

10; 11; 12

© 1992

ЛОКАЛЬНАЯ МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ
ИМПЛАНТИРОВАННОГО КРЕМНИЯ С ПОМОЩЬЮ
СКАНИРУЮЩЕГО ТУННЕЛЬНОГО МИКРОСКОПАА.А. Бухарев, Ф.Ф. Габайдуллин,
А.В. Назаров, Н.В. Бердунов

Сканирующие туннельные микроскопы (СТМ) в последнее время все шире используются для локальной модификации поверхности металлов и полупроводников [1]. Как правило, при этом используются эффекты, связанные с локальным воздействием пучка эмиссионных электронов иглы СТМ на поверхность. За счет малого радиуса закругления иглы СТМ удается формировать на поверхности структуры нанометрового размера. Существенно, что СТМ позволяет не только воздействовать на поверхностный слой вещества, но и исследовать микротопографию и электронные свойства поверхности до и после модификации.

В настоящей работе приводятся первые экспериментальные результаты по модификации и исследованию с помощью СТМ кремния, поверхность которого предварительно аморфизовалась посредством ионного облучения. Такой материал может оказаться перспективным для нанолитографии.

Исследования проводились на созданном нами компьютерном СТМ, в котором для управления и сбора данных использовался персональный компьютер PC 16/XT. СТМ мог работать в режимах получения СТМ-изображения при постоянном токе ~ 1 нА, литографии и спектроскопии. В последнем случае при разорванной обратной связи и постоянном зазоре между иглой и образцом в течении 50 мс измерялась вольт-амперная характеристика (ВАХ). Для локальной модификации поверхности на иглу СТМ вместо линейно изменяющегося напряжения, используемого при измерении ВАХ, в течении 8 мс подавалось отрицательное напряжение величиной 25 В. Использовался также трехимпульсный режим, когда в одной и той же точке поверхности вначале измерялась ВАХ, затем подавался модифицирующий импульс, после чего вновь измерялась ВАХ. СТМ имел пьезодвигатель типа „трипод“, собранный из пьезокерамических элементов марки ПКР-7М, имеющих в сечении крестообразную форму и закрепленных на основании из плавленого кварца, что обеспечивало достаточную жесткость конструкции. Максимальное поле сканирования 9×9 мкм. Пространственное разрешение по нормали 1 Å, в плоскости образца - 10 Å. Радиус закругления кончика вольфрамовой иглы СТМ составлял, по данным электронной микроскопии, порядка 300 Å.

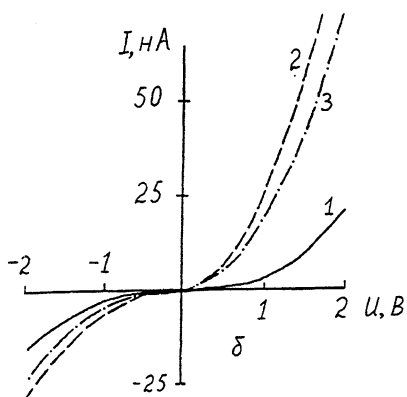
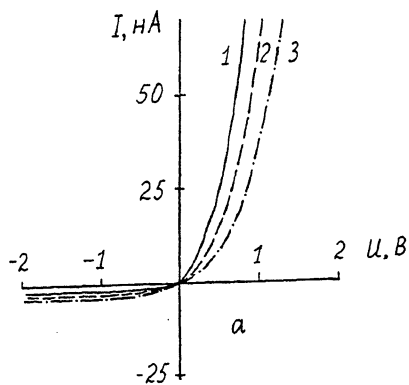


Рис. 1. ВАХ, полученные с помощью СТМ с различных участков поверхности Si : а - исходный неимплантированный кремний дырочного типа при напряжениях начального смещения: 1 - 0.25, 2 - 0.5, 3 - 0.75 В; б - имплантированный кремний: аморфизованный (1), рекристаллизованный ламповым отжигом (2), после модифицирующего импульса СТМ (3).

Монокристаллический Si дырочного типа КДБ-1(100) облучался на ускорителе ИЛУ-3 ионами Sb^+ с энергией 30 кэВ и дозой 10^{15} ион/см², превышающей порог аморфизации. Толщина аморфизованного слоя $a-Si$ при таком режиме облучения составляет около 200 Å [2]. Поскольку все измерения проводились на воздухе, для удаления с поверхности кремния окисной пленки и предотвращения последующего окисления перед началом каждого измерения проводилась пассивация поверхности Si известным методом гидрогенизации в атмосфере азота [3].

ВАХ исходного неимплантированного Si имели характерную форму, наблюдавшуюся ранее на Si при СТМ исследованиях на воздухе [3]. Выпрямляющий эффект обязан изгибу зон вблизи поверхности кремния и хорошо описывается теорией барьеров Шоттки. Характерная зависимость формы ВАХ от начального напряжения смещения между иглой образцом, задаваемого перед измерением ВАХ, определяется увеличением зазора между иглой и поверхностью с ростом напряжения смещения при включенной обратной связи. Бомбардировка ионами Sb^+ не приводила к заметному увеличению неровностей на СТМ-изображении поверхности Si . Однако ВАХ

после облучения существенно изменялась: она становилась симметричной и более пологой (рис. 1, б). Это объясняется характерным при аморфизации кремния существенным уменьшением (на 3–6 порядков) удельной проводимости поверхности S_i и наличием большого числа поверхностных состояний, связанных с дефектами структуры, созданными ионной бомбардировкой. Импульсный отжиг ксеноновыми лампами на установке УОЛ-П-1 в режиме [4], обеспечивающем рекристаллизацию имплантированного кремния (плотность энергии более 1 Дж/см^2 , температура поверхности выше $600 \text{ }^\circ\text{C}$) приводит к существенному увеличению крутизны ВАХ (рис. 1, б). Это связано со значительным увеличением (на несколько порядков) удельной проводимости рекристаллизованного слоя по сравнению с аморфной при фазовом переходе $a\text{-}Si$ в $c\text{-}Si$ [5].

Измерения ВАХ, проведенные до и после воздействия модифицирующего импульса с иглы СТМ показали, что в месте воздействия электронного пучка происходит такая же трансформация ВАХ, как в случае лампового отжига (рис. 1, б) при переходе $a\text{-}Si$ в $c\text{-}Si$. При сканировании в режиме постоянного тока в месте воздействия импульса наблюдался выступ высотой 300 \AA (рис. 2), а в отдельных случаях до 600 \AA , с размерами у основания выступа $\sim 0.3 \text{ мкм}$. Измерения ВАХ рядом с выступом и на других участках в пределах данного СТМ-изображения показали, что трансформация ВАХ, связываемая с переходом $a\text{-}Si$ в $c\text{-}Si$, происходит только в месте воздействия импульса. Очевидно в месте импульсного воздействия тока происходит нагрев аморфного слоя до температуры выше порога рекристаллизации ($600 \text{ }^\circ\text{C}$), что и приводит к фазовому переходу $a\text{-}Si$ в $c\text{-}Si$.

Известно, что при работе СТМ в режиме постоянного тока возрастание тока в цепи игла-образец (например, при существенном уменьшении сопротивления образца) компенсируется увеличением зазора между иглой и поверхностью. Однако если через зазор между иглой и поверхностью ток идет только за счет туннелирования, из-за сильной зависимости туннельного тока от величины зазора даже при 1000-кратном увеличении тока в цепи зазор увеличится только на 3 \AA [6]. Имеется, однако, целый ряд факторов, свидетельствующих о том, что в нашем случае, так же как и в [7], существенная часть тока в зазоре обязана, видимо, надбарьерному процессу, а именно, термоэлектронной эмиссии Шоттки [8, 9]. В этом случае зависимость тока от расстояния игла-поверхность значительно слабее, чем при туннельном механизме прохождения электронов сквозь зазор. Необходимым условием для реализации такого процесса является низкая работа выхода поверхностей, образующих зазор. К существенному снижению работы выхода, как известно, приводит взаимодействие поверхности металлов с атмосферой или наличие неконтролируемых загрязнений на поверхности [10], а также гидрогенизация поверхности Si [11]. Все эти факторы присутствуют в нашем эксперименте.

Количественные оценки, проведенные нами с использованием известных уравнений, описывающих термоэлектронную эмиссию

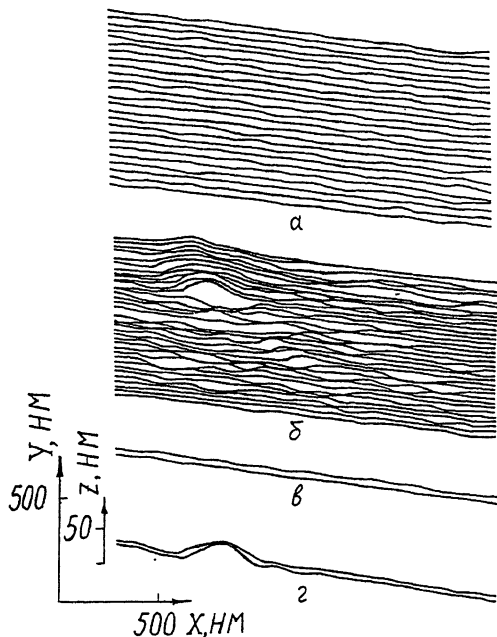


Рис. 2. Микролитография поверхности имплантированного кремния с помощью СТМ: а – СТМ-изображение исходной поверхности, б – СТМ-изображение того же участка после воздействия модифицирующего импульса (25 В, 8 мс), одиночные СТМ-профили до (в) и после (г) воздействия импульса.

Шоттки [9], показали, что при эффективной высоте потенциального барьера в зазоре 0.3 эВ и работах выхода W и S_i не более 1 эВ, увеличение тока в цепи игла-образец в несколько раз (за счет уменьшения удельного сопротивления поверхностного слоя при переходе $a-S_i$ в $c-S_i$) может привести к отводу иглы СТМ от рекристаллизованной поверхности на несколько сот ангстрем.

Таким образом, с помощью СТМ на поверхности S_i , аморфизованной с помощью ионной имплантации, можно формировать субмикронные участки $c-S_i$ с высокой проводимостью, что представляет несомненный интерес для решения задач нанотехнологии и микроэлектроники.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Неволин В.К., Хлебников Ю.Б., Шермергор Т.Д. // Электронная техника. 1989. Серия 3. В. 5 (134). С. 3-9.
- [2] Руссел Х., Руге И. Ионная имплантация. М.: Наука, 1983. С. 360.
- [3] Kaiser W.J., Bell L.D., Hetch M.H., Grunthaler F.J. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1988. V. 6. N 2. P. 519-523.
- [4] Fattachov Ya.V., Bayazitov R.M., Khaibullin I.B., Misyurov E.M., Mchitarov V.A. Physical Research. V. 8. Energy Pulse and Particle Beam Modification of Materials. Berlin: Academy-Verlag, 1988. P.256-261.
- [5] Двуреченский А.В., Качурин Г.А., Нидаев Е.В., Смирнов Л.С. Импульсный отжиг полупроводниковых материалов. М.: Наука, 1982. С. 280.
- [6] Salvan F., Humbert A., Dumas P., Thibaudau S. // Ann. Phys. Fr. 1988. V. 13. N 3. P. 133-142.
- [7] Jahanmir J., West H.E., Hsieh S. // J. Appl. Phys. 1989. V. 65. N 5. P. 2064-2068.
- [8] Jahanmir J., West H. // Appl. Lett. 1988. V. 52. N 4. P. 2086-2089.
- [9] Simmons J.G. // J. Appl. Phys. 1964. V. 35. N 8. P. 2472-2480.
- [10] Зенгуил Э. Физика поверхности. М.: Мир. 1990. С. 536.
- [11] Monch W. Chemistry and Physics of Solid Surface, V. 5. Springer-Verlag. 1984. P. 501.

Казанский
физико-технический
институт
Е.К. Завойского

Поступило в Редакцию
12 февраля 1992 г.