

## ДИФФУЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В КРЕМНИИ, МОДИФИЦИРОВАННОМ ОСАЖДЕНИЕМ Со ПOKPЫТИЙ В СОЧЕТАНИИ С ОБЛУЧЕНИЕМ ИОНАМИ Хе<sup>+</sup>

В настоящей работе обсуждаются результаты изучения композиционного состава, диффузионных процессов в Si, модифицированном осаждением Со покрытий в условиях ассистирования собственными ионами, когда образцы кремния предварительно облучались ионами ксенона.

Одним из перспективных методов модифицирования свойств поверхности является осаждение покрытий, при ассистировании собственными ионами (ОПАСИ). Нанесение металлов на кремний методом ОПАСИ дает возможность увеличивать твердость поверхности, изменять ее шероховатость и смачиваемость [1, 2]. Ионная имплантация ксенона в кремний широко применяется, т.к. позволяет управлять повреждением его структуры с целью создания полупроводниковых элементов с требуемыми характеристиками [3,4]. Малоизученными остаются процессы массопереноса в области межфазной границы структуры покрытие/кремний, формируемой методом ОПАСИ, и влияние на них предварительной имплантации ионов ксенона.

### 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 (РОР) ионов гелия Хе<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]. Пластины Si облучались ионами ксенона с энергией 10, 20 или 40 кэВ интегральным потоком от  $1 \times 10^{14}$  см<sup>-2</sup> до  $2.7 \times 10^{15}$  см<sup>-2</sup>, которые использовались также в качестве маркера для установления положения исходной поверхности подложки (ПИПП) [7]. Для изучения локализации атомов покрытия в (100)-кремнии применяли каналирование ионов Хе<sup>+</sup>. Величина среднего проективного пробега ассистирующих ионов кобальта и ионов ксенона в кремнии рассчитывалась с применением компьютерной программы TRIM-89 [8].

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что в состав покрытий, осажденных на кремний, входят кроме атомов металла атомы водорода, углерода, кислорода и кремния. Появление в изучаемых покрытиях О, С, и Н мы связываем, с осаждением на поверхность покрытия в процессе его роста совместно с атомами металла, компонентов углеводородной фракции и О из остаточного вакуума в мишенной камере, откачиваемой диффузионным паромасляным насосом. 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 Si, предварительно имплантированном ионами Хе<sup>+</sup>, глубина проникновения атомов кобальта увеличивается еще на  $\sim 120$  нм. Такой эффект проникновения можно объяснить радиационно-усиленной диффузией при осаждении покрытий атомов металла в глубь кремния по дефектам, создаваемыми ионами ксенона.

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

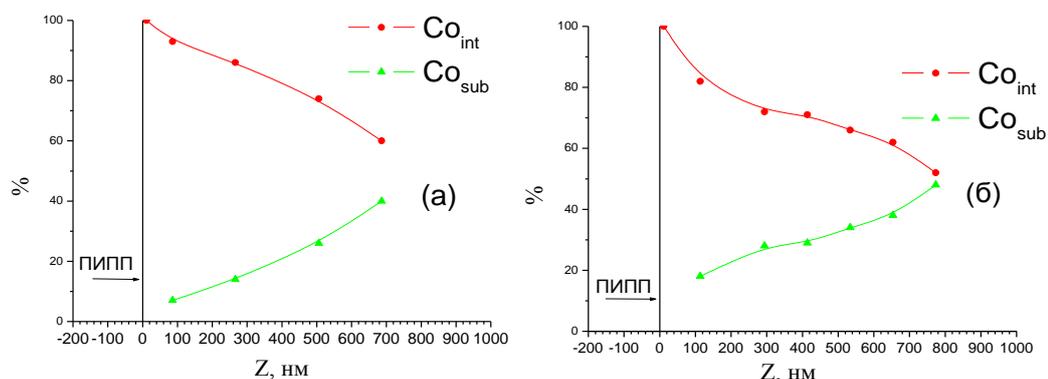


Рисунок 1. Распределение по глубине атомов кобальта в кремнии, находящихся в междоузлиях ( $Co_{int}$ ) и узлах ( $Co_{sub}$ ), относительно полной концентрации атомов кобальта, находящихся на соответствующей глубине в кремнии. *a* — в структурах Co покрытие/Si, сформированных методом ОПАСИ, *б* — методом ОПАСИ на кремнии, предварительно имплантированном ионами Хе с энергией 10 кэВ и интегральным потоком  $3 \times 10^{14}$  Хе/см<sup>2</sup>.

Характер зависимости распределения атомов кобальта, находящихся в узлах кристаллической решетки кремния, кривая  $Co_{sub}$ , и междоузлиях, кривая  $Co_{int}$ , позволяет предположить вероятный механизм диффузии атомов Со в глубь кремния. В кремнии, вблизи ПИПП (~10нм), наблюдается максимальная концентрация радиационных дефектов и наименьшая концентрация атомов кобальта в узлах решетки, рис 1 *a* и *б*. С увеличением глубины проникновения кобальта в кремний доля атомов Со в узлах решетки растет. Это объясняется тем, что при высокой концентрации дефектов (междоузельных атомов кремния) уменьшается вероятность миграции атомов кобальта вглубь по междоузлиям, а растет — по узлам кристаллической решетки. На большей глубине доля атомов кобальта, находящихся в узлах кристаллической решетки, растет, достигая значения 40% на глубине более 700 нм.

Анализ распределения атомов кобальта в кремнии, предварительно облученном ионами Хе<sup>+</sup> с энергией 10 кэВ и интегральным потоком  $3 \times 10^{14}$  см<sup>-2</sup>, рис. 1 *б*, подтверждает предположение о том, что механизм диффузии атомов Со 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.

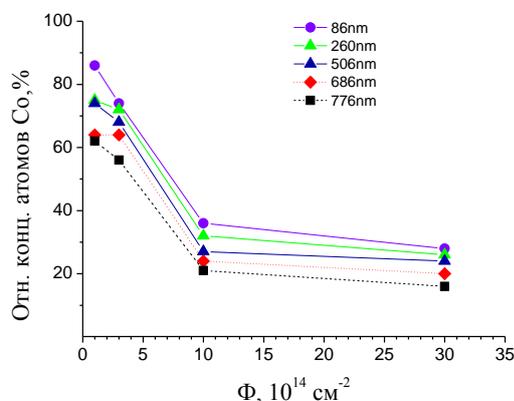


Рисунок 2. Дозовая зависимость доли атомов кобальта, локализованных в междоузлиях кристаллической решетки кремния, в структурах Co покрытие/Si, сформированных методом ОПАСИ на кремнии, предварительно облученном ионами Хе с энергией 10 кэВ.

В облученном ионами ксенона с  $E = 10$  кэВ кремнии наблюдается уменьшение доли междоузельных атомов кобальта с 86 % до 30 % при увеличении дозы  $1 \times 10^{14}$  см<sup>-2</sup> до  $2.7 \times 10^{15}$  см<sup>-2</sup> на глубине проникновения  $\sim 90$  нм. На глубине  $\sim 780$  нм - с 60 % до 16 % соответственно.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием метода Резерфордского обратного рассеяния в сочетании с каналированием ионов гелия и моделирующей программы RUMP установлено, что предварительное облучение кремния ионами ксенона способствует значительному увеличению глубины проникновения атомов наносимого покрытия в кремний и их концентрации на сопоставимой глубине, в сравнении с нанесением покрытий на необлученную подложку.

Полученные экспериментальные результаты подтверждают возможность управления процессами массопереноса в Si введением в его структуру радиационных дефектов. Работа выполнялась при частичном финансировании Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований, грант Ф110Б-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. No. 3. 2008. P. 111-113.
3. Н.А. Поклонский. Индуктивный импеданс кремниевых диодов, облученных высокоэнергетическими ионами ксенона. Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 8-й Междун. конф., Минск, 23-25 сент. 2009 г. 2009. С. 264.
4. О.М. Михалкович, И.С. Ташлыков. Повреждение поверхности кремния при ионно-ассистированном осаждении Ti и Co покрытий. ФХОМ. №5. 2008. С. 49.
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. B 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

In this paper a composite structure, processes of diffusion in Si, modified by means of ion-assisted deposition of coatings in conditions of a self-irradiation are discussed. The interstitial Si atoms, generated by radiation effect, diffuse during deposition of thin coating, both in a depth of a wafers, and in coatings. The influence of irradiation of ions Xe<sup>+</sup> on diffusion processes in silicon are revealed.

*Михалкович О.М.*, старший преподаватель кафедры экспериментальной физики Белорусского государственного педагогического университета имени Максима Танка, Минск, Беларусь, e-mail: [phyzbober@tut.by](mailto:phyzbober@tut.by)

*Ташлыков И.С.*, заведующий кафедрой экспериментальной физики Белорусского государственного педагогического университета имени Максима Танка, д.ф.-м.н., профессор, Минск, Беларусь, e-mail: [tashl@bspu.unibel.by](mailto:tashl@bspu.unibel.by)