

ности доказывает коллективность процессов ориентации и дезориентации полярных областей, наблюдающихся в условиях эксперимента при изменении механического напряжения.

Представляет несомненный интерес дальнейшее исследование эффекта тензолюминесценции в *PMN* и других сегнетоэлектриках с РФП, особенно на завершающих стадиях РФП для выяснения отличий процессов изменения поляризации в возникающих неоднородных состояниях от таких процессов в обычных сегнетоэлектриках-сегнетоэластиках.

Л и т е р а т у р а

- [1] Ф л е р о в а С.А. - Изв. АН СССР, сер. физ., 1984, т. 48, № 6, с. 1233-1237.
- [2] Ф л е р о в а С.А., П о п о в С.А., К р а й н и к Н.Н., Б о ч к о в О.Е., Л а з а р е в А.П. - ФТТ, 1985, т. 27, № 11, с. 3492-3494.
- [3] К р а й н и к Н.Н., Ф л е р о в а С.А., П о п о в С.А. - ФТТ, 1987, т. 29, № 9, с. 2845-2847.
- [4] Ф л е р о в а С.А., С а м ч е н к о Ю.И. - ФТТ, 1972, т. 14, № 2, с. 592-594.
- [5] Ф л е р о в а С.А., Т а р а н В.Г. - Изв. АН СССР, сер. физ., 1979, т. 43, № 8, с. 1745-1748.
- [6] С м о л е н с к и й Г.А., К р а й н и к Н.Н., К а м з и н а Л.С., Т р е п а к о в В.А. - Изв. АН СССР, сер. физ., 1977, т. 41, № 4, с. 721-726.
- [7] К р а й н и к Н.Н. - Изв. АН СССР, сер. физ., 1983, т. 47, № 3, с. 566-572.
- [8] Ф л е р о в а С.А., П о п о в С.А., К р а й н и к Н.Н., Л а з а р е в А.П. - Письма в ЖТФ, 1985, т. 11, № 18, с. 1134-1137.

Поступило в Редакцию
18 июля 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 21

12 ноября 1988 г.

ФОРМИРОВАНИЕ ДВУМЕРНЫХ УПОРЯДОЧЕННЫХ ФАЗ
НА ПОВЕРХНОСТИ Si(111) ПРИ НАПЫЛЕНИИ СУРЬМЫ
И В ПРОЦЕССЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА

Б.З. К а н т е р, А.И. Н и к и ф о р о в,
С.И. С т е н и н

Развитие метода молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) кремния стимулировало исследования сверхструктурных перестроек на поверх-

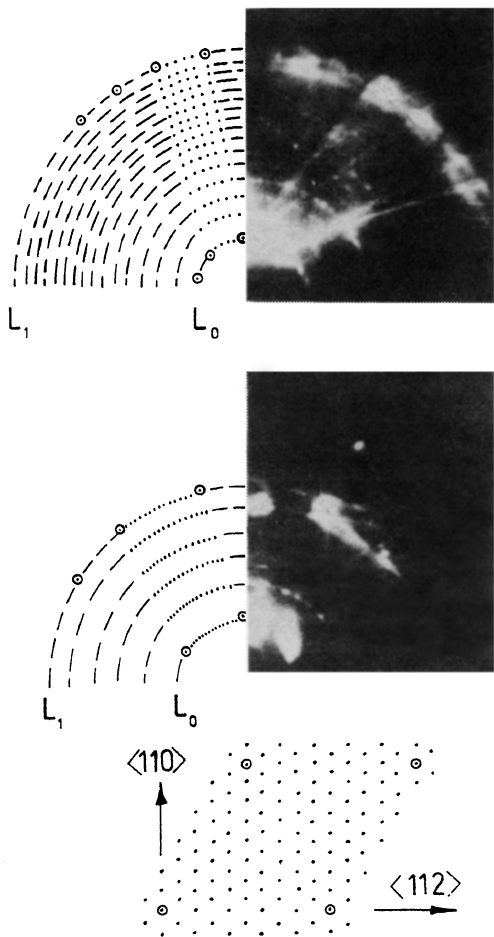


Рис. 1. Упорядоченная двумерная фаза $Si(111) - 5\sqrt{3} \times 5\sqrt{3} - Sb$.
 Схемы рефлексов и картины ДБЭ в азимутах: а - $\langle 110 \rangle$; б - $\langle 112 \rangle$; в - обратная решетка, точки соответствуют $Si(111) - 5\sqrt{3} \times 5\sqrt{3} - Sb$, кружки - $Si(111) - 1 \times 1$.

ности роста при обогащении атомами легирующих элементов, таких как In [1], Ga [2], B [3]. Были установлены концентрационно-температурные области существования и основные характеристики двумерных упорядоченных фаз, возникающих при адсорбции указанных примесей на поверхности Si .

К настоящему времени мало изучено поведение на поверхности атомов, являющихся донорными примесями в Si , в частности

Sb. В [4] приведены результаты наблюдения с помощью дифракции медленных электронов (ДМЭ) упорядоченных фаз, стабилизированных $Sb : Si$ (111) - 2×2 , $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$, $5\sqrt{3} \times 5\sqrt{3}$ и $7\sqrt{3} \times 7\sqrt{3}$. Наблюдения проводились только после напыления Sb и не отражают кинетику формирования двумерных фаз. Это обусловлено, видимо, сложностью применения методики ДМЭ и особенностями поведения Sb на поверхности Si : низким, сильно зависящим от температуры коэффициентом прилипания и большой скоростью десорбции. Данная работа посвящена исследованию условий формирования двумерных упорядоченных фаз на поверхности Si (111), возникающих при температурах 600–800 °С как в потоке Sb , так и в процессе изотермического отжига предварительно напыляемого слоя.

Измерения выполнялись с помощью дифрактометра быстрых электронов (ДБЭ) при энергии 10 кэВ на установке МЛЭ Si [5]. Объектом исследования служила поверхность кристаллов Si (111) $\pm \pm 0.5^\circ$, которая в рабочей камере установки подвергалась низкотемпературной очистке по методу, аналогичному [6]. После этого при температурах ниже 830 °С с помощью ДБЭ наблюдается сверхструктура Si (111) - 7×7 (далее 7×7), соответствующая атомарно-чистой поверхности.

Концентрация Sb на поверхности Si , необходимая для формирования двумерных упорядоченных фаз, может поддерживаться при $T > 500$ °С либо неограниченное время при постоянном потоке на поверхность, либо в течение ограниченного времени - при десорбции с поверхности предварительно нанесенного адсорбата. В соответствии с этим двумерные фазы на поверхности Si наблюдались в двух режимах получения необходимой концентрации Sb .

При постоянной температуре в диапазоне 600–800 °С на поверхность Si направлялся из тигельного испарителя поток Sb интенсивностью $10^{11}-10^{13}$ ат·см⁻²·с⁻¹. Через некоторое время можно было наблюдать переход сверхструктуры 7×7 в упорядоченную фазу Si (111) - $5\sqrt{3} \times 5\sqrt{3}$ - Sb (далее $5\sqrt{3}$) либо - при больших потоках Sb и низких температурах - в фазу Si (111) - $-\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ - Sb (далее $\sqrt{3}$). На рис. 1 приведены картины ДБЭ, схемы расположения рефлексов и обратная решетка для двумерной упорядоченной фазы $5\sqrt{3}$. После перекрытия потока Sb через 10^2-10^3 с наблюдались фазовые переходы в обратном порядке: $\sqrt{3} \rightarrow 5\sqrt{3} \rightarrow 7 \times 7$. Наиболее вероятной причиной последних является десорбция Sb с поверхности, т.к. диффузией в Si при температурах 600–800 °С за указанные времена можно пренебречь. Результаты измерений (рис. 2, а) позволили определить область существования двумерных упорядоченных фаз, стабилизированных Sb , на поверхности Si (111). Из рис. 2, а следует, что при температурах выше 600 °С на поверхности Si (111) могут существовать упорядоченные фазы, стабилизированные поступлением Sb из потока на поверхность, соответствующие относительно малым ($5\sqrt{3}$) или большим ($\sqrt{3}$) покрытиям. Любая из этих двумерных фаз сохраняется после прерывания потока Sb и охлаждения неограниченное время при комнатной температуре в условиях сверхвысокого вакуума.

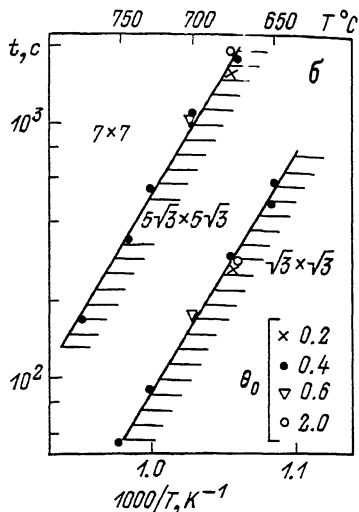
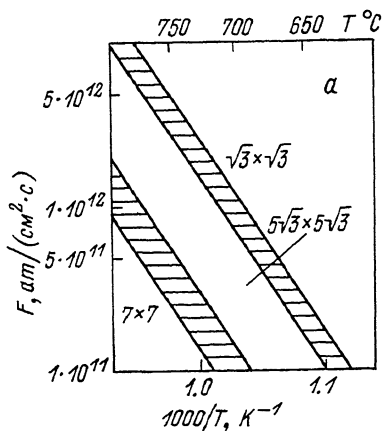


Рис. 2. а) Области существования на поверхности $Si(111)$ двумерных упорядоченных фаз, стабилизированных в потоке паров Sb . б) Время существования на поверхности $Si(111)$ двумерных фаз при $\theta_0 = 0.2-2.0$. Экспериментальными точками отмечены моменты завершения режима сосуществования двух фаз.

Однако, в отличие от сверхструктуры 7×7 , которая сохраняется при выносе на воздух в течение нескольких часов [7], двумерные фазы, стабилизированные Sb , разрушаются при кратковременном выносе на воздух, что свидетельствует о слабой связи атомов Sb с кристаллом. Сбласти существования двумерных упорядоченных фаз перекрываются: на дифракционной картине могут наблюдаться одновременно рефлексы двух фаз, что связано с постепенным изменением соотношения площадей, занятых сосуществующими фазами.

Двумерные упорядоченные фазы на поверхности $Si(111)$ наблюдались также в процессе изотермического отжига пленки Sb , напыленной на поверхность при температуре $200-300^\circ C$, когда десорбция Sb практически не происходит. Начальное покрытие θ_0 составляло $0.2-2.0$ монослоя Sb (рис. 2,б). После быстрого повышения температуры кристалла до температуры отжига на поверхности формируется фаза $\sqrt{3}$, которая через определенное время переходит в фазу $5\sqrt{3}$, а последняя в 7×7 . При $\theta_0 < 0.2$ упорядоченные фазы, стабилизированные Sb , не наблюдаются. Анализ состава поверхности, на которой были сформированы двумерные фазы $\sqrt{3}$ и $5\sqrt{3}$, с помощью Оже-спектрометра в установке $LAS-2000$ показал, что содержание Sb для них составляет 0.12 и 0.02 монослоя соответственно. Эти данные, хотя и заниженные из-за выноса образцов на воздух, можно считать близкими к минимальным для двумерных фаз $\sqrt{3}$ и $5\sqrt{3}$ на поверхности $Si(111)$.

Время перехода из одного структурного состояния в другое не зависит от величины θ_0 в исследованном диапазоне θ_0 и T . Независимость времени существования фазы $\sqrt{3}$ от θ_0 свидетельствует о том, что к моменту ее формирования с поверхности десорбируется избыток Sb , превышающий ее концентрацию в двумерной фазе, либо эта Sb испаряется сразу после формирования фазы $\sqrt{3}$. Процессы фазовых превращений на поверхности, вероятно, включают этапы выхода атомов в адсорбционный слой, частичную десорбцию из него в вакуум и встраивание оставшихся атомов в новое сверхструктурное состояние. Энергии активации переходов $\sqrt{3} \rightarrow 5\sqrt{3}$ и $5\sqrt{3} \rightarrow 7 \times 7$, определенные из приведенных на рис. 2,6 температурных зависимостей времени существования двумерных фаз, равны соответственно 1.8 ± 0.1 и 2.1 ± 0.1 эВ. Если считать, что энергия активации десорбции одинакова для всех фаз (десорбция из адслоя), то разность энергий активации переходов $\sqrt{3} \rightarrow 5\sqrt{3}$ и $5\sqrt{3} \rightarrow 7 \times 7$, составляющая 0.3 эВ, может представлять собой разность энергий связи атомов Sb с поверхностью $Si(111)$ для двумерных фаз $\sqrt{3}$ и $5\sqrt{3}$.

Сравнение полученных результатов с данными [4] свидетельствует, что в наших условиях двумерные фазы $\sqrt{3}$ и $5\sqrt{3}$ наблюдались в области существенно меньших T и θ_0 , а фаза $Si(111) - 7\sqrt{3} \times 7\sqrt{3} - Sb$ не наблюдалась. Это может быть связано с различием структуры исходной поверхности подложки либо с влиянием условий нанесения Sb на поверхность Si .

По результатам данной работы можно предложить следующую схему структурных превращений на атомно-чистой поверхности $Si(111)$, содержащей адатомы Sb . При низких температурах адсорбции Sb образует неупорядоченное и весьма устойчивое покрытие. Нагрев кристалла с $\theta_0 > 0.2$ активировывает диффузионное упорядочение адсорбата и частичную десорбцию Sb . Понижение концентрации адатомов Sb в процессе изотермического отжига обуславливает переход от более плотного упорядоченного адсорбционного покрытия (фаза $\sqrt{3}$) к менее плотному (фаза $5\sqrt{3}$). Существенно, что упорядоченные двумерные фазы, стабилизированные Sb , устойчивы в достаточно широком интервале покрытий.

Авторы благодарят А.Е. Долбака за проведение анализов методом Оже-спектроскопии.

Л и т е р а т у р а

- [1] B a b a S., H i r a y a m a H., Z h o u J. M. and K i n b a r a A. - Thin Solid Films, 1980, v. 90, N 1, p. 57-61.
- [2] S a k a m o t o T., K a w a n a m i H. - Surface Sci., 1981, v. 111, N 2, p. 177-188.
- [3] K o r o b t s o v V. V., L i f s h i t s V. G., Z o t o v A. V. and S h e n g u r o v V. G. - Phys. Stat. Sol., 1987, V. 103, N 2, p. 467-473.

- [4] Park G.-Y., Abukawa T., Kinoshita T., Enta Y. and Kono S. - Japan. J. Appl. Phys., 1988, v. 27, N 1, p. 147-148.
- [5] Кантер Б.З., Мошегов Н.Т., Никифоров А.И., Стенин С.И., Тийс С.А. - ПТЭ, 1988, № 2, с. 171-173.
- [6] Ishizaka A., Shiraki Y. - J. Electrochem. Soc., 1986, v. 133, N 4, p. 666-671.
- [7] Соколов Л.В., Торопов А.И., Бакланов М.Р., Стенин С.И. - Поверхность. Физика, химия, механика, 1982, № 8, с. 9-11.

Институт физики
полупроводников
СО АН СССР, Новосибирск

Поступило в редакцию
12 июня 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 21

12 ноября 1988 г.

РАЗЛИЧИЯ В СТРУКТУРНОМ СОСТОЯНИИ
АМОРФНОГО СПЛАВА $Fe-B-Si-C$,
ПОЛУЧЕННОГО В ВИДЕ ЛЕНТЫ, ПОРОШКА
И ПОРОШКОВОГО КОМПАКТА

А.А. Новакова, Г.В. Сидорова,
Г.А. Сиротинина, А.П. Куприн,
О.А. Романова

Возможность практического использования аморфных металлических сплавов (АМС) существенно ограничена видом получаемого материала - микронной толщины ленты, волокна, чешуйки, порошки, а также термической нестабильностью их структуры и свойств. Одна из кардинальных проблем промышленного применения АМС связана с получением массивных изделий из аморфных сплавов с сохранением высокого уровня их физико-механических свойств. В настоящее время наиболее оптимальным решением этой проблемы является импульсное динамическое компактирование порошка [1, 2]. При этом локальный разогрев материала не достигает температуры кристаллизации, носит кратковременный импульсный характер и не приводит к существенному ухудшению исходных свойств термически нестабильных материалов. Особенность этого процесса заключается в том, что во время компактирования энергия деформации и трения частиц концентрируется в тонком поверхностном слое, и малое количество материала на поверхности частиц нагревается до плавления, что обеспечивает микросварку частиц между собой [3]. Изучение таких зон связи [4] показало, что расплавленный материал вновь затвердевает очень быстро и может быть регенерирована первичная метастабильная структура. Однако может иметь место