

УДК 621.3.038.825.2

**Er,Yb:YGDsSiO<sub>5</sub> – ПЕРСПЕКТИВНАЯ АКТИВНАЯ СРЕДА ДЛЯ ЛАЗЕРОВ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ В СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ 1,5-1,6 МКМ**

Горбаченя К.Н.<sup>1</sup>, Ясюкевич А.С.<sup>1</sup>, Кисель В.Э.<sup>1</sup>, Толстик Н.А.<sup>2</sup>, Тараченко А.А.<sup>1</sup>,  
Шишко Т.А.<sup>1</sup>, Гоман В.И.<sup>1</sup>, Павловский Л.К.<sup>1</sup>, Орлович В.А.<sup>3</sup>,  
Волкова Е.А.<sup>4</sup>, Япаскурт В.О.<sup>4</sup>, Кулешов Н.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИЦ оптических материалов и технологий БНТУ  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Норвежский Университет науки и технологий  
Трондхейм, Норвегия

<sup>3</sup>Институт физики имени Б.И. Степанова  
Минск, Республика Беларусь

<sup>4</sup>Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова  
Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** Проведены исследования спектроскопических характеристик кристалла Er,Yb:YGDsSiO<sub>5</sub> как лазерной среды на область спектра 1,5–1,6 мкм. Показано, что кристалл является перспективным для использования в качестве активной среды лазеров спектрального диапазона 1,5–1,6 мкм.

**Ключевые слова:** эрбий, иттербий, иттрий-гадолиниевый силикат, спектроскопические свойства.

**Er,Yb:YGDsSiO<sub>5</sub> AS A PROMISING GAIN MEDIUM FOR DIODE-PUMPED LASERS EMITTING AT THE SPECTRAL RANGE OF 1.5-1.6 μm**

Gorbachenya K.<sup>1</sup>, Yasukevich A.<sup>1</sup>, Tolstik N.<sup>2</sup>, Kisel V.<sup>1</sup>, Tarachenko A.<sup>1</sup>, Shishko T.<sup>1</sup>,  
Homan V.<sup>1</sup>, Pavlovskiy L.<sup>1</sup>, Orlovich V.<sup>3</sup>, Volkova E.<sup>4</sup>, Yapaskurt V.<sup>4</sup>, Kuleshov N.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Center for Optical Materials and Technologies of Belarusian National Technical University  
Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Norwegian University of Science and Technology  
Trondheim, Norway

<sup>3</sup>B.I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus  
Minsk, Republic of Belarus

<sup>4</sup>Lomonosov Moscow State University  
Moscow, Russia

**Abstract.** The investigation of spectroscopic properties of Er,Yb:YGDsSiO<sub>5</sub> crystal as a gain medium for eye-safe lasers was carried out. It was shown that Er,Yb:YGDsSiO<sub>5</sub> crystal is a promising material for lasers emitting at the spectral range of 1.5–1.6 μm.

**Key words:** erbium, ytterbium, yttrium-gadolinium silicate, spectroscopic properties.

Адрес для переписки: Горбаченя К.Н., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь  
e-mail: gorby@bntu.by

Твердотельные эрбиевые лазеры, излучающие в спектральной области 1,5–1,6 мкм, представляют большой интерес для различных практических применений. Для создания лазеров с высокими выходными мощностями на сегодняшний день актуальной задачей является поиск новых кристаллических активных лазерных сред [1]. В данной работе представлены результаты исследований спектроскопических свойств кристалла иттрий-гадолиниевый силиката, легированного ионами эрбия и иттербия – Er<sup>3+</sup>,Yb<sup>3+</sup>:YGDsSiO<sub>5</sub> (YGSO) как перспективной активной среды лазеров условно безопасного для органов зрения спектрального диапазона 1,5–1,6 мкм.

Кристалл Er,Yb:YGSO является двусосным анизотропным кристаллом и принадлежит к моноклинной сингонии C2/c с параметрами элементарной ячейки  $a = 1,2547$  нм,  $b = 0,6750$  нм,

$c = 1,0477$  нм,  $\beta = 102,7933^\circ$  [2]. Элементный состав монокристалла изучался с помощью энергодисперсионного спектрометра, установленного на базе растрового электронного микроскопа с вольфрамовым термоэмиссионным катодом. По результатам определено, что массовое содержание ионов Er<sup>3+</sup> и Yb<sup>3+</sup> в кристалле составило 0,3 мас.% и 3,5 мас.%, соответственно. Внешний вид выращенного кристалла Er,Yb:YGSO приведен на рис. 1.

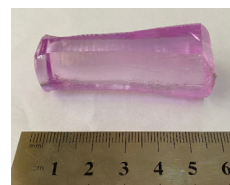


Рисунок 1 – Кристалл Er,Yb:YGSO

Для исследования спектроскопических свойств кристаллов использовались плоско-параллельные пластинки толщиной  $2,0 \pm 0,1$  мм, ориентированные вдоль кристаллографических осей кристалла  $a$ ,  $b$ ,  $c$ . Измерение абсорбционных свойств производилось при комнатной температуре на двулучевом спектрофотометре Varian CARY5000 в двух спектральных областях: 850–1050 нм и 1400–1650 нм. Кристалл характеризуется достаточно широкой полосой поглощения с максимумом около 925 нм для поляризации  $E//b$  и узкой интенсивной полосой на 976 нм с максимальным сечением поглощения  $1,65 \cdot 10^{-20}$  см<sup>2</sup> для поляризации  $E//a$ . Полуширина полосы с максимумом на 976 нм составляет около 2 нм. Спектры сечений поглощения в области 1,5 мкм приведены на рис. 2. Максимальное сечение поглощения достигает  $2,5 \cdot 10^{-20}$  см<sup>2</sup> на длине волны 1530 нм.

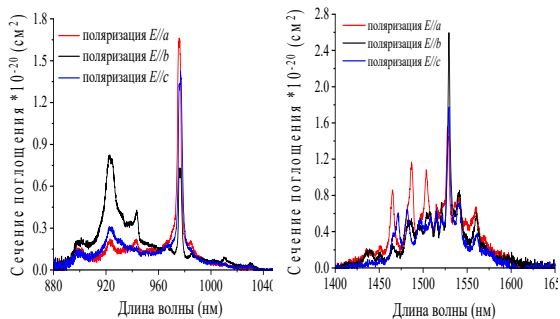


Рисунок 2 – Спектры сечений поглощения кристалла

Целью проведения измерений кинетик люминесценции было определение времени жизни возбужденных состояний  $^4I_{11/2}$  и  $^4I_{13/2}$  ионов эрбия. Люминесценция возбуждалась импульсным излучением на длине волны 976 нм. Затухание люминесценции с уровня  $^4I_{13/2}$  ионов эрбия носило моноэкспоненциальный характер с характерным временем  $7,2 \pm 0,5$  мс. Затухание люминесценции с  $^4I_{11/2}$  уровня также имело экспоненциальный характер, и время жизни этого уровня составило  $20 \pm 1$  мкс. Эффективность переноса энергии от ионов иттербия к ионам эрбия оценивалась по сокращению времени жизни уровня  $^2F_{5/2}$  ионов иттербия в кристалле YGSO, легированном ионами Er и Yb, относительно соответствующего времени жизни в кристалле, легированном только ионами иттербия. Для исследуемого кристалла эффективность переноса энергии  $Yb \rightarrow Er$  составила 91 %.

Спектры сечений вынужденного излучения для перехода  $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  ионов эрбия, определенные по модифицированному методу соответствия приведены на рис. 3. Наиболее интенсивный максимум с сечением вынужденного излучения  $1,2 \cdot 10^{-20}$  см<sup>2</sup> наблюдается для поляризации  $E//b$  на длине волны 1530 нм. На рис. 4 приведены спектры коэффициента усиления для различных значений относительной населенности  $\beta$  уровня  $^4I_{13/2}$  для поляризации  $E//b$ .

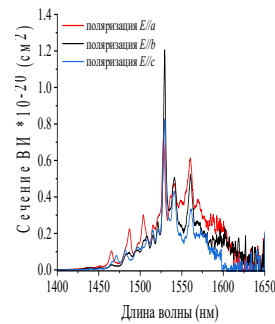


Рисунок 3 – Спектры сечений вынужденного излучения

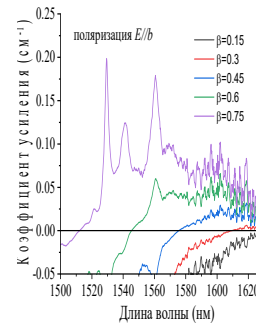


Рисунок 4 – Спектр коэффициента усиления для поляризации  $E//b$

Поглощение из возбужденного состояния в области 1,5 мкм (переход  $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$  ионов эрбия) является одним из самых существенных каналов энергетических потерь в эрбий-содержащих средах. В случае спектрального перекрытия полосы поглощения из возбужденного состояния с полосой усиления, эффективность лазерной генерации в спектральной области 1500–1600 нм может существенно снизиться. Спектр поглощения из возбужденного состояния кристалла Er, Yb:YGSO приведен на рис. 5. Спектр показывает, что полосы поглощения из возбужденного состояния лежат в области 1625–1800 нм (участок отрицательных значений) и практически не перекрываются с полосами усиления в области 1500–1600 нм.

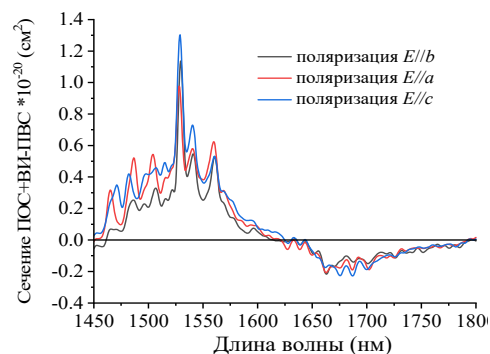


Рисунок 5 – Спектры поглощения из возбужденного состояния кристалла Er, Yb:YGSO

В данной работе проведены систематические исследования спектроскопических характеристик

кристалла Er,Yb:YGSO как лазерной среды на область спектра 1,5–1,6 мкм. Полученные результаты показали, что кристалл Er,Yb:YGSO является перспективным для использования в качестве активной среды лазеров спектрального диапазона 1,5–1,6 мкм.

#### Литература

1. Eye-safe 1.55  $\mu\text{m}$  passively Q-switched Er,Yb:GdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> diode-pumped laser / K. N. Gorbachenya [et al.] // *Optics Lett.* – 2016. – Vol. 41. – P. 918–921.
2. Tunable and efficient diode-pumped Yb<sup>3+</sup>:GYSO laser / J. Du [et al.]. – *Opt. Express.* – 2006. – Vol. 14. – P. 3333.

УДК 533.9.082, 533.922, 533.924, 621.373.8

### ПОСЛОЙНОЕ СКАНИРОВАНИЕ РЖАВЧИНЫ С МИКРОНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ СЛОЯ ДВУХИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ СПЕКТРОМЕТРОМ ЛАЭМС Ермалицкая К.Ф.

*Белорусский государственный университет  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** Разработан метод послойного качественного и количественного исследования ржавчины на изделиях из сплавов на основе железа методом двухимпульсной лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии с помощью спектрометра ЛАЭМС. Использование метода отрицательной расфокусировки для снижения плотности мощности лазерного излучения и, соответственно, толщины испаряемого слоя, дает возможность проводить сканирования ржавчины с микронным разрешением. Двухимпульсное лазерное возбуждение обеспечивает высокое отношение сигнал/шум, а, следовательно, и чувствительность определения концентрации примесей при снижении плотности мощности.

**Ключевые слова:** лазерная абляция, двухимпульсная лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия, послойное сканирование.

### LAYERWISE RUST SCANNING WITH MICRON RESOLUTION BY DOUBLE-PULSE LASER SPECTROMETER LAEMS Ermalitskaia K.

*Belorussian State University  
Minsk, Republic of Belarus*

**Abstract.** New method for layerwise qualitative and quantitative rust analysis on surface of iron-based alloys using double pulse laser atomic emission spectrometer LAEMS is suggested. Using negative defocusing of laser beam technique for lowering of flux density and thickness of evaporated layer one can perform depth scanning of rust with micron resolution. Double pulse laser excitation provides high signal/noise ratio and consequently high sensitivity of impurities concentration definition.

**Key words:** laser ablation, double pulse laser atomic emission spectroscopy, layerwise scanning.

*Адрес для переписки: Ермалицкая К.Ф., ул. Бобруйская, 5, Минск 220006, Республика Беларусь  
e-mail: ermaliaskaia@gmail.com*

**Введение.** Одним из наиболее важных преимуществ лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии является возможность проведения исследования без предварительной подготовки поверхности, так как программным обеспечением спектрометров предусмотрена возможность проводить предварительную абляцию поверхности без регистрации аналитических спектров. В большинстве случаев эмпирически определяется число таких «предимпульсов», чтобы с одной стороны исключить из рассмотрения данные относящиеся к окислам, нитридам и загрязнениям на поверхности, а с другой стороны не проводить абляцию со дна кратера, длина которого превышает его диаметр. В противном случае, абляционная плазма будет конденсироваться на стенках, не достигая поверхности и не давая адекватного вклада в аналитический сигнал.

В большинстве случаев, соединения на поверхности образца, являются лишь «досадным препятствием» при проведении исследования.

Однако, анализ ржавчины, патины и других молекулярных соединений дает возможность судить как о качестве сплава, так и об условиях хранения образца. Особый интерес представляет в этом случае ржавчина, так как, по сравнению с патиной, она более неоднородна и может проникать вглубь образца на неограниченную глубину.

**Целью данной работы** является создание аналитической методики послойного исследования с микронным разрешением ржавчины методом двухимпульсной лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии на спектрометре ЛАЭМС с управлением толщиной испаряемого слоя с помощью отрицательной расфокусировки.

**Лазерный спектрометр ЛАЭМС.** Исследования проводились на лазерном двухимпульсном атомно-эмиссионном спектрометре ЛАЭМС (производства кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета БГУ) [1]. Основные параметры ЛАЭМС: