

# Использование кластерных вторичных ионов $\text{Ge}_2^-$ , $\text{Ge}_3^-$ для повышения разрешения по глубине при послойном элементном анализе полупроводниковых гетероструктур GeSi/Si методом ВИМС

© М.Н. Дроздов<sup>¶</sup>, Ю.Н. Дроздов, Д.Н. Лобанов, А.В. Новиков, Д.В. Юрасов

Институт физики микроструктур Российской академии наук,  
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 15 июля 2009 г. Принята к печати 24 августа 2009 г.)

Обсуждаются новые возможности повышения разрешения по глубине при послойном элементном анализе полупроводниковых гетероструктур GeSi/Si методом вторично-ионной масс-спектрометрии на установке TOFSIMS-5. С использованием оптического профилометра Talysurf CCI-2000 для контроля формы и шероховатости дна кратера распыления проведен детальный анализ вкладов артефактов ионного распыления и аппаратурных эффектов в разрешение по глубине. Установлено, что использование ионов  $\text{Cs}^+$  для распыления позволяет минимизировать развитие шероховатости при послойном анализе структур GeSi/Si вплоть до глубины 1–1.5 мкм. Показано, что использование вторичных кластерных ионов  $\text{Ge}_2^-$  и  $\text{Ge}_3^-$  вместо  $\text{Ge}_1^-$  и  $\text{Ge}^+$  позволяет снизить величину переходных областей в регистрируемых профилях.

## 1. Введение

Необходимым условием послойного элементного анализа полупроводниковых наноструктур методом вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) является достижение высокого разрешения по глубине на уровне 1–1.5 нм. Основные источники погрешности, определяющие разрешение по глубине, можно разделить на две различные группы [1–4]. Первая, это информационная глубина метода, определяемая глубиной выхода регистрируемых вторичных ионов. Вторая группа включает достаточно многочисленные артефакты ионного распыления, среди которых основную роль играют атомное перемешивание в каскаде столкновений и развитие шероховатости в кратере распыления. Способы минимизации этих погрешностей для каждого типа структур требуют отдельного исследования. Кроме того, важную роль могут играть инструментальные погрешности, прежде всего наклон дна кратера ионного распыления, вклад которого в разрешение по глубине зачастую трудно выделить на фоне „наведенной“ шероховатости. Наиболее детально процесс послойного анализа изучен для установок ВИМС с магнитосекторным и квадрупольным масс-анализаторами (обеспечивающими динамический режим работы ВИМС). Установки ВИМС с времяпролетным масс-анализатором первоначально создавались для анализа поверхности в статическом режиме [5]. Лишь недавно они были модернизированы и для проведения послойного анализа [6–8], однако их возможности в этом режиме работы до сих пор мало изучены. В данной работе проведено систематическое исследование вклада отдельных погрешностей в разрешение по глубине при послойном анализе полупроводниковых гетероструктур SiGe/Si методом ВИМС на установке TOFSIMS-5 с времяпролетным масс-анализатором и рассмотрены новые способы минимизации.

## 2. Методика эксперимента

Послойный элементный анализ проводился на установке ВИМС TOFSIMS-5 фирмы IONTOF (Германия) с времяпролетным масс-анализатором. В этой установке используется импульсный режим работы ионных пушек и масс-анализатора, в котором разделены функции двух ионных пучков для анализа и распыления. Распыление проводится ионами  $\text{O}_2^+$  или  $\text{Cs}^+$  с энергиями от 0.5 до 2 кэВ, величина тока составляет сотни нА. Типичный размер раstra распыляющего пучка составляет  $500 \times 500$  мкм<sup>2</sup>. Для анализа используются ионы тяжелого элемента  $\text{Bi}^+$  с массой 209 а.е.м. с энергией 25 кэВ, что позволяет реализовать высокую чувствительность для анализа практически любых тяжелых ионов. Величина тока пучка ионов  $\text{Bi}$  в импульсе не превышает 1 пА, длительность импульса 1 нс. При этих условиях в одном зондирующем импульсе содержится около 500 ионов  $\text{Bi}$ , и за типичное время анализа в десятки минут ион  $\text{Bi}$  дважды не попадает в одну и ту же точку. Это условие составляет основу статического режима ВИМС [5]. Не менее важным оно оказывается в динамическом режиме послойного анализа. Здесь это означает, что анализирующий пучок с высокой энергией практически не нарушает поверхность, а формирование измененного приповерхностного слоя и результирующее разрешение по глубине определяются низкоэнергетическими ионными пучками. Заметим, что в динамическом режиме послойного анализа достаточно выполнения менее жесткого требования к току пучка ионов  $\text{Bi}$  — скорость распыления ионами  $\text{Bi}$  должна быть много меньше скорости распыления ионами  $\text{Cs}^+$  или  $\text{O}_2^+$  [6]. Как правило, это условие позволяет использовать более высокие значения тока пучка ионов  $\text{Bi}$ , чем в статическом режиме ВИМС.

Размер раstra ионов  $\text{Bi}$  составляет около 20% от раstra распыляющего пучка. Система юстировки ионных пучков в TOFSIMS-5 позволяет с высокой точностью

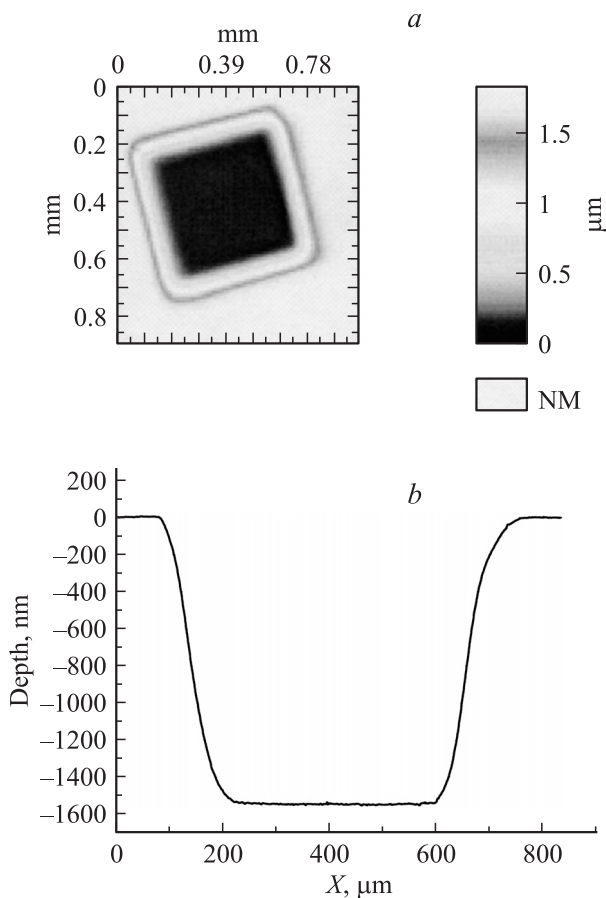
<sup>¶</sup> E-mail: drn@ipm.sci-nnov.ru

позиционировать анализирующий пучок в центре кратера распыления, что минимизирует инструментальные погрешности при послойном анализе.

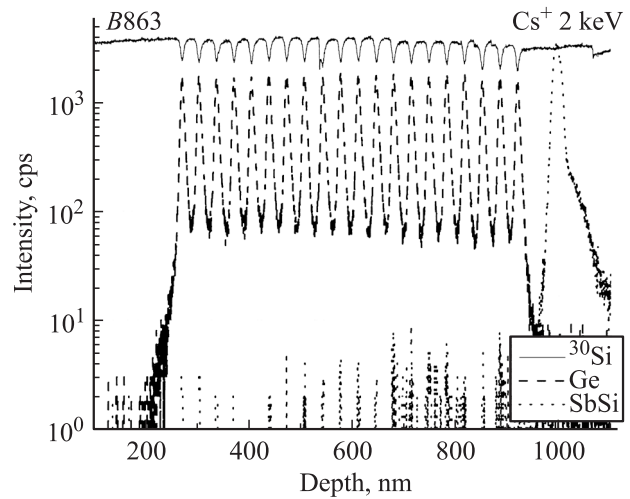
Детальный анализ формы и профиля кратера распыления, а также характеристик шероховатости в зоне кратера и на исходной поверхности проводился на оптическом интерференционном профилометре Talysurf CCI-2000.

### 3. Результаты эксперимента

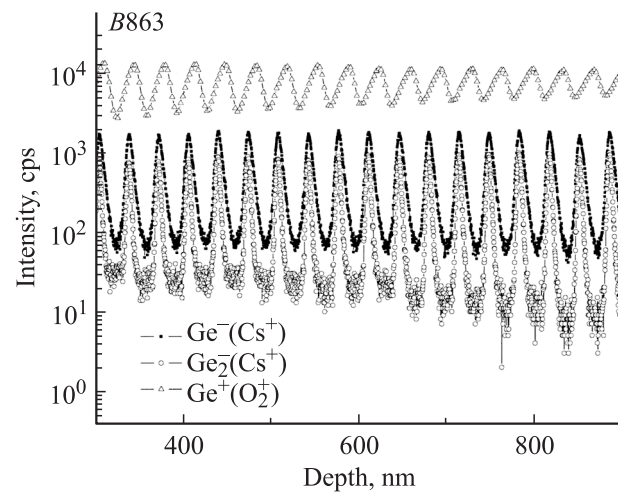
На рис. 1 показаны форма и профиль дна кратера распыления полупроводниковой структуры ионами  $O_2^+$ , падающими на поверхность под углом  $45^\circ$ . Установлено, что в установке достигается высокая степень коррекции инструментальной погрешности: наклон дна кратера не превышает 1–1.5% от глубины травления  $Z$ . Размер области, анализируемой пучком ионов  $Vi^+$ , составляет, как правило, пятую часть от кратера травления. В данном случае кратер составлял  $500 \times 500$  мкм, а анализируемая область  $100 \times 100$  мкм. Поэтому наклон дна кратера будет вносить дополнительную погрешность в разрешение по глубине  $D_Z$ , не превышающую  $D_Z = 0.2\%Z$ .



**Рис. 1.** Форма (а) и профиль дна (b) кратера травления в структуре, полученные на оптическом профилометре Talysurf CCI-2000.



**Рис. 2.** Профили элементов в структуре B863,  $\{Ge_xSi_{1-x}/Si\}/Si(100)$ .



**Рис. 3.** Профили вторичных ионов  $Ge^+$ ,  $Ge_1^-$ ,  $Ge_2^-$ .

На рис. 2,3 приведено распределение интенсивности линий  $^{30}Si$ , Ge и Sb (кластер SbSi) в многослойной структуре B863 с двадцатью чередующимися слоями  $Ge_xSi_{1-x}$  и Si. Прежде всего обращает на себя внимание разное поведение модуляции  $Ge^+$  (распыление ионами  $O_2^+$ ) и  $Ge^-$  (распыление  $Cs^+$ ) (рис. 3). При распылении ионами  $O_2^+$  модуляция элементов снижается с глубиной анализа, что может свидетельствовать о развитии шероховатости в зоне анализа при распылении. В то же время при распылении ионами  $Cs^+$  модуляция  $Ge_1^-$  сохраняет свою величину на всю глубину анализа. Предположение о различной степени развития шероховатости при распылении ионами  $Cs^+$  и  $O_2^+$  подтверждено прямыми измерениями величины среднеквадратичной шероховатости  $S_q$  на профилометре Talysurf. На исходной поверхности структуры B863  $S_q = 0.75$  нм. На дне кратера травления ионами  $Cs^+$  ( $Z = 1.3$  мкм) шероховатость возрастает

незначительно  $S_q = 1.15$  нм. При распылении ионами  $O_2^+$  ( $Z = 1.1$  мкм) изменения значительно сильнее —  $S_q = 3.9$  нм. Угол падения ионов  $O_2^+$  и  $Cs^+$  на поверхность был одинаковым и составлял  $45^\circ$ . Отметим, что развитие шероховатости полупроводниковых структур на основе Si с использованием наклонных пучков ионов  $O_2^+$  отмечалось и ранее в работах [9–11]. Использование вертикального падения ионов  $O_2^+$  позволяло минимизировать этот эффект [9–11]. Однако нам не известны работы, в которых подобные результаты достигались с использованием наклонных пучков ионов  $Cs^+$ . Различия в развитии шероховатости с использованием ионов  $O_2^+$  и  $Cs^+$  мы наблюдали и при анализе полупроводниковых гетероструктур других типов. Таким образом, использование ионов  $Cs^+$  для распыления позволяет значительно снизить влияние развития шероховатости на разрешение по глубине при послойном анализе полупроводниковых гетероструктур вплоть до  $Z = 1–1.5$  мкм.

При условии минимизации инструментальных погрешностей и процесса развития шероховатости разрешение по глубине определяется главным образом процессами атомного перемешивания в каскаде столкновений и информационной глубиной метода. Известно [1–4], что влияние процессов атомного перемешивания на величину  $D_Z$  может быть снижено путем уменьшения энергии распыляющих ионов до 1 кэВ, а также вариации их массы и угла падения. В данной работе мы хотим обратить внимание на новую возможность повышения разрешения по глубине для полупроводниковых гетероструктур, основанную на использовании кластерных вторичных ионов. Рис. 3 демонстрирует интересную особенность профиля элементов в структуре B863 — модуляция кластерных ионов  $Ge_2^-$  возрастает с глубиной в отличие от постоянного уровня для ионов  $Ge_1^-$ . Более детальная информация о профилях  $Ge_{1-3}$  может быть получена из рис. 4, 5 для структуры SiGe/Si R8. На рис. 4 видно существенное различие профилей  $Ge_1$ ,  $Ge_2$  и  $Ge_3$  в структуре R8, свидетельствующее о заметном повышении разрешения по глубине для ионов  $Ge_2$  и  $Ge_3$ . Некоторые количественные оценки, характеризующие величину  $D_Z$ , можно получить из рис. 5, где приведено нормированное на максимум распределение интенсивностей  $Ge_{1-3}$  для последнего (считая от поверхности), пятого слоя SiGe в структуре. Ширина профиля Ge на полувысоте (FWHM) снижается от 7 нм для  $Ge_1$  до 4 нм ( $Ge_2$ ) и 3 нм ( $Ge_3$ ). Заметим, что оценка  $D_Z$  по ширине профиля  $\delta$ -слоя или по области перехода на уровне 0.2–0.8 от максимального значения является наиболее распространенным способом для электронной оже-спектроскопии. Для метода ВИМС характерны очень большие динамические диапазоны изменения концентрации на несколько порядков величины. Поэтому часто используется дополнительная характеристика — размер области спада профиля на один порядок величины —  $L_{decay}$  [12]. Для структуры R8 мы получили  $L_{decay} = 5.8$  нм для ( $Ge_1$ ), 2.5 нм ( $Ge_2$ ) и 1.8 нм ( $Ge_3$ ). Совершенно другой результат был по-

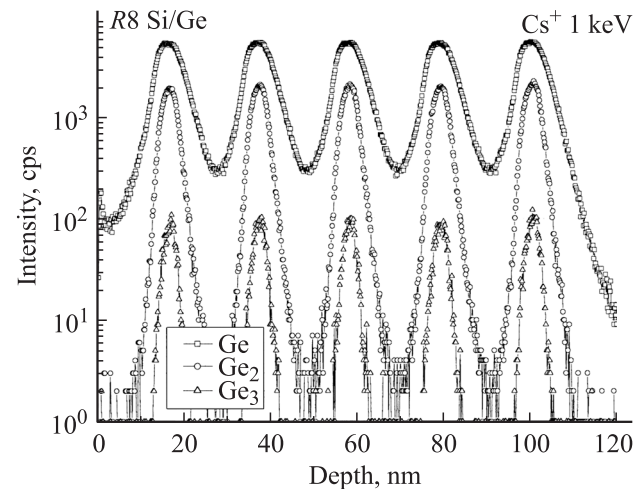


Рис. 4. Профили вторичных ионов  $Ge_{1-3}^-$  в структуре R8, 5{Ge/Si}/Si(100).

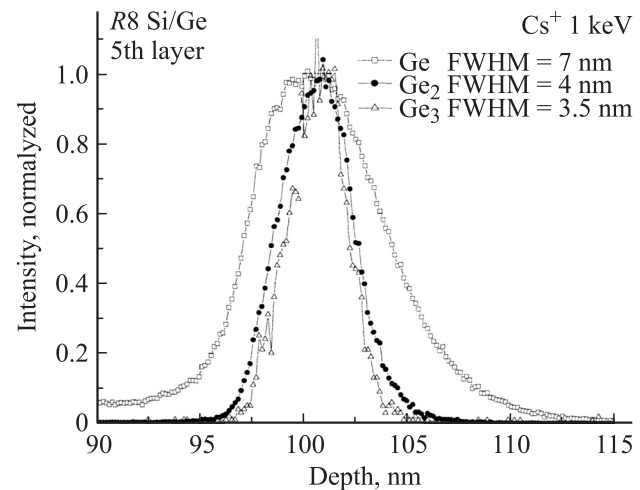


Рис. 5. Профили нормированной интенсивности ионов  $Ge_{1-3}^-$  в структуре R8.

лучен для структуры R8 при распылении ионами  $O_2^+$  в положительной моде регистрации. Для первого слоя Ge  $L_{decay}$  оказывается практически одинаковой для ионов  $Ge_1^+$  и  $Ge_2^+$  и равна 5.8 нм, для пятого слоя она возрастает и составляет 9 нм для  $Ge_1^+$  и  $Ge_2^+$ . Возвращаясь к рис. 3, можно утверждать, что послойный анализ с использованием вторичных ионов  $Ge_2^-$  с повышенным разрешением по глубине позволяет более детально характеризовать структуру B863. Спад профиля  $Ge_2$  от подложки к поверхности пленки может быть обусловлен накапливающимися нарушениями планарного процесса роста многослойной структуры.

#### 4. Заключение

В работе проведено систематическое исследование вклада отдельных погрешностей в разрешение по глу-

бине при послойном анализе полупроводниковых гетероструктур методом ВИМС на установке TOF.SIMS-5. Показано, что наклон дна кратера травления вносит дополнительную погрешность в разрешение по глубине, не превышающую 0.2% от глубины анализа. Использование ионов  $\text{Cs}^+$  для распыления структур GeSi/Si позволяет снизить развитие шероховатости по сравнению с ионами  $\text{O}_2^+$ . При распылении ионами  $\text{Cs}^+$  на глубине 1.3 мкм среднеквадратичная шероховатость  $S_q$  возрастает незначительно от 0.75 до 1.15 нм. Для ионов  $\text{O}_2^+$  развитие шероховатости оказывается более существенным — 3.9 нм. Впервые обнаружено, что использование кластерных вторичных ионов  $\text{Ge}_2^-$  и  $\text{Ge}_3^-$  может повысить разрешение по глубине при послойном анализе структур GeSi/Si по сравнению с элементарными ионами  $\text{Ge}_1^-$  и положительными ионами  $\text{Ge}^+$ .

Наблюдаемое повышение разрешения по глубине с использованием вторичных кластерных ионов не может быть объяснено в рамках существующей MRI модели Хоффмана (Mixing–Roughness–Information depth). Полученные результаты свидетельствуют о более сложной картине процессов распыления тяжелых комплексных ионов и показывают новые перспективы послойного анализа полупроводниковых структур методом ВИМС.

Работа поддерживалась РФФИ, проекты № 07-02-00163 и 09-02-00389 и программами президиума РАН.

## Список литературы

- [1] S. Hofmann. J. Vac. Sci. Technol., A, **9**, 1466 (1991).
- [2] S. Hofmann. Rep. Progr. Phys., **61**, 827 (1998).
- [3] М.Н. Дроздов, В.М. Данильцев, Ю.Н. Дроздов, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин. Письма ЖТФ, **27(3)**, 59 (2001).
- [4] S. Hofmann. Appl. Surf. Sci., **241**, 113 (2005).
- [5] L.V. Vaeck, A. Adriaens, R. Gijbels. Mass Spectrometry Rev., **18**, 1 (1999).
- [6] T. Grehl, R. Mollers, E. Niehuis. Appl. Surf. Sci., **203-204**, 277 (2003).
- [7] D. Simons, K. Kim, R. Benbalagh, J. Bennett, A. Chew, D. Gehre, T. Hasegawa, C. Hitzman, J. Ko, R. Lindstrom, B. MacDonald, C. Magee, N. Montgomery, P. Peres, P. Ronsheim, S. Yoshikawa, M. Schuhmacher, W. Stockwell, D. Sykes, M. Tomita, F. Toujoui, J. Won. Appl. Surf. Sci., **252**, 7232 (2006).
- [8] T. Grehl, R. Mollers, E. Niehuis, D. Rading. Appl. Surf., **255**, 1404 (2008).
- [9] P. Chakraborty. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B, **266**, 1858 (2008).
- [10] K. Wittmaack. J. Vac. Sci. Technol. B, **16**, 2776 (1998).
- [11] V.K.F. Chia, G.R. Mount, M.J. Edgell, C.W. Magee. J. Vac. Sci. Technol. B, **17**, 2345 (1999).
- [12] W. Vandervorst. Appl. Surf. Sci., **255**, 805 (2008).

Редактор Л.В. Беляков

## Cluster secondary ions $\text{Ge}_2^-$ and $\text{Ge}_3^-$ for enhancement of depth resolution at SIMS depth profiling of GeSi/Si heterostructures

M.N. Drozdov, Yu.N. Drozdov, D.N. Lobanov,  
A.V. Novikov, D.V. Yurasov

Institute for Physics of Microstructures,  
Russian Academy of Sciences,  
603950 Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract** We discuss new possibilities for depth resolution enhancement at SIMS depth profiling of GeSi/Si heterostructures using a TOF.SIMS-5 spectrometer. A detail analysis of sputtering artifacts and instrumental factor contribution into the depth resolution is performed by means of Talysurf CCI-2000 optical profilometer measurements of sputtering crater surface. It is determined that  $\text{Cs}^+$  ion sputtering allows to minimize the growth of surface roughness during the depth profiling of GeSi/Si structures up to depth of 1–1.5 microns. We show that registration of cluster secondary ions  $\text{Ge}_2^-$  and  $\text{Ge}_3^-$  instead of  $\text{Ge}_1^-$  and  $\text{Ge}^+$  allows to reduce the width of junction regions in measured profiles.