

Исследование микротопографии поверхностей SiO_2 и Si межфазной границы Si/SiO₂ в структурах SIMOX методом сканирующей туннельной микроскопии

© Д.В. Вялых, С.И. Федосеенко

Научно-исследовательский институт физики,
198904 Петродворец, Россия

(Получена 20 ноября 1998 г. Принята к печати 23 декабря 1998 г.)

Методом сканирующей туннельной микроскопии проведены исследования микротопографии поверхностей кремния и окисла кремния в структурах SIMOX. Для этой цели разработана методика, позволяющая применить метод сканирующей туннельной микроскопии для изучения неоднородностей на межфазной границе Si/SiO₂.

Показано, что рельеф поверхности кремния в структурах SIMOX является более гладким по сравнению с рельефом поверхности окисла. Неоднородности, которые наблюдаются на межфазной границе Si/SiO₂, связаны с процессом имплантации ионов кислорода в монокристалл кремния. Проведено сравнение неоднородностей на поверхностях SiO₂ и Si на межфазной границе Si/SiO₂ при стандартном и высокотемпературном окислении монокристалла кремния.

Одним из путей увеличения быстродействия полупроводниковых приборов является уменьшение толщины диэлектрика в структуре металл–окисел–полупроводник (МОП). При этом особенно важно контролировать структурное совершенство границы раздела полупроводник/диэлектрик, знать природу и свойства различных дефектов (центров захвата электронов, дырок и т.п.). В последние годы большое внимание уделяется структурам кремний на изоляторе (КНИ) [1], являющимся перспективными для полупроводниковых приборов, стойких к радиационному излучению, и обладающим высоким быстродействием. К обширному классу структур КНИ относятся слоистые системы SIMOX (Separation by IMplantation of OXygen), полученные в сложном технологическом процессе, в результате которого в кремниевой подложке образуется слой "захороненного" оксида кремния (buried oxide), так называемый слой BOX. Нужно отметить, что слой "захороненного" SiO₂ существенно отличается по своей структуре и электрофизическим свойствам [2,3] от оксида кремния, полученного путем термического окисления кремниевой подложки.

Как показывают исследования структур SIMOX методом фотоинжекции [4], в слое "захороненного" оксида присутствуют глубокие и мелкие ловушки электронов, которые не наблюдаются в термическом окисле. Эти ловушки связываются с наличием кластеров кремния в слое "захороненного" оксида, которые находятся в непосредственной близости от границы раздела Si/SiO₂. Одна из моделей, описывающих неоднородности на границе раздела Si/SiO₂, предполагает [4,5], что размеры кластеров кремния составляют несколько нанометров. Плотность и размеры этих кластеров во многом зависят от процессов имплантации ионов кислорода и высокотемпературного отжига. Кластеры существенно влияют на структурное совершенство границы раздела и могут быть зарегистрированы структурно-чувствительными методами. В настоящей работе была разработана методика,

которая позволила нам применить метод сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) для исследования размеров неоднородностей на поверхностях "захороненного" оксида кремния и кремния на МФГ Si/SiO₂ в структурах SIMOX.

Эксперимент

На рис. 1 изображены схемы исследованных в настоящей работе образцов SIMOX, WITNESS, THERMAL OX и стрелками показаны изучаемые поверхности. Показанная на рис. 1, а структура SIMOX является результатом имплантации ионов кислорода в подложку кремния, в результате чего образуется слой "захороненного" оксида кремния, над которым располагается тонкий слой аморфизированного кремния.

Задача, стоящая перед нами — исследовать неоднородности на границах раздела монокристалл Si/"захороненный" SiO₂ и "захороненный" SiO₂/аморфизованный Si. Поскольку метод СТМ является методом непосредственного зондирования поверхности, для исследования неоднородностей поверхности "захороненного" SiO₂ необходимо убрать верхний аморфизированный слой Si. Чтобы

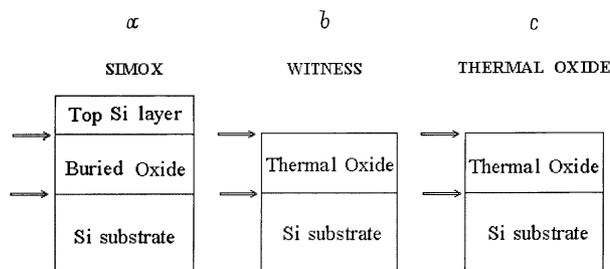


Рис. 1. Схема структуры SIMOX (а), структуры WITNESS (b) (слой SiO₂ выращен при $T = 1325^\circ\text{C}$), структуры THERMAL OXIDE (c) (слой SiO₂ выращен при $T = 1100^\circ\text{C}$).

получить информацию о структуре границы раздела монокристалл Si/"захороненный" SiO₂, нужно убрать как слой аморфизованного Si, так и слой "захороненного" SiO₂. Для удаления верхнего слоя аморфизованного кремния использовался метод сухого (серия образцов "DRY") и влажного (серия образцов "WET") травления. Можно ожидать, что любой из этих методов может изменить структуру поверхности "захороненного" SiO₂ и даже повлиять на морфологию границы раздела монокристалл Si/"захороненный" SiO₂. В работе мы попытались сравнить результаты травления этими двумя методами. Чтобы получить доступ к поверхности кремния использовался обычный метод травления окисла в 10%-ном растворе плавиковой кислоты.

Для применения метода СТМ необходимо иметь однородную проводящую поверхность. Поэтому на поверхности исследуемых образцов термически напылялся слой золота толщиной 15 нм. Специальные эксперименты показали, что напыление золота на поверхности кремния и окисла кремния не вносит изменений в структуру шероховатости поверхности более 1 нм.

В данной работе для изучения микротопографии поверхностей кремния и оксида кремния использовался СТМ (изготовленный в лаборатории Физической электроники кафедры ЭТТ НИИФ СПбГУ на основе пьезокерамики ПКР-6), позволяющий исследовать проводящую поверхность на воздухе. Калибровка прибора проводилась с использованием дифракционной решетки (2400 штрихов/мм), высокоориентированного пиролитического графита и кремниевой ступеньки высотой 22 нм. Разрешение сканирующего туннельного микроскопа для данных исследований составило 0.1 нм по нормали к поверхности и 1 нм в латеральном направлении.

Для получения количественных характеристик поверхности разработана программа, позволяющая математически обрабатывать полученные результаты и рассчитывать размеры средней неоднородности поверхности.

В эксперименте мы использовали коммерчески доступные образцы SIMOX. Технологический процесс приготовления SIMOX заключался в однократной имплантации ионов кислорода (образцы серии "С") с энергией ~ 200 кэВ и дозой ~ $1.8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ в монокристалл кремния при $T = 600^\circ\text{C}$, с последующим высокотемпературным отжигом при $T = 1325^\circ\text{C}$ в атмосфере $\text{Ar} + 1\% \text{O}_2$ в течение 5 ч. В монокристалле кремния образуется однородный слой "захороненного" окисла кремния толщиной ~ 400 нм. Над слоем "захороненного" окисла остается аморфизованный слой кремния толщиной ~ 200 нм [2,5]. Для того чтобы выяснить, каким образом влияет высокотемпературный отжиг в атмосфере кислорода при $T = 1325^\circ\text{C}$ на структуру МФГ Si/SiO₂, мы провели исследования неоднородностей поверхностей кремния и "термического" окисла кремния структуры WITNESS (рис. 1, b). Эта структура получена при окислении чистой поверхности кремния в тех же условиях, в каких проводился высокотемпературный отжиг при изготовлении SIMOX, т.е. при $T = 1325^\circ\text{C}$ в

атмосфере $\text{Ar} + 1\% \text{O}_2$ в течение 5 ч. Исследования структуры WITNESS позволяли получить информацию о влиянии высокотемпературного отжига на МФГ Si/SiO₂. Также мы хотели сравнить неоднородности на МФГ Si/SiO₂ у структур SIMOX и структуры THERMAL OX (рис. 1, c), полученной по стандартной технологии термического окисления монокристалла кремния при $T = 1100^\circ\text{C}$. Толщина слоя окисла у структуры WITNESS составляла ~ 90 нм, а у структуры THERMAL OX ~ 400 нм.

Результаты

На рис. 2–5 приведены типичные микротопографии поверхностей некоторых из исследованных образцов. На рисунках показано трехмерное изображение поверхности в черно-белой шкале (более высоким местам соответствует более светлый цвет) с выделенным направлением, а также профиль поверхности вдоль выделенного линией направления. Итоговые оценки высоты и латеральные размеры неоднородностей для кремния и окисла кремния структур SIMOX, WITNESS, THERMAL OX сведены в таблице.

На рис. 2 приведена микротопография поверхности кремния структуры SIMOX серии "С DRY". На поверхности присутствуют "нерегулярные" по размерам неоднородности высотой ~ 6 нм. На рис. 3 приведена микротопография поверхности "захороненного" окисла кремния структуры SIMOX серии "С DRY". Видно, что на поверхности присутствует большое количество "регулярных" неоднородностей продолговатой формы с перепадами по высоте ~ 10 нм. По сравнению с предыдущим изображением поверхности кремния можно сказать, что поверхность окисла является менее гладкой. На рис. 4 показано изображение микротопографии поверхности кремния образца WITNESS. В правом верхнем углу видно небольшое возвышение высотой ~ 6 нм и протяженностью ~ 90 нм. Видны небольшие неоднородности полушириной ~ 10 нм и высотой ~ 3 нм. Перепады по высоте сравнительно небольшие, поэтому можно сказать, что поверхность более гладкая по сравнению с упомянутыми ранее. На рис. 5 приведены изображения

Средние размеры неоднородностей на поверхности кремния и окисла кремния, нм

Тип образца	Поверхность Si		Поверхность SiO ₂	
	высота	латеральный размер	высота	латеральный размер
SIMOX "С WET"	6.3	~ 40	16.2	~ 25
SIMOX "С DRY"	5.1	~ 35	11.2	~ 25
WITNESS	3.7	~ 50	5.9	~ 35
THERMAL OX	5.2	~ 45	10.9	~ 30

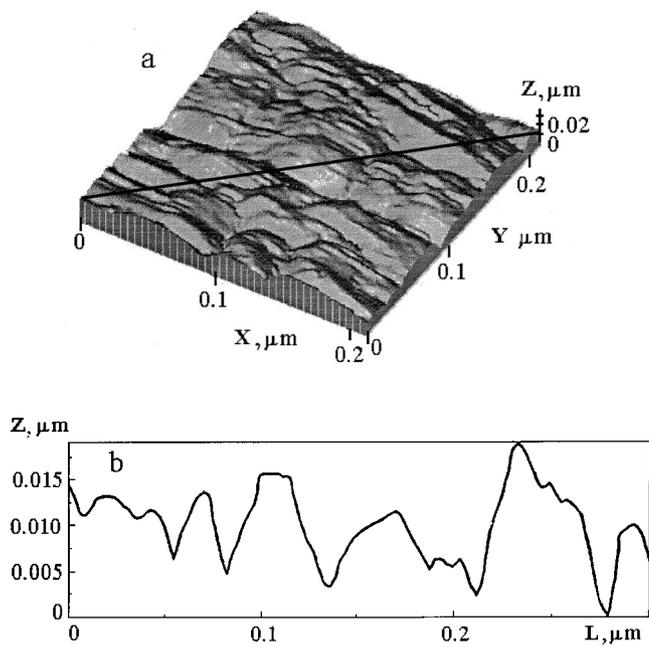


Рис. 2. *a* — трехмерное изображение поверхности кремния структуры SIMOX серии "C DRY". Линией отмечено выделенное направление L . *b* — профиль поверхности вдоль выделенного направления L .

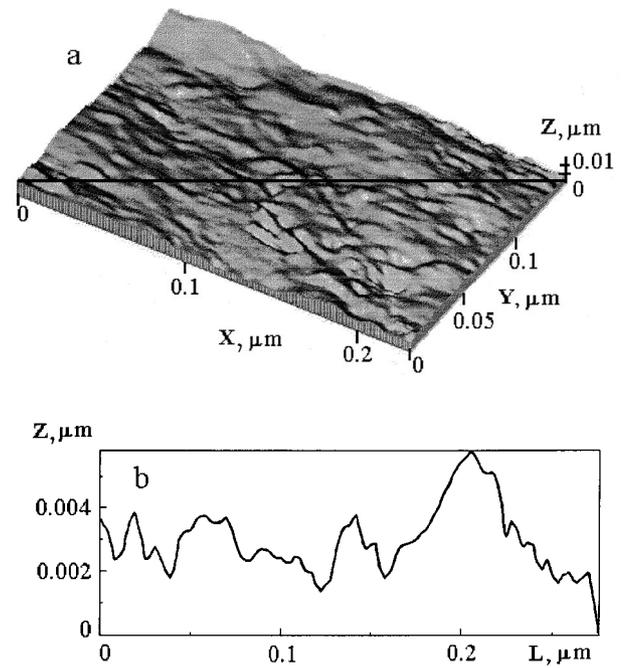


Рис. 4. *a* — трехмерное изображение поверхности кремния структуры WITNESS. Линией отмечено выделенное направление L . *b* — профиль поверхности вдоль выделенного направления L .

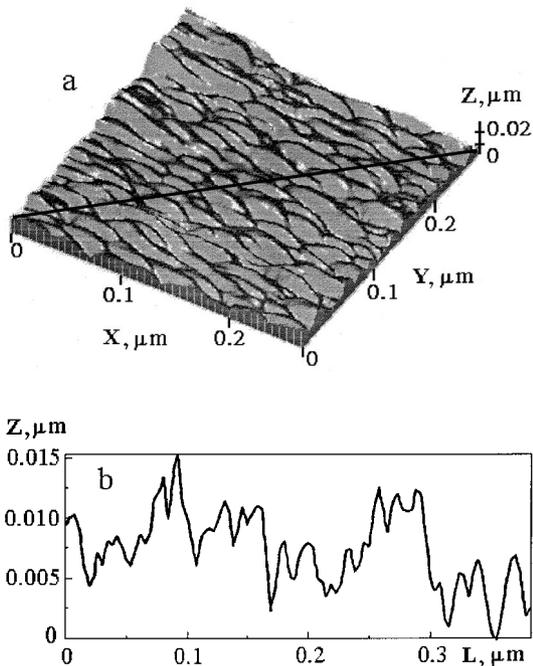


Рис. 3. *a* — трехмерное изображение поверхности окисла кремния структуры SIMOX серии "C DRY". Линией отмечено выделенное направление L . *b* — профиль поверхности вдоль выделенного направления L .

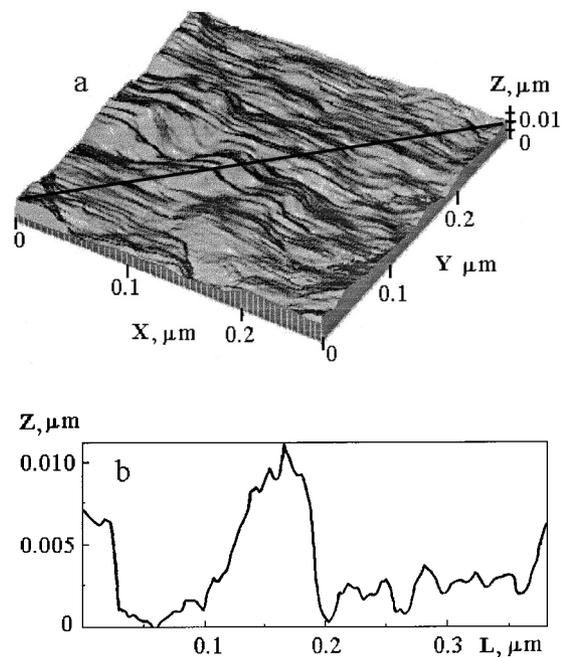


Рис. 5. *a* — трехмерное изображение поверхности окисла кремния структуры WITNESS. Линией отмечено выделенное направление L . *b* — профиль поверхности вдоль выделенного направления L .

поверхности оксида кремния образца WITNESS. На поверхности присутствуют неоднородности полушириной ~ 15 нм и высотой ~ 4 нм. На общем фоне можно увидеть несколько "холмов" высотой ~ 10 нм и полушириной ~ 35 нм.

При изучении всех полученных микротопографий поверхностей кремния и оксида кремния можно сказать, что поверхность кремния в структурах SIMOX на границе Si/"захороненный" SiO₂ является более гладкой по сравнению с поверхностью "захороненного" оксида кремния, и размер средней неоднородности по высоте поверхности кремния для всех исследованных образцов примерно в 2 раза меньше, чем размер средней неоднородности поверхности "захороненного" оксида кремния. Мы предполагаем, что более гладкий рельеф поверхности кремния может быть действительно обусловлен отрывом кластеров кремния, что способствует уменьшению механического напряжения на границе Si/"захороненный" SiO₂.

При производстве структур SIMOX используется высокотемпературный отжиг в атмосфере кислорода. Очевидно, что отжиг может очень сильно повлиять на структуру поверхности как оксида, так и МФГ Si/SiO₂ "захороненный": может образоваться большое количество различных неоднородностей. Поэтому в современных технологиях при изготовлении полупроводниковых структур стараются использовать по возможности более низкие температуры, так как поверхность в этом случае будет более гладкой. Очевидно, что чем меньше размеры неоднородностей по высоте и чем больше латеральные размеры, тем поверхность слоя оксида будет менее разветвленной. В наших исследованиях мы использовали образец WITNESS, чтобы посмотреть, не вносит ли дополнительные дефекты высокотемпературный отжиг при $T = 1325^\circ\text{C}$ в атмосфере кислорода в структуру поверхностей как кремния, так и оксида кремния. Из рис. 4 и 5, видно, что поверхности кремния и оксида кремния у WITNESS более гладкие, чем у структур SIMOX. Следовательно, значительно большие неоднородности, которые мы наблюдаем у SIMOX, нельзя связать с процессом высокотемпературного отжига. Скорее это связано с процессом имплантации высокоэнергетических ионов кислорода в монокристалл кремния.

Вполне логично было бы сравнить неоднородности на МФГ у структур SIMOX с неоднородностями образца, полученного при стандартном окислении монокристалла кремния при $T = 1100^\circ\text{C}$. Для этой цели исследовалась микротопография образца THERMAL OX, с толщиной слоя оксида ~ 400 нм. Было показано (см. таблицу), что неоднородности у структур SIMOX сравнимы по высоте с неоднородностями образца THERMAL OX.

Таким образом, в настоящей работе были проведены исследования микротопографий поверхностей кремния и оксида кремния в структурах SIMOX, а также в структурах, полученных термическим окислением монокристалла кремния при $T = 1325$ и 1100°C , методом сканирующей туннельной микроскопии с разрешением

0.1 нм по нормали к поверхности и 1 нм в латеральном направлении. Подводя итог проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы.

1. Геометрический рельеф поверхности кремния в структурах SIMOX на границе Si/"захороненный" SiO₂ является более гладким по сравнению с рельефом поверхности "захороненного" оксида кремния. Для всех исследованных образцов размер средней неоднородности по высоте на поверхности кремния примерно в 2 раза меньше, чем на поверхности "захороненного" оксида. Мы предполагаем, что более гладкий рельеф поверхности на МФГ Si/SiO₂ обуславливается отрывом кластеров кремния, что уменьшает механическое напряжение на границе Si/SiO₂.

2. Неоднородности, которые мы наблюдаем на МФГ у структур SIMOX являются результатом процесса имплантации ионов кислорода в монокристалл кремния.

3. При стандартной технологии термического окисления кремния при $T = 1100^\circ\text{C}$ на МФГ Si/SiO₂ присутствуют неоднородности, сравнимые по высоте с неоднородностями на МФГ у структур SIMOX.

Авторы благодарны проф. В.К. Адамчук за обсуждение результатов работы.

Настоящая работа выполнена в рамках ГНТП "Перспективные технологии и устройства микро- и нанoeлектроники" (проект № 039.04.223/57/2-3/1-95) и гранта № 95-0-7.1-160 Конкурсного центра фундаментального естествознания при Санкт-Петербургском государственном университете.

Список литературы

- [1] J.P. Colinge. *Silicon-on-Insulator Technology: Materials to VLSI* (Kluwer Academic Pub., Notwell, MA 1991).
- [2] A.G. Revesz, G.A. Brown, H.L. Hughes. *J. Electrochem. Soc.*, **140**, 3222 (1993).
- [3] V.V. Afanas'ev, A.G. Revesz, G.A. Brown, H.L. Hughes. *J. Electrochem. Soc.*, **141**, 2801 (1994).
- [4] S.I. Fedoseenko, V.K. Adamchuk, V.V. Afanas'ev. *J. Microelectronic Engin.*, **22**, 367 (1993).
- [5] S.W. Crowder, P.B. Griffin, J.D. Plummer. *J. Appl. Phys. Lett.*, **65**, 1698 (1994).

Редактор В.В. Чалдышев

A scanning tunneling microscopy study of the microtopography of SiO₂ and Si surfaces of Si/SiO₂ interface in SIMOX structures

D.V. Vyalykh, S.I. Fedoseenko

Scientific-Research Institute of Physics,
198904 Petrodvorets, Russia