

Импульсная генерация лазера на кристалле кальций-галлий-германиевого граната $\text{Ca}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}:\text{Nd}^{3+}$ с диодной накачкой при пассивной модуляции добротности резонатора

М.И.Беловолов, С.И.Державин, А.Ф.Шаталов

Исследована импульсная генерация твердотельного неодимового лазера на кристалле кальций-галлий-германиевого граната $\text{Ca}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}:\text{Nd}^{3+}$ (CGGG: Nd) с диодной накачкой при пассивной модуляции добротности резонатора. При поглощенной мощности накачки 0.8 Вт энергия импульса генерации равнялась 3.5 мкДж, а его временные параметры – время нарастания, длительность и время спада – составляли соответственно 6, 11 и 13 нс. Частота следования импульсов изменялась в интервале 3–13 кГц при изменении поглощенной мощности накачки от 0.45 до 1 Вт. Показано, что с увеличением поглощенной мощности накачки все временные параметры генерируемого импульса уменьшаются. Измерены коэффициенты чувствительности этих параметров и частоты следования импульсов генерации к изменениям поглощенной мощности накачки и длины резонатора лазера. Проведено сравнение результатов исследования с соответствующими результатами для импульсного YAG: Nd-лазера, работающего в аналогичных условиях.

Ключевые слова: твердотельные лазеры, диодная накачка, пассивная модуляция добротности.

1. Введение

Кристаллы кальций-галлий-германиевого граната, активированные неодимом, $\text{Ca}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}:\text{Nd}^{3+}$ (CGGG: Nd), относятся к перспективным для создания компактных твердотельных лазеров с диодной накачкой материалов, т. к. допускают легирование большими концентрациями ионов неодима Nd^{3+} , имеют практически такую же теплопроводность, как и кристаллы YAG (значительно превышающую теплопроводность лазерных стёкол), а также удачно сочетают привлекательные спектрально-люминесцентные и физико-технологические свойства [1, 2]. Кроме того, наличие у ионов неодима Nd^{3+} в кристаллах CGGG: Nd неоднородно уширенных спектров поглощения и люминесценции облегчает согласование этих спектров со спектрами излучения источников накачки на основе лазерных диодов, а сравнительно широкая линия генерации делает кристаллы CGGG: Nd перспективными для получения коротких лазерных импульсов [3, 4].

В работе [5] получена импульсная генерация лазера на кристалле CGGG: Nd с диодной накачкой при пассивной модуляции добротности резонатора, исследованы зависимости средней мощности генерации лазера, а также энергии и длительности τ_r импульса генерации от поглощенной мощности P накачки. В работе [6] изучена зависимость длительности импульса генерации YVO₄: Nd-лазера с диодной накачкой при пассивной модуляции добротности резонатора от длины L его резонатора. Поскольку в таких лазерах времена нарастания (τ_r) и спада (τ_f) генерируемого импульса сравнимы с временем τ_i [7],

то представляет интерес изучение влияния изменений мощности P и длины L на все временные параметры импульса генерации лазера.

Целью настоящей работы является изучение зависимостей τ_r , τ_i , τ_f и частоты f следования импульсов генерации лазера на кристалле CGGG: Nd с диодной накачкой при пассивной модуляции добротности резонатора от мощности накачки и длины резонатора лазера, а также измерение коэффициентов чувствительности параметров τ_r , τ_i , τ_f и f к изменениям P и L .

2. Эксперимент

Схема экспериментальной установки для исследования импульсной генерации лазера на кристалле CGGG: Nd с диодной накачкой при пассивной модуляции добротности резонатора показана на рис.1. Источником накачки на длине волны $\lambda_p = 805$ нм служил лазерный диод 1 с выходом через оптическое волокно 2 (NA = 0.22, $d_c = 100$ мкм). Ширина спектра излучения накачки на полувысоте составляла 2 нм. Микрообъектив 3

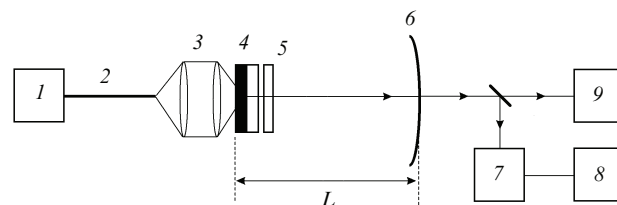


Рис.1. Схема экспериментальной установки для исследования импульсной генерации лазера на кристалле CGGG: Nd с диодной накачкой при пассивной модуляции добротности резонатора:

1 – лазерный диод; 2 – оптическое волокно; 3 – микрообъектив; 4 – лазерный элемент; 5 – насыщающийся поглотитель; 6 – выходное сферическое зеркало; 7 – фотоприемник; 8 – осциллограф; 9 – измеритель мощности.

М.И.Беловолов, А.Ф.Шаталов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: bmi@fo.gpi.ru, shatalov@fo.gpi.ru

С.И.Державин. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова 38

Поступила в редакцию 25 марта 2008 г.

фокусировал излучение из выходного торца волокна 2 на лазерный элемент (ЛЭ) 4 в пятно диаметром 90 мкм. ЛЭ укреплялся на медном теплоотводе с помощью термопасты. Передняя грань (на рис.1 зачернена) – входное зеркало ЛЭ вместе со сферическим зеркалом 6, имеющим коэффициент пропускания $T = 0.01$ и радиус $R = 5$ см, образуют резонатор лазера, длина которого L могла изменяться. В резонатор лазера помещался насыщающийся поглотитель 5, выполненный на кристалле YAG : Cr⁴⁺, просветленный на длине волны 1.06 мкм и имеющий коэффициент пропускания $T = 0.9$ при малых интенсивностях падающего на него излучения. Толщина поглотителя 5 равнялась 1 мм, толщина ЛЭ – 1.5 мм. За один проход в этом ЛЭ поглощалось 80 % излучения накачки. Концентрация ионов неодима в кристалле CGGG : Nd составляла 2.0×10^{20} см⁻³.

В качестве эталонного ЛЭ для сравнения параметров импульсной генерации был выбран кристалл YAG : Nd толщиной 4.1 мм, концентрация ионов неодима Nd³⁺ в котором составляла 0.8×10^{20} см⁻³. При таком выборе эталонного ЛЭ эффективность поглощения им излучения накачки была примерно такой же, как и у ЛЭ на кристалле CGGG : Nd.

Форма и временные параметры лазерных импульсов генерации измерялись с помощью малошумящего широкополосного фотоприёмника 7 и осциллографа 8 (Tektronix TDS 5104). В качестве измерителя мощности 9 использовался Coherent FieldMaster FM с измерительной головкой LM10.

3. Результаты и их обсуждение

Типичный вид одиночного импульса генерации CGGG : Nd-лазера показан на рис.2. Время нарастания (длительность переднего фронта) τ_r импульса определялось как время, за которое сигнал увеличивается от 0.1 до 0.9 от его максимального значения. Длительность τ_i импульса определялась как ширина импульса по уровню 0.5 от его максимального значения, а время спада (длительность заднего фронта) τ_f импульса – как время, за которое сигнал уменьшается от 0.9 до 0.1 от его максимального значения. Типичные значения параметров τ_r , τ_i и τ_f генерируемого CGGG : Nd-лазером импульса составляли соответственно 6, 11 и 13 нс, для YAG : Nd-лазера они были равны 9, 15 и 18 нс.

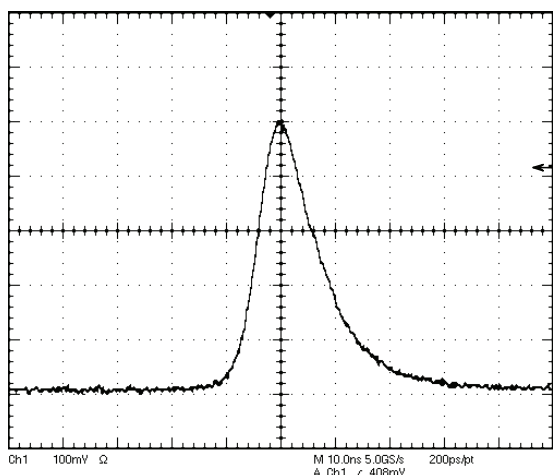


Рис.2. Вид одиночного импульса генерации лазера при $\tau_r = 6$ нс, $\tau_i = 11$ нс и $\tau_f = 13$ нс; временной масштаб $M = 10$ нс/дел.

3.1. Зависимость энергии и частоты следования импульсов генерации лазера от поглощенной мощности накачки

На рис.3 показаны зависимости энергии E и частоты f следования импульсов генерации CGGG : Nd- и YAG : Nd-лазеров от поглощенной мощности P накачки. Видно, что у CGGG : Nd-лазера при изменении поглощенной мощности от 0.45 до 1 Вт частота следования импульсов изменяется от 3 до 13 кГц. Полученную зависимость f от P для CGGG : Nd-лазера можно аппроксимировать линейной функцией с коэффициентом пропорциональности $K_{fC} \approx 17$ кГц/Вт, равным коэффициенту чувствительности частоты следования импульсов к изменениям поглощенной мощности накачки.

Для YAG : Nd-лазера изменение P от 0.35 до 1 Вт приводит к изменению f от 4 до 35 кГц, а соответствующий коэффициент чувствительности K_{fY} равен 49 кГц/Вт.

Различие коэффициентов чувствительности K_{fC} и K_{fY} связано с различием величин эффективных сечений индуцированных переходов σ в ионах Nd³⁺ в этих кристаллах: для CGGG : Nd лазера $\sigma_C = 1.4 \times 10^{-19}$ см², для YAG : Nd-лазера $\sigma_Y = 3.2 \times 10^{-19}$ см² [3], а частота f пропорциональна σ [8].

Энергия генерируемого CGGG : Nd-лазером импульса, как следует из рис.3, составляет 3.5 мкДж при поглощенной мощности накачки 0.7–1.1 Вт, а энергия импульса генерации YAG : Nd-лазера равна ~ 2.1 мкДж в диапазоне изменений поглощенной мощности накачки 0.6–1 Вт. Пиковая мощность E/τ_i импульса CGGG : Nd-лазера составляла 0.32 кВт, а YAG : Nd-лазера – 0.14 кВт, т. е. энергия и пиковая мощность генерируемого CGGG : Nd-лазером импульса превышают энергию и пиковую мощность импульса YAG : Nd-лазера соответственно в 1.7 и в 2.3 раза.

Большая энергия импульса CGGG : Nd-лазера по сравнению с энергией импульса YAG : Nd-лазера также обусловлена, в основном, различием эффективных сечений σ для этих лазеров ($\sigma_C < \sigma_Y$), т. к. энергия E обратно пропорциональна эффективному сечению σ [6].

3.2. Зависимость временных параметров импульса генерации от длины резонатора и поглощенной мощности накачки

На рис.4 показаны экспериментальные зависимости времени нарастания τ_r , длительности τ_i и времени спада τ_f импульсов генерации CGGG : Nd- и YAG : Nd-лазеров от поглощенной мощности накачки P и от длины L резонатора лазеров. Видно, что для этих лазеров при увеличении P все временные параметры импульса генерации имеют тенденцию к уменьшению. Коэффициент чувствительности каждого из параметров к изменению мощности P определялся как тангенс угла наклона прямой, аппроксимирующей экспериментальные точки соответствующей зависимости. Эти коэффициенты для каждого из лазеров примерно одинаковы: $K_{\tau_C}^{(P)} \approx -2$ нс/Вт, а $K_{\tau_Y}^{(P)} \approx -3$ нс/Вт.

Уменьшение длительности импульса генерации лазера при увеличении поглощенной мощности накачки может быть связано с изменениями свойств насыщающегося поглотителя (кристалла YAG : Cr⁴⁺) [9] и с изменениями профиля пучка накачки и рабочего объема усиления [10]. В частности эффекты фокусировки [3, 11] в ЛЭ могут приводить к значительным изменениям рабочего объема генерации ЛЭ [10]. Поскольку толщина

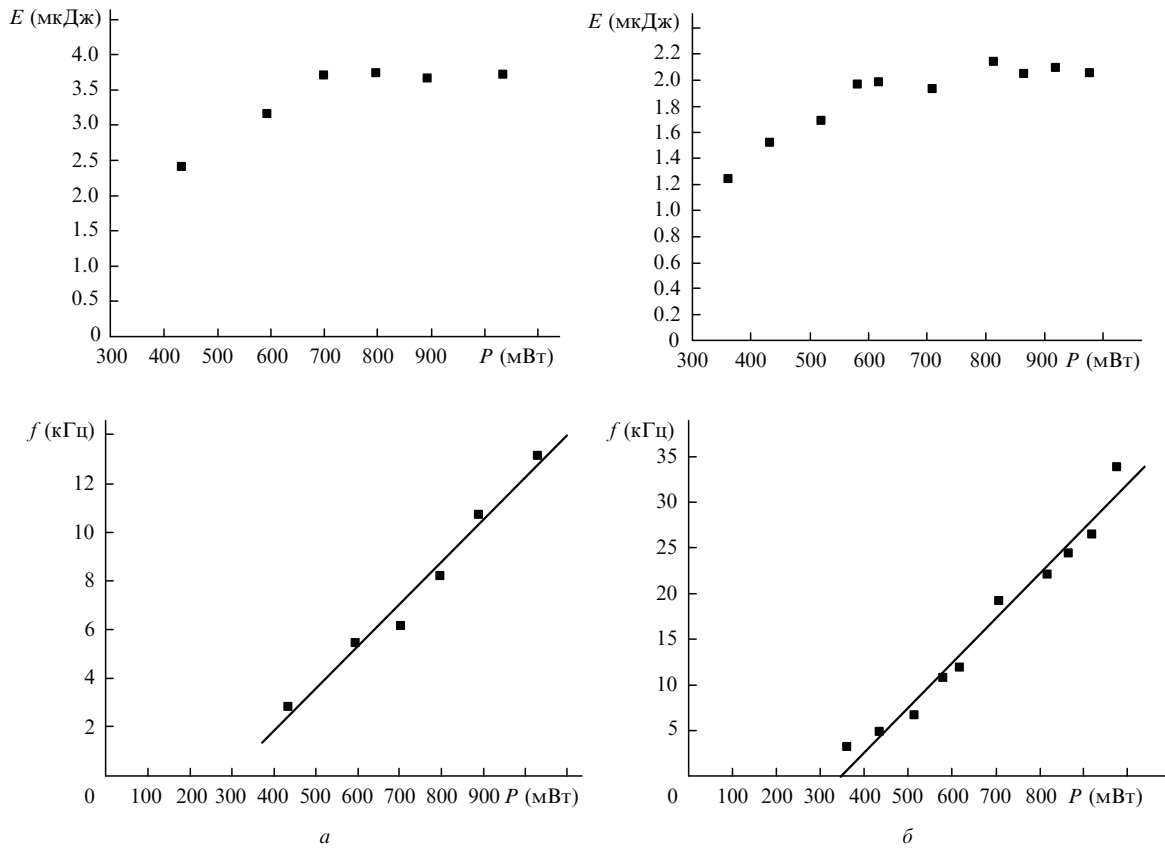


Рис.3. Зависимости энергии E и частоты f следования импульсов генерации лазеров на кристаллах CGGG:Nd (а) и YAG:Nd (б) от поглощенной мощности P накачки.

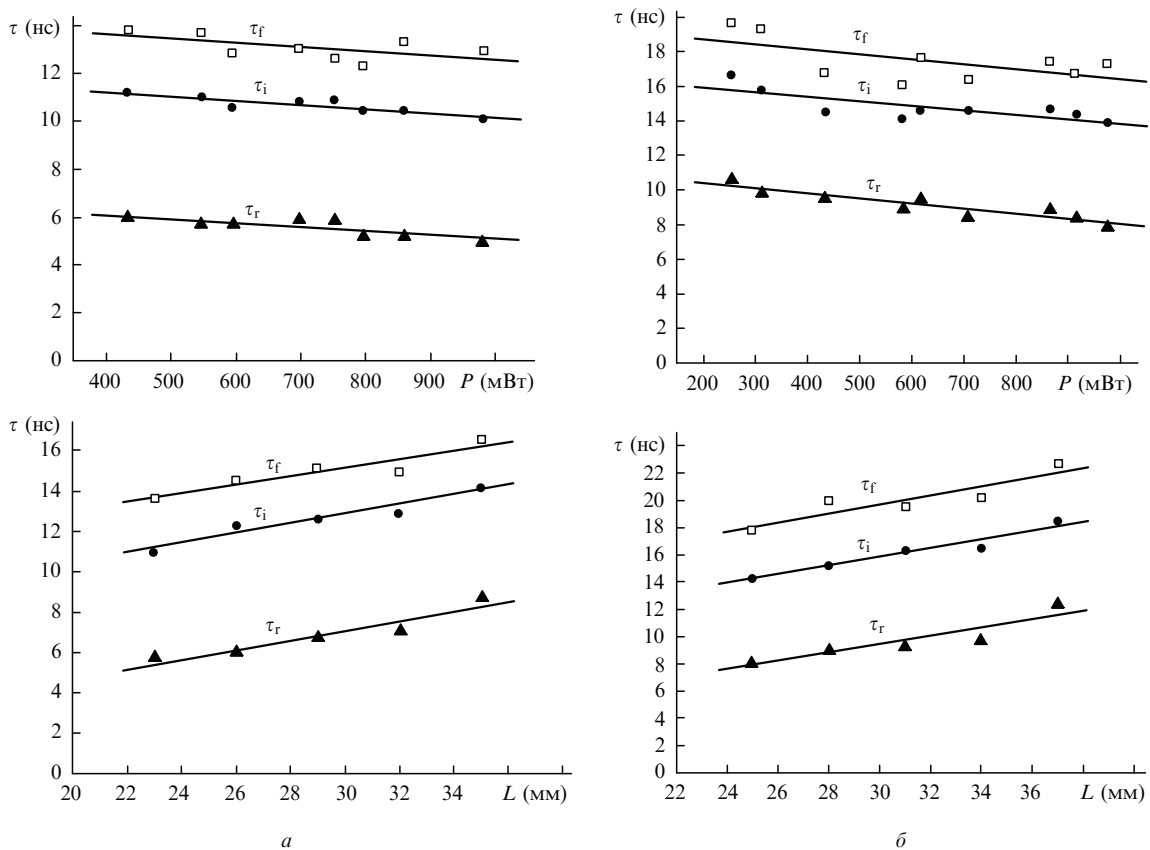


Рис.4. Зависимости времени нарастания τ_r , длительности τ_i и времени спада τ_f импульсов генерации лазеров на кристаллах CGGG:Nd (а) и YAG:Nd (б) от поглощенной мощности P накачки и длины L резонатора.

лазерного элемента YAG: Nd-лазера больше толщины лазерного элемента CGGG: Nd-лазера, то можно ожидать, что в YAG: Nd-лазере эффекты фокусировки [3, 11] выражены сильнее, в результате чего $|K_{\tau Y}^{(P)}| > |K_{\tau C}^{(P)}|$.

Увеличение длины L резонатора лазеров приводит, как следует из рис.4, к увеличению τ_r , τ_i и τ_f импульса генерации лазера. Результат вполне ожидаемый, т.к. длительность импульса генерации пропорциональна времени полного прохода светом резонатора лазера [6]. Коэффициенты чувствительности параметров τ_r , τ_i и τ_f к изменению L для каждого из лазеров приблизительно одинаковы и составляют 2 нс/см (CGGG: Nd-лазер) и 3 нс/см (YAG: Nd-лазер). Большее значение коэффициента $K_{\tau Y}^{(L)}$ связано с большей толщиной лазерного элемента YAG: Nd-лазера.

Погрешность измеренных коэффициентов чувствительности равна 30 %. Это связано с разбросом экспериментальных точек, одной из причин которого является неоднородность насыщающегося поглотителя, проявляющаяся при проведении таких измерений [6].

4. Заключение

В работе исследована импульсная генерация лазера на кристалле CGGG: Nd с диодной накачкой при пассивной модуляции добротности резонатора и проведено сравнение результатов исследования с соответствующими результатами для импульсного YAG: Nd-лазера, работающего в аналогичных условиях. В качестве модулятора использовался насыщающийся поглотитель на кристалле YAG: Cr⁴⁺. Частота следования импульсов генерации изменялась от 3 до 13 кГц при изменении погло-

щенной мощности накачки от 0.45 до 1 Вт. Энергия импульса генерации равнялась 3.5 мкДж, а его временные параметры – время нарастания, длительность и время спада – составляли соответственно 6, 11 и 13 нс. Пиковая мощность и энергия импульса CGGG: Nd-лазера примерно в два раза превышали пиковую мощность и энергию импульса YAG: Nd-лазера. Показано, что при увеличении поглощенной мощности накачки все временные параметры генерируемого импульса уменьшаются. Измерены коэффициенты чувствительности этих параметров и частоты следования импульсов генерации к изменениям поглощенной мощности накачки и длины резонатора лазера.

1. Воронько Ю.К., Кабаченко В.Я., Крысанова Л.И., Осико В.В., Соболев А.А., Тимошечкин М.И. *Неорганические материалы*, **19**, 959 (1983).
2. Петрунин Г.И., Попов В.Г., Тимошечкин М.И. *ФТТ*, **309**, 139 (1989).
3. Беловолов М.И., Державин С.И., Машковский Д.А., Сальников К.С., Сысоев Н.Н., Тимошечкин М.И., Шаталов А.Ф. *Квантовая электроника*, **37**, 753 (2007).
4. Шаталов А.Ф., Тимошечкин М.И., Беловолов М.И., Гладышев А.В. *Тезисы докл. Всерос. научной конф. «Лазеры. Измерения. Информация»* (Санкт-Петербург, 2003 г., с. 88).
5. Montes M., Heras C., Jaque D. *Opt. Mater.*, **28**, 408 (2006).
6. Spuhler G.J., Paschotta R., Fluck R., Braun B., Moser M., Zhang G., Gini E., Keller U. *J. Opt. Soc. Am. B*, **16**, 376 (1999).
7. Chen Y.F., Lan Y.P. *Appl. Phys. B*, **79**, 29 (2004).
8. Zayhowski J.J., Dill C. *Opt. Lett.*, **19**, 1427 (1994).
9. Chen Y., Tam C., Lam Y., Kobayashi T. *Opt. Rev.*, **7**, 451 (2000).
10. Waichman K., Kalisky Y. *Opt. Mater.*, **19**, 149 (2002).
11. Szabo A., Stein R.A. *J. Appl. Phys.*, **36**, 1562 (1965).