

Особенности формирования тонких пленок функциональных покрытий, нанесенных на кремний методом ионно-лучевого напыления Мо и W

А.А. Шевченко, С.М. Барайшук, В.К. Долгий

Белорусский государственный аграрно-технический университет 220023, Минск, Беларусь
e-mail: bear_s@rambler.ru

Изучению процессов получения тонких пленок оксидов металлов и их свойств (в том числе при введении легирующих добавок) в технологии микроэлектроники традиционно уделяется значительное внимание. Интерес к исследованию данных пленок возрастает в связи с необходимостью получения оптически прозрачных проводящих слоев для высокоэффективных солнечных элементов [1, 2], полупроводниковых лазеров и светодиодов, дисплеев. В нашем исследовании осаждение металлического покрытия сопровождается облучением ионами этого же металла [3], бомбардировка в процессе нанесения покрытий в условиях ионного ассистирования обеспечивает взаимное перемешивание на межфазной границе металл/кремний.

Мо и W осаждались на пластины монокристаллического кремния (111) Si в условиях ассистирования ионами при ускоряющих напряжениях 5 кВ – 15 кВ. Использовали резонансный ионный источник вакуумной электродуговой плазмы [3]. Отношение плотности ионного потока к плотности нейтрального потока составляло в опытах от 0,02 до 0,09, что соответствовало условиям роста покрытия на подложке [4, 5]. Послойный элементный анализ образцов, модифицированных осаждением металлического покрытия, изучали методом Резерфордского обратного и компьютерного моделирования экспериментальных спектров программой RUMP. Энергетическое разрешение анализирующей системы составляло 15 кэВ, что обеспечивало глубинное разрешение анализа ~13 нм. Топография поверхности изучалась методами растровой электронной электронно-зондовой микроскопии (EDX Oxford Instruments AZtecEnergy-Advanced) и атомно-силовой микроскопии (NT 206 Microtestmachines Co., Беларусь) в контактном режиме.

На Рисунке 1 показаны профили глубинного распределения элементов в образцах W/Si, полученных при ускоряющем напряжении 15 кВ. Концентрация атомов W составляет 30 ат. % при создании металлических покрытий на Si и примерно 40 ат. % – на конструкции W/Si, которая плавно уменьшается до 2-5 ат. % к границе раздела фаз покрытие/подложка.

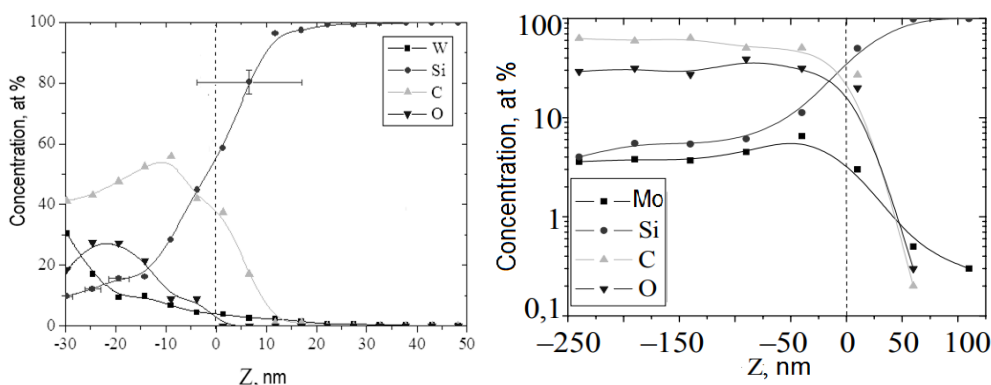


Рисунок 1. Распределение элементов по глубине после нанесения W и Mo покрытий с ионно-активированными ионами хрома и молибдена соответственно.

Нанесение металлического покрытия на подготовленные конструкции W/Si позволяет получить более толстые покрытия. Положение межфазной границы в системах покрытие/подложка, устанавливается методикой введения ксенонового маркера [6]. Уменьшение ускоряющего напряжения для ассистирующих ионов Mo^+ или W^+ до 5 кВ

позволяет увеличить толщину осаждаемого покрытия за счет, по-видимому, уменьшения интенсивности процессов распыления осаждаемого покрытия.

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 W. Распределение углерода подобно кислороду, но 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 вольфрама. По всей толщине покрытия обнаруживается кремний с концентрацией 10-40 ат.%. Появление в покрытии кремния связано со встречной диффузией из подложки.

Распределение молибдена в покрытии составляет 3-5 ат. % по всей толщине покрытия с увеличением до 5-7 ат. % к границе покрытие – подложка для Mo. 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. Как следует из сравнения концентрационных профилей, 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 нанесения покрытий. 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.

С использованием атомно-силовой микроскопии установлено, что шероховатость исходного кремния составляет ~0,2 нм, увеличиваясь при нанесении покрытий до 1,1 нм (рис.2). Шероховатость поверхности при ионно-ассистированном формировании систем Mo/Si и W/Si остается низкой, удовлетворяющей требованиям микроэлектроники.

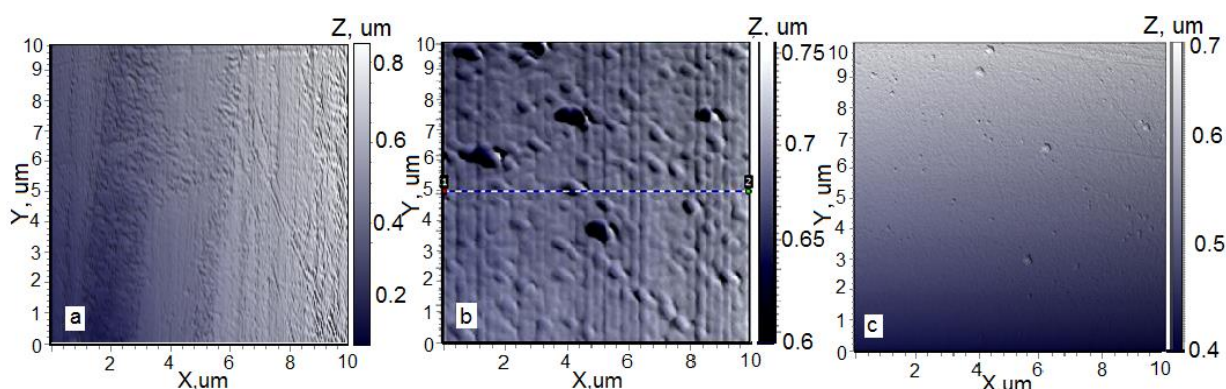


Рисунок 2. Поверхность кремния а – с Sr покрытием, б – чистая, в – с Mo покрытием.

Методами просвечивающей электронной микроскопии и дифракции установлено, что при осаждении W покрытий на подложке формируется один слой, содержащий области скопления силицидов (W_3Si , W_5Si_3 , WSi_2) и оксида WO_2 , размер которых составляет ~5 ÷ 10 нм. Отметим, что ионно-ассистированное нанесение покрытий на подготовленные конструкции W/Si и Mo/Si способствует получению более толстых пленок, содержащих фазы силицидов металлов. Так же наблюдается аморфизация поверхностного слоя кремниевой подложки. Более тяжелые ассистирующие ионы W^+ приводят к формированию тонкого сплошного аморфного слоя на поверхности пластин кремния. Ионы Mo^+ также формируют аморфные слои в приповерхностной области, однако они располагаются глубже и не являются сплошными по поверхности.

Работа выполнена при поддержке МО Республики Беларусь (№ ГР 20211250)

1. T. Razykov, et al., *Appl. Solar Energy* **57**, 113 (2021).
2. S.M. Baraishuk, et al., *J. of Surf. Inv.: X-ray, Synch. and Neutron Techn.* **6**, 1077 (2018).
3. I.S. Tashlykov, et al., *J. of Surf. Inv.: X-ray, Synch. and Neutron Techn.* **5**, 92 (2009).
4. O.G. Bobrovich, et al., *Inorg. Mater.: Appl. Res.* **6**, 229 (2015).
5. S.M. Baraishuk, et al., *Phys. and Chem. of Mat. Treatment* **1**, 66 (2011).
6. O.G. Bobrovich, et al., *Proc. of BSTU, series VI*, **XIII**, 90 (2005).