

УДК 537.534:539.23

О. Г. Бобрович

Белорусский государственный технологический университет

**ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МЕТОДОМ ВАКУУМНОГО
ОСАЖДЕНИЯ КОБАЛЬТА И МОЛИБДЕНА НА ГРАФИТ**

В статье рассматривается элементный состав покрытия, распределение элементов в покрытии и их химические связи при формировании структуры покрытие – подложка в системах Мо – графит и Со – графит, создаваемых нанесением многокомпонентного, металлического (Мо, Со) покрытия в условиях ассистирования ионами Mo^+ и Co^+ соответственно. Анализ выполнен с применением методов Резерфордского обратного рассеяния ионов гелия и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. В покрытии, кроме осаждаемого металла, содержатся высокие концентрации кислорода и углерода, а также кремний в результате встречной диффузии из подложки в покрытие. Результаты анализа спектров рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии показали, что в системе Мо – графит молибден находится как в виде металлического Мо, так и в виде оксида MoO_2 . Толщина покрытия увеличивается с уменьшением ускоряющего напряжения для ассистирующих ионов Co^+ , Mo^+ от 20 до 7 кВ и зависит как от отношения плотности потока ионов J_i к плотности потока нанесенных атомов J_a (J_i / J_a), так и типа осаждаемого на графит металла. Установлено, что оптимальное отношение J_i / J_a , при котором достигается наибольшая толщина Со-покрытий, составляет 0,01, а для Мо-покрытия – 0,18. Рассчитанные скорости осаждения покрытий составляли от 0,3 до 0,9 нм/мин для системы Со – графит и от 0,2 до 0,4 нм/мин для систем Мо – графит.

Ключевые слова: графит, Со-покрытие, Мо-покрытие, ионно-ассистируемое нанесение покрытия.

Для цитирования: Бобрович О. Г. Формирование поверхностного слоя методом вакуумного осаждения кобальта и молибдена на графит // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2021. № 2 (248). С. 47–52.

O. G. Bobrovich

Belarusian State Technological University

**FORMATION OF THE SURFACE LAYER BY VACUUM DEPOSITION
OF COBALT AND MOLYBDENUM ON GRAPHITE**

Analysis of chemical bonds, element composition and depth distribution of component in coating formed by self ion-assisted deposition of metal (Mo, Co) onto graphite using a method in which the metal deposition was accompanied by bombardment Mo^+ or Co^+ ions is reported. Analysis was carried out using Rutherford back scattering and X-ray photoelectric spectroscopy methods. Elemental analysis of the coatings on graphite shows a high content of carbon, oxygen and of the silicon as a result of counter-diffusion from the substrate into the coating. The findings have allowed to determine the presence of metal Mo and Mo oxide fractions. Thickness of the coatings are increases with the decrease of the accelerating voltage for assisting Co^+ , Mo^+ ions from 20 to 7 kV and depends on the relationship of the flux density of ions J_i to the flux density of deposited atoms J_a (J_i / J_a) and type deposited on graphite metal. It is established that the optimal ratio of J_i / J_a at which is reached the maximum thickness Co-coating is 0,01 and for Mo-coating – 0,18. The calculated average deposition rate of the coating was 0,3–0,9 nm/min for the Co – graphite system and 0,2–0,4 nm/min for the Mo – graphite system.

Key words: graphite, Co-coating, Mo-coating, self-ion-assisted deposition of coating.

For citation: Bobrovich O. G. Formation of the surface layer by vacuum deposition of cobalt and molybdenum on graphite. *Proceedings of BSTU, issue 3, Physics and Mathematics. Informatics*, 2021, no. 2 (248), pp. 47–52 (In Russian).

Введение. Среди известных методов модифицирования свойств поверхности материалов и изделий ионная имплантация имеет физические ограничения по введению требуемых концентраций легирующих примесей, как правило, оцениваемых в 10–15 ат. % [1, 2]. Новым этапом является технология нанесения покрытий, сопровождающаяся облучением ионами инертных газов [3]. Перемешивание атомов подложки и

осаждаемого покрытия ускоренными ионами на границе раздела покрытие – подложка, как правило, инертных газов, нередко технически затруднено, так как требуются высокие (100 кэВ и выше) энергии ионов газов. Метод ионно-лучевого ассистируемого осаждения покрытий рассматривается как наиболее перспективный для модифицирования свойств поверхности материалов. Его применение обеспечивает сцепление наносимой на

поверхность тонкой пленки с матрицей на атомном уровне, при этом размеры и состав наносимых слоев по толщине не ограничиваются, и слои могут обладать требуемой структурой и свойствами [4]. Принципиальным недостатком методов ионно-лучевого асистируемого осаждения и ионно-лучевого перемешивания является неизбежное введение ионным пучком значительных (до 5–15 ат. %) количеств нежелательных примесей, локализующихся в области границы раздела. Газовые примеси при этом, как известно, преципитируют в форме пузырьков, ухудшая характеристики слоев, способствуя деградации свойств и параметров поверхностей материалов, особенно полупроводниковых.

При выполнении настоящей работы в качестве ионов, перемешивающих атомы материала подложки и наносимого покрытия, использовались ионы материала покрытия. Этим, во-первых, исключается введение нежелательных примесей в модифицируемую поверхность, следовательно, создаются предпосылки получения качественно новых свойств поверхности с нанесенным покрытием. Во-вторых, из-за увеличения массы иона каскад столкновения, который образуется при торможении ионов, имеет меньшие продольный и поперечные размеры, чем каскад столкновений, создаваемый в том же материале ионами, например, аргона с равной энергией. При таком изменении энерговыделения в области границы раздела фаз можно ожидать проявления неизученных механизмов структурно-фазовых превращений, атомного перемешивания и, как результат, достижения лучших характеристик и параметров модифицированных поверхностей.

Настоящее исследование направлено на получение новых знаний о процессах и механизмах атомного перемешивания на границе покрытие – подложка, которая формируется при ионно-асистируемом осаждении Со и Мо покрытий на графит. Модифицирование поверхностного слоя графита нанесением тонких покрытий Со и Мо сопровождается облучением ионами Co^+ и Mo^+ и происходит в условиях управляемой плотности выделяемой энергии (ПВЭ) в объеме каскада атомных столкновений.

Основная часть. Ионно-асистируемое нанесение металлических (Со, Мо) покрытий на графит и на предварительно подготовленные структуры металл – графит (металл: Со, Мо) в условиях асистируемого осаждения ускоренными ионами Co^+ , Mo^+ осуществлялось при ускоряющем напряжении $U = 7, 15$ и 20 кВ. Для этого использовали импульсный ионный источник вакуумной электродуговой плазмы, который генерирует как нейтральный поток J_a , так и ионный поток J_i частиц наносимого металла [5]. Как видно из табл. 1, отношение J_i / J_a в наших экспериментах

менялось от 0,01 до 0,04 при осаждении Со и от 0,18 до 0,61 при осаждении Мо, что соответствовало условиям роста покрытия на подложке [6]. Структуры Со – графит и Мо – графит формировали осаждением соответствующего металла в течение одного часа в режиме работы ионного источника при нулевом значении ускоряющего напряжения. В рабочей камере в процессе модифицирования образцов графита поддерживался вакуум $\sim 10^{-2}$ Па.

Таблица 1

Параметры ионно-асистируемого нанесения покрытий

Подложка + осаждаемый металл	U , кВ	J_i , 10^{13} ион/ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$	J_a , 10^{15} атом/ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$	J_i / J_a
Графит + Со, Со – графит + + Со	7	2,9	2,1	0,01
	15	4,4	2,0	0,02
	20	7,3	1,8	0,04
Графит + Мо, Мо – графит + + Мо	7	1,7	9,4	0,18
	15	2,5	4,8	0,52
	20	2,5	4,1	0,61

Элементный состав поверхности образцов графита, модифицированных ионно-асистируемым осаждением покрытия, распределение элементов в покрытии и подложке, а также их химические связи изучены с применением методов резерфордского обратного рассеяния (РОР) ионов гелия и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Спектры РОР ионов гелия с энергией $E_0 = 1,5$ МэВ снимали в условиях геометрии рассеяния $\theta_1 = 50^\circ$, $\theta_2 = 70^\circ$, $\theta = 160^\circ$. Спектры РФЭС снимали на электронном спектрометре LHS-10 («Leybold» WG) с использованием $\text{MgK}\alpha$ -излучения. В качестве маркера для определения точного значения энергетической линии на спектре РФЭС использовался сигнал Au_{4f} , а послойный анализ образцов проводился с помощью травления ионами Ar^+ с энергией 3 кэВ со скоростью 0,5–1,0 нм/мин. Композиционный состав исходного образца графита, полученный компьютерным моделированием РОР по программе RUMP [7] спектра РОР, соответствует формуле $\text{C}_{97,4}\text{O}_{2,0}\text{Si}_{0,6}$.

На рис. 1 представлены спектры обратного рассеяния ионов гелия от поверхностного слоя структур Со – графит, модифицированных осаждением кобальта при разных значениях ускоряющего напряжения для асистирующих ионов Co^+ .

Стрелками на рис. 1 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 образцов, кроме наносимого металла также наблюдаются сигналы от С, О, Si. Наличие

в покрытии углерода и кислорода обусловлено конструктивными особенностями используемого импульсного ионного источника вакуумной электродуговой плазмы. Углерод и кислород являются технологическими примесями вакуума, созданного паромасляным диффузионным насосом, и вводятся в покрытие в процессе осаждения.

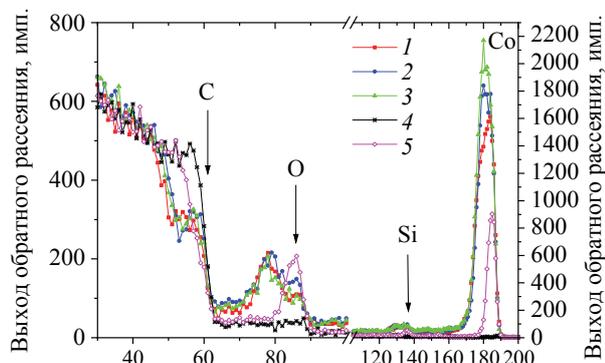


Рис. 1. Спектры РОР ионов гелия от структур Со – графит, модифицированных осаждением Со в условиях ассистирования ионами Со⁺ при ускоряющем напряжении: 1 – 7 кВ; 2 – 15 кВ; 3 – 20 кВ и 4 – исходного образца графита; 5 – от структуры Со – графит

Анализ спектров ОР ионов гелия показывает наличие характерной ступеньки в области 45–60 каналов, говорящей о росте тонкой пленки и одновременном нарастании углеродного слоя на поверхности образцов структур Со – графит. В то же время поверхностный слой обогащен кислородом и в меньшей степени кремнием, что следует из динамики изменения выхода ионов гелия, рассеянных на атомах примесей кислорода и кремния. Появление этих компонентов в образце обусловлено процессами ионно-ассистированного осаждения покрытий, обсужденными выше.

Различие в спектрах 1, 2 и 3 на рис. 1 отражает факт осаждения на образцы графита более толстого покрытия тогда, когда используется наименьшее ускоряющее напряжение ($U = 7$ кВ) для ионов Со⁺, несмотря на то, что в этих условиях проецированный пробег ионов в графите также самый малый и составляет $R_p = 11,5$ нм (табл. 2). Качественно сравнимое изменение в спектрах РОР наблюдается при осаждении на графитовую мишень Мо покрытия, ассистированного ионами Мо⁺. Осаждение покрытий на предварительно подготовленные структуры металл – графит ведет к более интенсивному росту тонкого покрытия. Рассчитанные скорости осаждения покрытий составляли от 0,3 до 0,9 нм/мин для системы Со – графит и от 0,2 до 0,4 нм /мин для систем Мо – графит.

Результаты обработки спектров РФЭС свидетельствуют о том, что по основным компонентам

элементного состава, идентифицируемого этим методом, качественно согласуются с данными, полученными в независимых опытах с применением резерфордского обратного рассеяния ионов гелия.

Таблица 2

Пробег и страгглинг пробега ионов металлов в графите

Показатель	Ионы					
	Со			Мо		
U , кВ	7	15	20	7	15	20
R_p , нм	11,5	20,4	25,2	13,2	21,8	26,7
ΔR_p , нм	2,8	4,6	5,5	2,7	4,0	4,9

На рис. 2 показаны профили глубинного распределения элементов в покрытии и подложке при нанесении Мо при ассистировании ионами Мо⁺ на графит и структуру Мо – графит, полученные моделированием спектров. Профиль Мо характеризуется концентрацией, снижающейся от 3 ат. % на поверхности модифицированного образца до 2 ат. % в области границы раздела покрытие – подложка, которая определяется согласно ранее разработанной методике [8]. Кислород распределен в покрытии неравномерно: его концентрация уменьшается с 30 ат. % на поверхности покрытия до 10 ат. % вблизи границы покрытие – подложка, а в графите его концентрация остается выше, чем концентрация Мо. В случае ионно-ассистированного нанесения Мо при $U = 20$ кВ на структуры Мо – графит концентрация Мо увеличивается до 10 ат. % в поверхностном слое, а распределение кислорода и кремния в покрытии и подложке аналогично, что и в случае осаждения Мо на графит. Распределение кремния по всей толщине покрытия практически не изменяется и составляет около 1 ат. %.

Уменьшение ускоряющего напряжения для ассистировующих ионов Мо⁺ до значений 7 и 15 кВ приводит к росту концентрации молибдена в поверхностном модифицированном слое до 12–20 ат. %, причем концентрация в 1,5–2,0 раза выше, если осаждение осуществляется на структуры Мо – графит. Анализ профилей распределения элементов в покрытии и подложке при нанесении Со и ассистировании ионами Со⁺ на графит и структуру Со – графит показывает, что содержание кобальта плавно уменьшается с ~22 до ~10 ат. % от поверхности пленки к границе раздела покрытие – подложка. При этом распределение атомов примеси кислорода, входящего в покрытие, имеет пик у границы раздела, а атомная концентрация меняется от 8 до 10–20 ат. %. Содержание кислорода в покрытии больше в системе Мо – графит, в сравнении с системой Со – графит, что связано с повышенной способностью

молибдена взаимодействовать с кислородом. Распределение кобальта и молибдена в подложке соответствует пробегаем с учетом страгглинга пробега ионов металлов в графите (табл. 2). Распределение кремния и в этом случае по всей толщине покрытия практически не изменяется и составляет около 1 ат. %. Появление в изучаемых покрытиях Si объясняется радиационным усилением диффузии в процессе облучения системы покрытие – подложка ассистирующими ионами, что приводит к миграции атомов Si из подложки в покрытие.

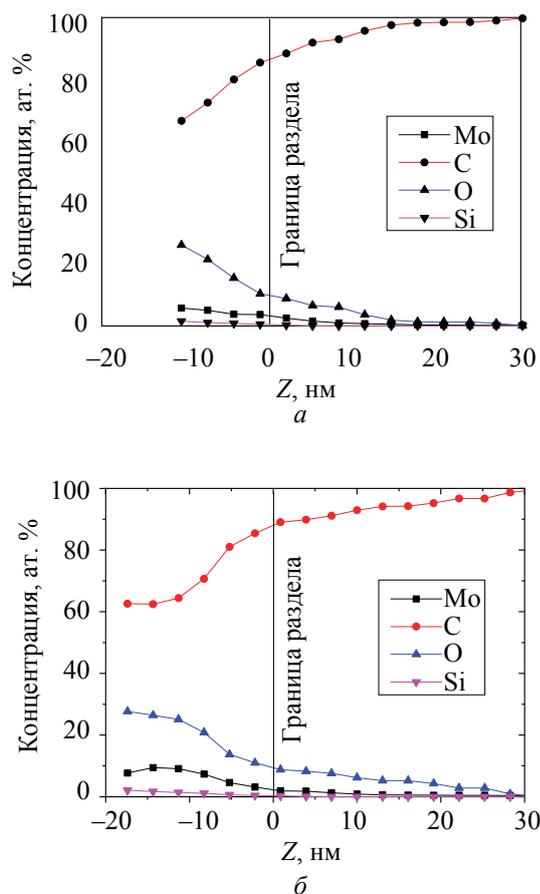


Рис. 2. Профили элементов в графите (а) и структуре Мо – графит (б) после нанесения Мо в условиях ассистирования ионами Mo^+ при ускоряющем напряжении $U = 20$ кВ

В данном исследовании одним из параметров, в зависимости от которого анализировалось глубинное распределение элементов, входящих и в покрытие, и в подложку, рассматривается плотность выделяемой энергии в упругих процессах каскада атомных столкновений. С этим параметром ассоциируется вероятность фазообразования, в том числе и образование химических соединений в формируемом покрытии, и процессы радиационно-стимулированной диффузии. Интервал выбранных энергий ионов Co^+ и Mo^+ достаточен для того, чтобы получить различные

значений ПВЭ [9] в одинаковых системах. Десятикратное различие в ПВЭ было получено в изучаемых системах Co – графит и Mo – графит, в которых ускоряющее напряжение менялось от 7 до 20 кВ. Абсолютные значения ПВЭ изменялись от 0,18 эВ/ат ($U = 7$ кВ) до 0,02 эВ/ат ($U = 20$ кВ) для системы Co – графит и от 0,27 эВ/ат ($U = 7$ кВ) до 0,03 эВ/ат ($U = 20$ кВ) для системы Mo – графит.

Значения атомной концентрации на межфазной границе покрытие – подложка (рис. 3) показывают, что при росте ПВЭ концентрация металла увеличивается. Это свидетельствует о повышенном проникновении наносимого металла в подложку графита с увеличением ПВЭ.

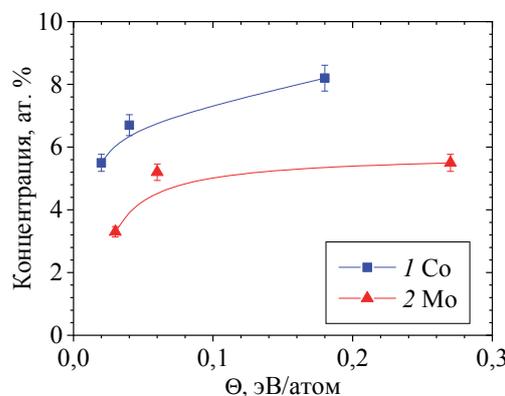


Рис. 3. Зависимость концентрации Co , Mo на границе раздела покрытие – графит от ПВЭ: 1 – в системе Co – графит; 2 – в системе Mo – графит

Глубинные профили углерода на рис. 2 показывают, что в изученных системах металл – графит в целом наблюдается очевидная зависимость эффективности процессов атомного переноса от ПВЭ. С другой стороны, влияние ПВЭ на модифицирование свойств облучаемых структур не одинаково и зависит от вида выбранной системы, а также, возможно, от концентрации примеси и ее химического состояния.

РФЭС-спектр поверхности нетравленного образца содержал линии трех элементов: молибдена, кислорода и углерода. Для точного спектрального анализа были выбраны наиболее характерные и интенсивные линии: $\text{Mo}3d$ -молибдена и $\text{C}1s$ -углерода. Структура спектра $\text{Mo}3d$ свидетельствует о том, что в поверхностном слое молибден находится как в виде Mo ($E_{\text{св}} \sim 228,6$ эВ), так и в виде MoO_2 ($E_{\text{св}} \sim 229,5$ эВ). Послойное травление модифицированных образцов графита нанесением Mo в условиях ассистирования ионами Mo^+ позволило на разных глубинах ($\sim 12,5$ нм, $\sim 22,5$ нм, $\sim 42,5$ нм) оценить количественное соотношение между Mo и MoO_2 , которое по всей исследуемой глубине практически

не изменяется и составляет 60% и 40%. Тонкая структура спектра C1s свидетельствует о том, что на тех же глубинах находится графитоподобный углерод ($E_{св} \sim 284,7$ эВ). Наличие оксида Мо приводит к существенному затруднению при идентификации карбида из-за наложения спектральных линий.

Заключение. Независимыми взаимодополняющими методами РОР и РФЭС установлено, что в поверхностном слое исследуемых структур металл – графит, наряду с осаждаемым металлом в условиях асситирования ионами того же металла, содержатся углерод, кислород и кремний. Наличие этих элементов в покрытии обусловлено спецификой осаждения металл(Сo, Мо)-покрытия из импульсного источника вакуумной электродуговой плазмы, внедрением элементов остаточных газов в мишенной камере, а также диффузией сопутствующей примеси кремния из графита в покрытие в результате ионного асситирования нанесению тонких пленок на графит.

Установлен характер распределения элементов в поверхностных слоях подложки графита и

покрытиях. В соответствии с известными моделями ионно-лучевого перемешивания атомный перенос в системе металл – графит зависит от плотности энергии, выделяемой в упругих процессах каскада атомных столкновений. Выполненные эксперименты проведены в условиях перекрывающихся подкаскадов, и они удовлетворяют модели «глобального» пика. Однако в данном случае химические силы, такие как теплота перемешивания, энергия когезии и другие, могут играть важную роль, что было отмечено в работе [3] при изучении систем Cu – Al, Fe – Pd, сформированных методами ионно-лучевого перемешивания (IBM), и в других работах по ионно-асситируемому осаждению покрытий (IBAD) [10–12].

Информация, полученная в данной работе об элементном составе, характере распределения металла и сопутствующих примесей в покрытии и подложке, является важной для понимания особенностей физико-химических процессов при нанесении Со, Мо покрытий на графит в условиях асситирования ионами осаждаемого металла.

Список литературы

1. Hirvonen J. K. Ion beam assisted thin film deposition: Fundamentals and Applications of IBAD Processing // *Materials and Processes for Surface and Interface Engineering* / Y. Pauleau (ed.). Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1995. P. 307–346.
2. Pearton S. J. Ion implantation in III-V semiconductor technology // *International Journal of Modern Physics B*. 1993. Vol. 7, no. 28. P. 4687–4761.
3. On the efficiency of deposited energy density for ion beam mixing processes with ions implanted during and after thin metal film deposition / I. S. Tashlykov [et al.] // *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.* 1993. Vol. B80/81. P. 98–101.
4. Baglin J. E. Interface structure, adhesion, and ion beam processing // *Materials and Processes for Surface and Interface Engineering* / Y. Pauleau (ed.). Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1995. P. 111–149.
5. Бобрович О. Г., Ташлыков И. С. Формирование на графите металлсодержащих покрытий в условиях ионного асситирования // *Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 5-й Международ. конф., Минск, 6–9 окт. 2003 г. Минск, 2003. С. 326–328.*
6. Carter G., Colligon J., Tashlykov I. S. A simple theory and experimental investigation of ion assisted deposition of cobalt on silicon // *J. of Advanced Materials*. 1999. Vol. 5, no. 1. P. 1–6.
7. Doolittle L. R. A semiautomatic algorithm for Rutherford backscattering analysis // *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.* 1986. Vol. B15. P. 227–238.
8. Бобрович О. Г., Ташлыков И. С., Глухатаренко Т. И. Изучение границы раздела фаз в структуре Ti – Si с применением Хе маркера // *Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информатика*. 2005. Вып. XIII. С. 90–92.
9. Sigmund P. Energy density and time constant of heavy-ion-induced elastic-collision spikes in solids // *Appl. Phys. Lett.* 1974. Vol. 25, no. 3. P. 169–171.
10. Deposition of metal layers on carbon assisted with the same metal's ion radiation / I. S. Tashlykov [et al.] // *Surf. Coat. Technol.* 1995. Vol. 74–75. P. 945–948.
11. 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. Vol. 6, no. 3. P. 229–233.
12. Ion beam assisted deposition of tantalum nitride thin films for vacuum microelectronic devices / Y. Gotoh [et al.] // *Surf. Coat. Technol.* 2002. Vol. 158–159. P. 729–731.

References

1. Hirvonen J. K. Ion beam assisted thin film deposition: Fundamentals and Applications of IBAD Processing. *Materials and Processes for Surface and Interface Engineering*. Y. Pauleau (ed.). Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1995, pp. 307–346.

2. Pearton S. J. Ion implantation in III-V semiconductor technology. *International Journal of Modern Physics B*, 1993, vol. 7, no. 28. pp. 4687–4761.
3. Tashlykov I. S., Belyi I. M., Bobrovich O. G., Kalbitzer S., Meyer O., Wolf G. K., Enders B. On the efficiency of deposited energy density for ion beam mixing processes with ions implanted during and after thin metal film deposition. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.*, 1993, vol. B80/81, pp. 98–101.
4. Baglin J.E. Interface structure, adhesion, and ion beam processing. *Materials and Processes for Surface and Interface Engineering*. Y.Pauleau (ed.). Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1995, pp. 111–149.
5. Bobrovich O. G., Tashlykov I. S. Formation of metalliferous coats on graphite by means of ion assisted deposition. *Vzaimodeystviye izlucheniya s tverdyim telom: materialy 5-y Mezhdunarodnoy konferentsii* [Interaction of Radiation with Solid: Materials of the 5-th International Conference]. Minsk, 2003, pp. 326–328 (In Russian).
6. Carter G., Colligon J., Tashlykov I. S. A simple theory and experimental investigation of ion assisted deposition of cobalt on silicon. *J. of Advanced Materials*, 1999, vol. 5, no. 1, pp. 1–6.
7. Doolittle L. R. A semiautomatic algorithm for Rutherford backscattering analysis. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.*, 1986, vol. B15, pp. 227–238.
8. Bobrovich O. G., Tashlykov I. S., Gluhatarenko T. I. The study of the phase boundary in the structure Ti – Si using marker Xe. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series VI, Physics and Mathematics Informatics, 2005, issue XIII, pp. 90–92 (In Russian).
9. Sigmund P. Energy density and time constant of heavy-ion-induced elastic-collision spikes in solids. *Appl. Phys. Lett.*, 1974, vol. 25, no. 3, pp. 169–171.
10. Tashlykov I. S., Bobrovich O. G., Palchek V. Ch., Tuljev V. V., Alow N. V., Kulikauskas V. S., Wolf G. K. Deposition of metal layers on carbon assisted with the same metal's ion radiation. *Surf. Coat. Technol.*, 1995, vol. 74–75, pp. 945–948.
11. 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, vol. 6, no. 3, pp. 229–233.
12. Gotoh Y., Kagamimori K., Tsuji H., Ishikawa J. Ion beam assisted deposition of tantalum nitride thin films for vacuum microelectronic devices. *Surf. Coat. Technol.*, 2002, vol. 158–159, pp. 729–731.

Информация об авторе

Бобрович Олег Георгиевич – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: olegbobrovich@belstu.by

Information about the author

Bobrovich Oleg Georgievich – PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Physics. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: olegbobrovich@belstu.by

Поступила после доработки 01.04.2021