

## ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ (111) КРЕМНИЕВЫХ ШАЙБ *p*-ТИПА В АТМОСФЕРНЫХ УСЛОВИЯХ С ПОМОЩЬЮ СКАНИРУЮЩЕГО ТУННЕЛЬНОГО МИКРОСКОПА

Л. Н. Болотов, В. А. Козлов, И. В. Макаренко, А. Н. Титков

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021, Санкт-Петербург, Россия

(Получено 22 декабря 1992 г. Принято к печати 24 декабря 1992 г.)

Характерная для современной микроэлектроники тенденция к уменьшению размеров ее базовых элементов до субмикронных, а также стремление к улучшению характеристик мощных полупроводниковых приборов, получаемых прямым сращиванием кремниевых пластин, вызывает растущий интерес к информации о рельефе и локальных электронных свойствах поверхности кремниевых шайб с нанометровым разрешением. Весьма удобная возможность наблюдения топографической структуры поверхности реализуется при использовании сканирующих туннельных микроскопов (СТМ), которые по своим техническим возможностям позволяют достаточно легко воспроизводить рельеф поверхности с желаемой точностью.

До сих пор топографические исследования поверхности кремния с использованием СТМ проводились в основном в сверхвысоком вакууме или атмосфере инертного газа [<sup>1-3</sup>]. В то же время весьма важным является применение подобного метода при атмосферных условиях, привлекающего большей доступностью и простотой. В атмосферных условиях поверхности кристаллов обычно окислены, но эту сложность научились обходить, травливая слой окисла и защищая открывшуюся поверхность тонкими пассивирующими покрытиями. Недавно, однако, было обнаружено еще одно препятствие на пути записи рельефа кремниевых поверхностей в атмосферных условиях. В работах [<sup>4, 5</sup>] для кристаллов *n*-типа было замечено, что при последовательных сканированиях одного и того же участка поверхности изображение рельефа видоизменялось. Основная модификация рельефов состояла в том, что на получаемом в СТМ изображении поверхности первоначально экспонированные участки «проседали» на глубину от одного до нескольких нанометров относительно уровня неэкспонированной поверхности. В работе [<sup>6</sup>] сообщалось о накоплении эффекта при увеличении времени экспозиции. Следует отметить, что СТМ изображение поверхности отражает в совокупности как ее истинный геометрический рельеф, так и изменение ее электронных свойств в разных точках. Авторы работ [<sup>4, 5</sup>] пришли к заключению об электронной природе наблюдаемого эффекта, обусловленной внедрением атмосферного кислорода в поверхность под воздействием сильного электрического поля в туннельном зазоре. Таким образом, при изучении реального нанорельефа поверхности с помощью СТМ существует опасность получения искаженной картины из-за изменения электронных свойств поверхности.

Настоящая работа направлена на выяснение наличия электронных искажений изображения поверхности *p*-типа кремния в атмосферных условиях, а также на проверку возможности записи реального рельефа поверхности в этих условиях.

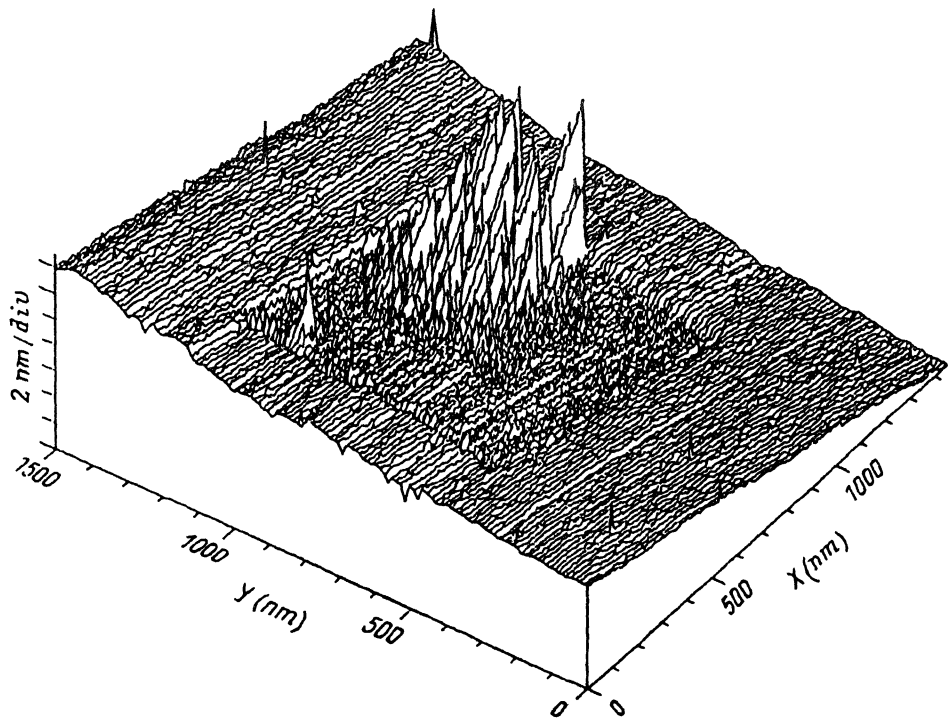


Рис. 1. Изображение поверхности кремния, полученное в атмосферных условиях. Напряжение смещения на образце  $U_T = 1.2$  В, туннельный ток  $I_T = 0.2$  нА.

Исследовавшиеся образцы приготовлены из переполитрованных в лабораторных условиях шайб кремния с ориентацией (111) и удельным сопротивлением  $0.01$  Ом·см. После полировки применялась стандартная для кремниевой технологии процедура отмычки шайб, состоящая из цикла обработок в кислотно-перекисных и аммиачно-перекисных растворах с промежуточными промывками в деионизованной отфильтрованной воде. Заключительный этап отмычки состоял в минутной обработке шайб в 5% водном растворе HF с последующей промывкой в  $H_2O$  в течение 10 мин. Такая обработка удаляет окисел и пассивирует поверхность за счет насыщения водородом оборванных связей [7]. На приготовленных таким образом поверхностях вольт-амперные характеристики имели ярко выраженный диодный характер, что указывало на качественную пассивацию [1]. Время между завершением процедуры пассивации и началом измерений на СТМ обычно не превышало 1 ч. Для уменьшения степени модификации поверхность сканировалась при минимальном контролируемом туннельном токе  $0.2$  нА и напряжении на игле около 1 В; при меньших напряжениях для отдельных образцов сканирование становилось невозможным из-за механического контакта иглы с поверхностью. Конструкция СТМ была аналогична применявшейся в работе [8], вольфрамовые острия с радиусом закругления менее 15 нм отбирались с помощью электронного микроскопа.

На рис. 1 показано изображение поверхности кремния, полученное после серии сканирований при атмосферных условиях. Первоначально острие было выведено в центр картинку и сделано пять последовательных записей малого поля  $380 \times 380$  нм. Затем острие было сдвинуто наполовину к началу координат и было прописано среднее поле  $700 \times 700$  нм, и, наконец, записывалось полное поле. Видно, что и в выбранных нами падящих условиях одиночное сканирование

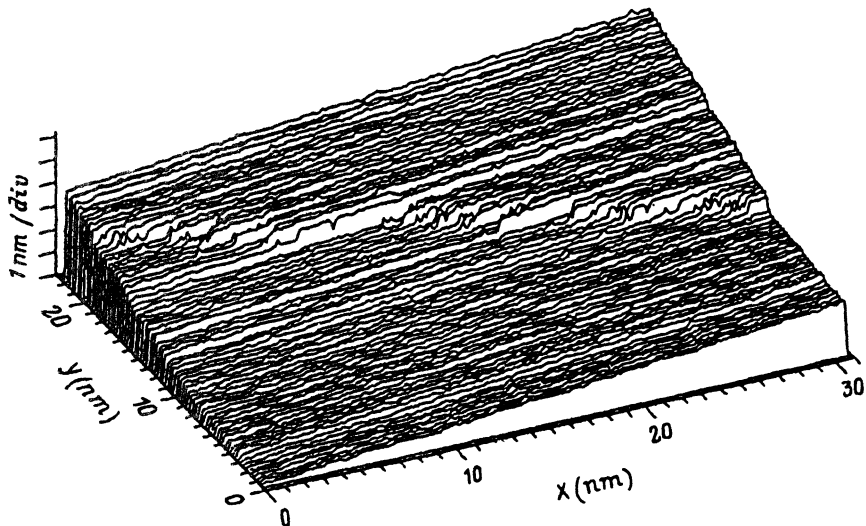


Рис. 2. Изображение участка поверхности кремния, полученное в атмосферных условиях при  $U_T = 0.7$  В и  $I_T = 0.3$  нА. Высота ступени 0.9 нм.

поверхности все равно вызывает ее проседание, замеченное в [6] для материала  $n$ -типа. Многократное сканирование приводит к более радикальным изменениям, развитию сильной «парусной» структуры, не наблюдавшейся ранее. Природу обнаруженной структуры предстоит еще понять, но представляется, что она также имеет электронное происхождение, так как временные задержки между последующими сканированиями приводили к уменьшению ее амплитуды.

Анализ данных рис. 1 приводит к заключению, что модификация СТМ изображения поверхности, очевидно, имеет место при любом, даже одиночном сканировании поверхности, а повторные сканирования могут привести к развитию крупномасштабных структур, способных полностью замаскировать нанорельеф поверхности. Тем не менее первое сканирование в указанном или еще более щадящем режиме, очевидно, может быть использовано для визуализации рельефа поверхности, так как вызывает лишь равномерное оседание изображения на незначительную глубину (менее одного нанометра). Это видно на рис. 2, где приведена первая запись топографии поля размером  $31 \times 23$  нм. Полученная запись уверенно демонстрирует ступеньку рельефа на поверхности высотой 0.9 нм.

Другой важный результат был получен при помещении СТМ в камеру с легко достижимым вакуумом  $10^{-2} - 10^{-3}$  Па. Оказалось, что в таком вакууме сканирование поверхности уже не вызывает заметного изменения ее изображения в СТМ. На рис. 3 показана топография поверхности кремния, полученная при таком вакууме. Провал в левом нижнем углу картинки является искажением изображения, произошедшим при подводе иглы на расстояние туннельного зазора еще в атмосферных условиях. Сканирование поверхности проводилось уже после откачки камеры. Многократное его повторение не оказывало влияния на получаемое изображение. Эта топография рельефа кремниевой пластины дает представление о его характерных особенностях, создаваемых в ходе полировки, травления и последующей пассивации. На поверхности могут оставаться плоские участки разной степени шероховатости, а также ступеньки сколов разной высоты. Интересно отметить, что для плоских участков реально достижение степени шероховатости до уровня менее 1 нм.

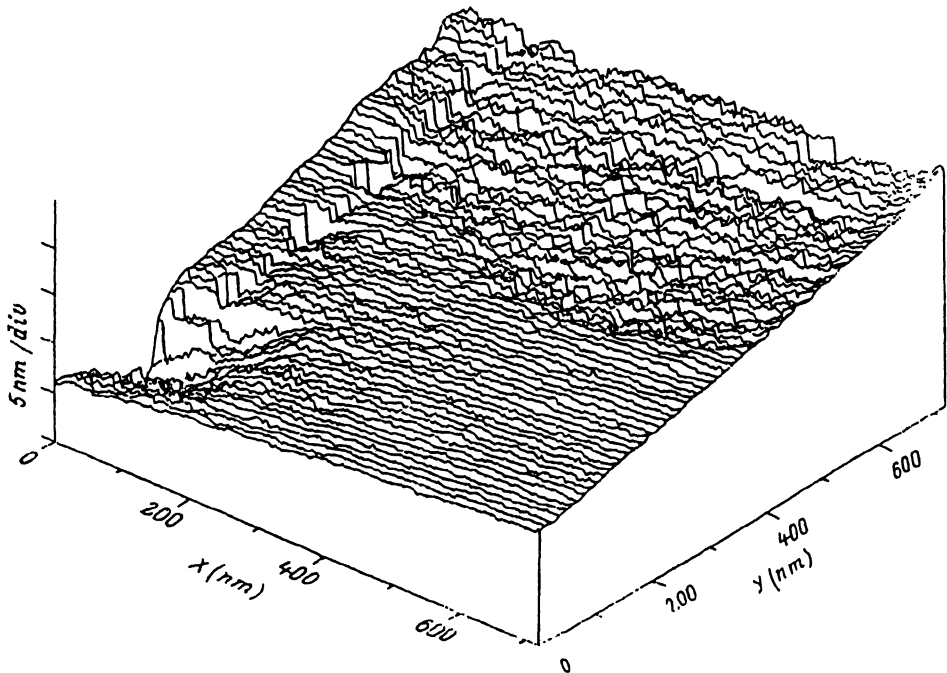


Рис. 3. Рельеф поверхности кремния, записанный при остаточном давлении  $10^{-2}$  Па,  $U_T = 2$  В и  $I_T = 0.2$  нА.

Возможность изучения топографии поверхности кремния при атмосферных условиях была использована нами для исследования поверхностей после различных обработок. Мы, в частности, исследовали поверхности после обработки в 40% растворе HF, характеризующиеся большим остаточным содержанием фтора [6]. Таким образом, обработанные поверхности оказались более шероховатыми и для них характерным было наличие ступеней с высотой до 10 нм. Отметим, что исследованные промышленные шайбы без лабораторной дополировки при пассивации в 5% растворе HF обладали еще более грубым рельефом. Для них характерным явилось наличие протяженных плоских террас с перепадами высот между ними в десятки нанометров. Террасы нередко содержали дефекты глубиной в 10–15 нм и поперечными размерами около 100 нм, а шероховатость террас по крайней мере на порядок превосходила эту величину для переполитованных образцов. Возможно, такой рельеф является характерным для шайб одной исследованной партии.

Таким образом, проведенные исследования показали, что в атмосферных условиях первые сканирования поверхности позволяют получать ее изображение с разрешением не хуже нанометра по высоте рельефа, а в умеренном вакууме ( $10^{-2}$ – $10^{-3}$  Па) изучение топографии такой поверхности происходит без видимого воздействия на нее.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] W. J. Kaiser, L. D. Bell. *J. Vac. Techn.*, A6, 519 (1988).
- [2] E. Hartmann, P. O. Hahn, R. J. Behm. *J. Appl. Phys.*, 69, 4273 (1991).
- [3] Y. Morita. *Japan. J. Appl. Phys.* 1, 30, 3570 (1991).
- [4] J. A. Dagata, J. Schneir, H. H. Harary, C. J. Evans, M. T. Postek, J. Bennet. *Appl. Phys. Lett.*, 56, 2001 (1990).

- [5] J. A. Dagata, J. Schneir, H. H. Harary, J. Bennett, W. Tseng. J. Vac. Sci. Techn., В9, 1384 (1991).  
[6] N. Barniol, F. Perez-Murana, X. Aymerich. Appl. Phys. Lett., 61, 462 (1992).  
[7] M. Grundner, D. Graf, P. O. Hahn, A. Schnegg. Sol. St. Techn., 34, 69 (1991).  
[8] Л. Н. Болотов, Б. Е. Деркач, Л. Ф. Иванцов, И. В. Макаренко, П. Б. Плеханов, В. И. Сафаров. ФТТ, 32, 1523 (1990).

Редактор Т. А. Полянская

ФТП, том 27, вып. 8, 1993

## ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ ДОНОРНОЙ ПРИМЕСИ В ФОСФИД ИНДИЯ

Т. М. Галина, В. Г. Володько, Е. С. Демидов, О. В. Подчищаева

Нижегородский исследовательский физико-технический институт при Нижегородском государственном университете им. Н. И. Лобачевского, 603600, Нижний Новгород, Россия  
(Получено 28 января 1993 г. Принято к печати 25 февраля 1993 г.)

В связи с тем что научный интерес к полупроводникам типа  $A^{III}B^V$  не ослабевает, возросло значение результатов исследований при легировании таких материалов методом ионной имплантации. Особые проблемы возникают при легировании  $InP$ , поскольку в этом соединении компоненты сильно различаются по массе. По этой причине в результате бомбардировки ионами не только повреждается решетка материала, но наблюдается неоднородное распределение атомов обеих компонент по глубине, т. е. имеет место нарушение стехиометрии [1].

В данной работе исследовалось влияние режимов имплантации и отжига донорной примеси на качество ионно-легированных слоев фосфида индия. Имплантация примеси осуществлялась в полуизолирующий фосфид индия марки ФИП-1, легированный железом, ориентации (100), на установке типа «Везувий». Для уменьшения эффектов каналирования угол разориентации составлял  $7^\circ$ . Отжиг ионно-легированных структур проводился под защитой  $SiO_2$  в вакууме при  $600\text{--}650^\circ\text{C}$  в потоке водорода и под защитой фосфорно-силикатного стекла (ФСС) при  $700\text{--}730^\circ\text{C}$  в потоке аргона, а также без применения защитного покрытия в импульсном режиме на промышленной установке «Импульс-6» в интервале температур от  $700$  до  $900^\circ\text{C}$  с различной длительностью импульса от 5 до 30 с. Тип проводимости, слоиное сопротивление ( $\rho/d$ ), концентрацию ( $n$ ) и подвижность ( $\mu$ ) электронов контролировали с помощью эффекта Холла в диапазоне температур  $77\text{--}300\text{ K}$ . В качестве имплантируемых примесей были выбраны селен, германий и кремний. При имплантации ионов  $Se$  с энергией  $E = 200\text{ кэВ}$  в полуизолирующий фосфид индия с последующим отжигом при  $650^\circ\text{C}$  под защитой двуокиси кремния в течение 30 мин электрическая активация примеси проявляется лишь при дозах внедренных ионов  $\Phi = 1.25 \cdot 10^{14}\text{ см}^{-2}$ . Пороговая доза, при которой наблюдается активация германия, составляет  $3.2 \cdot 10^{14}\text{ см}^{-2}$ . При имплантации ионов  $Se$  и  $Ge$  подвижность электронов не превышает  $800\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ , а поверхностная концентрация электронов составляет  $6 \cdot 10^{11}\text{ см}^{-2}$  при  $300\text{ K}$ . Аналогичная картина имеет место и при имплантации кремния, однако пороговая доза в этом случае много меньше,  $6.25 \cdot 10^{12}\text{ см}^{-2}$ , при этом поверхностная концентрация достигает  $6 \cdot 10^{10}\text{ см}^{-2}$ . Большие значения пороговых доз при имплантации в полуизолирующий фосфид индия могут быть обусловлены, во-первых, высокой концентрацией глубокой акцепторной примеси железа [2], во-вторых, обеднением приповерхностной области фосфором во время