УДК 535.2

ДИСПЕРСИЯ И ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЧИСТЫХ И ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ Yb^{3+} КРИСТАЛЛОВ $YAl_3(BO_3)_4$ В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА

© 2007 г. **В. В. Филиппов**[*]; **И. Т. Боднарь**[**]; **Н. В. Кулешов**[***], доктор физ.-мат. наук; **Н. И. Леонюк**[****], доктор хим. наук; **В. В. Мальцев**[****], канд. геол.-минер. наук; **О. В. Пилипенко**[****]

[*] Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь

E-mail: filippov@dragon.bas-net.by

[**] Институт физики твердого тела и полупроводников НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь

[***] НИИ оптических материалов и технологий БНТУ, г. Минск, Беларусь

[****] Геологический факультет МГУ, Москва

Измерена дисперсия показателей преломления номинально чистого и легированного 7 ат.% Yb^{3+} кристаллов ортобората иттрия в видимом диапазоне спектра. Введение 7 ат.% Yb^{3+} приводит к заметному (в третьем знаке после запятой) увеличению показателей преломления кристалла и увеличению его анизотропии. В диапазоне 293–633 K измерены температурные зависимости главных показателей преломления и найдены температурные коэффициенты первого и второго порядков. С ростом температуры значение показателя преломления необыкновенного луча растет в 1,5–3 раза (в зависимости от длины волны) быстрее, чем значение показателя преломления обыкновенного луча.

Коды OCIS: 160.0160.

Поступила в редакцию 29.01.2007.

Одноосные нецентросимметричные кристаллы ортобората иттрия $YAl_3(BO_3)_4$ (YAB) являются перспективным нелинейным материалом для лазерной физики. Привлекательные качества YAB как матричного лазерного кристалла обусловлены его довольно высокими значениями нелинейных оптических коэффициентов, химической стабильностью и хорошей теплопроводностью [1]. Сообщалось о легировании кристаллов YAB ионами Yb, Ho, Er, Nd, Tm, а также о кодопировании ионами Yb и Nd [2–7]. Кристаллы YAB могут быть также легированы ионами переходных металлов и другими легирующими элементами (Cr, Ga), что дает возможность целенаправленного изменения их оптических свойств. Легированные ионами Nd^{3+}, они используются в качестве эффективной активной среды с ламповой накачкой с самоудвоением частоты генерации. При диодной накачке наблюдалась эффективная перестраиваемая лазерная генерация на переходах ионов Yb^{3+} (в области $\lambda = 1$ мкм) и Tm^{3+} ($\lambda \approx 1{,}9$ мкм) [5, 7]. Среди всех Yb^{3+}-содержащих кристаллов YAB является одним из наиболее эффективных [7].

Несмотря на широкие возможности использования кристаллов YAB в лазерной физике, оптические свойства их исследованы недостаточно. В работе приводятся результаты измерений дисперсии и температурной зависимости показателей преломления чистого и легированного ионами Yb кристалла YAB в видимом диапазоне спектра.

Кристаллы YAB имеют структуру хантита, пространственная группа R32, с размерами элементарной ячейки $a = b = 9{,}288$ Å, $c = 7{,}226$ Å. Исследовались номинально чистые и легированные ионами Yb^{3+} образцы кристаллов, выращенные из раствора в расплаве [1, 5]. В решетке кристалла YAB ионы Y^{3+} занимают тригональные призматические пози-

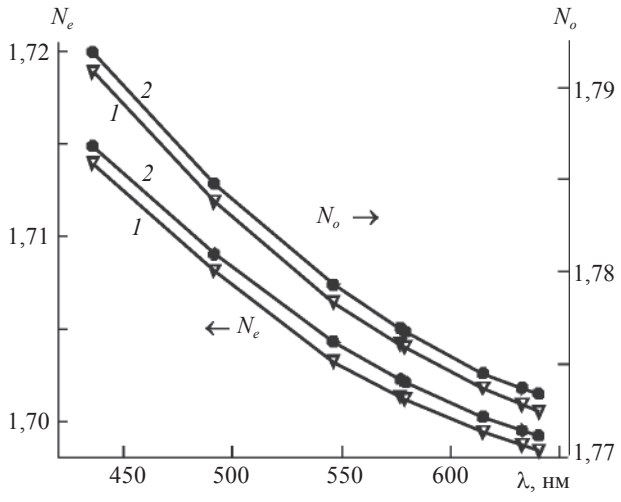


Рис. 1. Зависимости дисперсии показателей преломления обыкновенной N_o и необыкновенной N_e волн номинально чистого (*1*) и легированного ионами Yb^{3+} (*2*) кристалла YAB.

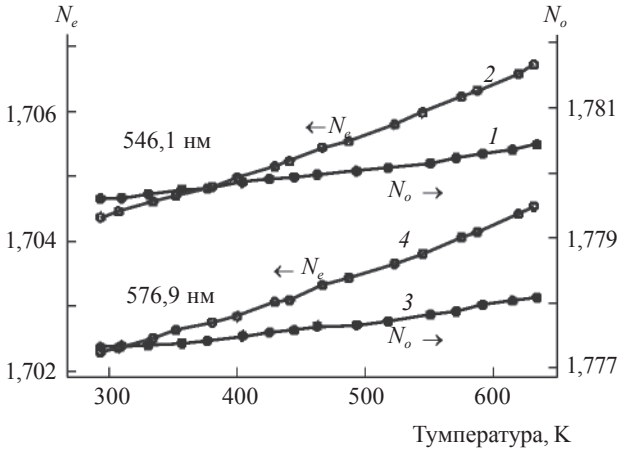


Рис. 2. Температурная зависимость показателей преломления N_o и N_e номинально чистого кристалла YAB. *1*, *2* – λ = 546,1; *3*, *4* – 576,9 нм.

ции, ионы Al^{3+} находятся в октаэдрическом окружении, а ионы B^{3+} упорядочены слоями в треугольниках $(BO_3)^{3-}$.

Показатели преломления кристаллов определялись методом угла наименьшего отклонения. Из кристаллов YAB и Yb (7 ат.%):YAB были вырезаны прямые призмы. Двухгранный угол между входной и выходной гранями составлял 30°, оптическая ось кристаллов была параллельна биссектрисе этого угла. Точность измерений установки составляла $\pm 2\times10^{-4}$. Однако из-за неоднородности кристаллов она была хуже, но не ниже $\pm 3\times10^{-4}$. На рис. 1 приведены зависимости дисперсии показателей преломления обыкновенной N_o и необыкновенной N_e волн, полученные по измерениям для восьми длин волн в диапазоне λ = 435,8–640,4 нм.

Как видно из рис. 1, кристаллы YAB имеют в видимом диапазоне спектра заметное двулучепреломление (0,077–0,074). Обращает на себя внимание значительное отличие показателей преломления чистого и легированного кристаллов. Легирование 7 ат.% Yb^{3+} приводит к увеличению показателей преломления N_o и N_e примерно на 0,002 и 0,001 соответственно. Таким образом, при легировании растет и двулучепреломление кристалла. Полученное увеличение показателей преломления легированных кристаллов коррелирует с результатами работы [8], в которой приведены данные сравнительногго анализа некоторых свойств легированных Yb^{3+} и чистого кристаллов YAB. В частности, было установлено, что введение ионов Yb влияет на параметры решетки кристалла – они уменьшаются с ростом концентрации Yb^{3+}. Следовательно, можно ожидать увеличения плотности кристалла, а значит, и увеличения его показателей преломления, что и было продемонстрировано. Температурная зависимость обоих показателей преломления измерена в интервале 293–653 K. На рис. 2 она приведена для номинально чистого кристалла YAB. Из рисунка видно, что показатель преломления обыкновенной волны растет с ростом температуры значительно медленнее по сравнению с N_e. Аппроксимируя экспериментальные зависимости полиномом второй степени, т. е. полагая

$$N_i = N_i^0 + \frac{dN_i}{dT}\left(T - T_0\right) + \frac{1}{2}\frac{d^2N_i}{dT^2}\left(T - T_0\right)^2,$$

где $T_0 = 297$ K, находим значения показателей преломления чистого кристалла при комнатной температуре и термооптические коэффициенты первого dN_i/dT и второго $0{,}5(d^2N_i/dT^2)$ порядков. Они приведены в таблице для четырех длин волн видимого диапазона спектра. Очевидно, что значение показателя преломления необыкновенного луча растет с ростом температуры в 1,5–3 раза (в зависимости от длины волны) быстрее, чем значение показателя преломления обыкновенного луча. Такая же ситуация имеет место и для широко используемого в лазерной физике кристалла ванадата иттрия, однако для него термооптические коэффициенты в два раза выше, чем приведенные в табл. 1 для кристалла YAB [9].

Найденные таким же образом термооптические коэффициенты легированного кристалла приведены в табл. 2. Из нее следует, что легирование приводит не только к росту значений показателей пре-

Таблица 1. Значения показателей преломления и термооптических коэффициентов первого и второго порядков кристалла $YAl_3(BO_3)_4$ для четырех длин волн видимого диапазона спектра

λ, нм	N_o			N_e		
	$N_o(0)$	$\frac{dN_o}{dT}$ $(10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1})$	$\frac{1}{2}\frac{d^2N_o}{dT^2}$ $(10^{-9}\ \mathrm{K}^{-2})$	$N_e(0)$	$\frac{dN_e}{dT}$ $(10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1})$	$\frac{1}{2}\frac{d^2N_e}{dT^2}$ $(10^{-9}\ \mathrm{K}^{-2})$
435,8	1,7909	1,85	2,48	1,7139	5,02	8,12
546,1	1,7784	1,57	2,17	1,7032	4,88	5,78
576,9	1,7761	1,45	2,55	1,7012	4,76	5,44
632,8	1,7729	1,34	2,92	1,6987	4,72	5,57

Таблица 2. Значения показателей преломления и термооптических коэффициентов первого и второго порядков кристалла 7 ат.% Yb^{3+}–$YAl_3(BO_3)_4$ для четырех длин волн видимого диапазона спектра

λ, нм	N_o			N_e		
	$N_o(0)$	$\frac{dN_o}{dT}$ (10^{-6} K^{-1})	$\frac{1}{2}\frac{d^2N_o}{dT^2}$ (10^{-9} K^{-2})	$N_e(0)$	$\frac{dN_e}{dT}$ (10^{-6} K^{-1})	$\frac{1}{2}\frac{d^2N_e}{dT^2}$ (10^{-9} K^{-2})
435,8	1,7920	2,42	2,79	1,7148	6,08	6,36
546,1	1,7795	2,10	2,13	1,7043	5,32	6,11
576,9	1,7771	1,85	2,17	1,7021	5,23	6,10
632,8	1,7738	1,60	2,86	1,6995	5,14	5,35

ломления и двулучепреломления кристалла, но и к увеличению термооптических коэффициентов, которое, однако, незначительно.

Изменение показателей преломления кристалла с температурой приводит к искажению профиля генерируемого пучка, что наблюдалось в работе [10] для излучения второй гармоники кристалла YAB, легированного 4 ат.% Nd^{3+}. При этом из-за температурного рассогласования условий фазового синхронизма падала и интенсивность излучения второй гармоники.

Таким образом, в работе измерены дисперсия и термооптические коэффициенты показателей преломления номинально чистого и легированного 7 ат.% Yb^{3+} кристаллов ортобората иттрия в видимом диапазоне спектра. Показано, что введение 7 ат.% Yb^{3+} приводит к заметному (в третьем знаке после запятой) увеличению показателей преломления кристалла, увеличению его анизотропии и термооптических коэффициентов.

Исследования белорусских авторов проводились в рамках гранта Ф05БР-003, работа российских авторов была поддержана грантами РФФИ №№ 04-05-64709, 05-05-08021 и грантом Президента РФ для молодых кандидатов наук № МК-2794.2005.5.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Leonyuk N.I.* Recent Developments in the Growth of $RM_3(BO_3)_4$ Crystals for Science and Modern Applications // Progr. in Crystal Growth and Charact. of Materials. 1995. V. 31. № 3/4. P. 279–285.
2. *Brenier A*. Modelling of the NYAB self-doubling laser with focused Gaussian beams // Optics Commun. 1997. V. 141. P. 221–228.
3. *Jaque D., Capmany J., J. Qarcia S.* Red, green, and blue laser light from a single $Nd:YAl_3(BO)_4$ crystal based on laser oscillation at 1,3 μm // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 75. № 3. P. 325–328.
4. *Bartschke J., Knappe R, Roller K.J., Wallenstein R*. Investigation of efficient self-frequency-doubling Nd:YAB lasers // IEEE J. Quantum. Electron. V. 1997. V. 33. № 12. P. 2995–2300.
5. *Jaque D., Ramirez M.O., Bausá L., Speghini A., Betinelli M., Cavalli E.* Influence of Nd^{3+} and Yb^{3+} concentration on the energy-transfer efficiency in the $YAl_3(BO_3)_4$ nonlinear crystal: determination of optimum concentrations for laser applications // JOSA. 2004. V. B21. P. 1203–1209.
6. *Bovero E., Cavalli E., Jaque D.* Cr^{3+}–Nd^{3+} energy transfer in the $YAl_3(BO_3)_4$ nonlinear laser crystal // Appl. Phys. 2005. V. 98. № 2. P. 023103.
7. *Dekker P., Dawes J.M., Piper J.A*. 1.1 W CW self-frequency-doubled diode-pumped $Yb:YAl_3(BO_3)_4$ laser // Opt. Commun. 2001. V. 195. P. 431–436.
8. *Li J., Wang J.Y., Cheng X.F., Hu X.B., Wang X.O*. The influence of Yb^{3+} concentration on Yb: $YAl_3(BO_3)_4$ // Cryst. Res. Technol. 2003. V. 38. № 10. P. 890–895.
9. *Weber M.J.* Handbook of optical materials / Publication Boca Raton e. a.: CRC Press, 2003.
10. *Omatsu T., Kato Y., Shimosegava M., Hasegawa A., Ogura I.* Thermal effects in laser diode pumped self-frequency-doubled $Nd_xY_{1-x}Al_3(BO_3)_4$ (NYAB) microchip laser // Optics Commun. 1995. V. 118. № 3. 4. P. 302–308.