

Сканирующая туннельная микроскопия структуры Si—SiO₂: использование режима ошибки обратной связи при исследовании поверхности

© В.М. Корнилов[†], А.Н. Лачинов, Б.А. Логинов*, В.А. Беспалов*

Институт физики молекул и кристаллов Уфимского научного центра Российской академии наук,
450075 Уфа, Россия

* Московский государственный институт электронной техники (технический университет),
124498 Зеленоград, Россия

(Получена 27 октября 2008 г. Принята к печати 5 ноября 2008 г.)

Представлены результаты экспериментального исследования методом сканирующей туннельной микроскопии поверхности кремния с естественным слоем окисла. Показано, что наблюдаемая модификация поверхности вызвана образованием каналов утечки в слое двуокиси кремния. Методически обоснована и показана возможность использования режима ошибки обратной связи для создания и исследования каналов утечки, индуцированных напряжением на туннельном зазоре. Используемая методика позволяет исследовать особенности формирования токовых каналов и тем самым диагностировать электрофизические свойства нанометровых слоев SiO₂.

PACS: 68.37.Ef, 73.40.Gk

1. Введение

Поверхность кремния успешно изучается самыми разными методами, в том числе и методом сканирующей туннельной микроскопии (СТМ). При работе в сверхвысоком вакууме со специально очищенной поверхностью образца реализуется случай прямого туннелирования на незанятые состояния кремния и полученное СТМ-изображение наилучшим образом соответствует морфологии поверхности.

Однако многочисленные СТМ-исследования поверхности кремния на воздухе натолкнулись на серьезные трудности. Было отмечено, что наличие окисла на поверхности кремния сильно затрудняет измерение и поддержание туннельного тока [1], что заставляет использовать различные методы травления и пассивации поверхности кремния [2–4].

Кроме того, оказалось, что поверхность кремния подвержена модификации при СТМ-исследованиях. Чаще всего эти изменения связывались с окислением поверхности полупроводника. При этом модифицированные участки могли иметь вид впадин на поверхности [5,6]. В то же время в работе [7] было показано, что локальное окисление поверхности кремния в сверхвысоком вакууме приводит к появлению возвышенностей. Анализу процессов окисления поверхности кремния посвящены работы [8,9], процессов диэлектрического пробоя в тонких слоях SiO₂ — [10], исследованию роли заряженных ловушек — [11], использованию атомно-силового микроскопа для исследования зарядовых процессов в структурах металл–диэлектрик–полупроводник — [12].

В работах [13,14] было показано, что характер модификации СТМ-изображения поверхности зависит от

условий проведения сканирования, в частности от полярности приложенного напряжения (при отрицательной полярности на образце формируется возвышение, при положительной — впадина).

Анализ литературы показывает, что механизмы процессов, влияющих на формирование изображения поверхности кремния, покрытого тонким слоем окисла, при СТМ-исследованиях могут быть сложными. В любом случае можно говорить о важной роли транспорта и накопления заряда в окисной пленке под действием внешнего электрического поля. Один из механизмов, участвующих в этом процессе, может быть связан с формированием каналов утечки. В частности, наличие таких каналов было показано в работе [15].

В связи с этим целью настоящей работы явилось расширение и обоснование методических предпосылок для создания и исследования каналов утечки заряда в пленке SiO₂, расположенной на поверхности Si, методом сканирующей туннельной микроскопии.

2. Эксперимент

В качестве объекта исследования были выбраны пластины оптически полированного кремния *n*-типа проводимости ориентации [111] с естественным слоем окисла. Толщина окисла составляла ~ 2 нм по данным эллипсометрии.

Исследования были выполнены на сканирующем мультимикроскопе СММ-2000 (ОАО „Завод ПРОТОН-МИЭТ“, Москва, Зеленоград), который входит в состав измерительного комплекса и позволяет получать на воздухе реальное разрешение в латеральном направлении до 0.3 нм, а по нормали к поверхности (ось *z*) до 0.1 нм. Диапазон изменения туннельного тока составлял 0.01–16 нА, диапазон напряжений в зазоре

[†] E-mail: kornilov@anrb.ru

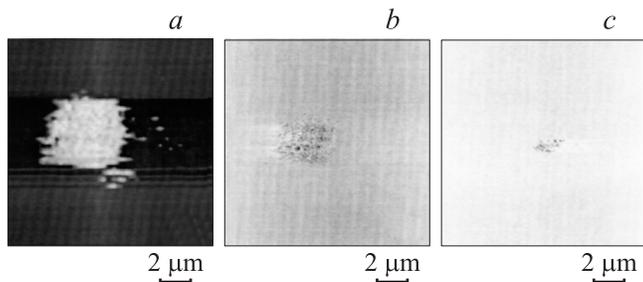


Рис. 1. Изображения модифицированного участка при напряжении сканирования. $U_{\text{vis}} = -1.6$ В (а) и -0.3 В (б). с — вид модифицированного участка при фиксации иглы над выбранной точкой; игла в центре скана, $U_{\text{mod}} = -5$ В, $U_{\text{vis}} = -0.6$ В.

игла-образец $0-(\pm 5)$ В. Острые иглы формировались методом косого среза платиновой проволоки.

Идея эксперимента заключалась в следующем. Эффекты модификации достаточно уверенно наблюдаются, когда микроскоп работает в режиме поддержания постоянного тока при напряжении на туннельном зазоре $U_t > 3$ В [13]. При этом можно говорить только об относительных изменениях поверхности, потому что любое наблюдение поверхности одновременно является ее модификацией. Минимизировать воздействие на поверхность можно, уменьшая напряжение и ток в туннельном зазоре и увеличивая скорость сканирования. В режиме постоянного тока это приводит к полной потере качества изображения. Можно надеяться, что токовые особенности на поверхности кремния будут проявляться при использовании режима постоянной высоты, когда скорость сканирования превышает время срабатывания обратной связи. Чувствительность микроскопа по току очень высока, а качество поверхности кремниевых образцов таково, что позволяет работать в режиме постоянной высоты на достаточно больших участках. Отметим, что аналогичные подходы использованы в работе [16], в которой экспериментально исследовано электрополевое индуцирование туннельно-токового контраста на поверхности кремния с тонкими слоями окисла.

Модификация поверхности кремния, покрытой естественным слоем окисла, проводилась по методике, ранее разработанной для таких объектов [13]. В частности, в работе использовалась следующая последовательность операций: вначале сканировался относительно малый участок поверхности при повышенном напряжении на туннельном зазоре (режим модификации); затем сканировался больший участок поверхности при пониженном напряжении на туннельном зазоре, для того чтобы зарегистрировать изменения, возникшие при первичном сканировании; далее исследовалась зависимость полученного изображения от параметров сканирования. Обозначим для определенности напряжение, при котором проводилась модификация, U_{mod} , а напряжение, при котором воспроизводились результаты модификации, U_{vis} .

На рис. 1, а представлено СТМ-изображение участка поверхности кремния размером 14.5×14.5 мкм, полученное при напряжении на туннельном зазоре $U_{\text{vis}} = -1.6$ В. Предварительно средняя часть этого участка размером 2.9×2.9 мкм сканировалась при $U_{\text{mod}} = -5.0$ В, т. е. подверглась модификации. Результат модификации наблюдается на представленном рисунке как возвышенность, по форме близкая к квадрату. При уменьшении U_{vis} до -0.9 В изображение искажается. Дальнейшее уменьшение напряжения на туннельном зазоре приводит к тому, что ток через систему становится меньше, чем назначенный туннельный ток (в данном случае 0.6 нА). При этом характер изображения меняется, модифицированный участок выглядит как совокупность отдельных структурных элементов (рис. 1, б, $U_{\text{vis}} = -0.3$ В).

Для установления особенностей „точечной“ модификации изображения поверхности Si/SiO₂ и определения минимально возможного размера модифицированного участка зонд СТМ фиксировался над определенной выбранной заранее точкой поверхности при напряжении модификации. На рис. 1, с представлено изображение поверхности, полученное после того, как зонд СТМ был установлен в центр участка, предназначенного для сканирования и находился там в течение 30 с при $U_{\text{mod}} = -5$ В. Картина модификации представляет собой в данном случае не единичную особенность, как можно было ожидать, а состоит из нескольких структурных элементов, образуя своеобразное поле пятен.

При увеличении масштаба наблюдения становится видно, что структурные элементы модифицированных участков имеют вид плоских ямок глубиной $0.5-2$ нм (рис. 2, а, с). Структурные элементы могут группироваться, причем на одном и том же изображении могут присутствовать фигуры разной формы (рис. 2, а). Мини-

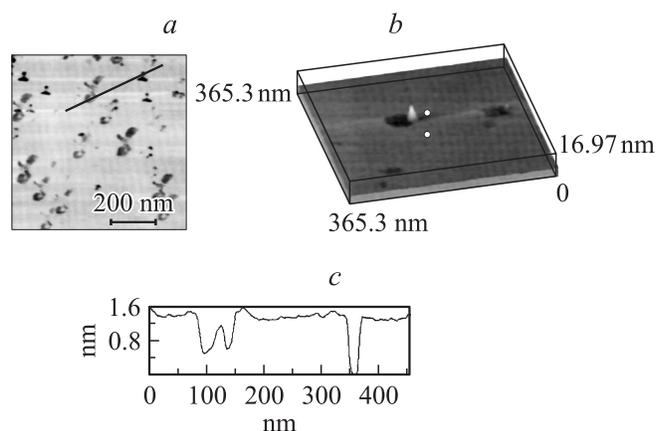


Рис. 2. Повторяющиеся структурные элементы модифицированного участка (а) и профиль поверхности вдоль линии на изображении (с). б — возникновение туннельного тока при увеличении напряжения сканирования, трехмерное представление: на изображении выброс — в системе регистрируется туннельный ток.

мальный размер структурного элемента, зарегистрированный в нашем эксперименте, составил ~ 1.5 нм.

Изображение структурных элементов в виде ямок нанометровой глубины получается в таком режиме работы СТМ, когда ток, протекающий через систему, меньше назначенного туннельного тока. Если увеличивать напряжение на туннельном зазоре, на изображении появляется резкий выброс, локализованный обычно на крае ямки. На рис. 2, *b* представлено трехмерное изображение участка, иллюстрирующее ситуацию, когда в системе начинает регистрироваться назначенный туннельный ток.

3. Обсуждение результатов

Анализируя полученные результаты, можно выделить основные особенности модификации поверхности кремния при отрицательном напряжении на образце.

Исследование кремния методом СТМ при $U_t > 3$ В приводит к модификации поверхности. Наблюдаемое изображение модифицированного участка сильно зависит от напряжения, при котором производится наблюдение. Из рис. 1 видно, что один и тот же участок может выглядеть и как возвышенность высотой ~ 500 нм, и как площадка, состоящая из мелких плоских ямок. Это позволяет предположить, что мы имеем дело не с истинным (геометрическим) рельефом, а с псевдоповерхностью.

Модифицированный участок состоит из отдельных структурных элементов, заполняющих площадь этого участка. Если модификация проводилась в одной точке, модифицированный участок представляет собой совокупность нескольких структурных элементов (рис. 1).

Места, в которых регистрируется назначенный туннельный ток, соответствуют структурным элементам модифицированного участка (рис. 2).

Сканирующий туннельный микроскоп представляет собой систему с обратной связью, автоматически поддерживающую назначенный туннельный ток. Если ток в системе становится меньше назначенного, зонд сближается с поверхностью вплоть до касания и в процессе сканирования скользит по поверхности. Этому способствует низкая степень шероховатости и высокая твердость, свойственные кремниевым образцам. Если при этом скорость сканирования превышает скорость срабатывания обратной связи, можно говорить о режиме, аналогичном режиму постоянной высоты (режим ошибки обратной связи). При этом режиме наблюдается не геометрический рельеф, а изменения протекающего тока.

Результаты экспериментов показывают, что модификация поверхности кремния носит дискретный характер, причем наблюдаемые особенности на поверхности („ямки“) соответствуют местам, благоприятным для протекания тока. Можно предположить, что это места, соответствующие каналам тока, индуцированным напряжением при сканировании. В работе [17] приведены аналогичные результаты, полученные при работе

на атомно-силовом микроскопе с проводящим зондом. Токовые каналы на изображении выглядят как объекты одинаковой формы и одного размера. Авторы статьи объясняют это тем, что отдельный токовый канал имеет поперечный размер меньше, чем радиус зонда, поэтому на самом деле видно изображение зонда, а не канала. В нашем случае подобное объяснение не подходит, так как на изображении наблюдались, как минимум, две группы одинаковых объектов. Подобие структурных элементов отмечалось также в статье [18], где было показано, что такие элементы имеют свойства квазинульмерных объектов (квантовых точек).

Пока трудно сказать, почему особенности на изображении выглядят в виде „ямки“, хотя являются местами облегченного протекания тока. Можно назвать по крайней мере три фактора, влияющие в данном случае на формирование контраста: напряжение сканирования, назначенный ток и скорость сканирования.

Неожиданным является факт, что модификация поверхности в одной точке приводит к появлению модифицированной области, многократно превышающей по площади размер зонда.

4. Заключение

Таким образом, в работе показано, что для изучения достаточно больших участков поверхности кремния может быть использован режим ошибки обратной связи. Использование данной методики позволило детально исследовать механизм модификации поверхности, вызванной приложенным напряжением, и визуализировать результаты модификации. Показано, что модификация поверхности при отрицательной полярности на образце обусловлена формированием в пленке окисла наноразмерных каналов протекания тока.

Работа выполнена при частичной поддержке грантом РФФИ № 02-08-12042-офи и Программой фундаментальных исследований президиума РАН „8-П“.

Список литературы

- [1] А.А. Бухараев, А.В. Назаров, В.Ю. Петухов, К.М. Салихов. Письма ЖТФ, **16**, 8 (1990).
- [2] М.С. Хайкин, А.М. Трояновский, В.С. Эдельман, В.М. Пудалов, С.Г. Семенчинский. Письма ЖЭТФ, **44**, 193 (1988).
- [3] V.V. Levenets, V.I. Beklemishev, E.P. Kirilenko, I.I. Makhonin, A.Yu. Trifonov, B.A. Loginov, V.V. Protasenko. Jpn. J. Appl. Phys., **34**, 1723 (1995).
- [4] Д.В. Вялых, С.И. Федосеев. ФТП, **33**, 708 (1999).
- [5] J.A. Dagata, J. Schneir, H.H. Harary, C.J. Evans, M.T. Postek, J. Bennet. Appl. Phys. Lett., **56**, 2001 (1990).
- [6] Л.Н. Болотов, В.А. Козлов, И.В. Макаренко, А.Н. Титков. ФТП, **27**, 1375 (1993).
- [7] J.W. Lyding, T.-C. Shen, J.S. Hubacek, J.R. Tucker, G.C. Abeln. Appl. Phys. Lett., **64**, 2010 (1994).
- [8] J.A. Dagata, F. Perez-Murano, C. Martin, H. Kuramochi, H. Yokoyama. J. Appl. Phys., **99**, 2386 (2004).

- [9] G. Abadal, F. Perez-Murano, N. Barniol, X. Aymerich. Appl. Phys. A, **66**, 791 (1998).
- [10] M. Porti, M. Nafria, M.C. Blum, X. Aymerich, S. Sadewasser. Surf. Sci., **532–535**, 727 (2003).
- [11] K. Ohmori, Z. Shigeaki, Y. Yasuda. Appl. Surf. Sci., **162–163**, 395 (2000).
- [12] E.T. Enikov, A. Palaria. Nanotechnology, **15**, 1211 (2004).
- [13] В.М. Корнилов, А.Н. Лачинов. ФТП, **37**, 323 (2003).
- [14] V.M. Kornilov, A.N. Lachinov. Microelectron. Eng., **69**, 399 (2003).
- [15] H. Watanabe, K. Fujita, M. Ichikawa. Appl. Phys. Lett., **72**, 1987 (1998).
- [16] А.В. Юхневич, О.П. Лосик, В.Л. Кузнецов, А.В. Паненко. Поверхность, № 8, 95 (2001).
- [17] K. Kuuno, K. Kita, A. Toriumi. Appl. Phys. Lett., **86**, 063 510 (2005).
- [18] V.M. Kornilov, A.N. Lachinov. Phys. Low-Dim. Structur., **1/2**, 145 (2004).

Редактор Л.В. Шаронова

Scanning tunneling microscopy of a Si–SiO₂ structure: approach of the feed back fault regime for surface study

V.M. Kornilov, A.N. Lachinov, B.A. Loginov, V.A. Bepalov**

Institute of Molecular and Crystal Physics,
Ufa Research Center,
Russian Academy of Sciences,
450075 Ufa, Russia

* Moscow Institute of Electronic Technology
(Technical University),
124498 Zelenograd, Russia

Abstract The paper presents experimental results obtained by scanning tunneling microscopy (STM) for a silicon surface with native oxide. It was established that the modification of the STM image during measurements has been induced by leakage path appearing in the SiO₂ layer. The possibility to use the feed back fault regime for making and study of leakage paths was proved technologically. This technique allows to study the peculiarities of current channel forming and thereby to control the electrical properties of nanodimensional SiO₂ layers.