

## ФОРМИРОВАНИЕ НИЗКОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР НА ПОЛИМЕРНОЙ ПЛЕНКЕ ФОКУСИРОВАННЫМ ИОННЫМ ПУЧКОМ

Thin (40  $\mu\text{m}$ ) polyimide films were implanted by focused beam of 100 keV  $\text{Au}^+$  and  $\text{Fe}^+$  ions with fluencies of  $1,0 \cdot 10^{16} \div 1,0 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$  at ion current densities of  $4 \text{ nA/cm}^2$ . Dimensions of formed on the surface of the polymer film structures have been investigated by atomic force microscopy. Depth, width and roughness dependencies of formed structures on dose of implanted ions are discussed.

Широко используемый в современной микроэлектронике метод ионной имплантации в полупроводниковые материалы является весьма эффективным при модификации электрофизических характеристик твердых тел. Так, с его помощью можно модифицировать механические свойства [1], в широких пределах изменять проводимость диэлектриков [2], а также эффективно управлять оптическими характеристиками путем формирования металлических включений [3]. Обычно ионная имплантация проводится в постоянном или импульсном режимах в соответствии с решаемыми задачами с использованием вариации таких параметров имплантации, как энергия имплантируемых ионов, доза и плотность ионного тока, а также тип подложки и ее температура. Особый интерес представляет проведение имплантации с помощью фокусированных ионных пучков, что в зависимости от вида имплантируемых ионов и режимов имплантации позволяет создавать электронные системы, один или несколько размеров которых сравнивается с характеристикой электронов, имеющей размерность длины (длина свободного пробега, остывания, сдвиг фазы волновой функции, длина волны де Бройля и т. д.), т. е. когда следует ожидать проявления классических или квантовых размерных эффектов. В [4] рассмотрено изменение морфологии поверхности ряда полимеров при имплантации ионами металлов с низкими энергиями и высокими дозами в непрерывном режиме и установлены закономерности изменения шероховатости, микротвердости и композиционного состава приповерхностного слоя от режима имплантации. Вместе с тем надо отметить, что имплантация в постоянном режиме не позволяет контролировать испарение полимера в это время, которое во многом определяет морфологию модифицированной поверхности, глубину залегания формирующихся при имплантации металлических включений, а следовательно, проводимость, коэффициент преломления и ряд других характеристик модифицированного слоя. Имплантация полимерной пленки фокусированным ионным пучком представляется важной при создании гибких проводящих как не магнитных, так и магнитных пассивных элементов электронной техники сверхмалых размеров, создании микроволноводов, разветвителей и т. д. Так, современные источники фокусированных ионных пучков позволяют формировать локальные включения с размерами менее 10 нм [5]. Однако работы по изучению возможности создания низкоразмерных электронных систем в полимерной матрице фокусированным ионным пучком нам неизвестны. Поэтому основная цель исследований состояла в установлении закономерностей изменения размеров формирующихся структур на пленке полиимида при имплантации фокусированным пучком ионов железа и золота заданного диаметра.

### Методика эксперимента

Пленки полиимида  $\text{C}_{22}\text{H}_{10}\text{O}_5\text{N}_2$  (ПИ) толщиной 40 мкм имплантировались ионами золота  $\text{Au}^+$  и железа  $\text{Fe}^+$  с энергией 100 кэВ в интервале доз  $D = 10^{16} \div 10^{18} \text{ cm}^{-2}$  при плотности тока  $4 \text{ nA/cm}^2$ . Имплантация проводилась на ускорителе НИКАРИ при комнатной температуре в остаточном вакууме  $10^{-8}$  Торр. Диаметр пучка на полимерной пленке не превышал 1 мкм, длина сканирования по поверхности составляла 1 мм.

Морфология поверхности модифицированной имплантацией полимерной пленки исследовалась методом атомно-силовой микроскопии при комнатной температуре в полуконтактной моде на частоте 145 кГц на приборе Solver P-47. Использовались кантеливеры серии NSG 01 с радиусом закругления 10 нм.

Расчет пробегов ионов железа и золота в полиимиде, проведенный с помощью программы SRIM [6], показал, что проецированный пробег ионов железа и серебра равен 110 и 60 нм со стандартным среднеквадратичным отклонением  $\Delta R_p = 30 \text{ нм}$  и  $\Delta R_p = 9 \text{ нм}$  соответственно.

### Результаты и их обсуждение

Имплантация фокусированным ионным пучком полиимида ионами металлов приводит к формированию углублений вследствие распыления полимерной матрицы из-за разрыва исходных химических связей и удаления легколетучих компонентов, которыми в случае полиимида могут быть  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  [7].

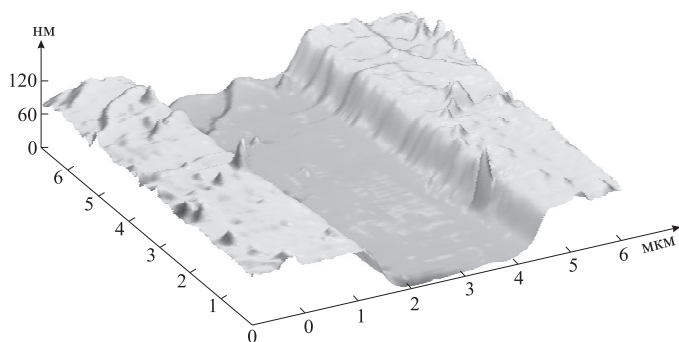


Рис. 1. Трехмерное АСМ-изображение поверхности полиимида, имплантированного фокусированным пучком Au<sup>+</sup> диаметром 1 мкм дозой  $D = 10^{18} \text{ см}^{-2}$

ное увеличение шероховатости до 12 нм и формирование лабиринтоподобных структур уже при дозе  $D = 1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  [4].

Зависимость глубины формирующейся канавки от дозы имплантации приведена на рис. 2 а для случая имплантации ионов железа (кривая 1) и золота (кривая 2). Как видно, при дозах имплантации до  $D = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  в случае имплантации ионов железа и  $D = 10^{17} \text{ см}^{-2}$  при имплантации ионов золота наблюдается резкое возрастание глубины, а дальнейшее увеличение дозы приводит лишь к незначительному ее изменению. Резкое увеличение глубины при малых дозах имплантации обусловлено интенсивным распылением приповерхностного слоя полимера, в котором при имплантации идет процесс карбонизации и зарождения частиц имплантируемых металлов. Изменение наклона дозовой зависимости глубины свидетельствует о завершении процессов карбонизации приповерхностного слоя полимерной пленки и о значительной доле в нем металлических включений, что затрудняет процесс распыления поверхности и, как следствие, увеличение глубины с дозой.

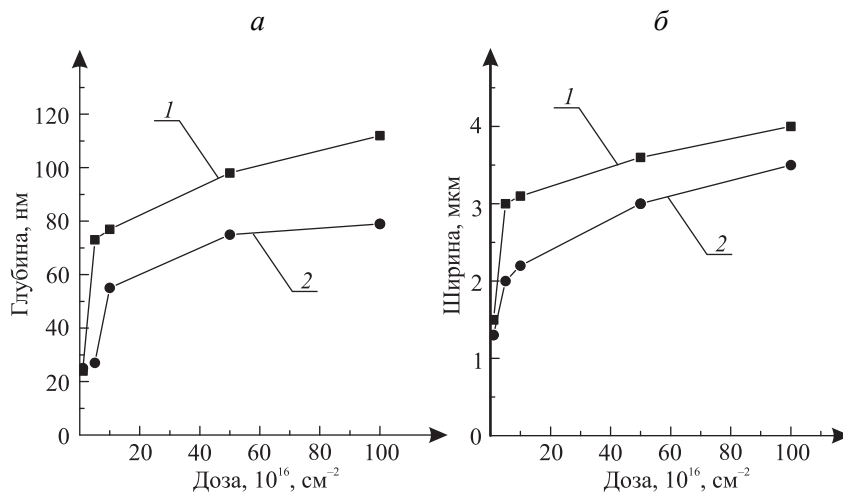


Рис. 2. Зависимость глубины (а) и ширины (б) формирующихся углублений в полиимиде при имплантации ионов железа (1) и золота (2) от дозы имплантации

Очевидно, что разница в глубине формирующихся канавок при имплантации ионов железа и золота обусловлена разницей в их атомной массе. Как уже отмечалось, оценка проецированного пробега ионов железа и золота показала, что для железа его величина почти в два раза больше. Стоит отметить, что для высоких доз имплантации глубины «канавок» превышают величину проецированного пробега ионов, и следует ожидать не гауссова профиля распределения как имплантированных ионов, так и углерода в карбонизированном слое по глубине.

На рис. 2 б представлена дозовая зависимость ширины полученных углублений, определенной на уровне поверхности пленки до имплантации, для обоих видов ионов. Ширина на дне углублений изменялась от 1 до 2 мкм, что несколько больше диаметра ионного пучка, но меньше ширины, определенной на уровне поверхности. Дозовые зависимости также показывают резкое увеличение ширины до доз  $D = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ , а дальнейшее увеличение дозы приводит к росту ширины не более чем на 50%. Наблюдаемое уширение углублений при наборе дозы имплантации может быть обусловлено

как отклонением ионов от направления распространения пучка, так и органической природой имплантируемого вещества, которое в первую очередь характеризуется слабостью межмолекулярной связи и легкостью деструкции при внешних радиационных воздействиях.

При достижении критической ширины влияние как ионов, отклоняющихся от направления распространения пучка, так и модификации полимера вдоль стенок углубления становится незначительным. Оценка показала, что угол наклона стенок углубления составляет около  $11^\circ$  по отношению к плоскости пленки и не зависит от вида ионов и дозы. Поэтому большая ширина углубления в случае имплантации ионов железа легко объясняется большей глубиной формирующейся канавки.

\* \* \*

Таким образом, формирование низкоразмерных структур на полиимиде с помощью фокусированного ионного пучка золота или железа с энергией 100 кэВ в интервале доз от  $10^{16}$  до  $10^{18}$  см<sup>-2</sup> при плотности тока 4 нА/см<sup>2</sup> и диаметре пучка 1 мкм приводит к созданию углублений на полимерной пленке с глубиной от 24 до 112 нм и шириной от 1,5 до 4 мкм при имплантации ионов железа от 25 до 79 нм и шириной от 1,3 до 3,5 мкм при имплантации ионов золота в зависимости от дозы, что обусловлено деструкцией и распылением полимерной матрицы ионным пучком. Установлено, что по сравнению с шероховатостью исходной полиимидной пленки шероховатость углублений практически не изменяется.

Работа выполнена в рамках договора о сотрудничестве между Рурским университетом г. Бохум и БГУ в рамках проекта кафедры физики полупроводников и нанoeлектроники и кафедры прикладной физики твердого тела «Формирование низкоразмерных структур». Авторы выражают благодарность профессору А. Вику и доценту Д. Ройтеру за предоставленную возможность проведения имплантации, а также Л.В. Баран за помощь при проведении исследований АСМ и обработке результатов.

1. Гофман И.В., Суханова Т.Е., Вылегжанина М.Э. и др. // ФТТ. 2010. Т. 52. № 3. С. 564.
2. Нажим Ф.А., Лукашевич М.Г., Нуждин В.И. и др. // Изв. НАН Беларуси. 2010. № 2. С. 105.
3. Степанов А.Л. // ЖТФ. 2004. Т. 74. № 2. С. 1.
4. Вабищевич С.А., Бринкевич Д.И., Волобуев В.С. и др. // Вестн. Полоц. ун-та. Сер. С. Фундаментальные науки. 2010. № 9. С. 74.
5. Bushby A., P'ng K., Young R. D. et al. // Nature Protocols. 2011. Vol. 6. P. 845.
6. Ziegler J.F., Biersack J.P., Littmark U. The stopping and range of ions in solids. New York, 1985. (SRIM-2008 software at <http://www.srim.org/>).
7. Оджаев В.Б., Козлов И.П., Попок В.Н., Свиридов Д.В. Ионная имплантация полимеров. Мн., 1998.

Поступила в редакцию 24.01.12.

**Андрей Андреевич Харченко** – аспирант кафедры физики полупроводников и нанoeлектроники. Научный руководитель – М.Г. Лукашевич.

**Степан Дмитриевич Шварков** – аспирант кафедры прикладной физики твердого тела Рурского университета. Научный руководитель – профессор А. Вик.

**Евгений Александрович Колесник** – студент 4-го курса физического факультета.

**Михаил Григорьевич Лукашевич** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики полупроводников и нанoeлектроники.