



Рисунок 2 – Смесительно-дозировочная установка низкого давления



Рисунок 3 – Комплекс автоматизированного оборудования

Разработанный автоматизированный комплекс состоит из заливочно-смесительной установки и стола порталного типа с устройством вертикального перемещения смесительного узла. Процесс производства качественного уплотнительного контура заключается в нанесении по заданной траектории трехкоординатным роботом-манипулятором жидкой реакционноспособной композиции при помощи заливочно-смесительной установки, обеспечивающей необходимую точность дозирования и высокое качество смешения.

Управление установкой осуществляется с помощью микропроцессорной системы, реализованной на однокристальном микроконтроллере фирмы MICROCHIP. Разработанные алгоритмы,

УДК 621.315.592

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЛАВЛЕНИЯ И ОТВЕРДЕВАНИЯ, ИНИЦИИРУЕМЫХ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЯХ GeSi ВОЗДЕЙСТВИЕМ НАНОИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Гацкевич Е.И.<sup>1</sup>, Ивлев Г.Д.<sup>2</sup>, Малевич В.Л.<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>Институт физики НАН Беларуси им. Б.И. Степанова, Минск, Республика Беларусь

В условиях нанопульсной лазерной модификации гетеросистем  $Ge_xSi_{1-x}/Si$  на стадии отвердевания возможно образование ячеистой

математическое обеспечение и оригинальная управляющая программа позволяют работать установке в автоматизированном режиме, выбирать и задавать технологические параметры, в том числе производительность, температуру, соотношение компонентов и время заливки. Современная электронная компонентная база и оригинальное системное программное обеспечение позволяет производить нанесение уплотнительного контура по любой заданной геометрической траектории.

В последнее время широким спросом стали пользоваться оборудование и технология для изготовления трехслойных панелей и других клееных конструкций (рисунок 4). Сэндвич-панели используются для строительства недорогого качественного жилья, теплых домов, гостиниц и кемпингов, а также сервисных и торговых помещений.



Рисунок 4 – Линия для производства сэндвич-панелей

Разработанный комплекс оборудования предназначен для производства сэндвич панелей с наполнителем из пенополиуретана, минеральной ваты, пенополистирола с внешним покрытием из пластика, металла и изготовления клееных деревянных конструкций, бруса, балки и др.

структуры [1]. При этом размер ячейки зависит от состава гетеросистемы, типа подложки и режима лазерной обработки. В данной работе при-

ведены результаты численного моделирования процессов нагрева, плавления и кристаллизации при облучении наносекундными лазерными импульсами структур  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , выращенных на Si подложке, и обсуждается механизм формирования в них ячеистой структуры, связанный с эффектом концентрационного переохлаждения.

Рассматривалось воздействие импульсов излучения рубинового лазера длительностью 80 нс с однородным распределением плотности энергии по области облучения. Конкретные расчеты проводились для образца  $\text{Si}_{0,5}\text{Ge}_{0,5}/\text{Si}$  (толщина эпитаксиального слоя SiGe 2 мкм). Согласно экспериментальным данным именно для этого типа структур наблюдались наиболее выраженная ячеистая структура.

Моделирование динамики нагрева, плавления и отвердевания гетероструктуры проводилось на основе численного решения задачи Стефана. Для рассматриваемых экспериментальных условий длина тепловой диффузии за время импульса существенно меньше диаметра лазерного пятна (4 мм), что позволяет ограничиться одномерным приближением.

В этой постановке задачи нелинейное неоднородное уравнение теплопроводности с условием Стефана на границе фазового перехода имеет вид

$$\rho(x, T)(c(x, T) + L\delta(T - T_m)) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k(x, T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q(x, t),$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0,$$

$$T|_{x=D} = T|_{t=0} = T_0,$$

где  $T$  – температура,  $T_0 = 300$  К, координата  $x$  направлена вглубь образца,  $\rho$  – плотность,  $c$  – удельная теплоемкость,  $k$  – коэффициент теплопроводности,  $L$  – скрытая теплота плавления,  $T_m$  – температура плавления,  $\delta(T)$  – дельта функция Дирака. Функция  $Q(x, t)$  описывает выделение тепла при поглощении лазерного излучения:

$$Q(x, t) = \alpha(T)(1-R)q(t) \exp\left\{-\int_0^x \alpha(T(x')) dx'\right\},$$

здесь  $\alpha$  и  $R$  – коэффициенты поглощения и отражения оптического излучения.

Форма лазерного импульса задавалась выражением:

$$q(t) = \frac{W}{\tau_p} \sin^2(\pi t / 2\tau_p),$$

где  $W$  и  $\tau_p$  – плотность энергии и длительность лазерного импульса.

В расчете учитывались температурные зависимости оптических и теплофизических параметров слоёв, а также зависимость их от фазового состояния. Теплофизические параметры  $\text{Si}_{0,5}\text{Ge}_{0,5}$ , кроме коэффициента теплопроводности в твердой фазе, определялись по формуле  $A_{\text{GeSi}} = A_{\text{Ge}}x + A_{\text{Si}}(1-x)$ . Коэффициент теплопроводности  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  в твердой фазе брался из данных [2]. Для коэффициента отражения использовались экспериментальные данные, полученные в настоящей работе,  $R=38,2\%$  в твердой фазе и  $76,7\%$  – в жидкой. Уравнение теплопроводности решалось в конечных разностях методом прогонки по неявной разностной схеме.

Согласно результатам расчета (рисунок 1) при изменении  $W$  от 0,25 до 2,5 Дж/см<sup>2</sup> температура возрастает от 1500 до 2400 К. Расчетные данные по времени существования расплава хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными из измерений методом оптического зондирования. Для сравнения приведены аналогичные данные для Si и Ge. Видно, что  $\tau$  в  $\text{Ge}_{0,5}\text{Si}_{0,5}/\text{Si}$  существенно выше, чем в монокристаллических образцах Si и Ge, что связано с исключительно низкой теплопроводностью твердого раствора.

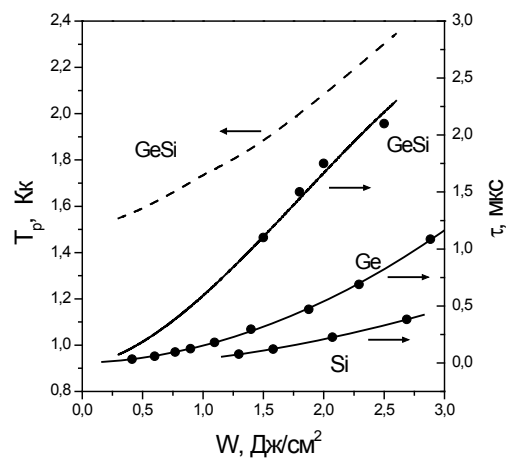


Рисунок 1 – Пиковая температура поверхности ( $T_p$ ) и время существования жидкой фазы ( $\tau$ ) в зависимости от плотности энергии облучения.

● – экспериментальные данные

Экспериментально наблюдаемое образование ячеистой структуры при лазерной обработке гетеросистем  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , скорее всего, связано с неустойчивостью плоского фронта кристаллизации, обусловленной концентрационным переохлаждением. Механизм данного явления рассматривался в работе [3] и может быть объяснен следующим образом. Коэффициент сегрегации примеси (в данном случае Ge), определяемый как отношение концентрации примеси в кристалле к

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/см<sup>2</sup> 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/см<sup>2</sup> 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.<sup>1</sup>, Скопцов Н. А.<sup>1</sup>, Маляревич А. М.<sup>1</sup>, Юмашев К. В.<sup>1</sup>, Дымшиц О. С.<sup>2</sup>, Жилин А. А.<sup>2</sup>, Алексеева И. П.<sup>2</sup>, Шемчук Д. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> НИЦ Оптических материалов и технологий, Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup> НИТИОМ ВНЦ «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

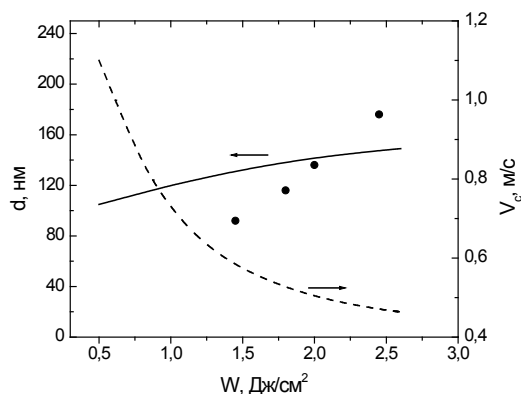


Рисунок 2 – Рассчитанные зависимости среднего размера ячеек (сплошная линия) и скорости движения фронта кристаллизации (штриховая кривая) от плотности энергии лазерного облучения; • - результат эксперимента [1]

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.