

# Твердотельные неодимовые лазеры на кристаллах кальций-галлий-германиевого граната $\text{Ca}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}:\text{Nd}^{3+}$ с диодной накачкой

М.И.Беловолов, С.И.Державин, Д.А.Машковский, К.С.Сальников,  
Н.Н.Сысов, М.И.Тимошечкин, А.Ф.Шаталов

*Исследованы спектрально-люминесцентные и лазерные характеристики кристаллов кальций-галлий-германиевого граната  $\text{Ca}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}:\text{Nd}^{3+}$  (CGGG : Nd) и проведено их сравнение с соответствующими характеристиками кристаллов YAG : Nd. Изучена непрерывная пространственно одномодовая генерация на этих кристаллах на длине волны  $\lambda = 1.064$  мкм в схеме с продольной диодной накачкой через оптическое волокно, и показано, что при одинаковых по геометрии схемах накачки Nd : CGGG-лазер близок по мощности генерации к Nd : YAG-лазеру. Определено эффективное сечение индуцированных переходов  $\sigma$ , оно составило  $1.4 \times 10^{-19}$  см<sup>2</sup> для кристаллов CGGG : Nd. Обнаружено, что спектр линии генерации Nd : CGGG-лазера на  $\lambda \approx 1.064$  мкм является неоднородно уширенным и имеет тонкую структуру из четырех отчетливых пиков, подтверждающих спектроскопические данные о существовании четырех основных типов активаторных центров ионов  $\text{Nd}^{3+}$  в кристаллах  $\text{Ca}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ . В конструкции компактного твердотельного лазера при толщине активного элемента 1 мм в непрерывном режиме генерации получена выходная мощность 700 мВт при поглощенной мощности накачки 2.7 Вт. Показано, что основными механизмами, ограничивающими выходную мощность твердотельного лазера на основе кристалла CGGG : Nd, являются термические искажения активного элемента.*

**Ключевые слова:** твердотельные лазеры, диодная накачка, лазерные кристаллы.

## 1. Введение

Активированный неодимом кальций-галлий-германиевый гранат  $\text{Ca}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}:\text{Nd}^{3+}$  (CGGG : Nd) является перспективным материалом для создания компактных и экономичных твердотельных лазеров с диодной накачкой, поскольку допускает легирование большими концентрациями ионов неодима  $\text{Nd}^{3+}$  и удачно сочетает привлекательные как спектрально-люминесцентные, так и физико-технологические свойства [1–3]. Кристаллы CGGG : Nd относятся к классу разупорядоченных сред и имеют неоднородно уширенные спектры поглощения и люминесценции ионов неодима  $\text{Nd}^{3+}$ . Такое уширение облегчает согласование спектров поглощения лазерного кристалла со спектрами излучения источников накачки на основе лазерных диодов и делает этот кристалл перспективным для получения коротких лазерных импульсов и создания перестраиваемых по длине волны источников лазерного излучения [4]. Кристалл CGGG обладает кубической симметрией и, следовательно, явля-

ется оптически изотропным. Теплопроводность CGGG практически так же велика, как и у широко используемого в настоящее время кристалла YAG, и значительно превышает теплопроводность лазерных стекол. Кристаллы высокого оптического качества с атомной концентрацией неодима до 30 % можно выращивать на воздухе с большой скоростью в платиновых тиглях. Приведенные в табл.1 основные физико-технологические характеристики кристаллов CGGG : Nd и YAG : Nd, взятые из работ [2, 3, 5, 6], иллюстрируют перечисленные выше достоинства CGGG : Nd.

Первое сообщение об использовании кристаллов CGGG : Nd для создания твердотельных лазеров с диодной накачкой появилось в 1996 г. [5]. Была достигнута мощность генерации 150 мВт. Позднее в работах [7, 8] исследовались спектрально-люминесцентные характеристики концентрационной серии кристаллов CGGG : Nd, и в многомодовом режиме получена выходная мощность до 300 мВт на кристаллах с атомной концентрацией ионов  $\text{Nd}^{3+}$  около 2 %.

Эффективность твердотельных лазеров в сильной степени зависит от типа и выходной мощности источника накачки, выбранной схемы возбуждения и условий согласования источника накачки и активного элемента лазера, качества и размеров активного элемента, концентрации иона активатора и т. д. Поэтому для получения достоверных данных о параметрах лазерной генерации на новом активном элементе измерения необходимо проводить в однозначных по геометрии условиях эксперимента; абсолютные значения того или иного параметра желательно одновременно измерять на эталонном лазерном элементе из какого-либо известного и хорошо изученного лазерного материала для последующего сравнения их по эффективности.

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

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

Н.Н.Сысов. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы

М.И.Тимошечкин. Научный центр лазерных материалов и технологий Института общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

Поступила в редакцию 27 апреля 2007 г., после доработки – 15 июня 2007 г.

Табл.1. Физико-технологические характеристики лазерных кристаллов YAG : Nd и CGGG : Nd.

Лазерный кристалл	Характеристики						
	Допустимые атомные концентрации ионов Nd <sup>3+</sup> (%)	Теплопроводность Вт·(м·°С) <sup>-1</sup>	Температура плавления (°С)	Материал тигля	Метод выращивания	Атмосфера	Скорость роста (мм/ч)
YAG : Nd	≤ 1	12–14	1970	Ir	Чохральского	Ar, N <sub>2</sub>	~0.5
CGGG : Nd	≤ 30	10.9	~1400	Pt	Чохральского	Воздух	~2

Целью настоящей работы являлось исследование компактных твердотельных лазеров повышенной мощности на основе кристаллов CGGG : Nd, а также сравнение спектрально-люминесцентных и лазерных характеристик кристаллов CGGG : Nd с соответствующими характеристиками кристаллов YAG : Nd в схеме с продольной диодной накачкой через оптическое волокно.

## 2. Спектры поглощения, люминесценции и радиационные времена жизни

Измерения спектрально-люминесцентных и генерационных характеристик проводились для кристаллов CGGG : Nd с концентрацией ионов Nd<sup>3+</sup>, равной  $2 \times 10^{20}$  см<sup>-3</sup>. Кристаллы были выращены методом Чохральского в окислительной атмосфере. Для проведения экспериментов из кристалла были вырезаны лазерные элементы (ЛЭ) в виде прямоугольных пластинок размерами  $5 \times 5$  мм и толщиной  $d = 1$  и  $1.5$  мм. В качестве лазерного материала для сравнения выбран YAG : Nd с радиационным временем жизни  $\tau \approx 230$  мкс, что близко к  $\tau$  для CGGG : Nd, и концентрацией ионов Nd<sup>3+</sup>, равной  $0.8 \times 10^{20}$  см<sup>-3</sup>. ЛЭ из YAG : Nd представлял собой диск диаметром 10 мм и толщиной  $d = 4.1$  мм. На входные грани лазерных элементов были нанесены диэлектрические зеркальные покрытия, которые имели коэффициент пропускания более 95 % на длинах волн накачки ( $\lambda_p \approx 0.8$  мкм) и полностью отражали излучение ( $R \geq 99$  %) на длине волны генерации ( $\lambda_g \approx 1.06$  мкм). Другие грани ЛЭ были просветлены для указанных длин волн. ЛЭ предназначались для использования в резонаторах лазеров с внешними (сферическими или плоскими) выходными зеркалами.

Для измерения спектров поглощения излучение от источника белого света (галогенной лампы накаливания) пропусклось через образец и вводилось в многомодовое оптическое волокно с числовой апертурой NA = 0.22 и диаметром сердцевинки  $d_c = 100$  мкм, которое соединялось с волоконным входом анализатора спектра MS96A фирмы Anritsu. Анализатор спектра позволял измерять спектральный состав излучения в диапазоне длин волн 0.6–1.6 мкм со спектральным разрешением до 0.1 нм и с точностью измерения абсолютного значения длины волны  $\sim 0.1$  нм.

Спектры поглощения исследованных кристаллов YAG : Nd ( $d = 4.1$  мм) и CGGG : Nd ( $d = 1.5$  мм) в интервале длин волн 0.78–0.82 мкм, записанные с разрешением 0.5 нм, показаны на рис.1. Видно, что у ЛЭ из CGGG : Nd полосы поглощения шире, чем аналогичные линии поглощения у кристаллов YAG : Nd, что связано с многоцентровой структурой кристалла CGGG : Nd. Самые интенсивные пики поглощения у YAG : Nd и CGGG : Nd расположены вблизи длин волн 0.8085 и 0.805 мкм соответственно. Ширина этих пиков на полувысоте составляет 0.7 нм для YAG : Nd и  $\sim 2.7$  нм для CGGG : Nd, т. е. линии поглощения для селективной на-

качки у ЛЭ из CGGG : Nd в 4 раза шире. Поэтому спектр поглощения CGGG : Nd эффективнее согласуется со спектром излучения полупроводниковых источников накачки, характерная ширина излучения которых составляет 1–3 нм, и это согласование более стабильно при вариациях температуры. Указанные свойства системы накачки для кристаллов CGGG : Nd являются существенными достоинствами конструкции лазеров с диодной накачкой. Кроме того, коэффициент поглощения в максимуме самой интенсивной линии поглощения CGGG : Nd равен  $11$  см<sup>-1</sup>, а для кристалла YAG : Nd –  $5$  см<sup>-1</sup>. Поэтому, хотя толщина ЛЭ из CGGG : Nd в 2.7 раза меньше, чем толщина ЛЭ из YAG : Nd, эффективность поглощения ими излучения накачки при настройке на максимум поглощения была приблизительно одинакова и составляла  $\sim 70$  %.

Для измерения спектров люминесценции излучение от источника накачки фокусировалось в пятно на краю образца. Излучение люминесценции собиралось микрообъективом в направлении, перпендикулярном направлению распространения излучения накачки, и вводилось в волокно (NA = 0.22,  $d_c = 100$  мкм), выходной конец которого стыковался с анализатором спектра. В качестве источника накачки для возбуждения люминесценции на длинах волн около 0.8 мкм использовался полупроводниковый лазерный диод (ЛД) на основе гетероструктуры AlGaAs, работающий в непрерывном или импульсном

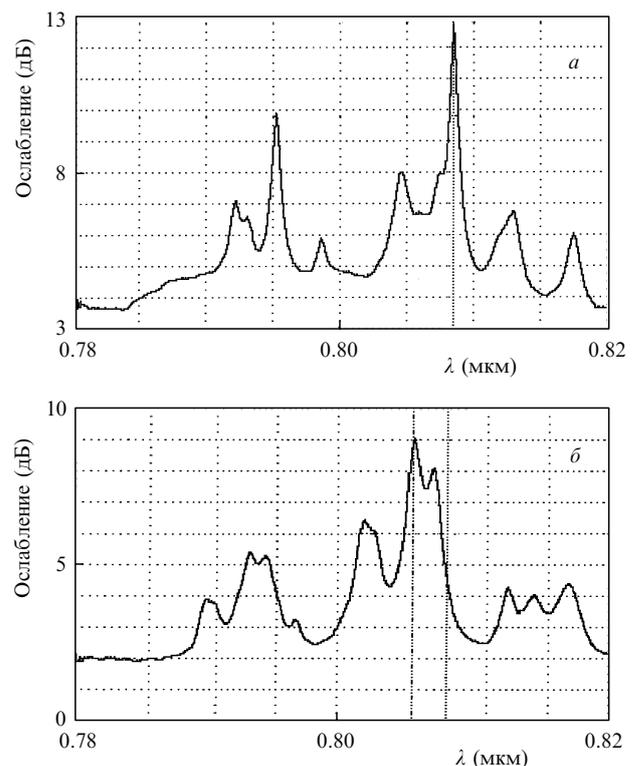


Рис.1. Спектры поглощения исследованных ЛЭ из кристаллов YAG : Nd (а) и CGGG : Nd (б).

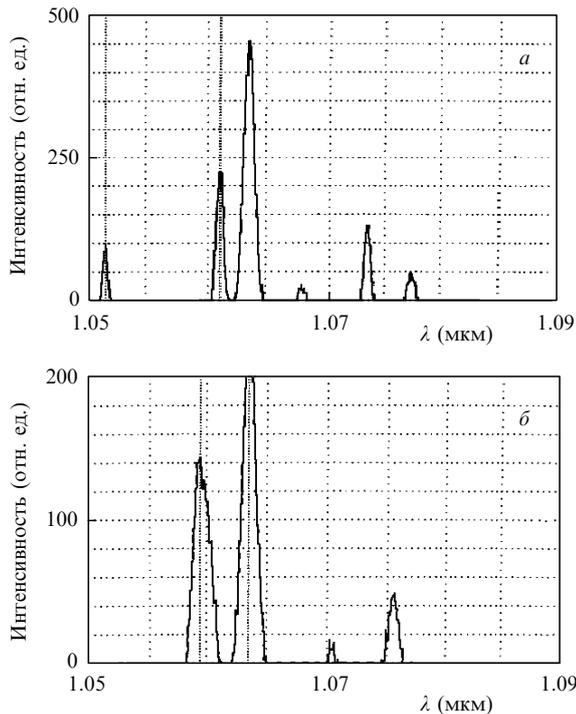


Рис.2. Спектры люминесценции исследованных кристаллов YAG : Nd (а) и CGGG : Nd (б) в области  $\lambda \approx 1.06$  мкм.

режиме с пиковой мощностью до 0.5 Вт. В ходе экспериментов ЛД поддерживался при постоянной температуре около  $20^\circ\text{C}$  с помощью схемы температурной стабилизации на элементах Пельтье с точностью  $\sim 0.1^\circ\text{C}$ . Его длина волны генерации при комнатной температуре составляла  $\sim 0.805$  мкм, а ширина спектра излучения – 1.0 нм. Настройка длины волны накачки на линию поглощения лазерного кристалла осуществлялась изменением температуры ЛД.

Измеренные спектры люминесценции исследованных в работе кристаллов CGGG : Nd и YAG : Nd в области длин волн около 1.06 мкм показаны на рис.2. Видно, что основные линии люминесценции у исследуемых образцов лазерного кристалла из YAG : Nd расположены на длинах волн  $\lambda = 1.0517, 1.0611, 1.0637, 1.0675, 1.0734$  и  $1.0775$  мкм, что согласуется с известными длинами волн переходов между подуровнями термов  $^4\text{F}_{3/2}$  и  $^4\text{I}_{11/2}$  иона  $\text{Nd}^{3+}$  в кристалле YAG [6]. Длина волны самого интенсивного пика люминесценции равна 1.0637 мкм, а его ширина на полувысоте составляет  $\sim 1$  нм. Именно на этой длине волны исследовалась генерация в данной работе.

Максимумы люминесценции у кристалла CGGG : Nd в диапазоне 1.05–1.09 мкм расположены на  $\lambda = 1.0595, 1.0635, 1.0704$  и  $1.0755$  мкм, что согласуется со спектро-

скопическими данными, полученными в работе [3]. Лазерная генерация на образце кристалла CGGG : Nd была получена на  $\lambda \approx 1.064$  мкм, соответствующей самому интенсивному пику в спектре люминесценции. Его ширина на полувысоте составляет  $\sim 1.5$  нм, т. е. в 1.5 раза больше, чем у YAG : Nd.

Для измерения кинетики люминесценции на ЛД накачки подавались прямоугольные импульсы тока с периодом следования 6 мс, длительностью 80 мкс и крутыми фронтами  $\sim 1$  мкс. Длительность и период следования импульсов тока блока питания лазера были выбраны с учетом характерного времени люминесценции в неодимовых гранатах, которое составляет 200–260 мкс.

В эталонном образце YAG : Nd измеренное время жизни  $\tau^{\text{YAG}}$  верхнего лазерного уровня  $^4\text{F}_{3/2}$  составило 230 мкс, что в пределах погрешности измерений ( $\sim 10\%$ ) согласуется с литературными данными [9]. В исследуемом образце CGGG : Nd время жизни этого уровня  $\tau^{\text{CGGG}}$  оказалось равным 220 мкс. Оно представляет собой величину, усредненную по активаторным центрам N, L, X, и Y [3] с близкими временами жизни ( $\sim 200$  мкс).

Измеренные спектрально-люминесцентные характеристики кристаллов CGGG : Nd и YAG : Nd сведены в табл.2. Концентрация ионов  $\text{Nd}^{3+}$  в исследуемых образцах CGGG : Nd была в  $\sim 2.4$  раза больше, чем в образце YAG : Nd, поэтому эффективность поглощения этим кристаллом излучения накачки вблизи  $\lambda \approx 0.805$  мкм была значительно выше, чем у кристаллов YAG : Nd. При этом радиационные времена жизни, которые характеризуют интенсивность процессов концентрационного тушения, у исследуемых образцов практически равны. Приведенные спектрально-люминесцентные характеристики кристаллов CGGG : Nd и YAG : Nd и концентрации ионов  $\text{Nd}^{3+}$  в них свидетельствуют о том, что лазерные элементы из этих кристаллов (толщиной 1.5 и 4.1 мм соответственно) поглощают примерно одинаковую мощность излучения накачки, и мощность лазерной генерации может служить фактором для сравнения эффективности лазерных материалов CGGG : Nd и YAG : Nd и ионов  $\text{Nd}^{3+}$  как рабочих ионов в этих кристаллах.

### 3. Характеристики лазерной генерации в схеме с диодной накачкой через оптическое волокно и эффективное сечение вынужденного излучения на переходе $^4\text{F}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{11/2}$

Схема экспериментальной установки для получения генерации на лазерных кристаллах при продольной диодной накачке через волоконный световод показана на рис.3. В качестве источника накачки использовалась линейка лазерных диодов HLU32F400-808 фирмы LIMO с волоконным выходом ( $\text{NA} = 0.22, d_c = 400$  мкм). Мак-

Табл.2. Спектрально-люминесцентные характеристики кристаллов YAG : Nd и CGGG : Nd.

Лазерный кристалл	Характеристики					
	Длина волны пика поглощения (нм)	Пиковый коэффициент поглощения ( $\text{cm}^{-1}$ )	Ширина пика поглощения на полувысоте (нм)	Длина волны пика люминесценции (нм)	Ширина пика люминесценции на полувысоте (нм)	$\tau$ (мкс)
YAG : Nd	808.5	5	0.7	1063.7	1	230
CGGG : Nd	805	12	2.3	1063.5	1.5	220

Примечание: концентрация ионов  $\text{Nd}^{3+}$  равна  $0.8 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  для YAG : Nd и  $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  для CGGG : Nd.

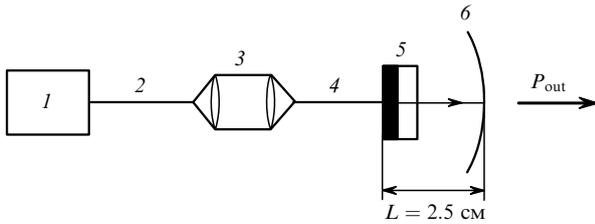
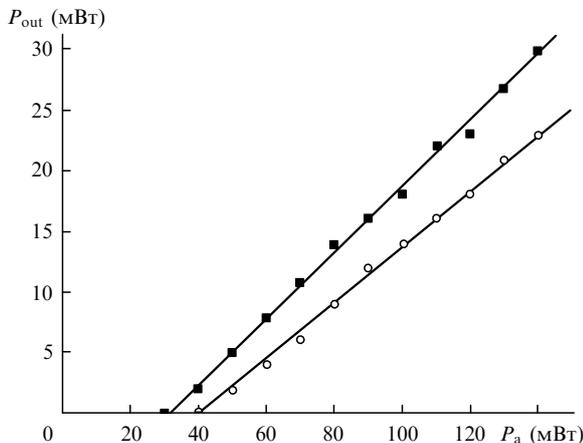


Рис.3. Схема экспериментальной установки:

1 – линейка лазерных диодов; 2 – оптическое волокно системы накачки на лазерных диодах ( $d_c = 400$  мкм,  $NA = 0.22$ ); 3 – коллимирующая и фокусирующая линзы ( $f = 30$  мм,  $NA = 0.22$ ); 4 – оптическое волокно для возбуждения одномодовой генерации ( $d_c = 100$  мкм,  $NA = 0.22$ ); 5 – ЛЭ; 6 – выходное сферическое зеркало радиусом 5 см.

симальная выходная мощность генерации линейки составляла 30 Вт,  $\lambda_p = 808$  нм, ширина спектра излучения на полувысоте  $\Delta\lambda$  была  $\sim 3$  нм. Чтобы улучшить условия пространственного согласования излучения накачки с основной модой резонатора (для нашего резонатора диаметр перетяжки  $2\omega_0 = 184$  нм) и упростить получение пространственно одномодового (мода  $TEM_{00}$ ) режима генерации, излучение линейки лазерных диодов 1 через волоконный выход 2 вводилось системой линз 3 в оптическое волокно 4 с меньшим диаметром сердцевинки  $d_c = 2\omega_{op} = 100$  мкм и такой же числовой апертурой  $NA = 0.22$ . Конец оптического волокна 4 стыковался перпендикулярно вплотную к передней грани (изображена на рис.3 зачерненным прямоугольником) лазерного элемента 5, который укреплялся на медном теплоотводе с помощью термопасты. Передняя грань – входное зеркало лазерного элемента – вместе со сферическим зеркалом 6 с коэффициентом пропускания  $T = 0.011$  образуют полуконфокальный резонатор длиной  $L = 2.5$  см.

С помощью этой экспериментальной установки при комнатной температуре была получена и исследована пространственно одномодовая непрерывная генерация на кристаллах CGGG:Nd ( $d = 1.5$  мм) и YAG:Nd ( $d = 4.1$  мм). Измеренные зависимости выходной мощности  $P_{out}$  генерации твердотельных лазеров на кристаллах YAG:Nd и CGGG:Nd от поглощенной мощности накачки  $P_a$  показаны на рис.4. Для Nd:YAG-лазера пороговая поглощенная мощность накачки  $P_{th}^{YAG}$  составила 31 мВт, дифференциальная эффективность  $\eta^{YAG}$  была равна 0.27, а для Nd:CGGG-лазера  $P_{th}^{CGGG} = 39$  мВт и

Рис.4. Зависимости выходной мощности пространственно одномодовой генерации твердотельных лазеров на кристаллах YAG:Nd (■) и CGGG:Nd (○) от поглощенной мощности при диодной накачке через волоконный световод ( $d_c = 100$  мкм,  $NA = 0.22$ ).

$\eta^{CGGG} = 0.22$ . Из рис.4 следует, что на кристаллах CGGG:Nd достигаются столь же низкие пороги генерации, как и на типичных образцах YAG:Nd. Абсолютные значения мощности генерации у кристаллов CGGG:Nd были всего на 20% – 30% меньше, чем у кристаллов YAG:Nd, что также свидетельствует о достаточно высокой эффективности лазерной генерации ионов  $Nd^{3+}$  в кристаллической решетке CGGG. Выходная мощность лазера на кристалле CGGG:Nd в меньшей степени зависела от вариаций температуры ЛД накачки, что объясняется более широкими спектрами поглощения этого кристалла и представляет собой одно из его преимуществ по сравнению с кристаллом YAG:Nd.

Эффективное сечение вынужденного излучения на переходе  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ , полученное при учете различных активаторных центров и переходов между штарковскими подуровнями, для четырехуровневой схемы генерации на ионах  $Nd^{3+}$  определяется выражением [10]

$$\sigma = \frac{h\nu_p \lambda_p T}{2\tau \lambda_g P_{th}\eta} S_{eff}, \quad (1)$$

где  $h\nu_p$  – энергия фотона накачки, а  $S_{eff}$  – эффективная «площадь» моды, учитывающая перекрытие пучка излучения накачки и основной моды резонатора.

Выражение для эффективной площади моды имеет следующий вид [11]:

$$S_{eff} = \left( d \int_V p(r,z)s(r,z)dV \right)^{-1}, \quad (2)$$

где  $p(r,z)$  и  $s(r,z)$  – нормированные распределения мощности накачки и основной моды резонатора;  $V$  – накачиваемый объем кристалла. В наших экспериментах в качестве источника накачки использовалась линейка лазерных диодов с волоконным выходом. Оптическое волокно стыковалось вплотную к кристаллу, так чтобы ось симметрии волокна совпадала с оптической осью резонатора. Радиус пучка накачки  $\omega_p$  на выходе многомодового волокна можно приблизительно определить с помощью формулы [11]

$$\omega_p^2 = \omega_{p0}^2 \left[ 1 + \left( \frac{\lambda_p M_p^2 z}{n\pi\omega_{p0}^2} \right)^2 \right], \quad (3)$$

где  $\omega_{p0}$  – радиус сердцевинки волокна;  $M_p^2$  – параметр качества пучка;  $n$  – показатель преломления кристалла;  $z$  – расстояние от торца волокна до плоскости сечения пучка накачки, в которой радиус пучка равен  $\omega_p$ . Соответствующая нормированная функция распределения мощности накачки в пределах кристалла будет иметь вид (см. [11, 12])

$$p(r,z) = \frac{\alpha e^{-\alpha z}}{\pi\omega_p^2(1 - e^{-\alpha d})} \Theta(\omega_p^2 - r^2), \quad (4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент поглощения образца кристалла, а  $\Theta(x)$  – функция Хевисайда. Условие нормировки записывается в виде

$$\int_V p(r,z)dV = 1. \quad (5)$$

Тогда нормированное распределение мощности основной моды  $TEM_{00}$

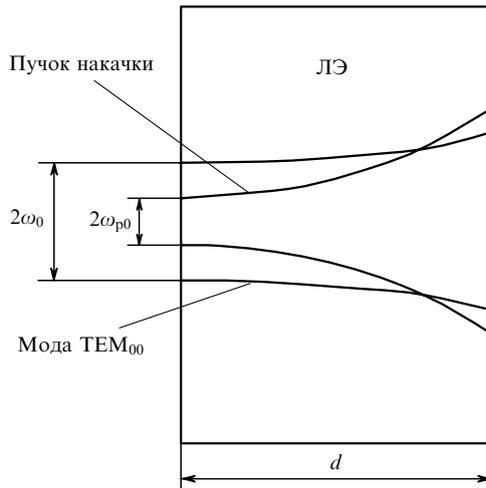


Рис.5. Схема совмещения поля накачки и поля моды резонатора для расчета эффективной площади генерируемой моды твердотельного лазера с диодной накачкой через волоконную систему.

$$s(r, z) = \frac{2}{\pi\omega_0^2 d} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right). \quad (6)$$

Перекрытие основной моды резонатора и пучка излучения накачки схематически показано на рис.5. Вычисленные на основании формул (2)–(6) значения  $S_{eff}$  для лазеров с активными элементами из CGGG:Nd и YAG:Nd составили  $2.6 \times 10^{-4} \text{ см}^2$  и  $6.0 \times 10^{-4} \text{ см}^2$  соответственно. Используя (1), полученные экспериментальные данные ( $P_{th}^{YAG} = 31 \text{ мВт}$ ,  $\eta^{YAG} = 0.27$ ,  $P_{th}^{CGGG} = 39 \text{ мВт}$ ,  $\eta^{CGGG} = 0.22$ ,  $\tau^{YAG} = 230 \text{ мкс}$ ,  $\tau^{CGGG} = 220 \text{ мкс}$ ,  $\lambda_g \approx 1.06 \text{ мкм}$ ,  $\lambda_p \approx 0.8 \text{ мкм}$ ,  $M_p = 40$ ), вычисленные значения  $S_{eff}$  и коэффициент пропускания выходного зеркала  $T = 0.011$ , мы определили значения эффективных сечений индуцированных переходов  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$  для наших образцов:  $\sigma_{CGGG} = 1.4 \times 10^{-19} \text{ см}^2$ ,  $\sigma_{YAG} = 3.2 \times 10^{-19} \text{ см}^2$ . Полученное значение эффективного сечения поглощения индуцированного перехода  $\sigma_{YAG}$  для кристалла YAG:Nd согласуется со значениями, которые приведены в работах [10, 13], и служит подтверждением надежности определенного нами значения эффективного сечения для кристалла CGGG:Nd.

Из полученных данных по абсолютным значениям мощности генерации и сечениям индуцированных переходов следует, что ионы  $\text{Nd}^{3+}$  в матрице кристалла CGGG работают при лазерной генерации с несколько меньшей эффективностью, чем в кристаллах YAG. Причина этого лежит, по всей видимости, в особенностях более сложной матрицы кристаллов CGGG, где ионы  $\text{Nd}^{3+}$  могут входить в решетку в различных позициях, о чем свидетельствуют данные спектроскопических исследований [3].

Табл.3. Генерационные характеристики кристаллов YAG:Nd и CGGG:Nd в схеме лазера с продольной диодной накачкой через волоконную систему.

Лазерный кристалл	Характеристики					
	$P_{th}$ (мВт)	$\eta$	Потери внутри резонатора (%)	Усредненное эффективное сечение индуцированного перехода ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ ( $10^{-19} \text{ см}^2$ )	$\lambda_g$ (мкм)	Ширина спектра генерации на полувысоте (нм)
YAG:Nd	31	0.27	2	3.2	1.064	0.3
CGGG:Nd	39	0.22	3	1.4	1.064	0.6

Примечание: концентрация ионов  $\text{Nd}^{3+}$  в кристаллах такая же, как в табл.2.

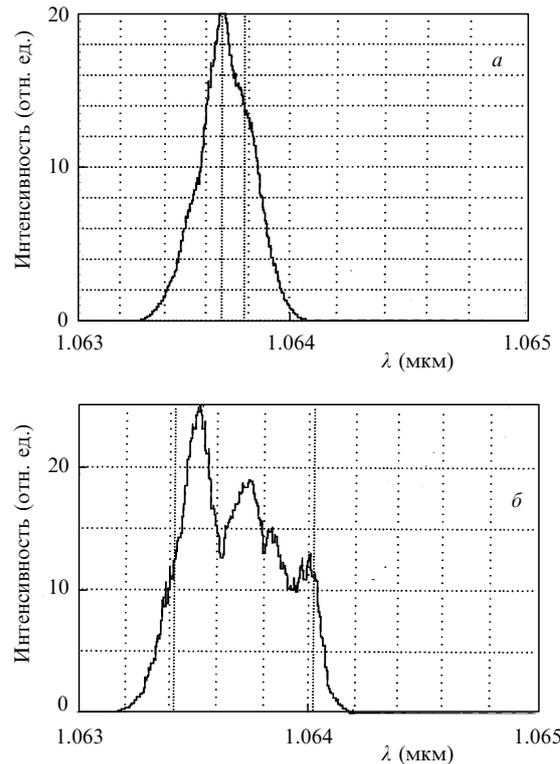


Рис.6. Спектры пространственно одномодовой генерации твердотельных лазеров на YAG:Nd (a) и CGGG:Nd (б) в области 1.06 мкм.

На рис.6 приведены спектры генерации твердотельных лазеров на кристаллах YAG:Nd и CGGG:Nd в области 1.06 мкм. Длина волны, на которой наблюдалась максимальная выходная мощность Nd:YAG-лазера, была равна 1.0637 мкм, а ширина пика генерации на полувысоте составляла  $\sim 0.3 \text{ нм}$ . Эта линия генерации соответствует переходам между энергетическими подуровнями  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$  иона  $\text{Nd}^{3+}$  в кристалле YAG [6].

Максимальная мощность излучения Nd:CGGG-лазера соответствовала  $\lambda = 1.0635 \text{ мкм}$ , а ширина линии генерации на полувысоте составляла 0.6 нм. Линия генерации этого лазера по сравнению с Nd:YAG-лазером имеет различимую тонкую структуру из четырех пиков, что согласуется с наличием нескольких типов активаторных центров у ионов  $\text{Nd}^{3+}$  в CGGG [3]. Длины волн генерации, на которых наблюдались эти пики, были равны 1.0635, 1.0637, 1.0638 и 1.0640 мкм. Из рис.6 видно, что линии генерации Nd:CGGG-лазера имеют различные интенсивности, а две линии – самая коротковолновая и самая длинноволновая – отличаются по интенсивности почти в 2 раза. Сравнительно широкая линия генерации ( $\sim 0.6 \text{ нм}$ ) дает возможность использовать кристалл CGGG:Nd для получения перестраиваемого по длине волны излучения, оптического гетеродинамирования, а так-

же для получения коротких лазерных импульсов. Измеренные в данной работе генерационные характеристики кристаллов YAG : Nd и CGGG : Nd сведены в табл.3. Полученные данные свидетельствуют о том, что лазерные характеристики CGGG : Nd близки к характеристикам образцов YAG : Nd и имеют существенные достоинства, связанные с более термостабильной схемой накачки и компактностью ЛЭ.

#### 4. Выходные характеристики Nd : CGGG-лазера при больших мощностях накачки

В экспериментах по исследованию особенностей генерации при больших мощностях накачки длина резонатора была уменьшена до минимально возможного для нашей установки (см. рис.3) значения ( $L = 1.5$  см), а линзы 3 и волокно 4 были заменены на микрообъектив, который фокусировал излучение накачки из торца волокна 2 сразу на кристалл в пятно размером  $\sim 400$  мкм. Уменьшение длины резонатора и увеличение площади поперечного сечения пучка накачки ослабили влияние термической линзы на лазерную генерацию, что позволило достичь максимальных значений выходной мощности твердотельного лазера при выбранных параметрах лазерной установки. Для исследования зависимости эффективности генерации от толщины ЛЭ был дополнително изготовлен образец кристалла CGGG : Nd толщиной 1 мм, аналогичный по своим характеристикам образцу толщиной 1.5 мм. За один проход в этих ЛЭ поглощалось 60 % и 80 % излучения накачки соответственно.

На рис.7 представлены экспериментальные зависимости выходной мощности генерации Nd : CGGG-лазера от поглощенной мощности накачки. Видно, что после превышения поглощенной мощностью порогового значения  $P_{th} = 130$  мВт выходная мощность лазера на ЛЭ толщиной 1 мм сначала растет линейно с дифференциальной эффективностью  $\eta = 0.3$  до значения  $P_{out} = 560$  мВт (соответствует поглощенной мощности накачки  $P_a = 2$  Вт). При  $P_a > 2$  Вт появляются отклонения от линейной зависимости, выходная мощность достигает максимального значения  $P_{out}^{max} \approx 700$  мВт при  $P_a = 2.7$  Вт и затем резко падает до нуля.

Качественно зависимость выходной мощности от по-

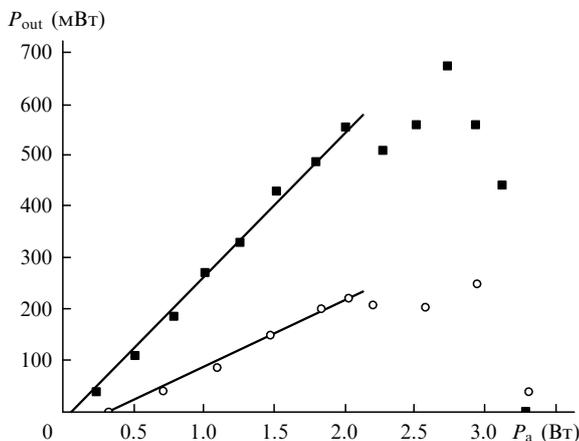


Рис.7. Зависимости выходной мощности многомодовой генерации компактных твердотельных лазеров на CGGG : Nd от поглощенной мощности накачки для лазерных элементов толщиной 1 (■) и 1.5 мм (○).

глощенной мощности накачки для твердотельного лазера на ЛЭ толщиной 1.5 мм выглядит так же, как и для ЛЭ толщиной 1 мм, однако мощности генерации ниже. Пороговая поглощенная мощность  $P_{th}$  для этого лазера составила 390 мВт, дифференциальная эффективность  $\eta$  на линейном участке – 0.14. Отклонения от линейной зависимости наблюдались при той же поглощенной мощности накачки  $P_a = 2$  Вт, что и для твердотельного лазера на ЛЭ толщиной 1 мм, но выходная мощность была значительно меньше ( $P_{out} = 220$  мВт). Максимальная выходная мощность  $P_{out}^{max}$  составила  $\sim 250$  мВт при  $P_a = 2.9$  Вт. Лазерная генерация у обоих образцов прекращалась полностью при  $P_a = 3.3$  Вт, а разрушение ЛЭ происходило при  $P_a \approx 4$  Вт.

Отклонение полученных зависимостей от линейного закона вызвано термическими искажениями резонаторов твердотельного лазера [14], приводящими к появлению в ЛЭ наведенной тепловой линзы. Такой ЛЭ в нашем случае можно рассматривать как зеркало с радиусом кривизны, равным фокусному расстоянию тепловой линзы [15]. С увеличением мощности накачки радиус кривизны зеркала уменьшается. В тот момент, когда он становится меньше длины резонатора, система выходит за границы области устойчивости и происходит срыв генерации. При меньших длинах резонатора срыв должен происходить при больших поглощенных мощностях накачки, что наблюдалось нами в эксперименте. Оптическая сила тепловой линзы, определяющая характерные особенности зависимости выходной мощности лазера от поглощенной мощности накачки, пропорциональна плотности мощности накачки [16], которая равна мощности накачки, деленной на площадь сечения пучка накачки. Поскольку геометрия накачки оставалась неизменной, качественно зависимости выходной мощности от поглощенной мощности накачки для элементов разной толщины выглядят одинаково. Эффективность генерации твердотельного лазера на ЛЭ большей толщины 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 следует, что возможно достижение больших выходной мощности и оптического КПД путем выбора оптимальных параметров резонатора и ЛЭ.

#### 5. Заключение

В работе проведено сравнение спектрально-люминесцентных и лазерных характеристик кристаллов YAG : Nd и CGGG : Nd. Показано, что спектры поглощения и люминесценции ионов  $Nd^{3+}$  в кристаллах CGGG : Nd уширены больше, что объясняется многоцентровой структурой CGGG : Nd. Это облегчает согласование спектров накачки на основе лазерных диодов со спектрами возбуждения кристаллов CGGG : Nd и обеспечивает большую стабильность лазерной генерации при изменении внешней температуры.

В схеме с диодной накачкой через оптическое волокно были исследованы генерационные характеристики пространственно одномодовых лазеров на кристаллах CGGG : Nd с концентрацией ионов  $Nd^{3+}$ , равной  $2 \times 10^{20}$  см $^{-3}$ , и проведено их сравнение с аналогичными параметрами известных лазерных кристаллов YAG : Nd с кон-

центрацией ионов  $\text{Nd}^{3+}$ , равной  $0.8 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Определена величина эффективного сечения индуцированных переходов  $\sigma_{\text{CGGG}} = 1.4 \times 10^{-19} \text{ см}^2$  для кристаллов CGGG:Nd, которая является усредненной по четырем основным линиям, наблюдающимся в спектре лазерной генерации.

Показано, что исследованные лазерные кристаллы CGGG:Nd по эффективности генерации близки к лазерным кристаллам на основе YAG:Nd и имеют преимущества, связанные с приблизительно в 3 раза большей шириной линии поглощения излучения накачки, высокой эффективностью поглощения накачки, а также с более простой технологией производства и меньшей стоимостью этих гранатов. Обнаружено, что спектр генерации лазера на CGGG:Nd на  $\lambda \approx 1.064 \text{ мкм}$  является неоднородно уширенным и состоит из четырех отчетливых пиков, подтверждающих спектроскопические данные о существовании нескольких (по крайней мере четырех) активаторных центров для ионов  $\text{Nd}^{3+}$  в кристаллах  $\text{Ca}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ .

Были определены параметры генерации компактного лазера на кристалле CGGG:Nd при больших мощностях накачки, и показано, что в этом случае рост выходной мощности ограничивается возникновением тепловой линзы. В непрерывном режиме генерации достигнута выходная мощность около 700 мВт при поглощенной мощности накачки 2.7 Вт.

Проведенные исследования показали, что CGGG:Nd является перспективным лазерным кристаллом для создания компактных эффективных и экономичных лазеров, работающих в широком диапазоне выходных мощностей. Неоднородно уширенный спектр генерации Nd:CGGG-лазера представляет интерес для получения пере-

страиваемого по длине волны излучения, оптического гетеродинамирования, а также для оптического усиления и получения коротких лазерных импульсов.

1. Еськов Н.А., Осико В.В., Соболев А.А., Тимошечкин М.И., Бугаева Т.И., Нгок Чан, Каминский А.А. *Неорганические материалы*, **14**, 2254 (1978).
2. Петрунин Г.И., Попов В.Г., Тимошечкин М.И. *ФТТ*, **309**, 139 (1989).
3. Воронько Ю.К., Кабаченко В.Я., Крысанова Л.И., Осико В.В., Соболев А.А., Тимошечкин М.И. *Неорганические материалы*, **19**, 959 (1983).
4. Шаталов А.Ф., Тимошечкин М.И., Беловолов М.И., Гладышев А.В. *Тез. докл. Всеросс. науч. конф. «Лазеры. Измерения. Информатика»* (С.-Пб., 2003, с. 88).
5. Belovolov M.I., Dianov E.M., Timoschekkin M.I., Morosov N.P., Prokhorov A.M., Timoschekkin K.M. *Proc. CLEO/Europe'96* (Hamburg, Germany, 1996, Paper CThI60, p. 281).
6. Зверев Г.М., Голяев Ю.Д. *Лазеры на кристаллах и их применение* (М.: Радио и связь, 1988).
7. Jaque D., Caldino U., Romero J.J., Garcia Sole J. *J. Appl. Phys.*, **86**, 6627 (1999).
8. Jaque D., Romero J.J., Garcia Sole J. *J. Appl. Phys.*, **92**, 3436 (2002).
9. Басиев Т.Т., Дианов Е.М., Прохоров А.М., Щербаков И.А. *ДАН СССР*, **216**, 297 (1974).
10. Naito K., Yokotani A., Sasaki T., Okuyama T., Yamanaka M., Nakatsuka M., Nakai S., Fukuda T., Timoschekkin M.I. *Appl. Opt.*, **32**, 7387 (1993).
11. Chen Y.-F. *J. Appl. Phys. B*, **70**, 475 (2000).
12. Romero J.J., Jaque D., et al. *J. Appl. Phys.*, **92**, 1754 (2002).
13. Mermilliod N., Romero R., Chartier I., Garapon C., Moncorge R. *IEEE J. Quantum Electron.*, **28**, 1179 (1992).
14. Дианов Е.М., Прохоров А.М. *ДАН СССР*, **192**, 531 (1970).
15. Ведяшкин Н.В., Державин С.И., Кузьминов В.В., Машковский Д.А. *Квантовая электроника*, **33**, 367 (2003).
16. Mukhopadhyay P.K., Ranganathan K., Jogy J., Sharma S.K., Nathan T.P.S. *Opt. Laser Technol.*, **35**, 173 (2003).