

МАССОПЕРЕНОС В Si ПРИ НАНЕСЕНИИ Ti ТОНКИХ ПЛЕНОК, АССИСТИРОВАННОМ СОБСТВЕННЫМИ ИОНАМИ

О.М. Михалкович¹⁾, В.Е. Гусаков²⁾, И.С. Ташлыков¹⁾

¹⁾Белорусский государственный педагогический университет,
ул. Советская 18, 220050 Минск, Беларусь, tashl@bspu.unibel.by

²⁾НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, ул. П.Бровки 19, 220072 Минск, Беларусь

В настоящей работе обсуждаются результаты изучения композиционного состава, диффузионных процессов в Si, модифицированном осаждением Ti покрытий в условиях ассистирования собственными ионами, когда образцы кремния были предварительно облученными ионами ксенона и необлученными.

Введение

Ионная имплантация ксенона в кремний имеет широкий ряд прикладных применений [1], но приводит к значительному повреждению его структуры [2]. Осаждение покрытий, ассистированное собственными ионами (ОПАСИ), является одним из перспективных методов модифицирования свойств поверхности. Мало изученным остается процесс массопереноса в кремнии элементов Ti покрытия, нанесенного методом ОПАСИ, и влияние предварительного облучения кремния ионами ксенона на диффузионные процессы при последующем нанесении покрытий. 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]. Поэтому при проведении исследований по нанесению покрытий необходима диагностика поверхности конструкции покрытие/подложка. В настоящей работе обсуждаются результаты изучения композиционного состава, диффузионных процессов в Si, модифицированном осаждением Ti покрытий в условиях ассистирования собственными ионами, когда образцы кремния были предварительно облученными ионами ксенона и необлученными.

Методы исследования

Для осаждения титановых 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 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 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 ионной имплантации в Si пластину ионов ксенона с энергией 10, 20, или 40 кэВ интегральным потоком от 1×10^{14} cm^{-2} до 2.7×10^{15} cm^{-2} в качестве маркера [7]. Для изучения положения атомов металла в кристаллической решетке кремния на различной глубине применяли метод

РОР в сочетании с каналированием ионов (РОР/КИ) He^+ с энергией 2 МэВ. Пластина Si (100) наполовину защищалась маской и облучалась ионами ксенона. Затем, с обеих частей образца снимались спектры РОР/КИ. На подготовленные таким образом пластины кремния наносилось Ti покрытие методом ОПАСИ. После этого снова с обеих частей полученных структур снимали спектры РОР/КИ. Величины среднего проективного пробега ионов в матрице были рассчитаны с применением компьютерной программы TRIM-89 [8].

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 показаны профили глубинного распределения компонентов конструкции, получаемой при нанесении титановой пленки на Si, не облученный и предварительно облученный ионами ксенона.

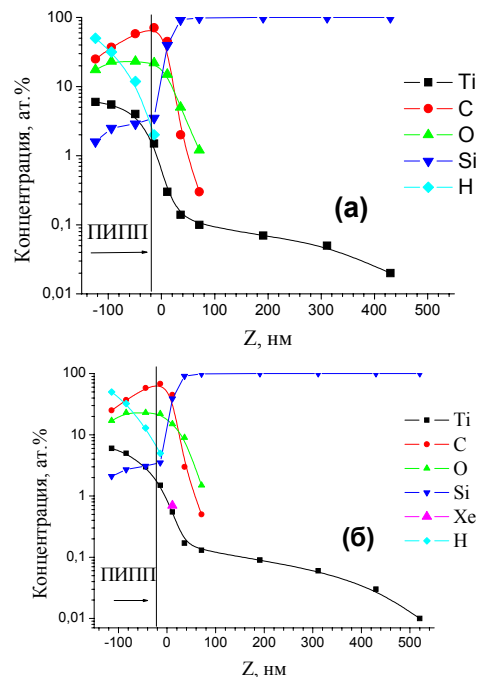


Рис. 1. Распределение атомов титана в конструкциях Ti покрытие/Si, сформированных: (а) – методом ОПАСИ, б) – методом ОПАСИ на кремнии, предварительно имплантированном ионами Хе с энергией 20 кэВ и интегральным потоком 9×10^{14} Хе/ cm^2

Профиль Ti характеризуется концентрацией, снижающейся от 6 ат % на поверхности, до 0.3 –

0.5 ат % в области межфазной границы системы. Атомы Ti идентифицируются в Si на глубине ~490 нм с концентрацией ~0.02 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 спадает 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 ПИПП, а в кремнии на глубине < 100 нм его концентрация снижается в несколько раз до значений порядка десятых долей атомного процента. Профиль С качественно подобен пространственному распределению кислорода в покрытии, однако его концентрация в примерно 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 ~90 нм. Появление в изучаемых покрытиях О, С, и Н мы связываем, с осаждением на поверхность покрытия в процессе его роста совместно с атомами Ti, углеводородной фракции и О 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 формируемая система покрытие/подложка предварительно облучалась ионами ксенона. Атомы же титана проникают в кремний на глубины во много раз большие проективного пробега рассчитанного по программе TRIM. В пластине Si с предварительно имплантированными ионами Xe⁺ глубина проникновения атомов титана увеличивается еще на ~ 90 нм. При этом концентрация атомов титана на сопоставимой глубине возрастает примерно в 1.5 раза. Такой эффект проникновения можно объяснить радиационно-усиленной при осаждении покрытий диффузией атомов металла в глубь кремния по дефектам, создаваемым в результате предварительной имплантации ионов ксенона.

Для анализа механизма диффузии были проведены сравнения осевых и случайных спектров РОР от полученных структур и исходного кремния.

Сравнение осевых и случайных спектров от исходного (100) кремния и кремния с нанесенным покрытием позволяет оценить доли замещающих и междоузельных положений атомов металла в кристаллической решетке кремния на различной глубине.

На рис. 3. представлены профили глубинного распределения атомов титана, находящихся в междоузельных и замещающих положениях кристаллической решетки кремния после нанесения покрытия методом ОПАСИ без предварительного облучения подложки ионами ксенона и с предварительным облучением.

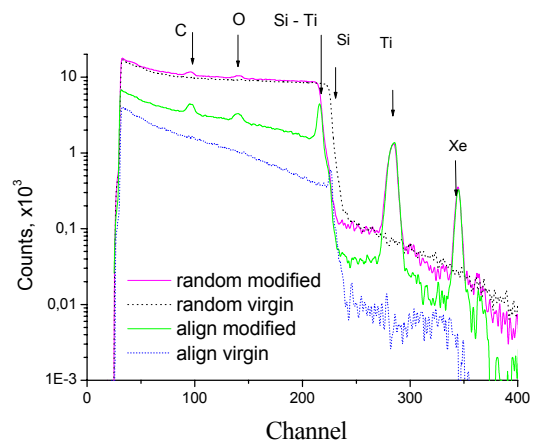


Рис 2. Энергетические спектры РОР ионов He⁺ с E₀=2 МэВ от (100) Si, модифицированного нанесением титанового покрытия методом ОПАСИ предварительно имплантированным ионами Xe с энергией 20 кэВ и интегральным потоком 9×10¹⁴ Xe/см², и исходного (100) кремния

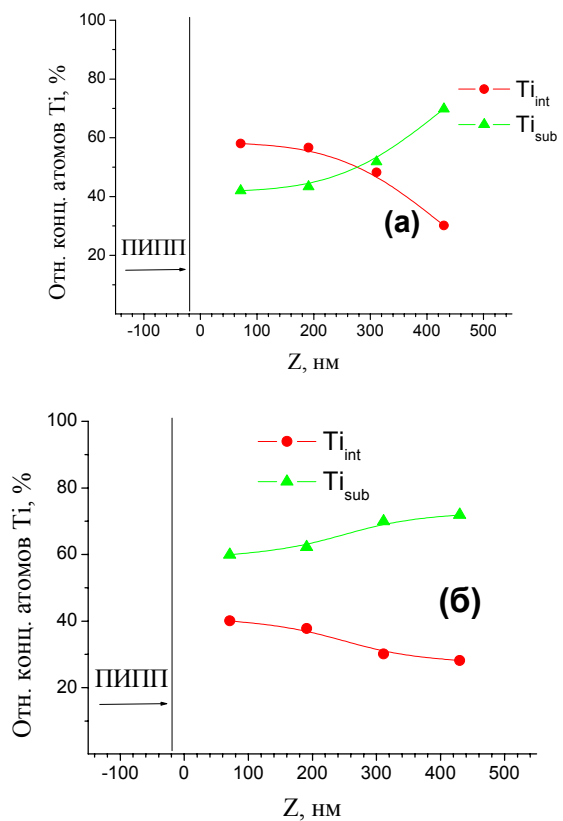


Рис. 3. Распределение в кремнии атомов титана, находящихся в междоузельных и замещающих положениях кристаллической решетки кремния, в структурах Ti покрытие/Si, сформированных: (а) – методом ОПАСИ, б) – методом ОПАСИ на кремнии, предварительно облученном ионами Xe с энергией 20 кэВ и интегральным потоком 9×10¹⁴ Xe/см².

Характер зависимости распределения атомов титана в кремнии, находящихся в узлах кристаллической решетки, кривая Ti_{sub}, и междоузельных, кривая Ti_{int}, дает возможность предположить вероятный механизм диффузии. В кремнии вблизи ПИПП (~10нм) создается наибольшее поврежде-

ние кристаллической решетки и наблюдается резкое уменьшение концентрации атомов титана. Это объясняется тем, что с увеличением числа междоузельных атомов кремния уменьшается число возможных путей миграции атомов титана по междоузлиям в решетке кремния. На большей глубине доля атомов титана, находящихся в узлах кристаллической решетки, увеличивается, достигая значения 70% на глубине около 430 нм. Механизм диффузии атомов титана в кремнии по узлам кристаллической решетки является основным, а наличие значительного количества атомов титана, находящихся в междоузлиях на малых глубинах проникновения, объясняется созданием высокоградиентной области междоузельных атомов металла вблизи ПИПП при нанесении покрытия.

Анализ распределения атомов титана в кремнии, предварительно облученном ионами Xe^+ с энергией 20 кэВ и интегральным потоком $9 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$, рис. 3 б, также подтверждает 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 титана, находящихся в замещающих положениях - усилению вклада механизма диффузии по узлам кристаллической решетки. Этим объясняется большая глубина проникновения атомов металла вглубь кремния при нанесении покрытий методом ОПА-СИ, если перед нанесением кремний облучался ксеноном.

Заключение

С использованием метода Резерфордского обратного рассеяния и моделирующей программы RUMP установлено, что введение в кремний ионов ксенона ведет к значительному увеличению глубины проникновения атомов наносимого покрытия и концентрации их в кремнии на сопос-

тавимой глубине, в сравнении с нанесением покрытий без предварительного облучения подложки.

Показано, что соотношение атомов титана, находящихся в узлах кристаллической решетки кремния, и атомов титана в междоузлиях не остается постоянным. С увеличением глубины проникновения доля атомов титана, находящихся в замещающих положениях, увеличивается, достигая значения 70 % на глубине $\sim 430 \text{ нм}$. Установлено, что предварительное облучение кремния ионами Xe^+ с $E = 20 \text{ кэВ}$ и дозами от $1 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ до $2.7 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ способствует увеличению доли атомов титана, находящихся в замещающих положениях.

Работа выполнялась при частичном финансировании Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований.

Список литературы

1. Поклонский Н.А., Горбачук Н.И., Шпаковский С.В., Филипеня В.А., Wieck A. // Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 8-й Междунар. конф., Минск, 23-25 сент. 2009г. - Минск: Изд. центр БГУ, 2009. - 364 с.
2. Михалкович О.М. Ташлыков И.С. // Физика и химия обработки материалов. - 2008. - 5. - С. 45-49.
3. Gotoh Y., Amioka T. // Surf. Coat. Technol. - 2002. - 158-159. - P.729-731.
4. Tashlykov I.S., Kasperovich A.V., Wolf G. // Surf. Coat. Techn. - 2002. - 158-159. - P.498-502
5. Ташлыков И.С., Белый И.С., Способ нанесения покрытий / Патент РБ №2324. 1С1 ВУ, С23 С4/12. С4/18, С14/16. Опул. 1999. офиц. бюл. гос. пат. ведом. РБ №1.
6. Doolittle L.R. // Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. - 1985. - В 9. - P.227-231.
7. Bøgh E. // Canad. J. of Phys. - 1968. - 46. - P.653-659.
8. Ziegler J.F., Biersak J.P., Littmark U. // Pergamon Press, Oxford, 1985. - 1. - P. 321.

MASS TRANSFER IN SILICON AT DEPOSITION OF Ti THIN FILMS ASSISTED BY SELF ION IRRADIATION

O.M.Mikhalkovich¹, V.E. Gusakov², I.S.Tashlykov¹,

¹Belarusian State Pedagogical University, Minsk, Belarus tashl@bspu.unibel.by

²Scientific-Practical Materials Research Center of NAS, Minsk, Belarus

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. Rutherford backscattering in combination with a channelling (RBS/Ch) of He^+ ions and computer program RUMP were applied to investigate an element composition. It is established, that coatings include atoms of metal, hydrogen, carbon, oxygen, silicon. 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^+ on diffusion processes in silicon are revealed.