

# ВЫСОКОЭФФЕКТИВНАЯ АКУСТООПТИЧЕСКАЯ АМПЛИТУДНАЯ МОДУЛЯЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ГОЛЬМИЕВОГО (Ho:YAG) ЛАЗЕРА

А. В. Мухин, В. И. Лазаренко, С. Н. Синьков, Ю. Н. Фролов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Создание эффективных лазерных систем, генерирующих излучение в безопасном для глаз диапазоне длин волн (1900–2100) нм, является одной из важных задач современной лазерной физики. Это связано с широкими возможностями практического использования данных лазеров в медицине, лидарном зондировании атмосферы, для накачки параметрических генераторов света среднего ИК-диапазона [1–4]. К важнейшим представителям данного класса лазерных систем относятся твердотельные лазеры с диодно-лазерной накачкой на основе кристаллов содержащих ионы гольмия  $\text{Ho}^{3+}$ .

В ряде задач, связанных с практическим применением таких лазеров, необходимо обеспечить эффективную амплитудную модуляцию выходного лазерного излучения с высоким контрастом. Чаще всего для этого применяются электрооптические и акустооптические модуляторы. Электрооптические модуляторы обеспечивают высокую эффективность модуляции. Однако они не позволяют получать высокий контраст излучения. Акустооптические модуляторы обладают меньшей эффективностью, но благодаря пространственному разделению лучей обеспечивают высокий контраст [5].

В данной работе представлены результаты исследования амплитудной модуляции излучения Ho:YAG с помощью акустооптического фильтра на основе кристалла диоксида теллура ( $\text{TeO}_2$ ).

Диоксид теллура (парателлуриит) – одноосный положительный кристалл. Он широко применяется в самых различных устройствах – дефлекторах, спектроанализаторах, неколлинеарных фильтрах и др [1]. Благодаря чрезвычайно низкой скорости поперечных упругих волн в направлении оси кристалла [110] при анизотропной дифракции реализуется большое значение акустооптического качества  $M_2$ . Вследствие этого такие устройства имеют низкое энергопотребление. При этом эффективность акустооптической дифракции поляризованного света может достигать 90 % и более [6, 7]. Область прозрачности данного кристалла перекрывает весь видимый и ближний ИК-диапазон, поэтому такой кристалл может быть пригоден для решения целого ряда различных задач, связанных с модуляцией излучения в спектральной области ~2000 нм.

## Физические основы акустооптического взаимодействия в кристаллах

В основе работы акустооптических устройств лежит акустооптический эффект. Многие характерные особенности дифракции оптического излучения на акустической волне можно получить с использованием корпускулярно-волновой природы света и звука [5]. Согласно этому представлению дифракцию оптического излучения на акустической волне можно рассматривать как процесс взаимодействия трех частиц: падающего фотона, акустического фонона и дифрагированного фотона. В изотропной среде показатель преломления для оптического излучения не зависит от направления распространения волны и поэтому волновой вектор дифрагированной волны  $\vec{k}_d$  совпадает с вектором падающей волны  $\vec{k}_i$  по модулю. В анизотропной среде показатель преломления для данного оптического излучения зависит от направления его распространения. Поскольку направления распространения дифрагированного пучка, в общем случае, отличается от направления исходного пучка, величины волновых векторов не остаются теперь неизменными. Векторные соотношения акустооптического взаимодействия записываются в виде [7]

$$\begin{aligned}\vec{k}_i^o - \vec{K} - \overline{\Delta\vec{K}} - \overline{\Delta\vec{k}} &= \vec{k}_d^b; \\ \vec{k}_i^b + \vec{K} + \overline{\Delta\vec{K}} + \overline{\Delta\vec{k}} &= \vec{k}_d^o,\end{aligned}\quad (1)$$

где  $\vec{k}_i$  и  $\vec{k}_d$  – волновые векторы падающего и дифрагирующего света для обыкновенно и необыкновенно поляризованных лучей;  $\vec{K}$  – волновой вектор звука;  $\overline{\Delta\vec{K}}$  и  $\overline{\Delta\vec{k}}$  – приращение акустического вектора и вектор расстройки соответственно.

Векторная диаграмма, иллюстрирующая соотношение (1), представлена на рис. 1. На этом рисунке показана оптическая ось кристалла [001] и углы Брэгга  $\theta_B^o$  и  $\theta_B^b$ . Акустические волны распространяются в кристалле под углом  $\alpha$  к оптической оси в плоскости акустооптического взаимодействия. Падающая оптическая волна является необыкновенно поляризованной по отношению к оптической оси кристалла.

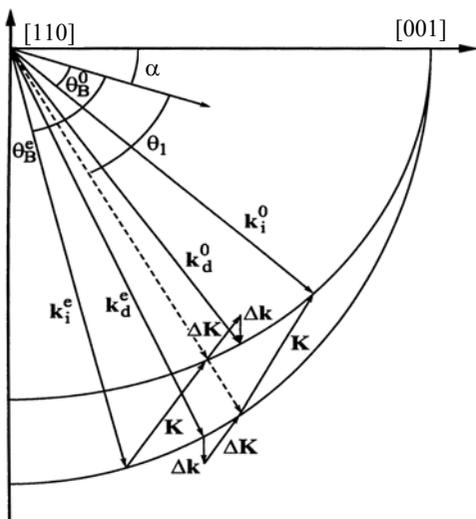


Рис. 1. Векторная диаграмма акустооптического взаимодействия

В соответствии с формулой (1), вектор  $\vec{k}_d^o$  образуется как сумма, а вектор  $\vec{k}_d^e$  – как разность волновых векторов падающей световой и акустической волн. Соотношения для волновых чисел взаимодействующих пучков записываются в виде [7]:

$$\begin{aligned} k &= 2\pi * n_o / \lambda; \\ K &= 2\pi * f / V; \\ \Delta K &= 2\pi * \Delta f / V, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $V$  – фазовая скорость звука;  $f$  и  $\Delta f$  – частота акустической волны и ее вариации при нарушении условия синхронизма.

## Расчет параметров акустооптического фильтра

Схема исследуемого акустооптического кристалла, работающего в режиме акустооптического фильтра, приведена на рис. 2. Плоскость пьезопреобразователя составляет угол  $\alpha_2 = 14,3^\circ$  с оптической осью кристалла [001]. Взаимодействие света и звука осуществлялось в режиме анизотропной дифракции Брэгга. Длина кристалла составляла 28 мм, при этом длина пьезопреобразователя – 17 мм и ширина – 1,8 мм. Рабочие грани кристалла имели просветляющее покрытие в области  $\sim 2000$  нм. Одна из граней кристалла была скошена под небольшим углом. Поэтому, в отсутствие высокочастотного сигнала на пьезопреобразователе прошедшее лазерное излучение отклонялось на угол  $\sim 7^\circ$ . При подаче высокочастотного сигнала на пьезопреобразователь направление лазерного излучения на выходе кристалла совпало с направлением падающего.

Важным параметром акустооптического фильтра является спектральная полоса пропускания  $\Delta\lambda$ . Рассчитанная по формуле, приведенной в источнике [8] полоса пропускания данного фильтра в режиме анизотропной дифракции составляет  $\Delta\lambda \sim 5$  нм.

Известно, что кристалл диоксида теллура обладает сильной анизотропией физических свойств [5]. Под анизотропией будем понимать не только оптическую, но и акустическую анизотропию, поскольку в общем случае акустической анизотропией пренебрегать нельзя в силу ее значительной величины. В результате акустической анизотропии, возникает снос акустической энергии относительно плоскости пьезопреобразователя. Направление фазовой и групповой скорости в этом случае не совпадают и образуют угол  $\phi$ .

Угол сноса акустической энергии можно рассчитать по следующей формуле [9]:

$$\phi = \arctg \left( \frac{1}{\vartheta} \frac{\partial \vartheta}{\partial \alpha_2} \right), \quad (3)$$

где  $\vartheta$  – скорость медленной звуковой волны в кристалле.

Направление распространения звука (волнового вектора) составляет угол  $\alpha_2 = 14,3^\circ$  с осью кристалла [110]. Скорость звука в этом случае можно рассчитать по формуле [9]:

$$\vartheta = \sqrt{\left( \frac{c_{11} - c_{12}}{2} \cos^2 \alpha_2 + c_{44} \sin^2 \alpha_2 \right) / \rho}, \quad (4)$$

где  $\vartheta$  и  $c_{ij}$  – плотность и упругие постоянные кристалла.

Подставив значения плотности и упругих постоянных кристалла из справочных данных [4] в формулу (4), получим скорость распространения звука в кристалле в данном направлении  $\vartheta = 795,69$  м/с. Тогда, угол сноса акустической энергии в кристалле, согласно формуле (3) будет равен  $\phi \approx 57^\circ$ .

Расчеты частоты и мощности высокочастотного сигнала проводились для длины волны излучения 2000 нм. Для акустооптического фильтра падающее лазерное излучение являлось необыкновенно поляризованным, а дифрагированное – обыкновенно поляризованным. Для данной длины волны лазерного излучения угол Брэгга составил  $\theta_B^e \approx 20,4^\circ$ . Значения показателей преломления для обыкновенно и необыкновенно поляризованных лучей взяты из [10]. Показатель преломления кристалла для падающего излучения с необыкновенной поляризацией  $n_i$  определяется из уравнения оптической индикатрисы [11]. Для данной ориентации акустооптического взаимодействия показатель преломления падающего излучения на длине волны  $\lambda = 2000$  нм составил  $n_i \approx 2,224$ . Из уравнений анизотропной акустооптической дифракции Брэгга [5] была определена центральная частота ультразвука на данной длине волны лазерного излучения  $f \approx 49,5$  МГц.

По формуле, приведенной в источнике [8] и при учете сноса акустической энергии в кристалле, проводились оценки мощности акустической волны, при которой эффективность акустооптического взаимодействия достигает максимального значения. Согласно проведенным оценкам данное значение мощности акустического сигнала составляет  $P \sim 2$  Вт.

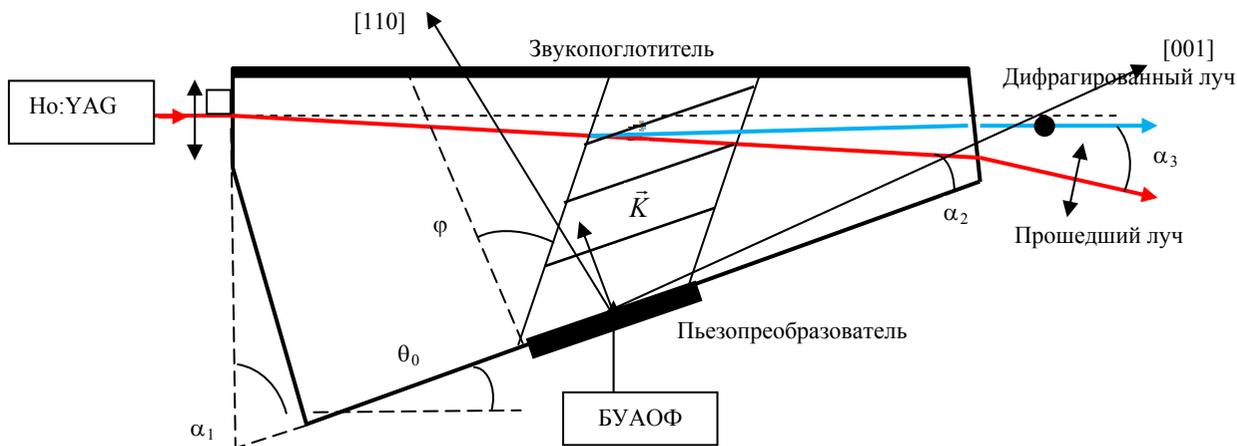


Рис. 2. Схема акустооптического фильтра:  $\alpha_1 = 69,583^\circ$ ;  $\alpha_2 = 14,3^\circ$ ;  $\alpha_3 = 7^\circ$

### Экспериментальная установка и методика проведения экспериментов

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 3. Источником накачки твердотельного гольмиевого лазера служил промышленный волоконный тулиевый лазер ТМ-50. Основная часть выходного

излучения гольмиевого лазера (~99 %) отражалась от пластинки 3 и попадала на вращатель плоскости поляризации 7, который обеспечивал поворот плоскости поляризации на угол  $90^\circ$ . Оставшаяся часть излучения направлялась на отражательную дифракционную решетку 4 и раскладывалась в спектр, который можно было наблюдать с помощью ИК-камеры

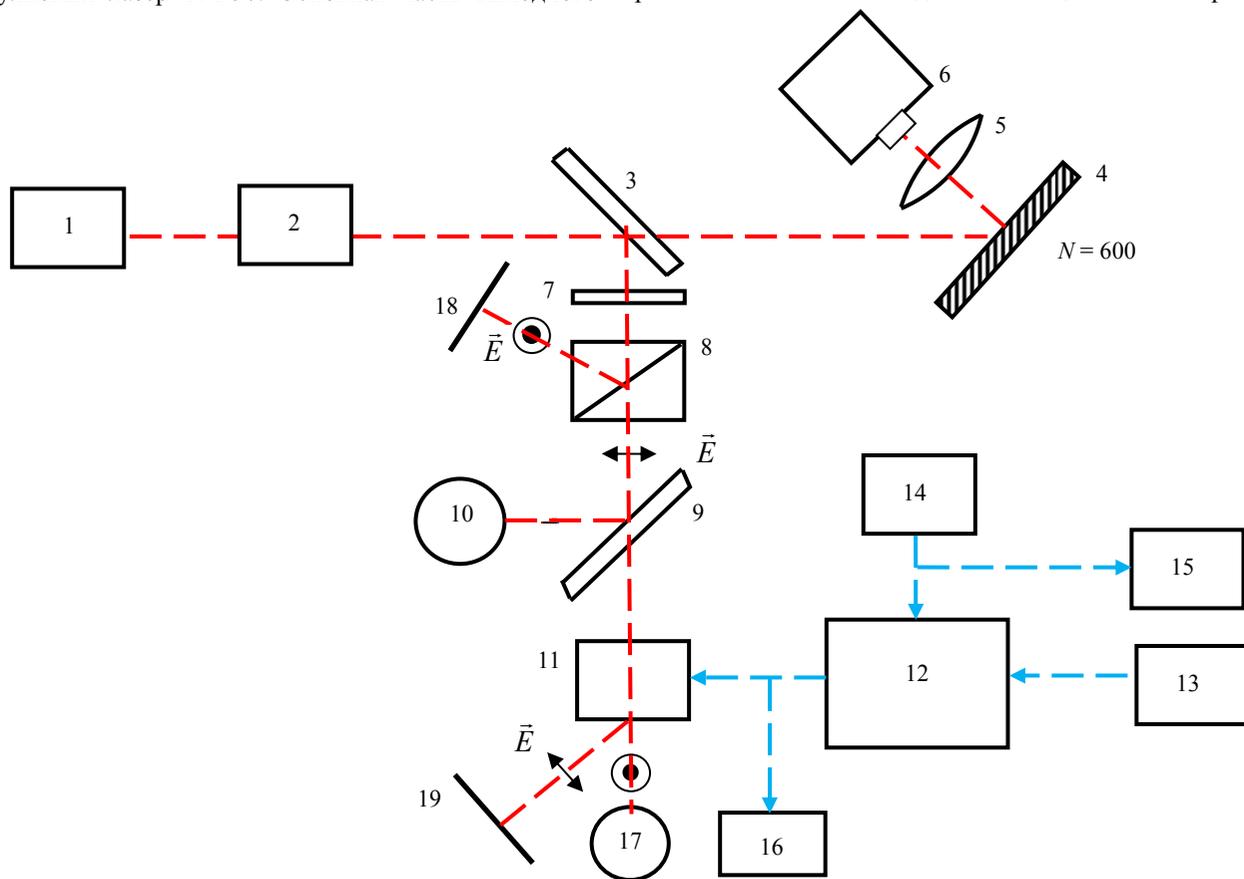


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1 – лазер накачки (волоконный тулиевый лазер с длиной волны 1908 нм); 2 – твердотельный гольмиевый лазер с длиной волны генерации 2091 и 2097 нм; 3 – отражающая пластинка, коэффициент отражения ~ 99 %; 4 – отражательная дифракционная решетка с числом штрихов  $N = 600$  шт./мм; 5 – положительная линза с фокусным расстоянием  $F = 100$  мм; 6 – ИК-камера Ругосат 3 с компьютером; 7 – вращатель плоскости поляризации, угол поворота  $90^\circ$ ; 8 – призма Глана; 9 – делительное зеркало; 10, 17 – измеритель мощности лазерного излучения (3 sigma); 11 – акустооптический фильтр (кристалл диоксида теллура); 12 – блок управления акустооптическим фильтром (БУАОФ); 13 – блок питания; 14 – генератор высокочастотных сигналов ГЧ-102А; 15 – частотомер ЧЗ-34; 16 – цифровой осциллограф TDS3000B; 18, 19 – непрозрачный экран

Ругосат 3 и компьютера 6. Это позволяло контролировать спектральный состав излучения лазера. Призма Глана 8 выделяла излучение необыкновенной поляризации, обеспечивая тем самым полную поляризацию излучения. Излучение с обыкновенной поляризацией отражалось и направлялось на непрозрачный экран 18. Делительное зеркало 9 позволяло контролировать падающую мощность лазерного излучения. Отраженная часть излучения падала на измеритель мощности 10, а прошедшая часть – на акустооптический фильтр 11. При отсутствии высокочастотного сигнала излучение попадало на непрозрачный экран 19. При подаче высокочастотного сигнала излучение попадало на измеритель мощности 17.

Источником высокочастотных сигналов служил генератор ГЧ-102А (поз. 14). Максимальное действующее значение амплитуды выходного сигнала такого генератора составляет 0,5 В, что соответствует выходной мощности  $P = 5$  мВт. Сигнал с этого генератора подавался на усилительный каскад блока управления акустооптическим фильтром 12. С выхода блока управления усиленный по амплитуде сигнал поступал на акустооптический фильтр. Амплитуда высокочастотного сигнала контролировалась с помощью цифрового осциллографа 16. Регулировка амплитуды выходного сигнала блока управления БУАОФ осуществлялась изменением выходного напряжения блока питания 13. Для измерения и контроля частоты ВЧ сигнала в схеме был предусмотрен частотомер ЧЗ-34 (поз. 15).

Для определения максимальной эффективности акустооптического взаимодействия значение мощности высокочастотного сигнала  $P$  подаваемой на кристалл варьировалось в диапазоне от 1 до 2 Вт. При этом мощность излучения в направлении дифрагированного луча сравнивалась со значением падающей мощности.

Контраст излучения определялся по отношению освещенностей в направлении дифрагированного луча при включенном и выключенном акустооптическом фильтре. При включенном акустооптическом фильтре мощность лазерного излучения в направлении дифрагированного луча определялась с помощью измерителя и пересчитывалась на освещенность. При выключенном акустооптическом фильтре уровень освещенности в том же направлении определялся с помощью ИК-камеры Ругосат 3, устанавливаемой вместо измерителя мощности 17.

## Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис. 4 показана экспериментально полученная зависимость мощности лазерного излучения в направлении дифрагированного луча от частоты высокочастотного сигнала в диапазоне от 49,2 до 49,6 МГц. Мощность высокочастотного сигнала поддерживалась на постоянном уровне и составляла  $P = 1,3$  Вт. Эксперименты показали, что центральная частота высокочастотного сигнала для длины волны 2091 нм, при которой на-

блюдается максимум мощности лазерного излучения в дифрагированном луче составляет  $f_0 \approx 49,41$  МГц. Полученное значение  $f_0$  достаточно хорошо согласуется с расчетным значением  $f_p \approx 49,5$  МГц.

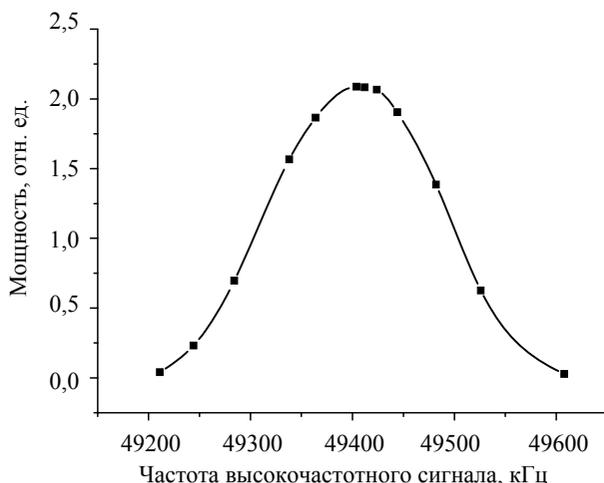


Рис. 4. Зависимости мощности лазерного излучения в направлении дифрагированного луча от частоты высокочастотного сигнала

При значении мощности высокочастотного сигнала  $P \approx 1,7$  Вт на частоте  $f_0$  мощность лазерного излучения в направлении дифрагированного луча достигала максимального значения. При этом максимальное значение эффективности акустооптической дифракции поляризованного излучения на длине волны 2091 нм составило  $\zeta = 96$  %. Для сравнения аналогичные эксперименты были проведены с частично поляризованным оптическим излучением и с излучением, имеющим в своем составе две длины волны. При исследовании акустооптической дифракции с частично поляризованным оптическим излучением (без призмы Глана) на длине волны 2091 нм, максимальная эффективность равнялась  $\zeta_1 = 90$  %. При наличии в излучении двух длин волн 2091 и 2097 нм с определенным соотношением энергии, эффективность акустооптического фильтра уменьшалась до значения  $\zeta_2 = 48$  %.

Определение контраста производилось при фиксированной выходной мощности лазера, которая составляла  $\sim 1,5$  Вт. Освещенность в направлении дифрагированного луча при включенном (наличие высокочастотного сигнала на пьезопреобразователе) акустооптическом фильтре составила  $E = 0,7$  Вт/мм<sup>2</sup>. В отсутствие высокочастотного сигнала на акустооптическом фильтре, лазерное излучение в направлении дифрагированного луча зафиксировать не удалось. Поэтому, можно считать, что уровень оптического излучения не превосходит уровня чувствительности фотоприемного устройства. В данном случае уровень чувствительности ИК-камеры составляет  $E_{\min} = 22$  мкВт/мм<sup>2</sup>. Следовательно, отношение максимального и минимального значений освещенности (глубина модуляции) составляет  $k > 3 \times 10^4$ , что соответствует контрасту излучения  $M > 99,994$  %.

## Заключение

В работе проведено исследование амплитудной модуляции излучения Ho:YAG с помощью акустооптического фильтра на основе кристалла диоксида теллура. Оценены и экспериментально определены основные параметры акустооптического фильтра для длины волны лазерного излучения 2091 нм. Центральная частота акустической волны составила  $f \approx 49,41$  МГц, а мощность, при которой наблюдается максимальная эффективность акустооптического взаимодействия –  $P \approx 1,7$  Вт. Эффективность акустооптической модуляции поляризованного одночастотного лазерного излучения при этом достигала 96 %. Исходя из полученных экспериментальных данных, определена глубина модуляции лазерного излучения –  $k > 3 \times 10^4$ , что соответствует контрасту излучения  $M = 99,994$  %.

Проведенные исследования показали, что с помощью данного акустооптического фильтра возможно высокоэффективное управление параметрами лазерного излучения в спектральной области ~ 2000 нм с высоким контрастом излучения на выходе.

## Литература

1. Грачев С. В. Гольмиевый лазер в медицине // Москва, Изд-во: Триада-Х, ISBN: 5-8249-0102-3(1). 2003.

2. Buzug T. M., Bongartz D. J., Hartmann M. U. and S. Weber. Design and Technical Concept of a Tm Laser Scalpel for Clinical Investigation Based on a 60W, 1.92  $\mu\text{m}$  Tm Fiber Laser System // Advances in Medical Engineering, 114. 2007. P. 447–452.

3. Henderson S. W., Hale C. P., Magee J. R., Kavaya M. J., and Huffaker A. V. Eye-safe coherent laser radar system at 2.1 using Tm, Ho:YAG-lasers // Opt. Lett. 1991. 16(10). P. 773–775.

4. Budni P. A., Pomeranz L. A., Lemons M. L., Miller C. A., Mosto J. R. and Chicklis E. P. Efficient mid-infrared laser using 1.9- $\mu\text{m}$ -pumped Ho:YAG and ZnGeP<sub>2</sub> optical parametric oscillators // J. Opt. Soc. Am. B. 2000. 17(5). P. 723–728.

5. Балакший В. И. Физические основы акустооптики / В. И. Балакший, В. Н. Парыгин, Л. И. Чирков. М.: 2000.

6. Антонов С. Н. Анизотропный акустооптический модулятор неполяризованного света на медленной световой волне в кристалле парателлуриита / С. Н. Антонов, В. И. Миргородский // Журнал технической физики. Т. 74. Вып. 1. 2004.

7. Волошинов В. Б. Акустооптический неполяризованного электромагнитного излучения / В. Б. Волошинов, В. Я. Молчанов, Т. М. Бабкина // Журнал технической физики. Т. 70. Вып. 9. 2000.

8. Магдич Л. Н. Акустооптические устройства и их применения / Л. Н. Магдич, В. Я. Молчанов. М.: 1978.

9. Зубринов И. И. Широкополосный акустооптический фильтр / И. И. Зубринов, В. К. Сапожников, Д. В. Шелопут // Журнал технической физики. Т. 67. Вып. 6. 1997.

10. Акустооптические кристаллы [Электронный ресурс] / МГУ – Электрон. текстовые дан. и граф. дан. М. Режим доступа <http://acustooptics.physic.mgu.ru>, свободный.

11. Ярив А. Оптические волны в кристаллах / А. Ярив, П. Юх / Пер. с англ. М.: Мир, 1987.