

# Спектроскопические предпосылки возможности реализации эффекта оптического охлаждения на фторидных кристаллах, активированных ионами $\text{Yb}^{3+}$ и $\text{Tm}^{3+}$

© Л.А. Нуртдинова, В.В. Семашко, А.К. Наумов, Р.Ю. Абдулсабиров, С.Л. Кораблева

Казанский государственный университет,

420008 Казань, Россия

E-mail: nurlari@yandex.ru

Представлены результаты спектрально-кинетических исследований ряда фторидных кристаллов, активированных ионами  $\text{Yb}^{3+}$  и  $\text{Tm}^{3+}$ , и оценена перспективность их применения в качестве охлаждающего элемента оптического рефрижератора. Определены оптимальные с точки зрения достижения эффекта лазерного охлаждения условия возбуждения этих сред. Установлено, что эффективность охлаждения зависит от степени упорядоченности активной среды.

Исследование поддержано грантами МНТЦ 2121, CRDF REC-007 и Российского фонда фундаментальных исследований № 03-02-17361.

## 1. Введение

Оптическое охлаждение (ОО) обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными методами достижения низких температур благодаря возможности локального отвода тепла и отсутствию необходимости механического контакта между охлаждающимся элементом и системой охлаждения с ее источниками энергии. Особый интерес вызывают перспективы использования эффекта ОО при разработке различных квантово-электронных систем, в частности, радиационно-сбалансированных, самоохлаждающихся лазеров.

Впервые идея оптического охлаждения на основе антистоксовой люминесценции была предложена Прингсхеймом еще в 1929 г [1,2]. Однако реализовать ее стало возможным только с появлением лазеров. К 1999 г. лучшим результатом, достигнутым в этой области исследований, стало охлаждение оптоволокна металлфлюоридного стекла ZBLANP:Yb<sup>3+</sup> на 65° от комнатной температуры [2,3]. Однако предельная эффективность лазерного охлаждения для этой среды, определяемая особенностями спектров поглощения и люминесценции активаторных ионов, оказывается весьма невысокой, а выбор материала ZBLANP:Yb<sup>3+</sup> для проведения экспериментов был обусловлен не столько особенностями спектроскопических характеристик оптоволокна, сколько развитостью технологии его получения. В то же время ряд работ свидетельствует, что предельная эффективность охлаждения в других активированных материалах может быть существенно большей [2].

Цель данной работы — проведение оценки перспективности использования некоторых фторидных кристаллов, активированных трехвалентными ионами иттербия и туллия, в качестве охлаждающего элемента оптического рефрижератора.

## 2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

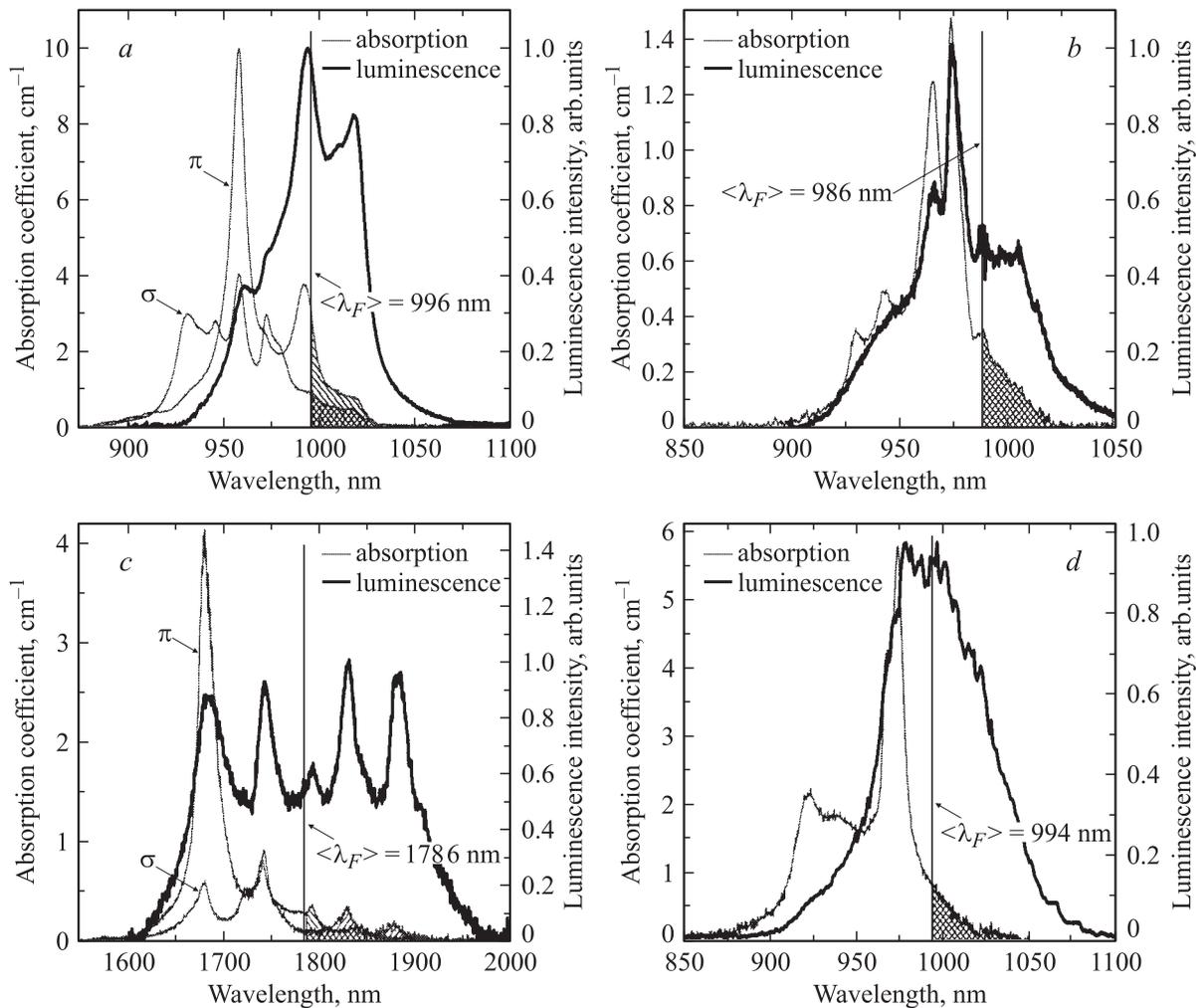
В соответствии с ранее опубликованными работами [1–4], эффективность оптического охлаждения (ЭОО) при заданной температуре образца  $T$  определяется формулой

$$\frac{P_{\text{cool}}}{P_{\text{inc}}} = \eta(T) [1 - \exp(-\alpha(\lambda, T)L)] \frac{\lambda - \langle \lambda_F \rangle(T)}{\langle \lambda_F \rangle(T)}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{cool}}$  — мощность охлаждения,  $P_{\text{inc}}$  — мощность излучения накачки,  $\eta$  — квантовый выход люминесценции,  $L$  — длина образца и  $\alpha(\lambda)$  — коэффициент поглощения образца на длине волны излучения накачки  $\lambda$ . Величина  $\langle \lambda \rangle$  в формуле (1) имеет смысл средневзвешенной длины волны люминесценции, которая может быть оценена из спектров люминесценции образцов  $I_F(\lambda)$  по формуле (2)

$$\langle \lambda_F \rangle = \frac{\int \lambda I_F(\lambda) d\lambda}{\int I_F(\lambda) d\lambda}. \quad (2)$$

В случае возбуждения образцов излучением с длиной волны, большей  $\langle \lambda_F \rangle$ , энергия излученных квантов люминесценции в среднем будет превышать поглощенную энергию квантов накачки (антистоксовая люминесценция), что может привести к охлаждению образца. Как следует из формулы (1), ЭОО будет тем больше, чем меньше стоксов сдвиг спектра люминесценции относительно спектра поглощения или, другими словами, чем больше площадь антистоксового крыла спектра поглощения, ограниченного со стороны коротких длин волн средневзвешенной длиной волны люминесценции  $\langle \lambda_F \rangle$ , выше квантовый выход и больше доля поглощенного образцом излучения возбуждения. Очевидно, что понижение температуры вызовет изменения квантового выхода



**Рис. 1.** Спектры поглощения и люминесценции для оптимальных концентраций активных ионов в кристаллах. *a* —  $\text{LiLuF}_4:\text{Yb}^{3+}$  ( $c = 10\%$ ), *b* —  $\text{KY}_3\text{F}_{10}:\text{Yb}^{3+}$  ( $c = 5\%$ ), *c* —  $\text{LiYF}_4:\text{Tm}^{3+}$  ( $c = 4\%$ ), *d* —  $\text{N}_4\text{Y}_6\text{F}_{22}:\text{Yb}^{3+}$  ( $c = 5\%$ ).

и трансформацию спектров поглощения и люминесценции, что в свою очередь обусловит различные зависимости ЭОО от температуры для различных образцов. В проведенных экспериментах ЭОО оценивалась при комнатной температуре. Следует также обратить особое внимание, что формула (1) позволяет оценить лишь максимально возможную эффективность ОО для данного материала, которая на практике может быть значительно меньше из-за наличия в образцах посторонних примесей, приводящих к дополнительному тепловыделению. Кроме этого, к дополнительному тепловыделению будут приводить эффекты перепоглощения люминесценции и пленения возбуждения, которых также следует избегать.

С учетом указанного выше, в качестве объектов исследования были выбраны известные кристаллические лазерные среды, технология получения которых хорошо отработана [5–7]. Образцы для исследований с химическим составом  $\text{KY}_3\text{F}_{10}:\text{Yb}^{3+}$  (KYF:Yb),  $\text{N}_4\text{Y}_6\text{F}_{22}:\text{Yb}^{3+}$  (NYF:Yb),  $\text{LiLuF}_4:\text{Yb}^{3+}$  (LLF:Yb) и  $\text{LiYF}_4:\text{Tm}^{3+}$  (YLF:Tm) были выращены в лаборатории

роста кристаллов Казанского государственного университета. Для установления оптимальной концентрации активаторных ионов с точки зрения достижения максимальной ЭОО, содержание ионов  $\text{Yb}^{3+}$  и  $\text{Tm}^{3+}$  в образцах варьировалось от 0.5 до нескольких десятков атомных процентов. Регистрация спектров поглощения и люминесценции образцов в области переходов  ${}^2F_{7/2} \rightarrow {}^2F_{5/2}$  ионов  $\text{Yb}^{3+}$  и  ${}^3H_6 \rightarrow {}^3F_4$  ионов  $\text{Tm}^{3+}$  осуществлялась на сканирующем спектрометре на основе монохроматора МДР-23. Возбуждение люминесценции образцов, активированных ионами  $\text{Yb}^{3+}$  и  $\text{Tm}^{3+}$ , осуществлялось соответственно излучением галогенной лампы накаливания или излучением третьей гармоники YAG:Nd лазера. Зарегистрированные спектры приведены на рис. 1. Из рис. 1, *a* и *c* видно, что для анизотропных кристаллов с точки зрения получения максимальной ЭОО следует использовать  $\pi$ -поляризованное излучение накачки.

Также были исследованы кинетики люминесценции образцов при комнатной и азотной температурах. По результатам этих исследований было установлено, что

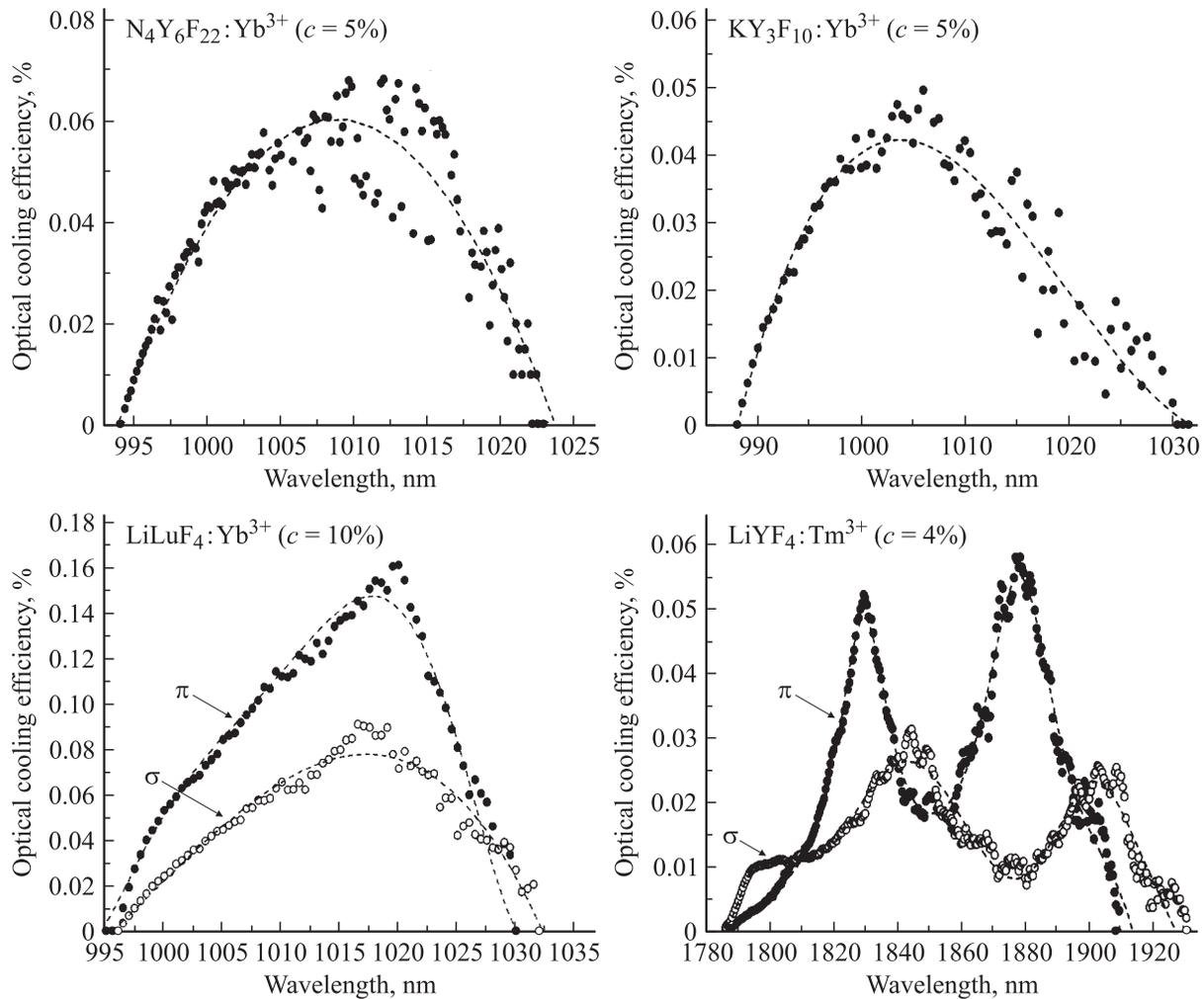


Рис. 2. Эффективность оптического охлаждения для оптимальных концентраций ионов  $\text{Yb}^{3+}$  и  $\text{Tm}^{3+}$  в исследуемых кристаллах.

в кристаллах LLF:Yb и YLF:Tm квантовый выход падает с ростом концентрации  $\text{Yb}^{3+}$  и  $\text{Tm}^{3+}$ . Напротив, время жизни люминесценции Yb в NYF растет с концентрацией из-за эффекта пленения возбуждения. Таким образом, оптимальные с точки зрения ЭОО концентрации ионов  $\text{Yb}^{3+}$  составили для кристаллов LLF 10 at.%, KYF и NYF — 5 at.%, а ионов  $\text{Tm}^{3+}$  в кристалле YLF — 4 at.%.

Результаты численных оценок эффективности охлаждения для оптимальных концентраций  $\text{Yb}^{3+}$  и  $\text{Tm}^{3+}$  приведены на рис. 2. Расчет показал, что среди исследованных кристаллических сред, активированных ионами  $\text{Yb}^{3+}$ , максимальную ЭОО (около 0.16%) должен иметь кристалл LLF:Yb<sup>3+</sup> при возбуждении его  $\pi$ -поляризованным излучением в области длин волн 1018–1030 nm. Для кристаллов NYF:Yb и KYF:Yb эффективность охлаждения не превышает 0.05% и достигает максимума при возбуждении образцов соответственно в области длин волн 1005–1017 и 1002–1008 nm. Значительно большую эффективность ЭОО по сравнению с ранее изученными иттербий-содержащими об-

разцами имеет кристалл YLF, активированный ионами  $\text{Tm}^{3+}$ . Ожидаемая ЭОО в этом кристалле достигает значений 0.55 и 0.3% при возбуждении образца соответственно  $\pi$ - и  $\sigma$ -поляризованным излучением накачки.

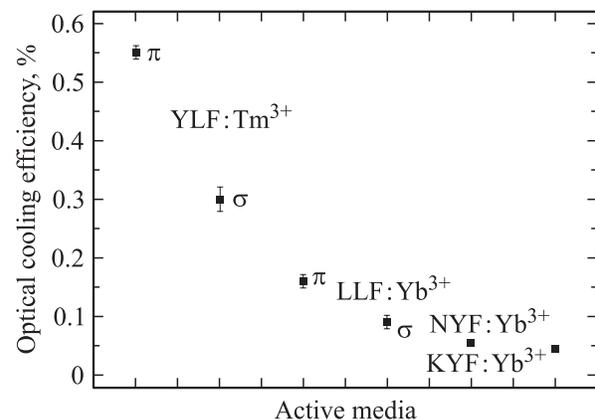


Рис. 3. Эффективность оптического охлаждения в исследованных кристаллических средах.

Таким образом, ЭОО для исследованных фторидных кристаллов, активированных ионами  $\text{Yb}^{3+}$  и  $\text{Tm}^{3+}$ , более чем вдвое превышает ЭОО для упомянутого выше стекла ZBLANP [4], рассчитанную по той же методике, что и для образцов, исследованных в настоящей работе. Кроме того, по результатам наших исследований установлено, что эффективность охлаждения в кристаллах с высокой степенью упорядоченности (YLF и LLF) существенно выше по сравнению с разупорядоченными, стеклоподобными материалами (KYF и NYF) (рис. 3).

### 3. Заключение

В результате экспериментально продемонстрирована перспективность использования фторидных кристаллов, активированных ионами  $\text{Yb}^{3+}$  и  $\text{Tm}^{3+}$ , в качестве охлаждающихся элементов оптического рефрижератора. Показано, что предельная эффективность охлаждения этих кристаллов, определяемая по спектрам поглощения и люминесценции исследованных образцов, превышает аналогичную эффективность известных сред, на которых эффект лазерного охлаждения уже продемонстрирован на практике. Определены оптимальные, с точки зрения достижения эффекта лазерного охлаждения, условия возбуждения исследованных образцов. Установлено, что эффективность охлаждения зависит от степени упорядоченности активной среды.

### Список литературы

- [1] G. Lei, J.E. Anderson, M.I. Buchwald, B.C. Edwards, R.I. Epstein, M.T. Murtagh, G.H. Sigel. *IEEE J. Of Quant. Electr.*, **34**, 10, 1839 (1998).
- [2] S.R. Bowman, C.E. Mungan. *Appl. Phys. B* **71**, 1 (2000).
- [3] C.W. Hoyt, M. Sheik-Bahae, R.I. Epstein, B.C. Edwards, J.E. Anderson. *Phys. Rev. Lett.* **85**, 17, 3600 (2000).
- [4] C.E. Mungan, M.I. Buchwald, B.C. Edwards, R.I. Epstein, T.R. Gosnell. *Mat. Sci. Forum* **239-241**, 501 (1997).
- [5] W.F. Krupke. *IEEE J. Selected Topics Quant. Electr.*, **6**, 6, 1287 (2000).
- [6] V.V. Semashko, M.A. Dubinskii, R.Yu. Abdulsabirov, S.L. Korableva, A.K. Naumov, A.S. Nizamutdinov, M.S. Zhuchkov. *SPIE Proc.* **4766**, 17, 119 (2001).
- [7] V.V. Semashko, M.A. Dubinskii, R.Yu. Abdulsabirov, A.K. Naumov, S.L. Korableva, P. Misra, C. Haridas. *Proc. of the Inter. Conf. on LASERS 2000*. STS Press, McLean, VA (2001). P. 675.