

# Импульсная и непрерывная генерация на новом лазерном кристалле $\text{Cr}^{3+} : \text{Li} : \text{Mg}_2\text{SiO}_4$

А.В.Гайстер, Е.В.Жариков, В.Ф.Лебедев, А.С.Подставкин,  
С.Ю.Теняков, А.В.Шестаков, И.А.Щербаков

*Впервые получена генерация на ионах  $\text{Cr}^{3+}$  в кристалле форстерита  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ , дополнительно легированном ионами лития, в импульсном и непрерывном режимах. В импульсном режиме перестраиваемая по длине волны генерация реализована в спектральном диапазоне 1030–1180 нм.*

**Ключевые слова:** новые активные среды, перестраиваемая лазерная генерация.

До настоящего времени легированные хромом кристаллы форстерита  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  были известны как активная среда перестраиваемых лазеров ближнего ИК диапазона с рабочими ионами  $\text{Cr}^{4+}$  [1, 2]. Перестраиваемая по длине волны генерация в импульсном и непрерывном режимах была получена в диапазонах 1173–1338 нм и 1236–1300 нм соответственно (см., напр., [3]). Поскольку в кристаллах форстерита ионы хрома в основном находятся в трехвалентном состоянии [4], неоднократно высказывались предположения о желательности использования их в качестве активных ионов [5–8]. Необходимая в этом случае зарядовая компенсация обеспечивается введением примеси ионов лития. Полученные в [5–8] при исследовании спектрально-люминесцентных свойств кристаллов  $\text{Cr}^{3+} : \text{Li} : \text{Mg}_2\text{SiO}_4$  противоречивые результаты не позволили ни в одной из указанных работ дать правильную интерпретацию влияния ионов лития на интенсивность, форму и спектральное положение полос люминесценции ионов  $\text{Cr}^{3+}$ .

В результате исследований, проведенных нами в [9, 10], было обнаружено, что спектрально-люминесцентные свойства кристаллов  $\text{Cr}^{3+} : \text{Li} : \text{Mg}_2\text{SiO}_4$  определяются суперпозицией спектров, принадлежащих хорошо известным центрам  $\text{Cr}^{3+}$  и новым комплексным центрам, обозначенным нами как  $\text{Cr}^{3+}(\text{Li}^+)$  и образующимся при локализации ионов  $\text{Li}^+$  вблизи ионов  $\text{Cr}^{3+}$ . Принято считать, что оба эти центра связаны с ионами хрома, замещающими магниевые позиции с зеркальной симметрией  $M_2$  в структуре форстерита [1, 8]. При концентрации лития в кристалле больше некоторого значения спектральные свойства ионов трехвалентного хрома определяются только центрами  $\text{Cr}^{3+}(\text{Li}^+)$ , причем их концентрация существенно выше концентрации исходных центров  $\text{Cr}^{3+}$ . Энергия перехода  ${}^4A_2 - {}^4T_2$  для центров  $\text{Cr}^{3+}(\text{Li}^+)$ , по сравнению с центром  $\text{Cr}^{3+}$ , уменьшается от  $14705 \text{ см}^{-1}$  ( $\lambda_{\text{max}} \sim 680 \text{ нм}$ ) до  $\sim 14286 \text{ см}^{-1}$  ( $\lambda_{\text{max}} \sim 700$

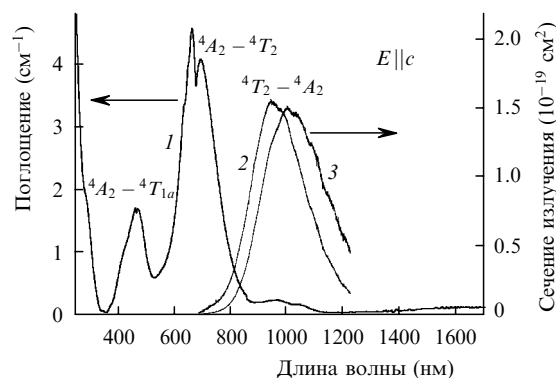


Рис.1. Спектры поглощения (1) и люминесценции (в отн. ед.) (2), а также сечение излучения (3) для поляризации  $E \parallel c$ .

нм). Максимум полосы люминесценции центров  $\text{Cr}^{3+}(\text{Li}^+)$  сдвинут в длинноволновую область ( $\lambda_{\text{max}} \sim 950 \text{ нм}$ ) по сравнению с исходными центрами  $\text{Cr}^{3+}$  ( $\lambda_{\text{max}} \sim 890 \text{ нм}$ ) и имеет большую ширину, равную  $\Delta\lambda = 240 \text{ нм}$ , в то время как для центров  $\text{Cr}^{3+}$   $\Delta\lambda = 200 \text{ нм}$ . Присутствие в образцах лития существенно снижает также и концентрацию ионов  $\text{Cr}^{2+}$ , влияющих на величину паразитного поглощения в полосе люминесценции ионов  $\text{Cr}^{3+}(\text{Li}^+)$ . Таким образом, проведенные исследования показали принципиальную возможность создания на основе кристаллов  $\text{Cr}^{3+} : \text{Li} : \text{Mg}_2\text{SiO}_4$  лазера с перестройкой длины волны в области 1 мкм [9, 10].

В настоящей работе использовались сильнолегированные хромом и литием кристаллы, выращенные методом Чохральского в инертной атмосфере (100% Ar). Максимальное поглощение в полосе, соответствующей переходу  ${}^4A_2 - {}^4T_2$ , составило  $\sim 4.2 \text{ см}^{-1}$  (поляризация  $E \parallel c$  в установке Pbnm, рис.1). В полосе генерации присутствовало остаточное паразитное поглощение, принадлежащее ионам  $\text{Cr}^{2+}$  и  $\text{Cr}^{4+}$ . На рис.1 также представлены спектр люминесценции ионов  $\text{Cr}^{3+}(\text{Li}^+)$  и сечение вынужденного излучения  $\sigma_{\text{em}}(\lambda)$ , рассчитанное по методу Фехтбауэра–Ладенбурга [3]. Видно, что перестраиваемая генерация возможна в спектральном диапазоне 900–1200 нм, а максимум сечения перехода при  $\lambda \approx 1000 \text{ нм}$  составил  $\sigma_{\text{em}}^{\text{max}} = 1.55 \times 10^{-19} \text{ см}^2$ .

В экспериментах по исследованию насыщения пропускания кристалла и в экспериментах по импульсной генерации для накачки использовался одномодовый твер-

А.В.Гайстер, Е.В.Жариков, И.А.Щербаков. Научный центр лазерных материалов и технологий Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

В.Ф.Лебедев, С.Ю.Теняков. Научный центр волоконной оптики при Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: vfeb@fo.gpi.ru

А.С.Подставкин, А.В.Шестаков. Научно-производственный центр «ЭЛС-94», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3

Поступило в редакцию 5 июля 2004 г.

дотельный лазер на александрите ( $\text{Cr}^{3+} : \text{BeAl}_2\text{O}_4$ ), работавший в режиме модуляции добротности. Длительность импульса излучения составляла  $\sim 400$  нс при максимальной энергии до 5 мДж и частоте повторения импульсов 1–15 Гц.

Насыщения пропускания кристалла на длине волны накачки  $\lambda_p = 750$  нм в диапазоне плотностей энергий в пучке, не приводящих к повреждению кристалла ( $\sim 0 - 5$  Дж/см<sup>2</sup>), не наблюдалось, и поэтому оценка сечения поглощения была сделана без учета поглощения из возбужденного состояния с помощью известного выражения Франца – Нодвика [11]. В результате аппроксимации экспериментальных данных получены следующие оценки значений сечения поглощения из основного состояния и концентрации ионов  $\text{Cr}^{3+}(\text{Li}^+)$ :  $\sigma_{gs} = (5.32 \pm 0.82) \times 10^{-20}$  см<sup>2</sup>,  $N = (4.8 \pm 0.37) \times 10^{19}$  см<sup>-3</sup>.

Свободная генерация лазера на  $\text{Cr}^{3+} : \text{Li} : \text{Mg}_2\text{SiO}_4$  с длиной волны излучения 1121 нм была реализована в схеме с полуконфокальным резонатором. Поглощенная кристаллом энергия накачки ( $\lambda_p = 750$  нм) составляла 75 % от энергии падающего на кристалл излучения с поляризацией  $E \parallel c$ . Плоскопараллельные торцы кристалла, через которые вводилось излучение лазера накачки, имели просветляющие покрытия в диапазоне длин волн генерации. При выходном зеркале с коэффициентом пропускания  $T = 2.15$  % пороговая плотность энергии накачки составила  $\sim 0.8$  Дж/см<sup>2</sup>, а для зеркала с пропусканием 6.3 % – 1.3 Дж/см<sup>2</sup>. Поскольку пороговая энергия накачки прямо пропорциональна суммарным потерям в резонаторе, то величина пассивных потерь в нашем случае составляла  $L_{th} = 4$  %.

Лазерная генерация, перестраиваемая по длине волны в диапазоне 1030–1180 нм, имела максимум интенсивности в окрестности  $\lambda = 1100$  нм и наблюдалась в резонаторе с плоскими зеркалами и диспергирующим элементом в виде призмы. Выходное зеркало имело коэффициент пропускания, плавно менявшийся от 1.4 % на длине волны 1000 нм до 4 % на длине волны 1200 нм.

Эксперименты по непрерывной генерации проводились в схеме с конфокальным резонатором и непрерывным  $\text{Ag}^+$ -лазером (Spectra Physics 2030) в качестве лазера накачки. Кристалл термостатировался при 12 °С. При работе лазера на всех длинах волн диапазона 457.9 – 514.5 нм и поляризации излучения  $E \parallel b$  измеренное поглощение в кристалле, соответствующее переходу  $^4A_2 - ^4T_{1a}$ , составило  $\sim 60$  % от падающей мощности.

На рис.2 показаны зависимости выходной мощности лазера на кристалле  $\text{Cr}^{3+} : \text{Li} : \text{Mg}_2\text{SiO}_4$  от поглощенной мощности накачки для трех значений пропускания  $T$  выходного зеркала. Полученные в результате анализа экспериментальных зависимостей рис.2 значения пороговых мощностей накачки ( $P_{th}$ ) и дифференциального КПД ( $\eta$ ) приведены в табл.1. В таблице также представлены измеренные значения длин волн излучения исследуемого лазера  $\lambda_{out}$  и пороговой интенсивности накачки  $I_{th}$  для расчетного значения сечения перетяжки пучка накачки ( $s = 0.38 \times 10^{-4}$  см<sup>2</sup>). Пассивные потери в кристалле оценивались с помощью выражения  $1/\eta = 1/\eta_0(1 + L_\eta/T)$  [12]. В результате аппроксимации экспериментальных данных линейной зависимостью  $1/\eta(1/T)$  было получено близкое к определенному выше в эксперимен-

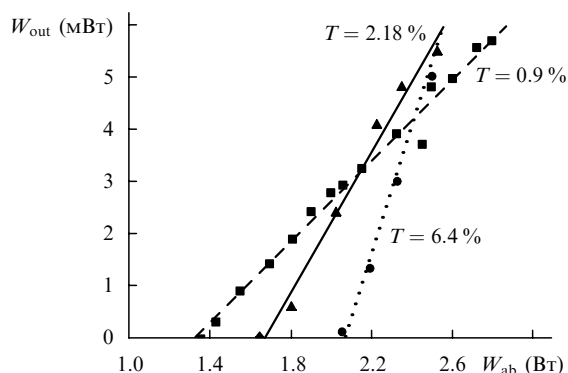


Рис.2. Зависимости выходной мощности излучения лазера от поглощенной мощности накачки для различных значений коэффициента пропускания выходного зеркала.

Табл.1. Характеристики непрерывного лазера на  $\text{Cr}^{3+} : \text{Li} : \text{Mg}_2\text{SiO}_4$ .

$T$ (%)	$P_{th}$ (Вт)	$\eta$ (%)	$\lambda_{th}$ (нм)	$I_{th}$ (кВт/см <sup>2</sup> )	$L_\eta$ (%)
0.9	1.325	0.38	1140	35	3.7
2.18	1.665	0.7	1130	44	
6.4	2.07	1.27	1120	54	

тах по импульсной генерации значение пассивных потерь  $L_\eta = 3.7$  %.

Таким образом, впервые получена импульсная и непрерывная генерация на кристаллах форстерита с активным ионом  $\text{Cr}^{3+}$  в новом для перестраиваемых твердотельных лазеров спектральном диапазоне (1030–1180 нм). Диапазон перестройки излучения в импульсном режиме составил  $\Delta\lambda = 150$  нм, что сравнимо с диапазоном перестройки лазера на форстерите с активными ионами  $\text{Cr}^{4+}$  ( $\Delta\lambda = 165$  нм [3]). Расширение диапазона перестройки и увеличение эффективности лазерной генерации возможно при снижении уровня паразитного поглощения в полосе генерации, снижении пассивных потерь в активном элементе, оптимизации длины волны накачки и параметров резонатора.

- Petricevic V., Gayen S.K., Alfano R.R. *Appl. Phys. Lett.*, **53**, 2590 (1988).
- Verdun H.R., Thomas L.M., Andrauskas D.M., McCollum T. *Appl. Phys. Lett.*, **53**, 2593 (1988).
- Kueck S. *Appl. Phys. B*, **72**, 515 (2001).
- Mass J.L., Burlitch J.M., Markgraf S.A., Higuchi M., Dieckman R., Barber D.B., Pollock C.R. *J. Cryst. Growth*, **165**, 250 (1996).
- Nishide N., Segawa Y., Kim P.H., Namba S., Masuyama A. *Resa Kagaku Kenkyu*, **7**, 89 (1985).
- Nishide N., Segawa Y., Kim P.H., Namba S. *Resa Kagaku Kenkyu*, **8**, 97 (1986).
- Скрипко Г.А., Матросов В.Н., Дворников С.С., Золотарева Л.Е. *Оптика и спектроскопия*, **68** (1), 228 (1990).
- Sugimoto A., Nobe Y., Yamazaki T., Yamaguchi Y., Yamagishi K., Segawa Y., Takei H. *Phys. Chem. Miner.*, **24**, 333 (1997).
- Lebedev V.F., Gaister A.V., Tenyakov S.Yu., Zharikov E.V. *Proc. CLEO/Europe-2003* (Munich, Germany, 2003, vol. 27E, CG4-6WED).
- Lebedev V.F., Gaister A.V., Tenyakov S.Yu., Zharikov E.V. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5478**, 37 (2004).
- Lipavsky B., Kalisky Y., Burshtein Z., Shimony Y., Rotman S. *Opt. Mater.*, **13**, 117 (1999).
- Caird A., Payne S.A., Staver P.R., Ramponi A.J., Chase L.L., Kupke W.F. *IEEE J. Quantum Electron.*, **24** (6), 1077 (1988).