

00

Лазерные источники двухмикронного излучения на основе кристаллов Tm^{3+} , Ho^{3+} : YSGG и Tm^{3+} , Ho^{3+} : YLF

© Л.В. Гафурова, А.А. Сироткин, Б.Д. Овчаренко, В.Х. Багдасаров, М.В. Понарина, С.В. Гарнов

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
Москва, Россия

e-mail: lidiya19shirkina@gmail.com

Поступила в редакцию 05.12.2025 г.

В окончательной редакции 20.01.2026 г.

Принята к публикации 03.06.2026 г.

Продemonстрированы твердотельные $2\mu\text{m}$ лазерные источники на основе кристаллов YSGG и YLF, солегированных ионами тулия (Tm^{3+}) и гольмия (Ho^{3+}) с поперечной диодной накачкой. В режиме свободной генерации достигнута одинаковая для двух активных сред энергия импульса $\sim 1.1\text{ J}$. При импульсной накачке с частотой следования 2 Hz в режиме модуляции добротности генерируется цуг импульсов с длительностями одиночных импульсов $\sim 70\text{ ns}$, энергиями одиночных импульсов $\sim 29.0\text{ mJ}$ для YSGG и $\sim 115\text{ mJ}$ для YLF. Полная энергия в цуге импульсов составила $\sim 0.21\text{ J}$ (Tm^{3+} , Ho^{3+} : YSGG) и $\sim 0.81\text{ J}$ (Tm^{3+} , Ho^{3+} : YLF).

Ключевые слова: кристалл Tm^{3+} , Ho^{3+} : YSGG, кристалл Tm^{3+} , Ho^{3+} : YLF, $2\mu\text{m}$ лазерный источник, цуг наносекундных импульсов.

DOI: 10.61011/OS.2026.08.63712.37-26

Введение

Лазеры с длинами волн около $2\mu\text{m}$ широко востребованы для применения в области медицины [1,2], так как один из пиков поглощения воды находится вблизи $2\mu\text{m}$. При характерном времени воздействия, меньшем времени тепловой релаксации ткани (длительность лазерного импульса менее 1 ms) [3], с высокой эффективностью происходит локализация нагрева тканей и коагуляция крови [1]. Лазерное излучение с длиной волны около $2\mu\text{m}$ эффективно применяется для оптической накачки параметрических генераторов света (ПГС), излучающих в среднем ИК-диапазоне спектра [4–6], с последующей генерацией излучения терагерцового (THz) диапазона [7]. Источники $2\mu\text{m}$ излучения перспективны в области дистанционного зондирования окружающей среды, поскольку одно из „окон прозрачности“ атмосферы ($2.1\text{--}2.4\mu\text{m}$) находится в данном диапазоне длин волн [8]. В частности, импульсные $2\mu\text{m}$ лазеры служат основой безопасных для глаз лидаров, которые работают на основе гетеродинного детектирования или дифференциального поглощения (DIAL) [9].

Генерация $2\mu\text{m}$ излучения в ряде случаев реализована на основе волоконного гольмиевого (Ho^{3+}) лазера с оптической накачкой волоконным тулиевым (Tm^{3+}) лазером [10]. Другой концепцией выступает ПГС с накачкой Nd^{3+} : YAG лазером [11]. Широкое распространение в качестве твердотельного источника с длиной волны около $2\mu\text{m}$ получили лазеры с конфигурацией на основе гольмиевого кристалла с оптической накачкой тулиевым волоконным лазером [4,12]. Альтернативным подходом выступает использование композитных сред, состоящих из областей, легированных только ионами Tm^{3+} или

Ho^{3+} , соединенных в единую структуру [13,14]. Перспективным направлением исследований выступают источники на основе материалов, солегированных Tm^{3+} и Ho^{3+} с продольной накачкой [13,15–17] и с поперечной диодной накачкой в квантронах [18]. Лазерная генерация вблизи $2\mu\text{m}$ в материалах, солегированных Tm^{3+} и Ho^{3+} , получена в керамике [19], канальных волноводах [17], в кристаллах гранатов [4,6,12,20–22] и фторидов [9,23,24]. Наибольшая выходная мощность продемонстрирована при использовании кристаллов фторидов — 87.7 W (Tm^{3+} , Ho^{3+} : YLF [25]) и гранатов — 57 W (Tm^{3+} , Ho^{3+} : YAG [25]).

Лазерная генерация в средах, солегированных Tm^{3+} , Ho^{3+} , осуществлена в различных режимах: непрерывном режиме [25], пассивной модуляции добротности на основе Cr:ZnSe/ZnS [15,17] или графена [26], активной модуляции добротности с помощью электрооптического модулятора [14] или акустооптического модулятора (АОМ) [27], а также самомодуляции [13].

Режим модуляции добротности с использованием АОМ позволяет генерировать последовательности наносекундных (ns) импульсов с регулируемой частотой следования, длительностью и энергией в импульсе, что преимущественно используется для оптической накачки ПГС или активных сред. Акустооптические модуляторы на кристалле KGW широко применимы для лазерных систем с высокой мощностью в ИК-спектральном диапазоне, демонстрируя высокий коэффициент контрастности и высокий порог оптического пробоя [28].

В настоящей работе продемонстрирован $2\mu\text{m}$ лазерный источник на основе квантрона с импульсной поперечной диодной накачкой и кристаллами YSGG и YLF, солегированными ионами тулия

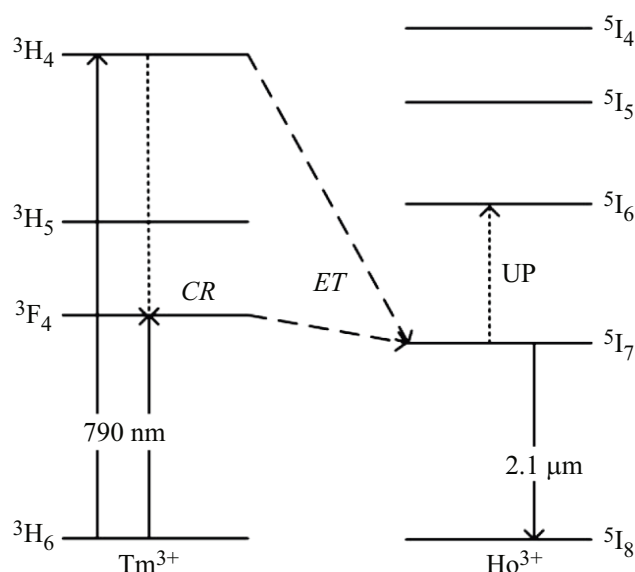


Рис. 1. Схема переноса энергии в системе: Tm^{3+} , Ho^{3+} (ET — перенос энергии, CR — перекрестная релаксация; UP — ап-конверсия).

Tm^{3+} (5 at.%) и гольмия Ho^{3+} (0.5 at.%). Данные материалы были выбраны в качестве активных сред, вследствие относительно низких энергий фоонов $\sim 700 \text{ cm}^{-1}$ [29] и 500 cm^{-1} [30] соответственно, что снижает безызлучательные потери. Кроме того, кристаллы фторидов и гранатов демонстрируют достаточно высокое поперечное сечение поглощения $^5\text{I}_7$ (Ho^{3+}): $\sim 0.6 \cdot 10^{-20} \text{ cm}^2$ (Tm^{3+} , Ho^{3+} : YLF [24]), $\sim 0.4 \cdot 10^{-20} \text{ cm}^2$ (Tm^{3+} , Ho^{3+} : GGAG [21]) и большое время жизни уровня $^3\text{H}_4$ (Tm^{3+}): $\sim 14 \text{ ms}$ (Tm^{3+} , Ho^{3+} : YLF [31]), $\sim 8 \text{ ms}$ (Tm^{3+} , Ho^{3+} : GGAG [21]), что обеспечивает эффективное накопление энергии. А также кристаллы фторидов и гранатов характеризуются относительно высоким поперечным сечением излучения $^5\text{I}_7 \rightarrow ^5\text{I}_8$ (Ho^{3+}): $\sim 1.5 \cdot 10^{-20} \text{ cm}^2$ (Tm^{3+} , Ho^{3+} : YLF [23]), $\sim 4.9 \cdot 10^{-19} \text{ cm}^2$ (Tm^{3+} , Ho^{3+} : GGAG [32]). В настоящей работе реализованы режимы свободной генерации и активной модуляции добротности на кристалле KGW для активных сред YSGG и YLF. В режиме свободной генерации достигнута одинаковая для двух активных сред энергия импульса $\sim 1.1 \text{ J}$, в режиме модуляции добротности энергия цуга импульсов поляризованного излучения составила $\sim 0.21 \text{ J}$ (Tm^{3+} , Ho^{3+} : YSGG) и $\sim 0.81 \text{ J}$ (Tm^{3+} , Ho^{3+} : YLF). Длины волн генерации составили $2.07 \mu\text{m}$ (Tm^{3+} , Ho^{3+} : YSGG) и $2.05 \mu\text{m}$ (Tm^{3+} , Ho^{3+} : YLF) соответственно.

Энергетический перенос в системе $\text{Tm}^{3+} \rightarrow \text{Ho}^{3+}$

Один из пиков поглощения ионов Tm^{3+} находится вблизи $0.79 \mu\text{m}$ [33], позволяющий осуществлять эффек-

тивную оптическую накачку коммерчески доступными лазерными диодами с последующей генерацией излучения в области $1.9 \mu\text{m}$. В то же время ионы Ho^{3+} имеют полосу поглощения в области $1.9 \mu\text{m}$ [1], а также большое сечение вынужденного излучения перехода $^5\text{I}_7 \rightarrow ^5\text{I}_8$ ($\sim 8 \cdot 10^{-20} \text{ cm}^2$) [34] и большое время жизни 10.8 ms [35]. Это позволяет осуществлять эффективную генерацию $\sim 2.1 \mu\text{m}$ с накачкой $\sim 0.79 \mu\text{m}$ в кристаллах, солегированных Tm^{3+} , Ho^{3+} . Схема энергетического переноса системы $\text{Tm}^{3+} \rightarrow \text{Ho}^{3+}$ изображена на рис. 1.

При накачке $0.79 \mu\text{m}$ в Tm^{3+} наблюдается эффективный процесс перекрестной релаксации (CR): генерируются две возбужденные частицы на переходах $^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{F}_4$ и $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{F}_4$ [36]. Использование ионов тулия в качестве сенситизатора ионов гольмия позволяет реализовать эффективный перенос энергии (ET) на уровень $^5\text{I}_7$ (Ho^{3+}) [37]. Таким образом, осуществляется лазерная генерация на переходе $\text{Ho}^{3+} : ^5\text{I}_7 \rightarrow ^5\text{I}_8$ в области $\sim 2.1 \mu\text{m}$ [38]. В кристаллах, солегированных Tm^{3+} и Ho^{3+} , наблюдается эффект ап-конверсии ($^5\text{I}_7 \rightarrow ^5\text{I}_6$) на переходе $\text{Ho}^{3+} : ^5\text{I}_7 \rightarrow ^5\text{I}_8$. Процесс ап-конверсии снижает населенность уровня $\text{Ho}^{3+} : ^5\text{I}_7$, что увеличивает порог генерации и тепловыделение, снижая эффективность генерации. При достаточно низкой концентрации Ho^{3+} (0.5–1%) вероятность ап-конверсии мала. В то же время процесс ап-конверсии становится существенным при модуляции добротности, когда населенность на уровне $^5\text{I}_7$ значительно возрастает.

Лазерные источники $2 \mu\text{m}$ излучения на основе кристаллов Tm^{3+} , Ho^{3+} :YSGG/YLF

Кристаллы Tm^{3+} , Ho^{3+} :YSGG/YLF представляют собой цилиндрические активные элементы размером $\varnothing 5 \times 80 \text{ mm}^2$ с концентрацией ионов тулия Tm^{3+} 5 at. % и гольмия Ho^{3+} 0.5 at. %. Эта концентрация ионов является оптимальной для генерации излучения вблизи $2.1 \mu\text{m}$ [16,32]. Оптическая накачка активных элементов осуществляется в квантроне, состоящем из 10 лазерных диодных решеток (ЛДР) производства компании НПП „Инжект“. ЛДР расположены симметрично на угловом шаге 72° вокруг боковой поверхности на равноудаленном расстоянии от центра активного элемента, осуществляя его накачку с 5 сторон (5 параллельных каналов, по 2 ЛДР последовательно в каждом канале). Каждая ЛДР имела следующие технические характеристики: размер тела свечения $5 \times 25 \text{ mm}$, максимум спектра лазерного излучения $795 \pm 2 \text{ nm}$, расходимость излучения 38.2° и 12.7° по быстрой и медленной осям. Схема оптической накачки в поперечном сечении представлена на рис. 2.

Узкая спектральная линия излучения лазерных диодов (по уровню FWHM 4–6 nm) согласуется с характерными полосами поглощения ионных центров тулия. С целью обеспечения эффективного ввода излучения

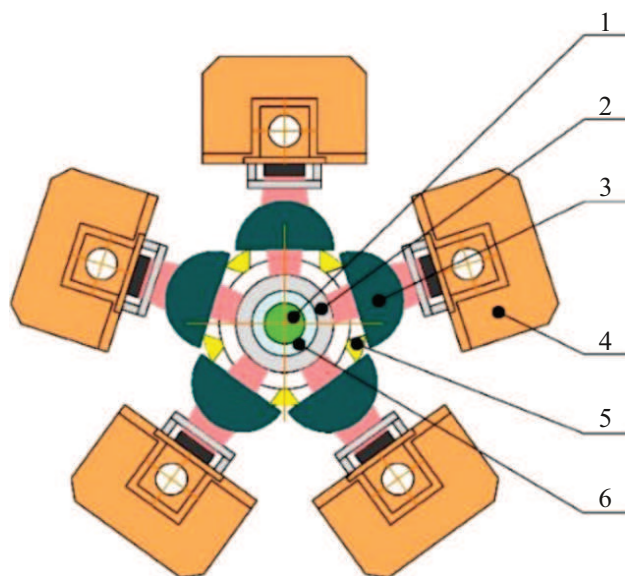


Рис. 2. Оптическая схема квантрона в поперечном сечении: 1 — активный элемент Tm^{3+} , Ho^{3+} :YSGG/YLF, 2 — кварцевая трубка, 3 — система фокусировки, 4 — ЛДР, 5 — отражатель, 6 — хладагент.

оптической накачки между каждой ЛДР и активным элементом используется система фокусировки излучения в виде цилиндрических линз с радиусом кривизны $R = 12 \text{ mm}$. Термостабилизация квантрона осуществляется одноконтурной системой жидкостного охлаждения при температуре хладагента 15°C . Контур охлаждения состоит из 6 параллельных протоков. Один проток представляет из себя кварцевую трубку (длина 60 mm , внутренний/внешний диаметр $8/12 \text{ mm}$), и 5 одинаковых протоков проходят в теплообменниках, на которых закреплены ЛДР через индиевые пластины толщиной $50 \mu\text{m}$. С целью уменьшения потерь и повышения эффективности используются отражатели (металлические цилиндрические сегменты с золотым покрытием), обеспечивающие обратное отражение непоглощенного излучения накачки. Максимальное значение амплитуды импульса тока накачки в квантроне составляет 225 A ($45 \text{ A} \times 5 \text{ ЛДР}$) при падении напряжения 220 V ($110 \text{ V} \times 2 \text{ ЛДР}$). Выравнивание тока накачки в каждом параллельном канале происходит за счет заранее подобранных пар ЛДР таким образом, чтобы отличие суммы напряжения каждой пары ЛДР в параллельном канале составляло не более 1 V . Импульс тока накачки во всех экспериментах обеспечивался источником питания SF315 производства компании FEDAL и имел прямоугольную временную форму с фронтами нарастания и спада по $35 \mu\text{s}$. Суммарная пиковая мощность излучения накачки в квантроне составляет $\sim 20 \text{ kW}$ при центральной длине волны $0.796 \mu\text{m}$ и длительностью импульсов тока накачки $250 \mu\text{s}$ по паспортным значениям ЛДР. Возможности квантрона позволяют выполнять экс-

периментальные исследования при частоте следования импульсов от 1 до 10 Hz и длительности импульсов от 100 до $1000 \mu\text{s}$. Вышеописанный квантрон с поперечной диодной накачкой разработан в ИОФ РАН аналогично работе [39].

Режим свободной генерации и модуляции добротности в Tm^{3+} , Ho^{3+} : YSGG/YLF лазерах

На рис. 3 представлена принципиальная схема экспериментальной установки Tm^{3+} , Ho^{3+} : YSGG/YLF лазера.

Режим активной модуляции добротности реализуется с помощью АОМ на кристалле KGW. Управление АОМ осуществляется с рабочей частотой ультразвуковых преобразователей $50 \pm 10 \text{ MHz}$, с частотой повторения $20\text{--}70 \text{ kHz}$. В режиме свободной генерации акустооптический модулятор не используется. В режиме свободной генерации зеркало № 1 имеет высокий коэффициент отражения ($R \approx 99\%$ для $\lambda = 2.1 \mu\text{m}$) и радиус кривизны $R_z \rightarrow \infty$, выходное зеркало имеет коэффициент отражения ($R \approx 88\%$ для $\lambda = 2.1 \mu\text{m}$) и радиус кривизны $R_z \approx 1000$, длина резонатора составляет $\approx 160 \text{ mm}$. В режиме модуляции добротности зеркало № 1 имеет высокий коэффициент отражения ($R \approx 99\%$ для $\lambda = 2.1 \mu\text{m}$) и радиус кривизны $R_z \rightarrow \infty$, выходное зеркало имеет коэффициент отражения $R \approx 65\%$ ($\lambda = 2.1 \mu\text{m}$) и радиус кривизны $R_z \approx 500 \text{ mm}$, длина резонатора составляет $\approx 550 \text{ mm}$.

На рис. 4 представлены характерные временные формы импульсов для двух лазеров: 1) тока накачки ЛДР, 2) свободной генерации, 3) модуляции добротности.

На рис. 5 представлена зависимость выходной энергии в режиме свободной генерации и модуляции добротности в цуге для Tm^{3+} , Ho^{3+} : YLF источника от электрической энергии накачки.

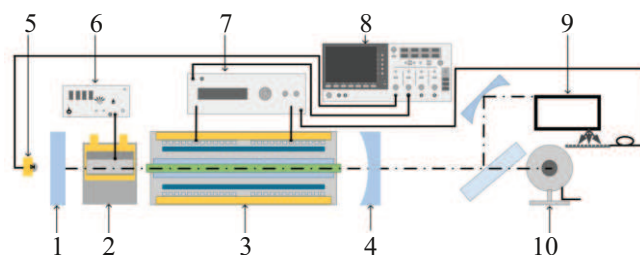


Рис. 3. Принципиальная схема экспериментальной установки Tm^{3+} , Ho^{3+} :YSGG/YLF лазера: 1 — плоское высокоотражающее зеркало, 2 — АОМ (KGW), 3 — квантрон (Tm^{3+} , Ho^{3+} :YSGG/YLF), 4 — выходное зеркало, 5 — ИК-детектор HgCdTe Vigo PVM-10.6, 6 — генератор GCH-50-30И, 7 — блок питания ЛДР, 8 — цифровой осциллограф GW Instek GDS-72304, 9 — спектрограф на основе неохлаждаемой пироэлектрической линейки HPL-256-500 и спектрометра MS2004, 10 — измеритель мощности Ophir 12A-SH-V1. 1–4 — оптическая схема, 6, 7 — система управления, 5, 8–10 — система регистрации.

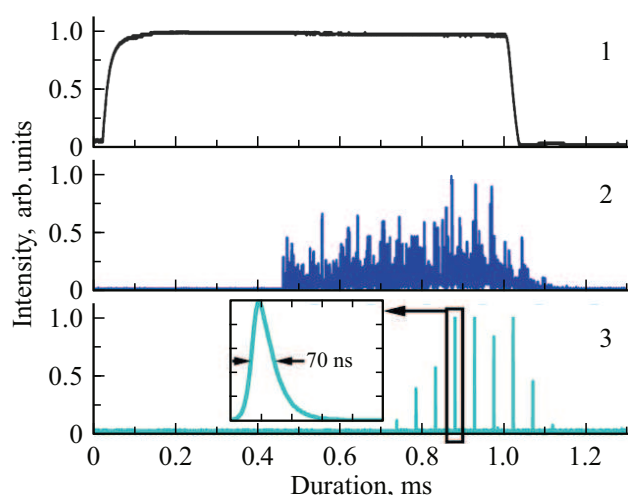


Рис. 4. Характерные временные формы импульсов: 1) тока накачки ЛДР, 2) свободной генерации (Tm^{3+} , Ho^{3+} :YLF), 3) модуляции добротности (Tm^{3+} , Ho^{3+} :YLF).

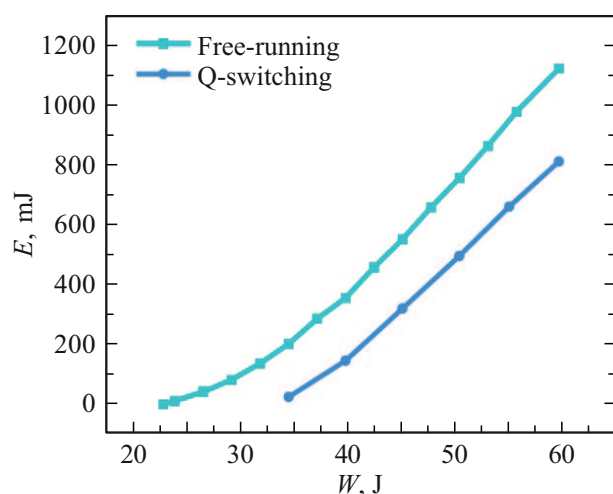


Рис. 5. Зависимость энергии генерации Tm^{3+} , Ho^{3+} :YLF от электрической энергии.

При длительности импульса накачки ~ 1 ms в режиме свободной генерации энергия импульсов для двух сред составила $\sim 1.1 \pm 0.03$ J. В режиме модуляции добротности формируется пуч импульсов с энергией $E_g = 200 \pm 7$ mJ (Tm^{3+} , Ho^{3+} :YSGG), $E_g = 800 \pm 7$ mJ (Tm^{3+} , Ho^{3+} :YLF). Для двух активных сред длительность каждого одиночного импульса в пуче была одинаковой и составляла ~ 70 ns (FWHM), так как имелась техническая возможность подстройки с помощью источника управления AOM. Энергия одиночного импульса составляла: $E_{g1} = 29.0 \pm 1.5$ mJ (Tm^{3+} , Ho^{3+} :YSGG), $E_{g1} = 115 \pm 4$ mJ (Tm^{3+} , Ho^{3+} :YLF). Расходимость излучения в режиме модуляции добротности составила: 1.7 mrad (Tm^{3+} , Ho^{3+} :YSGG) и 2.1 mrad (Tm^{3+} , Ho^{3+} :YLF). При использовании кристалла Tm^{3+} , Ho^{3+} :YLF была достигнута более высо-

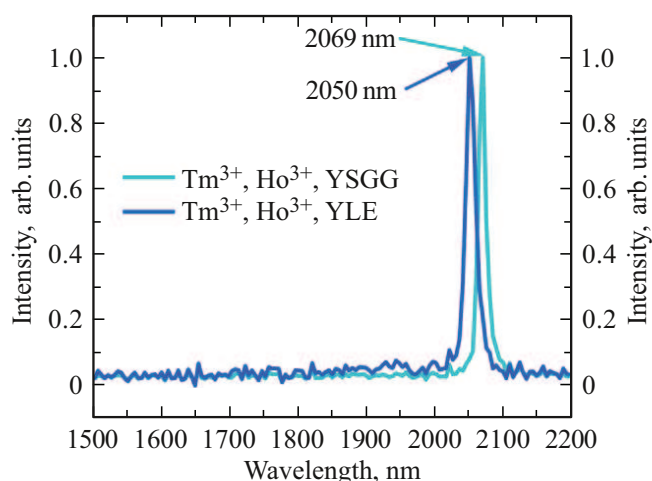


Рис. 6. Спектры излучения Tm^{3+} , Ho^{3+} :YSGG/YLF лазеров.

кая энергия в режиме модуляции добротности, чем при Tm^{3+} , Ho^{3+} :YSGG. При этом в режиме свободной генерации энергии одинаковые. Большое время жизни в кристаллах фторидов обеспечивает эффективное накопление инверсии населённости, в сравнении с кристаллами гранатов. В то же время кристалл YLF — одноосный кристалл, что позволяет селективно подавить усиление паразитных мод в отличие от кристалла YSGG. В то же время на различия генерации в режиме модуляции добротности, при схожих результатах в свободной генерации, мог повлиять процесс ап-конверсии, который становится существенным при модуляции добротности. Это требует дополнительных исследований.

С целью регистрации длины волны собран многоканальный спектрограф на основе неохлаждаемой пирозлектрической линейки HPL-256-500 (размер пикселя $42 \times 100 \mu\text{m}$) и спектрометра MS2004. Спектры излучения Tm^{3+} , Ho^{3+} :YSGG и Tm^{3+} , Ho^{3+} :YLF лазеров представлен на рис. 6.

Центральная длина волны Tm^{3+} , Ho^{3+} :YSGG $\sim 2.069 \mu\text{m}$, Tm^{3+} , Ho^{3+} :YLF $\sim 2.050 \mu\text{m}$. Отсутствие линии генерации Tm^{3+} вблизи $1.900 \mu\text{m}$ указывает на то, что генерация на ионах Ho^{3+} выступает доминирующим и кинетически более выгодным процессом.

Заключение

Исследованы параметры генерации компактных $2 \mu\text{m}$ лазерных источников на основе квантрона с импульсной поперечной диодной накачкой и кристаллов Tm^{3+} , Ho^{3+} :YSGG/YLF. В режиме свободной генерации энергия импульсов для двух сред составила 1.1 ± 0.03 J. В режиме активной акустооптической генерации в пуче ns импульсов получена энергия: 1) ~ 0.21 J для лазера Tm^{3+} , Ho^{3+} : YSGG и ~ 0.81 J для лазера Tm^{3+} , Ho^{3+} :YLF. Центральная

длина волны $\sim 2069 \pm 3.5 \text{ nm}$ (Tm^{3+} , Ho^{3+} : YSGG), $\sim 2050 \pm 3.5 \text{ nm}$ (Tm^{3+} , Ho^{3+} : YLF). Насколько нам известно, это первая реализация твердотельного лазера Tm^{3+} , Ho^{3+} : YSGG/YLF на основе квантрона с цугом наносекундных импульсов на АОМ (KGW) с подобными уровнями энергий.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] K. Scholle, S. Lamrini, P. Koopmann, P. Fuhrberg. *2 μm Laser Sources and Their Possible Applications* (IntechOpen, 2010).
- [2] T. Bilici, S. Mutlu, H. Kalaycioglu, A. Kurt, A. Sennaroglu, M. Gulsoy. *Lasers Med. Sci.*, **26**(5), 699 (2011). DOI: 10.1007/s10103-011-0915-0
- [3] M.J. Murphy, P. A. Torstensson. *Lasers Med Sci.*, **29**(3), 973 (2014). DOI: 10.1007/s10103-013-1445-8
- [4] O.L. Antipov, I.D. Eranov, R.I. Kositsyn. *Quantum Electronics*, **47**(7), 601 (2017). DOI: 10.1070/QEL16366
- [5] W. Dai, Y. Ding, T. Liu, Y. Zhao, J. Gao, C. Zhao. *Front Phys.*, **12**, 1390115 (2024). DOI: 10.3389/fphy.2024.1390115
- [6] Z. Hou, S. Yang, G. Zheng. *Front Phys.*, **12**, 1374090 (2024). DOI: 10.3389/fphy.2024.1374090
- [7] V. Petrov. Elsevier Ltd., **42**, 1 (2015). DOI: 10.1016/j.pquantelec.2015.04.001
- [8] B.I. Vasil'ev, O. Mannoun. *Quantum Electronics*, **36**(9), 801 (2006). DOI: 10.1070/QE2006v036n09ABEH006577
- [9] U.N. Singh, B.M. Walsh, J. Yu, M. Petros, M.J. Kavaya, N.P. Barnes. *Advanced Solid State Lasers, ATh3A.1*, (2014). DOI: 10.1364/ASSL.2014.ATh3A.1
- [10] J. Geng, Q. Wang, T. Luo, B. Case, S. Jiang, F. Amzajerdian, J. Yu. *Opt. Lett.*, **37**(18), 3795 (2012). DOI: 10.1364/OL.37.003795
- [11] V.L. Naumov, A.M. Onishchenko, A.S. Podstavkin, A.V. Shestakov. *Quantum Electronics*, **32**(3), 225 (2002). DOI: 10.1070/QE2002v032n03ABEH002167
- [12] A.I. Gribenyukov, S.M. Vatik, V.V. Demin, S.N. Podzyvalov, I.G. Polovtsev, N.N. Yudin. *Quantum Electronics*, **48**(7), 603 (2018). DOI: 10.1070/QEL16682
- [13] H. Huang, H. Hu, W. Weng, J. Deng, J. Huang, H. Zheng, W. Lin. *IEEE Photonics Technology Letters*, **33**(1), 47 (2021). DOI: 10.1109/LPT.2020.3040735
- [14] W. Weng, H. Huang, H. Wu, J. Li, Z. Zhang, Z. Lin, J. Deng, H. Ye, W. Lin. *Opt. Commun.*, **532**, 129248 (2023). DOI: 10.1016/j.optcom.2022.129248
- [15] X. Zhang, L. Yu, S. Zhang, L. Li, J. Zhao, J. Cui. *Opt. Express*, **21**(10), 12629 (2013). DOI: 10.1364/oe.21.012629
- [16] L. Huang, J. Zhang, Q. Zhang, G. Sun, R. Dou, X. Wang, D. Zhang, J. Gao, Yu. Sun, W. Liu, J. Luo. *Infrared Physics & Technology*, **143**, 105579 (2023). DOI: 10.21203/rs.3.rs-3555093/v1
- [17] B. Ayevi, Y. Morova, B. Morova, E. Damiano, M. Tonelli, A. Sennaroglu. *Optics Letters*, **49**(24), 6968 (2024). DOI: 10.1364/OL.544317
- [18] Y.-J. Song, B.-T. Lang, D. Zhu, N. Zong, Y. Bo, Q.-J. Peng. *Optics & Laser Technology*, **189**, 113128, (2025). DOI: 10.1016/j.optlastec.2025.113128
- [19] P. Liu, L. Jin, X. Liu, H. Huang, J. Zhang, D. Tang, D. Shen. *IEEE Photon. J.*, **8**(5), 1 (2016). DOI: 10.1109/JPHOT.2016.2608661
- [20] H. Zhang, D. Sun, J. Luo, Z. Fang, X. Zhao, M. Cheng, Q. Zhang, S. Yin. *Optical Materials*, **47**, 490 (2015). DOI: 10.1016/j.optmat.2015.06.026
- [21] J. Kratochvíl, P. Boháček, J. Šulc, M. Němec, M. Fibrich, H. Jelínková, B. Trunda, L. Havlá k, K. Jurek, M. Nikl. *High-Power, High-Energy, and High-Intensity Laser Technology*, **11033**, 54 (2019). DOI: 10.1117/12.2520906
- [22] Z. Pan, H. Yuan, K. Tang, X. Dai, H. Cai, Y. Wang, Y. Zhao, W. Chen, U. Griebner, V. Petrov, P. Loiko, J.L. Doualan, P. Camy, J.M. Serres, S. Slimi, M. Aguiló, F. Díaz, R.M. Solé, X. Mateos, E. Ben Salem, E. Dunina, A. Kornienko, L.A. Fomicheva. *Journal of Alloys and Compounds*, **853**, 157100 (2021). DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.157100
- [23] P. Loiko, R. Souldard, G. Brasse, J.L. Doualan, A. Braud, A. Tyazhev, A. Hideur, P. Camy. *Optics Letters*, **43**(18), 4341 (2018). DOI: 10.1364/ol.43.004341
- [24] V. Sudesh, K. Asai. *Journal of the Optical Society of America B*, **20**(9), 1829 (2003). DOI: 10.1364/JOSAB.20.001829
- [25] J.H. Wu, S.F. Du, Y. Bo, Z.C. Wang, Y. Gao, H.L. Wang, D.X. Liu, D.F. Cui, Q.J. Peng. *Appl. Phys. B*, **130**(4), 55 (2024). DOI: 10.1007/s00340-024-08192-2
- [26] Y. Zhao, Y. Li, S. Zhao, T. Li, P. Hu, J. Mao, K. Yang, T. Feng. *Optical Materials*, **129**, 112499 (2022). DOI: 10.1016/j.optmat.2022.112499
- [27] L. Li, X. Yang, L. Zhou, We. Xie, Y. Wang, Y. Shen, Y. Yang, W. Yang, W. Wang, Z. Lv, X. Duan, M. Chen. *Photonics Research*, **6**(6), 614 (2018). DOI: 10.1364/prj.6.000614
- [28] M.M. Mazur, L.I. Mazur, A.A. Sirotkin, A.V. Ryabinin, V.N. Shorin. *Quantum Electronics*, **50**(10), 957 (2020). DOI: 10.1070/QEL17375
- [29] S. Ding, H. Ren, H. Li, A. He. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, **32**(2), 1616 (2021). DOI: 10.1007/s10854-020-04930-2
- [30] A. Bensalah, Y. Guyot, M. Ito, A. Brenier, H. Sato, T. Fukuda, G. Boulon. *Optical Materials*, **26**, 375 (2004). DOI: 10.1016/j.optmat.2003.09.015
- [31] X. Zhang, Y. Ju, Y. Wang. *Optics Express*, **13**(11), 4056 (2005). DOI: 10.1364/OPEX.13.004056
- [32] Y. Li, J. Zhang, Zh. Jia, Y. Liu, H. Nie, B. Zhang, X. Tao. *Journal of Crystal Growth*, **601**, 126948 (2023). DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2022.126948
- [33] С. Э. Иванова, А. М. Ткачук, А. А. Мирзаева, F. Pelle. *Опт. и спектр.*, **105**(2), 250 (2008). [S.E. Ivanova, A.M. Tkachuk, A. Mirzaeva, F. Pellé. *Opt. Spectrosc.* **105**(2), 228 (2008).
- [34] D. Hu, J. Dong, J. Tian, W. Wang, Q. Wang, Y. Xue, X. Xu, J. Xu. *Journal of Luminescence*, **238**, 118243 (2021). DOI: 10.1016/j.jlumin.2021.118243
- [35] C. Li, Y. Zhang, X. Zhang, F. Zeng, T. Mauro, J. Liu. *Journal of Rare Earths*, **29**(6), 592 (2011). DOI: 10.1016/S1002-0721(10)60503-0
- [36] A.S. Yasukevich, G.E. Rachkovskaya, G.B. Zakharevich, E.E. Trusova, A.A. Kornienko, E.B. Dunina, V.E. Kisel, N.V. Kuleshov. *Journal of Luminescence*, **229**, 117667 (2021). DOI: 10.1016/j.jlumin.2020.117667

- [37] S. Mi, J. Li, D. Wei, K. Yang, C. Yang, B. Yao, X. Duan, T. Dai. Optics & Laser Technology, **138**, 106847 (2021).
DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106847
- [38] S.A. Payne, L.L. Chase, L.K. Smith, W.L. Kway, W.F. Krupke. Quantum Electronics, **28**(11), 2619 (1992).
DOI: 10.1109/3.161321
- [39] В.Х. Багдасаров, С.А. Бельков, С.Г. Гаранин, С.В. Гарнов, Н.А. Кудашева, Б.Д. Овчаренко, В.Б. Цветков. Оптическая усилительная головка с диодной накачкой, патент России № 184832. 01.02.2018. Бюл. № 32.