

УДК 539.26+539.216.2+539.219.1

© В. В. Розанов, А. А. Евстапов

ВЛИЯНИЕ ТОПОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖКИ НА СТРУКТУРУ ФОРМИРУЕМЫХ ЛЕНГМЮРОВСКИХ ПЛЕНОК

Рассмотрены основные вопросы подготовки поверхности подложки для нанесения на нее ленгмюровской пленки. Приводятся изображения, полученные методами конфокальной сканирующей лазерной микроскопии и атомно-силовой микроскопии, что позволило выявить корреляцию дефектов в структуре поверхности пленки и подложки. Обсуждается влияние топографии поверхности подложки на структуру формируемых пленок.

ВВЕДЕНИЕ

Тонкие полиимидные пленки [1] являются перспективным материалом для использования в электронике и микросистемной технике [2]. При их формировании важными характеристиками, помимо физико-химических и геометрических характеристик, отражающих свойства пленок, являются их структурные характеристики: размеры и форма структурных элементов, однородность и наличие дефектов. Одним из методов получения пленок является метод Ленгмюра—Блоджетт (ЛБ) [3]. Данный метод позволяет формировать монослои органических пленок и осаждать их на твердую основу.

Важным этапом в технологии формирования ленгмюровских пленок малых толщин является выбор и подготовка поверхности подложки для их осаждения. Основными требованиями при выборе подложки с целью получения однородной и воспроизводимой пленки являются:

- 1) рельеф поверхности и малая шероховатость;
- 2) чистота поверхности;
- 3) хорошие адгезионные свойства.

Наиболее широко применяемым материалом подложки является кремний. Он обладает высокой химической и термической стабильностью и хорошей теплопроводностью. Недостатком этого материала является необходимость дополнительных технологических операций для получения гладкой и чистой поверхности.

К различным типам нерегулярностей, составляющих общую поверхностную текстуру подложки, можно отнести следующие поверхностные дефекты [4].

Дефекты микронного размера: царапины и выбоины после шлифовки; границы кристаллитов в поликристаллических материалах; микропоры.

Дефекты субмикронного размера: царапины и выбоины после полировки; нанопоры.

Дефекты атомного и молекулярного размера: точечные дефекты, дислокационные линии, одноатомные ступеньки на плоскостях скола. Этот вид дефектов в данной работе не рассматривается.

Заданная шероховатость поверхности кремния достигается шлифовкой и полировкой. Часто встречающимися загрязнениями, остающимися на поверхности кремния после ее обработки, являются гели, масла и частицы, осажденные из воздуха, а также волокна от упаковки, используемой для хранения кремния. Для получения хорошей адгезии поверхности подложки с наносимой пленкой поверхность кремниевой пластины перед использованием подвергают предварительной очистке от органических веществ, а затем травлению для получения поверхности с заданными физическими свойствами [5].

В связи с вышеизложенным актуальным представляется изучение влияния топологии поверхности подложки на структуру формируемых пленок на субмикронном и микронном уровнях методами высокоразрешающей микроскопии.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ШЛИФОВАННОЙ И ПОЛИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖКИ

Поверхность подложки из пластины кремния марки КДБ (100) исследовалась методами высокоразрешающей микроскопии: конфокальной сканирующей лазерной микроскопии (КСЛМ) [6] и атомно-силовой микроскопии (АСМ) [7]. Исследования проводились в двух направлениях: панорамного сканирования — по большой площади методом КСЛМ и локального сканирования — по малой площади методом АСМ. Такое комплексное исследование позволяет получить более полную информацию о характере рельефа поверхности подложки: шероховатости и дефектности поверхности подложки в микронном и субмикронном

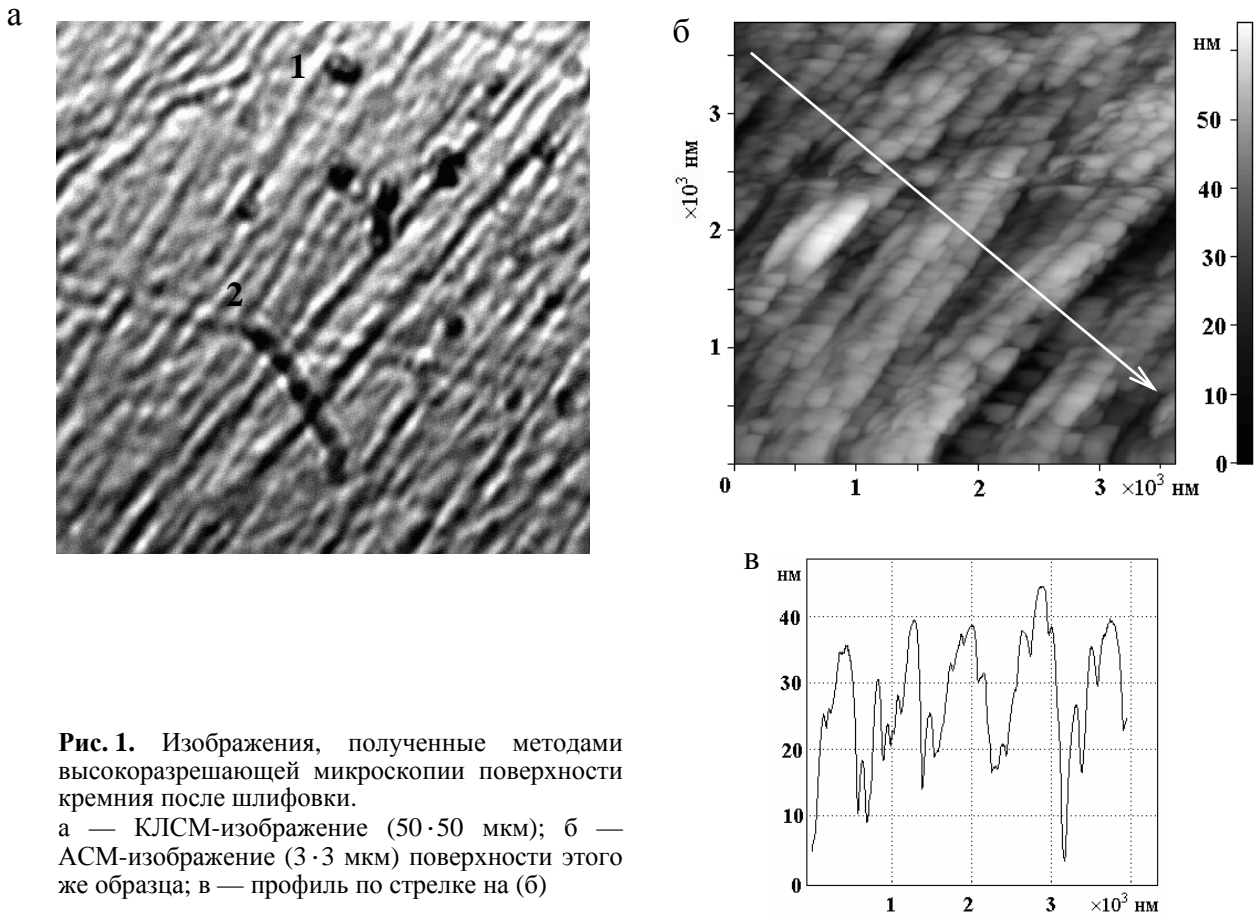


Рис. 1. Изображения, полученные методами высокоразрешающей микроскопии поверхности кремния после шлифовки.
 а — КЛСМ-изображение (50·50 мкм); б — АСМ-изображение (3·3 мкм) поверхности этого же образца; в — профиль по стрелке на (б)

диапазонах измерения. Были получены изображения поверхности пластины кремния, характеризующие поверхность подложки:

после шлифовки;

после полировки и последующего травления в растворе HF для снятия слоя SiO₂.

На рис. 1 представлены КЛСМ- (а) и АСМ-изображения (б) поверхности пластины кремния после шлифовки. Данные изображения позволили оценить рельеф (в) поверхности на микроуровне и возможную форму зерна ("кристалликов") структуры кремния на наноуровне. Исходный рельеф поверхности имеет волнистую гребнеобразную форму (б), по-видимому, являющуюся результатом механической обработки. КЛСМ-изображения (а) позволяют обнаружить наличие микродефектов на поверхности кремния в форме пор (1) и царапин (2) микронных размеров. АСМ-изображения (б) показывают, что гребни поверхности состоят из "кристалликов". Стандартные методы обработки АСМ-изображений микроскопа "Smena" (NT-MDT, Россия) показывают, что "кристаллики"

имеют вытянутую форму с размерами в плоскости 140×160 нм и средней высотой ~ 8 нм.

Характер рельефа поверхности меняется после ее полировки: исчезает волнистость поверхности подложки (рис. 2). Однако полученные КЛСМ-изображения (рис. 2, а) свидетельствуют о неоднородной структуре кремния: отражательная способность на просканированном участке различна, что следует из чередования темных и светлых областей поверхности. Изредка встречаются резко очерченные темные пятна (1, 2, 3), по-видимому, представляющие собой поры или углубления, отражающие дефекты поверхности. Обработка участка этого изображения (рис. 2, в) с использованием типовых программных средств микроскопа "Leica TCS SL" (Leica, Германия) позволяет интерпретировать полученные темные пятна как углубления с характерным размером около 1÷2 мкм (3). Поверхность кремния, при таком представлении изображения (б), является достаточно однородной и шероховатой, имеющей некоторые перепады по высоте, очевидно, обусловленные процессом полировки.

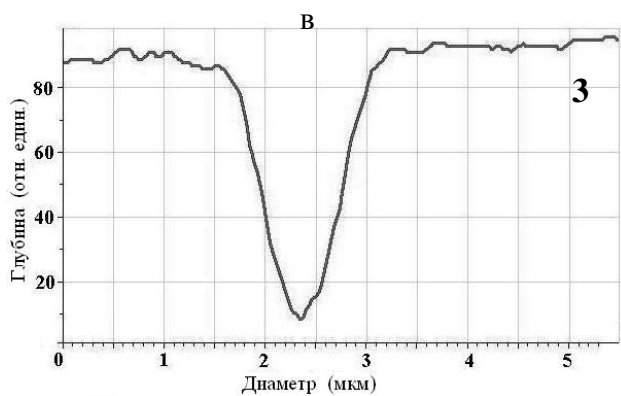
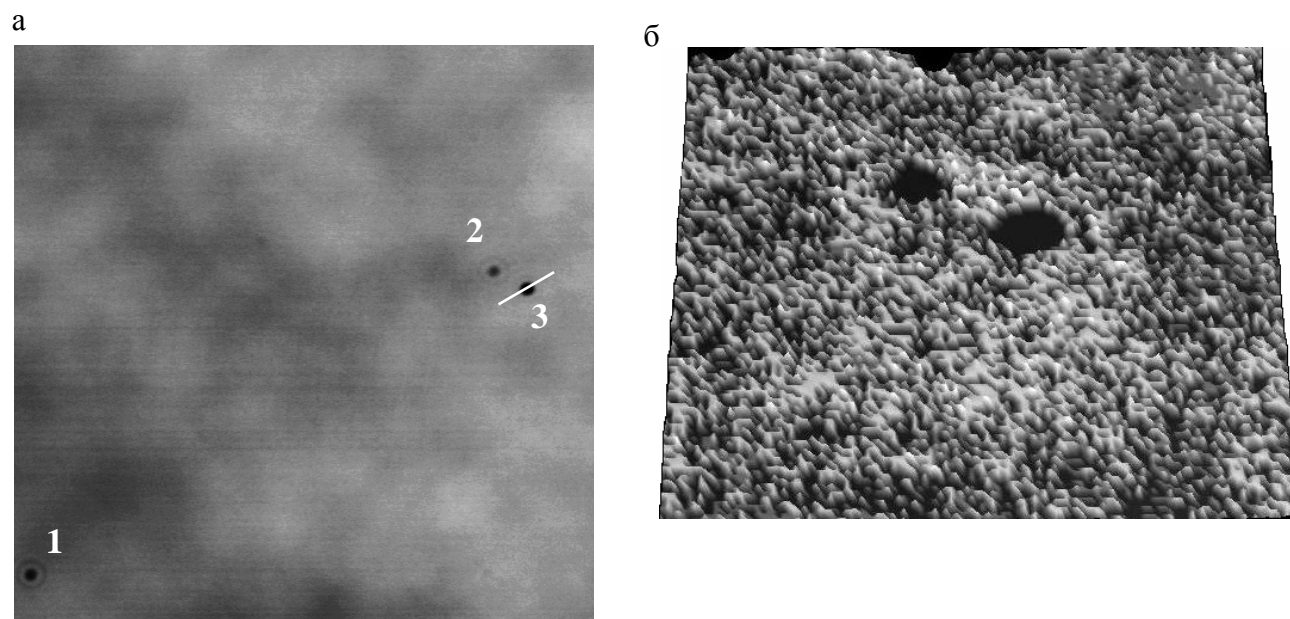


Рис. 2. Изображения, полученные методами высокоразрешающей микроскопии поверхности кремния после полировки.
а — КЛСМ-изображение (50·50 мкм); б — КЛСМ-изображение (15·15 мкм) поверхности этого же образца; в — профиль окрестности "пятна" (3) по стрелке на (а)

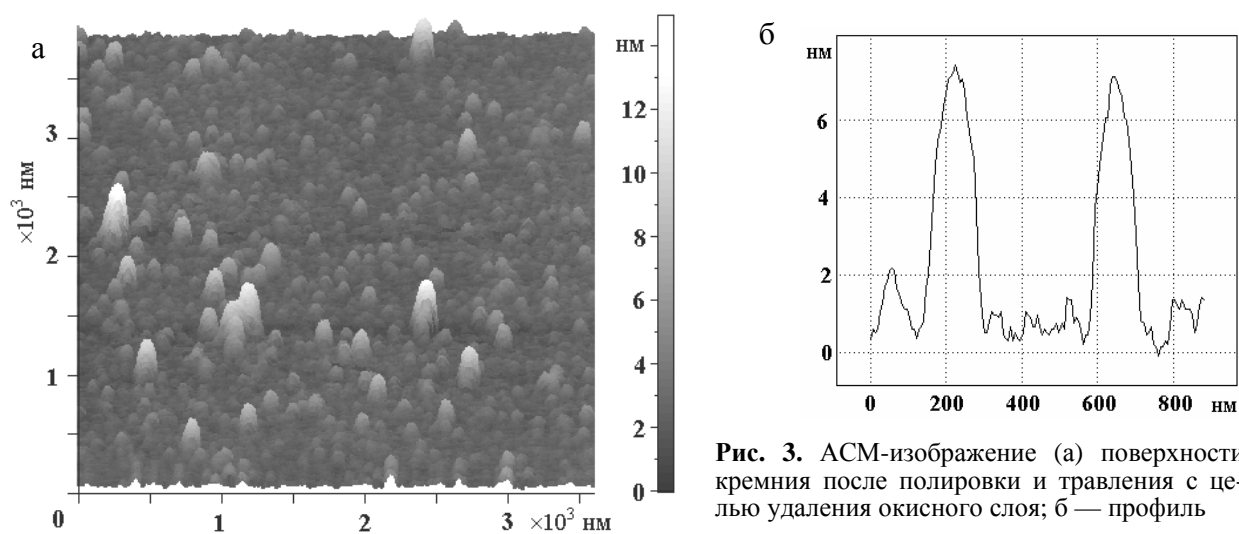


Рис. 3. АСМ-изображение (а) поверхности кремния после полировки и травления с целью удаления окисного слоя; б — профиль

На рис. 3 представлено АСМ-изображение (3×3 мкм) рельефа поверхности полированной подложки, подвергнутой травлению. Характерной особенностью полученной поверхности является наличие значительных по размеру участков подложки, состоящих из мелких "кристалликов" высотой порядка $2 \div 3$ нм с размерами в плоскости сканирования ~ 80 нм. Тем не менее приготовленная таким образом поверхность подложки не является однородной по высоте. Достаточно крупные отдельные "кристаллики" высотой $7 \div 8$ нм чередуются с "кристалликами" высотой порядка 2 нм (б). Такой перепад высот в $5 \div 6$ нм позволяет предполагать, что на этих локальных участках подложки можно ожидать эффектов неравномерного прилипания монослоя пленки.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ДЕФЕКТЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА РЕЛЬЕФ ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНКИ

Анализ поверхности "тонких" ЛБ-пленок, сформированных на полированной и протравленной поверхности подложки, показывает, что имеется наследование микрорельефа поверхности подложки. В частности, на изображении поверхности преполимера ЛБ-пленки толщиной в 3 слоя (~ 9 нм) (рис. 4), полученном методом КЛСМ, визуализированы углубления (1) с латеральными размерами,

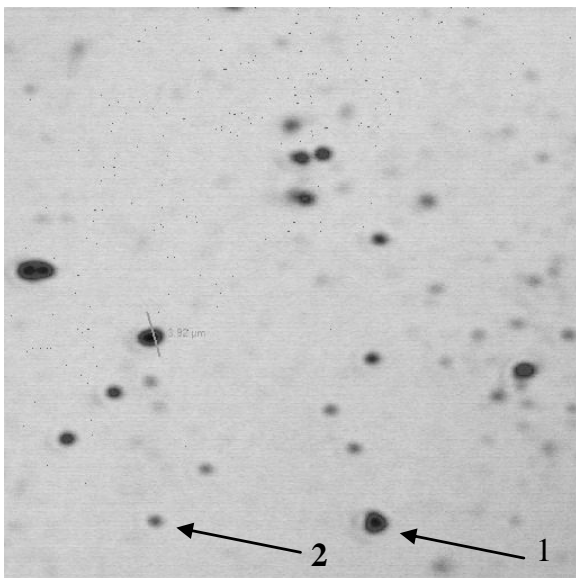


Рис. 4. КЛСМ-изображение (50×50 мкм) поверхности ЛБ-пленки преполимера толщиной 9 нм. Стрелками показаны сквозные (1) и скрытые пленкой дефекты (2)

подобными размерам углублений, наблюдавшихся на КЛСМ-изображении поверхности подложки кремния после полировки (рис. 2). Методом послойного КЛСМ-изображения в структуре ЛБ-пленки были выявлены также скрытые пленкой углубления (2), принадлежащие, по-видимому, поверхности подложке.

Другой важной стороной, характеризующей качество подготовки поверхности подложки, является наличие технологических дефектов, появившихся в результате нарушения технологий очистки пленки от органических веществ и травления. На рис. 5 приведено АСМ-изображение (а) топографии полиимидной ЛБ-пленки. Толщина такой пленки составляет 5.5 нм и соизмерима с высотой зерна поверхности подложки кремния после ее травления (рис. 3). Особенностью данного изображения (рис. 5, а) является наличие отчетливо проступающих вытянутых объектов — участков рельефа, подобных (1). Увеличенное изображение объекта (1) на рис. 5, б показывает, что его поверхность сформирована из элементов округлой формы, размеры которых подобны размерам элементов, составляющих ровные участки поверхности пленки (1). Подобные по форме объекты (1) наблюдались ранее при исследовании поверхности подложки кремния (рис. 5, в), обработанной для нанесения на нее ЛБ-пленки, и рассматривались как дефекты, образовавшиеся в результате нарушений в технологическом процессе очистки и травления. Проведенные сечения (2 и 3) схожих по форме объектов (на б и в) позволяют говорить о том, что поверхность пленки передает форму объекта, не принадлежащего структуре пленки, но сходную с дефектами на поверхности подложки. Так, проведенные сечения свидетельствуют о том, что размеры дефекта на пленке соизмеримы с размерами дефекта на подложке: высота дефекта на поверхности подложки составляет 20 нм, а высота пленки с дефектом — 10 нм; протяженность дефекта в обоих случаях составляет ≈ 600 нм.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что наблюдаемый эффект структуры пленки есть дефект подложки, повторяемый пленкой.

ВЫВОДЫ

Представленные выше экспериментальные результаты, полученные при комплексном анализе методами КЛСМ и АСМ поверхности кремниевой подложки и поверхности пленок преполимера (толщиной 9 нм) и полиимида (толщиной 5.5 нм), показали, что структура тонких пленок может наследовать дефекты поверхности подложки, имеющие микронные и субмикронные размеры. Таким образом, при изучении структуры

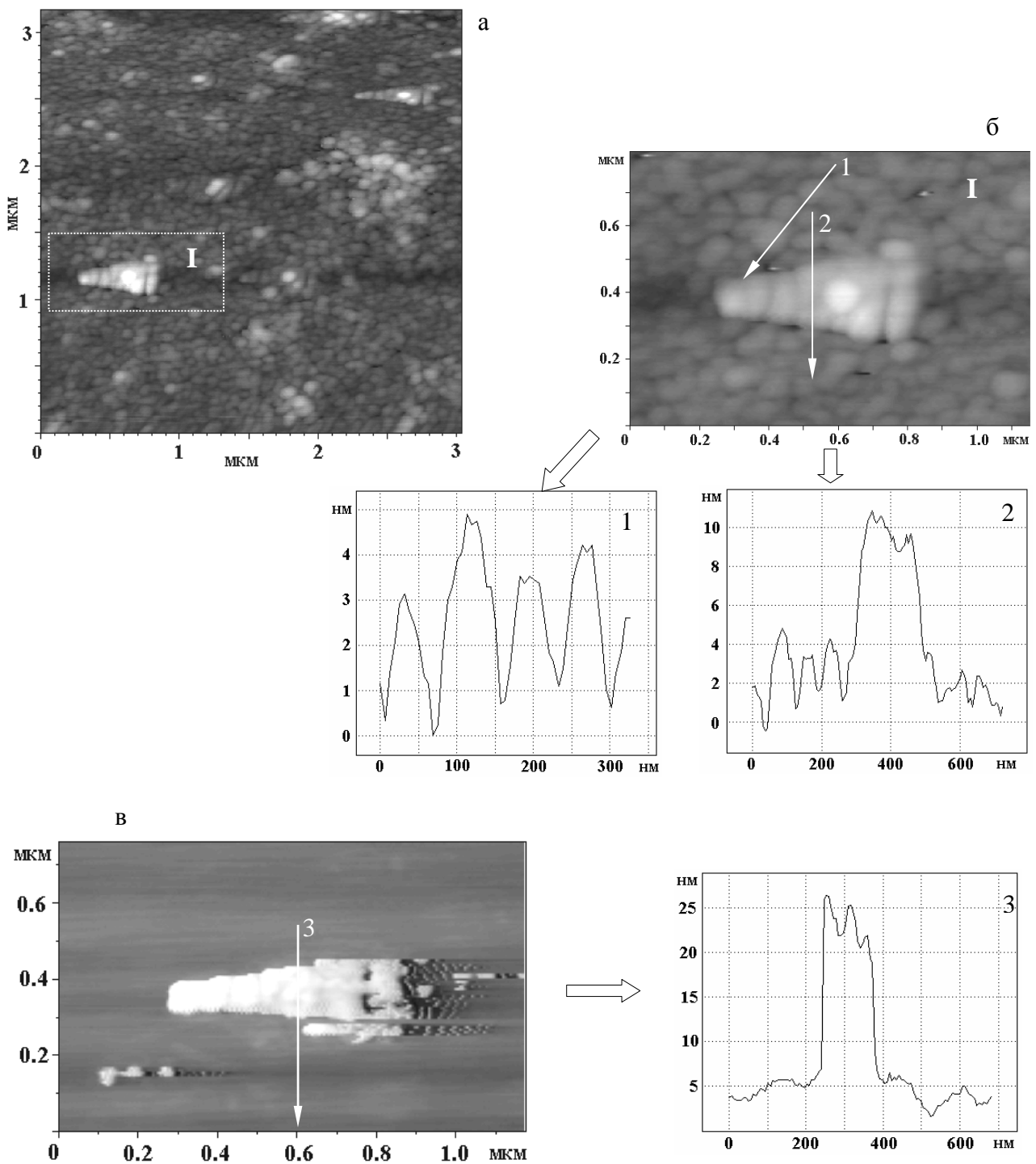


Рис. 5. АСМ-изображение (а, б) поверхности полиимидной ЛБ-пленки, сформированной на поверхности кремния с технологическим дефектом и поверхность кремния с идентичным по форме дефектом (в); 1, 2, 3 — профили по соответственно обозначенным направлениям

тонких ленгмюровских пленок целесообразным является проведение дополнительных исследований, связанных с изучением исходного рельефа подложки, с целью правильной интерпретации структуры формируемых на подложках пленок. Наиболее приемлемым для этой цели представляется использование методов КЛСМ — для панорамного сканирования и АСМ — для локального сканирования поверхности соответственно с субмикронным и нанометровым разрешением.

Благодарности. Авторы благодарят зам. директора по научной работе ИАиП РАН проф. А.О. Голубка за полезные замечания и директора ЦМИД СПбГЭТУ проф. В.В. Лучинина с сотрудниками за предоставленные образцы подложек и ЛБ-пленок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бессонов М.И., Котон М.М., Кудрявцев В.В., Лайус Л.А. Полиимиды — класс термостойких полимеров. Л.: Наука, 1983. 328 с.
2. Нанотехнология. Физика, процессы, диагностика, приборы / Под ред. Лучинина В.В., Таи-

- рова Ю.М. М.: Физматлит, 2006. 551 с.
3. *Blodgett K.B., Langmuir I.* Built-up Films of Barium Stearate and Their Optical Properties // *Phys. Rev.* 1937. V. 51. P. 964–982.
 4. Технология тонких пленок. Справочник / Под ред. Майссела Л., Глэнга Р. М.: Советское радио, 1977. Т. 1. 662 с.
 5. *Ubara H., Imura T., Hiraki A.* Formation of Si-H Bonds on the Surface of Microcrystalline Silicon Covered with SiO_x by HF Treatment // *Solid State Communications.* 1984. V. 50, N 7. P. 673–675.
 6. *Лежнев Э.И., Попова И.И., Кузьмин С.В., Слащев С.М.* Конфокальная лазерная сканирующая микроскопия: принципы, устройство, применение (часть 1) // *Научное приборостроение.* 2001. Т. 11, № 2. С. 3–20.
 7. *Миронов В.Л.* Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Техносфера, 2004. 144 с.

Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург

Материал поступил в редакцию 14.08.2007.

THE EFFECT OF THE SUBSTRATE SURFACE TOPOLOGY ON THE LANGMUIR FILM STRUCTURE

V. V. Rozanov, A. A. Evstrapov

Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint-Petersburg

The paper considers the basic problems of preparing the substrate surface for applying Langmuir films. Images obtained by confocal laser scanning microscopy and atomic force microscopy are represented; they allowed us to reveal the correlation between structure defects of the film and substrate surfaces. The influence of the substrate surface topography on the structure of the formed film is discussed.