

концентрации ее в расплаве, $k < 1$. В процессе роста кристалла примесь должна отводиться внутрь жидкой фазы и, следовательно, ее концентрация должна уменьшаться при удалении от фронта кристаллизации вглубь расплава. Если учесть, что для данного полупроводникового соединения наклон линии ликвидуса отрицательный, нетрудно понять, что уменьшение концентрации примеси приведет к повышению температуры затвердевания раствора и степени его переохлаждения по мере удаления вглубь расплава. В результате случайно образовавшаяся выпуклость на фронте кристаллизации попадает в область с более высокой степенью переохлаждения и это приводит к ее дальнейшему росту. В процессе роста такой выпуклости примесь выталкивается в расплав.

Это приводит к возникновению латерального градиента концентрации между вершиной выступа и областью над его основанием. В результате от вершины выступа с более высокой концентрацией возникнет поток примеси, который приведет к понижению концентрации вблизи вершины выступа и повышению вблизи его основания. Этот процесс приведет к стабилизации движения выступа и к возрастанию концентрации примеси на границах ячеек.

Разработанная в [3] модель неустойчивости фронта кристаллизации, а также расчетные данные по скорости кристаллизации были использованы для оценки среднего размера ячеек (рисунок 2).

Из расчетов следует, что при увеличении плотности энергии от 0,5 до 2,5 Дж/см² скорость движения фронта кристаллизации уменьшается более, чем в 2 раза. Соответственно рассчитанный размер ячеек увеличивается от 100 до 150 нм, т. е. примерно в полтора раза. Однако в эксперименте [1] наблюдается более резкое увеличение размера ячеек с ростом плотности энергии лазерного импульса: при возрастании плотности энергии от 1,5 до 2,5 Дж/см² средний размер ячеек увеличивается от 90 до 180 нм. Таким образом, в рамках используемой здесь мо-

УДК 539.26, 538.958, 621.373.8

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТЕКЛОКЕРАМИКИ, СОДЕРЖАЩЕЙ НАНОКРИСТАЛЛЫ $\text{Co}^{2+}:\text{Ga}_2\text{O}_3$

Глазунов И. В.¹, Скопцов Н. А.¹, Маляревич А. М.¹, Юмашев К. В.¹, Дымшиц О. С.², Жилин А. А.², Алексеева И. П.², Шемчук Д. В.²

¹ НИЦ Оптических материалов и технологий, Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

² НИТИОМ ВНИЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, Российская Федерация

На сегодняшний день источники лазерного излучения, которые генерируют импульсы короткой длительности, широко применяются для обработки материалов, дальнометрии, передачи и обработки информации. Перспективной воз-

можностью для получения импульсного лазерного излучения является использование пассивных затворов на основе просветляющихся сред. В настоящее время существует ряд просветляющихся сред на основе стеклокристаллических

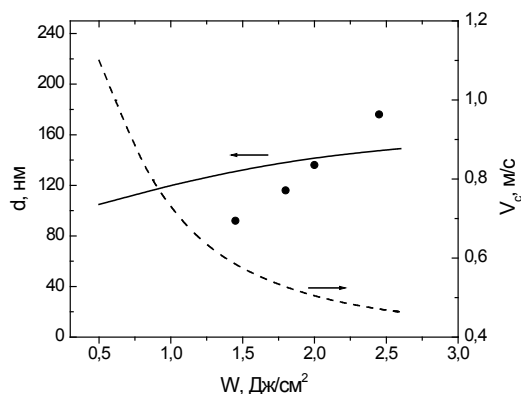


Рисунок 2 – Рассчитанные зависимости среднего размера ячеек (сплошная линия) и скорости движения фронта кристаллизации (штриховая кривая) от плотности энергии лазерного облучения; • - результат эксперимента [1]

Работа выполнена при поддержке БРФФИ по проекту Ф13К-117.

- Gaiduk, P. I., Prakopyeu, S. L. Structural changes in SiGe/Si layers induced by fast crystallization // Subsecond Annealing of Advanced Materials, Springer Series in Material Science, ed. by W. Scorupa and H. Schmidt.- Springer, 2014. - V. 192. - P. 79-105.
- <http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/SiGe>.
- Mullins, W. W. Stability of a Planar Interface During Solidification of a Dilute Binary Alloy/ W.W. Mullins, R. F. Sekerka//J. Appl. Phys. – 1964.-Vol. 35. - P. 444-452.

материалов (ситаллов) с тетракоординированными ионами Co^{2+} . В настоящей работе исследуются свойства ещё одного материала с целью создания пассивного затвора для лазеров ближнего ИК диапазона спектра.

Исходные стекла и прозрачные стеклокристаллические материалы были синтезированы и исследованы в лаборатории стеклокристаллических материалов НИТИОМ ВНИЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова». Стекло было синтезировано в лабораторной печи с силитовыми нагревателями в тигле из кварцевой керамики при температуре $1580\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 6 ч с перемешиванием. Стекло было отлито на металлическую плиту и отожжено. Термообработка полученного стекла проводилась при температуре $730\text{ }^\circ\text{C}$. В результате были получены прозрачный стеклокристаллический материал.

Для определения структуры кристаллической фазы, выделившейся при термообработке, был выполнен рентгенофазовый анализ. Измерение спектров рассеяния рентгеновского излучения производилась с помощью дифрактометра Shimadzu XRD 6000 при излучении $\text{Cu K}\alpha$ с никелевым фильтром. Исходя из рентгенограммы (рис. 1), можно сделать вывод о формировании в полученной стеклокерамике наноразмерных кристаллов Ga_2O_3 .

Регистрация спектров пропускания (рис. 2) исследуемых образцов осуществлялась с помощью спектрофотометра Cary Varian 5000. В ближнем инфракрасном диапазоне спектра наблюдается полоса поглощения, характерная для тетракоординированных ионов кобальта Co^{2+} и обусловленная их переходами из основного состояния 4A_2 в возбуждённое состояние ${}^4T_1({}^4F)$. Её структурирование позволяет сделать вывод, что указанные ионы входят в кристаллическую фазу (Ga_2O_3) исследуемого материала.

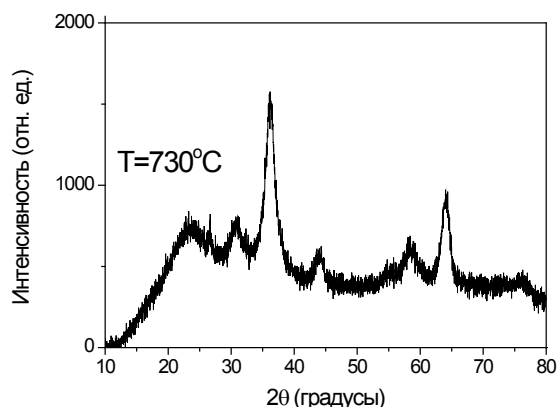


Рисунок 1 – Рентгенограмма стеклокерамики с нанокристаллами $\text{Co}^{2+}:\text{Ga}_2\text{O}_3$

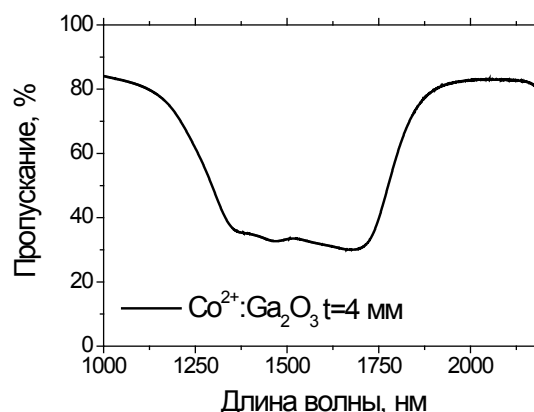


Рисунок 2 – Спектр пропускания ионов кобальта в нанокристаллах $\text{Co}^{2+}:\text{Ga}_2\text{O}_3$

Исследована зависимость пропускания материала от плотности энергии падающего излучения. Образец толщиной 4 мм облучался импульсами с энергией 1,3 мДж, длительностью 87 нс на длине волны 1540 нм. Диаметр сфокусированного на образец пятна лазерного излучения составлял 70 мкм. Плотность энергии излучения на образце варьировалась с помощью призмы Глана в пределах от 0,2 до 15 Дж/см^2 . На рис. 3 представлена соответствующая зависимость (точки – экспериментальные результаты, кривая – результат моделирования). Видно, что материал хорошо просветляется, его пропускания от начальной величины $T_0=40\%$ возрастает до $T=64\%$.

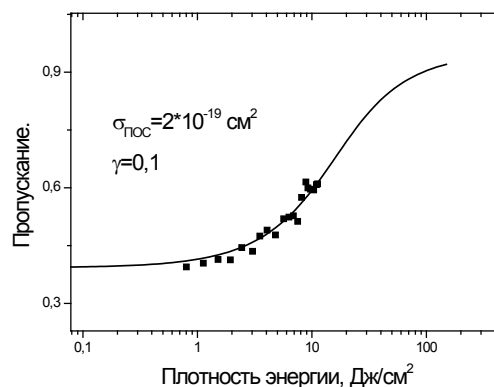


Рисунок 3 – Зависимость пропускания стеклокерамики с нанокристаллами $\text{Co}^{2+}:\text{Ga}_2\text{O}_3$ от плотности энергии падающего излучения

Анализ экспериментальных данных проводился в рамках модели медленно релаксирующего поглотителя:

$$\frac{dE_0}{dz} = -E_{sa} \cdot \frac{\ln(1/T_0)}{L} \cdot \left[(1-\gamma) \cdot \left(1 - e^{-\frac{E_0}{E_{sa}}}\right) + \gamma \cdot \frac{E_0}{E_{sa}} \right]$$

где $E_{sa} = h\nu/\sigma_a$ – плотность энергии насыщения поглощения; $\gamma = \sigma_{esa}/\sigma_a$ – контраст просветления среды; σ_a и σ_{esa} – поперечные сечение поглощения из основного и возбужденного состояний, соответственно. По результатам моделирования установлено, что контраст просветления равен $\gamma=0.1$, т.е. остаточное поглощение в полностью просветлённом состоянии составляет лишь 10% от величины, характеризующей пропускание низкоинтенсивного излучения. Значение попе-

УДК 621.375.826

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КРИСТАЛЛОВ Er,Yb:YAl₃(BO₃)₄ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОНЦЕНТРАЦИЙ ИОНОВ ЭРБИЯ

Горбачена К.Н.¹, Кисель В.Э.¹, Ясюкевич А.С.¹, Мальцев В.В.², Леонюк Н.И.², Кулешов Н.В.¹

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

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Геологический факультет, Москва, Российская Федерация

Излучение спектральной области 1.5-1.6 мкм привлекает внимание разработчиков лазерных систем для дальнометрии благодаря ряду особенностей. Во-первых, оно является сравнительно безопасным для глаз. Такая особенность обусловлена достаточно высоким коэффициентом поглощения в этой области внешних элементов светопреломляющей системы глаза (роговицы и хрусталика), благодаря чему лишь малая доля падающей энергии достигает чувствительной сетчатки. Во-вторых, излучение в области 1.5-1.6 мкм области обладает малыми потерями при прохождении через атмосферу. На сегодняшний день существует ряд лазерных источников, излучающих в спектральной области 1.5-1.6 мкм: диодные лазеры, ВКР-лазеры, параметрические генераторы света. Однако наибольшее практическое распространение получили твердотельные лазеры на основе фосфатных стёкол с ионами Er и Yb, отличающиеся относительной простотой, компактностью и возможностью работы в различных режимах генерации. Однако, основным недостатком, ограничивающим применение эрбиевых стекол в системах с непрерывной диодной накачкой, является низкая теплопроводность матрицы (теплопроводность фосфатных стёкол составляет 0.85 Вт/м*К). Для снятия таких ограничений актуальным является использование кристаллических матриц для активации ионами Er и Yb.

Кристаллы Er,Yb:YAl₃(BO₃)₄ (YAB) характеризуются достаточно высоким значением теплопроводности (более 7 Вт/м*К). При использовании данных кристаллов в качестве активных сред твердотельных лазеров был получен непрерывный режим генерации с максимальной выходной мощностью 1 Вт на длине волны 1522 нм с дифференциальной эффективностью по погло-

речного сечения поглощения из основного состояния на длине волны 1.54 мкм составляет $\sigma_a=2 \cdot 10^{-19}$ см², а плотность энергии насыщения поглощения $E_{sa}=0.65$ Дж/см².

В заключение: исследованы структурные, спектроскопические и нелинейно-оптические свойства нового стеклокристаллического материала, содержащего нанокристаллы Co²⁺:Ga₂O₃. Сделан вывод, что ситаллы с кристаллической фазой Co²⁺:Ga₂O₃ являются перспективной средой для пассивной модуляции добротности лазеров спектрального диапазона 1.5 мкм.

щенной мощности накачки 35 %. Однако, исследование зависимости генерационных характеристик кристаллов Er,Yb:YAB от концентраций ионов-активаторов ранее проведена не была.

В данной работе представлены результаты исследований зависимости выходных мощностей и дифференциальных эффективностей лазеров на основе кристаллов Er,Yb:YAB от концентраций ионов эрбия.

Рост кристаллов осуществлялся методом раствор-расплавной кристаллизации в сложных многокомпонентных системах. В качестве основы растворителя использовался тримолибдат калия (K₂Mo₃O₁₀). В результате были получены кристаллы Er,Yb:YAB размерами до 20x10x10 мм³ с содержанием ионов эрбия 0.83x10²⁰ см⁻³ (1.5 ат.%), 1.11x10²⁰ см⁻³ (2.0 ат.%), 1.66x10²⁰ см⁻³ (3.0 ат.%), 2.22x10²⁰ см⁻³ (4.0 ат.%) и ионов итербия 6.0x10²⁰ см⁻³ (11 ат.%).

Для проведения лазерных экспериментов и исследования зависимости генерационных характеристик кристаллов Er,Yb:YAB от концентрации ионов активаторов был собран макет эрбиевого лазера с диодной накачкой (рисунок 1). В качестве источника излучения использовался лазерный диод с максимальной выходной мощностью мощностью 15 Вт с волоконным выходом. Диаметр волокна был равен 105 мкм, числовая апертура – 0.15. Диод излучал на длине волны 976 нм со спектральной шириной полосы около 6 нм. Оптическая система фокусировала излучение накачки в активный элемент с размером перетяжки $2\omega_0=100$ мкм, близким к размеру моды резонатора. Резонатор имел четырехзеркальную конфигурацию.

Активный элемент – кристалл Er(X ат.%),Yb (11 ат.%):YAB, где X=1.5, 2.0, 3.0, 4.0 ат.%, толщиной 1.5 мм имел антиотражающие покры-