

УДК 535.33:621.373:535

Высокочастотная акустооптическая дифракция четырехцветного излучения на одной акустической волне

В. М. Котов, Г. Н. Шкердин, С. В. Аверин, Е. В. Котов

Предложен вариант брэгговской дифракции, обеспечивающий эффективное акустооптическое взаимодействие четырехцветного излучения с одной акустической волной на высокой частоте звука. Вариант опробован на примере дифракции четырехцветного излучения с длинами волн 0,488, 0,496, 0,514 и 0,633 мкм, взаимодействующих с одной акустической волной в монокристалле парателлуриата. Эффективная дифракция получена на частоте поперечного звука, равной 165 МГц.

PACS: 42.79.Jp

Ключевые слова: акустооптическая дифракция, брэгговский режим, четырехцветное оптическое излучение.

Введение

Для управления параметрами оптического излучения широко используется акустооптическая (АО) дифракция. Наиболее востребованными на практике оказались режимы брэгговской дифракции, позволяющие отклонять излучение с эффективностью, близкой к 100 % [1, 2]. Однако селективность брэгговского режима затрудняет его использование для отклонения многоцветного излучения. В [3, 4] было показано, что в анизотропных материалах можно отклонять до шести лучей с разными длинами волн. Однако выбор длин волн не произволен. Свободный выбор можно сделать только для двухцветного излучения [4]. Это нашло применение, в частности, в лазерной анемометрии [5, 6]. Но сегодня задача управления трех- и четырехцветным оптическим излучением остро встает во многих областях науки и техники (см., напр., [7—9]). Но, как правило, подобная задача решается путем использования нескольких акустических частот.

В настоящей работе все монохроматические составляющие четырехцветного лазерного излучения взаимодействуют с одной акустической волной одной частоты. Это, с одной стороны, сужает функциональные возможности управления четырехцветным излучением, но, с другой стороны, позволяет исключить эффекты интермодуляции, понизить потребляемую электрическую мощность, уменьшить габариты устройства, его себестоимость и т. п.

Отметим, что в [10] уже ставилась подобная задача. Был найден вариант его реализации, но он осуществлялся на достаточно низкой частоте звука (~ 85 МГц). Для лазерной анемометрии частота звука ограничивает диапазон измеряемых скоростей. Другими словами, чем выше частота управления оптическими лучами, тем больше измеряемый диапазон. В настоящей работе найден вариант, обеспечивающий максимально возможную частоту эффективной АО-дифракции четырехцветного излучения. В частности, в парателлуриате четырехцветное излучение, состоящее из длин волн 0,633 мкм (излучение He—Ne-лазера) и 0,488, 0,496, 0,514 мкм (линии излучения Ag-лазера), одновременно дифрагирует на частоте звука ~ 165 МГц, что вдвое превышает частоту, используемую ранее.

Теория

На рис. 1 представлена векторная диаграмма предлагаемого варианта АО-дифракции четырехцветного оптического излучения на одной акустической волне, происходящей в одноосном поло-

Котов Владимир Михайлович, ведущий научный сотрудник.
Шкердин Геннадий Николаевич, зав. лабораторией.
Аверин Станислав Владимирович, ведущий научный сотрудник.

Котов Евгений Владимирович, младший научный сотрудник.
Филиал Института радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН.
Россия, 141190, г. Фрязино, Моск. обл., пл. Введенского, 1.
E-mail: vmk277@ire216.msk.su; gns277@ire216.msk.su

Статья поступила в редакцию 10 июня 2016 г.

© Котов В. М., Шкердин Г. Н., Аверин С. В., Котов Е. В., 2016

жительном гиротропном кристалле. Отметим попутно, что вариант может быть реализован на базе любых кристаллов как с гиротропией, так и без нее, но нами рассматривается гиротропный кристалл, поскольку подразумевается использование эффективного АО-кристалла парателлурита, обладающего гиротропией. На рисунке оптическое излучение падает под углом β на входную грань кристалла (OY), ориентированную ортогонально оптической оси кристалла OZ . Внутри кристалла излучение распадается на монохроматические компоненты, причем каждая компонента в общем случае представлена двумя лучами с разными поляризациями. На рисунке приведены только по одному лучу от каждой компоненты (лучи, участвующие в дифракции), чтобы не перегружать рисунок. Волновые векторы падающего оптического излучения — $\vec{K}_1, \vec{K}_2, \vec{K}_3$ и \vec{K}_4 , они описывают распространение лучей с длинами волн $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ и λ_4 , соответственно, ($\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 > \lambda_4$). Все лучи дифрагируют на одной акустической волне с волновым вектором \vec{q} . Звуковая волна распространяется ортогонально оси OZ . В строгом брэгговском синхронизме с \vec{q} находится только луч \vec{K}_1 . Остальные лучи дифрагируют с небольшим рассинхронизмом Δk , разным для разных лучей. Все лучи претерпевают анизотропную дифракцию, т. е. дифракцию с «перебросом» волнового вектора с одной волновой поверхности на другую. Дифрагировавшие лучи — $\vec{K}'_1, \vec{K}'_2, \vec{K}'_3$ и \vec{K}'_4 , соответственно. Луч \vec{K}_1 претерпевает дифракцию вида (о-е), остальные — (е-о). На рис. 2 представлены зависимости величины расстройки волнового вектора Δk от длины волны света λ . Полагалось, что дифракция происходит в парателлурите на «медленной» звуковой волне, распространяющейся ортогонально OZ со скоростью 617 м/с. Частота звуковой волны — 148 МГц, угол падения света на кристалл $\beta = 4,02^\circ$. Расчет выполнялся на основании поверхности показателей преломления одноосного гиротропного кристалла, наиболее общий вид которой описывается выражением из работы [4]:

$$\begin{aligned}
 & n_y^4 \left(\frac{1}{n_0^2 n_e^2} - G_{11}^2 \right) + n_z^4 \left(\frac{1}{n_0^4} - G_{33}^2 \right) + \\
 & + \frac{n_y^2 n_z^2}{n_0^2} \left[\left(\frac{1}{n_0^2} + \frac{1}{n_e^2} \right) - 2G_{11}G_{33}n_0^2 \right] - \\
 & - 2 \frac{n_z^2}{n_0^2} - n_y^2 \left(\frac{1}{n_0^2} + \frac{1}{n_e^2} \right) + 1 = 0,
 \end{aligned} \quad (1)$$

где n_y, n_z — проекции вектора рефракции \vec{n} на направления OY и OZ соответственно (вектор рефракции \vec{n} по направлению совпадает с направлением волнового вектора света \vec{K} , а его величина равна показателю преломления среды [11]); n_0, n_e — главные показатели преломления кристалла; G_{11}, G_{33} — компоненты псевдотензора гирации. В вычислениях пренебрегалось влиянием G_{11} , т. е. полагалось $G_{11} = 0$. Показатели преломления и компоненты псевдотензора гирации G_{33} кристалла TeO_2 в зависимости от длины волны света брались в виде, полученном на основании [12, 13]:

$$\begin{aligned}
 n_0 &= \frac{7,76658 \cdot 10^{-10}}{\lambda^2} - \frac{11,9507 \cdot 10^{-6}}{\lambda} + 2,253, \\
 n_e &= \frac{9,337 \cdot 10^{-10}}{\lambda^2} - \frac{14,7035 \cdot 10^{-6}}{\lambda} + 2,409, \\
 G_{33} &= \frac{3,9442 \cdot 10^{-22}}{\lambda^4} - \frac{1,7037 \cdot 10^{-17}}{\lambda^3} + \frac{2,7725 \cdot 10^{-13}}{\lambda^2}.
 \end{aligned} \quad (2)$$

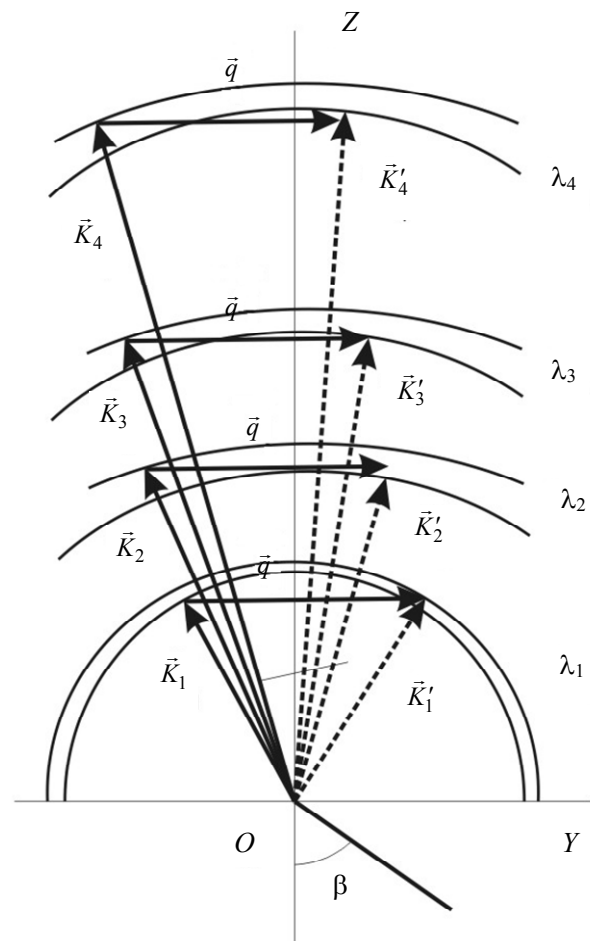


Рис. 1. Векторная диаграмма АО дифракции четырехцветного излучения.

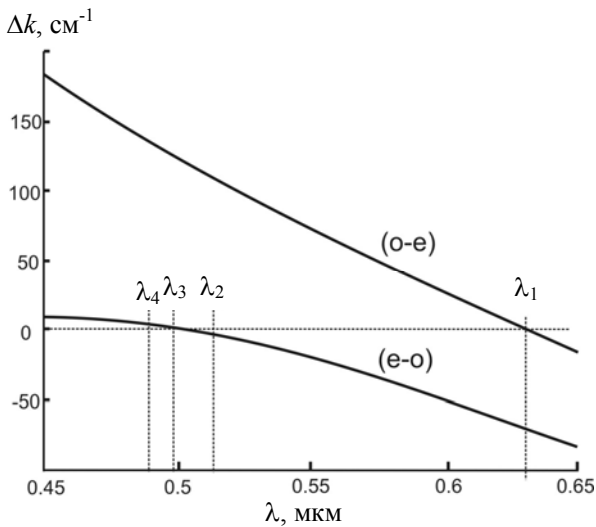


Рис. 2. Зависимость величины расстройки $\Delta \vec{k}$ от длины волны света λ .

Проекция волнового вектора \vec{K} на направление OY и OZ равны соответственно $K_y = \frac{2\pi}{\lambda} n_y$, $K_z = \frac{2\pi}{\lambda} n_z$. На рис. 2 представлены две «ветви», соответствующие дифракциям вида (o-e) и (e-o) соответственно. Видно, что при вышезаданных параметрах излучение с длиной волны $\lambda_1 = 0,63$ мкм находится в строгом брэгговском синхронизме (для него $\Delta k = 0$), а для лучей с длинами волн $\lambda_2 = 0,514$ мкм, $\lambda_3 = 0,496$ мкм и $\lambda_4 = 0,488$ мкм (лучи, генерируемые Аг-лазером) значение Δk — небольшое. На рис. 3 приведены зависимости изменения λ_k от угла β для приведенных выше длин волн на той же частоте звука. Видно, что $\Delta k = 0$ для излучения λ_1 при $\beta = 4,02^\circ$, а Δk для остальных лучей не превышает 5 см^{-1} .

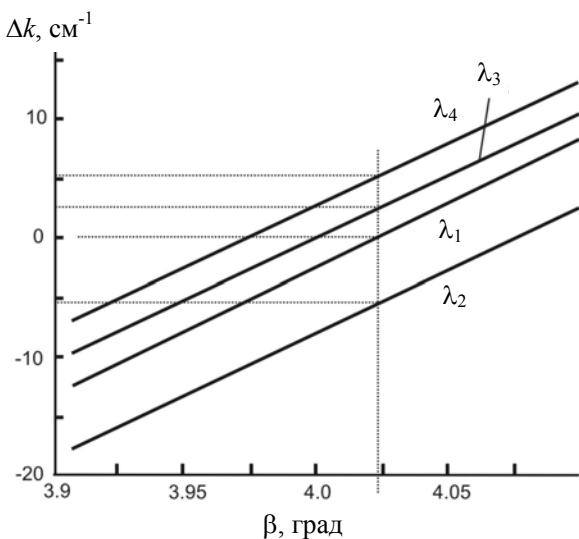


Рис. 3. Зависимость величины расстройки Δk от угла β . Частота звука $f = 148$ МГц.

На рис. 4 приведены зависимости эффективности η дифракции первого порядка от акустической мощности P_{ac} , построенные согласно выражению [1, 2]:

$$\eta = \frac{I_1}{I_{inc}} = \frac{v^2}{(\Delta k L)^2 + v^2} \sin^2 \left[0,5 \sqrt{(\Delta k L)^2 + v^2} \right], \quad (3)$$

где I_1 — интенсивность дифрагировавшего в первый порядок луча, I_{inc} — интенсивность падающего на кристалл излучения, v — параметр Рамана-Ната, равный $v \approx \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{M_2 L}{2H}} P_{ac}$, где λ — длина волны света, M_2 — коэффициент АО-качества материала, L и H — длина АО-взаимодействия и высота акустического столба. При вычислениях полагалось $L = 0,4$ см, $H = 0,4$ см (условия эксперимента), M_2 бралось равным $1200 \times 10^{-18} \text{ с}^3/\text{г}$. Видно, что кривые для разных длин волн (за исключением кривой λ_3) на начальном участке располагаются достаточно близко друг к другу. При $P_{ac} > 0,05$ Вт зависимости начинают существенно расходиться. Варьируя условиями эксперимента (частотой звука и углом падения β), можно существенно «сгладить» разброс в поведении кривых. В экспериментах (см. ниже) наилучшие условия дифракции всех линий были достигнуты на частоте звука ~ 165 МГц.

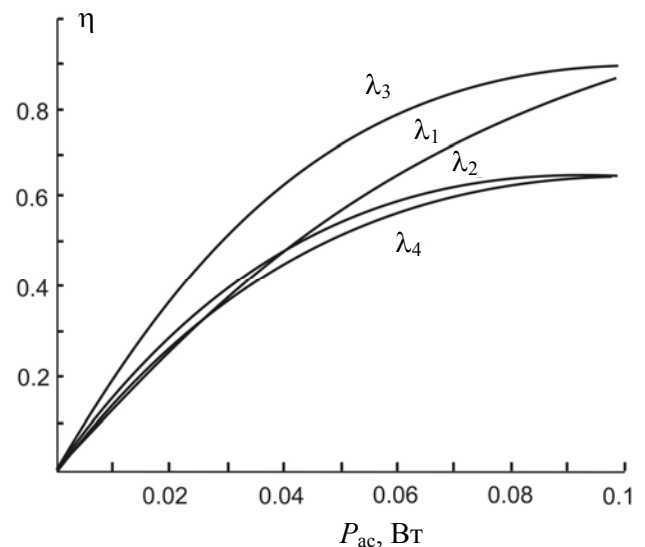


Рис. 4. Зависимость эффективности дифракции η от акустической мощности P_{ac} .

Эксперимент

Для проверки полученного результата был выполнен эксперимент. Экспериментальная установка приведена на рис. 5. Аг-лазер 1 генерировал три наиболее ярких линии $\lambda_2 = 0,514$ мкм, $\lambda_3 = 0,596$ мкм

и $\lambda_4 = 0,514$ мкм. Эти лучи пропускались через ослабитель 2, пластинку 3, поляризатор 5, механический модулятор излучения 6 и направлялись на АО-ячейку 7. Лазер 4 генерировал излучение с длиной волны $\lambda_1 = 0,63$ мкм, которое отражалось от пластинки 3 и, распространяясь далее коллинеарно с лучами λ_2 – λ_4 , направлялось так же на ячейку 7. Поверхности пластинки 3 «просветлены» таким образом, чтобы максимально пропускать излучения λ_2 – λ_4 и отражать излучение λ_1 . АО ячейка 7 выполнена из монокристалла TeO_2 . Размеры ячейки — $10 \times 10 \times 8$ мм вдоль направлений $[110]$, $[1\bar{1}0]$ и $[001]$ соответственно. Направление ОУ на рис. 1 соответствует направлению $[110]$, а оптическая ось ОZ — направлению $[001]$. Пьезопреобразователь из LiNbO_3 , приклеенный к грани $\{110\}$, генерировал поперечную акустическую волну в диапазоне частот 120—180 МГц. Скорость звука в кристалле — 617 м/с. Все дифрагировавшие лучи распространялись по одну сторону от падающего излучения I_0 . Излучения по отдельности регистрировались фотоприемником 8. Поскольку дифрагировавшие лучи λ_2 – λ_4 распространялись достаточно близко друг к другу, для их разделения использовались поляризационные фильтры 9. Для выделения луча λ_1 фильтр не требовался. Подбором частоты, мощности звука и угла падения света на кристалл добивалась ситуация, когда излучения с длинами волн λ_1 и λ_3 одновременно дифрагировали с максимальной эффективностью, по-

скольку для них величина расстройки Δk должна быть практически равной нулю. После этого измерялись интенсивности лучей λ_2 и λ_4 . Здесь так же велся поиск режима оптимальных условий дифракции. Наилучшая ситуация возникала на частоте звука 165 МГц. При этом эффективности дифракции лучей λ_2 и λ_4 были близки к 25 %, а лучей λ_1 и λ_3 — к 15 %. Если принять во внимание, что половина исходного излучения вообще не принимала участия в дифракции, поскольку соответствующие лучи имели другую поляризацию, то результаты эксперимента показывают высокую дифракционную эффективность. Для получения больших эффективностей необходимо использовать фазосдвигающие устройства с целью получения «нужных» поляризаций. Формирование разных поляризаций одновременно у нескольких лучей с разными длинами волн является самостоятельной задачей. Нами такая задача не ставилась. Эксперименты выполнялись с целью проверки основных теоретических результатов. В целом эксперименты подтвердили выводы теории, получено хорошее согласие между экспериментальными и теоретическими данными. Полученная частота 165 МГц достаточно близка к расчетной (148 МГц). Расхождения могут быть вызваны расходимостью световых и звуковых волн, неоднородностью кристалла, неточностью ориентировки граней кристалла, неточностью используемой модели, и т. п.

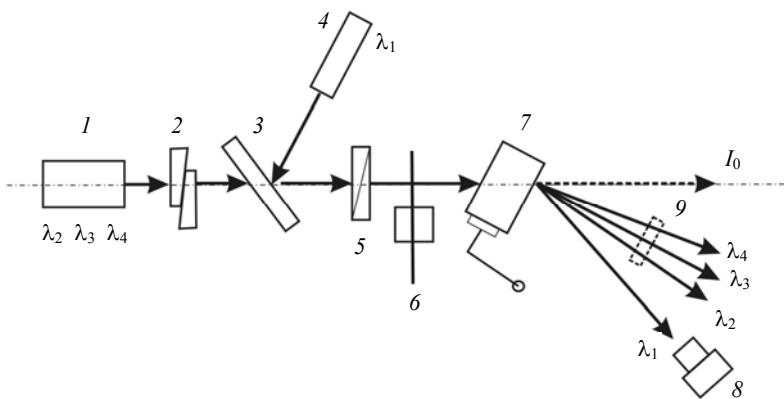


Рис. 5. Оптическая схема экспериментальной установки.

Заключение

Основные результаты работы можно изложить следующим образом.

1. Предложен вариант АО-дифракции четырехцветного излучения на одной звуковой волне, реализуемый при максимально возможной частоте звука при заданном направлении звуковой волны.

2. Для получения эффективной дифракции лучей с наперед заданными длинами волн предложено использовать режимы дифракции с рас-

стройкой брэгговского синхронизма. Согласно разработанной методике, выбираются условия дифракции, когда излучение с максимальной длиной волны находится в строгом брэгговском синхронизме с акустической волной, а рассинхронизм остальных лучей с той же звуковой волной — минимальный.

3. Методика продемонстрирована на примере четырехцветного излучения, три луча которых (0,488, 0,596 и 0,514 мкм) генерируются Ar-лазером, а четвертый луч (0,63 мкм) — He-Ne-лазером. Лучи

взаимодействуют с одной акустической волной, распространяющейся в кристалле парателлурита со скоростью 617 м/с. Показано, что оптимальный вариант при использовании кристалла парателлурита, в котором акустическая волна направлена ортогонально его оптической оси, реализуется на частоте звука, равной 165 МГц. Расхождения с теорией могут быть вызваны расходимостью оптических и акустических лучей, неоднородностью кристалла, неточностью ориентирования граней, погрешностями используемой модели и т. п.

Полученные результаты могут найти применение для создания АО-устройств, предназначенных для управления четырехцветным лазерным излучением.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-07-00064), а также Совета по грантам при Президенте Российской Федерации (программа государственной поддержки ведущих научных школ РФ, грант НШ-3317.2010.9).

ЛИТЕРАТУРА

1. Балакшиев 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. Котов В. М., Шкердин Г. Н. // Опт. и Спектр. 1998. Т. 85. № 1. С. 118.
4. Котов В. М. Акустооптическая брэгговская дифракция многокомпонентного оптического излучения. Автореферат Дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. — М.: 1998.
5. Антонов С. Н., Котов В. М., Сотников В. Н., Тимофеев А. С. Акустооптические поляризационные расщепители для лазерных доплеровских анемометров. Препринт № 20 (549). — М.: ИРЭ АН СССР, 1990.
6. Антонов С. Н., Котов В. М., Сотников В. Н. // ЖТФ. 1991. Т. 61. В. 1. С. 168.
7. Акустооптические процессоры спектрального типа / Под ред. В. В. Проклова, В. Н. Ушакова. — М.: Радиотехника, 2012.
8. Henrie A., Haymore B., and Smalley D. E. // *Review of Scientific Instruments*. 2015. Vol. 86. Issue 023101.
9. Kastelik J.-C., Yushkov K. B., Dupont S., Voloshinov V. B. // *Optics Express*. 2009. Vol. 17. No. 15. P. 12767.
10. Котов В. М., Шкердин Г. Н., Булюк А. Н., Воронко А. И., Тихомиров С. А. // Радиотехника. 2015. № 8. С. 53.
11. Федоров Ф. И. Оптика анизотропных сред. — М.: УРСС, 2004.
12. Акустические кристаллы / Под ред. Шаскольской М. П. — М.: Наука, 1982.
13. Кизель В. А., Бурков В. И. Гиروتропия кристаллов. — М.: Наука, 1980.

High frequency acousto-optic diffraction of the four-color radiation on the single acoustic wave

V. M. Kotov, G. N. Shkerdin, 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; gns277@ire216.msk.su

Received June 10, 2016

It is suggested a variant of the Bragg diffraction providing the effective acousto-optic interaction of the four-color beam with a single acoustic wave on the high acoustic frequency. A variant is confirmed on the basis of the diffraction of the four-color radiation with the wavelengths 0.488; 0.496; 0.514 and 0.633 mcm interacted with a single acoustic wave in the paratellurite crystal. The effective diffraction is obtained on the shear acoustic wave with the frequency equal to 165 MHz.

PACS: 42.79.Jp

Keywords: acousto-optic diffraction, Bragg regime, four-color optical radiation.

REFERENCES

1. V. I. Balakshij, V. N. Parygin, and L. E. Chirkov, *Physical Foundations of Acousto-Optics* (Radio i Sviaz', 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. V. M. Kotov and G. N. Shkerdin, *Opt. Spectrosc.* **85** (1), 118 (1998).
4. V. M. Kotov, Doctoral Dissertation (Moscow, 1998).
5. S. N. Antonov, V. M. Kotov, V. N. Sotnikov, and A. S. Timofeev, Preprint No. 20(549). (Moscow, IRE AN USSR, 1990).
6. S. N. Antonov, V. M. Kotov, and V. N. Sotnikov, *Tech. Phys.* **61** (1), 168 (1991).
7. *Acousto-Optic Processors of the Spectral Type*. Ed. by V. V. Proklova and V. N. Ushakova (Moscow, Radiotekhnika. 2012) [in Russian].
8. A. Henrie, B. Haymore, and D. E. Smalley, *Review of Scientific Instruments* **86**, Issue 023101 (2015).
9. J.-C. Kastelik, K. B. Yushkov, S. Dupont, and V. B. Voloshinov, *Optics Express* **17**, 12767 (2009).
10. V. M. Kotov, G. N. Shkerdin, A. N. Buliuk, A. I. Voronko, and S. A. Tikhomirov, *Radiotekhnika*, No. 8, 53 (2015).
11. F. I. Fyodorov, *Optics of Anisotropic Media* (URSS, Moscow, 2004) [in Russian].
12. *Acoustic Crystals*. Ed. by M. P. Shaskol'skoj. (Nauka, Moscow, 1982) [in Russian].
13. V. A. Kizel' and V. I. Burkov, *Girotropy of Crystals* (Nauka. Moscow, 1980) [in Russian].