

Качественное улучшение лазерных свойств кристаллов $\text{PbGa}_2\text{S}_4:\text{Dy}^{3+}$ при их соактивации ионами Na^+

Т.Т.Басиев, М.Е.Дорошенко, В.В.Осико, В.В.Бадиков,
Д.В.Бадиков, В.Л.Панютин, Г.С.Шевырдяева

Исследованы генерационные свойства кристаллов тиогаллата свинца, активированных ионами трехвалентного диспрозия и соактивированных ионами натрия. Показано положительное влияние дополнительной соактивации ионами натрия на оптические и генерационные свойства кристаллов тиогаллата свинца. При длительности импульса накачки 1.5 мс реализованы существенно более высокие значения энергии генерации в импульсе – до 15 мДж при дифференциальном КПД до 4%. Получено каскадное лазерное излучение на двух электронных переходах иона Dy^{3+} с длинами волн 4.3, 4.5, 4.65, 5.2, 5.3 и 5.4 мкм.

Ключевые слова: кристалл тиогаллата свинца, ионы диспрозия, ионы натрия, соактивация, каскадная генерация Dy^{3+} .

Кристаллы тиогаллата свинца, активированные ионами диспрозия ($\text{PbGa}_2\text{S}_4:\text{Dy}^{3+}$), являются перспективной активной средой для лазеров среднего ИК диапазона [1–4]. Из-за значительного различия ионных радиусов Pb^{2+} и Dy^{3+} (1.29 и 1.03 Å в восьмерной координации) даже введение в кристаллическую матрицу диспрозия с атомной концентрацией 1% приводит к значительному ухудшению ее оптической однородности и нарушает воспроизводимость лазерных свойств выращенных активных кристаллов [3]. По нашему мнению, дополнительная соактивация $\text{PbGa}_2\text{S}_4:\text{Dy}^{3+}$ щелочным ионом Na^+ могла бы способствовать как смягчению влияния значительного различия между ионными радиусами Pb^{2+} и Dy^{3+} , так и решению традиционной задачи зарядовой компенсации. Напомним, что величина ионного радиуса Na^+ в восьмерной координации составляет 1.16 Å. В работе [3] отмечалось, что дополнительная соактивация ионами Na^+ позволяет увеличить концентрацию ионов диспрозия в выращенных кристаллах. Влияние соактиватора Na^+ на спектроскопические параметры и лазерные свойства кристаллов $\text{PbGa}_2\text{S}_4:\text{Dy}^{3+}$ являются предметом обсуждения данной работы.

Генерационные свойства активных элементов из кристаллов $\text{PbGa}_2\text{S}_4:\text{Dy}^{3+}:\text{Na}^+$ (далее по тексту PGS:Dy:Na) были исследованы при их оптической накачке излучением лазера на кристалле YAG:Nd³⁺, который работал в режиме свободной генерации на длине волны 1.318 мкм с частотой повторения импульсов 3 Гц. Лазер накачки включал в себя два осветителя с активными элементами размером 6.3 × 100 мм. Для подавления генерации на основном переходе ионов неодима с длиной волны 1.064 мкм элементы были установлены в V-образном резонаторе со специальным дихроичным поворот-

ным зеркалом с максимальным отражением на длине волны генерации 1.318 мкм и максимальным пропусканием на конкурирующей длине волны 1.064 мкм. Каждый активный элемент накачивали излучением импульсной лампы с разрядным промежутком 90 мм и питанием от отдельных источников с управляемой длительностью импульса разряда. Для получения генерации только на длине волны 1.318 мкм и подавления второй линии генерации с длиной волны 1.34 мкм в резонатор лазера устанавливали дополнительно селективирующее зеркало с пропусканием на длине волны 1.318 мкм и отражением на длине волны 1.34 мкм.

Резонатор лазера с элементом из активированного тиогаллата свинца был образован двумя зеркалами. Излучение накачки вводили в активный элемент через входное плоское дихроичное зеркало резонатора с максимальном пропускания на 1.318 мкм и максимальным отражением ~0.998 в диапазоне длин волн 4–5.5 мкм. Выходное зеркало резонатора с радиусом кривизны 500 мм располагалось на расстоянии ~40 мм от плоского входного зеркала. Для оптимизации энергии генерируемого излучения использовали выходные зеркала с различными коэффициентами отражения. Излучение накачки фокусировали в активный элемент линзой с фокусным расстоянием 100 мм. Для предотвращения пробоя активного элемента и зеркал резонатора линзу устанавливали таким образом, чтобы фокус располагался вне резонатора PGS:Dy-лазера.

Измерение выходной энергии генерации PGS:Dy-лазера осуществлялось с помощью измерителя мощности EPM-2000 (Coherent). Спектры генерации регистрировались с использованием монохроматора МДР-23 с решеткой 150 штрих./мм, охлаждаемого жидким азотом приемника на основе антимонида индия и цифрового осциллографа TDS-3052 (Tektronix), подключенного к персональному компьютеру.

Зависимости выходной энергии импульса генерации PGS:Dy:Na-лазера от поглощенной энергии излучения накачки для различных коэффициентов отражения выходного зеркала показаны на рис.1. Максимальные значения энергии импульса генерации (5 мДж) и дифферен-

Т.Т.Басиев, М.Е.Дорошенко, В.В.Осико. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: dorosh@lst.gpi.ru

В.В.Бадиков, Д.В.Бадиков, В.Л.Панютин, Г.С.Шевырдяева. Кубанский государственный университет, Россия, 350040 Краснодар, ул. Ставропольская, 149

циального КПД η_{dif} (3.6 %) получены для выходного зеркала с коэффициентом отражения $R_1 = 85\%$ на длине волны 4.3 мкм. Отметим, что для двух зеркал R_2 и R_3 с идентичным коэффициентом отражения на длине волны 4.3 мкм (90 %) при одинаковом η_{dif} пороги генерации существенно отличаются, что связано с различным отражением этих зеркал на длине волны 5.4 мкм.

Действительно, длина волны 5.4 мкм соответствует максимуму спектра люминесценции ионов диспрозия в кристалле тиогаллата свинца на электронном переходе ${}^6\text{H}_{9/2} - {}^6\text{H}_{11/2}$. Накачка ионов диспрозия лазерным излучением с длиной волны 1.318 мкм приводит первоначально к заселению уровня ${}^6\text{H}_{9/2}$, через который затем заселяется верхний уровень ${}^6\text{H}_{11/2}$; с уровня ${}^6\text{H}_{11/2}$ и происходит последующая генерация на длине волны 4.3 мкм. Как следует из проведенного ранее анализа [1], заселение верхнего лазерного уровня ${}^6\text{H}_{11/2}$ происходит в основном за счет безызлучательной релаксации с верхнего уровня ${}^6\text{H}_{9/2}$. Доля излучательных переходов с уровня ${}^6\text{H}_{9/2}$ на уровень ${}^6\text{H}_{11/2}$ составляет всего 12 %. Включение канала генерации на переходе ${}^6\text{H}_{9/2} - {}^6\text{H}_{11/2}$ существенно ускоряет процесс заселения уровня ${}^6\text{H}_{11/2}$. Это позволяет предположить, что реализация в кристалле $\text{PGS}:\text{Dy}:\text{Na}$ каскадного типа генерации должна привести к росту эффективности генерации в области 4 мкм.

На рис.1 также приведена зависимость выходной энергии импульса генерации от поглощенной энергии для кристалла $\text{PGS}:\text{Dy}$, равного по длине кристаллу $\text{PGS}:\text{Dy}:\text{Na}$. Без дополнительной соактивации ионами Na^+ максимальная поглощенная энергия накачки существенно меньше из-за меньшей концентрации ионов диспрозия, а дифференциальный КПД при прочих равных условиях более чем вдвое ниже (1.4 %).

Спектр генерации $\text{PGS}:\text{Dy}:\text{Na}$ -лазера для коэффициента отражения выходного зеркала $R_1 = 85\%$ показан на рис.2 совместно со спектром люминесценции ионов диспрозия в кристалле тиогаллата свинца. В спектре генерации ионов диспрозия наблюдается ряд линий с максимумами около 4.3, 4.5 и 4.65 мкм, за которые ответственен переход ${}^6\text{H}_{11/2} - {}^6\text{H}_{13/2}$. Кроме того, в спектре генерации наблюдаются линии, соответствующие выше лежащему лазерному переходу ${}^6\text{H}_{9/2} - {}^6\text{H}_{11/2}$ с максимумами на длинах волн 5.2, 5.3 и 5.4 мкм, что указывает на его существенное влияние на заселение уровня ${}^6\text{H}_{11/2}$ и

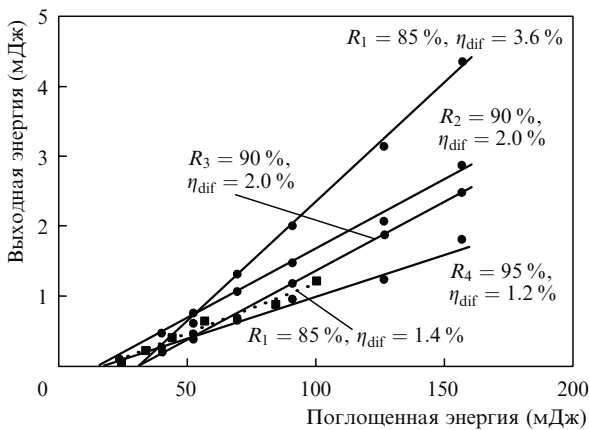


Рис.1. Зависимости выходной энергии генерации лазера на кристалле $\text{PbGa}_2\text{S}_4:\text{Dy}^{3+}:\text{Na}^+$ от поглощенной энергии накачки при различных величинах коэффициента отражения выходного зеркала. Пунктиром выделена зависимость для кристалла $\text{PbGa}_2\text{S}_4:\text{Dy}^{3+}$ без дополнительной соактивации ионами Na^+ .

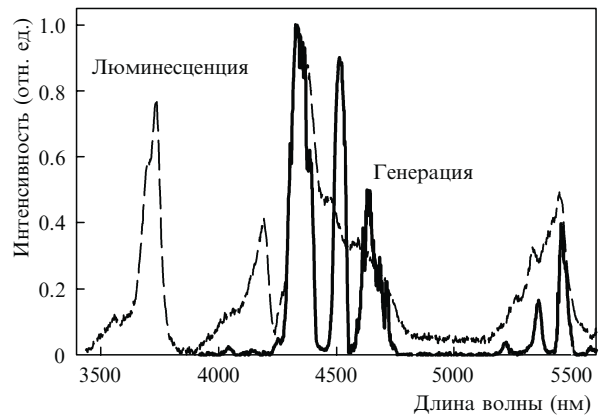


Рис.2. Спектр генерации лазера на кристалле $\text{PbGa}_2\text{S}_4:\text{Dy}^{3+}:\text{Na}^+$ с выходным зеркалом с коэффициентом отражения 85 % и спектр люминесценции ионов диспрозия в кристалле тиогаллата свинца.

каскадный тип генерации ионов диспрозия в кристалле тиогаллата свинца при накачке излучением с длиной волны 1.318 мкм (заселение уровня ${}^6\text{H}_{9/2}$).

На рис.3 приведены зависимости выходной энергии генерации от поглощенной энергии накачки при различных частотах повторения импульсов накачки. Как видно из рисунка, повышение частоты повторения импульсов накачки приводит к некоторому снижению дифференциального КПД генерации. Мы связываем это с разогревом кристалла $\text{PGS}:\text{Dy}:\text{Na}$, который не имел системы охлаждения.

Для исследования влияния длительности импульса излучения накачки на генерационные свойства кристалла $\text{PGS}:\text{Dy}:\text{Na}$ длительность разрядного импульса накачки кристаллов $\text{YAG}:\text{Nd}$ изменяли в пределах 250–1000 мкс. Зависимости выходной энергии генерации $\text{PGS}:\text{Dy}:\text{Na}$ -лазера от энергии импульса накачки при различных длительностях разрядного импульса (τ_p) приведены на рис.4. Необходимо отметить, что, в отличие от графика на рис.1, здесь на оси абсцисс отложена не поглощенная энергия излучения накачки, а полная энергия, падающая на кристалл. Как следует из полученных результатов, дифференциальный КПД генерации растет при увеличении длительности импульса накачки от 250 до 1000 мкс, что связано с лучшим согласованием длительности импульса накачки с временем жизни верхнего лазерного уровня ${}^6\text{H}_{11/2}$ (2 мс). Вид импульсов накачки и генерации при длительности разряда ламп накачки 1 мс

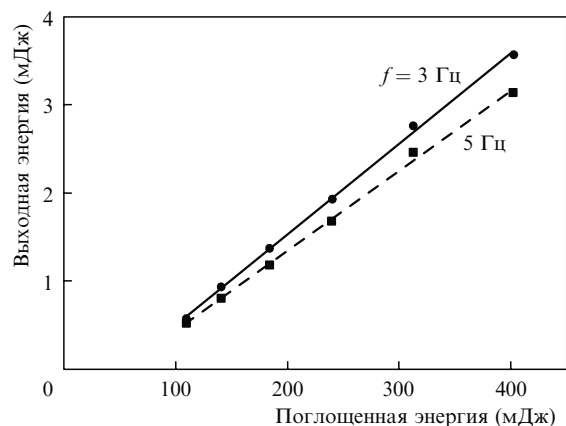


Рис.3. Зависимости выходной энергии генерации лазера на кристалле $\text{PbGa}_2\text{S}_4:\text{Dy}^{3+}:\text{Na}^+$ от поглощенной энергии накачки при различных частотах повторения f импульсов накачки.

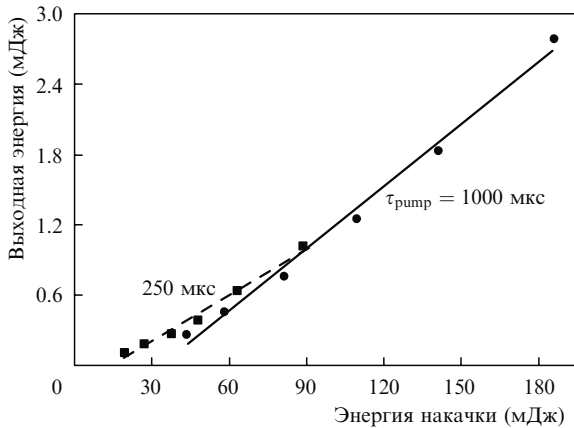


Рис.4. Зависимости выходной энергии генерации лазера на кристалле $\text{PbGa}_2\text{S}_4:\text{Dy}^{3+}:\text{Na}^+$ от падающей на кристалл энергии накачки при различных длительностях τ_{pump} разрядного импульса лампы накачки $\text{YAG}:\text{Nd}$ -лазера.

представлен на рис.5. Видно, что длительности импульсов $\text{YAG}:\text{Nd}$ -лазера накачки и $\text{PGS}:\text{Dy}:\text{Na}$ -лазера совпадают и составляют ~ 800 мкс по полувысоте.

На рис.6 приведены измеренные зависимости выходной энергии генерации $\text{PGS}:\text{Dy}:\text{Na}$ -лазера от поглощенной энергии накачки при длительности импульса разряда лампы накачки 1.5 мс. В этих экспериментах была достигнута максимальная энергия импульса генерации 15 мДж при дифференциальном КПД генерации 4 %, что

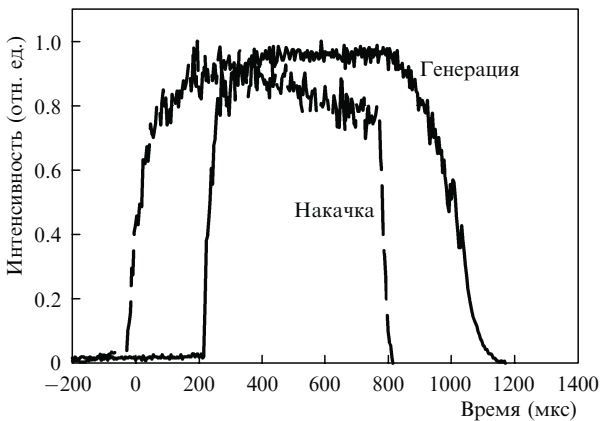


Рис.5. Осциллограммы импульсов генерации лазера накачки и лазера на кристалле тиагаллата свинца при длительности импульса разряда лампы накачки 1 мс.

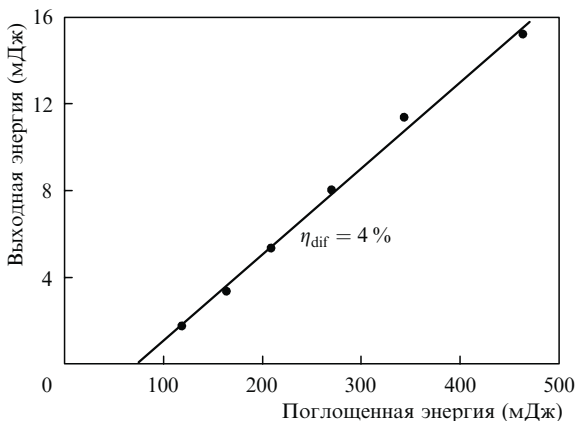


Рис.6. Зависимость выходной энергии генерации лазера на кристалле $\text{PbGa}_2\text{S}_4:\text{Dy}^{3+}:\text{Na}^+$ от поглощенной энергии накачки при длительности разрядного импульса лампы накачки $\text{YAG}:\text{Nd}$ -лазера 1.5 мс.

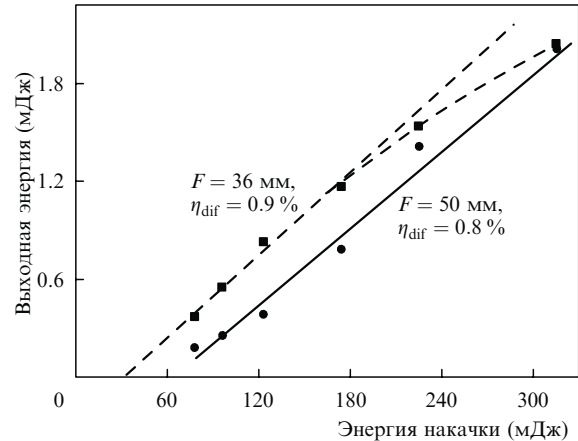


Рис.7. Зависимости выходной энергии генерации лазера на кристалле $\text{PbGa}_2\text{S}_4:\text{Dy}^{3+}:\text{Na}^+$ от падающей энергии накачки при различных фокусных расстояниях F фокусирующей цилиндрической линзы.

существенно превышает достигнутые ранее значения [1–4]. Учет различия энергий поглощенных квантов накачки и квантов генерации дает значение квантовой эффективности процесса генерации ~ 6 %.

Во всех предыдущих экспериментах была использована продольная схема оптической накачки. Представляло интерес исследование генерационных свойств $\text{PGS}:\text{Dy}:\text{Na}$ -лазера при поперечной схеме накачки активного элемента. Для формирования соответствующего профиля пучка накачки использовались различные цилиндрические фокусирующие линзы и расширение пучка до диаметра ~ 10 мм. На рис.7 приведены зависимости выходной энергии генерации $\text{PGS}:\text{Dy}:\text{Na}$ -лазера от падающей энергии излучения накачки для случая поперечной накачки при различных фокусных расстояниях цилиндрических линз. Как и следовало ожидать, использование более короткофокусной линзы повышает плотность мощности накачки и снижает порог генерации. При этом при малых энергиях накачки дифференциальный КПД растет, а при больших энергиях насыщение поглощения приводит к просветлению канала накачки и уменьшению поглощенной энергии.

Таким образом, в данной работе были синтезированы оптически более однородные кристаллы $\text{PbGa}_2\text{S}_4:\text{Dy}^{3+}:\text{Na}^+$ с повышенной концентрацией активатора Dy^{3+} . Существенно более высокое оптическое качество выращенных кристаллов позволило использовать более высокие энергии накачки без оптического пробоя активных элементов. На активных элементах из выращенных кристаллов впервые достигнута энергия импульса генерации 15 мДж в среднем ИК диапазоне при дифференциальном КПД до 4 %. Реализована каскадная генерация ионов диспрозия на переходах ${}^6\text{H}_{9/2} - {}^6\text{H}_{11/2}$ и ${}^6\text{H}_{11/2} - {}^6\text{H}_{13/2}$ с длинами волн 5.2, 5.3 и 5.4 мкм и 4.65, 4.5 и 4.3 мкм соответственно.

1. Basiev T.T., Doroshenko M.E., Osiko V.V., Badikov D.V., in *Trends in Optics and Photonics* (Washington, DC, Optical Society of America, 2005, Vol. 98).
2. Orlovskii Yu.V., Basiev T.T., Pukhov K.K., Alimov O.K., Doroshenko M.E., Polyachenkova M.V., Dmitruk L.N., Osiko V.V., Badikov D.V., Badikov V.V., Mirov S.B. *Opt. Mater.*, **29**, 1115 (2007).
3. Badikov V., Badikov D., Doroshenko M., Panyutin V., Chizhikov V.I., Shevrydyeva G. *Opt. Mater.*, **31**, 184 (2008).
4. Doroshenko M.E., Basiev T.T., Osiko V.V., Badikov D.V., Badikov V.V., Jelinkova H., Koranda P., Sulc J. *Opt. Lett.*, **34** (5), 590 (2009).