

Лазерная генерация в кристалле $Tm:Yb_3Al_5O_{12}$ при накачке излучением с длиной волны 1.678 мкм

Ю.Д.Заварцев, А.И.Загуменный, Ю.Л.Калачев, С.А.Кутовой, В.А.Михайлов, И.А.Щербаков

Предложен кристалл $Yb_3Al_5O_{12}$ (YbAG) в качестве матрицы активного элемента с легированием ионами Tm^{3+} для лазеров двухмикронного диапазона. Методом Чохральского выращен кристалл $Tm:YbAG$ высокого оптического качества и исследованы его спектрально-люминесцентные характеристики. Измерено время спада интенсивности люминесценции для верхнего лазерного уровня 3F_4 , составившее 4.7 мс. Впервые для этого кристалла реализована лазерная генерация на длине волны 2.02 мкм при накачке излучением волоконного лазера на длине волны 1.678 мкм. Общай и дифференциальный КПД лазера при комнатной температуре и выходной мощности до 330 мВт достигали 33% и 41% соответственно.

Ключевые слова: Tm , YbAG, лазер, люминесценция, генерация, время жизни.

1. Введение

Лазеры двухмикронного диапазона на основе различных кристаллических матриц, легированных ионами Tm^{3+} , находят многочисленные применения в различных областях науки и техники [1]. Однако, несмотря на большое количество уже исследованных к настоящему времени кристаллических матриц активных элементов (АЭ), продолжают поиски новых кристаллов с новыми комбинациями лазерных свойств, расширяющими диапазон применения таких лазеров. Например, за последние годы удалось вырастить кристалл $Tm:Sc_2SiO_5$ лазерного качества, обеспечивающий высокоэффективную лазерную генерацию с широкой линией излучения на длине волны вблизи 1.98 мкм [2].

Кристалл $Yb_3Al_5O_{12}$ (YbAG) – аналог кристалла $Y_3Al_5O_{12}$ (YAG), у которого атом Y заменен атомом Yb, привлекает внимание исследователей как альтернативная матрица для АЭ [3], в частности для генерации в двухмикронной области спектра. Впервые интерес к кристаллу $Tm:YbAG$ был проявлен как к потенциально перспективному кристаллу с точки зрения эффективных ап-конверсионных процессов и возможности генерации в видимой области спектра [4]. При накачке излучением Ti-сапфирового лазера мощностью 1 Вт в диапазоне 925–980 нм были исследованы спектры его люминесценции в областях 340–370 нм и 450–510 нм и изучены процессы переноса энергии при ап-конверсии.

В отличие от кристалла YAG в матрице YbAG присутствует дополнительный энергетический уровень с $E \approx 10000 \text{ см}^{-1}$, который может являться каналом потерь энергии возбуждения. Мы полагаем, что этот канал не должен снижать эффективность лазера, поскольку при возбужде-

нии уровня 3F_4 иона тулия уровень $^5F_{5/2}$ иона иттербия может заселяться только посредством ап-конверсионных переходов, характерных для иона тулия в любой матрице. В дальнейшем населенность уровня 3F_4 будет частично восстановлена за счет перехода с уровня $^5F_{5/2}$.

В настоящей работе впервые, насколько нам известно, представлены результаты экспериментов по выращиванию кристалла $Tm:YbAG$ высокого оптического качества, исследованию его спектральных характеристик и реализации лазерной генерации. Лазерная накачка осуществлялась на переходе $^3F_4 - ^3H_6$.

2. Лазерный кристалл

Технология выращивания кристалла YbAG близка к технологии выращивания кристалла YAG. Кристаллы $Tm:YbAG$ выращивали методом Чохральского из иридиевого тигля с внешним диаметром 40 мм и высотой 40 мм. Для предотвращения взаимодействия расплава с материалом тигля применялась защитная атмосфера с добавкой кислорода (99.5% N_2 + 0.5% O_2). Кристалл длиной 75 мм и сечением 18 мм выращивали на затравку с ориентацией $\langle 100 \rangle$, скорость вытягивания кристалла составляла 5.4 мм/ч. Выращенный кристалл отжигался на воздухе 24 ч при 1200°C с целью устранения центров окраски, возникающих в процессе роста.

Лазерный АЭ кубической формы с концентрацией ионов тулия 5.7 ат.% и размером $3 \times 3 \times 3$ мм вырезался вдоль кристаллографического направления $\langle 100 \rangle$. Параллельность противоположных плоских рабочих поверхностей кристалла выдерживалась с точностью не хуже $10''$. Просветляющее покрытие на кристалл не наносилось. АЭ крепился так, чтобы с обеспечивался тепловой контакт с медной теплоотводящей пластиной. Эксперименты проводились при комнатной температуре.

3. Спектральные характеристики

Схема низколежащих уровней ионов Tm^{3+} и Yb^{3+} приведена на рис.1. Поскольку нам не удалось найти данных

Ю.Д.Заварцев, А.И.Загуменный, Ю.Л.Калачев, С.А.Кутовой, В.А.Михайлов, И.А.Щербаков. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: kalachev@kapella.gpi.ru

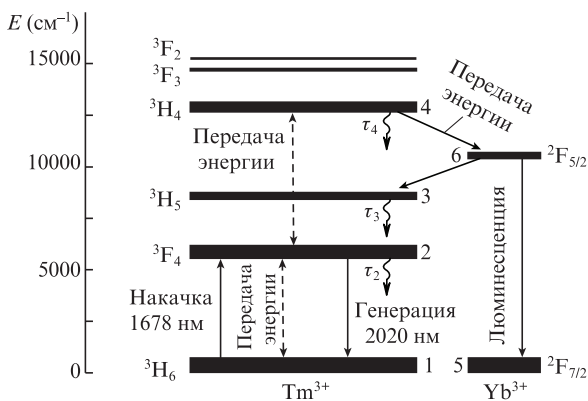


Рис.1. Схема низколежащих уровней Tm^{3+} и Yb^{3+} .

о схеме уровней Tm^{3+} в матрице $YbAG$, представлена схема уровней Tm^{3+} в матрице YAG , взятая из работы [5], и схема уровней Yb^{3+} из работы [6]. Спектр поглощения кристалла АЭ $Tm:YbAG$ приведен на рис.2. Масштаб по вертикальной оси выбран таким, чтобы максимально подробно отобразить участки спектра, содержащие линии поглощения Tm^{3+} , при этом коэффициенты поглощения Yb^{3+} оказываются далеко за пределами диапазона $0-24\text{ см}^{-1}$.

Измерения осуществлялись с помощью спектрофотометра Shimadzu UV-3600. На длине кристалла АЭ поглощала $\sim 60\%$ излучения накачки. Следует отметить, что использованная в экспериментах длина волны излучения накачки 1.678 мкм не попадает в максимум наиболее сильной линии поглощения Tm^{3+} и тем самым не является оптимальной для реализации наибольшей эффективности лазера, работающего по квазитрехуровневой схеме. Таким образом, существует возможность некоторого увеличения эффективности лазера при выборе лазерного источника накачки, согласованного с наиболее интенсивной линией спектра поглощения.

Спектры люминесценции кристалла АЭ измерялись при возбуждении излучением накачки с $\lambda = 1.678\text{ мкм}$. АЭ помещался напротив щели монохроматора МДР-204 («ЛОМО-Фотоника»). Рабочие грани кристалла были ориентированы перпендикулярно оптической оси монохроматора, другие (матированные) грани кристалла ориентировались в вертикальной и горизонтальных плоскостях. Излучение лазера накачки мощностью 100 мВт фокусировалось линзой с фокусным расстоянием 80 мм . Таким

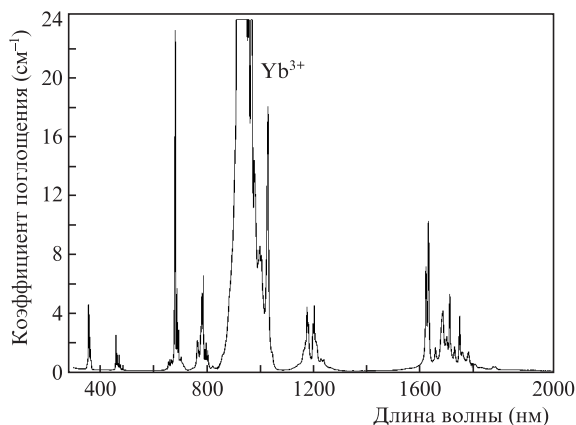


Рис.2. Спектр поглощения кристалла $Tm:YbAG$ с концентрацией ионов тулия $5.7\text{ ат.}\%$. Коэффициент поглощения иона Yb^{3+} в максимуме превышает 68 см^{-1} .

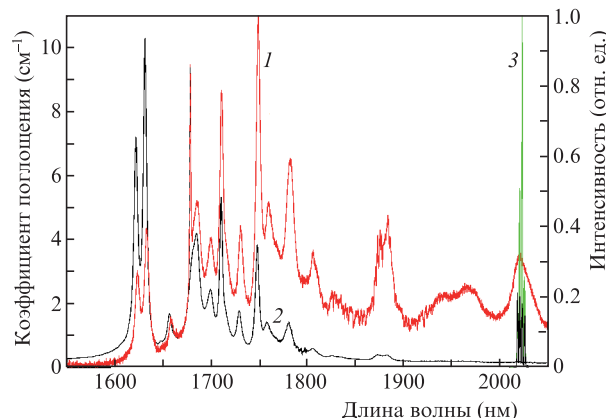


Рис.3. Спектры люминесценции (1), поглощения (2) и генерации (3) кристалла $Tm:YbAG$. Длина волны излучения накачки 1678 нм .

образом в фокальной области линзы создавался пучок диаметром 80 мкм с конфокальной длиной 15 мм . Этот пучок направлялся вертикально на верхнюю грань кристалла, так, чтобы в кристалле параллельно наиболее удаленной от щели монохроматора грани, на расстоянии $\sim 50\text{ мкм}$ от нее, формировался канал люминесценции. Изображение канала люминесценции проецировалось на щель монохроматора с помощью сферического зеркала с фокусным расстоянием 20 см . Ось кристалла находилась ниже оси зеркала, чтобы не затенять входную щель монохроматора, а зеркало было наклонено под небольшим углом к вертикальной плоскости. Такая геометрия обеспечивала минимальные искажения спектра люминесценции, связанные с реабсорбцией как при выходе света из объема кристалла, так и при фокусировке света на щель монохроматора.

Приемниками излучения служили фотодиоды ФД-24к в области длин волн короче 1 мкм и G8373-01 (Hamamatsu) в диапазоне длин волн $1-2.2\text{ мкм}$. Модуляция излучения накачки осуществлялась оптическим прерывателем MC2000 (Thorlabs) в диапазоне частот модуляции $2-1000\text{ Гц}$. Сигнал с фотодиодов усиливался цифровым синхронным детектором SR830 (Stanford Research Systems) и регистрировался персональным компьютером при помощи программного обеспечения монохроматора МДР-204. На рис.3 приведены спектры поглощения, люминесценции и генерации кристалла $Tm:YbAG$. Небольшое различие в длинах волн пиков поглощения и люминесценции обусловлено погрешностью определения длины волны с помощью монохроматора, составляющей около 1.6 нм .

Спектр люминесценции занимает область $1600-2100\text{ нм}$, а спектр генерации с максимумом на длине волны 2023 нм практически совпадает с длинноволновой линией люминесценции с $\lambda \sim 2020\text{ нм}$. Учитывая, что в спектральной области с длинами волн, превышающими 1800 нм , поглощение в кристалле АЭ невелико, можно ожидать перестройки длины волны излучения лазера в широкой ($1800-2100\text{ нм}$) области при использовании спектрально-селективного резонатора. При этом более эффективной генерации можно ожидать в областях наиболее интенсивной люминесценции с длинами волн около $1880, 1960$ и 2020 нм .

4. Время затухания люминесценции

Время спада интенсивности двухмикронной люминесценции вычислялось по измеренным диаграммам Боде – амплитудно-частотным (АЧХ) и фазочастотным (ФЧХ)

характеристикам при модуляции пучка накачки дисковым прерывателем в диапазоне частот модуляции 2–1000 Гц (см., напр., [7]). В данном диапазоне частот основной вклад в диаграммы Боде дают процессы с характерными временами ~ 1 мс и более. Для исследуемого кристалла наиболее долгоживущими состояниями являются уровни 3F_4 с ожидаемым временем жизни порядка нескольких миллисекунд. Другие уровни иона Tm³⁺ имеют времена жизни существенно меньше 1 мс.

Время жизни состояния $^3F_{5/2}$ иона Yb³⁺ в нелегированном кристалле YbAG было измерено в работе [3] и составило 939 мкс. В этой же работе указано, что малые добавки (в виде загрязнений) ионов Tm³⁺ или Er³⁺ приводят к уменьшению времени жизни этого уровня. Так, по данным [8] время жизни уровня $^3F_{5/2}$ составляет 860 мкс.

Таким образом, мы можем ожидать, что диаграммы Боде в диапазоне частот модуляции 2–1000 Гц определяются главным образом временем жизни уровня 3F_4 , и форма импульса люминесценции будет описываться выражением

$$\frac{U(t)}{U_{\max}} = \begin{cases} 1 - \exp(-t/\tau), & 0 < t < t_p, \\ \exp(t_p - t)/\tau, & t > t_p, \end{cases} \quad (1)$$

где $U(t)$ – сигнал фотоприемника; U_{\max} – установившееся (максимальное) значение сигнала фотоприемника; t_p – длительность импульса накачки; τ – время жизни уровня. При частоте модуляции накачки f и скважности 2 длительность импульса накачки $t_p = 1/(2f)$. В этом случае диаграммы Боде имеют следующий вид:

$$\frac{U(f)}{U_{\max}} = \sqrt{\frac{1}{1 + (2\pi f\tau)^2}}, \quad (2)$$

$$\varphi = -\arctan(2\pi f\tau), \quad (3)$$

где φ – фазовый сдвиг между импульсом накачки и сигналом фотоприемника. Из этих соотношений можно получить $\tau = 1/(2\pi F_p)$, где F_p – частота, при которой фазовый сдвиг составляет -45° , а нормированная амплитуда равна 0.707.

На рис.4 приведены измеренные и расчетные АЧХ и ФЧХ излучения люминесценции на длине волны 2020 нм.

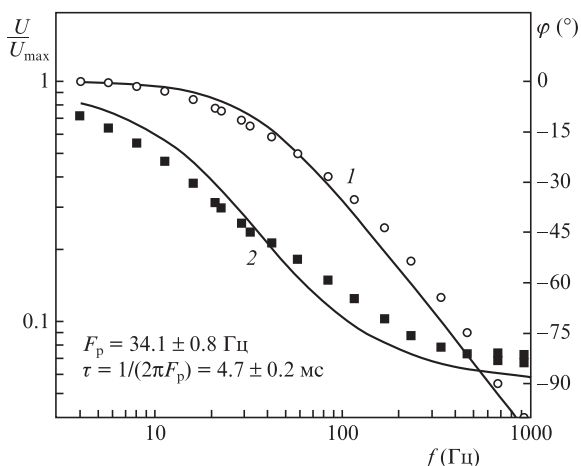


Рис.4. Измеренные и расчетные АЧХ (1) и ФЧХ (2) излучения люминесценции на длине волны 2020 нм.

Аппроксимация экспериментальных точек зависимостями (2) и (3) дает $F_p = 33.7 \pm 1.3$ Гц для АЧХ и $F_p = 35.9 \pm 2.8$ Гц для ФЧХ. Средневзвешенное значение $F_p = 34.1 \pm 0.8$ Гц, что соответствует времени $\tau = 4.7 \pm 0.2$ мс. Отклонения форм АЧХ и ФЧХ от теоретически ожидаемых могут быть связаны с влиянием неучтенных в данной модели переходов.

5. Лазерные эксперименты

Генерация лазера осуществлялась при использовании близкого к полуконцентрическому резонатора, образованного полностью отражающим плоским зеркалом и выходным сферическим зеркалом с радиусом кривизны 50 мм и коэффициентом отражения на рабочей длине волны 98%. Накачка АЭ, размещенного вблизи плоского зеркала, осуществлялась через плоское дихроичное зеркало излучением одномодового волоконного эрбиевого лазера с рамановским преобразованием на длине волны 1.678 мкм. Излучение накачки фокусировалось в кристалл в пятно диаметром ~ 80 мкм линзой с фокусным расстоянием 80 мм.

На рис.5 приведены зависимости мощности генерации Tm:YbAG-лазера от поглощенной в АЭ мощности накачки. Измерения проводились в импульсном и непрерывном режимах накачки. Импульсный режим осуществлялся с помощью дискового прерывателя, пропускающего излучение накачки в течение $1/20$ периода вращения с частотой ~ 10 Гц.

Лазерная генерация возникла уже при мощности накачки ~ 200 мВт и была наиболее эффективной в импульсном режиме (дифференциальный и полный КПД составляли $\sim 41\%$ и 33% соответственно). Выходная мощность излучения лазера достигала 330 мВт и ограничивалась лишь максимально доступной мощностью используемого нами лазерного источника накачки. С ростом мощности накачки выходная мощность лазера монотонно росла без тенденции к насыщению. Следует отметить, что кристалл Tm:YbAG демонстрирует высокую эффективность, сравнимую в сходных условиях с эффективностями других, хорошо зарекомендовавших себя в этом отношении кристаллов, например Tm:YLF [9]. Этот результат указывает на хорошие перспективы использования кристалла Tm:YbAG в качестве АЭ лазеров.

В режиме непрерывной накачки при небольшом (примерно двукратном) превышении над порогом эффектив-

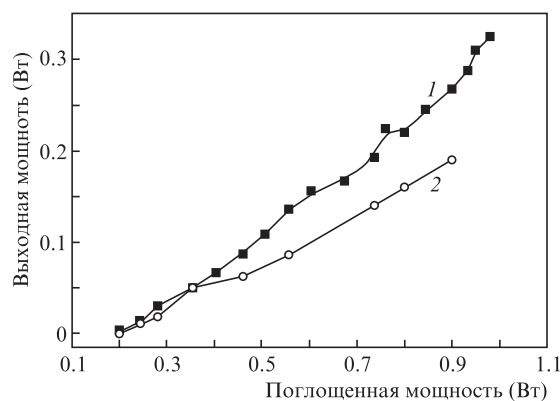


Рис.5. Зависимости выходной мощности генерации Tm:YbAG-лазера от поглощенной в АЭ мощности излучения накачки в импульсном (1) и непрерывном (2) режимах.

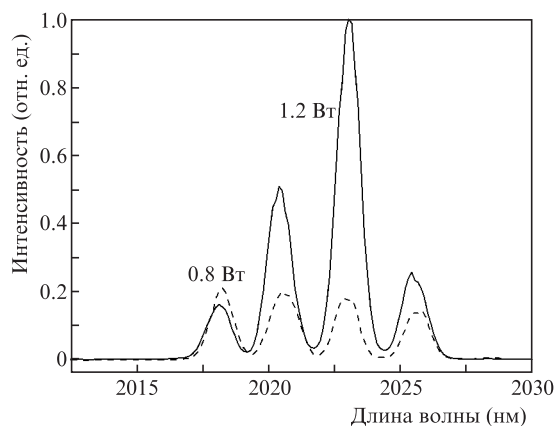


Рис.6. Спектры генерации лазера при разных мощностях излучения накачки.

ность лазера примерно такая же, как и в импульсном режиме. С дальнейшим увеличением мощности накачки эффективность непрерывной генерации лазера оказывается на 20%–25% ниже, чем в импульсном режиме. Наибольшая мощность лазера в непрерывном режиме достигала 180 мВт при дифференциальном и полном КПД лазера 32% и 21% соответственно. Некоторое снижение эффективности лазерной генерации, наблюдающееся в непрерывном режиме, может быть связано с нагревом излучением накачки канала внутри кристалла. Этот нагрев увеличивает внутрирезонаторные потери лазера, что характерно для квазитрехуровневой схемы генерации.

Типичные спектры генерации Tm:YbAG-лазера приведен на рис.6. Они представляет собой набор линий в диапазоне 2017–2027 нм. С увеличением мощности накачки наиболее сильно растет интенсивность линии с длиной волны 2023 нм, и появляются признаки еще одной линии с центром на $\lambda = 2028$ нм. Наличие эквидистантных линий в спектре генерации и расстояние между ними хорошо согласуются с толщиной внутрирезонаторного интерферометра Фабри–Перо, образованного задним ($R \sim 100\%$)

зеркалом резонатора и плоскопараллельными непросветленными плоскими поверхностями АЭ.

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что новый для лазерных исследований кристалл Tm:YbAG достаточно технологичен при выращивании и демонстрирует высокие лазерные характеристики, близкие к характеристикам его аналога – кристалла Tm:YAG, а также хорошо известных эффективных лазерных кристаллов Tm:YLF, Tm:YAP и др. На кристалле Tm:YbAG при комнатной температуре получена эффективная лазерная генерация в диапазоне длин волн 2017–2027 нм с общим ($\sim 33\%$) и дифференциальным ($\sim 41\%$) КПД при выходной мощности линейной поляризованного излучения до ~ 330 мВт, т. е. энергетические характеристики лазера на Tm:YbAG близки к характеристикам лучших лазеров на кристаллах этого семейства. Измеренное время затухания люминесценции на длине волны 2020 нм составило 4.7 мс. Результаты настоящей работы свидетельствуют о хороших перспективах внедрения АЭ из кристалла Tm:YbAG в лазерную технику.

1. Jelinkova H., Koranda P., Sulc J., Nemeč M., Cerný P., Pasta J. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6871**, 68712N (2008).
2. Заварцев Ю.Д., Загуменный А.И., Калачев Ю.Л., Кутовой С.А., Михайлов В.А., Щербаков И.А. *Квантовая электроника*, **43** (11), 989 (2013).
3. Fagundes-Peters D., Martynyuk N., Lunstedt K., Peters V., Petermann K., Huber G., Basun S., Laguta V., Hofstaetter A. *J. Luminescence*, **125**, 238 (2007).
4. Morris P.J., Luthy W., Weber H.P., Zavartsev Yu.D., Studenikin P.A., Umyskov A.F., Zagumenyi A.I. *Proc. CLEO/EUROPE'94* (Amsterdam, 1994, p. 382).
5. Tiseanu C., Lupei A., Lupei V. *J. Phys.: Condens. Matter*, **7**, 8477 (1995).
6. Buchanan R.A., Wickersheim K.A., Pearson J.J., Herrmann G.F. *Phys. Rev.*, **159**, 245 (1967).
7. Дорф Р., Бишоп Р. *Современные системы управления* (М.: Лаборатория базовых знаний, 2002, с. 429).
8. Petermann K., Fagundes-Peters D., Johannsen J., Mond M., Peters V., Romero J.J., Kutovoi S., Speiser J., Giesen A. *J. Cryst. Growth*, **275**, 135 (2005).
9. Kalachev Yu.L., Mihailov V.A., Podreshetnikov V.V., Shcherbakov I.A. *Opt. Commun.*, **284**, 3357 (2011).