

Кристаллы кальций-ниобий-галлиевого и кальций-литий-ниобий-галлиевого гранатов как активные среды лазеров с диодной накачкой

Ю.К.Воронько, Н.А.Еськов, А.С.Подставкин, П.А.Рябочкина, А.А.Соболь, С.Н.Ушаков

Исследованы энергетические и спектральные характеристики лазеров на кристаллах кальций-ниобий-галлиевого и кальций-литий-ниобий-галлиевого гранатов при накачке лазерным диодом с выходной мощностью 2 Вт. Продемонстрирована стабильность характеристик лазерного излучения кристаллов при небольших колебаниях температуры диода накачки.

Ключевые слова: полупроводниковая накачка, выходные характеристики, кристаллы гранатов.

Впервые спектральные и генерационные свойства кристаллов кальций-ниобий-галлиевого граната $\text{Ca}_3\text{Nb}_{1.68}\text{Ga}_{3.2}\text{O}_{12}$ (КНГГ), активированного ионами Nd^{3+} , исследованы в работах [1–3], а кальций-литий-ниобий-галлиевого граната $\text{Ca}_3\text{Li}_{0.25}\text{Nb}_{1.75}\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ (КЛНГГ) – в работе [4]. В настоящее время исследователи вновь проявляют интерес к разупорядоченным средам, активированным редкоземельными ионами, в частности к кристаллам КНГГ, активированного Nd^{3+} [5, 6].

Привлекательными свойствами этих кристаллов являются низкая температура плавления (1460°C), позволяющая выращивать их из платиновых тиглей, а также особенности кристаллической структуры, приводящие к сильному неоднородному уширению линий редкоземельных ионов-активаторов. По величине неоднородного уширения кристаллы КНГГ и КЛНГГ сравнимы со стеклами, однако они обладают большей по сравнению со стеклами теплопроводностью и присущими кристаллам граната высокой стабильностью оптических характеристик и механической прочностью.

Нами была проведена оптимизация ионного состава указанных кристаллов и концентрации активатора – иона Nd^{3+} с целью использования этих гранатов в качестве активного элемента лазеров с ламповой накачкой, работающих в режимах свободной генерации и модулированной добротности. Характеристики этих лазеров при средней мощности излучения до 30 Вт превышали аналогичные характеристики $\text{Nd}:\text{ИАГ}$ -лазеров [4, 7].

Ранее нами были исследованы и лазеры на рассматриваемых кристаллах, работающие в режиме синхронизации мод. Благодаря неоднородному уширению линий люминесценции Nd^{3+} в кристаллах КНГГ: Nd^{3+} и КЛНГГ: Nd^{3+} были получены импульсы излучения длительностью 10–15 пс в режиме как активной, так и пассивной синхронизации мод, при этом эффективность таких кристаллов оказалась выше, чем эффективность промышленных лазерных стекол [8, 9].

Однако меньшая по сравнению с ИАГ теплопроводность ограничивала возможность применения этих кри-

сталлов при ламповой накачке. Использование для возбуждения кристаллов КНГГ: Nd^{3+} и КЛНГГ: Nd^{3+} полупроводниковых лазеров снимает это ограничение.

Для исследования было отобрано несколько кристаллов КНГГ: Nd^{3+} и КЛНГГ: Nd^{3+} с различной атомной концентрацией n_a ионов Nd^{3+} . Кристаллы были выращены методом Чохральского из платиновых тиглей. Концентрация активатора контролировалась методом рентгенофлуоресцентного анализа.

На рис.1 приведены спектры поглощения кристаллов КНГГ с разными концентрациями n_a и стандартного образца ИАГ: Nd^{3+} с $n_a = 1\%$. Максимумы линий поглощения для КНГГ и КЛНГГ находятся на длине волны $\lambda = 807.5$ нм. Как видно из рис.1, кристаллы КНГГ имеют меньшее по сравнению с ИАГ пиковое значение линии поглощения (при одинаковых концентрациях Nd^{3+}), но большую ее полуширину. Последняя для КНГГ и КЛНГГ равна 4 нм, а для ИАГ – около 1 нм.

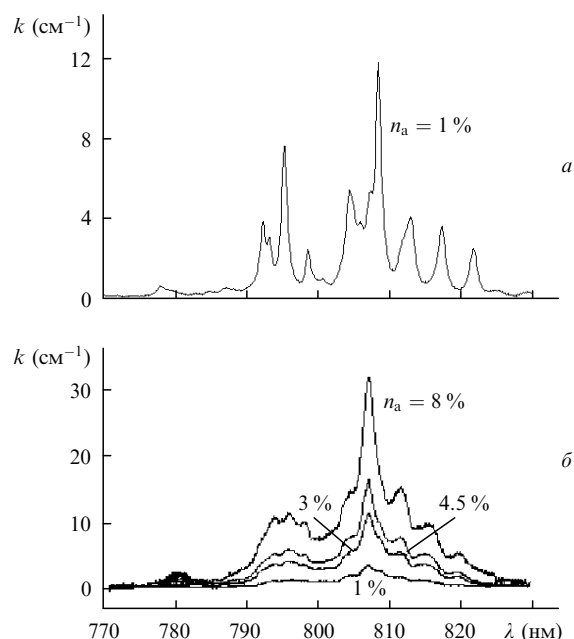


Рис.1. Спектры поглощения кристаллов ИАГ: Nd^{3+} (а) и КНГГ: Nd^{3+} (б) при разных концентрациях n_a .

Для достижения таких же, как в ИАГ:Nd³⁺, пиковых значений поглощения концентрацию активатора в кристаллах КНГГ и КЛНГГ необходимо увеличить до 3%.

Определение оптимальной концентрации связано с изучением кросс-релаксации возбуждения с уровня ⁴F_{3/2} с последующей безызлучательной релаксацией. Для этого мы исследовали кинетику затухания люминесценции при переходе иона Nd³⁺ с уровня ⁴F_{3/2} на уровень ⁴I_{9/2}. При этом использовалось резонансное импульсное (τ_p = 10 нс) возбуждение излучением лазера с λ = 880 нм.

На рис.2 представлена кинетика затухания люминесценции трех образцов кристаллов КНГГ с различной концентрацией Nd³⁺. Для образца с концентрацией n_a ~ 1% (10²⁰ см⁻³) затухание люминесценции экспоненциально в большом динамическом диапазоне, а время жизни равно 237 мкс. С увеличением концентрации на кривых затухания виден фёрстеровский распад.

Для кристаллов гранатов, активированных неодимом, кросс-релаксация хорошо описывается формулой Фёрстера – Декстера для случая диполь-дипольного взаимодействия:

$$I = I_0 \exp \left[- \left(\frac{t}{\tau} + \gamma \sqrt{t} + w \right) \right], \quad (1)$$

где I – интенсивность люминесценции; τ – радиационное время жизни; w – вероятность миграционно-ограниченной релаксации; γ – параметр прямого статического взаимодействия. Определение с помощью формулы (1) параметра γ позволяет найти микропараметр донор-акцепторного взаимодействия:

$$C_{da} = \frac{9\gamma^2}{16\pi^3 n_a^2}. \quad (2)$$

Однако для кристаллов КНГГ:Nd³⁺ и КЛНГГ:Nd³⁺ вследствие многоцентровости вхождения в них ионов Nd³⁺, строго говоря, формула (2) неприменима несмотря на то, что для отдельных концентраций кривая затухания достаточно хорошо описывается формулой (1). Вычисленный микропараметр C_{da} для концентрации n_a = 3% равен 4.5·10⁻⁴¹ см⁶·с⁻¹, что сильно отличается от его значения 5.4·10⁻⁴⁰ см⁶·с⁻¹ для n_a = 8%.

Возможно, это связано с тем, что вследствие разупорядоченности рассматриваемых кристаллов мы имеем несколько констант взаимодействия как внутри групп

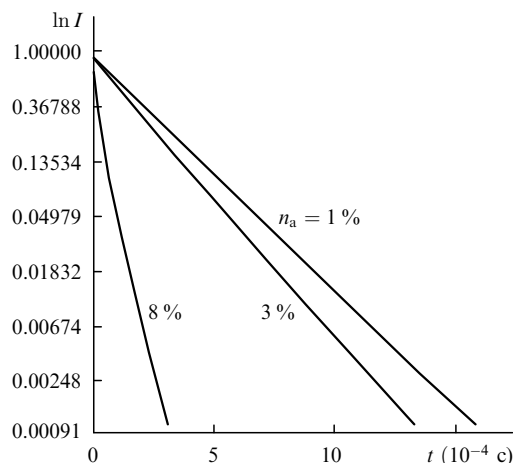


Рис.2. Кинетика затухания интенсивности люминесценции I с уровня ⁴F_{3/2} иона Nd³⁺ в кристаллах КНГГ при разных концентрациях n_a.

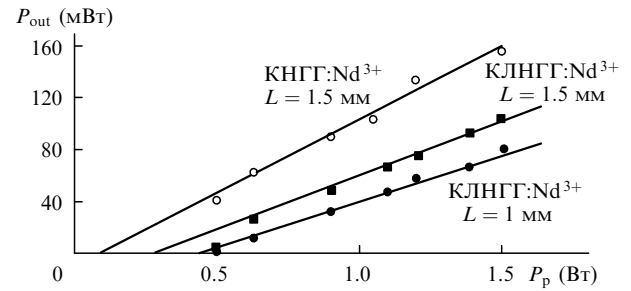


Рис.3. Зависимости выходной мощности генерации P_{out} от мощности накачки P_p для активных элементов разной длины.

центров, так и между этими группами, и при изменении концентрации активатора нарушается соотношение удельных концентраций отдельных групп центров. Таким образом, наиболее объективным параметром для оценки вклада кросс-релаксации является интеграл кинетики затухания $\int_0^{\infty} I dt$. Значения интегралов кинетики затухания показывают, что квантовый выход люминесценции образца КНГГ:Nd³⁺ с n_a = 3% составил примерно 75% от квантового выхода люминесценции того же образца с n_a = 1%.

Для лазерных экспериментов использовались кристаллы КНГГ:Nd³⁺ и КЛНГГ:Nd³⁺ с диаметром 5 мм и длинами $L = 1, 1.5$ и 2 мм. В качестве источника накачки применялся лазерный диод с выходной мощностью 2 Вт и длиной волны около 807 нм. Активный элемент в виде плоскопараллельного диска, с одной стороны которого нанесено просветляющее покрытие, а с другой – селективное зеркало с коэффициентами отражения $R_{1,06} = 99.9\%$ и $R_{0,8} < 10\%$, помещали в фокус оптической системы, состоящей из двух линз. Длина оптического резонатора составляла 50 мм. Плоское выходное зеркало имело коэффициент отражения $R = 99.4\%$. Выходные параметры непрерывной генерации приведены на рис.3.

Спектр излучения лазеров на кристаллах КНГГ:Nd³⁺ и КЛНГГ:Nd³⁺ в режиме непрерывной генерации при неселективном резонаторе состоит из двух линий в областях 1055–1062 и 1063–1066 нм. Структура этих линий зависит от мощности накачки. Эти данные согласуются с результатами наших исследований таких же лазеров при импульсной ламповой накачке [7] и лазеров на кристаллах КНГГ:Nd³⁺ при диодной накачке [6].

Значительная ширина линий поглощения ионов Nd³⁺ в кристаллах КНГГ и КЛНГГ приводит к стабильности выходных параметров лазерного излучения при изменении температуры лазерного диода в диапазоне ±1.5 °С. Это существенно снижает требования к системе термостабилизации и идентичности длин волн излучения различных диодов в случае использования диодных линеек и матриц. Проведенные нами исследования демонстрируют перспективность применения кристаллов КНГГ и КЛНГГ, активированных ионами Nd³⁺, в качестве активных элементов лазеров с полупроводниковой накачкой.

Настоящая работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 00-02-16318а).

1. Каминский А.А., Милль Б.В., Буташи А.В., Саркисов С.Э., Никольская О.К. *Изв. АН СССР. Сер. Неорганич. матер.*, **21**, 2093 (1985).
2. Каминский А.А., Белоконева Е.Л., Буташи А.В., Курбанов К., Маркосян А.А., Милль Б.В., Никольская О.К., Саркисов С.Э. *Изв. АН СССР. Сер. Неорганич. матер.*, **22**, 1061 (1986).