

06

## Вольт-амперные характеристики $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ( $0.02 < x < 0.15$ ) гетеродиодов, изготовленных прямым сращиванием

© И.В. Грехов, Е.И. Белякова, Л.С. Костина, А.В. Рожков,  
Ш.А. Юсупова, Л.М. Сорокин, Т.С. Аргунова, Н.В. Абросимов,  
Н.А. Матчанов, J.H. Je

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
Санкт-Петербург, Россия  
Institute of Crystal Growth, 12489 Berlin, Germany  
Физико-технический институт АН Республики Узбекистан, Ташкент  
Pohang University of Science and Technology; Pohang, 790–784, Korea  
E-mail: konst@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 14 мая 2008 г.

Приведены результаты исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ)  $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  гетеродиодов, сформированных прямым сращиванием пластин кремния  $n$ -типа проводимости ориентации (111) с пластинами  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  той же ориентации  $p$ -типа проводимости с содержанием германия от 2 до 15 at.%. Показано, что с ростом концентрации германия  $N_{\text{Ge}}$  в исходных кристаллах  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  плотность дефектов кристаллической решетки увеличивается, что приводит к уменьшению времени жизни неосновных носителей в базе гетеродиода, увеличению рекомбинационной составляющей прямого тока и дифференциального сопротивления ВАХ. Однако для всех  $N_{\text{Ge}} \leq 15$  at.% в диапазоне рассматриваемых плотностей токов ( $1 \text{ mA/cm}^2 \div 200 \text{ A/cm}^2$ ) ВАХ гетеродиодов  $n\text{-Si}/p\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  является удовлетворительной, что позволяет сделать вывод о перспективности использования технологии прямого сращивания для формирования  $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  гетероструктур.

PACS: 72.15.Eb, 61.72.Lk, 61.72.Ff, 81.05.Hd

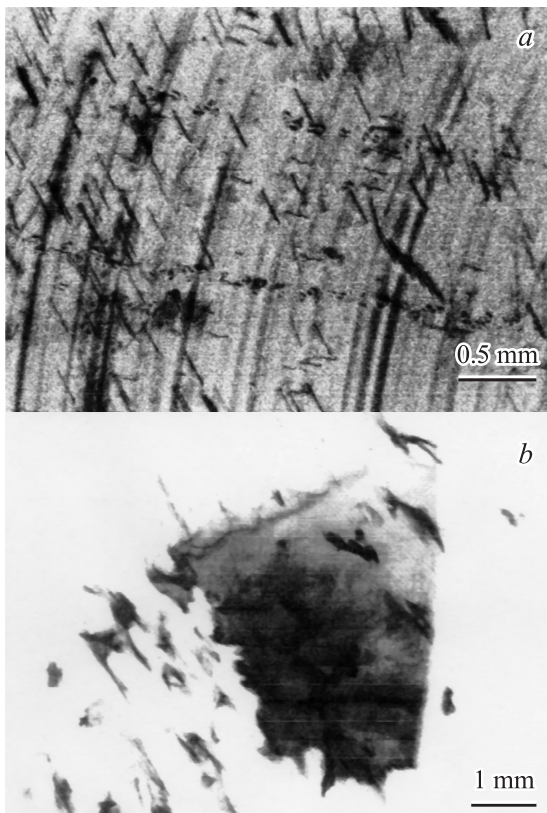
Одним из направлений развития современной микроэлектроники является создание и все более широкое использование приборов различного назначения на основе твердых растворов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ . Достоинствами  $\text{SiGe}$  устройств в сравнении с  $\text{GaAs}$  приборами является сопоставимость с ними по частотным характеристикам при меньшей стоимости, а с приборами на основе кремния — существенное возрастание рабочих

частот и линейности характеристик при незначительном (на 10–20%) увеличении стоимости. При изготовлении биполярных транзисторов с SiGe базой формируется гетеропереход Si/SiGe (отсюда название прибора: биполярный транзистор с гетеропереходом — Heterojunction Bipolar Transistor, HBT). Уменьшение ширины запрещенной зоны материала базы приводит к увеличению эффективности эмиттера, благодаря чему увеличивается коэффициент усиления и уменьшается потребляемый ток [1–3]. Кроме того, сокращается время переключения и снижается уровень шумов.

Для изготовления слоев  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  на кремниевых подложках используются главным образом эпитаксиальные технологии. Структурное качество эпитаксиальных композиций ограничено высокой плотностью дислокаций кристаллической решетки, прорастающих от интерфейса в SiGe слой [3]. Ранее нами впервые было показано [4], что для изготовления  $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  структур может быть использована достаточно простая и малоэнергоёмкая технология прямого сращивания, позволяющая при формировании композиций использовать исходные материалы (в данном случае Si и  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ) с заданными структурными и электрическими свойствами [5]. Дислокации несоответствия в таких структурах сосредоточены в узком слое вблизи интерфейса [6,7]. Создание слоя SiGe наноразмерной толщины обеспечивается применением метода Smart-Cut, химико-механической полировкой и окислением с последующим травлением окисла.

В настоящей работе приводятся результаты исследования электрических характеристик гетеродиодов  $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , сформированных прямым сращиванием, и анализируется их зависимость от структурных свойств кристаллов  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  с различным содержанием германия ( $0.02 < x < 0.15$ ).

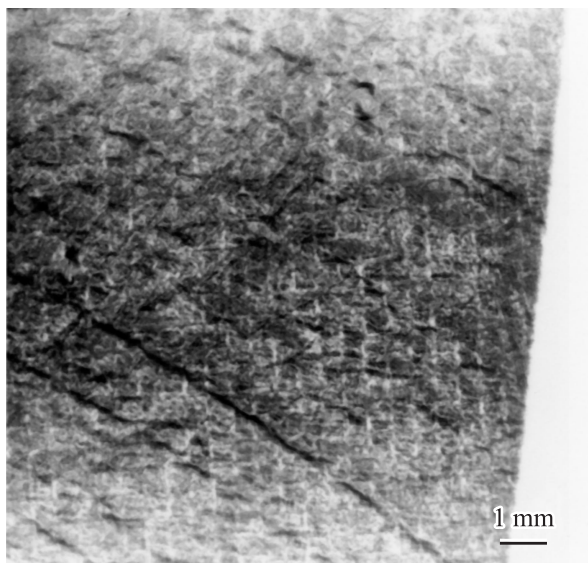
Пластины кремния толщиной  $\sim 350 \mu\text{m}$  ориентации (111)  $n$ -типа проводимости с удельным объемным сопротивлением  $\rho_v \sim 5 \Omega \cdot \text{cm}$  были изготовлены из кристаллов, выращенных методом Чохральского. Они срачивались с пластинами  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  той же толщины и ориентации  $p$ -типа проводимости, выращенных методом Чохральского с содержанием германия  $N_{\text{Ge}} = 2.5, 5.0, 8.0 \text{ at. } \%$ , и методом бестигельной зонной плавки (БЗП) с  $N_{\text{Ge}} = 15 \text{ at. } \%$ . Удельное объемное сопротивление составляло величину  $\rho_v \sim 19.0, 5.2, 6.5$  и  $76 \Omega \cdot \text{cm}$  соответственно. Прямое сращивание проводилось по модифицированной технологии [6], которая обеспечивала формирование рельефного интерфейса, способствовавшего уменьшению плотности дислокаций решетки, снижению



**Рис. 1.** Рентгеновские изображения дефектов структуры в пластинах  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ :  $a$  —  $N_{\text{Ge}} = 5$  at.%;  $b$  —  $N_{\text{Ge}} = 8$  at.%. Отражения получены в белом синхротронном излучении.

упругих напряжений и ликвидации газовых пузырей [6,8]. Для измерения ВАХ гетероперехода из структур вырезались образцы диаметром  $\sim 1 \text{ cm}^2$ , на поверхности которых изготавливались никелевые контакты: со стороны пластины  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  — сплошные, а со стороны кремния — в виде круглых площадок диаметром  $200 \mu\text{m}$ .

Структурное качество исходных пластин  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  и сформированных пластин  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  и сформированных сращиванием композиций  $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  изучалось с помощью



**Рис. 2.** Рентгеновская топограмма, полученная от гетероструктуры  $\text{Si}/\text{Si}_{0.95}\text{Ge}_{0.05}$  в белом синхротронном излучении.

рентгеновской дифракционной топографии в белом синхротронном излучении. Эксперименты проводились на станции 7В2 (Рентгеновская микроскопия), Pohang Light Source, г. Поханг, Корея. На рис. 1 показаны изображения типичных дефектов кристаллической структуры, обнаруженных в кристаллах с  $N_{\text{Ge}} = 5 \text{ at.}\%$  (a) и  $8 \text{ at.}\%$  (b). С ростом концентрации германия плотность дефектов решетки увеличивается и дефектная структура усложняется, развиваясь от полос сегрегации Ge при  $x \sim 0.02$  до большеугловой мозаичности при  $x \sim 0.08$ . Распределение дислокаций в мозаичных структурах является существенно неоднородным: плотность дислокаций изменяется от  $> 10^6 \text{ cm}^{-2}$  (в границах блоков) до  $\sim 10^4 \text{ cm}^{-2}$  (между границами). На рис. 2 показана типичная топограмма гетероструктуры  $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , изготовленной сращиванием. Можно видеть контраст, обусловленный упругими напряжениями, возникающими при сращивании, и изображениями полостей искусственного рельефа в виде сетки. Отсутствие газовых пузырей и нарушений сплошности свидетельствует об успешном сращивании. Полосы сегре-

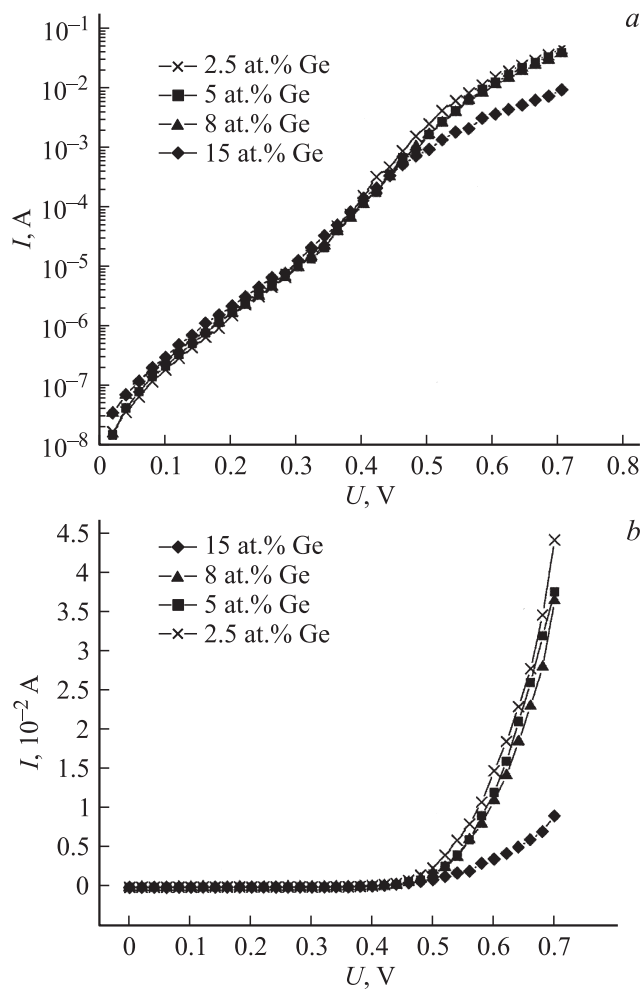
гации Ge проявляются в виде темных линий, расположенных наклонно к белым линиям искусственного рельефа.

Распределение состава по площади образцов, измеренное методом EDX (Energy Dispersive X-ray Analysis), показало, что распределение Ge было однородным в пределах ошибки измерения (0.5%). Распределение листового сопротивления также было достаточно однородным.

Прямые вольт-амперные характеристики, представленные на рис. 3 в полупологарифмическом (*a*) и линейном (*b*) масштабах, исследовались на постоянном и импульсном токе при комнатной температуре в диапазоне плотностей токов  $1 \text{ mA/cm}^2 \div 200 \text{ A/cm}^2$ . Как следует из рис. 3, ВАХ всех образцов, выращенных как методом Чохральского, так и БЗП, с содержанием германия в интервале от 2.5 до 15 at.%, качественно похожи друг на друга. Напряжение отсечки для всех кривых  $U_{on} \leq 0.5 \text{ V}$  (рис. 3, *b*), что свидетельствует о наличии гетероперехода (для гомоперехода в кремнии  $U_{on} = 0.75 \text{ V}$ ). На начальном участке в диапазоне напряжений ( $0.03 \div 0.12$ ) V и токов ( $5 \cdot 10 \div 8 \cdot 10^{-6}$ ) A ВАХ всех образцов практически сливаются и носят экспоненциальный характер с коэффициентом неидеальности  $\beta \sim 1.25$ . В этом случае можно говорить о доминировании диффузионного тока через переход и достаточно слабым влиянии дефектов границы сращивания на его протекание. Далее ВАХ отклоняются от экспоненты. Уменьшение градиента кривых  $I - f(U)$  при более высоких напряжениях, особенно заметное для образцов с базой  $\text{Si}_{0.85}\text{Ge}_{0.15}$ , связано как с ограничением тока последовательным сопротивлением толщи образцов, так и с недостаточной модуляцией сопротивления базы вследствие малого времени жизни неосновных носителей заряда (ННЗ) — электронов  $\tau_e$ . Измерения показали, что с увеличением концентрации германия  $N_{\text{Ge}}$  время жизни ННЗ падает практически на порядок величины: для гетеродиодов с  $p\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  базой при  $N_{\text{Ge}} = 2.5, 5.0, 8.0$  и  $15 \text{ at.}\%$   $\tau_e = 12, 8, 2.5$ , и  $1 \mu\text{s}$  соответственно. Такое существенное снижение  $\tau_e$  с ростом концентрации Ge можно объяснить усилением влияния дефектов структуры базовых слоев  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , плотность которых с увеличением концентрации Ge растет. Дифференциальное сопротивление  $R_d$  в установившемся проводящем режиме в этих условиях увеличивается: при  $N_{\text{Ge}} = 2.5, 5.0, 8.0$  и  $15 \text{ at.}\%$   $R_d = 1.7, 3.0, 4.0$  и  $10 \Omega$  соответственно.

Обратные напряжения для всех рассмотренных случаев не превышали  $200 \text{ V}$  ( $I_{\text{leak}} < 100 \mu\text{A}$ ,  $300 \text{ K}$ ).

Из полученных результатов следует, что рост концентрации германия в базовых слоях гетеродиодов, сопровождающийся увеличением



**Рис. 3.** Вольт-амперные характеристики гетеродиодов  $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , изготовленных прямым сращиванием кремния с пластинами  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  с разным содержанием Ge: *a* — полулогарифмический масштаб; *b* — линейный масштаб.

плотности дефектов структуры, приводит к увеличению рекомбинационной составляющей тока, протекающего через  $pn$ -переход в прямом направлении. Однако для всех  $N_{\text{Ge}} \leq 15 \text{ at.}\%$  в диапазоне рассматриваемых плотностей токов ( $1 \text{ mA/cm}^2 \div 200 \text{ A/cm}^2$ ) ВАХ гетеродиодов  $n\text{-Si}/p\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  является удовлетворительной, что позволяет сделать вывод о перспективности использования технологии прямого сращивания для формирования SiGe гетероструктур.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН „Новые принципы преобразования энергии в полупроводниковых структурах“, а также Creative Research Initiatives (Functional X-ray Imaging) of MOST/KOSEF and by BK21 Korea.

## Список литературы

- [1] Шохнович И. // Электроника. НТБ. 2005. № 5. С. 58–64.
- [2] Erhen U., Cruhl A. et al. // Electron. Lett. 1994. N 30. P. 525.
- [3] Hirose F., Souda Y., Nakano K. et al. // IEEE Transactions on Electron Devices. 2001. V. 48. N 10. P. 2417–2420.
- [4] Аргунова Т.С., Белякова Е.И., Грехов И.В., Забродский А.Г., Костина Л.С., Сорокин Л.М. и др. // ФТП. 2007. Т. 41. В. 6. С. 700–704.
- [5] Tong Q.-Y., Gösele U. Semiconductor Wafer Bonding: Science and Technology. 1999. J. Wiley & Sons, Inc. 297 с.
- [6] Grekhov I.V., Argunova T.S., Kostina L.S. et al. // Electrochem Soc. 1997. V. 144. N 2. P. 622–627.
- [7] Грехов И.В., Берман Л.С., Аргунова Т.С., Костина Л.С. и др. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 14. С. 956–961.
- [8] Аргунова Т.С., Грехов И.В., Костина Л.С. и др. // ФТТ. 1999. Т. 41. В. 11. С. 1953–1962.