

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

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

^{*} Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

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

[°] Institute of Crystal Growth, 12489 Berlin, Germany

[^] 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 мкм , глубиной $0.2\text{--}0.3 \text{ мкм}$ и расстоянием между ними 200 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°C в течение 4 ч, затем при 1000°C в течение 1 ч и при 1150°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	ρ_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)

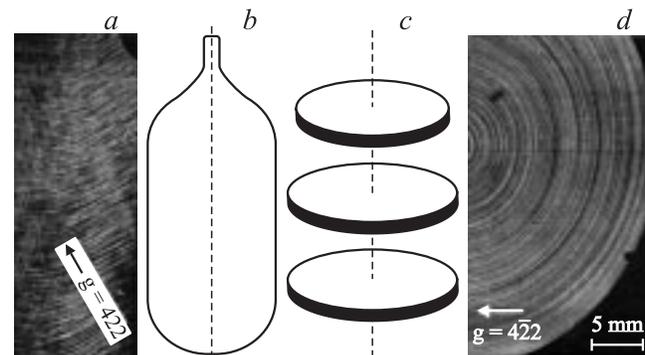


Рис. 1. a — рентгеновская топограмма образца, вырезанного параллельно оси роста кристалла $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ ($x = 0.07$); b, c — схематические изображения були (ось роста показана пунктиром) и образцов для исследования; d — рентгеновская топограмма образца, вырезанного перпендикулярно оси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

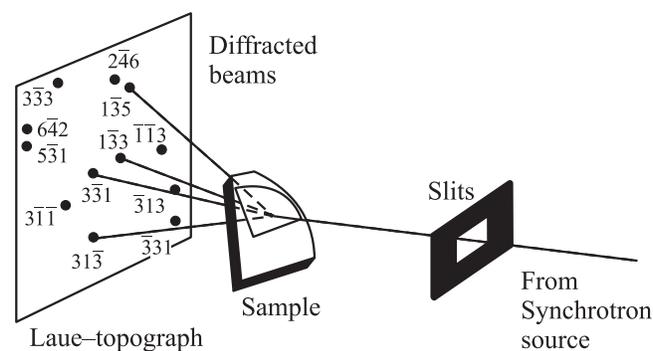


Рис. 2. Схема рентгенотопографического эксперимента с использованием полихроматического синхротронного излучения. Образец представлен состоящим из сросшихся пластин $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ (меньшей площади) и Si (большей площади).

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 10×8 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 60×160 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

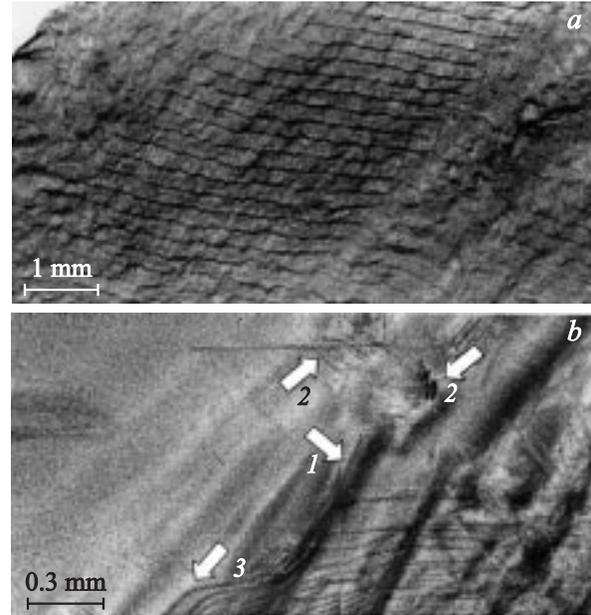


Рис. 3. Рентгеновские топограммы, полученные в полихроматическом спектре синхротронного излучения: *a* — от структуры $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ ($x = 0.07$), *b* — от пластины $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ ($x = 0.07$). 1 — полосы сегрегации Ge; 2 — источники дислокаций, связанные с полосами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

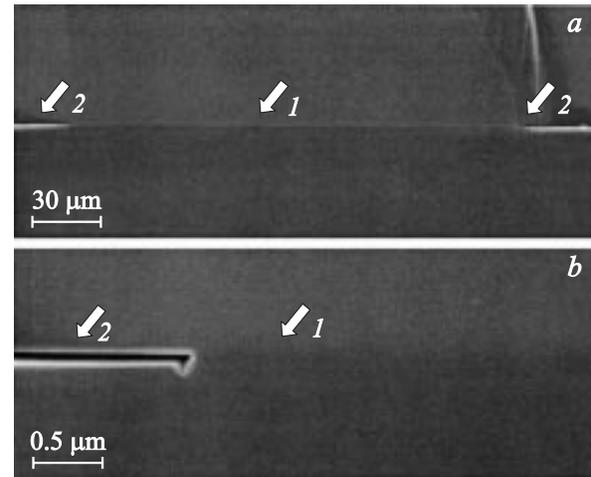


Рис. 4. Изображения поперечных срезов структур $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ ($x = 0.07$), полученные методом сканирующей электронной микроскопии. *a, b* — образцы вырезаны из структуры, показанной на рис. 3, *a*. 1 — интерфейс; 2 — изображения искусственных полостей на интерфейсе.

кристаллических плоскостей вблизи интерфейса. Полосы сегрегации на рис. 3, *b* имеют вид толстых черных линий прерывистого и неоднородного контраста (1). 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 ε^* [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 —

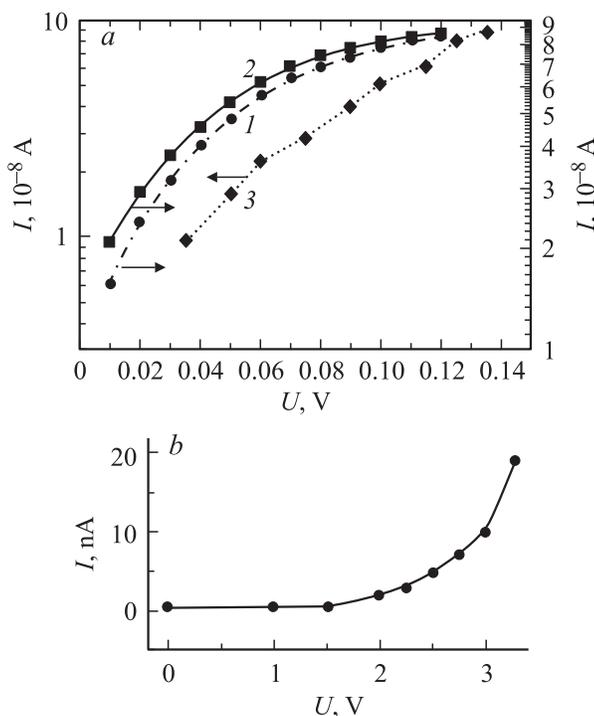


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики диодов, *a* — прямые: 1 — $p\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x(110)/n\text{-Si}(110)$, 2 — $p\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x(110)/n\text{-Si}(111)$, 3 — $p\text{-Si}(111)/n\text{-Si}(111)$; *b* — обратная ВАХ.

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/см² 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/см² 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 Si/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 Si/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 (~ 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⁺*, *J.W. Jung⁺*, *J.H. Je⁺*,
N.V. Abrosimov^{°,^}

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

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

[°] Institute of Crystal Growth,
12489 Berlin, Germany

[^] 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.