

Поверхности Si(hhm): полигон для создания наноструктур

© С.И. Божко[¶], А.М. Ионов, А.Н. Чайка

Институт физики твердого тела Российской академии наук,
142432 Черноголовка, Россия

(Получена 2 декабря 2014 г. Принята к печати 14 декабря 2014 г.)

Обсуждается возможность создания упорядоченных низкоразмерных структур на базе атомно-чистых и декорированных атомами металлов ступенчатых поверхностей кремния Si(557) и Si(556). Проведены исследования условий формирования и особенностей атомной структуры регулярных систем ступеней на чистых поверхностях Si(557) 7×7 и Si(556) 7×7 . Атомная структура ступенчатых поверхностей Si(hhm), Ag/Si(557), Gd/Si(557) исследована с помощью сканирующей туннельной микроскопии высокого разрешения и дифракции медленных электронов. Показана возможность создания 1D- и 2D-структур атомов гадолиния и серебра на поверхности Si(557).

1. Введение

Наноструктурные материалы и системы атомного масштаба (квантовые точки, нити и полосы) представляют значительный интерес, как с фундаментальной, так и с практической точек зрения. Интерес к низкоразмерным (1D, 2D) объектам связан с наличием уникальных физических свойств, обусловленных пространственным ограничением атомных кластеров по одному или нескольким направлениям, а также возможными практическими применениями, например, для создания элементной базы нанoeлектроники. Использование естественного рельефа вицинальных (ступенчатых) поверхностей кремния Si(hhm), полученных отклонением от низкоиндексной плоскости (111), представляется привлекательным способом создания упорядоченных систем нанообъектов на полупроводниковых подложках с контролируемыми размерами и периодичностью [1–14]. Несмотря на большой интерес к подобным ступенчатым „полигонам“-матрицам, существует ряд технологических проблем по их созданию. Они связаны главным образом со сложностью контролируемого получения поверхностей с заданной атомной структурой и их исследования комплексом взаимодополняющих методик физики поверхности, необходимостью соблюдения условий сверхвысокого вакуума (СВВ) и т.д.

Как правило, подготовка атомно-чистой поверхности кремния Si(111) 7×7 [15] в СВВ включает в себя кратковременный нагрев при температурах в диапазоне 1200–1300°C, чтобы убрать поверхностные загрязнения и оксидный слой, и последующее постепенное охлаждение образца до температур ниже 870°C (переход $(1 \times 1) \rightarrow (7 \times 7)$). Приготовленная таким способом поверхность Si(111), как правило, демонстрирует реконструкцию (7×7) , которая стабильна в СВВ при комнатной температуре. Прогрев образца, чаще всего, осуществляется пропусканием электрического тока через ориентированную пластину монокристалла кремния. В этом случае до высоких температур нагревается только образец, что позволяет проводить термообработку при незначительном ухудшении вакуума, не препятствующем приготовлению атомно-чистой поверхности

без адсорбатов. Однако при прогреве прямым током необходимо учитывать массоперенос вдоль поверхности образца под действием электрического поля [16,17]. Из-за эффектов электромиграции, приводящих в ряде случаев к уширению террас и „схлопыванию“ ступеней („step bunching“), атомная структура одной и той же ступенчатой поверхности, приготовленной с использованием различных режимов термообработки, может различаться [16–19]. В качестве иллюстрации на рис. 1 схематически представлены данные о влиянии электрического поля на атомную структуру поверхностей кремния при малом (несколько градусов) отклонении от плоскости (111) [18]. Выше температуры перехода $(1 \times 1) \rightarrow (7 \times 7)$ существует несколько интервалов температур, в которых изменение направления тока (вверх и вниз перпендикулярно ступеням — „step-up“ и „step-down“) приводит к изменению структуры поверхности. Например, в диапазоне I от 830 до 1000°C при направлении тока вверх по ступеням образуется регулярная поверхность (R) с моноатомными ступенями, а при обратном направлении тока происходит „схлопывание“ ступеней (SB) и формирование ступеней высотой в несколько межплоскостных расстояний (рис. 1). В диапазоне II (1000–1180°C) наблюдается обратный эффект: при направлении тока вниз по ступеням образуется регулярная поверхность, а при противоположном направлении тока происходит схлопывание ступеней. Такое влияние электрического поля на регулярность и высоту ступеней связано с миграцией атомов кремния, сложная зависимость которой от температуры до сих пор не до конца ясна. Считается, что прогрев вицинальной поверхности кремния током, направленным вдоль ступеней, позволяет существенно подавить эффекты электромиграции атомов при высоких температурах. Тем не менее, даже в этом случае, как правило, не удается полностью избежать „схлопывания“ ступеней, а структура приготовленной поверхности может зависеть от температурного режима обработки.

Несмотря на большое количество экспериментальных данных об атомной структуре вицинальных поверхностей кремния с малым углом отклонения от (111), поведение систем ступеней при больших углах отклонения недостаточно изучено. Это связано, в частности, с тем,

[¶] E-mail: bozhko@issp.ac.ru

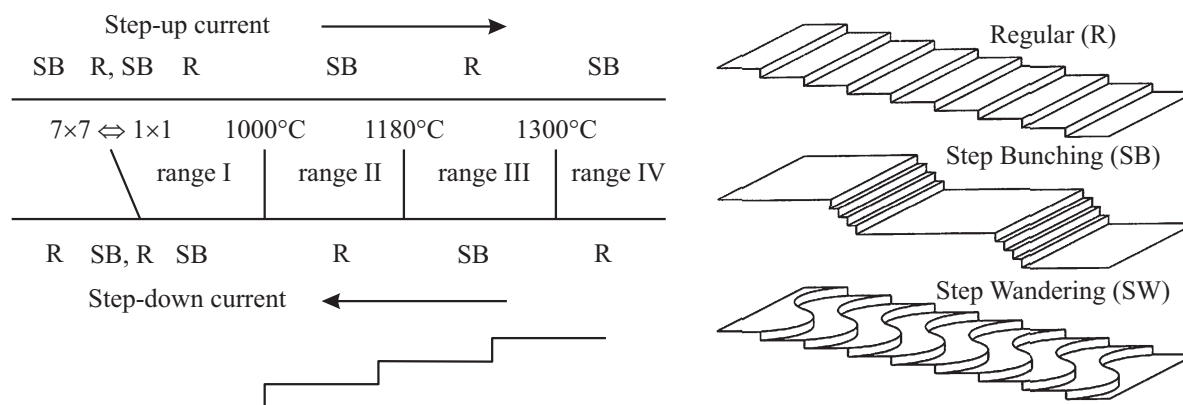


Рис. 1. Схематическое изображение влияния нагрева прямым током на регулярность системы ступеней для вицинальных поверхностей Si(111) [18].

что помимо эффектов электромиграции на регулярность и периодичность ступеней в этом случае может оказывать влияние атомная структура образующихся террас и ступеней, а также взаимодействие ступеней между собой [20].

Целью настоящей работы являлась отработка методики формирования упорядоченных наноструктур на базе чистых и декорированных атомами металлов ступенчатых поверхностях кремния Si(557)7 × 7, Si(556)7 × 7 и исследование их атомной структуры с помощью сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) и дифракции медленных электронов (ДМЭ). Поверхности Si(557) и Si(556) были получены отклонением от плоскости (111) в направлении $[\bar{1}\bar{1}2]$ на углы, равные 9.45 и 5.05° соответственно. Установлено, что использование определенных режимов термообработки в СВВ позволяет получать на базе чистых поверхностей Si(hhm)7 × 7 регулярные системы ступеней с характерной периодичностью ступеней в нанометровом диапазоне, отвечающей различным локальным ориентациям поверхностей кремния Si(hhm). Данные СТМ с атомным разрешением свидетельствуют о наличии различных конфигураций „тройных“ ступеней на поверхностях Si(hhm) с регулярной системой ступеней, выдержанной на площадях с латеральными размерами несколько сотен нанометров. Такие регулярные системы террас и ступеней могут быть использованы для создания квазиодномерных (цепочечных) и анизотропных (вытянутых вдоль направления ступеней) квазидвумерных (планарных) структур атомов гадолиния и серебра на полупроводниковой подложке.

2. Методика эксперимента

Атомная структура чистых поверхностей Si(hhm) исследовалась при комнатной температуре в СВВ электронном спектрометре LAS-3000 (RIBER), оснащенный методиками ДМЭ, СТМ и оже-электронной спектроскопии (ОЭС). Базовое давление в камере СТМ GPI-300 (Σ-скан) не превышало $p = 8 \cdot 10^{-11}$ Торр. Подготовка

образцов и зондов сканирующего туннельного микроскопа осуществлялась *in-situ* в камере анализа спектрометра и СТМ GPI-300. В качестве зондов СТМ использовались вольфрамовые острия, полученные из поликристаллической проволоки и ориентированные вдоль направления [001] монокристаллических заготовок с помощью электрохимического травления в двухмолярном растворе NaOH. Для очистки острия иглы в СВВ использовался высокотемпературный прогрев электронной бомбардировкой с последующим ионным травлением в камере СТМ [21].

Для создания упорядоченных структур на ступенчатых поверхностях кремния использовались монокристаллические образцы Si(557) и Si(556) *n*-типа (легированные фосфором, $\rho = 25$ Ом·см при 300 К). Образцы представляли собой полированные и покрытые слоем окисла пластины толщиной 0.5 мм, шириной 3–4 мм и длиной 7–8 мм. После загрузки в СВВ камеру образцы Si(hhm) обезгаживались при температуре около 600°C в течение 15–20 ч. Давление в камере после окончания дегазации не превышало 1×10^{-10} Торр. Для приготовления атомно-чистых ступенчатых поверхностей с регулярными системами ступеней использовалась специальная процедура отжига, включающая в себя кратковременный высокотемпературный прогрев и последующее охлаждение до температур ниже температуры фазового перехода. Нагрев осуществлялся пропусканием постоянного тока через кремниевую пластину. Температура образцов контролировалась с помощью оптического пирометра.

Осаждение атомов гадолиния и серебра осуществлялось в камере подготовки спектрометра LAS-3000 сразу после подготовки чистых поверхностей Si(557) и Si(556). Температура подложки во время напыления превышала 300 К. Для напыления использовалась вольфрамовая спираль, на которую предварительно в условиях высокого вакуума (10^{-6} Торр) был наплавлен осаждаемый металл. Величина покрытия контролировалась с помощью кварцевого толщиномера. Скорости напыления не превышали 1 Å/мин. Чистота поверхности

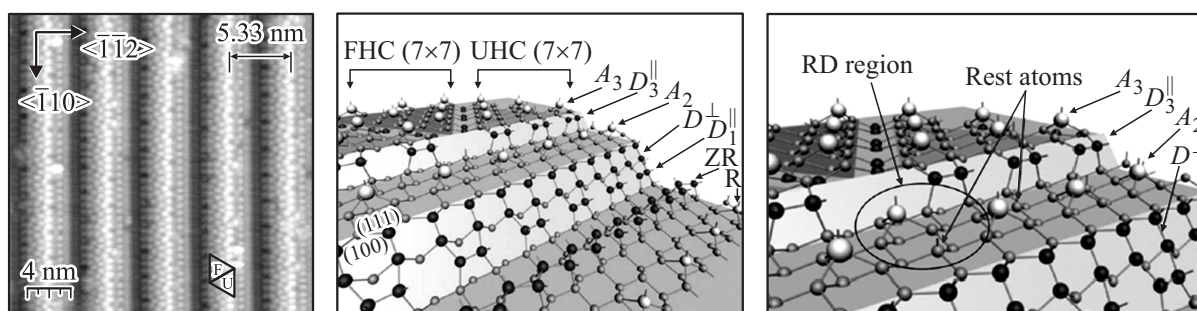


Рис. 2. СТМ-изображение поверхности кремния Si(557) с периодом 5.3 нм (левая панель) и модель „тройной“ ступени (центральная и правая панели), предложенная в работе [4]. Две последовательные ступени высотой в одно и два межплоскостных расстояния содержат ряды параллельных (D_{\parallel}) и перпендикулярных (D_{\perp}) димеров, а также дополнительный ряд (R) и зигзагоподобный ряд атомов (ZR) на нижней части тройной ступени. СТМ-изображение и модель взяты из работы [4].

контролировалась с помощью ОЭС. Предварительное обезгаживание источников позволяло проводить напыление гадолиния и серебра при давлениях в камере подготовки не превышавших 1×10^{-9} Торр.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Атомная структура чистых поверхностей кремния Si(hhm)

Возможность создания регулярной системы террас Si(111) 7×7 и ступеней высотой в три межплоскостных расстояния (так называемых „тройных“ ступеней) с периодом 5.73 нм на базе чистой поверхности Si(557) была показана в работе [2]. Для уменьшения эффектов массопереноса при подготовке поверхности прогрев осуществлялся прямым током, направленным параллельно ступеням. Кроме того, для предотвращения схлопывания ступеней и образования дефектов авторами использовалась специальная схема термообработки образца. Сначала образец подвергался вспышке при 1250°C , после чего следовало охлаждение до 1060°C в течение 30 с, затем быстрое (две секунды) охлаждение от 1060 до 830°C и отжиг при этой температуре в течение 15 мин. С помощью СТМ было установлено, что периодичность „тройных“ ступеней составляла 17 атомных рядов в направлении $\langle 110 \rangle$. Исходя из ширины и высоты ступеней, авторы определили их ориентацию как (112). В нескольких работах были приняты дополнительные попытки разъяснить атомную структуру „тройных“ ступеней на поверхности Si(557). В работе [3] приведены данные ДМЭ, свидетельствующие о предпочтительности ориентации (113), а не (112), как было предположено ранее. В работе [4] исследовалась регулярная структура с периодом ~ 5.3 нм (рис. 2), состоящая из тройных ступеней и террас Si(111), полученная на базе вицинальной поверхности кремния с начальной ориентацией поверхности Si(557). Было предположено, что регулярная система террас и „тройных ступеней“ отвечает поверхности Si(7710) с углом среза 10.02° в направлении $[\bar{1}12]$ от поверхности Si(111), а не Si(557),

как докладывалось ранее в работе [2]. На основе данных СТМ высокого разрешения авторами была предложена модель „тройной“ ступени, состоящей из последовательных ступеней высотой в одно и два межплоскостных расстояния, как показано на рис. 2.

Как следует из работ [2,4], использование одинаковой процедуры термообработки ступенчатых поверхностей кремния с одинаковым начальным отклонением от плоскости (111), предположительно, привело к формированию различных систем ступеней с периодами 5.7 [9] и 5.3 нм [11]. Как показали наши исследования [7–9], расхождения в имеющихся литературных данных [2–5] могут быть связаны с формированием систем ступеней различной периодичности на поверхностях с одинаковым углом среза относительно плоскости Si(111). В частности, значительное уширение террас может происходить в случае длительного отжига чистой поверхности Si(557) вблизи температуры фазового перехода. Кроме того, как следует из работы [7], регулярные системы ступеней с минимальным отклонением локальной ориентации поверхности от Si(557) могут быть получены в случае прогрева электрическим током, направленным перпендикулярно ступеням. В работах [7,8] использование тока, перпендикулярного ребрам ступеней, позволило получить регулярные системы „тройных“ ступеней с локальной ориентацией поверхности Si(223).

Рис. 3 демонстрирует регулярные системы „тройных“ ступеней при использовании поверхностей Si(557) и Si(556). Как показывают поперечные сечения СТМ-изображений, проведенные перпендикулярно ребрам ступеней (рис. 3, c и f), период созданных систем ступеней составляет примерно 6 и 12 нм соответственно. В случае поверхности Si(557) наблюдались регулярные на атомном уровне системы ступеней без сбоев периодичности на участках с латеральными размерами более 0.5 мкм. В качестве примера на рис. 3, a–c показана система „тройных“ ступеней на участке поверхности 250×250 нм. Чтобы избежать уширения террас на поверхностях Si(hhm), нами была использована специальная процедура термообработки образцов с использованием электрического тока, направленного перпендикулярно ребрам ступеней (вверх по ступеням). Сначала

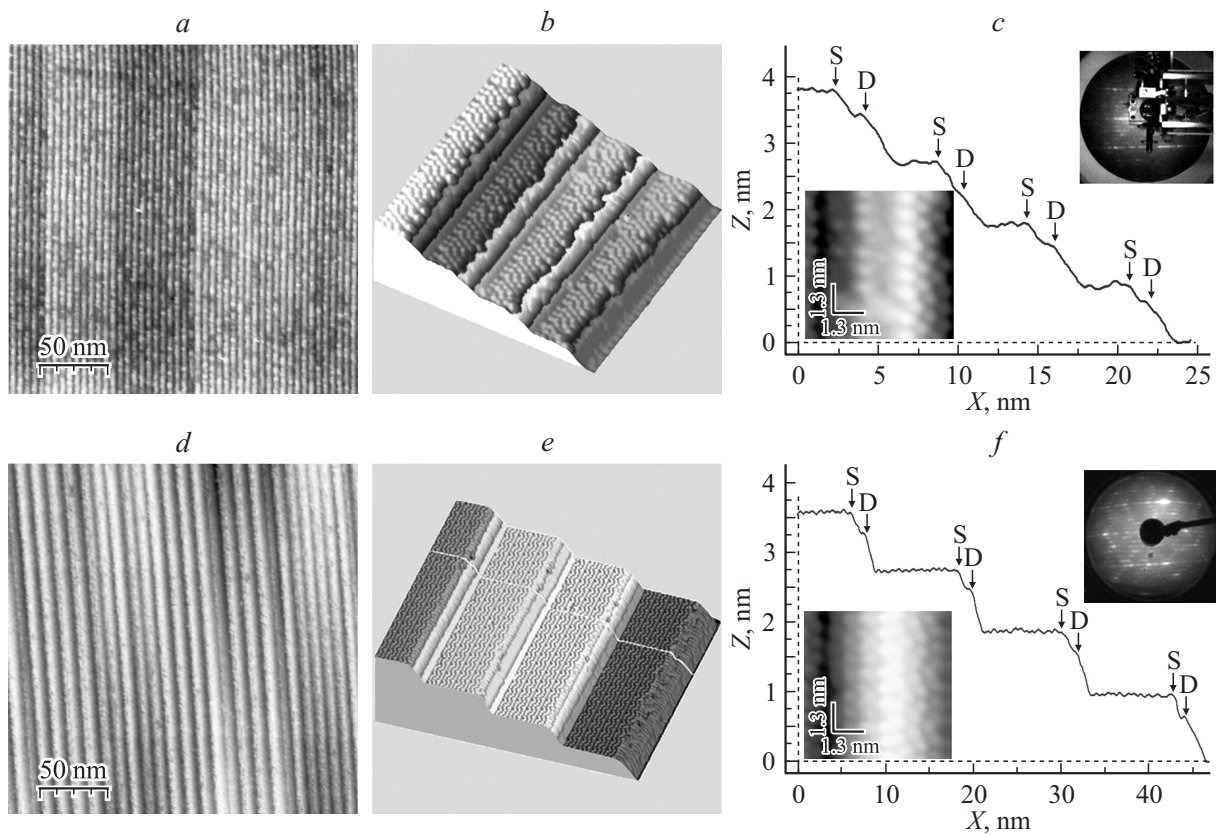


Рис. 3. СТМ-изображения регулярных систем ступеней на поверхностях Si(557) (a–c) и Si(556) (d–e). Поперечные сечение изображений (b) и (e), показанные на панелях (c) и (f) соответственно демонстрируют формирование ступеней высотой в одно (S) и два (D) межплоскостных расстояния на каждой из „тройных“ ступеней поверхностей Si(557) и Si(556). Вставки на панелях (c) и (f) показывают картины ДМЭ и увеличенное изображение одной из „тройных“ ступеней для каждой системы.

образец дегазировался длительное время (15–20 ч) при температурах, не превышавших 650°C, чтобы убрать загрязнения с контактных площадок и держателя, но не нарушить защитный оксидный слой на поверхности образца. Затем осуществлялся кратковременный (несколько секунд) нагрев образца до 1250–1300°C, быстрое (20–30 с) охлаждение до 900–950°C, отжиг в течение 1 мин при этих температурах (отвечающих диапазону I с регулярными ступенями для направления „step-up“ на диаграмме рис. 1), медленное (15 мин) охлаждение до 600–650°C и последующий длительный (от 20 мин до 1 ч) отжиг при этих температурах. Анализ атомной структуры поверхностей Si(hhm), приготовленных с использованием различных времен и температур завершающего отжига, показал важность этого этапа, позволяющего достичь большей регулярности систем ступеней при использовании умеренных температур завершающего прогрева. При более высоких температурах на завершающей стадии подготовки, регулярные на атомном уровне системы ступеней большой (микронных размеров) площади в наших экспериментах не наблюдались из-за уширения террас. Использование описанной выше процедуры термообработки позволяло воспроизводимо получать поверхности Si(557) и Si(556) с регулярными на атомном уровне системами ступеней

и минимальным отклонением от начальной (макроскопической) ориентации поверхности. Отметим также, что значительного уширения террас поверхностей Si(hhm) удавалось избежать и в случае направления тока вдоль ребер ступеней при достаточно быстром прохождении температуры перехода (1 × 1) → (7 × 7) без длительного отжига вблизи температур фазового перехода.

Данные СТМ с атомным разрешением показали, что для исследованных систем Si(hhm) возможны несколько конфигураций „тройных“ ступеней. Два СТМ-изображения „тройных“ ступеней, соответствующих регулярным системам с локальной ориентацией поверхности Si(557) и Si(556), показаны на рис. 3, c и f соответственно. Для обеих систем ступеней СТМ-изображения (рис. 3, b и e) демонстрируют неоднородную структуру „тройных“ ступеней, которые в обоих случаях состоят из моноатомной ступени, небольшой террасы (111) и двойной ступени с ориентацией, близкой к (113). Как показали СТМ-исследования, мини-терраса между моноатомной и двойной ступенями может содержать разное количество адатомов в зависимости от ширины основной террасы Si(111)7 × 7 и наличия/отсутствия зигзагоподобного ряда атомов внизу ступени (рис. 2). Наблюдение в СТМ-экспериментах нескольких возможных конфигураций „тройных“ ступеней, на наш взгляд,

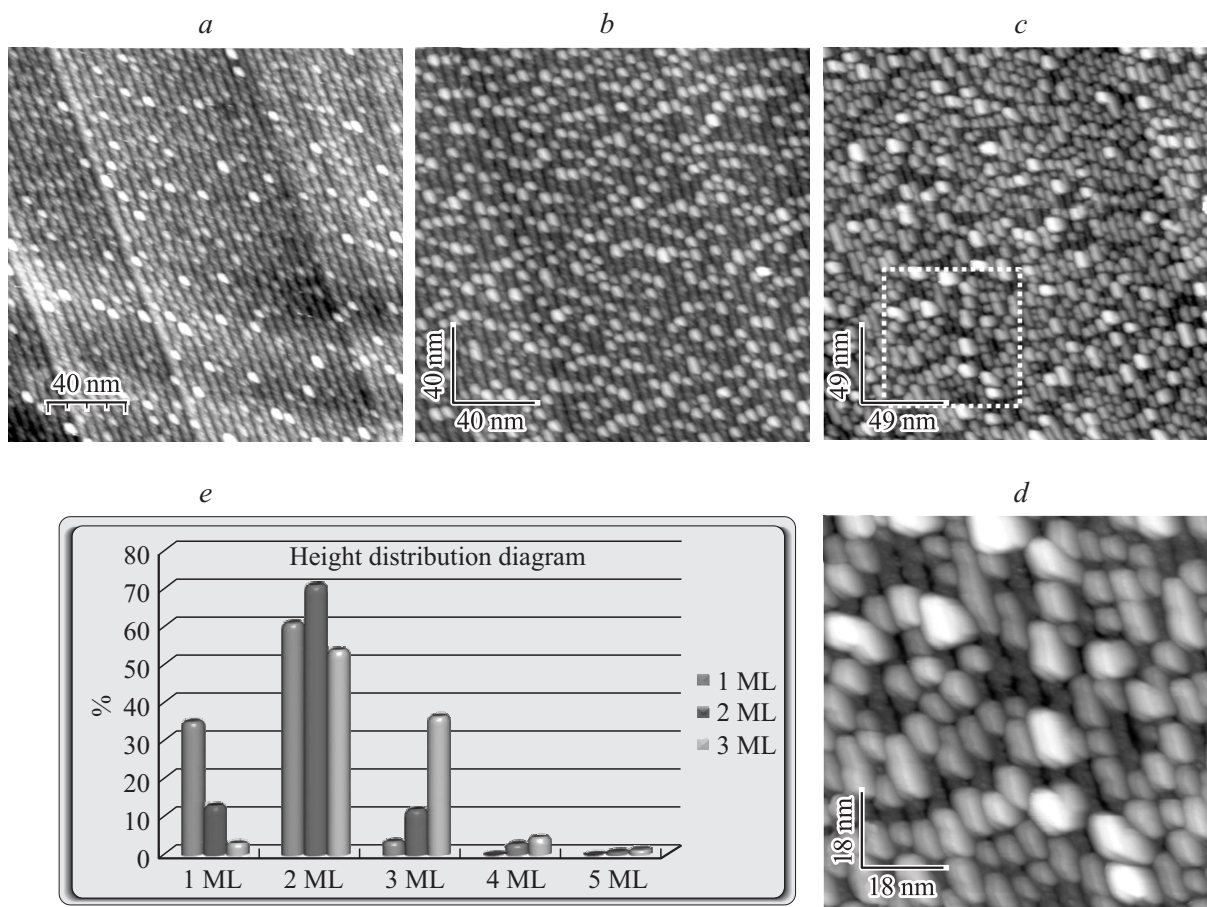


Рис. 4. *a–d* — СТМ-изображения систем Ag/Si(557) при величинах покрытий один (*a*), два (*b*) и три монослоя атомов серебра (*c, d*). *e* — гистограммы распределения высот островков серебра на поверхности Si(557), рассчитанные по СТМ-изображениям, измеренным при трех разных покрытиях.

может говорить о том, что период ступеней на поверхностях Si(hhm) зависит не только от атомной структуры ступени, но и взаимодействия ступеней между собой. В свою очередь, последнее может изменяться из-за появления на поверхности атомов адсорбата или примесей, диффундирующих из объема монокристалла кремния при высокотемпературном отжиге.

На СТМ-изображениях ступеней поверхностей Si(hhm) с атомным разрешением, как правило, наблюдаются димеры на ступени высотой в два межплоскостных расстояния и большое количество дефектов на мини-террасе и ступенях, что согласуется с качественной моделью тройной ступени поверхности Si(7710), предложенной в работе [4]. Дефекты атомной структуры, по-видимому, играют существенную роль в минимизации количества оборванных связей и энергии ступеней, определяющих периодичность формирующихся структур.

3.2. Создание низкоразмерных структур на вицинальных поверхностях Si(hhm)

Поверхности Si(hhm), содержащие регулярные системы террас и ступеней (рис. 3), представляются пер-

спективной подложкой для создания 1D- и 2D-структур с уникальными физическими свойствами. Рельеф таких поверхностей может использоваться для создания цепочек атомов, массива металлических нанопроволок с характерным периодом в нанометровом диапазоне или анизотропных островков нанометрового размера. При малых (субмонослойных) покрытиях металлов характер взаимодействия осажденных атомов между собой и с атомами подложки может приводить как к образованию отдельных островков, так и к образованию цепочек атомов вдоль некоторых выделенных направлений. Последнее наблюдалось для некоторых систем „металл–вицинальная поверхность Si(111)“ [10–14, 22–28]. В частности, была показана возможность создания одномерных цепочек атомов золота [10–13], серебра [14] и свинца [28] на поверхности кремния Si(557) при субмонослойных ($\Theta \sim 0.2$ монослоя) покрытиях атомов металлов. Использование ступенчатой поверхности с большим отклонением от плоскости (111) позволило избежать образования многодоменных структур и создать цепочки атомов металлов с преимущественным упорядочением вдоль направления ступеней. Транспортные измерения, выполненные на

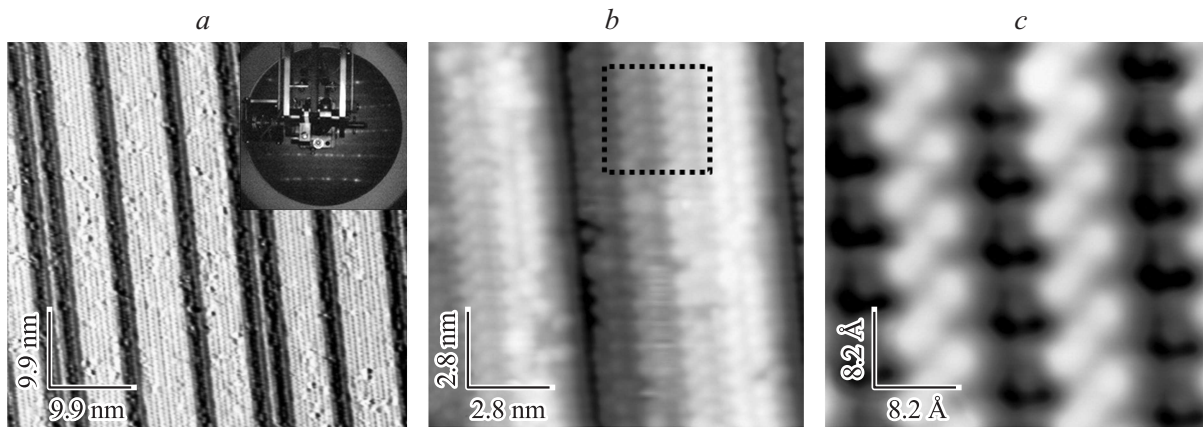


Рис. 5. *a–c* — СТМ-изображения системы Si(557)+Gd (0.2 монослоя), демонстрирующие квазиодномерную реконструкцию типа 5×2 на террасах ступенчатой поверхности кремния. Изображение на панели (*a*) процифференцировано, чтобы усилить контраст на террасах и показать цепочки атомов, ориентированные вдоль ребер ступеней. Вставка на панели (*a*) показывает типичную картину ДМЭ с поверхности Gd/Si(557) 5×2 . Штриховой линией на панели (*b*) обозначен участок поверхности, показанный на панели (*c*).

таких цепочечных структурах [11–13], показали анизотропию проводимости вдоль и перпендикулярно ступеням, а также неметаллический характер проводимости в атомных цепочках при субмонослойных покрытиях.

Рис. 4 демонстрирует возможность создания анизотропных наностроек серебра на террасах регулярной ступенчатой поверхности Si(557) при монослойных покрытиях атомов серебра, осажденных на подложку при комнатной температуре. Из рис. 4, *a, b* видно, что при малых покрытиях (0–2 монослоя) островки растут на террасах Si(111) и имеют анизотропную форму. Островки вытянуты вдоль направления ступеней и ограничены по ширине одной террасой ступенчатой поверхности Si(557). При увеличении покрытия (рис. 4, *b, c*) островки, в большинстве случаев, по-прежнему вытянуты вдоль ребер ступеней и ограничены по ширине одной террасой Si(111), но некоторые покрывают два или три периода ступенчатой структуры поверхности Si(557) (рис. 4, *c, d*). Как демонстрируют гистограммы распределения высот, при величинах покрытий 1, 2 и 3 монослоя существует предпочтительная высота островков, которая одинакова для всех трех покрытий, представленных на рис. 4, и составляет 2 монослоя атомов серебра.

Рис. 5 демонстрирует возможность использования рельефа ступенчатых поверхностей Si(hhm) для создания квазиодномерных цепочечных структур атомов редкоземельного элемента. Как видно из рис. 5, *a* и 5, *b*, после серии напылений субмонослойных покрытий (0.1–0.2 монослоя) атомов гадолиния и отжига при 600°C удавалось создать упорядоченную квазиодномерную структуру Si(111) 5×2 -Gd на террасах поверхности Si(557). Из-за диффузии гадолиния в объем монокристалла кремния, ступенчатая поверхность Si(hhm) после формирования цепочечных структур не демонстрирует такой же регулярности, как наблюдалась для чистой поверхности Si(557) (рис. 3) и системы Ag/Si(557) (рис. 4).

Тем не менее, как демонстрируют СТМ-изображения и картина ДМЭ на рис. 3, все цепочки атомов гадолиния вытянуты вдоль одного направления, совпадающего с направлением ступеней в кремниевой матрице. Ранее в работах [25–27] была показана возможность получения трехдоменных и однодоменных структур типа $(n \times 1)$ и $(n \times 2)$ для систем Yb/Si(111) [25], Eu/Si(111) [26] и Ce/Si(111) [27]. Однако, контролируемого и воспроизводимого создания упорядоченных однодоменных квазиодномерных структур из атомов редкоземельного элемента, по-видимому, можно добиться только с использованием ступенчатой подложки, позволяющей выделить одно из направлений $\langle 110 \rangle$ монокристалла кремния.

4. Заключение

Показано, что использование определенных режимов термообработки позволяет получать на базе чистых поверхностей Si(hhm) 7×7 регулярные системы ступеней высотой в три межплоскостных расстояния с характерной периодичностью ступеней в нанометровом диапазоне. Результаты СТМ-исследований демонстрируют возможность создания регулярных ступенчатых матриц, не имеющих сбоев периодичности на атомном уровне на участках поверхности с латеральными размерами несколько сотен нанометров. Данные СТМ с атомным разрешением свидетельствуют о наличии нескольких конфигураций „тройных“ ступеней на поверхностях Si(hhm), которые наблюдались даже на участках регулярных поверхностей с одной периодичностью ступеней. Продемонстрирована возможность создания низкоразмерных (островковых и цепочечных) металлических наноструктур металлов с уникальными физическими свойствами на вицинальных ступенчатых поверхностях Si(hhm).

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН № 24 „Фундаментальные основы технологий наноструктур и наноматериалов“, Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 08-02-00612, 11-02-01256, 14-02-01234, 14-02-00949), гранта Марии Кюри в рамках 7-й Рамочной Программы ЕС и программы поддержки ведущих научных школ Министерства образования и науки РФ. СТМ-изображения были представлены с использованием программы WSXM [29].

Авторы выражают особую благодарность Н.В. Абросимову за подготовку монокристаллических образцов и А.В. Латышеву за полезные комментарии и плодотворные дискуссии.

Список литературы

- [1] T. Suzuki, H. Minoda, Y. Tanishiro, K. Yagi, H. Kitada, N. Shimizu. *Surf. Sci.*, **357–358**, 73 (1996).
- [2] A. Kirakosian, R. Bennewitz, J.N. Crain, Th. Fauster, J.-L. Lin, D.Y. Petrovykh, F.J. Himpsel. *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 1608 (2001).
- [3] M. Henzler, R. Zhachuk. *Thin Sol. Films*, **428**, 129 (2003).
- [4] S.A. Teys, K.N. Romanyuk, R.A. Zhachuk, B.Z. Olshanetsky. *Surf. Sci.*, **600**, 4878 (2006).
- [5] D.-H. Oh, M.K. Kim, J.H. Nam, I. Song, C.-Y. Park, S.H. Woo, H.-N. Hwang, C.C. Hwang, J.R. Ahn. *Phys. Rev. B*, **77**, 155 430 (2008).
- [6] A.A. Baski, L.J. Whitman. *Phys. Rev. Lett.*, **74**, 956 (1995).
- [7] A.N. Chaika, D.A. Fokin, S.I. Bozhko, A.M. Ionov, F. Debontridder, V. Dubost, T. Cren, D. Roditchev. *J. Appl. Phys.*, **105**, 034 304 (2009).
- [8] A.N. Chaika, D.A. Fokin, S.I. Bozhko, A.M. Ionov, F. Debontridder, T. Cren, D. Roditchev. *Surf. Sci.*, **603**, 752 (2009).
- [9] A.N. Chaika, V.N. Semenov, V.G. Glebovskiy, S.I. Bozhko. *Appl. Phys. Lett.*, **95**, 173 107 (2009).
- [10] Daniel Sanchez-Portal, Richard M. Martin. *Surf. Sci.*, **532–535**, 655 (2003).
- [11] R. Losio, K. N. Altmann, A. Kirakosian, J.-L. Lin, D.Y. Petrovykh, F.J. Himpsel. *Phys. Rev. Lett.*, **86**, 4632 (2001)
- [12] M. Schock, C. Surgers, H.V. Lohneysen. *Thin Sol. Film*, **428**, 11 (2003).
- [13] H. Okino, R. Hobara, I. Matsuda, T. Kanagawa, S. Hasegawa, J. Okabayashi, S. Toyoda, M. Oshima, K. Ono. *Phys. Rev. B*, **70**, 113 404 (2004).
- [14] M. Krawiec, T. Kwapiński, M. Jałochowski. *Phys. Rev. B*, **73**, 075 415 (2006).
- [15] K. Takayanagi, Y. Tanishiro, S. Takahashi. *J. Vac. Sci. Technol. A*, **3**, 1502 (1985).
- [16] A.V. Latyshev, A.L. Aseev, A.B. Krasilnikov, S.I. Stenin. *Surf. Sci.*, **213**, 157 (1989).
- [17] A.V. Latyshev, A.B. Krasilnikov, A.L. Aseev. *Surf. Sci.*, **311**, 395 (1994).
- [18] K. Yagi, H. Minoda, M. Degawa. *Surf. Sci. Rep.*, **43**, 45 (2001).
- [19] Y.-N. Yang, E.S. Fu, E.D. Williams. *Surf. Sci.*, **356**, 101 (1996).
- [20] В.И. Марченко, А.Я. Паршин. *Письма ЖЭТФ*, **79**, 257 (1980).
- [21] A.N. Chaika, N.N. Orlova, V.N. Semenov, E.Yu. Postnova, S.A. Krasnikov, M.G. Lazarev, S.V. Chekmazov, V.Yu. Aristov, V.G. Glebovsky, S.I. Bozhko, I.V. Shvets. *Sci. Reports*, **4**, 3742 (2014).
- [22] A. Kirakosian, J.L. Mc Chesney, R. Bennewitz, J.N. Crain, J.-L. Lin, F.J. Himpsel. *Surf. Sci. Lett.*, **498**, L109 (2002).
- [23] R.A. Zhachuk, S.A. Teys, A.E. Dolbak, B.Z. Olshanetsky. *Surf. Sci.*, **565**, 37 (2004).
- [24] Р.А. Жачук, С.А. Тайс, Б.З. Ольшанецкий. *Письма ЖЭТФ*, **79**, 467 (2004).
- [25] R.-L. Vaara, M. Kuzmin, R.E. Perala, P. Laukkanen, I.J. Vayrynen. *Surf. Sci.*, **529**, L229 (2003).
- [26] Vaara, M. Kuzmin, P. Laukkanen, R.E. Perala, I.J. Vayrynen. *Appl. Surf. Sci.*, **220**, 327 (2003).
- [27] M. Goshtasbi Rad, M. Gotherid, G. LeLay, U.O. Karlsson. *Surf. Sci.*, **558**, 49 (2004).
- [28] C. Tegenkamp, T. Ohta, J.L. Mc Chesney, H. Dil, E. Rotenberg, H. Pfnur, K. Horn. *Phys. Rev. Lett.*, **100**, 076 182 (2008).
- [29] I. Horcas, R. Fernandez, J.M. Gomez-Rodriguez, J. Colchero, J. Gomez-Herrero, A.M. Baro. *Rev. Sci. Instrum.*, **78**, 013 705 (2007).

Редактор А.Н. Смирнов

Si(hhm) surfaces: ground for development of nanostructures

S.I. Bozhko, A.M. Ionov, A.N. Chaika

Institute of Solid State Physics,
Russian Academy of Sciences,
142432 Chernogolovka, Russia

Abstract Fabrication of well ordered low dimensional structures on clean and metal-decorated stepped Si(hhm) surfaces is discussed. The atomic structure of clean Si(557)7 × 7 and Si(556)7 × 7 surfaces fabricated using special annealing procedure and metal-decorated Ag/Si(557) and Gd/Si(557) systems have been studied using high resolution scanning tunneling microscopy and low energy electron diffraction. The investigations demonstrate feasibility of fabrication of anisotropic 1D- and 2D-structures of gadolinium and silver atoms on the Si(557) surface.