

УДК 539.23.234

С.М. Барайшук, О.М. Михалкович, И.С. Ташлыков (Минск, Беларусь)

## ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ И СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ ТОНКИХ ПЛЕНОК МЕТАЛЛОВ, НАНЕСЕННЫХ НА ПОДЛОЖКИ КРЕМНИЯ

In this paper a composite structure, topography 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 (RBS) of He<sup>+</sup> ions and computer program RUMP were applied to investigate an composition of surface. It is established, that coating includes 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 (AFM) surface observations were used to investigate the topography of modified surfaces.

### Введение

Осаждение тонких металлических (Me) плёнок 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 [1,2]. Свойства модифицированной поверхности во многом определяются рядом факторов, среди которых такие как: элементный и фазовый состав покрытий, их структура, адгезия к подложке, топография и др. [3,4]. 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, при ассистировании собственными ионами (ОПАСИ), топографии поверхности полученных структур, а также их 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 резерфордовское обратное рассеяние (РОР) ионов гелия He<sup>+</sup> с  $E_0 = 2.0$  МэВ и геометрией рассеяния  $\theta_1=0^\circ$ ,  $\theta_2=12^\circ$ ,  $\theta=168^\circ$ , где  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  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 экспериментах по введению маркера (атомов ксенона) в Si пластину. Энергия ионов  $\text{Xe}^+$  при этом была 10, 20 или 40 кэВ, интегральные потоки от  $1 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$  до  $2.7 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$  [7]. Величина среднего проективного пробега элементов в матрице были рассчитаны при помощи компьютерной программы TRIM-89 [8]. 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 нагрузение–разгрузка, которая в дальнейшем обрабатывается по методу Оливера–Фара [9]. Толщина осажденных покрытий имеет значение в пределах 180-200 нм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис.1 представлены профили глубинного распределения компонентов в системе Co/Si, полученной без введенного ксенонового маркера и с ним.

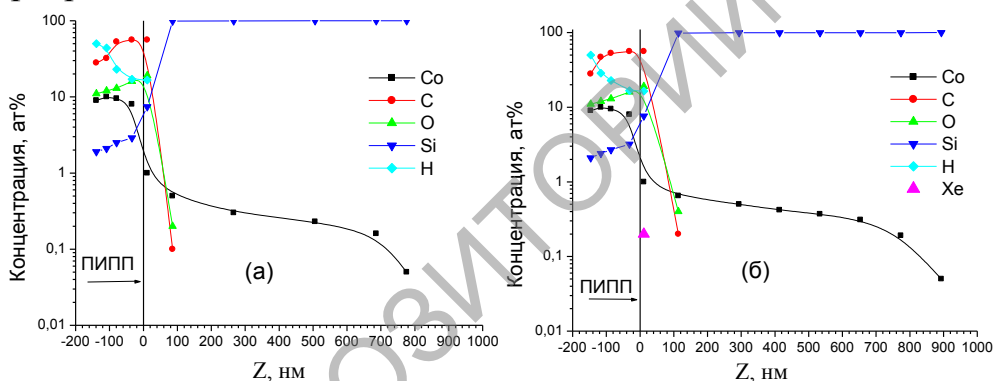


Рисунок 1. Распределение элементов по глубине в структурах Co покрытие/Si, сформированных: (а) – методом ОПАСИ, б) – методом ОПАСИ на кремнии, предварительно имплантированном ионами  $\text{Xe}^+$  с энергией 10 кэВ и интегральным потоком  $3 \times 10^{14} \text{ Xe/см}^2$ .

Из представленных данных следует, что в состав покрытий входят кроме атомов металла атомы водорода, углерода, кислорода и кремния. Появление в изучаемых покрытиях O, C и H мы связываем с осаждением на поверхность покрытия в процессе его роста совместно с атомами Co, атомов 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 металла 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 [2]. В пластине Si, предварительно имплантированной ионами  $\text{Xe}^+$ , глубина проникновения атомов кобальта увеличивается еще на  $\sim 120$  нм. При этом концентрация атомов кобальта на сопоставимой глубине возрастает примерно в 1.5 раза. Наблюдаемый эффект глубинного проникновения кобальта можно объяснить радиационно-усиленной диффузией атомов металла в глубь кремния по дефектам, созданным ионами ксенона.

При изучении топографии систем покрытие/подложка и чистого кремния и определении ее параметров были выбраны площадки размером  $5 \times 5$  мкм<sup>2</sup>.

По изображению топографии поверхности титанового покрытия на рис. 2 следует, что на кремнии формируется поверхность высокого качества. Параметры поверхности осажденных покрытий представлены в таблице.

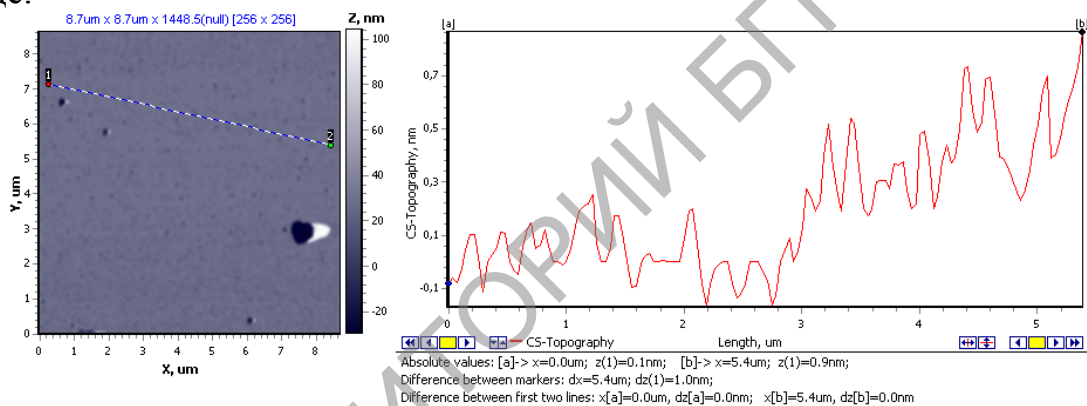


Рисунок 2. Топография поверхности кремния, с титановым покрытием и диаграмма неровностей.

Таблица. Характеристики топографии поверхности исходного кремния и модифицированного нанесением металлопокрытий в течение 1 часа при энергии ассистирования 7 кэВ.

Параметр	Кремний исходный	Ti	Co
Средняя шероховатость, нм	0.169	1.101	0.744
Отношение полной площади участка к его проективной площади	1.0027	1.0044	1.0073

Как следует из приведенных в таблице данных, средняя шероховатость исходного кремния весьма незначительна и изменяется от 0.169 нм до 1.101 нм на поверхности кремния с покрытием на основе титана и 0.744 нм при нанесении Co покрытия. Полная площадь фрагмента

практически не отличается от проективной площади. Таким образом установлено, что при нанесении Ti и Co покрытий на кремний наблюдаются качественно подобные изменения свойств топографии поверхности, заключающиеся в незначительном увеличении шероховатости, а также отношения полной площади поверхности к проективной.

Известно, что водород в многокомпонентных системах выполняет важную роль, стимулируя формирование алмазоподобных  $sp^3$  – связей [10].

Результаты измерения нанотвердости формируемых структур представлены на рисунке 3.

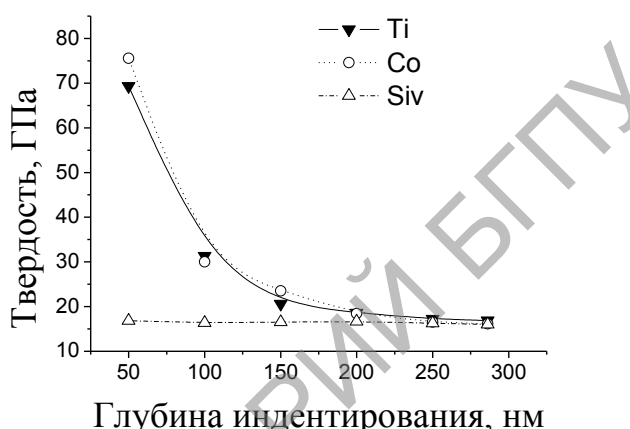


Рисунок 3. Зависимость нанотвердости поверхности структур, сформированных на кремнии, от глубины индентирования.

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 нанотвердость структуры покрытие/подложка определяет нанотвердость кремния.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием метода резерфордского обратного рассеяния ионов гелия и моделирующей программы RUMP установлен композиционный состав покрытий Ti и Co, нанесенных на пластины Si, в состав которых входят кроме атомов металлов атомы водорода, углерода, кислорода и кремния. Также установлено что предварительное облучение кремния ионами ксенона способствует значительному увеличению глубины проникновения атомов наносимого покрытия в кремний и их концентрации вследствие процессов радиационно-стимулированной диффузии. 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 шероховатость поверхности полученных

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

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. С.М. Барайшук, В.Ф. Гременок, В.В. Тульев, И.С. Ташлыков. Изучение поверхности структур металл/кремний, приготовленных ионно-ассистированным нанесением покрытий. ФХОМ. №1. 2011. С. 66.
2. И.С. Ташлыков, С.М. Барайшук, О.М. Михалкович, И.П. Антонович. Структура и повреждение кремния, модифицированного ионно-ассистированным нанесением тонких пленок. Przegląd Elektrotechniczny. №3. 2008. P. 111.
3. 3. Gotoh Y. Amioka T. Ion beam assisted deposition of tantalum nitride thin films for vacuum microelectronic devices. Surf. Coat. Technol. V.158-159. 2002. P.729.
4. 4. Tashlykov I.S., Kasperovich A.V., Wolf G. Elastomer surface modification by means of SIAD of metal-based layers. Surf. Coat. Technol. V.158-159. 2002. P.498.
5. И.С. Ташлыков, И.М. Белый. Патент РБ №2324. 1С1 ВУ, С23 С4/12. С4/18, С14/16. Оpubл. 1999. офиц. бюл. гос. пат. ведом. РБ №1.
6. L.R. Doolittle. Algorithms for rapid simulation of Rutherford backscattering spectra. Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. V. В 9. 1985. P. 231.
7. E. Bögh. Defect studies in crystals by means of channeling. Canad. J. of Phys. V. 46. 1968. P. 653.
8. J.F. Ziegler, J.P. Biersak, U. Littmark. The stopping range of ions in solids. Pergamon Press, Oxford, V.1. 1985. P. 321.
9. W.C. Oliver, G.M. Pharr. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. J. Mater.Res. V. 7. № 6. 1992. P. 1564.
10. Н.Г. Чеченин, П.Н. Черных, В.С. Куликаускас. Ионно-пучковый метод определения массовой плотности углеводородной матрицы в тонкопленочных нанокompозитах. ЖТФ. Т.33. № 21. 2007. С. 47.