

**Акустооптический модулятор многоцветного излучения
на основе ниобата лития**

В. М. Котов, С. В. Аверин, Е. В. Котов

Исследована акустооптическая (АО) брэгговская дифракция многоцветного излучения, генерируемого Ar-лазером в сине-зеленой области спектра, на акустической волне, распространяющейся в кристалле ниобата лития. Показано, что, с точки зрения фазового синхронизма оптических лучей с одной акустической волной, ниобат лития существенно превосходит широко используемый на практике парателлуриит при частотах модуляции менее 80 МГц, где парателлуриит вносит сильные искажения. Выполненные эксперименты по импульсной модуляции оптического излучения Ar-лазера на частоте звука 56 МГц подтвердили теоретические выводы.

Ключевые слова: акустооптическая дифракция, брэгговский режим, многоцветное оптическое излучение, ниобат лития.

Введение

В настоящее время дифракция света на звуке широко используется для управления параметрами оптического излучения [1–3]. Наиболее часто на практике используется брэгговский режим, позволяющий отклонять падающее излучение в один дифракционный порядок с высокой эффективностью. Однако высокая избирательность брэгговского взаимодействия к длине волны света затрудняла до недавнего времени его использование для задач управления многоцветным лазерным излучением.

Сравнительно недавно для расширения оптической полосы было предложено использовать одновременную дифракцию двух лучей на одной акустической волне (см. напр. [4–6]). В этом случае две линии дифрагируют с высокой эффективностью, а остальные – с расстройкой брэгговского синхронизма, т. е. с существенно меньшей эффективностью [7, 8]. При этом выбор режимов дифракции оказывается не произвольным. Напротив, для кристалла парателлуриита TeO_2 наилуч-

шие условия акустооптической (АО) дифракции двух наиболее ярких линий генерации Ar-лазера с длинами волн 0,514 и 0,488 мкм реализуются на частоте звука, превышающей 90 МГц [6]. На более низких частотах, применяемых, например, в системах низкоскоростной лазерной интерферометрии, использование парателлуриита приводит к большим искажениям сигнала.

Целью данной работы являются теоретические и экспериментальные исследования возможности акустооптической брэгговской дифракции многоцветного излучения, генерируемого Ar-лазером в сине-зеленой области спектра, на акустической волне, распространяющейся в кристалле ниобата лития LiNbO_3 , причем при относительно низких частотах звука (< 80 МГц).

Теория

Рассмотрим АО-взаимодействие в одноосном отрицательном кристалле, к которым относится LiNbO_3 . Волновые поверхности такого кристалла представляют собой сферу и эллипсоид вращения, описывающие распространение «обыкновенного» и «необыкновенного» лучей соответственно. Будем считать, что акустическая волна распространяется ортогонально оптической оси кристалла. Анализ показывает, что наилучшие условия для АО-дифракции многоцветного излучения реализуются в случае, когда происходит анизотропная дифракция. При этом «обыкновенные» лучи дифрагируют в «необыкновенные», а волновой вектор звука направлен практически по касательной к внутренней поверхности волновых

Котов Владимир Михайлович, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н.

Аверин Станислав Владимирович, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н.

Котов Евгений Владимирович, младший научный сотрудник, ФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН.

Россия, 141195, г. Фрязино, Московская обл., пл. Введенского, 1.

E-mail: vmk277@ire216.msk.su

Статья поступила в редакцию 12 декабря 2017 г.

векторов (в нашем случае – к эллипсоиду вращения). Амплитуда первого дифракционного порядка определяется согласно соотношению из работ [1, 2] в следующем виде:

$$C_1 = -\frac{q}{\sqrt{\Delta k^2 + q^2}} \sin\left(\sqrt{\Delta k^2 + q^2} \frac{L}{2}\right) \exp\left(-i \frac{\Delta k L}{2}\right), \quad (1)$$

где $q = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{M_2}{2LH}} P_{ac}$. Здесь λ – длина волны света; L и H – длина АО-взаимодействия и высота акустического столба соответственно; M_2 – величина АО-качества материала; P_{ac} – мощность акустической волны. В выражении (1) параметр Δk – величина вектора расстройки брэгговского синхронизма. Эта величина существенным образом влияет на эффективность дифракции и зависит от условий АО-взаимодействия.

Будем полагать, что оптическая грань кристалла ориентирована ортогонально оптической оси, а плоскость АО-дифракции наклонена к оптической оси на угол α . Пусть исходное оптическое излучение падает на оптическую грань кристалла под углом β . Тогда, как нетрудно показать, величина вектора расстройки определяется выражением:

$$\Delta k = \left| K_\alpha \sqrt{1 - \frac{(K_x - s)^2}{K_e^2}} - \sqrt{K_0^2 - K_x^2} \right|. \quad (2)$$

Здесь $K_x = \frac{2\pi}{\lambda} \sin \beta$; $K_\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \sin^2 \alpha + n_e^2 \cos^2 \alpha}}$;

$K_0 = \frac{2\pi}{\lambda} n_o$; $K_e = \frac{2\pi}{\lambda} n_e$; $s = \frac{2\pi f}{V}$.

В этих выражениях n_o , n_e – главные показатели преломления кристалла; f и V – частота и скорость звуковой волны. Положим, что M_2 , входящий в выражение (1), равен $10^{-17} \text{ с}^3/\text{г}$ [9]. Скорость звука примем равной $3,84 \times 10^5 \text{ см/с}$.

Будем далее рассматривать АО-дифракцию шести линий излучения Аг-лазера с длинами волн $\lambda_1 = 0,514 \text{ мкм}$, $\lambda_2 = 0,501 \text{ мкм}$, $\lambda_3 = 0,496 \text{ мкм}$, $\lambda_4 = 0,488 \text{ мкм}$, $\lambda_5 = 0,4765 \text{ мкм}$, $\lambda_6 = 0,458 \text{ мкм}$. Относительные интенсивности линий, согласно нашим измерениям, равны 45 %, 4,5 %, 9 %, 25,5 %, 11,55 и 4 % соответственно. Как видно, длины волн наиболее ярких линий – 0,514 и 0,488 мкм. Нами проводился поиск условий одновременной дифракции двух этих линий на одной акустической волне согласно методике, разработанной в [10]. Было выявлено, что одновременная дифракция двух ярких линий, когда дифрагировавшие лучи распространяются по одну сторону от пада-

ющего излучения, реализуется на частоте звука, линейно зависящей от угла наклона плоскости дифракции α . Зависимость описывается соотношением $f = 119\alpha$ [МГц], где α измеряется в градусах. Видно, что частота может быть сколь угодно малой в отличие от ситуации с использованием TeO_2 : там существует нижняя граница частоты, соответствующая $\sim 90 \text{ МГц}$ [8].

На рис. 1 приведены зависимости эффективности первого дифракционного порядка I_1 от угла β для шести линий излучения Аг-лазера. Расчеты выполнены на основе соотношений (1) и (2) для частоты звука 60 МГц, $\alpha = 0,5^\circ$, $P_{ac} = 10 \text{ Вт}$. Параметры для длин волн, распространяющихся в LiNbO_3 , взяты из [9]. Здесь учтены относительные интенсивности линий. Видно, что все линии одновременно достигают своих максимумов, т. е. изменяются синфазно с изменением угла β . Отметим, что для TeO_2 такой синфазности на частоте звука 60 МГц получить не удастся.

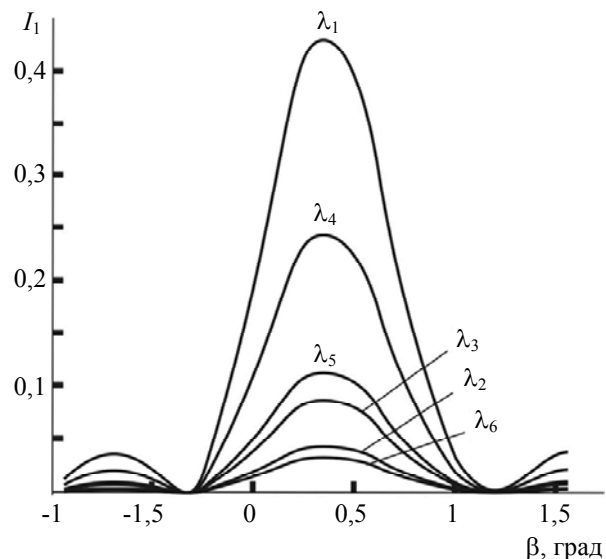


Рис. 1. Зависимость эффективности первого дифракционного порядка I_1 от угла падения β

Эксперимент и обсуждение экспериментальных результатов

Экспериментальная установка была аналогична установке, описанной в [8]. В качестве АО-ячейки был выбран монокристалл LiNbO_3 с размерами $10 \times 10 \times 10 \text{ мм}$ вдоль направлений [100], [010] и [001]. Шестицветное излучение Аг-лазера распространялось в кристалле вблизи его оптической оси [001]. Вдоль направления [010] распространялась поперечная акустическая волна с направлением сдвига вдоль [100]. Скорость звука – $3,84 \times 10^5 \text{ см/с}$. Размеры пьезопреобразователя: $L = 10 \text{ мм}$, $H = 4 \text{ мм}$.

Электрический сигнал подавался на пьезопреобразователь в виде электрических импульсов с длительностью 10 мкс и скважностью ~ 50 . Частота заполнения импульса – 56 МГц, амплитуда импульсного сигнала – 45 В. Реализовывалась анизотропная дифракция света на звуке, сопровождающаяся поворотом плоскости поляризации. Несомненным достоинством модулятора является то, что кристалл и пьезопреобразователь изготовлены из одного материала – LiNbO_3 . Это существенно уменьшает акустические потери на границе «кристалл-преобразователь». Кроме того, собственные оптические волны в LiNbO_3 являются линейно, а не эллиптически поляризованными, что выгодно отличает его от кристалла TeO_2 . Это позволяет достаточно просто разделять падающий и дифрагировавший лучи на выходе LiNbO_3 использованием обычного поляризатора. При этом появляется возможность существенно уменьшить апертуру света внутри кристалла путем его фокусировки, не опасаясь пространственного перекрытия падающего и дифрагировавшего лучей: в любом случае лучи разделяются поляризатором.

Фокусировка света, как известно, необходима для увеличения быстродействия устройства, поскольку время нарастания фронта оптического сигнала определяется временем пробега акустической волны через апертуру света [2]. На рис. 2, а приведена типичная фотография с экрана осциллографа электрического сигнала, на рис. 2, б – оптического сигнала, снимаемого с фотоприемника.

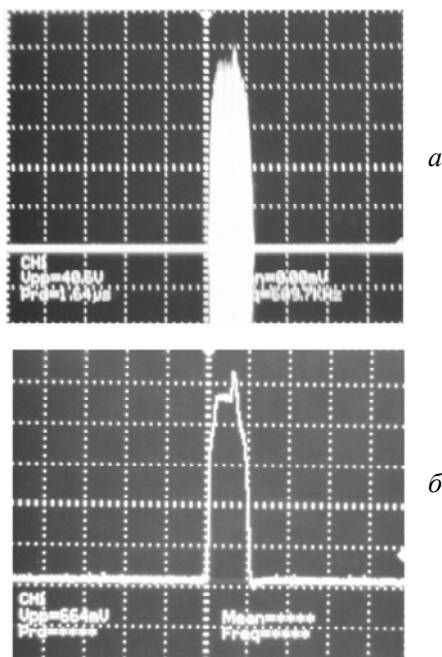


Рис. 2. Фотографии с экрана осциллографа: а – электрический сигнал; б – оптический сигнал с фотоприемника. Развертка – 10 мкс/дел.

Видно, что форма оптического сигнала очень хорошо воспроизводит форму электрического сигнала, причем крутизна фронтов обоих сигналов практически одинакова, что при использовании TeO_2 получить, вообще говоря, не удастся. Это связано с тем, что скорость звука в АО-модуляторах из TeO_2 в несколько раз меньше скорости звука в LiNbO_3 , и это существенно искажает фронты оптического сигнала.

Таким образом, наши исследования подтверждают преимущество использования LiNbO_3 в сравнении с TeO_2 для импульсной модуляции оптического излучения посредством коротких электрических сигналов.

Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. В качестве импульсного модулятора многоцветного оптического излучения предложено использовать АО-ячейку из LiNbO_3 , обладающую рядом достоинств в сравнении с широко применяемыми на практике ячейками из TeO_2 , а именно: минимальными акустическими потерями, существенно большей скоростью звука, возможностью получения высокоэффективной дифракции в широкой оптической полосе на низких акустических частотах, а также линейной поляризацией собственных волн.

2. Эксперименты, выполненные на основе АО-модуляции шестицветного оптического излучения с применением ячейки из LiNbO_3 , в целом подтверждают выводы теории и доказывают преимущество ячеек из LiNbO_3 в сравнении с TeO_2 для импульсной модуляции многоцветного излучения посредством коротких электрических сигналов, в т. ч. при относительно низких частотах звука (< 80 МГц).

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-07-00064).

ЛИТЕРАТУРА

1. Балакиев 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. – N.Y.: John Wiley & Sons, Inc., 1992.
3. Ярич А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. – М.: Мир, 1987.
4. Котов В. М. // Оптика и спектроскопия. 1993. Т. 74. № 2. С. 386.
5. Котов В. М. // Оптика и спектроскопия. 1994. Т. 77. № 3. С. 493.

6. Котов В. М. // Квантовая электроника. 1995. Т. 22. № 6. С. 579.
7. Котов В. М. // ЖТФ. 1996. Т. 66. Вып. 1. С. 151.
8. Котов В. М. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 2. С. 177.
9. Акустические кристаллы / Под ред. М. П. Шаскольской. – М.: Наука, 1982.
10. Котов В. М. Акустооптика. Брэгговская дифракция многоцветного излучения. – М.: Янус-К, 2016.

PACS: 42.79.Jp

Acousto-optic modulator of a multi color radiation on the basis of lithium niobate

V. M. Kotov, S. V. Averin, and E. V. Kotov

Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, (Fryazino Branch)
1 Vvedensky sq., Fryazino, Moscow Region, 141190, Russia
E-mail: vmk277@ire216.msk.su

Received December 12, 2017

Consideration is given to the acousto-optic (AO) Bragg diffraction of the multi color radiation generated by the Ar laser in the blue-green spectrum on the acoustic wave propagating in the lithium niobate crystal. It is shown that from point of view the phase synchronism of many optical beams with a single acoustic wave the lithium niobate sufficiently surpasses the widely used in practice the paratellurite at acoustic frequencies less than 80 MHz where the paratellurite causes strong distortions. The pulse modulation experiments of the Ar multi color laser radiation at the acoustic frequency of 56 MHz confirm the theoretical conclusions.

Keywords: acousto-optic diffraction, Bragg regime, multi color optical radiation, lithium niobate.

REFERENCES

1. V. I. Balakshiy, V. N. Parygin, and L. E. Chirkov, *Physical Foundations of Acousto-optics* (Radio Svyaz', Moscow, 1985) [in Russian].
2. J. Xu and R. Stroud, *Acousto-optic Devices: Principles, Design, and Applications* (N.Y.: John Wiley & Sons, Inc., 1992).
3. A. Yariv and P. Yuhk, *Optic Waves in Crystals* (Mir, Moscow, 1987) [in Russian].
4. V. M. Kotov, *Optika i Spektroskopiya* **74** (2), 386 (1993).
5. V. M. Kotov, *Optika i Spektroskopiya* **77** (3), 493 (1994).
6. V. M. Kotov, *Quantum Electron.* **22** (6), 579 (1995).
7. V. M. Kotov, *Tech. Phys.* **66** (1), 151 (1996).
8. V. M. Kotov, *Usp. Prikl. Fiz.* **2** (2), 177, 2014.
9. *Acoustic Crystals*. Ed. by M. P. Shasolskaya (Nauka, Moscow, 1982) [in Russian].
10. V. M. Kotov, *Acousto-optics. The Bragg Diffraction of a Multi Color Radiation* (Yanus, Moscow, 2016) [in Russian].