

**НАНОМАСШТАБНАЯ РЕПЛИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ
ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**А.Д.Ахсаханян, Д.Г.Волгунов, С.В.Гапонов, Б.А.Грибков,
В.Л.Миронов, Н.Н.Салашенко, С.А.ТресковИнститут физики микроструктур РАН, 603950, Нижний Новгород, ГСП-105
E-mail: mironov@ipm.sci-nnov.ru

Полимерные материалы находят широкое применение в репликационных технологиях. В последнее время такие методы как литье, горячая штамповка, инъекционное прессование полимеров успешно используются в технологии создания структур с субмикронными элементами сложной формы и для репликации поверхностных структур с элементами вплоть до нанометрового масштаба [1-4]. В связи с этим представляется весьма перспективным возможное применение полимерных материалов для сглаживания шероховатостей поверхности и получения относительно дешевых подложек для изготовления элементов рентгеновской оптики. В настоящей работе были проведены исследования возможности получения гладких комбинированных подложек полимер-стекло методом репликации поверхности эталонных пластин из кремния и зеродура.

В тестовых экспериментах в качестве модельных подложек использовались стеклянные пластины, имеющие различную величину шероховатости поверхности. Сглаживание шероховатостей производилось методом репликации сверхгладких (с шероховатостями на уровне единиц ангстрем) эталонных поверхностей полированных пластин из кремния и зеродура. В качестве реплицирующих слоев использовались тонкие слои на основе акриловых анаэробных герметиков и фотополимерных композиций. Перед нанесением полимера поверхности эталонных и стеклянных пластин подвергались стандартной процедуре очистки в органических растворителях (изопропиловый спирт и толуол). Тонкий слой жидкого преполимера наносился на поверхность стеклянных подложек. Затем эталонная пластина и стекло с преполимером соединялись, и после полимеризации формировался полимерный слой толщиной порядка 1-5 мкм. Эталонные пластины отделялись от полимерного слоя под действием термических напряжений в системе эталон – полимер – стекло, так что полимерная пленка оставалась на поверхности стеклянных подложек. Исследования шероховатостей поверхностей эталонных образцов, стеклянных подложек и полимерных реплик проводились с помощью атомно-силовых микроскопов (АСМ) "Solver P-47" и "Solver P7LS" (производство компании НТ МДТ, г. Зеленоград, Россия). При исследовании шероховатости снималась серия АСМ кадров с одинаковыми размерами с различных участков поверхности. По каждому кадру рассчитывалась величина среднеквадратичной шероховатости σ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N^2} \sum_{ij} (z_{ij} - \bar{z})^2},$$

где: z_{ij} - значение высоты рельефа в точке поверхности с координатами (i,j) , измеренное с помощью АСМ, \bar{z} - средняя высота в кадре, N - количество точек в строке сканирования. Итоговая шероховатость поверхности на данном масштабе оценивалась как величина σ , усредненная по набору АСМ кадров одинакового размера. Многочисленные наши АСМ исследования и измерения других авторов показывают, что рельеф практически всех поверхностей является многомасштабным. Наряду с мелкомасштабными неровностями (в основном гауссова типа) имеются

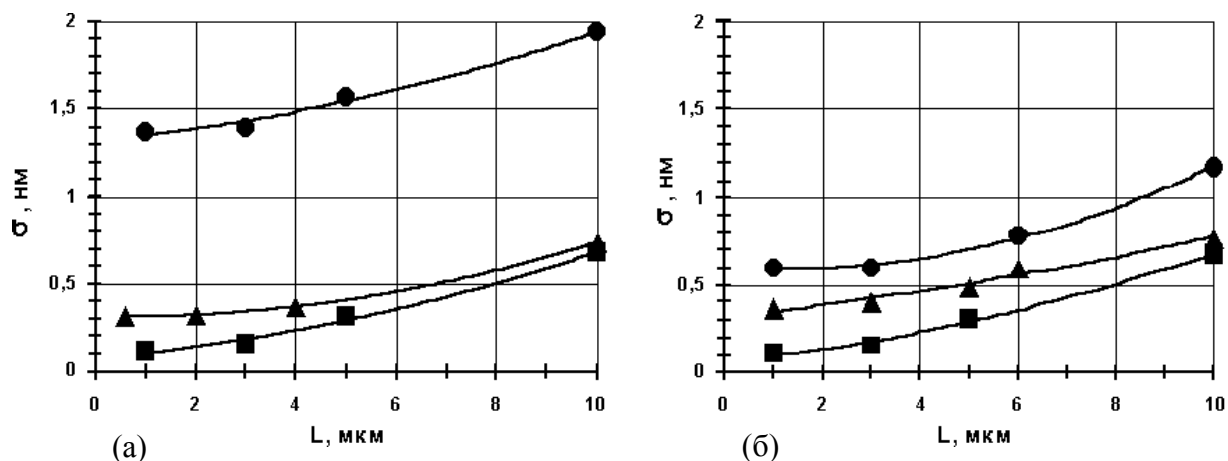


Рис.1. Масштабные зависимости среднеквадратичной шероховатости поверхности полимерных реплик с поверхности кремния (обозначены треугольными точками ▲) на подложках из стекла. (а) и (б) – результаты АСМ измерений для стеклянных подложек со средней ~ 1.5 нм и низкой ~ 0.7 нм шероховатостью поверхности соответственно. Масштабные зависимости параметра σ эталонной поверхности кремния показаны квадратными (■) точками, а исходной поверхности стеклянных подложек обозначены круглыми (●) точками. (L – размер кадра).

крупномасштабные структуры и случайные включения, которые существенно увеличивают оценку среднеквадратичной шероховатости на кадрах большого размера. Поэтому в качестве результатов АСМ измерений нами формировались зависимости величины среднеквадратичной шероховатости от размера кадра, характеризующие неровности поверхности на разных масштабах.

Была проведена серия экспериментов по репликации поверхности кремния и зеродура полимерными пленками на стеклянных подложках. На Рис. 1а приведены результаты АСМ измерений шероховатости исходной поверхности кремния и получаемого полимерного слоя на стеклянных пластинах, имеющих относительно высокую (порядка 1.5 нм по данным рентгеновского отражения) шероховатость поверхности. Как показали АСМ измерения, поверхность данного стекла имела величину σ в диапазоне 1.3 – 1.9 нм в зависимости от размера кадра L . Поверхность же полимерной реплики имела шероховатости существенно меньшие по сравнению с поверхностью стекла. Величина σ для полимерного слоя в этом случае составляла порядка 0.3 – 0.5 нм на площади 5×5 мкм. Как видно из рисунка различие в шероховатости поверхности полимерной реплики по отношению к исходной поверхности кремния составляет порядка 0.2 нм на площади 1 - 5 мкм.

На Рис. 1б приведены масштабные зависимости величины σ для полимерной реплики на стеклянной пластине с малыми (порядка 0.7 нм по данным рентгеновского отражения) шероховатостями поверхности. В этом случае величина шероховатостей полимерного слоя также составляла порядка 0.3 – 0.5 нм на площади 5×5 мкм. Данные эксперименты показали, что параметр σ для поверхности полимерного слоя практически не зависит от исходной шероховатости поверхности стекла и определяется шероховатостью эталонной поверхности. Были проведены аналогичные эксперименты по репликации поверхности полированных пластин из зеродура. На Рис. 2а приведены масштабные АСМ зависимости параметра σ для реплик с поверхности зеродура.

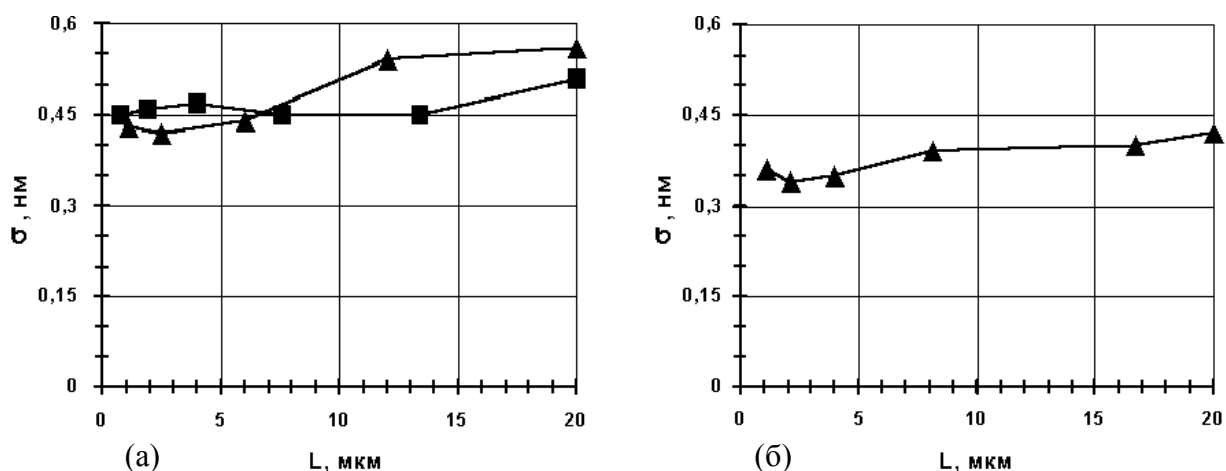
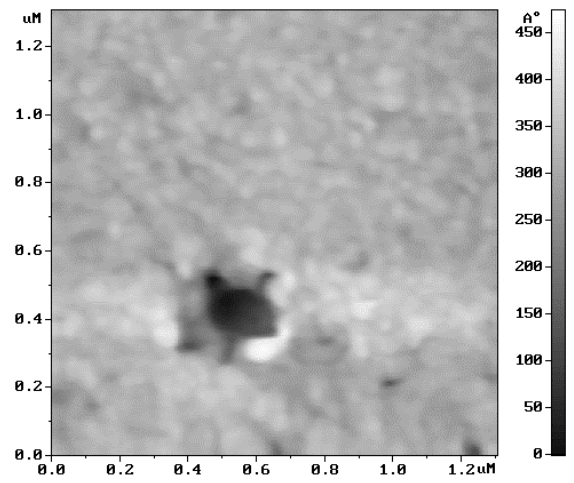
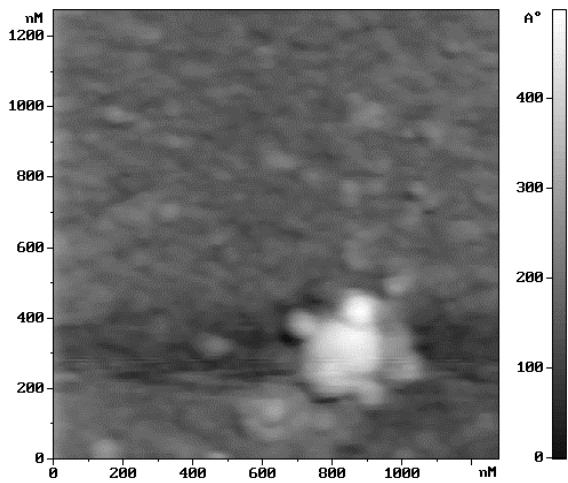
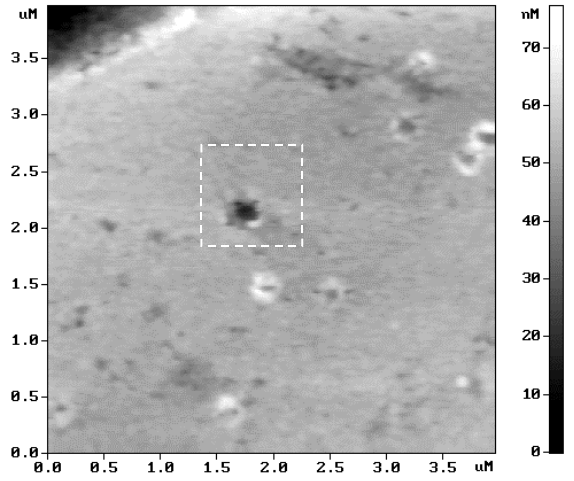
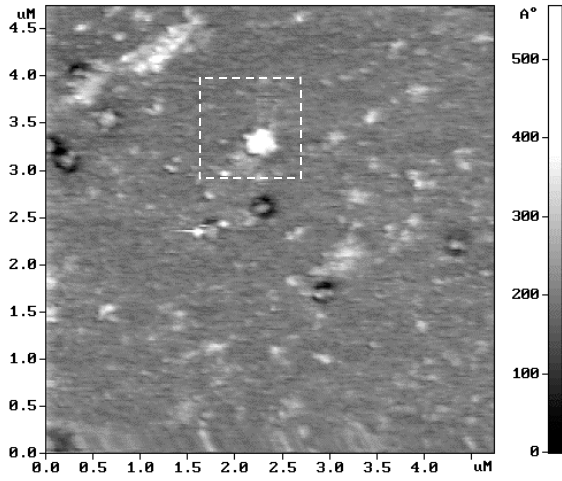
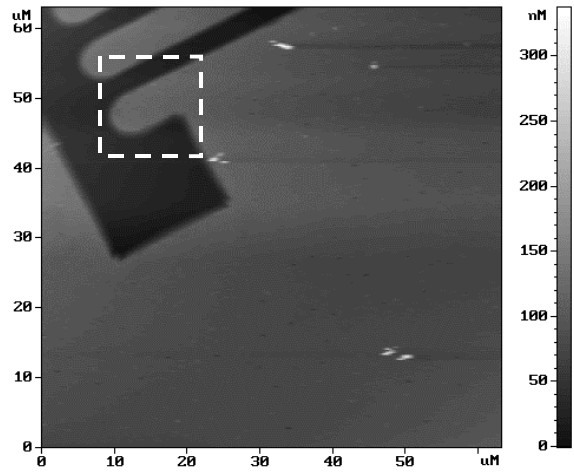
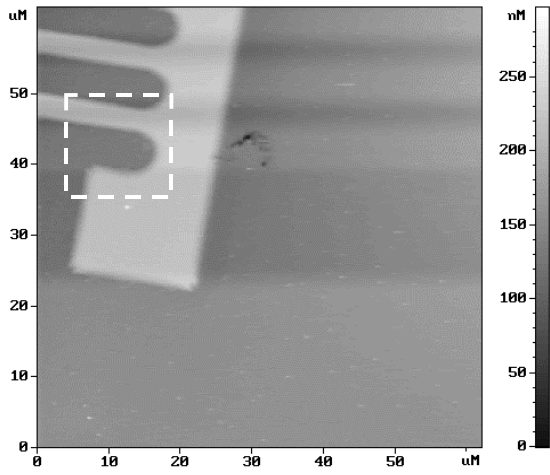


Рис. 2. (а) – Масштабные зависимости среднеквадратичной шероховатости поверхности полимерной реплики (показана квадратными точками ■) и соответствующей ей эталонной поверхности зеродура (показана треугольными точками ▲). (б) – Масштабная зависимость среднеквадратичной шероховатости поверхности полимерной реплики с поверхности глубоко полированного кремния. (L – размер АСМ кадра).

АСМ исследования показали, что шероховатость поверхности зеродуровых пластин составляла порядка 0.4 нм и практически не зависела от размера области сканирования. Поверхность полимерных реплик на стекле, полученных с поверхности зеродура имела величину $\sigma \sim 0.5$ нм близкую к значению σ зеродура и также не зависела от размера кадра. Отсутствие масштабной зависимости для данного типа эталонных пластин, по-видимому, обусловлено высоким качеством глубокой финишной полировки поверхности. Аналогичные результаты были получены для полимерных реплик с поверхности глубоко полированного кремния (Рис. 2б). Как видно из рисунка, для данной эталонной поверхности также отмечается отсутствие масштабной зависимости σ от размера АСМ кадра.

Также были проведены АСМ исследования сопряженных участков поверхности эталонного образца и полимерной реплики. В качестве эталонного образца в данных экспериментах использовалась решетка на поверхности кремния, изготовленная методом фотолитографии. Как показали результаты исследований (Рис. 3), поверхность полимерной реплики хорошо передает особенности рельефа поверхности эталонного образца на нанометровых масштабах. Минимальные латеральные размеры реплицируемых особенностей с учетом конечных размеров зонда составляют порядка 30 нм.

На комбинированных подложках стекло-полимер методом магнетронного напыления были изготовлены многослойные рентгеновские зеркала (МРЗ) на основе Mo-Si на длину волны 13 нм [5]. Для сравнения в тех же условиях были изготовлены аналогичные МРЗ структуры на эталонных кремниевых подложках. Угловые и спектральные зависимости полученных МРЗ исследовались с помощью рентгеновского рефлектометра, созданного в ИФМ РАН на базе спектрометра - монохроматора РСМ-500 (диапазон длин волн 4–50 нм). Как показали исследования, полуширина спектральной зависимости и пиковые значения в максимуме для МРЗ на



комбинированных подложках практически совпадают с аналогичными характеристиками для МРЗ, изготовленных на кремниевых подложках при одних и тех же условиях в одном цикле. На Рис 4 приведены спектральные зависимости коэффициента отражения МРЗ на комбинированных подложках полимер-стекло и на эталонных Si подложках. Наблюдаемое уменьшение коэффициента отражения на 1-2 % по сравнению с МРЗ на кремнии может объясняться развитием рельефа поверхности полимерного слоя под действием высокоэнергетической части магнетронного пучка при формировании первых слоев МРЗ, а также возможным разогревом подложки и частичной пластической релаксацией напряжений в слое полимера в процессе напыления. Повышение отражательных характеристик МРЗ на подложках полимер-стекло требует дальнейших исследований и разработки специальной технологии напыления буферных слоев для устранения возможной деградации поверхности полимера.

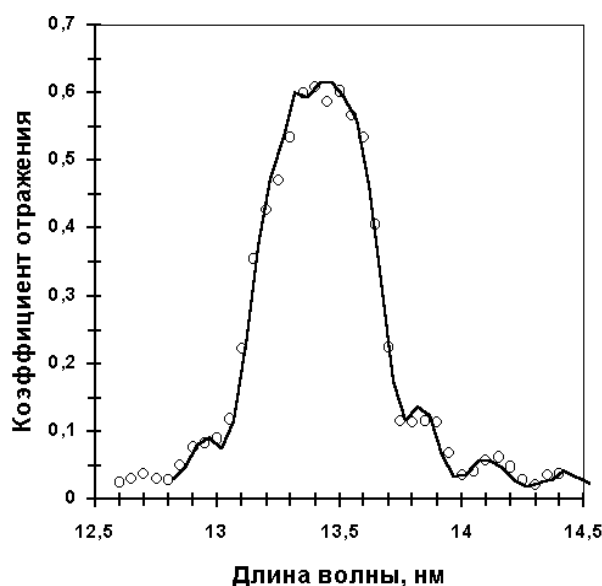


Рис. 4. Спектральные зависимости коэффициента отражения МРЗ на основе Mo-Si, изготовленных на комбинированных подложках полимер-стекло (показана кружками) и на эталонных Si подложках (показана сплошной линией).

Также с использованием полимеров были изготовлены цилиндрические отражатели для формирования коллимированных рентгеновских пучков от источников с линейным фокусом. В качестве подложек использовались плоские стеклянные пластины. Форма поверхности полимера задавалась эталонным пуансоном цилиндрической формы. Комбинированная подложка стекло-полимер изготавливалась посредством полимеризации слоя полимера в зазоре между плоской подложкой и пуансоном. Затем на поверхность данной комбинированной подложки наносилось МРЗ Mo-Si. Результаты сравнительных исследований поперечного распределения интенсивности рентгеновского пучка, сформированного с помощью параболического отражателя на изогнутой кремниевой подложке и на комбинированной подложке полимер-стекло, приведены на Рис. 5. Из рисунка видно, что ширина коллимированного пучка для обоих отражателей практически одинакова, хотя интенсивность отраженного излучения от зеркала на полимерной основе несколько ниже (отношение интенсивностей равно 0,8).

Таким образом, в работе были проведены исследования возможности сглаживания шероховатостей поверхности подложек с помощью тонких слоев полимерных материалов. Сглаживание производилось методом репликации поверхности эталонных образцов. Проведенные АСМ исследования шероховатости исходных подложек и полимерных реплик с поверхности эталонных образцов из кремния и зеродура показали, что тонкие полимерные слои достаточно хорошо реплицируют поверхности эталонных образцов. Шероховатость поверхности полимерных реплик близка к шероховатости эталонных поверхностей. На комбинированных подложках стекло-

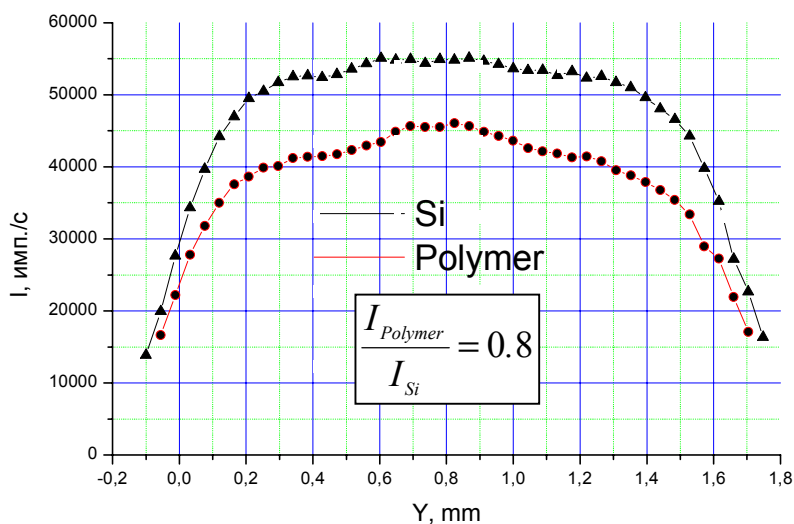


Рис. 5. Поперечное распределение интенсивности рентгеновского пучка, сформированного с помощью параболического зеркала на изогнутой кремниевой подложке и на комбинированной подложке полимер-стекло.

полимер изготовлены МРЗ на основе Mo-Si. Показано, что полуширина спектральной зависимости коэффициента отражения и пиковые значения в максимуме практически совпадают с аналогичными характеристиками для МРЗ, изготовленных на кремниевых подложках при одних и тех же условиях в рамках одного эксперимента. На комбинированных подложках стекло-полимер изготовлены параболические отражатели для формирования рентгеновских пучков, не уступающие аналогичным структурам, изготовленным на основе изогнутых кремниевых пластин.

В заключение авторы выражают благодарность Л.А.Суслову, С.Ю.Зуеву, Н.А.Коротковой за помощь при проведении данных исследований.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 01-02-16444, 00-02-1657)

Литература

1. M.T.Gale - Microelectronic Engineering, 34, p. 321, (1997).
2. P.R.Krauss, S.Y.Chou – Appl. Phys. Lett., 71 (21), p. 3174, (1997).
3. H.Schift, C.David et al. - Microelectronic Engineering, 53, p. 171, (2000).
4. J.A.Rogers, Z.Bao, M.Meier et al. – Synthetic Metals, 115, p. 5, (2000).
5. С.С.Андреев, С.В.Гапонов и др. – Поверхность, № 1, с. 66 (2001).