

02

## Температурная зависимость интенсивности селективного излучения линии $R_1$ при лазерно-термическом нагреве рубина

© В.М. Марченко, Ю.А. Шакир

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,  
119991 Москва, Россия

e-mail: shakir@kapella.gpi.ru

Поступила в редакцию 08.04.2019 г.

В окончательной редакции 11.10.2019 г.

Принята к публикации 19.02.2020 г.

Экспериментально исследована температурная зависимость интенсивности селективного излучения линии  $R_1$  при лазерно-термическом нагреве рубина, которая объясняется конкуренцией процессов излучательной и безызлучательной релаксации.

**Ключевые слова:** селективное излучение, рубин, лазерно-термический нагрев.

DOI: 10.21883/OS.2020.06.49396.81-20

### Введение

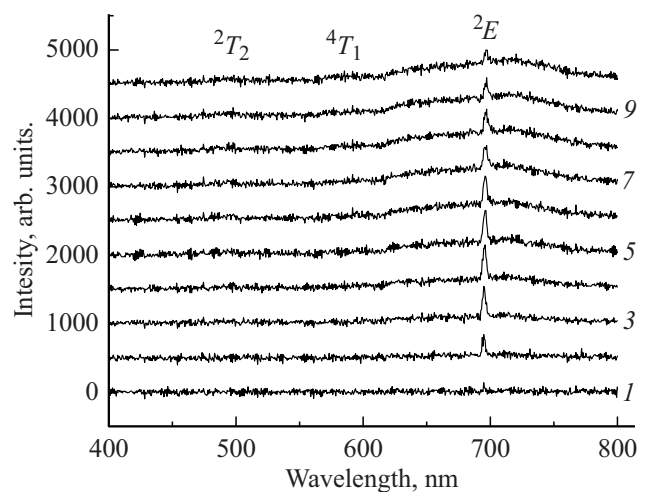
Спектры фотолюминесценции кристаллов рубина  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$  определяются переходами из возбужденных электронных состояний примесных ионов  $\text{Cr}^{3+}$  в основное  $^4A_2$  [1–3]. При температуре  $T = 300$  К интенсивные линии  $R_1$  и  $R_2$  на длине волны  $\lambda \approx 694$  nm соответствуют переходам  $^2E \rightarrow ^4A_2$ , а слабые полосы  $R'$  на  $\lambda = 670$  nm и  $\lambda \approx 630$  nm переходам  $^2T_1 \rightarrow ^4A_2$  и  $^4T_2 \rightarrow ^4A_2$ . Антистоксова люминесценция линий  $R$  рубина наблюдалась при двухфотонном поглощении одиночных импульсов излучения лазера на неодимовом стекле длительностью 25 ns на  $\lambda \approx 1.06$   $\mu\text{m}$  [4] и периодических фемтосекундных импульсов Тi:сапфирового лазера на  $\lambda = 800$  nm [5]. В области температур  $T > 250$  К происходит температурное тушение люминесценции линий  $R$  рубина [2]. Излучение на  $\lambda = 694$  nm зарегистрировано при алмазной резке, шлифовании и полировке рубина, но механизм его возбуждения не имеет удовлетворительно-го объяснения [6].

В работах [7,8] впервые получены и экспериментально исследованы интегральные спектры термического излучения монокристаллов  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$  в области  $\lambda = 400$ –800 nm при нагреве непрерывным излучением электроразрядного  $\text{CO}_2$ -лазера на  $\lambda = 10.6$   $\mu\text{m}$ . Спектры являются суперпозицией спектров селективного излучения (СИ) электронных переходов примесных ионов  $\text{Cr}^{3+}$  и пьедестала сплошного спектра термического излучения кристаллической матрицы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [7] и зависят от температуры кристалла.

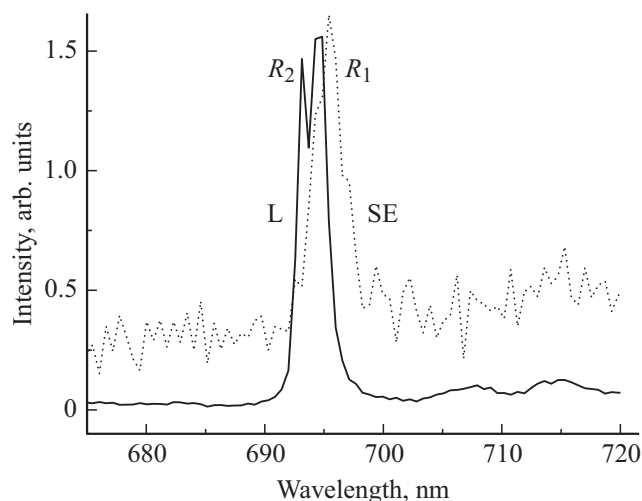
Целью настоящей работы является экспериментальное исследование и интерпретация зависимости интенсивности линии  $R_1$  от температуры при непрерывном лазерно-термическом нагреве рубина.

### Эксперимент

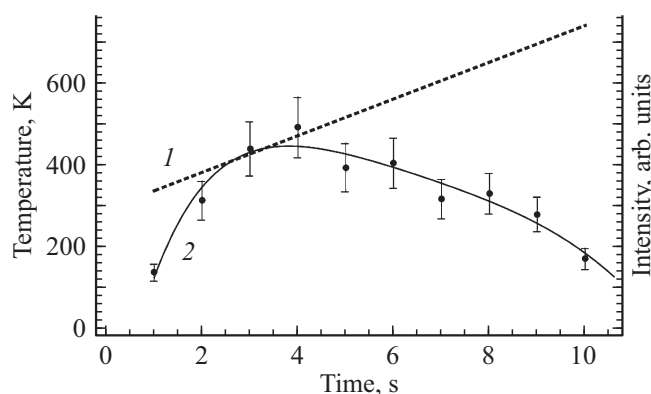
В работе исследовались спектры термического излучения лазерных монокристаллов рубина  $\text{Al}_2\text{O}_3:0.03\%\text{Cr}^{3+}$  диаметром 5 mm. Нагрев монокристаллов до температуры выше 1000 К проводился непрерывным излучением электроразрядного  $\text{CO}_2$ -лазера с мощностью излучения  $\sim 30$  W на длине волны  $\lambda = 10.6$   $\mu\text{m}$ . Температура в лазерном пятне на полированном торце монокристалла варьировалась временем нагрева фокусированным лазерным лучом при интенсивности излучения в пределах 1–20  $\text{kW}/\text{cm}^2$ . Спектры термического излучения рубина регистрировались спектрометром AvaSpec-2048 с дифракционной решеткой 300 lines/mm, областью дисперсии 200–1100 nm, приемной линейкой с 2048 pixels



**Рис. 1.** Температурная зависимость спектров излучения монокристалла  $\text{Al}_2\text{O}_3:0.03\%\text{Cr}^{3+}$ , зарегистрированных через 1 s при лазерно-термическом нагреве на  $\lambda = 10.6$   $\mu\text{m}$ .



**Рис. 2.** Спектры люминесценции (L) и селективного излучения (SE) рубина при  $T = 475$  К.  $R_1$  и  $R_2$  — наиболее интенсивные линии ионов  $\text{Cr}^{3+}$ .



**Рис. 3.** Временная зависимость температуры  $T$  (1) и интенсивности  $I$  (2) линии  $R_1$  при непрерывном лазерно-термическом возбуждении  $\text{Al}_2\text{O}_3 : 0.03\% \text{Cr}^{3+}$  на  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ .

и спектральным разрешением  $0.04 \text{ nm}$  и волоконно-оптическим входом, ориентированным на лазерное пятно на расстоянии  $3\text{--}5 \text{ cm}$  от кристалла. Коррекция чувствительности спектрометра проводилась по спектру фотометрической лампы Photometric standard lamp Tokyo Shibaura Electric Co. Ltd. 72, Japan. Погрешность калибровки чувствительности спектрометра  $15\%$ .

На рис. 1 показана температурная зависимость экспериментальных спектров излучения  $\text{Al}_2\text{O}_3 : 0.03\% \text{Cr}^{3+}$ , которые регистрировались через  $1 \text{ s}$  при непрерывном лазерно-термическом нагреве монокристалла [8]. Спектры являются суперпозицией сплошного спектра термического излучения кристаллической матрицы и СИ электронных линий ионов  $\text{Cr}^{3+}$ . На рис. 2 показан характерный спектр селективного излучения  $R$ -линий рубина в сравнении со спектром фотолюминесценции  $L$  при возбуждении диодным лазером на  $\lambda = 405 \text{ nm}$ . Пик линии  $R_1$  в спектре термического излучения сдви-

нут в длинноволновую сторону относительно пика  $L$  вследствие зависимости длины волны от  $T$ , которая описывается формулой  $\nu(R_1) = 14450 - 0.158T \text{ cm}^{-1}$  [9], где  $\nu(R_1)$  — волновое число линии  $R_1$  переходов  ${}^2E \rightarrow {}^4A_2$ . На рис. 3 показаны временные зависимости температуры  $T$  и интенсивности  $I$  излучения линии  $R_1$ , вычисленные из результатов измерений спектров на рис. 1. На рис. 4 показана зависимость  $I(T)$  (высоты) линий  $R_1$ , вычисленная по временным зависимостям  $T$  и  $I$  на рис. 3.

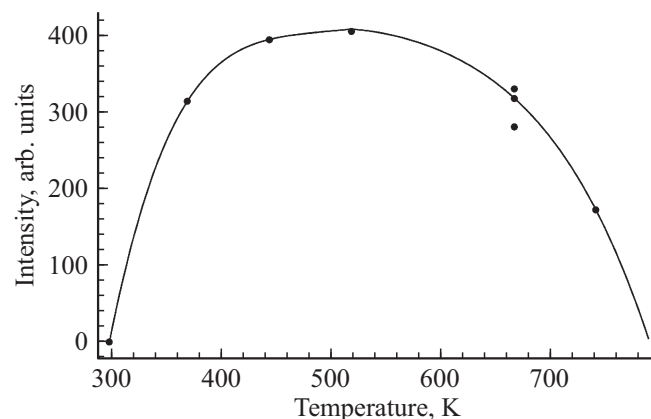
### Модель селективного излучения линии $R_1$

На основе принципа суперпозиции элементарных излучателей интенсивность спектров примесных кристаллов можно представить в виде

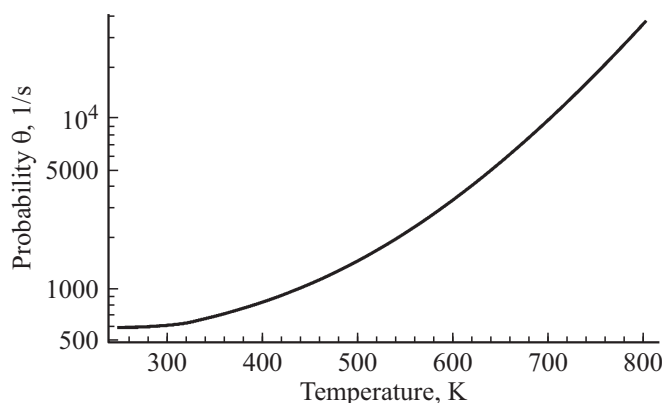
$$I(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \sigma T^4, \quad (1)$$

$$\varepsilon(\lambda, T) = \gamma_{21}(\lambda) / (\gamma_{21}(\lambda) + \theta_{21}(\lambda, T)), \quad (2)$$

где коэффициент черноты  $\varepsilon(\lambda, T)$  равен квантовой эффективности излучения на  $\lambda$  при  $T$ ,  $\gamma_{21}(\lambda)$ ,  $\theta_{21}(\lambda, T)$  —



**Рис. 4.** Зависимость интенсивности излучения  $I$  линии  $R_1$  от температуры  $T$  при лазерно-термическом нагреве монокристалла  $\text{Al}_2\text{O}_3 : 0.03\% \text{Cr}^{3+}$  на  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ .



**Рис. 5.** Температурная зависимость вероятности спонтанного излучения  $\theta$  линии  $R_1$  рубина.

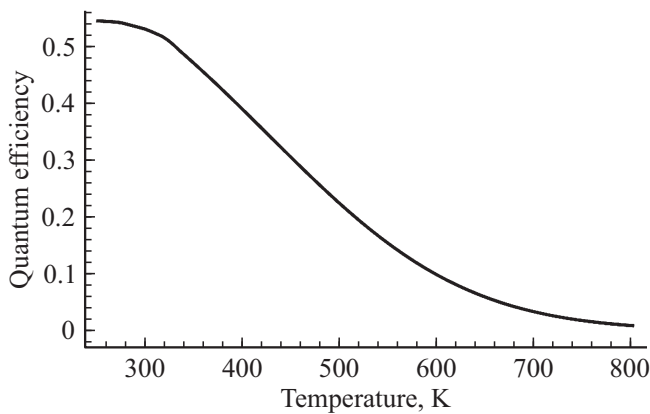


Рис. 6. Температурная зависимость квантовой эффективности спонтанного излучения линии  $R_1$  рубина.

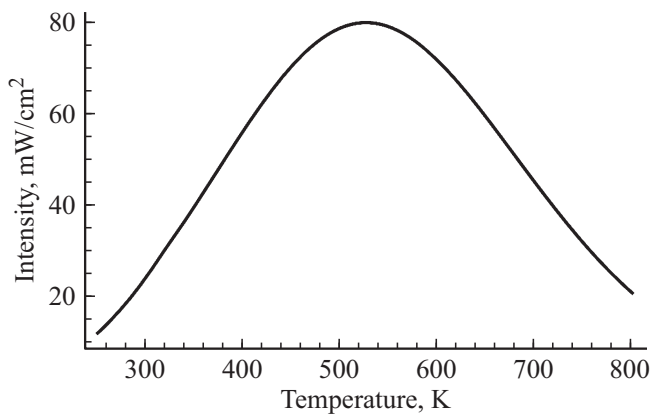


Рис. 7. Температурная зависимость интенсивности селективного излучения  $I(T)$  линии  $R_1$  рубина.

вероятности спонтанных и безызлучательных переходов между энергетическими уровнями кристалла с населенностью  $N_2$  и  $N_1$ ,  $\sigma$  — постоянная Стефана-Больцмана.

Сумма вероятностей в знаменателе (2) равна обратному времени жизни люминесценции  $\tau(T)$ . Температурная зависимость  $\tau(T)$  линии  $R_1$  рубина приведена в [10]. На рис. 5 показана температурная зависимость обратного времени жизни люминесценции  $\theta = 1/\tau$ .

Используя приведенную температурную зависимость вероятности  $\theta$  и величину  $1/\gamma_{21}(694\text{ nm}) = 3\text{ ms}$ , была вычислена квантовая эффективность  $\varepsilon$  СИ линии  $R_1$  рубина по формуле (2). График зависимости  $\varepsilon(R_1)$  на рис. 6 показывает, что рост тепловых потерь при релаксации в кристалле ведет к уменьшению квантовой эффективности. Использование  $\varepsilon(R_1)$  в законе Стефана-Больцмана (1) позволяет получить температурную зависимость интенсивности СИ рубина на длине волны линии  $R_1$  (рис. 7). Форма полученной расчетной зависимости согласуется с формой экспериментальной кривой на рис. 4.

## Выводы

Таким образом, в работе с помощью модели релаксационных процессов объяснена экспериментально измеренная зависимость интенсивности спектров СИ линии  $R_1$  от температуры при лазерно-термическом нагреве рубина. Интенсивность увеличивается при низких температурах до  $T \approx 540\text{ K}$  из-за преобладания многофононного возбуждения [11] и затухает при дальнейшем увеличении  $T$  из-за увеличения вероятности безызлучательной релаксации. Этими же процессами объясняется зависимость  $I(T)$  при механической обработке рубина [6].

Селективное излучение линии  $R_1$  может использоваться в термометрии и исследовании физико-химических процессов на поверхности рубина при высоких тепловых нагрузках.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Misu A.J. // Phys. Soc. Japan. 1964. V. 19. N 12. P. 2260–2270.
- [2] Kisliuk P., Moore C.A. // Phys. Rev. 1967. V. 60. P. 307–312.
- [3] Fonger W.H., Struck C.W. // Phys. Rev. B. 1975. V. 11. N 9. P. 3251–3260.
- [4] Zverev G.M., Mikhailova T.N., Pashkov V.A. // Sov. Phys. JETP. 1969. V. 28. N 1. P. 75–76.
- [5] Yang L., Dong Y., Chen D., Wang C., Da N., Jiang X., Zhu C., Qiu J. // Optics Express. 2005. V. 13. N 20. P. 7893–7897.
- [6] Katsumata T., Komuro S., Aizawa H. // J. Lumin. 2014. V. 154. P. 511–514.
- [7] Marchenko V.M., Kiselev V.V. // J. Appl. Spectr. 2016. V. 83. N 6. P. 996–999.
- [8] Marchenko V.M. // Phys. Wave Phenom. 2018. V. 26. N 4. P. 1–4.
- [9] Ragan D.D., Gustavsen Fi., Schiferl D. // J. Appl. Phys. 1992. V. 72. P. 5539–5544.
- [10] Zhang Z., Grattan K.T.V., Palmer A. // Phys. Rev. 1993. V. B48. P. 7772–7778.
- [11] Sova R.M., Linevsky M.L., Thomas M.E., Mark F.F. // APL Technical Digest. 1992. V. 3. N 3. P. 368–378.