

**С.М. Барайшук¹, М. Вертель², М. Будзинский²,
О.Г. Бобрович³, О.М. Михалкович⁴**

¹ Белорусский государственный аграрный технический университет
Минск, Беларусь

² Институт физики Университета им. М. Кюри Складовской Люблин, Польша,

³ Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь

⁴ Белорусский государственный педагогический университет, Минск, Беларусь

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ, ОСАЖДЕННЫХ НА КРЕМНИЕ ИОННО-ЛУЧЕВЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ Mo, Cr.

Аннотация. В данной работе с использованием методов РОР, растровой электронной и сканирующей зондовой микроскопии установлены состав и структура металлических (Mo, Cr) покрытий, осажденных на (111) Si в условиях ассистирования собственными ионами.

**S. Baraishuk¹, M. Wiertel², M. Budzynski², O. Bobrovich³,
O. Mikhalkovich⁴**

¹ Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk Belarus

² Institute of Physics, University n.a. M. Curie-Sklodowska, Lublin, Poland

³ Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus

⁴ Belarusian State Pedagogical University, Minsk, Belarus

FEATURES OF THE FORMATION OF THIN FILMS OF FUNCTIONAL COATINGS DEPOSITED ON SILICON BY ION- BEAM SPUTTERING OF Mo, Cr.

Abstract. In this work, using RBS, scanning electron microscopy, and scanning probe microscopy, the composition and structure of metal coatings (Mo, Cr) deposited on (111) Si under conditions of irradiation with intrinsic ions are established.

Получению тонких пленок металлов и оксидов металлов и изучению их свойств традиционно уделяется значительное внимание. В последнее время интерес к исследованию данных пленок возрастает в связи с необходимостью получения оптически прозрачных проводящих и при этом упрочненных слоев для высокоэффективных солнечных элементов [1, 2] и фотоприемников, полупроводниковых лазеров и сенсорных элементов. Формирование границы между покрытием и кремнием является важным этапом в изготовлении полупроводниковых устройств. Большинство опубликованных работ посвящены анализу атомного перемешивания на межфазной границе металл/кремний, вызванному воздействием ионов инертных газов Ar,

Kr и Xe при осаждении покрытия (метод IBAD) [3]. Облучение растущей пленки ионами основы наносимого покрытия применяется для: улучшенная адгезия к подложке, управление морфологией поверхности, модификация зернистости и смачиваемости осаждаемого слоя, модификация электрических и оптических свойств. Этот процесс и ряд других, например, силицидообразование являются предметом многочисленных исследований из-за широкого применения в новых электронных приборах [4]. Разрабатываемые процессы и полученные тонкие пленки могут найти применение при создании перспективных материалов для сенсорных микро-наносистем контроля оптического излучения.

Металлическое (Mo, Cr) покрытие осаждалось на пластины монокристаллического кремния (111) Si в условиях ассистирования ионами осаждаемого металла (Mo^+ , Cr^+) при ускоряющих напряжениях 5 кВ – 15 кВ. Для этого использовали резонансный ионный источник вакуумной электродуговой плазмы, который одновременно генерирует как нейтральный поток атомов, так и поток ионов осаждаемого металла. Отношение плотности ионного потока к плотности нейтрального потока составляло от 0,02 до 0,09, что соответствовало условиям роста покрытия на подложке [4, 5]. Давление в вакуумной камере в процессе осаждения покрытий составляло $\sim 10^{-2}$ Па, а скорость осаждения покрытий в разных опытах была $\sim 0,16 \div 0,45$ нм/мин. Ионный источник использовали также для создания конструкций металл/Si подложка пассивным осаждением нейтрального потока атомов металла, генерируемого ионным источником без включения ускоряющего напряжения на держатель мишени. Эти системы использовали для последующего нанесения одноименных покрытий в условиях ионного ассистирования.

Послойный элементный анализ исходных образцов (111)Si, модифицированных ионно-ассистированным осаждением металлического покрытия изучались с применением метода резерфордского обратного рассеяния (ROR) ионов гелия с $E_0=1,5$ МэВ при углах рассеяния, влета и вылета 110° , 0° , 70° , соответственно и компьютерного моделирования экспериментальных спектров ROR программой RUMP. Энергетическое разрешение анализирующей системы составляло 15 кэВ, что обеспечивало глубинное разрешение анализа ~ 13 нм. Топография поверхности покрытий изучалась методами растровой электронной электронно-зондовой микроскопии (EDX Oxford Instruments AZtecEnergy-Advanced) и атомно-силовой микроскопии (NT 206 (Microtestmachines Co.) в контактном режиме.

Результаты и их обсуждение. На рис. 1 показаны профили глубинного распределения элементов в образцах Cr/Si и Mo/Si, полученных при ускоряющем напряжении 15 кВ. Анализ концентрационных зависимостей распределения элементов в формируемых металлических покрытиях обнаруживает существенное различие в зависимости от металла осаждаемого покрытия, а также технологических условий осаждения. На представленных концентрационных профилях глубинного распределения компонентов указано положение межфазной границы в системах покрытие/подложка, которая устанавливается, согласно известной методике введения ксенонового маркера [3].

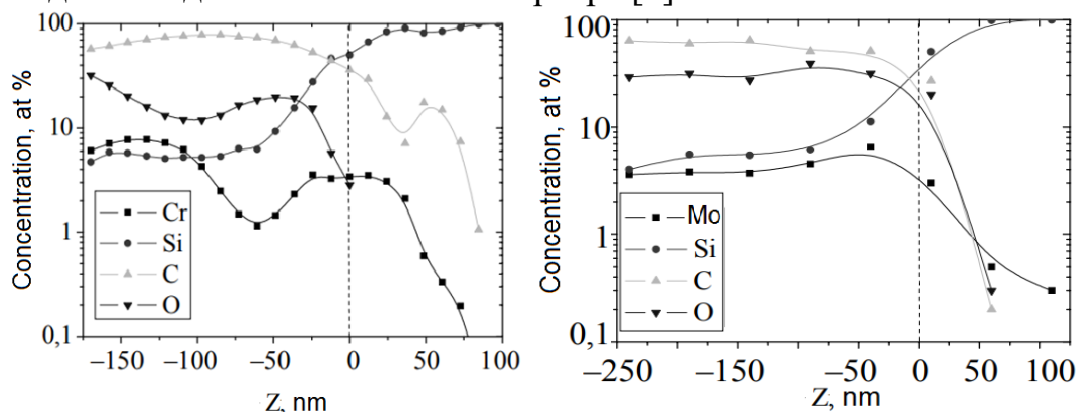


Рис. 1 - Распределение элементов по глубине в образцах после нанесения покрытий на основе хрома и молибдена в условиях ионного ассистирования собственными ионами.

Распределение хрома и молибдена в покрытии составляет 3-5 ат. % по всей толщине покрытия с увеличением до 5-7 ат. % к границе покрытие – подложка для Mo и уменьшением с 7 до 3 ат. % для хромсодержащих покрытий. Кислород и углерод распределены в покрытиях неравномерно. Так концентрация кислорода возрастает до 30 ат. % в покрытии и снижается до 2-5 ат. % к границе раздела покрытие/подложка, а в кремнии становится ниже, чем концентрация металлов, рис. 1. Распределение углерода качественно подобно пространственному распределению кислорода, однако концентрация примерно 2 раза выше в покрытии и снижается до 40 ат. % к границе раздела покрытие/подложка. В кремнии содержание углерода на несколько порядков превышает концентрацию металлов. Кроме этого, по всей толщине осажденного покрытия содержится кремний с концентрацией 10-40 ат.%. Появление в покрытии кремния связано со встречной диффузией из подложки.

Толщина покрытия с увеличением времени модифицирования, как и стоило ожидать, растет. При времени облучения 1 ч толщина покрытия составляет ~20 нм, 3 ч – 50 нм и 6 ч – 240 нм. Средняя

скорость роста осаждаемого металлсодержащего покрытия на кремнии равна 0,5 нм/мин. Уменьшение ускоряющего напряжения для ассистирующих ионов Mo^+ от 10 до 5 кВ приводит к увеличению толщины покрытий от ~165 до ~240 нм 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 Mo^+ .

С использованием атомно-силовой микроскопии установлено, что шероховатость исходного кремния незначительна и составляет 0,2 нм, увеличиваясь при нанесении покрытий до 1,5 нм (рис. 2). Так же можно говорить о значительном изменении морфологии поверхности при нанесении покрытий, которая нашла свое подтверждение и при анализе данных СЭМ (рис. 3). Изменения шероховатости и связанное с нанесением покрытия изменения гидрофобных свойств поверхности приведены в таблице 1.

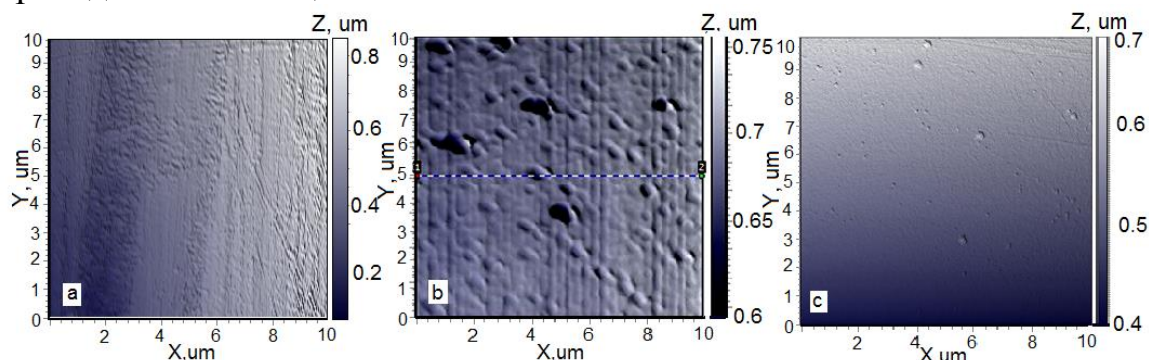


Рис. 2 - Морфология поверхности покрытий на основе хрома и молибдена полученная АСМ, а также поверхность чистого кремния.

Таблица 1 – РКУС водой поверхности исходного и модифицированного нанесением различных металлопокрытий кремния

Параметр	Кремний исходный	Покрытия металлов на кремнии	
		Cr	Mo
РКУС, °	68.1	70.7	77.0
Ra, nm	0.2	0.7	1.5

Проведение исследований с на сканирующем электронном микроскопе сочеталось с анализом обратного энергодисперсионного рассеяния электронов, результаты которого так же показали, что состав

приповерхностного слоя толщиной 100нм входят помимо атомов металлов наносимого покрытия с концентрацией 2-5 % , а так же кислорода углерода и кремния, в концентрациях сопоставимых с полученными моделированием спектров РОР.

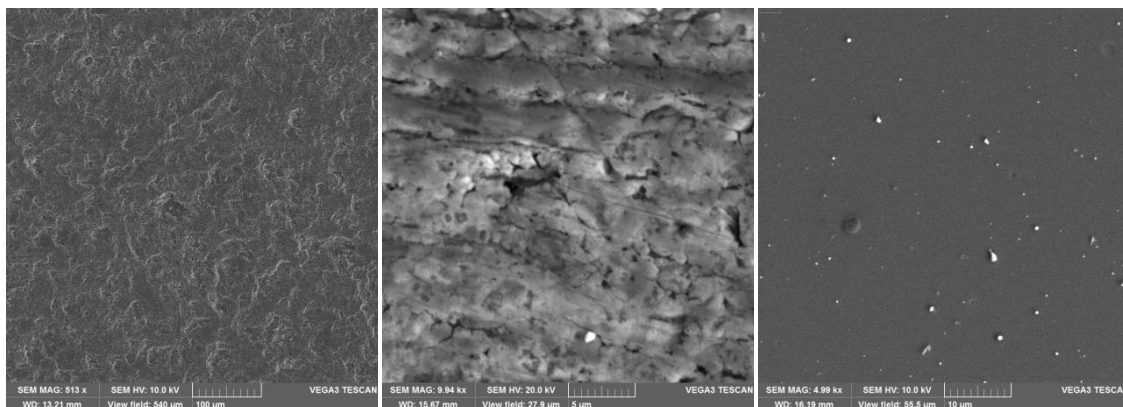


Рис. 3 - Микрофотографии поверхности и покрытий на основе хрома и молибдена, а также поверхности чистого кремния полученная СЭМ.

Заключение. Установлено, что в состав получаемых на кремниевых пластинах покрытий входят атомы наносимого металла, технологических примесей углерода и кислорода из вакуумной камеры, а также Si в результате встречной диффузии из подложки в покрытие. При уменьшении ускоряющего напряжения для ассистирующих ионов от 15 кВ до 5 кВ толщина покрытия увеличивается от ~ 30-45 нм до ~ 90-120 нм, что объясняется разной интенсивностью процессов распыления покрытия, осаждаемого при различных энергиях ассистирующих ионов, и активацией миграционных процессов во время осаждения покрытия. Шероховатость поверхности при ионно-ассистированном формировании систем Cr/Si и Mo/Si остается низкой, что позволяет в дальнейшем использовать такие системы в качестве подложек для фотоприемников и сенсорных систем.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь № ГР 20211250

Список использованных источников

1. Baraishuk S. M. et al. Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Tech. – 2018. – Т. 12. – №. 6. – С. 1077-1081.
2. Carter G., et al. J. of Advanced Materials, 1999, v.5, № 1, p. 1-6.
3. Tashlykov I. S. et al. J. of Surface Investigation. X-ray. Synchrotron and Neutron Techniques 2009, № 5, с.92-95.