

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 асистирувания различными интегральными потоками ионов Mo<sup>+</sup> 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; Заг. 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<sup>-2</sup>. 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 асистирувании 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-

звояет 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 послыйный анализ конструкций пленка/кремний выполняли, используя резерфордское обратное рассеяние (РОР) ионов гелия  $He^+$  с  $E_0 = 2.0$  МэВ и геометрией рассеяния  $\theta_1=0^\circ$ ,  $\theta_2=12^\circ$ ,  $\theta=168^\circ$ , где  $\theta_1$ ,  $\theta_{2п}$  и  $\theta$  - углы влета, вылета и рассеяния соответственно, и компьютерное моделирование экспериментальных спектров РОР 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  $He^+$  при этом была 10, 20 или 40 кэВ, интегральные потоки от  $1 \times 10^{14}$   $cm^{-2}$  до  $2.7 \times 10^{15}$   $cm^{-2}$ . 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 нанотвёрдости 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

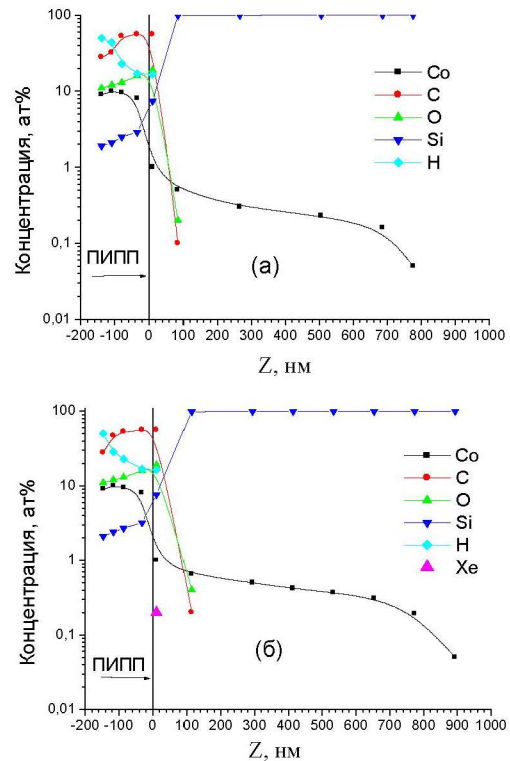


Рис. 1. Распределение элементов по глубине в структурах Co покрытие/Si, сформированных: (а) – методом ОПАСИ, б) – методом ИАНПУС на кремнии, предварительно облученном ионами  $He^+$  с энергией 10 кэВ и интегральным потоком  $3 \times 10^{14}$   $He/cm^2$

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  $\sim 30$  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  $He^+$  глубина проникновения атомов кобальта увеличивается еще на  $\sim 120$  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-

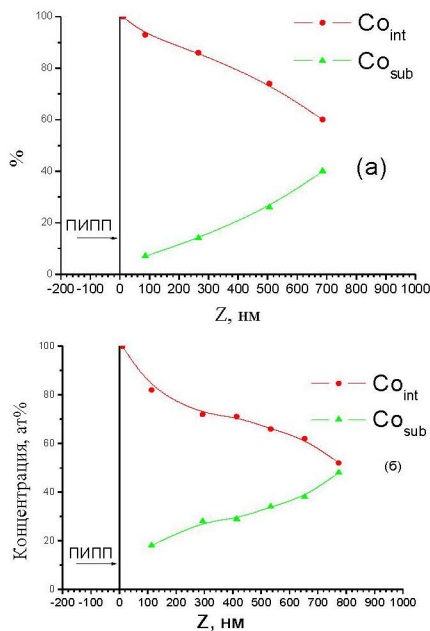


Рис. 2. Распределение атомов кобальта в кремнии, находящихся в междоузлиях, относительно атомов кобальта, находящихся в узлах кристаллической решетки кремния, в структурах  $\text{Co}$  покрытие/ $\text{Si}$ , сформированных: (а) – методом ОПАСИ, б) – методом ОПАСИ на кремнии предварительно имплантированном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

узельных, кривая  $\text{Co}_{\text{int}}$ , дает возможность предположить вероятный механизм диффузии. В кремнии вблизи ПИПП (~10нм) 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  $\text{Xe}^+$  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 большему 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  $\text{Xe}^+$  наблюдается уменьшение доли междоузельных атомов  $\text{Co}$  с 86 % до 30 % при увеличении ( $\Phi$ ) 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  $\text{Ti}$  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.

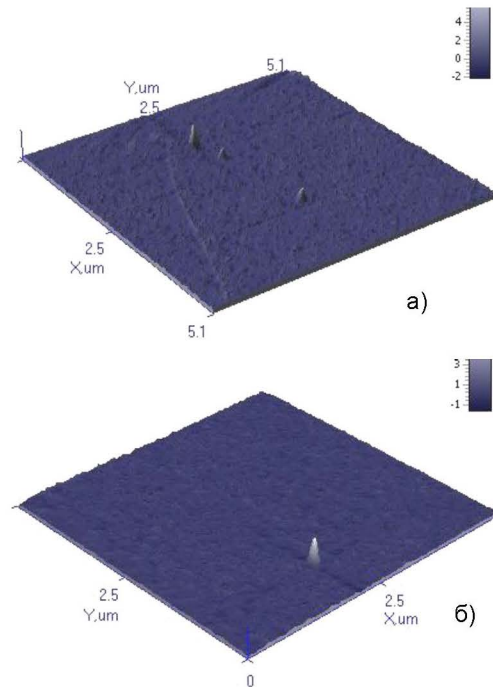


Рис. 3. 3D - изображения топографии поверхности  $\text{Ti}$  покрытия, нанесенного на кремний методом ОПАСИ без облучения (а) и с предварительным облучением ионами ксенона с  $E = 40 \text{ кэВ}$  и дозой  $3 \cdot 10^{14} \text{ Xe}/\text{см}^2$  (б)

На рис. 4 представлены фотографии капель воды на поверхности  $\text{Ti}$  покрытия. Параметры поверхности осажденных покрытий представлены в таблице. Как следует из представленной таблицы облучение кремния ионами ксенона не вызывает заметного увеличения шероховатости  $\text{Me}$  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  $\text{Si}$  введением в его структуру радиационных дефектов.

С применением сканирующей зондовой микроскопии установлены высокое качество и низкая

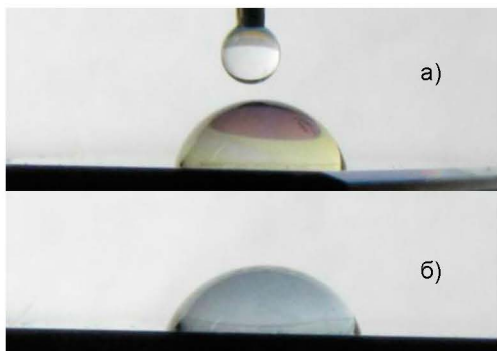


Рис. 4. Фотографии капель воды на поверхности Ti покрытия, нанесенного на кремний методом ОПАСИ без облучения (а) и с предварительным облучением ионами ксенона с  $E = 10$  кэВ и дозой  $3 \cdot 10^{15}$  Хе/см<sup>2</sup> (б)

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

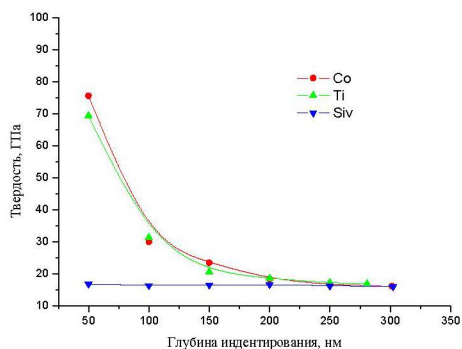


Рис. 5. Зависимость нанотвердости поверхности сформированных структур от глубины индентирования

### 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<sup>+</sup> 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 Ф11ОБ-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. – Р. 1564.
9. Bögh E. // Canad. J. of Phys. – 1. 968. – 6. – Р. 653.