

УДК 548.0:535

## ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НИОБАТА КАЛИЯ, ДОПИРОВАННОГО ЖЕЛЕЗОМ (Fe:KNbO<sub>3</sub>), ДЛЯ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОЙ МОДУЛЯЦИИ СВЕТА

В. А. Дьяков, А. А. Подшивалов, В. С. Сырцов

(кафедра общей физики и волновых процессов)

E-mail: dva@lbo.phys.msu.su

**Исследована возможность применения кристалла ниобата калия, допированного железом (Fe:KNbO<sub>3</sub>), для электрооптической модуляции света. Измерены его электрооптические коэффициенты и скорости распространяющихся в нем акустических волн. Определено, что модуляция излучения в Fe:KNbO<sub>3</sub> может проводиться на частотах до 6 МГц.**

### Введение

В лазерной технике и оптической связи постоянно существует интерес к низковольтным (и вместе с тем к широкополосным) электрооптическим модуляторам [1–3], для этого регулярно проводится поиск различных кристаллов, обладающих большими электрооптическими константами на высоких частотах модуляции. Однако, как правило, совместить эти два параметра не удается. В качестве примера можно отметить, что кристаллы группы  $Ba_x Sr_{1-x} Nb_2 O_6$  имеют полуволновые напряжения в сотни или даже десятки вольт, однако их рабочие частоты не превышают 1 МГц. Популярными же кристаллами  $LiNbO_3$  и  $DKDP$  используются в модуляторах до гигагерцевых частот, однако полуволновое напряжение у них достаточно велико и составляет величину около 4 кВ на длине волны 0.63 мкм [1].

Ранее было установлено [4, 5], что кристалл ниобата калия ( $KNbO_3$ ) обладает большими электрооптическими коэффициентами, и соответственно модулятор на его основе будет иметь малое полуволновое напряжение. Однако в качестве электрооптического модулятора  $KNbO_3$  практически не использовался до сих пор в силу заметной проводимости кристалла.

В настоящей работе нами был исследован ниобат калия, допированный железом (Fe:KNbO<sub>3</sub>). Подобные кристаллы используются в экспериментах по обращению волнового фронта [6]. В процессе оптимизации фоточувствительности элементов (нагрев до 200°C в постоянном электрическом поле) обнаружилось, что кристаллы с примесью железа имеют высокое удельное сопротивление — почти на порядок больше по сравнению с обычным  $KNbO_3$ . В экспериментах по созданию регулярной доменной структуры [7] было определено, что кристалл ниобата калия имеет низкое коэрцитивное поле, поэтому при приложении к нему внешнего электрического поля возможно его двойникование, в то время как Fe:KNbO<sub>3</sub> имеет существенно большую устойчивость доменной структуры к переполяризации. Совокупность этих данных позволяет предположить, что кристаллы Fe:KNbO<sub>3</sub> перспективны для при-

менения в качестве электрооптического модулятора света. Область прозрачности  $KNbO_3$  составляет 0.4–4 мкм, измеренная нами для Fe:KNbO<sub>3</sub> — 0.5–4 мкм. Таким образом, допирование не ухудшает оптические свойства кристалла для применения его в качестве модулятора инфракрасного излучения.

Целью нашей работы было изучение пригодности кристаллов Fe:KNbO<sub>3</sub> для электрооптических модуляторов света и сравнение полученных результатов с имеющимися данными по  $KNbO_3$ .

### Эксперимент

Ниобат калия — это двуосный кристалл класса симметрии 2 мм, матрица линейных электрооптических коэффициентов для него имеет пять ненулевых коэффициентов, их табличные значения для чистого  $KNbO_3$  в случае низких частот:  $r_{13} = 28$ ,  $r_{23} = 1.3$ ,  $r_{33} = 64$ ,  $r_{51} = 105$  и  $r_{42} = 380$  пм/В [1]. Соответствие кристаллографических и кристаллофизических осей —  $a(y)$ ,  $b(x)$ ,  $c(z)$ .

Кристаллы выращивались нами из расплава с избытком оксида калия, содержание железа в расплаве составляло 0.5 вес.%. После выращивания кристаллов проводилась их монодоменизация, степень которой контролировалась травлением в концентрированной плавиковой кислоте.

Для осуществления амплитудной модуляции использовалась стандартная схема, в которой кристалл помещался между скрещенными поляроидами и через него пропускалось излучение лазера (рис. 1, а). Вблизи торцов кристалла наносились тонкие поясковые электроды, на которые прикладывалось управляющее напряжение. В качестве источника света использовалось излучение гелий-неонового лазера с длиной волны  $\lambda = 0.63$  мкм.

Для экспериментов были изготовлены два образца из кристалла Fe:KNbO<sub>3</sub>. Первый был вырезан по главным кристаллографическим осям, и прикладываемое электрическое поле было направлено вдоль оси  $Oz$  (рис. 1, б), а оптическое излучение направлялось поочередно вдоль всех трех главных осей. Таким образом, можно было измерить комбинации

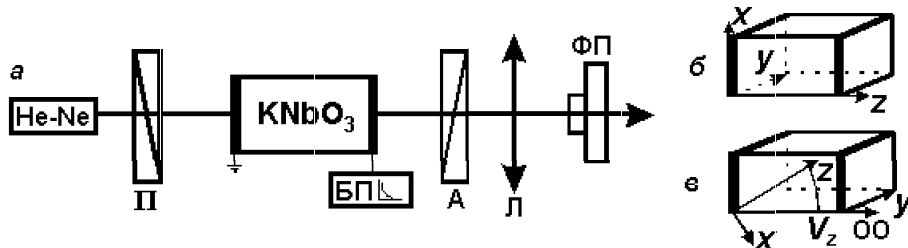


Рис. 1. Схема экспериментов (а); геометрия используемых образцов из Fe:KNbO<sub>3</sub> (б) и (в)

электрооптических коэффициентов  $n_1^3 r_{13} - n_2^3 r_{23}$ ,  $n_2^3 r_{23} - n_3^3 r_{33}$ ,  $n_1^3 r_{13} - n_3^3 r_{33}$  и соответственно найти  $r_{13}$ ,  $r_{23}$  и  $r_{33}$ .

Второй образец был вырезан вдоль оптической оси кристалла, электрическое поле и излучение также были направлены вдоль оптической оси (рис. 1, в). Данная схема электрооптической модуляции имеет свои преимущества, поскольку отсутствует постоянная разность фаз, связанная с двулучепреломлением, и по расчету с использованием табличных данных для чистого KNbO<sub>3</sub> полуволновое напряжение в такой схеме должно быть ниже, чем при распространении света вдоль главных осей. Действительно, при распространении по оптической оси двух волн, поляризация одной из которых лежит в плоскости оптических осей, а вторая ортогональна ей, полуволновое напряжение дается выражением

$$U_{\lambda/2} = (\lambda/n_y) \{ n_x^2 ((n_y^2 - n_z^2)/(n_x^2 - n_z^2)) \times \\ \times ((r_{13} + r_{33} \operatorname{tg}^2 V_z) \cos V_z + 2r_{51} \operatorname{tg} V_z \sin V_z) - \\ - n_y^2 r_{23} \cos V_z \}^{-1},$$

где  $V_z = \arccos\{n_x(n_y^2 - n_z^2)^{1/2}/n_y(n_x^2 - n_z^2)^{1/2}\}$  — угол между оптической осью и осью Oz (для длины волны  $\lambda = 0.633$  мкм  $V_z = 32.27^\circ$ ). Вычисление по этой формуле дает  $U_{\lambda/2} = 650$  В. Экспериментально измерив полуволновое напряжение вдоль оптической оси и зная  $r_{13}$ ,  $r_{23}$  и  $r_{33}$ , можно найти  $r_{51}$ .

Для исследования импульсного режима модуляции на образцы подавались импульсы напряжения длительностью 10 мкс по полувысоте с фронтом 20 нс (рис. 2, а). Частота повторения импульсов 300 Гц, причем при наличии в электрической цепи кристалла импульс напряжения на нем имел вид, представленный на рис. 2, б. Осцилляции, накладывающиеся на напряжение, обусловлены пьезоэлектрическими резонансами в ниобате калия. Их амплитуда во всех схемах составляла около 10% от амплитуды сигнала.

### Результаты измерений

В первой схеме для импульсной модуляции при распространении света вдоль осей Ox, Oy и Oz использовался кристалл Fe:KNbO<sub>3</sub> размерами по осям x, y и z соответственно 5.3 × 5.4 × 5.8 мм. В отсутствие напряжения на кристалле фотопри-

емник находился в темной полосе интерференционной картины. При поперечной модуляции света, проходящего по оси Oy, типичная модуляция интенсивности прошедшего света представлена на рис. 3, а. При этом контраст оказался около 100. Длительность фронта импульса, регистрируемого фотоприемником, составила 240 нс. Спектр мощности модулированного света приведен на рис. 3, б. В спектре наблюдаются три частоты, связанные с акустическими колебаниями, это  $f_1 = (450 \pm 25)$  кГц,  $f_2 = (600 \pm 25)$  кГц,  $f_3 = (800 \pm 25)$  кГц. Максимальные частоты в спектре составляли 3.6 МГц.

При поперечной модуляции света, проходящего по оси Ox, вид модуляции интенсивности и контраст были сравнимы с предыдущим случаем, за исклю-

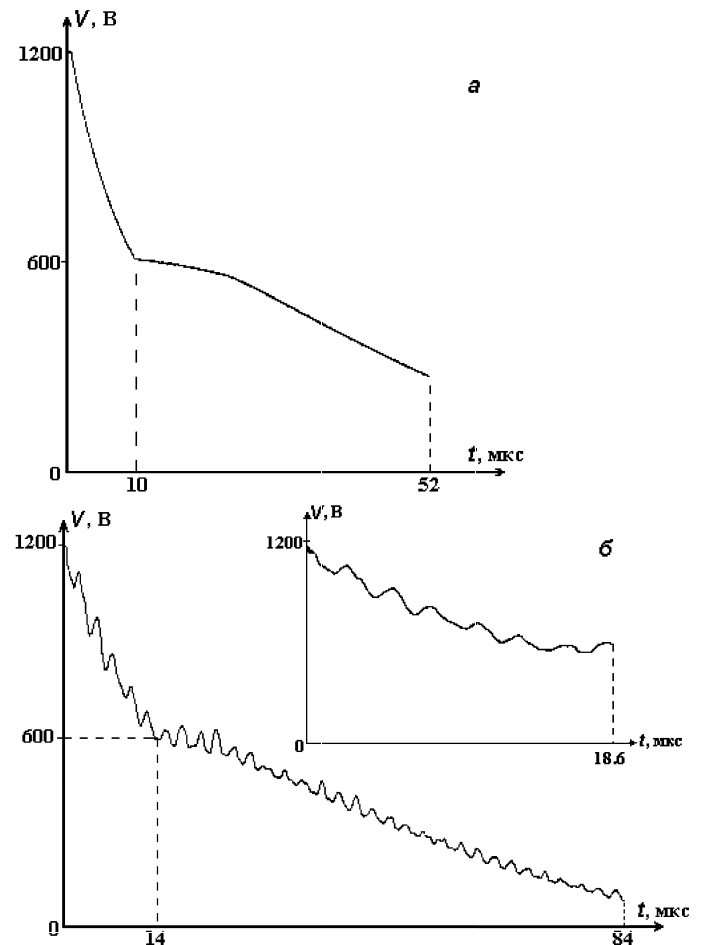


Рис. 2. Осциллограмма импульса напряжения с импульсного блока питания в цепи: а — с бесконечной нагрузкой (открытые концы), б — с кристаллом. Появляющиеся пички — следствие обратного пьезоэлектрического эффекта

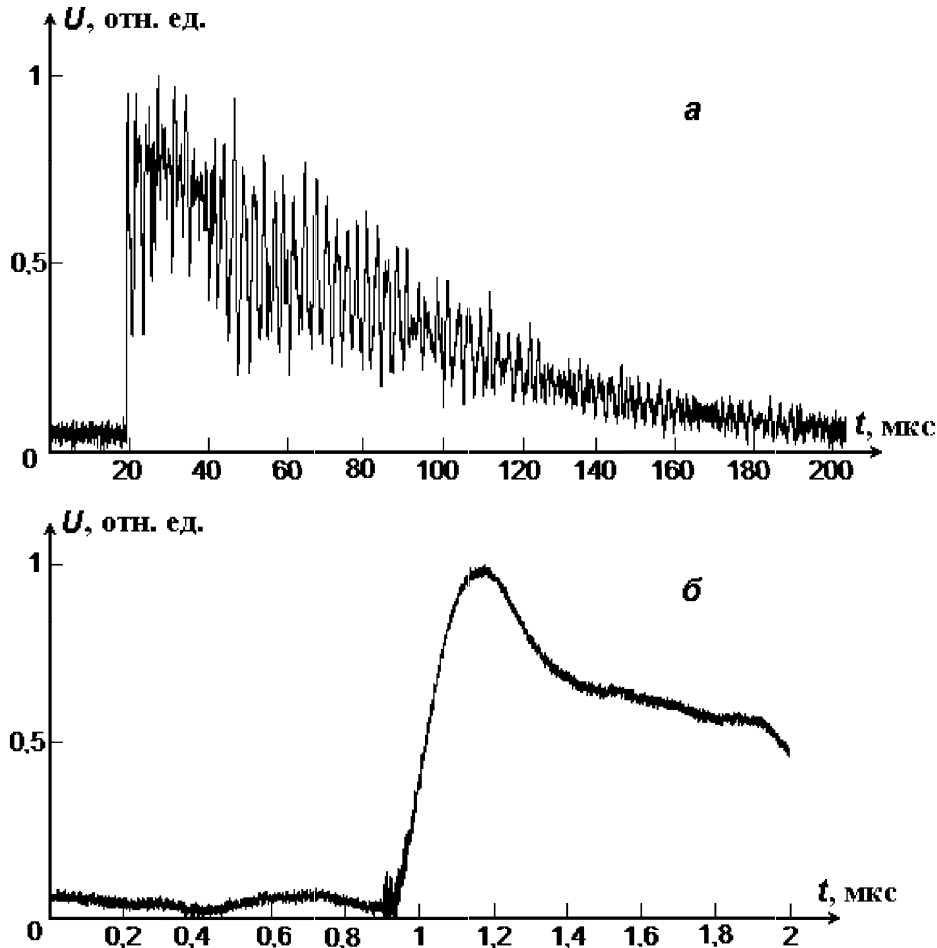


Рис. 3. Типичная осциллограмма напряжения на фотоприемнике для распространения света вдоль оси  $Oy$ , импульсное напряжение к кристаллу приложено по оси  $Oz$  (а); спектр акустических резонансов для этого же направления (б)

чением того, что амплитуда пиков обратного электрооптического эффекта была выше. Длительность фронта импульса была не более 250 нс. В спектре интенсивности модулированного света наблюдались три частоты, связанные с акустическими колебаниями, это  $f_1 = (475 \pm 25)$  кГц,  $f_2 = (575 \pm 25)$  кГц и  $f_3 = (975 \pm 25)$  кГц. Максимальные частоты в спектре составляли 3.0 МГц.

При продольной модуляции света типичная модуляция интенсивности и контраст аналогичны предыдущему случаю. Начальный фронт импульса имел длительность 320 нс. В спектре интенсивности модулированного света наблюдались две частоты, связанные с акустическими колебаниями, это  $f_1 = (480 \pm 10)$  кГц и  $f_2 = (600 \pm 10)$  кГц. Максимальные частоты в спектре составляли 2.0 МГц.

Как следует из наших измерений, при распространении света в плоскости оптических осей наблюдается сильное влияние обратного пьезоэлектрического эффекта. Наиболее интенсивная частота, наблюдающаяся во всех спектрах  $f_1 = (480 \pm 10)$  кГц, соответствует акустической волне, распространяющейся по оси  $Oz$ , вдоль которой прикладывалось электрическое поле. Ее скорость  $v_1 = 2L_z f_1 = (5600 \pm 100)$  м/с, где  $L_z = 5.8$  мм — длина кристалла по оси  $Oz$ .

Вторая частота,  $f_2 = (600 \pm 10)$  кГц, соответствует скорее всего акустической волне, распространяющейся по оси  $Ox$ . Ее скорость  $v_2 = 2L_x f_2 = (6400 \pm 100)$  м/с, где  $L_x = 5.3$  мм.

Измеряя момент начала снижения интенсивности прошедшего света при повышении амплитуды электрического импульса, можно было определить высокочастотные полуволновые напряжения при модуляции света во всех трех направлениях. Они оказались равными  $U_{\lambda/2}^x = (1.5 \pm 0.2)$  кВ при распространении по оси  $Ox$ ,  $U_{\lambda/2}^y = (2.4 \pm 0.2)$  кВ — по оси  $Oy$  и  $U_{\lambda/2}^z = (2.4 \pm 0.2)$  кВ — по оси  $Oz$ . Известно [1], что  $r_{23}$  существенно меньше остальных электрооптических коэффициентов, поэтому можно определить  $n_z^3 r_{33} = (550 \pm 30)$  пм/В и  $n_x^3 r_{13} = (260 \pm 30)$  пм/В. Показатели преломления для длины волны  $\lambda = 0.63$  мкм равняются:  $n_x = 2.3295$ ,  $n_y = 2.2801$  и  $n_z = 2.1686$  [8]. Тогда высокочастотные значения электрооптических коэффициентов  $r_{33} = (53 \pm 3)$  пм/В и  $r_{13} = (21 \pm 3)$  пм/В, что довольно близко к таким же данным для чистого  $\text{KNbO}_3$ . Коэффициент  $r_{23}$  при точности наших экспериментов определить не удалось, можно лишь сказать, что он меньше 3 пм/В.

Также было измерено статическое полуволновое напряжение при распространении света вдоль оси  $Oz$ , которое составило  $1.9 \pm 0.2$  кВ, т.е. статические и высокочастотные полуволновые напряжения и электрооптические коэффициенты отличаются примерно на 20%.

В случае модуляции излучения, распространяющегося вдоль оптической оси, использовался кристалл  $\text{Fe:KNbO}_3$  с размерами 5.2 мм по оси  $Oy$ , 5.4 мм по направлению, перпендикулярному к оси  $Oy$  и к оптической оси, и 8 мм по оптической оси. В отсутствие напряжения на кристалле фотоприемник находился в темной полосе интерференционной картины. Модуляция интенсивности света импульсом напряжения представлена на рис. 4, а. Начальный фронт импульса света на выходе модулятора представлен на рис. 4, б, его длительность составляет 160 нс. В спектре модулированного света наблюдались две основные частоты, связанные с акустическими волнами, это  $f_1 = (337 \pm 5)$  кГц и  $f_2 = (398 \pm 5)$  кГц, которые могут быть сопоставлены с наблюдавшимися в предыдущем образце кристалла. Максимальные частоты в спектре составляли 3.9 МГц.

В данном образце также было измерено статическое полуволновое напряжение вдоль оптической оси, оно составило  $U_{\lambda/2}^{\circ} = (800 \pm 100)$  В, что дает для коэффициента  $r_{51}$  значение  $(88 \pm 11)$  пм/В.

## Обсуждение результатов

Полученные в работе значения электрооптических коэффициентов  $r_{13}$ ,  $r_{33}$  и  $r_{51}$  с учетом найденного 20%-го отличия низко- и высокочастотных величин хорошо согласуются с известными в литературе данными [1]. Таким образом, кристалл  $\text{Fe:KNbO}_3$  показывает те же электрооптические свойства, что и  $\text{KNbO}_3$ . При этом в полях до 2.5 кВ/см не происходило двойникового допированных кристаллов. Измеренные скорости акустических волн также хорошо совпадают с известными величинами для чистого кристалла. Достаточно малое отличие между низко- и высокочастотными электрооптическими коэффициентами говорит о возможности применения  $\text{Fe:KNbO}_3$  в качестве высокочастотного электрооптического модулятора. При этом наиболее эффективно использование как продольной модуляции вдоль оптической оси, так и поперечной при приложении управляющего напряжения вдоль оси  $Oz$  и распространении света вдоль оси  $Oy$ . Колебания, связанные с обратным пьезоэлектрическим эффектом, при этом минимальны. Особенно интересным представляется использование продольного электрооптического эффекта вдоль оптической оси, что позволяет как избавиться от постоянной разности фаз, так и использовать низкое полуволновое напряжение около 800 В. Измеренная для элемента из кристалла  $\text{Fe:KNbO}_3$  длительность фронта модулированного излучения в этом случае (160 нс)

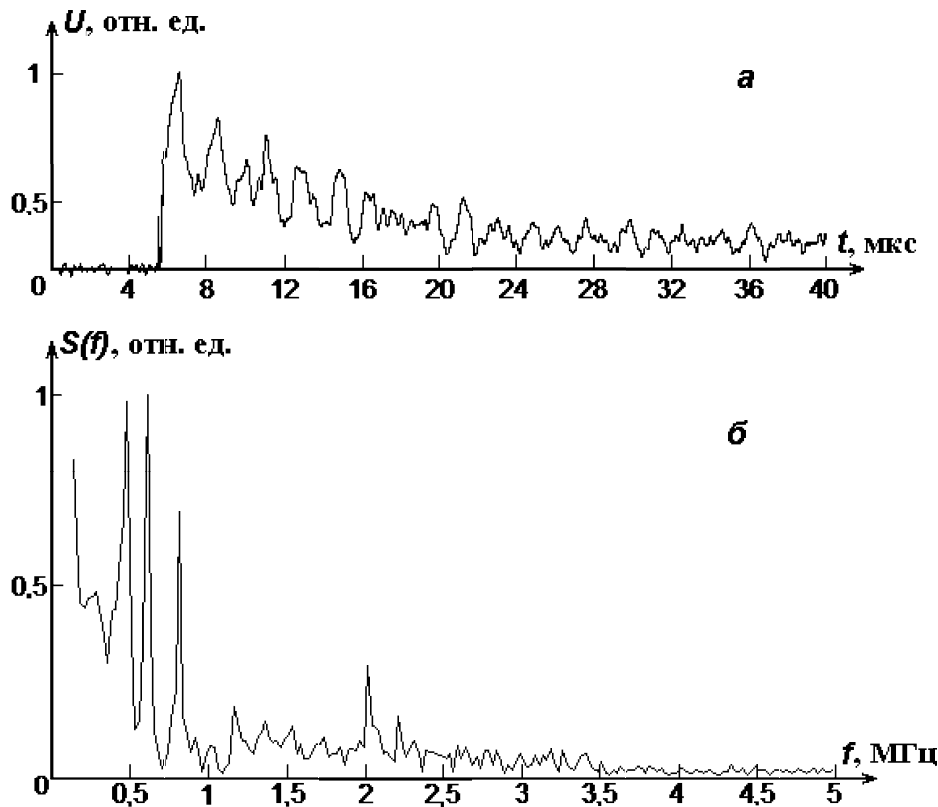


Рис. 4. Осциллограмма прошедшего сигнала при продольном электрооптическом эффекте вдоль оптической оси (а), начало импульса (б)

позволяет проводить модуляцию света с частотой до 6 МГц.

### Заключение

В данной работе показана возможность применения кристалла Fe:KNbO<sub>3</sub> для создания низковольтных электрооптических модуляторов света. Данный кристалл может быть использован в широком диапазоне длин волн 0.5–4 мкм. При этом в продольной схеме (при приложении электрического поля и при распространении света вдоль оптической оси) полуволновое напряжение на длине волны 0.63 мкм составляет всего 800 В. В работе измерены высокочастотные линейные электрооптические коэффициенты  $r_{33} = (53 \pm 3)$  пм/В,  $r_{13} = (21 \pm 3)$  пм/В и  $r_{51} = (88 \pm 11)$  пм/В, найдено, что их отличие от низкочастотных составляет около 20%. Определены скорости распространяющихся в кристалле акустических волн —  $v_1 = (5600 \pm 100)$  м/с по оси  $Oz$  и  $v_2 = (6400 \pm 100)$  м/с по оси  $Ox$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 03-02-16973-а и 03-02-06447мас).

### Литература

1. Ярич А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. М., 1987.
2. Мустель Е.Р., Парыгин В.Н. Методы модуляции и сканирования света. М., 1970.
3. Bierlein J.D., Arweiler C.B. // Appl. Phys. Lett. 1986. **49**, N 15. P. 917.
4. Günter P. // Opt. Commun. 1974. **11**. P. 285.
5. Дьяков В.А., Козлов П.В., Магницкий С.А. и др. // Кристаллография. 1982. **27**, № 2. С. 403.
6. Dyakov V.A., Korolkov S.A., Mamaev A.V. et al. // Opt. Letters. 1991. **16**, N 20. P. 1614.
7. Дьяков В.А., Сырцов В.С. // Сб. трудов второй научной молодежной школы «Оптика-2002». 14–17 окт. 2002. СПб. С. 147.
8. Dmitriev V.G., Gurzadyan G.G., Nikogosyan D.N. Handbook of Nonlinear Optical Crystals, second revised and updated edn. Springer Series in Optical Science. Berlin, 1997. **64**.

Поступила в редакцию  
22.12.03