

УДК 535.5

В. Д. Анцыгин, В. А. Гусев, А. М. Юркин

(Новосибирск)

ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БОРАТОВ БАРИЯ И ЛИТИЯ

Измерены электрооптические коэффициенты кристаллов бета-бората бария и трибората лития. Показано, что дисперсия электрооптических свойств этих кристаллов хорошо описывается моделью ангармонического осциллятора. Обсуждаются возможности применения электрооптического эффекта для модуляции излучения.

Бета-борат бария — β - BaB_2O_4 (ВВО) — и триборат лития — LiB_3O_5 (ЛВО) — являются новыми перспективными нелинейно-оптическими материалами, обеспечивающими нелинейное преобразование излучения в ультрафиолетовую область спектра вплоть до 200 нм. Высокие значения нелинейно-оптических восприимчивостей и большая лучевая прочность кристаллов позволяют широко использовать ВВО и ЛВО для эффективного преобразования излучения твердотельных лазеров во вторую—пятую гармоники и параметрической генерации света в широком спектральном диапазоне. Несмотря на большое количество работ, где описывается применение кристаллов ВВО и ЛВО [1, 2], нелинейно-оптические свойства данных материалов в области низких частот не используются и большинство этих свойств не исследовано.

Учитывая, что высокие нелинейные восприимчивости на оптических частотах у ацентричных кристаллов обычно сопровождаются значительными изменениями оптических свойств под действием приложенного электрического поля, представляет научный и практический интерес исследование электрооптических свойств боратов бария и лития.

Измерения оптических и электрооптических свойств ВВО и ЛВО выполнены на образцах в форме параллелепипедов, ребра которых ориентированы по кристаллографическим осям. Образцы вырезаны из монокристаллических буль, выращенных из высокотемпературных растворов-расплавов.

Спектры поглощения боратов в диапазоне 190—3200 нм регистрировались с помощью спектрофотометра "Shimadzu-3100". Типичные спектры оптической плотности $D(\lambda)$ образцов ВВО и ЛВО приведены на рис. 1. Анализ спектров, полученных для разных участков образцов, показал идентичность оптических свойств по всему объему исследуемых кристаллов. Остаточные световые потери в исследуемых образцах не превышают значений, известных в литературе для лучших монокристаллов боратов. Это означает, что используемые образцы обладают высоким оптическим качеством как объема материала, так и обработки поверхности.

Измерения электрооптических свойств боратов выполнены на образцах с размерами ($x : y : z$): 6,5 : 5 : 4,5 мм (ВВО) и 5,6 : 5,5 : 7,6 мм (ЛВО). При проведении электрооптических измерений для приложения поперечных к направлению распространения света электрических полей использовались прижимные серебряные электроды. При измерении продольного

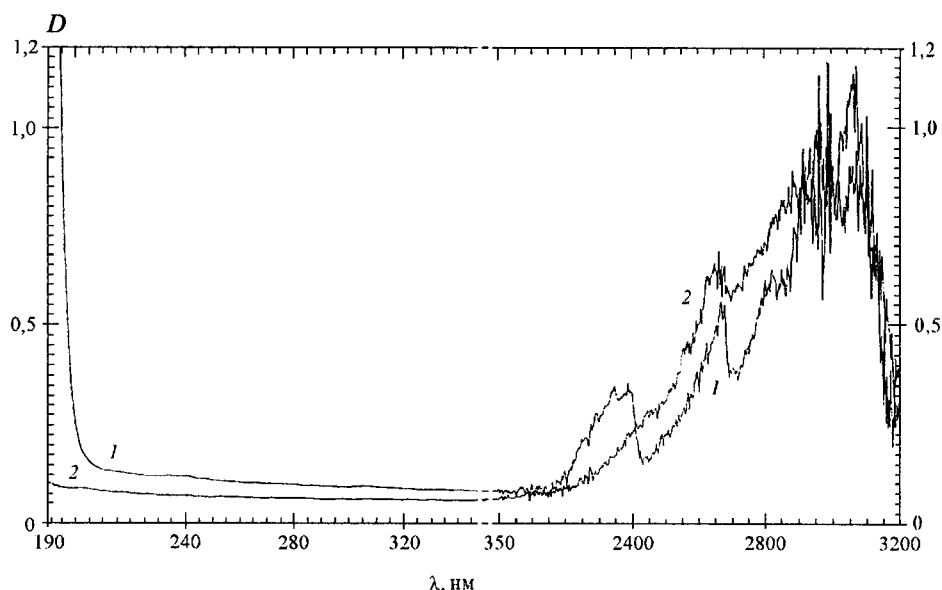


Рис. 1. Спектры оптической плотности монокристаллов бета-бората бария (1) и трибората лития (2)

электрооптического эффекта применялись жидкостные электроды. Для определения электрооптических коэффициентов использовались измерения индуцированного полем двулучепреломления, выполненные на эллипсометре следующим образом. Лазерный пучок линейно поляризованного света проходил через модулятор Фарадея, обеспечивающий периодическое качание плоскости поляризации прошедшего пучка ($\delta\varphi = 0,5^\circ$, $f = 830$ Гц), и падал на образец перпендикулярно его соответствующей поверхности. Свет, прошедший через образец, приобретал разность фаз между ортогональными компонентами поляризации, пропорциональную естественному двулучепреломлению и индуцированному двулучепреломлению $\delta n_{\text{инд}}$, обусловленному приложенным электрическим полем. Эллиптически поляризованный свет с помощью компенсатора преобразовывался в линейно поляризованный свет, который проходил через анализатор и попадал на фотоприемник. В отсутствие приложенного к образцу поля вращением анализатора и компенсатора достигалось полное гашение света, поступающего на фотоприемник, что контролировалось по минимуму переменного сигнала с фотоприемника на частоте модуляции. Отмечались положения углов компенсатора C_0 и анализатора A_0 , при которых осуществлялась компенсация естественного двулучепреломления образца. Приложение к образцу электрического поля создавало $\delta n_{\text{инд}}$, которое компенсировалось при новых положениях компенсатора C_1 и анализатора A_1 . Нетрудно показать, что при определенной начальной ориентации компенсатора и направлениях вращения компенсатора и анализатора [3] изменения фазы между ортогональными составляющими $\delta\Gamma$ имеют вид:

$$\delta\Gamma = 2\pi d \delta n_{\text{инд}} / \lambda = (C_1 - C_0) + (A_1 - A_0), \quad (1)$$

где λ — длина волны; d — толщина образца в направлении распространения света. По значениям C_i и A_i при разных напряженностях электрического поля и разных ориентациях образца определялись все соответствующие компоненты электрооптического тензора r_{ij} .

Бета-борат бария при температурах ниже 920 °С принадлежит к тригональному классу с пространственной симметрией решетки $R3c$ и точечной группой $3m$. В этой области температур ВВО — отрицательный одноосный кристалл с большим двулучепреломлением ($\Delta n = n_o - n_e > 0,1$ в видимой области длин волн, где n_o — обыкновенный, а n_e — необыкновенный показатели преломления). Оптическая ось C в кристаллах ВВО проходит параллельно кристаллографической оси Z .

Так как ВВО относится к точечному классу $3m$, то из 18 компонент электрооптического тензора есть четыре независимые компоненты, для которых выполняются следующие соотношения [4]:

$$r_{22} = -r_{12} = -r_{61}; \quad r_{51} = r_{42}; \quad r_{13} = r_{23}; \quad r_{33}, \quad (2)$$

а уравнение оптической индикатрисы для этого класса кристаллов при произвольном направлении электрического поля имеет вид [5]:

$$(a_{10} - r_{22}E_y + r_{13}E_z)x^2 + (a_{10} + r_{22}E_y + r_{13}E_z)y^2 + (a_{30} + r_{33}E_z)z^2 + 2r_{42}E_y yz + 2r_{42}E_x xz - 2r_{42}E_x xy = 1, \quad (3)$$

где $a_{10} = 1/n_o^2$, $a_{30} = 1/n_e^2$, E_i — i -я компонента напряженности электрического поля.

В табл. 1 приведены выражения для индуцированного двулучепреломления в ВВО для разных компонент электрического поля и направлений светового луча, полученные на основе соотношений (2) и (3). Для определения значений электрооптических коэффициентов использовались эллипсометрические измерения в условиях, обозначенных знаком «*» в табл. 1.

Полученные значения электрооптических коэффициентов ВВО на длине волны $\lambda = 633$ нм составляют:

$$|r_{22}| = (2,54 \pm 0,01)10^{-12} \text{ м/В}; \quad |r_{42}| < 2 \cdot 10^{-14} \text{ м/В}; \\ |r_z| = (5,1 \pm 0,3)10^{-14} \text{ м/В}. \quad (4)$$

Аналогично для кристаллов LBO, имеющих при комнатной температуре симметрию точечного класса $mm2$, из 18 компонент тензора линейного элект-

Т а б л и ц а 1

Зависимость индуцированного двулучепреломления в бета-борате бария от направления электрического поля и распространения света

Направление распространения света	Направление электрического поля, E	Индукцированное двулучепреломление, Δn	Определяемый коэффициент, r_{ij}
x	x	0	—
y	x	$(n_o^3 + n_e^3)r_{42}E/2$	r_{42}
z	x	$n_o^3 r_{42}E$	r_{42}^*
x	y	$n_o^3 r_{22}E/2 + (n_o^3 + n_e^3)r_{42}E/2$	—
y	y	$n_o^3 r_{22}E/2$	r_{22}
z	y	$n_o^3 r_{22}E$	r_{22}^*
x	z	$(n_o^3 r_{13} - n_e^3 r_{33})E/2$	$r_z = r_{13} - r_{33}(n_e/n_o)^3$ *
y	z	$(n_o^3 r_{13} - n_e^3 r_{33})E/2$	$r_z = r_{13} - r_{33}(n_e/n_o)^3$
z	z	0	—

Зависимость индуцированного двулучепреломления в триборате лития от направления электрического поля и распространения света

Направление распространения света	Направление электрического поля, E	Индуцированное двулучепреломление, δn	Определяемый коэффициент, r_{ij}
x	x	$n_z^3 r_{31} E / 2$	$r_{31} *$
y	x	$(n_z^3 r_{31} - n_x^3 r_{51}) E / 2$	$r_{51} *$
z	x	0	—
z	z	$n_z r_{33} E / 2$	—
		0	—

рооптического эффекта есть пять независимых компонент: r_{51} , r_{42} , r_{31} , r_{32} , r_{33} [4], а уравнение оптической индикатрисы приобретает вид:

$$a_{10}x^2 + a_{20}y^2 + (a_{30} + r_{31}E_x + r_{32}E_y + r_{33}E_z)z^2 + 2r_{42}E_y yz + 2r_{51}E_x xz = 1. \quad (5)$$

В табл. 2 приведены выражения для индуцированного в LBO двулучепреломления для разных направлений электрического поля и световых лучей, полученные с использованием выражения (5).

Значения электрооптических коэффициентов LBO на длине волны 633 нм составляют:

$$\begin{aligned} |r_{32}| &= (8,4 \pm 0,2)10^{-13} \text{ м/В}; & |r_{31}| &= (6,2 \pm 0,2)10^{-13} \text{ м/В}; \\ |r_{33}| &= (1,2 \pm 0,3)10^{-14} \text{ м/В}; & |r_{51}| &= (2,8 \pm 0,3)10^{-14} \text{ м/В}; \quad (6) \\ |r_{42}| &< 1 \cdot 10^{-14} \text{ м/В}. \end{aligned}$$

На рис. 2, 3 приведены значения наибольших электрооптических коэффициентов для ВВО (r_{22}) и LBO (r_{32}) на различных длинах волн лазерного излу-

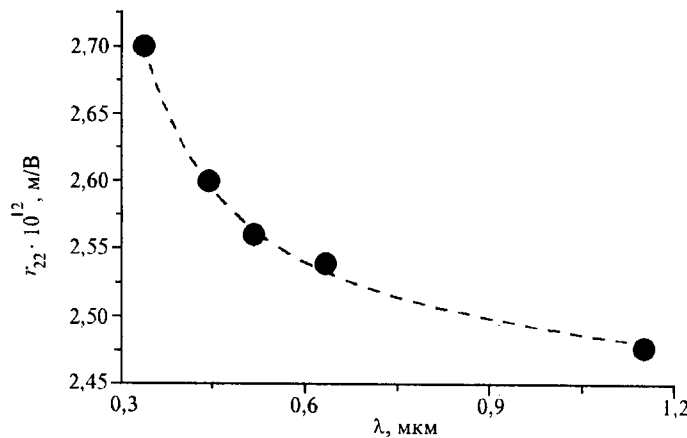


Рис. 2. Дисперсия электрооптического коэффициента r_{22} в монокристалле бета-бората бария

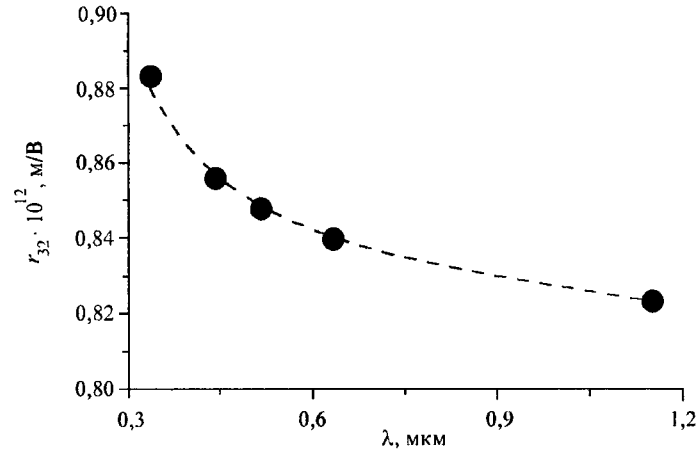


Рис. 3. Дисперсия электрооптического коэффициента r_{32} в монокристалле трибората лития

чения. На рисунках штриховыми линиями изображены подгоночные кривые, аппроксимирующие дисперсионную зависимость электрооптических коэффициентов по формуле

$$r_{ij} = A_i [n_i^2(\lambda) - 1]^2 / n_i^4(\lambda). \quad (7)$$

При построении этих зависимостей использовались формулы Зельмейера для дисперсии показателя преломления ВВО [6]

$$n_0^2 = 2,7405 + 0,0184/(\lambda^2 - \lambda_0^2) - 0,0155\lambda^2 \quad (8)$$

и трибората лития [2]

$$n_z^2 = 2,5865 + 0,0131/(\lambda^2 - \lambda_z^2) - 0,01861\lambda^2, \quad (9)$$

где λ — в микрометрах, $\lambda_0 = 0,1338$ и $\lambda_z = 0,1106$ мкм.

Хорошее качество аппроксимации экспериментальных зависимостей электрооптических коэффициентов от длины волны с помощью выражений (7)—(9) показывает, что нелинейно-оптические восприимчивости, и в частности электрооптические свойства боратов бария и лития, хорошо описываются моделью ангармонического осциллятора [7], так как только для этой модели дисперсия электрооптических коэффициентов выражается соотношением типа (7).

Невысокие значения электрооптических коэффициентов боратов бария и лития означают, что эффективная электрооптическая модуляция света может быть осуществлена только с помощью элементов из бета-бората бария при использовании двойного поперечного эффекта Погкельса. В этой геометрии электрическое поле прикладывается вдоль оси Y , свет распространяется вдоль оси Z с поляризацией под углом 45° к осям X , Y и используется наибольший электрооптический коэффициент r_{22} . При этом, например, для получения 100 %-ной модуляции света на $\lambda = 1,064$ мкм с помощью пластинки ВВО, у которой $d_z = 1,5$ см и $d_y = 0,3$ см, необходимо приложить электрическое напряжение около 4,7 кВ. Полученные результаты показывают, что элементы из ВВО можно использовать для электрооптической модуляции мощного лазерного излучения в инфракрасной, видимой и ультрафиолетовой областях спектра.

Авторы благодарны А. Е. Коху и Н. А. Пыльневой за предоставленные для исследования образцы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bordui P. F., Fejer M. M. Inorganic crystals for nonlinear optical frequency conversion // Annu. Rev. Mater. Sci. 1993. 23. P. 321.
2. Nicogosayn D. N. Lithium Triborate (LBO). A review of its properties and applications // J. Appl. Phys. A. 1994. 58. P. 181.
3. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир. 1981.
4. Сиротин Ю. И., Шаскольская М. П. Основы кристаллофизики. М.: Наука, 1979.
5. Мустель Е. Р., Парыгин В. Н. Методы модуляции и сканирования света. М.: Наука, 1970.
6. Eimerl D., Davis L., Graham E. K., Zalkin A. Optical, mechanical, and thermal properties of barium borate // J. Appl. Phys. 1987. 62, N 5. P. 1968.
7. Лайнс М., Гласс А. Сегнетоэлектрики и родственные соединения. М.: Мир, 1981.

Поступила в редакцию 6 марта 1996 г.

Реклама продукции в нашем журнале — залог Вашего успеха!