

СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ СИСТЕМЫ Мо/ПОДЛОЖКА, ФОРМИРУЕМОЙ ПРИ ИОННОМ АССИСТИРОВАНИИ

И.С. Ташлыков, А.И. Туровец

Белорусский государственный педагогический университет им. М. Танка,
ул. Советская, 18, 220050 Минск, Беларусь, tashl@bspu.unibel.by

В работе представлены результаты исследования свойств поверхности системы тонкая пленка Мо/стеклянная подложка, формируемой методом осаждения пленки, ассистированного собственными ионами (ОПАСИ). Установлены корреляции между топологией поверхности, значениями шероховатости и смачиваемостью ее дистиллированной водой. Показано, что нанесение Мо пленки снижает гидрофильность поверхности изучаемой системы.

Введение

При конструировании солнечных элементов (СЭ) на подложку, используя разные методы, наносят тыльный контакт, затем поглощающий слой, буферный слой, лицевой контакт, антиотражающее покрытие. В качестве подложек рекомендуются натрийсодержащие стекла, боросиликатные стекла и Al_2O_3 -подложки [1]. С другой стороны, стекло идеально подходит как подложка для изготовления лабораторных образцов [2]. В качестве тыльного контакта применяются различные материалы [3]. Выбор молибдена в этом качестве основан на следующих критериях: хорошая адгезия к поглощающему слою; возможность омического контакта с поглощающим слоем р-типа проводимости; низкое удельное сопротивление; температура плавления должна быть настолько высокой, чтобы избежать смешивания с поглотителем в периоды термической обработки; химическая устойчивость к наносимым веществам. Мо пленка создает центры роста зерен поглощающего слоя [4].

В работе приведены результаты изучения Мо пленки, осаждаемой в качестве тыльного контакта тонкопленочных солнечных элементов на стеклянную подложку методом ОПАСИ. Целью работы являлось исследовать стадии процесса роста пленки тыльного контакта солнечного элемента при различных дозах облучения ассистировающими ионами до развития сплошной пленки, влияние дозы ионов Mo^+ на топографию и смачиваемость водой поверхности сформированных пленок. Метод ОПАСИ позволяет создать плавный переход между осажденной пленкой и материалом подложки. Это влияет на адгезию, гладкость поверхности пленки, позволяет повысить качество тонкопленочных устройств [5].

Основная часть

Тонкие пленки Мо наносились на стекло методом ОПАСИ [6] с использованием резонансного ионного источника вакуумной электродуговой плазмы. Ускоряющий потенциал на катоде для ассистировающих ионов Mo^+ был 10 кВ, облучение прекращалось при достижении интегральных потоков ассистировающих ионов Mo^+ $1,2 \cdot 10^{16}$, $3,2 \cdot 10^{16}$, $5,2 \cdot 10^{16}$, $8,1 \cdot 10^{16}$, $1,1 \cdot 10^{17}$ cm^{-2} .

Топология поверхности систем изучалась, используя сканирующую зондовую микроскопию (атомно-силовой микроскоп NT-206). Данные о гидрофильности поверхности образцов получали, измеряя равновесный краевой угол смачивания

(РКУС) на установке, представленной в [7]. В качестве смачивающей жидкости применялась дистиллированная вода (объем капли ~15 мкл).

Изображения топографии поверхности исходного стекла и стекла с нанесенной Мо пленкой приведены на рис. 1, а её характеристики представлены в таблице.

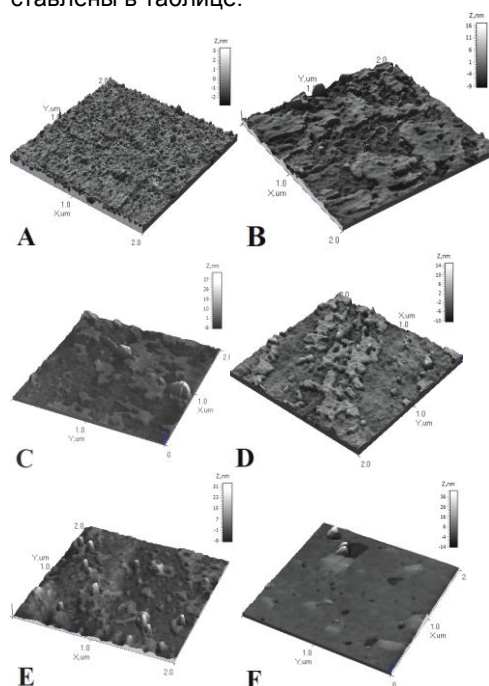


Рис. 1. 2-х и 3-х мерные изображения поверхности пленки Мо, нанесенной на стекло (А), при ассистировании с интегральным потоком ионов Mo^+ $1,2 \cdot 10^{16}$ (В), $3,2 \cdot 10^{16}$ (С), $5,2 \cdot 10^{16}$ (D), $8,1 \cdot 10^{16}$ (Е), $1,1 \cdot 10^{17}$ (F) cm^{-2} .

Таблица — Параметры морфологии и смачиваемости.

Образец	Исх	1	2	3	4	5
Интегральный поток Mo^+ , $\cdot 10^{16}$ cm^{-2}		1,2	3,2	5,2	8,1	11
Время модифицирования, мин		15	50	75	110	145
Средняя шероховатость, нм	2,20	1,78	1,97	2,71	2,33	2,30
% образования покрытия		56,9	33,6	34,5	48,1	96,5
Разность высот, нм		7,2	6,0	4,6	3,0	3,0
Краевой угол смачивания, °	25,1	62,8	67,4	69,7	60,8	56,7

Согласно полученным данным, используя качественное описание эволюции тонких пленок, синтезированных на аморфных и поликристаллических подложках [8], мы наблюдаем следующие шаги в процессе роста пленки Мо: появление островков роста, столкновение и слияние островков, развитие непрерывного структуры. Построив в программе SX гистограммы распределения высот и сечения 2D рисунков топографии на наиболее часто встречаемых высотах, определяем, насколько сплошным является пленка и ее толщину.

Оценивая % образования покрытия, отметим странное снижение с 56,9% до 33,6% на начальном этапе формирования пленки. Это возможно лишь в случае, когда наблюдаемая разнородная поверхность на АСМ снимках отображается не поверхностью пленки и подложки, а только поверхностью пленки, осаждаемой неравномерно на различных участках на начальном этапе ее формирования. Это возможно только в случае, если на АСМ снимках мы видим не поверхность подложки (более низкий уровень), а поверхность ранее осажденной пленки. Об этом свидетельствует, в частности, снижение разности высот с 7,2 нм до 3 нм при увеличении интегрального потока и, соответственно, времени нанесения пленки.

Средняя шероховатость (R_a) стекла незначительна и составляет 2,2 нм. Наблюдаемая при этом картина рельефа поверхности представляет собой ансамбль «холмов» схожей высоты.

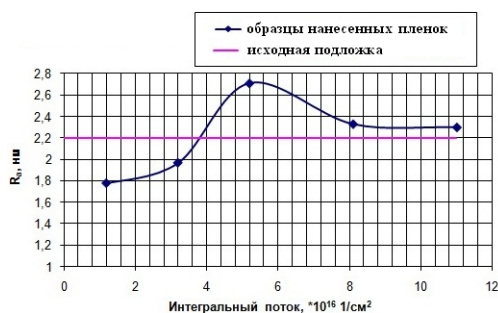


Рис. 2. Зависимость средней шероховатости поверхности образцов с нанесенными пленками Мо от интегрального потока ионов Mo^+

Зависимость R_a от величины интегрального потока (рис.2) имеет вид, схожий с ранее полученными результатами исследования влияния облучения графита ионами He^+ на структуру, элементный состав, топографию поверхности образцов, их смачиваемость [9].

После нанесения покрытия характер топографии поверхности заметно меняется. В отличие от исходного образца значительно снижается количество небольших неоднородностей, поверхность подложки становится более гладкой. Рост шероховатости с увеличением интегрального потока обусловлен разностью высот покрытия и подложки, а также многочисленностью островков зарождения покрытия, достигая максимума в 2,71 нм при интегральном потоке ионов $5,2 \cdot 10^{16} \text{ ион/см}^2$. При дальнейшем увеличении времени нанесения, а значит, увеличении интегрального потока ионов, площадь покрытия растет, заполняя всю по-

верхность стекла, что приводит к снижению шероховатости до 2,3 нм.

Измерения РКУС дистиллированной водой поверхности исходного стекла ($25,1^\circ$) и стекла с пленками Мо ($56,7^\circ - 67,4^\circ$) выявили значительное влияние самой пленки и меньшее влияние интегрального потока ассистирующих ионов на значение РКУС. Следовательно, нанесением Мо пленки на стекло с разными интегральными потоками ионов Mo^+ можно управлять смачиваемостью его поверхности водой.

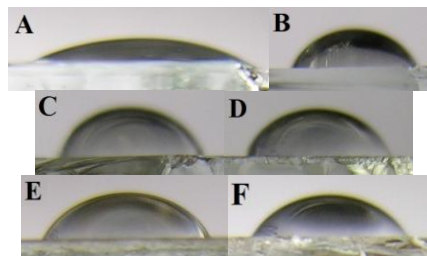


Рис. 3. Фотографии капель на поверхности образцов исходной стеклянной подложки (A) и подложек с нанесенными пленками Мо при ассистировании с интегральными потоками ионов Mo^+ $1,2 \cdot 10^{16}$ (B), $3,2 \cdot 10^{16}$ (C), $5,2 \cdot 10^{16}$ (D), $8,1 \cdot 10^{16}$ (E), $1,1 \cdot 10^{17}$ (F) см^{-2}

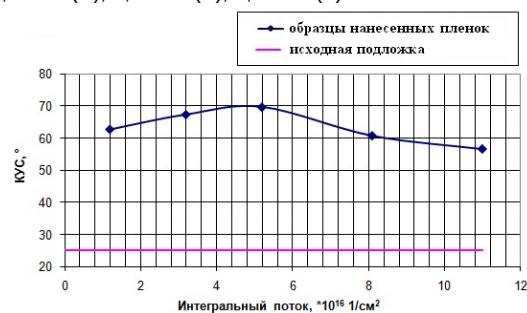


Рис. 4. Зависимость РКУС поверхности образцов с нанесенными пленками Мо от интегрального потока ионов Mo^+

Изменение величины РКУС с ростом интегрального потока, как это прослеживается по изменению формы капли воды на поверхности образцов, имеет зависимость, качественно подобную дозовой зависимости величины шероховатости (таблица, рис. 4).

Очевидно, что три фактора влияют на смачиваемость поверхности в этом случае: химический состав материала (осаждение Мо-пленки), гетерогенность состава поверхности (% образования покрытия) и морфология поверхности (шероховатость поверхности).

Заключение

Работа является этапом исследований процесса роста пленки тыльного контакта солнечных элементов, наносимой на стекло методом ОПА-СИ, при различных дозах ассистирующего облучения ионами Mo^+ , влияния дозы облучения на топографию и смачиваемость поверхности системы Мо пленка/стеклянная подложка.

Установлено значение порогового интегрального потока ($5,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$), при превышении которого снижается шероховатость поверхности на-

носимых пленок.

При выполнении измерений равновесного краевого угла смачивания дистиллированной водой поверхности образцов обнаружено, что нанесение Mo покрытия приводит к увеличению краевого угла смачивания, то есть к снижению гидрофильности поверхности тыльного контакта. Изменение величины РКУС имеет качественно подобную зависимость с изменением величины шероховатости пленок от интегрального потока асистирующих ионов. Нанесение на поверхность стекла Mo пленки в условиях асистирования различными интегральными потоками ионов Mo⁺ позволяет управлять смачиваемостью поверхности тыльного контакта водой.

Три фактора влияют на смачиваемость поверхности тыльного контакта: химический состав материала (осаждение Mo пленки), гетерогенность поверхности (% образования покрытия) и морфология поверхности (шероховатость поверхности).

Список литературы

1. Rau U., Schock H.W. // Series on Photo-conversion of Solar Energy. – 2001. – Vol. 1. – P. 277.
2. Гременок В.Ф., Тиванов М.С., Залесский В.Б. Солнечные элементы на основе полупроводниковых материалов. – Минск: БГУ, 2007. – 221 с.
3. Matson R.J., Jamjoum O., Buonaquisti A.D. // Solar Cells. – 1984. – Vol. 11. – P. 301.
4. Orgassa K., Schock H.W., Werner J.H. // Thin Solid Films, 2003. – Vol.431-432. – P. 387.
5. Tashlykov I.S., Kasperovich A.V., Wolf G. // Surf. Coat. Techn. – 2002. – Vol. 158–159. – P. 498.
6. Ташлыков И.С., Белый И.М. Способ нанесения покрытий: пат. 1 С1 ВУ, МКИ С 23 С 4/12, С 4/18, С 14/16. / ; – №2324; Заявл. 30.03.1994; Запат. 16.03.1998 // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. – 1999. – №1. – С. 30.
7. Ташлыков И.С., Барайшук С.М. // Известия ВУЗов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2008. – 1. – С. 30.
8. Petrov I., Hultman L., Sundgren J.E., Greene J.E. // J. Vac. Sci. Technol. – 2003. – A 21.5. – P. 117.
9. Tashlykov I.S., Turavets A.I., Zukowski P. // Acta Physica Polonica A. – 2011. – №1. – P. 115–117.

PROPERTIES OF Mo/SUBSTRATE SYSTEMS FORMED BY MEANS OF SELF - ION ASSISTED DEPOSITION

I.S. Tashlykov, A.I. Turavets

Belarusian State Pedagogical University, Sovetskaya 18, 220030 Minsk, Belarus, tashl@bspu.unibel.by

In this paper results of deposition molybdenum layer on glass substrate in order to investigate the surface properties of Mo back contact on glass are discussed. The Mo thin films were deposited on glass substrates by self-ion-assisted deposition method (SIAD)

SIAD experiments were performed using a resonance vacuum arc ion source. Substrate plates were floated to a negative potential with respect to the source of 10 keV to accelerate the ion species. The dose of ions was $1.2 \cdot 10^{16}$, $3.2 \cdot 10^{16}$, $5.2 \cdot 10^{16}$, $8.1 \cdot 10^{16}$, $1.1 \cdot 10^{17}$ cm⁻². Atomic force microscopy study of samples was performed using a microscope "NT-206". Contact angle measurements were based on the sessile-drop method. The wetting agent was distilled water.

The roughness of initial glass is 2.2 nm. After the start of deposition of coating the character of the surface topography changes drastically. The roughness increases with the increase of the irradiation dose to 2.7 nm due to the difference of levels of covering and the multitude of islands of covering nucleation. With further increasing of the deposition time the area of covering increases, gradually filling the entire surface, which reduces the roughness to 2.3 nm. The wettability test results show fundamental difference between the contact angle (CA) of initial glass (25.1°) and the contact angle of experimentally modified surfaces (56.7° – 69.7°). There was observed increasing in 2.45-2.77 times in the contact angle of water when the Mo thin film is deposited on glass. The deposition of the Mo thin films on glass makes the surface less hydrophilic. The dependence of the value CA from a dose of ion irradiation is similar to the dependence of the average roughness from a dose. Obviously, three factors affect on the wettability of the surface in that case: chemical composition of the material (fact deposition of Mo-films), local inhomogeneity (% of coating formation) and surface morphology (roughness).

КОМПОЗИЦИОННЫЙ СОСТАВ И СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ СИСТЕМ Me/Si, ПОЛУЧАЕМЫХ ОСАЖДЕНИЕМ ТОНКИХ ПЛЕНОК Ti И Co ПРИ АССИСТИРОВАНИИ СОБСТВЕННЫМИ ИОНАМИ

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

Белорусский государственный педагогический университет,
ул. Советская 18, 220030 Минск, Беларусь, tashl@bspu.unibel.by

В настоящей работе обсуждаются результаты изучения композиционного состава, повреждения структуры поверхности (100) Si, диффузионных процессов на межфазной границе в системах Me/Si при модифицировании кремния методом осаждения покрытий Ti и Co (Me) при асистировании собственными ионами (ОПАСИ), топографии поверхности полученных структур, ее смачиваемости дистиллированной водой, а также нанотвердости.

Введение

Осаждение тонких металлических плёнок на кремниевые пластины представляет как научный, так и практический интерес. Оно позволяет фор-

мировать изолирующие или проводящие слои, лиофильные или лиофобные в разных средах поверхности изделий [1,2]. Ионная имплантация ксенона в кремний широко применяется, т.к. по-

звolyет управлять повреждением его структуры [3,4]. Малоизученным остается процесс массопереноса в кремнии атомов покрытия, нанесенного методом ОПАСИ, и влияние предварительной имплантации ксенона в кремний на диффузионные процессы в нем при последующем нанесении покрытий. Для управления свойствами покрытий при их осаждении на подложку необходима диагностика поверхности конструкции покрытие/подложка. В настоящей работе обсуждаются результаты изучения композиционного состава, диффузионных процессов на межфазной границе в системах Me/Si при модифицировании кремния методом осаждения покрытий Ti и Co, в условиях ассистирования собственными ионами, топографии поверхности полученных структур, смачиваемости ее дистиллированной водой, а также нанотвердости.

Методы исследования

Для осаждения покрытий на кремний использовали резонансный источник вакуумной дуговой плазмы (вакуум 10^{-2} Па) [5]. Элементный послойный анализ конструкций пленка/кремний выполняли, используя резерфордское обратное рассеяние (ROP) ионов гелия He^+ с $E_0 = 2.0$ МэВ и геометрией рассеяния $\theta_1=0^\circ$, $\theta_2=12^\circ$, $\theta=168^\circ$, где θ_1 , θ_2 и θ - углы влета, вылета и рассеяния соответственно, и компьютерное моделирование экспериментальных спектров ROP по программе RUMP [6]. Энергетическое разрешение анализирующей системы составляло 25 кэВ. Для построения глубинных профилей компонентов изучаемых конструкций мы используем понятие положения исходной поверхности подложки (ПИПП), которое определяли в эксперименте по введению маркера (атомов ксенона) в Si пластину. Энергия ионов Xe^+ при этом была 10, 20 или 40 кэВ, интегральные потоки от 1×10^{14} см $^{-2}$ до 2.7×10^{15} см $^{-2}$. Величина среднего проективного пробега элементов в матрице были рассчитаны при помощи компьютерной программы TRIM-89 [7]. Изучение топографии поверхности образцов и определение ее шероховатости было выполнено с применением сканирующей зондовой микроскопии на AFM NT-206. Измерение нанотвердости и модуля Юнга в нашей работе, проводилось при помощи нанотвердомера «Fisher H100». В процессе измерений снимается кривая нагружение-разгрузка, которая в дальнейшем обрабатывается по методу Оливера-Фара [8]. Толщина осажденных покрытий имеет значение в пределах 180-200 нм. Смачиваемость поверхности покрытий определяли по величине краевого угла смачивания (КУС), который измеряли методом сидячей капли. Объем капли составлял 9,3 мкл.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 показаны профили глубинного распределения компонентов конструкции, получаемой при нанесении кобальтовой пленки на Si, без введенного ксенонового маркера (а) и с ним (б).

Установлено, что в состав покрытий входят кроме атомов металла атомы водорода, углерода, кислорода и кремния. Появление в изучаемых

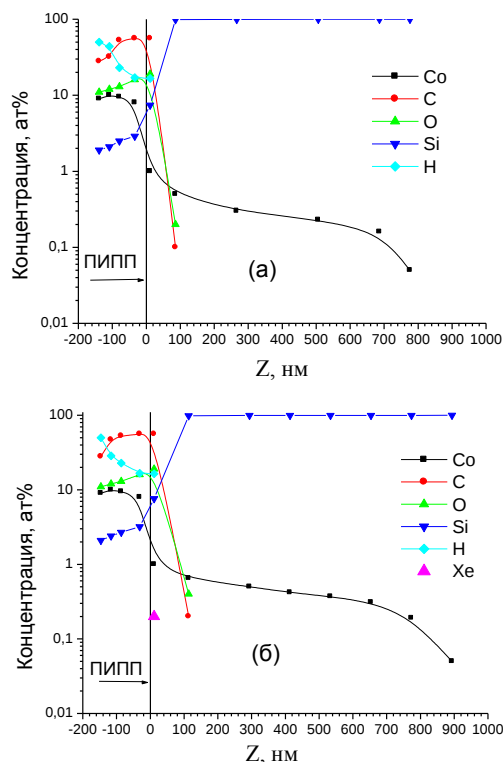


Рис. 1. Распределение элементов по глубине в структурах Co покрытие/Si, сформированных: (а) – методом ОПАСИ, б) – методом ИАНПУС на кремнии, предварительно облученном ионами Xe^+ с энергией 10 кэВ и интегральным потоком 3×10^{14} $\text{Xe}/\text{см}^2$

покрытиях O, C, и H мы связываем, с осаждением на поверхность покрытия в процессе его роста совместно с атомами Co, углеводородной фракции и O из остаточного вакуума в мишенной камере, откачиваемой диффузионным паромасляным насосом.

Анализируя полученные результаты, рис. 1 а и б, отметим, что атомы углерода и кислорода проникают в кремниевую подложку на ~30 нм глубже, если в систему покрытие/подложка предварительно вводился маркер ксенона. Атомы же кобальта 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 кобальта увеличивается еще на ~ 120 нм. При этом концентрация атомов кобальта на сопоставимой глубине возрастает примерно в 1.5 раза. Такой эффект проникновения можно объяснить радиационно-усиленной диффузией при осаждении покрытий атомов металла в глубь кремния по дефектам, созданных ионами ксенона.

Сравнение осевых и случайных спектров от исходного (100) кремния и кремния с нанесенным покрытием позволяет определить положения атомов металла в кристаллической решетке кремния на различной глубине [9].

Характер зависимости распределения атомов кобальта в кремнии, находящихся в узлах кристаллической решетки, кривая Co_{sub} , и между-

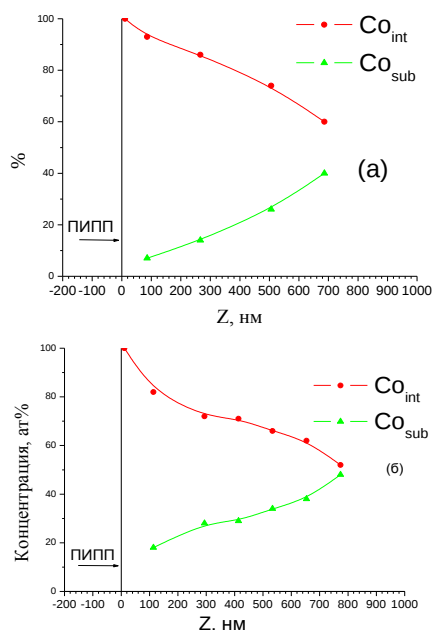


Рис. 2. Распределение атомов кобальта в кремнии, находящихся в междоузлиях, относительно атомов кобальта, находящихся в узлах кристаллической решетки кремния, в структурах Co покрытие/Si, сформированных: (а) – методом ОПАСИ, б) – методом ОПАСИ на кремнии предварительно имплантированном ионами Xe^+ с энергией 10 кэВ и интегральным потоком $3 \times 10^{14} \text{ Xe/cm}^2$

узельных, кривая Co_{int} , дает возможность предположить вероятный механизм диффузии. В кремнии вблизи ПИПП (~10 нм) создается наибольшее повреждение кристаллической решетки и наблюдается резкое уменьшение концентрации атомов кобальта. Это объясняется тем, что с увеличением числа междоузельных атомов кремния, уменьшается число возможных путей миграции атомов кобальта по междоузлиям в решетке кремния. На большей глубине доля атомов кобальта, находящихся в узлах кристаллической решетки, увеличивается, достигая значения 40% на глубине около 780 нм.

Анализ распределения атомов кобальта в кремнии, предварительно облученном ионами Xe^+ с энергией 10 кэВ и интегральным потоком $3 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$, рис. 2 б, позволяет сделать предположение о том, что механизм диффузии по узлам кристаллической решетки является основным. Предварительное облучение кремния ионами ксенона ведет к большому повреждению структуры кремния и к увеличению доли атомов кобальта находящихся в замещающих положениях – усилению вклада механизма диффузии по узлам кристаллической решетки. Этот эффект имеет выраженную дозовую зависимость. При облучении кремния ионами Xe^+ наблюдается уменьшение доли междоузельных атомов Co с 86 % до 30 % при увеличении (Ф) от $1 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ до $2.7 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ на глубине проникновения ~ 90 нм, а на глубине ~ 780 нм – с 60 % до 16 % соответственно.

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

При изучении топографии систем покрытие/подложка и чистого кремния и определении ее параметров были выбраны площадки размером $5 \times 5 \text{ мкм}^2$.

По 3D - изображению топографии поверхности титанового покрытия на рис. 3 следует, что на кремнии формируется поверхность высокого качества.

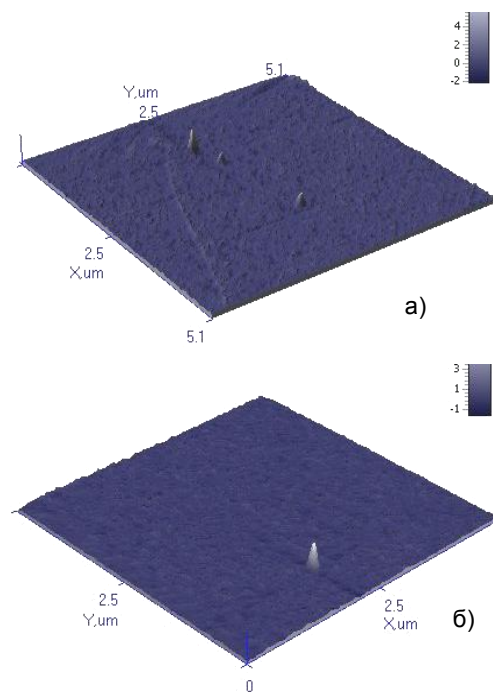


Рис. 3. 3D - изображения топографии поверхности Ti покрытия, нанесенного на кремний методом ОПАСИ без облучения (а) и с предварительным облучением ионами ксенона с $E = 40 \text{ кэВ}$ и дозой $3 \cdot 10^{14} \text{ Xe/cm}^2$ (б)

На рис. 4 представлены фотографии капель воды на поверхности Ti покрытия. Параметры поверхности осажденных покрытий представлены в таблице. Как следует из представленной таблицы облучение кремния ионами ксенона не вызывает заметного увеличения шероховатости Me покрытий, нанесенных на кремний, и значимого изменения смачиваемости их дистиллированной водой.

Результаты измерения нанотвердости формируемых структур представлены на рисунке 5. Твердость поверхностного слоя покрытий толщиной 50 нм возрастает при нанесении титана в 4 раза и в 4,5 раза при нанесении кобальта. При увеличении глубины индентирования интегральная нанотвердость структуры покрытие/подложка приближается к нанотвердости исходного кремния.

Заключение

Полученные экспериментальные результаты подтверждают возможность управления процессами массопереноса в Si введением в его структуру радиационных дефектов.

С применением сканирующей зондовой микроскопии установлены высокое качество и низкая

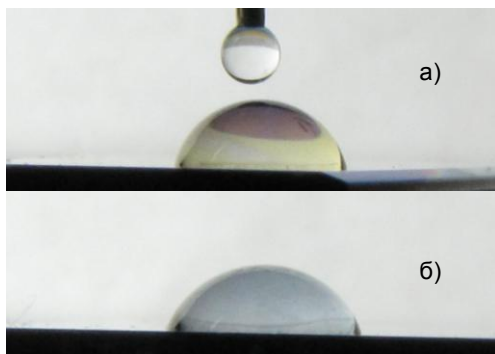


Рис. 4. Фотографии капля воды на поверхности Ti покрытия, нанесенного на кремний методом ОПАСИ без облучения (а) и с предварительным облучением ионами ксенона с $E = 10$ кэВ и дозой $3 \cdot 10^{15}$ Хе/см² (б)

Таблица

	Ti покрытие		Co покрытие	
	без облучения	с облучением	без облучения	с облучением
КУС, град.	77,8	78,4	60,5	59,3
Ra, нм	0,123	0,158	0,114	0,113

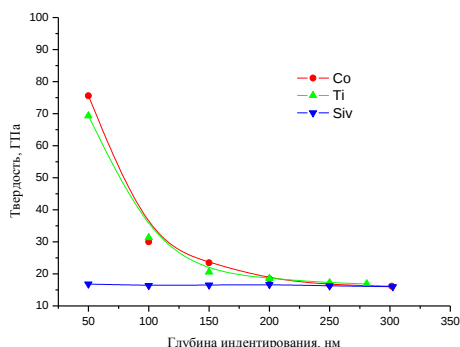


Рис. 5. Зависимость нанотвердости поверхности сформированных структур от глубины индентирования

COMPOSITION and PROPERTIES of SURFACE of Me/Si SYSTEMS, PREPARED by DEPOSITION of Ti AND Co THIN FILMS ASSISTED by SELF-ION

O.M. Mikhalkovich, S.M. Baraishuk, I.S. Tashlykov
Belarusian State Pedagogical University, Minsk, Belarus, tashl@bspu.unibel.by

In this paper a composite structure, topography, wettability and nanohardness of a surface (100) Si modified by means of ion-assisted deposition of coatings in conditions of a self-irradiation are discussed. Rutherford backscattering of He⁺ ions and computer program RUMP were applied to investigate a composition of surface. It is established, that coatings include atoms of metal, hydrogen, carbon, oxygen, silicon. The nanoindentation data from coated systems were used for calculation of the hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. Atomic Force Microscopy surface observations were used to investigate the topography of modified surfaces. Hydrophilicity was measured by means of the contact angle measurement technique.

шероховатость поверхности полученных структур Ti/Si и Co/Si, что свидетельствует о возможности управления шероховатостью поверхности систем Me/Si, применяемых для разных функциональных элементов.

Установлено что предварительное облучения кремния ионами ксенона не ведет к значимому изменению смачиваемости поверхности полученных структур.

Изучение нанотвердости поверхности полученных покрытий показало, что методом ОПАСИ создаются покрытия, твердость которых сравнима с твердостью алмазоподобных пленок.

Работа выполнялась при частичном финансировании Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований, грант Ф110Б-028.

Список литературы

1. Барайшук С.М., Гременок В.Ф., Тульев В.В., Ташлыков И.С. // ФХОМ. – 2011. – 1. – С. 66.
2. Ташлыков И.С., Барайшук С.М., Михалкович О.М., Антонович И.П. // Przegląd Elektrotechniczny. – 2008. – 3. – Р. 111.
3. Поклонский Н.А. // Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 8-й Междунар. конф., Минск, 23-25 сент. 2009г. – 2009. – С. 264.
4. Михалкович О.М., Ташлыков И.С. // ФХОМ. – 2008. – 5. – С. 49.
5. Ташлыков И.С., Белый И.М. Патент РБ №2324. 1С1 ВУ, С23 С4/12. С4/18, С14/16. Оpubл. 1999. офиц. бюл. гос. пат. ведом. РБ №1.
6. Doolittle L.R. // Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. – 1985. – В 9. – Р. 231.
7. Ziegler J.F., Biersak J.P., Littmark U. // Pergamon Press, Oxford. – 1985. – 1. – Р. 321.
8. Oliver W.C., Pharr G.M. // J. Mater. Res. – 1992. – 7. – 6. – Р. 1564.
9. Bógh E. // Canad. J. of Phys. – 1. 1968. – 6. – Р. 653.