

Непрерывная генерация лазера на кристалле $\text{YAlO}_3 : \text{Tm}^{3+}$ при диодной накачке

Н.И.Бородин, П.В.Крюков, А.В.Попов, С.Н.Ушаков, А.В.Шестаков

Исследованы генерационные характеристики лазера на кристалле $\text{YAlO}_3 : \text{Tm}^{3+}$ при диодной накачке в спектральной области 802–810 нм. Выходная мощность в непрерывном режиме генерации превышала 10 Вт при полном КПД более 30%. Длина волны лазерного излучения изменяется в диапазоне 1946–1985 нм и определяется мощностью накачки и потерями резонатора в этой спектральной области. Определена эффективность кросс-релаксационного процесса при создании населенности лазерного уровня $^3\text{F}_4$.

Ключевые слова: ортоалюминат иттрия, непрерывный режим генерации, диодная накачка, сечение усиления генерационного перехода.

1. Введение

Твердотельные лазеры, излучающие в двухмикронной области спектра, нашли практическое применение в медицине и технологии, а также в лазерных измерительных системах [1, 2]. Лазеры на основе кристаллов, активированных ионами Tm^{3+} , представляют особый интерес, т.к. при полупроводниковой накачке может быть реализована высокая эффективность преобразования излучения накачки в лазерное излучение благодаря кросс-релаксационному механизму создания инверсной населенности при оптическом возбуждении ионов Tm^{3+} в полосу поглощения перехода $^3\text{H}_6 - ^3\text{H}_4$. При этом квант излучения накачки, поглощенный на переходе $^3\text{H}_6 - ^3\text{H}_4$ иона Tm^{3+} , взаимодействуя с невозбужденным ионом Tm^{3+} по схеме $^3\text{H}_4 - ^3\text{F}_4$, $^3\text{H}_6 - ^3\text{F}_4$, приведенной на рис.1, может породить два возбужденных состояния $^3\text{F}_4$ ионов Tm^{3+} [3, 4]. Таким образом, при условии соответствующего выбора кристаллической матрицы, концентрации активатора и интенсивности накачки квантовая эффективность такого процесса возбуждения может быть близкой к 2. В кристаллах $\text{YAG} : \text{Tm}^{3+}$ и $\text{YLF} : \text{Tm}^{3+}$, обычно используемых в лазерах с полупроводниковой накачкой, наиболее интенсивные линии поглощения, отвечающие переходу $^3\text{H}_6 - ^3\text{H}_4$, находятся в спектральной области 785–795 нм, что позволяет применять для накачки лазерные диоды на основе арсенида галлия-алюминия.

Ортоалюминат иттрия, активированный ионами Tm^{3+} ($\text{YAlO}_3 : \text{Tm}^{3+}$), является перспективным активным материалом для лазеров двухмикронного диапазона с диодной накачкой. Вследствие анизотропии кристалла, т.е. наличия собственного двулучепреломления, активные элементы из YAlO_3 будут испытывать небольшое влияние

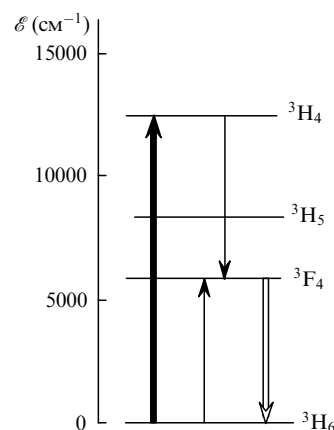


Рис.1. Схема уровней иона Tm^{3+} , участвующих в создании инверсной населенности верхнего лазерного уровня $^3\text{F}_4$.

термоиндуцированного двулучепреломления, возникающего под действием излучения накачки. Сечение перехода $^3\text{F}_4 - ^3\text{H}_6$, на котором осуществляется генерация, примерно в два раза превышает его значение для кристаллов YAG [5]. Прочностные, теплофизические и оптические характеристики кристаллов YAlO_3 также свидетельствуют о перспективности их применения в лазерах [6].

В работе [7] представлены результаты исследования генерационных характеристик $\text{YAlO}_3 : \text{Tm}^{3+}$ -лазера (с концентрацией ионов Tm^{3+} $C_{\text{Tm}} = 4.2\%$) на переходе $^3\text{F}_4 - ^3\text{H}_6$ при продольной диодной накачке. Накачка осуществлялась излучением одиночного лазерного диода в полосу поглощения Tm^{3+} с центром в области $\lambda = 795$ нм и коэффициентом поглощения около 7.5 см^{-1} . Полученные результаты свидетельствуют об эффективности кросс-релаксационных процессов при создании инверсной населенности уровня $^3\text{F}_4$ ионов Tm^{3+} в кристаллах YAlO_3 . Однако накачка в полосу поглощения с $\lambda = 795$ нм не позволяет использовать более высокую мощность накачки и реализовать большую выходную мощность лазерного излучения. Получить высокую (до 115 Вт) мощность лазерного излучения удалось авторам ра-

Н.И.Бородин, П.В.Крюков, А.В.Шестаков. ООО НПЦ «ЭЛС-94», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3; e-mail: nikbor1@rol.ru
А.В.Попов, С.Н.Ушаков. Научный центр лазерных материалов и технологий Института общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: Ushakov@lst.gpi.ru

боты [8] при использовании активного элемента из кристалла YAG: Tm³⁺ (C_{Tm} = 2 %) длиной 55 мм и продольной диодной накачке в полосу поглощения с центром в области $\lambda = 804$ нм, имеющую значительно меньший коэффициент поглощения. Несомненный интерес представляет получение высокой выходной мощности в лазерах на кристаллах YAlO₃: Tm³⁺ при продольной накачке излучением традиционных лазерных AlGaAs-диодов с $\lambda = 803 - 805$ нм.

В настоящей работе исследованы генерационные характеристики лазера на кристалле YAlO₃: Tm³⁺ (C_{Tm} = 5.5 %), излучающего на переходе ³F₄ – ³H₆. Накачка осуществлялась как одиночным лазерным диодом, так и линейкой лазерных диодов из AlGaAs, излучающих в области $\lambda = 803 - 805$ нм.

2. Спектрально-люминесцентные характеристики кристаллов YAlO₃: Tm³⁺

Монокристаллы алюмината иттрия, легированные ионами Tm³⁺, были выращены методом Чохральского на модернизированной ростовой установке «Кристалл-3М» с автоматизированным контролем параметров выращивания и послеростовой термообработки. Из выращенных кристаллов были изготовлены образцы с C_{Tm} = 1 % и 5.5 % для спектральных и генерационных исследований соответственно.

Для определения эффективности кросс-релаксационных процессов, описывающих заселение верхнего лазерного уровня ³F₄, и условий возбуждения лазерных элементов были исследованы поляризованные спектры поглощения и люминесценции кристаллов YAlO₃: Tm³⁺. Регистрация спектров люминесценции и поглощения проводилась на спектрометре СДЛ-1 и спектрофотометре СФ-20.

На рис.2 приведены спектры поглощения в кристалле YAlO₃: Tm³⁺ с C_{Tm} = 5.5 % при переходе ионов Tm³⁺ на уровень ³H₄ для двух ориентаций поляризации электрического вектора **E** падающего излучения относительно кристаллографической оси *c* кристалла YAlO₃. Видно, что для обеих поляризаций наблюдается интенсивная полоса поглощения в области $\lambda = 795$ нм. Помимо этой полосы в области 800–810 нм наблюдается ряд линий с коэффициентами поглощения 1–2 см⁻¹, в которые предполагалось осуществить накачку активных элементов.

Поскольку эффективность работы лазера на ионах

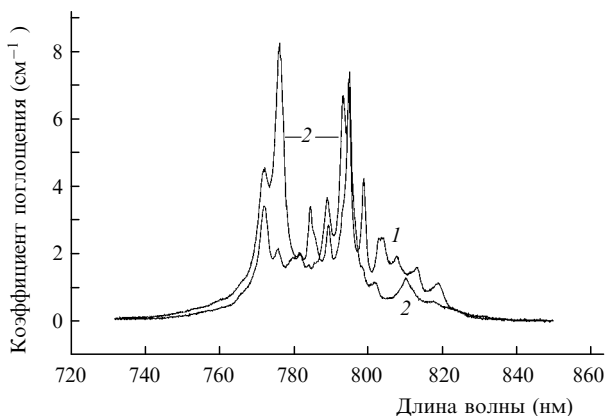


Рис.2. Поляризованные спектры поглощения ионов Tm³⁺ (переход ³H₆ – ³H₄) в кристалле YAlO₃ (C_{Tm} = 5.5 %) при T = 300 К в случаях, когда $c \parallel E$ (1) и $c \perp E$ (2).

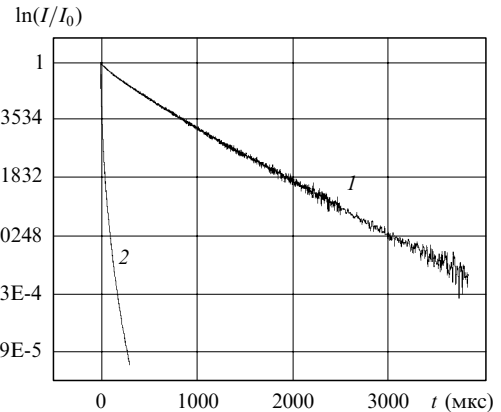


Рис.3. Кривые затухания люминесценции возбужденного уровня ³H₄ ионов Tm³⁺ в кристалле YAlO₃ (длина волны возбуждения 792 нм, длина волны регистрации 802 нм) при C_{Tm} = 1 % (1) и 5.5 % (2).

Tm³⁺ в области $\lambda = 2$ мкм при T = 300 К, как показано в [9], зависит от эффективности заселения метастабильного состояния ³F₄ за счет кросс-релаксации (переходы ³H₄ – ³F₄, ³H₆ – ³F₄), нами изучалась эффективность этого процесса в кристаллах YAlO₃: Tm³⁺ с C_{Tm} = 5.5 %. При исследовании кинетики затухания люминесценции с уровня ³H₄ в кристалле YAlO₃: Tm³⁺ с C_{Tm} = 1 % при T = 300 К было установлено, что она близка к экспоненциальной. Динамический диапазон измеренного затухания люминесценции составлял четыре порядка (рис.3, кривая 1). Оцененное по соответствующему этому диапазону временному интервалу время жизни возбужденного уровня ³H₄ составило 500 мкс, что немного отличается от приведенного в [10] значения 630 мкс, измеренного при T = 77 К. При увеличении концентрации ионов Tm³⁺ до 5.5 % в кристалле YAlO₃ наблюдается сильное тушение люминесценции с уровня ³H₄ (рис.3, кривая 2), обусловленное кросс-релаксационным процессом (³H₄ – ³F₄, ³H₆ – ³F₄). По кинетике затухания люминесценции ионов Tm³⁺ была оценена эффективность кросс-релаксации β_{Tm-Tm} , происходящей по указанной выше схеме. Эффективность рассчитывалась по формуле [11]

$$\beta_{Tm-Tm} = 1 - \int I_{Tm} dt / \int I'_{Tm} dt,$$

где I_{Tm} и I'_{Tm} – интенсивности сигналов люминесценции ионов Tm³⁺ с уровня ³H₄ при наличии кросс-релаксации и в ее отсутствие. Полученный результат представлен в табл.1, где для сравнения приведены значения β_{Tm-Tm} для кристаллов YAG [12].

Проведенные исследования показывают, что в кристаллах YAlO₃: Tm³⁺ с C_{Tm} = 5.5 % эффективность кросс-релаксации, ответственной за заселение верхнего лазерного уровня ³F₄, является высокой и может обеспечить эффективную генерацию с этого уровня в кристаллах YAlO₃. На основе спектральных исследований были оп-

Табл.1.

Кристалл	C _{Tm} (%)	β_{Tm-Tm}
YAlO ₃	5.5	98.5
	2.8	96
YAG	7.1	99

ределены размеры активных элементов из $\text{YAlO}_3 : \text{Tm}^{3+}$ с $C_{\text{Tm}} = 5.5\%$ для проведения генерационных экспериментов.

3. Генерация на кристаллах $\text{YAlO}_3 : \text{Tm}^{3+}$ при продольной диодной накачке

Для генерационных экспериментов из кристалла $\text{YAlO}_3 : \text{Tm}^{3+}$ ($C_{\text{Tm}} = 5.5\%$) были изготовлены активные элементы с размерами 7, 7 и 5 мм вдоль осей c , a и b соответственно. Торцевые поверхности этих элементов, перпендикулярные оси b , были плоскими, и при использовании различных схем генерации на них наносились диэлектрические покрытия различных типов:

1) на один из торцов, через который осуществлялась накачка, наносилось селективное зеркало с коэффициентом отражения $R > 99.5\%$ на $\lambda = 1940$ нм и коэффициентом пропускания $T > 85\%$ на $\lambda = 805$ нм, на другой торец – просветляющее покрытие на $\lambda = 1940$ нм (элемент первого типа);

2) на торец, через который осуществлялась накачка, наносилось зеркало, глухое для $\lambda = 1940$ нм и пропускающее более 85% излучения накачки, на другой торец – выходное зеркало с коэффициентом пропускания $T = 5.6\%$ на $\lambda = 1940$ нм (элемент второго типа).

Исследовалась генерация активных элементов при накачке одиночным лазерным диодом мощностью 2 Вт и лазерной диодной линейкой (HLU30F400, LIMO GmbH) мощностью 30 Вт. Эти элементы устанавливались в медном корпусе, температура которого регулировалась в диапазоне $15^\circ - 25^\circ\text{C}$ с помощью элемента Пельтье. Активные элементы первого типа использовались в лазерах с накачкой линейкой лазерных диодов, а элементы второго типа – в экспериментах с накачкой одиночным диодом.

3.1. Накачка одиночным лазерным диодом

Излучение лазерного диода фокусировалось в активный элемент линзой с фокусным расстоянием $f = 3.3$ мм, что обеспечивало получение пятна излучения накачки размером 100×200 мкм. Резонатор лазера был образован зеркалами, нанесенными на торцы активного элемента второго типа. Поскольку излучение лазерного диода было поляризованным, взаимная ориентация излучения накачки и активного элемента осуществлялась с учетом зависимости, приведенной на рис.2 (кривая 2). Длина волны излучения накачки устанавливалась равной 803 нм с помощью регулировки рабочей температуры диода.

На рис.4 представлена зависимость выходной мощности генерации от поглощенной в активном элементе мощности накачки. Порог генерации достигался при поглощенной мощности 0.7 Вт, максимальная выходная мощность была равна 540 мВт при поглощенной мощности накачки 1.6 Вт. Таким образом, полный КПД генерации составил 33%, а дифференциальный – 60%.

3.2. Накачка линейкой лазерных диодов

Излучение линейки лазерных диодов со световодным выводом (диаметр световода 400 мкм) фокусировалось в активный элемент первого типа четырехлинзовым конденсором с увеличением $1.7\times$. При этом размер пятна излучения накачки в активном элементе составлял 0.65–0.67 мм. Излучение накачки с $\lambda = 802 - 805$ нм на выходе световода было неполяризовано. Резонатор лазера обра-

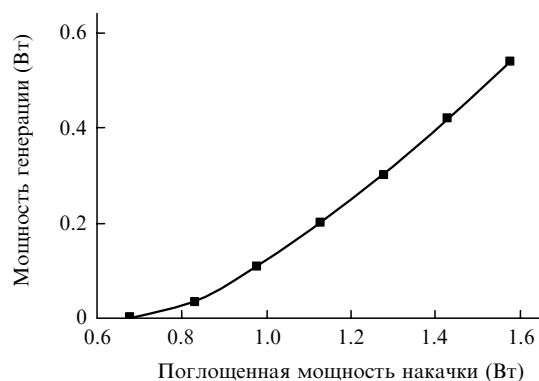


Рис.4. Зависимость выходной мощности генерации от поглощенной мощности накачки при накачке одиночным лазерным диодом.

зован глухим зеркалом, нанесенным на торец активного элемента первого типа, через который осуществлялась накачка, и внешним зеркалом с коэффициентом пропускания $T = 5.6\%$.

На рис.5 представлена зависимость выходной мощности генерации лазера, выходное зеркало которого имело коэффициент пропускания $T = 5.6\%$, от поглощенной мощности накачки. Выходная мощность лазерного излучения при максимальной поглощенной мощности накачки составляет 7.7 Вт. Анализ поперечного распределения поля генерируемого излучения показал, что во всех случаях возбуждалась лишь одна TEM_{00} -мода. Полный КПД генерации при этом был равен 38.5%, а дифференциальный – 45%. При мощности накачки, достигавшей в наших экспериментах 32 Вт, в активном элементе за один проход поглощается излучение накачки мощностью менее 20 Вт, что свидетельствует о возможности улучшения генерационных характеристик за счет оптимизации параметров активного элемента и системы накачки. Использование двухпроходной схемы накачки (рис.6) позволило при той же мощности накачки полу-

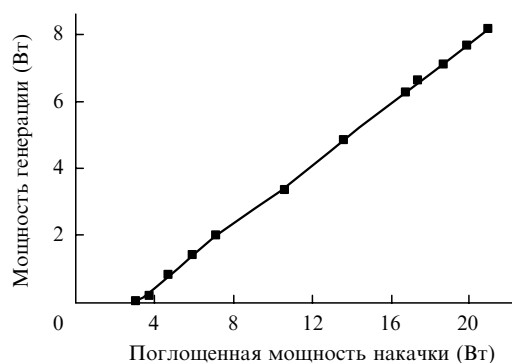


Рис.5. Зависимость выходной мощности генерации от поглощенной мощности накачки при накачке линейкой лазерных диодов.

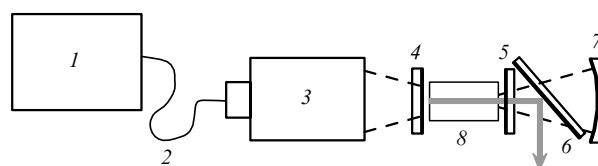


Рис.6. Оптическая схема эксперимента при использовании двухпроходной схемы накачки:

1 – линейка лазерных диодов; 2 – оптическое волокно; 3 – фокусирующая система; 4–7 – зеркала; 8 – активный элемент первого типа.

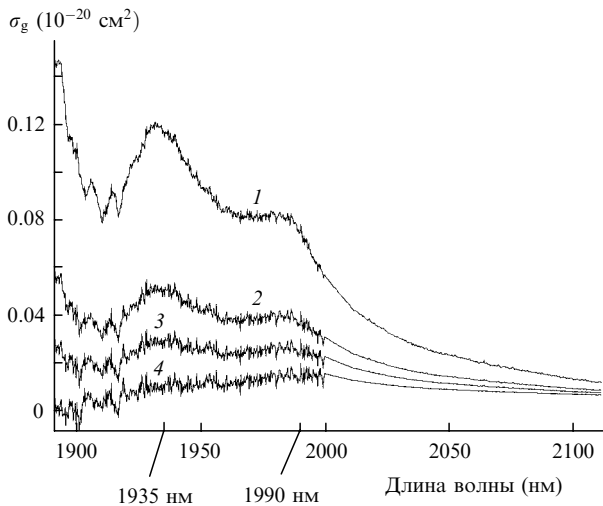


Рис.7. Спектр сечения усиления σ_g ионов Tm^{3+} в кристалле $YAlO_3$ при $c \perp E$ и относительной инверсной населенности $P = 0.50$ (1), 0.25 (2), 0.17 (3) и 0.10 (4).

чить более высокую выходную мощность лазерного излучения за счет дополнительного использования части мощности излучения, прошедшего через активный элемент. Так, при мощности накачки 32 Вт была получена мощность выходного лазерного излучения 10.5 Вт.

Нами были измерены длины волн генерации на переходе ${}^3F_4 - {}^3H_6$ ионов Tm^{3+} в кристаллах $YAlO_3$ при накачке как одиночным диодом, так и линейкой лазерных диодов. Длина волны генерации регистрировалась с помощью монохроматора МДР-23. Спектральное разрешение при этом было не хуже 3 нм. В обоих случаях при $T = 5.6\%$ генерируется одна линия с $\lambda = 1990$ нм. При увеличении пропускания выходного зеркала свыше 8% и накачке излучением линейки диодов длина волны лазерного излучения изменяется и составляет 1946 нм. В обоих случаях лазерное излучение поляризовано так, что электрический вектор E перпендикулярен оси c кристалла $YAlO_3$. Такое изменение длины волны генерации связано с необходимостью создания большей инверсной населенности при увеличении излучательных потерь и существенного изменения спектральной зависимости коэффициента усиления в области рабочих переходов. Методом, изложенным в работе [13], был проведен расчет эффективных сечений генерационного перехода ${}^3F_4 - {}^3H_6$ ионов Tm^{3+} при различных поляризациях излучения и относительных инверсных населенностях P . Параметр P определяется как плотность ионов на верхнем лазерном уровне, деленная на концентрацию активных ионов. Результаты расчета представлены на рис.7. Видно, что при малых значениях относительной инверсной населенно-

сти ($P < 0.17$) преобладает линия с максимумом на $\lambda = 1990$ нм, при увеличении ($P \geq 0.17$) преобладающей становится линия с $\lambda = 1935$ нм, что вполне согласуется с экспериментальными результатами.

4. Заключение

Проведенные в настоящей работе исследования показали, что в лазерах на кристаллах $YAlO_3:Tm^{3+}$ возможна эффективная генерация при продольной накачке в полосы поглощения в области 803–805 нм излучением одиночного лазерного диода и линейки диодов на основе $AlGaAs$. Сравнение полученных результатов с данными работы [7] показывает, что при накачке излучением одиночного диода в полосу с центром на $\lambda = 803$ нм эффективность генерации сопоставима с достигнутой в [7] при накачке в наиболее интенсивную полосу поглощения с $\lambda = 795$ нм. Достигнутая мощность 540 мВт при поглощенной мощности накачки 1.6 Вт соответствует результатам, полученным в [7]. При накачке излучением линейки лазерных диодов мощностью 32 Вт максимальная мощность выходного излучения составила 10.5 Вт при эффективности преобразования накачки в лазерное излучение 32%–33%. Показано, что оптимизация параметров лазерного элемента и накачки позволит улучшить выходные характеристики лазера на основе кристалла $YAlO_3:Tm^{3+}$.

1. Ropoulos V. *Photon. Spectra*, June, 116 (1996).
2. Sudesh V., Piper J.A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **36**, 879 (2000).
3. Stoneman R.C., Esterovitz L. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **1**, 78 (1995).
4. Ногинов М.А., Прохоров А.М., Саркисян Г.К., Смирнов В.А., Щербаков И.А. *Квантовая электроника*, **18** (9), 1042 (1991).
5. Payne S.A., Chase L.L., Smith L.K., Kway W.L., Krupke W.F. *IEEE J. Quantum Electron.*, **28**, 2619 (1992).
6. Каминский А.А. *Лазерные кристаллы* (М.: Наука, 1975, с. 189).
7. Elder I.F., Payne J. *Appl. Opt.*, **36**, 8606 (1997).
8. Honea E.C., Beach R.J., Sutton S.B., Speth J.A., Mitchell S.C., Skidmore J.A., Emanuel M.A., Payne S.A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **33**, 1592 (1997).
9. Антипенко Б.М., Бученков А.С., Киселева Т.И., Крутова Л.И., Никитичев А.А., Письменный В.А. *Письма в ЖТФ*, **15** (16), 80 (1989).
10. Иванов А.О., Мочалов И.В., Ткачук А.М., Федоров В.А., Феофилов П.П. *Квантовая электроника*, **2**, 188 (1975).
11. Воронько Ю.К., Гессен С.Б., Еськов Н.А., Рябочкина П.А., Соболев А.А., Ушаков С.Н., Цымбал Л.И. *Квантовая электроника*, **20**, 363 (1993).
12. Becker T., Clausen R., Huber G., Duczynski E.W., Mitzscherlich P. *OSA Proc. Tunable Solid State Lasers*, **5**, 150 (1989).
13. Ryba-Romanowski W., Golab S., Sokolska I., Dominiak-Dzik G., Zawadzka J., Berkowski M., Fink-Finowicki J., Baba M. *Appl. Phys. B*, **68**, 199 (1999).