

11;12

©1994 г.

СКАНИРУЮЩАЯ ТУННЕЛЬНАЯ МИКРОСКОПИЯ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В АДсорБИРОВАННЫХ ПЛЕНКАХ ВИСМУТА: СИСТЕМА Bi/Si (111)

Р.З.Базтизин, Ч.Пак,¹ Т.Хашицуме,² Т.Сакурай²

Башкирский университет, 450074, Уфа
(Поступило в Редакцию 14 июля 1993 г.
В окончательной редакции 11 января 1994 г.)

Методами сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) и дифракции медленных электронов (ДМЭ) исследована реконструкция ($\sqrt{3} \times \sqrt{3}$)R30°, вызванная адсорбцией висмута на атомарно-чистой поверхности Si(111) 7×7 . Впервые получены СТМ изображения системы Bi/Si (111) с атомным разрешением. В пределах симметрии ($\sqrt{3} \times \sqrt{3}$), наблюдавшейся на картинах ДМЭ поверхности кремния, впервые с помощью СТМ удалось обнаружить три отчетливые фазы: монометры, тримеры и структуру типа пчелиных сот, образование которых связано с различной степенью покрытия адсорбатом. При малых покрытиях атомы Bi занимают T₄-центры (по DAS-модели Такаянаги) и в этой адсорбционной геометрии α -фаза (монометры) стабильно формируется вплоть до покрытия 1/3 монослоя. β -фаза (тримеры) наблюдалась при монослойном покрытии, причем на СТМ изображениях кластеров висмута удалось разрешить отдельные атомы Bi. При промежуточных покрытиях с помощью СТМ впервые была обнаружена структура типа пчелиных сот, сосуществующая вместе с тримерами. Этот результат свидетельствует о существовании дополнительного нового, зависящего от величины покрытия процесса реконструкции.

Введение

Изучение микроскопических процессов, происходящих на начальных стадиях формирования межфазной границы металл-полупроводник, продолжает оставаться предметом многочисленных исследований. Особый интерес при этом вызывает исследование атомной структуры поверхности кремния, покрытой субмонослойными пленками металлов групп III-IV, что обусловлено потребностями полупроводниковой микроэлектроники [1,2]. Адсорбция этих металлов обычно приводит к появлению различных сверхструктур и специфических фазовых

¹ Физический факультет Национального университета Чхонбуг, г. Чхонджу 560-756, Южная Корея.

² Институт проблем материаловедения Университета Тохоку, г. Сендай 980, Япония.

переходов на поверхностях, причем для поверхности Si (111) 7×7 наиболее часто встречается реконструкция $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})R30^\circ$, как это наблюдалось в случае металлов III (Al, Ga, In) [3-5], IV (Sn, Pb) [6,7] и V (Sb) групп [8], а также Ag и Au [9,10]. Интерес к адсорбции металлов групп III и V связан также и с тем, что они могут полностью пассивировать "оборванные связи" на поверхности Si (111), понижая ее свободную энергию. При этом каждый адатом металла из группы III оказывается связанным с тремя атомами Si, а каждый адатом металла из группы V образует межатомный центр с тройной симметрией, в результате чего все поверхностные оборванные связи полностью насыщаются.

Известно, что адсорбция атомов висмута на поверхности Si (111) также приводит к образованию сверхструктуры $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})R30^\circ$ [11-14], однако истинное геометрическое расположение адатомов в приповерхностном слое и соответственно степень заполнения поверхности адсорбатом e , отвечающая этой структуре, до сих пор окончательно не определены. Вообще для соразмерных упорядоченных поверхностных слоев со структурой $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ предложено несколько моделей, которые соответствуют степеням покрытия $\theta = 1/3$ [6,15,16], $\theta = 2/3$ [17] и $\theta = 1$ [9,18], и в которых число атомов в поверхностной элементарной ячейке меняется от 1 до 3 (под монослоем $\theta = 1$ имеется в виду такое наименьшее покрытие, при котором адатомы занимают все эквивалентные адсорбционные центры). Предполагается, что в отношении адатомов Bi эти модели образуют на поверхности Si (111) фазы типа пчелиных сот при $\theta = 2/3$ и тримеры при $\theta = 1$. Экспериментально структура поверхности, образуемой при адсорбции Bi на грани Si (111), исследовалась методами рентгеновской фотоэлектронной дифракции путем сопоставления измеренных интенсивностей рефлексов при разных значениях азимутального и полярного углов с расчетными [8,13], а также дифракции рентгеновских лучей при их почти нормальном падении [17]. В обоих случаях предполагалось, что на каждом адсорбционном центре структуры $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ три атома Bi образуют тример с межатомным расстоянием 3.1 \AA , так что структура поверхностного слоя соответствует степени покрытия $\theta = 1$ и оказывается соразмерной с подложкой. С другой стороны, анализ результатов экспериментов по термодесорбции, проведенный в [11,19], показал, что кристаллографическая структура соразмерного упорядоченного поверхностного слоя $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ Bi должна соответствовать степени покрытия $\theta = 1/3$. Но совсем недавно в работах [20,21] при изучении этой адсорбционной системы методами дифракции медленных электронов (ДМЭ) в сочетании с анализом зависимости интенсивности дифракционных рефлексов от энергии электронов и электронной оже-спектроскопии (ЭОС) было убедительно показано, что для структуры $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ Bi наблюдаются две фазы в зависимости от степени покрытия: одна — при покрытии $\theta = 1/3$ (α -фаза), а другая — при $\theta = 1$ (β -фаза). Соответственно предполагалось, что ответственными за появление сверхструктуры $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ при покрытии $\theta = 1$ являются тримеры Bi, а при $\theta = 1/3$ — одиночные атомы Bi (монометры).

В задачу настоящей работы входило детальное, на атомном уровне, исследование структуры субмонослойных пленок Bi на грани (111)

кремния. Интерес к этим исследованиям определялся также тем, что висмут — это полуметалл с малой эффективной массой электронов в направлении роста пленки, широко используемый в микроэлектронике, в частности, для изготовления контактов, так как образует упорядоченные слои на подложке, и проявляющий размерный эффект при адсорбции [22]. Исследования проводились методом сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) и ДМЭ.

Методика

Эксперименты были выполнены в сверхвысоковакуумном СТМ Института проблем материаловедения университета Тохоку (Япония), снабженным полевым ионным микроскопом (ПИМ) для контроля качества сканирующих острий [23,24]. Базовое давление в вакуумной камере не превышало 5×10^{-11} Тор. СТМ был также оборудован дополнительной камерой для подготовки образцов со встроенным узлом ULA-020, состоящим из электронографа медленных электронов и оже-спектрометра. Исследуемые образцы представляли собой прямоугольные пластины размером $18 \times 4 \times 0.5$ мм, вырезанные из пластин монокристаллического *p*-типа кремния с удельным сопротивлением $3.0 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ и ориентацией $\langle 111 \rangle$. Непосредственно перед помещением в камеру образец тщательно промывался чистым метанолом, после чего обезгаживался вместе с держателем в течение 12 часов. Поверхность образцов очищалась серией высокотемпературных прогревов до 1230°C прямонакальным способом в вакууме 10^{-10} Тор. Для измерения температуры образцов при очистке и отжиге использовались оптический и инфракрасный пирометры. Слои висмута получали путем термического распыления кусочка металлического *Vi* чистотой $5N$, помещенного в небольшую танталовую эффузионную ячейку Кнудсена, подобную использованной в [25].

Как известно, важную роль в корректной интерпретации СТМ изображений играет учет геометрических характеристик (форма, размеры) и электронных свойств сканирующего острия [26,27]. Сами острия изготавливались из вольфрамовой монокристаллической проволоки с ориентацией $\langle 111 \rangle$ путем электролитического травления. Выбор вольфрама в качестве материала для сканирующих острий определялся в первую очередь тем, что в нем плотность состояний электронов проводимости вблизи поверхности Ферми содержит изотропную *s/p*-компоненту, которая вносит основной вклад в туннельный ток в СТМ геометрии [27]. Вместе с тем, как показали теоретический анализ [24,26,28] и практика эксплуатации [23,24,29], истинно атомное разрешение в СТМ может быть получено лишь при использовании сканирующих острий с очень маленькими радиусом закругления (эффективный радиус острия не должен превышать $\sim 10 \text{ \AA}$) и контролируемой поверхностью, поэтому окончательная форма сканирующего острия, содержащая на кончике 3–6 атомов, получалась методом испарения полем при комнатной температуре под непрерывным контролем с помощью ПИМ. ДМЭ использовалась для структурного анализа поверхности и оценки величины *Vi* покрытия.

Основными факторами, определяющими атомную структуру адсорбированных пленок, являются характер взаимодействия адатомов с атомами подложки и друг с другом, зависящий от концентрации адатомов, а также атомное строение подложки. Различные концентрации адатомов Vi получали путем напыления слоев висмута на поверхность кремния (111) при комнатной температуре и последующем их отжиге при температурах 120–560°С. После нанесения толстого слоя Vi при комнатной температуре хорошо известная картина ДМЭ от сверхструктуры (7 × 7) чистой поверхности Si (111) сменялась слабой диффузной картиной структуры (1 × 1) или кольцевой структурой, что указывает на присутствие на поверхности нескольких неупорядоченных слоев висмута. С увеличением температуры отжига интенсивность фона на электронограммах ослабевала, а кольцевая структура заменялась картиной структуры $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$. После отжига при $T \geq 300^\circ \text{C}$ устанавливалась четкая и резкая ДМЭ картина структуры $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$, она оставалась таковой до тех пор, пока не начиналась заметная термодесорбция Vi при температуре 520°С. На рис. 1 приведена типичная электронограмма Si (111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ Vi , полученная на грани (111) кремния, покрытой субмонослойной пленкой Vi и отожженной при $T = 360^\circ \text{C}$. Для получения кривых зависимости интенсивности дифракционных рефлексов от энергии электронов была изготовлена серия фотографий ДМЭ картин с одинаковым временем экспозиции и шагом 5 эВ, после чего проведена количественная оценка интенсивности некоторых ха-

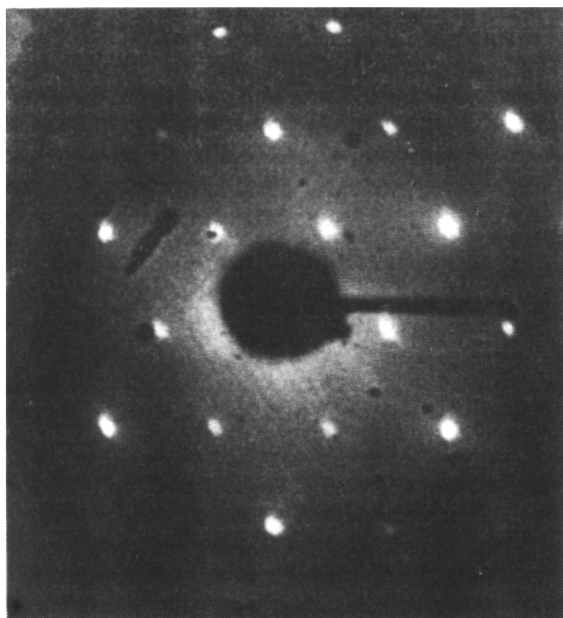


Рис. 1. Картина ДМЭ от слоя Vi , нанесенного на атомарно-чистую поверхность Si (111) 7 × 7 и подвергнутого отжигу в течение 5 мин при 360°С.

$E = 40$ эВ; отчетливо видна сверхструктура $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$.

рактрных $\sqrt{3}$ -рефлексов с помощью фотометра. Полученные спектры интенсивности рефлексов на электронограммах хорошо согласуются с данными измерений, выполненных в [20,21], и, таким образом, подтверждают предположение о возможности существования по крайней мере двух разных фаз (α - и β -фазы) с различными атомными структурами. Следует отметить, что после отжига при $T = 440^\circ \text{C}$ на ДМЭ картинах в кристаллографическом направлении $\langle 110 \rangle$ появились полосы и дополнительные слабые рефлексы, указывающие на начало фазового перехода $\sqrt{3} \times \sqrt{3} \rightarrow 7 \times 7$ и начало десорбции Vi . Дальнейший отжиг при $T = 520^\circ \text{C}$ приводил к появлению чистых участков со структурой 7×7 одновременно с сохранением части структуры $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$, а дифракционная картина представляла собой наложение картин, соответствующих доменам этих структур.

На рис. 2, а приведено СТМ изображение участка такой поверхности, демонстрирующее характерные детальные особенности структур, наблюдавшихся при малых покрытиях Vi . Данное покрытие получено после частичной десорбции предварительно нанесенного висмута. Хорошо видны несколько террас, разделенных моноатомными ступеньками, и большие двумерные островки со структурой $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$, а также межфазные границы между доменами структур 7×7 и $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$. Островки со структурой $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ демонстрируют достаточно хорошее атомное упорядочение, а их расположение ясно показывает, что зарождение и рост островков преимущественно происходят на краях ступеней.

Интересно отметить, что изображения, как мы полагаем, отдельных атомов Vi , расположенных на островках со структурой $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$, имеют округленную форму, но некоторые из них оказываются более темными, чем другие, и наблюдаются в виде небольших островков, причем форма этих округлых деталей структуры существенно не зависит от напряжения смещения V_s между образцом и сканирующим острием. Происхождение такой модуляции в яркости изображений не вполне понятно, однако то, что СТМ изображения, полученные при положительном значении V_s , показали обратную яркость, позволяет предположить, что разница в интенсивности не связана с геометрическими различиями, а определяется скорее электронной структурой исследуемой поверхности. Поэтому мы полагаем, что более яркие кружочки соответствуют атомам Vi , а более темные — атомам Si .

На увеличенном СТМ изображении участка межфазной границы (рис. 2, б) хорошо видны ряды адатомов Vi , выстроенные в ровные линии относительно чистого участка со структурой 7×7 . Приведенный здесь же профиль сканирования поверхности вдоль белой линии, проходящей через угловые "дырки" структуры 7×7 (DAS-модель Такаэнаги [2,29]), наглядно демонстрирует, что расположение атомов Vi определенным образом согласуется с нижележащей решеткой кремния, что адсорбция висмута происходит на T_4 -центрах (по DAS-модели), расположенных на верхней части второго слоя атомов Si . Исходя из (внешнего) вида обсуждаемого изображения и его отличия от изображений тримеров, которые хорошо видны при больших покрытиях (рис. 3), мы приходим к заключению, что наблюдавшиеся изображения действительно представляют собой одиночные атомы висмута. Полагая, что каждый атом висмута соответствует отдельной округлой детали

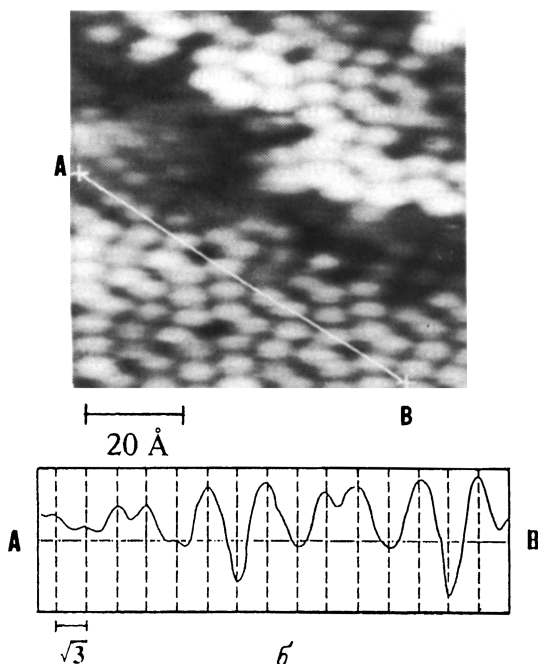
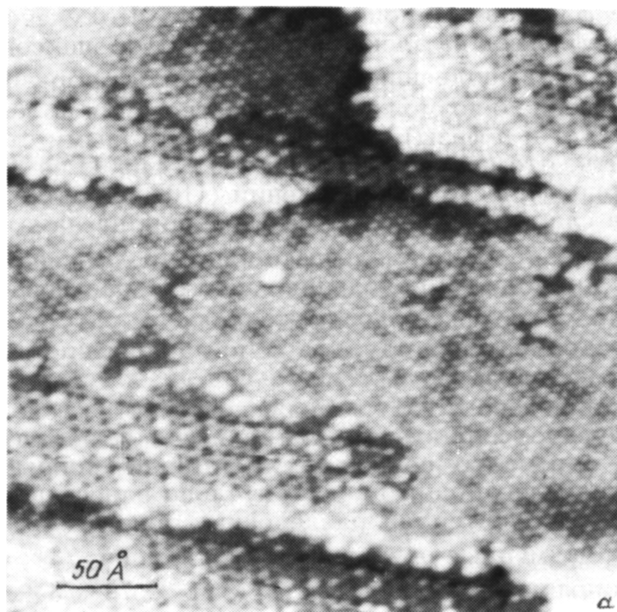


Рис. 2.
a — СТМ изображение участка размером $320 \times 320 \text{ \AA}$ поверхности Si (111) 7×7 после нанесения V_i при комнатной температуре и последующего отжига при 520°C в течение 5 мин, для которой на ДМЭ картине одновременно наблюдались домены структур 7×7 и $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ (напряжение между образцом и сканирующим острием $V_s = -2.0 \text{ В}$, туннельный ток $I = 2.0 \times 10^{-11} \text{ А}$); *б* — увеличенное СТМ изображение межфазной границы между структурами 7×7 и $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$; рельеф волнистости поверхности, снятый вдоль пунктирной линии, демонстрирует адсорбцию на T_4 -центре, расположенном на вершине второго слоя атомов Si.

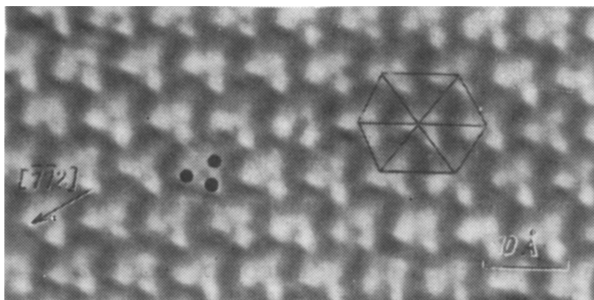


Рис. 3. СТМ изображение ($V_s = -1.6$ В, $I = 2.0 \times 10^{-11}$ А) структуры $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$, полученный после нанесения толстого слоя Вi при комнатной температуре и последующего отжига при 390° С. Показаны гексагональные массивы тримеров и положение отдельного тримера.

структуры $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$, получаем, что абсолютное Вi покрытие на рис. 2 должно быть равно $1/3$ монослоя и соответствует α -фазе, наблюдавшейся на ДМЭ картинах.

На рис. 3 приведено СТМ изображение участка поверхности размером 65×65 Å со структурой $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$, полученной после нанесения толстого слоя Вi при комнатной температуре и последующего отжига при 390° С. ДМЭ картины и спектры интенсивности рефлексов на электронограммах от этой поверхности соответствовали β -фазе, описанной в [20,21]. На СТМ изображении хорошо видно, что поверхность образца покрыта рядами гексагональных массивов выступов с тройной симметрией. При более тщательном рассмотрении можно увидеть, что каждый такой выступ состоит из трех топографических максимумов и это служит хорошим аргументом в пользу предположения о присутствии тримеров висмута на каждом участке $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ поверхности кремния. Расстояние между тремя топографическими максимумами приблизительно равно 3.0 \AA , что хорошо согласуется со значением 3.06 \AA , полученным из модели, основанной на результатах экспериментов по рентгеновской электронной дифракции [8,13] и дифракции рентгеновских лучей [17].

Следует отметить, что все тримеры Вi ориентированы в кристаллографическом направлении $\langle 112 \rangle$, которое подразумевает, что тримеры выстроены в точном соответствии с геометрией адатомов Si. Заметим также, что структура тримеров не может быть четко отражена на СТМ изображениях при положительных значениях V_s : в этом случае треугольная форма объекта расплывается и предстает в виде, напоминающем большой одиночный округленный выступ. Этот результат позволяет предположить, что изменения в СТМ изображениях отражают изменения в плотности состояний. О подобном же искажении формы тримеров на СТМ изображениях при изменении V_s для структуры $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ Sb на поверхности Si (111) сообщалось в [30]. В рассматриваемом случае (симметрия тримеров) p -орбитали каждого атома Вi связываются с соседними атомами Вi остронаправленными связями под углом 60° , а остающаяся орбиталь связывается с атомами Si, расположенными ниже, устраяя, таким образом, оборванные связи. Два

других остающихся валентных электрона займут свободную пару орбиталей, которые выступают из каждого тримера, и могли бы быть изображены в виде трех выступов распределения плотности заряда заполненных состояний при отрицательном напряжении смещения, как это обсуждалось в случае адсорбции Sb на поверхности Si (111) [30]. Наличие тримеров структуры $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ при такой электронной конфигурации приводит к полной пассивации поверхности Si (111), покрытой монослоем Bi.

Дальнейший отжиг при более высоких температурах (до 500° C) с одновременным анализом СТМ изображений позволили обнаружить новую фазу типа пчелиных сот реконструкции $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$. На рис. 4 приведено СТМ изображение этой структуры с достаточно хорошим разрешением, на котором видно, что поверхностная элементарная ячейка $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ содержит два выступа. Данное изображение получено при $V_s = +1.2$ В, но в то же время наблюдалась и некоторая зависимость изображения от величины напряжения смещения. Следует отметить, что при отрицательных значениях V_s структуру типа пчелиных сот наблюдать очень трудно, так как СТМ изображение в этом случае расплывается, но сам факт существования отчетливо выраженной фазы типа пчелиных сот не подлежит сомнению, что подтверждается неоднократно наблюдением наличия факта сосуществования обеих фаз, структуры типа пчелиных сот и тримеров на одном и том же СТМ изображении.

Поверхностная элементарная ячейка структуры типа пчелиных сот содержит два выступа (рис. 4), что предполагает степень заполнения поверхности адсорбатом $\theta = 2/3$ монослоя [18]. Однако структурная модель, предложенная в [14], в действительности содержит 2 атома кремния в элементарной ячейке, ниже которых встроены тримеры висмута. Такая конфигурация заставляет предположить, что степень покрытия поверхности висмутом $\theta = 1$, и что в СТМ изображаются выступающие атомы Si, плотность которых равна $2/3$ монослоя. В настоящее время у нас нет убедительных аргументов в пользу такого представления, однако если предположить, что для структуры типа пчелиных сот степень покрытия висмутом $\theta = 1$, то факт ее появления при более высоких температурах отжига, чем это необходимо для образования структуры тримеров, и сосуществование с последней мо-

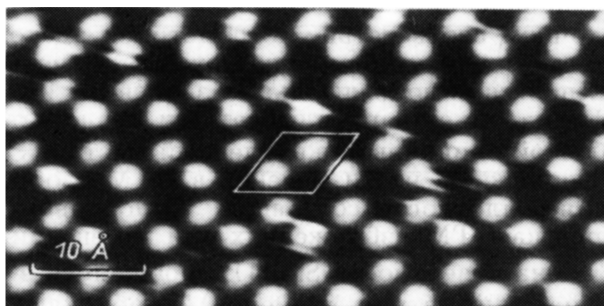


Рис. 4. СТМ изображение структуры типа пчелиных сот, полученной после отжига при 500° C ($V_s = +1.2$ В, $I = 2.0 \times 10^{-11}$ А).

Элементарная ячейка поверхностей решетки содержит два выступа.

жет означать, что структура типа пчелиных сот энергетически более предпочтительна, чем реконструкция типа тримеров. В зависимости от начала процесса зарождения, в котором могут играть роль дефекты и несовершенства на поверхности, тримеры при определенных условиях могут расти вместе с фазой типа пчелиных сот. Это дает основание говорить о существовании дополнительного нового, зависящего от величины покрытия процесса реконструкции.

Заключение

Методами СТМ и ДМЭ исследована атомная структура поверхности Si (111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ Вi. Детальный анализ СТМ изображений поверхности Si (111), покрытой субмонослойными пленками висмута, позволил обнаружить три отчетливые фазы реконструкции $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$: монометры, тримеры и фазу типа пчелиных сот. При малых покрытиях адатомы Вi занимает T_4 -центры и образуют мономеры. При монослойном покрытии наблюдаются кластеры висмута с симметрией тримеров, на СТМ изображениях которых оказалось возможным непосредственно разрешить отдельные атомы Вi. При промежуточных покрытиях на СТМ изображениях обнаружено присутствие фазы типа пчелиных сот, сосуществующей с тримерами.

Список литературы

- [1] Brillson L.J. // Surf. Sci. Rep. 1982. Vol. 2. N 1. P. 123-241.
- [2] Persson B.N.J. // Surf. Sci. Rep. 1992. Vol. 15. N 1-3. P. 1-135.
- [3] Northrup J.E. // Phys. Rev. Lett. 1984. Vol. 54. P. 683-686.
- [4] Hybertsen M.S., Louie S.C. // Phys. Rev. 1988. Vol. B38. N 4. P. 4033-4044.
- [5] Ricart J.M., Rubio J., Illas F. // Phys. Rev. 1990. Vol. B42. N 4. P. 5212-5220.
- [6] Kinoshita T., Kono S., Sagawa T. // Phys. Rev. 1986. Vol. B34. N 3. P. 3011-3014.
- [7] Huang H., Wei C.M., Li H., Tonner B.P., Tong S.Y. // Phys. Rev. Lett. 1989. Vol. 62. P. 559-562.
- [8] Park C.-Y., Abukawa T., Kinoshita T. et al. // Jap. J. Appl. Phys. 1988. Vol. 27. P. 147-152.
- [9] Takahashi T., Nakatani S., Okamoto N. et al. // Jap. J. Appl. Phys. 1988. Vol. 27. P. L753-L759.
- [10] Chan C.T., Ho K.M. // Surf. Sci. 1989. Vol. 217. P. 403-409.
- [11] Saito Y., Kawazu A., Tominaga G. // Surf. Sci. 1981. Vol. 103. N 3. P. 563-575.
- [12] Kinoshita T., Kono S., Nagayjshi H. // J. Phys. Soc. Jap. 1987. Vol. 56. P. 2511-2517.
- [13] Park C.Y., Abukawa T., Higashiyama K., Kono S. // Jap. J. Appl. Phys. 1987. Vol. 26. P. L1335-L1337.
- [14] Takahashi T., Nakatani S., Ishikawa T., Kikuta S. // Surf. Sci. 1987. Vol. 191. N 3. P. L825-L834.
- [15] Lander J.J., Morrison J. // Surf. Sci. 1964. Vol. 2. N 2. P. 553-562.
- [16] Elswijk H.B., Dijkkamp D., van Loenen E.J. // Phys. Rev. 1991. Vol. B4. N 3. P. 3802-3809.
- [17] Wilson R.J., Chiang S. // Phys. Rev. Lett. 1987. Vol. 58. P. 369-372.
- [18] Van Loenen E.J., Demuth J.E., Tromp R.M., Hamers R.J. // Phys. Rev. Lett. 1987. Vol. 58. P. 373-376.
- [19] Kawazu A., Saito Y., Ogiwara N. et al. // Surf. Sci. 1979. Vol. 86. N 1. P. 108-109.
- [20] Wan K.J., Guo T., Ford W.K., Hermanson J.C. // Phys. Rev. 1991. Vol. B44. N 3. P. 3471-3474.
- [21] Wan K.J., Guo T., Ford W.K., Hermanson J.C. // Surf. Sci. 1992. Vol. 261. N 1. P. 69-87.
- [22] Guo T., Atkinson R.E., Ford W.K. // Rev. Sci. Instr. 1990. Vol. 611. P. 968-974.
- [23] Sakurai T., Hashizume T., Kamiya I. et al. // J. Vac.Sci. & Technol. 19x89. Vol. A7. N 2. P. 1684-1692.
- [24] Sakurai T., Hashizume T., Kamiya I. et al. // Progress in Surf. Sci. 1990. Vol. 33. N 1. P. 3-89.

- [25] *Paffett M.T., Campbell C.T., Taylor T.N.* // *J. Vac. Sci. & Technol.* 1985. Vol. A3. N 3. P. 812-816.
- [26] *Tsukada M., Shima N.* // *J. Phys. Soc. Jap.* 1987. Vol. 56. N 4. P. 2875-2883.
- [27] *Tersoff J., Namann D.R.* // *Phys. Rev.* 1985. Vol. B31. N 2. P. 805-812.
- [28] *Sakurai T., Sakai A., Pickering H.W.* // *Atom-Probe Field Ion Microscopy and Its Applications.* New York: Academic Press, 1989. P. 261-263.
- [29] *La Femina J.P.* // *Surf. Sci. Repts.* 1992. Vol. 16. N 4/5. P. 133-261.
- [30] *Vartensson P., Meyer G., Amer N.M. et al.* // *Phys. Rev.* 1990. Vol. B42. N 6. P. 7230-7233.
-