности звука. Понятно, что при этом необходимо решать проблему повышения стойкости TeO_2 к мощному лазерному излучению. Оба подхода правомерны, у каждого есть достоинства и недостатки. Но, как известно, разные подходы к решению одной и той же проблемы только дополняют друг друга и помогают более эффективно решать поставленную задачу.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-07-00138), а также гранта Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ № НШ-3317.2010.9).

1. Балакший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. *Физические основы акустооптики* (М.: Радио и связь, 1985).
2. Xu J., Stroud R. *Acousto-optic Devices: Principles, Design, and Applications* (New York: John Wiley & Son Inc., 1992).
3. Ярив А., Юх П. *Оптические волны в кристаллах* (М.: Мир, 1987).
4. Котов В.М. *ЖТФ*, **62** (8), 95 (1992).
5. Котов В.М. *Оптика и спектроскопия*, **74** (2), 386 (1993).
6. Котов В.М. *Оптика и спектроскопия*, **77** (3), 493 (1994).
7. Котов В.М. *ЖТФ*, **66** (1), 151 (1996).
8. Котов В.М. *Успехи прикладной физики*, **2** (2), 177 (2014).
9. Балакший В.И., Манцевич С.Н. *Оптика и спектроскопия*, **103** (5), 831 (2007).
10. *Акустические кристаллы*. Под ред. М.П.Шаскольской (М.: Наука, 1982).
11. Кизель В.А., Бурков В.И. *Гиротропия кристаллов* (М.: Наука, 1980).
12. Котов В.М. *Прикладная физика*, **2**, 69 (2014).
13. Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. *Акустооптические устройства и их применение* (М.: Сов. Радио, 1978).