

УДК 535.343.1

КРИСТАЛЛ $\text{LiNbO}_3\text{-Ho}^{3+}$: МАТЕРИАЛ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Г.Г. ДЕМИРХАНЫАН^{1,2}, Э.П. КОКАНЯН^{1,2}, А.Г. ДЕМИРХАНЫАН^{1*},
Д. САРДАР³, М. АЙЛЕРИ⁴

¹ Армянский государственный педагогический университет
им. Х. Абовяна, Ереван, Армения

² Институт физических исследований НАН Армении, Аштарак, Армения

³ Университет Техаса, Сан-Антонио, США

⁴ Университет Лоррена, Мец, Франция

*e-mail: demirkhanyan_hasmik@yahoo.com

(Поступила в редакцию 19 июня 2015 г.)

Исследованы возможности кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{-Ho}^{3+}$ для оптического охлаждения на основе антистоксовой люминесценции в диапазоне длин волн 2000–2200 нм. Оценены величины эффективности и температуры охлаждения при непрерывном возбуждении (CW) на длинах волн 2035–2071 нм с мощностью ~100 Вт. Показано, что при CW возбуждении на длине волны 2035 нм максимальная температура охлаждения составляет 2.5К, а при возбуждении на длине волны 2071 нм – 10.9К.

1. Введение

Кристаллы ниобата лития, LiNbO_3 (LN), легированные трехвалентными ионами редких земель (R^{3+}), являющиеся хорошим материалом для малогабаритных многофункциональных лазеров в инфракрасной и видимой областях спектра [1,2], могут быть перспективными как для оптического охлаждения на основе антистоксового излучения (ASL) примесных ионов, так и для создания лазеров с самоохлаждением [3–7]. Обзор работ, посвященных исследованию охлаждающих возможностей кристаллических ($\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$, $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$, YAG, Y_2SiO_5 , YLF и т.д.) и аморфных (ZBLANP, BIG и т.д.) материалов, легированных ионами Yb^{3+} , Er^{3+} и Tm^{3+} приведен в [5].

В настоящей работе на основе анализа энергетической схемы штарковских уровней мультиплетов 5I_8 и 5I_7 [8,9] (рис.1) и результатов теоретических исследований спектроскопических свойств кристалла LN- Ho^{3+} [7,10] рассматриваются возможности указанного кристалла для оптического охлаждения на основе ASL в диапазоне длин волн 2000–2200 нм.

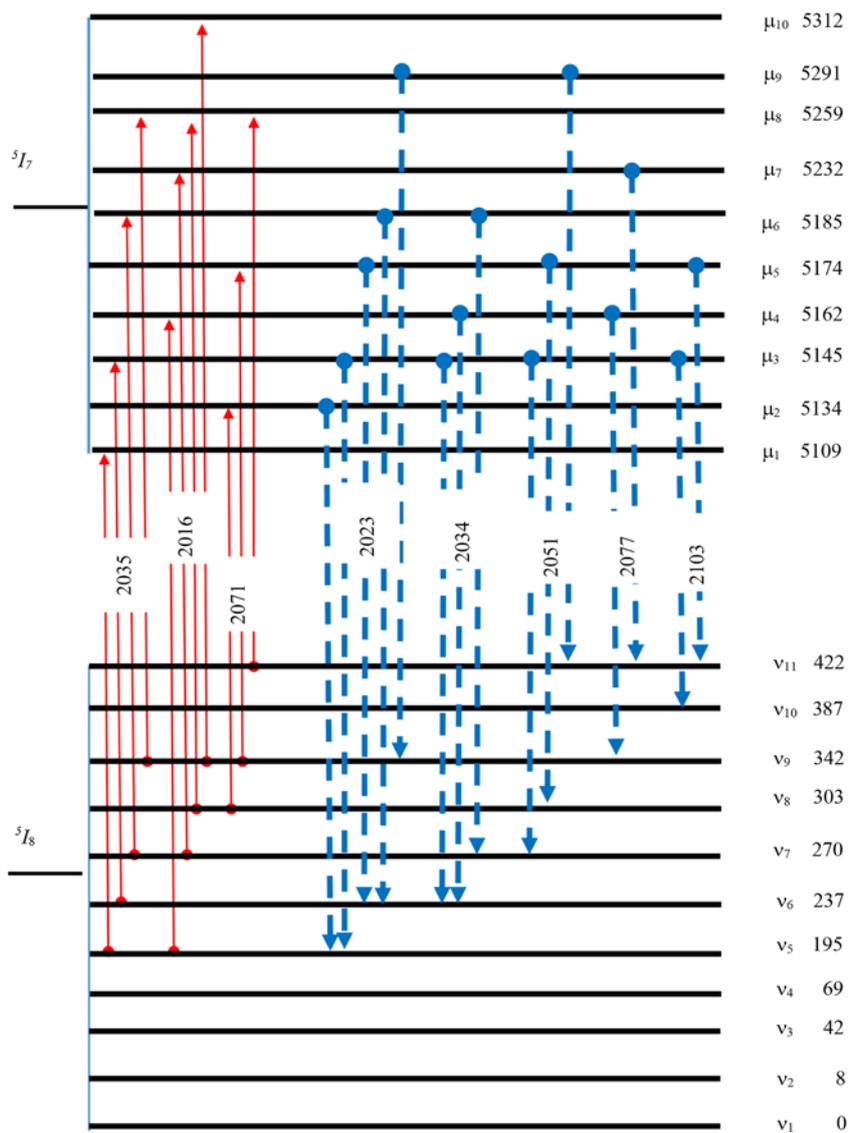


Рис.1. Схема энергетических уровней иона Ho³⁺ в LN [7]: энергии уровней приведены в см⁻¹, переходы между штарковскими состояниями указаны стрелками, длины волн переходов даны в нм.

2. Спектры поглощения и излучения в диапазоне 1800–2200 нм

Оптические спектры примесного поглощения кристалла LN-Ho³⁺ исследованы в [7–10]. Спектр поглощения в диапазоне длин волн 1800–2200 нм приведен на рис.2. Видно, что максимальное поглощение происходит при длине волны возбуждения 1950 нм, что соответствует переходу между нижайшими штарковскими состояниями мультиплетов ⁵I₈ и ⁵I₇ (переходы ν₁→μ₁, ν₃→μ₄,

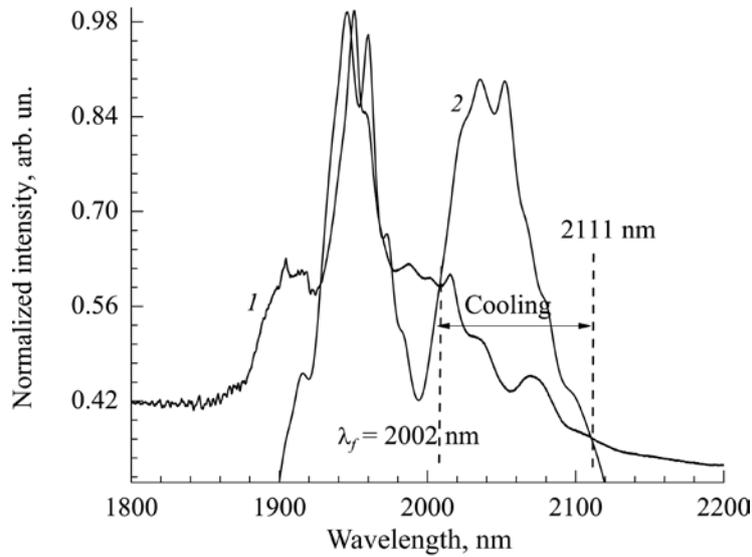


Рис.2. Спектры поглощения (кривая 1) и люминесценции (кривая 2) кристалла LN-Ho³⁺ [7,9].

$\nu_4 \rightarrow \mu_6$, $\nu_5 \rightarrow \mu_{10}$). Кроме основного пика в длинноволновой области спектр поглощения содержит ярко выраженные пики на длинах волн 1987 нм (переходы $\nu_1 \rightarrow \mu_4$, $\nu_5 \rightarrow \mu_7$, $\nu_6 \rightarrow \mu_8$, $\nu_7 \rightarrow \mu_{10}$), 2016 нм (переходы $\nu_5 \rightarrow \mu_4$, $\nu_7 \rightarrow \mu_7$, $\nu_8 \rightarrow \mu_8$, $\nu_9 \rightarrow \mu_{10}$) 2035 нм (переходы $\nu_5 \rightarrow \mu_1$, $\nu_6 \rightarrow \mu_3$, $\nu_7 \rightarrow \mu_6$, $\nu_9 \rightarrow \mu_8$) и 2071 нм (переходы $\nu_8 \rightarrow \mu_2$, $\nu_9 \rightarrow \mu_5$, $\nu_{11} \rightarrow \mu_8$) (рис.1,2). Соответствующие спектроскопические параметры приведены в табл.1. При этом эффективность поглощения рассчитана с учетом всех межштарковских $i \rightarrow f$ переходов:

$$\xi_{\text{abs}}(i \rightarrow f) = \alpha_{i,f} \exp\left(\frac{\varepsilon_i - \varepsilon_1}{kT}\right) / \sum_{j,m} \alpha_{j,m} \exp\left(\frac{\varepsilon_j - \varepsilon_1}{kT}\right), \quad (1)$$

где $\alpha_{i,f}$ – коэффициент поглощения на переходе $i \rightarrow f$, ε_j – энергия j -ого штарковского состояния начального мультиплета, k – постоянная Больцмана и T – температура.

Видно, что процессы поглощения на длинах волн 2016 нм, 2035 нм и 2071 нм в основном обусловлены переходами $\nu_5 \rightarrow \mu_4$, $\nu_5 \rightarrow \mu_1$, $\nu_6 \rightarrow \mu_3$ и $\nu_8 \rightarrow \mu_2$, соответственно. Что касается оптических спектров примесного излучения кристалла LN-Ho³⁺, то исследована лишь часть спектра, соответствующая переходам с высоколежащих мультиплетов (5F_4 , 5F_5 , 5S_2) [8,9]. Экспериментальное исследование спектра излучения в диапазоне длин волн 1800–2200 нм (переходы между штарковскими уровнями мультиплетов 5I_7 и 5I_8) в литературе отсутствует. Поэтому мы будем исходить из результатов анализа приведенного на рис.2 спектра люминесценции, построенного на основе расчетных значений спектроскопических параметров [10].

Табл.1. Спектроскопические параметры поглощения при $T = 300\text{K}$ [10]: сила линии перехода S , коэффициент поглощения α , заселенность начального уровня N_i/N_0 и эффективность поглощения ξ_{abs}

λ_{ex} , нм	Переход	S , 10^{-21} см ²	α , 10^{-26} см ⁻¹	N_i/N_0	ξ_{abs} , %
2016	$\nu_5 \rightarrow \mu_4$	4.3078	1.6528	0.075	1.0
	$\nu_7 \rightarrow \mu_7$	2.27703	0.8745	0.053	0.4
	$\nu_8 \rightarrow \mu_8$	4.58537	1.7636	0.045	0.6
	$\nu_9 \rightarrow \mu_{10}$	1.99421	0.7647	0.037	0.2
2035	$\nu_5 \rightarrow \mu_1$	3.66529	1.4216	0.075	0.8
	$\nu_6 \rightarrow \mu_3$	4.0845	2.0177	0.062	0.8
	$\nu_7 \rightarrow \mu_6$	4.60531	1.7862	0.053	0.7
	$\nu_9 \rightarrow \mu_8$	2.63614	1.0220	0.037	0.3
2071	$\nu_8 \rightarrow \mu_2$	6.28411	2.4793	0.045	0.9
	$\nu_9 \rightarrow \mu_5$	1.92399	0.7591	0.037	0.2
	$\nu_{11} \rightarrow \mu_8$	2.76008	1.0874	0.025	0.2

3. Возможности применения кристалла LN- Ho^{3+} в системах оптического охлаждения

На рис.1 приведена энергетическая схема штарковских уровней основного (5I_7) и первого возбужденного (5I_8) мультиплетов иона Ho^{3+} в LN, указаны межштарковские переходы, соответствующие наиболее интенсивным линиям поглощения в диапазоне длин волн 2016–2071 нм и ASL в диапазоне длин волн 2023–2103 нм (рис.2).

Средняя длина волны люминесценции, рассчитанная по формуле $\lambda_f = \int_0^\infty \lambda I_f(\lambda) d\lambda / \int_0^\infty I_f(\lambda) d\lambda$ (где $I_f(\lambda)$ – спектральная плотность интенсивности люминесценции), равна $\langle \lambda_f \rangle = 2002$ нм. В то же время видно, что ASL доминирует над поглощением вплоть до длины волны 2111 нм (рис.2). Таким образом, охлаждение (длина волны возбуждения превышает длину волны ASL) может быть обусловлено антистоксовыми переходами в диапазоне 2002–2111 нм, где спектр ASL имеет пики на длинах волн 2023, 2034, 2051, 2077 и 2103 нм.

В табл.2 приведены спектроскопические параметры неполяризованной ASL на указанных длинах волн, при этом коэффициенты ветвления люминесценции рассчитаны с учетом всех межштарковских переходов.

Табл.2. Параметры спектра ASL кристалла LN- Ho^{3+} при $T = 300\text{K}$ [10]: сила линии перехода S , вероятность спонтанного перехода A , заселенность начального уровня N_i/N_0 и коэффициент ветвления люминесценции β .

λ , нм	Переход	S , 10^{-21} cm^2	A , c^{-1}	N_i/N_0	β , %
2023	$\mu_2 \rightarrow \nu_5$	3.03797	26.3804	0.131	1.0
	$\mu_3 \rightarrow \nu_5$	4.78368	41.8486	0.124	1.5
	$\mu_5 \rightarrow \nu_6$	3.66778	31.8022	0.108	1.0
	$\mu_6 \rightarrow \nu_6$	7.64323	66.7652	0.103	2.0
	$\mu_9 \rightarrow \nu_9$	1.60008	13.9771	0.062	0.3
2035	$\mu_3 \rightarrow \nu_6$	4.0845	34.8448	0.124	1.3
	$\mu_4 \rightarrow \nu_6$	5.21502	44.9512	0.115	1.5
	$\mu_5 \rightarrow \nu_7$	1.41515	12.0372	0.108	0.4
	$\mu_6 \rightarrow \nu_7$	4.60531	39.4038	0.103	1.2
	$\mu_8 \rightarrow \nu_9$	2.21413	22.5886	0.124	0.5
2051	$\mu_3 \rightarrow \nu_7$	3.32482	27.7872	0.124	1.0
	$\mu_5 \rightarrow \nu_8$	1.43708	41.6042	0.108	1.3
	$\mu_8 \rightarrow \nu_{10}$	3.07435	25.6188	0.072	0.5
	$\mu_9 \rightarrow \nu_{11}$	9.87124	82.1378	0.062	1.5
2077	$\mu_4 \rightarrow \nu_9$	2.29563	18.5277	0.115	0.6
	$\mu_7 \rightarrow \nu_{11}$	2.65767	21.3261	0.082	0.5
2103	$\mu_3 \rightarrow \nu_{10}$	2.69212	20.9011	0.124	0.8
	$\mu_5 \rightarrow \nu_{11}$	5.08119	39.3370	0.108	1.3

Очевидно, что эффективность охлаждения существенно зависит от выбора длины волны возбуждающего излучения λ_{ex} , которая должна удовлетворять условию: $\lambda_{\text{ex}} > \lambda_{\text{ASL}} > \langle \lambda_f \rangle$. Видно, что в нашем случае наиболее удобными являются возбуждения на длинах волн $\lambda_{\text{ex}} = 2035$ нм и $\lambda_{\text{ex}} = 2071$ нм (рис.2). Возбуждение на длине волны 2035 нм заселяет уровни μ_1 , μ_3 и μ_6 , а при возбуждении с длиной волны 2071 нм, в основном, заселяется уровень μ_2 (табл.1). В первом случае охлаждение на основе ASL может происходить за счет переходов в области длин волн 2023 нм и 2034 нм, а во втором случае – за счет переходов на длинах волн 2023, 2034 и 2051 нм (рис.1). Для оценки эффективности γ оптического охлаждения методом ASL воспользуемся следующим упрощенным выражением [11]:

$$\gamma = \eta \left[1 - e^{-(\alpha_{ab} + \alpha_{ph})L} \right] \frac{\lambda_{ex} - \langle \lambda_f \rangle}{\langle \lambda_f \rangle}, \quad (2)$$

где η – квантовый выход люминесценции с возбужденного уровня, α_{ab} – коэффициент поглощения (в см^{-1}) возбуждающего излучения на длине волны λ_{ex} , α_{ph} – коэффициент фонового поглощения матрицы кристалла и L – длина кристалла вдоль оптического возбуждения.

С целью проведения количественных оценок отметим, что вероятность безызлучательного многофононного перехода с мультиплета 5I_7 пренебрежимо мала, так что можно допустить, что квантовый выход с возбужденного штарковского уровня совпадает с коэффициентом ветвления люминесценции с этого уровня. Далее предположим, что интенсивность возбуждающего излучения достаточно мала, так что система далека от насыщения. Тогда, полагая $L = 0.4$ см и $N_{Ho} \approx 1.68 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$, по данным табл.1,2 оценим величину γ для различных схем возбуждения. При этом величина коэффициента поглощения $\alpha_{ab}(\lambda)$ на длине волны λ связана с величиной интегрального коэффициента поглощения α (табл.2) соотношением $\alpha_{ab}(\lambda) = \alpha(\lambda) N_i / \Delta\lambda$, где $N_i = \delta \times N$ – населенность уровня v_i (δ – Больцмановский фактор) и $\Delta\lambda$ – ширина соответствующей линии поглощения. При численных оценках использованы приведенные в табл.1 значения $\alpha(\lambda)$, $\beta(\lambda)$ и δ , а для ширины линий поглощения и коэффициента фонового поглощения – значения $\Delta\lambda \approx 5$ нм и $\alpha_{ph} = 0.01 \text{ см}^{-1}$ [6]. Результаты оценок приведены в табл.3. Видно, что эффективность охлаждения меняется в пределах от 0.002% до 0.015%, что вполне сопоставимо с данными, полученными для других материалов [5,6].

Оценим величину температуры охлаждения $\Delta T_1 = T_0 - T_1$, исходя из энергетического баланса $E_{ph}(T_0) - E_{ph}(T_1) = \varepsilon(T_0)$, где $E_{ph}(T)$ – колебательная энергия кристалла при температуре T и $\varepsilon(T_0)$ – тепловая энергия, поглощенная при одном акте ASL. В рамках приближения Дебая для колебаний решетки легко получить выражение

$$\left(\frac{T_0}{T_D} \right)^4 \int_0^{T_D/T_0} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} - \left(\frac{T_1}{T_D} \right)^4 \int_0^{T_D/T_1} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = \frac{N_{Ho}}{N} \frac{hc \delta_p \delta_L}{9kT_D} \left(\frac{1}{\lambda_L} - \frac{1}{\lambda_p} \right) \frac{\tau F_p \sigma_p}{1 + \tau F_p \sigma_p}, \quad (3)$$

определяющее значение температуры T_1 после первого цикла охлаждения. Здесь введены следующие обозначения: N_{Ho} – концентрация примесных ионов, N – концентрация атомов в матрице кристалла LN, T_D – температура Дебая, T_0 – начальная температура кристалла, δ_p и δ_L – больцмановские факторы, определяющие населенности штарковских уровней иона Ho^{3+} , с которых протекают процессы поглощения и люминесценции, h – постоянная Планка, c – скорость света, τ – время жизни уровня 5I_7 и F_p – плотность потока фотонов возбуждающего излучения. Используя данные табл.1–3, а также значения $T_D = 503\text{K}$, $N =$

Табл.3. Температура ΔT_{fin} и эффективность γ оптического охлаждения кристалла LN-Нo³⁺.

ASL		Возбуждение				
		2035 нм, $\nu_5 \rightarrow \mu_1, \nu_6 \rightarrow \mu_3,$ $\nu_7 \rightarrow \mu_6, \nu_9 \rightarrow \mu_8,$		2071 нм, $\nu_8 \rightarrow \mu_2, \nu_9 \rightarrow \mu_5,$ $\nu_{11} \rightarrow \mu_8$		
Переход	Длина волны, нм	$\Delta T_1, \text{K}$ ($\Delta T_{\text{fin}}, \text{K}$)	$\gamma, \%$	$\Delta T_1, \text{K}$ ($\Delta T_{\text{fin}}, \text{K}$)	$\gamma, \%$	
$\mu_2 \rightarrow \nu_5$	2025	0.15 (2.5)	0.0075	0.33 (10.9)	0.0073	
$\mu_3 \rightarrow \nu_5$	2020		0.0113		0.0110	
$\mu_5 \rightarrow \nu_6$	2026		0.0075		0.0073	
$\mu_6 \rightarrow \nu_6$	2021		0.0151		0.0146	
$\mu_9 \rightarrow \nu_9$	2020		0.0023		0.0022	
$\mu_3 \rightarrow \nu_6$	2037		-		-	0.0095
$\mu_4 \rightarrow \nu_6$	2036		-		-	0.0110
$\mu_6 \rightarrow \nu_7$	2035		-		-	0.0088
$\mu_5 \rightarrow \nu_7$	2039		-		-	0.0029
$\mu_3 \rightarrow \nu_7$	2051		-		-	0.0073
$\mu_5 \rightarrow \nu_8$	2053	-	-	0.0095		
$\mu_9 \rightarrow \nu_{11}$	2054	-	-	0.0100		

$3.14 \times 10^{22} \text{ см}^{-3}$, $N_{\text{Ho}} = 1.68 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ [12], $T_0 = 300\text{K}$ и $\tau \approx 4 \text{ мс}$, $\sigma_p \approx 5 \times 10^{-19} \text{ см}^2$ [19] и $F_p \approx 5 \times 10^{21} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$, легко найти величину первого интеграла в (3)

$$I(T_0) = \left(\frac{T_0}{T_D} \right)^4 \int_0^{T_D/T_0} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = 0.100862, \text{ а также значение правой части выражения (3)}$$

для каждого отдельного канала ASL. Далее из (3) определим температуру T_1 и ΔT_1 (табл.3). Следует отметить, что при непрерывном возбуждении процесс охлаждения будет идти до установления некоторой предельной температуры T_{fin} . Для оценки величины T_{fin} поступим следующим образом: разделим область температур $[T_0, T_{\text{fin}}]$ на интервалы $T_0 > T_1 > T_2 > \dots > T_n > \dots$, где T_n – температура системы после n -ого цикла охлаждения. Обозначив правую часть выражения (3) посредством $\gamma(T)$, запишем уравнение (3) для каждого интервала температур $[T_{i-1}, T_i]$

$$I(T_{i-1}) - I(T_i) = \gamma(T_{i-1}), \quad (4)$$

где $I(T_n) = \left(\frac{T_n}{T_D}\right)^4 \int_0^{T_D/T_n} \frac{x^3 dx}{e^x - 1}$. Формула (4) представляет собой рекуррентное соотношение, из которого легко определить $I(T_n)$: $I(T_n) = I(T_0) - \sum_{i=1}^n \gamma(T_{i-1})$. Тогда, переходя к пределу $n \rightarrow \infty$ с учетом $\lim_{n \rightarrow \infty} T_n = T_{\text{fin}}$, получим

$$I(T_{\text{fin}}) = I(T_0) - \sum_{i=1}^{\infty} \gamma(T_{i-1}). \quad (5)$$

Заметим, что температурная зависимость $\gamma(T)$ определяется больцмановскими факторами δ_p и δ_L , так что $\lim_{T \rightarrow T_{\text{fin}}} \gamma(T) = 0$, поскольку предполагается, что при температуре T_{fin} процесс охлаждения прекращается. Таким образом, $\gamma(T)$ можно представить в виде $\gamma(T_i) = C \exp(-(\varepsilon_p + \varepsilon_L) / k(T_i - T_{\text{fin}}))$, где ε_p и ε_L – энергии начальных штарковских уровней, с которых происходят поглощение и люминесценция, C – независящая от температуры постоянная. Для оценки суммы в правой части выражения (5) предположим, что $(T_n - T_{\text{fin}}) / T_{\text{fin}} = \alpha_n$, где α_n – бесконечно малая величина. Тогда, полагая $\alpha_n = 1/n$, получим соотношение $(T_n - T_{\text{fin}})^{-1} = T_{\text{fin}}^{-1} n$, с помощью которого найдем сумму в правой части выражения (5). Таким образом получим рекуррентную формулу

$$I(T_{\text{fin}}) = I(T_0) - B \frac{1}{\exp(\Delta / (kT_{\text{fin}})) - 1}, \quad (6)$$

позволяющую определить величину предельной температуры T_{fin} и температуры охлаждения $\Delta T = T_0 - T_{\text{fin}}$. Отметим, что величина B , определяемая правой частью (3), зависит от выбора канала ASL. Результаты расчетов приведены в табл.3. Видно, что при СВ возбуждении на длине волны 2035 нм максимальная температура охлаждения составляет 2.5К, а при возбуждении на длине волны 2071 нм – 10.9К. Это, очевидно, связано с тем, что во втором случае в процессе охлаждения задействовано большее число переходов. Отметим, что в случае кристаллов $\text{BaY}_2\text{F}_8\text{-Tm}^{3+}$ и $\text{KPr}_2\text{Cl}_5\text{-Er}^{3+}$ [5] для температуры охлаждения получены значения соответственно $\Delta T = 3.2\text{К}$ и $\Delta T = 0.12\text{К}$, что ниже соответствующих значений для LN-Ho^{3+} .

4. Заключение

Сравнение полученных результатов с охлаждающими свойствами кристаллов, легированных редкоземельными ионами со структурой энергетических уровней, подобной энергетической схеме иона Ho^{3+} , показывает, что при СВ возбуждениях с мощностью ~ 100 Вт на длинах волн 2035 нм и 2071 нм кристаллы

LN- Ho^{3+} , являются вполне перспективным материалом для систем оптического охлаждения на основе ASL.

ЛИТЕРАТУРА

1. **A. Cordova-Plaza, M. Digonnet, H.J. Shaw.** IEEE, J. Quantum Electron., **QE-23**, 262 (1987).
2. **E. Lallier, J.P. Pocholle et al.** Opt. Lett., **15**, 682 (1990).
3. **X.L. Ruan, M. Kaviany.** Phys. Rev. B, **73**, 155422 (2008).
4. **A.J. Garcia-Adeva, R. Balda, J. Fernandez.** Phys. Rev. B, **79**, 033110 (2009).
5. **G. Nemova, R. Kashyap.** Rep. Prog. Phys., **73**, 086501 (2010).
6. **V.G. Babajanyan.** Laser Phys., **23**, 126002 (2013).
7. **Г. Демирханян, Э. Коканян, Дж. Грубер, Д. Сардар, М. Похрел.** Сб. трудов конференции к 90 -летию АГПУ, **3**, 384 (2014).
8. **A. Lorenzo, J.A.S. Garcia, J.G. Sole.** J. Phys.: Condens. Matter., **6**, 1065 (1994).
9. **A. Lorenzo, L.E. Bausa, J.A. S. Garcia, J.G. Sole.** J. Phys.: Cond. Matter., **8**, 5781 (1996).
10. **Г.Г. Демирханян, Э.П. Коканян, А.Г. Демирханян.** Изв. НАН РА, Физика, **50**, 318 (2015).
11. **S.D. Melgard, D.V. Seletskiy, A. Di Lieto, M. Tonelli, M. Sheik-Bahae.** Opt. Lett., **38**, 1588 (2013).
12. **Ю.С. Кузьминов.** Электро-оптический и нелинейно-оптический кристалл ниобата лития. Москва. Наука, 1987.

LiNbO₃-Ho³⁺ ԲՅՈՒՐԵՂԸ ՈՐՊԵՍ ՆՅՈՒԹ ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ՍԱՌԵՑՄԱՆ ՀԱՄԱՐ
Գ.Գ. ԴԵՄԻՐԽԱՆՅԱՆ, Է.Պ. ԿՈԿԱՆՅԱՆ, Հ.Գ. ԴԵՄԻՐԽԱՆՅԱՆ, Դ.ՍԱՐԴԱՐ, Մ.ԱՅԼԵՐԻ

Հետազոտված են LiNbO₃-Ho³⁺ բյուրեղների՝ 2000–2200 նմ ալիքի երկարությունների տիրույթում անտիստոքայան ճառագայթման հիման վրա օպտիկական սառեցման հնարավորությունները: Գնահատված են ~100 Վտ հզորությամբ 2035–2071 նմ ալիքի երկարությունների վրա անընդհատ գրգռման (CW) դեպքում էֆեկտիվության արժեքները և սառեցման ջերմաստիճանները: Ցույց է տրված, որ CW գրգռման դեպքում 2035 նմ ալիքի երկարության վրա սառեցման առավելագույն ջերմաստիճանը 2.5K է, իսկ 2071 նմ ալիքի երկարության դեպքում՝ 10.9K:

LiNbO₃-Ho³⁺ CRYSTAL: MATERIAL FOR OPTICAL COOLING

G.G. DEMIRKHANYAN, E.P. KOKANYAN, A.G. DEMIRKHANYAN,
D. SARDAR, M. AILLERIE

Possibilities of LiNbO₃-Ho³⁺ crystals for the optical cooling based on anti-Stokes luminescence in the wavelength range 2000–2200 nm are investigated. The values of efficiency and cooling temperature under continuous wave (CW) excitation at wavelengths 2035–2071 nm by ~100 W power are estimated. It shown that under CW excitation at 2035 nm wavelength the maximum cooling temperature is 2.5K, and for excitation at 2071 nm wavelength is 10.9K.