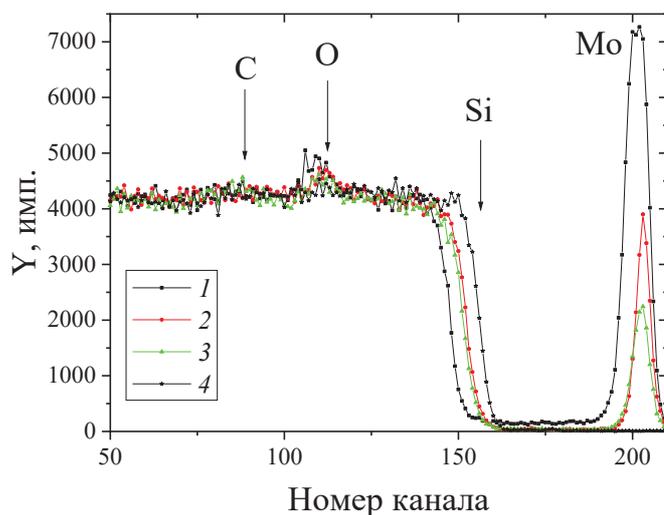


## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ В ПРОЦЕССЕ ИОННО-АССИСТИРУЕМОГО ОСАЖДЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

Ионное ассистирование в процессе осаждения покрытия влияет на кристаллическую структуру, плотность упаковки, адгезию и поверхность получаемого покрытия, что может повлиять на качество тонкопленочных устройств [1]. Осаждение металлических покрытий на кремний в условиях ионного ассистирования проводили с использованием вакуумного плазменно-дугового ионного источника. Этот тип ионного источника с электродами, изготовленными из материала осаждаемого покрытия, позволяет одновременно получать регулируемые потоки ионов металла  $J_i$  и нейтральных атомов  $J_A$  осаждаемого металла. В данной работе для создания покрытий применялся процесс осаждения Cr, Co, Mo, W на поверхность кремния в условиях ассистирования ускоренными ионами  $Cr^+$ ,  $Co^+$ ,  $Mo^+$ ,  $W^+$ , соответственно, при ускоряющем напряжении от 5 и 20 кВ. Время модифицирования кремния ионами  $Cr^+$  составляло 1, 3, 6 ч, что позволяло получить различные ионные потоки при нанесении Cr-покрытий и толщину покрытий. Осаждение кобальта, молибдена и вольфрама проводили на пластины Si (100) и на предварительно подготовленные структуры металл - Si (100) (металл: Co, Mo, W), которые приготавливали, используя этот же ионный источник в режиме пассивного осаждения покрытия при нулевом значении ускоряющего напряжения. Вакуум в процессе осаждения покрытий в рабочей камере достигал  $\sim 10^{-2}$  Па. Отношение плотности ионного потока к плотности нейтрального потока  $J_i / J_A$  составляло 0,02–0,45, что соответствовало росту покрытия на кремнии [2].

Экспериментальные спектры резерфордского обратного рассеяния (РОР) ионов гелия от кремниевых образцов, обработанных ионами  $Mo^+$  с одновременным осаждением покрытий Mo, показаны на рис. 1 Вертикальными стрелками отмечены номера каналов, которые связаны с энергиями рассеяния ионов гелия на атомах соответствующих элементов, локализованных на поверхности образцов. В числе элементов, находящихся в поверхностном слое исследуемых материалов, на спектрах идентифицируются молибден, а также C, O, Si. Сдвиг сигнала от кремния в область меньших номеров каналов на спектрах

1, 2 и 3 РОР, приведенных на рис. 1, свидетельствует о том, что на поверхности кристалла кремния образуется покрытие. Аналогичные закономерности по элементному составу и росту покрытий на кремнии наблюдались на спектрах РОР от образцов Si и структур металл–Si, модифицированных ионами  $\text{Cr}^+$ ,  $\text{Co}^+$ ,  $\text{W}^+$ .



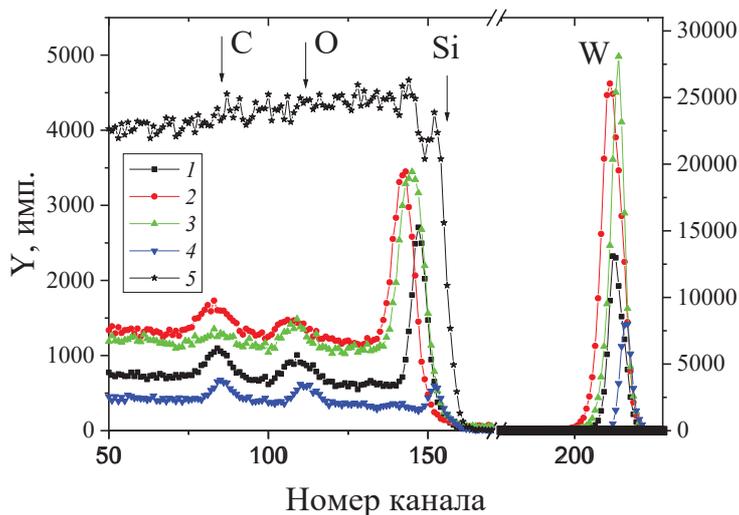
**Рисунок 1 – Энергетические спектры ОР ионов гелия с  $E = 1,5$  МэВ от кристаллов (100) Si, модифицированных ионно-ассистируемым осаждением Mo покрытий при ускоряющем напряжении: 1 – 7 кВ; 2 – 15 кВ; 3 – 20 кВ. 4 – исходный образец кремния**

Моделирование спектров РОР показало, что глубина проникновения хрома в кремний больше при ускоряющем напряжении 5 кВ, чем при ускоряющем напряжении 10 кВ. Это объясняется различием в значениях плотности энергии, выделенной (ПЭВ) в каскаде атомных столкновений при нанесении покрытия, которые составляли 0,42 эВ/атом для ускоряющего напряжения 5 кВ и 0,25 эВ/атом для 10 кВ. Аналогичная зависимость глубинного проникновения ионов в кремний от ПЭВ наблюдалась также и при ионно-ассистируемом осаждении кобальта, молибдена и вольфрама.

При уменьшении ускоряющего напряжения и увеличении времени модифицирования толщина покрытия растет. Так при ионно-ассистируемом осаждении хрома толщина покрытия составляет ~150 нм ( $U = 5$  кВ) и ~175 нм ( $U = 10$  кВ) при времени модифицирования 1 ч, увеличиваясь до ~320 нм ( $U = 5$  кВ) и до ~400 нм ( $U = 10$  кВ) при 6 ч модифицирования. Как следует из сравнения концентрационных профилей, снижение ускоряющего напряжения для ассистирующих ионов  $\text{Cr}^+$  от 10 до 5 кВ приводит к уменьшению толщины покрытия при одинаковом времени модифицирования образцов кремния. Это

связано с различной интенсивностью процессов распыления осаждаемого покрытия при различных энергиях ассистирующих ионов и активацией миграционных процессов в результате управляемого энерговыделения в каскаде атомных столкновений при нанесении покрытия в условиях ассистирования ионами  $\text{Cr}^+$ .

Для изучения совершенства структуры кристаллов, дефектообразования в приповерхностных слоях ионно-имплантированных кристаллов кремния анализировались каналированные спектры РОР. На рис. 2 показаны энергетические осевые спектры обратного рассеяния кристаллов (100) Si, модифицированных нанесением W в условиях ионного  $\text{W}^+$  ассистирования. Осевой выход ориентированного спектра в области 130–160 каналов, связанный с повреждением в кристалле Si, растет с увеличением ускоряющего напряжения для ионов  $\text{W}^+$ , ассистирующих осаждение вольфрама.



**Рисунок 2 – Энергетические (100) осевые спектры ионов  $^4\text{He}$  с  $E=1,5$  МэВ от структур W-кремний, модифицированного нанесением W в условиях ассистирования ионами  $\text{W}^+$  при ускоряющем напряжении: 1 – 7 кВ; 2 – 15 кВ; 3 – 20 кВ. 4 – исходный W-кремний; 5 – случайный спектр кремния**

Изменение уровня деканалирования за пиком повреждений обнаруживает неоднозначную зависимость от энергии ионов  $\text{Co}^+$  и  $\text{W}^+$  (спектры 1–3, рис. 3). Наблюдается рост деканалирования с увеличением энергии ассистирующих ионов в системе W – Si и уменьшение в системе Co – Si. Этот факт может быть связан с формированием в кремнии дефектов структуры разного типа при облучении ионами  $\text{Co}^+$ ,  $\text{W}^+$ .

Характер повреждения на спектрах РОР каналированных ионов отражает тот факт, что структура кремния повреждается лишь в

начальный момент времени модифицирования образца, когда толщина осаждаемого покрытия меньше пробега ассистирующих ионов в материале покрытия. Слоевое содержание смещенных из узлов атомов в образцах кремния, модифицированных ионно-ассистируемым нанесением покрытий при различном времени модифицирования кристаллов Si, составляет  $5 \cdot 10^{16}$ – $8 \cdot 10^{16}$  атом/см<sup>2</sup>. Ионно-ассистируемое осаждение покрытий на структуры металлическое (Co, Mo, W) покрытие – кремний, созданные предварительным вакуумным осаждением на кремний покрытий при  $U = 0$ , позволяет снизить дефектность в поверхностном слое кремния размером 30–40 нм.

В результате выполненной работы с применением метода РОР/К установлено, в состав получаемых покрытий на кремнии входят атомы осаждаемого металла (Cr, Co, Mo, W), технологических примесей углерода и кислорода из вакуумной камеры, а также Si в результате встречной диффузии из подложки в покрытие. Средняя скорость осаждения покрытия хрома при времени модифицирования 1 ч составляла 2,3–2,8 нм/мин и уменьшалась до значений 0,9–1,0 нм/мин при времени модифицирования 6 ч. Исследование дефектообразования в Si методом РОР/КИ показало, что концентрация дефектов в поверхностном слое кремния растет с увеличением энергии ассистирующих ионов  $Co^+$ ,  $Mo^+$  и  $W^+$ . Глубина максимальной концентрации дефектов сравнима с глубиной проникновения ионов с соответствующими энергиями в кремнии, и при этом максимум нарушений смещается в глубину кристалла с увеличением энергии ассистирующих ионов. Концентрация смещенных из узлов атомов кремния уменьшается в 1,7–3,7 раза при одинаковых условиях осаждения покрытия на кремний и на структуру металлическое покрытие – кремний. Установлено, что при сравнимых энергиях ионов, ассистирующих осаждение разных металлов на кремний концентрация дефектов в кремнии растет с ростом энергии, выделенной в каскаде атомных столкновений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Bobrovich O. G., Mikhalkovich O. M., Tashlykov I. S. Composition and morphology of Ti and W coatings deposited on silicon during ion-beam assistance // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2015. – V. 6, – №. 3. – P. 229–233.
2. Бобрович О. Г., Ташлыкков И. С. Формирование на графите металлсодержащих покрытий в условиях ионного ассистирования // *Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 5-й Международ. конф., Минск, 6–9 окт. 2003 г., БГУ. Минск, – 2003. – С. 326–328.*