

10;11

Перенос волнообразного нанорельефа на поверхность различных материалов

© Д.С. Кибалов, И.В. Журавлев, П.А. Лепшин, В.К. Смирнов

Институт микроэлектроники и информатики РАН, Ярославль
E-mail: IBTec@rambler.ru

Поступило в Редакцию 30 мая 2003 г.

Волнообразный нанорельеф формируется на поверхности аморфного кремния при бомбардировке ионами азота. Исследован перенос нанорельефа с пленок аморфного кремния за счет ионного распыления на поверхность ряда материалов: стекла, полиимида, фианита и арсенида галлия. Установлено, что геометрия нанорельефа не изменяется при переносе в исследованные материалы на глубину, равную амплитуде нанорельефа в аморфном кремнии. Эволюция амплитуды нанорельефа при дальнейшем распылении определяется не только процессом распыления, характеризуемого коэффициентом распыления, но требует учета и других процессов на поверхности, сопровождающих ионную бомбардировку.

Известно явление образования анизотропного периодического микрорельефа на поверхности монокристаллического кремния (*c*-Si) при бомбардировке ионами с энергией 1–10 keV [1]. Существенное влияние на морфологию структуры оказывает тип ионного пучка. В системе $N_2^+ - c\text{-Si}$ формируется волнообразный нанорельеф (ВНР), отличительными свойствами которого являются: малые глубины формирования (D_F); минимальный период ($\lambda = 20$ nm); существование на глубинах распыления, превышающего D_F , стабильного нанорельефа с высокой степенью планарности [2–4].

Установлено, что для аморфного кремния (*a*-Si) характер зависимостей D_F и λ от энергии E и угла бомбардировки θ ионов азота аналогичен таковым для *c*-Si. При $\theta = 45\text{--}55^\circ$ относительно нормали к поверхности морфология нанорельефа, сформированного на поверхности *c*-Si и *a*-Si, близка. Это позволяет заменить *c*-Si на *a*-Si для практического применения нанорельефа как наноструктуры. В свою очередь, слои *a*-Si могут быть нанесены на различные материалы; акту-

ально установление возможности переноса рисунка в виде нанорельефа на их поверхность.

В экспериментах слои a -Si толщиной $0.3 \mu\text{m}$ наносились методом магнетронного распыления кремниевой мишени на поверхности слоев: SiO_2 ($0.5 \mu\text{m}$)/Si; полиимида ($0.6 \mu\text{m}$)/стекло; фианита Y–Zr–O ($0.16 \mu\text{m}$)/Si; стекла марки „Corning“; арсенида галлия (GaAs) [5]. По данным электронной Оже-спектроскопии содержание кислорода в слое a -Si не превышало 0.7 at.%. Бомбардировка образцов ионами N_2^+ осуществлялась при $E = 8 \text{ keV}$ и $\theta = 45^\circ$. В данных условиях на глубине $D_F = 185 \text{ nm}$ формируется нанорельеф с $\lambda = 128 \text{ nm}$. Благодаря стабильности нанорельефа его морфология остается неизменной в слое a -Si вплоть до границы с нижележащим слоем. Отдельные измерения относительных коэффициентов распыления перечисленных выше слоев при условиях отсутствия ВНР на поверхности a -Si ($E = 8 \text{ keV}$, $\theta = 38^\circ$) дали следующие значения: $Y(\text{фианит})/Y(a\text{-Si}) = 0.7$; $Y(\text{стекло})/Y(a\text{-Si}) = 1.1$; $Y(\text{SiO}_2)/Y(a\text{-Si}) = 1.3$; $Y(\text{полиимид})/Y(a\text{-Si}) = 1.6$; $Y(\text{GaAs})/Y(a\text{-Si}) = 3.8$.

Морфология поверхности после ионной бомбардировки на разных стадиях прохождения слоев исследовалась с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ). В качестве иллюстрации на рис. 1 показано изображение нанорельефа на поверхности полиимида, на рис. 2 — на поверхности стекла после распыления a -Si в области границы с нижележащим слоем.

Для всех исследованных материалов на глубине распыления от границы с a -Si, близкой к амплитуде волны ($\sim 30 \text{ nm}$), происходит практически точный перенос морфологии нанорельефа из слоя a -Si в нижележащий слой. Сохраняются длина волны и ее геометрия. Дальнейшее заглабление сопровождается морфологическими отличиями, степень проявления которых зависит от материала. В случае фианита наблюдается уменьшение амплитуды волны без изменения λ , и на границе данного слоя с подложкой c -Si рельеф слабо выражен. Происходит как бы сглаживание нанорельефа по мере прохождения слоя фианита, что может объясняться меньшим значением его коэффициента распыления по сравнению с a -Si.

С точки зрения согласованности коэффициентов распыления достаточно оптимистичной представляется ситуация в случае структуры a -Si/стекло. Действительно, анализ РЭМ-изображений показал отсутствие каких-либо существенных изменений в морфологии ВНР при

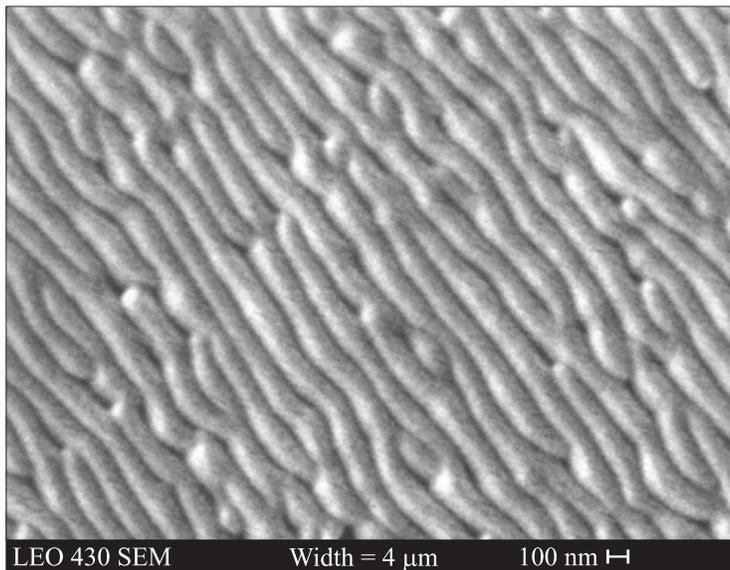


Рис. 1. Волнообразный нанорельеф, перенесенный на поверхность полиимида.

заглублении в стекло вплоть до глубин около $0.32\ \mu\text{m}$. Аналогичная картина наблюдается при распылении слоя SiO_2 в структуре SiO_2/Si . Нанорельеф начинает изменяться на глубине $0.30\ \mu\text{m}$, что выражается как в морфологии, так и в увеличении λ .

Для полиимида результат оказался отличным от ожидаемого. Несмотря на возросшее значение относительного коэффициента распыления по сравнению с оксидом кремния, эволюция морфологии нанорельефа выражена слабо и наблюдается только при значительных глубинах распыления полиимида ($0.5\text{--}0.6\ \mu\text{m}$) без изменений в λ . Из исследованных материалов полиимид оказался наиболее благоприятным для переноса нанорельефа.

В отличие от системы $\text{O}_2^+ - \text{GaAs}$ [6] при распылении GaAs ионами N_2^+ с $E = 8\ \text{keV}$ и $\theta = 45^\circ$ волнообразный рельеф не обнаружен. При переносе нанорельефа в GaAs с $a\text{-Si}$ наблюдается уменьшение амплитуды нанорельефа без изменения λ . Волнообразный нанорельеф

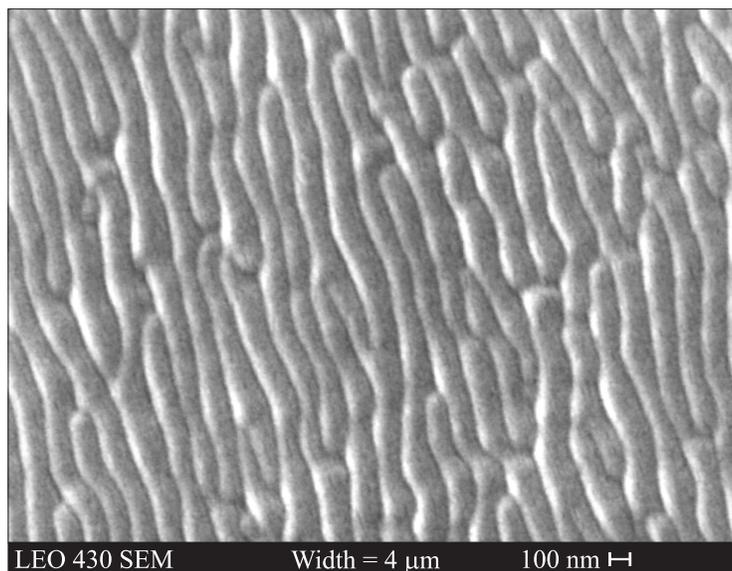


Рис. 2. Волнообразный нанорельеф, перенесенный на поверхность стекла.

существует в GaAs на глубинах распыления до $1\ \mu\text{m}$. Вопреки ожиданиям интенсивное распыление не ускорило эволюцию рельефа.

Таким образом, существование волнообразного нанорельефа теперь не ограничено только кремнием. Он может быть создан на поверхности различных материалов путем переноса нанорельефа из слоя $\alpha\text{-Si}$ в нижележащий слой за счет ионного распыления. Нанорельеф переносится без изменений формы на глубину, близкую к его амплитуде. Дальнейшая эволюция амплитуды нанорельефа определяется, кроме распыления, воздействием других факторов, сопровождающих ионную бомбардировку, например поверхностной диффузией.

Авторы выражают благодарность Г.Ф. Смирновой за помощь в получении РЭМ-изображений.

Работа выполнена в рамках договора № 1-2002/7И, № 10-2003/7И ИМИРАН с ООО „Агентство маркетинга научных разработок“.

Список литературы

- [1] *Carter G., Vishnyakov V., Nobes M.J.* // Nucl. Instrum. Methods B. 1996. V. 115. P. 440–445.
- [2] *Smirnov V.K., Kibalov D.S., Krivelevich S.A.* et al. // Nucl. Instrum. Methods B. 1999. V. 147. P. 310–315.
- [3] *Vachurin V.I., Lepshin P.A., Smirnov V.K.* // Vacuum. 2000. V. 56. P. 241–245.
- [4] *Журавлев И.В., Смирнова Г.Ф., Кибалов Д.С.* и др. // Поверхность. 2002. № 10. С. 100–104.
- [5] *Бочкарев В.Ф., Наумов В.В., Трушин О.С.* и др. // Тр. ФТИАН. 1995. Т. 9. С. 25–30.
- [6] *Karen A., Nakagawa Y., Hatada M.* et al. // Surf. Interf. Anal. 1995. V. 23. P. 506–513.