

03,07

## Особенности пластической релаксации метастабильного слоя $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ , захороненного между подложкой Si и релаксированным слоем Ge

© Ю.Б. Болховитянов, А.К. Гутаковский, А.С. Дерябин, Л.В. Соколов

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова РАН,  
Новосибирск, Россия

E-mail: bolkhov@isp.nsc.ru

(Поступила в Редакцию 21 июня 2013 г.)

Гетероструктуры  $\text{Ge}/\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$ , выращенные методом молекулярной эпитаксии, были исследованы методом высокоразрешающей электронной микроскопии с атомным разрешением. Пленка Ge толщиной  $0.5\text{--}1\ \mu\text{m}$ , выращенная при температуре  $500^\circ\text{C}$ , полностью релаксирована. В то же время промежуточный слой  $\text{Ge}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$  остается в напряженном метастабильном состоянии, несмотря на то, что его толщина в 2–4 раза превышает критическую для введения  $60^\circ$ -ных дислокаций несоответствия. Предполагается, что граница раздела  $\text{Ge}/\text{GeSi}$  является барьером для проникновения дислокаций из релаксированного слоя Ge в слой GeSi. Этот барьер преодолевается в процессе 30 min отжига гетероструктур при температуре  $700^\circ\text{C}$ , после чего в обеих гетерограницах  $\text{Ge}/\text{GeSi}$  и  $\text{GeSi}/\text{Si}(001)$  наблюдаются дислокационные сетки различной степени упорядоченности, состоящие в основном из краевых дислокаций несоответствия.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России (ГК 16.518.11.7091).

### 1. Введение

Для выращивания тонких пленок Ge-на-Si с относительно малой плотностью пронизывающих дислокаций (ПД) наиболее распространено использование так называемой двухступенчатой стратегии: рост низкотемпературного затравочного слоя Ge (LT Ge seed layer) перед выращиванием основного слоя Ge [1,2]. Развитием этой технологии является трехступенчатая стратегия роста, основой которой является выращивание слоя GeSi нанометровой толщины перед слоем LT Ge [3,4]. Анализируя рентгеновские кривые качания гетероструктур (ГК)  $\text{Ge}/\text{GeSi}/\text{Si}(001)$ , приведенные в работах [3,4], можно отметить, что буферный слой GeSi после выращивания Ge пленки оставался в состоянии, близком к псевдоморфному, несмотря на то, что его толщина превышала критическое значение для введения  $60^\circ$ -ных дислокаций несоответствия (ДН). Причины сохранения метастабильного состояния в напряженном слое не ясны.

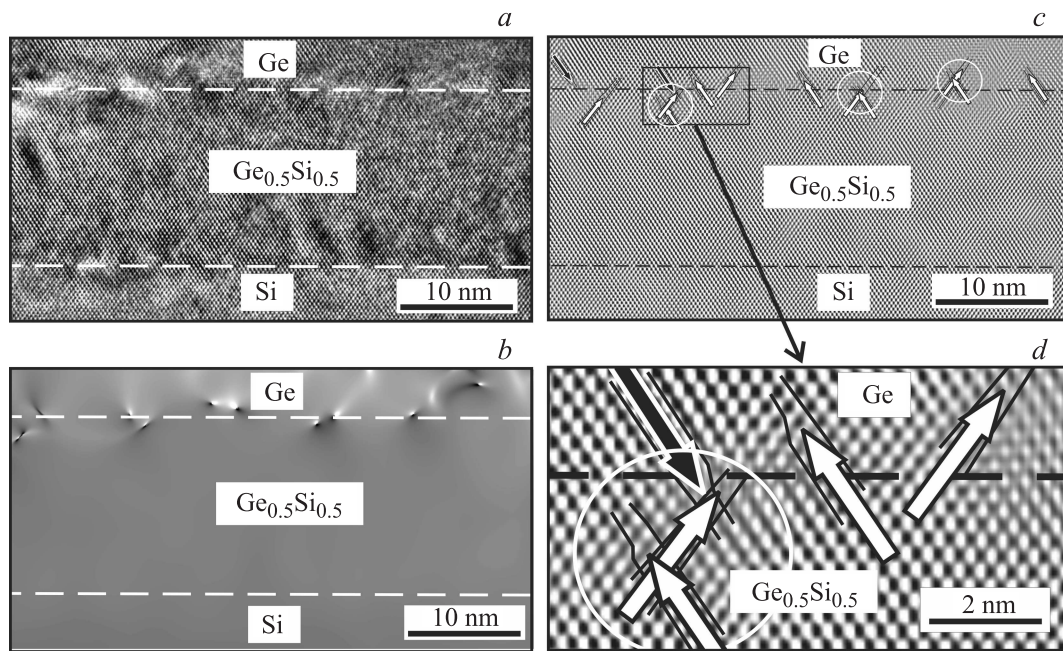
В настоящей работе рассмотрены особенности пластической релаксации буферного слоя GeSi как захороненного элемента ГК  $\text{Ge}/\text{Ge seed}/\text{Ge}_{0.5}\text{Si}_{0.5}/\text{Si}(001)$  и его дислокационное взаимодействие со слоем Ge, в результате которого формируются упорядоченные сетки краевых ДН на обеих границах раздела, ограничивающих буферный слой GeSi.

### 2. Методика эксперимента

Структуры Ge-на-Si выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии из твердотельного источника.

Основные детали эксперимента по выращиванию гетероструктур были ранее описаны в [5]. Особенностью эксперимента являлся трехступенчатый рост, при котором на поверхности Si при  $T = 450^\circ\text{C}$  выращивался  $10\text{--}20\ \text{nm}$  буферный слой GeSi с долей Ge 0.5, а затем, при  $T = 200^\circ\text{C}$  осаждался Ge затравочный слой толщиной  $7\ \text{nm}$ . После этого, одновременно с подъемом температуры до  $T = 500^\circ\text{C}$ , начинался рост основного слоя Ge до толщины  $0.5\text{--}1\ \mu\text{m}$ . В настоящей работе анализируются два образца  $\text{Ge}/\text{Ge}_{0.5}\text{Si}_{0.5}/\text{Si}(001)$  с толщиной буферного слоя  $\text{Ge}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$  10 и 20 nm, выращенные по трехслойной методике. Образцы исследовались как сразу после роста (свежевыращенные, as grown), так и после 30 min отжига при  $T = 700^\circ\text{C}$ .

Дислокационная структура выращенных образцов была исследована на поперечных срезах образцов с использованием электронного микроскопа JEOL-4000EX при ускоряющем напряжении 400 kV. Применялся метод высокоразрешающей электронной микроскопии (ВРЭМ) с атомным разрешением и интегрированные с ним методики цифровой обработки ВРЭМ-изображений. Применение цифровой обработки ВРЭМ-изображений позволяет решить две задачи. Во-первых, удаление шума и сепарация наиболее характерных особенностей изображения, связанных, например, с нарушениями кристаллической структуры исследуемого объекта. И во-вторых, извлечение количественной информации о кристаллическом строении материала: межплоскостные расстояния, деформации решетки и т. п. Поскольку ВРЭМ-изображения кристаллических объектов представляют собой периодический набор пространственных частот, то наиболее адекватным методом их цифровой обработки является метод Фурье-фильтрации. В настоящей работе был ис-



**Рис. 1.** Экспериментальное ВРЭМ-изображение поперечного среза свежевывращенного образца  $\text{Ge}/\text{Ge}_{0.5}\text{Si}_{0.5}(20\text{ nm})/\text{Si}(001)$  (*a*) и результаты его цифровой обработки (*b*) и (*c*). Здесь (*b*) — карта распределения межплоскостных расстояний для плоскостей  $(111)$  и  $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$  в тоновом режиме. (*c*) — фильтрованное в рефлексах  $(111)$  и  $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$  композитное изображение. (*d*) — выделенный прямоугольником фрагмент (*c*) в увеличенном виде. Стрелками отмечены окончания экстраплоскостей  $(111)$  и  $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ , соответствующие черно-белым розеткам на (*b*) и являющиеся ядрами  $60^\circ$  ДН. Черными линиями выделены ближайшие к дислокационному ядру плоскости  $(111)$  и  $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ , окаймляющие окончания экстраплоскостей.

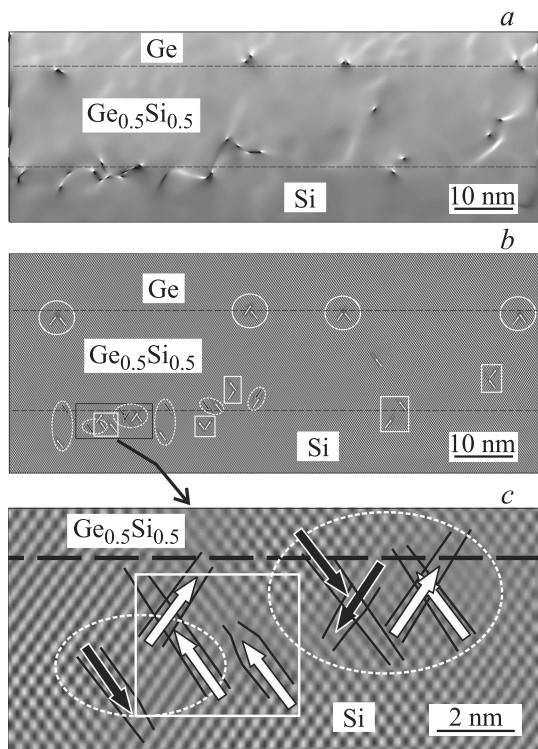
пользован метод геометрической фазы, впервые предложенный в работах [6,7]. Для расширения возможностей этого метода нами был разработан новый обобщающий подход, заключающийся в анализе всех доступных пространственных частот высокоразрешающего электронно-микроскопического изображения [8].

В дальнейшем в статье используется обозначение „фильтрованное композитное изображение“ для картин, полученных наложением двух, фильтрованных в рефлексах  $(111)$  и  $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ , изображений. Обозначение „карта распределения межплоскостных расстояний“ используется для изображений, полученных методом геометрической фазы, на которых в тоновом режиме представлено распределение межплоскостных расстояний для плоскостей  $(111)$  и  $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ . Такие картины позволяют судить о напряжениях в кристалле. В области сжатия параметр решетки уменьшается, и эта область выглядит более темной. В области растяжения параметр решетки увеличивается, и эта область выглядит более светлой.

### 3. Экспериментальные результаты

На рис. 1, *a* приведено изображение поперечного среза ГС  $\text{Ge}/\text{Ge}_{0.5}\text{Si}_{0.5}(20\text{ nm})/\text{Si}(001)$ , полученное с помощью ВРЭМ с атомным разрешением. Рис. 1, *b, c* представляет ту же область и ее увеличенный фрагмент (рис. 1, *d*) после цифровой обработки экспериментального изображения. Характерной особенностью изображения на рис. 1, *b*

является специфический контраст в виде черно-белых розеток, периодически расположенных вдоль гетерограницы  $\text{Ge}/\text{GeSi}$ . Такой контраст соответствует деформациям кристалла в окрестности ядер дислокаций, линия которых перпендикулярна плоскости рисунка. Как видно из этого рисунка, все ДН расположены исключительно на гетерогранице  $\text{Ge}/\text{GeSi}$ , и, соответственно, буферный слой  $\text{GeSi}$  остается практически нерелаксированным. Окружностями обведены парные  $60^\circ$  ДН, расстояния между ядрами которых составляют несколько межатомных расстояний и позволяют допустить суммарную краевую сущность этих пар, так как их суммарный вектор Бюргера перпендикулярен линии дислокации. (Более подробно механизмы взаимодействия парных  $60^\circ$  ДН, приводящие к образованию краевых ДН с различающейся структурой дислокационного ядра, описаны в [9]). В районе гетерограницы  $\text{Ge}/\text{GeSi}$  встречаются также непарные  $60^\circ$  ДН, в том числе и с экстраплоскостями, увеличивающими напряжения в пленке  $\text{Ge}$  (отмечены на рис. 1, *c, d* черными стрелками), свидетельствующие о частичной разупорядоченности дислокационной структуры границы раздела  $\text{Ge}/\text{GeSi}$ . Буферный слой  $\text{Ge}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$  толщиной 20 нм превышает критическую толщину для введения ДН в  $\sim 4$  раза ( $\sim 5\text{ nm}$  для данного состава). В соответствии с расчетами [10] пластическая релаксация буферного слоя  $\text{GeSi}$  такой толщины энергетически более выгодна на величину порядка 50%. Однако наблюдаемое на изображениях отсутствие ДН в границе разде-



**Рис. 2.** Результаты цифровой обработки экспериментального ВРЭМ-изображения поперечного среза отожженного образца  $Ge/Ge_{0.5}Si_{0.5}(20\text{ nm})/Si(001)$ : (a) — карта распределения межплоскостных расстояний; (b) — фильтрованное композитное изображение; (c) — выделенный прямоугольником фрагмент (b) в увеличенном виде. Стрелки и черные линии означают то же, что и на рис. 1.

ла  $GeSi/Si$  свидетельствует о близком к псевдоморфному состоянию слоя  $GeSi$ . Как видно из рис. 1, одиночные  $60^\circ$  ДН группируются вблизи границы раздела  $Ge/GeSi$ .

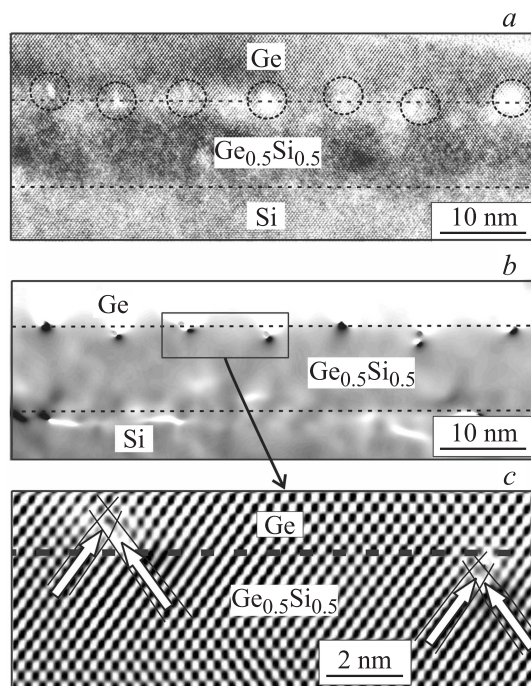
После отжига дислокационная структура этого образца кардинально изменилась. На рис. 2, a видно, что основная часть дислокаций переместилась в район границы раздела  $GeSi/$ подложка  $Si$ . На более детальном изображении (рис. 2, b) видно, что в границе раздела  $Ge/GeSi$  буфер остались исключительно краевые ДН (обведены белыми кружками). Среднее расстояние между ними составляет  $\sim 20\text{ nm}$  (по данным нескольких изображений), что соответствует полностью релаксированному состоянию пленки  $Ge$  на виртуальной подложке  $Ge_{0.5}Si_{0.5}$ , также полностью релаксированной.

Значительная часть  $60^\circ$  ДН, находящихся в районе границы раздела  $GeSi/Si$ , имеет компенсирующую  $60^\circ$  ДН (черные стрелки на рис. 2, b, c), вектор Бюргера которой противоположно направлен. Эти области окантованы пунктирными овалами. В связи с тем что контур обхода Бюргера, включающий такие дислокационные пары, является замкнутым, такие дефекты не вызывают смещения одной части пленки по отношению к другой и, следовательно, не могут оказывать влияние на релаксацию пленки. Однако присутствие таких областей в боль-

шом количестве свидетельствует о разупорядоченности дислокационной структуры вблизи границы  $GeSi/Si$ . На рис. 2, b, c пары  $60^\circ$  ДН, лежащие вблизи границы раздела  $GeSi/Si$  и позволяющие допустить суммарную краевую сущность (контур обхода вокруг такой пары имеет замыкающий вектор Бюргера, перпендикулярный линии дислокации), обведены прямоугольниками и квадратами. Среднее расстояние между ними близко к  $20\text{ nm}$  и приблизительно соответствует полной пластической релаксации буферного слоя  $GeSi$ .

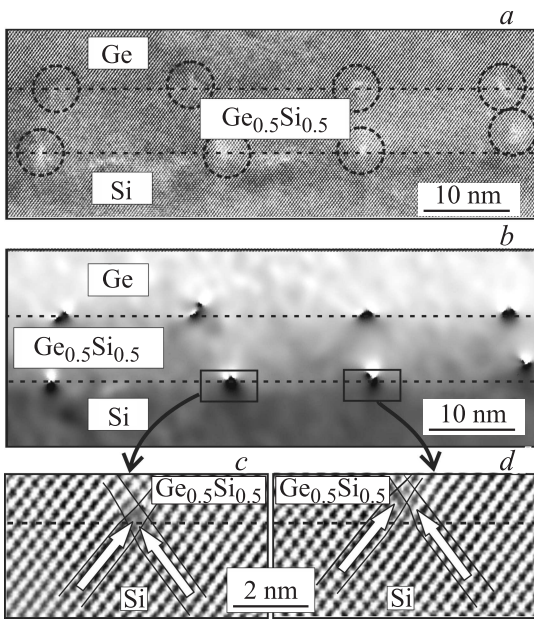
Таким образом, в процессе отжига образца  $Ge/Ge_{0.5}Si_{0.5}(20\text{ nm})/Si(001)$  буферный слой практически полностью релаксировал в результате перераспределения дислокаций, в том числе и краевых между границами раздела  $Ge/GeSi$  и  $GeSi/Si(001)$ .

При уменьшении толщины буферного слоя до  $10\text{ nm}$  в ГС  $Ge/Ge_{0.5}Si_{0.5}/Si(001)$  краевые дислокации составили основную часть ДН. На рис. 3 представлено изображение поперечного среза ГС  $Ge/Ge_{0.5}Si_{0.5}/Si(001)$  с буферным слоем  $10\text{ nm}$ . На исходном ВРЭМ-изображении области, содержащие ДН, выделены штриховыми окружностями. Так же, как и в предыдущем образце, ДН наблюдались только в гетерогранице  $Ge/GeSi$ , рис. 3, b. Однако, в отличие от предыдущего случая, ДН были исключительно краевыми (характерные примеры на рис. 3, c)



**Рис. 3.** Экспериментальное ВРЭМ-изображение поперечного среза свежевращенного образца  $Ge/Ge_{0.5}Si_{0.5}(10\text{ nm})/Si(001)$  (a) и результаты его цифровой обработки (b) и (c): (b) — карта распределения межплоскостных расстояний и (c) — фильтрованное композитное изображение. Выделенный прямоугольником на полутоновом изображении (b) фрагмент представлен на (c) в увеличенном виде. Стрелки и черные линии означают то же, что и на рис. 1.





**Рис. 4.** Экспериментальное ВРЭМ-изображение поперечного среза отожженного образца  $\text{Ge}/\text{Ge}_{0.5}\text{Si}_{0.5}(10 \text{ nm})/\text{Si}(001)$  (*a*) и результаты его цифровой обработки: (*b*) — карта распределения межплоскостных расстояний, (*c*, *d*) — фильтрованное композитное изображение. Выделенные прямоугольниками на полутоновом изображении (*b*) дислокационные ядра представлены на (*c*) и (*d*) в увеличенном виде. Стрелки и черные линии означают то же, что и на рис. 1.

и располагались на почти равных расстояниях друг от друга, что свидетельствует об образовании на этой границе упорядоченной дислокационной сетки. Средний период следования краевых ДН составляет  $\sim 9.4 \text{ nm}$ , что свидетельствует о полной аккомодации несоответствия параметров решеток пленки Ge и подложки Si. Вместе с отсутствием ДН на границе раздела  $\text{GeSi}/\text{Si}(001)$  это означает, что, также как и в предыдущем образце, буферный слой  $\text{Ge}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$  находится в псевдоморфном или близком к этому состоянию. При этом толщина этого слоя ( $10 \text{ nm}$ ) вдвое больше критической толщины введения  $60^\circ$  ДН.

На рис. 4 представлено изображение поперечного среза того же образца  $\text{Ge}/\text{Ge}_{0.5}\text{Si}_{0.5}/\text{Si}(001)$  с  $10 \text{ nm}$  буферным слоем после его отжига. Как видно из рисунка, дислокационная структура границ раздела  $\text{Ge}/\text{GeSi}$  и  $\text{GeSi}/\text{Si}(001)$  кардинально изменилась. На исходном ВРЭМ-изображении (рис. 4, *a*) области, содержащие ДН, выделены штриховыми окружностями. Более четко искажения кристаллической структуры этих областей видны на карте распределения межплоскостного расстояния (рис. 4, *b*). Судя по изображению на этом рисунке, а также более подробно представлению структуры отдельных ДН на рис. 4, *c* и 4, *d*, все наблюдаемые дислокации в обеих границах раздела являются краевыми. Причем, в границе раздела  $\text{Ge}/\text{GeSi}$  их линейная плотность уменьшилась  $\sim 2$  раза и соответствует величине,

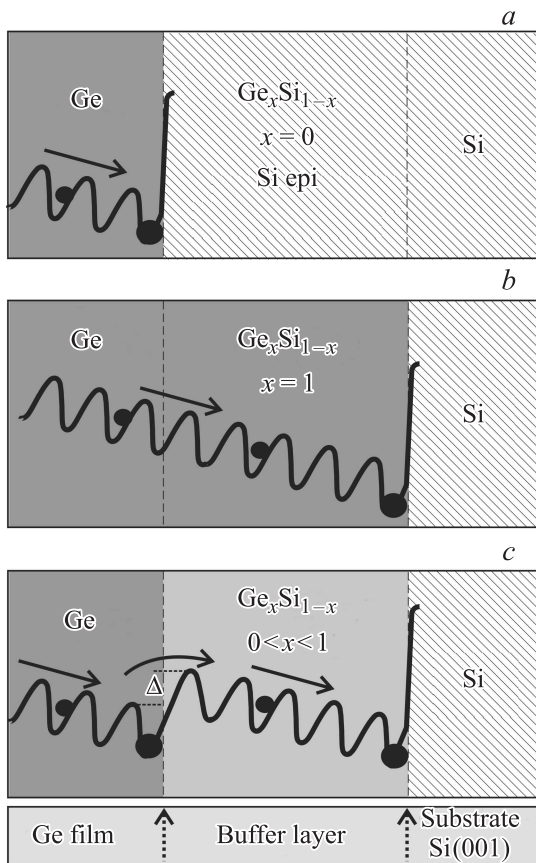
характерной для границы раздела между пластически релаксированными Ge и  $\text{Ge}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$ . Наличие ДН краевого типа в границе раздела  $\text{GeSi}/\text{Si}(001)$  приблизительно в том же количестве свидетельствует в пользу практически полной пластической релаксации буферного слоя GeSi. Измеренные на ВРЭМ-изображениях усредненные по площади буферного слоя  $\text{Ge}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$  расстояния между соседними наклонными плоскостями (111) составили  $0.318 \text{ nm}$  и  $0.320 \text{ nm}$  для свежеработанного и отожженного образцов, соответственно, что близко или совпадает с расчетными значениями для псевдоморфного ( $0.3174 \text{ nm}$ ) и полностью релаксированного ( $0.320 \text{ nm}$ ) состояний буферного слоя состава  $\text{Ge}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$ .

Таким образом, в процессе отжига образца  $\text{Ge}/\text{Ge}_{0.5}\text{Si}_{0.5}(10 \text{ nm})/\text{Si}(001)$  буферный слой  $\text{Ge}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$  практически полностью релаксировал в результате перераспределения краевых ДН между границами раздела  $\text{Ge}/\text{GeSi}$  и  $\text{GeSi}/\text{Si}(001)$ .

#### 4. Обсуждение результатов

В экспериментальных данных обращает на себя внимание тот факт, что в обоих образцах промежуточный слой GeSi в условиях превышения критической толщины в 2–4 раза остается псевдоморфным после окончания роста (так же, как и в работах [3,4]). В то же время отжиг приводит к полной его релаксации. Известно, что пластическая релаксация напряженных пленок в системе  $\text{GeSi}/\text{Si}(001)$  происходит, в основном, за счет зарождения дислокаций на свободной поверхности (см., например, обзор Фицджеральда [11]). В нашем эксперименте поверхность GeSi закрыта пленкой Ge. Однако объяснить сохранение псевдоморфного состояния слоя GeSi отсутствием центров зарождения дислокаций невозможно, так как во время выращивания пленки Ge она релаксирует с введением  $60^\circ$  ДН в границу раздела  $\text{Ge}/\text{GeSi}$ . Можно было бы предположить проникновение этих дислокаций в слой GeSi с образованием ДН на границе раздела  $\text{GeSi}/\text{Si}$ . Однако, как показывают экспериментальные данные для образца  $\text{Ge}/\text{Ge}_{0.5}\text{Si}_{0.5}(20 \text{ nm})/\text{Si}(001)$ , отдельные  $60^\circ$  ДН остаются на границе раздела  $\text{Ge}/\text{GeSi}$  (рис. 1, *b*, *c*). Таким образом, можно предположить, что переходу  $60^\circ$  ДН из границы раздела  $\text{Ge}/\text{GeSi}$  в границу раздела  $\text{GeSi}/\text{Si}$  препятствует энергетический барьер, существование которого схематически может быть объяснено на рис. 5.

Как известно, общепринятая модель распространения дислокаций основана на образовании изломов на дислокационной линии [12]. В напряженных пленках такие изломы образуют полупетли, мигрирующие в соседнюю энергетическую долину понижающегося потенциального рельефа. В нашем случае на пути такой миграции дислокационной линии находится граница раздела  $\text{Ge}/\text{напряженный буферный слой с перепадом доли Ge, равной 0.5}$ , что должно нарушить монотонность пони-



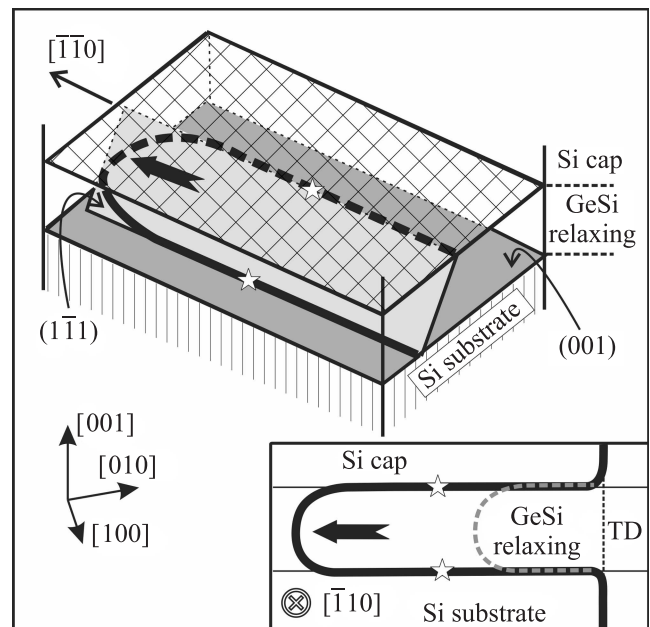
**Рис. 5.** Схема движения  $60^\circ$  ДН через границу раздела Ge/GeSi/Si(001). Состав буферного слоя в общем случае —  $Ge_xSi_{1-x}$ . Показан периодический потенциальный рельеф, по которому дислокационные линии (черные кружки) мигрируют в направлении стрелок. Большие кружки — неподвижные дислокации.

жения потенциального рельефа и повлиять на характер миграции дислокации.

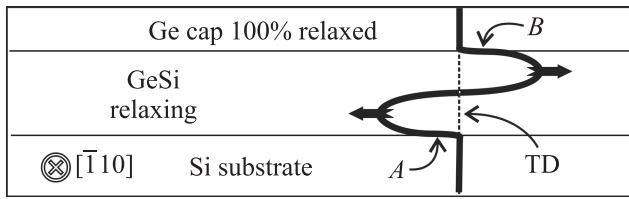
На рис. 5 схематично представлены варианты движения  $60^\circ$  ДН через границу раздела Ge/GeSi буфер. Как известно, при релаксации напряженной пленки дислокации располагаются в границе раздела пленка/подложка, так как дальнейшее их продвижение в ненапряженную подложку не выгодно. Если состав буферного слоя не отличается от состава подложки, то граница раздела, стопорящая продвижение  $60^\circ$  ДН внутрь подложки Si, сдвигается к границе Ge/Si буфер (рис. 5, a). Если напряженный буферный слой имеет состав тот же, что и пленка, то монотонное понижение потенциального рельефа продолжается вплоть до подложки Si, где и стопорится передвижение  $60^\circ$  ДН (рис. 5, b). На рис. 5, c представлен промежуточный вариант, когда состав напряженного буферного слоя  $Ge_xSi_{1-x}$  имеет промежуточное значение между составом основной пленки Ge и подложкой Si. На границе раздела пленка/напряженный буферный слой появляется дополнительный потенциальный барьер  $\Delta$  (рис. 5, c), величина которого должна

зависеть от состава буферного слоя. В нашем случае величина этого барьера оказалась достаточной, чтобы воспрепятствовать движению дислокаций через границу раздела Ge/GeSi в процессе роста при  $500^\circ\text{C}$ , и преодолимой при отжиге образцов при  $700^\circ\text{C}$ .

Рассмотрим возможные механизмы релаксации захороненного слоя GeSi в процессе отжига. Пластическая релаксация захороненных напряженных слоев типа Si/GeSi/Si(001) и напряженных сверхрешеток изучалась ранее в связи с применением подобных ГС в приборах, использующих напряженное состояние вещества, например в гетеробиполярных транзисторах [13]. Механизм пластической релаксации напряженного слоя, заключенного между границами с ненапряженными материалами, был предложен в 1974 г. в [14]. В силу идентичности параметров решетки обкладок захороненного слоя его релаксация происходила путем образования пары  $60^\circ$  ДН, находящихся на одной наклонной плоскости скольжения  $\{111\}$ , но на разных границах раздела (рис. 6), и принадлежащих одной дислокационной полупетле. Источником этой пары предполагалась пронизывающая дислокация, пересекавшая ГС. На экспериментальных электронно-микроскопических изображениях такие дислокационные пары выглядят как две параллельные ДН, расстояние между которыми определяется толщиной захороненного слоя (см., например, [15,16]). Ключевой особенностью такого механизма пластической релаксации является то, что напряженный слой захоронен



**Рис. 6.** Схема образования и распространения  $60^\circ$  ДН при пластической релаксации захороненного метастабильного слоя GeSi, заключенного между обкладками ненапряженного Si. Звездочками отмечены  $60^\circ$  ДН. На вставке вид в направлении вдоль границы раздела. TD — пронизывающая дислокация. Черная стрелка показывает направление скольжения дислокационной полупетли.



**Рис. 7.** Схема пластической релаксации буферного слоя GeSi за счет изгиба пронизывающей дислокации (TD на схеме). Изгиб ПД в границу раздела GeSi/Si способствует релаксации буферного слоя GeSi (дислокация несоответствия A). Но при этом плотность ДН в границе раздела Ge/GeSi должна уменьшаться, что мог бы обеспечить изгиб ПД в границе раздела Ge/GeSi и движение дислокации несоответствия B в противоположном направлении.

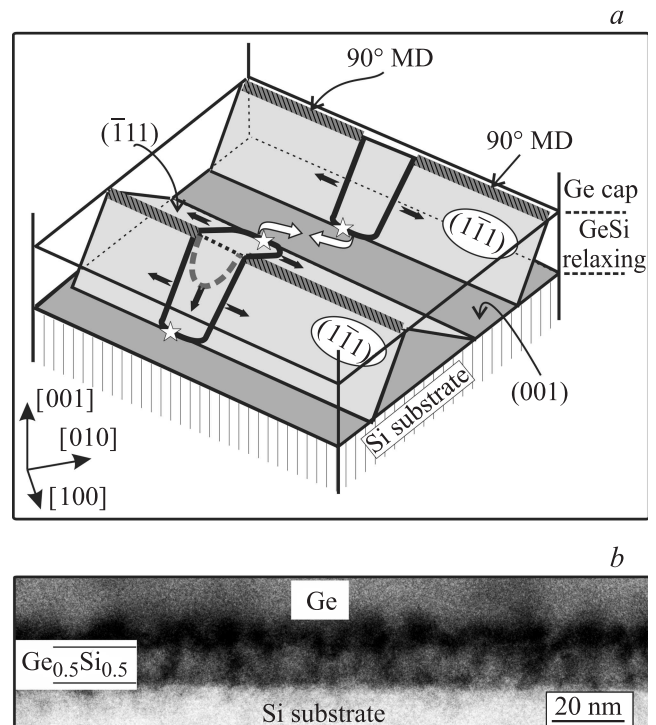
между двумя ненапряженными материалами, имеющими одинаковый параметр решетки. При этом дислокационная полупетля, расширяющаяся в напряженном слое в одном направлении, снимает несоответствие параметров решетки на обеих границах.

Коренное отличие рассматриваемого в настоящей работе случая заключается в том, что GeSi-слой, находящийся в напряженном метастабильном состоянии, заключен между ненапряженной подложкой Si и релаксированным Ge, имеющими разный параметр решетки. При этом граница раздела GeSi-слоя с Ge состоит из сетки как краевых, так и  $60^\circ$  ДН, в то время как граница между слоем GeSi и Si-подложкой — когерентна (рис. 7). Если предположить релаксацию слоя GeSi за счет изгиба ПД вдоль границ раздела, то, в нашем случае по мере релаксации этого буферного слоя, плотность ДН в границе раздела Ge/GeSi должна уменьшаться. Это проявится в движении части ПД, прилегающей к границе Ge/GeSi, в направлении, противоположном ее распространению вблизи границы GeSi/Si, как это представлено на рис. 7. Такой вариант представляется маловероятным вследствие образования и удлинения дислокационной линии, соединяющей две полупетли, расширяющиеся в противоположных направлениях.

Приведенные выше экспериментальные результаты показывают, что часть краевых ДН, до отжига ГС находившихся в границе раздела Ge/GeSi, в процессе отжига мигрировала в границу GeSi/Si. Возможная схема миграции краевых ДН в эту границу в случае реализации механизма скольжения представлена на рис. 8, а. Предполагается расщепление краевой дислокации на две полупетли, включающие  $60^\circ$  дислокационные сегменты, с последующим их скольжением в границу GeSi/Si. В районе этой границы ближайшие комплементарные пары  $60^\circ$  дислокаций при образовании краевой ДН мигрируют друг к другу путем механизма переползания (показано изогнутыми стрелками на рис. 8, а). Учитывая малую толщину слоя GeSi, можно предположить, что краевые ДН могут перемещаться целиком (без рас-

щепления и последующего скольжения) по механизму переползания.

Таким образом, при переходе ГС из состояния с напряженным буферным слоем в более энергетически выгодное состояние с двумя дислокационными сетками и пластически релаксированным буферным слоем дислокациям необходимо преодолеть барьер при расщеплении краевой ДН на две подвижные полупетли, а также барьер, препятствующий пересечению дислокационной линией границы GeSi/Si по модели, изображенной на рис. 6. Кроме того, при образовании краевых ДН в границе GeSi/Si необходимо движение пары комплементарных  $60^\circ$  дислокаций, достигших этой границы, по направлению друг к другу в плоскости границы раздела. Это возможно только в случае, если механизм переползания дислокаций становится равноправным участником их взаимодействия. По-видимому, температура отжига  $700^\circ\text{C}$  оказалась достаточной для преодоления этих трех энергетических барьеров в исследованных образцах. В результате такого перераспределения дислокаций пластически релаксированный буферный слой GeSi оказывается насыщен дислокационными сегментами, свя-



**Рис. 8.** (а) — схема расщепления краевых ДН, находящихся в гетерогранице Ge/GeSi (обозначены штрихованными полосами), на дислокационные полупетли, расширение которых обозначено черными стрелками. На пересечении наклонных плоскостей скольжения (на рис. (а) это плоскости  $(\bar{1}11)$  и  $(1\bar{1}1)$ ) с границей раздела GeSi/Si образуются  $60^\circ$  дислокационные сегменты (обозначены звездочками). (б) — темнопольное двулучевое ВРЭМ-изображение поперечного среза образца Ge/Ge<sub>0.5</sub>Si<sub>0.5</sub> (10 нм)/Si(001) после отжига. Наблюдается большая плотность ПД внутри буферного слоя GeSi.

зываются две ограничивающие его дислокационные сетки. Это демонстрирует рис. 8, *b*. Основываясь на вышеприведенных рассуждениях, можно отрицательно отнестись к высказанному в работах [3,4] предположению о том, что в объеме буферного слоя происходит коалесценция дислокаций, способствующая уменьшению плотности ПД в слое Ge.

## 5. Заключение

В процессе роста ГС типа Ge/GeSi/Si(001) на границе раздела Ge/GeSi формируется сетка ДН, достаточная для полной пластической релаксации слоя Ge. В то же время буферные слои GeSi остаются в метастабильном состоянии, несмотря на то, что их толщина (10–20 nm) в несколько раз превышает критическую для введения ДН. Предполагается, что существует барьер для перехода ДН из слоя Ge в слой GeSi, в результате чего ДН захватываются на этой границе. Этот барьер преодолевается в процессе 30 min отжига при 700°C: буферный слой GeSi пластически релаксирует за счет перехода части как 60°, так и краевых ДН из границы Ge/GeSi в границу GeSi/Si(001). В ГС Ge/Ge<sub>0.5</sub>Si<sub>0.5</sub>/Si(001), буферный слой которой имеет толщину 10 nm, в обеих гетерограницах, его ограничивающих, образуются упорядоченные дислокационные сетки, состоящие из краевых дислокаций несоответствия.

## Список литературы

- [1] H.-C. Luan, D.R. Lim, K.K. Lee, K.M. Chen, J.G. Sandland, K. Wada, L.C. Kimerling. *Appl. Phys. Lett.* **75**, 2909 (1999).
- [2] L. Colace, G. Masini, G. Assanto, Hsin-Chiao Luan, K. Wada, L.C. Kimerling. *Appl. Phys. Lett.* **76**, 1231 (2000).
- [3] T.H. Loh, H.S. Nguyen, C.H. Tung, A.D. Trigg, G.Q. Lo, N. Balasubramanian, D.L. Kwong, S. Tripathy. *Appl. Phys. Lett.* **90**, 092 108 (2007).
- [4] Z. Zhou, C. Li, H. Lai, S. Chen, J. Yu. *J. Cryst. Growth* **310**, 2508 (2008).
- [5] Y.B. Bolkhovityanov, A.S. Deryabin, A.K. Gutakovskii, L.V. Sokolov. *J. Appl. Phys.* **107**, 123 521 (2010).
- [6] M.J. Hytch, M. Gandais. *Phil. Mag. A* **72**, 619 (1995).
- [7] M. Takeda, J. Suzuki. *J. Opt. Soc. Am. A* **13**, 1495 (1996).
- [8] A.K. Гутаковский, А.Л. Чувилин, Se Ahn Song. *Изв. РАН, Сер. физ.* **71**, 1464 (2007).
- [9] Y.B. Bolkhovityanov, A.S. Deryabin, A.K. Gutakovskii, L.V. Sokolov. *Acta Materialia* **61**, 617 (2013).
- [10] S.M. Hu. *J. Appl. Phys.* **69**, 7901 (1991).
- [11] E.A. Fitzgerald. *Mater. Sci. Rep.* **7**, 87 (1991).
- [12] J.P. Hirth, J. Lothe. *Theory of Dislocations* (McGraw-Hill, N. Y., 1968). Ch. 15.
- [13] D.C. Houghton. *Appl. Phys. Lett.* **57**, 1434 (1990).
- [14] J.W. Matthews, A.E. Blakeslee. *J. Cryst. Growth* **27**, 118 (1974).
- [15] C.G. Tuppen, C.J. Gibbings. *J. Appl. Phys.* **68**, 1526 (1990).
- [16] X.W. Liu, A.A. Hopgood, B.F. Usher, H. Wang, N.St.J. Braithwaite. *J. Appl. Phys.* **94**, 7496 (2003).