<u>ΥCΠΕΧИ ΦИЗИЧЕСКИХ НАУК</u>

ОБЗОРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

Создание наноструктур германия и кремния с помощью зонда сканирующего туннельного микроскопа

А.А. Шкляев, М. Ичикава

Рассмотрено состояние исследований по созданию наноструктур на поверхностях полупроводников с помощью зонда сканирующего туннельного микроскопа (СТМ). Анализируется процесс непрерывного переноса атомов при направленной поверхностной диффузии под действием электрического поля СТМ в условиях испарения поверхностных атомов полем. Исследуется влияние облучения внешним электронным пучком на взаимодействие образца и зонда. Облучение создает условия как для уменьшения барьера для прямых межатомных реакций, так и для изменения направления переноса атомов между зондом и образцом. Показаны возможности создания наноструктур, таких, как островки и линии германия и кремния, а также окон кремния на окисленной поверхности кремния.

PACS numbers: 68.37.Ef, 79.70.+q, 81.16.Ta

Содержание

1. Введение (913).

2. Образование островков кремния на поверхности кремния (915).

2.1. Условия образования островков. 2.2. Кинетика роста островков. 2.3. Влияние величины туннельного тока на образование островков. 2.4. Механизм переноса атомов к островкам.
2.5. Модель переноса атомов. 2.6. Оценка параметров взаимодействия электрического поля СТМ с атомами поверхности кремния.

3. Образование островков германия (920).

3.1. Особенности образования островков германия. 3.2. Взаимодействие между электрическим полем СТМ и поверхностными атомами германия. 3.3. Сравнение процессов образования островков германия и кремния.

4. Линии германия (922).

4.1. Непрерывный перенос атомов германия с помощью зонда СТМ. 4.2. Влияние отжига на форму линий германия. 4.3. Пересечение линий германия.

А.А. Шкляев. Институт физики полупроводников СО РАН, 630090 Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева 13, Российская Федерация Тел. (383) 330-85-91. Факс (383) 333-27-71 E-mail: shklyaev@thermo.isp.nsc.ru Quantum-Phase Electronics Center, Department of Applied Physics, The University of Tokyo and Japan Science and Technology Agency, CREST 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan Тел./Факс + 81 3 5841 7903 E-mail: shklyaev@exp.t.u-tokyo.ac.jp М. Ичикава. Quantum-Phase Electronics Center, Department of Applied Physics, The University of Tokyo and Japan Science and Technology Agency, CREST 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan Тел./Факс + 81 3 5841 7901 E-mail: ichikawa@ap.t.u-tokyo.ac.jp

Статья поступила 22 февраля 2006 г.

Влияние облучения внешним электронным пучком на взаимодействие образца и зонда СТМ (924).

5.1. Удаление атомов из слоя германия на окисленной поверхности кремния. 5.2. Перенос атомов с образца на зонд СТМ. 5.3. Создание окон кремния на окисленной поверхности кремния. 5.4. Механизм переноса атомов с образца на зонд СТМ в условиях облучения внешним электронным пучком.

6. Заключение (929).

Список литературы (929).

1. Введение

Широкий интерес к исследованию наноразмерных структур вызван общей тенденцией, направленной на миниатюризацию электронных устройств. Однако существует и фундаментальная причина, связанная с электронными свойствами наноструктур, которые отличаются от свойств объемных материалов наличием эффектов пространственного квантования. Зависимость зонной структуры объекта от его размера может быть использована для существенного расширения области применения материалов в электронных и оптических схемах. Изменение положений энергетических уровней может сопровождаться изменением условий электронных переходов и, следовательно, влиять на эффективность оптической эмиссии. Пространственное квантование создает хорошо выраженные дискретные энергетические уровни в структурах размером около 10 нм и менее. Такие структуры, называемые квантовыми точками, формируют элементную базу для изготовления одноэлектронных транзисторов, новых фотоэлектронных приборов, а также квантовых компьютеров [1-4].

Среди способов создания полупроводниковых наноструктур наибольшее распространение получили методы, основанные на использовании процессов самоорганизации, происходящих при релаксации напряженных гетероструктур [2, 5–7], а также методы, модифицирующие поверхности для изменения начальных стадий роста [8–11]. Используемые этими методами природные механизмы включают в себя спонтанное зарождение и рост, которые позволяют варьировать геометрические размеры наноструктур только в определенных пределах. Эти методы являются эффективными для создания массивов наноструктур. Для создания же одиночных нанообъектов в заданном местоположении требуется поиск методов адресной модификации морфологии поверхности с использованием дополнительных технических средств, таких, как сканирование поверхности с помощью электронных пучков и микрозондов.

Многочисленными исследованиями было показано, что сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) [12] является эффективным инструментом не только для исследования морфологии и атомной структуры поверхностей, но также и для прямого создания наноразмерных структур [13-15]. Уникальные возможности СТМ были продемонстрированы при модификации поверхностей металлов, а именно при создании таких структур, как "квантовый коралл" [16, 17]. Особенностью этих экспериментов является использование очень низких температур образца, порядка 10 К. Это связано с подвижностью адатомов при более высоких температурах. Перенос атомов осуществляется как вдоль поверхности — латеральное перемещение, так и между образцом и зондом СТМ — вертикальный перенос. Эксперимент [18-20] и теория [21, 22] по латеральному перемещению указывают на возникновение "подстройки" химических связей между зондом и адатомом, тогда как при вертикальном переносе важную роль играет возбуждение вибрации связей адатом-подложка за счет неупругого электронного туннелирования [23-27].

Поверхности полупроводников благодаря ковалентным связям являются термически более устойчивыми и позволяют проводить их модификацию при комнатной температуре. Ямки или выпуклости (островки) были сформированы на поверхности образцов с помощью зонда СТМ при приложении между ними импульсов напряжения, обычно миллисекундной длительности [28, 29]. Импульсы подаются в моменты, когда зонд СТМ выдвигается к поверхности образца до расстояния в несколько ангстрем. Под действием импульса напряжения величиной около 3В происходит модификация поверхности, вызываемая химическим и механическим взаимодействием атомов зонда и образца. При подаче более высоких напряжений в интервале 4-6 В в режиме постоянного туннельного тока СТМ, когда расстояние между образцом и зондом составляет величину приблизительно 0,6-0,8 нм, наблюдается удаление атомов с поверхности образца кремния [30]. Удаление происходит через образование и перенос положительных или отрицательных ионов под действием сильного электрического поля СТМ [31]. Этот процесс был использован для создания канавок шириной несколько нанометров на поверхности кремния [32]. Кроме переноса атомов между образцом и зондом СТМ, происходит и перемещение адатомов вдоль поверхности образца вслед за движением зонда [13, 14]. Такое перемещение обусловлено наличием градиента электрического поля и происходит по направлению к месту более сильного поля, т.е. к центру взаимодействия образца и зонда [31]. Модификация поверхности образца с помощью зонда СТМ может осуществляться и без приложения напряжения при

сближении зонда и образца до состояния, близкого к механическому контакту [33]. Автоматическое приближение зонда СТМ на близкое расстояние к образцу происходит в режиме работы СТМ при нулевом напряжении смещения и заданных больших величинах туннельного тока до 10 нА [34]. Желаемая модификация поверхности при использовании последних методов происходит только с некоторой вероятностью из-за возможного изменения химического состава и формы острия зонда после каждого акта взаимодействия. Использование зонда СТМ как инструмента нанолитографии рассмотрено на примере разных материалов в недавнем обзоре Тсенга и др. [15].

В данном обзоре рассматривается процесс непрерывного переноса поверхностных атомов с помощью зонда СТМ для создания наноструктур кремния и германия [35-37]. Непрерывный перенос атомов происходит под действием сильного электрического поля СТМ при подаче повышенного стационарного напряжения смещения между зондом и образцом. Результат взаимодействия образца и зонда зависит от полярности приложенного напряжения. При отрицательном напряжении на острие поверхностные атомы образца перемещаются к центру взаимодействия, создавая трехмерный островок размером порядка 10 нм. В отличие от методов, основанных на приложении импульсов напряжения, при которых за импульс переносится небольшой кластер атомов, методы, использующие повышенные стационарные напряжения смещения, создают процесс непрерывного переноса атомов с постоянной скоростью. Скорость перемещения определяется величиной как заданного туннельного тока, так и приложенного напряжения [37, 38]. Путем сканирования поверхности зондом СТМ в режиме непрерывного перемещения атомов могут быть созданы линии на поверхности образца [39]. Процесс перемещения атомов может быть описан размерным соотношением между скоростью перемещения, величиной напряжения смещения и эффективным дипольным моментом атомов на поверхности [40]. Это соотношение позволяет делать оценку величин эффективных дипольных моментов, а также энергий взаимодействия между этими дипольными моментами и приложенным электрическим полем [37, 40].

Дополнительную информацию о механизме переноса атомов получают при изучении взаимодействия образца и зонда СТМ в разных экспериментальных условиях. Интересный эффект дает облучение области взаимодействия зонда и образца внешним электронным пучком. Облучение вызывает перенос атомов с образца на острие зонда в случае, когда поверхность кремния покрыта пленкой окисла кремния [41]. В перенос вовлекаются не только атомы слоев, нанесенных на окисел, но и атомы самого окисла, а также атомы кремния после удаления окисла. Данный эффект позволяет создавать окна кремния в окисле кремния с помощью зонда СТМ при комнатной температуре образца.

Приведенные в этом обзоре экспериментальные данные получены на уникальной сверхвысоковакуумной установке, камера молекулярно-лучевой эпитаксии которой была оснащена СТМ, сверхвысоковакуумной пушкой сканирующего отражательного электронного микроскопа (ОЭМ), детектором вторичных электронов и детектором дифракции быстрых электронов (ДБЭ). Расположение зонда СТМ и электронной пушки позволяло использовать их для одновременного сканирования поверхности образца и наблюдения на экране ОЭМ состояния острия зонда и его манипуляций на поверхности образца.

2. Образование островков кремния на поверхности кремния

2.1. Условия образования островков

Взаимодействие образца Si(111) и зонда СТМ в режиме постоянного туннельного тока (I_t) приводит к перемещению атомов образца по направлению к центру взаимодействия. Перемещение происходит при повышенном отрицательном напряжении смещения в диапазоне 5,5-10 В, приложенном к зонду, и при относительно малых туннельных токах до 1 нА [36, 38, 40]. В результате перемещения на поверхности образца образуется трехмерный островок, размер которого зависит от времени взаимодействия, обычно составляющего от 1 до 60 с. После создания островка его форма и размер фиксируются путем записи изображения поверхности образца с помощью СТМ. На рисунке 1 приведены данные для островков кремния, выращенных при разных напряжениях смещения (V). Каждый островок имеет индивидуальную форму, которая несколько отличается от формы других островков.

Хотя образование островков наблюдалось в широком диапазоне напряжений смещения от 5,5 до 10 В, островки с хорошо воспроизводимым размером получались только при больших смещениях от 7 до 10 В. Как видно из рис. 1, разброс островков по высоте составлял



Рис. 1. (а) Островки кремния, выращенные на поверхности Si(111) при постоянном туннельном токе величиной 0,3 нА и трех напряжениях смещения зонда, -9,0, -9,5 и -10,0 В, для рядов слева направо соответственно. Каждый островок создавался в течение 7 с. (б) Увеличенное изображение двух островков из левого ряда. (в) Изображение того же участка поверхности, что и на (а) после отжига образца в течение 5 мин при 700 °С. (г, д) Профили поверхности вдоль белых линий, проходящих по островкам на рис. а, б соответственно.

менее 20 %. Островки, выращенные при -9 В в течение 7 с имели высоту около 3 нм и основание около 9 нм. Такие параметры соответствуют геометрическому фактору ~ 0.3 , определяемому как отношение высоты островка к длине его основания. Эта величина приблизительно в два раза больше, чем у островков кремния, создаваемых с помощью высокотемпературного СТМ. При взаимодействии зонда и образца Si(111) при повышенных температурах образовывался островок в форме скошенной пирамиды с гранями {311} на боковых сторонах [34]. Интересно отметить, что такая же пирамидальная форма островков наблюдается и в случае гетероэпитаксии германия на поверхности Si(111) при покрытиях германия выше покрытий перехода от двумерного к трехмерному росту [42, 43]. Большое различие в форме островков свидетельствует о разном механизме их образования на образцах при комнатной и при повышенной температурах.

Отжиг образца при 700 °C в течение 5 мин приводил к уменьшению островков (рис. 1в). Островки полностью растекались по поверхности при отжиге образца при 900 °C в течение 3 мин.

2.2. Кинетика роста островков

Размер островка возрастает с увеличением длительности взаимодействия образца и зонда СТМ. Высота островков достигала 12 нм при длительности взаимодействия 10³ с. Заметим, что для изображения формы островка с помощью СТМ зонд должен быть острее, чем островок. При этом измерение высоты островка не зависит от формы зонда СТМ. На рисунке 2 показаны островки, полученные при сравнительно коротких временах взаимодействия. СТМ-изображения, полученные с атомным разрешением, выявили, что поверхность вокруг островков имеет разупорядоченную атомную структуру, в которой отсутствует часть атомов поверхностного слоя (рис. 2б). Эти данные показывают, что кремний для образования островков берется с широкой области вокруг них, а отсутствие больших изменений морфологии поверхности свидетельствует о переносе кремния преимущественно посредством отдельных атомов.

Кинетика роста островков была изучена по измерению зависимости высоты островков от времени взаимодействия зонда СТМ с образцом при отрицательном напряжении смещения зонда в диапазоне между -6 и -10 В (рис. 2г). Для оценки количества кремния в островке требуется знание его формы. Поскольку высота островка измеряется с помощью СТМ корректно независимо от его формы, то объем островка рассчитывался на основе предположения, что все островки имеют одинаковую форму в виде конуса с геометрическим фактором, равным 0,3. Тогда объем островка равен $3H^3$, где H — высота островка. С другой стороны, при постоянной скорости переноса атомов в островок, для объема островка имеем:

$$3H^3 = Rt, (1)$$

где *R* — скорость и *t* — время роста островка. Скорость роста островка в начальный период определялась путем подгонки равенства (1) к экспериментальным данным, полученным для высот островков меньше 4 нм (рис. 2г), при этом величина *R* использовалась как подгоночный параметр. Рисунок 2д показывает величины *R*, опреде-



Рис. 2. (а) Изображение участка поверхности с островками кремния, выращенными при $I_t = 0,3$ нА и V = -10,0 В, приложенном к зонду СТМ в течение 1, 3, 6, 11, 17, 27 и 47 с (сверху вниз). (б) Увеличенное изображение участка с маленькими островками, отмеченного на рис. а белыми линиями. (в) Профиль поверхности вдоль белой линии на рис. а. (г) Высота островков кремния в зависимости от времени роста. Данные приведены для островков, выращенных при напряжениях смещения -6, -8 u - 10 В и $I_t = 0,3$ нА. Сплошные линии описывают процесс роста островков с постоянной скоростью перемещения атомов в островок согласно формуле (1). (д) Начальная скорость роста островков кремния в зависимости от величины отрицательного напряжения зонда при $I_t = 0,3$ нА.

ленные в результате подгонки в зависимости от напряжения смещения (параметры *s* и α определены в разделах 2.4, 2.5).

2.3. Влияние величины туннельного тока на образование островков

Рост островков кремния под действием зонда СТМ зависит от величины туннельного тока. Хорошо воспроизводимый рост островков наблюдается при сравнительно малых туннельных токах — менее 0,5 нА. При бо́льших туннельных токах высота островков в среднем увеличивается с возрастанием длительности взаимодействия между образцом и зондом, однако это увеличение не является монотонным. Это выражается в разбросе данных на зависимости высоты островка от времени взаимодействия, который превышает точность измерения высоты островка (рис. 3а). Для анализа экспериментальных данных процесс роста островков был разбит на стадии: начальную и последующую. Скорости роста определялись подгонкой соотношения (1) к экспериментальным данным, полученным на соответствующих стадиях роста. Скорость роста на начальной стадии

оказалась значительно выше, чем на последующей, при этом зависимость скорости от туннельного тока имела максимум при 0,3 нА (рис. 3б).

Разброс островков по высоте возрастает при увеличении туннельного тока, при этом в процессе роста островка возникают спонтанные флуктуации туннельного тока. При напряжении смещения -10 В и туннельном токе 1,2 нА или выше флуктуации могут усиливаться и достигать величины 500 нА по амплитуде. Во время флуктуаций на поверхности образца может появиться ямка вместо островка или возле островка (рис. 4). Такой результат можно объяснить следующим образом. Обратная связь СТМ направлена на поддержание постоянной величины туннельного тока путем изменения расстояния между зондом и образцом. В условиях работы обратной связи возникновение флуктуаций туннельного тока вызывает появление механических вибраций зонда СТМ в направлении к поверхности образца. Такая вибрация зонда наблюдалась с помощью сканирующего электронного микроскопа. Вибрация может привести к механическому контакту зонда и образца. Образование ямки на поверхности образца, вероятно, является ре-



Рис. 3. (а) Высота островка в зависимости от длительности взаимодействия между образцом и зондом СТМ при $I_t = 1,2$ нА и V = -10 В. Точность измерения высоты островков (в пределах 10%) значительно превышает разброс экспериментальных данных. (б) Скорости роста островков на начальной и последующей стадиях в зависимости от величины I_t при V = -10 В. Точность определения скорости роста на начальной стадии составляет 15–20%. Стрелкой показана область туннельных токов, при которых рост островков был нестабильным. Сплошные линии показывают аппроксимацию экспериментальных данных посредством равенства (1) для случая роста островков с постоянной скоростью, которая предполагалась размой на начальной и последующей стадиях. На вставке приведена начальная скорость роста в зависимости от I_t для V = -8 В.

зультатом такого контакта. Отметим, что перенос материала при механическом контакте рассматривался авторами нескольких работ [31, 44, 45] для объяснения появления бугорков и ямок на поверхности образца после приложения импульсов напряжения между зондом, изготовленным из золота, и образцом кремния.

2.4. Механизм переноса атомов к островкам

На рисунке 5 показаны изображения участков поверхности, полученных после взаимодействия зонда и образца при разных полярностях напряжения смещения. В случае отрицательного напряжения на зонде на поверхности образца наблюдается образование островка, как описано выше, тогда как при положительном напряжении, на поверхности образуется небольшое углубление. В работе Хейке и др. [35] было показано, что в этом случае на острие зонда рос островок. Это свидетельствует о том, что углубление на образце появляется в результате



Рис. 4. (а, б) Изображения поверхности Si(111), полученной в результате взаимодействия образца и зонда CTM при V = -10 В и (а) $I_t = 0,3, 0,7, 1,3$ и 3,0 нА (на рисунке сверху вниз) в течение 22 с в каждой точке и (б) в течение 25 с при величинах I_t , отмеченных на рисунке. (в, г) Профили поверхности между стрелками, отмеченными на рис. а, б соответственно. Структуры, такие, как (а) ямка возле островка и (б) большая ямка, были образованы при $I_t = 3,0$ нА.

переноса атомов с образца на острие зонда. Эти факты позволяют разграничить роль таких процессов, как испарение атомов в виде ионов и поверхностной диффузии, направленной к центру взаимодействия. В работах Аоно и др. [30, 32] было определено, что в случае поверхности Si(111) скорости процессов испарения положительных и отрицательных ионов кремния практически равны. Таким образом, при отрицательном напряжении смещения на зонде электрическое поле переносит атомы с образца на зонд в виде положительных ионов. Этот процесс сопровождается обратным испарением атомов с зонда на образец в виде отрицательных ионов.

Однако перенос положительных и отрицательных ионов не является полностью сбалансированным. Образование островка на образце при отрицательном напряжении смещения на зонде, а также рост иглы на поверхности острия зонда при положительном смещении свидетельствуют о том, что баланс в переносе ионов в обоих случаях сдвинут в сторону электрода, имеющего положительную полярность. Другими словами, скорость переноса отрицательных ионов выше, чем положительных. Эйглер и др. [23] обнаружили аналогичное явление при изучении поведения атомов ксенона в электрическом поле СТМ, где направление переноса ксенона всегда совпадало с направлением потока электронов между образцом и зондом. Отметим, что образование наноструктур под действием зонда СТМ при использовании таких газов, как силаны и герман, происходит стабильно при отрицательных напряжениях смещения зонда [46-49].

Другой результат испарения атомов образца состоит в создании разукомплектованной поверхностной структуры. В такой структуре оставшиеся атомы менее связаны между собой и поэтому более подвержены направленной диффузии под действием электрического поля СТМ. Поскольку острие зонда находится непосредственно над вершиной островка при условии, что тун-



Рис. 5. Изображения участков поверхности Si(111), полученных после приложения к зонду СТМ (а) отрицательного и (б) положительного напряжения смещения величиной 10 В в течение 6 с при $I_t = 0.5$ нА. Контраст изображения (а) существенно увеличен. (в, г) Изображения одного и того же участка слоя германия толщиной 2,7 бислоя, нанесенного на подложку Si(111) при 450 °C. Изображения были получены (в) до и (г) после приложения положительного напряжения смещения (8 В) к зонду в течение 30 с при $I_t = 0.3$ нА.

нельный ток поддерживается постоянным, то расстояние между зондом и областью поверхности образца вокруг островка увеличивается по мере роста островка. При постоянном напряжении смещения это увеличение вызывает ослабление электрического поля вокруг островка, что в случае кремния приводит к уменьшению скорости его роста (см. рис. 3). При последовательной записи нескольких СТМ-изображений поверхности Si(111), полученной после образования островков, обнаружено, что расположение атомов в разукомплектованной поверхностной структуре на этих изображениях несколько различается. Это различие возникает из-за смещения поверхностных атомов и свидетельствует об их подвижности даже под действием сравнительно слабого поля (-2,0 В), используемого при записи изображений.

Испарение атомов полем не вызывает их движения вдоль поверхности, которое требуется для роста островка. Латеральное перемещение атомов может происходить в результате направленной поверхностной диффузии, вызванной наличием градиента электрического поля на поверхности образца. Потенциальная энергия для поверхностной диффузии изменяется под действием электрического поля следующим образом [14, 18, 50]:

$$E_F = E_0 - \mathbf{p} \cdot \mathbf{F_r} - \frac{1}{2} \ \alpha F_r^2, \qquad (2)$$

где Е₀ — энергия активации в отсутствие электрического поля, *р* и α — статический дипольный момент и тензор поляризуемости атомов на поверхности соответственно и F_r — электрическое поле на поверхности образца, которое уменьшается с увеличением расстояния r от центра области взаимодействия образца и зонда СТМ. Аналогично описанию электромиграции адатомов на поверхности Si(111) [51] положительный заряд может быть приписан в нашем случае атомам кремния в разукомплектованной поверхностной структуре. Этот заряд и соответствующий зеркальный заряд в поверхностном слое подложки образуют статический дипольный момент. Взаимодействие между электрическим полем и диполем согласно второму слагаемому формулы (2) может либо уменьшить, либо увеличить (в зависимости от полярности напряжения смещения) высоту потенциального барьера для диффузии атомов в направлении к центру взаимодействия. При этом действие третьего слагаемого в формуле (2), описывающего взаимодействие электрического поля с наведенным (индуцированным) дипольным моментом, всегда направлено на уменьшение величины барьера для диффузии к центру взаимодействия при обеих полярностях. То, что при обеих полярностях перемещение атомов происходит к центру взаимодействия образца и зонда, а именно растет либо островок на поверхности образца, либо игла на острие зонда, означает, что второе слагаемое в формуле (2) меньше третьего слагаемого. Следовательно, действие наведенного дипольного момента сильнее действия статического дипольного момента. Поэтому в дальнейшем при описании роста островков на поверхности Si(111) мы отбросим второе слагаемое в формуле (2). Диффузия под действием градиента электрического поля может происходить как на поверхности образца, так и на острие зонда. Наблюдение изменений в расположении атомов при записи СТМ-изображений показывает, что диффузия атомов на поверхности образца под действием электрического поля СТМ действительно имеет место. Однако у нас нет экспериментальных данных по определению того, где диффузия происходит более эффективно, — на поверхности острия зонда или образца. В модели, рассматриваемой в следующем разделе, предполагается, что диффузия происходит преимущественно на поверхности образца, хотя полученное размерное соотношение не зависит от этого предположения.

Зависимость начальной скорости роста от величины туннельного тока *I*t имеет форму кривой с максимумом (рис. 3б) [38]. Величина I_t связана с расстоянием между зондом и образцом s следующим образом: $I_{\rm t} \sim V \exp(-1.1 s \phi^{1/2})$, где V — напряжение смещения, ϕ — эффективная высота туннельного барьера, выраженная в вольтах, и *s* — в ангстремах [52, 53]. Согласно этой формуле, больший туннельный ток соответствует меньшему расстоянию s и, следовательно, более сильному градиенту электрического поля на поверхности образца, что должно соответствовать большей скорости роста островка. Однако зависимость на рис. 3б показывает, что начальная скорость роста возрастает с увеличением тока только при малых токах до 0,3 нА и затем уменьшается. В нашем случае при отрицательном напряжении смещения на зонде диффузионный поток атомов на поверхности образца направлен к центру взаимодействия, тогда как поток туннелирующих электронов растекается от центра. Такому направлению движения атомов должна препятствовать сила "ветра" электронов, действие которой известно по эффекту электромиграции [51, 54]. Таким образом, действие потока электронов на направление перемещения атомов является противоположным эффекту уменьшения потенциального барьера для диффузии под действием градиента электрического поля. При наличии двух сил, действующих в противоположных направлениях, зависимость с максимумом на рис. Зб может быть результатом их конкуренции. При туннельном токе выше 0,3 нА уменьшение начальной скорости роста может происходить за счет преобладающего действия силы "ветра" электронов. Однако действительная причина уменьшения скорости роста, вероятно, связана с более простым эффектом, а именно с возрастающей механической вибрацией зонда при больших туннельных токах.

Кинетические данные на рис. Зб показывают существенное различие скоростей роста островков кремния на начальной и последующей стадиях. С увеличением высоты островка автоматически увеличивается расстояние между зондом и участком поверхности вокруг островка. Естественно предположить, что уменьшение скорости роста для высоких островков связано с ослаблением электрического поля из-за увеличения этого расстояния.

2.5. Модель переноса атомов

При острие зонда СТМ в форме конуса электрическое поле на поверхности образца вокруг островка может быть описано (в первом приближении по r), как $F_r = V/S_r$, где $S_r = s + H + \beta r$, s — расстояние между зондом и образцом, которое автоматически поддерживается фиксированным в режиме постоянного туннельного тока СТМ, и β — параметр, зависящий от геометрии острия зонда. Для атомов в точке r вероятность Gпересечения потенциального барьера в точке r - a/2 в присутствии электрического поля при отрицательном смещении на зонде дается выражением [40]

$$G_{r-a/2} = v \exp\left(-\frac{E_0 - (1/2) \,\alpha F_{r-a/2}^2}{kT}\right),\tag{3}$$

где *а* — длина диффузионных прыжков и *v* — частота атомных колебаний. Диффузионный поток в направлении центра взаимодействия между образцом и зондом, создаваемый за счет различия высот барьеров потенциальной энергии, пропорционален величине $\Delta G(S_r) = G_{r-a/2} - G_{r+a/2}$ или

$$\Delta G(S_r) \approx \frac{G_0 \,\beta \,a\alpha V^2}{2S_r^3 kT} \exp\left(\frac{\alpha V^2}{2S_r^2 kT}\right),\tag{4}$$

где $G_0 = v \exp(-E_0/kT)$ и отношение a/S_r было использовано как параметр малости. Пространственное распределение плотности подвижных атомов θ вокруг растущего островка определяется испарением и переиспарением, а также диффузионным потоком. Предполагая, что процессы испарения преобладают в создании плотности θ на начальной стадии роста островка, величину θ можно считать постоянной. С учетом (4) скорость переноса атомов к центру взаимодействия записывается как

$$R \approx A\theta \Delta G(s) \,. \tag{5}$$

Множитель *А* описывает результат интегрирования диффузионного потока вокруг островка. Формула, аналогичная (4), может быть получена и для случая, когда третьим слагаемым в уравнении (2) можно пренебречь по сравнению со вторым слагаемым. Тогда для начальной скорости роста островка получаем

$$R \approx \frac{A\theta G_0 \beta \, a p V}{s^2 k T} \exp\left(\frac{p V}{s k T}\right). \tag{6}$$

Как будет показано ниже, этот случай соответствует росту островка германия под действием зонда СТМ на поверхности смачивающего слоя германия на кремнии. На практике формулы (5) и (6) могут быть использованы как размерные соотношения между начальной скоростью роста островка R, величиной напряжения смещения V и эффективным дипольным моментом р. Используя эти размерные соотношения, а также экспериментально полученные зависимости начальной скорости роста островка от величины напряжения смещения, можно оценить величины эффективных дипольных моментов и энергий взаимодействия между этими дипольными моментами и электрическим полем. При таких оценках слабой зависимостью расстояния s от напряжения смещения V в виде $s \sim \ln V$, имеющей место при постоянном туннельном токе [53], можно пренебречь.

2.6. Оценка параметров взаимодействия электрического поля СТМ

с атомами поверхности кремния

Описание начальной скорости роста островка как функции напряжения смещения зонда было проведено посредством приближенной формулы (4), взятой в виде $R = c_1 V^2 \exp(c_2 V^2)$, где c_1 и c_2 были использованы как подгоночные параметры. Подгонка этой формулы к экспериментальным данным показана сплошной линией на рис. 2д со значением параметров $c_1 \approx 0,016$ и $c_2 = \alpha/2s^2kT \approx 0,024$. Величина c_2 была использована для оценки индуцированного дипольного момента $\alpha F = \alpha V/s \approx 2 \times 10^{-28}$ Кл см при следующих значениях параметров: V = 10 В, s = 1 нм и T = 300 К. Соответствующая энергия взаимодействия между индуцированным дипольным моментом и полем, $\alpha F^2/2 = m_2 V^2 kT$, лежит в интервале между 0,02 и 0,06 эВ для напряжений смещения от 6 до 10 В. Ранее оценка энергии взаимодействия между диполем и полем СТМ проводилась для атомов Cs на поверхности GaAs(110) [55]. В этой оценке использовалась величина $1,6 \times 10^{-27}$ Кл см для статического дипольного момента, полученная из величины изменения работы выхода в расчете на адсорбцию одного атома Cs [56]. Для этой величины рассчитанная энергия взаимодействия получилась около 0,1 эВ [55]. Важно отметить, что изложенный метод позволяет оценивать либо статический, либо индуцированный дипольный момент, а также соответствующую величину энергии взаимодействия между диполем и полем, используя экспериментальные данные, полученные только методом СТМ.

При отрицательном напряжении смещения зонда индуцированный дипольный момент состоит из положительного заряда q, наведенного на поверхностных атомах, и отрицательного зеркального заряда в поверхностном слое. Индуцированный дипольный момент может быть выражен как $\alpha F = ql$, где l — расстояние между этими зарядами. Для ковалентного материала, каким является кремний, зеркальный заряд располагается на ближайших атомах. Для дипольного момента, полученного выше, при l = 0,3 нм находим q = 0.04 e, где e — заряд электрона. Расчеты из первых принципов, проведенные для анализа эффекта электромиграции, показали, что два положения адатомов на поверхности Si(111) характеризуются различной плотностью заряда. В результате было найдено, что прыжки адатомов в присутствии электрического поля, направленного вдоль поверхности, происходят преимущественно из одного положения в другое, создавая тем самым диффузионный поток. Эффективная сила, действующая на диффундирующие атомы, может быть выражена в виде взаимодействия между электрическим полем и эффективным положительным зарядом величиной около 0,05 [51]. Эффективный заряд, ответственный за поверхностную электромиграцию, был также определен с помощью мезоскопической теории, которая дала оценку этого заряда ≤ 0,01е [54]. Эти теоретические исследования дают эффективный статический заряд. Хотя механизм направленной диффузии в электрическом поле СТМ отличается от механизма электромиграции, получение сравнимых величин зарядов является ожидаемым, поскольку направленный перенос атомов имеет электростатическое происхождение в обоих случаях.

3. Образование островков германия

3.1. Особенности образования островков германия

Рост островков германия с помощью зонда СТМ исследован на двумерных слоях германия на поверхности Si(111). Образование островков германия происходит воспроизводимо при отрицательных напряжениях смещения зонда в диапазоне от -7 до -10 В. При одинаковой длительности взаимодействия между образцом и зондом размер островков был больше при бо́льших напряжениях смещения (рис. 6). Островки Ge имеют геометрический фактор около 0,2. Эта величина приблизительно в два раза выше, чем геометрический фактор трехмерных островков германия, образующихся при гетероэпитаксии германия на поверхности Si(111) при покрытиях германием бо́льших, чем покрытие, достаточное для перехода от двумерного к трехмерному росту [42, 43]. Значительное различие в форме островков показывает, что их образование не является результатом релаксации напряженного эпитаксиального слоя германия на поверхности Si(111) под действием электрического поля СТМ, а происходит, вероятно, по такому же механизму, как у кремния. Об этом также свидетельствуют и другие экспериментальные данные, приведенные ниже.

Рисунок 7 показывает, что размер островков возрастает с увеличением длительности взаимодействия между образцом и зондом. Островки вырастали до 15 нм в высоту, когда длительность взаимодействия увеличивалась до 10³ с. На рисунке 8 видно, что образование островка происходило за счет удаления большого количества атомов германия из поверхностного слоя на участке вокруг островка. Это означает, что, как и на поверхности кремния, перенос германия к островку происходит посредством перемещения одиночных атомов. Однако наблюдалось и различие между германием и



Рис. 6. Изображение островков германия на слое германия толщиной 2,9 бислоя, выращенного на подложке Si(111) при 450 °C. Три ряда островков были созданы с помощью зонда СТМ при одинаковом $I_t = 0,3$ нА, но разных отрицательных напряжениях смещения зонда, показанных на рисунке для каждого ряда. Для создания каждого островка длительность взаимодействия между образцом и зондом составляла 7 с. Вставка показывает профиль поверхности между белыми стрелками.



Рис. 7. (а) Изображение островков германия на слое германия толщиной 2,3 бислоя, нанесенного на подложку Si(111) при 450 °C. Островки были выращены при $I_t = 0,3$ нА и V = -10 В. Время роста каждого островка показано на рисунке. (б) Высота островков германия в зависимости от времени роста. Островки были выращены при V = -9 В, приложенном к зонду СТМ при $I_t = 0,3$ нА. Сплошная линия соответствует модели роста островка с постоянной скоростью переноса германия в островок. Вставка показывает данные для начальной стадии роста островка. Разброс данных, полученных в разных экспериментальных сериях, превышал точность измерения высоты островка, которая была в пределах 10 %.

кремнием. Как известно, поверхности Ge(111) и Si(111) состоят из бислоя, т.е. двойного слоя атомов. У кремния атомы обоих подслоев поверхностного бислоя были вовлечены в процесс переноса (рис. 9), тогда как СТМизображение поверхности германия (см. рис. 8) показывает, что атомы только верхнего подслоя отсутствуют на поверхности вокруг образовавшегося островка. Это СТМ-изображение было получено при уменьшенном туннельном токе по сравнению с его оптимальным значением, дающим наилучшее атомное разрешение. Эксперименты с последовательной записью нескольких СТМ-изображений показали, что даже при уменьшенном значении тока, которое соответствует меньшему напряжению электрического поля на поверхности образца, атомы германия в неукомплектованном поверхностном слое смещались вдоль поверхности при сканировании зонда СТМ. Это свидетельствует о легкой подвижности этих атомов под действием электрического поля СТМ.

3.2. Взаимодействие между электрическим полем СТМ и поверхностными атомами германия

Еще одно различие между германием и кремнием наблюдалось при использовании положительного напряжения смещения на зонде. В этом случае происходит образование разупорядоченной поверхностной структуры (рис. 5в, г), что означает отсутствие направленного перемещения атомов, тогда как при отрицатель-



Рис. 8. (а) Изображение островка германия на слое германия толщиной 2,7 бислоя, нанесенного на подложку Si(111) при 450 °C. Островок был выращен на атомной ступени при $I_t = 0,3$ нА и V = -10 В, приложенном к зонду на 5 с. Контраст изображения был существенно усилен для того, чтобы выявить атомную структуру поверхности вокруг островка. (б) Профиль поверхности между черными стрелками.



Рис. 9. Начальные стадии роста островков германия и кремния в зависимости от величины отрицательного напряжения смещения на зонде при $I_t = 0,3$ нА. Данные для кремния такие же, как на рис. 2д, приведены для сравнения с германием. Сплошные линии представляют описание экспериментальных данных с помощью соотношения (8).

ном напряжении смещения в центральной области взаимодействия растет островок, как это описано в предыдущем разделе. Отметим, что аналогичная зависимость от полярности наблюдалась Любинецким и др. [48] в случае газофазного осаждения, стимулированного электрическим полем и туннельным током СТМ. Такая зависимость от полярности смещения означает, что второе и третье слагаемые в формуле (2) имеют противоположные знаки и приблизительно равны по абсолютной величине. Эта зависимость также показывает, что поверхностные атомы германия характеризуются положительным статическим зарядом. В дальнейшем для оценки силы взаимодействия зонда с поверхностными атомами образца при отрицательном напряжении смещения на зонде введем такой параметр, как эффективный дипольный момент, записанный в виде $p^* = p + \alpha F_r/2$. Это позволит объединить второе и третье слагаемые в формуле (2) и записать их как $-p^*F_r$. Мы будем использовать p* как величину, не зависящую от напряжения смещения. Такое приближение вносит ошибку около 20 % в определение величины p^* в интервале напряжений смещения от -6 до -10 В.

3.3. Сравнение процессов образования островков германия и кремния

Параметры взаимодействия электрического поля СТМ с поверхностными атомами германия могут быть определены из кинетики роста островков. Как и в случае кремния, кинетика роста изучалась по измерению высоты островка в зависимости от времени взаимодействия (рис. 7б). Предполагая, что все островки имеют одинаковую коническую форму с отношением высоты островка к его основанию равным 0,2, для количества германия, перенесенного в островок, получим $6,5 H^3$. В то же время

$$6,5 H^3 = R (t - t_0) \tag{7}$$

для островков, растущих с постоянной скоростью R в течение времени t. Параметр t₀ добавлен для учета неопределенности в определении момента начала роста, который был в пределах ±1 с и связан со временем автоматического приближения острия к поверхности для создания очередного островка. Была проанализирована только начальная стадия роста островков. Сплошная линия на рис. 76 показывает кинетику роста с постоянной скоростью R, величина которой была определена в результате подгонки равенства (7) к экспериментальным данным для длительностей взаимодействия в интервале между 0 и 30 с. Для оценки эффективного дипольного момента величина *R* была получена в зависимости от напряжения смещения в интервале между -6 и -10 В (см. рис. 9). Описание этих данных выражением (6), взятым в виде

$$R \sim DV \exp\left(\frac{p^* V}{skT}\right),$$
 (8)

дало значение подгоночного параметра $p^*/skT \approx 0,2$. Как и в случае кремния, здесь тоже пренебрегалось слабой логарифмической зависимостью $s \sim \ln V$ [53]. Результат подгонки показан на рис. 9 сплошной линией. Эффективный дипольный момент был оценен как $p^* \approx 0,2 \, skT$, что при величинах s = 1 нм и T = 300 К дало $p^* \approx 8 \times 10^{-29}$ Кл см. Соответствующая энергия взаимодействия между эффективным дипольным моментом и электрическим полем F, $p^*F \approx 0,2 \, vkT$, лежит в интервале между 0,03 и 0,05 эВ для напряжений смещения от -6 до -10 В.

Для прямого сравнения параметров, характеризующих перемещение атомов германия и кремния, экспери-

ментальные данные для кремния были также аппроксимированы с помощью соотношения (8), которое в результате подгонки дало величину $p^*/skT \approx 0.6$. Результат этой подгонки показан на рис. 9. Поскольку величина p^*/skT для кремния в три раза больше, чем для германия, то соответствующий дипольный момент и энергия взаимодействия диполя с электрическим полем также больше в три раза. При этом, однако, скорость роста для кремния приблизительно в пять раз (в зависимости от напряжения смещения) меньше, чем для германия. То, что более слабое взаимодействие между диполем и полем дает, тем не менее, более высокую скорость перемещения атомов, вероятно, объясняется тем фактом, что энергии активации процессов на поверхности германия значительно меньше, чем на поверхности кремния. Это также согласуется с тем наблюдением, что в процесс перемещения электрическим полем на поверхности германия были вовлечены атомы только верхнего подслоя, тогда как в случае кремния в процесс вовлекались атомы обоих подслоев. Следует отметить, что в ранних исследованиях Бекер и др. [57] получили модификацию поверхности германия при сравнительно малых напряжениях смещения зонда, таких, как -4 В при постоянном туннельном токе, тогда как известно, что для модификации поверхности кремния требуются напряжения смещения выше -5 B [30, 32].

4. Линии германия

4.1. Непрерывный перенос атомов германия с помощью зонда СТМ

Как показано выше, при фиксированных величинах напряжения смещения и туннельного тока начальная стадия образования островков хорошо описывается моделью с постоянной скоростью перемещения атомов электрическим полем СТМ в центральную область взаимодействия зонда и образца. В условиях непрерывного перемещения атомов движение зонда вдоль поверхности создает на образце линию, высота которой должна определяться скоростью движения острия вдоль поверхности, т.е. скоростью записи. Было обнаружено, что для каждого напряжения смещения в интервале от -7 до -10 В существовала оптимальная скорость записи, при которой образующиеся линии были однородны по длине. Например, такая скорость была около 0.9 ± 0.1 нм с⁻¹ при напряжении смещения -9 В. При таких условиях средние значения высоты и ширины линии были около 2 и 5 нм соответственно (рис. 10а). При большей скорости записи скорость перемещения атомов была недостаточной для образования непрерывной линии, т.е. линии без разрывов, тогда как при меньшей скорости записи происходило образование бо́льших перепадов высот вдоль линии.

4.2. Влияние отжига на форму линий германия

В отличие от поведения островков кремния на поверхности кремния, которые растекались при отжиге образца, линии германия, наоборот, увеличивались в размере (см. рис. 10). Это различие связано с механизмом роста германия на поверхности Si(111), который включает в себя уменьшение толщины смачивающего слоя германия после образования трехмерных структур. Уменьшение толщины связано с генерацией адатомов германия,



Рис. 10. Изображение одного и того же участка линий германия на слое германия толщиной 2,5 бислоя, нанесенного на подложку Si(111) при 450 °C. Линии были образованы при $I_t = 0,3$ нА, скорости записи 0,8 нм с⁻¹ и V = -9 В. Изображения были получены (а) до и (б) после отжига образца в течение 10 мин при 550 °C. Вставка в середине рисунка показывает изображение участка размером 356 × 356 нм, содержащего всю структуру с выращенными линиями после их отжига. Участок, приведенный на изображениях (а) и (б), обведен на вставке белыми линиями.

диффузия которых обеспечивает рост трехмерных структур даже при отсутствии внешнего потока атомов германия на поверхность [58]. Вставка на рис. 10 показывает, что участки линий, расположенные по периметру занятой ими области, увеличиваются в размере значительно больше, чем участки, расположенные в центральной части этой области. Вполне очевидно, что это явление происходит благодаря тому факту, что участки линий по периметру снабжаются адатомами с большей поверхности, чем участки линий в центральной части области линий. СТМ-изображения показывают, что отжиг приводит к латеральному росту линий, тогда как максимальная высота участков линий не изменяется. Таким образом, в результате отжига линии становились более однородными по высоте, но и более широкими.

Структура линий определялась с помощью ДБЭ с использованием пучка электронов ОЭМ, сфокусированного до нескольких нанометров в диаметре на поверхности образца. Рисунки 11а, б иллюстрируют изображения в ОЭМ участков поверхности, содержащих линии. При падении пучка параллельно линиям (рис. 11б) они выглядели как точки из-за использования скользящего угла падения первичного пучка электронов в отражатель-



Рис. 11. ОЭМ-изображения, полученные при направлении падения первичного пучка электронов (а) перпендикулярно и (б) параллельно линиям германия на поверхности образца. Изображения получены (а) для линий, показанных на рис. 10 и (б) для пяти линий, созданных при таких же условиях, как и линии на рис. 10. Картины ДБЭ, полученные (в) от участка поверхности, находящегося в стороне от линий, и (г) при электронном пучке, сфокусированном на линиях после отжига образца для случая, показанного на рис. а.

ной электронной микроскопии. При направлении падения пучка перпендикулярно линиям десять линий германия выглядели как одна (рис. 11а).

Картины ДБЭ от участков поверхности, удаленных от линий, свидетельствуют о наличии на поверхности реконструкции 5×5 (рис. 11в), которая является типичной для смачивающего слоя германия на Si(111). Рост линий происходит по механизму, который включает индуцированное электрическим полем испарение атомов между образцом и зондом, а также индуцированную полем направленную поверхностную диффузию, переносящую атомы к центру взаимодействия зонда и образца. Поэтому рост линии за счет диффузии сопровождается ее бомбардировкой ионами с энергией, определяемой напряжением смещения. Поскольку эти процессы происходят при комнатной температуре образца, то ожидается, что структура объема линий не должна быть кристаллической. Картины ДБЭ, полученные для обоих направлений падения пучка электронов относительно направления линий, показывают, что структура линий не является эпитаксиальной. Более того, после отжига линии также не становятся эпитаксиальными (рис. 11г). СТМ-изображения указывают на то, что линии после отжига имеют поликристаллическую структуру с кристаллами размером несколько нанометров.

4.3. Пересечение линий германия

Рисунок 12 показывает СТМ-изображение, полученное от участка поверхности, содержащего пересекающиеся линии германия. Линии в направлении х были выращены первыми, т.е. до линий в направлении у. Можно отметить два различия между линиями в этих направлениях. Количество германия, собранного в линиях x, было значительно больше, чем в линиях у. Поскольку каждая линия создавалась в результате переноса атомов с окружающих участков поверхности за счет направленной поверхностной диффузии, индуцированной электрическим полем, то количество германия, перенесенного в линию, пропорционально размеру участка, с которого происходило перемещение атомов. Поэтому полученное различие между линиями х и у, вероятно, отражает тот факт, что размер участков поверхности, которые снабжали атомами линии у, были ограничены созданными прежде линиями х. Второе различие состоит в том, что линии у получились более однородными по длине, чем линии х. Исходя из опыта создания линий с помощью



Рис. 12. Линии германия, созданные с помощью зонда СТМ на слое германия толщиной 2,5 бислоя, осажденного на подложку Si(111) при 450 °C. Скорость записи линий была 0,8 нм с⁻¹ при $I_t = 0,3$ нА и V = -9 В. СТМ-изображение было получено после отжига образца при 450 °C в течение 10 мин.

зонда СТМ, можно предположить, что это различие связано с формой острия зонда. Однородные линии и непрерывные пересечения линий обычно образуются, когда форма острия зонда является симметричной и острой. Однако когда острие зонда имеет довольно плоскую форму, создаваемые линии состоят из цепочки островков, причем некоторые соседние островки даже не соприкасаются друг с другом. Поэтому различие в однородности линий x и y на рис. 12, вероятно, происходит от асимметрии формы острия зонда, при которой профиль острия зонда в плоскости, перпендикулярной линии x, был острее, чем в плоскости, перпендикулярной линии y.

Приведенные результаты показывают, что существуют материалы, такие, как германий, которые характеризуются довольно высокой скоростью переноса атомов с помощью зонда СТМ и позволяют создавать наноструктуры при комнатной температуре подложки. При создании канавок с помощью зонда СТМ на поверхностях кремния обратное осаждение кремния с острия зонда на образец можно видеть по появлению островков вдоль канавок [32, 59]. Однако создание наноструктур типа непрерывных линий, подобных линиям германия, на поверхности кремния не наблюдалось. Это происходит, вероятно, потому что скорость перемещения атомов на поверхности кремния приблизительно в пять раз ниже, чем на поверхности германия. Хотя скорость перемещения резко возрастает с увеличением напряжения смещения, использование слишком больших напряжений, превышающих 10 В при постоянном туннельном токе, видится весьма проблематичным. Это связано с одновременным возрастанием процессов испарения и переиспарения атомов между зондом и образцом, которые могут приводить к изменению формы острия зонда, делая его плоским. На основе результатов, полученных Ичимия и др. [34], можно предположить, что скорость переноса кремния с помощью зонда СТМ значительно возрастает с увеличением температуры образца и, вероятно, может достигать величин, достаточных для воспроизводимого создания линий. Отметим, что по сравнению с методом, основанным на использовании зонда СТМ для десорбции водорода с пассивированной водородом поверхности кремния, когда пассивирование и стимулированная десорбция применяются как промежуточные стадии, непрерывный перенос атомов, рассмотренный выше, является прямым методом создания наноструктур.

5. Влияние облучения внешним электронным пучком на взаимодействие образца и зонда СТМ

Возможности зонда СТМ оказались довольно ограниченными для модификации поверхностей широкозонных диэлектриков по сравнению с металлами и полупроводниками. Так, тонкая пленка SiO₂ на поверхности кремния может быть удалена с участка размером 10-50 нм под действием потока электронов с зонда СТМ на образец при температуре образца выше 450 °C [60-62]. Механизм удаления связан с тем, что образование летучих молекул SiO в пленке SiO₂ после ее облучения электронным пучком начинается при более низких температурах [63]. В этом разделе рассмотрен метод, при котором перенос атомов с окисленной поверхности кремния на зонд СТМ достигается при прямом взаимодействии образца и зонда. Метод позволяет удалять как материал, нанесенный на поверхность окисла кремния, так и сам окисел при комнатной температуре образца. Для достижения стабильности процесса переноса важны как химический состав острия зонда, так и влияние внешних условий, а именно облучение области взаимодействия образца и зонда внешним пучком электронов.

5.1. Удаление атомов из слоя германия на окисленной поверхности кремния

В разделах 3, 4 было показано, что атомы германия, предварительно осажденные на поверхность кремния, могли быть собраны в островки или линии под действием электрического поля СТМ при повышенных отрицательных напряжениях смещения, приложенных к зонду СТМ. Однако при использовании этой методики для окисленной поверхности кремния (как покрытой слоем германия, так и без покрытия), перемещение атомов образца в центральную область взаимодействия образца и зонда не происходит даже при таких больших напряжениях смещения, как -10 В. Вместо этого наблюдается перенос атомов с окисленной поверхности кремния на зонд. Этот процесс не является стабильным и хорошо воспроизводимым в зависимости от величины туннельного тока и напряжения. Можно только отметить, что процесс переноса происходит более эффективно при малых расстояниях между зондом и образцом, достигаемых при сравнительно больших туннельных токах (несколько наноампер) и небольших отрицательных напряжениях смещения (2-3 B), приложенных к зонду. Процесс переноса был аналогичен манипулированию кластерами серебра на пассивированной поверхности кремния [64].

В экспериментах на окисленной поверхности кремния пленка окисла кремния приготавливается следующим образом. Образец кремния нагревается до температуры 620 °С в среде кислорода при давлении 2×10^{-4} Па в течение нескольких минут. В результате на поверхности образца вырастает пленка окисла кремния толщиной около 0,5 нм [65, 66]. Затем, если требуется, образец покрывается слоем германия толщиной в два-три бислоя при температуре около 400 °С. Германий, осажденный на окисленную поверхность кремния, образует



Рис. 13. (а) СТМ-изображение островков германия, образующихся на окисленной поверхности кремния после осаждения двух бислоев германия при 420 °С. Кольца Дебая на картине ДБЭ на вставке показывают, что островки являются кристаллическими, но не эпитаксиальными по отношению к подложке Si(111). (б, в) СТМ-изображения одной и той же области поверхности, (б) до и (в) после взаимодействия образца и зонда в условиях облучения внешним электронным пучком 2 нА. Удаление германия на (в) происходило в результате 200-секундного сканирования области 46 × 46 нм² зондом СТМ при V = -4 В и $I_t = 0,3$ нА. Область сканирования отмечена линиями на изображении (б).

слой полусферических островков (рис. 13a) [10, 67]. При низких температурах осаждения, таких, как 400 °C, островки германия формируются кристаллическими, но не эпитаксиальными по отношению к подложке кремния из-за наличия пленки окисла кремния.

В отличие от чистых поверхностей кремния и германия, на окисленной поверхности кремния наблюдалось сильное влияние облучения внешним электронным пучком от ОЭМ на взаимодействие между зондом СТМ и образцом. Результат взаимодействия зависел от химического состава острия зонда. Воздействие зонда на образец было более эффективным после модификации исходного вольфрамового зонда следующим образом. Зонд выдвигался к образцу кремния на расстояние порядка 100 нм, что контролировалось с помощью ОЭМ. Затем образец кремния нагревался до температуры около 1000 °C посредством пропускания тока. В результате термического расширения возникал механический и электрический контакт образца и зонда. Это приводило к тому, что в месте контакта происходило плавление кремния и острия зонда. После такой модификации острие зонда, вероятно, покрывалось кремнием. Отметим, что использование механического контакта между образцом и зондом (погружение зонда в образец) при приложенном напряжении смещения является методом изменения формы и химического состава острия зонда в случае образцов из металла [68]. В отличие от металлических образцов, механический контакт с образцом из кремния при комнатной температуре уплощает острие зонда. Край острия зонда может стать острым, если при контакте имеет место плавление и последующая кристаллизация.

При использовании зонда СТМ с острием из кремния и при облучении области взаимодействия образца и зонда пучком электронов от ОЭМ происходило эффективное и воспроизводимое удаление материала с поверхности образца (рис. 136, в) и его перенос на острие зонда, что наблюдалось с помощью ОЭМ. Было обнаружено, что эффективность переноса зависит от интенсивности облучения, величины напряжения смещения и туннельного тока. Исследование этого явления проводилось для случая фиксированных условий облучения. Ток пучка электронов, сфокусированного до диаметра в несколько нанометров, задавался величиной 1 или 2 нА (величина тока измерялась с помощью зонда СТМ); при этом устанавливался режим развертки изображения ОЭМ с увеличением ×20000 области взаимодействия зонда и образца.

На рисунке 14а показаны линии, созданные в результате удаления германия из слоя островков германия в зависимости от напряжения смещения в случае, когда зонд двигался вдоль поверхности образца с постоянной скоростью при туннельном токе 0,3 нА. Удаление германия происходит стабильно при отрицательном напряжении смещения в интервале от -3,5 до -4 В, приложенном к зонду. Эффективность удаления существенно уменьшается при более низких напряжениях, а при более высоких напряжениях процесс становится нестабильным. Рисунок 14б показывает, что эффективность удаления германия возрастает с увеличением туннельного тока. Глубина линии удаленного германия приблизительно соответствовала уровню поверхности окисла кремния. Эффективность удаления германия была проверена также для разных скоростей движения зонда вдоль поверхности, т.е. для разных скоростей записи (рис. 14в). Эффективность оставалась достаточно высокой для полного удаления германия с поверхности окисла кремния даже при таких высоких скоростях записи, как 0,6 мкм c^{-1} . Можно отметить, что такие же по величине скорости записи используются и в случае депассивации поверхности кремния, покрытой водородом [69, 70].

В режиме низкой скорости удаления германия с поверхности образца была исследована возможность удаления отдельных островков германия. Рисунок 15 представляет серию СТМ-изображений участка поверхности после 200-секундного взаимодействия между зондом и образцом при напряжении смещения –3 В и туннельном токе 0,3 нА. Полученные изображения показывают, что после каждого взаимодействия один или два островка германия были удалены либо частично, либо полностью. Тот факт, что островки германия могли уменьшаться в размере постепенно, означает, что процесс удаления германия происходит посредством отрыва маленьких кластеров или отдельных атомов германия.



Рис. 14. Изображения участков поверхности после взаимодействия между образцом и зондом СТМ под облучением электронным пучком 1 нА от ОЭМ. Линии поверхности окисла кремния получены в результате удаления германия с окисленной поверхности кремния при различных экспериментальных условиях: (а) $I_t = 0,3$ нА, скорости записи 6 нм c⁻¹ и различных отрицательных напряжениях смещения от -3,0 до -5,0 В, приложенных к острию и отмеченных на (а) возле каждой линии; (б) -4,0 В, 6 нм c⁻¹ и различных I_t между 0,3 и 4,8 нА; (в) -4,0 В, 3,0 нА и различных скоростях записи в интервале от 30 до 600 нм c⁻¹. Шкала уровня контраста, приведенная на (а), является приблизительно такой же для изображений (б) и (в).



Рис. 15. Серия изображений участка поверхности после процессов взаимодействия между образцом и зондом, длившихся 200 с каждый при $I_t = 0,3$ нА и V = -3,0 В под облучением пучком электронов от ОЭМ. Ямка в центре изображения (а) образовалась после первого процесса взаимодействия. Изображения (б-г) показывают результат последующих процессов взаимодействия. Островки германия, уменьшающиеся или исчезающие после очередного процесса взаимодействия, указаны стрелками. Размер изображенного участка $40 \times 40 \text{ нм}^2$.

5.2. Перенос атомов с образца на зонд СТМ

Удаление германия с поверхности образца сопровождается ростом иглы на острие зонда СТМ. Область на поверхности образца размером 400×400 нм², где удалялись островки германия, появлялась как яркая линия на изображениях поверхности в сканирующем отражательном электронном микроскопе (ОЭМ), регистрирующем зеркально отраженный пучок электронов. При этом происходил рост иглы на острие зонда (рис. 16а-в). Форма иглы зависела от напряжения смещения и величины туннельного тока. При напряжении смещения –4 В и туннельном токе 1,0 нА (такие условия соответствуют



Рис. 16. (а-в) Серия СТМ-изображений области взаимодействия образца и зонда, полученная после последовательных удалений германия из слоя островков германия на окисленной поверхности кремния. Удаление германия происходило при V = -4,0 В и $I_{\rm t} = 3.0$ нА под облучением пучком электронов от ОЭМ при сканировании зондом СТМ участка поверхности размером 400 × 400 нм². Участок, где германий был удален, появлялся на изображении ОЭМ в виде белой полосы. Черный верхний участок изображения представляет профиль острия зонда, тогда как нижний участок — это тень зонда. (г-е) Изображения острия зонда после переноса германия с образца на острие зонда под облучением пучком электронов от ОЭМ при следующих условиях: (г) относительно высокая скорость удаления германия, достигаемая при V = -4,0 В и $I_t = 3,0$ нА, (д) средняя скорость удаления германия при -4,0 В и 0,3 нА и (е) после выращивания иглы на острие зонда при средней скорости удаления германия и последующего роста острия иглы при низкой скорости удаления германия при -3,0 В и 0,3 нА.

высокой скорости удаления германия с поверхности образца) растущая игла имела относительно большой диаметр (около 30 нм в основании, рис. 16а). При средней скорости удаления германия, которая была при условиях -4 В и 0,3 нА, диаметр иглы составлял величину 10– 15 нм (рис. 16д). Тонкое острие иглы могло быть выращено при низкой скорости удаления германия при -3 В и 0,3 нА (рис. 16е). Условия появления иглы свидетельствуют о том, что она состоит из германия. Это также согласуется с тем фактом, что оценка количества германия, удаленного с поверхности, соответствует количеству германия, рассчитанному из размера выросшей иглы. Следует отметить, что СТМ-изображения, представленные в этом разделе, были получены с использованием зонда, острие которого представляло собой иглу из германия, выращенную при низкой скорости удаления германия с поверхности образца.

5.3. Создание окон кремния на окисленной поверхности кремния

После удаления островков германия с окисленной поверхности кремния дальнейшее взаимодействие образца и зонда СТМ приводит к удалению также и окисла кремния (рис. 17а). Для создания структуры, показанной на рис. 17а, островки германия удалялись с относительно большого участка размером 60×60 нм². Затем процесс взаимодействия был продолжен на небольшой центральной части этого участка. Профиль поверхности (рис. 17г) показывает, что взаимодействие приводит к дальнейшему удалению материала с поверхности образца. Из этого следует, что способность зонда к присоединению атомов существенно не изменяется после присоединения некоторого количества окисла кремния и кремния. На рисунке 176 приведен пример другой структуры, для создания которой сначала удалялись островки германия с полосы шириной 16 нм путем последовательного удаления островков с квадратных участков размером 16 × 16 нм² при таких же экспериментальных условиях, как в случае создания структуры, показанной на рис. 13в. Требовалось около одной минуты сканирования зондом СТМ для удаления германия с одного такого участка. После создания полосы поверхности без островков германия дальнейшее взаимодействие зонда СТМ и образца в режиме удаления германия проводилось в левом конце линии в течение 5 мин. В результате была образована ямка глубиной около 2 нм, что свидетельствовало о полном удалении

также и окисла кремния (толщина которого 0,5 нм) с этого участка поверхности.

Образование окон в окисле кремния происходит и тогда, когда островки германия не располагаются по краям области удаления окисла кремния. Однако без слоя германия на поверхности окисла кремния способность зонда СТМ с острием из кремния к присоединению атомов окисла кремния является ограниченной и не обеспечивает создания даже одного окна с полностью удаленным окислом кремния (рис. 17в).

Для того чтобы охарактеризовать эффект воздействия облучения внешним электронным пучком, была измерена зависимость туннельного тока от напряжения смещения как под облучением, так и без облучения в режиме, когда обратная связь СТМ, поддерживающая туннельный ток постоянным, была отключена. Измерения показали, что облучение вызывает флуктуации туннельного тока величиной до нескольких наноампер. Эти флуктуации могут быть инициированы как первичными, так и вторичными электронами от рассеяния внешнего пучка электронов. Когда система обратной связи СТМ установлена на поддержание туннельного тока на постоянном уровне, эти флуктуации тока приводят к вибрации зонда СТМ по направлению к поверхности образца. Вибрация может достичь большой амплитуды, такой, что может стать видимой на ОЭМизображении образца и зонда при их взаимодействии [38]

При смене полярности напряжения смещения направление переноса атомов между образцом и зондом меняется на противоположное. Германий, накопленный на острие зонда при отрицательном напряжении смещения, переносится обратно на образец при положи-



Рис. 17. (а, б) Изображения структур, созданных в результате переноса атомов с образца на острие зонда СТМ. Процесс переноса стимулировался облучением области взаимодействия образца и зонда пучком электронов. (в) Изображение поверхности после попытки удаления окисла с окисленной поверхности кремния без использования покрытия поверхности островками германия. Окисел с центральной части изображенного участка удален не полностью. (г, д) Профили поверхности между стрелками, отмеченными на (а, б) соответственно.



Рис. 18. СТМ-изображения окисленной поверхности кремния, покрытой островками германия после (а) переноса германия с образца на зонд при отрицательном напряжении смещения зонда в условиях таких же, как и в случае рис. 13в и (б) обратного переноса германия с зонда на образец при положительном напряжении смещения зонда. Обратный перенос происходил при взаимодействии зонда с образцом в фиксированной точке l для V = 4 В и точке 2 для 7 В.

тельном напряжении смещения, приложенном к зонду (рис. 18). Обратный перенос происходит с высокой скоростью и без облучения внешним электронным пучком области взаимодействия образца и зонда. Использование облучения значительно ускоряет процесс обратного переноса и делает его малоконтролируемым.

5.4. Механизм переноса атомов с образца на зонд СТМ в условиях облучения внешним электронным пучком

Перенос материала с окисленной поверхности кремния на зонд СТМ не является процессом, вызванным только электрическим полем СТМ, и отличается от такого процесса по нескольким аспектам. Несмотря на ослабление электрического поля диэлектрическим слоем окисла кремния, перенос германия происходит при таких низких напряжениях смещения, как 4 В, что ниже порога испарения атомов электрическим полем на чистых поверхностях германия и кремния [32, 36, 37]. Другое отличие от процессов, индуцированных электрическим полем, состоит в направлении переноса атомов. Атомы испаряются с поверхности под действием электрического поля в виде положительных или отрицательных ионов [31, 71]. В случае чистых поверхностей германия и кремния перенос атомов между образцом и зондом происходит в том же направлении, что и поток туннелирующих электронов, свидетельствуя о том, что поток отрицательных ионов доминирует над потоком положительных ионов [40]. Это направление переноса противоположно направлению переноса атомов с окисленной поверхности кремния, где перенос происходит на зонд СТМ, находящийся под отрицательным потенциалом относительно образца. Кроме этих отличий следует отметить, что процессы, вызванные только электрическим полем, такие, как испарение и направленная поверхностная диффузия [14, 31, 71], вовлекают атомы с широкой области (порядка 100 нм [37, 40]) вокруг центра взаимодействия образца и зонда СТМ, тогда как процесс удаления германия с окисленной поверхности кремния является локальным, происходящим на участке размером несколько нанометров.

Стабильный перенос атомов с образца на зонд СТМ происходит при наличии двух условий, а именно: зонда с острием из кремния и вибрации зонда в направлении к поверхности образца, вызванной облучением области взаимодействия внешним электронным пучком. При вибрации зонд приближается к поверхности образца на расстояние до нескольких ангстрем, при котором, согласно теоретическому анализу [31, 33, 71-74], происходит существенное снижение потенциального барьера между атомами для их переноса электрическим полем. Механизм такого переноса может быть охарактеризован как испарение электрическим полем с участием химического взаимодействия. Как экспериментальные [23, 25, 27], так и теоретические [24, 26] работы выделяют важность в этом процессе колебательного возбуждения связей атома с поверхностью под действием туннельного тока и напряжения. В этом случае перенос является локальным, так как в него вовлекаются только атомы образца, оказавшиеся на расстоянии в несколько ангстрем от атомов острия зонда. Этот механизм объясняет такие характеристики процесса, как достаточность сравнительно низких напряжений смещения, а также малый размер участка поверхности, подверженный удалению атомов. Полученные экспериментальные результаты показывают, что направление переноса атомов в зависимости от полярности приложенного напряжения при испарении электрическим полем с участием химического взаимодействия является противоположным по отношению к испарению электрическим полем без участия химического взаимодействия. Это свидетельствует о том, что с уменьшением расстояния между атомами образца и зонда происходит не только уменьшение потенциального барьера между ними, но и изменяется конфигурация этого барьера, что и приводит к изменению направления переноса атомов.

Полученное различие в направлении переноса атомов согласуется с результатами экспериментов по взаимодействию образца кремния и зонда при высоких напряжениях смещения (-10 В) и болыших туннельных токах (\sim 3 нА), приводящих к образованию ямок на поверхности кремния [38]. При таких довольно экстремальных условиях работы СТМ перенос атомов между образцом и зондом является нестабильным и вызывает флуктуации туннельного тока, а следовательно, и механическую вибрацию зонда. При вибрации, как и в случае с использованием внешнего электронного пучка, механизм переноса атомов меняется за счет вовлечения химического взаимодействия между атомами образца и зонда. Это вызывает появление ямки на поверхности кремния вместо роста островка.

Различие в действии острия зонда из кремния по сравнению с острием из вольфрама может происходить из-за разных реакционных способностей их поверхностей. Реакционная способность атомов поверхности кремния, вероятно, выше, чем у вольфрама по отношению к присоединению германия. Стабильное образование окон кремния в пленке окисла кремния наблюдается при покрытии окисла кремния слоем германия. Это означает, что атомы окисла и атомы подложки кремния удаляются с поверхности образца после удаления слоя германия, который покрывает острие зонда. Таким образом, слой германия требуется для покрытия острия зонда из кремния для улучшения его способности к присоединению атомов окисла кремния. Имеет значение и сила связи атомов с поверхностью образца, что выражается в значительном различии скоростей переноса германия с окисленной поверхности кремния и

атомов окисла кремния, так как очевидно, что атомы осажденного германия связаны с окислом кремния слабее, чем атомы в самом окисле.

Ранее известные методы создания наноразмерных окон кремния на поверхности окисленного кремния основаны на термическом разложении окисла при высоких температурах (900 °C). Термическое разложение очень тонких пленок окисла кремния происходит не однородно по поверхности, а посредством образования пор с плотностью от 10⁹ до 10¹⁰ см⁻² [75, 76]. Облучение пленки окисла пучком электронов при комнатной температуре образца приводит к снижению температуры последующего разложения до 720-750°С [63, 77]. Это снижение происходит за счет распада SiO2 на SiO и кислород при облучении. Эффект облучения был использован для создания окон кремния на окисленной поверхности кремния. Для этого использовалось облучение электронным пучком, сфокусированным до диаметра в несколько нанометров и последующее термическое разложение окисла только на облученных участках поверхности [63, 77, 78]. В качестве источника электронов для локального облучения может использоваться также и поток электронов, создаваемый полевой эмиссией с зонда СТМ. В этом случае образование окон кремния происходит в процессе облучения образца, нагретого до температуры 450-630°C [60-62]. Отметим, что методика, описанная выше, не использует процессы термического разложения и позволяет создавать окна кремния на окисленной поверхности кремния непосредственно зондом СТМ при комнатной температуре образца [79].

6. Заключение

Модификация поверхности с помощью зонда СТМ может осуществляться несколькими способами. В данном обзоре рассмотрен метод непрерывного переноса атомов, возникающий при повышенных напряжениях смещения между зондом и образцом. Этот метод позволяет переносить материал с постоянной скоростью в центральную область взаимодействия зонда и образца и создавать в результате этого переноса трехмерные структуры, такие, как островки и линии на поверхности образца. Перенос атомов осуществляется за счет направленной поверхностной диффузии, возникающей при наличии градиента электрического поля СТМ, и происходит в результате взаимодействия поля с эффективным дипольным моментом поверхностных атомов. Рассмотрена модель процесса, которая устанавливает соотношение между скоростью переноса атомов, напряжением смещения и величиной эффективного дипольного момента, создаваемого поверхностными атомами. Это соотношение позволяет оценить велечины эффективных дипольных моментов, энергий взаимодействия диполей и поля по измерению зависимости скорости переноса атомов от напряжения смещения.

Результат взаимодействия зонда и образца зависит от химического состава острия зонда и от внешнего воздействия, такого, например, как облучение области взаимодействия образца и зонда внешним электронным пучком. При облучении наблюдается перенос атомов с поверхности образца на зонд СТМ посредством механизма испарения полем с участием химического взаимодействия между атомами образца и острия зонда. Такой механизм осуществляется на расстоянии нескольких ангстрем между атомами. На образцах кремния с окисленной поверхностью другими важными условиями для переноса атомов является использование острия зонда из кремния и покрытие окисленной поверхности образца слоем германия. Перенос атомов германия из этого слоя осуществляется с высокой эффективностью, что приводит к покрытию зонда германием. Острие зонда, покрытое германием, в свою очередь становится эффективным для переноса атомов окисла кремния и атомов подложки кремния. В таких экспериментальных условиях окна кремния на окисленной поверхности кремния создаются непосредственно зондом при комнатной температуре образца. Интересно, что перенос атомов между образцом и зондом СТМ при реализации механизма испарения полем с участием химического взаимодействия имеет направление, противоположное направлению переноса атомов, осуществляемое без участия химического взаимодействия.

Список литературы

- 1. Леденцов Н Н и др. ФТП **32** 385 (1998)
- 2. Пчеляков О П и др. ФТП **34** 1281 (2000)
- 3. Bimberg D, Grundmann M, Ledentsov N N *Quantum Dot Hetero*structures (Chichester: John Wiley & Sons, 1999)
- 4. Валиев К А *УФН* **175** 3 (2005)
- 5. Brunner K Rep. Prog. Phys. 65 27 (2002)
- 6. Drucker J IEEE J. Quantum Electron. 38 975 (2002)
- 7. Stangl J, Holý V, Bauer G Rev. Mod. Phys. 76 725 (2004)
- 8. Schmidt O G et al. Appl. Phys. Lett. 71 2340 (1997)
- 9. Peng C S et al. Phys. Rev. B 57 8805 (1998)
- 10. Shklyaev A A, Shibata M, Ichikawa M Phys. Rev. B 62 1540 (2000)
- 11. Shklyaev A A, Ichikawa M Phys. Rev. B 65 045307 (2002)
- 12. Binnig G et al. Phys. Rev. Lett. 50 120 (1983)
- 13. Stroscio J A, Eigler D M Science 254 1319 (1991)
- 14. Avouris Ph Acc. Chem. Res. 28 95 (1995)
- Tseng A A, Notargiacomo A, Chen T P J. Vac. Sci. Technol. B 23 877 (2005)
- 16. Crommie M F, Lutz C P, Eigler D M Science 262 218 (1993)
- 17. Hla S-W J. Vac. Sci. Technol. B 23 1351 (2005)
- 18. Eigler D M, Schweizer E K Nature 344 524 (1990)
- 19. Bartels L, Meyer G, Rieder K-H Phys. Rev. Lett. 79 697 (1997)
- 20. Hla S-W, Braun K-F, Rieder K-H Phys. Rev. B 67 201402(R) (2003)
- 21. Bouju X, Joachim C, Girard C Phys. Rev. B 59 R7845 (1999)
- 22. Kühnle A et al. Surf. Sci. 499 15 (2002)
- 23. Eigler D M, Lutz C P, Rudge W E Nature 352 600 (1991)
- Walkup R E, Newns D M, Avouris Ph *Phys. Rev. B* 48 1858 (1993)
- 25. Shen T-C et al. *Science* **268** 1590 (1995)
- 26. Gao S. Persson M. Lundqvist B I Phys. Rev. B 55 4825 (1997)
- 27. Stroscio J A, Celotta R J Science 306 242 (2004)
- 28. Lyo I-W, Avouris Ph Science 253 173 (1991)
- 29. Salling C T, Lagally M G Science 265 502 (1994)
- 30. Uchida H et al. Phys. Rev. Lett. 70 2040 (1993)
- 31. Tsong T T Phys. Rev. B 44 13703 (1991)
- 32. Kobayashi A et al. *Science* **259** 1724 (1993)
- Dujardin G et al. *Phys. Rev. Lett.* **80** 3085 (1998)
- Ichimiya A, Tanaka Y, Hayashi K Surf. Rev. Lett. 5 821 (1998)
- Heike S, Hashizume T, Wada Y J. Appl. Phys. 80 4182 (1996)
- Shklyaev A A, Shibata M, Ichikawa M Appl. Phys. Lett. 74 2140 (1999)
- 37. Shklyaev A A, Shibata M, Ichikawa M J. Appl. Phys. 88 1397 (2000)
- 38. Shklyaev A A, Shibata M, Ichikawa M Surf. Sci. 447 149 (2000)
- 39. Shklyaev A A, Shibata M, Ichikawa M J. Vac. Sci. Technol. B 19 103 (2001)
- Shklyaev A A, Shibata M, Ichikawa M J. Vac. Sci. Technol. B 18 2339 (2000)
- 41. Shklyaev A A, Ichikawa M Jpn. J. Appl. Phys. 40 3370 (2001)
- 42. Voigtländer B, Zinner A Appl. Phys. Lett. 63 3055 (1993)
- 43. Shklyaev A A, Shibata M, Ichikawa M Surf. Sci. 416 192 (1998)
- 44. Chang C S , Su W B, Tsong T T Phys. Rev. Lett. 72 574 (1994)

- 45. Fujita D, Jiang Q, Nejoh H J. Vac. Sci. Technol. B 14 3413 (1996)
- 46. Samara D et al. J. Vac. Sci. Technol. B 14 1344 (1996)
- 47. Rauscher H, Behrendt F, Behm R J J. Vac. Sci. Technol. B 15 1373 (1997)
- 48. Lyubinetsky I et al. J. Vac. Sci. Technol. A 17 1445 (1999)
- 49. Schöffel U R, Rauscher H, Behm R J Appl. Phys. Lett. 83 3794 (2003)
- 50. Tsong T T, Kellogg G Phys. Rev. B 12 1343 (1975)
- 51. Kandel D, Kaxiras E Phys. Rev. Lett. 76 1114 (1996)
- 52. Simmons J G J. Appl. Phys. **34** 1793 (1963)
- 53. Binnig G, Rohrer H Surf. Sci. 126 236 (1983)
- 54. Fu E S et al. *Surf. Sci.* **385** 259 (1997)
- 55. Whitman L J et al. Science 251 1206 (1991)
- 56. Heskett D et al. J. Vac. Sci. Technol. B 7 915 (1989)
- 57. Becker R S, Golovchenko J A, Swartzentruber B S *Nature* **325** 419 (1987)
- 58. Shklyaev A A, Shibata M, Ichikawa M Phys. Rev. B 58 15647 (1998)
- 59. Ma Z L et al. J. Vac. Sci. Technol. B 13 1212 (1995)
- 60. Shibata M et al. Appl. Phys. Lett. 73 2179 (1998)
- 61. Li N, Yoshinobu T, Iwasaki H Jpn. J. Appl. Phys. 37 L995 (1998)

- 62. Ito T et al. Jpn. J. Appl. Phys. 40 6055 (2001)
- 63. Fujita S et al. Appl. Phys. Lett. 69 638 (1996)
- 64. Park K-H et al. Jpn. J. Appl. Phys. 39 4629 (2000)
- 65. Yasuda T et al. Phys. Rev. Lett. 87 037403 (2001)
- 66. Miyata N, Watanabe H, Ichikawa M Phys. Rev. Lett. 84 1043 (2000)
- 67. Shklyaev A A, Ichikawa M Surf. Sci. 514 19 (2002)
- 68. Hla S-W et al. *Nano Lett.* **4** 1997 (2004)
- 69. Lyding J W et al. Appl. Phys. Lett. 64 2010 (1994)
- 70. Shen T-C, Wang C, Tucker J R Phys. Rev. Lett. 78 1271 (1997)
- 71. Tsong T T, Chang C-S Jpn. J. Appl. Phys. 34 3309 (1995)
- 72. Girard C, Bouju X, Joachim C Chem. Phys. 168 203 (1992)
- 73. Stokbro K et al. Phys. Rev. Lett. 80 2618 (1998)
- 74. Pizzagalli L, Baratoff A Phys. Rev. B 68 115427 (2003)
- 75. Johnson K E, Engel T Phys. Rev. Lett. 69 339 (1992)
- 76. Fujita K, Watanabe H, Ichikawa M J. Appl. Phys. 83 4091 (1998)
- 77. Fujita S et al. J. Vac. Sci. Technol. A 15 1493 (1997)
- 78. Shklyaev A A, Shibata M, Ichikawa M Appl. Phys. Lett. 72 320 (1998)
- 79. Shklyaev A A, Ichikawa M J. Vac. Sci. Technol. B 24 739 (2006)

Germanium and silicon nanostructure fabrication using a scanning tunneling microscope tip

A.A. Shklyaev

The Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, prosp. Akad. Lavrent'eva 13, 630090 Novosibirsk, Russian Federation Tel. (7-383) 330-85-91. Fax (7-383) 333-27-71 E-mail: shklyaev@thermo.isp.nsc.ru Quantum-Phase Electronics Center, Department of Applied Physics The University of Tokyo and Japan Science and Technology Agency, CREST 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan Tel./Fax + 81 3 5841 7903 E-mail: shklyaev@exp.t.u-tokyo.ac.jp **M. Ichikawa** Quantum-Phase Electronics Center, Department of Applied Physics The University of Tokyo and Japan Science and Technology Agency, CREST 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan Tel./Fax + 81 3 5841 7901 E-mail: ichikawa@ap.t.u-tokyo.ac.jp

The current status of research on the fabrication of semiconductor surface nanostructures using a scanning tunneling microscope (STM) tip is reviewed. The continuous atom transfer occurring due to directional surface diffusion initiated by the STM electric field and involvement of field-induced evaporation is analyzed. The effect of irradiation by an external electron beam on the tip-sample interaction is discussed, which consists in reducing the barrier for direct interatomic reactions and in changing the direction of the tip-sample atom transfer. The possibilities of fabricating germanium and silicon nanostructures of island and line types and making silicon windows on oxidized silicon surfaces are demonstrated.

PACS numbers: 68.37.Ef, 79.70.+q, 81.16.Ta

Bibliography - 79 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk 176 (9) 913-930 (2006)

Received 22 February 2006

Physics-Uspekhi 49 (9) (2006)