

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ КРАЕВЫХ ДИСЛОКАЦИЙ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ $\text{Ge}/\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$ ($x = 0.2\text{--}0.6$)

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

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова Российской академии наук
630090, Новосибирск, Россия*

Поступила в редакцию 12 мая 2016 г.

Гетероструктуры $\text{Ge}/\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$ ($x = 0.2\text{--}0.6$), выращенные методом молекулярной эпитаксии, были исследованы методом высокоразрешающей электронной микроскопии с атомным разрешением. Буферный слой $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ имел толщину 7–35 нм. Показано, что такие гетероструктуры релаксируют в две стадии: в процессе роста (500°C) формируется упорядоченная сетка краевых дислокаций на границе раздела Ge/GeSi ; затем в процессе отжига при более высоких температурах и $x > 0.3$ часть краевых дислокаций в противовес общепринятому мнению об их неподвижности перемещается через буферный слой GeSi к границе раздела $\text{GeSi}/\text{Si}(001)$. Было обнаружено, что пластическая релаксация буферного слоя GeSi осуществляется путем движения дислокационных комплексов краевого типа, состоящих из пары комплементарных 60-градусных дислокаций, окончания экстроплоскостей $\{111\}$ которых находятся на удалении примерно от 2 до 12 межплоскостных расстояний. Показано, что проникновение дислокационных комплексов в буферный слой GeSi и далее в границу GeSi/Si интенсифицируется с ростом температуры отжига ($600^\circ\text{C}\text{--}800^\circ\text{C}$) и доли Ge в буферном слое.

DOI: 10.7868/S0044451016110134

1. ВВЕДЕНИЕ

Ломер [1] в 1951 г. предположил, что упрочнение кубических и гексагональных кристаллов при деформации может быть объяснено появлением сидячих дислокаций. Эти дислокации образуются из двух смешанных дислокаций, скользящих вдоль пересекающихся плоскостей $\{111\}$. В результате их взаимодействия образуется краевая дислокация (позже названная дислокацией Ломера, а дислокационная конструкция — ломеровским замком (Lomer lock)), неподвижная в кристаллах с алмазоподобной решеткой.

Краевые дислокации Ломера являются одним из основных структурных дефектов в кристаллах Ge, Si и A_{III}B_V (см., например, [2]). С тех пор как появилась возможность наблюдать на атомном уровне особенности кристаллической структуры границ раздела веществ, рассогласованных по параметру решетки, в частности, гетероструктур на

основе Ge/Si и GaAs/Si , выращенных различными методами, было обнаружено, что дислокации краевого типа, обычно обнаруживаемые в области границ раздела, могут иметь разнообразную структуру ядра: от компактной, подобной предложенной в работе [3], до рыхлой, занимающей в поперечнике несколько нм [4]. В работах [5, 6] был введен новый параметр, дополнительно характеризующий кристаллическую структуру краевой дислокации, — расстояние между ядрами 60-градусных дислокационных пар, образующих краевую дислокацию. Это расстояние меняется от нуля до 5–6 нм [5].

Гетероструктуры $\text{Ge}/\text{HTGe}/\text{GeSi}(10\text{--}50\text{ нм})\text{-буфер}/\text{Si}(001)\text{-подложка}$ (HT — низкотемпературный слой Ge) обладают необычными, с точки зрения пластической релаксации, свойствами. В работе [7] мы показали, что в гетероструктурах такого типа после пластической релаксации слоя Ge, выращенного при $T = 500^\circ\text{C}$, практически все дислокации несоответствия имеют краевой тип и расположены исключительно в границе раздела Ge/GeSi , а буферный слой GeSi остается псевдоморфным. После отжига при $T = 700^\circ\text{C}$ в некоторых гетероструктурах буферный слой также релаксирует за счет того,

* E-mail: bolkhov@isp.nsc.ru

что часть краевых дислокаций несоответствия, ранее расположенных в границе раздела Ge/GeSi, перемещается на границу GeSi/Si [8]. Возникает вопрос: как краевые дислокации перемещаются из верхней границы раздела Ge/GeSi через объем буферного слоя GeSi, хотя по общепринятым меркам они считаются сидячими.

Рассматриваемые гетероструктуры являются удобным объектом для изучения поведения краевых дислокаций. Вследствие того, что при температуре роста 500 °С дислокации краевого типа занимают места исключительно на границе раздела Ge/GeSi-буфер и последний остается напряженным, после отжига образцов при более высоких температурах становится возможной фиксация событий (структурная форма дефектов, их расположение), определяющих процесс пластической релаксации буферного слоя GeSi. В работе [9] мы показали на примере буферного слоя Ge_{0.5}Si_{0.5} (10 нм), что перераспределение краевых дислокаций между верхней и нижней границами осуществляется путем движения дислокационных комплексов ломеровского типа, имеющих более рыхлую, чем компактная согласно работе [3] краевая дислокация, атомную структуру.

В настоящей работе основное внимание уделено влиянию состава буферного слоя Ge_xSi_{1-x} ($x = 0.2-0.6$) на возможность продвижения дислокационных комплексов ломеровского типа в объем буферного слоя при температурах 500–800 °С, что позволило более детально изучить механизм перемещения краевых дислокаций несоответствия.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Гетероструктуры Ge на Si-подложке были выращены методом молекулярной эпитаксии. Основные детали условий роста были описаны в работе [10]. Для удобства дальнейшего обсуждения отметим температурный режим роста слоев: буферный слой GeSi толщиной 7–35 нм и долей германия 0.2–0.6 был выращен при температуре 450 °С; следующий за ним слой Ge толщиной 7 нм (затравочный низкотемпературный слой германия) был осажден при температуре 200 °С. Далее, одновременно с повышением температуры до 500 °С, основной слой Ge был выращен до толщины 0.5 мкм.

Дислокационная структура выращенных образцов была исследована на поперечных срезах с использованием электронного микроскопа JEOL-4000EX при ускоряющем напряжении 400 кВ.

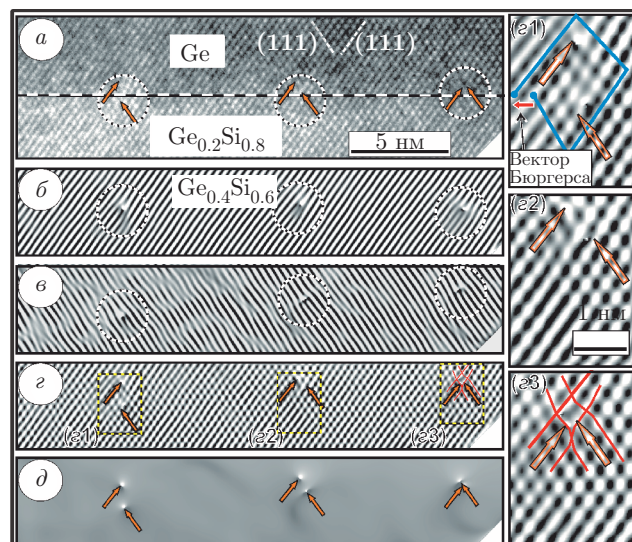


Рис. 1. (В цвете онлайн) Экспериментальное ВРЭМ-изображение поперечного среза свежеращенного образца Ge/Ge_{0.2}Si_{0.8}(35 нм)/Si(001) (а) и результаты его цифровой обработки: б и в — фильтрованное в рефлексах (111) и (111) композитное изображение, г — композитное изображение как результат наложения б и в; д — распределение межплоскостных расстояний для плоскостей (111) и (111) в тоновой моде. Оранжевые стрелки отмечают окончания экстраплоскостей {111}. Голубая линия на рис. 1г1 — контур Бюргерса. Красные линии на рис. 1г2 и 1г3 проведены вдоль плоскостей (111) и (111), окаймляющих окончания экстраплоскостей. Штриховая линия на рис. 1а — граница раздела

В настоящей работе был использован метод геометрической фазы, впервые предложенный в работах [11, 12].

Для наглядного представления распределения дислокаций, расположенных перпендикулярно срезу поперечного сечения, исходные ВРЭМ-изображения обрабатываются таким образом, что величина межплоскостных расстояний представляется в виде полутоновой картины. Пример результатов цифровой обработки образца Ge/Ge_{0.2}Si_{0.8}(35 нм)/Si(001) представлен на рис. 1д. На фоне однородного распределения межплоскостных расстояний (однородный фон) наблюдаются розетки деформаций: черный и белый полутон соответствуют местам, где в дислокационных ядрах наблюдаются окончания экстраполуплоскостей {111}. 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

Рисунок 1 представляет одно из нескольких изображений свежесвыращенного образца $\text{Ge}/\text{Ge}_{0.2}\text{Si}_{0.8}$ (35 нм)/ $\text{Si}(001)$, использованное выше для иллюстрации цифровой обработки ВРЭМ-изображений, где показано (рис. 1а), что сопряжение кристаллических решеток Ge и GeSi осуществляется с помощью дислокационных комплексов, сформированных из двух 60-градусных дислокаций, и вектор, замыкающий контур обхода Бюргера, включающий оба окончания экстраплоскостей (рис. 1з), лежит в плоскости (001), что является признаком краевой дислокации. По этим двум признакам наблюдаемые дислокационные комплексы можно отнести к дислокациям ломеровского типа [1]. Как видно на рис. 1а,г,д, окончания экстраплоскостей каждой пары 60-градусных дислокаций находятся на расстояниях от одного до нескольких межплоскостных промежутков, что подтверждает отмеченное во Введении разнообразие атомной структуры дислокационных комплексов. По данным нескольких изображений этого образца среднее расстояние между дислокационными комплексами составляет 9.6 нм, что означает практически полную пластическую релаксацию слоя Ge краевыми дислокациями и в то же время псевдоморфное состояние буферного слоя GeSi, не содержащего дислокаций несоответствия.

3.1. Гетероструктура $\text{Ge}/\text{Ge}_{0.3}\text{Si}_{0.7}$ (10 нм)/ $\text{Si}(001)$

Ранее мы сообщили о том, что в гетероструктуре $\text{Ge}/\text{Ge}_{0.3}\text{Si}_{0.7}$ (30 нм)/ $\text{Si}(001)$, отожженной при $T = 700^\circ\text{C}$, краевые дислокации остались в границе Ge/GeSi [10]. На рис. 2 представлено изображение поп-среза той же гетероструктуры, но отожженной при более высокой температуре 800°C в течение 10 мин. Несмотря на высокую температуру отжига все дислокации краевого типа по-прежнему расположены исключительно на границе раздела Ge/GeSi . Как видно на рисунке, практически все ломеровские дислокации имеют компактную атомную структуру (окончания экстраплоскостей в каждой паре 60-градусных дислокаций находятся на расстояниях не более 2 межплоскостных промежутков).

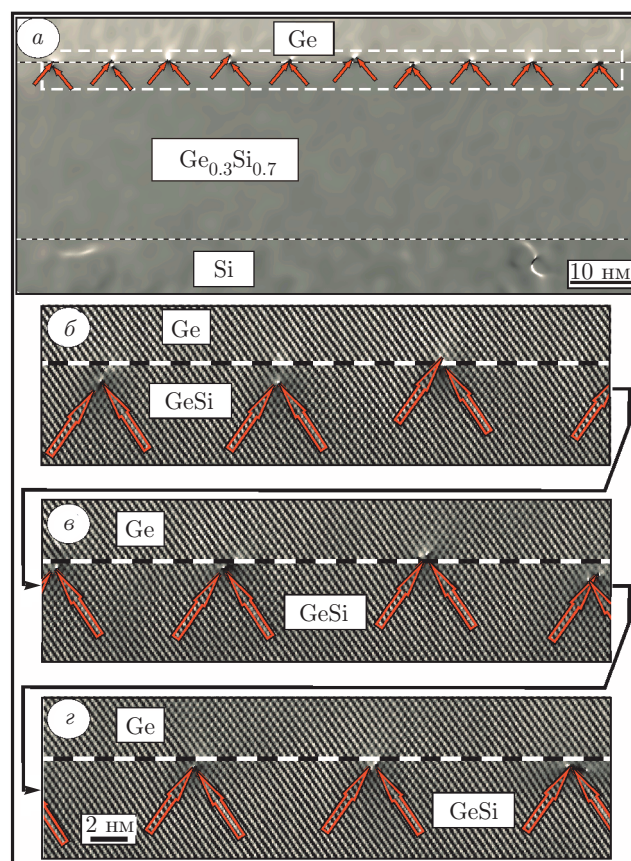


Рис. 2. ВРЭМ-изображение гетероструктуры $\text{Ge}/\text{Ge}_{0.3}\text{Si}_{0.7}$ (30 нм)/ $\text{Si}(001)$, отожженной при $T = 800^\circ\text{C}$: а — распределение межплоскостных расстояний для плоскостей (111) и (11 $\bar{1}$) в тоновой моде; б–г — фильтрованное в рефлексах (111) и (11 $\bar{1}$) композитное изображение области, выделенной на рис. 2а белым штриховым прямоугольником. Стрелки отмечают окончания экстраплоскостей {111}. Штриховые линии — границы раздела

3.2. Гетероструктура $\text{Ge}/\text{Ge}_{0.4}\text{Si}_{0.6}$ (10 нм)/ $\text{Si}(001)$

Анализ поперечных срезов свежесвыращенного образца $\text{Ge}/\text{Ge}_{0.4}\text{Si}_{0.6}$ (10 нм)/ $\text{Si}(001)$ показал, что буферный слой GeSi остается напряженным (так же, как и в предыдущем случае), и все дислокации находятся в границе раздела Ge/GeSi . Как пример, одно из таких изображений приведено на рис. 3а. В то же время после отжига этого образца при $T = 700^\circ\text{C}$ наблюдаются следующие изменения: часть дислокационных комплексов, оставаясь в районе границы Ge/GeSi , имеет большие чем ранее расстояния между парами экстраплоскостей (рис. 3в–д), а также наблюдаются единичные проникновения таких комплексов внутрь буферного слоя (на рис. 3б выделе-

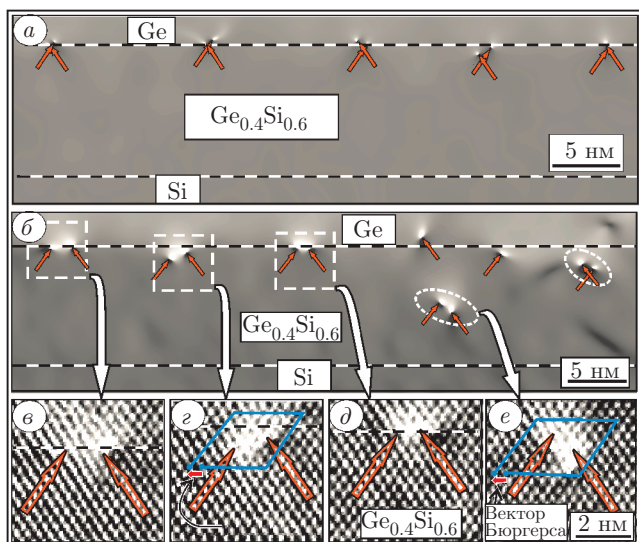


Рис. 3. ВРЭМ-изображения гетероструктуры Ge/Ge_{0.4}Si_{0.6}(10 нм)/Si(001) — свежесинтезированной (а) и отожженной при $T = 700\text{ }^\circ\text{C}$ (б–е); а и б — распределения межплоскостных расстояний для плоскостей (111) и (11 $\bar{1}$) в тоновой моде; в–е — увеличенные экспериментальные ВРЭМ-изображения областей, обведенных на рис. 3б штриховыми линиями. Изображения фильтрованы в рефлексах (111) и (11 $\bar{1}$). Остальные обозначения те же, что и на рис. 1

ны пунктирными белыми овалами). Это свидетельствует о появлении условий, способствующих движению этих дислокационных образований к границе GeSi/Si. Контуры Бюргерса, включающие оба окончания экстраплоскостей (111) и (11 $\bar{1}$) (рис. 3з,е), по-прежнему индицируют принадлежность суммарного вектора Бюргерса к краевой дислокации. Наблюдаемые дислокационные образования можно трактовать как «расщепленные или не полностью сформировавшиеся дислокационные комплексы ломеровского типа» [7].

3.3. Гетероструктура Ge/Ge_{0.5}Si_{0.5}(10 нм)/Si(001)

Местонахождение дислокаций в гетероструктуре Ge/Ge_{0.5}Si_{0.5}(10 нм)/Si(001) при температурах роста 500 °C и отжига 600 °C и 700 °C представлено на рис. 4. Буферный слой Ge_{0.5}Si_{0.5} остается псевдоморфным после роста, дислокации, находящиеся исключительно в границе раздела Ge/GeSi, являются компактными образованиями ломеровского типа (рис. 4а). После отжига GeSi при $T = 700\text{ }^\circ\text{C}$ слой практически полностью релаксирован: в каждой границе раздела наблюдается практически рав-

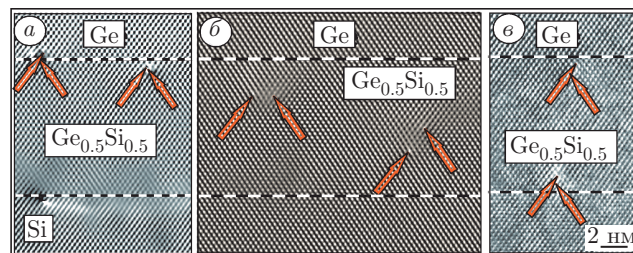


Рис. 4. ВРЭМ-изображения поперечного среза гетероструктуры Ge/Ge_{0.5}Si_{0.5}(10 нм)/Si(001): а — свежесинтезированной, б — отожженной при $T = 600\text{ }^\circ\text{C}$, в — отожженной при $T = 700\text{ }^\circ\text{C}$. Изображения фильтрованы в рефлексах (111) и (11 $\bar{1}$). Остальные обозначения те же, что и на рис. 1

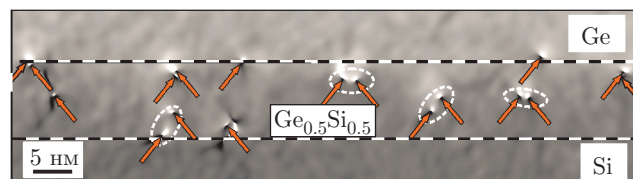


Рис. 5. ВРЭМ-изображение поперечного среза гетероструктуры Ge/Ge_{0.5}Si_{0.5}(10 нм)/Si(001), отожженной при $T = 600\text{ }^\circ\text{C}$. Использована полутонная мода. Дислокационные комплексы, проникшие в объем буферного слоя, выделены белыми штриховыми овалами. Остальные обозначения те же, что и на рис. 1

ное количество краевых компактных дислокаций ломеровского типа (рис. 4в).

Отжиг при температуре 600 °C выявил промежуточное состояние этого образца (рис. 4б): дислокационные комплексы находятся внутри буферного слоя, т.е. на пути к границе раздела GeSi/Si, а расстояния между окончаниями экстраплоскостей {111} составляют около 2 нм. Более общая картина распределения дислокаций и дислокационных комплексов представлена на рис. 5 в полутонной моде. Наиболее характерные дислокационные комплексы с расстояниями между окончаниями экстраплоскостей {111} вплоть до 4 нм выделены штриховыми овалами. Таким образом, достаточно уверенно наблюдается промежуточная стадия релаксации буферного слоя GeSi, в которой комплексы краевого типа движутся к границе раздела GeSi/Si. Отличительной особенностью комплексов является наличие расстояния между ядрами пары 60-градусных дислокаций (2–12 межплоскостных промежутков по данным нескольких ВРЭМ изображений). Такие структурные образования можно назвать диссоциированными дислокациями Ломера.

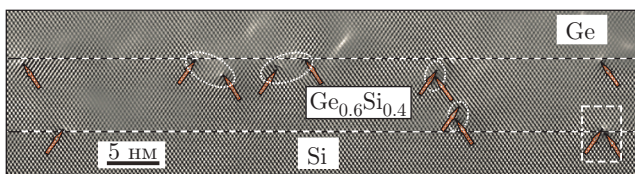


Рис. 6. ВРЭМ-изображение поперечного среза гетероструктуры Ge/Ge_{0.6}Si_{0.4}(7 нм)/Si(001). Образец свежеращенный при $T = 500^\circ\text{C}$. Изображение отфильтровано в рефлексах (111) и (11 $\bar{1}$). Дислокационные комплексы, проникшие в объем буферного слоя, выделены белыми штриховыми овалами. Остальные обозначения те же, что и на рис. 1

3.4. Гетероструктура Ge/Ge_{0.6}Si_{0.4}(7 нм)/Si(001)

В соответствии с наметившейся закономерностью можно было ожидать начало пластической релаксации буферного слоя с долей Ge 0.6 путем перемещения части дислокационных комплексов Ломера из верхней границы в нижнюю уже в процессе роста гетероструктуры, т. е. при $T = 500^\circ\text{C}$. Чтобы избежать неопределенности, связанной с возможным началом введения дислокаций несоответствия на границу раздела Ge_{0.6}Si_{0.4}/Si еще до начала роста основного слоя Ge, была снижена температура роста буферного слоя до 350°C . Как видно на рис. 6, уже в свежеращенном образце (500°C) часть дислокаций в виде компактных комплексов оказалась на границе раздела GeSi/Si (в штриховом прямоугольнике), но часть комплексов (обведены пунктирными овалами) «не успела» достичь этой границы. Таким образом, в гетероструктуре с буферным слоем Ge_{0.6}Si_{0.4} его пластическая релаксация началась уже при температуре роста основного слоя Ge, т. е. при $T = 500^\circ\text{C}$. Как и ранее, этот процесс определяется движением диссоциированных дислокационных комплексов краевого типа внутри буферного слоя GeSi по направлению к его границе с Si.

4. ДИСКУССИЯ

Механизмом случайной встречи подходящих 60-градусных дислокаций трудно объяснить формирование упорядоченной сетки краевых дислокаций на границах раздела рассмотренных гетероструктур. Авторы работы [5] одними из первых обратили внимание на существенную долю парных (как они отмечали) 60-градусных дислокаций в гетероструктуре Ge/Si и предположили, что зарождение вторичной группы 60-градусных

дислокаций, скользящих вдоль зеркально отклоненной плоскости (111) и имеющих два различных направления сдвиговых компонент по отношению к первичной 60-градусной дислокации (противоположное и параллельное), ответственно за образование краевой дислокации (противоположное направление) и дислокационной пары (параллельное направление), которая не может сформировать краевую дислокацию. Позднее эти авторы показали, что в соответствии с механизмом наведенного зарождения (впервые предложенным в работе [13]) вторичная 60-градусная дислокация зарождается под влиянием поля напряжений первичной 60-градусной дислокации несоответствия [14]. (Это предположение позднее было подтверждено в наших работах, например, в [15].) На основании этого следует ожидать, что пары комплементарных 60-градусных дислокаций с противоположными сдвиговыми компонентами будут преобладать в наблюдаемых дислокационных комплексах и при повышенных температурах отжига трансформироваться в компактные краевые дислокации Ломера. Приведенные выше эксперименты показали, что ранее наблюдаемые близкорасположенные пары 60-градусных дислокаций после отжига практически полностью преобразуются в компактные формы (см., например, рис. 2), что подтверждает данное предположение.

Как следует из приведенных выше результатов, гетероструктуры типа Ge/LTGe/GeSi (7–50 нм)-буфер/Si(001) релаксируют в две стадии: в процессе роста (500°C) формируется упорядоченная сетка краевых дислокаций Ломера на границе раздела Ge/GeSi; затем в процессе отжига при более высоких температурах часть краевых дислокаций перемещается через буферный слой GeSi к границе раздела GeSi/Si(001). Однако ясно, что этот процесс существенно зависит от состава буферного слоя и температуры отжига.

Для облегчения восприятия влияния состава буферного слоя, а также температуры на возможность его пластической релаксации все результаты сведены в таблицу.

После отжига гетероструктуры вплоть до $T = 800^\circ\text{C}$ ломеровские дислокационные комплексы остаются на границе раздела Ge/GeSi, если доля Ge в буферном слое не превышает 0.3. Структура таких комплексов приближается к структуре компактной дислокации Ломера (рис. 2). При большей доле Ge они обнаруживаются как в буферном слое, так и на границе раздела GeSi/Si в диссоциированном виде (рис. 3, 5, 6). Как следует из таблицы, проникнове-

Таблица. Структурное состояние буферного слоя $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ в зависимости от температуры (500–800 °С), состава ($x = 0.2\text{--}0.6$) и толщины d слоя GeSi

Образец		M30	P24	P50	P22	P123
x		0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
d , нм		35	30	10	10	7
После роста (500 °С)		Псевдоморфный	Псевдоморфный	Псевдоморфный	Псевдоморфный	Промежуточное состояние*
Отжиг	600 °С	—	—	—	Промежуточное состояние*	—
	700 °С	—	Псевдоморфный**	Начало релаксации*	Полностью релаксирован	—
	800 °С	—	Псевдоморфный	—	—	—

Примечание: * — дислокационные комплексы обнаруживаются внутри слоя GeSi, ** — информация из работы [10].

ние таких комплексов в буферный слой и далее на границу GeSi/Si интенсифицируется с ростом температуры отжига и доли Ge в буферном слое.

Как следует из приведенных выше ПЭМ-микрофотографий, перемещение краевых дислокаций осуществляется в форме ломеровских дислокационных комплексов, состоящих из пары комплементарных 60-градусных дислокаций, окончания экстраплоскостей {111} которых находятся на удалении примерно 2–12 межплоскостных расстояний. Можно предположить, что из-за такой «размытости» дислокационные комплексы имеют возможность непрерывной перестройки, позволяющей им продвигаться к границе раздела GeSi/Si как путем скольжения 60-градусных дислокаций, их образующих, так и путем переползания. Таким образом, наблюдаемые ломеровские дислокационные комплексы краевого типа в силу своей «рыхлости» являются подвижными объектами, обеспечивающими пластическую релаксацию буферных слоев GeSi.

Возможная схема передвижения дислокационных комплексов внутри буферного слоя GeSi представлена на рис. 7. Как известно, скольжение подвижных дислокаций в ковалентных полупроводниках осуществляется путем генерации микроскопических перегибов, называемых изломами [16], в соседнюю энергетическую долину. Переползание отдельного отрезка дислокационной линии в направлении, не совпадающем с плоскостью скольжения, также происходит за счет образования неровностей, но при ее взаимодействии с точечными дефектами [17]. Окончания {111} экстраплоскостей, входящие

в ядро ломеровского дислокационного комплекса, при взаимодействии с вакансиями должны удаляться друг от друга, что показано белыми стрелками на схеме рис. 7. Но в то же время их сближение (красные стрелки) возможно путем скольжения каждой 60-градусной дислокации по наклонным плоскостям скольжения {111} за счет действия сил взаимного притяжения [18]. При этом дислокационный комплекс будет передвигаться внутрь буферного слоя, по направлению к границе GeSi/Si, как это показано на схеме рис. 7. Движущими силами таких перемещений являются $F1$ — сила притяжения между 60-градусными комплементарными дислокациями [18] и $F2$ — сила, определяемая напряжениями в псевдоморфном буферном слое, направленная к подложке Si [19]. Сила $F2$ присутствует на самой ранней стадии формирования дислокаций краевого типа на границе Ge/GeSi (буферный слой напряжен) и может быть одной из причин появления разнобразной структуры образующихся дислокационных комплексов. Такой механизм релаксации, состоящий из элементарных актов скольжения и переползания, происходящих одновременно при температурах отжига, позволяет объяснить особенности перераспределения краевых дислокационных комплексов на гетерограницах рассматриваемых структур. Можно предположить, что для состава $\text{Ge}_{0.3}\text{Si}_{0.7}$ (и тем более для $\text{Ge}_{0.2}\text{Si}_{0.8}$) напряженного буферного слоя величина силы $F2$ оказалась недостаточной для продвижения дислокационных комплексов внутрь буферного слоя, и сила $F1$ в процессе отжига при $T = 700\text{--}800$ °С сгруппировала эти комплексы в

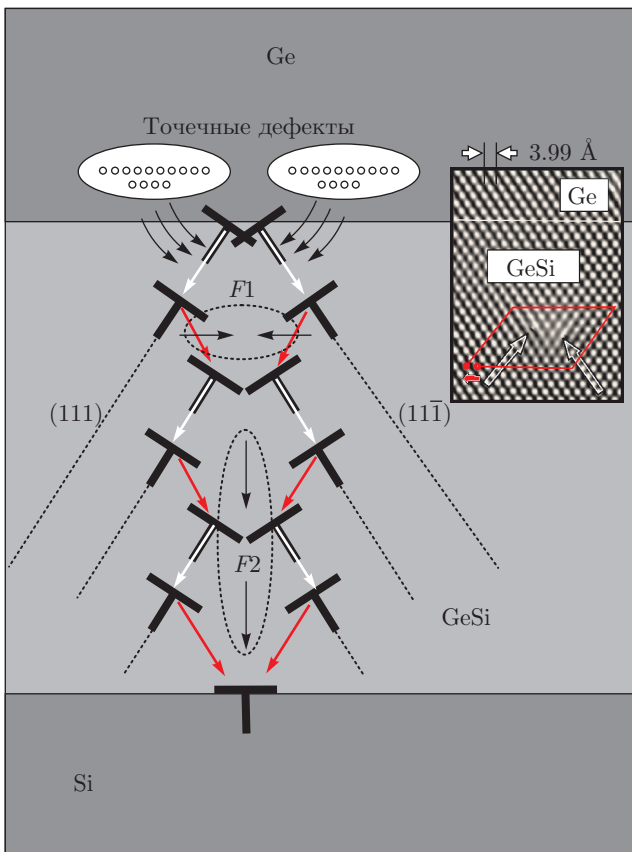


Рис. 7. (В цвете онлайн) Схема передвижения дислокационного комплекса краевого типа. Белые стрелки означают «ликвидацию» части экстроплоскости 60-градусной дислокации — переползание в результате ее взаимодействия с точечными дефектами — вакансиями. Силы притяжения обеспечивают скольжение 60-градусных дислокаций по направлению друг к другу (красные стрелки). На вставке один из экспериментально наблюдаемых дислокационных комплексов, находящийся внутри слоя GeSi. Контур Бюргерса (красная линия) выявляет вектор Бюргерса, лежащий в плоскости (001)

образования, близкие по атомной структуре к сидячей компактной дислокации Ломера (рис. 2). При увеличении доли Ge в напряженном буферном слое GeSi сила F_2 увеличивается и дислокационные комплексы краевого типа в разнообразной структурной форме движутся на границу GeSi/Si.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Следует выделить две ранее неизвестные особенности пластической релаксации гетероструктур типа Ge/Ge_xSi_{1-x}/Si(001). 1) Отсутствие пласти-

ческой релаксации буферного слоя Ge_xSi_{1-x}, если $x \sim 0.3$ и менее, даже при температуре отжига 800 °C. Этот слой остается напряженным, несмотря на превышение в 3–5 раз критической толщины введения дислокаций несоответствия. 2) В случае $x > 0.3$ и отжиге при температурах 600–700 °C пластическая релаксация буферного слоя осуществляется путем движения диссоциированных дислокационных комплексов краевого типа, состоящих из пары 60-градусных дислокаций, окончания экстроплоскостей {111} которых находятся на удалении около 2–12 межплоскостных расстояний друг от друга. Показано, что проникновение таких комплексов в буферный слой GeSi и далее на границу GeSi/Si интенсифицируется с ростом температуры отжига (600–700 °C) и доли Ge в буферном слое. Предполагается, что уровень механических напряжений буферного слоя, увеличивающийся с увеличением доли Ge в GeSi, является одним из факторов, формирующих неплотную атомную структуру дислокационных комплексов ломеровского типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. W. M. Lomer, *Phil. Mag.* **42**, 1327 (1951).
2. S. Mader, A. E. Blakeslee, and J. Angilello, *J. Appl. Phys.* **45**, 4730 (1974).
3. J. Hornstra, *J. Phys. Chem. Sol.* **5**, 129 (1958).
4. D. Wang, J. Zou, W. Z. He, H. Chen, F. H. Li, K. Kawasaki, and T. Oikawa, *Ultramicroscopy* **98**, 259 (2004).
5. S. Oktyabrskiy, H. Wu, R. D. Vispute, and J. Narayan, *Phil. Mag. A* **71**, 537 (1995).
6. A. Vila, A. Cornet, and J. R. Morante, *Appl. Phys. Lett.* **68**, 1244 (1996).
7. Yu. B. Bolkhovityanov, A. S. Deryabin, A. K. Gutakovskii, and L. V. Sokolov, *Acta Mater.* **61**, 617 (2013).
8. Yu. B. Bolkhovityanov, A. S. Deryabin, A. K. Gutakovskii, L. V. Sokolov, and A. P. Vasilenko, *Acta Mater.* **61**, 5400 (2013).
9. Ю. Б. Болховитянов, А. С. Дерябин, А. К. Гутаковский, Л. В. Соколов, в сб. Тезисы докладов XI конф. «Кремний 2016», Новосибирск (2016).
10. Ю. Б. Болховитянов, А. С. Дерябин, А. К. Гутаковский, Л. В. Соколов, *ФТТ* **56**, 247 (2014).

11. M. J. Hytch and M. Gandais, *Phil. Mag. A* **72**, 619 (1995).
12. M. Takeda and J. Suzuki, *J. Opt. Soc. Amer. A* **13**, 1495 (1996).
13. E. P. Kvam, D. M. Maher, and C. J. Humphreys, *J. Mater. Res.* **5**, 1900 (1990).
14. J. Narayan and S. Oktyabrsky, *J. Appl. Phys.* **92**, 7122 (2002).
15. Yu. B. Bolkhovityanov, A. S. Deryabin, A. K. Gutakovskii, and L. V. Sokolov, *J. Appl. Phys.* **109**, 123519 (2011).
16. J. P. Hirth and J. Lothe, *Theory of Dislocations*, Wiley, New York (1982).
17. R. W. Balluffi, *Phys. Stat. Sol.* **31**, 443 (1969).
18. C. Ulhaq-Bouillet and A. Lefebvre, *Phil. Mag.* **68**, 1273 (1993).
19. J. W. Matthews and A. E. Blakeslee, *J. Cryst. Growth* **27**, 118 (1974).