

# Структурные и электрические свойства гетеропереходов $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ , полученных методом прямого сращивания

© Т.С. Аргунова<sup>\*,+</sup>, Е.И. Белякова<sup>\*</sup>, И.В. Грехов<sup>\*</sup>, А.Г. Забродский<sup>\*</sup>, Л.С. Костина<sup>\*¶</sup>, Л.М. Сорокин<sup>\*</sup>, Н.М. Шмидт<sup>\*</sup>, J.M. Yi<sup>+</sup>, J.W. Jung<sup>+</sup>, J.H. Je<sup>+</sup>, Н.В. Абросимов<sup>°,^</sup>,

<sup>\*</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>+</sup> Department of Materials Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology, 790-784 Pohang, Republic of Korea

<sup>°</sup> Institute of Crystal Growth, 12489 Berlin, Germany

<sup>^</sup> Институт физики твердого тела Российской академии наук, 142432 Черногловка, Россия

(Получена 3 октября 2006 г. Принята к печати 17 октября 2006 г.)

Приведены результаты исследования структурных и электрических свойств композиций, изготовленных методом прямого сращивания пластин  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  и Si. Пластины были вырезаны из кристаллов, выращенных методом Чохральского. Непрерывность интерфейса и дефекты кристаллической решетки исследованы рентгеновскими методами с использованием синхротронного излучения и сканирующей электронной микроскопией. Измерение прямых и обратных вольт-амперных характеристик диодов  $p\text{-Ge}_x\text{Si}_{1-x}/n\text{-Si}$  позволило оценить влияние дефектов кристаллической структуры на электрические свойства гетеропереходов. Удовлетворительные электрические параметры позволяют сделать вывод о том, что технология прямого сращивания перспективна для изготовления гетеропереходов  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$  большой площади.

PACS: 73.40.Lq, 61.72.Lk, 61.72.Ff

## 1. Введение

Твердые растворы  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  являются перспективным материалом для различных применений в современной электронике. Благодаря меньшей, чем у кремния, ширине запрещенной зоны и большей, чем в кремнии, подвижности носителей заряда они используются прежде всего для формирования гетероструктур  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$  [1]. В настоящее время на основе гетеропереходов  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$  созданы сильноточные полупроводниковые приборы, мощность и быстродействие которых превосходит параметры приборов на основе кремния: биполярные мощные быстродействующие транзисторы, высокочастотные транзисторы [2,3]; pin-диоды [4]; полевые транзисторы и интегральные схемы для работы на сверхвысоких частотах [5,6]. Основными технологическими методами формирования слоев  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  на кремниевых подложках являются молекулярная эпитаксия (molecular beam epitaxy, MBE) [1], химическое осаждение (ultra-high vacuum chemical vapor deposition, UHV/CVD; rapid thermal CVD) [1,7], ионная имплантация высоких доз германия в кремний и некоторые другие. Путем изменения содержания Ge в твердых растворах  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  можно создавать приборы с заданными свойствами. Вместе с тем увеличение содержания Ge приводит к несоответствию параметров решеток между слоем  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  и подложкой Si, которое вызывает возникновение упругих напряжений. Релаксация напряжений приводит к зарождению различных дислокационных структур [8–10]. Дислокации прорастают в активную

область приборов и ухудшают их характеристики. Для того чтобы предотвратить зарождение дислокаций или уменьшить их плотность, были предложены методы выращивания тонких упругонапряженных [11] или толстых релаксированных [12] слоев  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ . Однако задача получения гетероструктур  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$  большой площади с высоким структурным качеством не решена до сих пор.

В данной работе для создания полупроводниковых приборов с гетеропереходами  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$  предлагается использовать технологию прямого сращивания (direct wafer bonding, DWB) — процесс, при котором две металлические, полупроводниковые или диэлектрические поверхности практически любой площади могут быть соединены в одно целое без применения промежуточных слоев или внешних воздействий [13]. В настоящее время эта технология успешно применяется для серийного выпуска ряда приборов на основе кремния; ее использование для изготовления структур на основе других полупроводниковых материалов также дает положительные результаты [13,14]. Несоответствие параметров решетки и кристаллографическая разориентация сращиваемых пластин не препятствуют получению непрерывного интерфейса большой площади. Дислокации несоответствия в таких структурах сосредоточены в узком слое вблизи интерфейса [15], а электрические параметры слоев по обе стороны от границы сращивания легко контролировать, поскольку они определяются исходными свойствами сращиваемых пластин.

Цель настоящей работы состоит в формировании композиций  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$  методом прямого сращивания, исследовании их структурного совершенства и электрических свойств.

¶ E-mail: konst@mail.ioffe.ru

## 2. Образцы и методы исследования

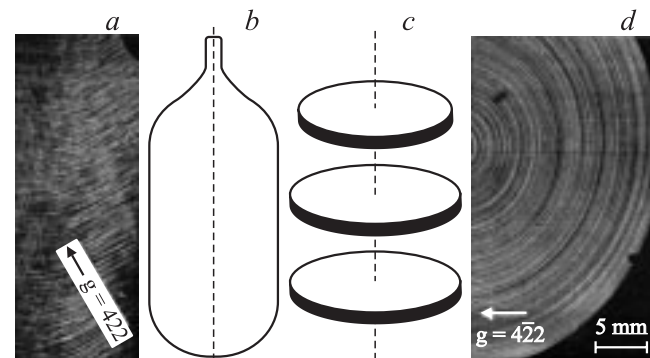
Кристаллы  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  ( $x = 0.07$ ) были выращены методом Чохральского в Институте роста кристаллов (Institut für Kristallzüchtung), в Берлине, Германия [16]. В процессе роста кристаллы легировались фосфором или бором; они содержали кислород на уровне  $6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Пластины диаметром от 30 до 42 мм были вырезаны перпендикулярно оси роста  $\langle 110 \rangle$ . Микрофлуктуации скорости роста на границе твердой и жидкой фаз и высокий коэффициент сегрегации Ge в Si привели к формированию полос сегрегации Ge (полос роста) [17,18]. Изображение полос сегрегации в образцах, вырезанных параллельно и перпендикулярно оси роста, приведено на рис. 1.

Для изготовления диодных структур использовались зеркально полированные пластины  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$   $p$ -типа проводимости с удельным объемным сопротивлением  $\rho_v = 4.8 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  и пластины Si  $n$ -типа проводимости с  $\rho_v = 5$  и  $4.5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , выращенные методом Чохральского. Ориентация пластин была  $(110)$  или  $(111)$  и толщина  $\approx 400 \text{ мкм}$ . Характеристики образцов приведены в табл. 1. Прямое сращивание проводилось по модифицированной технологии, согласно которой одна из сращиваемых поверхностей имеет искусственный рельеф [19]. Ранее было показано, что рельефный интерфейс способствует уменьшению плотности дислокаций решетки, снижает упругие напряжения и препятствует образованию газовых пузырей [20–22]. Рельеф в виде ортогональной сетки канавок шириной  $50 \text{ мкм}$ , глубиной  $0.2\text{--}0.3 \text{ мкм}$  и расстоянием между ними  $200 \text{ мкм}$  изготавливался методом фотолитографии на поверхности пластины Si. Перед сращиванием пластины подвергались стандартной RCA-отмывке и гидрофилизации; приведение их в контакт осуществлялось в деионизованной воде с удельным сопротивлением  $18 \text{ МОм} \cdot \text{см}$  с последующей сушкой на центрифуге. Отжиг включал в себя термообработку на воздухе при температуре  $95^\circ\text{C}$  в течение 4 ч, затем при  $1000^\circ\text{C}$  в течение 1 ч и при  $1150^\circ\text{C}$  в течение 2 ч.

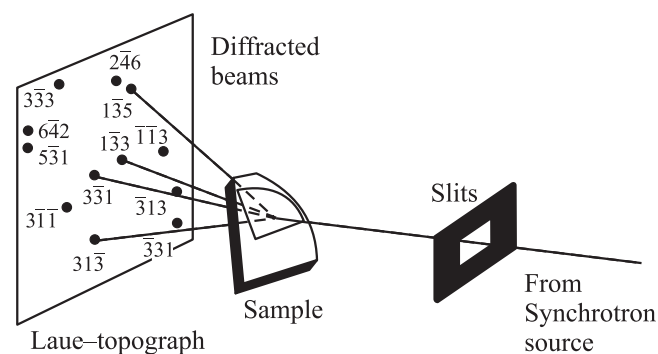
После сращивания с  $p$ - и  $n$ -сторон гетероструктуры путем диффузии бора и фосфора из силикатных стекол создавались соответственно  $p^+$ - и  $n^+$ -слои глубиной  $8\text{--}10 \text{ мкм}$ . Контакты изготавливались путем химического осаждения никеля.

**Таблица 1.** Характеристики образцов для исследования

№ образца	Материал	Тип проводимости	$\rho_v$ , Ом·см	Ориентация поверхности
1	$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ Si	$p$	4.8	(110)
		$n$	4.5	(110)
2	$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ Si	$p$	4.8	(110)
		$n$	5.0	(111)
3	Si Si	$p$	15.0	(111)
		$n$	5.0	(111)



**Рис. 1.**  $a$  — рентгеновская топограмма образца, вырезанного параллельно оси роста кристалла  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  ( $x = 0.07$ );  $b, c$  — схематические изображения були (ось роста показана пунктиром) и образцов для исследования;  $d$  — рентгеновская топограмма образца, вырезанного перпендикулярно оси роста.



**Рис. 2.** Схема рентгенотопографического эксперимента с использованием полихроматического синхротронного излучения. Образец представлен состоящим из сросшихся пластин  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  (меньшей площади) и Si (большей площади).

Из полученных образцов вырезались диодные структуры площадью  $\approx 1 \text{ см}^2$ . Краевой контур после снятия фаски подвергался обработке травлением и пассивации. Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) проводились при комнатной температуре на постоянном токе. Полученные результаты сравнивались с ВАХ  $p$ - $n$ -переходов, сформированных прямым сращиванием пластин Si  $p$ - и  $n$ -типов проводимости с удельными сопротивлениями  $\rho_v = 15$  и  $5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  соответственно и толщиной  $\approx 400 \text{ мкм}$ .

Образцы для рентгеновских исследований были приготовлены из гетероструктур  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$  ( $x = 0.07$ ) путем химико-механической полировки со стороны пластины  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  с целью получения тонкого ( $\approx 40 \text{ мкм}$ ) слоя на толстой подложке Si. Упругие напряжения и дефекты кристаллической структуры изучались методом рентгеновской топографии с использованием непрерывного („белого“) спектра синхротронного излучения (СИ) [23]. Схема эксперимента показана на рис. 2. В условиях, когда излучение с непрерывным спектром падает на кристаллический образец, каждая система плоскостей выбирает участок спектра, удовлетворяющий условию

Брэгга, и множество отраженных пучков регистрируется на снимке одновременно. При малой угловой расходимости СИ и большой площади пучка на образце каждое „пятно“ становится высокоразрешающей топограммой. В нашем случае размер пучка на образце был равен  $10 \times 8$  мм ( $H \times V$ ). Топограммы регистрировались на высокоразрешающую фотопленку Kodak SR 45.

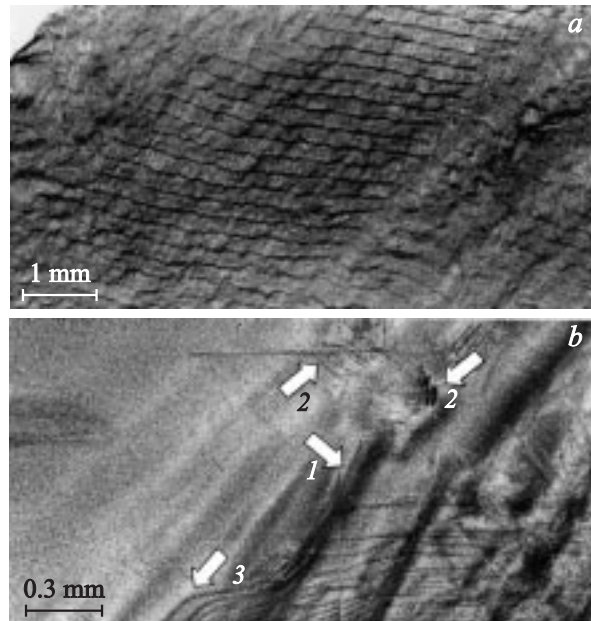
Эксперименты были выполнены на источнике СИ Pohang Light Source, на станции 7B2 в г. Поханг, Республика Корея. Эффективные размеры источника, сформированного поворотным магнитом с индукцией 1.32 Т, были равны  $60 \times 160$  мкм ( $V \times H$ ), и расстояние от источника до образца составляло 34 м. Спектр СИ изменялся от 6 до 40 кэВ.

### 3. Результаты и их обсуждение

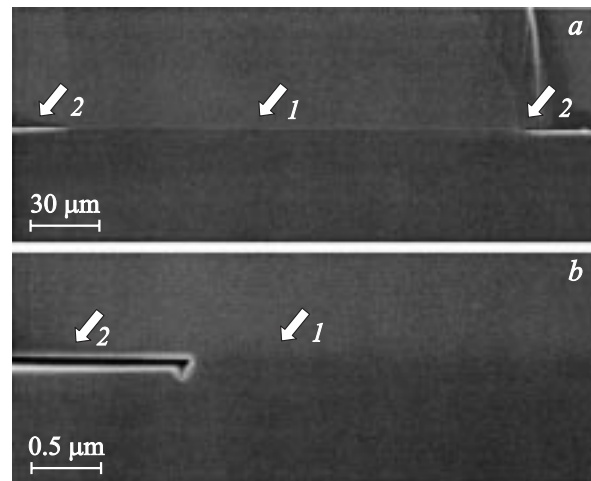
#### 3.1. Дефекты кристаллической решетки в структурах $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$

Рентгенотопографическое исследование непрерывности интерфейса в структурах, полученных прямым сращиванием, основано на следующих принципах. Микрошероховатость поверхности, различие в параметрах решетки и коэффициентах теплового расширения пластин приводит к тому, что в процессе сращивания вблизи интерфейса возникают значительные напряжения. Под воздействием напряжений кристаллическая решетка испытывает упругую и пластическую деформацию. Распределение интенсивности рентгеновского излучения, отраженного искаженной решеткой, является неоднородным. Напротив, в тех областях, где силы сцепления атомов недостаточны для сращивания, искажения решетки незначительны или отсутствуют. Распределение рентгеновской интенсивности, отраженной от несросшихся участков, более однородное.

Рентгеновская топограмма структуры  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$  ( $x = 0.07$ ) представлена на рис. 3, *a*. Изображение получено в отражении от тонкой пластины  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  (различие в углах Брэгга между пластинами  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  и Si обусловлено их разориентацией друг относительно друга). Можно видеть, что распределение интенсивности на топограмме является неоднородным. Изображения искусственных полостей на интерфейсе имеют вид пересекающихся топограмму длинных темных линий. Неоднородный фон и изображения искусственных полостей в рентгеновских изображениях от обеих частей структуры — это типичные признаки успешного сращивания, описанные в литературе [20–22,24]. Однако в данном случае обращает на себя внимание следующая особенность. Канавки искусственного рельефа на поверхности пластины Si представляли собой прямые линии, пересекающиеся друг с другом под прямыми углами, а их изображения на топограмме выглядят криволинейными. Причиной этого эффекта являются дальнедействующие напряжения, которые распространяются от полос сегрегации Ge в пластине  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  и вызывают кривизну



**Рис. 3.** Рентгеновские топограммы, полученные в полихроматическом спектре синхротронного излучения: *a* — от структуры  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$  ( $x = 0.07$ ), *b* — от пластины  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  ( $x = 0.07$ ). 1 — полосы сегрегации Ge; 2 — источники дислокаций, связанные с полосами сегрегации; 3 — дислокации, распространяющиеся от источников 2.



**Рис. 4.** Изображения поперечных срезов структур  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$  ( $x = 0.07$ ), полученные методом сканирующей электронной микроскопии. *a, b* — образцы вырезаны из структуры, показанной на рис. 3, *a*. 1 — интерфейс; 2 — изображения искусственных полостей на интерфейсе.

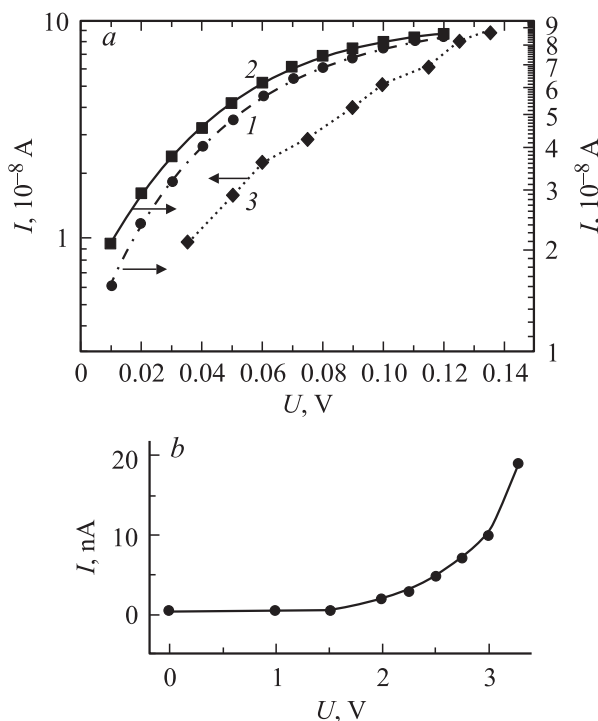
кристаллических плоскостей вблизи интерфейса. Полосы сегрегации на рис. 3, *b* имеют вид толстых черных линий прерывистого и неоднородного контраста (*I*). Изменение силы контраста полос отражает изменение концентрации Ge. В рамках теории упругости каждую область с повышенным содержанием Ge можно

рассматривать как включения, обладающие собственной деформацией  $\varepsilon^*$  [25]. Эта деформация обусловлена несоответствием параметров кристаллической решетки и коэффициентов теплового расширения области сегрегации и окружающего материала. При высокотемпературном отжиге в процессе сращивания области, обогащенные Ge, становятся источниками упругой и пластической деформации. Размножение дислокаций от таких источников может происходить по механизму Франка–Рида [26].

Непрерывность интерфейса на микроуровне была исследована сканирующей электронной микроскопией (*scanning electron microscopy*, SEM). На рис. 4 приведены изображения поперечных срезов структур  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$  ( $x = 0.07$ ). Отсутствие микро- и макропустот свидетельствует об успешном сращивании, что согласуется с рентгеновскими данными.

### 3.2. Электрические свойства гетеропереходов $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$

Рис. 5 представляет прямые ВАХ диодов, изготовленных прямым сращиванием пластин: 1 —  $p\text{-Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  ( $x = 0.07$ ) с ориентацией (110) и  $n\text{-Si}$  с ориентацией (110), 2 —  $p\text{-Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  ( $x = 0.07$ ) с ориентацией (110) и  $n\text{-Si}$  с ориентацией (111) и 3 —  $p\text{-Si}(111)$  и  $n\text{-Si}(111)$ . Все характеристики описываются зависимостью  $j = \exp(qU/mkT)$ , где  $q$  — заряд электрона,  $U$  — напряжение,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  —



**Рис. 5.** Вольт-амперные характеристики диодов, *a* — прямые: 1 —  $p\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x(110)/n\text{-Si}(110)$ , 2 —  $p\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x(110)/n\text{-Si}(111)$ , 3 —  $p\text{-Si}(111)/n\text{-Si}(111)$ ; *b* — обратная ВАХ.

**Таблица 2.** Факторы неидеальности  $m$  гетеропереходов  $p\text{-Ge}_{1-x}\text{Si}_{1-x}/n\text{-Si}$

№ образца	Материал	Фактор неидеальности
1	$p\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x(110)/n\text{-Si}(110)$	1.46
2	$p\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x(110)/n\text{-Si}(111)$	1.68
3	$p\text{-Si}(111)/n\text{-Si}(111)$	1.74

абсолютная температура и  $m$  — фактор неидеальности  $p$ – $n$ -перехода [27].

Из этой зависимости были вычислены факторы неидеальности  $m$ , представленные в табл. 2. Факторы неидеальности оценивались на участках максимального градиента кривых  $I = f(U)$ . Из вычислений следует, что в интервале токов  $10^{-8}$ – $10^{-7}$  А/см<sup>2</sup> и напряжений 0.01–0.08 В для структуры  $p\text{-Ge}_x\text{Si}_{1-x}(110)/n\text{-Si}(110)$   $m = 1.46$ , для структуры  $p\text{-Ge}_x\text{Si}_{1-x}(110)/n\text{-Si}(111)$   $m = 1.68$  и для структуры  $p\text{-Si}(111)/n\text{-Si}(111)$   $m = 1.74$ . В интервале токов  $10^{-4}$ – $10^{-3}$  А/см<sup>2</sup> и напряжений 0.3–0.4 В для структуры  $p\text{-Ge}_x\text{Si}_{1-x}(110)/n\text{-Si}(110)$  величина  $m$  составляет 1.49. Поскольку во всех исследованных структурах  $1 < m < 2$ , можно сделать вывод, что ток через  $p$ – $n$ -переход, сформированный прямым сращиванием, включает в себя как диффузионную, так и генерационно-рекомбинационную составляющие [27]. Величина  $m$  для  $p$ – $n$ -перехода, полученного сращиванием пластин Si и  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  с разной кристаллографической ориентацией, выше, чем при сращивании пластин с одинаковой кристаллографической ориентацией (1.68 против 1.46). Поскольку плотность дефектов кристаллической структуры в области интерфейса в первом случае выше, полученный результат свидетельствует о влиянии этих дефектов на электрические свойства гетеропереходов  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ . Однако для обоих типов гетероструктур фактор неидеальности ниже, чем для гомоперехода, сформированного прямым сращиванием пластин Si (см. табл. 2).

При исследовании обратных характеристик ток утечки  $I_1$  гетеропереходов в диодах  $p\text{-Ge}_x\text{Si}_{1-x}(110)/n\text{-Si}(110)$  изменялся в пределах единиц наноампер в интервале напряжений 1–3 В (см. вставку на рис. 5).

Полученные данные показывают, что ВАХ гетеропереходов  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ , изготовленных прямым сращиванием, не хуже, чем ВАХ гетеропереходов, сформированных методом МВЕ (см., например, [28]). Таким образом, метод прямого сращивания может быть использован для создания гетероструктур  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$  большой площади.

## 4. Заключение

Гетероструктуры  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$  сформированы прямым сращиванием пластин, изготовленных из кристаллов  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  и Si, выращенных методом Чохральского.

Исследованы непрерывность интерфейса, дефекты кристаллической решетки и электрические свойства полученных структур. Результаты исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Непрерывность интерфейса в структурах  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$  не хуже, чем в структурах  $\text{Si}/\text{Si}$ , полученных прямым сращиванием кремния.

2. Плотность дислокаций решетки и уровень упругих напряжений в структурах  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$  выше, чем в  $\text{Si}/\text{Si}$ -композициях. Это обусловлено тем, что при высокотемпературном отжиге в процессе сращивания области с повышенной концентрацией Ge в полосах сегрегации становятся источником упругой и пластической деформации.

3. Неидеальность прямых ВАХ диодных структур  $p\text{-Ge}_x\text{Si}_{1-x}/n\text{-Si}$  в большей степени определяется влиянием дефектов области интерфейса, чем дефектов в объеме сращиваемых пластин: фактор неидеальности для структуры  $p\text{-Ge}_x\text{Si}_{1-x}(110)/n\text{-Si}(111)$  выше, чем для структуры  $p\text{-Ge}_x\text{Si}_{1-x}(110)/n\text{-Si}(110)$  ( $m_1 = 1.68$  и  $m_2 = 1.46$  соответственно).

4. Результаты исследования ВАХ, в частности малые токи утечки ( $\sim 1$  нА при  $U = 2$  В) и величина фактора неидеальности  $m \approx 1.46$ , позволяют заключить, что метод прямого сращивания перспективен для формирования гетероструктур  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$  большой площади.

Работа выполнена при поддержке Программ фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН „Низкоразмерные квантовые структуры“ и „Новые принципы преобразования энергии в полупроводниковых структурах“, проекта РФФИ № 05-02-17768, а также Creative Research Initiatives (Functional X-ray Imaging) of MOST/KOSEF and by BK21 Korea.

## Список литературы

- [1] S. Voinigescu, M. Schumacher, K. Iniewski, R. Lisak, Z. Parpia. *Electron. Tech.*, **26**, 25 (1993).
- [2] U. Erhen, A. Gruhl, A. Schiipen, H. Kibbel, U. König. *Electron. Lett.*, **30**, 525 (1994).
- [3] G.M. Khanduri, B.S. Panwar. *Amer. J. Appl. Sci.*, **1**, 236 (2004).
- [4] F. Hirose, Y. Souda, K. Nakano, S. Goya, T. Nishimori, S. Okumura. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **48**, 2417 (2001).
- [5] M. Arafa, P. Fay, K. Ismail, J.O. Chu, B.S. Meyerson, I. Aidesidaa. *IEEE Trans. Electron. Dev. Lett.*, **17**, 124 (1996).
- [6] M. Zeuner, T. Hackbarth, G. Hock, D. Behammer, U. König. *IEEE Microwave Guided Lett.*, **9**, 410 (1999).
- [7] B.S. Meyerson. *Appl. Phys. Lett.*, **48**, 797 (1986).
- [8] Ю.А. Тхорик, Л.С. Хазан. *Пластическая деформация и дислокации несоответствия в гетерозитаксиальных системах* (Киев. Наук. думка, 1983).
- [9] М.Г. Мильвидский, В.Б. Освенский. *Структурные дефекты в эпитаксиальных слоях полупроводников* (М., Металлургия, 1985).
- [10] V.I. Vdovin. *Phys. Status Solidi A*, **171**, 239 (1999).
- [11] M.L. Green, B.E. Weir, D. Brasen, Y.E. Hsieh, G. Higashi, A. Feigenson, L.C. Feldman, R.L. Headrick. *J. Appl. Phys.*, **69**, 745 (1991).
- [12] E.A. Fitzgerald, Y.-H. Xie, M.L. Green, D. Brasen, A.R. Kortan, J. Michel, Y.-J. Mii, B.E. Weir. *Appl. Phys. Lett.*, **59**, 811 (1991).
- [13] Q.Y. Tong, U. Gösele. *Semiconductor Wafer Bonding: Science and Technology* (N.Y., J. Wiley & Sons, 1999).
- [14] A. Plössl, G. Kräuter. *Mater. Sci. Eng.*, **R25**, 1 (1991).
- [15] И.В. Грехов, Л.С. Берман, Т.С. Аргунова, Л.С. Костина, Е.И. Белякова, Т. В. Кудрявцева, E.D. Kim, S.C. Kim. *Письма ЖТФ*, **22**, 14 (1996).
- [16] N.V. Abrosimov, S.N. Rossolenko, V. Alex, A. Gerhardt, W. Shróder. *J. Cryst. Growth*, **166**, 657 (1996).
- [17] K. Wieteska, W. Wierzchowski, W. Graeff, M. Lefeld-Sosnowska, M. Regulska. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **36**, A133 (2003).
- [18] Т.С. Аргунова, М.Ю. Гуткин, А.Г. Забродский, Л.М. Сорокин, А.С. Трегубова, М.П. Шеглов, Н.В. Абросимов, J.H. Je, J.M. Yi. *ФТТ*, **47**, 1184 (2005).
- [19] Т.С. Аргунова, А.Г. Андреев, Е.И. Белякова, И.В. Грехов, Л.С. Костина, Т.В. Кудрявцева. *Письма ЖТФ*, **22**, 1 (1996).
- [20] Т.С. Аргунова, И.В. Грехов, М.Ю. Гуткин, Л.С. Костина, Е.И. Белякова, Т.В. Кудрявцева, E.D. Kim, D.M. Park. *ФТТ*, **38**, 3361 (1996).
- [21] Т.С. Аргунова, Р.Ф. Витман, И.В. Грехов, Л.С. Костина, Т.В. Кудрявцева, М.Ю. Гуткин, А.В. Штурбин, J. Hartwig, M. Ohler, E.D. Kim, S.C. Kim. *ФТТ*, **41**, 1953 (1999).
- [22] T.S. Argunova, I.V. Grekhov, L.S. Kostina, T.V. Kidryavtzeva, M.Y. Gutkin, J. Hartwig, E.D. Kim, S.Ch. Kim, N.K. Kim. *Jpn. J. Appl. Phys.*, pt 1, **37**, 6287 (1998).
- [23] D.K. Bowen, B.K. Tanner. *High resolution x-ray diffraction and topography* (UK, Taylor & Francis, 1998).
- [24] J. Härtwig, S. Köhler, W. Ludwig, H. Moriceau, M. Ohler, E. Prieur. *Cryst. Res. Technol.*, **37**, 705 (2002).
- [25] T. Mura. *Micromechanics of Defects in Solids* (Dordrecht, Martinus Nijhoff, 1987).
- [26] Дж. Хирт, И. Лоте. *Теория дислокаций* (М.: Атомиздат, 1972).
- [27] С.М. Зи. *Физика полупроводниковых приборов*. [S.M. Sze. *Physics of Semiconductor Devices*. (N.Y., J. Wiley & Sons, 1981)].
- [28] V. Roberts, D.W.E. Allsopp. *Semicond. Sci. Technol.*, **11** (9), 1346 (1996).

Редактор Л.В. Беляков

## Structural and electrical properties of heterojunctions $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ manufactured by direct bonding technology

*T.S. Argunova\**, *E.I. Belyakova\**, *I.V. Grekhov\**,  
*A.G. Zabrodskij\**, *L.S. Kostina\**, *L.M. Sorokin\**,  
*N.M. Schmidt\**, *J.M. Yi<sup>+</sup>*, *J.W. Jung<sup>+</sup>*, *J.H. Je<sup>+</sup>*,  
*N.V. Abrosimov<sup>°,^</sup>*

\* Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

<sup>+</sup> Department of Materials Science and Engineering,  
Pohang University of Science and Technology,  
790-784 Pohang, Republic of Korea

<sup>°</sup> Institute of Crystal Growth,  
12489 Berlin, Germany

<sup>^</sup> Institute of Microelectronics Technology Problems  
and High Purity Materials,  
Russian Academy of Sciences,  
142432 Chernogolovka, Russia

**Abstract** Structural and electrical properties of the compositions manufactured by the direct bonding of  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  and Si wafers are examined. The wafers were cut of bulk crystals grown by Czochralski technique. The quality of the interface and structural defects are studied using Synchrotron X-ray imaging and scanning electron microscopy. The investigation of forward and reverse current-voltage characteristics of  $p\text{-Ge}_x\text{Si}_{1-x}/n\text{-Si}$  diodes reveals the influence of structural defects on electrical properties of heterojunctions. Satisfactory electrical parameters allow to conclude that a direct bonding technology is promising for the fabrication of  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/n\text{-Si}$  heterojunctions of big area.