

Лазерная генерация в кристалле $Tm:Ho:Yb_3Al_5O_{12}$ при накачке на переходе $^3H_6 - ^3F_4$

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

Разработана технология роста, и методом Чохральского выращен лазерный кристалл $Tm:Ho:Yb_3Al_5O_{12}$ высокого оптического качества. Исследованы его спектрально-люминесцентные характеристики. Реализована лазерная генерация на длине волны 2100 нм при лазерной накачке в линию поглощения на переходе $^3H_6 - ^3F_4$ иона Tm^{3+} с длиной волны 1678 нм. Дифференциальный и общий (оптический) КПД лазера достигали 41% и 30% соответственно при выходной мощности излучения до 320 мВт.

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

1. Введение

Лазеры двухмикронного диапазона на основе кристаллических активных элементов, легированных ионами Tm^{3+} и Ho^{3+} , эффективно используются в различных областях науки и техники [1–3]. С целью дальнейшего улучшения характеристик таких лазеров продолжают активные поиски новых кристаллических матриц. Например, в последние годы были исследованы новые кристаллы силиката скандия (Sc_2SiO_5) $Tm:SSO$ и $Tm:Ho:SSO$, а также кристалл $Tm:YbAG$, которые продемонстрировали высокую лазерную эффективность [4, 5].

Наше внимание привлек ранее не исследованный в качестве активного элемента лазера кристалл $Yb_3Al_5O_{12}$, допированный ионами Tm^{3+} и Ho^{3+} ($Tm:Ho:YbAG$). Этот кристалл является аналогом кристалла YAG, у которого атом Y заменен атомом Yb. Технология его выращивания при умеренных температурах относительно проста и сочетается с высокой скоростью роста. В отличие от кристалла YAG, в матрице YbAG имеется энергетический уровень с энергией $E \approx 10000 \text{ см}^{-1}$, который может служить каналом утечки энергии возбуждения.

В настоящей работе впервые сообщается о режимах выращивании нового лазерного кристалла $Tm:Ho:YbAG$ и приведены результаты исследования его лазерных характеристик при накачке на переходе $^3H_6 - ^3F_4$ иона Tm^{3+} на длине волны $\lambda = 1678 \text{ нм}$. В качестве источника накачки использовался одномодовый волоконный эрбиевый лазер с рамановским преобразователем длины волны.

2. Лазерный кристалл

Выращивание кристаллов $Tm:Ho:YbAG$ осуществлялось методом Чохральского на промышленной установ-

ке «Кристалл-2». Оптимальным является выращивание кристаллов при использовании монокристаллической затравки, имеющей кристаллографическую ориентацию $\langle 001 \rangle$. Концентрации ионов Tm^{3+} и Ho^{3+} в расплаве были равны 5.7 ат.% и 0.7 ат.% соответственно. Скорость вытягивания кристаллов составляла 6–7 мм/ч при скорости вращения затравки 10 об./мин. Расплав находился в иридиевом тигле диаметром 40 мм.

Приведенные выше параметры выращивания кристаллов были определены в результате экспериментов по их оптимизации. Установлено, что скорость вытягивания були $Tm:Ho:YbAG$ может достигать 6–7 мм/ч без ухудшения оптического качества кристалла, в то время как для широко используемого в технике кристалла YAG она равна 0.5 мм/ч. Большая скорость вытягивания кристалла $Tm:Ho:YbAG$ обусловлена использованием оптимизированного состава расплава: $\{Yb_{2.784}Tm_{0.192}Ho_{0.024}\}[Yb_{0.02}Al_{1.98}]Al_3O_{12}$. Кристаллы $Tm:Ho:YbAG$ имеют кубическую пространственную группу симметрии и поэтому являются изотропными, что позволяет при промышленном производстве выращивать крупные кристаллы диаметром до 80 мм.

В ходе экспериментов осуществлялся поиск оптимального состава ростовой атмосферы. Для уменьшения потерь иридия за счет испарения со стенок тигля использовалась газовая атмосфера с минимальным содержанием кислорода, поскольку даже небольшое его содержание ведет к разрушению стенок дорогостоящих иридиевых тиглей. Однако с химической точки зрения желательнее иметь некоторое количество кислорода в атмосфере, чтобы предотвратить диссоциацию расплава и потерю части кислорода из расплава при высоких температурах. В результате кристалл $Tm:Ho:YbAG$ выращивался в атмосфере азота (99.5%) с небольшой примесью кислорода (0.5%) при температуре плавления около 2000 °C. При таких условиях полностью устранялось образование макродефектов в виде газовых пузырей. Из выращенных кристаллов были изготовлены образцы с полированными торцами, исследование которых показало их высокое оптическое качество и полное отсутствие в них микродефектов.

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

Поступила в редакцию 5 августа 2015 г., после доработки – 2 декабря 2015 г.

3. Спектральные характеристики

Схема низколежащих уровней ионов Tm^{3+} , Ho^{3+} и Yb^{3+} приведена на рис.1. На этой схеме указаны длины волн излучения накачки (1678 нм), люминесценции иона Yb^{3+} (1031 нм) и лазерной генерации (2100 нм), а также переходы, обусловленные передачей энергии между ионами Tm^{3+} (стрелки 1), Tm^{3+} и Yb^{3+} (стрелки 2) и Tm^{3+} и Ho^{3+} (стрелка 3).

Использование кристаллической матрицы YbAG в лазерах на ионах тулия и гольмия обуславливает наличие в энергетической схеме уровня иттербия ${}^2F_{5/2}$, который не участвует в процессе генерации, но может порождать дополнительные каналы утечки энергии накачки. Наблюдалась люминесценция на $\lambda = 1031$ нм, но интенсивность ее была мала по сравнению с интенсивностью люминесценции в области $\lambda \approx 2100$ нм. Мы предполагаем, что каналы утечки энергии возбуждения, порожденные уровнем иттербия, не должны значительно ухудшить эффективность генерации лазера, поскольку при накачке в полосу перехода ${}^3H_6 - {}^3F_4$ иона тулия уровень ${}^2F_{5/2}$ иона иттербия может заселяться только посредством ап-конверсионных переходов, а в дальнейшем за счет энергии уровня ${}^2F_{5/2}(\text{Yb})$ будут частично заселяться уровни ${}^3F_4(\text{Tm})$ и ${}^5I_6(\text{Ho})$.

Кроме указанных на схеме переходов, в энергообмене принимают участие и другие межзонные переходы (см., напр., [6, 7]). В частности, заселение уровня ${}^2F_{5/2}(\text{Yb})$ предполагает возможность каскадных межзонных переходов ${}^2F_{5/2}(\text{Yb}) + {}^5I_8(\text{Ho}) \rightarrow {}^2F_{7/2}(\text{Yb}) + {}^5I_6(\text{Ho})$ и ${}^5I_6(\text{Ho}) + {}^5I_6(\text{Ho}) \rightarrow {}^5S_2(\text{Ho}) + {}^5I_8(\text{Ho})$, как это продемонстрировано в [6] для кристалла $\text{Yb}:\text{Ho}:\text{YLF}$. Все эти переходы вносят вклад в ап-конверсионные потери энергии и снижают КПД лазера, но, как показали наши исследования, наличие иона Yb^{3+} в матрице незначительно ухудшает эффективность лазерной генерации.

Спектр поглощения исследуемого кристалла приведен на рис.2. Масштаб по вертикальной оси выбран таким, чтобы максимально подробно отобразить участки спектра, содержащие линии поглощения ионов Tm^{3+} и Ho^{3+} , при этом пики поглощения Yb^{3+} оказываются за границами рисунка.

Измерения осуществлялись с помощью спектрофотометра Shimadzu UV-3600. На длине кристалла активного элемента поглощалось $\sim 60\%$ излучения накачки. Следует отметить, что длина волны излучения накачки 1678 нм,

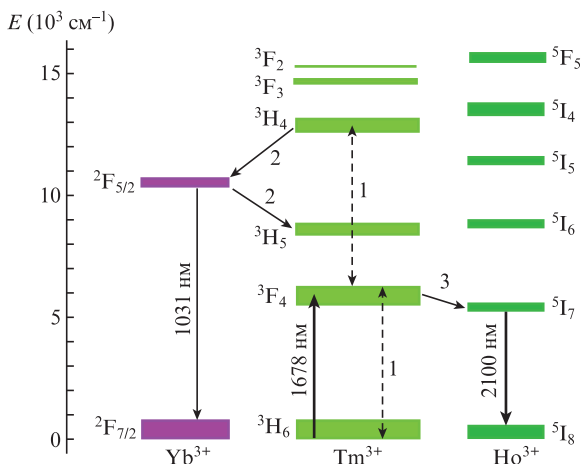


Рис.1. Схема низколежащих уровней Tm^{3+} , Ho^{3+} и Yb^{3+} .

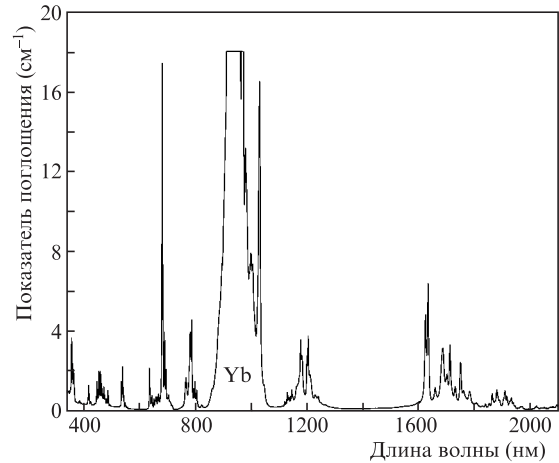


Рис.2. Спектр поглощения в кристалле $\text{Tm}:\text{Ho}:\text{YbAG}$. Показатель поглощения иона Yb^{3+} в максимуме превышает 68 cm^{-1} .

использованная в экспериментах, не совпадает с длиной волны пика линии наибольшего поглощения и тем самым не является оптимальной для реализации наибольшей эффективности лазера, работающего по квазитрехуровневой схеме. Таким образом, существует потенциальная возможность некоторого увеличения КПД лазера при выборе лазерного источника накачки, согласованного с наиболее интенсивной линией поглощения.

Спектры люминесценции кристалла активного элемента регистрировались при возбуждении излучением с $\lambda = 1678$ нм. Активный элемент помещался напротив щели монохроматора МДР-204 (ЛОМО-Фотоника). Оптическая схема эксперимента была идентична описанной в работе [5]. Использованная «геометрия» обеспечивала минимальные искажения спектра люминесценции, связанные с реабсорбцией при выходе излучения из объема кристалла.

Приемником излучения в диапазоне длин волн 1000–2200 нм служил фотодиод G8373-01 (Hamamatsu). Модуляция излучения накачки осуществлялась оптическим прерывателем MC2000 (ThorLabs) в диапазоне частот 2–1000 Гц. Сигнал от фотодиода усиливался цифровым синхронным детектором SR830 (Stanford Research Systems) и регистрировался персональным компьютером с использованием программного обеспечения монохроматора МДР-204. На рис.3 приведены спектры люминесценции, генерации и поглощения для кристалла $\text{Tm}:\text{Ho}:\text{YbAG}$ в ИК области. Небольшой сдвиг по длинам волн пиков поглощения и люминесценции обусловлен тем, что погрешность определения длины волны с использованием монохроматора составляла около 1.6 нм. Ширины входной и выходной щелей монохроматора равнялись 100 мкм.

Спектр ИК люминесценции лежит в широкой области ($\sim 1600 - 2150$ нм). Полученная нами длина волны генерации 2100 нм совпадает с длиной волны интенсивной линии люминесценции. Поскольку в широкой области длин волн, превышающих 2020 нм, поглощение в кристалле активного элемента невелико, можно ожидать, что при использовании спектрально-селективного резонатора удастся осуществить перестройку частоты излучения лазера в широкой области спектра.

Время затухания двухмикронной люминесценции τ_{lum} кристалла $\text{Tm}:\text{Ho}:\text{YbAG}$ определялось по описанной в [5] методике при модуляции интенсивности накачки

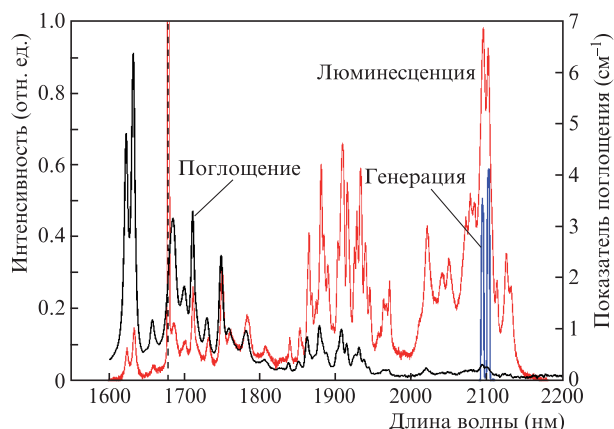


Рис.3. Спектры люминесценции, генерации и поглощения для кристалла $\text{Tm}:\text{Ho}:\text{YbAG}$ в ИК области. Вертикальной штриховой линией указана длина волны накачки (1678 нм).

оптическим дисковым прерывателем в диапазоне частот 2–1000 Гц. В исследуемом кристалле люминесцирующий уровень ${}^5\text{I}_7(\text{Ho}^{3+})$ заселяется не напрямую излучением накачки, а посредством перехода ${}^3\text{F}_4(\text{Tm}^{3+}) \leftrightarrow {}^5\text{I}_7(\text{Ho}^{3+})$, так что время затухания люминесценции определяется временами жизни обоих вовлеченных в процесс уровней. Измеренное время $\tau_{\text{lum}} = 3.8 \pm 0.14$ мс. В рамках применяемого подхода невозможно разделить вклады времен жизни разных уровней в результирующее время затухания люминесценции.

4. Лазерные эксперименты

Для реализации лазерной генерации в кристалле $\text{Tm}:\text{Ho}:\text{YbAG}$ использовался резонатор, близкий к полуконцентрическому. Накачка активного элемента осуществлялась через плоское дихроичное зеркало, полностью отражающее излучение лазера. Сферическое выходное зеркало с радиусом кривизны 50 мм имело коэффициент отражения на рабочей длине волны 98%. Активный элемент размещался вблизи плоского зеркала. Излучение накачки фокусировалось линзой с фокусным расстоянием 80 мм внутрь кристалла в пятно диаметром ~ 80 мкм. Активный элемент кубической формы ($3 \times 3 \times 3$ мм), вырезанный вдоль направления $[001]$, монтировался с использованием индиевой фольги на медном теплоотводе. Рабочие поверхности активного элемента не просветлялись. В большинстве экспериментов температура активного элемента поддерживалась равной 20°C .

Лазерная генерация в кристалле $\text{Tm}:\text{Ho}:\text{YbAG}$ происходила на $\lambda = 2100$ нм. На рис.4 приведены зависимости мощности генерации $\text{Tm}:\text{Ho}:\text{YbAG}$ -лазера от поглощенной в активном элементе мощности накачки. Измерения проводились в импульсном и непрерывном режимах накачки. Импульсный режим осуществлялся с помощью дискового прерывателя, который открывал излучение на $1/20$ оборота при частоте вращения ~ 10 Гц.

Наименьшая пороговая мощность накачки была получена при импульсной накачке и составляла ~ 270 мВт. При импульсной накачке во всем диапазоне использованных мощностей (до 1 Вт) наблюдался линейный рост интенсивности выходного излучения. Дифференциальный и общий (оптический) КПД лазера достигали 41% и 30% соответственно при выходной мощности излучения до

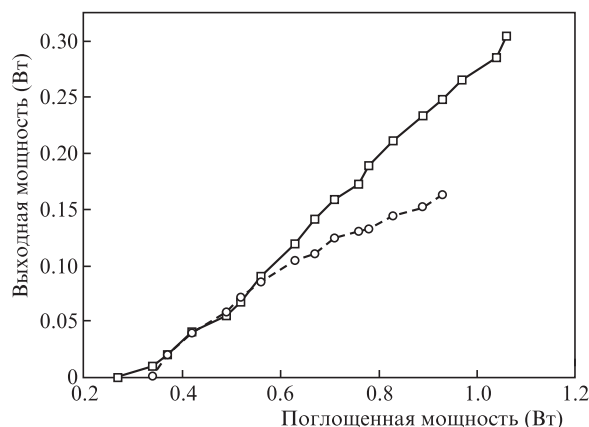


Рис.4. Зависимости мощности генерации $\text{Tm}:\text{Ho}:\text{YbAG}$ -лазера от мощности накачки, поглощенной в активном элементе, в импульсном (■) и непрерывном (○) режимах.

320 мВт, ограниченной лишь предельной выходной мощностью имевшегося в нашем распоряжении лазера накачки.

Следует отметить, что эффективность лазерной генерации в кристалле $\text{Tm}:\text{Ho}:\text{YbAG}$ оказалась в пределах ошибки эксперимента практически такой же, как и при генерации в кристалле $\text{Tm}:\text{YbAG}$ [5]. Этот результат, полученный при идентичных экспериментальных условиях, свидетельствует о высокой эффективности передачи энергии ионов Tm^{3+} ионам Ho^{3+} . Отменим также, что наличие энергетического уровня ${}^2\text{F}_{5/2}$ иона Yb^{3+} не оказывает существенного влияния на эффективность переноса энергии от иона Tm^{3+} к иону Ho^{3+} .

В режиме непрерывной накачки при небольших превышениях порога (примерно при двукратном) эффективность лазера почти такая же, как и в импульсном режиме. При дальнейшем увеличении 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 общем КПД лазера 30% и 18% соответственно. Наблюдавшееся в непрерывном режиме некоторое снижение эффективности лазерной генерации может быть связано с нагревом излучением накачки канала внутри кристалла. Этот нагрев увеличивает внутрирезонаторные потери лазера, поскольку генерация в нем происходит по квазитрехуровневой схеме.

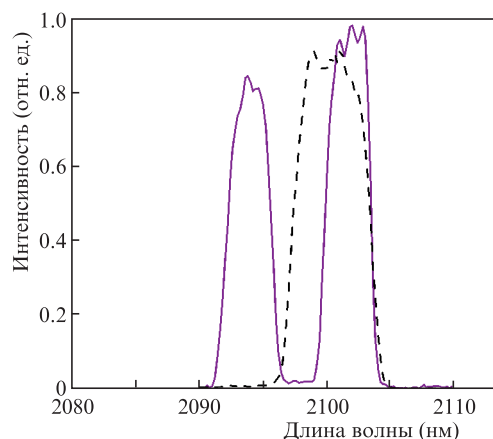


Рис.5. Спектры генерации при мощностях излучения накачки 0.4 (сплошная кривая) и 0.8 Вт (штриховая кривая).

На рис.5 представлены спектры лазерной генерации в кристалле Тm:Ho:YbAG при разных мощностях накачки. Спектры состояли из одной или двух линий в зависимости от мощности накачки. При многократном превышении мощностью накачки порога длина волны линии генерации составляла 2100 нм при ширине линии ~ 10 нм.

5. Заключение

Таким образом, нами выращен и исследован новый лазерный кристалл Тm:Ho:YbAG. Показано, что скорость роста кристалла может быть достаточно большой, и в этом отношении он существенно превосходит большинство известных лазерных кристаллов.

Получена лазерная генерация иона Ho^{3+} в кристалле Тm:Ho:YbAG с $\lambda = 2100$ нм при накачке на $\lambda = 1678$ нм в линию поглощения на переходе ${}^3\text{H}_6 - {}^3\text{F}_4$ иона Tm^{3+} . Порог генерации по мощности накачки был равен примерно 180 мВт. Дифференциальный и общий КПД лазера достаточно велики и достигают 41% и 30% соответственно, а мощность лазерной генерации составила 320 мВт. Измеренное время затухания люминесценции на $\lambda = 2100$ нм было равно 3.8 мс.

Схема уровней Тm:Ho:YbAG сложнее схемы уровней ранее исследованного кристалла Тm:YbAG [5]. В частности, частота перехода ${}^2\text{F}_{5/2} - {}^2\text{F}_{7/2}$ иона Yb^{3+} находится в

резонансе с частотой перехода ${}^5\text{I}_7 - {}^5\text{F}_5$ иона Ho^{3+} , что может привести к нежелательному расселению верхнего лазерного уровня. Сравнение лазерных энергетических характеристик кристаллов Тm:Ho:YbAG и Тm:YbAG в идентичных экспериментальных условиях показывает практически одинаковую их эффективность, при том что в первом случае генерация происходит на переходе иона Tm^{3+} , а во втором – на переходе иона Ho^{3+} . Это свидетельствует о высокой эффективности передачи энергии иона Tm^{3+} иону Ho^{3+} и об отсутствии существенного влияния уровня ${}^2\text{F}_{5/2}$ иона Yb^{3+} на КПД лазера.

Работа выполнена при финансовой поддержке Президиума РАН по теме 46П.

1. Henderson S.W., Hale C.P., Magee J.R., Kavaya M.J., Huffaker A.V. *Opt. Lett.*, **16**, 773 (1991).
2. Scholle K., Lamrini S., Koopmann P., Fuhrberg P., in *Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics* (Rijeka, Croatia: Intech, 2010, pp 471–500).
3. Godard A.C.R. *Physique*, **8**, 1100 (2007).
4. Заварцев Ю.Д., Загуменный А.И., Калачев Ю.Л., Кутовой С.А., Михайлов В.А., Щербаков И.А. *Квантовая электроника*, **43** (11), 989 (2013).
5. Заварцев Ю.Д., Загуменный А.И., Калачев Ю.Л., Кутовой С.А., Михайлов В.А., Щербаков И.А. *Квантовая электроника*, **44** (10), 895 (2014).
6. Marthaler H., Dohnke J., Luthy W., Hulliger J., Weber H.P. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5147**, 249 (2003).
7. Osiać E., Sokolska I., Kuck S. *Phys. Rev. B*, **65**, 235119 (2002).