

# Термооптические свойства, модуляция добротности и перестройка частоты излучения Nd:LGGG-лазера на переходе ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ иона неодима\*

Шан Гао, Вей Ван

*Исследованы характеристики Nd:LGGG-лазеров в непрерывном режиме и в режиме модуляции добротности на переходе  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  иона неодима. Подробно исследованы лазерные спектры в указанных режимах генерации. Согласно оценке, термооптический коэффициент кристалла Nd:LGGG на длине волны 1.33 мкм составил  $15.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Путем внесения в резонатор кварцевой пластины, наклоненной под углом Брюстера, осуществлена перестройка частоты излучения Nd:LGGG-лазера. В непрерывном режиме максимальная выходная мощность была равна 802 мВт с дифференциальным КПД 13.2%. В режиме модуляции добротности минимальная длительность импульса 9.75 нс получена при средней выходной мощности 176 мВт и частоте следования импульсов 8 кГц. Максимальная энергия импульса составила 25.4 мкДж, наибольшая пиковая мощность – 2 и 4 кВт.*

**Ключевые слова:** модуляция добротности, разупорядоченный кристалл Nd:LGGG, перестраиваемый лазер.

## 1. Введение

Твердотельные лазеры с диодной накачкой привлекают внимание своей простотой, высокой эффективностью и дешевизной. Такие лазеры, излучающие на длине волны  $\lambda = 1.3$  мкм, широко применяются в спектроскопии, микрообработке материалов, оптической связи и дистанционном зондировании. Более того, гармоники излучения на  $\lambda = 1.3$  мкм можно использовать в устройствах изображения, в лазерной терапии и биомедицинских приложениях. Кристаллы, легированные неодимом, показали себя отличными активными средами для лазеров, излучающих вблизи длины волны 1.3 мкм. Среди этих сред важную роль играет кристалл Nd:YAG [1, 2]. Альтернативными активными средами для лазеров этого спектрального диапазона являются кристаллы ванадатов, легированные неодимом [3–5]. Спектральные линии ионов неодима в легированных неодимом разупорядоченных кристаллах неоднородно уширены, а сами кристаллы сочетают спектральные и термофизические достоинства неодимовых стекол и упорядоченных кристаллов. Этим и объясняется значительный интерес, вызванный в последние годы легированными неодимом разупорядоченными кристаллами. По сравнению с наиболее распространенным кристаллом граната Nd:YAG кристалл Nd:LGGG, по структуре относящийся к той же пространственной группе и имеющий превосходные физико-химические характеристики, обладает широкой полосой излучения благодаря структурной разупорядоченности

из-за примеси  $\text{Lu}^{3+}$  [6, 7]. В связи с этим кристалл Nd:LGGG рассматривается как перспективный для эффективной лазерной генерации на  $\lambda = 1.3$  мкм.

Лазеры с пассивной модуляцией добротности могут генерировать короткие импульсы с малой длительностью и высокой пиковой мощностью. До настоящего времени для модуляции добротности в лазерах на  $\lambda = 1.3$  мкм используются несколько насыщающихся поглотителей, таких как кристалл  $\text{Co}^{2+}:\text{LMA}$  [8, 9], полупроводниковое зеркало с насыщающимся поглощением (semiconductor saturable absorber mirror, SESAM) [10], кристалл V:YAG [3–5, 9, 11], а также некоторые наноматериалы [12–16]. Эксперименты показали, что при модуляции добротности с помощью кристалла  $\text{Co}^{2+}:\text{LMA}$  импульсы получаются сравнительно длинными, а пиковая мощность – низкой. Использование SESAM усложняет проектирование и изготовление лазеров, тем самым ограничивая их применение. Низкоразмерные наноматериалы имеют недостаточную долговременную стабильность. По сравнению с другими кристаллами, V:YAG является лучшим насыщающимся поглотителем на  $\lambda = 1.3$  мкм благодаря превосходным физическим и оптическим характеристикам, таким как большое сечение поглощения иона неодима в основном состоянии ( $\sigma_g = 7.2 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ ), малая плотность энергии насыщения ( $\sim 0.05 \text{ Дж/см}^2$ ), высокий порог повреждения и низкое остаточное поглощение на длине волны 1.3 мкм [17]. В 2012 г. S.Liu и др. сообщили о создании Nd:LGGG-лазера с пассивной модуляцией добротности на основе насыщающегося поглотителя V:YAG на  $\lambda = 1330 \text{ нм}$  [18]. Однако о некоторых важных характеристиках Nd:LGGG-лазера на переходе иона неодима  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ , таких как спектр генерации, термооптический коэффициент и область перестройки, до сих пор не сообщалось.

В настоящей работе детально исследованы характеристики непрерывного Nd:LGGG-лазера и лазера в режиме модуляции добротности.

\* Перевод с англ. В.Л.Дербова.

Shang Gao, Wei Wang, School of Science, Shandong Jiaotong University, Jinan, 250357, China; e-mail: wwangsl@sdjtu.edu.cn

Поступила в редакцию 8 сентября 2010 г., после доработки – 9 ноября 2020 г.

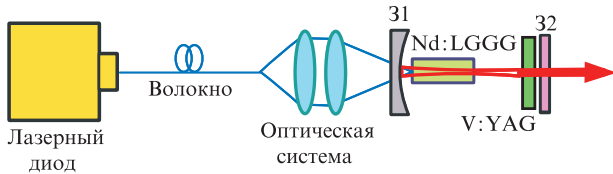


Рис.1. Схема установки для изучения характеристик генерации Nd:LGGG-лазера на переходе иона неодиима  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ .

## 2. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки для исследования генерации Nd:LGGG-лазера в непрерывном режиме и в режиме модуляции добротности приведена на рис.1. Источником накачки служил лазерный диод FAP-I system (Coherent Inc., США) с центральной длиной волны излучения 808 нм, которое передавалось по оптическому волокну. Пучок накачки коллимировался и фокусировался оптической системой внутри кристалла Nd:LGGG в пятно диаметром 400 мкм. Кристалл Nd:LGGG был выращен методом Чохральского и имел примесь 1 ат.% ионов неодиима. Срез  $\langle 111 \rangle$  кристалла Nd:LGGG с размерами  $4 \times 4 \times 3.8$  мм был обернут тонким слоем фольги из индия и установлен на медный держатель для поддержания температуры 18 °С. Использовался обычный плосковогнутый резонатор, образованный двумя зеркалами – вогнутым зеркалом 31 с радиусом кривизны 200 мм и покрытием, обеспечивающим большое отражение на длине волны 1330 нм ( $R > 99.5\%$ ) и большое пропускание на длинах волн 808 и 1064 нм ( $T = 90\%$ ), и выходным зеркалом связи 32. Это плоское зеркало с пропусканием  $T = 5\%$  на длине волны 1330 нм и большим пропусканием на  $\lambda = 1064$  нм ( $T > 90\%$ ) для подавления генерации на этой длине волны. Кристалл V:YAG с антиотражающим покрытием на  $\lambda = 1330$  нм ( $R < 0.2\%$ ) и пропусканием слабого сигнала 90% использовался в качестве пассивного модулятора добротности. Полная длина резонатора лазера составляла  $\sim 25$  мм. Для измерения выходной мощности лазера и спектра его генерации использовались измеритель мощности MAX 500AD (Coherent Inc., США), цифровой осциллограф с люминофором DPO 7104C (Tektronix Inc., США) с шириной полосы 1 ГГц и частотой дискретизации 20 ГГц, быстродействующий InGaAs-фотоприемник (New Focus 1611) с постоянной времени  $\sim 0.4$  нс и лазерный спектрометр WaveScan (APE GmbH, Германия) с разрешением 0.5 нм.

## 3. Результаты и их обсуждение

На рис.2 представлены зависимости средней выходной мощности лазера от мощности излучения накачки. Пороговые значения последней для непрерывного режима и режима модуляции добротности составляют примерно 0.82 и 3.41 Вт соответственно. В непрерывном режиме максимальная выходная мощность 802 мВт была получена при мощности излучения накачки 7.09 Вт с дифференциальным КПД  $\eta = 13.2\%$ . При модуляции добротности максимальная средняя выходная мощность составляла 176 мВт. Следует отметить, что в непрерывном режиме выходная мощность убывала при превышении мощности накачки 7.09 Вт. Возможная причина этого связана с эффектом тепловой линзы, возникающей в кристалле Nd:LGGG. Хорошо известно, что этот эффект на  $\lambda = 1.3$  мкм значительно больше, чем на 1.06 мкм, из-за

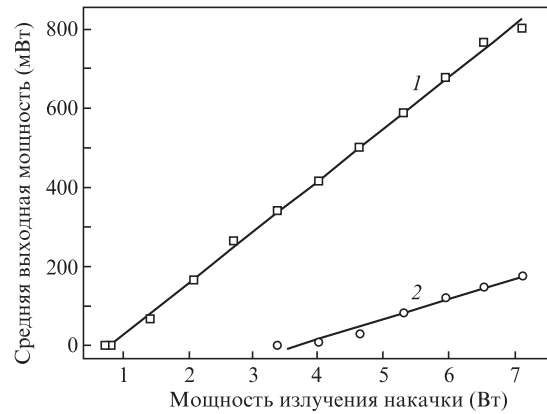


Рис.2. Зависимости средней выходной мощности в непрерывном режиме,  $\eta = 13.2\%$  (1), и в режиме модуляции добротности,  $\eta = 5.1\%$  (2), от мощности излучения накачки.

большого квантового дефекта, а также сильного поглощения излучения на  $\lambda = 1.3$  мкм возбужденными состояниями иона неодиима.

Поскольку выходная мощность убывала при мощности накачки свыше 7.09 Вт, мы предположили, что лазерный резонатор становился неустойчивым в случае превышения этого уровня накачки из-за эффекта тепловой линзы в активной среде. С помощью обычного метода матрицы ABCD мы оценили фокусное расстояние линзы, наведенной в активной среде при мощности накачки 7.09 Вт, примерно в 26 мм. Фокусное расстояние тепловой линзы связано с мощностью излучения накачки  $P_{in}$  соотношением [19, 20]

$$f = \frac{\pi K_c w_p^2}{\xi P_{in} (dn/dT) [1 - \exp(-\alpha l)]}, \quad (1)$$

где  $K_c = 9.66$  Вт/мК [7] – теплопроводность кристалла;  $w_p$  – средний радиус пучка излучения накачки в Nd:LGGG;  $\xi$  – доля тепловой нагрузки ( $\sim 39.3\%$ );  $\alpha = 5.76$  см $^{-1}$  – измеренный коэффициент поглощения;  $l$  – длина кристалла Nd:LGGG. Отсюда термооптический коэффициент  $dn/dT$  для кристалла Nd:LGGG на длине волны 1.33 мкм получается равным  $\sim 15.3 \times 10^{-6}$  K $^{-1}$ , что согласуется с его значением для кристалла Nd:GGG ( $16.4 \times 10^{-6}$  K $^{-1}$ ) [21].

При мощностях излучения накачки ниже пороговой (0.82 Вт) соответствующее фокусное расстояние составляло  $\sim 224$  мм, тогда как радиус перетяжки пучка  $w_c$  в лазерном резонаторе оценивался в 136 мкм. Пороговая мощность  $P_{th}$  излучения накачки в непрерывном режиме генерации может быть выражена как [22]

$$P_{th} = \frac{\pi h\nu_p (w_p^2 + w_c^2) (T + L)}{4\eta_p \sigma \tau}, \quad (2)$$

где  $h\nu_p$  – энергия фотона накачки;  $\eta_p = 1$  – квантовая эффективность возбуждения;  $L$  – внутренние потери в резонаторе;  $\sigma$  – сечение вынужденного излучения на лазерном переходе;  $\tau = 243$  мкс – излучательное время жизни возбужденного состояния [7];  $T$  – эффективное пропускание для выходного излучения в отсутствие покрытий на гранях кристалла. Сечение вынужденного излучения было оценено в  $4.2 \times 10^{-20}$  см $^2$ , что соответствовало работе [18].

Были детально исследованы спектры генерации. На рис.3 приведено несколько типичных спектров при раз-

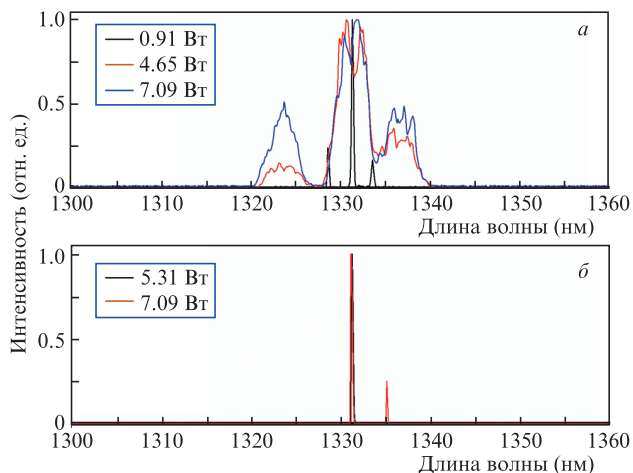


Рис.3. Типичные спектры генерации в непрерывном режиме (а) и в режиме модуляции добротности (б) при различных мощностях излучения накачки. Цветной вариант рис.3 приведен на сайте нашего журнала <http://www.quantum-electron.ru>.

личных мощностях излучения накачки. В непрерывном режиме ширина спектра на уровне половины максимума увеличивалась с ростом мощности накачки, отражая увеличение числа мод, генерируемых в лазерном резонаторе. Когда усиление слабого сигнала превышало потери, в резонаторе лазера становилась возможной генерация. Усиление слабого сигнала зависело от плотности населенностей лазерных уровней, которые определялись интенсивностью накачки. Как показано на рис.3,а, с увеличением мощности накачки усиливается генерация при 1335 и 1323 нм. В режиме модуляции добротности центральный пик спектра находится при 1331.3 нм. Интересно, что при мощности накачки 7.09 Вт, как показано на рис.3,б, наблюдалась генерация на длинах волн 1331.2 и 1335.2 нм. Дальнейшая оптимизация лазерного резонатора позволяет использовать сбалансированную генерацию на двух длинах волн с высокой пиковой мощностью для получения терагерцевого излучения путем генерации разностной частоты. Как показано на рис.3,а, ширина спектра генерации на уровне половины максимума весьма велика, что можно использовать для получения ультракоротких импульсов.

Для Nd:LGGG-лазера, работающего в режиме пассивной модуляции добротности при помощи насыщаемого поглотителя V:YAG, зависимости длительности импульса и частоты следования импульсов от мощности излучения накачки показаны на рис.4; видно, что с ростом мощности накачки длительность импульса убывает. Минимальная длительность 9.75 нс была получена при мощности накачки 7.09 Вт. В то же время частота следования импульсов с ростом мощности накачки увеличивалась. Наибольшая частота составила 8 кГц.

Энергия импульса и пиковая мощность могут быть вычислены по полученным значениям выходной мощности, длительности импульсов и частоты их следования. На рис.5 приведены зависимости энергии импульса и пиковой мощности от мощности излучения накачки. Наибольшая энергия импульса и пиковая мощность на выходе составили около 25.4 мкДж и 2.4 кВт. На рис.6 показаны типичные осциллограммы импульсов, демонстрирующие стабильную работу лазера в режиме модуляции добротности. Видно, что при  $P_{in} = 7.09$  Вт генерируется

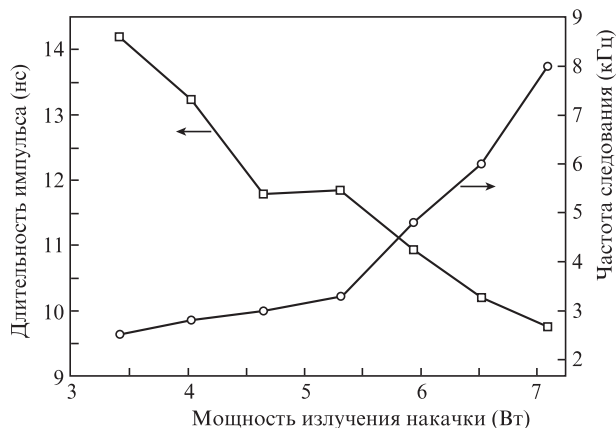


Рис.4. Зависимости длительности и частоты следования импульсов от мощности излучения накачки.

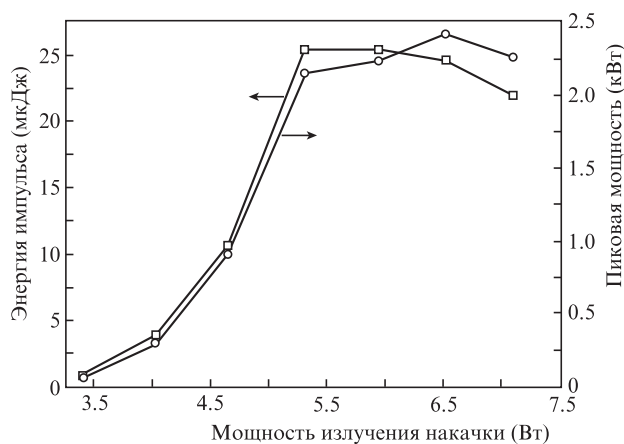


Рис.5. Зависимости энергии и пиковой мощности импульса от мощности излучения накачки.

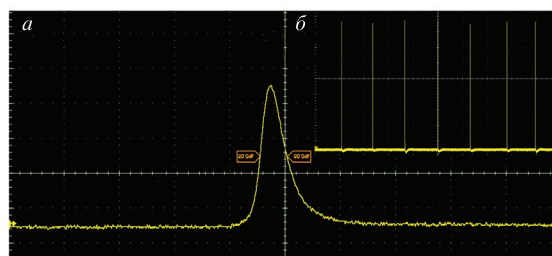


Рис.6. Типичные осциллограммы импульса длительностью 9.75 нс на уровне половины максимума (а) и стабильного цуга импульсов с частотой следования 8 кГц (б);  $P_{in} = 7.09$  Вт.

стабильный цуг импульсов длительностью 9.75 нс с частотой следования 8 кГц.

Для перестройки частоты излучения Nd:LGGG-лазера на переходе  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  иона неодима использовался типичный V-образный резонатор с дополнительным зеркалом, имеющим радиус кривизны 200 мм и покрытие с большим коэффициентом отражения на  $\lambda = 1330$  нм ( $R > 99.5\%$ ). Длины плеч резонатора составляли 155 и 245 мм. В качестве частотного фильтра использовалась кварцевая пластина толщиной 2 мм с оптической осью, лежащей в плоскости входной грани, наклоненная под углом Брюстера. Диапазон перестройки при  $P_{in} = 7.09$  Вт показан на рис.7. Экспериментальные результаты, представленные на рис.7, указывают на возмож-

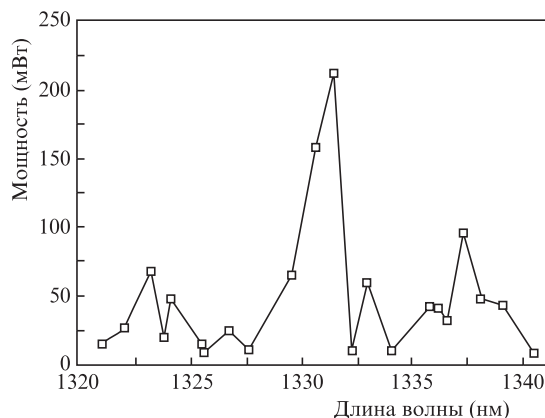


Рис.7. Перестроенная кривая Nd:LGGG-лазера на переходе  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  иона неодима при  $P_{in} = 7.09$  Вт.

ность использования Nd:LGGG-лазера на длине волны  $\sim 1331$  нм для генерации ультракоротких импульсов.

#### 4. Заключение

Исследованы характеристики генерации лазера на переходе  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  иона неодима в разупорядоченном смешанном кристалле Nd:LGGG. В режиме непрерывной генерации получена максимальная выходная мощность 802 мВт с дифференциальным КПД  $\eta = 13.2\%$ . Термооптический коэффициент кристалла Nd:LGGG на  $\lambda = 1.33$  мкм был оценен в  $15.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . В режиме модуляции добротности минимальная длительность импульса составила 9.75 нс при максимальной средней выходной мощности 176 мВт и наибольшей частоте следования импульсов 8 кГц. Кроме того, при мощности излучения накачки 7.09 Вт можно наблюдать генерацию на двух длинах волн – 1331.2 и 1335.2 нм. С использованием кварцевой пластинки толщиной 2 мм в качестве частотного фильтра можно осуществлять перестройку частоты излучения лазера.

Работа поддержана Фондом естественных наук провинции Шаньдун (грант № ZR2020MF102, ZR2017MA040).

- Liu L., Huxley J., Ippen E., Haus H. *Opt. Lett.*, **15**, 553 (1990).
- Hall G., Ferguson A. *Opt. Lett.*, **19**, 557 (1994).
- Liu F., He J., Zhang B., Xu J., Dong X., Yan K., Xia H., Zhang H. *Opt. Express*, **16**, 11759 (2008).
- Yang K., Zhao S., He J., Zhang B., Zuo C., Li G., Li D., Li M. *Opt. Express*, **16**, 20176 (2008).
- Huang H., Zhang B., He J., Yang J., Xu J., Yang X., Zuo C., Zhao S. *Opt. Express*, **17**, 69461 (2009).
- Jia Z., Tao X., Yu H., Dong C., Zhang J., Zhang H., Wang Z., Jiang M. *Opt. Mater.*, **31**, 3469 (2008).
- Fu X., Jia Z., Li Y., Yuan D., Dong C., Tao X. *J. Cryst. Growth*, **353**, 726 (2012).
- Huang H., He J., Zuo C., Zhang H., Wang J., Wang H. *Appl. Phys. B*, **89**, 319 (2007).
- Cheng K., Zhao S., Li Y., Li G., Li D., Yang K., Zhang G., Li X. *J. Opt. Soc. Am. B*, **28**, 149 (2011).
- Fluck R., Braun B., Gini E., Melchior H., Keller U. *Opt. Lett.*, **22**, 991 (1997).
- Li H., Zhang R., Tang Y., Wang S., Xu J., Zhang P., Zhao C., Hang Y., Zhang S. *Opt. Lett.*, **38**, 4425 (2013).
- Pan H., Cao L., Chu H., Wang Y., Zhao S., Li Y., Qi N., Sun Z., Jiang X., Wang R., Zhang H., Li D. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **11**, 48281 (2019).
- Dong L., Li D., Pan H., Li Y., Zhao S., Li G., Chu H. *Appl. Opt.*, **58**, 8194 (2019).
- Chu H., Li Y., Wang C., Zhang H., Li D. *Nanophoton.*, **9**, 761 (2020).
- Dong L., Huang W., Chu H., Li Y., Wang Y., Zhao S., Li G., Zhang H., Li D. *Opt. Laser Technol.*, **128**, 106219 (2020).
- Ca L., Chu H., Pan H., Wang R., Li Y., Zhao S., Li D., Zhang H., Li D. *Opt. Express*, **28**, 31799 (2020).
- Malyarevich A., Denisov I., Yumashev K., Mikhailov V., Conroy R., Sinclair B. *Appl. Phys. B*, **67**, 555 (1998).
- Liu S., Jia Z., He J., Zhang B., Yang X., Liu F., Xu J., Tao X. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **24**, 146 (2012).
- Innocenzi M., Yura H., Fincher C., Fields R. *Appl. Phys. Lett.*, **56**, 18313 (1990).
- Chu H., Zhao S., Yang K., Zhao J., Li D., Li G., Li T., Qiao W., Xu X., Zheng L., Xu J. *Opt. Mater.*, **45**, 181 (2015).
- Wang Z., Huang L., Zhang Q., Zhang G., Sun D., Yin S. *J. Optoelectron. Laser*, **18**, 956 (2007) (in Chinese).
- Jaque D., Capmany J., Sole J., Brenier A., Boulon G. *Appl. Phys. B*, **70**, 11 (2000).