

06;10

Особенности формирования рельефа при травлении кремния фокусированным ионным пучком

© Н.Н. Герасименко, А.А. Чамов, Н.А. Медетов, В.А. Ханин

Московский государственный институт электронной техники, Зеленоград
ОАО «НИИ молекулярной электроники и завод „Микрон“», Зеленоград,
Москва
E-mail: rmta@miee.ru

Поступило в Редакцию 7 июня 2010 г.

Экспериментально исследовано воздействие фокусированного ионного пучка на состояние поверхности кремния. Обнаружены периодические кольцеобразные наплывы на стенках вытравливаемого цилиндра. Показана зависимость процесса формирования структур от условий эксперимента. Сделан вывод о влиянии явления радиационной пластичности на эффект образования кольцеобразных периодических структур.

Фокусированный ионный пучок (ФИП) широко применяется в технологии твердотельной микроэлектроники, в частности с его помощью проводится формирование профилей на поверхности образцов (пластин) путем вытравливания канавок и цилиндрических отверстий, а также для подготовки образцов при исследовании структуры с помощью просвечивающей электронной микроскопии. При этом принято считать, что при травлении ионным пучком форма стенок вытравливаемого профиля сохраняется абсолютно гладкой, т. е. при формировании отверстия создается идеальный цилиндр. Нами обнаружено, что в зависимости от условий эксперимента образующиеся поверхности цилиндров отличаются от идеально гладких: формируются кольцеобразные наплывы, расположенные друг от друга на одинаковых расстояниях. В работе исследованы особенности формирования таких профилей при травлении ФИП.

В литературе неоднократно обсуждались результаты исследований воздействия пучков ионов малых энергий (10–30 keV) на структурное состояние поверхности облучаемых кристаллов, в частности монокри-

сталлического кремния. В этих работах было обнаружено и исследовано явление формирования на поверхности облучаемых материалов периодических структур. Авторы связывают его с анизотропным распылением поверхности под действием ионного пучка. Полученные нами результаты дают основание предположить, что наблюдаемые при облучении ФИП периодические структуры имеют одинаковую природу с результатами, полученными в этих работах. На основании полученных в нашей работе результатов мы считаем возможным предложить альтернативный вариант объяснения наблюдаемого явления.

Ниже представлены результаты исследования профилей поверхности стенок вытравливаемых ФИП цилиндров в зависимости от условий эксперимента. Исследование проводилось на установке FEI Quanta 200 3D. Значение энергии ионов E варьировалось от 5 до 30 keV, тока пучка I от 1 до 20 nA. Травление образца проводилось в двух режимах: сканированием ионным пучком по выбранной области с заданным временем его нахождения в каждой точке скана (от 1 до 50 μ s), а также в неподвижном положении пучка на поверхности образца. В работе использовались образцы с ориентацией {111} и {100}, но зависимость наблюдаемых явлений от ориентации образца не наблюдалась. Во время травления все образцы располагались перпендикулярно к ионному пучку.

В ходе исследования нами была зафиксирована зависимость процесса формирования периодических структур при ионном травлении от плотности тока ионного пучка. Диаметр зонда фиксирован и составляет $\sim 2.75 \mu$ m. При плотности тока ионного пучка $J = 2.16 \mu$ A/cm² (рис. 1) наблюдаются ярко выраженные наплывы на стенках цилиндра, а при плотности $J = 1.07 \mu$ A/cm² образование наплывов отсутствует. Представленные результаты показывают, что увеличение плотности пучка приводит к формированию периодического рельефа на поверхности стенок вытравливаемого цилиндра.

Также в работе наблюдается зависимость процесса формирования периодических структур при ионном травлении от частоты сканирования, при этом площадь, глубина и общее время травления оставались постоянными. На рис. 2, *a* отчетливо виден рельеф на стенках цилиндра, при этом время воздействия пучка на точку сканирования в 50 раз меньше, чем на рис. 2, *b*. Таким образом, представленные результаты показывают, что при уменьшении частоты сканирования (увеличение

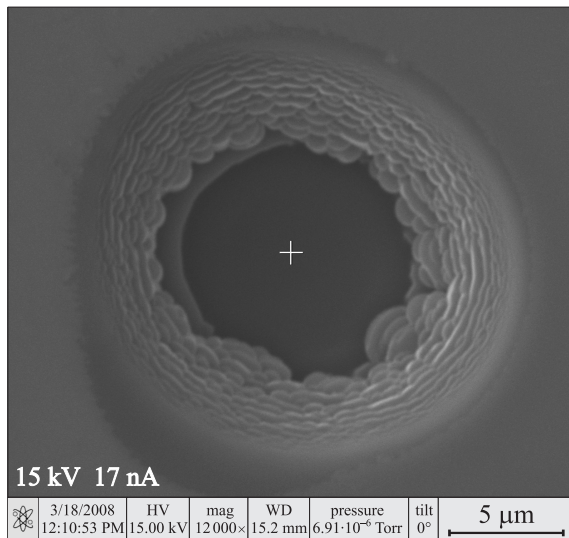


Рис. 1. СЭМ-изображения образующихся цилиндров с плотностью ионного пучка $J = 2.16 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

времени воздействия пучка на точку) рельеф на стенках вытравливаемого цилиндра исчезает, причем этот процесс наиболее заметен для областей, расположенных глубже от облучаемой поверхности. Остатки рельефа наблюдаются только в непосредственной близости от облучаемой поверхности образца. При большей частоте сканирования подобная закономерность проявляется так, что у облучаемой поверхности формируемый рельеф проявляется более четко.

Наибольший интерес представляют результаты исследования профиля травления при воздействии пучка на образец без сканирования, т.е. при постоянном воздействии пучка в точке. В этом случае наблюдается немонотонный характер возникновения наплывов на стенках вытравливаемого цилиндра. При начальном времени травления ($t = 5$ s) рельеф отсутствует. С увеличением времени травления периодические структуры начинают проявляться, при этом вначале структуры формируются с одной стороны ($t = 20$ s), затем происходит формирование структур по всей поверхности цилиндра ($t = 100$ s) (рис. 3, *a, b*). При

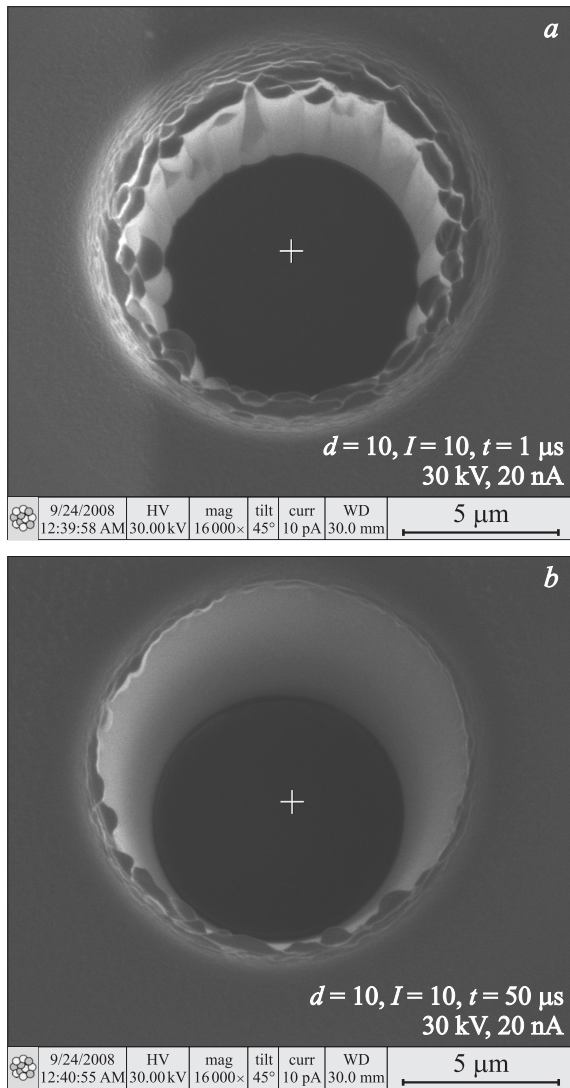


Рис. 2. СЭМ-изображения образующихся цилиндров с различной частотой сканирования. $E = 30 \text{ kV}$, $I = 20 \text{ nA}$. *a* — $t = 1 \mu s$, *b* — $t = 50 \mu s$. t — время пребывания пучка в точке, соответствующей диаметру пучка.

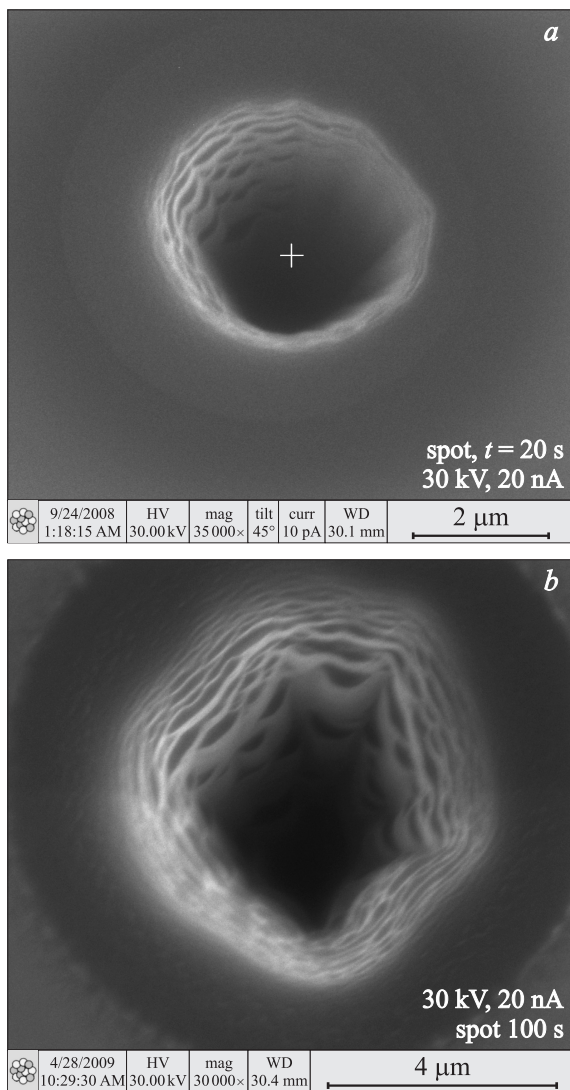


Рис. 3. СЭМ-изображения образующихся цилиндров при постоянном воздействии пучка в точке. $E = 30$ kV, $I = 20$ nA. $a - t = 20$ s, $b - t = 100$ s.

дальнейшем увеличении времени травления ($t = 360$ s) рельеф исчезает, что аналогично исчезновению профиля при травлении по области с малой частотой сканирования (рис. 2, *b*).

Нам представляется возможным провести описание эффекта образования и исчезновения наплывов на стенках вытравленного с помощью ФИП цилиндра, опираясь на явление радиационной пластичности, возникающей при воздействии плотных ионных пучков на приповерхностные слои облучаемого кристаллического материала. В нашем случае рассматриваемый процесс можно разделить на два этапа: формирование рельефа и его сглаживание. Во время первого этапа реализуется процесс радиационной текучести под ионным пучком за счет генерации дефектов в приповерхностных слоях стенок вытравливаемого профиля. В результате этого процесса формируются периодически расположенные кольцеобразные наплывы на стенках цилиндра. Второй этап представляет собой сглаживание полученного рельефа под действием того же ионного пучка. Цикл повторяется снова до тех пор, пока граница профиля не сместится за границы воздействия пучка.

Сопоставим наблюдаемые нами явления и возможности их объяснения с известными из публикаций в мировой литературе результатами и их интерпретацией. Достаточно хорошо известно явление формирования периодического рельефа на поверхности твердотельных объектов, в частности монокристаллических полупроводников (например, монокристаллического кремния) при облучении ионами малых и средних энергий под малыми углами направления ионного пучка к поверхности облучаемого образца [1]. Все авторы связывают наблюдаемый эффект с анизотропным распылением облучаемой поверхности. В то же время в работах [2,3] экспериментально и теоретически показано, что при облучении твердотельные материалы могут становиться пластичными за счет накопления радиационных дефектов. В этом случае под действием скользящего ионного пучка может создаваться периодический рельеф на поверхности.

С другой стороны, достаточно много опубликованных результатов показывают, что шероховатость на поверхности твердых тел может быть устранена (происходит сглаживание) при воздействии на поверхность ионных пучков [4–7]. Причем авторы обращают внимание на то, что сам эффект сглаживания связан как с генерацией радиационных дефектов,

так и с обусловленным генерацией проявлением пластического течения [2,3].

Следует оговориться, что все перечисленные выше результаты, известные из мировой литературы, не относятся непосредственно к использованию фокусированного ионного пучка, однако по характерным особенностям воздействия на твердотельную структуру они связаны следующим образом:

— во всех случаях речь идет о большой скорости генерации радиационных дефектов. Это особенно характерно для случая бомбардировки кластерными ионами [5]. Облучение фокусированным ионным пучком также связано с большой скоростью генерации радиационных дефектов (плотность ионного тока в точке воздействия пучка составляет $2.16 \mu\text{A}/\text{cm}^2$);

— во многих случаях авторы отмечают, что переход к пластическому течению с последующим сглаживанием связан с прохождением стадии аморфизации. По-видимому, в случае воздействия ФИП, особенно при воздействии постоянным пучком (без сканирования), вполне можно ожидать, что стадии испарения вещества (распыления) предшествует фазовый переход монокристалл—аморфное состояние.

С этих позиций всю совокупность наблюдаемых нами экспериментальных особенностей — формирование рельефа и его последующее исчезновение при воздействии ФИП — можно объяснить следующим образом.

В случае обработки сканирующим ФИП наблюдается формирование периодической структуры на стенках вытравливаемого цилиндра за счет проявления эффекта пластического течения. При этом следует учесть, что при формировании цилиндра сам со себе пучок падает на стенки цилиндра под малым углом. Уменьшение частоты сканирования во время травления цилиндра приводит к исчезновению (сглаживанию) рельефа, который остается только вблизи поверхности. Это происходит за счет увеличения времени непрерывного воздействия ионного пучка (а значит, генерации радиационных дефектов) в каждой точке вытравливаемого профиля.

С другой стороны, при формировании цилиндра травлением неподвижным пучком реализуются последовательно как процессы формирования рельефа на поверхности стенок цилиндра, так и при дальнейшем воздействии пучка исчезновение рельефа за счет сглаживания.

Список литературы

- [1] *Chason E., Aziz M.J.* // Scripta mater. 2003. V. 49. N 10. P. 953.
- [2] *Mayr S.J., Averbach R.S.* // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 87. N 19. P. 6106.
- [3] *Mayr S.J., Ashkenazy Y., Able K.* et al. // Phys. Rev. Lett. 2003. V. 90. N 5. P. 5505.
- [4] *Volkert C.A.* // J. Appl. Phys. 1991. V. 70. P. 3521.
- [5] *Nakai A., Aoki T., Seki T.* et al. // NIMB. 2003. V. 206. P. 842.
- [6] *Goswami D.K., Dev B.N.* // Phys. Rev. B. 2003. V. 68. P. 3401.
- [7] *Insepov Z., Hassanein A., Norem J.* et al. Advanced surfa polishing using gas cluster ion beams. Preprint ANL/MCS-P1409-0407. 2007.