

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

#### Литература

1. D. Garbuzov, I.Kudryashov, M. Dubinskii «Resonantly diode laser pumped 1.6- $\mu\text{m}$ -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:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – laser-related spectroscopy». Opt. Mat. Express. Vol. 3, № 11, 1992–2002 – (2013).
4. N. Ter-Gabrielyan [et al.] «Ultralow quantum-defect eye-safe Er:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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.<sup>1</sup>, Ивлев Г.Д.<sup>2</sup>, Гундина М.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский 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 «x» 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/см<sup>2</sup>.

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 ( $\sim 1$  мкм<sup>2</sup>) ионами  $\text{Cs}^+$  с энергией 1 кэВ (ток пучка 70 нА) и зондировании ионами  $\text{Bi}^+$  (25 кэВ, 1 нА). В процессе распыления регистрировались элементарные вторичные ионы  $\text{Ge}^-$  и  $\text{Si}^-$ , а также кластерные  $\text{Ge}_2^-$ , 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/см<sup>2</sup> формируется бинарная система  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  с параметром «x», уменьшающимся от

0,7 (поверхность ГС) до 0 примерно на глубине  $d = 0,5$  мкм, при постоянстве ( $x = 0,3$ ) в интервале  $d = 30\text{--}80$  нм. Полученные зависимости указывают на отсутствие нанокластеров германия в основном объёме сформированного субмикронного слоя с параметром  $x = f(d)$ .

Типичный вид осциллограмм сигналов отражения зондирующего излучения показан на рисунке 2. По скачку отражательной способности  $R(t)$  (методика проведения измерений описана в [6]), были определены порог плавления аморфной пленки и время существования жидкой фазы  $\tau$ . Отражательная способность Ge/Si гетероструктуры с началом действия лазерного импульса резко возрастает до  $R$  расплава Ge, затем через 0,1 мкс падает до промежуточного минимума и выходит на пониженный квазистационарный уровень, сохраняющийся около 0,3 мкс, затем падает ниже исходного в связи с окончанием фазовых превращений. Видно, что начальное значение и конечное значение отражательной способности различаются. Это может быть объяснено тем, что в результате плавления при ИЛО произошло перераспределение элементного состава гетероструктуры и образование твердого раствора.

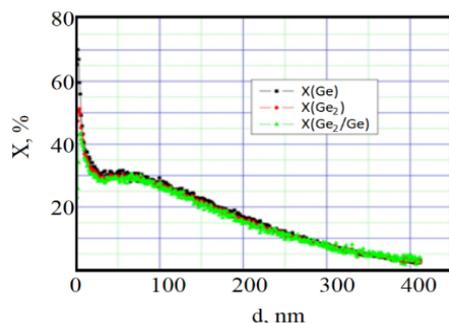


Рисунок 1 – Распределение германия по глубине в лазерно-модифицированной области гетероструктуры Ge/Si(100) при  $W = 3,6$  Дж/см<sup>2</sup>;  $X_{Si} = 1 - X_{Ge}$

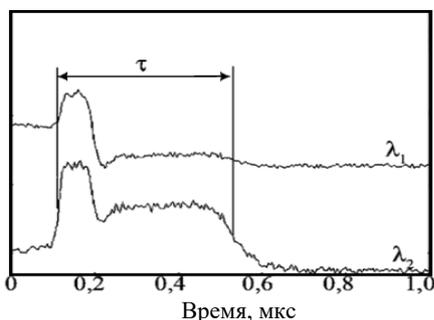


Рисунок 2 – Осциллограммы сигналов отражения зондирующего излучения  $R(t)$  при ИЛО образцов Ge/Si(100)

С помощью зондирования зоны ИЛО можно определить время существования жидкой фазы, но нельзя получить данные о глубине плавления. Для анализа распределения температур по глу-

бине, а также глубин проплавления было проведено численное моделирование лазерно-индуцированных в Ge/Si образцах фазовых превращений плавление ↔ отвердевание. Численное моделирование лазерно-индуцированных фазовых переходов в исследуемых ГС проводилось по методике, описанной в [7], для ситуации максимально приближенной к экспериментальной. Рассматривалось тепловое воздействие импульсов излучения рубинового лазера длительностью 80 нс с однородным распределением плотности энергии по области облучения с описанием происходящих при этом процессов плавление – отвердевание на основе численного решения задачи Стефана. Для рассматриваемых экспериментальных условий длина тепловой диффузии за время импульса существенно меньше диаметра лазерного пятна (4 мм) на образце толщиной 0,35 мм, что позволяет ограничиться одномерным приближением. Сравнение с экспериментальными данными показало разумное согласие расчётных и экспериментальных данных по времени существования жидкой фазы. Согласно данным моделирования при плотности энергии 3,6 Дж/см<sup>2</sup> облучения глубина проплавления достигает более 1 мкм, что существенно превышает толщину аморфной плёнки. При этом длительность фазы плавления достигает несколько микросекунд. Наблюдаемое экспериментально перераспределение Ge в гетероструктуре обусловлены субмикросекундными диффузионными процессами (Ge и Si), происходящими в расплавленном слое, толщина которого существенно превышает толщину исходной плёнки аморфного германия.

Методом ВИМС получены данные, характеризующих распределение элементов по глубине в Ge/Si гетероструктурах, модифицированных под действием моноимпульсного излучения рубинового лазера. На основе численного моделирования дана интерпретация установленных особенностей перераспределения германия и кремния в исследуемых ГС в условиях наносекундного воздействия лазерного излучения, инициирующего фазовые превращения плавление – отвердевание с сопутствующими жидкофазными процессами массообмена.

#### Литература

1. Ge-on-Si lasers for large-scale electronic-photonics integration / J. Liu, L.C. Kimerling, J. Michel // *Semicond. Sci. Technol.*, 2012, vol. 27, no. 9, pp. 094006(13).
2. Room-temperature electroluminescence from tensile strained double-heterojunction germanium pin LEDs on silicon substrates / M. Kaschel [et al.] // *Solid-State Electron.*, 2013. – Vol. 83. – Pp. 87–91.
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. 6–14.

4. Количественная калибровка и послойный анализ концентрации германия в гетероструктурах  $GexSi_{1-x}/Si$  методом вторично-ионной масс-спектропии / М.Н. Дроздов [и др.] // ФТП. – 2014. – Т. 48, № 8. – С. 1138–1146.

5. Новый подход к диагностике наноструктур в гетероструктурах  $GexSi_{1-x}/Si$  методом вторично-ионной масс-спектрометрии / М.Н. Дроздов [др.] // Письма в ЖТФ. – 2014. – Т. 40, № 14. – С. 36–46.

6. Оптическая диагностика лазерно-индуцированных фазовых превращений в тонких пленках

германия на кремнии, сапфире и кварце / Г.А. Новиков [и др.] // ЖТФ. – 2015. – Т. 85, № 3. – С. 89–95.

7. Моделирование лазерно-индуцированных процессов в пленках германия на полупроводниковых подложках / Е.И. Гацкевич, М.А. Гундина, М.А. Князев // Материалы IX-й Международной научно-практической конференции "Инновационные технологии обучения физико-математическим и профессионально-техническим дисциплинам", Мозырь, 21–24 марта 2017 г. – Мозырь, МГПУ им. И.П. Шамякина, 2017. – С. 126–127.

УДК 004

## ПРОФИЛЬ ЯРКОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЯ ВДОЛЬ ЛИНИИ

Гундина М.А., Кондратьева Н.А., Грузд Н.А.

*Белорусский национальный технический университет*

*Минск, Республика Беларусь*

Качественный контроль продукции выполняется автоматическими методами анализа изображения. При обработке изображений, полученных приборами, решается обширный круг задач, таких как улучшение качества изображений; измерение числовых характеристик; распознавание некоторых частей, сжатие изображений и др. Современные устройства формирования изображений позволяют решать комплекс технических и научных задач [1–3], требующих синтеза и анализа методов обработки, бинаризации, классификации изображений.

Развитие микроэлектроники позволяет повысить сложность применяемых алгоритмов для решения прикладных задач. В зарубежной и отечественной литературе [4–6] приводится большой класс алгоритмов обработки цифровых изображений, который может быть применен для решения задач производства, приводится набор вопросов сегментации, распознавания образов, описания и представления деталей, морфологического анализа изображения [5–6]. Однако они предназначены для решения научных задач. В то же время, существует необходимость в разработке алгоритмов, которые можно использовать в условиях производства и таких алгоритмов, которые будут интересны и полезны современным инженерам.

Для количественного анализа изображения как двумерного массива яркости часто используется одномерный профиль поверхностной яркости.

Под профилем изображения вдоль некоторой линии будем понимать функцию, характеризующую распределение яркости изображения вдоль этой линии.

В работе рассматривается разработанная программа, реализующая построение профиля изображения для последующей его сегментации.

Сегментация делит изображение на его составные части и объекты. Например, при осуществлении автоматического контроля при сборке узлов радиоэлектронной аппаратуры важно

уметь выявлять определенные дефекты изготавливаемых приборов, таких как отсутствие компонентов или наличие разрывов контактных дорожек на плате.

После того как одномерный массив значений яркости профиля сформирован, его анализ осуществляется стандартными компьютерными средствами и позволяет автоматически выделять различного рода особые точки функции профиля (определить резкое изменение цвета, контуры изображения).

Получение и анализ профиля вдоль линии используется в различных областях науки и техники. Например, анализ интенсивности свечения изображений, полученных тепловизором, позволяет получить данные об изображении, основываясь на значениях профиля яркости.

Профиль вдоль некоторой линии используется также для считывания штрихового кода изделия [7]. Поскольку метод кодирования сигнала в штриховых кодах заключается в определенной последовательности чередования штрихов и пробелов различной ширины, следовательно, профиль изображения содержит всю необходимую информацию для того, чтобы считать штриховой код.



Рисунок 1 – Пример штрихового кода

На профиле заметны промежутки постоянного значения яркости штрихи кода, а также положения начала и конца штриховой последовательности (границы объекта).

Построение профиля яркости используется при создании систем искусственного интеллекта, например, при анализе распознавания микропараметров клеточной структуры годовичных колец хвойных деревьев [8].