

типоволожного поведения поверхностей корпуса и иглы являются напряжения разного знака, возникающие на данных деталях под действием давления в процессе эксплуатации и различных фазовый состав иглы и корпуса.

УДК: 621.375.826

МИКРОПАРАМЕТРЫ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ МЕЖДУ ПРИМЕСНЫМИ ИОНАМИ В КРИСТАЛЛЕ $Tm, Ho: KY(WO_4)_2$

Курильчик С.В.¹, Кулешов Н.В.¹, Зенькевич Э.И.²

¹НИЦ оптических материалов и технологий БНТУ, Минск, Республика Беларусь

²Кафедра технической физики БНТУ, Минск, Республика Беларусь

Для получения лазерной генерации в спектральной области около 2 мкм на кристаллах, соактивированных ионами Tm^{3+} и Ho^{3+} , как правило, используется накачка в полосу поглощения ионов тулия [1], в результате которой происходит заселение долгоживущего энергетического состояния 3F_4 (рисунок 1).

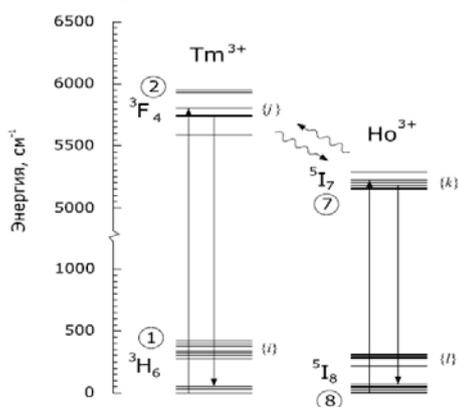


Рисунок 1 – Схема уровней ионов Tm^{3+} и Ho^{3+}

Вследствие близости энергии уровней 3F_4 тулия и 5I_7 гольмия имеет место безызлучательный перенос энергии на ионы гольмия, что открывает перспективы для получения генерации на переходе $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ ионов гольмия [1]. Однако на эффективность генерации негативное влияние оказывает обратный перенос энергии с уровня 5I_7 гольмия на уровень 3F_4 тулия. Поэтому для оценки перспективности использования соактивированного материала в качестве активной среды лазеров, излучающих в области 2 мкм, весьма важным является определение параметров переноса энергии между примесными ионами.

Исследование параметров переноса энергии между примесными ионами проводилось для кристалла $Tm, Ho: KY(WO_4)_2$ с концентрацией ионов тулия 5 ат. % и гольмия 0,4 ат. % в рамках теории индуктивно-резонансного переноса энергии Фёрстера-Декстера [2,3] в приближении ди-

1. Шульце, Г. Металлофизика / Г. Шульце. – М.: Мир, 1971. – 603 с.
2. Головин, Ю.И. Наноиндентирование и его возможности / Ю.И. Головин. – М.: Машиностроение, 2009. – 312 с.

поль-дипольного межиионного взаимодействия. В соответствии с данной теорией вероятность переноса энергии между отдельными ионом-донором и ионом-акцептором определяется выражением:

$$W_{ДА} = \frac{c_{ДА}}{r_{ДА}^6}, \quad (1)$$

где $c_{ДА}$ - микропараметр переноса энергии для диполь-дипольного межиионного взаимодействия, постоянный для данной среды; $r_{ДА}$ - расстояние между взаимодействующими ионами. Микропараметр переноса энергии $c_{ДА}$ выражается через время жизни возбужденного состояния иона-донора в отсутствие акцептора τ_D и критическое расстояние взаимодействия $R_{ДА}$:

$$c_{ДА} = \frac{R_{ДА}^6}{\tau_D}. \quad (2)$$

Критическим расстоянием взаимодействия называется такое расстояние между донором и акцептором в среде, при котором вероятность прямого резонансного переноса энергии равна вероятности спонтанной излучательной релаксации донора ($1/\tau_D$). Выражения для критического расстояния взаимодействия $R_{ДА}$ и микропараметра переноса энергии $c_{ДА}$ определяются спектроскопическими параметрами активных ионов в данной среде и, учитывая (2), могут быть записаны в следующем виде [3-5]:

$$R_{ДА}^6 = \frac{9c\tau_D\kappa^2}{16\pi^4n^2} \int \sigma_D^{изл}(\lambda)\sigma_A^{погл}(\lambda)d\lambda, \quad (3)$$

$$c_{ДА} = \frac{9c\kappa^2}{16\pi^4n^2} \int \sigma_D^{изл}(\lambda)\sigma_A^{погл}(\lambda)d\lambda \quad (4)$$

где c - скорость света, n - показатель преломления среды, $\sigma_D^{изл}(\lambda)$ - сечение вынужденного излучения донора, $\sigma_A^{погл}(\lambda)$ - сечение поглощения акцептора, κ^2 - ориентационный фактор, характеризующий взаимную ориентацию дипольных моментов переходов в доноре и акцепторе. В случае, когда взаимная ориентация доноров и акцепторов в среде случайная, но фиксированная и не меняется за время жизни иона в возбужден-

ном состоянии, что характерно в условиях кристаллической матрицы, ориентационный фактор $\kappa^2=0,476$ [4, 6].

Выражение под знаком интеграла характеризует степень перекрытия спектра поглощения акцептора и спектра излучения донора и определяет резонансную природу процесса переноса энергии. В случае кристалла $\text{Tm, Ho: KY(WO}_4)_2$ необходимо рассматривать два случая: прямой и обратный перенос энергии. В случае прямого переноса в качестве донора (Д) выступают ионы Tm^{3+} , а в качестве акцептора (А) – ионы Ho^{3+} . При обратном переносе энергии в качестве донора (Д) будут выступать ионы Ho^{3+} , а в качестве акцептора (А) – ионы Tm^{3+} . На основании формулы (1) можно получить выражение для отношения вероятностей прямого и обратного переноса энергии:

$$\frac{W_{\text{HoTm}}}{W_{\text{TmHo}}} = \frac{c_{\text{HoTm}}}{c_{\text{TmHo}}} \quad (5)$$

Усредненные по поляризации спектры поперечных сечений стимулированного излучения ионов Tm^{3+} и поглощения ионов Ho^{3+} в кристалле KYW, рассматриваемые в случае прямого переноса энергии ($\text{Tm} \rightarrow \text{Ho}$), представлены на рисунке 2.



Рисунок 2 – Спектры поперечных сечений стимулированного излучения ионов Tm^{3+} и поглощения ионов Ho^{3+} в кристалле KYW

Усредненные по поляризации спектры поперечных сечений стимулированного излучения ионов Ho^{3+} и поглощения ионов Tm^{3+} в кристалле KYW для случая обратного переноса энергии, представлены на рисунке 3.

Путем численного интегрирования произведения спектров, представленных на рисунках 1 и 2, с использованием выражений (3) и (4) рассчитаны значения критического расстояния взаимодействия $R_{\text{ДА}}$ и микропараметра переноса энергии $c_{\text{ДА}}$ для случаев прямого и обратного переноса энергии. Полученные значения представлены в таблице 1.

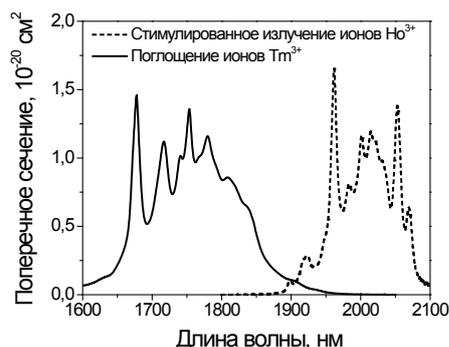


Рисунок 3 – Спектры поперечных сечений стимулированного излучения ионов Ho^{3+} и поглощения ионов Tm^{3+} в кристалле KYW

Таблица 1 – Микропараметры переноса энергии в кристалле $\text{Tm}(5\text{ат.}\%), \text{Ho}(0,4\text{ат.}\%): \text{KYW}$

Направление переноса энергии	$R_{\text{ДА}}, \text{ \AA}$	$c_{\text{ДА}}, \times 10^{-40} \text{ см}^6 \cdot \text{с}^{-1}$	$\frac{W_{\text{HoTm}}}{W_{\text{TmHo}}}$
$\text{Tm} \rightarrow \text{Ho}$	12,52	35,08	0,061
$\text{Ho} \rightarrow \text{Tm}$	9,95	2,16	

На основании выражения (5) рассчитана величина отношения вероятностей обратного и прямого переноса энергии между ионами тулия и гольмия, которая составила 0,061, что находится в хорошем соответствии с аналогичными значениями параметра для других кристаллов, Tm, Ho: YAG [7-9] и Tm, Ho: YLF [7], и указывает на доминирование прямого переноса энергии в исследуемом кристалле.

Таким образом, в результате исследования определены микропараметры переноса энергии между ионами тулия и гольмия в кристалле $\text{Tm}(5\text{ат.}\%), \text{Ho}(0,4\text{ат.}\%): \text{KY(WO}_4)_2$, которые подтверждают перспективность использования кристалла в качестве активной среды лазеров, излучающих в спектральном диапазоне 2 мкм при накачке в полосу поглощения ионов Tm^{3+} .

1. A.A. Lagatsky, F. Fusari, S.V. Kurilchik, et.al. Applied Physics B. 97 (2), 321-326 (2009).
2. Förster, T. Annalen der Physik. 6 (2), 55-75 (1948).
3. Dexter, D. J. Chem. Phys. 21(5), 836-850(1953).
4. Lakowicz, J. R. Principles of Fluorescence Spectroscopy, 3rd ed. – Kluwer Academic Press: New York, 2006. – 954.
5. J. Caird, et.al. J. Opt. Soc. Am. B. 8(7), 1391-1403 (1991).
6. I.Z. Steinberg, et.al. Annu. Rev. Biochem. 40, 83-114 (1971).
7. B.M. Walsh, et.al. J. Lumin. 75(2), 89-92 (1997).
8. S.R. Bowman, et.al. // IEEE J. Quantum Electron. 27 (9), 2142-2149 (1991).
9. R.R. Petrin, et.al. // Optical Materials. 1, 111-124 (1992).