

Таким образом, из полученных результатов следует, что примеси замещения с ковалентными радиусами, отличными от радиуса атома решетки, могут быть центрами аннигиляции точечных дефектов через захват их на избыточные вакансии, последующее вытеснение их из узлов решетки в междоузлия междоузельными атомами Si (эффект Воткинса) и т. д. Процессом вытеснения примесей из узлов решетки междоузельными атомами Si при имплантации и отжиге можно управлять, изменяя уровень ионизации в имплантированном слое.

ЛИТЕРАТУРА

1. Berezhnov N. I., Chelyadinskii A. R., Jadan M., Suprun-Belevich Yu. R. // Nucl. Instr. Meth. B. 1993. V. 73. P. 357–361.
2. Eriksson L. E., Davis J. A., Denhartog J. E. // Can. Nucl. Tech. 1966. V. 5. P. 40–43.
3. Liefving J. R., Schreuelkamp R. // J. Appl. Phys. Lett. 1993. V. 63. P. 1134–1136.
4. Bonafos C., Claverie A., Alquier D. // Appl. Phys. Lett. 1977. V. 71. P. 365–367.

ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЕ В КРЕМНИИ ПРИ ИОННО-АССИСТИРОВАННОМ ОСАЖДЕНИИ МЕТАЛЛОПОКРЫТИЙ

О. Г. Бобрович¹, И. С. Ташлыков², С. М. Барайшук²

¹Белорусский государственный технологический университет, physics@bstu.unibel.by

²Белорусский государственный педагогический университет
имени Максима Танка, tashl@bspu.unibel.by

1. ВВЕДЕНИЕ

В течение последних 15 лет интенсивно изучается взаимодействие тугоплавких металлов с кремнием в ионно-лучевых технологиях из-за своего возрастающего значения для изготовления полупроводниковых [1, 2] устройств.

В нашей работе мы изготавливали структуры металлосодержащее покрытие – Si, используя ионно-ассистированное нанесение покрытий в условиях саморадиации (ИАНПУС), и исследовали влияние плотности энергии, выделяемой (ПЭВ) в каскаде атомных столкновений, а также режимов и параметров осаждения покрытий на перемешивание элементов покрытия и подложки в области межфазной границы.

Как известно, воздействие радиационной модификации, сопровождающей осаждение покрытия, на структуру и состав образца обусловлено комплексом физических и химических процессов и явлений (например, баллистическое перемешивание, радиационно-стимулированная диффузия, химические реакции, распыление и другие), которые могут вносить различный вклад в интенсивность процессов взаимодействия компонентов покрытия и подложки [3, 4]. При этом возможна активация тех или иных механизмов атомного перемешивания на межфазной границе покрытие-подложка и, как результат, достижение лучших характеристик и параметров модифицированных поверхностей.

2. МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Образцы, предназначенные для исследований, модифицировали осаждением покрытий с использованием резонансного ионного источника вакуумной электродуговой плазмы, который генерирует как нейтральный поток, так и поток ионов металла.

Ионно-ассистированное в условиях саморадиации осаждение тонких металлсодержащих покрытий на основе металлов Co, Zr, Mo и W проводилось на пластины Si (100) и на предварительно подготовленные структуры металл – Si (100) (металл: Co, Zr, Mo, W), которые приготавливали, используя этот же ионный источник в режиме пассивного (при нулевом значении ускоряющего напряжения) нанесения покрытия.

Вакуум в процессе осаждения покрытий составлял $\sim 10^{-2}$ Па. Отношение плотности ионного потока к плотности нейтрального потока, в зависимости от ускоряющего напряжения (5, 7, 15, 20 кВ), менялось в разных опытах от 0,02 до 0,45, что соответствовало условию роста покрытия на подложке [5]. Рассчитанные скорости осаждения металлсодержащих покрытий были от 0,3 нм/мин до 1,9 нм/мин, а плотности ионного тока от 6,3 мкА/см² до 20 мкА/см² в зависимости от наносимого металла и энергии ассистирующих ионов. Для оценки плотности энергии, выделяемой в каскаде атомных столкновений, использовалось приближение Зигмунда [6].

Для элементного анализа формируемых структур, распределения элементов по глубине, а также для изучения повреждения структуры кремния применялся метод резерфордовского обратного рассеяния ионов гелия с $E_0 = 1,5$ МэВ и геометрией рассеяния $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = 70^\circ$, $\theta = 110^\circ$ в сочетании с каналированием. Энергетическое разрешение детектора составляло 15 кэВ, а глубинное разрешение в кремнии 13 нм. Структуру покрытие-подложка, сформированную ионно-ассистированным нанесением металлсодержащих покрытий, исследовали с помощью электронного микроскопа JEOL 3010. Изображение получали от поперечного сечения покрытия на кремнии “hand tools” методом, использующим малоугловую технику расщепления [7].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 показаны энергетические осевые спектры ОР кристаллов (100) Si, модифицированных ионно-ассистированным нанесением W в условиях саморадиации при комнатной температуре. Увеличение осевого выхода ориентированного спектра в области 130–160 каналов, связанное с повреждением в кристалле, растет с увеличением энергии облучения как при ионно-ассистированном нанесении W, так Co и Mo. Вместе с тем изменение уровня деканалирования за пиком повреждений обнаруживает неоднозначную зависимость от энергии ионов Co^+ , Mo^+ и W^+ , кривые 1–3 на рис. 1. Наблюдается рост деканалирования с увеличением энергии в системе W/Si и уменьшение в системе Co/Si и Mo/Si. Этот факт может быть связан с формированием в кремнии дефектов структуры разного типа при облучении ионами Co^+ , Mo^+ и W^+ .

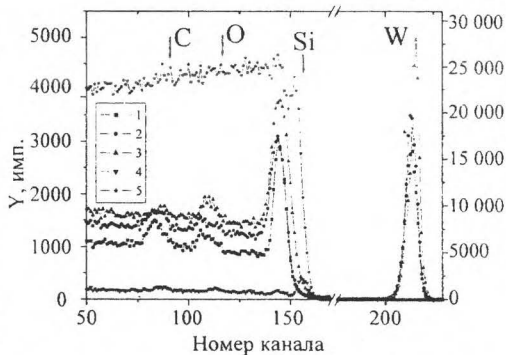


Рис. 1. Спектры ПОР/КИ от образцов W-(100)Si, сформированных ионно-ассистированным нанесением покрытий при ускоряющих напряжениях:
1 – 7 кВ; 2 – 15 кВ; 3 – 20 кВ. Исходный Si:
4 – осевой спектр; 5 – случайный спектр

Расчет слоевых концентраций дефектов по спектрам РОР/КИ показывает, что, как и ожидалось, при внедрении в предварительно подготовленные структуры металл-Si ионов с большей атомной массой

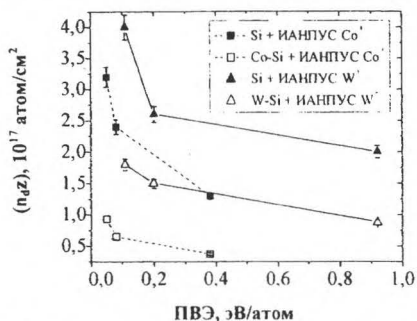


Рис. 2. Слоевая концентрация дефектов в Si и структуре металл-Si в зависимости от ПВЭ после модификации Si методом ИАНПУС

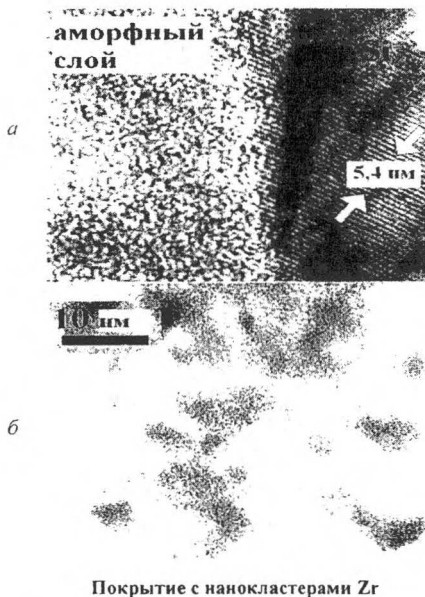


Рис. 3. ПЭМ-изображение поперечного сечения покрытия, осажденного на (100) Si в условиях ассистирования ионами Zr⁺ при ускоряющем напряжении 5 кВ: а – область границы раздела покрытие-подложка; б – центральная область покрытия

концентрация дефектов в кремнии выше, чем при облучении структур ионами с меньшей атомной массой при сравнимых ускоряющих напряжениях и, соответственно, энергиях ассистирующих ионов Co⁺, Mo⁺ и W⁺. На рис 2 показана зависимость слоевой концентрации дефектов в Si и структуре металл-Si в зависимости от плотности энергии, выделяемой в каскаде атомных столкновений после ионно-ассистированного нанесения металлсодержащих покрытий. Обнаружено, что ионно-ассистированное осаждение покрытий на тонкие металлсодержащие пленки, предварительно нанесенные на кремний вакуумным осаждением, позволяет снизить дефектность в поверхностном слое кремния. В частности, с применением метода РОР/КИ установлено, что концентрация смещенных из узлов атомов кремния уменьшается в 1,7–3,7 раза при одинаковых условиях осаждения металлсодержащего покрытия на кремний и на структуру металлсодержащее покрытие-кремний. Вакуумное осаждение тонкого покрытия на кремний маскирует его поверхность, и структура кремния не повреждается при дальнейшем модифицировании образца методом ионно-ассистированного в условиях саморадиации нанесения покрытий.

На рис.3 представлена структура металлсодержащего покрытия на основе циркония, осажденного на пластины (100) Si при ионном ассистировании в условиях саморадиации. Дефекты, наблюдаемые в кремнии (рис. 3а) вблизи границы раздела металлсодержащего покрытия на основе Zr и подложки кремния, являются результатом облучения пластин (100) Si ионами Zr⁺ на начальной стадии осаждения покрытия.

Покрытие на кремнии однородно по составу по всей толщине, но его структура изменяется от аморфной в области пленки с наноразмерными (~5–10 нм) включениями Zr (рис. 3б) до аморфной в области границы раздела фаз покрытие-подложка (рис. 3а). Плотность наноразмерных включений Zr по сечению покрытия оценивается в $\sim 1,7 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$.

4. ВЫВОДЫ

Мы исследовали влияние ПВЭ на повреждение структуры кремния и на эффективность перемешивания в системах металл-кремний сформированных ионно-ассистированным нанесением покрытий в условиях саморадиации. Процесс роста металлсодержащих покрытий сопровождается формированием переходного перемешанного слоя в области межфазной границы покрытие-подложка (металл-Si), толщина которого растет с увеличением ПВЭ, а число смещенных из узлов атомов в кремнии уменьшается.

Установлено, что ионно-ассистированное осаждение покрытий на тонкие металлсодержащие пленки, предварительно нанесенные на кремний вакуумным осаждением, позволяет снизить дефектность в поверхностном слое кремния до предъявляемого микроэлектроникой размера 30–40 нм. Концентрация смещенных из узлов атомов кремния уменьшается в 1,7–3,7 раза при одинаковых условиях осаждения металлсодержащего покрытия на кремний и на структуру металлсодержащее покрытие-кремний.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Dehm C., Raun B., Käsko I., Ryssel H.* // Nucl. Instr. and Methods in Physics Research. 1993. V. B80/81. P. 759.
2. *Gotoh Y., Nagao M., Ura T. et al.* // Nucl. Instr. and Methods in Physics Research. 1999. V. B148. P. 925.
3. *Zhang T., Song J. H., Tian X. B. et al.* // J. Vacuum Science and Technology. 2001. V. A19. P. 2048.
4. *Бобрович О. Г., Ташлыков И. С.* // Физика и химия обработки материалов. 2002. № 5. С. 40.
5. *Бобрович О. Г., Ташлыков И. С.* // Материалы 5-й Междунар. конф. ВИГТ. 2003. С. 326.
6. *Sigmund P.* // Appl. Phys. Lett. 1974. V. 25. P. 169.
7. *McCaffrey J. P.* // Proc. Mat. Res. Soc. Symp. 1992. V. 254. P. 109.

ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА КОМПЛЕКСОВ СОБСТВЕННЫЙ МЕЖДОУЗЕЛЬНЫЙ АТОМ-КИСЛОРОДНЫЙ ДИМЕР В КРЕМНИИ

**В. П. Маркевич^{1,2}, Л. И. Мурин¹, С. Б. Ластовский¹,
И. Ф. Медведева¹, Б. А. Комаров¹, J. L. Lindström³, A. R. Peaker²**

¹Институт физики твердого тела и полупроводников НАН Беларуси, mif@iftip.bas-net.by

²Centre for Electronic Materials, UMIST, Manchester

³Lund University, Division of Solid State Physics, Lund, Sweden

Остаточная технологическая примесь углерода в кремнии, как известно, является эффективным стоком для собственных междуузельных атомов (I_{Si}). В кристаллах кремния большого диаметра, выращенного методом Чохральского (Cz-Si), концентрация углерода, как правило, не высока ($N_C \leq 10^{15} \text{ см}^{-3}$), и I_{Si} могут захватываться дру-