

наночастицами магнетита. Несмотря на большее разрешение, полученное методом электронной микроскопии, изображения самих липосом имеют слабый контраст, однако на их фоне хорошо видны более темные зерна магнетита.

Заключение. Метод ПЭМ так же, как и метод АСМ, подтвердил факт встраивания наночастиц магнетита в мембраны липосом. Результаты исследований, полученные методами АСМ и ПЭМ, хорошо коррелируют между собой и дополняют друг друга. Анализ этих результатов – изображений микрорельефа, фазового контраста, а также микроизображений, полученных методом ПЭМ, – позволил сделать вывод о возможности модификации поверхности пленок ЛБ и мембран липосом наночастицами магнетита и молекулами ДНК.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований № 11-08-00529-а и № 11-08-12058-офи-м-2011.

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СИСТЕМ ТИТАНОВОЕ ПОКРЫТИЕ–КРЕМНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ОСАЖДЕНИЕМ ТИТАНА НА КРЕМНИЙ В УСЛОВИЯХ ОБЛУЧЕНИЯ СОБСТВЕННЫМИ ИОНАМИ

О. М. Михалкович, С. М. Барайшук, И. С. Ташлыков

Белорусский государственный педагогический университет, Минск, Беларусь

Введение. Осаждение тонких пленок на кремниевые пластины представляет как научный, так и практический интерес. Оно позволяет формировать изолирующие или проводящие слои, лиофильные или лиофобные в разных средах поверхности изделий. Чтобы исключить введение в приповерхностный слой атомов благородных газов, желательно применять для радиационного ассистирования ионы атомов осаждаемого покрытия. Для управления свойствами покрытий при осаждении покрытий необходимо изучать композиционный состав систем покрытие–подложка, их морфологию и структуру. Поэтому в настоящем исследовании мы изучали элементный состав системы покрытие–кремний, сформированной ионно-ассистированным осаждением покрытия на кремний, глубинное распределение дефектов и топографию полученной структуры.

Результаты и их обсуждение. Для осаждения титановых и кобальтовых покрытий на кремний в условиях ионного ассистирования использовали резонансный источник вакуумной дуговой плазмы (вакуум 10^{-2} Па). Элементный послойный анализ конструкций пленка–кремний выполняли используя резерфордовское обратное рассеяние (РОР) ионов гелия He^+ с $E_0 = 2.0$ МэВ и компьютерное моделирование экспериментальных спектров РОР по программе RUMP [1]. Для построения глубинных профилей компонентов изучаемых конструкций мы используем понятие положения исходной поверхности подложки (ПИПП), которое определяли в экспериментах по введению ионной

имплантацией в Si пластину ионов ксенона с энергией 10, 20, или 40 кэВ интегральным потоком от $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ до $2.7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ в качестве маркера.

В ранее проведенных экспериментах по осаждению покрытий было установлено, что при определенных условиях на поверхности пластин возможно появление капельной фракции. Так, на рис. 1 видно присутствие капельной фракции на поверхности структур кремний–титановое покрытие, которая создает существенные неоднородности на поверхности структуры покрытие–подложка и приводит к увеличению шероховатости поверхности.

Анализ топографии систем покрытие–подложка и чистого кремния и определение ее параметров был проведен с применением атомно-силового микроскопа. Были выбраны площадки размером $5 \times 5 \text{ мкм}$ и учтены рекомендации, предложенные в работе [2].

По изображению топографии (рис. 1) видно, что площадь капель в 10–40 превышает площадь неоднородностей основного рельефа поверхности струк-

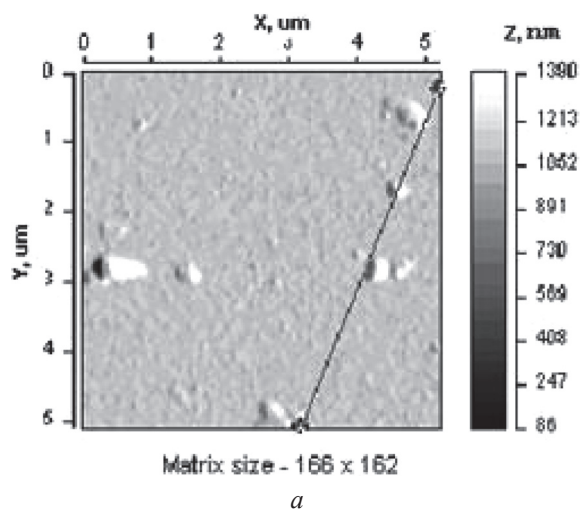
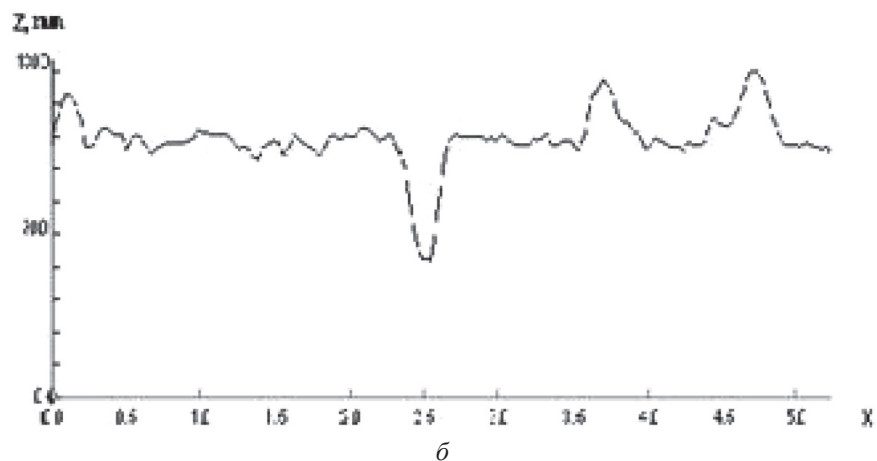


Рис. 1. Топография поверхности кремния с титановым покрытием (а) (потенциал – 3 кВ, расстояние до источника – 5 см) и диаграмма неровностей (б)



тур покрытие–подложка, а высота этих вкраплений в 3–7 раз превышает среднее отклонение остального рельефа поверхности. Таким образом, капельная фракция увеличивает шероховатость приблизительно на 15–20 %.

Для устранения этого эффекта использовали методику, обсуждаемую в работе [3], в соответствии с которой было увеличено расстояние между источником и подложкой.

Применение такого приема в опытах по ионно-ассистированному нанесению металлсодержащих покрытий в условиях самооблучения на кремний привело не только к уменьшению скорости нанесения покрытия, но и к уменьшению удельной площади капельной фракции на поверхности образца с осажденными покрытиями в 4–6 раз (рис. 1, 2).

Как следует из данных, приведенных в таблице, средняя шероховатость исходного кремния весьма незначительна и изменяется от 0.2 до 1.1 нм на поверхности кремния с покрытием на основе титана. Полная площадь фрагмента практически не отличается от проективной площади. Из таблицы видно, что при нанесении всех изученных металлопокрытий наблюдаются качественно подобные изменения свойств топографии поверхности, заключающиеся в увеличении шероховатости и отношения полной площади поверхности к проективной.

Топография поверхности исходного кремния и кремния, модифицированного нанесением металлопокрытий (Ti)

Параметр	Кремний исходный	Ti
Средняя шероховатость, нм	0.169	1.101
Отношение полной площади участка к его проективной площади	1.0027	1.0044

Примечание. Время воздействия – 1 ч, мощность энергии ассистирования – 7 кэВ, размеры площадки сканирования – 5 × 5 мкм.

На рис. 3 показаны профили глубинного распределения компонентов конструкции, получаемой при нанесении титановой пленки на Si без введенного ксенонового маркера и с ним.

Профиль Ti характеризуется концентрацией, снижающейся от 6 ат.% на поверхности, до 1 ат.% в области межфазной границы системы. Атомы Ti идентифицируются в Si на глубине ~ 430 нм с концентрацией ~ 0.03 ат.%, что свидетельствует об их радиационно-стимулированной диффузии вглубь в процессе нарастания покрытия под радиационным воздействием ассистирующих ионов. Водород распределен в покрытии неравномерно, и его концентрация уменьшается от 49.9 ат.% на поверхности пленки, до 5 ат.% в области положения исходной поверхности подложки. В кремнии водород не идентифицируется.

Кислород распределен в покрытии неравномерно: его концентрация возрастает с 17 ат.% на поверхности покрытия до 23 ат.% вблизи исходной по-

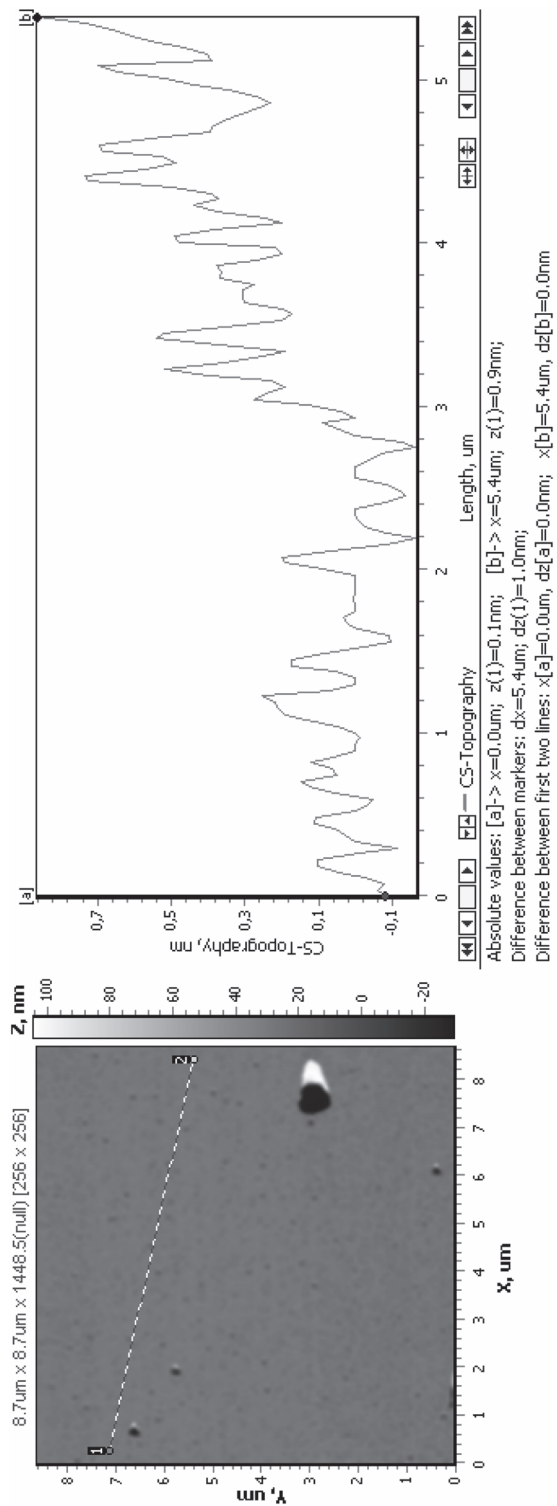


Рис. 2. Топография поверхности кремния с титановым покрытием (а) (потенциал – 3 кВ, расстояние до источника – 15 см) и диаграмма неровностей (б)

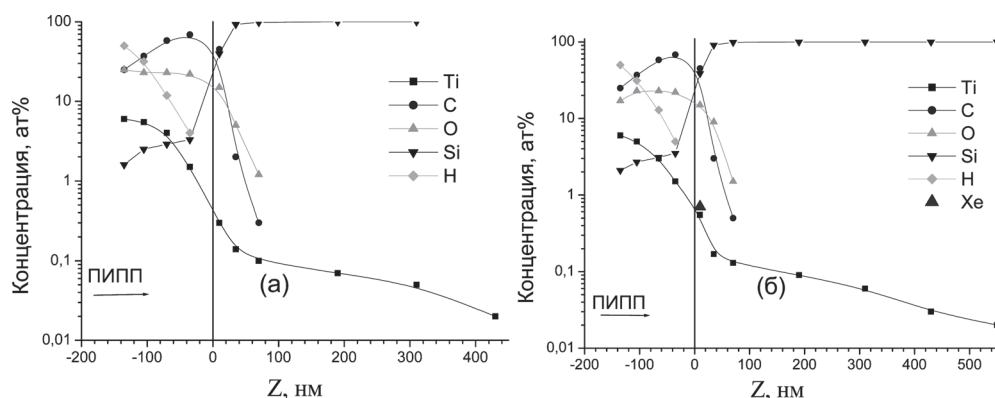


Рис. 3. Распределение элементов по глубине в структурах Ti покрытие–Si, сформированных: *a* – методом ИАНПУС; *б* – методом ИАНПУС на кремнии с предварительно имплантированным маркером Xe с энергией 20 кэВ и интегральным потоком 9×10^{14} Xe/см²

верхности подложки, а в кремнии на глубине < 100 нм его концентрация снижается в несколько раз до значений порядка десятых долей атомного процента. Профиль углерода качественно подобен пространственному распределению кислорода в покрытии, однако его концентрация примерно в 2.5 раза выше. В подложке же количество углерода в 2 раза ниже количества кислорода на сопоставимой глубине. Кислород и углерод проникают в подложку на глубину ~ 70 нм.

Анализируя полученные результаты (рис. 3), отметим, что атомы углерода и кислорода проникают в кремниевую подложку на ~ 30 нм глубже, если в систему покрытие–подложка был предварительно введен маркер ксенона. Атомы же титана проникают в кремний на глубины во много раз большие проективного пробега, рассчитанного по программе TRIM, и в разы превышающие проникновение атомов кислорода и углерода в кремний. В пластине Si с предварительно имплантированными ионами Xe⁺ глубина проникновения атомов титана увеличивается еще приблизительно на 120 нм. При этом концентрация атомов титана на сопоставимой глубине возрастает примерно в 1.5 раза. Такой эффект проникновения можно объяснить радиационно-усиленной диффузией при осаждении покрытий атомов металла вглубь кремния по дефектам, создаваемым ионами ксенона. Заметим, что при предварительной имплантации ионов ксенона в качестве маркера в кремний наблюдается незначительное увеличение концентрации атомов кремния в покрытии, что может также свидетельствовать о роли дефектов в усилении процессов встречной диффузии.

Диффундируя на большую глубину, атомы Ti способствуют диффузии атомов кислорода и углерода. Это также можно объяснить тем, что при введении ксенонового маркера в кремниевой подложке образуются дефекты, по которым и происходит усиленное проникновение атомов компонентов покрытия. При этом отметим, что концентрация кислорода и углерода на сопоставимой

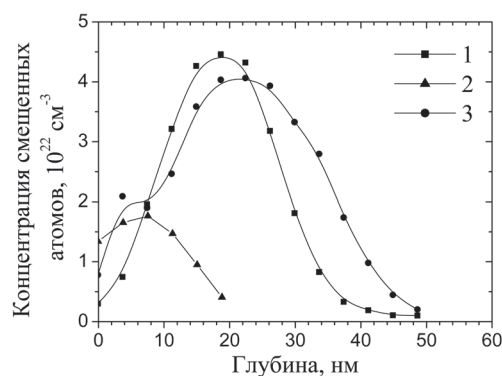


Рис. 4. Распределение концентрации дефектов по глубине в кремнии после: 1 – имплантации ионов Xe^+ с $E = 40$ кэВ и дозой: $D = 27 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$; 2 – только ионно-ассистированного в условиях самооблучения нанесения титана; 3 – ионно-ассистированного осаждения Ti на кремний с предварительно имплантированным Xe

были рассчитаны при помощи компьютерной программы TRIM-89 [4].

На рис. 4 представлены профили распределения по глубине радиационных дефектов в кремнии (междоузельные атомы Si) имплантированным ксеноном (кривая 1), с титановым покрытием на исходном Si (кривая 2) и на Si с ксеноном (кривая 3).

Глубина максимальной концентрации дефектов, производимых при имплантации ионов ксенона, сравнима с глубиной проникновения ионов Xe^+ с соответствующими энергиями в кремнии, которая рассчитана по программе TRIM. Так, для ионов ксенона с энергией 40 кэВ средний проективный пробег и страгглинг пробега составляет $R_p \pm \Delta R_p = 27,1 \pm 7,1$ нм.

Характер повреждения структуры кремния при его модифицировании, отсутствие «полочки» на профиле дефектов, генерируемых ионами Ti^+ (рис. 3: б), свидетельствует о том, что смещенные в междоузлия атомы Si диффундируют на поверхность и далее входят в состав покрытия.

Максимальная концентрация смещенных из узлов атомов кремния, полученная при имплантации ионов Xe^+ , уменьшается при последующем ионно-ассистированном нанесении Ti, Co покрытий в условиях самооблучения, что объясняется нами с активацией миграционных процессов вглубь и к поверхности кремния, что также способствует вхождению атомов кремния в покрытие, с одной стороны, и миграции атомов компонентов покрытия вглубь подложки.

Заключение. В данной работе обсуждается композиционный состав структур Ti покрытие–кремниевая подложка, полученных методом ионно-ассистированного нанесения. Показано взаимопроникновение атомов покрытия в подложку и встречная диффузия атомов подложки в покрытие. Определены значения шероховатости образцов. Показано, что шероховатостью поверхно-

глубине в кремнии с введенным маркером, как и титана, выше, чем в образцах только с покрытием (рис. 3).

Отметим, что физические процессы формирования структур Ti покрытие–подложка качественно сопоставимы с процессами, протекающими при нанесении на кремний кобальтовых покрытий.

Для изучения пространственного распределения радиационных дефектов, генерируемых в конструкциях покрытие–подложка ассистирующими ионами Ti^+ , применяли метод РОР/КИ ионов He^+ с энергией 2 МэВ. Разрешение детектора составляло 25 кэВ. Величина среднего проективного пробега элементов в матрице

сти образцов можно управлять, создавая поверхность для разных функциональных применений. Рассмотрены механизмы диффузии элементов и предложено качественное объяснение явлениям, протекающим на границе раздела покрытие–подложка.

Список использованных источников

1. Chu, W. K. Backscattering spectroscopy / W. K. Chu, J. W. Mayer, M. A. Nicolet. – New York : Academic Press, 1978. – 377 p.
2. Westra, K. L. Atomic force microscopy tip radius needed for accurate imaging of thin film surfaces / K. L. Westra, D. J. Thomson // J. Vac. Sci. Technol. B. – 1994. – Vol. 12, N 6. – P. 3176–3181.
3. Изучение физико-химических процессов на межфазной границе систем покрытие–пленка, облучаемых ускоренными ионами в условиях управляемой плотности выделенной энергии. Разработка «чистой» технологии нанесения тонких слоев материалов, сопровождаемого облучением ускоренными ионами : отчет о НИР (заключ.) / Фонд фундаментальных исследований Республики Беларусь ; рук. темы И. С. Ташлыков. – Минск, 1994. – 109 с. – № Ф8–123.
4. Шипатов, Э. Т. Обратное рассеяние быстрых ионов : теория, эксперимент, практика / Э. Т. Шипатов. – Ростов-на-Дону : РГУ, 1988. – 153 с.

АТОМНО-СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ В ЗАДАЧАХ КОНТРОЛЯ ЗАТРАВОЧНОГО СЛОЯ НАНОКРИСТАЛЛОВ ОКСИДА ЦИНКА

К. А. Мить

Физико-технический институт, Алматы, Казахстан

Введение. В последнее время большой интерес исследователей привлекают такие материалы, как оксиды цинка, сульфиды цинка и кадмия, что объясняется высоким потенциалом их применения в самых различных отраслях техники: в электронике и сенсорике, в солнечной и водородной энергетике, в топливных элементах, аккумуляторах, каталитических реакторах и пр. Особый интерес представляют наноматериалы, физико-химические свойства которых зависят от размерных эффектов. Количество научных публикаций по нанокристаллическим полупроводниковым материалам растет из года в год. Все это обуславливает высокую актуальность работ по разработке методов получения материалов и исследованию их свойств.

Для практических применений весьма важна разработка таких методов синтеза, которые позволяли бы получать материалы с заданными свойствами с высокой экономической эффективностью. Методы осаждения прекурсоров в водной фазе, газотранспортные методы являются низкочастотными, используют простое аппаратное оформление и поэтому являются потенциально высокоэффективными. Однако конечный результат зависит от всех деталей технологического процесса, поэтому для применения этих методов и получе-