

Результаты расчета времени существования жидкой фазы хорошо коррелируют с экспериментальными данными, полученными методом оптического зондирования. Образование локальных минимумов в распределении Ge по глубине связано с явлениями сегрегации. Хотя кремний и германий образуют непрерывный ряд твердых растворов, в существенно неравновесных условиях нанопульсного нагрева ГС, инициирующего быстрые фазовые превращения твердое состояние ↔ бинарный расплав, при быстром отвердевании расплавленного слоя происходит сегрегация Ge. Ее следствие – формирование ячеистых структур [3, 4] в результате вытеснения германия в латеральных направлениях, а также к поверхности. Положение каждого из локальных минимумов в распределении Ge (рис. 1) приблизительно на 0,1 мкм ниже достигаемой глубины проплавления. Это различие связано с тем, что моделирование выполнено в приближении плоского фронта фазового перехода.

В результате данного исследования получены данные о перераспределении элементов по глубине в эпитаксиальных слоях $Ge_xSi_{1-x}/Si(100)$ в условиях ИЛО моноимпульсным излучением рубинового лазера. Установлено, что положение локальных минимумов в распределении Ge соответствует глубинам проплавления ГС при заданных значениях W . Происхождение указанных минимумов концентрации германия связано с начальной стадией отвердевания бинарного расплава и зарождением сегрегации, приводящей к формированию ячеистой структуры в результате ИЛО эпитаксиального слоя Ge_xSi_{1-x} .

Авторы признательны П.И. Гайдуку за предоставленный образец гетероструктуры GeSi/Si(100) и М.Н. Дроздову за данные ВИМС.

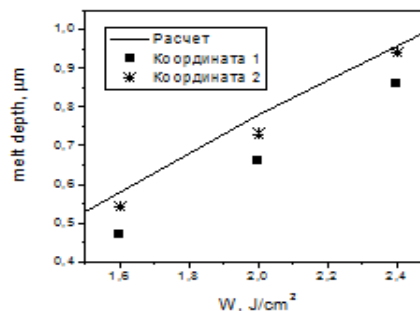


Рисунок 2 – Рассчитанная зависимость максимальной глубины проплавления (сплошная линия) от плотности энергии лазерного облучения. Координата 1 соответствует локальному минимуму, координата 2 – началу формирования локального минимума (пояснения в тексте)

Литература

1. Reliability and performance scaling of very high speed SiGe HBTs / G. Freeman [et al.] // *Microelectronics Reliability*. – 2004. – Vol. 44. – P. 397.
2. Liu, J. Ge-on-Si lasers for large-scale electronic-photon integration / J. Liu, L. C. Kimerling, J. Michel // *Semicond. Sci. Technol.* – 2012. – Vol. 27, № 9. – P.094006(13).
3. Структура и фотопроводимость эпитаксиальных слоев SiGe/Si, модифицированных моноимпульсным лазерным облучением / Г. Д. Ивлев [и др.] // *Письма в ЖТФ*. – 2014. – Т. 40, № 23. – С. 9–15.
4. Гацкевич Е. И. Образование ячеистой структуры в слоях SiGe при наносекундном лазерном облучении / Е. И. Гацкевич, Г. Д. Ивлев, В. Л. Малевич // *Письма в ЖТФ*. – 2015. – Т. 41, вып. 1. – С. 43–49.
5. Количественная калибровка и послойный анализ концентрации германия в гетероструктурах Ge_xSi_{1-x}/Si методом вторично-ионной масс-спектропии / М. Н. Дроздов [и др.] // *ФТП*. – 2014. – Т. 48, № 8. – С. 1138–1146.

УДК 621.375.826

РОСТ И СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ $Er, Yb:YAl_3(BO_3)_4$

Горбаченя К.Н.¹, Кисель В.Э.¹, Лазарчук А.И.¹, Волкова Е.А.², Копорулина Е.В.², Мальцев В.В.², Кулешов Н.В.¹

¹Научно-исследовательский центр оптических материалов и технологий БНТУ
Минск, Республика Беларусь

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Москва, Российская Федерация

Аннотация. Методом жидкофазной эпитаксии из раствора-расплава на подложке кристалла YAB были выращены образцы монокристаллических слоев $Er, Yb:YAB$. Определены спектрально-люминесцентные свойства полученных образцов, проведено их сравнение со свойствами объемных монокристаллов сходного состава, подтверждающее высокое оптическое качество полученных эпитаксиальных слоев.

Ключевые слова: жидкофазная эпитаксия, эпитаксиальные слои, борат, эрбий, иттербий, спектрально-люминесцентные свойства.

**GROWTH AND SPECTRAL-LUMINESCENT PROPERTIES
OF Er,Yb:YAl₃(BO₃)₄ EPITAXIAL LAYERS**

**Gorbachenya K.¹, Kisel V.¹, Lazartchuk A.¹, Volkova E.²,
Koporulina E.², Maltsev V.², Kuleshov N.¹**

¹*Center for Optical Materials and Technologies of BNTU
Minsk, Belarus*

²*Lomonosov Moscow State University
Moscow, Russia*

Abstract. Crystalline Er,Yb:YAl₃(BO₃)₄ films were grown with LPE on undoped YAl₃(BO₃)₄ substrates. The spectral-luminescent properties of grown samples were determined. The comparison with spectroscopic properties of bulk crystals was done. It was shown the high optical quality of obtained epitaxial layers.

Key words: liquid phase epitaxy, epitaxial layers, borate, erbium, ytterbium, spectral-luminescent properties.

*Адрес для переписки: Кисель В.И., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: VEKisel@bntu.by*

Интерес к исследованию и разработке волноводных лазеров на основе эрбийсодержащих активных сред, которые излучают в спектральной области 1,5–1,6 мкм, обусловлен тем, что полоса люминесценции ионов эрбия совпадает с С-диапазоном длин волн, используемым в волоконно-оптической связи, который соответствует окну прозрачности кварцевых волокон, являющихся основой современных сетей оптических телекоммуникаций. Кварцевые волокна характеризуются низкими значениями дисперсии и поглощения в данной спектральной области, что дает возможность передачи импульсов излучения с длиной волны 1,5–1,6 мкм посредством таких волокон на большие расстояния с минимальными искажениями. Успешная разработка волноводных активных сред на основе эрбийсодержащих материалов перспективна для последующего создания волноводных лазерных излучателей и усилителей оптического сигнала, которые могут быть интегрированы в оптический канал передачи информации, что позволит минимизировать оптические потери, связанные с вводом/выводом излучения.

В данной работе представлены результаты исследований спектрально-люминесцентных свойств эпитаксиальных слоев иттербия – Er³⁺, Yb³⁺:YAl₃(BO₃)₄ (YAB).

Эпитаксиальные слои Er,Yb:YAB получены методом жидкофазной эпитаксии из раствора-расплава на основе тримолибдата калия K₂Mo₃O₁₀. На основании кривой растворимости и данных по выращиванию кристаллов YAB на затравку [1] использовался оптимальный состав шихты, который предусматривал 17 мас. % R:YAB и 83 мас.% (K₂Mo₃O₁₀–B₂O₃–R₂O₃), где R = Er, Yb, Y. Содержание ионов Er³⁺ и Yb³⁺ в шихте составило 2 ат. % и 11 ат. % соответственно.

В качестве подложек использовались пластины, изготовленные из нелегированных кристаллов YAB и ориентированные перпендикулярно главной кристаллографической оси. Монокри-

сталлы YAB размером 10x10x8 мм получены на затравках в статическом режиме из аналогичного по составу раствора-расплава в температурном интервале 1050–850 °С.

В экспериментах по наращиванию эпитаксиальных слоев предварительно уточнялась температура насыщения системы, которая составила T_s = 1027 °С. Исходя из данных по кинетике роста тонких пленок аналогичного состава [2] наращивание слоев осуществлялось при переохлаждении системы ΔT = 4 °С и времени выдержки t = 24 часа. В результате, наблюдаемая скорость роста составила 5 мкм/ч, что соответствовало толщине пленки 117,5 мкм.

Анализ состава полученных слоев Er_{0.02}Yb_{0.11}Y_{0.87}Al₃(BO₃)₄ показывает, что соотношение редкоземельных катионов Er/Yb/Y практически полностью соответствует их соотношению в исходном растворе-расплаве и не меняется в процессе роста. С помощью цветного 3D сканирующего конфокального лазерного микроскопа VK-9700 (Keyence Corp., Япония) была изучена морфология поверхности. В результате выделено два основных морфологических типа нарастающей поверхности: (1) хорошо выраженные слои роста, распространяющиеся от периферийных участков подложек к центральному (рис. 1, а) и (2) вицинальные холмики, развитые на более гладких областях (рис. 1, б).

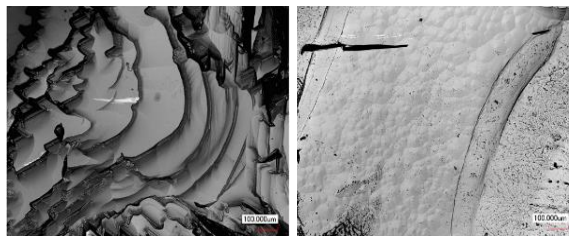


Рисунок 1 – Характерные элементы морфологии пленок Er_{0.02}Yb_{0.11}Y_{0.87}Al₃(BO₃)₄: слои роста (а) и вицинальные холмики (б)

Измерение спектров поглощения монокристаллического слоя производилось на двулучевом спектрофотометре Cary 5000 Varian при комнатной температуре. Спектральная ширина щели спектрофотометра составляла 0,9 нм. Спектр поглощения хорошо согласуется со спектром объемного кристалла Er,Yb:YAB (рис. 2) [3].

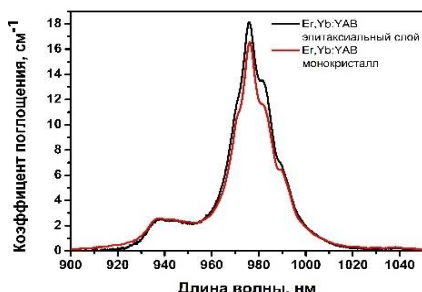


Рисунок 2 – Спектр поглощения эпитаксиального слоя Er,Yb:YAB в сравнении с монокристаллом

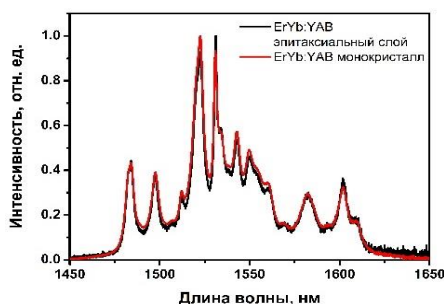


Рисунок 3 – Спектр люминесценции эпитаксиального слоя Er,Yb:YAB в сравнении с монокристаллом

Возбуждение люминесценции осуществлялось InGaAs лазерным диодом, излучающим на длине волны 975 нм. Излучение лазерного диода фокусировалось с помощью линзы на поверхность исследуемого образца, который был расположен под углом. Возбуждаемое излучение люминесценции, промодулированное механическим прерывателем светового потока с частотой ~650 Гц, собиралось с помощью широкоапертурной линзы на входной щели монохроматора (МДР-23). Излучение регистрировалось чувстви-

тельным фотоприемником (Hamamatsu G5851). Сигнал с фотоприемника обрабатывался синхронным усилителем (Stanford Research Systems SR810), на который также подавался опорный сигнал от модулятора. Управление процессом сканирования и регистрация сигнала осуществлялось с помощью компьютера. Спектры люминесценции эпитаксиальных пленок и кристаллов Er,Yb:YAB в области 1,5 мкм приведены на рис. 3. Спектры пленок в точности повторяют форму спектров кристаллов.

Исследование кинетики затухания люминесценции верхнего лазерного уровня $^4I_{13/2}$ иона Er^{3+} на длине волны 1530 нм проводилось при возбуждении лазерными импульсами длительностью 20 нс с длиной волны 975 нм. Кривая затухания люминесценции хорошо аппроксимировалась моноэкспоненциальной зависимостью с характерным временем жизни 320 ± 15 мкс. Измерения кинетики люминесценции показали соответствие времен затухания возбужденных уровней пленок и соответствующих времен в кристаллических образцах.

Результаты исследований показывают, что эпитаксиальные монокристаллические слои Er,Yb:YAB обладают спектроскопическими свойствами близкими свойствам монокристаллов Er,Yb:YAB и перспективны для получения лазерной генерации.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 19-12-00235.

Литература

1. Leonyuk, N. I. Growth and characterization of $RM_3(BO_3)_4$ crystals / N. I. Leonyuk, L. I. Leonyuk // Prog. Cryst. Growth Charact. – 1995. – Vol. 31. – P. 179–278.
2. Volkova, E. A. Thin Films and Glass–Ceramic Composites of Huntite Borates Family: A Brief Review / E. A. Volkova, D. A. Naprasnikov, N. I. Leonyuk // Crystals. – 2010. – Vol. 10. – P. 487.
3. Tolstik, N. Er,Yb:YAl₃(BO₃)₄ – efficient 1.5 μm laser crystal / N. Tolstik [et al.] // Appl. Phys. – 2009. – Vol. 97(2). – P. 357–362.

УДК 621.375.826

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ Er,Yb:GdMgB₅O₁₀

Горбаченя К.Н.¹, Кисель В.Э.¹, Лазарчук А.И.¹, Митина Д.Д.², Мальцев В.В.², Копорулина Е.В.², Волкова Е.А.², Кулешов Н.В.¹

¹ Научно-исследовательский центр оптических материалов и технологий БНТУ
Минск, Республика Беларусь

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Москва, Российская Федерация

Аннотация. Исследованы спектроскопические свойства кристаллов гадолиний-магниевого пентабората, легированных ионами Er^{3+} и Yb^{3+} . Определены спектры поперечных сечений поглощения. Исследованы кинетики люминесценции, определено время жизни энергетического уровня $^4I_{13/2}$ иона эрбия

Ключевые слова: спектроскопические свойства, кристалл, пентаборат, эрбий, иттербий.