

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ МЕТАЛЛОПОРИСТЫХ КАТОДОВ С ПОКРЫТИЕМ МЕТАЛЛАМИ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ

SIMULATION OF ION SPUTTERING FOR TECHNOLOGY OF DISPENSER CATHODES WITH PLATINUM GROUP METALS COATING

А.И.Кузьмичёв (ORCID: 0000-0003-0087-275X)
М.С.Мельниченко (ORCID: 0000-0002-9461-4913)
В.М.Шулаев

A.I.Kuzmichev (ORCID: 0000-0003-0087-275X)
M.S.Melnichenko (ORCID: 0000-0000-0000-0001)
V.M.Shulaev

ООО Научно-производственное предприятие «НИТТИН», г. Белгород

Рассчитаны коэффициенты распыления Os, Ir, W, Al и их смесей ионами N⁺, средняя энергия распылённых атомов металлов, коэффициенты отражения и глубины внедрения ионов для использования при проектировании распылительных систем, применяемых в технологии металлопористых термокатодов

The sputtering coefficients of Os, Ir, W, Al and their mixtures with N⁺ ions, the average energy of atomized metal atoms, the reflection coefficients and ion penetration coefficients for use in the design of atomization systems used in the technology of metal-porous thermal cathodes are calculated

Ключевые слова: *металлопористый термокатод, покрытие осмием иридием, ионы азота, ионное распыление, коэффициент ионного распыления.*

Key words: *dispenser thermionic cathode, cathode with osmium and iridium coating, nitrogen ions, ion sputtering, ion sputtering coefficient.*

ВВЕДЕНИЕ

Применение металлопористых термокатодов (МПК) в мощных электровакуумных приборах (ЭВП) лучевого типа является устойчивым трендом современной технологии в электронной промышленности [1-3]. Это объясняется такими преимуществами МПК перед традиционными оксидными катодами как повышенный срок службы при высокой плотности тока электронной эмиссии, механическая устойчивость, допускается контакт с атмосферным воздухом. Постоянно возрастающие требования к параметрам ЭВП стимулировали внедрение МПК с тонкоплёночными покрытиями эмитирующей поверхности металлами платиновой группы, в первую очередь плёнками осмия (Os) и (Ir) толщиной до 1 мкм. Во многих работах было показано [2-4], что при наличии таких плёнок уменьшается работа выхода электронов, что позволяет снизить рабочую температуру катода примерно на 100°C.

Базовым методом изготовления МПК с металлическим покрытием является ионное распыление, причём оно применяется многократно [4-7]. Сначала для ионного распыления рабочей поверхности с целью раскрытия поверхностных пор вольфрамовой губки МПК, частично закрытых вследствие завальцовки во время токарной обработки, которая выполняется для придания эмитирующей поверхности специальной формы для лучшей фокусировки электронного пучка. Затем ионное распыление используется для финишных очисток как поверхности распыляемой мишени из металлов платиновой группы, так и

рабочей поверхности МПК, на которое осаждается покрытие. Наконец, ионами распыляют мишень для нанесения распыляемых металлов на рабочую поверхность МПК. Для осуществления описанной технологии чаще всего используют триодные распылительные системы (ТРС), в которых применяют газовый разряд низкого давления ($< 0,1$ Па) с термокатодом прямого накала [5-10]. Плазма этого разряда служит источником ионов для указанных выше процессов, т.е. одно и то же газоразрядное устройство может обеспечить все виды ионных обработок МПК [5-7]. Однако, применение вольфрамового термокатада в ТРС приводит к возможному загрязнению вольфрамом (W) покрытия и поверхности мишени из-за испарения и ионного распыления материала термокатада [8,11]. Также надо учитывать загрязнения вследствие взаимодействия газоразрядной плазмы со стенками камеры [12]. Всё это должно учитываться при конструировании ТРС.

Было выявлено, что при использовании для распыления ионов аргона наблюдается нестабильность работы ЭВП, вызванная выделением из МПК захваченного аргона, но не удаляемого полностью на операциях термической обработки. Последующее выделение аргона во время эксплуатации ЭВП приводит к электрическим пробоям при высоком рабочем напряжении и крайне нежелательному ионному распылению поверхности МПК и других электродов. Было предложено использовать азот вместо аргона в качестве распыляющего газа, и было установлено, что ЭВП с МПК по “азотной технологии” имеют лучшие характеристики [4,5]. Возможными причинами этого являются меньшие размеры атомов азота и химическое связывание азота, внедрённого в тело катода.

Было установлено, что использование вместо чистого Os его сплава с иридием (Ir) или рутением уменьшает эффект образования интерметаллического соединения OsW_2 и повышает долговечность МПК [4]. Результаты исследований влияния взаимодействия Os с W на характеристики катодов с покрытием осмием также представлены в [13]. Определённую пользу приносит однопроцентная добавка алюминия к плёнке Os+Ir [4].

При конструировании технологических ТРС необходимо прогнозировать параметры процессов ионного распыления, для чего требуется знать, в частности, коэффициенты распыления одноэлементных и многоэлементных мишеней, среднюю энергию распылённых атомов, коэффициент отражения и среднюю энергию атомных частиц (бывших) ионов, обратно рассеянных от распыляемой поверхности, глубину внедрения (имплантации) ионов в катод или покрытие. К сожалению, в литературе практически отсутствуют подобные данные в отношении ионов азота и металлов платиновой группы. Цель данной работы – получение данных о распылении ионами азота N^+ осмия, иридия, вольфрама, алюминия и их смесей методом численного моделирования процесса ионной бомбардировки мишени соответствующего состава. Для этого также экспериментально определяется степень легирования (загрязнение) покрытия вольфрамом.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОД ЕГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Исследование и моделирование процесса ионного распыления выполнялось на электродной конфигурации, характерной для типовой ТРС [5], упрощённая схема которой представлена на рис. 1. Анод 1 выполнен в виде цилиндрической или прямоугольной трубы. Термокатоды 2 – спирали из вольфрама. Подложка 3 и мишень 4 расположены напротив отверстий в аноде. Катушки 5 генерируют продольное вдоль оси магнитное поле. Рабочим газом служит азот.

В ТРС создаётся магнетронный разряд с двумя термокатадами 2 для получения однородного распределения газоразрядной плазмы (ток разряда – единицы-десятки ампер, напряжение – до 100 В). Давление азота достаточно низкое ($< 0,1$ Па), так что средняя длина свободного пробега электронов больше межэлектродных расстояний. Ионизация азота осуществляется в основном электронами, эмитируемыми термокатадами 2 и ускоряемыми в прикатодном слое положительного пространственного заряда. Электроны осциллируют между термокатадами 2 вдоль силовых линий магнитного поля, которое образует своеобразную электронную ловушку, не позволяя электронам попасть на анод 1

по кратчайшему пути. В результате формируется протяжённый плазменный столб с необходимой концентрацией ионов вдоль поверхности анодов, подложки и мишени. Как правило, плазма содержит атомарные N^+ и молекулярные N_2^+ ионы. Для определения соотношения концентраций этих ионов следует выполнить специальные масс-спектрометрические измерения.

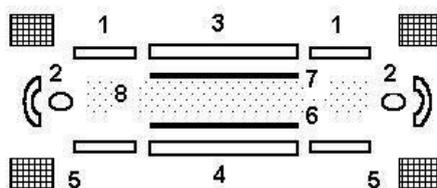


Рис.1. Схема триодной системы распыления. 1 – анод, 2 – термокатоды, 3 – подложка, 4 – мишень, 5 – катушки, 6 и 7 – заслонки, 8 – плазменный столб газового разряда.

Около подложки и мишени, находящихся под отрицательным напряжением U относительно плазменного столба, формируются слои положительного пространственного заряда. В этих слоях происходит ускорение плазменных ионов азота до энергии $E_i = eU$, где e – заряд электрона (здесь предполагается, что при низких давлениях азота ионы движутся в слоях пространственного заряда без столкновений с молекулами газа, т.е. без потерь энергии). Расчёты будут выполнены при типовых для ТРС значениях E_i .

Для ионной обработки рабочей поверхности МПК, т.е. подложки 3, на неё подаётся отрицательное напряжение U , заслонка 7 открывается, а заслонка 6 – закрыта. Во время нанесения металлического покрытия на подложку 3 открыты обе заслонки 6 и 7, а на мишень 4 подаётся отрицательное напряжение U . Благодаря низкому давлению и небольшому расстоянию между мишенью и подложкой распылённые атомы движутся к подложке практически без столкновений с молекулами азота и без потерь своей начальной энергии. При большой площади мишени имеет место практически параллельный перенос распылённого вещества из центральной зоны мишени в центральную зону подложки, т.е. можно полагать, что количество вещества, наносимого на центральную часть подложки, соответствует количеству распылённого материала с такой же части мишени.

Для исследования и моделирования использовались мишени из чистых металлов (Os, Ir, W, Al) и из смесей Os+Ir, а также Os+Ir+W. В последнем случае введение W в состав мишени моделировало загрязнение мишени и, соответственно, подложки продуктом эрозии (испарения и распыления) вольфрамовых термокатодов 2 (см. рис.1).

Определялся химический состав покрытия, используя метод рентгенофлуоресцентного анализа на кристалл-дифракционном спектрометре "Спрут" СЭФ 01 [14]. Спектры флуоресценции получены путём дискретного сканирования в диапазоне длин волн от 0,35 до 8,5 Å. Неопределённость определения концентрации составляет ± 1 %.

Характеристики процессов при ионном распылении рассчитывались путём моделирования движения бомбардирующих ионов и атомов отдачи в металлической мишени по методу Монте Карло в приближении линейных каскадов парных столкновений атомных частиц. Расчёты выполнялись с помощью программного кода TRIM [15]. Примеры расчётов, выполненных для объектов, подобных нашему, представлены в [16-18]. Проверка результатов этих расчётов путём сопоставления с известными из литературы данными показала, что они вполне адекватны, поэтому был сделан вывод о применимости TRIM в нашей работе.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты рентгенофлуоресцентного анализа покрытия, полученного на дисковом свидетеле (\varnothing 50 мм) из кварцевого стекла на поверхности подложкодержателя

при распылении мишени исходного состава Os(50 %)–Ir(50%) при напряжении на мишени 2,5 кВ, мощности ионизирующего разряда 600 Вт, мощности накала термокатода 600 Вт, представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Концентрации элементов в покрытии на свидетеле			
Радиус точки измерения на свидетеле, мм	Os	Ir	W
	вес. %	вес. %	вес. %
20	46,9	42,7	10,4
15	47,3	42,2	10,5
10	47,0	42,4	10,6
5	44,6	43,6	11,9
центр	45,7	43,1	11,2

Можно видеть, что коэффициенты распыления осмия и иридия близки друг к другу, т.е. сплав этих металлов распыляется практически конгруэнтно. Также можно видеть, что уровень загрязнения покрытия вольфрамом порядка 10 % т.е. довольно значительный. Это является недостатком ТРС с неэкранированными термокатадами (см. схему ТРС на рис.1). Очевидно, что вольфрам попадает на свидетель непосредственно со стороны термокатодов и в результате его перепыления с поверхности мишени. Также ясно, что из-за удалённости термокатодов механизм переноса атомов W – диффузионный, и вольфрам также конденсируется на других частях ТРС. Если исходить из того, что распылённые атомы W не рассеиваются в газе при движении от мишени до близко расположенного свидетеля, то можно предположить, что уровень загрязнения вольфрамом поверхности мишени – около 5 %.

На рис.2 показаны траектории частиц при ионной бомбардировке мишени и видно, что сравнительно легкие ионы азота проникают на десятки ангстрем вглубь мишени из тяжёлого осмия и сильно в нём рассеиваются. Часть ионов (в виде нейтральных атомов) рассеивается обратно к поверхности и выходит из тела мишени, образуя поток отражённых атомов, летящих в сторону подложки (подобный процесс рассматривался в [16,17]). При многократных столкновениях ионов с атомами мишени генерируются атомы отдачи, которые, сталкиваясь с другими атомами, выталкивают некоторые атомы мишени наружу, генерируя таким образом поток распылённых частиц.

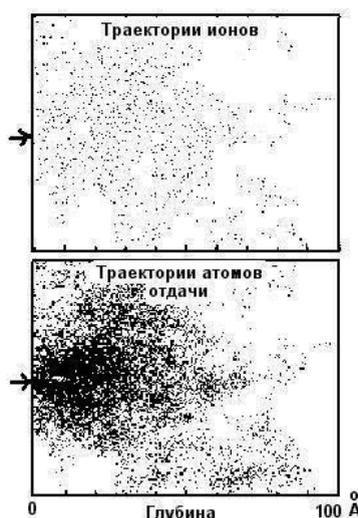


Рис.2. Траектории бомбардирующих ионов N⁺ и атомов отдачи (Os) внутри мишени (Os). E_i = 2 кэВ. Стрелки показывают место бомбардировки ионами.

Таблица 2 представляет результаты расчётов для одноэлементных мишеней для отрицательных напряжений, подаваемых на мишени, в диапазоне, представляющих практический интерес для проектирования ТРС. Здесь приняты следующие обозначения: S – коэффициент ионного распыления, равный отношению количества распылённых атомов мишени, приходящих на один бомбардирующий ион N^+ ; E_s – средняя энергия распылённых атомов металла; R_i – коэффициент отражения от мишени ионов (обратного рассеивания бомбардирующих частиц в виде нейтральных атомов); L_i – средняя глубина проникновения ионов в тело мишени. В случае молекулярных ионов азота N_2^+ для определения коэффициента распыления следует пользоваться данными для иона N^+ , но для половинной энергии ($0,5eU$) и умножить на 2 значение S . Аналогичным образом следует определять количество отражённых атомов при бомбардировке мишени ионами N_2^+ . Отметим, что отражённые атомы имеют значительную энергию, порядка 30-60 % от энергии бомбардирующих ионов [16,17].

Таблица 2.

Расчитанные параметры ионного распыления одноэлементных мишеней.

Энергия иона N^+ , кэВ	Мишень	Os	Ir	W	Al
	Энергия поверхн. связи, эВ	8,13	6,9	8,68	3,359
0,5	S	0,400	0,555	0,307	0,608
	E_s , эВ	10,8	12,1	7,7	17,6
	R_i	0,371	0,383	0,382	0,052
	L_i , Å	17	17	18	27
0,8	S	0,553	0,704	0,433	0,640
	E_s , эВ	14,7	18,1	13,0	27,0
	R_i	0,387	0,373	0,351	0,043
	L_i , Å	21	21	23	37
1,0	S	0,561	0,782	0,485	0,609
	E_s , эВ	19,1	21,4	16,0	24,6
	R_i	0,371	0,348	0,350	0,046
	L_i , Å				43
1,25	S	0,703	0,916	0,633	0,680
	E_s , эВ	20,7	25,9	20,7	37,0
	R_i	0,375	0,382	0,336	0,047
	L_i , Å	28	28	31	50
1,6	S	0,719	0,892	0,607	0,685
	E_s , эВ	28,0	25,1	23,9	35,9
	R_i	0,375	0,354	0,341	0,034
	L_i , Å	34	33	38	54
2,0	S	0,829	1,8	0,675	0,748
	E_s , эВ	30,4	32,2	28,9	50,5
	R_i	0,341	0,347	0,356	0,047
	L_i , Å	47	36	40	55
2,5	S	0,939	1,240	0,784	0,797
	E_s , эВ	33,2	37,1	32,4	55,4
	R_i	0,359	0,360	0,358	0,035
	L_i , Å	40	41	44	58

Таблица 3 и таблица 4 представляют результаты расчётов для двух- и трёхэлементных мишеней. Здесь к ранее описанным обозначениям параметров добавлен парциальный коэффициент распыления S_p , равный отношению количества распыленных атомов определенного рода, приходящих на один бомбардирующий ион N^+ ; сумма парциальных коэффициентов определяет суммарный коэффициент распыления для данной мишени.

При расчёте характеристик ионного распыления учитывается наличие потенциального барьера на поверхности, который должен преодолеть атом отдачи мишени, чтобы покинуть тело мишени. Этот барьер определяется энергией поверхностной связи, а оценивают её энергией сублимации материала мишени [15,18]. В табл.2 приведены значения энергии для одноэлементных мишеней. При расчётах для многоэлементных моделей пользуются некоей средней энергией поверхностной связи, в нашем случае средней арифметической величиной от суммы энергий для всех элементов, которые содержит мишень. В табл.3 и табл.4 приведены такие значения средней энергии связи.

Таблица 3

Расчитанные параметры ионного распыления двухэлементных мишеней

Энергия иона N^+ , кэВ	Параметр	Состав мишени	
		Os	Ir
2,5	Содерж. элементов, вес. %	50	50
	Парциальный. коэфф. распыления, S_p	0,547	0,508
	Средняя энергия распылённых атомов E_s , эВ	17,0	18,2
	R_i		0,364
	L_i , Å		40
	Средняя энергия поверхностной связи, эВ		7,51
1,25	Содерж. элементов, вес. %	50	50
	Парциальный. коэфф. распыления, S_p	42	40
	Средняя энергия распылённых атомов E_s , эВ	12,8	10,3
	R_i		0,367
	L_i , Å		28
	Средняя энергия поверхностной связи, эВ		7,51
1,6	Содерж. элементов, вес. %	50	50
	Парциальный. коэфф. распыления, S_p	0,455	0,419
	Средняя энергия распылённых атомов E_s , эВ	13,8	13,9
	R_i		0,359
	L_i , Å		33
	Средняя энергия поверхностной связи, эВ		7,51
0,8	Содерж. элементов, вес. %	50	50
	Парциальный. коэфф. распыления, S_p	0,362	0,302
	Средняя энергия распылённых атомов E_s , эВ	9,9	8,9
	R_i		0,387
	L_i , Å		21
	Средняя энергия поверхностной связи, эВ		7,51

Таблица 4.

Рассчитанные параметры ионного распыления трёхэлементных мишеней.

Энергия иона N ⁺ , кэВ	Параметр	Состав мишени		
		Os	Ir	W
2,5	Содерж. элементов, вес. %	45	45	10
	Парциальный коэфф. распыления, S_p	0,447	0,424	0,108
	Средняя энергия распылённых атомов E_s , эВ	16,2	16,7	3,5
	R_i		0,361	
	L_i , Å		42	
	Средняя энергия поверхностной связи, эВ		7,90	
1,25	Содерж. элементов, вес. %	45	45	10
	Парциальный коэфф. распыления, S_p	0,306	0,343	0,063
	Средняя энергия распылённых атомов E_s , эВ	10,5	12,3	2,0
	R_i		0,381	
	L_i , Å		29	
	Средняя энергия поверхностной связи, эВ		7,90	
2,5	Содерж. элементов, вес. %	47,5	47,5	5
	Парциальный коэфф. распыления, S_p	0,478	0,446	0,044
	Средняя энергия распылённых атомов E_s , эВ	17,7	14,17	1,1
	R_i		0,348	
	L_i , Å		41	
	Средняя энергия поверхностной связи, эВ		7,90	
1,25	Содерж. элементов, вес. %	47,5	47,5	5
	Парциальный коэфф. распыления, S_p	0,353	0,407	0,035
	Средняя энергия распылённых атомов E_s , эВ	10,8	12,2	0,7
	R_i		0,397	
	L_i , Å		28	
	Средняя энергия поверхностной связи, эВ		7,90	

Во всех проанализированных случаях имеет место отражение от мишени большого количества высокоэнергетичных атомов азота – бывших ионов, испытавших нейтрализацию и потерявших некоторую часть первоначальной энергии во время блуждания в приповерхностном слое мишени. Таблицы показывают, что коэффициент отражения $R_i = 0,35-0,38$. Молекулярные ионы N₂⁺ при ударе о поверхность не только нейтрализуются, но и диссоциируют на атомы с получением половины первоначальной энергии молекулярного иона. Затем эти атомы самостоятельно перемещаются в теле мишени, приводя к генерации каскадов столкновений между атомами мишени. Некоторая часть атомов отдачи выходит из тела мишени, образуя поток распылённого вещества.

Распылённые атомы обладают энергией, средняя величина которой E_s – порядка десятков электрон-вольт.

Потоки отражённых атомов азота и распылённых атомов металлов переносят достаточно большую энергию на поверхность подложки, вызывая различные кинетические эффекты, включая нагрев подложки и стимулирование адгезии между наносимыми атомами металлов и подложкой.

Расчёты показывают, что при отрицательном напряжении на мишени около 2,5 кВ интегральный коэффициент распыления металлов платиновой группы ионами азота порядка единицы, т.е. эту величину напряжения можно принять как ориентир для выбора режима электрического питания процесса распыления. В случае загрязнения элементов ТРС продуктом эрозии вольфрамового термокатода, вольфрам будет эффективно распыляться с мишени на подложку, что и было обнаружено при анализе состава покрытия, наносимого в ТРС с незранированными термокатадами.

ВЫВОДЫ

Было выполнено кинетическое моделирование процесса распыления металлов платиновой группы ионами азота и получены количественные данные его характеризующие. Исследования состава получаемого покрытия подтвердило результаты моделирования. Показано, что незранированные термокатоды триодной распылительной системы загрязняют вольфрамом мишень и подложку. Это указывает на необходимость экранирования частей распылительной системы от продукта эрозии термокатодов. Полученные данные о характеристиках процесса ионного распыления металлов платиновой группы целесообразно использовать при проектировании систем для нанесения металлических покрытий на металлопористые катоды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Barker R.J., Luhmann N.C., Booske J.H., and Nusinovich G.S. Modern Microwave and Millimeter-Wave Power Electronics. Wiley-IEEE Press, 2005. 512 p.
2. Капустин В.И. Теория, электронная структура и физико-химия материалов катодов СВЧ-приборов. М.: ИНФРА-М, 2020. 370 с.
3. Дюбуа Б.Ч., Королёв А.Н. Современные эффективные катоды // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2011. Вып. 1 (508). С. 5-24.
4. Козлов В.И. Технология и свойства металлопористых катодов для СВЧ приборов // Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1980. Вып. 6 (709). С. 1-65.
5. Иосилевич Л.Ш., Сахаджи Г.В., Сухов В.П., Данилина Е.Е. Автоматизирование технологических процессов ионно-плазменного травления и напыления при изготовлении импрегнированных металлопористых катодов для ламп бегущей и обратной волны // Наука и бизнес: пути развития. 2013. № 10 (28). С. 40-47.
6. Устройство для ионно-плазменного травления и нанесения тонких плёнок: пат. 2540318 Рос. Федерация № 2013112086/02; заявл. 18.03.13; опубл. 10.02.2015, Бюл. № 4. 7 с.
7. Устройство для ионно-плазменного напыления: пат. 2691357 Рос. Федерация № 2018125087; заявл. 09.07.184; опубл. 11.06.19, Бюл. № 17. 7 с.
8. Waite M.M., Shah S.I., Glocker D.A. Sputtering Sources // Society of Vacuum Coaters Bulletin. 2007. Spring. P. 42-50.
9. Kay E., and Coburn J.W. Early example of an interdisciplinary approach in industry: Harold F. Winters's contributions. // J. Vac. Sci. Technol. A. 2017. Vol. 35. P 05C101.
10. Greene J.E. Review Article: Tracing the recorded history of thin-film sputter deposition: From the 1800s to 2017. // J. Vac. Sci. Technol. A. 2017. Vol. 35. P. 05C204.
11. Ryden W.D., Bindell J.B., Holschwandner L.H., and Labuda E.F. Reduction of contamination in triode sputtering systems // J. Vac. Sci. Technol. A. 1978. Vol. 15. P. 290-295.

12. Baek K.H., Lee E., Klick M., and Rothe R. Comprehensive understanding of chamber conditioning effects on plasma characteristics in an advanced capacitively coupled plasma etcher. *J. Vac. Sci. Technol. A* 2017. Vol. 35. P. 021304.

13. Zhou Q., Balk T.J., and Beck M.J. Quantum mechanical investigation of thermionic emission from Os-coated tungsten dispenser cathodes / 2016 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC-2016). Monterey, CA, USA. P. 1-2. (doi:10.1109/ivec.2016.7561810).

14. Mikhailov I.F., Baturin A.A., Mikhailov A.I., and Fomina L.P. Perspectives of development of X-ray analysis for material composition // *Functional Materials*. 2016. Vol. 23. Iss. 2. P. 5-14.

15. Экштайн В. Компьютерное моделирование взаимодействия частиц с поверхностью твердого тела: Пер. с англ. М.: Мир, 1995. 321 с.

16. Kuzmichev A., Perevertaylo V., Tsybulsky L., and Volpian O. Characteristics of flows of energetic atoms reflected from metal targets during ion bombardment // *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. Vol. 729. P. 012005.

17. Кузьмичёв А.И., Бабинов Н.А., Лисенков А.А. Плазменные эмиттеры источников заряженных и нейтральных частиц. Киев: Аверс, 2016. 181 с.

18. Lorenz R., O'Sullivan M., Sprenger D., Lang B., and Mitterer C. Chemical composition and properties of MoAl thin films deposited by sputtering from MoAl compound targets. // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 2017. Vol. 35. P. 041504.