

**ВЫЗВАННОЕ МАГНИТНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ
ОБОГАЩЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ
МАГНИТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ПРИМЕСЯМИ**

**Л. П. Стебленко¹, И. В. Плющай¹, Д. В. Калининченко¹,
А. Н. Курилюк¹, А. Н. Крит¹, В. В. Трачевский²**

¹ Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко, г. Киев, Украина

² Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова Национальной Академии наук Украины,
kurylyuk_a2008@ukr.net

В последние годы активно исследуется и обсуждается проблема, связанная с воздействием магнитных полей на магнитоупорядоченные материалы, в частности, на полупроводниковые кристаллы кремния. Обнаружено, что магнитное влияние на кремний приводит к долговременным и немонотонным изменениям его структуры и структурнозависимых свойств. Высокую чувствительность при этом проявляют приповерхностные слои кристаллов кремния.

В нашей предыдущей работе [1] были обнаружены индуцированные магнитным полем эффекты геттерирования ионов примесей щелочных металлов, алюминия, гидроксильных групп поверхностью Si, а также обогащение приповерхностных слоев кислородом и углеродом. В данной работе было проведено исследование изменения топологии поверхности и характера рельефа поперечных сечений дислокационных и бездислокационных образцов Si, вызванное воздействием модулированного низкочастотного магнитного поля с индукцией $B=0,33$ Тл. Длительность магнитной обработки (МО) составляла $t_{MO} = 120$ минут.

Исследование топологии поверхности и микроструктуры проводилось методом магнитно-силовой микроскопии (МСМ). Эта методика дает возможность выявить и оценить магнитное состояние примесей на поверхности образца.

На рис. 1 (а, б) представлены результаты МСМ-измерений состояния поверхности кристалла кремния (Cz-Si), содержащего дислокации, до и после магнитной обработки. В результате воздействия магнитным полем поверхность кремния видоизменяется, становится более неоднородной по сравнению с исходной. При этом нарушается планарность поверхности, наблюдается ярко выраженный рельеф, в 2-3 раза возрастает шероховатость поверхности.

Как известно, для МСМ исследований применяется двухпроходная методика. При этом итоговый МСМ кадр представляет собой функцию $F(x,y)$, характеризующую распределение магнитного момента по поверхности образца. Наши исследования выявили 6-ти кратное изменение силы магнитного взаимодействия поверхности с кантилевером в процессе сканирования образцов, прошедших МО. Последнее указывает на усиление взаимодействия магнитного зонда с образцом. Выявленные изменения в структуре поверхности после МО свидетельствуют о неоднородности магнитных сил, действующих на зонд со стороны образца. Следует отметить, что спустя 60 суток после магнитного воздействия структура постепенно релаксирует к исходному состоянию и обнаруженные изменения примесного состояния поверхности, как видно из рис. 1в нивелируются.

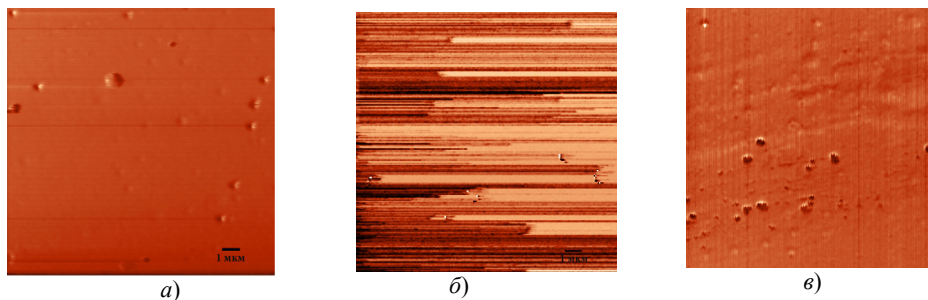


Рис. 1. Изображения поверхности дислокационных образцов кремния, полученные с помощью магнитно-силовой микроскопии. Поверхность кремния: а) до обработки в магнитном поле; б) сразу после обработки в магнитном поле ($B=0.33$ Тл, $t_{MO}=120$ мин.); в) через 60 суток после завершения магнитной обработки

Таким образом, было установлено, что примеси, продифундировавшие к поверхности, изменили не только топологию, но и перевели ее в магнитоактивированное состояние.

В работе было также выявлено усиление эффекта магнитной активации поверхности в образцах Si, содержащих дислокации, по сравнению с бездислокационными образцами. Более яркое проявление эффекта в дислокационных образцах может быть связано с тем, что дислокации, наряду с поверхностью, являются мощными геттерами примесей. В результате этого процесс геттерирования магниточувствительных

примесей из объема дислокационных образцов в зону дислокаций протекает более интенсивно в сравнении с бездислокационными образцами.

С нашей точки зрения было интересно и целесообразно изучить взаимосвязь между обогащением магниточувствительными примесями кристаллов кремния, содержащими дислокации, и их магнитными свойствами.

Полученные в данной работе с привлечением сверхпро-

водящего квантового интерференционного магнитометра результаты указывают на то, что наличие дислокаций приводит к некоторому уменьшению величины магнитного момента, а следовательно, к уменьшению магнитной восприимчивости (рис.2).

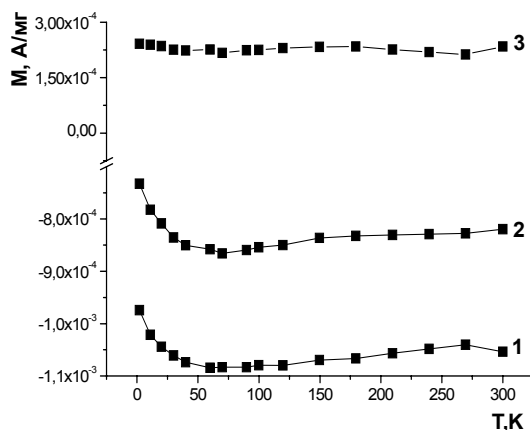


Рис. 2. Температурная зависимость магнитного момента образцов Si: 1 - образец Si без дислокаций, отожженный при 700°C , деформирующее напряжение $\sigma=0$ МПа, время отжига $t=30$ мин.; 2 - образец Si с дислокациями, деформированный при 700°C , деформирующее напряжение $\sigma=79,4$ МПа, время деформирования $t=30$ мин.; 3 - вклад в магнитный момент, привнесенный пластической деформацией

На основании полученных данных можно предположить, что пластическая деформация приводит к уменьшению диамагнетизма и к появлению некоторого парамагнитного вклада от парамагнитных центров (ПЦ), которые вводятся при деформации. Наша работа была нацелена на установление природы ПЦ и на рассмотрение влияния на них высокотемпературного деформирования. При исследовании ЭПР-сигнала от магниточувствительных примесей нами было обнаружено наличие анизотропии интенсивностей сигнала при разной ориентации образца по отношению к постоянному магнитному полю ($\theta=0^\circ$ и $\theta=90^\circ$). Такая анизотропия свойственна парамагнитным центрам, связанным с дислокационными оборванными связями (ДОС) [2].

Полученные в работе методом ЭПР температурные зависимости интенсивности сигнала, при котором наблюдается резонанс от магниточувствительных примесей, позволяют утверждать, что при повышении температуры деформирования интенсивности линий ЭПР уменьшаются. Последнее, вероятно, происходит в результате реконструкции ядер дислокаций (введенных при деформировании). Согласно [3], указанная реконструкция сопровождается при высокотемпературном отжиге ($T=800^\circ\text{C}$) попарным замыканием ДОС в состояние $\text{Si}=\text{O}$.

Нами было высказано предположение, что в результате взаимодействия кремния с кислородом при повышенных температурах деформирования должны образовываться оксидные преципитаты. Эти предположения были подтверждены экспериментально. Полученные с помощью метода растровой электронной микроскопии (РЕМ) изображения поверхности образцов кремния, которые прошли высокотемпературное деформирование при 800°C , свидетельствует о появлении на поверхности характерных фигур травления, отождествляемых нами с оксидными и другими комплексами.

Более детальное исследование дефектно-примесного состава образцов Si, подвергавшихся высокотемпературному деформированию при $T=800^\circ\text{C}$, проведенное с помощью рентгеноспектрального анализа выявило, что вблизи зоны дислокаций концентрация углерода возрастала $\sim$ в 18 раз, концентрация кислорода увеличивалась $\sim$ в 40 раз. По нашему мнению, увеличение концентрации парамагнитных примесей кислорода и углерода приводит к двум последствиям. Во-первых, к изменению величины магнитного момента, которая наблюдалась экспериментально, и, во-вторых, к появлению "новой" модифицированной структуры, в состав которой входят кремний-кислородные оксидные преципитаты и кремний-кислородно-углеродные ассоциаты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макара, В.А. Вызванные действием магнитного поля изменения примесного состава и микротвердости приповерхностных слоев кристаллов кремния / В.А. Макара [и др.] // Физика и техника полупроводников. 2008. Т.42. №9. С.1061.
2. Вавилов, В.С. Дефекты в кремнии и на его поверхности / В.С. Вавилов, В.Ф. Киселев, Б.Н. Мукашев. М.: Наука, 1990. 212 с.

3. Золотухин, М.Н. Сравнительное ЭПР и DLTS исследование процесса отжига дислокационных оборванных связей в кремнии / М.Н. Золотухин, В.В. Кведер, Ю.А. Осипьян, И.Р. Сагдеев // ФТТ. 1984. Т.26. № 5. С.1412.