

Прогулка по атомным ступеням

или как перейти от фундаментальных исследований на поверхности к измерениям в мире нано



Л. И. ФЕДИНА, А. В. ЛАТЫШЕВ

Любой материальный объект для нас начинается с его поверхности, которая фактически является той границей, которая отделяет объект от окружающего пространства. И для любой технологии очень важно изучить эти свойства и попытаться их контролировать. Возможность непосредственного наблюдения за динамическим поведением поверхностей объектов в «наноразмерном масштабе» появилась благодаря союзу отражательной электронной микроскопии со сверхвысоковакуумными технологиями



ФЕДИНА Людмила Ивановна – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории нанодиагностики и нанолитографии Института физики полупроводников СО РАН им. А. В. Ржанова (Новосибирск). Автор и соавтор более 90 научных работ и 3 патентов

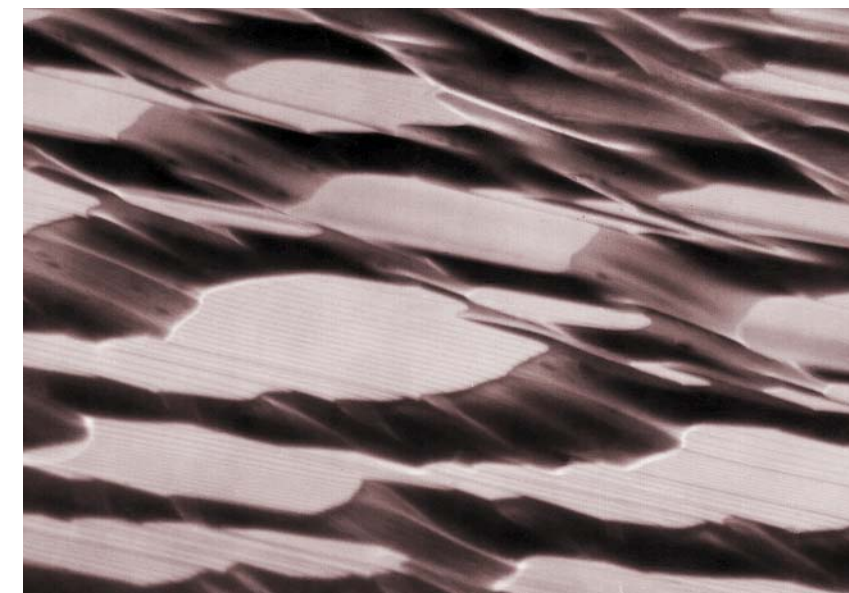


ЛАТЫШЕВ Александр Васильевич – член-корреспондент РАН, профессор, заведующий кафедрой физики полупроводников Новосибирского государственного университета. Лауреат премии Правительства РФ (2014). Автор и соавтор более 250 научных статей и 12 патентов

Это не поверхность Марса. Такой вид приобретает чистая поверхность кристаллического кремния после разогрева кристалла электрическим током до 1300 °С. Изображение получено в отражательном электронном микроскопе (ОЭМ) при тридцатитысячекратном увеличении

© Л. И. Федина, А. В. Латышев, 2015

Странный, фантастический рельеф с рядом бесчисленных «дюн» с резко обрывающимися краями... Это – не поверхность Марса или другого космического объекта. Говоря научным языком, так выглядит атомно-чистая поверхность пластины монокристаллического кремния (Si) в отражательном электронном микроскопе при увеличении в 30 тыс. раз после длительного пропускания постоянного электрического тока, разогревающего кристалл до 1300 °С. Чуть позже мы еще вернемся к причинам возникновения столь необычного рельефа, а пока в прямом смысле остановимся «на поверхности».



Нет необходимости говорить о том, что свойства поверхности важны, ведь именно с нее начинается и ею заканчивается любой объект или технология. Кремниевая микроэлектроника началась, когда научились локально изменять электронные свойства приповерхностных областей кристалла кремния, закрывать их оксидом и металлом и в результате получать транзистор. Уже тогда характеристики создаваемых устройств в существенной мере определялись свойствами самой поверхности и границ раздела, в том числе наличием примесей.

В наши дни на основе современных технологий, использующих приставку «нано», создаются приборы, локализованные на глубине нескольких десятков атомных слоев, т. е. фактически на самой поверхности. Эти технологии предъявляют все более жесткие требования к качеству поверхности и управлению атомными процессами, протекающими на ней. Поэтому без фундаментальных знаний о том, как движутся атомы на поверхности кристалла и как они взаимодействуют с атомными ступенями – главным структурным элементом кристаллической поверхности, сегодня не обойтись. Но для изучения этих процессов нужен соответствующий метод, позволяющий визуализировать структуру поверхности. Одним из таких структурно-чувствительных методов и является отражательная электронная микроскопия (ОЭМ).

Ключевые слова: сверхвысоковакуумная отражательная электронная микроскопия (СВВ ОЭМ), поверхность кремния, моноатомная ступень.

Key words: ultrahighvacuum reflection electron microscopy (UHV REM), silicon surface, monoatomic step

Кремниевая «лестница»

На изображениях атомных ступеней на реальной поверхности кремния, полученных с помощью ОЭМ, и структурной модели, созданной с помощью компьютерного моделирования, видно, что ступени появляются за счет выхода на поверхность кристаллографических плоскостей, в которых повышена плотность атомов.

Как это происходит? Представьте, что вы мысленно разрезаете кристалл, зная, что все атомы в нем строго упорядочены в виде трехмерной решетки в соответствии с типом химической связи. В простейшем случае такая решетка состоит из элементарных кубиков, в углах и на гранях которых располагаются атомы. Такой кубик называется элементарной ячейкой; ее перемещение (трансляция) по трем пространственным координатам воспроизводит положение всех атомов в кристаллической решетке.

Атомы в решетке кремния Si связаны ковалентной связью, в результате чего формируется структура типа алмаза, характерная для всех элементов IV группы таблицы Менделеева. На языке элементарных ячеек, структура алмаза состоит из двух «кубиков», вставленных друг в друга вдоль диагонали куба на четверть ее длины.

Для описания различных сечений кристаллической решетки, в которых плотность атомов значительно варьируется, используются индексы Миллера. Не вдаваясь в подробности, скажем только, что поверхность Si с индексами (111) соответствует сечению двоянного кубика вдоль одной из его диагоналей. Теоретически при таком строгом разрезе – параллельно плоскостям (111) – можно получить идеальную атомно-гладкую поверхность без каких-либо ступеней.

Однако в реальности разрезать слиток Si точно по плоскости (111) невозможно, так как современная точность резки не превышает $0,5^\circ$. Это означает, что реальная поверхность разрезанного кристалла будет состоять из кусочков атомно-гладких участков поверхности (111), разделенных атомными ступенями, что хорошо видно на компьютерной модели. Высота получившихся ступеней будет строго равна расстоянию между плоскостями (111), выходящими на поверхность, т. е. 0,314 нм. Фактически это расстояние близко к размерам самого атома кремния ($\sim 0,1$ нм или 10^{-10} м), поэтому ступени и называют «атомными».

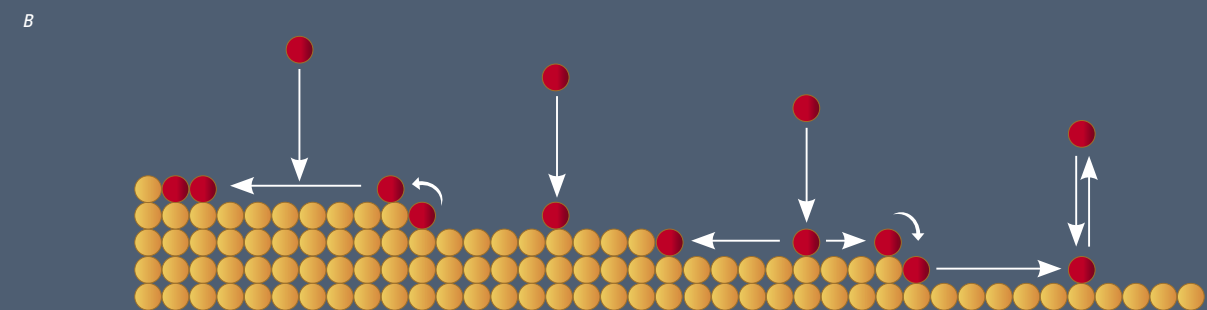
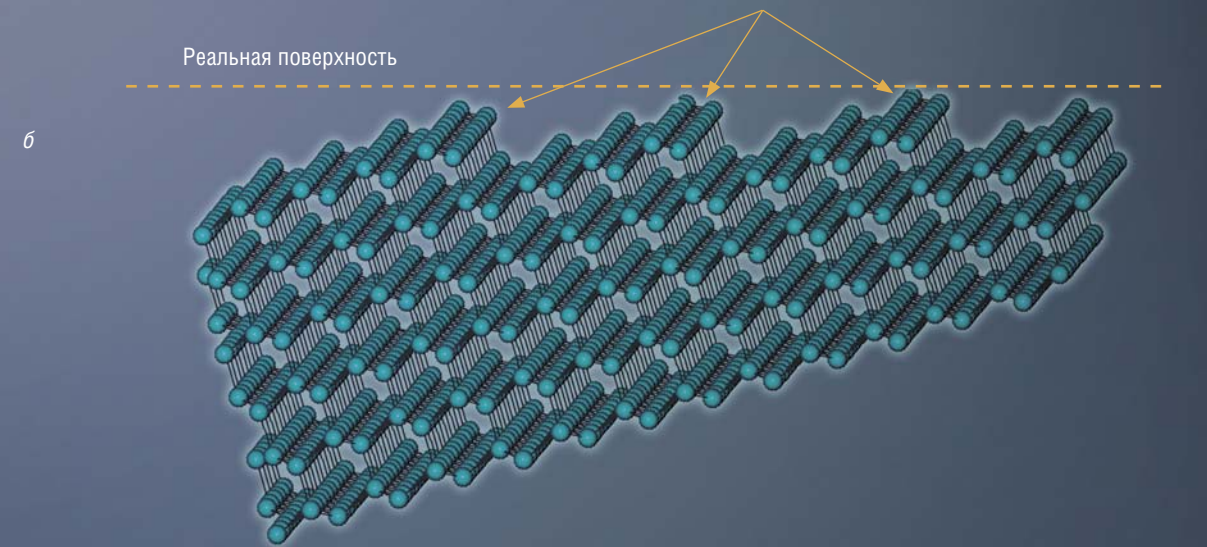
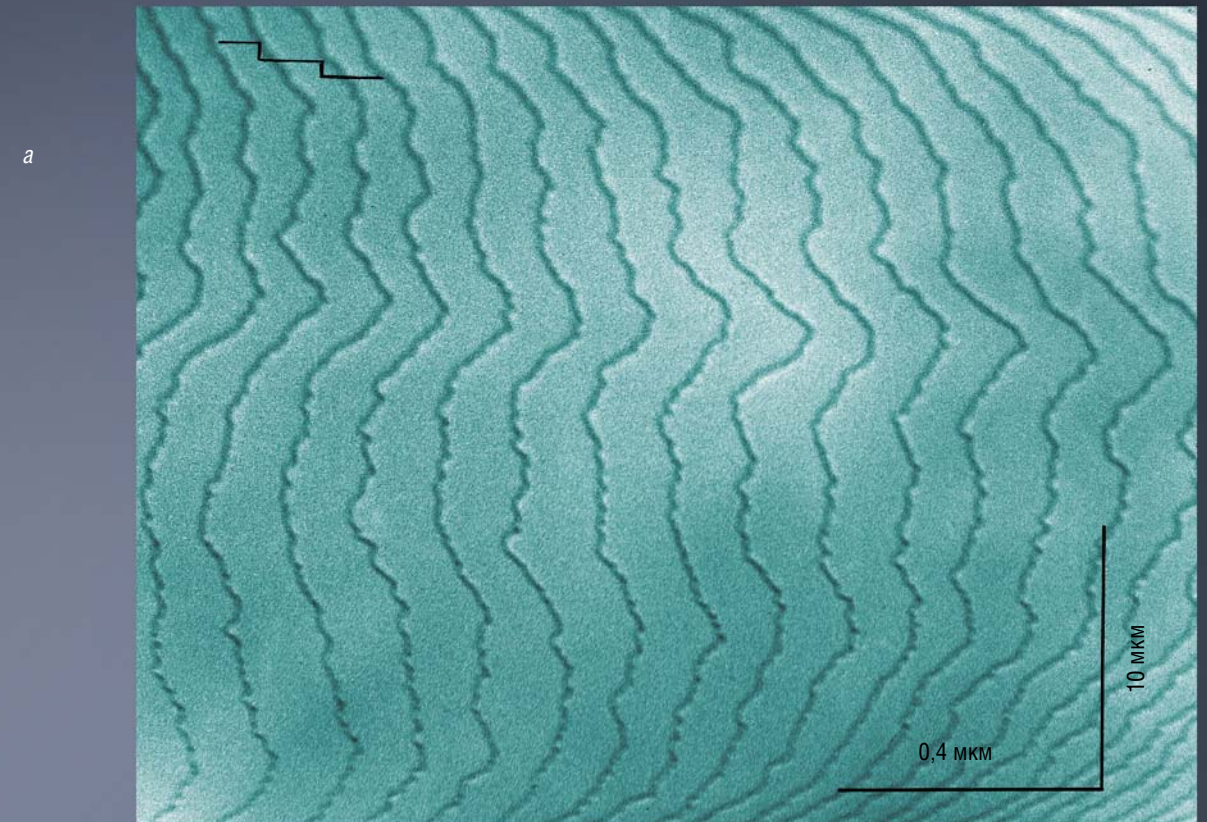
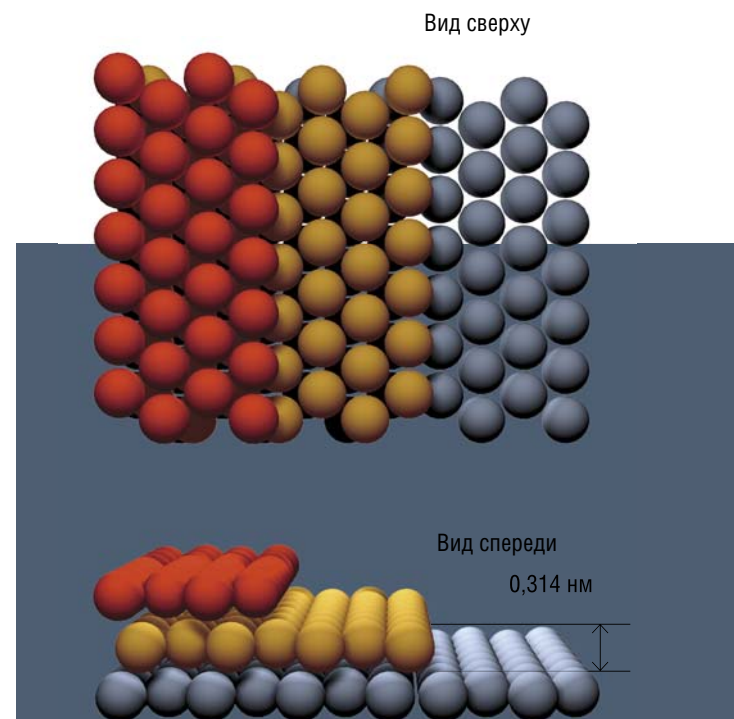
Таким образом, реальная атомно-чистая поверхность Si (111) напоминает лестницу в здании, где поверхность «ступени», на которую наступает нога, является атомно-гладкой террасой, а ее край – собственно атомной ступенью, куда встраиваются или откуда выходят атомы в процессе роста или сублимации кристалла.

Сверхвакуум В «спичечном коробке»

Атомные ступени очень трудно увидеть в силу их малой высоты, сравнимой с размерами атома, поэтому долгое время они были объектом исключительно теоретических исследований. Впервые экспериментальное изображение атомной ступени, полученное с помощью ОЭМ в условиях сверхвысокого вакуума, было продемонстрировано в 1980 г. японским профессором К. Яги на Конгрессе по росту кристаллов (Москва).

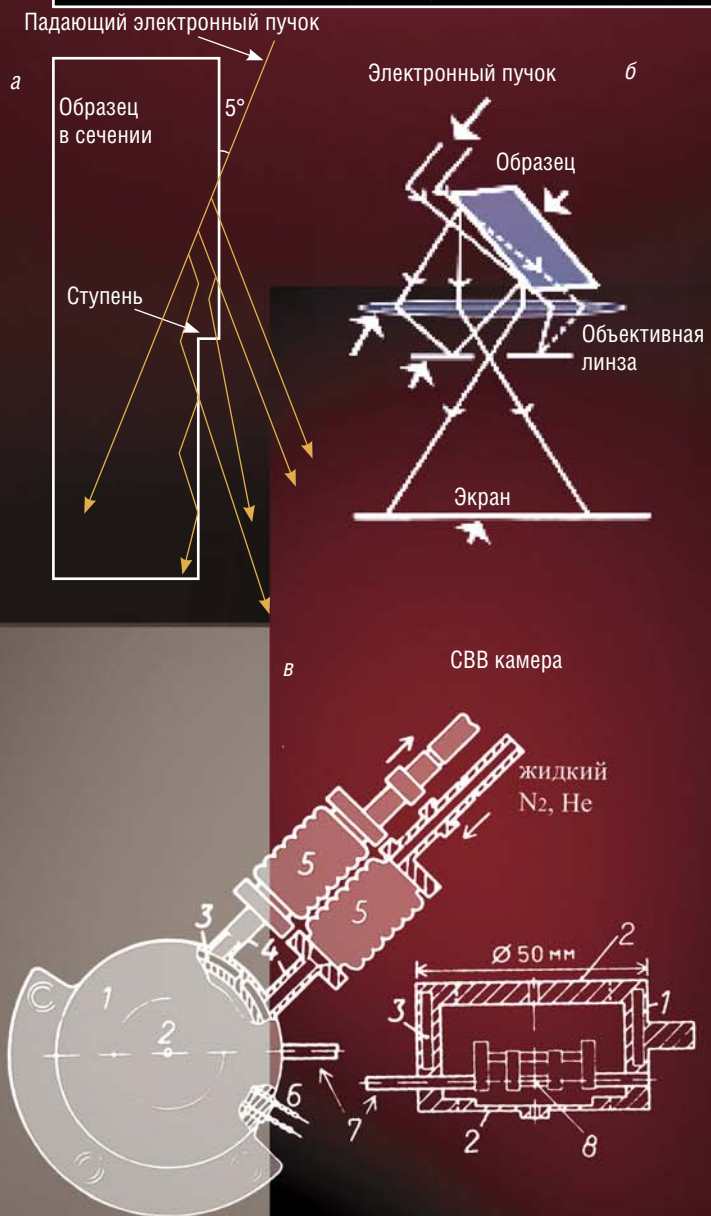
С этого момента метод ОЭМ начал активно развиваться в новосибирском Институте физики полупроводников СО РАН по инициативе руководителя лаборатории электронной микроскопии С. И. Стенина. К тому времени благодаря его усилиям в институте уже сложились предпосылки для прорыва в создании больших сверхвысоковакуумных установок, предопределивших бурное развитие в ИФП СО РАН технологии

Атомные ступени на поверхности кремния формируются за счет выхода плотно упакованных атомами плоскостей кристаллической решетки: а – изображения атомных ступеней высотой 0,314 нм на поверхности Si(111), полученные с помощью ОЭМ; б – атомная модель ступеней, полученная с помощью компьютерного моделирования; в – схематическое изображение различных видов встраивания атомов в ступень при их осаждении на поверхность





Картина дифракции электронов в ОЭМ



По распространенности в земной коре кремний занимает второе место после кислорода, однако в природе он встречается преимущественно в виде различных соединений на основе диоксида кремния, а также силикатов и алюмосиликатов. Монокристаллический кремний – основа всей микроэлектроники, получается искусственным путем в виде слитков. На сегодняшний день это самый чистый материал, когда-либо полученный человеком. Но создать и наблюдать атомно-чистую поверхность образца кремния можно только после его сублимации в сверхвысоком вакууме

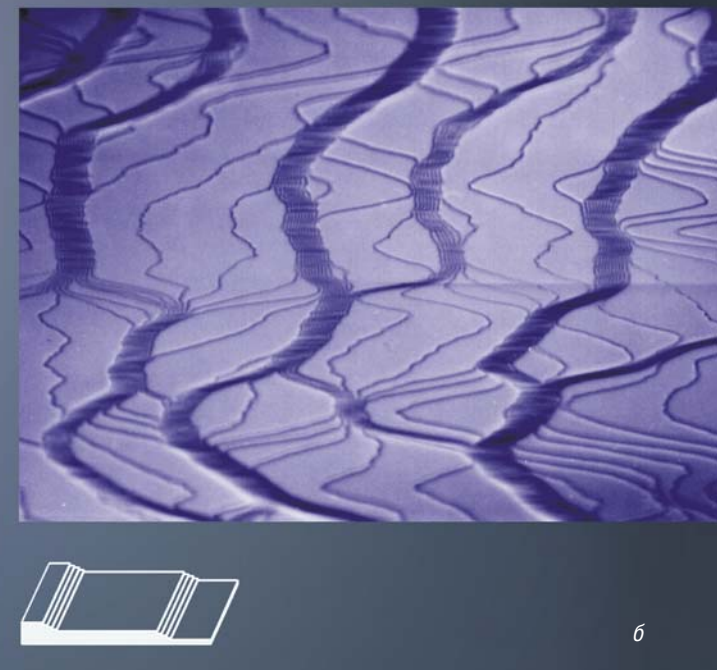
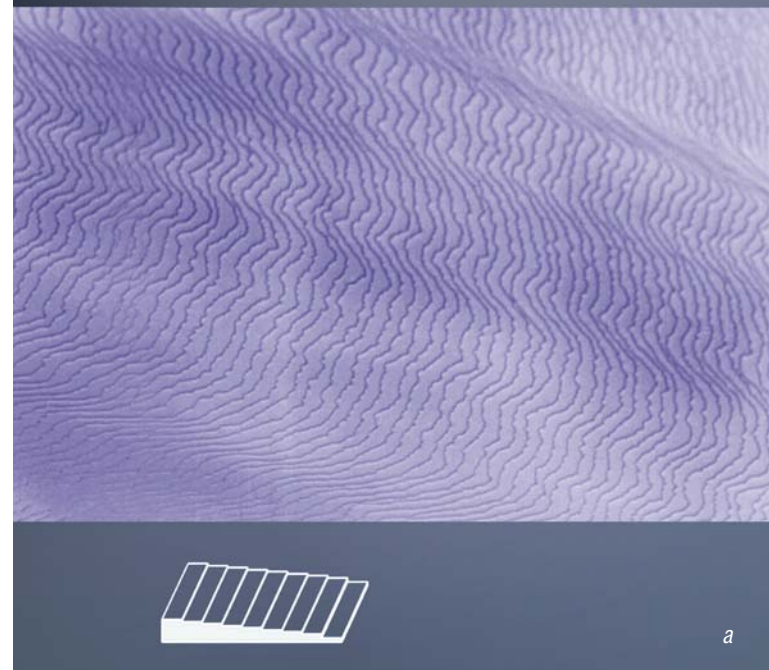
молекулярно-лучевой эпитаксии, позволяющей выращивать на подложке совершенные монокристаллические слои вещества. Возможности метода ОЭМ исключительно соответствовали задачам этой технологии, поскольку выращивание эпитаксиальных структур требовало детальных знаний об элементарных процессах встраивания и отрыва атомов из атомных ступеней, что составляло фундаментальную основу процесса эпитаксиального роста.

В основе ОЭМ лежит обычная просвечивающая электронная микроскопия, однако сам объект исследования при этом располагается под небольшим (~5°) углом относительно пучка электронов. Одним из первых, кто выдвинул эту идею еще в начале 30-х гг., был немецкий физик Э. Руска, впоследствии получивший Нобелевскую премию за «фундаментальные работы по электронной оптике и создание первого электронного микроскопа». Однако в полной мере реализовать идею ОЭМ в то время не удалось из-за невозможности достичь хорошего вакуума в колонне микроскопа. Тем не менее, развернув тонкий образец на угол в 90° относительно пучка электронов, который в этом случае мог просветить всю толщину образца, Руске удалось создать просвечивающий электронный микроскоп – основной инструмент материаловедения в наши дни.

Чтобы увидеть с помощью ОЭМ атомные ступени на поверхности кремния, да еще в процессе их движения (*in situ*), вокруг образца необходимо было создать сверхвысокий вакуум (СВВ). Еще одна задача, которую нужно было при этом решить, – очистить

Важнейшие аспекты метода *in situ* ОЭМ: схемы хода электронного пучка относительно поверхности образца (а) и в электронном микроскопе (б), а также принципиальная конструкция сверхвысоковакуумной ячейки, устанавливаемой в пространство между линзами просвечивающего электронного микроскопа (в).

Вверху – типичная картина дифракции электронов, отраженных от атомно-чистой поверхности кремния



образец от естественного оксида, неизбежно возникающего на поверхности кремния в результате взаимодействия с атмосферным кислородом. Эта проблема решается нагревом образца до температуры сублимации материала (около 1300 °С), например, пропусканием электрического тока.

Таким образом, для наблюдения атомных ступеней на поверхности кремния требовалась маленькая СВВ-ячейка с двумя отверстиями для входа и выхода электронного пучка. Внутри такой СВВ-камеры должен был помещаться образец, который можно было бы нагревать до температуры 1300 °С, а также источник для напыления вещества. Для получения сверхвысокого вакуума стенки такой камеры нужно было охлаждать жидким азотом, при этом должна была сохраняться возможность проведения механических юстировок электронных линз микроскопа.

Это была невероятно трудная задача – создать сложнейшее устройство размером со спичечный коробок, которое бы встраивалось в небольшое пространство внутри электронного микроскопа. Решить ее удалось совместными усилиями талантливых ученых и конструкторов: С. И. Стенина, А. Л. Асеева, А. В. Латышева, А. Б. Красильникова, Б. З. Кантера, А. А. Крошкова, Э. А. Барановой, О. А. Якушенко, Н. И. Козлова, И. Н. Сизикова и В. В. Решетникова. Мировых аналогов эта работа не имеет до сих пор.

Сегодня ИФП СО РАН – единственное место в мире, где для изучения атомных процессов на поверхности кристалла используется метод *in situ* СВВ ОЭМ. Метод позволяет успешно проводить эксперименты по изучению структуры и морфологии атомно-чистых поверх-

При прогреве постоянным током до температуры сублимации кремния система атомных ступеней на поверхности Si(111) (а) быстро трансформируется в кластеры – эшелоны ступеней, которые на ОЭМ-изображении появляются в виде широких темных полос (б). Это изменение морфологии поверхности обратимо путем смены направления постоянного электрического тока, пропускаемого через образец

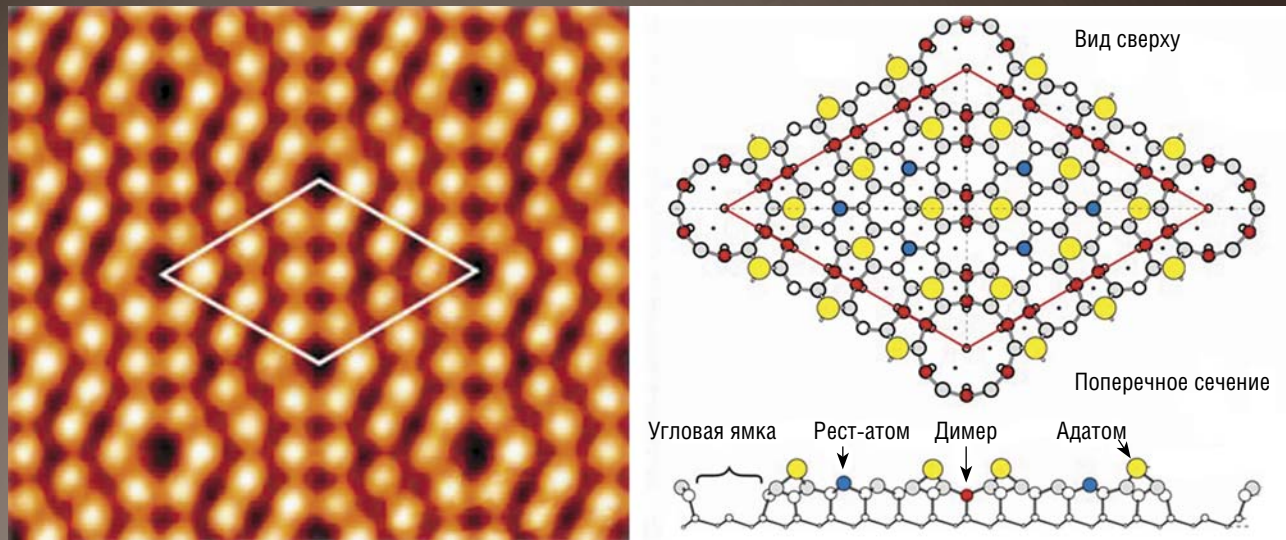
ностей кристаллов при сублимации, эпитаксии, окислении, каталитических реакциях и других воздействиях, которые можно проводить в СВВ ОЭМ-ячейке.

Можно добавить, что сейчас интерес к подобным исследованиям *in situ* в мире чрезвычайно растет, и ведущие производители электронных микроскопов активно занимаются разработкой различных встроенных ячеек для изучения процессов в работающих наноструктурах.

Чем больше эшелон, тем медленнее он движется

Одним из самых замечательных фундаментальных явлений, открытых в 1980-е гг. с помощью *in situ* СВВ ОЭМ, стал эффект эшелонирования атомных ступеней (Латышев, Асеев и др., 1988; Латышев, Красильников и др., 1988; Latyshev *et al.*, 1989; 1991; 1994). Это открытие не только предвосхитило теорию, но и оказалось очень полезным для осуществления точных измерений в наномасштабе (1–100 нм).

Суть эффекта в том, что система движущихся эквидистантно расположенных атомных ступеней на чистой



Изображение сверхструктуры (7×7) на поверхности Si (111), полученное с помощью сканирующего туннельного микроскопа (слева), и ее современная структурная компьютерная модель (справа). Ромб белых линий на STM-изображении очерчивает элементарную ячейку структуры (7×7). На этом изображении видны только самые верхние атомы, лежащие на поверхности (адатомы), отмеченные на модели желтым цветом. Строение этой сверхструктуры впервые расшифровал К. Такауагаи в 1985 г.

поверхности кремния при прогреве постоянным током до температур сублимации становится нестабильной. При определенных условиях она очень быстро трансформируется в кластеры ступеней, которые и назвали эшелонами по аналогии с железнодорожным составом. Чем больше атомных ступеней (вагонов) кластеризуется в эшелоне, тем медленнее он движется.

Поскольку каждая атомная ступень связана с определенным перепадом высоты на поверхности, то высота эшелона определяется числом сблизившихся ступеней. В результате рельеф поверхности кардинально меняется и становится очень развитым, даже грубым, тем самым «марсианским». По сути, эшелон атомных ступеней представляет собой естественные наноструктуры на поверхности кристалла, высота которых строго кратна высоте отдельной атомной ступени. Поэтому, как будет видно далее, их можно использовать для точных измерений в наномасштабе.

Эффект эшелонирования атомных ступеней оказался обратимым. Он зависит как от величины тока (температуры), так и от его направления, поэтому, меняя значения этих параметров, можно управляемо менять форму эшелонов (т.е. расстояние между ступенями) вплоть до их полного «развала» и восстановления исходного распределения ступеней.

Простой аналогией начальной стадии эшелонирования ступеней, движущихся сначала с постоянной скоростью, служит формирование автомобильных пробок вблизи светофора, который в нашем случае «включается» при смене температуры или направления тока. Однако микроскопическая природа таких «пробок» на поверхности до сих пор не ясна. Предполагается, что они связаны с изменениями процессов встраивания и выхода атомов из ступеней при переключениях тока, а также частичной ионизацией атомов, движущихся по поверхности и увлекаемых электрическим полем, приложенным к образцу (Latyshev *et al.*, 1996; Латышев, Асеев, 1998).

Самоорганизация нанорельефа

Значительно позже после открытия эффекта эшелонирования атомных ступеней стало ясно, что морфологическая нестабильность поверхности, т.е. возникновение нанорельефа, является общим проявлением процесса самоорганизации поверхности, поскольку наблюдается в самых разных условиях: при сублимации, эпитаксии, росте кристаллов и даже внутри твердого тела при твердофазной кристаллизации. Это

подсказывает, что морфологическая нестабильность возникает на поверхности и границах раздела не случайно и обусловлена понижением энергии системы при действии определенных факторов.

Другими словами, процесс формирования естественных нанообъектов на поверхности за счет ее самоорганизации является таким же неизбежным при определенных воздействиях, как и возникновение живой клетки (по сути – сложной бионаноструктуры) в ходе эволюции нашей планеты. И поскольку физические свойства объектов с размерами от 1 до 100 нм могут, как известно, фантастически отличаться от их макроаналогов, это явление может быть использовано для создания совершенно новых приборов и устройств, работающих на других физических принципах. В этом смысле эти процессы, когда наноструктуры возникают за счет естественного перераспределения и самоорганизации атомов, представляют большой практический интерес с точки зрения развития нанотехнологий по типу «снизу-вверх» по шкале размеров.

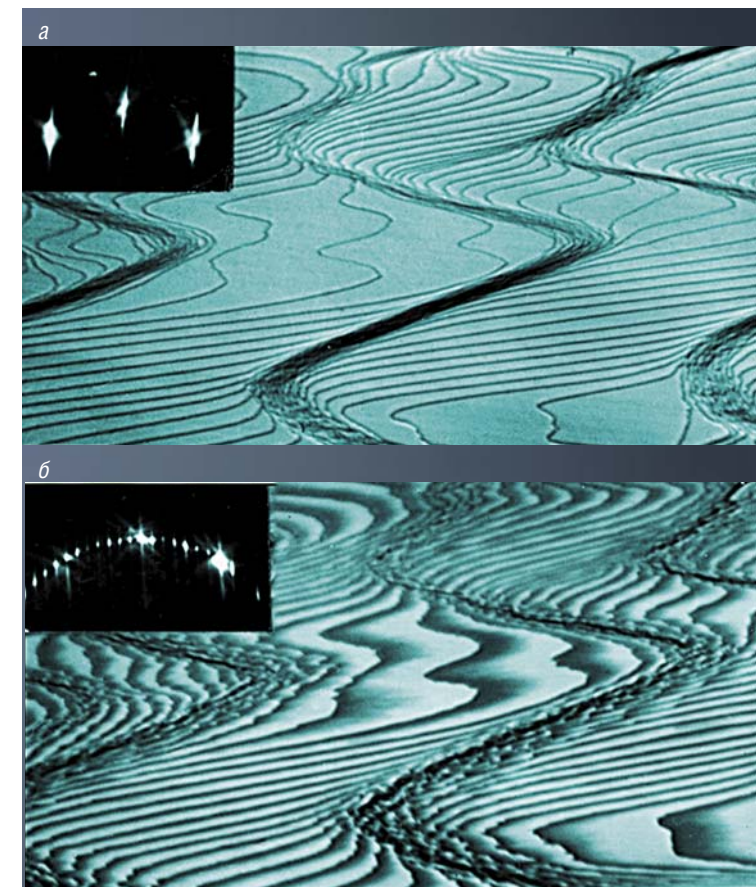
Механизм эшелонирования атомных ступеней настолько сложен, что до сих пор окончательно не объяснен, поскольку микроскопические параметры, описывающие встраивание и выход атомов из ступеней, трудны для определения даже методом *in situ* ОЭМ. К тому же теория предсказывает «неэквивалентность» процессов встраивания атомов в ступень с верхней и нижней террас.

Более того, атомы теоретически могут свободно «гулять» по ступени вообще без всякого встраивания; в этом случае ступень является прозрачной. Хотя в одиночные изломы атомной ступени (ступень, как и линия, может быть прямой или содержать атомные изломы) атомы встраиваются немедленно. И лишь при отсутствии излома, т.е. для строго прямолинейных участков ступеней, встраивание атомов затруднено. Все это было показано с помощью еще одного очень интересного метода *in situ* – сканирующей туннельной микроскопии (СТМ), позволяющей визуализировать атомную структуру поверхности при температурах не выше 600 °С.

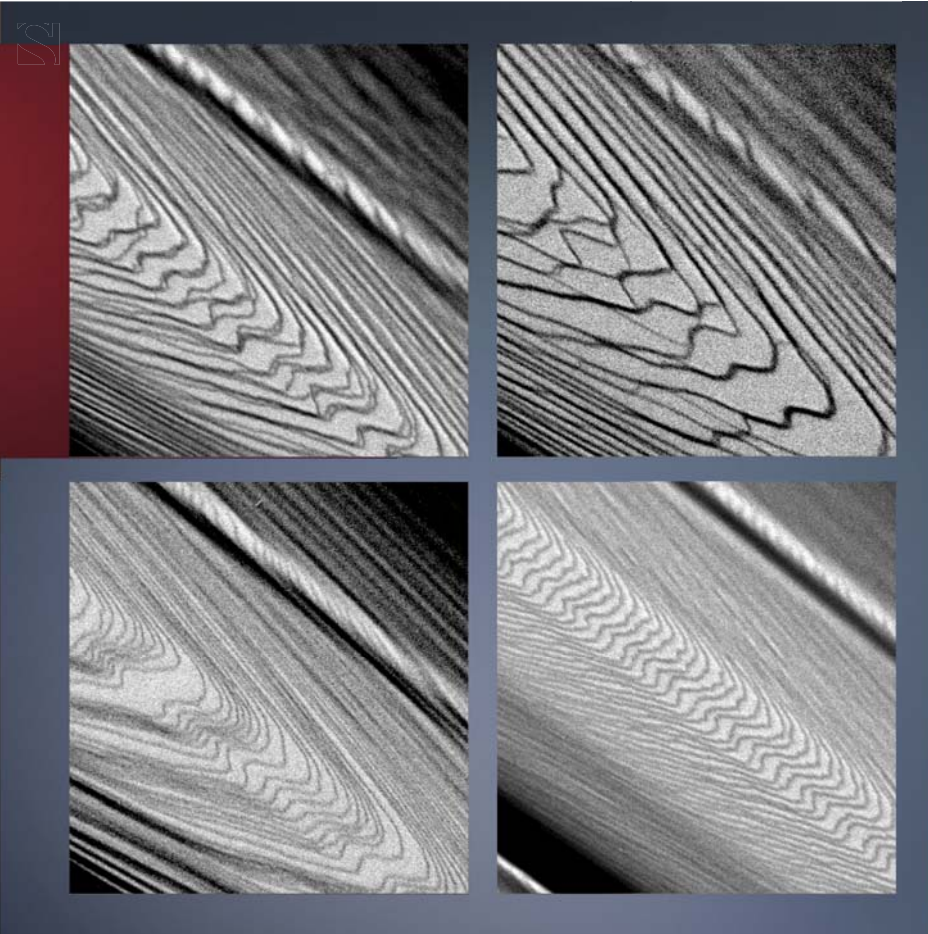
Общую картину встраивания атомов в ступень, и так достаточно сложную, усугубляет возникновение так называемой сверхструктуры на атомно-гладких террасах (т.е. между ступенями) при понижении температуры до 830 °С. Это явление связано с коллективной перестройкой поверхностных атомов, в том числе образованием новых связей, не характерных для «объемных» атомов. В результате размер элементарной ячейки в поверхностной сверхструктуре увеличивается в несколько раз по сравнению с тем, что наблюдается в объеме кристалла. Формирование сверхструктуры является типичным примером самоорганизации поверхности,

при которой происходит понижение ее энергии за счет минимизации числа оборванных атомных связей.

В результате всех этих процессов на поверхности Si (111) при высокой (> 830 °С) температуре возникает очень сложная структура с периодом трансляции, в семь раз большим относительно исходной поверхности. На ОЭМ-изображении формирование сверхструктуры (7×7) легко визуализируется по появлению сильных размытых теней вблизи атомных ступеней. При этом на дифракционном изображении, полученном при другом режиме работы электронных линз микроскопа, появляются мелкие рефлексы между основными сильными дифракционными рефлексами, разбивая расстояние между ними строго на семь интервалов.



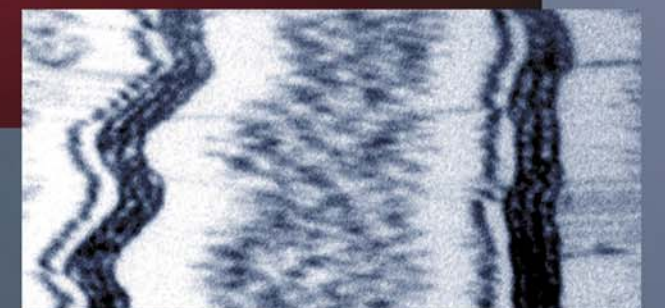
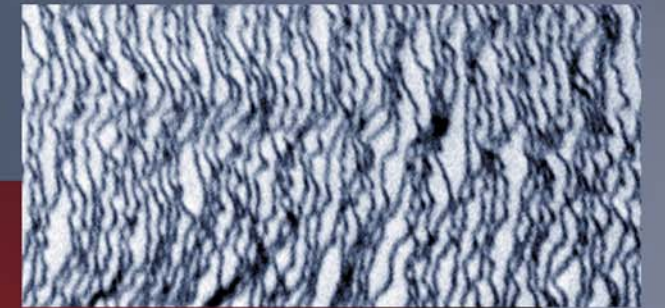
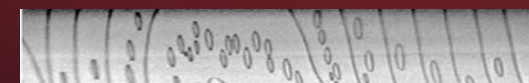
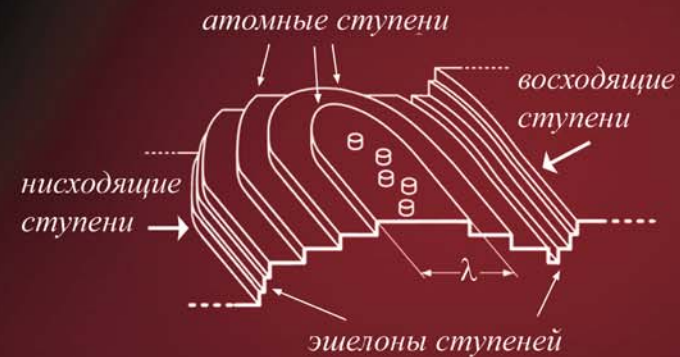
На этих ОЭМ изображениях показано исходное состояние эшелонированной поверхности Si (111) после высокотемпературного прогрева током (а) и после ее охлаждения до температуры ниже сверхструктурного перехода (б). На вставках – соответствующие дифракционные изображения от поверхности кристалла до и после перехода



Эта серия ОЭМ-изображений иллюстрирует трансформацию морфологии поверхности кремния (111) при адсорбции на ней атомов золота при нагреве постоянным током до 900 °С

Как измерить «нано»

Развитие нанотехнологий и производство нанопроductии требуют наличия надежного стандартизированного метода измерений размеров



Применение метода *in situ* ОЭМ с использованием эффекта эшелонирования оказалось очень информативным для изучения встраивания атомов в ступени в условиях существования сверхструктуры (Rogilo *et al.*, 2013).

Сначала из плотного массива ступеней формируются широкие атомно-гладкие террасы, разделенные эшелонами. При этом эшелон справа от атомно-гладкой террасы состоит из ступеней, восходящих вверх, а эшелон слева – из ступеней, уходящих вниз.

Последующее осаждение атомов кремния приводит к зарождению маленьких двумерных островков в центре гладких террас, которые на ОЭМ-изображении визуализируются в виде темных точек. Вблизи эшелонов формируются зоны «обеднения» разной ширины, в пределах которых островки не зарождаются. Это явление демонстрирует неэквивалентность встраивания атомов в восходящие ступени и нисходящие ступени. Тот факт, что зона обеднения вблизи нисходящих ступеней больше, свидетельствует о преимущественном встраивании атомов в эти ступени и хорошо согласуется с современными теоретическими представлениями эпитаксиального роста.

Дальнейший рост сопровождается формированием пирамидальной структуры, ограниченной зигзагообразными ступенями с длинными прямолинейными участ-

ками. Визуализируя процесс встраивания атомов в ступень на атомном уровне с помощью вышеупомянутой *in situ* СТМ, но при увеличении в несколько миллионов раз можно увидеть*, что образование прямолинейных ступеней связано с быстрым встраиванием атомов к прямолинейной ступени оказывается чрезвычайно затрудненным.

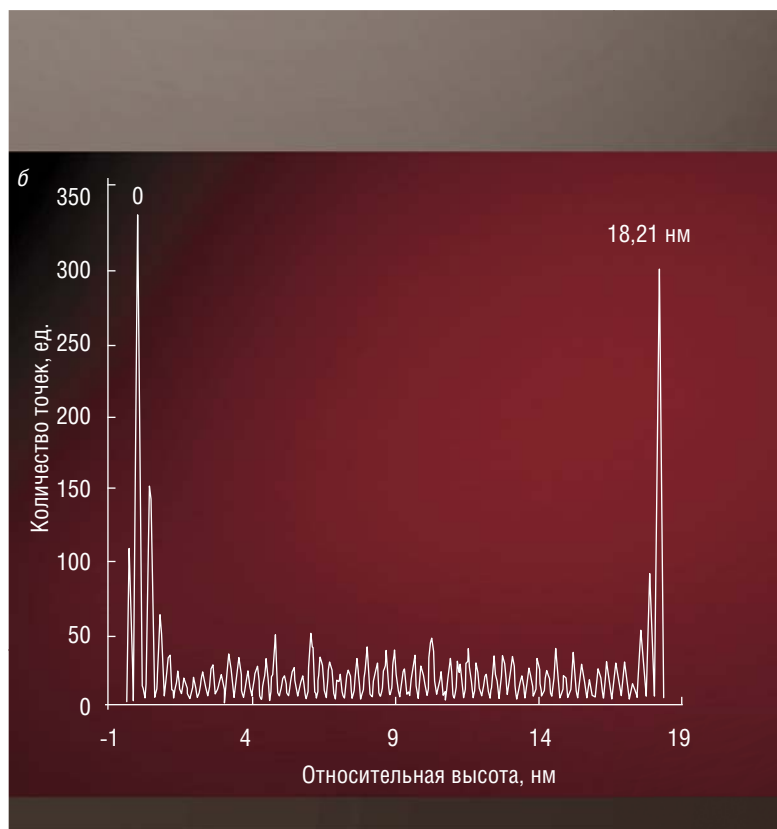
Анализируя процесс роста пирамидальной структуры в зависимости от условий формирования (ширины террасы, температуры, скорости осаждения), удалось определить величину энергетического барьера для встраивания в нисходящую ступень. Удалось также показать, что «прозрачность» ступеней – реальное явление, связанное с ограничением встраивания атомов в прямолинейные участки ступеней. Получение этой важной информации должно приблизить нас к пониманию механизма эшелонирования, а дальнейшее использование метода *in situ* ОЭМ, безусловно, принесет еще много новых фундаментальных результатов.

* Оригинальный видеоролик смотрите на <http://www.fz-juelich.de/pgi/pgi-3/EN/UeberUns/Organisation/Gruppe2/STM-Movies/artikel.html>

создаваемых структур (включая вертикальные) в диапазоне от 100 нм до размера атома (0,1 нм). Для этого нужны не только специальные приборы, как, например, атомно-силовой микроскоп (АСМ), но и калибровочные образцы для их настройки. Современная метрологическая система, использующая в качестве эталона длины метр, для такой шкалы размеров не работает.

Другие меры длины, разработанные на сегодняшний день на основе литографических методов (так называемые технологии «сверху-вниз», от макро-к наноразмерам путем «отрезания лишнего»), имеют минимальный размер 525 нм, что очень много. В то же время, как показано выше, идеальным кандидатом для создания метрологических мер в шкале наноразмеров является эшелон ступеней, возникающий в условиях самоорганизации атомно-чистой

С помощью *in situ* ОЭМ удалось проследить последовательные стадии формирования эшелонов ступеней (а, б) и осаждения атомов Si (в, г). При этом правый эшелон на фото состоит из ступеней, восходящих вверх, а левый – уходящих вниз. В атомно-силовом микроскопе удалось увидеть образовавшуюся пирамидальную структуру, ограниченную зигзагообразными ступенями (д) (схема роста этой структуры представлена сверху)



Команда молодых ученых, осваивающая метод *in situ* ОЭМ. На экране монитора – результат морфологической нестабильности атомно-чистой поверхности кремния

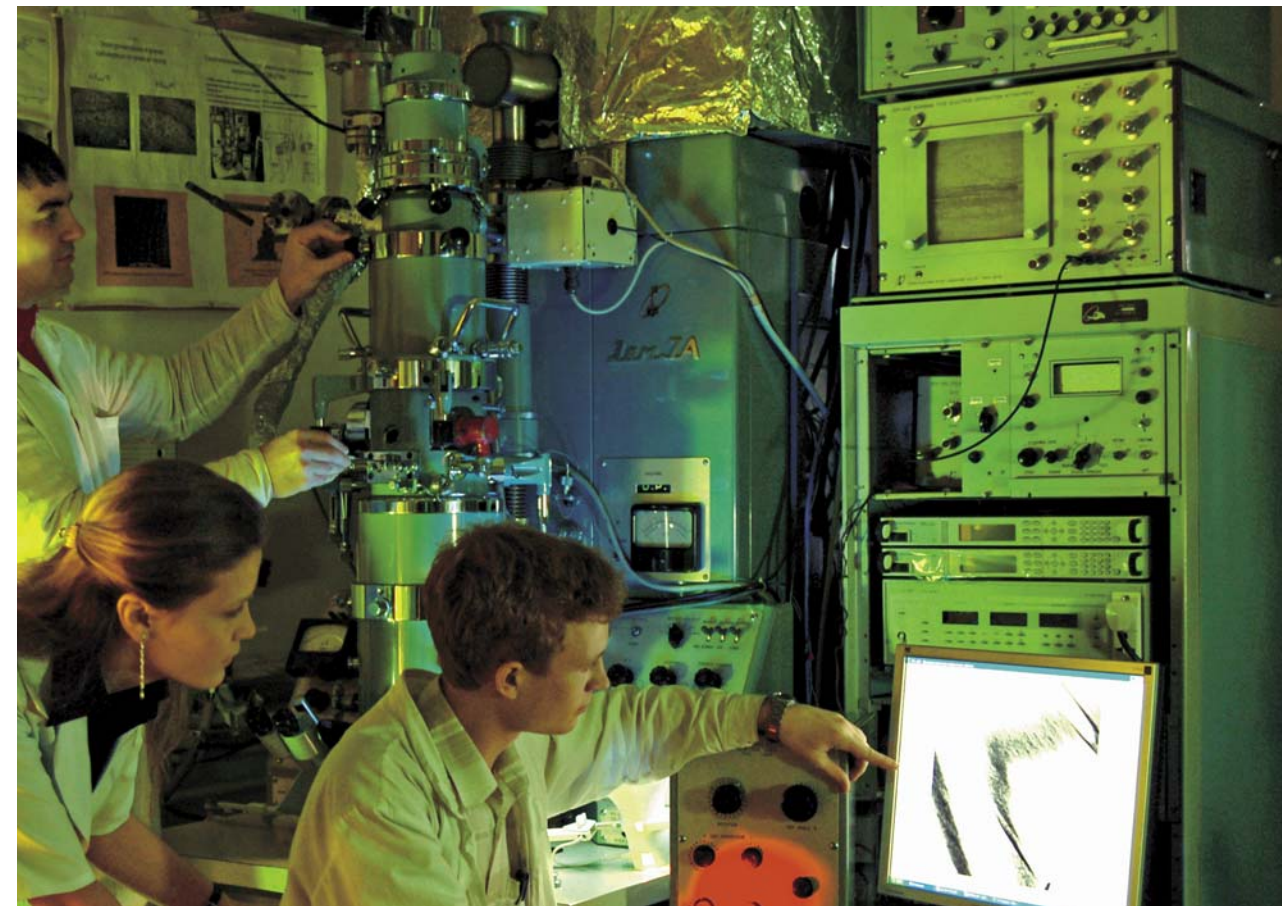
поверхности. Поскольку высота эшелона на поверхности Si (111) строго кратна высоте отдельной атомной ступени, то и высота эшелона может быть определена с очень высокой точностью.

Недавно высота атомной ступени на реальной поверхности Si (111), покрытой тонким слоем естественного оксида, была напрямую измерена с атомным разрешением в высокоразрешающем электронном микроскопе с точностью $\pm 0,001$ нм. Ее высота составила 0,314 нм, что соответствует расстоянию между кристаллографическими плоскостями Si (111) (Fedina *et al.*, 2010). С помощью рентгеновских измерений этот параметр был измерен с еще большей точностью, вплоть до восьмого знака после запятой! Поэтому атомная ступень, как и сам атом, могут рассматриваться как природные константы линейных размеров в масштабе «нано».

Существует лишь одна проблема, связанная с высокой плотностью атомных ступеней на поверхности при промышленной резке или скалывании кристалла, что не позволяет использовать такие поверхности для калибровки АСМ. Поэтому так важно явление эшелонирования атомных ступеней, с помощью которого можно направленно создавать участки с различной плотностью атомных ступеней. Создавая широкие атомно-гладкие участки с единичной атомной ступенью и эшелон со счетным количеством ступеней, можно легко получать образец для измерений в любом диапазоне высот.



Комплект мер высоты СТЕПП-ИФП-1 (а) и фазовое АСМ-изображение поверхности кремния (в), содержащей 58 ступеней, которое соответствует спектру высот от 0 до 18,21 нм (б)



Таким образом, на современном уровне развития метод отражательной электронной микроскопии *in situ* демонстрирует нам прямой переход от изучения фундаментальных явлений, происходящих на атомно-чистой поверхности вещества, к использованию полученных знаний на практике. Новые знания открывают возможности управления процессами роста и создания полупроводниковых материалов с необходимыми для современной микро- и нанoeлектроники свойствами.

Что касается непосредственного практического приложения результатов исследований на основе *in situ* ОЭМ, то в ИФП СО РАН уже созданы стандартные образцы, которые позволяют с большой точностью проводить измерения в наномасштабе, привязываясь к высоте отдельной атомной ступени. Комплект высокоточных мер вертикальных размеров «СТЕПП-ИФП-1» после проведения государственных испытаний приказом Росстандарта № 6290 от 31.10.2011 был внесен в Государственный реестр средств измерений.

Авторы благодарят сотрудников ИФП СО РАН (Новосибирск) к. ф.-м. н. С. С. Косолюбову, к. ф.-м. н. Д. И. Шеглова, д. ф.-м. н. А. Д. Шкляева и аспиранта Д. И. Роголо за помощь в подготовке публикации

Литература
 Латышев А. В., Асеев А. Л., Красильников А. Б. и др. // Доклады АН СССР. 1988. Т. 300. № 1. С. 84.
 Латышев А. В., Красильников А. Б., Асеев А. Л., Стенин С. И. // Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 49. № 9. С. 448.,
 Латышев А. В., Асеев А. Л. // Успехи физических наук. 1998. Т. 168, № 10. С. 1117.
 Латышев А. В., Асеев А. Л. Моноатомные ступени на поверхности кремния. Издательство СО РАН, 2006. 242 с.
 Fedina L. I., Sheglov D. V., Kosolobov S. S. *et al.* // Meas. Sci. Technol. 2010. V. 21. P. 054004.
 Rogilo D. I., Fedina L. I., Kosolobov S. S., *et al.* // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 111, P. 036105.
 Latyshev A. V., Aseev A. L., Krasilnikov A. B., and Stenin S. I. // Surf. Sci. 1989. V. 213. P. 157.
 Latyshev A. V., Krasilnikov A. B., Sokolov L. V., *et al.* // Surf. Sci. 1991. V. 254. P. 90.
 Latyshev A. V., Krasilnikov A. B., Aseev A. L. // Surf. Sci. 1994. V. 311. P. 395,
 Latyshev A. V., Minoda H., Tamishiro Y., and Yagi K. // Phys. Rev. Lett. 1996. V. 76. No. 1. P. 94.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта Российского научного фонда № 14-22-00143