

УДК 538.911

## ЗАВИСИМОСТЬ ФОРМЫ ДИСЛОКАЦИОННЫХ ЯМОК ТРАВЛЕНИЯ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНКАХ GeSi (001) НА Si ОТ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНКИ

© 2019 г. А. С. Дерябин<sup>1</sup>, Л. В. Соколов<sup>1</sup>, Е. М. Труханов<sup>1</sup>, \*

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников имени А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

\*E-mail: trukh@isp.nsc.ru

Поступила в редакцию 20.11.2018 г.

После доработки 16.12.2018 г.

Принята к публикации 25.02.2019 г.

С помощью атомно-силового микроскопа и структурно-чувствительного травления эпитаксиальных пленок GeSi на Si(001) исследована кристаллография четырехугольного контура, ограничивающего дислокационную ямку травления в плоскости поверхности пленки. В зависимости от таких характеристик пленки как ее толщина и наличие дислокационных полос скольжения стороны контура могут быть параллельными как направлениям типа  $\langle 110 \rangle$ , так и направлениям  $\langle 010 \rangle$ . Ямки травления ограничены низкоиндексными фасетками  $\{111\}$  и  $\{110\}$ , и согласно электрохимической гипотезе их формирование обусловлено распределением напряжений вблизи полос скольжения.

DOI: 10.1134/S0367676519060127

### ВВЕДЕНИЕ

Поле напряжений эпитаксиальной пленки обычно снимается дислокациями несоответствия (ДН), которые расположены в границе раздела. Их удлинение обусловлено скольжением пронизывающих дислокаций (ПД), играющих принципиально важную роль при протекании процесса пластической релаксации напряжений несоответствия. Вследствие различных причин ПД останавливаются, накапливаясь в пленке. Они частично сохраняются после полного завершения релаксационного процесса, что ухудшает электронные свойства полупроводников. Важной проблемой эпитаксиального материаловедения является уменьшение количества ПД в выращенной пленке. Ее решение требует всестороннего изучения как природы пронизывающих дислокаций, так и особенностей их выявления.

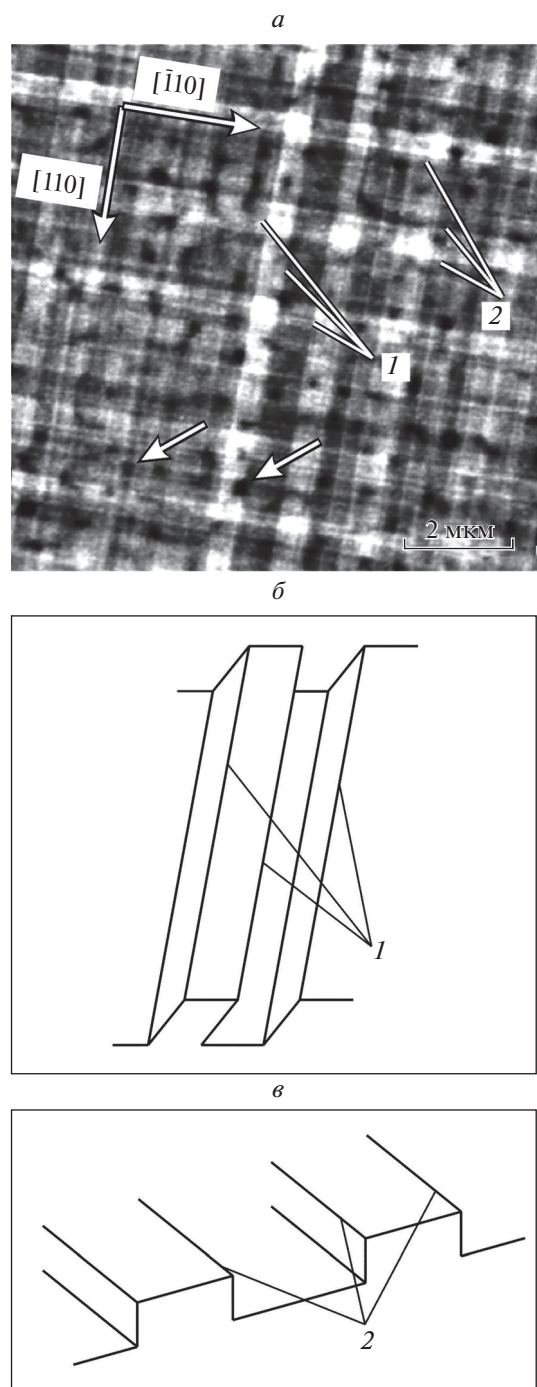
### 1. ФОРМА ДИСЛОКАЦИОННЫХ ЯМОК ТРАВЛЕНИЯ

Распространенным способом обнаружения ПД является использование химического структурно-чувствительного травления. С его помощью формируются ямки травления в местах выхода ПД на поверхность пленки. На рисунках представлены полученные с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ) картины поверхности эпитаксиальных пленок GeSi. Использовался

травитель Шиммеля, содержащий  $\text{HF } 250 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$  и  $\text{Cr}_2\text{O}_3 \text{ } 10 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$ . У ямок травления стороны контура параллельны направлениям типа  $\langle 110 \rangle$  (рис. 1а) или направлениям типа  $\langle 010 \rangle$  (рис. 2). Наиболее отчетливо это выражено для ямок, указанных стрелками. Отметим, что варианты ориентации сторон, представленные на указанных рисунках, известны в литературе (см., например, [1–3]), однако в условиях использования травителя одного состава смена ориентации сторон в зависимости от режима получения пленки зарегистрирована впервые. Природа явления, обуславливающего различную кристаллографическую ориентацию сторон контура, обсуждается в предлагаемой работе с привлечением эффекта электрохимического травления.

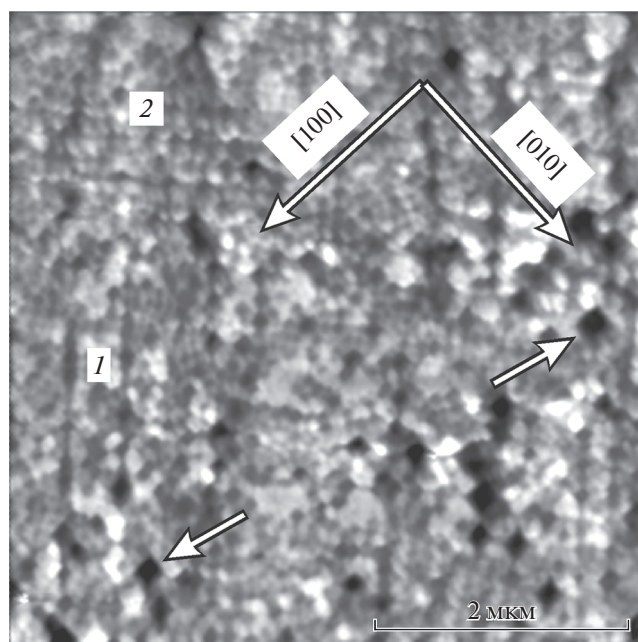
### 2. ОБРАЗОВАНИЕ СТУПЕНЕЙ НА ПОВЕРХНОСТИ GeSi ПЛЕНКИ

Одинокая ПД, скользящая в наклонной плоскости и удлиняющая ДН, формирует на поверхности пленки моноатомную ступень, которая параллельна ДН. Если же в общей наклонной плоскости скользит значительное количество ДН, то возникает многоатомная ступень, которую можно зарегистрировать с помощью АСМ. Такие ступени представлены на рис. 1а. Они расположены между чередующимися светлыми и темными полосами шириной доли микрометра. Светлые полосы де-



**Рис. 1.** Ямки травления (указаны стрелками) со сторонами контура, параллельными направлениям типа  $\langle 110 \rangle$ , и поверхностные ступени 1 и 2 (а); схема расположения параллельных направлению  $[110]$  ступеней 1 (б); схема расположения параллельных  $[-110]$  ступеней 2 (в). Эпитаксиальная пленка  $\text{Ge}_{0.57}\text{Si}_{0.43}$  толщиной 1 мкм на  $\text{Si}(001)$ .

монстрируют террасы, уровень которых выше среднего уровня свободной поверхности пленки, а темные полосы – пониженные террасы. Для приблизи-



**Рис. 2.** Ямки травления (указаны стрелками) со сторонами контура, параллельными направлениям типа  $\langle 010 \rangle$  и поверхностные ступени (1 и 2) в эпитаксиальной пленке  $\text{Ge}_{0.38}\text{Si}_{0.62}$  толщиной 0.4 мкм на  $\text{Si}(001)$ .

тельно вертикальных (1) и горизонтальных (2) многоатомных ступеней, которые разделяют полосы-террасы противоположного контраста, соответствующие пояснения их геометрии представлены на схемах рис. 1б и рис. 1в. Отметим, что образование возвышающихся или пониженных террас объясняется присутствием краевой составляющей вектора Бюргерса ДН, которая перпендикулярна границе раздела [4].

На рис. 2 также зарегистрированы приблизительно вертикальные (1) и горизонтальные (2) ступени, высоты которых превышают моноатомные. Ступени выражены менее отчетливо, чем на рис. 1а. Выполненный нами экспериментальный анализ позволяет утверждать, что стороны контура ямок травления параллельны направлениям типа  $\langle 010 \rangle$ , если, во-первых, толщина  $h$  эпитаксиальной пленки  $\text{GeSi}$  меньше 1 мкм, и во-вторых, если присутствуют дислокационные полосы скольжения, сопровождающиеся возникновением СТМ изображений ступеней типа представленных на рис. 1а и рис. 2. Если же  $h > 1$  мкм, или если отсутствует СТМ изображение ступеней, то стороны контура ямок параллельны направлениям  $\langle 110 \rangle$ . В работе предложена гипотеза, объясняющая это оригинальное явление в рамках электрохимического механизма травления. Отметим, что на образце (рис. 1) также были зарегистрированы отдельные ямки травления, имеющие ребра  $\langle 010 \rangle$ .

### 3. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ФАСЕТОК {111} и {011}

Можно предположить, что обсуждаемые ребра  $\langle 110 \rangle$  и  $\langle 010 \rangle$  ограничивают фасетки, соответственно, типа {111} и {110}. В соответствии с изложенным текстом, по мере увеличения толщины пленки  $h$  образование фасеток {110} прекращается, и возникают только фасетки {111}. Аналогичная особенность была установлена для фасеток {111} и {110} (см. [5] а также [1, Fig. 28]): в процессе электро-химического травления пассивированной поверхности монокристаллов различных сплавов  $\text{Cr-Fe}$  с уменьшением скорости растворения сохранялись только фасетки {111}. Обратим внимание, что в наших исследованиях травление  $\text{Ge}$  выполнялось при отсутствии искусственно наложенного электрического поля. Однако в работе [6, стр. 341] П. Холмс пишет о возможности возникновения “гальванического” эффекта, при структурно-чувствительном травлении поверхности полупроводника, которая содержит выходы дислокаций. Разность потенциалов возникает между областью вблизи пронизывающей дислокации, на которой присутствует атмосфера Коттрела, и областью кристалла, удаленной от ПД. Для объяснения экспериментальных данных, представленных на рис. 1 и 2, примем, что фасетки типа {011} возникают, когда существует зависимость потенциала  $E$  от толщины пленки. Естественно предположить, что вблизи ПД потенциал  $E$  не зависит от толщины пленки  $h$  и определяется преимущественно характером атмосферы Коттрела на пронизывающей дислокации. Для варианта толстой пленки ( $h \geq 1$  мкм) из-за значительного удаления свободной поверхности пленки от дислокационной границы раздела потенциал  $E$  вдали от пронизывающей дислокации также не зависит от  $h$ . Однако в случае  $h < 1$  мкм вдали от ПД, по-видимому, возникает существенная зависимость  $E(h)$ , если эпитаксиальная пленка содержит группы дислокаций несоответствия, которые скользят в общей плоскости и формируют немонаотомные ступени на поверхности пленки. Обратим внимание, что если наклонная плоскость скольжения содержит одиночную ДН, то дислокация располагается строго в границе раздела. Если же в общей плоскости скользят две ДН, то одна из них смещается от границы раздела в пленку, а другая — в подложку. Чем больше дислокаций скользят в общей плос-

кости, тем значительней создаваемое ими поле напряжений отличается от поля одиночной ДН. На свободной поверхности пленки при этом формируется многоатомная ступень. При наличии немонаотомной ступени в окрестности наклонной плоскости скольжения, по-видимому, возникает такая особенность дислокационной структуры пленки, которая и обуславливает зависимость  $E(h)$ , необходимую для возникновения фасеток {110}, вытравливаемых вблизи ПД.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В завершение статьи укажем, что в большой обзорной работе [3] представлены экспериментальные данные о нетипичном характере дислокационных ямок травления в эпитаксиальных слоях  $\text{GeSi}$  на  $\text{Si}$ , когда стороны ямок параллельны направлениям  $\langle 010 \rangle$ . На стр. 190 работы [3, Fig. 6.19] приведен оптический снимок картины дефектов травления в образце 75051. Хорошо видны полосы скольжения, расположенные вдоль направлений типа  $\langle 110 \rangle$ . Рисунок содержит несколько десятков изображений четырехугольных ямок травления. Отчетливо видно, что все стороны ямок параллельны направлениям  $\langle 010 \rangle$ . Смена направления сторон ямок в зависимости от условий роста пленок авторами не наблюдалась. Обсуждаемая в нашей работе зависимость ориентации сторон ямок травления от электро-химического потенциала в пленке требует своего дальнейшего исследования.

Авторы выражают благодарность К.Б. Фрицлеру за помощь на различных этапах исследований.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Heimann R.D.* // In Chemical etching. Berlin; New-York: Springer-Verlag, 1982. P. 175.
2. *Yang E.H.* // J. Electrochem. Soc. Sol. St. Sci. Techn. 1984. V. 131. № 5. P. 1140.
3. [https://warwick.ac.uk/fac/sci/physics/research/condensedmatt/silicon/papers/theses/Lee\\_Nash\\_Thesis.pdf](https://warwick.ac.uk/fac/sci/physics/research/condensedmatt/silicon/papers/theses/Lee_Nash_Thesis.pdf).
4. *Колесников А.В., Труханов Е.М., Ильин А.С., Лошкарев И.Д.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтр. иссл. 2014. № 7. С. 30.
5. *Hisamatsu Y., Ichikawa K.* // Boshoku Gijutsu. 1974. V. 23. P. 117.
6. *Holmes P.* // In The electrochemistry of semiconductors. London—New York: Acad. Press, 1962. P. 329.