

Непрерывная лазерная генерация на кристаллах $\text{GGG}:\text{Yb}^{3+}$ при накачке на длине волны 0.925 мкм

А.М.Беловолов, М.И.Беловолов, Е.М.Дианов, В.В.Дудин, М.И.Тимошечкин

В лазерах на кристаллах $\text{GGG}:\text{Yb}^{3+}$ при комнатной температуре впервые получена непрерывная одномодовая генерация на длинах волн 1.030 и 1.037 мкм при возбуждении ионов Yb^{3+} на длине волны 0.925 мкм волоконным неодимовым лазером. Генерация реализована на переходах между нижним штатковским подуровнем уровня ${}^2F_{5/2}$ и верхними штатковскими подуровнями основного состояния ${}^2F_{7/2}$ ионов Yb^{3+} . Исследование генерационных характеристик показало, что генерация происходит по четырехуровневой схеме. Порог генерации по поглощенной мощности составил 85 мВт, дифференциальная эффективность равнялась 20%. При мощности накачки 1.7 Вт достигнута мощность генерации 310 мВт при коэффициенте пропускания выходного зеркала резонатора 1%. Эффективное сечение генерационного перехода составило $0.9 \times 10^{-20} \text{ см}^2$.

Ключевые слова: одномодовый $\text{GGG}:\text{Yb}^{3+}$ -лазер, четырехуровневая схема генерации, спектр излучения.

1. Введение

В настоящее время значительное внимание уделяется исследованию активных сред твердотельных лазеров, активированных ионами Yb^{3+} . Достоинствами иттербиевых активных сред являются простая схема уровней ионов Yb^{3+} , исключаяющая кросс-релаксацию, а также значительная ширина линии генерации, привлекательная с точки зрения получения сверхкоротких лазерных импульсов [1–5]. Кроме того, длина волны генерации иттербиевых лазеров близка к длине волны накачки, что уменьшает выделение тепла в активной области и существенно улучшает тепловой режим этих лазеров по сравнению с неодимовыми [1–5]. Впервые генерация на ионах Yb^{3+} в кристаллах $\text{GGG}:\text{Yb}:\text{Nd}$ была получена в 1975 г. на длине волны $\lambda_L = 1.0232 \text{ мкм}$ при температуре 77 К и импульсной ламповой накачке [6]. С тех пор, несмотря на прогресс в разработке систем накачки на диодных лазерах, генерация на кристаллах $\text{GGG}:\text{Yb}^{3+}$ не была достигнута, и перспективы создания и применения лазеров на этих материалах остаются невыясненными. Многочисленные попытки получить непрерывную генерацию при использовании одиночных диодных лазеров или лазерных линеек пока не привели к положительным результатам, и низкие пороги генерации не были достигнуты. Это свидетельствует о том, что кристаллы $\text{GGG}:\text{Yb}^{3+}$ имеют ряд особенностей, связанных с возбуждением и переносом энергии накачки, и весьма чувствительны к геометрии лазерных экспериментов.

В работах [7, 8] сообщалось о получении непрерывной одномодовой генерации на $\lambda_L \sim 1.037 \text{ мкм}$ в кристаллах $\text{GGG}:\text{Yb}^{3+}$ при накачке титан-сапфировым лазером на

$\lambda_p = 0.944$ и 0.97 мкм . Цель настоящей работы – продолжить исследования по лазерной генерации в указанных кристаллах при накачке на длине волны $\lambda_p = 0.925 \text{ мкм}$, которую можно реализовать при использовании диодной накачки.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Эксперименты по лазерной генерации кристаллов $\text{GGG}:\text{Yb}^{3+}$ проводились на установке, схема которой приведена на рис.1. Для накачки на $\lambda_p = 0.925 \text{ мкм}$ использовалось излучение непрерывного неодимового волоконного лазера с максимальной выходной мощностью 2.2 Вт, о создании и генерационных характеристиках которого сообщалось в работе [9].

На рис.2 представлены спектры поглощения и люминесценции кристаллов $\text{GGG}:\text{Yb}^{3+}$ с отмеченными на них длинами волн электронных переходов между соответствующими подуровнями штатковского расщепления уровней ${}^2F_{7/2}$ (основное состояние) и ${}^2F_{5/2}$ (возбужденное

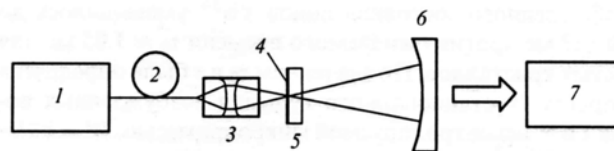


Рис.1. Схема экспериментальной установки для получения и исследования лазерной генерации в кристаллах $\text{GGG}:\text{Yb}^{3+}$:

1 – волоконный неодимовый лазер ($\lambda_p = 0.925 \text{ мкм}$, максимальная мощность непрерывной генерации 2.2 Вт [9]); 2 – одномодовое оптическое волокно; 3 – двухлинзовый объектив С230220Р (1:2); 4 – входное плоское зеркало резонатора (высокий коэффициент пропускания на $\lambda = 0.925 \text{ мкм}$, высокий коэффициент отражения на $\lambda = 1.03 - 1.04 \text{ мкм}$); 5 – активный элемент $\text{GGG}:\text{Yb}^{3+}$; 6 – выходное сферическое зеркало резонатора (коэффициент пропускания $T = 1\%$ на $\lambda = 1.04 \text{ мкм}$, высокий коэффициент отражения на $\lambda = 0.925 \text{ мкм}$, радиус кривизны $R = 5 \text{ см}$); 7 – оптический анализатор спектра AQ-6310 или измеритель мощности.

А.М.Беловолов, М.И.Беловолов, Е.М.Дианов, В.В.Дудин. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: bmi@fo.gpi.ru

М.И.Тимошечкин. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

Поступила в редакцию 12 апреля 2006 г.

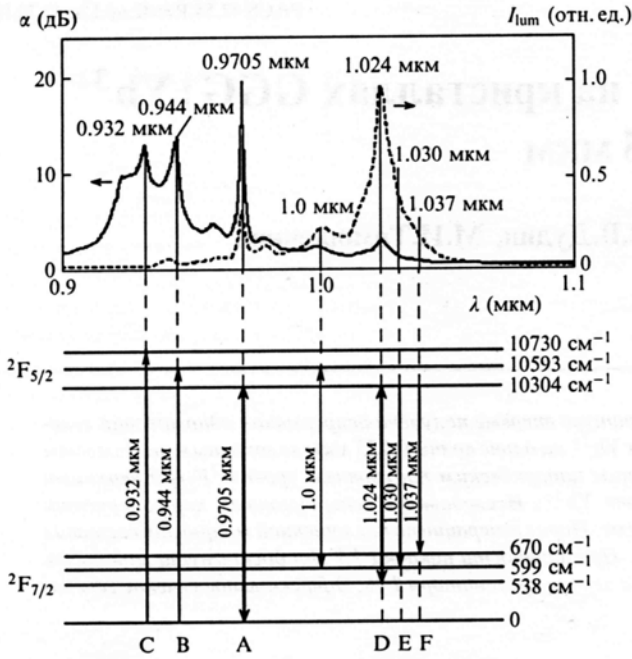


Рис.2. Спектры поглощения $\alpha(\lambda)$ и люминесценции $I_{lum}(\lambda)$ кристаллов GGG: Yb³⁺ (17% Yb³⁺, толщина образца $l = 2.2$ мм) при температуре 300 К и основные электронные переходы в схеме уровней ионов Yb³⁺. Излучательные переходы на длинах волн 1.030 и 1.037 мкм определены в данной работе по результатам лазерной генерации.

состояние), схема которых использовалась в данной работе и в [7]. Выходное одномодовое оптическое волокно неодимового лазера имело диаметр распределения поля моды 8.0 мкм. Для фокусировки накачки применялся двухлинзовый объектив C230220P-B (1 : 2) фирмы THORLABS, установленный так, чтобы увеличить размер перетяжки и обеспечить хорошую фокусировку накачки на всей длине активного элемента. Лазер представлял собой полуконфокальный резонатор, состоящий из плоского зеркала на активном элементе и выходного сферического зеркала с радиусом кривизны $R = 5$ см и коэффициентом пропускания $T = 1\%$ в диапазоне 1.03–1.06 мкм. Активным элементом служил кристалл толщиной $l = 1$ мм, активированный ионами Yb³⁺ с атомной концентрацией 17%. Кристаллы GGG: Yb³⁺ содержали неконтролируемые микропримеси редкоземельных элементов Ho³⁺ с атомной концентрацией $10^{-3}\%$ – $10^{-2}\%$, роль которых в исследуемых кристаллах была заметной: время жизни τ возбужденного состояния ионов Yb³⁺ уменьшилось до ~ 0.827 мс против ожидаемого времени $\tau_0 \approx 1.05$ мс для чистых кристаллов. По значениям τ_0 и τ была определена скорость W стационарного тушения возбужденных ионов Yb³⁺ неконтролируемой микропримесью: $W = \tau^{-1} - \tau_0^{-1} = 257 \text{ c}^{-1}$.

Спектры генерации Yb³⁺: GGG-лазера в условиях накачки неодимовым лазером на $\lambda_p = 0.925$ мкм представлены на рис.3 и 4. При увеличении поглощенной мощности накачки от пороговой (85 мВт) до 0.5 Вт в указанной геометрии эксперимента наблюдалась одна линия генерации с $\lambda_L \approx 1.037$ мкм, которая соответствовала лазерному переходу с нижнего штарковского уровня основного состояния $^2F_{5/2}$ на верхний штарковский уровень основного состояния $^2F_{7/2}$. Непрерывная генерация на переходе $^2F_{5/2} - ^2F_{7/2}$ с $\lambda_L \approx 1.037$ мкм наблюдалась нами ранее в экспериментах с накачкой титан-сапфировым ла-

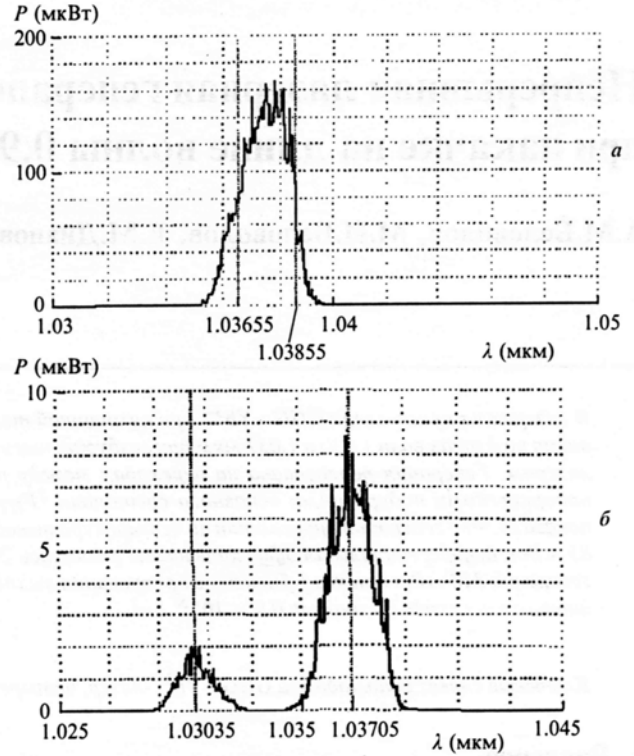


Рис.3. Спектры непрерывной генерации Yb³⁺: GGG-лазера (линейный масштаб) при мощности накачки 0.5 (а) и 1.7 Вт (б).

зером [7, 8]. Эти данные позволили определить энергию (670 см⁻¹) верхнего штарковского уровня состояния $^2F_{7/2}$, которая, как это видно из рис.2, не определяется с достаточной точностью по спектрам поглощения и люминесценции.

В настоящей работе было обнаружено, что при повышении мощности накачки до 1.7 Вт происходила одновременная генерация на двух длинах волн – 1.037 и 1.030 мкм. Из рис.4 видно, что обе линии генерации имеют полуширину ~ 2 нм и уровень фона спонтанного излучения находится на три порядка (-30 дБ) ниже максимума линии генерации на $\lambda_L = 1.037$ мкм. Излучение на $\lambda_L = 1.030$ мкм идентифицировано нами с излучением перехода из возбужденного состояния с энергией 10304 см⁻¹ на второй сверху штарковский уровень с энергией 599 см⁻¹ основного состояния $^2F_{7/2}$, который также практически

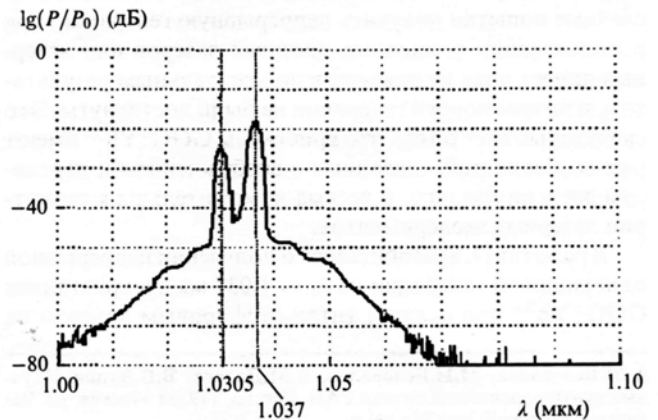


Рис.4. Спектр генерации Yb³⁺: GGG-лазера на $\lambda_L = 1.030$ и 1.037 мкм при накачке на $\lambda_p = 0.925$ мкм излучением неодимового волоконного лазера мощностью 1.7 Вт (логарифмический масштаб, уровень спонтанного излучения -30 дБ).

не определяется по спектрам поглощения и люминесценции из-за неоднородного уширения соответствующих линий вследствие электрон-фононного взаимодействия. Таким образом, зарегистрированные экспериментально длины волн генерации 1.030 и 1.037 мкм позволили уточнить положение двух штарковских подуровней мультиплета ²F_{7/2} ионов Yb³⁺ в кристаллах GGG: Yb³⁺ при комнатной температуре, энергия которых составила 599 и 670 см⁻¹ соответственно.

Зависимость мощности генерации от поглощенной мощности накачки показана на рис.5. Линейный характер данной зависимости после достижения порога генерации, свидетельствует о том, что генерация происходит по четырехуровневой схеме [10]. Пороговая поглощенная мощность накачки P_{th} = 85 мВт, дифференциальная эффективность η = 20%. При поглощенной мощности накачки 1.7 Вт получена выходная мощность непрерывной одномодовой генерации 310 мВт.

Для количественного анализа экспериментальных данных расчет основных параметров лазерной генерации проводился на основе системы балансных уравнений для разности населенностей генерационного перехода и числа фотонов в резонаторе, аналогично расчету, выполненному в [10, 11]. В отличие от работ [10, 11] при расчетах было учтено тушение верхнего лазерного уровня за счет переноса энергии на неконтролируемую микропримесь, а также бoльцмановское распределение населенностей штарковских подуровней уровней ²F_{7/2} и ²F_{5/2}. С учетом четырехуровневого характера генерации по дифференциальной эффективности η была сделана оценка нерезонансных потерь в активном элементе δ_n [10]:

$$\delta_n \approx T \left(\frac{h\nu_L}{h\nu_p} \eta^{-1} - 1 \right) = 0.035, \quad (1)$$

где hν_L/hν_p = λ_p/λ_L = 0.891 – отношение энергии фотона лазерной генерации к энергии фотона накачки.

Оценка δ_n ≈ 0.035 в пределах погрешности эксперимента совпадает с величиной δ_n ≈ 0.0267, полученной нами для того же активного элемента в работе [7] при накачке титан-сапфировым лазером. Это свидетельствует о высоком оптическом качестве лазерных элементов на кристаллах GGG: Yb³⁺, а также о том, что в течение примерно 10 лет лазерные элементы сохраняют свои основные генерационные характеристики.

Наш анализ показал, что в предположении четырех-

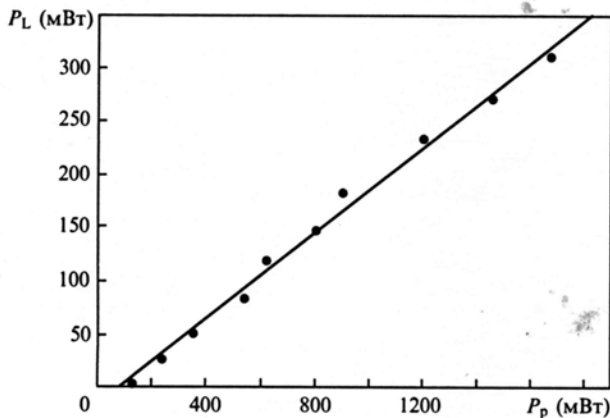


Рис.5. Зависимость мощности P_L генерации Yb³⁺: GGG-лазера от поглощенной мощности накачки P_p на λ_p = 0.925 мкм.

уровневого характера генерации для пороговой мощности накачки P_pth можно использовать выражение [10]

$$P_p^{th} = \frac{\pi h\nu_p (\delta_n + T)}{4\sigma(f_1 + f_2)\tau} (w_{L0}^2 + w_{p0}^2), \quad (2)$$

где w_{L0} = 91 мкм – радиус распределения поля моды в перетяжке каустики резонатора; w_{p0} = 8.0 мкм – радиус перетяжки пучка накачки; f₁ = 0.034 и f₂ = 0.727 – бoльцмановские факторы населенностей нижнего и верхнего лазерных уровней [10]; σ – сечение индуцированного перехода.

Зная пороговую мощность P_pth и другие параметры лазера, из формулы (2) можно получить оценку эффективного сечения σ генерационного перехода на λ_L = 1.037 мкм, которая составила 0.9 × 10⁻²⁰ см². Ниже приведены основные параметры непрерывной одномодовой лазерной генерации в исследованных кристаллах GGG: Yb³⁺ при комнатной температуре, которые могут применяться для создания иттербиевых лазеров с требуемыми мощностными характеристиками, а также для продолжения исследований по освоению и использованию мощных систем накачки на диодных лазерах.

Длина волны генерации λ _L (мкм).....	1.037
Ширина линии генерации Δλ _L (нм).....	2
Постоянная времени жизни верхнего лазерного уровня τ (мс).....	0.827
Порог генерации по поглощенной мощности накачки P _p th (мВт).....	85
Нерезонансные потери в активном элементе δ _n (%).....	3.5
Дифференциальная эффективность генерации η (%).....	20
Сечение σ индуцированного перехода на λ = 1.37 мкм (см ²).....	0.9 × 10 ⁻²⁰

Из спектра поглощения, показанного на рис.2, видно, что диапазон длин волн 0.920–0.945 мкм является наиболее перспективным для применения систем накачки на диодных лазерах. Резонансный пик поглощения на λ = 0.9705 мкм удобно использовать для накачки при выполнении первых экспериментов по получению низкороговой генерации в кристаллах GGG: Yb³⁺ с накачкой титан-сапфировым лазером, который можно было точно перестраивать по длине волны при сохранении узкого спектра и острой направленности выходного излучения.

Особенностью используемых нами лазерных кристаллов GGG: Yb³⁺ было наличие в них микропримеси ионов Ho³⁺ с атомной концентрацией 10⁻³ % – 10⁻² %, которая вызывала сильную люминесценцию на «зеленой» длине волны ~540 нм (переходы ⁵S₂, ⁵F₄ – ⁵I₈ в спектре ионов Ho³⁺, см. [8]). Это приводило к тому, что при накачке лазерного элемента примерно до 20 % энергии возбуждения могло расходоваться на антистоксово излучение. Однако, несмотря на заметное тушение микропримесью генерационного перехода ионов Yb³⁺ в области λ = 1.0 мкм, нами получена непрерывная одномодовая генерация со сравнительно низким порогом при пропускании выходного зеркала T = 1 %. Более мощная генерация на исследованных кристаллах GGG: Yb³⁺ может быть достигнута при использовании оптимальных коэффициентов пропускания зеркал и геометрии резонатора лазера, которые могут быть рассчитаны с помощью характеристик лазерных кристаллов, определенных в настоящей работе.

3. Заключение

В кристаллах $\text{GGG}:\text{Yb}^{3+}$ при комнатной температуре и накачке на $\lambda_p \approx 0.925$ мкм впервые получена непрерывная одномодовая генерация на $\lambda_L = 1.030$ и 1.037 мкм. Длины волн генерации кристаллов $\text{GGG}:\text{Yb}^{3+}$, зарегистрированные в эксперименте, позволили уточнить положение двух штарковских подуровней мультиплета $^2F_{7/2}$ основного состояния ионов Yb^{3+} , энергия которых была равна 599 и 670 см $^{-1}$. Исследование генерационных характеристик показало, что генерация происходит по четырехуровневой схеме. Порог генерации по поглощенной мощности составил 85 мВт, дифференциальная эффективность $\eta = 20\%$. При мощности накачки 1.7 Вт достигнута мощность генерации 310 мВт. Для количественного анализа генерационных характеристик $\text{GGG}:\text{Yb}^{3+}$ -лазера использовались теоретическая модель, учитывающая процессы тушения возбуждения ионов Yb^{3+} неконтролируемой примесью (Ho^{3+}) и специфику системы энергетических уровней ионов Yb^{3+} (больцмановское распределение населенностей по штарковским подуровням). С помощью этой модели найдены оценки эффективного сечения генерационного перехода на $\lambda_L = 1.037$ мкм и нерезонансных оптических потерь в кристаллах $\text{GGG}:\text{Yb}^{3+}$ соответственно: $\sigma = 0.9 \times 10^{-20}$ см 2 , $\delta_n = 0.035$. Полученные в данной работе результаты свидетельствуют о перспективности создания непрерывных итербиевых лазеров на кристаллах $\text{GGG}:\text{Yb}^{3+}$ и использования диодной накачки в диапазоне длин волн 0.925 – 0.945 мкм.

Авторы выражают глубокую благодарность И.А.Буфетову за помощь в проведении экспериментов по лазерной генерации.

Работа частично финансировалась грантом Президента РФ поддержки ведущих научных школ № НШ-2813.2006.2.

1. Taira T., Saikawa J., Kobayashi T., Byer R.L. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **3** (1), 100 (1997).
2. Aron A., Aka G., Viana B., et al. *Opt. Mater.*, **16** (1/2), 181 (1999).
3. Marshall C.D., Smith L.K., Beach R.J., et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, **32**, 650 (1996).
4. Bruesselbach H.W., Smida D.S., Reeder R.A., Byren R.W. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **3** (1), 105 (1997).
5. Druon F., Chenais S., Raybaut P., Balembois F., Georges P., Gaume R., Aka G., Viana B., et al. *Techn. Dig. of OSA Topical Meeting, Advanced Solid-State Lasers* (Quebec, Canada, 2002, Paper MD7).
6. Богомолова Г.А., Вылегжанин Д.Н., Каминский А.А. *ЖЭТФ*, **69**, 860 (1975).
7. Беловолов М.И., Дианов Е.М., Тимошечкин М.И., Барашов Л.В., Беловолов А.М., Иванов М.А., Морозов Н.П., Прохоров А.М., Тимошечкин К.М. *Антистоксовая люминесценция и непрерывная генерация ГГГ-Уб лазера на 1.038 мкм при комнатной температуре. Препринт ИОФАН № 1* (М., 1997).
8. Belovolov M.I., Dianov E.M., Timoshechkin M.I., Barashov L.V., Belovolov A.M., Ivanov M.A., Morozov N.P., Prokhorov A.M., Timoshechkin K.M. *Proc. CLEO/Europe '96* (Hamburg, Germany, 1996, Paper CML5, p. 43).
9. Буфетов И.А., Бубнов М.М., Мелькумов М.А., Дудин В.В., Шубин А.В., Семенов С.Л., Кравцов К.С., Гурьянов А.Н., Яшков М.В., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **35** (4), 328 (2005).
10. Fan T.Y., Byer R.L. *IEEE J. Quantum Electron.*, **24** (6), 895 (1988).
11. Laporta P., Brussard M. *IEEE J. Quantum Electron.*, **27**, 2319 (1988).