

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХМИКРОННЫХ ЛАЗЕРОВ НА КРИСТАЛЛАХ YAG И YSGG, АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ $\text{Ho}^{3+}$

*В. Г. Иванова, П. Г. Зверев, А. А. Сироткин*

Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской Академии наук

## 1. Введение

В настоящее время остается актуальной проблема поиска активных сред твердотельных лазеров, работающих в новых спектральных областях. Лазерное излучение с длиной волны около 2 мкм представляет интерес, так оно сильно поглощается водой и может рассматриваться в качестве «безопасного для глаз» излучения. Оно поглощается в объеме глазного яблока и не доходит до фоточувствительной сетчатки глаза. Лазеры, генерирующие в области 2 мкм, используются в медицине, при лидарном зондировании атмосферы [1–3]. Излучение с длиной волны около 2 мкм может быть эффективно преобразовано в средний ИК диапазон (3–8 мкм) с помощью нелинейно оптических кристаллов, обладающих высокой квадратичной нелинейной восприимчивостью [4]. Одним из путей создания двухмикронных лазеров является использование кристаллов и стекол, активированных ионами  $\text{Ho}^{3+}$ .

В настоящей работе исследовались двухмикронные лазеры на кристаллах YAG и YSGG, активированных ионами  $\text{Ho}^{3+}$ , работающие на переходе  ${}^5\text{I}_7 \rightarrow {}^5\text{I}_8$ . Для получения лазерной генерации на кристалле YAG: $\text{Ho}^{3+}$  использовался волоконный тулиевый лазер. Ионы гольмия возбуждались излучением с длиной волны 1,9 мкм на верхние штарковские подуровни уровня  ${}^5\text{I}_7$ . Затем происходила релаксация возбуждения на нижние подуровни и была получена лазерная генерация в спектральной области 2,0–2,15 мкм. При таком возбуждении гольмиевый лазер работает по квази четырехуровневой схеме и поскольку разница в энергии между фотонами накачки и генерации мала, получается высокая энергетическая эффективность такого лазера.

Генерация лазера на кристалле YSGG: $\text{Cr}^{3+}\text{Yb}^{3+}\text{Ho}^{3+}$  нами исследовалась при ламповом возбуждении. Поглощение излучения ламп накачки ионами  $\text{Ho}^{3+}$  довольно слабое, поэтому при ламповой накачке используются гольмиевые кристаллы, дополнительно активированные ионами  $\text{Cr}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{3+}$ . Ионы  $\text{Cr}^{3+}$ , имеющие широкие полосы поглощения, обеспечивают эффективное поглощение излучения ламп накачки, передача возбуждения идет по схеме  $\text{Cr}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Ho}^{3+}$ . Эффективность такой передачи энергии может достигать 99 % [5].

Для пассивной модуляции добротности двухмикронных лазеров используются электро-, акустооптические и пассивные затворы. В настоящей работе использовался пассивный затвор – кристалл ZnSe, активированный ионами  $\text{Cr}^{2+}$ . Спектр поглощения ионов  $\text{Cr}^{2+}$  в ZnSe простирается от 1,4 до 2,2 мкм и перекрывает область генерации двухмикронных гольмиевых лазеров [6]. Целью настоящей работы было исследование пассивной модуляции добротности гольмиевых лазеров YAG: $\text{Ho}^{3+}$  и YSGG: $\text{Cr}^{3+}\text{Yb}^{3+}\text{Ho}^{3+}$  с помощью кристалла ZnSe: $\text{Cr}^{2+}$ .

## 2. Лазер на кристалле YAG: $\text{Ho}^{3+}$ с пассивной модуляцией добротности ZnSe: $\text{Cr}^{2+}$

Для исследования генерации лазера YAG: $\text{Ho}^{3+}$  с пассивной модуляцией добротности кристаллом ZnSe: $\text{Cr}^{2+}$  была собрана экспериментальная установка, схема которой показана на рис. 1. Накачка YAG: $\text{Ho}^{3+}$  лазера осуществлялась с помощью непрерывного тулиевого волоконного лазера IPG TLM-30 с длиной волны генерации 1984 нм. Выходная мощность лазера не повышалась выше 25 Вт. Излучение лазера коллимировалось двухлинзовым телескопом и фокусировалось в кристалл YAG: $\text{Ho}^{3+}$  длиной 35 мм с просветленными плоскопараллельными торцами. Поглощение излучения накачки в кристалле YAG: $\text{Ho}^{3+}$  составляло 72 %. Для стабилизации температуры активный элемент был обернут в индиевую фольгу и установлен в медный держатель, охлаждаемый проточной водой

с температурой  $18 \pm 1$  °С. Резонатор YAG:Ho<sup>3+</sup> лазера состоял из двух зеркал: входного, плоского с отражением  $R_{2090-2150 \text{ нм}} > 99,9$  % и пропусканием 93 % на длине волны лазера накачки, и сферическим зеркалом с радиусом кривизны 100 мм и  $R_{2090-2150 \text{ нм}} = 99,2$  %. Расстояние между зеркалами было 90 мм. Для измерения мощности лазерной генерации использовался калориметр Coherent Ultima с приемной головкой LM – 10 НТД.

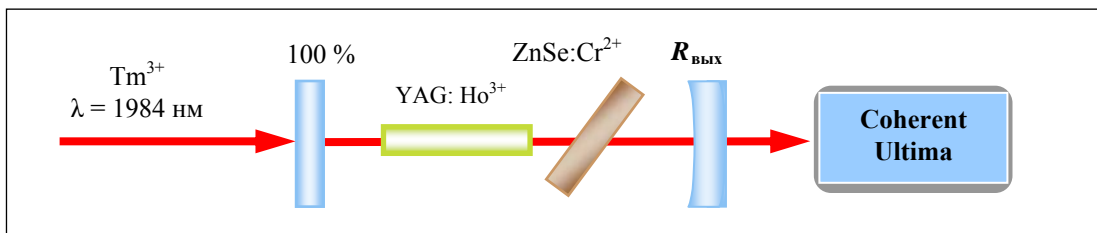


Рис. 1. Схема установки лазера YAG: Ho<sup>3+</sup>

На рис. 2 показана зависимость выходной мощности YAG:Ho<sup>3+</sup> лазера от мощности лазера накачки, падающей на входное зеркало, в режиме свободной генерации. Видно, что при накачке 20,7 Вт лазер дает 5 Вт излучения с КПД около 25 %. Дифференциальный КПД YAG: Ho<sup>3+</sup> лазера при максимальных накачках достигал 36 %.

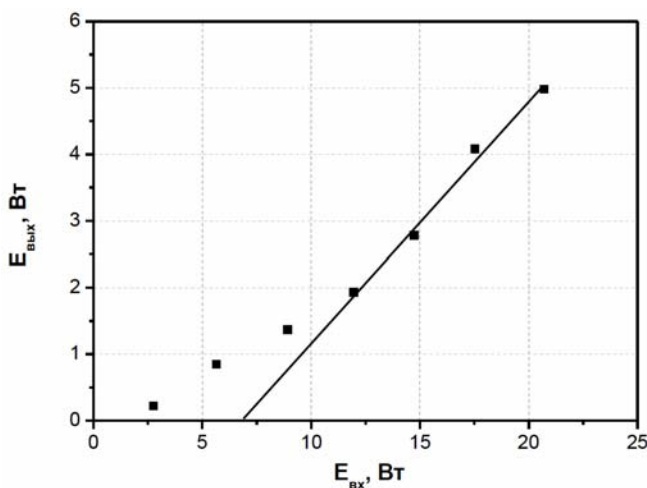


Рис. 2. Зависимость энергии генерации от энергии накачки в режиме свободной генерации

Спектр генерации YAG: Ho<sup>3+</sup> лазера измерялся с помощью решеточного спектрометра с линейкой Hamamatsu, работающей в спектральной области  $1 \div 2,3$  мкм. Разрешение спектральной системы было 5 нм на пиксель. Спектр генерации YAG:Ho<sup>3+</sup> лазера показан на рис. 3. Видно, что максимум длины волны генерации соответствует длине волны 2,12 мкм, что хорошо согласуется с известными литературными данными [7].

Для исследования режима пассивной модуляции добротности лазера на кристалле YAG:Ho<sup>3+</sup> использовалась плоскопараллельная пластинка из кристалла ZnSe, активированная ионами Cr<sup>2+</sup>, толщиной 4 мм, которая устанавливалась перед выходным зеркалом. Спектр ее поглощения представлен на рис. 4. Видно, что начальное пропускание пластины (без учета френелевских потерь) на длине волны 2,1 мкм составляло 84 %. Показатель преломления кристалл ZnSe на длине волны  $\lambda = 2,1$  мкм равен 2,4460, что приводит к высоким френелевским потерям при нормальном падении. Чтобы их снизить, пассивный затвор ZnSe:Cr<sup>2+</sup> устанавливался под углом Брюстера 67,8° к оси резонатора.

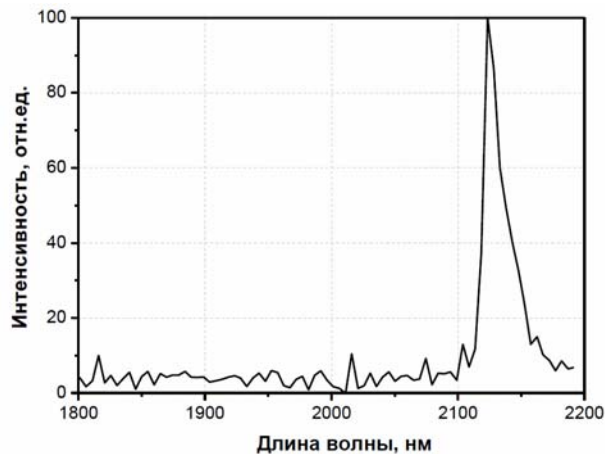


Рис. 3. Спектр генерации YAG: Ho<sup>3+</sup> – лазера в режиме свободной генерации

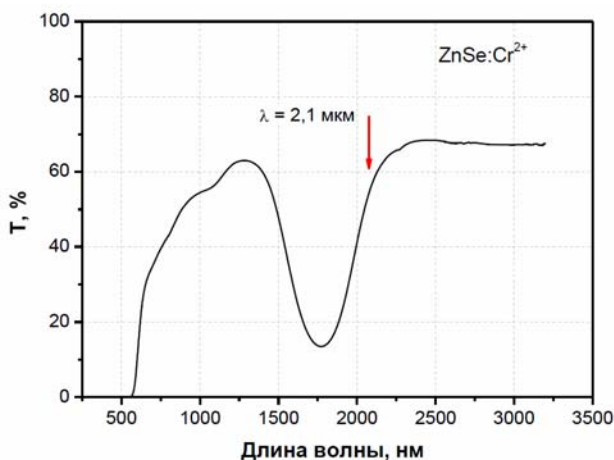


Рис. 4. Спектр пропускания пассивного затвора на кристалле ZnSe:Cr<sup>2+</sup>

Зависимость мощности YAG:Ho<sup>3+</sup> лазера в режиме модулированной добротности представлена на рис. 5. Видно, что мощность лазера достигает 320 мВт при накачке 20,7 Вт. При этом КПД лазера составляет около 1,6%. Снижение КПД лазера по сравнению с режимом свободной генерации связано с потерями на просветление пассивного затвора, а также тем, что в этом случае лазер давал поляризованное излучение, в отличие от неполяризованного в режиме свободной генерации.

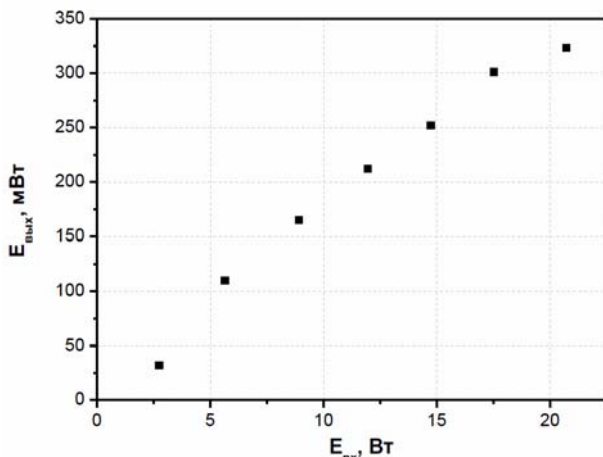


Рис. 5. Зависимость мощности генерации YAG: Ho<sup>3+</sup> – лазера с пассивной модуляцией добротности кристаллом ZnSe:Cr<sup>2+</sup> от мощности накачки

Для измерения временных характеристик лазерного излучения использовался фотодиод PVM-10.6 (Vigo system), с временным разрешением  $\tau \sim 1$  нс, и осциллографа GW Instek GDS-73154. На рис. 6 представлены осциллограммы отдельного импульса и гребенки импульсов YAG:Ho<sup>3+</sup> – лазера в режиме пассивной модуляции добротности при энергии накачки 2,7 Вт. Длительность импульсов генерации слабо изменялась в зависимости от мощности накачки и составляла  $310 \pm 25$  нс. Частота следования импульсов линейно зависела от мощности накачки и увеличивалась от 8,3 кГц для 2,7 Вт до 90 кГц для 20,7 Вт. Энергия отдельных импульсов генерации составляла  $3,5 \pm 0,5$  мкДж. Пиковая мощность в импульсе составляла около 11 Вт.

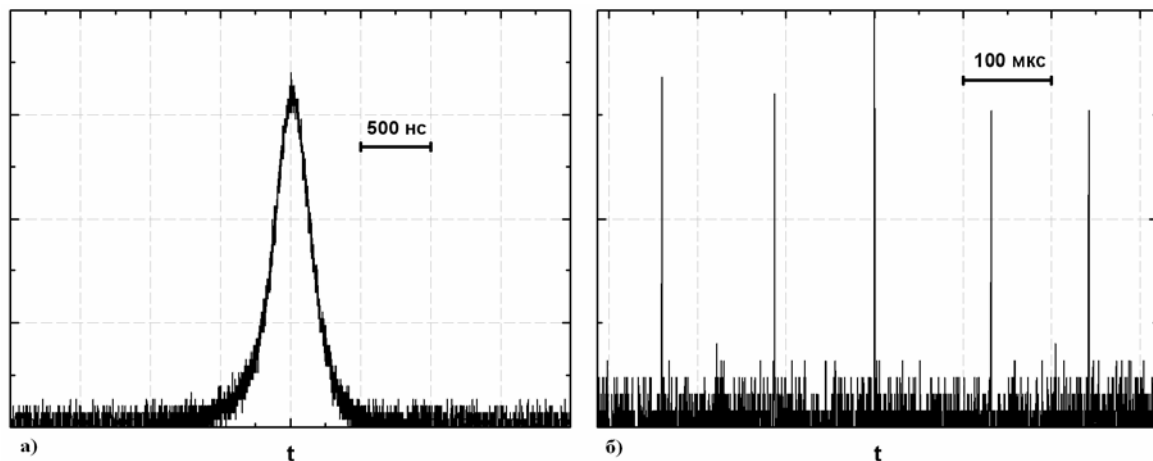


Рис. 6. Осциллограммы отдельных импульсов (а) и гребенки импульсов (б) генерации YAG:Ho<sup>3+</sup> лазера с пассивной модуляцией добротности ZnSe:Cr<sup>2+</sup> при мощности накачки 2,75 Вт

### 3. Лазер на кристалле YSGG:Cr<sup>3+</sup>Yb<sup>3+</sup>Ho<sup>3+</sup> с пассивной модуляцией добротности ZnSe:Cr<sup>2+</sup>

Для исследования пассивной модуляции добротности на кристалле ZnSe:Cr<sup>2+</sup> был создан лазер на базе кристалла YSGG:Cr<sup>3+</sup>Yb<sup>3+</sup>Ho<sup>3+</sup>. Схема установки изображена на рисунке 7. В работе использовался активный элемент длиной 100 мм и диаметром 4 мм из кристалла YSGG:Cr<sup>3+</sup>Yb<sup>3+</sup>Ho<sup>3+</sup>, выращенного в ИОФ РАН. Концентрация ионов Ho<sup>3+</sup> была  $5 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>. Элемент был закреплен в цанги и установлен в квантроне с диффузным отражателем и импульсной лампой ИНП 6/90А-1. Использовался блок питания 704-TS с длительностью разряда 500 мкс, энергией импульсов до 200 Дж и частотой следования импульсов 5 Гц. Охлаждение квантрона и активного элемента осуществлялось дистиллированной водой. Резонатор лазера длиной 280 мм был образован двумя плоскими зеркалами: глухим с коэффициентом отражения около 100 % и выходными зеркалами с коэффициентом отражения на длине волны 2,1 мкм равными  $R(1) = 83$  %,  $R(2) = 62$  % и  $R(3) = 35$  %. Энергия лазерной генерации измерялась измерителем мощности с помощью Ophir Nova II с чувствительным элементом PE9-C и ИМО-2М.

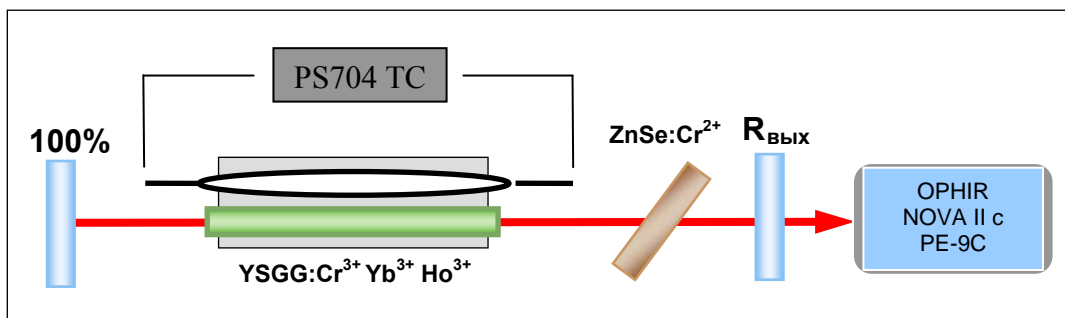


Рис. 7. Схема установки лазера YSGG:Cr<sup>3+</sup>Yb<sup>3+</sup>Ho<sup>3+</sup>

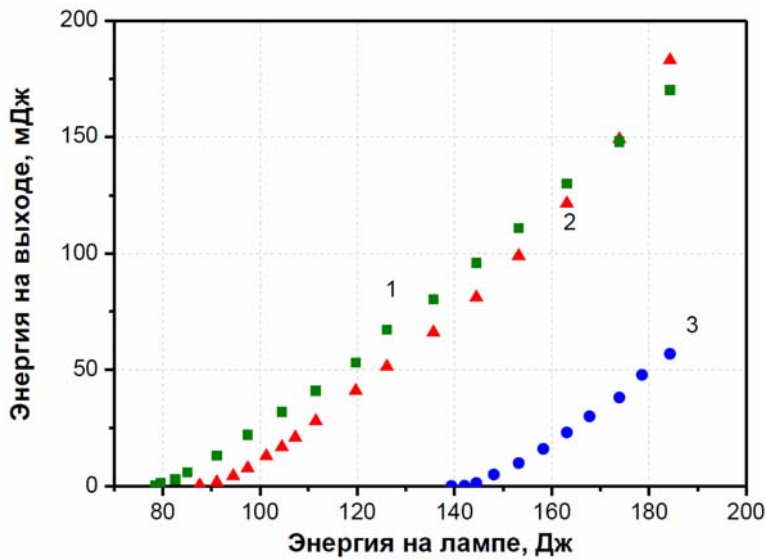


Рис. 8. Зависимость энергии генерации YSGG:Cr<sup>3+</sup>Yb<sup>3+</sup>Ho<sup>3+</sup> лазера с ламповой накачкой для трех выходных зеркал  $R(1) = 83\%$ ,  $R(2) = 62\%$  и  $R(3) = 35\%$  в режиме свободной генерации

На рис. 8 представлены зависимости энергии генерации YSGG:Cr<sup>3+</sup>Yb<sup>3+</sup>Ho<sup>3+</sup> лазера от энергии накачки для выходных зеркал с коэффициентом отражения 83 %, 62 % и 35 %. Видно, что порог генерации лазера увеличивался при использовании более прозрачных выходных зеркал. Максимальная энергия генерации была получена при использовании зеркала  $R_{2,1\text{MKM}} = 62\%$  и составила 183 мДж при накачке 184 Дж, КПД лазер составлял 0,1 %.

Длина волны генерации лазера определялась с помощью полихроматора, разрешение которого составляло 1,3 нм. На рис. 9 представлены спектры генерации YSGG:Cr<sup>3+</sup>Yb<sup>3+</sup>Ho<sup>3+</sup> лазера в режиме свободной генерации для двух выходных зеркал  $R_{2,1\text{MKM}} = 35\%$ ,  $R_{2,1\text{MKM}} = 77\%$ , а так же спектры отражения этих зеркал.

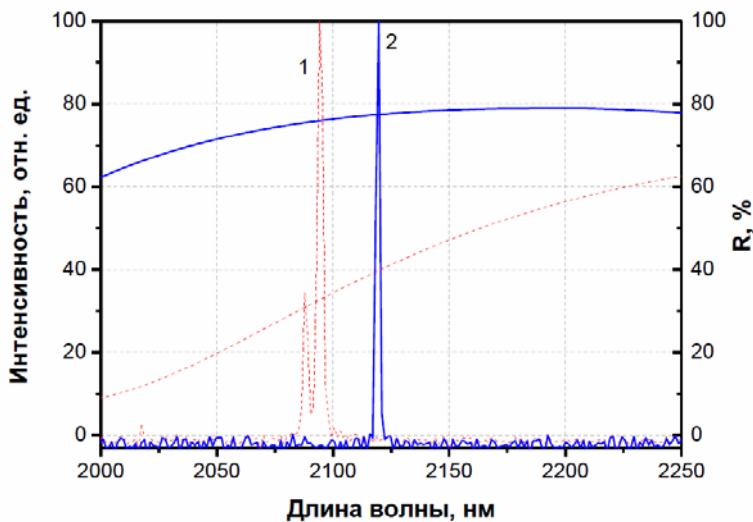


Рис. 9. Сравнение спектров генерации YSGG:Cr<sup>3+</sup>Yb<sup>3+</sup>Ho<sup>3+</sup> – лазера в режиме свободной генерации

Сравнивая спектры генерации видно, что при увеличении коэффициента отражения выходного зеркала, длина волны генерации сдвигается в более длинноволновую область.

Для исследования лазера с пассивной модуляцией добротности режима использовался кристалл  $\text{ZnSe:Cr}^{2+}$ , установленный под углом Брюстера перед выходным зеркалом. Лазерная генерация в этом случае была получена со всеми выходными зеркалами. Длительность импульсов генерации для выходных зеркал  $R_{2,1\text{мкм}} = 35\%$  и  $R_{2,1\text{мкм}} = 62\%$  составила 37 нс и 50 нс, соответственно. Видно, что использование более прозрачного выходного зеркала приводит к укорочению импульса генерации. Энергия импульса генерации с зеркалом  $R_{2,1\text{мкм}} = 35\%$  составила 4,3 мДж при накачке на лампу 233 Дж, что давало пиковую мощность двухмикронной лазерной генерации 116 кВт.

#### 4. Заключение

В данной работе были исследованы и сравниваются генерационные характеристики двухмикронных лазеров на кристаллах  $\text{YAG:Ho}^{3+}$  с накачкой волоконным туллиевым лазером и  $\text{YSGG:Cr}^{3+}\text{Yb}^{3+}\text{Ho}^{3+}$  с ламповой накачкой с пассивной модуляцией добротности кристаллом  $\text{ZnSe:Cr}^{2+}$ . Эксперименты показали, что для получения квазинепрерывного двухмикронного излучения с высокой средней мощности целесообразно использовать  $\text{YAG:Ho}^{3+}$  с накачкой непрерывным туллиевым лазером. При накачке 20,7 Вт была получена гребенка импульсов длительностью 310 нс с частотой следования импульсов до 90 кГц и средней мощностью 320 мВт, причем пиковая мощность в импульсе составляла 11 Вт. Для получения высокой пиковой мощности целесообразно использовать  $\text{YSGG:Cr}^{3+}\text{Yb}^{3+}\text{Ho}^{3+}$  с накачкой импульсными лампами. Для энергии накачки 149 Дж получены одиночные импульсы лазерного излучения с энергией 4,3 мДж длительностью около 37 нс, что давало пиковую мощность 116 кВт. Установлено, что кристалл  $\text{ZnSe:Cr}^{2+}$  может работать в качестве пассивного затвора в лазерах с высокой средней и высокой пиковой мощностью.

#### 5. Благодарности

Авторы выражают благодарность Гаврищуку Е. М. (ИХВВ РАН) за предоставление кристалла  $\text{ZnSe:Cr}^{2+}$ . Авторы благодарят Российскому фонду фундаментальных исследований (грант № 15-02-05932) за частичную финансовую поддержку данной работы.

#### Список литературы

1. Scholle K., S. Lamrini, Koopmann P., Fuhrberg P. 2  $\mu\text{m}$  Laser Sources and Their Possible Applications. *Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics* / ed. Bishnu Pal, INTECH, 2010. p. 674.
2. Wu C.T., Ju Y.L., Chen F., Jin G.Y. Research on 2  $\mu\text{m}$  solid state lasers // *Laser Physics*, 2012. 42, 635-647.
3. Захаров Н. Г., Антипов О. Л., Савикин А. П., Шарков В. В., Еремейкин О. Н., Фролов Ю. Н., Мищенко Г. М., Великанов С. Д. Эффективная генерация на длине волны 1908 нм в лазере на кристалле  $\text{Tm:YLF}$  с диодной накачкой // *Квантовая электроника*, 2009. 39, 410–414.
4. Petrov V. Frequency down-conversion of solid-state laser sources to the mid-infrared spectral range using non-oxide nonlinear crystals // *Progress in Quantum Electronics*, 2015. 42, 1-106.
5. Денисов А. Л., Загуменный А. И., Лутц Г. Б., Осико В. В., Семенов С. Г., Умысов А. Ф. Кристалл  $\text{YSGG:Cr}^{3+},\text{Ho}^{3+}$  - перспективный материал для генерации по каскадной схеме // *Квантовая электроника*, 1992. 19, 842-844.
6. Mirov S., V. Fedorov, Moskalev I., Martyshkin D., and Kim C. Progress in  $\text{Cr}^{2+}$  and  $\text{Fe}^{2+}$  doped II-VI materials and lasers // *Optical Materials Express*, 2011. 1, 898-901.
7. Захаров Н. Г., Антипов О. Л., Шарков В. В., Савикин А. П. Эффективная генерация на длине волны 2,1 мкм в лазере на кристалле  $\text{Ho:YAG}$  с накачкой излучением  $\text{Tm:YLF}$  лазера // *Квантовая электроника*, 2010. 40, 98–100.