

Таблица 1 – Времена затухания люминесценции для образцов стеклокерамики, приготовленных при различных температурах термообработки

Режим термообработки	Время затухания люминесценции, $\tau_{1/e}$, нс
720 °C/6 ч + 800 °C/6 ч	260±10
720 °C/6 ч + 850 °C/6 ч	280±10
720 °C/6 ч + 900 °C/6 ч	260±10
720 °C/6 ч + 1000 °C/3 ч	250±10

Новые цинк-галлиоалюмосиликатные ситаллы на основе нанокристаллов шпинели $Zn(Ga,Al)_2O_4$, легированные Co^{2+} , были получены традиционным методом закалки в расплаве с контролируемой кристаллизацией.

Изучены люминесцентные свойства данных материалов, а также получены характерные времена затухания люминесценции. Показано, что люминесцентные свойства ситаллов определяются в основном тетраэдрически координированными ионами Co^{2+} , расположенными в нанокристаллах $Zn(Ga,Al)_2O_4$ со структурой шпинели.

Литература

1. Karlsson G., Laurell F., Tellefsen J., Denker B., Galagan B., Osiko V., Sverchkov S. // Appl. Phys. B. 2002. – V. 75. – P. 41.
2. Yumashev K.V., Denisov I.A., Posnov N.N., Prokoshin P.V., Mikhailov V.P. // Appl. Phys. B. – 2000. – V. 70. – P. 179.
3. Papalardo R., Wood D.L., Linares R.C., Jr. // J. Chem. Phys. – 1961. – V. 35. – P. 2041.
4. Holand W., Beall G.H. Glass Ceramic Technology, 2nd Edition. Wiley, 2012. – 440 p.
5. I.A. Denisov, Yu.V. Volk, A.M. Malyarevich, K.V. Yumashev, O.S. Dymshits, A.A. Zhilin, U. Kang, K.-H. Lee, Linear and nonlinear optical properties of cobalt-doped zinc aluminum glass ceramics. J. Appl. Phys. 93 (7) (2003) 3827-3831.
6. P. Loiko, A. Belyaev, O. Dymshits, I. Evdokimov, V. Vitkin, K. Volkova, M. Tsenter, A. Volokitina, M. Baranov, E. Vilejshikova, A. Baranov, A. Zhilin, Synthesis, characterization and absorption saturation of $Co:ZnAl_2O_4$ (gahnite) transparent ceramic and glass-ceramics: A comparative study, J. Alloys Compnd 725 (2017) 998-1005.

УДК 621.375.826

СИНТЕЗ И СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОПТИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ

$Er:Y_2O_3$ И $Er:YAG$

Горбаченя К.Н.¹, Кисель В.Э.¹, Лопухин К.В.², Балашов В.В.², Федин А.В.³, Герке М.Н.³, Кулешов Н.В.¹

¹НИЦ «Оптических материалов и технологий» БНТУ
Минск, Республика Беларусь

²Фрязинский филиал института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН
Фрязино, Российская Федерация

³Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
Владимир, Российская Федерация

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к разработке и созданию лазеров, работающих в условно безопасном для глаз спектральном диапазоне 1.5–1.6 мкм, в том числе для лазерных локаторов беспилотного транспорта. Однако до сих пор актуальным вопросом является поиск эффективной лазерной среды, обеспечивающей возможность получения лазерной генерации с высокой средней выходной мощностью. На сегодняшний день основными эрбиевыми материалами остаются фосфатные стекла, характеризующиеся малой теплопроводностью (~ 0,85 Вт/м*К), что ограничивает их применение в мощных лазерах. В настоящее время внимание исследователей смещается на материалы, которые обеспечивают сочетание спектроскопических характеристик, необходимых для получения эффективной лазерной генерации, и высокой теплопроводности матриц (> 3 Вт/м*К). Применение таких активных сред в дальнейшем позволяет создавать лазеры, генерирующие излучение с высокой средней выходной

мощностью (> 1 Вт) в непрерывном и импульсном режимах, для применения в лазерной дальнометрии, медицине, системах оптической локации и лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии.

Появление доступных источников накачки – лазерных диодов на основе соединений $InGaAsP/InP$, излучающих в области 1,5 мкм, с приемлемыми пространственными и спектральными характеристиками пучка вызвало повышенный интерес исследователей к изучению генерационных характеристик материалов, активированных только ионами Er^{3+} , при резонансной накачке непосредственно на верхний лазерный уровень $^4I_{13/2}$. В этом случае тепловыделение из-за малой относительной разности энергий квантов накачки и генерации сводится к минимуму. Открывается возможность применения материалов с низкой эффективностью переноса энергии от ионов иттербия к ионам эрбия в качестве активных сред лазеров спектрального диапазона 1,5–1,6 мкм. Ранее сообщалось о получении ла-

зерной генерации с резонансной накачкой на основе различных эрбийсодержащих оксидных материалов, таких как кристаллы гранатов YAG, ванадатов ReVO_4 ($\text{Re}=\text{Y}, \text{Gd}$) и полупрозрачных оксидов Re_2O_3 ($\text{Re}=\text{Sc}, \text{Lu}$) [1–4]. Группа редкоземельных полупрозрачных оксидных кристаллов $\text{Er}:\text{Re}_2\text{O}_3$ ($\text{Re}=\text{Sc}, \text{Lu}$) характеризуется наибольшим значением теплопроводности из рассматриваемых кристаллов ($\sim 12,6$ Вт/м \times К для кристалла $\text{Er}:\text{Lu}_2\text{O}_3$). При использовании кристалла $\text{Er}:\text{Sc}_2\text{O}_3$ получен непрерывный режим генерации с дифференциальной эффективностью до 45 % [4]. Однако основным недостатком полупрозрачных оксидных кристаллов является технологическая сложность их роста – температура плавления для указанных кристаллов составляет 2400 °С. Одним из решений описанных проблем, связанных с ростом кристаллов, является применение оптической керамики на основе указанных кристаллов. Современная технология изготовления оптической керамики позволяет получать материалы больших размеров с оптическим качеством, как правило, не уступающим по качеству соответствующим монокристаллам. Кроме того, стоимость изготовления оптической керамики существенно ниже роста монокристаллов, что в конечном итоге приводит к уменьшению себестоимости лазера.

Исследованные образцы керамики $\text{Er}(0,5 \text{ ат.}\%):\text{YAG}$ были изготовлены методом реактивного спекания в вакууме. Для этого были взяты коммерчески доступные порошки Y_2O_3 , Al_2O_3 и Er_2O_3 . В качестве спекающих добавок были использованы SiO_2 и V_2O_5 . Порошки были смешаны в стехиометрических пропорциях и помолоты в планетарной мельнице в среде безводного спирта в течение 15 часов, а потом высушены и протерты через сито. После протирки порошки были отожжены при 1 000 °С для удаления органики. Полученные порошки были отпрессованы сначала одноосным прессованием при 100 МПа в стальной форме диаметром 10 мм или при 20 МПа в стальной форме диаметром 27 мм, а потом в изостатическом прессе при 250 МПа в течение 5 минут. После первого этапа прессовки компакты были отожжены при 600 °С, а после 2-ого этапа при 800 °С для окончательного удаления всех летучих примесей. Полученные компакты были спечены в вакуумной печи с вольфрамовыми нагревателями при температуре 1 750 °С в течение 21 часа. После спекания образцы были отожжены при 1 100 °С в течение 36 часов для удаления кислородных вакансий. Образцы $\text{Er}(0,5 \text{ ат.}\%):\text{Y}_2\text{O}_3$ были изготовлены по аналогичной технологии. В качестве спекающих добавок использовались La_2O_3 (0,5 ат.%) и ZrO_2 (1,5 ат. %). Спекание проводилось при температуре 1860 °С в течение 10 часов. Отжиг после спекания проводился при температуре

1400 °С в течение 15 часов. Все отжиги проводились в воздушной атмосфере. После финального отжига образцы были отполированы. На рисунке 1 приведены фотографии синтезированных образцов оптической керамики $\text{Er}:\text{Y}_2\text{O}_3$ и $\text{Er}:\text{YAG}$.

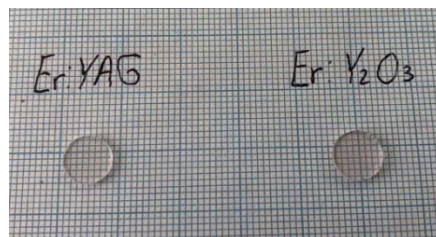


Рисунок 1 – Оптическая керамика $\text{Er}:\text{Y}_2\text{O}_3$ и $\text{Er}:\text{YAG}$

Измерение абсорбционных свойств оптической керамики $\text{Er}:\text{Y}_2\text{O}_3$ и $\text{Er}:\text{YAG}$ производилось при комнатной температуре на двухлучевом спектрофотометре Varian CARY 5 000 в спектральной области 1 400–1 700 нм, соответствующей энергетическому переходу $^4\text{I}_{15/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2}$ ионов эрбия. Спектральное разрешение прибора составляло 0,5 нм. При определении коэффициентов поглощения было учтено френелевское отражение от полированных поверхностей образцов. По спектрам коэффициентов поглощения и содержанию ионов-активаторов были определены спектры поперечных сечений поглощения.

На рисунке 2 представлены спектры поперечных сечений поглощения оптической керамики $\text{Er}:\text{Y}_2\text{O}_3$.

Максимальное поперечное сечение поглощения составляет $2,1 \cdot 10^{-20}$ см² на длине волны 1 535 нм. Значение поперечного сечения поглощения на длине волны 1 531 нм, на которой излучает источник накачки, который планируется использовать при проведении лазерных экспериментов и исследовании генерационных характеристик, составляет $0,42 \cdot 10^{-20}$ см².

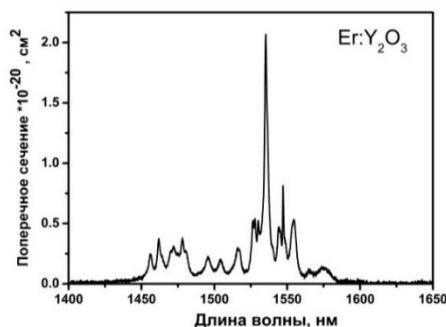


Рисунок 2 – Спектры поперечных сечений поглощения оптической керамики $\text{Er}:\text{Y}_2\text{O}_3$

На рисунке 3 представлены спектры поперечных сечений поглощения оптической керамики $\text{Er}:\text{YAG}$.

Значение поперечного сечения поглощения на длине волны 1 531 нм составляет $0,4 \cdot 10^{-20}$ см².

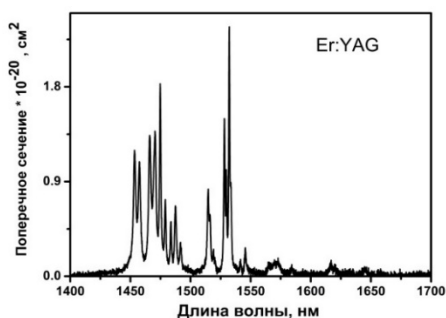


Рисунок 3 – Спектры поперечных сечений поглощения оптической керамики Er:YAG

Литература

1. D. Garbuzov, I.Kudryashov, M. Dubinskii «Resonantly diode laser pumped 1.6- μm -erbium-doped yttrium aluminum garnet solid-state laser». Appl. Phys. Lett. – Vol. 87, № 12, 131115-131118 (2005).
2. N. Ter-Gabrielyan [et al.] «Nearly quantum-defect-limited efficiency, resonantly pumped, $\text{Er}^{3+}:\text{YVO}_4$ laser at 1593.5 nm». Opt.Lett. Vol. 36, № 7, 1218–1220 (2011).
3. L.D. Merkle [et al.] «Er:Lu₂O₃ – laser-related spectroscopy». Opt. Mat. Express. Vol. 3, № 11, 1992–2002 – (2013).
4. N. Ter-Gabrielyan [et al.] «Ultralow quantum-defect eye-safe Er:Sc₂O₃ laser». Opt. Lett. Vol. 33, № 13, 1524–1526 (2008).

УДК 621.315.592

ДИФфуЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГЕРМАНИЙ-КРЕМНИЕВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Гацкевич Е.И.¹, Ивлев Г.Д.², Гундина М.А.¹

¹Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

Одна из актуальных проблем полупроводниковой оптоэлектроники - создание эффективных источников света на основе германия, излучающих при комнатной температуре в ближней инфракрасной (ИК) области ($\lambda = 1,5\text{--}1,6$ мкм). На основе гетероструктур Ge/Si была получена лазерная генерация при оптической и электрической накачке [1, 2]. Твердые растворы $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ с задаваемой параметром «х» шириной запрещенной зоны применяются при создании различных микро- и оптоэлектронных приборных структур. Однако эффективность таких лазерных структур пока остается сравнительно низкой, а методы их создания (например, сверхвысоковакуумная молекулярно-лучевая эпитаксия) усложняют кремниевую технологию. Требуется поиск альтернативных методов создания $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ слоев, совместимых с кремниевой планарной технологией. Таким методом может быть импульсная лазерная обработка (ИЛО). Эффекты ИЛО различных германий кремниевых структур в наносекундном диапазоне длительностей воздействующего излучения исследовались в ряде работ [3]. При импульсных воздействиях на гетероструктуры и твердые растворы происходит перераспределение элементного состава. В настоящей работе изучено перераспределение элементов по глубине в Ge/Si гетероструктурах (ГС) при ИЛО методом вторично-ионной масс-спектропии.

В качестве объектов исследования использовались Ge/Si ГС, приготовленные вакуум-термическим напылением германия на подложку Si(100). Толщина аморфной плёнки германия составляла 70 нм. Исследуемые образцы облучались пучком рубинового лазера (длительность импульса 70–80 нс по уровню 0,5) с заданными

плотностями энергии W при неоднородности её распределения не выше $\pm 5\%$ по облучаемой зоне диаметром 3–4 мм. Одновременно проводилось оптическое зондирование зоны ИЛО на $\lambda_1 = 0,53$ и/или $\lambda_2 = 1,06$ мкм путём детектирования отражённого от неё пробного пучка. Источником зондирующего излучения являлся лазер на стекле, активированном неодимом, работающий в режиме свободной генерации – генерации «гладкого» импульса длительностью 0,5 мс. Оба лазера работали в режиме взаимно синхронизированных одиночных вспышек. Величина плотности энергии облучения W для изучения влияния ИЛО на перераспределение элементного состава варьировалась калиброванными нейтральными фильтрами от 0,25 до 4 Дж/см².

ВИМС-измерения проводились на установке TOF.SIMS-5 с времяпролётным масс-анализатором и двумя ионными пушками – для распыления и зондирования, на которой ранее авторами работ [4, 5] выполнялись исследования подобных германий – кремниевых структур. Данные ВИМС, были получены послойным анализом ГС при распылении тестируемой области образцов (~ 1 мкм²) ионами Cs^+ с энергией 1 кэВ (ток пучка 70 нА) и зондировании ионами Bi^+ (25 кэВ, 1 нА). В процессе распыления регистрировались элементарные вторичные ионы Ge^- и Si^- , а также кластерные Ge_2^- , детектирование которых проводилось для выявления по известной методике [5] присутствия нанокластеров (наноостровков) германия в анализируемых слоях.

Как следует из данных, представленных на рисунке 1, вследствие ИЛО ГС при $W = 3,6$ Дж/см² формируется бинарная система $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ с параметром «х», уменьшающимся от