

ЛАЗЕР СРЕДНЕГО

ИК-ДИАПАЗОНА НА КРИСТАЛЛЕ $\text{PbGa}_2\text{S}_4:\text{Dy}^{3+}$

Выращенные кристаллы $\text{PbGa}_2\text{S}_4:(\text{Dy}^{3+}, \text{Na}^+)$ с высокой оптической однородностью и повышенной концентрацией активатора (ионов Dy^{3+}) позволили использовать высокие энергии накачки без оптического пробоя активного элемента. Впервые в среднем ИК-диапазоне длин волн была получена высокая энергия импульса генерации до 15 мДж с эффективностью до 4%.

Кристаллы тiogаллата 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+} (1,29Å/1,03Å в восьмерной координации), введение в кристаллическую матрицу даже 1% ат. диспрозия приводит к значительному ухудшению ее оптической однородности и нарушает воспроизводимость лазерных свойств выращенных активных кристаллов [3]. При этом дополнительная соактивация $\text{PbGa}_2\text{S}_4:\text{Dy}^{3+}$ щелочным ионом Na^+ способствует как смягчению проблемы значительного различия ионных радиусов Pb^{2+} и Dy^{3+} , так и решению традиционной задачи зарядовой компенсации, что в результате позволяет улучшить оптическое качество и увеличить концентрацию ионов диспрозия в выращенных кристаллах.

Генерационные свойства активных элементов из кристаллов $\text{PbGa}_2\text{S}_4:(\text{Dy}^{3+}, \text{Na}^+)$ исследовались при оптической накачке излучением лазера на кристалле $\text{YAG}:\text{Nd}^{3+}$, который работал в режиме свободной генерации на длине волны 1,318 мкм. В экспериментах использовались: мощный двухэлементный лазер (два активных элемента $\text{YAG}:\text{Nd}$ размером $6,3 \times 100$ мм) с ламповой накачкой для получения высоких выходных энергий и малогабаритный лазер на кристалле $\text{YAG}:\text{Nd}$ с диодной накачкой со средней выходной мощностью до 3 Вт для исследования возможности создания компактного источника излучения в среднем ИК-диапазоне длин волн (4–6 мкм).

Оптический резонатор лазера на основе активированного тiogаллата свинца был образован двумя зеркалами: входное плоское дирироичное зеркало с максимумом пропускания на длине волны накачки 1,318 мкм и максимальным отражением $R=0,998$ в диапазоне длин волн 4–5,5 мкм. Выходное зеркало резонатора с радиусом кривизны 500 мм было установлено на расстоянии порядка 40 мм от плоского входного зеркала. Для оптимизации энергии генерируемого излучения использовали выходные зеркала с различными коэффициентами отражения. Излучение накачки фокусировалось в активный элемент линзой с фокусным расстоянием 100 мм.

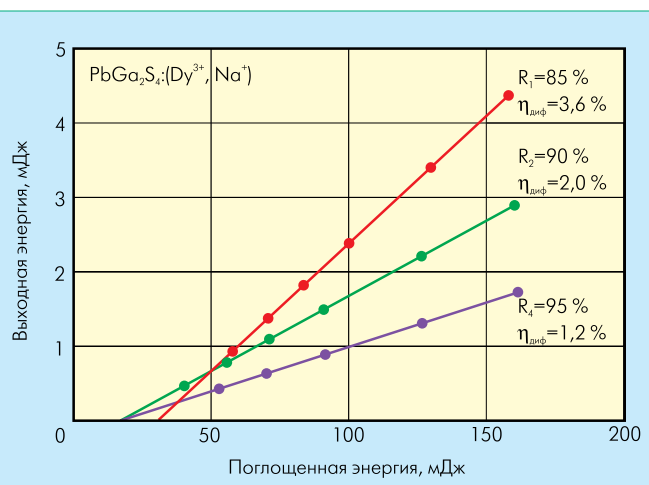


Рис. 1 Зависимость выходной энергии генерации лазера на кристалле $\text{PbGa}_2\text{S}_4:(\text{Dy}^{3+}, \text{Na}^+)$ от поглощенной энергии накачки при различных величинах коэффициента отражения выходного зеркала

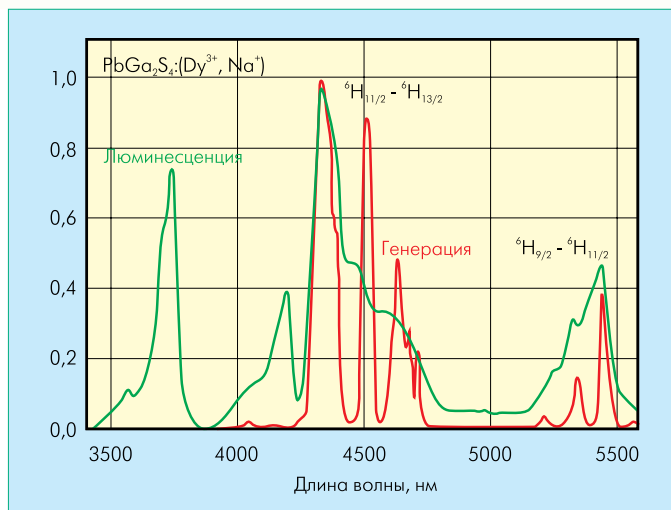


Рис.2 Спектр генерации лазера на кристалле $\text{PbGa}_2\text{S}_4:(\text{Dy}^{3+}, \text{Na}^+)$ с выходным зеркалом с коэффициентом отражения 85% и спектр люминесценции ионов диспрозия

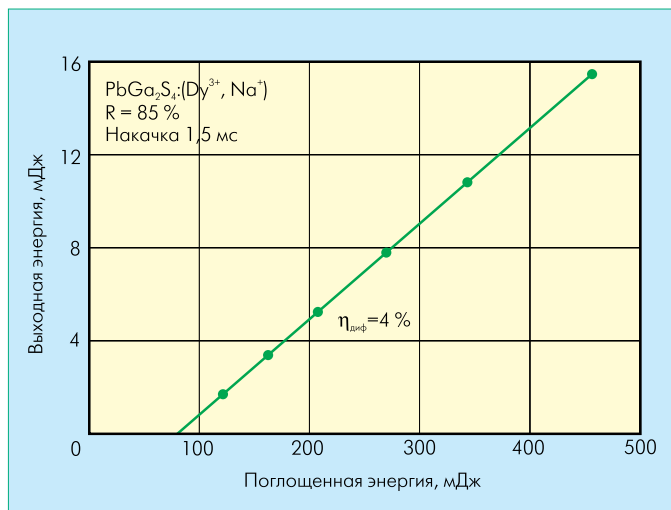


Рис.3 Зависимость выходной энергии генерации лазера на кристалле $\text{PbGa}_2\text{S}_4:(\text{Dy}^{3+}, \text{Na}^+)$ от поглощенной энергии накачки при накачке мощным YAG:Nd лазером с ламповой накачкой

Измерение выходной энергии генерации лазера на кристалле $\text{PbGa}_2\text{S}_4:(\text{Dy}^{3+}, \text{Na}^+)$ осуществляли с помощью измерителя мощности EPM-2000 фирмы Coherent. Спектры генерации регистрировали с помощью монохроматора МДР-23 с решеткой 150 штр/мм, охлаждаемого жидким азотом приемника на основе антимонида индия и цифрового осциллографа TDS-3052 фирмы Tektronix, подключенного к персональному компьютеру. Измерение профиля пучка генерации лазера на основе активированного кристалла тиагаллата свинца осуществлялось с помощью камеры фирмы Spiricon.

Зависимость выходной энергии импульса генерации $\text{PbGa}_2\text{S}_4:(\text{Dy}^{3+}, \text{Na}^+)$ лазера от поглощенной энергии излучения накачки для различных коэффициентов отражения выходного зеркала показана на рис.1. Как видно из рисунка, максимальные значения энергии импульса генерации

(4,5 мДж) и дифференциального КПД (3,6%) были получены для выходного зеркала с коэффициентом отражения $R_1=85\%$ на длине волны 4,3 мкм. Необходимо отметить, что измеренный в таком резонаторе спектр генерации лазера на кристалле $\text{PbGa}_2\text{S}_4:(\text{Dy}^{3+}, \text{Na}^+)$, приведенный на рис.2, показывает, что на ионах диспрозия реализуется каскадный тип генерации. Действительно, длина волны 5,4 мкм соответствует максимуму люминесценции ионов диспрозия в кристалле тиагаллата свинца на электронном переходе ${}^6\text{H}_{9/2}-{}^6\text{H}_{11/2}$ (см. рис.2). Накачка ионов диспрозия лазерным излучением 1,318 мкм приводит первоначально к заселению уровня ${}^6\text{H}_{9/2}$, а затем возбуждение попадает на верхний лазерный уровень ${}^6\text{H}_{11/2}$, с которого и происходит последующая генерация на длине волны 4,3 мкм. Из проведенного ранее анализа [1] следует, что на переходе ${}^6\text{H}_{9/2}-{}^6\text{H}_{11/2}$ в отсутствие лазерной генерации заселение верхнего лазерного уровня ${}^6\text{H}_{11/2}$ происходит в основном за счет безызлучательной релаксации с уровня ${}^6\text{H}_{9/2}$, эффективность которой не очень высока за счет «короткого» фоновго спектра в кристалле тиагаллата свинца. При этом 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

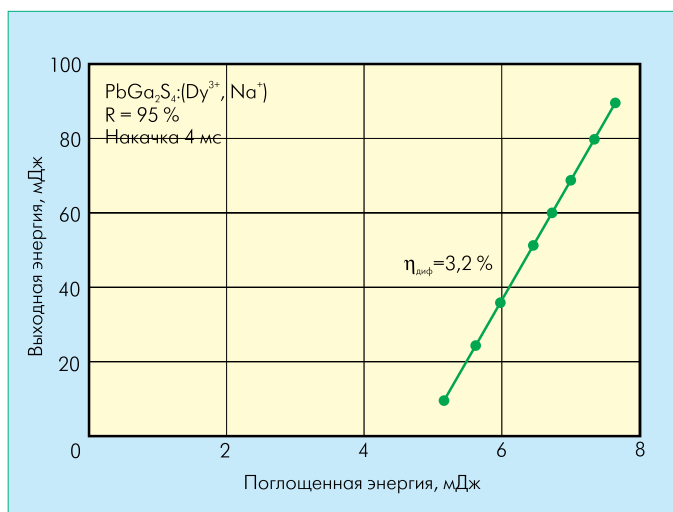


Рис. 4 Зависимость выходной энергии генерации лазера на кристалле $PbGa_2S_4:(Dy^{3+}, Na^+)$ от поглощенной энергии при накачке малогабаритным YAG:Nd лазером с диодной накачкой

${}^6H_{9/2}-{}^6H_{11/2}$ позволяет существенно ускорить процесс заселения уровня ${}^6H_{11/2}$ и повысить эффективность генерации $PbGa_2S_4:(Dy^{3+}, Na^+)$ -лазера.

На рис.3 приведены измеренные зависимости выходной энергии генерации лазера на кристалле $PbGa_2S_4:(Dy^{3+}, Na^+)$ от поглощенной энергии при накачке мощным YAG:Nd-лазером с ламповой накачкой при длительности импульса разряда лампы накачки 1,5 мс. Достигнутая максимальная энергия импульса генерации в этом случае составила 15 мДж при величине дифференциального КПД генерации 4%, что существенно превышает достигнутые ранее значения [1–4].

При использовании в качестве источника накачки малогабаритного лазера YAG:Nd с диодной накачкой максимальный дифференциальный КПД генерации по поглощенной энергии был близок к величине, полученной для случая ламповой накачки, и составил 3,2% (рис.4). Здесь необходимо отметить, что при использовании длительностей накачки вплоть до 4 мс эффектов снижения эффективности генерации за счет самоограниченности лазерного перехода ${}^6H_{11/2}-{}^6H_{13/2}$ не наблюдалось.

Таким образом, выращенные кристаллы $PbGa_2S_4:(Dy^{3+}, Na^+)$ с высокой оптической однородностью и повышенной концентрацией активатора (ионов Dy^{3+}) позволили, с одной стороны, использовать высокие энергии накачки без оптического пробоя активного элемента и впервые получить высокую энергию импульса генерации до 15 мДж с эффективностью до 4% в среднем ИК-диапазоне длин волн. При этом был реализован режим каскадной генерации ионов диспрозия на переходах ${}^6H_{9/2}-{}^6H_{11/2}$ и ${}^6H_{11/2}-{}^6H_{13/2}$ с длинами волн генерации 5,4 мкм, 4,65 мкм, 4,5 мкм и 4,3 мкм. С другой стороны, высокое оптическое качество выращенных кристаллов позволило получить низкий порог генерации в

среднем ИК-диапазоне длин волн, что дало возможность использовать в качестве источника накачки малогабаритный лазер на кристалле YAG:Nd с диодной накачкой и получить эффективную генерацию (с эффективностью до 3,2%) в компактной «настоющей» схеме.

В обсуждении результатов и в проведении исследований принимали активное участие Т. Басиев, В. Осико, В. Панютин и Г. Шевырдяева. За это мы выражаем им свою благодарность.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Basiev T., Doroshenko M., Osiko V. et al.** Mid IR laser oscillations in new low phonon $PbGa_2S_4:Dy^{3+}$ crystal. – OSA TOPS, 2005, v. 98.
2. **Orlovskii Yu., Basiev T., Pukhov K. et al.** Mid-IR transitions of trivalent neodymium in low phonon laser crystals. – Optical Materials, 2007, 29.
3. **Badikov V., Badikov D., Doroshenko M. et al.** Optical properties of lead thiogallate. – Optical Materials, 2008, v. 31.
4. **Doroshenko M., Basiev T., Osiko V. et al.** Oscillation properties of dysprosium-doped lead thiogallate crystal. – Optics Letters, 2009, v. 34 (5).

КОРРЕЛЯЦИЯ – КТО ЕЕ ПРИДУМАЛ?

Латинское correlation означает «связь, соотношение, соответствие». В период 1893–1894 годов в статистике начинают применять новые методики: введение в научный эксперимент, использование среднего, стандартной девиации и коэффициента корреляции. Фундаментальную роль в этом сыграли работы британских ученых, прежде всего Гальтона о наследственности (в 1889 году он ввел коэффициент корреляции), Пирсона, Эджеурта, Уэлдона и др. Каждый шел своим путем, получая оригинальные результаты. Но вместе с тем, постоянные тесные контакты и обсуждения обогащали и стимулировали родственные идеи. Так что попытки установить приоритет совершенно безнадежны. Например, Уэлдон и Пирсон тесно сотрудничали с 1891 года до преждевременной кончины Уэлдона. Эджеурт предвосхитил в 1883 году «распределение Стьюдента». В свою очередь Госсет (его псевдоним известен всем – Стьюдент) присоединился к этим исследованиям в 1899 году. Он тоже исходил из теории ошибок и метода наименьших квадратов. Госсет (Стьюдент) установил, что некоторые из его наблюдений не являются независимыми. Поэтому ему было необходимо некоторым образом измерить эту «связь», и, похоже, что если бы не случайная консультация при встрече с Пирсоном в 1905 году, он переоткрыл бы коэффициент корреляции совершенно оригинальным и независимым путем.

Н.Александрова