

УДК 535.327, 535.012

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ МОНОКЛИННЫХ КРИСТАЛЛОВ $KYb_xY_{1-x}(WO_4)_2$ Юмашев К. В.¹, Гурецкий С. А.², Карпинский Д. В.², Труханова Е. Л.², Герцова А. В.¹¹Белорусский национальный технический университет²ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Получены зависимости температурных коэффициентов показателей преломления для поляризаций света вдоль осей N_p , N_m и N_g оптической индикатрисы от коэффициента стехиометрии x моноклинных кристаллов $KYb_xY_{1-x}(WO_4)_2$.

Ключевые слова: моноклинные кристаллы, температурные коэффициенты показателей преломления, метода отклонения лазерного пучка.

THERMO-OPTIC COEFFICIENTS OF MONOCLINIC $KYb_xY_{1-x}(WO_4)_2$ Yumashev K.¹, Guretskii S.², Karpinsky D.², Trukhanova E.², Hertsova A.¹¹Belarusian National Technical University²SSPA “Scientific Practical Materials Research Center of NAS of Belarus”

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The dependences of the thermo-optic coefficients for light polarizations along the N_p , N_m , and N_g axes of the optical indicatrix on the stoichiometry coefficient x of monoclinic $KYb_xY_{1-x}(WO_4)_2$ crystals were obtained.

Key words: monoclinic crystals, thermo-optic coefficients, laser beam deviation technique.

Адрес для переписки: Юмашев К. В., пр. Независимости, 65/17, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: kyumashev@bntu.by

В настоящей работе исследованы температурные коэффициенты показателя преломления dn/dT моноклинных кристаллов калий-иттриевых вольфраматов, активированных ионами иттербия $KYb_xY_{1-x}(WO_4)_2$. Данные кристаллы являются высокоэффективными лазерными активными средами, генерирующими в спектральной области 1 мкм. Радиусы ионов иттрия Y^{3+} и иттербия Yb^{3+} близки (1,019 Å и 0,985 Å соответственно), что дает возможность непрерывного легирования кристалла $KY(WO_4)_2$ (коэффициент стехиометрии $x = 0$) ионами Yb^{3+} , в конечном итоге получая кристалл $KYb(WO_4)_2$ ($x = 1,0$).

Кристаллы $KYb_xY_{1-x}(WO_4)_2$ выращивались модифицированным методом Чохральского, детально описанным в [1]. Температурные коэффициенты dn/dT определялись с помощью метода отклонения лазерного пучка в среде с линейным градиентом температуры. Этот метод основан на измерении угла отклонения θ лазерного луча, прошедшего через образец в форме прямоугольного параллелепипеда, в котором создан линейный градиент температуры. По полученным значениям угла θ находится термический коэффициент оптического пути W . Величина W в данном эксперименте определяется формулой $W = dn/dT + \alpha(n - 1)$, где α – температурный коэффициент линейного расширения материала в направлении распространения света, а n – его показатель преломления для соответствующей длины волны света λ и поляризации E лазерного пучка. Поэтому в итоге температурный коэффициент dn/dT определяется по формуле $dn/dT = W - \alpha(n - 1)$, в

которой используются известные данные по коэффициенту α и показателю n . Погрешности в измерении W и dn/dT составили $\sim 0,5 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ и $\sim 0,6 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ соответственно. Детальное описание данного метода и процедуры измерения можно найти в [2, 3].

Моноклинные кристаллы $KYb_xY_{1-x}(WO_4)_2$ относятся к пространственной группе симметрии $C2/c$ и являются двуосными средами. В соответствии с этим оптические свойства этих кристаллов описываются оптической индикатрисой с тремя ортогональными главными осями N_p , N_m и N_g . При этом между главными показателями преломления n_p , n_m и n_g (для поляризаций света $E//N_p$, $E//N_m$ и $E//N_g$ соответственно) выполняется условие $n_p < n_m < n_g$. Ось N_p параллельна кристаллографической оси b , а оси N_m и N_g лежат в плоскости кристаллографических осей a и c . Поэтому для измерений коэффициентов dn_i/dT ($i = p, m, g$) были приготовлены по три образца для каждого стехиометрического состава $x = 0, 0,05, 0,1, 0,2, 0,5$ и $1,0$. Образцы имели форму прямоугольных параллелепипедов с размерами $5,6 \times 7,0 \times 8,6$ мм³ ($x = 0$), $8,0 \times 7,0 \times 8,5$ мм³ ($x = 0,05$), $8,0 \times 7,0 \times 8,6$ мм³ ($x = 0,1$), $8,0 \times 7,0 \times 8,5$ мм³ ($x = 0,2$), $8,0 \times 7,0 \times 9,1$ мм³ ($x = 0,5$) и $8,1 \times 7,0 \times 9,1$ мм³ ($x = 1,0$), ориентированными вдоль осей N_p , N_m и N_g соответственно [рис. 2 (б)]. Ориентация образцов достигалась путем идентификации оси b кристалла с помощью рентгеновского просвечивания образцов в геометрии обратного рассеяния Лауэ с точностью $0,2^\circ$. Далее приготавливались образцы с гранями, перпендикулярными направлению $b//N_p$, и определялось

направление осей N_m и N_g путем выявления направлений гашения света (с точностью $0,5^\circ$) при просмотре образцов, помещенных между скрещенными поляризаторами, вдоль оси b . Содержание иттербия в выращенных кристаллах измеряли методом рентгеновской флуоресценции с использованием эталонных образцов. Относительный разброс концентрации иттербия в объеме исследуемых кристаллов в зависимости от уровня легирования составлял $0,3-0,7\%$. Измерения проводились на длине волны $1,06$ мкм.

В таблице 1 приведены значения термического коэффициента оптического пути W измеренные для различных направлений распространения k и поляризации E света. Значения W характеризуются сильной анизотропией, отличаясь как по абсолютной величине, так и по знаку для различных сочетаний направлений k и E . При этом для фиксированных направлений k и E термический коэффициент оптического пути возрастает с увеличением коэффициента стехиометрии x кристалла.

Таблица 1 – Термические коэффициенты оптического пути ($10^{-6} K^{-1}$) для кристаллов $KYb_xY_{1-x}(WO_4)_2$, измеренные на длине волны $1,06$ мкм при различных направлениях распространения k и поляризации E света

Коэффициент стехиометрии, x	$k // N_p$		$k // N_m$		$k // N_g$	
	$E // N_m$	$E // N_g$	$E // N_p$	$E // N_g$	$E // N_p$	$E // N_m$
0	-6,2	-10,2	-4,8	-1,2	0,58	6,2
0,05	-6,0	-10,1	-4,6	-1,0	0,64	6,5
0,1	-5,3	-9,9	-4,1	-0,97	0,69	6,9
0,2	-5,2	-9,7	-3,6	-0,43	1,1	7,5
0,5	-4,1	-8,9	-3,4	0,48	1,3	8,0
1,0	-2,0	-7,5	-1,8	2,7	2,4	9,7

Таблица 2 – Температурные коэффициенты показателей преломления dn/dT ($10^{-6} K^{-1}$) для кристаллов $KYb_xY_{1-x}(WO_4)_2$, измеренные на длине волны $1,06$ мкм при различных направлениях распространения k и поляризации E света, x – коэффициент стехиометрии

x	dn/dT ($10^{-6} K^{-1}$)						значения, усредненные по направлению k		
	$E // N_p$		$E // N_m$		$E // N_g$		$E // N_p$	$E // N_m$	$E // N_g$
	$k // N_m$	$k // N_g$	$k // N_p$	$k // N_g$	$k // N_p$	$k // N_m$			
0	-16,0	-15,4	-9,6	-10,4	-13,8	-13,4	-15,7	-10,0	-13,6
0,05	-15,9	-15,3	-9,45	-10,1	-13,7	-13,3	-15,6	-9,8	-13,5
0,1	-15,4	-15,2	-8,8	-9,6	-13,5	-13,3	-15,3	-9,2	-13,4
0,2	-14,9	-14,7	-8,7	-8,9	-13,3	-12,9	-14,8	-8,8	-13,1
0,5	-14,8	-14,2	-7,6	-8,2	-12,6	-12,4	-14,5	-7,9	-12,5
1,0	-13,3	-12,7	-5,6	-6,0	-11,3	-10,9	-13,0	-5,8	-11,1

На рисунок 1 показана зависимость термических коэффициентов оптического пути от коэффициента стехиометрии x для различных направлений распространения k и поляризации E света. Зависимость W от x достаточно хорошо описывается линейной зависимостью для каждой пары направлений k и E .

Температурные коэффициенты показателей преломления для поляризаций света $E // N_p$, $E // N_m$ и $E // N_g$ определялись по формуле

$$\frac{dn_i}{dT} = W_{ij} - \alpha_j(n_i - 1),$$

где ($i \neq j$), индекс $i = p, m, g$ соответствует поляризации света, а индекс $j = p, m, g$ – направлению распространения света k . При этом использовались полученные ранее для кристаллов $KYb_xY_{1-x}(WO_4)_2$ значения температурных коэффициентов линейного расширения по наклону линейной зависимости, описывающей теплового расширения материала:

$$\alpha_p = (3.42 + 0.08x) 10^{-6} K^{-1},$$

$$\alpha_m = (11.60 + 1.00x) 10^{-6} K^{-1},$$

$$\alpha_g = (16.49 - 1.30x) 10^{-6} K^{-1} [1].$$

Значения показателей преломления для различных коэффициентов стехиометрии x находились по формуле $n = xn_{KYbW} + (1-x)n_{KYW}$ [4], в которой n_{KYbW} и n_{KYW} – показатели преломления соответственно для кристаллов $KYbW$ ($x = 1.0$) и KYW ($x = 0$): на длине волны $1,06$ мкм $n_p = 1,9925$, $n_m = 2,0357$, $n_g = 2,0773$ (для $KYbW$), $n_p = 1,9681$, $n_m = 2,0063$, $n_g = 2,0499$ (для KYW) [5, 6].

В таблице 2 приведены значения температурных коэффициентов показателей преломления dn_i/dT для кристаллов $KYb_xY_{1-x}(WO_4)_2$, полученные при различных направлениях распространения k и поляризации E света, а также значения dn_i/dT , усредненные для каждой поляризации света по двум направлениям распространения k . Температурные коэффициенты dn_i/dT для всех поляризаций света и коэффициентов стехиометрии x отрицательные и характеризуются достаточно сильной анизотропией. При этом для каждой поляризации света значение температурного коэффициента x (то есть при последовательном переходе от кристалла KYW к $KYbW$) уменьшается по абсолютной величине с увеличением коэффициента стехиометрии.

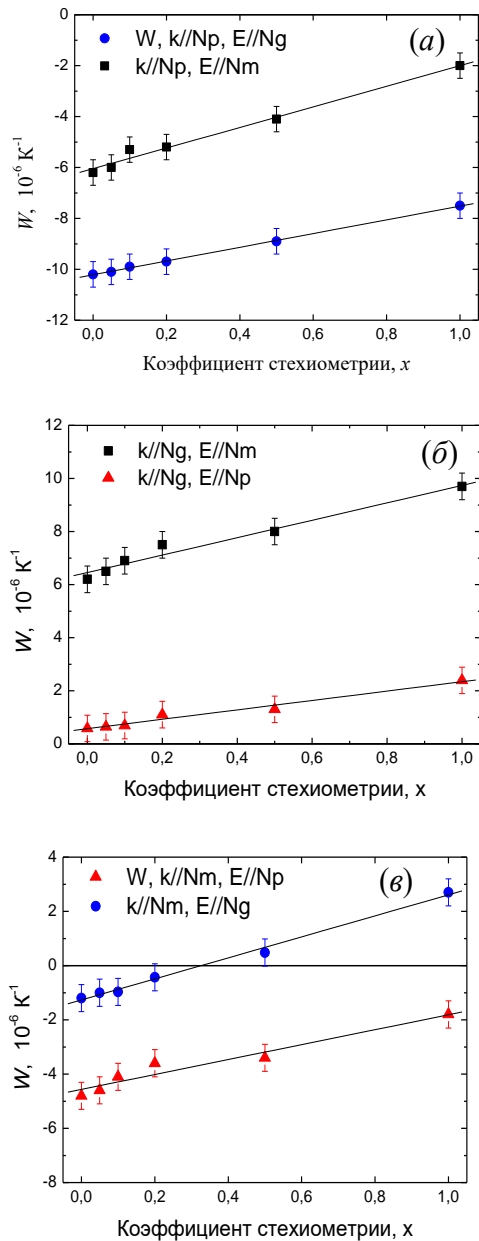


Рисунок 1 – Зависимость термических коэффициентов оптического пути W кристаллов $KYb_xY_{1-x}(WO_4)_2$ на длине волны 1,06 мкм от коэффициента стехиометрии x для различных направлений распространения k и поляризаций E света. Символы – экспериментальные данные, линии – линейная аппроксимация (коэффициенты R^2 составляют 0,9427 – 0,9991)

На рисунок 2 приведена зависимость температурных коэффициентов dn_i/dT , усредненных по двум направлениям распространения света k , от коэффициента стехиометрии x кристаллов $KYb_xY_{1-x}(WO_4)_2$. Данные усредненные значения рассматриваются в качестве итоговых температурных коэффициентов показателей преломления для каждой поляризации света. Зависимость dn_i/dT от x достаточно хорошо описывается линейной зависимостью для каждой поляризации света:

$$\frac{dn_p}{dT} = (-15.613 + 2.583x) \cdot 10^{-6} K^{-1},$$

$$\frac{dn_m}{dT} = (-9.830 + 4.042x) \cdot 10^{-6} K^{-1},$$

$$\frac{dn_g}{dT} = (-13.633 + 2.484x) \cdot 10^{-6} K^{-1}.$$

Различие между значениями dn/dT при $x = 0$ и $x = 1,0$ составляет $(2,5-4,2) \cdot 10^{-6} K^{-1}$, что значительно превышает погрешность измерения dn/dT ($0,6 \times 10^{-6} K^{-1}$). Таким образом, зависимость температурных коэффициентов показателей преломления от коэффициента стехиометрии x кристаллов $KYb_xY_{1-x}(WO_4)_2$ можно представить в виде:

$$\left(\frac{dn_{p,m,g}}{dT}\right)_{KYb_xY_{1-x}W} = x \left(\frac{dn_{p,m,g}}{dT}\right)_{KYbW} + (1-x) \left(\frac{dn_{p,m,g}}{dT}\right)_{KYW}.$$

Следует отметить, что данные по dn/dT , полученные в настоящей работе для KYW и $KYbW$ находятся в хорошем согласии с соответствующими значениями, полученными другими авторами и которые собраны в [7].

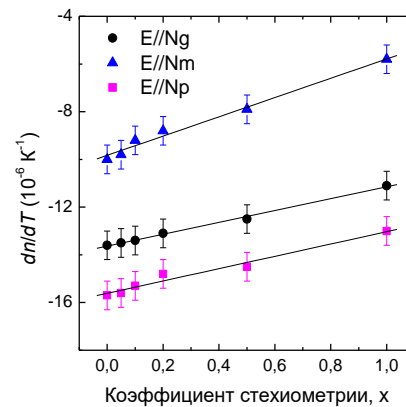


Рисунок 2 – Зависимость температурных коэффициентов показателей преломления dn/dT (усредненных по измерениям для двух направлений распространения света) кристаллов $KYb_xY_{1-x}(WO_4)_2$ на длине волны 1,06 мкм от коэффициента стехиометрии x . Символы – экспериментальные данные, линии – линейная аппроксимация (коэффициенты детерминации $R^2 = 0,9855$ ($E // N_p$), $0,9931$ ($E // N_m$) и $0,9981$ ($E // N_g$))

Литература

1. Appl. Phys. B / К. V. Yumashev [et al.]. – 2024. – V. 130 (1), art. 14.
2. Appl. Phys. B / S. Vatik [et al.]. – 2009. – V. 95 (4). – P. 653–656.
3. Приборы и методы измерений / П. А. Лойко. – 2010. – № 1. – С. 70–77.
4. Opt. Letters / S. Kurilchik [et al.]. – 2017. – V. 42 (21). – P. 4565–4568.
5. Physical review B / М. С. Pujol [et al.]. – V. 65, – P. 165121-1–165121-11.
6. Crystals, Crystallogr. Rep. / А. А. Kaminskii [et al.]. – 2001. – V. 46 (4). – P 733–741.
7. Opt. Mater / P. A. Loiko [et al.]. – 2011. – V. 33, № 11. – 1688–1694.