

## Исследование структур покрытия на основе Мо/кремниевой подложки для тонкопленочных ИК-излучателей

С.М. Барайшук<sup>1,\*</sup>, О.М. Михалкович<sup>2,†</sup>, М. Виертель<sup>3,‡</sup>, М. Будзински<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный аграрный технический университет, агроэнергетический факультет, кафедра практической подготовки студентов Республика Беларусь, 220012, г. Минск, проспект Независимости, 99

<sup>2</sup>Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка, факультет естественных наук, кафедра физики и методики преподавания физики Республика Беларусь, 220030, г. Минск, ул. Советская, 18

<sup>3</sup>Университет Марии Складовской-Кюри, институт физики, кафедра физики материалов Польша, 20-031, г. Люблин, пл. Марии Складовской-Кюри, 5  
(Поступила в редакцию 14.01.2024; подписана в печать 14.03.2024)

В работе представлены исследования структур покрытия на основе Мо/кремниевая подложка полученных комбинацией ионно-ассистированного и магнетронного осаждения в различных режимах. Показано, что поверхность покрытия имеют структурный состав и проявляют радиационно-стимулированную диффузию молибдена в глубь подложки с концентрацией до 1 ат%, на глубину до 500 нм. Полученные покрытия обладают стабильными резистивными и термоэлектрическими свойствами, обладают поверхностью с низкой шероховатостью не более 2.5 нм по площадке  $10 \times 10$  мкм и высокими прочностными характеристиками (твёрдость получаемых покрытий до 70 ГПа) и управляемой смачиваемостью, что делает их пригодными для дальнейшего формирования защитных или функциональных слоев электроники, позволяют формировать из них тонкопленочные ИК-излучатели на основе  $\text{MoSi}_2$ , которые крайне важны при создании оптических газоанализаторов, построенных на принципе бездисперсионной ИК-спектроскопии.

PACS: 25.40.Cm, 52.40.Ni, 61.80.Ba, 62.20.-x, 68.35.Ct.

УДК: 539.4, 538.9, 539.87

Ключевые слова: тонкие пленки, способы нанесения покрытий, сенсор, структура поверхности, резерфордовское обратное рассеяние, электронная микроскопия, свойства поверхности, твердость, смачиваемость, состав поверхности.

### ВВЕДЕНИЕ

Актуальной задачей в настоящее время является разработка и создание интегрированных газовых сенсоров, регистрирующих в воздушной среде содержание таких веществ как углекислый ( $\text{CO}_2$ ) и угарный (СО) газы, метан ( $\text{CH}_4$ ), аммиак ( $\text{NH}_3$ ) и других газов. Эта задача особенно важна в связи с высоким уровнем загазованности атмосферы, необходимости анализа газовых сред, используемых при хранении и транспортировке продуктов и помещений, где производится заполнение упаковок такими средами. Такие разработки особенно актуальны в условиях активного импортозамещения, что делает разработку элементов сенсорных систем особенно актуальной. Одним из перспективных направлений в решении задач построения сенсорных систем, является разработка оптических газоанализаторов, построенных на принципе бездисперсионной инфракрасной спектроскопии. Такой способ определения возможен поскольку газы имеют характерные полосы поглощения в инфракрасной области спектра длин волн света, обусловленные изменением колебательно-вращательного состояния молекул газа под действием

ИК-излучения [1]. Необходимо выделить спектральный интервал, соответствующий положению полосы поглощения определяемого газа, и пропустить световой поток выделенного интервала через контролируемый объем исследуемой среды. Анализируя фотоприемником величину поглощения излучения, прошедшего сквозь пробу, можно судить о концентрации газа в исследуемой газовой смеси, например в воздухе.

Дисилицид молибдена ( $\text{MoSi}_2$ ) является подходящим высокотемпературным материалом для использования в качестве источника инфракрасного излучения в таких приложениях, поскольку он имеет высокую температуру плавления ( $2030^\circ\text{C}$ ), относительно низкую плотность ( $6.24 \text{ г/см}^3$ ), высокую теплопроводность ( $52 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ), температуру перехода от хрупкого к пластичному около  $1000^\circ\text{C}$ , кроме того, обладает стабильностью в различных агрессивных и окислительных средах [2, 3] и, при этом, дешевле материалов имеющих аналогичные свойства.

В нашем исследовании получение  $\text{MoSi}_2$  осуществляли при осаждении металлического покрытия, которое сопровождается облучением ионами этого же металла [4]. Плазменное напыление является очень эффективным методом получения композиционных покрытий  $\text{MoSi}_2$ , сформированных распылением компонентов, а ионная бомбардировка в процессе нанесения покрытий в условиях ионного ассистирования обеспечивает взаимное перемешивание на межфазной границе металл/кремний. Такой способ формирования по-

\* [baraishuksm@gmail.com](mailto:baraishuksm@gmail.com)

† [phyzbober@tut.by](mailto:phyzbober@tut.by)

‡ [marek.wiertel@mail.umcs.pl](mailto:marek.wiertel@mail.umcs.pl)

крытия на кремнии сопровождается, в том числе, силицидообразованием и представляет интерес для исследователей из-за потенциально широкого применения в электронике [5, 6]. При проведении экспериментов по атомному перемешиванию кремния с металлами в приповерхностных областях необходимо проведение послойного элементного анализа, изучение структурно-фазовых перестроек и морфологии поверхности модифицируемых образцов кремния. Разрабатываемые и полученные тонкие пленки могут найти применение при создании сенсорных микро-наносистем для контроля оптического излучения, а также в других отраслях народного хозяйства, где задача преобразования оптических параметров чрезвычайно важна и актуальна [7–9].

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Покрытие на основе Мо осаждалось на пластины монокристаллического кремния (111) Si в условиях ассистирования ионами  $Mo^+$  при ускоряющих напряжениях 5–15 кВ. Для этого использовали резонансный ионный источник вакуумной электродуговой плазмы, который одновременно генерирует как нейтральный поток атомов, так и поток ионов осаждаемого металла [4]. Используемый тип ионного источника с электродами, изготовленными из материала наносимого покрытия (молибден), позволяет одновременно получать регулируемые потоки ионов металла  $J_i$  и нейтральных атомов  $J_A$  осаждаемого металла. Отношение плотности ионного потока к плотности нейтрального потока  $J_i/J_A$  составляло в экспериментах с Мо от 0.02 до 0.09, что соответствовало условиям роста покрытия на подложке [10]. Плотность ионного тока варьировалась в пределах 50–100 мА/см<sup>2</sup>. Давление в вакуумной камере в процессе осаждения покрытий составляло  $\sim 10^{-3}$  Па, а скорость осаждения покрытий в разных опытах была  $\sim 0.16 \div 0.45$  нм/мин. Ионный источник использовали также для создания конструкций Мо/Si подложки пассивным осаждением нейтрального потока атомов металла, генерируемого ионным источником без приложения ускоряющего напряжения на держатель мишени в течение 1 ч. Такие системы были в том числе использованы и для последующего нанесения на них Мо покрытий в условиях ионного ассистирования.

Послойный элементный анализ исходных образцов (111) Si, модифицированных ионно-ассистированным осаждением металлического покрытия, проводили с применением метода резерфордовского обратного рассеяния (POP) ионов  $He^+$  с  $E_0 = 1.95$  МэВ и геометрией рассеяния  $\theta_1 = 0^\circ$ ,  $\theta_2 = 12^\circ$ ,  $\theta = 168^\circ$ , где  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  и  $\theta$  — углы влета, вылета и рассеяния соответственно, и компьютерного моделирования экспериментальных спектров POP по программе RUMP [11]. Энергетическое разрешение анализирующей системы составляло 15 кэВ, что обеспечивало глубинное разрешение анализа  $\sim 13$  нм. Топография поверхности

покрытий изучалась методами растровой электронной электронно-зондовой микроскопии (EDX Oxford Instruments AZtecEnergy-Advanced) и атомно-силовой микроскопии (NT 206 (Microtestmachines Co., Беларусь) в контактном режиме. Элементный анализ состава поверхности пленок проводили, используя метод обратного энергодисперсионного рассеяния электронов с использованием электронно-зондового микроскопа типа EDX Oxford Instruments AZtecEnergy-Advanced с кремний-дрейфовым детектором X-act (активная площадь кристалла 10 мм<sup>2</sup>), работающим при комнатной температуре. Энергия первичного пучка электронов составляла 20 кэВ, детектор вторичных электронов типа Everhart-Thornley (кристалл YAG). Резистивные свойства поверхности исследовались с использованием ПИУС-1УМ-К. Чтобы измерять изменения смачиваемости поверхности применяли известную и модернизированную нами ранее методику измерения равновесного краевого угла смачивания [12]. Измерение нанотвёрдости и модуля Юнга проводилось на нанотвердомере «Fisher H100» методом наноиндентирования. В процессе измерений снимается кривая нагружение–разгрузка, которая в дальнейшем обрабатывается по методу Оливера–Фарра [13].

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Примеры изображения поверхности, восстановленного по результатам атомно-силовой микроскопии и сканирующей электронной микроскопии, приведены на рис. 1. Для оценки поверхности было выбрано не менее пяти площадок сканирования размером  $10 \times 10$  мкм с разных участков поверхности, что позволило проводить усреднение параметров рельефа. На рис. 1 видно образование зеренной структуры на поверхности кремния в процессе нанесения Мо-содержащего покрытия. Результаты оценки размеров таких структур показывают длину 50–70 нм, ширину 30–50 нм, а анализ их распределения по поверхности показывает преимущественную ориентацию в одном направлении.

На основании анализа топографии поверхности получена зависимость средней арифметической шероховатости  $R_a$  (рис. 2) от толщины покрытия (фактически от времени нанесения), которая показывает, что на начальном этапе нанесения покрытий средняя арифметическая шероховатость поверхности значительно больше, чем у исходного кремния, что, по видимому, обусловлено неравномерностью формирования покрытия, имеющего островковый механизм роста [14]. При толщине наносимого покрытия более 50 нм средняя арифметическая шероховатость будет изменяться незначительно, что подтверждает равномерность формирования покрытия по поверхности.

Ранее нами изучалась структура поверхности полученных аналогичным образом покрытий и предварительных слоев, полученных перед формированием итогового покрытия [15] методом сканирующей

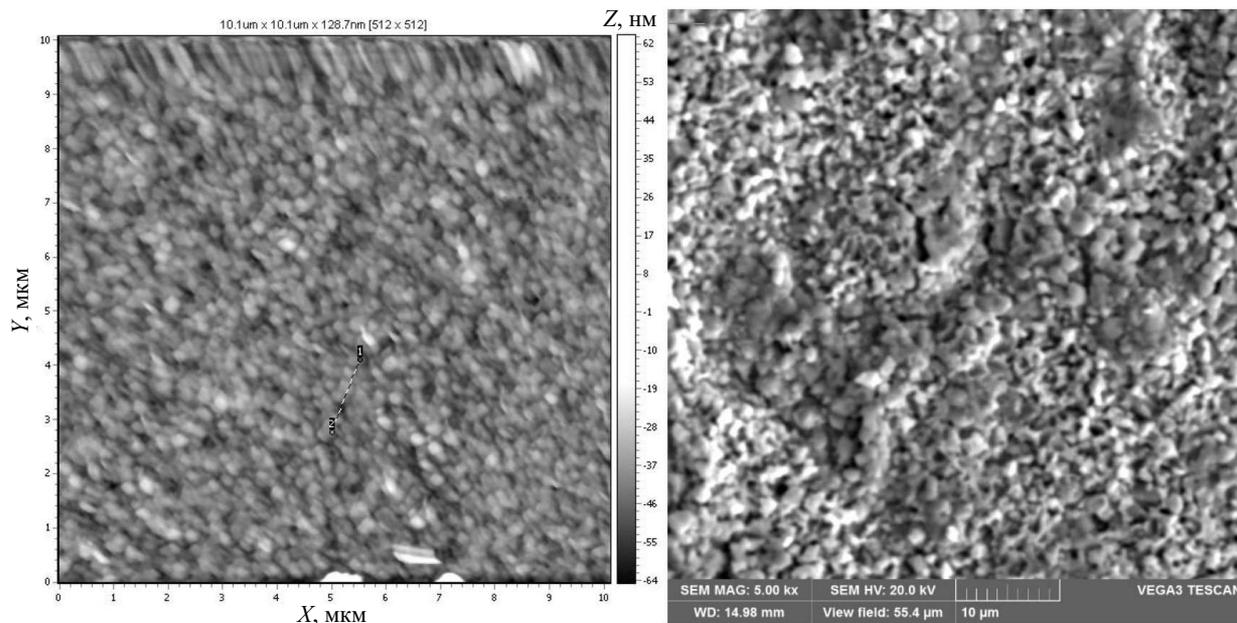


Рис. 1. Пример АСМ (слева) и СЭМ (справа) изображения участка поверхности полученных покрытий

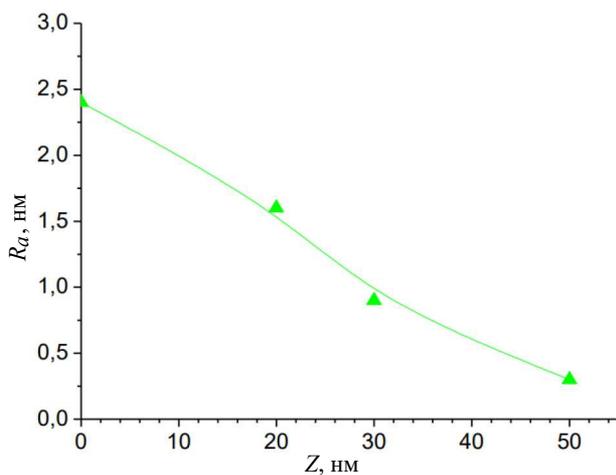


Рис. 2. Зависимость шероховатости поверхности Mo покрытия от толщины осажденного покрытия

электронно-зондовой микроскопии в сочетании с анализом энергодисперсионного рассеяния электронов. В настоящем исследовании так же было получено распределение элементов по поверхности и, как можно видеть на рис. 3, показана высокая равномерность распределения элементов в наносимом покрытии.

Анализ рис. 3 подтверждает формирование на поверхности равномерного покрытия содержащего Mo, Si, а также показывает достаточно высокое содержание кислорода в покрытии, что, по-видимому, обусловлено его высокой остаточной концентрацией в камере.

Кроме того, для подобных систем ранее проведены исследования рентгеновской фотоэлектронной спектро-

скопии [15], которые показали наличие тонкой структуры спектра Mo, что говорит о том, что молибден на тех же глубинах находится как в виде Mo, так и в виде  $MoO_x$  и  $MoSi_x$ , эти результаты хорошо согласуются с тем, что мы видим в настоящем исследовании. Причем соотношение  $MoO_x$  и  $MoSi_x$  в слое покрытия, полученном при ионном ассистировании, и ионно-ассистированном нанесении покрытий в условии облучения ионами Mo на ранее нанесенное Mo-покрытие составляет 60%–40%. Как было показано ранее [16], для аналогичных систем при осаждении Mo покрытий на подложке формируется слой, содержащий области скопления силицидов и оксида Mo, размер зерна которых составляет от 20 до 40 нм, величина которого растет при предварительном нанесении Mo-подслоя и увеличении энергии, выделяющейся в каскадах столкновений при ассистировании.

Экспериментальные спектры POP ионов гелия от Si, модифицированного осаждением Mo методом осаждения покрытий в условиях облучения собственными ионами, при ускоряющем потенциале 5 кВ в течении 6 ч, показаны на рис. 4.

На спектре POP ионов гелия от структуры Mo-покрытие/Si (рис. 4) наблюдается сдвиг сигнала от кремния в область меньших номеров каналов (220–225 каналы), свидетельствующий о том, что на поверхности кристаллов кремния образуется тонкая пленка. Сигнал, имеющийся в области 330–355 каналов также подтверждает наличие Mo в осаждаемой на Si плёнке толщиной 200 нм. Увеличение сигнала выхода в области 100 и 150 каналов свидетельствует о присутствии в осажденных на Si пленок атомов C и O. В области 222–224 каналов формируется ступенька. Её появление отражает тот факт, что

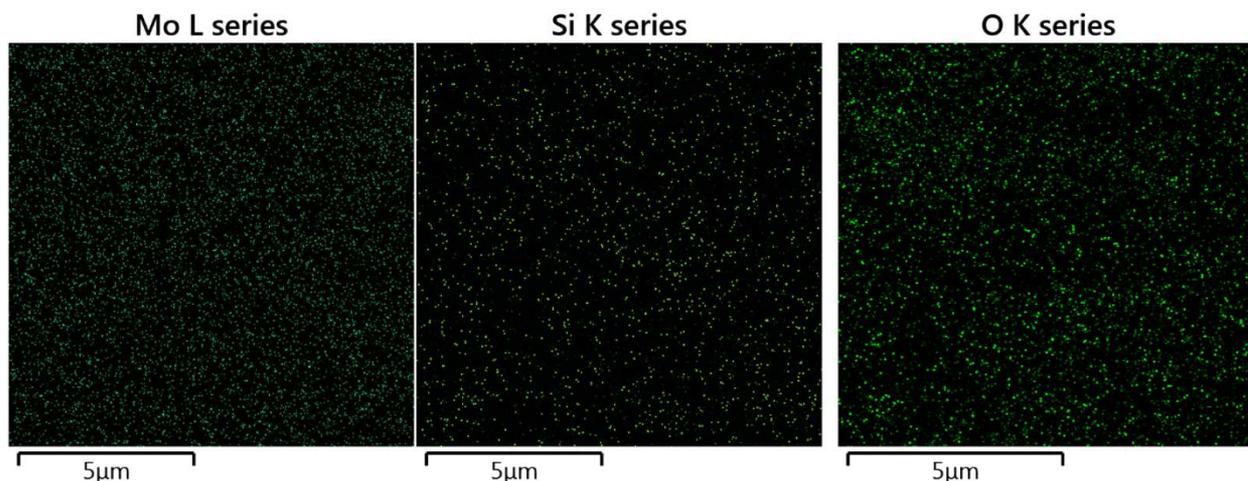


Рис. 3. Распределение элементов на участке Мо покрытия полученное анализом энергодисперсионного рассеяния электронов

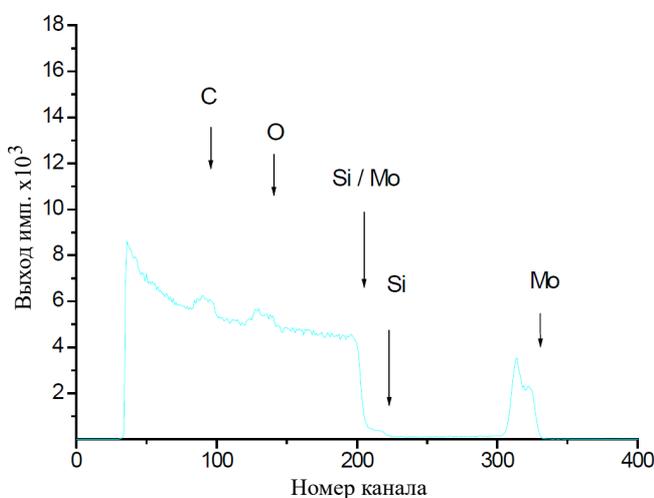


Рис. 4. Спектры ОР ионов гелия с  $E_0 = 1.95$  МэВ от Si, модифицированного ионно-ассистированным осаждением Мо, покрытия при  $U_{\text{acc}} = 5$  кВ и  $t_{\text{эксп}} = 6$  ч

в состав пленки, осаждаемой на поверхность образца Si, кроме осаждаемого металла, углерода и кислорода входят так же радиационно-смещенные атомы кремния из подложки. Результаты послойного анализа состава сформированной структуры Мо-пленка/кремний представлены на рис. 5.

На рис. 5 представлено распределение элементов в системе пленка/подложка относительно положения исходной поверхности подложки (ПИПП). Распределение элементов в массиве пленки практически равномерное. Концентрация атомов Мо, Si, C, O, H в пленке составляет в среднем 7, 4.5, 55, 28, 6 ат.% соответственно. Мо в кремнии идентифицируется на глубине в 800–1000 нм с концентрацией 0.05 ат.%. Атомы C и O проникают в Si на сравнительно малую глубину в 40 нм с концентрацией 0.6 и 0.3 ат.% соот-

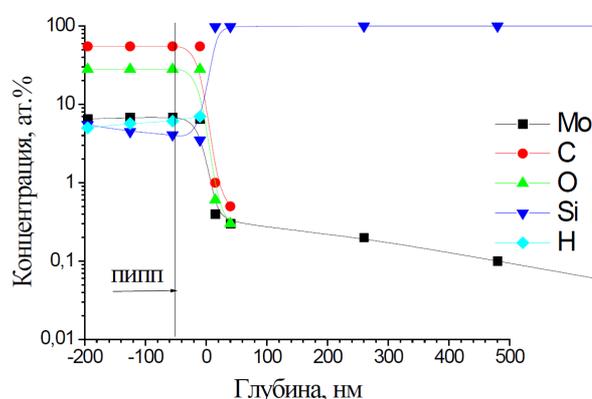


Рис. 5. Распределение элементов по глубине в структуре Мо-пленка/кремний, сформированной методом ОПАСИ ассистированием при  $U_{\text{acc}} = 5$  кВ и  $t_{\text{эксп}} = 6$

ветственно. Наличие кремния в пленке с концентрацией порядка 5 ат.% свидетельствует о его диффузии в пленку в составе силицида, в то время как C, O, H идентифицируются из гидроксильной группы вакуумного масла. При времени нанесения 6 ч толщина покрытия составляет порядка 350 нм. Средняя скорость роста осаждаемого металлосодержащего покрытия на кремнии равна 0.6 нм/мин.

Смачиваемость покрытий описывается с помощью состояния Венцеля. Для подтверждения обоснованности применения модели Венцеля [17] к описанию смачивания водой систем Мо/Si были проведены исследования гистерезиса краевого угла смачивания водой покрытий с упорядоченными структурами на поверхности. Гистерезис краевого угла смачивания изученных образцов составляет более  $40.1^\circ$ , следовательно, при описании их смачиваемости мы должны пользоваться моделью Венцеля. Кроме того, равновесный краевой угол смачивания (РКУС) растет с толщиной покрытия

и стабилизирует свое значение при толщине покрытия от 30 нм (рис. 6).

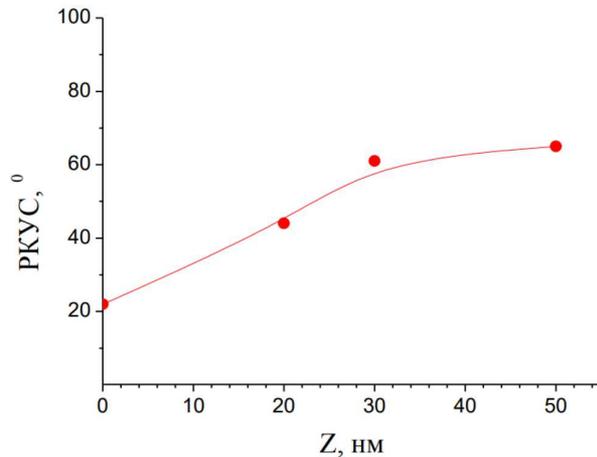


Рис. 6. Зависимость РКУС поверхности Мо-покрытия от толщины осажденного покрытия

В начальный момент нанесения покрытия происходит радиационное повреждение поверхности и формирование островков наносимого материала, что вызывает рост шероховатости и угла смачивания. В дальнейшем площадь островков покрытия растёт, и при толщине покрытия около 30 нм покрытие становится сплошным. После чего состав поверхности не влияет на изменения РКУС, а изменения обусловлены особенностями топографии поверхности. При толщине покрытия более 50 нм шероховатость поверхности стабилизируется (рис. 2) что может свидетельствовать о том, что дальнейший рост покрытия не вызывает сколь-либо значимых изменений топографии. Это предположение также подтверждается стабилизацией РКУС, измеряемого для покрытий толщиной более 40 нм (рис. 6).

Измерение удельного сопротивления полученных покрытий непосредственно после нанесения показали средние значения  $5 \times 10^{-4}$  Ом·м, с незначительным разбросом по площади. После циклического нагрева до  $500^\circ$  (100 циклов) удельное сопротивление незначительно выросло до  $5.4 \times 10^{-4}$  Ом·м, все еще позволяя использовать такое покрытие в качестве ИК-излучателя.

С использованием методики [18] по кривым нагружения–разгрузки были рассчитаны значения интегральной нанотвердости и модуля Юнга поверхности исходного кремния и кремния с нанесенным покрытием. Интегральная нанотвердость металлических покрытий составляет 16.73 ГПа. Эта величина сравнима с нанотвердостью исходного кремния 16.07 ГПа. Однако нанесение на кремниевую подложку Мо-покрытия приводит к уменьшению модуля Юнга с 81.04 для исходного кремния до 53.15 ГПа у сформированных структур.

Измерения распределения нанотвердости и модуля Юнга покрытий по глубине показали, что с уменьшением глубины индентирования растет твердость поверхности нанесенного покрытия. При этом максимальное значение нанотвердость поверхности имеет в слое 50 нм, что соответствует толщине нанесенного покрытия (рис. 7), при малой глубине индентирования твердость покрытия сопоставима с твердостью алмазоподобных пленок и более чем в 3 раза превосходит твердость исходного кремния (таблица).

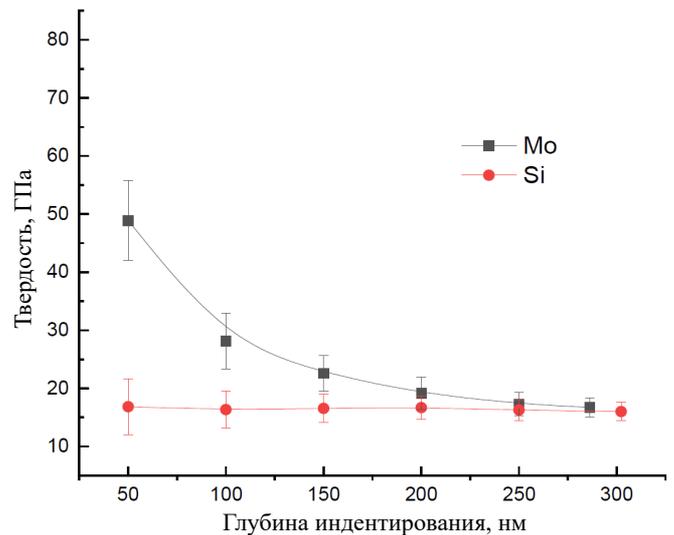


Рис. 7. Зависимости нанотвердости Мо-покрытий, нанесенных на кремний, от глубины индентирования

Возможным объяснением высокой твердости может быть возникновение размерных эффектов при индентировании, что связано с уменьшением области контакта между индентором и материалом. В таком случае размер области контакта становится сопоставим с расстояниями между дислокациями в структуре, происходит индентирование «бездислокационного объема», твердость которого приближается к теоретическому пределу. Уменьшение твердости с увеличением глубины индентирования подтверждает высокую твердость именно нанесенного покрытия. Такое изменение твердости можно объяснить формированием на поверхности различных соединений Мо.

Таблица. Твердость и модуль Юнга покрытий, нанесенных на кремний методом ионно-ассистированного осаждения, измеренная в разных точках одного образца и исходной подложки

Покрытие	$H$ , ГПа	$\bar{E}_{eff}$ , ГПа
Исходный Si	$16.8 \pm 2.3$	$81.0 \pm 4.6$
Молибден	$73.9 \pm 11.8$	$18.3 \pm 3.7$

Кроме того, при малой толщине покрытие имеет значительный разброс по свойствам и значительную погрешность, достигающую 12%. С увеличением глубины индентирования и, соответственно, нагрузки на индентор, нанотвердость монотонно уменьшается до значения, равного нанотвердости кремния. Разброс значений по площади подтверждает, что покрытие имеет по поверхности неоднородную, с точки зрения механических свойств, структуру, что связано с островковым механизмом роста покрытий, кроме того, неоднородность можно объяснить неоднородным фазовым составом покрытий, в структуре которых могут обнаруживаться оксиды, карбиды, силициды и гидриды металлов, обнаруженные ранее для аналогичных систем [19, 20], служащие причиной изменяющихся по поверхности механических свойств.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены структуры покрытие-подложка, содержащие силициды молибдена, имеющие равномерное распределение по поверхности, высокую термостабильность резистивных свойств, со смачиваемостью  $20^0$ , что ниже, чем у исходной подложки. Анализ результатов измерений твердости показал, что интегральная нанотвердость покрытий на основе исследу-

дованного металла сравнима со значениями для поверхности исходного кремния. При этом наблюдается уменьшение эффективного модуля Юнга до 50%. Твердость непосредственно покрытий в 4.3 раз выше, чем твердость исходного кремния и сопоставима с твердостью алмазоподобных покрытий и подтверждает хорошие прочностные характеристики получаемых покрытий. Полученные результаты позволяют предложить возможность формирования конструкции пленка/подложка для ИК-излучателя и сенсора ИК-излучения групповым методом на единой Si-пластине. Такое решение, при формировании необходимых проводящих и защитных элементов, позволит сформировать газовый сенсор в виде чипа, вырезанного из Si-пластины, и использовать его в газоанализаторах. Исследование позволило получить покрытия на основе Mo/кремниевой подложки с необходимыми структурными и электрическими свойствами для их применения в качестве тонкопленочных ИК-излучателей. Продолжение исследования позволит улучшить полученные результаты и оптимизировать параметры покрытий для конкретных приложений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь № ГР 20211394 и № ГР 20211250.

- [1] Mao J., Ding S., Li S. et al. // Surface & Coatings Technology. **358**. 873 (2019).
- [2] Peters M.I., Vaidya R.U., Castro R.G. et al. // Industrial Heating. **68**(10) 105 (2001).
- [3] Филонов А.Б., Иваненко Л.И., Мигас Д.Б. и др. // Доклады БГУИР. **3**, № 7. 168 (2004).
- [4] Tashlykov I.S., Belyj I.M. // Coating methods: patent BY 2324. 1998.
- [5] Барайшук С.М., Гременок В.Ф., Тульев В.В., Ташлыков И.С. // ФХОМ. № 1. 66 (2011).
- [6] Дудаева Е.Г. / Нанотехнологии и наноматериалы. Сборник статей II Всероссийской научно-технической конференции. Анапа: Б. 2020. С. 74-82.
- [7] Александров С.Е., Гаврилов Г.А., Капралов А.А. // Журнал технической физики. **79**, № 6. 112 (2009).
- [8] Балякин А.А., Малышев А.С., Мамонов М.В., Тараненко С.Б. // Фундаментальные исследования. № 9-7. 1558 (2014).
- [9] Кабацкий В.Н. Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2008. С.1-6.
- [10] Bobrovich O.G., Mikhalkovich O.M., Tashlykov I.S. // Inorganic Materials: Applied Research. **6**. 229 (2015).
- [11] Doolittle L.R. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Sec. B, Beam Interactions with Materials and Atoms. **15**, iss. 1. 227 (1986).
- [12] Белый А.В., Кукареко В.А., Лободаева О.В. и др. Ионно-лучевая обработка металлов, сплавов и керамических материалов. Минск, 1998.
- [13] Oliver W.C., Pharr G.M. // J. Mater.Res. **7**, N 6. 1564 (1992).
- [14] Petrov I., Barna P.B., Hultman L., Greene J. // J. Vac. Sci. Technol. A **21**(5). 117 (2003).
- [15] Барайшук С.М., Михалкович О.М., Долгий В.К., Шевченко А.А. // Актуальные проблемы физики твердого тела: сб. X Междунар. науч. конф. Минск: 2023. P. 274-277.
- [16] Tashlykov I., Mikhalkovich O., Baraishuk S., Zukowski P. // Acta Physica Polonica A. **1256** No. 6. 1306 (2014).
- [17] Cottin-Bizonne C., Barentin C., Charlaix E. et al. // Eur. Phys. J. E. **15**. 427 (2004).
- [18] Zhou X.Y., Jiang Z.D., Wang H.R., Zhu Q. // Journal of Physics: Conference Series. N 48. 1096 (2006).
- [19] Бобрович О.Г., Верес О.Г., Касперович А.В., Ташлыков И.С. // ФХОМ. № 2. 46 (2011).
- [20] Бобрович О.Г. Ташлыков И.С., Тульев В.В. // ФХОМ. № 1. 54 (2006).

**Study of the structure of Mo-based coatings on silicon substrates for thin-film IR emitters****S.M. Baraishuk<sup>1,a</sup>, O.M. Mikhalkovich<sup>2,b</sup>, M. Wiertel<sup>3</sup>, M. Budzynski<sup>3</sup>.**<sup>1</sup>*Department of Practical Training of Students, Agro-Energy Faculty, Belarusian State Agrarian Technical University  
Minsk 220012 Republic of Belarus*<sup>2</sup>*Department of Physics and Methods of Teaching Physics, Faculty of Natural Sciences, Belarusian State Pedagogical  
University named after Maxim Tank  
Minsk 220030 Republic of Belarus*<sup>3</sup>*Department of Materials Physics, Institute of Physics, Maria Skłodowska-Curie University  
Lublin 20-031 Poland**E-mail: <sup>a</sup>baraishuksm@gmail.com, <sup>b</sup>phyzbober@tut.by, <sup>c</sup>marek.wiertel@mail.umcs.pl*

The work studies the structure of a coating based on Mo/silicon substrate radiation using a combination of ion-assisted and magnetron deposition in various modes. It is shown that the surface of the coating has a structural composition and demonstrates radiation-stimulated diffusion of molybdenum into the depth of the substrate with a concentration of up to 1 at%, to a depth of up to 500 nm. The resulting coatings have stable resistive and thermoelectric properties and a surface roughness of no more than 2.5 nm in conditions of  $10 \times 10 \mu\text{m}$  and provide strength properties and density. The hardness of the coatings, obtained by interpreting the indentation results, is up to 70 GPa and controlled wettability, obtained by interpreting the indentation results, which makes it possible to subsequently form protective or electronic layers from them, makes it possible to form thin-film IR emitters based on  $\text{MoSi}_2$  from them, which is extremely important when creating optical gas analyzers built on the principle of dispersive-free IR-spectroscopy.

PACS: 25.40.Cm; 52.40.Hf, 61.80.Ba, 62.20.-x, 68.35.Ct.

*Keywords:* thin films, coating methods, sensor, surface structure, Rutherford backscattering, electron microscopy, surface properties, hardness, wettability, surface composition.*Received 14 January 2024.***Сведения об авторах**

1. Барайшук Сергей Михайлович — канд. физ.-мат. наук, доцент, зав. кафедрой; тел.: (8 017) 505-22-49, (+37529) 775-76-37, e-mail: baraishuksm@gmail.com.
2. Михалкович Олег Михайлович — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (+37529) 765-72-38, e-mail: phyzbober@tut.by.
3. Марек Виертель — канд. физ.-мат. наук, ст. специалист; тел.: 81 537-62-20, marek.wiertel@mail.umcs.pl.
4. Мечислав Будзински — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: 81 537-61-93.