

УДК 621.373.862.038.825.2

**А.А. Ляпин¹, П.А. Рябочкина¹, А.Н. Чабушкин¹,
С.Н. Ушаков², П.П. Федоров²**

¹ Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск, Россия

² Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

ВИЗУАЛИЗАТОР ДВУХМИКРОННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ $\text{CaF}_2:\text{Ho}$

В настоящей работе исследовалась возможность использования монокристаллов и керамики $\text{CaF}_2:\text{Ho}$ для визуализации двухмикронного лазерного излучения в видимый спектральный диапазон (635–670 нм). Также произведена оценка энергетической эффективности преобразования кристаллом $\text{CaF}_2:\text{Ho}$ двухмикронного лазерного излучения в свечение красного диапазона спектра 620–680 нм.

Ключевые слова: визуализатор, монокристалл, керамика, CaF_2 , гольмий.

**A.A. Liapin¹, P.A. Riabochkina¹, A.N. Chabushkin¹,
S.N. Ushakov², P.P. Fedorov²**

¹ Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russian Federation

² A.M. Prokhorov General Physics Institute of Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

VISUALISER OF TWO-MICRON LASER RADIATION BASED ON $\text{CaF}_2:\text{Ho}$

In the present paper we investigated the possibility of using single crystals and ceramics $\text{CaF}_2:\text{Ho}$ to visualize two-micron laser radiation in the visible spectral range (635–670 nm). Also energy efficiency of the conversion of two-micron laser radiation to glow in red spectral range 620–680 nm by $\text{CaF}_2:\text{Ho}$ crystal was estimated.

Keywords: visualizer, single crystal, ceramics, CaF_2 , holmium.

1. Введение

Визуализаторы лазерного излучения являются необходимым элементом для лазеров, генерирующих излучение, находящееся в спектральном диапазоне за пределами видимого излучения. Коммерческие визуализаторы лазерного излучения, существующие в настоящее время, обеспечивают диапазон визуализации до 1700 нм (таблица).

Коммерческие модели визуализаторов

Компания ¹	Модель визуализатора	Диапазон поглощения, нм
Thorlabs Inc	VRC2	800–1700
ООО «Полироник»	FID-C, FID-CD	760–1600
НТЦ ООО «Кобра-Оптикс»	IRV-R	1470–1600
ROITHNER LASERTECHNIK GmbH	ISC-4-ALL	800–1700
Newport	F-IRC2-F	700–1700

На сегодняшний день активно разрабатываются лазеры (твердотельные, волоконные, полупроводниковые), генерирующие излучение в двухмикронном диапазоне спектра. Двухмикронные лазеры представляют интерес для медицины и разработки лидарных систем [1–4]. В соответствии с этим актуальной является задача визуализации излучения в видимый свет ИК-излучения в спектральном диапазоне выше 1,7 мкм.

Цель настоящей работы – выявление возможности использования монокристаллов и керамики $\text{CaF}_2:\text{Ho}$ для визуализации лазерного излучения в ближнем ИК-диапазоне спектра 1800–2150 нм в видимый спектральный диапазон (635–670 нм).

2. Методика эксперимента

Монокристаллы $\text{CaF}_2-\text{HoF}_3$ были выращены методом вертикальной направленной кристаллизации (метод Бриджмена) в вакуумированной камере в графитовых тиглях с графитовым нагревателем сопротивления и графитовыми тепловыми экранами [5].

Спектры поглощения ионов Ho^{3+} в кристалле $\text{CaF}_2:\text{Ho}$ были зарегистрированы с помощью сканирующего двулучевого спектрофотометра с двойным монохроматором Perkin Elmer Lambda 950.

Для возбуждения на уровень $^5\text{I}_7$ ионов Ho^{3+} в кристаллах $\text{CaF}_2:\text{Ho}$ использовался непрерывный твердотельный лазер на кристалле $\text{LiYF}_4:\text{Tm}$ с длиной волны излучения 1912 нм. Диаметр пучка падающего лазерного излучения, сфокусированного на кристалл, составил 230 мкм. Антистоксовая люминесценция на переходе $^5\text{F}_5 \rightarrow ^5\text{I}_8$ ионов Ho^{3+} в кристалле $\text{CaF}_2:\text{Ho}$, возникающая при возбуждении излучением лазером $\text{LiYF}_4:\text{Tm}$, регистрировалась с использованием автоматизированной установки на базе монохроматора МДР-23. Синхронное детектирование сигнала при регистрации спектров люминесценции осуще-

¹ См. официальные сайты компаний: www.thorlabs.de; www.polironik.ru; www.scitc.ru; www.roithner-laser.com; www.newport.com

ствлялось с помощью синхронного усилителя SR-810. В качестве приемника излучения использовался ФЭУ-79. Измерения проводились при комнатной температуре.

Спектральная плотность мощности излучения люминесценции в красном диапазоне спектра (620–680 нм) измерялась с использованием интегрирующей сферы OL IS-670-LED и спектрометра OL-770 UV/VIS (Gooch&Housego). Мощность двухмикронного излучения, поглощенного в кристалле CaF₂:Ho, определялась с помощью измерителя мощности 11 PMK-30H-H5 (Standa).

3. Экспериментальные результаты

На рис. 1 представлен спектр поглощения кристаллов CaF₂:Ho для перехода ⁵I₈→⁵I₇ ионов Ho³⁺. Регистрация антистоксовой люминесценции осуществлялась возбуждением на уровень ⁵I₇ ионов Ho³⁺ излучением LiYF₄:Tm лазера на длине волны 1912 нм. На рис. 1 длина волны возбуждения показана стрелкой.

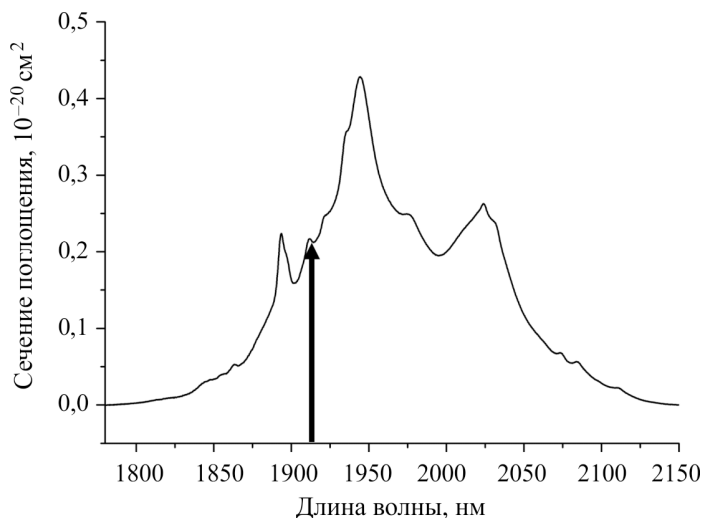


Рис. 1. Спектр поглощения кристаллов CaF₂:Ho

Спектр антистоксовой люминесценции, соответствующий переходу ⁵F₅→⁵I₈, зарегистрированный при данном способе возбуждения, показан на рис. 2.

Наличие для кристаллов CaF₂:Ho интенсивной антистоксовой люминесценции в области 630–670 нм позволило нам предложить способ визуализации ИК-излучения в двухмикронной области спектра. Возможность визуализации двухмикронного излучения продемонстри-

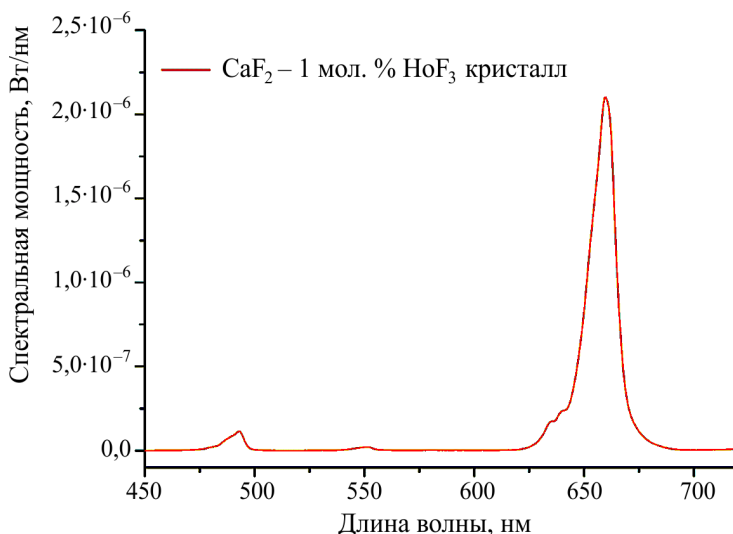


Рис. 2. Спектральная плотность мощности $P_{^5F_3 \rightarrow ^5I_8}$ антистоксовой люминесценции ионов Ho^{3+} для монокристалла $\text{CaF}_2:\text{Ho}$ ($C_{\text{Ho}} = 1$ мол. %) в диапазоне 450–725 нм

рована нами с помощью транспаранта, представляющего собой алюминиевую подложку, на которую с помощью связующего нанесен порошок из размолотого кристалла $\text{CaF}_2:\text{Ho}$. При освещении данного транспаранта излучением $\text{LiYF}_4:\text{Tm}$ лазером наблюдалось пятно ярко-красного цвета. Фотография установки, с помощью которой продемонстрирована возможность визуализации излучения $\text{LiYF}_4:\text{Tm}$ лазера, показана на рис. 3. Предложенный способ визуализации позволяет наблюдать без разрушения экрана двухмикронное излучение с плотностью мощности ИК-излучения от $0,4 \text{ Вт/см}^2$ до 340 кВт/см^2 .

В настоящей работе проведена оценка энергетической эффективности преобразования кристаллом CaF_2 -1 мол. % HoF_3 излучения лазера $\text{LiYF}_4:\text{Tm}$ в свечение красного диапазона спектра 620–680 нм.

Энергетическая эффективность преобразования монокристаллом и керамикой $\text{CaF}_2:\text{Ho}$ двухмикронного лазерного излучения в свечение красного диапазона спектра 620–680 нм определялась по формуле

$$\eta = \frac{P_{^5F_3 \rightarrow ^5I_8}}{P_{^5I_8 \rightarrow ^5I_7}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где $P_{^5F_3 \rightarrow ^5I_8}$ – плотность мощности излучения люминесценции в красном диапазоне спектра (620–680 нм); $P_{^5I_8 \rightarrow ^5I_7}$ – мощность излучения, поглощенного в исследованных образцах.

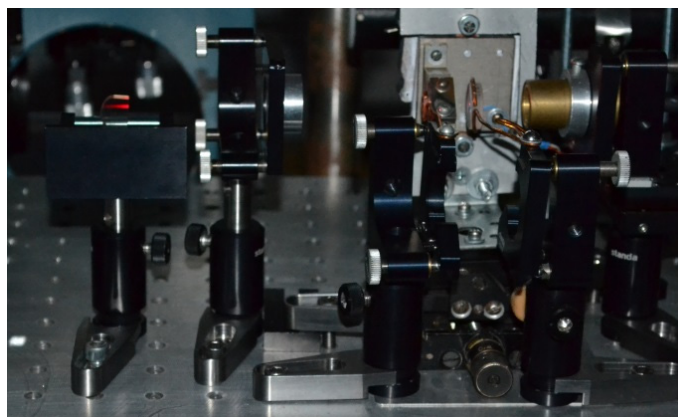


Рис. 3. Визуализатор двухмикронного лазерного излучения с использованием объемного образца монокристалла $\text{CaF}_2:\text{Ho}$

Излучение двухмикронного лазера YLF4:Tm фокусировалось на образец кристалла CaF_2 -1 мол. % HoF_3 , расположенного в интегрирующей сфере OL IS-670-LED (см. рис. 3). Спектральная плотность мощности антистоксовой люминесценции ионов Ho^{3+} в диапазоне 620–680 нм измерялась с помощью спектрорадиометра OL-770 UV/VIS и составила $2 \cdot 10^{-5}$ Вт (рис. 4). Мощность излучения, поглощенного в кристалле, определялась с помощью измерителя мощности 11 РМК-30Н-Н5 и составила 0,1 Вт. Энергетическая эффективность преобразования кристаллом CaF_2 -1 мол. % HoF_3 двухмикронного лазерного излучения в свечение красного диапазона спектра 620–680 нм не превышает 0,02 %.

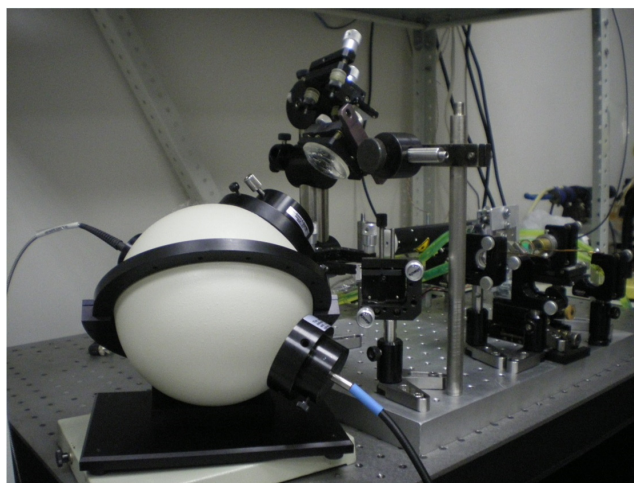


Рис. 4. Внешний вид установки для определения эффективности преобразования кристаллом $\text{CaF}_2:\text{Ho}^{3+}$ двухмикронного излучения в излучение видимого диапазона спектра (620–680 нм)

Предложенный нами способ визуализации двухмикронного излучения апробирован учеными (руководитель группы О.В. Палашов) Института прикладной физики РАН (г. Н.Новгород). В ходе эксперимента ими было установлено, что визуализатор на основе CaF₂:Ho эффективно преобразует излучение с длиной волны 2064 нм в красное свечение. В качестве источника излучения в данном случае использовался твердотельный лазер с полупроводниковой накачкой на основе керамики Lu₂O₃:Tm.

4. Заключение

В настоящей работе показано, что с использованием CaF₂:Ho можно обеспечить простой, безинерционный способ визуализации ИК-излучения в широком диапазоне плотности мощности ИК-излучения от 0,4 Вт/см² до 340 кВт/см² и в диапазоне длин волн ИК-излучения от 1800 до 2150 нм при высоком контрасте наблюдаемой картины распределения ИК-излучения и высокой разрешающей способности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания Министерства образования и науки РФ (проект №. 3.384.2014/К и проект № 07080210059611).

Список литературы

1. Scholle K., Lamrini S., Koopmann P., Fuhberg P. 2 μm Laser Sources and Their Possible Applications // INTECH. Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics. – 2010. – February 1. DOI: 10.5772/39538.
2. Генерация суперконтинуума в оптических волокнах, легированных ионами тулия / А.С. Курков, В.А. Камынин, В.Б. Цветков, Я.Э. Садовникова, А.В. Маракулин, Л.А. Минашина // Квантовая электроника. – 2012. – Т. 42, № 9. – С. 778–780.
3. Antipov S.O., Kurkov A.S. A holmium-doped fiber amplifier at 2.1 μm // Laser Physics Letters. – 2013. – Vol. 10, no. 12. DOI:10.1088/16122011/10/12/125106.
4. Spectroscopic, luminescent and laser properties of nanostructured CaF₂:Tm materials / A.A. Lyapin, P.P. Fedorov, E.A. Garibin, A.V. Malov, V.V. Osiko, P.A. Ryabochkina, S.N. Ushakov // Optical Materials. – 2013. – Vol. 35, № 10. – P. 1859–1864.

5. Fedorov P.P., Osiko V.V. Crystal Growth of Fluorides // In: Bulk Crystal Growth of Electronic, Optical and Optoelectronic Materials / Ed. P.Capper. Wiley Series in Materials for Electronic and Optoelectronic Applications. – John Wiley&Son, Ltd., 2005. – P. 339–356.

6. Визуализатор двухмикронного лазерного излучения на основе кристаллов CaF₂:Ho / А.А. Ляпин, П.А. Рябочкина, С.Н. Ушаков, П.П. Федоров // Квантовая электроника. – 2014. – Т. 44, № 6. – С. 602–605.

References

1. Scholle K., Lamrini S., Koopmann P., Fuhberg P. 2 μm Laser Sources and Their Possible Applications. *INTECH. Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics*, 2010, February 1. DOI: 10.5772/39538.

2. Kurkov A.S., Kamynin V.A., Tsvetkov V.B., Sadovnikova Ia.E., Marakulin A.V., Minashina L.A. Generatsiia superkontinuuma v opticheskikh voloknakh, legirovannykh ionami tuliia [Supercontinuum generation in thulium-doped fibres]. *Kvantovaya elektronika*, 2012, vol. 42, no. 9, pp. 778-780.

3. Antipov S.O., Kurkov A.S. A holmium-doped fiber amplifier at 2.1 μm. *Laser Physics Letters*, 2013, vol. 10, no. 12. DOI: 10.1088/16122011/10/12/125106.

4. Lyapin A.A., Fedorov P.P., Garibin E.A, Malov A.V., Osiko V.V., Ryabochkina P.A., Ushakov S.N. Spectroscopic, luminescent and laser properties of nanostructured CaF₂:Tm materials. *Optical Materials*, 2013, vol. 35, no. 10, pp. 1859-1864.

5. Fedorov P.P., Osiko V.V. Crystal Growth of Fluorides. *Bulk Crystal Growth of Electronic, Optical and Optoelectronic Materials*. Ed. P.Capper. Wiley Series in Materials for Electronic and Optoelectronic Applications. John Wiley&Son, Ltd., 2005, pp. 339-356.

6. Liapin A.A., Riabochkina P.A., Ushakov S.N., Fedorov P.P. Vizualizator dvukhmikronnogo lazernogo izlucheniia na osnove kristallov CaF₂:Ho [Visualiser of two-micron laser radiation based on Ho:CaF₂ crystals]. *Kvantovaya elektronika*, 2014, vol. 44, no. 6, pp. 602–605.

Получено 16.10.2014