

06;07;12

Особенности генерации твердотельного неодимового лазера на кристалле кальций-галлий-германиевого граната $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ при больших мощностях диодной накачки

© М.И. Беловолов, А.Ф. Шаталов

Научный центр оптики РАН,
119333 Москва, Россия
e-mail: shatalov@fo.gpi.ru

(Поступило в Редакцию 28 ноября 2007 г.)

Приведены результаты экспериментального исследования непрерывной генерации компактного твердотельного неодимового лазера на кристалле кальций-галлий-германиевого граната $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ на длине волны $1.06\ \mu\text{m}$ при больших мощностях диодной накачки. При длине резонатора $15\ \text{mm}$ и толщине активного элемента $1\ \text{mm}$ достигнута выходная мощность генерации $0.7\ \text{W}$. Показано, что величина выходной мощности ограничивается тепловой линзой в активном элементе лазера.

PACS: 42.55.Xi, 42.55.Rz, 42.60.Pk

Кальций-галлий-германиевый гранат, $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (CGGG:Nd), является перспективным материалом для создания твердотельных лазеров с диодной накачкой. Это обусловлено тем, что кристаллы CGGG:Nd имеют высокую, сравнимую с YAG, теплопроводность, низкую температуру плавления, допускают введение высоких концентраций неодима [1]. Кроме того, кристаллы CGGG:Nd имеют уширенные спектры поглощения и люминесценции ионов Nd^{3+} , что облегчает согласование их спектров поглощения со спектрами излучения лазерных диодов и обеспечивает большую термостабильность схемы накачки [2].

В работе [3] впервые сообщалось о получении лазерной генерации на кристалле CGGG:Nd при диодной накачке. Выходная мощность генерации лазера достигала $\sim 150\ \text{mW}$. В работах [4,5] максимальная выходная мощность лазеров на кристалле CGGG:Nd составляла $\sim 300\ \text{mW}$.

В настоящей работе исследуется генерация компактного твердотельного неодимового лазера на кристаллах CGGG:Nd при ваттных мощностях диодной накачки с целью повышения выходной мощности лазера.

Схема экспериментальной установки для получения генерации на лазерных кристаллах при диодной накачке через волоконную систему показана на рис. 1. Источником накачки служила линейка 1 лазерных диодов HLU32F400-808 фирмы LIMO с волоконным выходом 2 ($\text{NA}=0.22$, $d_c = 400\ \mu\text{m}$). Максимальная выходная мощность линейки лазерных диодов 1 на выходе оптического волокна 2 составляла $30\ \text{W}$; длина волны накачки $\lambda_p = 808\ \text{nm}$, ширина спектра излучения на полувысоте $\Delta\lambda \sim 3\ \text{nm}$. Микрообъектив 3 фокусировал излучение из торца волокна 2 на лазерный элемент 4 в пятно размером $\sim 400\ \mu\text{m}$. Лазерный элемент 4 укреплялся на медном теплоотводе с помощью термопасты. Передняя грань (изображена на рис. 1 зачерненным прямоугольником) — входное зеркало лазерного элемента 4 — вместе со сферическим зеркалом 5 с коэффициентом пропускания $T = 0.01$ образуют резонатор лазера.

На рис. 2 представлены экспериментальные зависимости выходной мощности многомодовой генерации компактных твердотельных лазеров на CGGG:Nd от поглощенной мощности накачки для лазерных элементов (ЛЭ) толщиной 1 и $1.5\ \text{mm}$. Концентрация ионов Nd^{3+} в ЛЭ составляла $2 \cdot 10^{20}\ \text{cm}^{-3}$. За один проход в этих ЛЭ поглощалось 60 и 80% излучения накачки соответственно.

Отклонение полученных зависимостей от линейного закона, и в результате ограничение выходной мощности лазера, вызвано термическими искажениями резонаторов твердотельного лазера [6,7], приводящими к появлению в ЛЭ наведенной термической линзы и, в конечном итоге, к срыву лазерной генерации. При меньших длинах резонатора срыв должен происходить при больших поглощенных мощностях накачки, что наблюдалось нами в эксперименте. Учитывая полученные особенности генерации лазера, нами для увеличения его выходной мощности длина резонатора была уменьшена до минимально возможного для нашей установки (рис. 1) значения — $1.5\ \text{cm}$.

Выходная мощность лазера на ЛЭ толщиной $1\ \text{mm}$ после превышения поглощенной мощностью накачки порогового значения $P_{thr} = 130\ \text{mW}$ растет сначала ли-

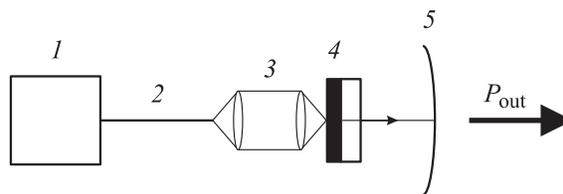


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для получения генерации на лазерных кристаллах при диодной накачке через волоконную систему: 1 — линейка лазерных диодов; 2 — оптическое волокно системы накачки на лазерных диодах ($d_c = 400\ \mu\text{m}$, $\text{NA}=0.22$); 3 — микрообъектив; 4 — ЛЭ; 5 — выходное сферическое зеркало ($R=5\ \text{cm}$).

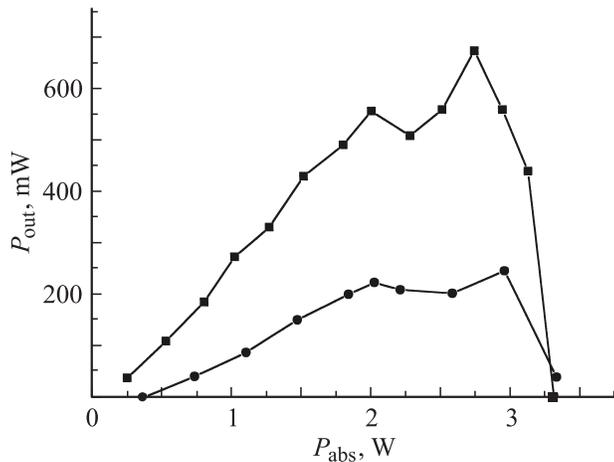


Рис. 2. Зависимость выходной мощности многомодовой генерации компактных твердотельных лазеров на CGGG:Nd от поглощенной мощности накачки для лазерных элементов толщиной 1 (—■—) и 1.5 (—●—) mm.

нейно с дифференциальной эффективностью $\eta = 0.3$ до значения $P_{out} = 560 \text{ mW}$ (соответствует поглощенной мощности накачки $P_{abs} = 2 \text{ W}$). При $P_{abs} > 2 \text{ W}$ появляются отклонения от линейной зависимости, затем при $P_{abs} = 2.7 \text{ W}$ выходная мощность достигает максимального значения $P_{max} \approx 700 \text{ mW}$ и потом спадает до нуля.

Качественно зависимость выходной мощности накачки для лазера на ЛЭ толщиной 1.5 mm выглядит так же, как и для лазера на ЛЭ толщиной 1 mm, однако при одинаковых мощностях накачки мощность его генерации ниже. Пороговая поглощенная мощность для этого лазера составила $P_{thr} = 390 \text{ mW}$, дифференциальная эффективность на линейном участке была равна $\eta = 0.14$. Отклонения от линейной зависимости наблюдались при той же поглощенной мощности накачки $P_{abs} = 2 \text{ W}$, что и для лазера на ЛЭ толщиной 1 mm, но выходная мощность при этом составила величину $P_{out} = 220 \text{ mW}$. Максимальная выходная мощность составила $P_{max} \approx 250 \text{ mW}$ при поглощенной мощности накачки $P_{abs} = 2.9 \text{ W}$. Лазерная генерация у обоих образцов прекращалась полностью при $P_{abs} = 3.3 \text{ W}$, а разрушение ЛЭ происходило при $P_{abs} \approx 4 \text{ W}$.

Особенности измеренных выходных характеристик при больших мощностях накачки определяются термической линзой, оптическая сила f^{-1} которой пропорциональна поглощенной мощности излучения накачки P_{abs} [8]:

$$f^{-1} = \frac{P_{abs} \gamma dn/dT}{2\pi K_c (\omega_p)^2}, \quad (1)$$

где γ — коэффициент, определяющий, какая часть поглощенного излучения накачки превращается в тепло, dn/dT — температурный коэффициент показателя преломления, K_c — коэффициент теплопроводности кристалла, ω_p — радиус пучка накачки.

Из формулы (1) видно, что оптическая сила тепловой линзы не зависит от толщины ЛЭ, поэтому качественно

выходные характеристики для ЛЭ толщиной 1 и 1.5 mm выглядят одинаково. При этом эффективность генерации лазера на ЛЭ толщиной 1.5 mm была ниже, так как с увеличением толщины ЛЭ растут неактивные потери, а также ухудшаются условия пространственного согласования излучения накачки и основных мод резонатора.

Из полученных экспериментальных данных (рис. 2) также видно, что в области, где зависимость выходной мощности лазера от поглощенной мощности накачки носит нелинейный характер, выходная мощность перед срывом генерации сначала уменьшается, потом увеличивается, достигая максимального значения, а затем уже спадает до нуля. Такая осцилляция мощности генерации перед ее срывом сопровождается изменениями модового состава излучения лазера, которые наблюдались параллельно с изменениями его выходной мощности. Это объясняется, по-видимому, тем, что термические искажения резонатора по-разному влияют на уровень потерь различных поперечных мод, а также на степень их перекрытия с пучком излучения накачки.

Таким образом, в работе нами исследованы особенности генерации твердотельного неодимового лазера на кристалле кальций-галлий-германиевого граната $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ при больших мощностях диодной накачки. Показано, что рост выходной мощности ограничивают в основном термические искажения активного элемента лазера, приводящие к образованию термической линзы. На лазерном элементе толщиной 1 mm получена выходная мощность 700 mW при поглощенной мощности накачки 2.7 W. Дифференциальная эффективность составляла 0.3. Из полученных экспериментальных данных следует, что возможно создание компактного твердотельного лазера с выходной мощностью $P_{out} \geq 1 \text{ W}$ путем выбора оптимальных параметров лазерного элемента и уменьшения длины резонатора лазера. При этом накачку можно производить одиночным лазерным диодом мощностью $\sim 3 \text{ W}$.

Список литературы

- [1] Еськов Н.А., Осико В.В., Соболев А.А., Тимошечкин М.И., Бутаева Т.И., Нзюк Чан, Каминский А.А. // Неорганические материалы. 1978. Т. 14. С. 2254.
- [2] Шаталов А.Ф., Тимошечкин М.И., Беловолов М.И., Гладышев А.В. // Тез. докл. Всеросс. науч. конф. „Лазеры. Измерения. Информация“. СПб, 2003. С. 88–89.
- [3] Belovolov M.I., Dianov E.M., Timoschekkin M.I., Morosov N.P., Prokhorov A.M., Timoschekkin K.M. // Proc. CLEO/Europe'96. 1996. Paper CTh160. P. 281.
- [4] Jaque D., Caldino U., Romero J.J., and Garcia Sole J. // J. of Appl. Phys. 1999. Vol. 86. P. 6627.
- [5] Jaque D., Romero J.J., and Garcia Sole J. // J. of Appl. Phys. 2002. Vol. 92. P. 3436.
- [6] Дианов Е.М., Прохоров А.М. // ДАН СССР. 1970. Т. 192. С. 531.
- [7] Ведяшкин Н.В., Державин С.И., Кузьминов В.В., Машковский Д.А. // Квант. электрон. 2003. Т. 33. С. 367.
- [8] Clarkson W.A. // J. of Physics D: Appl. Phys. 2001. Vol. 34. P. 2381–2395.