

05;11

Наноразмерные изменения структуры ионно-облученных кристаллов кремния на глубинах, превышающих пробег внедряемых ионов

© А.Н. Киселев, В.Л. Левшунова, В.А. Перевошников, В.Д. Скупов

Нижегородский государственный технический университет (НГТУ)
Научно-исследовательский физико-технический институт (НИФТИ ННГУ),
Нижний Новгород
E-mail: vap@nifti.unn.ru

Поступило в Редакцию 26 февраля 2002 г.

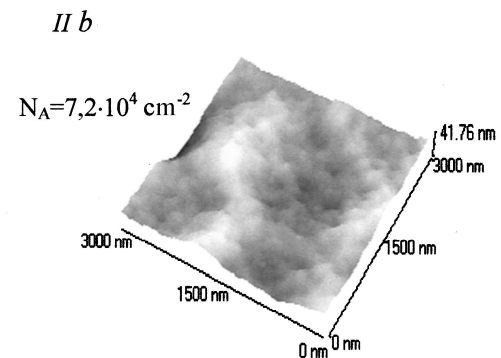
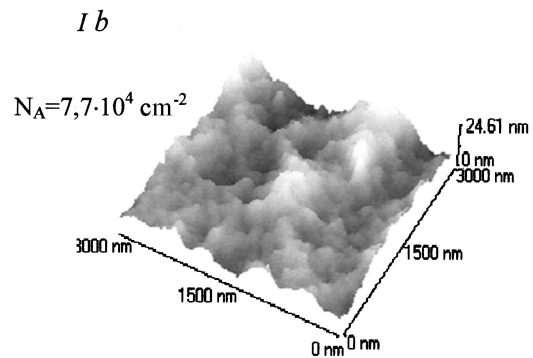
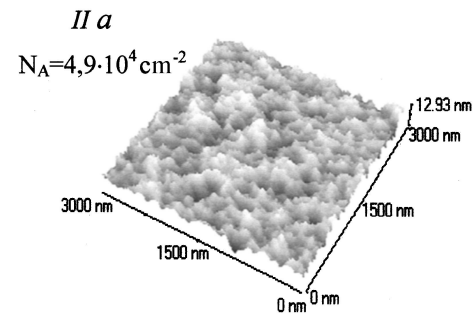
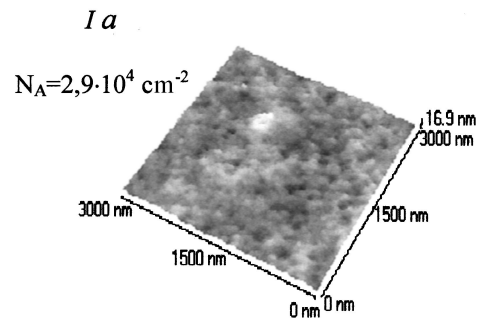
Методом атомно-силовой микроскопии обнаружено изменение микроморфологии поверхности ионно-облученных кристаллов кремния при послойном химико-динамическом полировании и селективном травлении до глубин, существенно превышающих пробег ионов аргона с энергией 40 KeV.

Явление аномально глубоких структурных изменений в твердых телах при имплантации ионов средних энергий, так называемый эффект дальнего действия, остается предметом острых дискуссий до настоящего времени. Одной из основных причин неоднозначного отношения исследователей к эффекту является недостаточный объем прямых экспериментальных доказательств структурных превращений в облучаемых кристаллах за пределами зоны торможения ионов. Подавляющее большинство известных на сегодня данных о наблюдении эффекта получены косвенными методами. Цель настоящей работы состояла в исследовании структуры облученных кристаллов бездислокационного кремния методом атомно-силовой микроскопии в сочетании с послойным химико-динамическим полированием и селективным травлением поверхности.

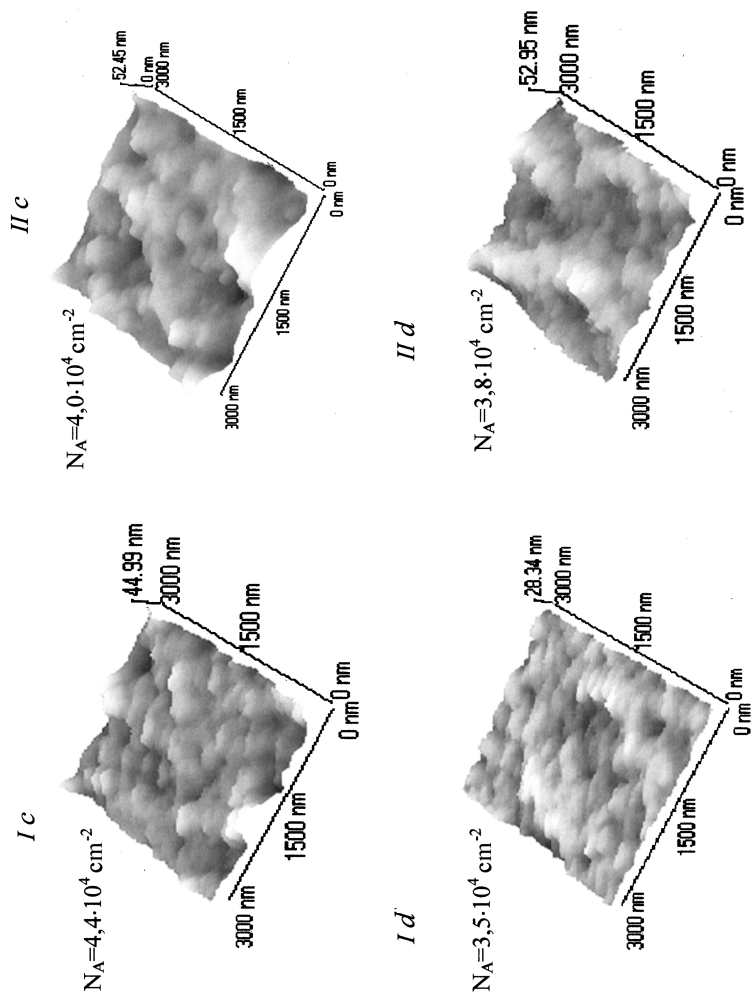
Объектами исследований служили кристаллы кремния КЭФ-15 (111) толщиной 630 μm , облученные ионами аргона с энергией 40 keV, дозой $2.8 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ при плотности тока менее $3 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$. Перед облучением на часть поверхности исходных образцов электронно-лучевым испарением осаждался слой аморфного кремния толщиной

0.7 μm для проверки возможности стимулирования эффекта по аналогии с результатами работ [1,2]. Кроме облученных, в качестве контрольных исследовались исходные кристаллы и образцы со слоями аморфного кремния для определения влияния повышенной температуры ($T = 420 \text{ K}$) во время его осаждения на структуру монокристаллической подложки. Микроморфология поверхности кристаллов при послойном травлении в растворе $\text{HNO}_3 : \text{HF} : \text{CH}_3\text{COOH} = 40 : 1 : 1$ со скоростью $1 \mu\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ и после обработки в селективном травителе состава $\text{HF} : \text{CrO}_3 = 1 : 1$ фиксировалась на сканирующем зондовом микроскопе ТМХ-2100 „Accugex“ в режиме Non-contact AFM. Исследования выполнялись как на облученной (I), так и на противоположной (II) сторонах образцов.

Эксперименты показали, что осаждение аморфного кремния и ионное облучение сглаживают микрошероховатость и уменьшают латеральные размеры микрорельефа исходной поверхности образцов примерно в $1.9 \div 3.2$ раза. Указанные параметры для свободной поверхности исходных кристаллов составляли соответственно $2.6 \div 3.3$ и $100 \div 120 \text{ nm}$. Однако уже при травлении кристаллов с аморфным слоем и после облучения на глубину $1.5 \div 2.0 \mu\text{m}$ на обеих сторонах наблюдалось резкое увеличение микрошероховатости и дисперсии значений латеральных размеров микрорельефа при некотором уменьшении их средней величины. На рисунке приведены типичные микрофотограммы микрорельефа поверхности сторон I и II кристаллов, травленных на глубину $15 \mu\text{m}$. На поверхности исходных образцов на всех глубинах фиксировались мелкие впадины диаметром $40 \div 160 \text{ nm}$, плотность которых составляла $10^{19} \div 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ (см. рисунок, Ia и IIa). По-видимому, эти впадины связаны с растворением ростовых микродефектов С- или D-типа при селективном травлении [3]. Последующие операции осаждения аморфного кремния и ионное облучение увеличивают размеры микровпадин, образуемых при травлении, причем наиболее заметно вблизи стороны II (см. рисунок). Характерно, что наличие аморфного слоя при облучении приводит к меньшим изменениям микроморфологии областей кристалла вблизи стороны I по сравнению с изменениями вблизи стороны II (см. рисунок Id и IId). Последние по уровню сопоставимы с изменениями структуры под облученной свободной поверхностью образцов (см. рисунок, Ia и IIc). Во всех областях кристаллов после облучения обнаружены достаточно крупные впадины глубиной до 50 nm и эффективным диаметром $0.6 \div 0.8 \mu\text{m}$,



Микротопограммы микрорельефа поверхности кристаллов кремния на глубине $15 \mu\text{m}$ со стороны *I* и *II* в исходном состоянии (*a*), после осаждения аморфного кремния (*b*), после облучения ионами аргона свободной поверхности (*c*) и через аморфный слой (*d*).



(Продолжение рисунка).

имеющие зачастую неправильную форму, что может свидетельствовать об их принадлежности к трансформировавшимся при ионной бомбардировке кластерам *A*- и *B*-типа. По данным зондовой микроскопии плотность таких дефектов в среднем составляет $10^6 \div 10^7 \text{ см}^{-2}$ и изменяется в зависимости от обработки кристаллов аналогично изменению плотности микродефектов *A*-типа N_A , которая определялась прямыми металлографическими измерениями по картинам травления. Значения N_A на глубине $15 \mu\text{m}$ для обеих сторон образцов приведены на рисунке.

Анализ обнаруженных закономерностей изменения микроморфологии поверхности послойно травливаемых кристаллов и их микродефектной структуры позволяет предположить, что при осаждении аморфного кремния вследствие нагрева происходит частичное растворение экранирующих микродефекты примесных атмосфер, в результате чего повышается скорость их растворения в селективном травителе. Это и приводит к увеличению микрошероховатости поверхности. Облучение не только усиливает этот процесс, но и способствует растворению самих микродефектов под воздействием неравновесных собственных точечных дефектов и упругих волн, генерируемых в зоне торможения ионов [2,4–6]. При ионной бомбардировке через аморфный слой поток точечных дефектов оказывается меньше и поэтому слабее выражены структурные изменения. Вблизи обратной стороны образцов действие упругих волн, сопровождающееся также генерацией точечных дефектов [2,5], приводит к практически одинаковым эффектам в кристаллах, облучаемых через аморфный слой и свободную поверхность (см. рисунок, *Ис, d*).

Представленные результаты дают основание утверждать, что anomalно глубокие структурные изменения при ионном облучении связаны с трансформацией в подсистеме микродефектов кристалла, которая проявляется в изменении спектра их размеров и концентраций. Снижение N_A на образцах, подвергнутых предварительному низкотемпературному отжигу во время осаждения аморфного кремния и облучению через этот слой, указывает на возможность использования эффекта для геттерирования кластеров дефектов в кристаллах.

Список литературы

- [1] Куликов А.В., Перевоицков В.А., Скупов В.Д. и др. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. В. 13. С. 27–31.
- [2] Перевоицков В.А., Скупов В.Д. и др. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 8. С. 50–54.
- [3] Мильвидский М.Г. Полупроводниковые материалы в современной электронике. М.: Наука, 1986. 88 с.
- [4] Итальянцев А.Г., Мордкович В.Н. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 2. С. 217–222.
- [5] Павлов П.В., Семин Ю.А., Скупов В.Д. и др. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 3. С. 503–507.
- [6] Демидов Е.С., Латышева Н.Д., Перевоицков В.А. и др. // Неорганические материалы. 2000. Т. 36. В. 5. С. 1–4.