

10; 11

© 1990

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ИМПЛАНТИРОВАННОГО КРЕМНИЯ С ПОМОЩЬЮ СКАНИРУЮЩЕГО ТУННЕЛЬНОГО МИКРОСКОПА

А.А. Бухарев, А.В. Назаров,
В.Ю. Петухов, К.М. Салихов

Сканирующие туннельные микроскопы (СТМ) благодаря их высокому разрешению и сравнительной простоте находят все более широкое применение для исследования микротопографии поверхности металлов и полупроводников [1-3]. Несомненный интерес представляет использование СТМ для изучения изменений поверхности проводящих сред, которые вызваны ионной бомбардировкой. Сюда относятся такие явления как ионное распыление и травление поверхности, процессы дефектообразования и распухания поверхностных слоев после воздействия потока ионов.

В настоящей работе приводятся первые экспериментальные результаты, демонстрирующие возможности СТМ для исследования поверхности Si , подвергнутого бомбардировке ионами группы железа (Fe^+ , Co^+ , Ni^+) с энергией 40 кэВ и дозами от $1.25 \cdot 10^{17}$ до $2.2 \cdot 10^{18}$ ион/см². Измерения проводились на сканирующем туннельном микроскопе РТП-1 с разрешением не хуже 1 нм и максимальными размерами исследуемого участка поверхности $6.7 \cdot 6.2$ мкм. СТМ работал на воздухе в режиме постоянного туннельного тока, значения которого составляли порядка 1 нА. Напряжение между иглой и образцом подбиралось экспериментально так, чтобы электронная схема обратной связи для поддержания постоянного туннельного тока работала стабильно, без срывов в течение всего периода измерения. Как правило оно задавалось в пределах от 200 до 600 мВ. Характерно, что, за редким исключением, стабильное изображение поверхности неимплантированного Si удалось получить только после предварительной обработки пластины Si в 30 % растворе HF в течение 2-3 с для снятия окисной пленки SiO_2 . В то же время устойчивое изображение имплантированных поверхностей Si удавалось получать без какой-либо предварительной обработки образцов. Время записи одного скана на графопостроителе Н-307 составляло 7 сек. Смещение одного скана относительно другого (по оси y) было задано в 120 Å. Калибровка чувствительности прибора в горизонтальной плоскости (x, y) осуществлялась путем записи изображения металлизированной поверхности оптической дифракционной решетки, имеющей шаг 1200 штр/мм. По вертикальной оси z калибровка проводилась с помощью ступеньки известной глубины, полученной

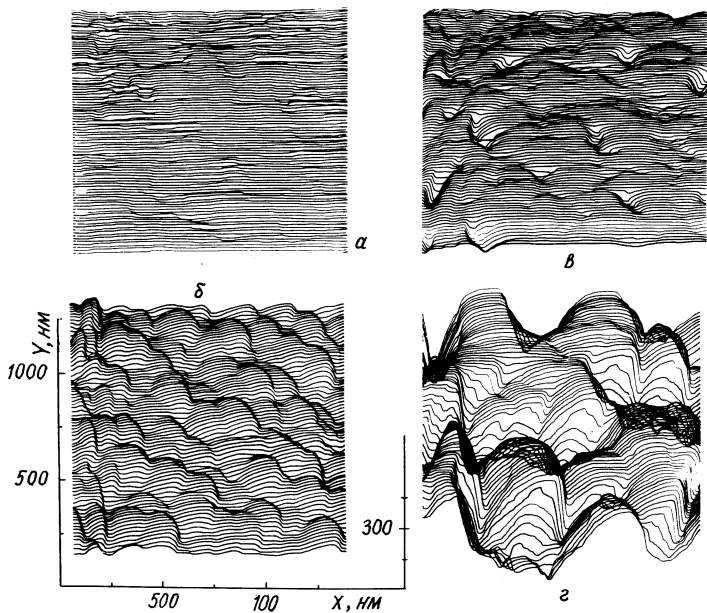


Рис. 1. Микротопографическое изображение участка поверхности кремния размером $1.2 \cdot 1.3$ мкм: а - по имплантации, б - после имплантации Co^+ , $6.24 \cdot 10^{17}$; в - Fe^+ , $5 \cdot 10^{17}$; г - Fe^+ , $2.2 \cdot 10^{18}$ ион/см².

на *Si* методом фотолитографии. Игла СТМ изготовлялась из вольфрамовой проволоки диаметром 0.2 мм путем электрохимического травления в 4 % водном растворе КОН.

В качестве исходных образцов использовались пластины монокристаллического *Si* типа ЭКДБ-10 с ориентацией (111), полированные химикодинамическим методом. До имплантации максимальная высота неровностей на поверхности, зарегистрированных с помощью СТМ, не превышала 25 нм (рис. 1,а) и определялась очевидно качеством полировки поверхности.

Облучение ионами металлов дозами от 1.25 до $3 \cdot 10^{17}$ ион/см² не давало существенных изменений в изображении поверхности *Si*. При дальнейшем увеличении дозы облучения на поверхности *Si*, имплантированного ионами Co^+ и Ni^+ появлялись неровности диаметром до 250 нм и высотой от 40 до 100 нм (так называемая колончатая структура). Характерно, что высота микрорельефа росла с увеличением дозы облучения (рис. 2), а края этих выступов становились все более крутыми. Для образцов, имплантированных ионами Fe^+ , первые заметные следы ионной бомбардировки проявлялись при дозе $5 \cdot 10^{17}$ ион/см² в виде отдельных провалов диамет-

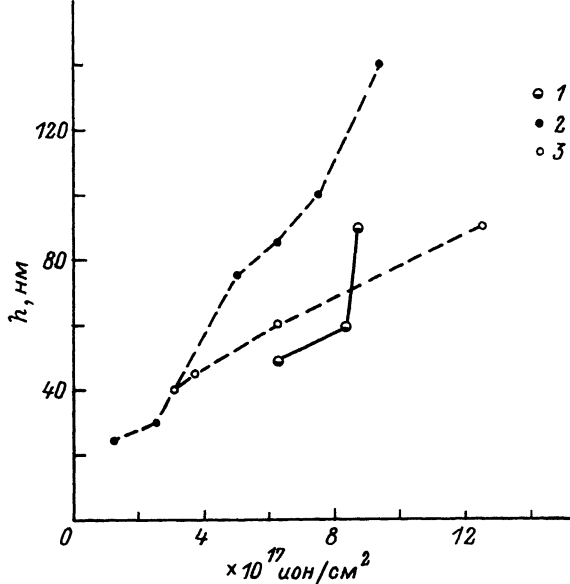


Рис. 2. Зависимость максимальных значений высоты микрорельефа на поверхности кремния от дозы облучения (1 - Ni^+ , 2 - Fe^+ , 3 - Co^+).

ром 80–140 нм, глубиной до 100 нм, на расстоянии 100–600 нм друг от друга (рис. 1, в). Дальнейшее увеличение дозы облучения приводило к возрастанию глубины микрорельефа (рис. 2).

Среди исследованных образцов наиболее выраженный микрорельеф с перепадами высоты до 300 нм наблюдался у Si после облучения ионами Fe^+ дозой $2.2 \cdot 10^{18}$ ион/см² (рис. 1, г). Во время облучения этот образец в отличие от остальных специально подогревался до 380 °С.

Образование микрорельефа в виде колончатых структур связано видимо с процессами формирования мелкодисперсных вторичных фаз и ионного травления [4, 5]. При больших дозах облучения тяжелыми ионами (Fe^+ , Co^+ , Ni^+) в приповерхностном слое происходит образование и накопление значительного числа крупных вакансионных комплексов (микропор), а также синтез мелкодисперсных силицидов. Кроме того, в процессе имплантации поверхностный слой интенсивно распыляется, микропоры и силициды „выходят“ на поверхность. При этом коэффициент распыления (S) становится неоднородным: известно, что S больше на границах зерен и микропор, к тому же S у кремния выше, чем у силицидов. В результате этого на поверхности может образоваться микрорельеф колончатого типа.

Наличием на поверхности Si силицидов объясняется, на наш взгляд, возможность исследования имплантированного Si на воздухе. По своим свойствам силициды обладают сравнительно высо-

кой стойкостью к окислению и большей электропроводностью, чем используемый в данной работе Si [6]. Оба этих фактора весьма существенны для получения и стабилизации туннельного тока на воздухе.

Полученные данные хорошо согласуются с проведенными ранее [4, 5] исследованиями поверхности таких же образцов с помощью электронной микроскопии: методом реплик и на растровом электронном микроскопе. В то же время СТМ позволяет оценить не только горизонтальные размеры сформированного на поверхности рельефа, но и его глубину, что особенно важно для определения пороговых доз, выше которых начинается формирование колончатых структур на Si . Кроме того, использование СТМ позволит сделать выводы и о механизмах образования рельефа на поверхности в зависимости от режимов и условий имплантации.

Таким образом, приведенные выше результаты, а также полученные нами с помощью СТМ изображения поверхности Ge , $Cd_{1-x}Hg_xTe$, Au и Si , подвергнутых ионной бомбардировке, показывают, что СТМ является очень эффективным и удобным инструментом для исследования топографии поверхности имплантированных металлов и полупроводников.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Кук Й., Сильверман П. // Приборы для научных исследований 1989. № 2. С. 3-22.
- [2] Gimzewski J.K., Humbert A. // IBM J. Res. Develop. 1986. V. 30. N 5. P. 472-477.
- [3] Wilson L.H., Zheng N.J., Knipring U., Tsong L.S.T. // Appl. Phys. Lett. 1988. V. 53. N 21. P. 2039-2041.
- [4] Петухов В.Ю., Хайбуллин И.Б., Зарипов М.М. // Деп. ВИНТИ. 05.11.1980. № 46 97-80 Деп.
- [5] Петухов В.Ю., Хайбуллин И.Б., Зарипов М.М. // Поверхность. 1985. № 2. С. 104-107.
- [6] Самсонов Г.В., Дворина Л.А., Рудь Б.М. Силициды, М.: Металлургия, 1979. С. 272.

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского

Поступило в Редакцию
15 ноября 1989 г.