

## Магнетрон для осаждения пленок четырехкомпонентного сплава

В. И. Шаповалов, Д. С. Шарковский✉, Д. К. Зефания, А. В. Николаев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ sharkovskiy.d@yandex.ru

**Аннотация.** Цель данной статьи состоит в изучении нового варианта многослойной мишени, установленной на сбалансированный магнетрон и предназначенной для синтеза пленки четырехкомпонентного эквиатомного сплава. Распыляемая область мишени имеет форму кольца с внутренним и внешним радиусами  $R_{01}$ ,  $R_{02}$  соответственно. Мишень состоит из четырех распыляемых металлических пластин, установленных на одной оси с магнетроном. Внутренняя сплошная распыляемая металлическая пластина служит холодильником, две средние и внешняя выполнены из других металлов и представляют собой кольца с внутренними радиусами  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$  соответственно. Из условия эквиатомности сплава получена система уравнений для вычисления этих радиусов. Изложение иллюстрируется примером с мишенью, предназначенной для осаждения пленки сплава TiTaNbMo.

**Ключевые слова:** эквиатомный сплав, пленка, магнетронное распыление, многослойная мишень, титан, тантал, ниобий, молибден

**Для цитирования:** Магнетрон для осаждения пленок четырехкомпонентного сплава / В. И. Шаповалов, Д. С. Шарковский, Д. К. Зефания, А. В. Николаев // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. Т. 19, № 5. С. 5–15. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-5-5-15.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-01003.

Original article

## Magnetron for Depositing Quaternary Alloy Films

V. I. Shapovalov✉, D. S. Sharkovskii, J. K. Zephaniah, A. V. Nikolaev

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ sharkovskiy.d@yandex.ru

**Abstract.** The objective of this work is to investigate a new variant of a multilayer target mounted on a balanced magnetron and designed for the synthesis of a film of a four-component equiatomic alloy. The sputtered region of the target has the shape of a ring with inner and outer radii  $R_{01}$  and  $R_{02}$ , respectively. The target consists of four sputtered metal plates. The plates are mounted on the same axis as the magnetron. The inner solid sputtered metal plate serves as a refrigerator. The two middle plates and the outer plate are made of other metals and represent rings with inner radii  $R_2$ ,  $R_3$  and  $R_4$ , respectively. A system of equations for calculating these radii is derived from the equiatomicity condition of the alloy. The presentation is illustrated by an example with a target designed for the deposition of a TiTaNbMo alloy film.

**Keywords:** equiatomic alloy, film, magnetron sputtering, multilayer target, titanium, tantalum, niobium, molybdenum

**For citation:** Magnetron for Depositing Quaternary Alloy Films / V. I. Shapovalov, D. S. Sharkovsky, J. K. Zephaniah, A. V. Nikolaev // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2026. Vol. 19, no. 5. P. 5–15. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-5-5-15.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflicts of interests.

**Funding:** The research was carried with support from the Russian Science Foundation (grant 25-29-01003).

**Введение.** Одним из фундаментов материаловедения в течение многих столетий были металлические сплавы (стали, бронзы, латуни, силумины и др.), созданные микролегированием одного основного металла (Fe, Cu, Al и др.). Около 20 лет назад была предложена новая концепция в конструировании металлических сплавов [1]. В ее основу был положен принцип смешивания нескольких компонентов в эквиатомных или близких к ним соотношениях [2]. В качестве критерия, характеризующего такие сплавы, была принята энтропия смешения [3]

$$\Delta S_{\text{смеш}} = R \ln K, \quad (1)$$

где  $R = 8.314$  Дж/(моль · К) – универсальная газовая постоянная;  $K$  – число компонентов в сплаве. При увеличении  $K$  величина (1) возрастает так, как показано на рис. 1.

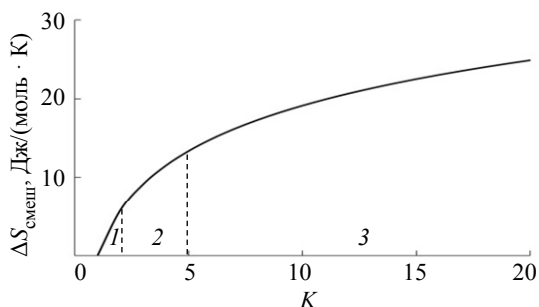


Рис. 1. Зависимость величины  $\Delta S_{\text{смеш}}$  от количества компонентов эквиатомного сплава.

Области: 1 – низко-, 2 – средне-, 3 – высокоэнтропийных сплавов

Fig. 1. Dependence of the value of  $\Delta S_{\text{mix}}$  on the number of components of an equiatomic alloy. Regions: 1 – low-, 2 – medium-, 3 – high-entropy alloys

Сплавы, имеющие  $K \geq 5$  ( $\Delta S_{\text{смеш}} \geq 1.61R$ ), принято называть высокоэнтропийными, при  $2 < K < 5$  ( $0.69R \leq \Delta S_{\text{смеш}} < 1.61R$ ) – среднеэнтропийными, и, наконец, традиционные и двухкомпонентные сплавы – низкоэнтропийными [4].

Обнаружено, что эффективный метод увеличения функциональных и механических свойств различных материалов представляет нанесение на их поверхность пленок эквиатомных сплавов [4]. Этим методом повышают, например, твердость материала, вязкость разрушения, его стойкость к

высокотемпературному окислению и горячей коррозии. Широко изучают возможности применения для этих целей пленок простых химических соединений обсуждаемых сплавов с азотом, кислородом и иными элементами [4].

В любых сплавах широко распространено применение титана (Ti) [5]. Титаносодержащие пленки многие десятилетия удерживают лидирующие позиции по числу публикаций о методах их синтеза, свойствах и всевозможных приложениях. Начиная от пленок чистого металла [6], развитие интереса к ним прошло через пленки простых химических соединений (например, оксидов или нитридов [7]–[11]), сплавов или твердых растворов двойных (например, TiAlN [12], TiCrN [13]) или тройных (например, NiTiCrN, MoTiCrN [14]) соединений.

Однако разработка нового материала на основе титана с превосходными функциональными свойствами все еще остается открытой проблемой. Один из путей ее решения основан на двойной системе Ti-Ta. Добавление тантала повышает коррозионную стойкость и биосовместимость материала [15]. Одним из первых применений пленок сплава TiTa были контактные системы в кремниевых схемах [15]. В дальнейшем в этих сплавах был обнаружен эффект памяти формы [16]. Он заключается в том, что деформированный металл может самопроизвольно восстанавливать исходную форму в результате нагрева. Это свойство открыло возможности сплава для применения в медицине, бытовой технике, автомобилестроении, аэрокосмической промышленности или энергетике [17].

Добавление в систему Ti-Ta третьего компонента позволило улучшить его свойства. Например, было показано, что сплав TiTaCu обладает более высокими коррозионной стойкостью, биосовместимостью и антибактериальными свойствами [18]. У сплава TiTaAl обнаружена высокая биосовместимость – неперенный атрибут изделий медицинского назначения [19]. Аналогичные свойства продемонстрировали авторы, изучавшие сплав TiTaNb [20].

Логика развития нового направления материаловедения привела к появлению в эквиатомных сплавах четвертого компонента. Легко убедиться в том, что добавление в сплав очередного компонента приводит к возрастанию количества возможных вариантов их состава. Например, если взять 10 металлов, то из них можно создать  $C_{10}^3 = 120$  трехкомпонентных или  $C_{10}^4 = 210$  четырехкомпонентных сплавов. Здесь через  $C_{10}^i$  обозначено число сочетаний из 10 по  $i = 3, 4$  элементам. Примерами таких сплавов служат тугоплавкие TiTaNbW [21], твердые TiTaNbZr [22] или коррозионностойкие TiTaNbMo [23].

Наиболее часто для осаждения многокомпонентных пленок применяют различные методы магнетронного распыления. Мишень одиночного магнетрона изготавливают из сплава, заданного для пленки состава [24] или применяют секционированную мишень [25]. Более сложна система сораспыления, содержащая как минимум два магнетрона с мишенями разного состава [26]. Очевидно, что увеличение числа компонентов в сплаве приводит к возрастанию сложности системы магнетронного распыления.

В последние годы нами предложен магнетрон с многослойной мишенью [27]–[30]. Цель данной статьи состоит в изучении нового варианта многослойной мишени магнетрона, выполненного на примере мишени, установленной на сбалансированный магнетрон и предназначенной для синтеза пленки четырехкомпонентного эквиатомного сплава  $M_1M_2M_3M_4$  или его твердого раствора  $M_1M_2M_3M_4X$  ( $X$  – кислород или другой химически активный газ).

**Модель.** Мишень содержит (рис. 2) четыре распыляемые металлические пластины 1–4. Будем считать, что мишень предназначена для сбалансированного магнетрона, поэтому она имеет кольцевую распыляемую область, ограниченную внутренним и внешним радиусами  $R_{01}$  и  $R_{02}$  соответственно. Эта область включает распыляемые зоны всех пластин. Пластины установлены на одной оси с магнетроном 5 и жестко прикреплены к нему. Внутренняя сплошная пластина 1, охлаждаемая проточной водой, средние 2, 3 и внешняя 4 пластины выполнены из металлов  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$  и  $M_4$  соответственно. Пластины 2–4 представляют собой кольца с внутренними радиусами  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$  соответственно.

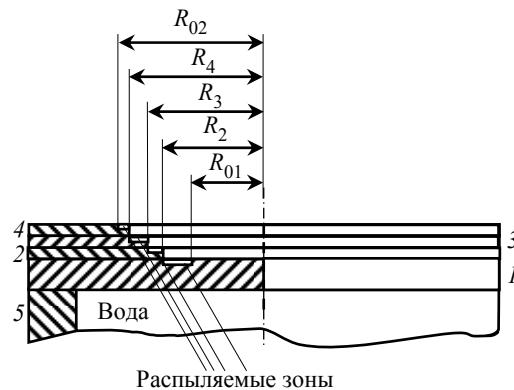


Рис. 2. Схематическое изображение четырехслойной мишени магнетрона (5), содержащая пластины: 1 – внутреннюю; 2 и 3 – первую и вторую средние; 4 – внешнюю  
Fig. 2. Schematic representation of a four-layer magnetron target (5), containing plates: 1 – internal; 2 and 3 – first and second middle; 4 – external

Пластина 1 – это холодильник, отводящий тепло от распыляемого узла. Пластины 2–4 работают в свободном тепловом режиме, т. е. охлаждаются за счет излучения и теплопроводности элементов крепления.

При распылении мишени в среде аргона независимые переменные – это ток разряда, давление аргона и внутренние радиусы кольцеобразных пластин. Для дальнейшего анализа будем считать, что плотность тока в распыляемой области, ограниченной радиусами  $R_{01}$  и  $R_{02}$ , распределена равномерно. Это сильное упрощение задачи. Его возможное влияние обсудим далее.

Из рис. 2 видно, что распыляемые зоны пластин 1–4 имеют форму колец с площадями

$$\begin{aligned} s_1 &= \pi(R_2^2 - R_{01}^2); \quad s_2 = \pi(R_3^2 - R_2^2); \\ s_3 &= \pi(R_4^2 - R_3^2); \quad s_4 = \pi(R_{02}^2 - R_4^2). \end{aligned} \quad (2)$$

Каждая пластина за счет воздействия потока ионов аргона становится источником металла с плотностью потока

$$J_i = \frac{S_i j}{e(1 + \gamma_i)} = a_i \frac{j}{e}, \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad (3)$$

где  $S_i$  – коэффициент распыления  $i$ -го металла;  $j$  – плотность тока разряда;  $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд электрона;  $\gamma_i$  – коэффициент ионно-электронной эмиссии  $i$ -го металла. Потоками, которые в (3) обусловлены испарением пластин в связи с их нагревом, пренебрегаем, учитывая только распыленный компонент. В (3) использовано обозначение  $a_i$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$ :

$$a_i = \frac{S_i}{1 + \gamma_i}, \quad i = 1, 2, 3, 4. \quad (4)$$

Для осаждения пленки четырехкомпонентного эквивалентного сплава необходимо обеспечить равенство потоков металлов, которые генерируют пластины:

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4, \quad (5)$$

где  $Q_i = s_i J_i = s_i a_i j / e$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$ .

Следует учесть, что площади  $s_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) в (5) задаются выражениями (2). Равенство (5) удобнее выразить в относительной форме:

$$\frac{Q_1}{\sum Q_i} = \frac{Q_2}{\sum Q_i} = \frac{Q_3}{\sum Q_i} = \frac{Q_4}{\sum Q_i} = 0.25. \quad (6)$$

Поскольку (6) содержит только три неизвестных  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$ , то в ней достаточно оставить три уравнения, записав их, например, в виде  $4Q_i = \sum Q_i$  (для левой части  $i = 2, 3, 4$ , для правой –  $i \neq 1, 2, 3, 4$ ):

$$\begin{aligned} -Q_4(r) - Q_3(r) + 3Q_2(r) - Q_1(r) &= 0; \\ -Q_4(r) + 3Q_3(r) - Q_2(r) - Q_1(r) &= 0; \\ 3Q_4(r) - Q_3(r) - Q_2(r) - Q_1(r) &= 0, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $r$  – радиус-вектор, лежащий на поверхности  $i$ -й пластины.

Оценим возможность преобразования системы уравнений (7). Корректное выражение для потока в этом случае должно принять вид  $Q_i(r) = s_i J_i(r) = a_i s_i j_i(r) / e$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$ . Если это выражение подставить в (7), то получим сложную картину зависимости уравнений в системе от плотности тока  $j_i(r)$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$  в распыляемой зоне каждой пластины. Такую задачу практически можно решать только численным методом. Однако, как было указано ранее, задача была упрощена. Принято равномерное распределение плотности тока  $j_i(r) \approx j_0$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$  во всей распыляемой области мишени, ограниченной радиусами  $R_{01}$  и  $R_{02}$ . Это дает поток в виде  $Q_i(r) = Q_i \approx a_i s_i j_0 / e$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$ , где  $j_0$  – средняя плотность тока в распыляемой области мишени, что позволяет упростить систему (7), удалив из нее зависимости от координаты  $r$ . В развернутом виде, пригодном для решения, система уравнений (7) с учетом (3) и (4) выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} &-(R_{02}^2 - R_4^2)a_4 - (R_4^2 - R_3^2)a_3 + \\ &+ 3(R_3^2 - R_2^2)a_2 - (R_2^2 - R_{01}^2)a_1 = 0; \\ &-(R_{02}^2 - R_4^2)a_4 + 3(R_4^2 - R_3^2)a_3 - \\ &-(R_3^2 - R_2^2)a_2 - (R_2^2 - R_{01}^2)a_1 = 0; \\ &3(R_{02}^2 - R_4^2)a_4 - (R_4^2 - R_3^2)a_3 - \\ &-(R_3^2 - R_2^2)a_2 - (R_2^2 - R_{01}^2)a_1 = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Система (8) с неизвестными радиусами кольцеобразных пластин  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$  может быть решена в аналитической форме. Параметрами задачи, как это следует из (4), служат коэффициенты распыления и ионно-электронной эмиссии металлов, составляющих четырехслойную мишень. Кроме этого, должны быть известны границы распыляемой области в виде радиусов  $R_{01}$  и  $R_{02}$ .

Далее в качестве примера используем предложенную конструкцию мишени для осаждения пленки четырехкомпонентного сплава TiTaNbMo. Этот сплав относится к среднеэнтропийным. Во множестве ему подобных TiTaNbW [21], TiTaNbZr [22], TiZrNbMo [31], NbMoTaW [32], TaNbCrTi [33] и др. он находится среди лидеров по коррозионной стойкости при высокой температуре [34], поэтому интересен в качестве конструкционного материала в аэрокосмической и автомобильной промышленности, химическом машиностроении и других отраслях, где элементы конструкций подвергаются нагреву в химически активных средах.

В мишени, предназначенной для осаждения пленок сплава, пластины разместим следующим образом: внутренняя – Ti, первая средняя – Ta, вторая средняя – Nb, внешняя – Mo. Расположение пластин не играет заметной роли. Однако в качестве внутренней желательнее использовать пластину из металла, имеющего наименьшую температуру плавления, поскольку во всех остальных положениях пластины будут работать в горячем режиме и при токе разряда в несколько ампер могут быть локально доведены до температуры плавления. Используем для удобства в качестве подстрочных индексов радиусов пластин символы металлов:  $R_2 \equiv R_{Ta}$ ,  $R_3 \equiv R_{Nb}$ ,  $R_4 \equiv R_{Mo}$ . Значения физических параметров материалов пластин и результаты расчета приведены в таблице.

Физические параметры материалов пластин  
Physical parameters of plate materials

Параметр	Металл			
	Ti	Ta	Nb	Mo
$S$ [35]	0.32	0.4	0.3	0.5
$\gamma$ [36]	0.1100	0.0577	0.0444	0.0222
$a$	0.63	0.38	0.43	0.39
$R$ , см	–	2.7	3.1	3.6
$s$ , см <sup>2</sup>	10.9	8.2	11.0	6.4

Запишем решение системы (8) в общем виде, удобном для интерпретации. Полагая, что величины  $R_{01}$  и  $R_{02}$  неизвестны, из (8) получим:

$$\begin{aligned} R_{Ta}^2 &= 0.702R_{01}^2 + 0.298R_{02}^2; \\ R_{Nb}^2 &= 0.475R_{01}^2 + 0.525R_{02}^2; \\ R_{Mo}^2 &= 0.176R_{01}^2 + 0.824R_{02}^2. \end{aligned} \quad (9)$$

Из (9) следует, что внутренние радиусы кольцеобразных пластин мишени однозначно связаны с параметрами области распыления, тоже имеющей кольцеобразную форму. Они представляют собой гипотенузы прямоугольных треугольников, катеты которых пропорциональны внутреннему и внешнему радиусам распыляемой области.

Используем решение (9) для анализа частного случая магнетрона, который использован в данных экспериментах. Конструкция магнитной системы этого устройства обеспечивает кольцеобразную распыляемую область, имеющую внутренний и внешний радиусы 1.9 и 3.9 см соответственно. Площадь этой области равна  $\pi(R_{02}^2 - R_{01}^2) \approx 36.4$  см<sup>2</sup>.

Значения радиусов пластин мишени, вычисленные по (9), и соответствующие им площади распыляемых зон (2) показаны в двух нижних строках таблицы.

На рис. 3 приведены зависимости от тока разряда плотности потоков металлов, вычисленные по формуле (3) с учетом (4). Различие величин,

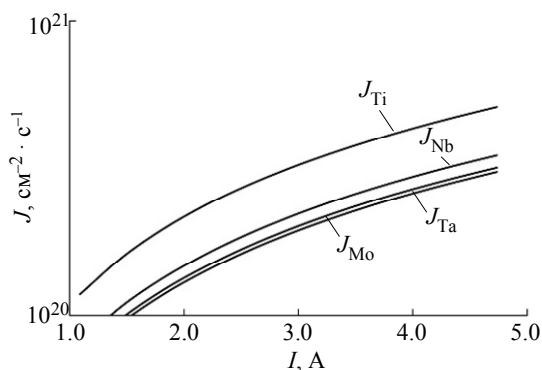


Рис. 3. Зависимости от тока разряда плотности потоков металлов Ti, Ta, Nb, Mo  
Fig. 3. Dependences of metal flux density  $J_i$  on discharge current Ti, Ta, Nb, Mo

наблюдаемое на рис. 3, связано с очевидным отличием физических параметров материалов, указанных в таблице.

На рис. 4 даны зависимости от тока разряда потоков металлов, которые генерируют разные пластины, вычисленные по кривым на рис. 3 ( $Q_i = s_i J_i$ ,  $i = Ti, Ta, Nb, Mo$ ), и зависимость суммарного потока  $\Sigma Q_i$ , формирующего пленку сплава. Результаты, показанные на рис. 4, свидетельствуют о том, что потоки, которые генерируют пластины, одинаковы. Это позволяет надеяться на то, что пленка сплава TiTaNbMo, осажденная с помощью магнетрона с предложенной четырехслойной мишенью, будет иметь состав, близкий к эквиатомному.

Здесь уместно выполнить анализ влияния распределения плотности тока разряда на результаты расчета. Выполним его на примере простейшей двухслойной мишени, предназначенной для осаждения эквиатомного сплава TiTa. При удалении двух внешних пластин из задачи для четырехкомпонентного сплава правая часть в (6) будет равна 0.5. Неизвестен в полученной системе только внутренний радиус  $R_2$  внешней танталовой пластины. Система (8) можем быть свернута до одного уравнения при условии  $j_i(r) \approx j_0$ ,  $i = 1, 2$ :

$$(R_{02}^2 - R_2^2)a_2 - (R_2^2 - R_{01}^2)a_1 = 0. \quad (10)$$

Для физических параметров пластин ( $S_i \gamma_i$ ,  $i = Ti, Ta$ ) из таблицы решение уравнения (10) дает значение  $R_2 = 2.94$ . Это значение задает распыляемые зоны обеих пластин. Для внутренней титановой пластины эта зона имеет форму кольца с внутренним и внешним радиусами  $R_{01} = 1.9$  и  $R_2 = 2.94$  см соответственно. Ее площадь  $s_1 = 15.8$  см<sup>2</sup> в соответствии с (2).

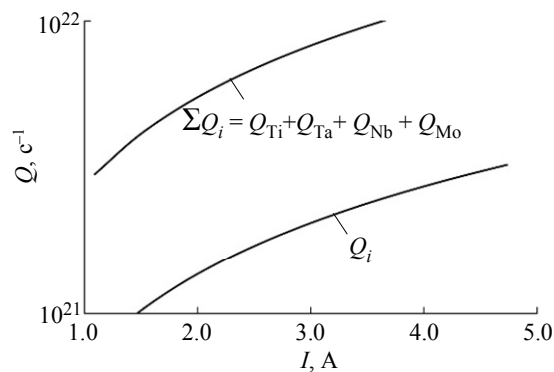


Рис. 4. Зависимости от тока разряда потоков металлов  $Q_i$ , Ti, Ta, Nb, Mo и суммарного потока  $\Sigma Q_i$   
Fig. 4. Dependences on the discharge current of the metal flows  $Q_i$ , Ti, Ta, Nb, Mo and the total flow  $\Sigma Q_i$

Аналогичные величины для внешней танталовой пластины  $R_2 = 2.94$  см,  $R_{02} = 3.9$  см и  $s_2 = 20.6$  см<sup>2</sup>, если учесть неравномерность распределения тока  $j(r)$ . Это в конечном итоге с учетом (2) приводит к уравнению

$$\begin{aligned} & (R_{02}^2 - R_2^2)a_2j_2(r) - \\ & - (R_2^2 - R_{01}^2)a_1j_1(r) = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

По сравнению с (10) уравнение (11) нельзя решить в аналитической форме, поскольку плотности тока и площади распыляемых зон в (11) взаимосвязаны. Оценим ошибку, к которой приводит допущение  $j_i(r) \approx j_0$ ,  $i = 1, 2$ . Пусть процесс распыления происходит при токе разряда  $I$ . Упрощаем задачу, предполагая равномерность распределения тока уже в распыляемой зоне каждой пластины. Значение соответствующего тока пропорционально площади распыляемой зоны пластины:  $I_i(r) \approx I_{i0} = I s_i / (s_1 + s_2)$ ,  $i = 1, 2$ . Учитывая это, определим потоки металлов, которые генерируют обе пластины, записав их в виде

$$Q_i = a_i I_i / e = a_i s_i I / [e(s_1 + s_2)], \quad i = \text{Ti, Ta}. \quad (12)$$

На рис. 5 показаны зависимости потоков атомов титана и тантала от тока разряда, вычисленные с помощью (12) при значении  $R_2 = 2.94$  см.

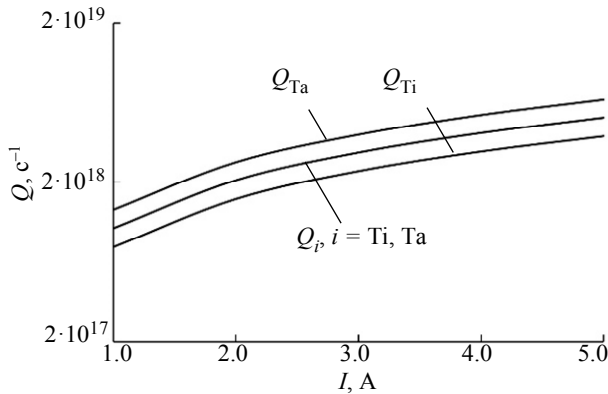


Рис. 5. Зависимости от тока разряда потоков металлов  $Q_{\text{Ta}}$  и  $Q_{\text{Ti}}$ , вычисленные с помощью (12) при значении  $R_2 = 2.94$  см, и потоков  $Q_i$ ,  $i = \text{Ti, Ta}$ , вычисленные с помощью итерационной процедуры  
Fig. 5. Dependences on the discharge current of the metal flows  $Q_{\text{Ta}}$  and  $Q_{\text{Ti}}$ , calculated using (12) with the value  $R_2 = 2.94$  cm and the flows  $Q_i$ ,  $i = \text{Ti, Ta}$ , calculated using the iterative procedure

Из рис. 5 видно, что предположение о равномерности распределения тока разряда в распыляемой области мишени приводит к различию потоков тантала и титана примерно на 40%. Как отмечено

ранее, вычисление значения  $R_2$ , которое обеспечивает равенство потоков, может быть вычислено с помощью итерационной процедуры, в которой в качестве начального значения принято  $R_2 = 2.94$  см. Очевидно, что для решения задачи необходимо уменьшать поток атомов тантала. Это можно достигнуть увеличением значения  $R_2$ . В столь простом случае оказалось достаточным выполнить подбор без сложных процедур. Оказалось, что равенство  $Q_{\text{Ta}} = Q_{\text{Ti}}$  достигается при  $R_2 = 3.19$  см. Эта зависимость обозначена на рис. 5 через  $Q_i$ ,  $i = \text{Ta, Ti}$ .

**Заключение.** Предложенная конструкция мишени не имеет ограничений на количество распыляемых пластин. Очевидно, что применение двухслойной или пятислойной мишени даст возможность осаждать пленки двух- или пятикомпонентных сплавов соответственно. В каждом случае для вычисления внутренних радиусов кольцеобразных пластин нужно будет составить систему уравнений типа (6) и в развернутом виде (9). Например, для пятислойной мишени в системе (6) появится уравнение, описывающее пятую пластину, генерирующую поток металла  $Q_5$  и ее правая часть будет равна 0.2:

$$\frac{Q_1}{\sum Q_i} = \frac{Q_2}{\sum Q_i} = \frac{Q_3}{\sum Q_i} = \frac{Q_4}{\sum Q_i} = \frac{Q_5}{\sum Q_i} = 0.2. \quad (13)$$

Система уравнений (13) содержит уже четыре неизвестных:  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  и  $R_5$ . Уравнения, необходимые для их определения, с учетом с (11) можем задать в расширенной форме:

$$\begin{aligned} & - (R_{02}^2 - R_5^2)a_5j_{05} - (R_5^2 - R_4^2)a_4j_{04} - \\ & - (R_4^2 - R_3^2)a_3j_{03} + 4(R_3^2 - R_2^2)a_2j_{02} - \\ & \quad - (R_2^2 - R_{01}^2)a_1j_{01} = 0; \\ & - (R_{02}^2 - R_5^2)a_5j_{05} - (R_5^2 - R_4^2)a_4j_{04} + \\ & + 4(R_4^2 - R_3^2)a_3j_{03} - (R_3^2 - R_2^2)a_2j_{02} - \\ & \quad - (R_2^2 - R_{01}^2)a_1j_{01} = 0; \\ & - (R_{02}^2 - R_5^2)a_5j_{05} + 4(R_5^2 - R_4^2)a_4j_{04} - \\ & - (R_4^2 - R_3^2)a_3j_{03} - (R_3^2 - R_2^2)a_2j_{02} - \\ & \quad - (R_2^2 - R_{01}^2)a_1j_{01} = 0; \\ & 4(R_{02}^2 - R_5^2)a_5j_{05} - (R_5^2 - R_4^2)a_4j_{04} - \\ & - (R_4^2 - R_3^2)a_3j_{03} - (R_3^2 - R_2^2)a_2j_{02} - \\ & \quad - (R_2^2 - R_{01}^2)a_1j_{01} = 0. \end{aligned} \quad (14)$$

где  $j_{0i}$ ,  $i = 1, 2, \dots, 5$  – средняя плотность тока в распыляемой зоне  $i$ -й пластины.

Кажущаяся сложность системы (14) легко преодолевается с помощью любого математического пакета. Предложенную мишень можно использовать и для осаждения твердых растворов

простых соединений типа оксидов, нитридов и др. Для этого нужно добавить в газовую среду необходимый реактивный газ. Однако выбор тока разряда и расходов газов для осаждения пленки нужного химического состава может оказаться в этом случае не очень простым.

### Список литературы

1. Pat. US 20020159914 A1 US. High-entropy multi-element alloys / Yeh J.-W. Заявл. 29.04.2002; опубл. 31.10.2002.
2. Microstructural development in equiatomic multi-component alloys / B. Cantor, I. T. Chang H., P. Knight, A. J. B. Vincent // *Mater. Sci. Engin.: A*. 2004. Vol. 375–377. P. 213–218. doi: 10.1016/j.msea.2003.10.257.
3. Microstructures and properties of high-entropy Alloys / Y. Zhang, T. T. Zuo, Z. Tang, M. C. Gao, K. A. Dahmen, P. K. Liaw, Z. P. Lu // *Progress Mater. Sci.* 2014. Vol. 61. P. 1–93. doi: 10.1016/j.pmatsci.2013.10.001.
4. Шаповалов В. И. Пленки высокоэнтропийных сплавов. Обзор // *Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2024. Т. 17, № 8. С. 13–30. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-8-13-30.
5. Thanka Rajan S., Arockiarajan A. J. Thin film metallic glasses for bioimplants and surgical tools: A review // *Alloys Comp.* 2021. Vol. 876. P. 159939. doi: 10.1016/j.jallcom.2021.159939.
6. Belser R. B., Hicklin W. H. J. Temperature coefficients of resistance of metallic films in the temperature range 25 to 600 °C // *J. Appl. Phys.* 1959. Vol. 30. P. 313–322. doi: 10.1063/1.1735158.
7. Кристаллизация и термохромизм в отожженных гетероструктурах, содержащих пленки оксидов титана и вольфрама / В. И. Шаповалов, А. Е. Лапшин, А. Е. Комлев, М. Ю. Арсентьев, А. А. Комлев // *ЖТФ*. 2013. Т. 83, № 9. С. 73–83.
8. Кристаллизация и термохромизм в пленках оксида вольфрама, отожженных в вакууме / В. И. Шаповалов, А. Е. Лапшин, А. Е. Комлев, А. А. Комлев // *Письма в ЖТФ*. 2012. Т. 38, № 12. С. 8–16.
9. ITO-Induced nonlinear optical response enhancement of titanium nitride thin films / P. Lu, T. Yan, J. Huang, T. Xing, H. Liu, Z. Han, X. Xu, C. Tao // *J. Nanomaterials*. 2024. Vol. 14, no 12. P. 1040. doi: 10.3390/nano14121040.
10. High-performance hydrogen sensing at room temperature via Nb-doped titanium oxide thin films fabricated by micro-arc oxidation / C. Zhou, Z. Ye, Y. Tan, Z. Wu, X. Guo, Y. Bai, X. Xie, Z. Wu, J. Feng, Y. Xu, B. Deng, H. Wu // *J. Nanomaterials* 2025. Vol. 15, no. 2. P. 124.
11. Влияние термообработки на структуру пленок диоксида титана / А. А. Комлев, А. Е. Лапшин, О. В. Маддысюк, В. В. Плотников, В. И. Шаповалов, Н. С. Шутова // *Письма в ЖТФ*. 2010. Т. 36, № 20. С. 29–34.
12. Effects of nitrogen flow rate on the microstructure and mechanical and tribological properties of TiAlN films prepared via reactive magnetron sputtering / X. Niu, G. Dong, S. Wei, Y. Wang, B. Wang, H. Tian // *Ceramics Int.* 2023. Vol. 49, no 12. P. 19885–19894. doi: 10.1016/j.ceramint.2023.03.108.
13. Mehr Ali K., Mehr Abbas K. Reactive grid-assisted co-sputtering of titanium and chromium in a pure nitrogen atmosphere: Uniformity, optics, and structure of the Ti-Cr-N films // *Ceram. Intern.* 2022. Vol. 48, no. 4. P. 4921–4929. doi: 10.1016/j.ceramint.2021.11.030.
14. The impact of Ni and Mo on growth-morphology and mechanical properties of arc evaporated Ti-Cr-N hard coatings / A. Chernogor, F. F. Klimashin, A. O. Volkonskii, I. Blinkov, P. H. Mayrhofer // *Surf. Coat. Technol.* 2019. Vol. 377. P. 124917. doi: 10.1016/j.surfcoat.2019.124917.
15. A Study of Ti-Ta Library and Microstructure Manufactured by Magnetron Sputtering / S. Barbos, A. Novac, R. Sprincenatu, M. Condel, I. Mitelea, C. Craciunescu // *Solid State Phenomena*. 2016. Vol. 254. P. 97–101. doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.254.97.
16. Innovations in additive manufacturing of shape memory alloys: Alloys, microstructures, treatments, applications / S. Ahmad, A. W. Hashmi, J. Singh, K. Arora, Y. Tian, F. Iqbal, M. Al-Dossari, M. I. Khan // *J. Mater. Res. Technol.* 2024. Vol. 32. P. 4136–4197. doi: 10.1016/j.jmrt.2024.08.213.
17. Crystallographic structure analysis of a Ti-Ta thin film materials library fabricated by combinatorial magnetron sputtering / P. M. Kadletz, Y. Motemani, J. Iannotta, S. Salomon, C. Khare, L. Grossmann, H. J. Maier, A. Ludwig, W. W. Schmahl // *ACS Combin. Sci.* 2018. Vol. 20, no. 3. P. 137–150. doi: 10.1021/acscombsci.7b00135.
18. Investigating the relationship between microstructures and multiple properties of the novel biomedical Ti-Ta-Cu alloy / H. Yu, B. Wang, Z. Jiang, T. Sun, Y. Yang, M. Song, B. Guo, W. Li, Z. Yu // *J. Alloys Comp.* 2025. Vol. 1036. P. 181716. doi: 10.1016/j.jallcom.2025.181716.
19. Quantifying protein adsorption on combinatorially sputtered Al-, Nb-, Ta- and Ti-containing films with electron microprobe and spectroscopic ellipsometry / T. M. Byrne, L. Lohstreter, M. J. Filiaggi, Z. Bai, J. R. Dahn // *Surf. Sci.* 2009. Vol. 603. P. 992–1001. doi: 10.1016/j.susc.2009.02.014.
20. Tribocorrosion of biomedical Ti-Nb-Ta alloys fabricated by directed energy deposition using elemental powders / K. Praveen Kumar, V. Gopal, S. Prasanth, G. Manivasagam, K. Chatterjee, S. Suwas // *Tribol. Int.* 2025. Vol. 211. P. 110906. doi: 10.1016/j.triboint.2025.110906.
21. Phase, mechanical property and corrosion resistance evaluation of W-Nb-Ta-Ti and W-Nb-Ta-Ti-N medium entropy alloy thin films / B.-S. Lou, C.-J. Wang,

Y.-Y. Chen, S.-B. Hung, Y.-C. Lin, J.-W. Lee // Surf. Coat. Technol. 2022. Vol. 442. P. 128339. doi: 10.1016/j.surfcoat.2022.128339.

22. Prediction of Ti-Zr-Nb-Ta high-entropy alloys with desirable hardness by combining machine learning and experimental data / Y. Sun, Z. Lu, X. Liu, Qing Du, H. Xie, J. Lv, R. Song, Y. Wu, H. Wang, S. Jiang, Z. Lu // Appl. Phys. Lett. 2021. Vol. 119. P. 201905. doi: 10.1063/5.0065303.

23. Corrosion behavior of TiMoNbX (X = Ta, Cr, Zr) refractory high entropy alloy coating prepared by laser cladding based on TC<sub>4</sub> titanium alloy / L. Liu, H. Liu, X. Zhang, Y. Wang, X. Hao // Materials. 2023. Vol. 16, no. 10. P. 3860. doi: 10.3390/ma16103860.

24. High-entropy alloy for thin film application: A review / N. I. Muhammad Nadzri, D. S. C. Halin, M. M. Al Bakri Abdullah, S. Joseph, M. A. A. Mohd Salleh, P. Vizureanu, D.-P. Burduhos-Nergis, A. V. Sandu // Coatings. 2022. Vol. 12, no. 12. P. 1842. doi: 10.3390/coatings12121842.

25. Enhancing wear resistance: In-situ ceramic phase precipitation for strengthening and toughening FeCoNiCrN<sub>x</sub> high-entropy alloy films / W. Liu, C. T. Wang, S. C. Zhao, L. Chen, Y. T. Li, X. Jiang, Y. X. Leng // Surf. Coat. Technol. 2024. Vol. 478. P. 130466. doi: 10.1016/j.surfcoat.2024.130466.

26. Peng H.-W., Hsueh C.-H. Effects of silicon and neodymium additions on microstructures and mechanical properties of CoCrNi medium entropy alloy films // Surf. Coat. Technol. 2024. Vol. 476. P. 130206. doi: 10.1016/j.surfcoat.2023.130206.

27. Influence of argon pressure and current density on substrate temperature during magnetron sputtering of hot titanium target / A. A. Komlev, E. A. Minzhulina, V. V. Smirnov, V. I. Shapovalov // Appl. Phys. A. 2018. Vol. 124. P. 48. doi: 10.1007/s00339-017-1458-4.

28. Kozin A. A., Shapovalov V. I. Modeling of thermal processes in magnetron with single hot target and

sandwich-target // Surf. Coat. Technol. 2019. Vol. 359. P. 451–458. doi: 10.1016/j.surfcoat.2018.12.070.

29. Shapovalov V. I. Hot target. Physico-chemical model of reactive sputtering // Techn. Phys. 2019. Vol. 64, no. 7. P. 926–932. doi: 10.1134/S1063784219070211.

30. Shapovalov V. I., Ivantsov M. O., Krainov N. S. On the deposition of an Fe<sub>x</sub>Ni<sub>1-x</sub> film by the magnetron sputtering of a multilayer target // J. Surf. Invest. X-ray. 2023. Vol. 17. P. S220–S225. doi: 10.1134/S1027451023070479.

31. Mechanical properties and corrosion behavior of β-type Ti-Zr-Nb-Mo alloys for biomedical application / P. Chui, R. Jing, F. Zhang, J. Li, T. Feng // J. Alloys Comp. 2020. Vol. 842. P. 155693. doi: 10.1016/j.jallcom.2020.155693.

32. Pozuelo M., Marian J. In-situ observation of 'chemical' strengthening induced by compositional fluctuations in Nb-Mo-Ta-W // Scripta Mater. 2024. Vol. 238. P. 115750. doi: 10.1016/j.scriptamat.2023.115750.

33. High temperature oxidation behavior of Ta-Nb-Cr-Ti refractory high-entropy alloy coating / M. Shi, Z. Guan, L. Qin, T. Yue, Z. Yang, J. Zhao // Mater. Lett. 2025. Vol. 395. P. 138660. doi: 10.1016/j.matlet.2025.138660.

34. A significant improvement in corrosion resistance and mechanical properties of Cu-containing nanocrystalline Ti-Mo-Nb-Ta refractory complex concentrated alloy / S.-O. Agbedor, D. Gao, K. Li, Q. Lei, A. Kanwal, I. E. Ohiomomo, S. Xing, J. Hou, M. Sun, H. Wu // Corrosion Sci. 2025. Vol. 246. P. 112737. doi: 10.1016/j.corsci.2025.112737.

35. Betz G. Sputtering by particle bombardment. I. Physical sputtering of single element solids // Topics in Appl. Phys. Vol. 47. Ed. R. Behrisch. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1981. 336 p. doi: 10.1107/S0567739482000904.

36. Depla D., Mahieu S., De Gryse R. Magnetron sputter deposition: Linking discharge voltage with target properties // Thin Solid Films. 2009. Vol. 517. P. 2825–2839. doi: 10.1016/j.tsf.2008.11.108.

#### Информация об авторах

**Шаповалов Виктор Иванович** – д-р техн. наук, профессор кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Почетный работник высшего профессионального образования РФ.

E-mail: vishapovalov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2196-6851>

**Шарковский Даниил Сергеевич** – аспирант кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: sharkovskiy.d@yandex.ru

**Зефания Джошуа Казазассан** – студент гр. 1203 СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: zephaniahk333@gmail.com

**Николаев Арсений Витальевич** – студент гр. 2202 СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: nikolaev.a2004@mail.ru

#### Вклад авторов:

Шаповалов В. И. – общее руководство исследованием, постановка научной задачи, разработка концепции многослойной мишени, анализ результатов расчета, подготовка и редактирование текста статьи.

Шарковский Д. С. – анализ литературных источников, участие в разработке математической модели и методологии исследования, критический анализ и доработка текста статьи.

Зефания Д. К. – проведение программной реализации алгоритма, постановка и проведение расчетов, сбор и анализ данных.

Николаев А. В. – участие в проведении расчетов, участие в обсуждении результатов, визуализация результатов.

## References

1. Pat. US 20020159914 A1 US. High-entropy multielement alloys / Yeh J.-W. Zayavl. 29.04.2002; opubl. 31.10.2002.
2. Microstructural development in equiatomic multi-component alloys / B. Cantor, I. T. Chang H., P. Knight, A. J. B. Vincent // *Mater. Sci. Engin.: A*. 2004. Vol. 375–377. P. 213–218. doi: 10.1016/j.msea.2003.10.257.
3. Microstructures and properties of high-entropy Alloys / Y. Zhang, T. T. Zuo, Z. Tang, M. C. Gao, K. A. Dahmen, P. K. Liaw, Z. P. Lu // *Progress Mater. Sci.* 2014. Vol. 61. P. 1–93. doi: 10.1016/j.pmatsci.2013.10.001.
4. Shapovalov V. I. Plenki vysokoentropijnyh splavov. Obzor // *Izv. SPbGETU «LETI»*. 2024. T. 17, № 8. S. 13–30. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-8-13-30. (In Russ.).
5. Thanka Rajan S., Arockiarajan A. J. Thin film metallic glasses for bioimplants and surgical tools: A review // *Alloys Comp.* 2021. Vol. 876. P. 159939. doi: 10.1016/j.jallcom.2021.159939.
6. Belser R. B., Hicklin W. H. J. Temperature coefficients of resistance of metallic films in the temperature range 25 to 600 °C // *J. Appl. Phys.* 1959. Vol. 30. P. 313–322. doi: 10.1063/1.1735158.
7. Kristallizatsija i termohromizm v otozhzhennyh geterostrukturah, sodержashih plenki oksidov titana i volframa / V. I. Shapovalov, A. E. Lapshin, A. E. Komlev, M. Yu. Arsentev, A. A. Komlev // *ZhTF*. 2013. T. 83, № 9. S. 73–83. (In Russ.).
8. Kristallizatsija i termohromizm v plenkah oksida volframa, otozhzhennyh v vakuume / V. I. Shapovalov, A. E. Lapshin, A. E. Komlev, A. A. Komlev // *Pisma v ZhTF*. 2012. T. 38, № 12. S. 8–16. (In Russ.).
9. ITO-induced nonlinear optical response enhancement of titanium nitride thin films / P. Lu, T. Yan, J. Huang, T. Xing, H. Liu, Z. Han, X. Xu, C. Tao // *J. Nanomaterials*. 2024. Vol. 14, no 12. P. 1040. doi: 10.3390/nano14121040.
10. High-performance hydrogen sensing at room temperature via Nb-doped titanium oxide thin films fabricated by micro-arc oxidation / C. Zhou, Z. Ye, Y. Tan, Z. Wu, X. Guo, Y. Bai, X. Xie, Z. Wu, J. Feng, Y. Xu, B. Deng, H. Wu // *J. Nanomaterials* 2025. Vol. 15, no 2. P. 124.
11. Vlijanie termoobrabotki na strukturu plenok dioksida titana / A. A. Komlev, A. E. Lapshin, O. V. Magdysyuk, V. V. Plotnikov, V. I. Shapovalov, N. S. Shutova // *Pisma v ZhTF*. 2010. T. 36, № 20. S. 29–34.
12. Effects of nitrogen flow rate on the microstructure and mechanical and tribological properties of TiAlN films prepared via reactive magnetron sputtering / X. Niu, G. Dong, S. Wei, Y. Wang, B. Wang, H. Tian // *Ceramics Int.* 2023. Vol. 49, no 12. P. 19885–19894. doi: 10.1016/j.ceramint.2023.03.108.
13. Mehr Ali K., Mehr Abbas K. Reactive gridassisted cosputtering of titanium and chromium in a pure nitrogen atmosphere: Uniformity, optics, and structure of the Ti–Cr–N films // *Ceram. Intern.* 2022 Vol. 48, no. 4. P. 4921–4929. doi: 10.1016/j.ceramint.2021.11.030.
14. The impact of Ni and Mo on growth-morphology and mechanical properties of arc evaporated Ti–Cr–N hard coatings / A. Chernogor, F. F. Klimashin, A. O. Volkhonskii, I. Blinkov, P.H. Mayrhofer // *Surf. Coat. Technol.* 2019. Vol. 377. P. 124917. doi: 10.1016/j.surfcoat.2019.124917.
15. A study of Ti-Ta library and microstructure manufactured by magnetron sputtering / S. Barbos, A. Novac, R. Sprincenatu, M. Condel, I. Mitelea, C. Craciunescu // *Solid State Phenomena*. 2016. Vol. 254. P. 97–101. doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.254.97.
16. Innovations in additive manufacturing of shape memory alloys: Alloys, microstructures, treatments, applications / S. Ahmad, A. W. Hashmi, J. Singh, K. Arora, Y. Tian, F. Iqbal, M. Al-Dossari, M. I. Khan // *J. Mater. Res. Technol.* 2024. Vol. 32. P. 4136–4197. doi: 10.1016/j.jmrt.2024.08.213.
17. Crystallographic structure analysis of a Ti-Ta thin film materials library fabricated by combinatorial magnetron sputtering / P. M. Kadletz, Y. Motemani, J. Iannotta, S. Salomon, C. Khare, L. Grossmann, H. J. Maier, A. Ludwig, W. W. Schmahl // *ACS Combin. Sci.* 2018. Vol. 20, no. 3. P. 137–150. doi: 10.1021/acscombsci.7b00135.
18. Investigating the relationship between microstructures and multiple properties of the novel biomedical Ti-Ta-Cu alloy / H. Yu, B. Wang, Z. Jiang, T. Sun, Y. Yang, M. Song, B. Guo, W. Li, Z. Yu // *J. Alloys Comp.* 2025. Vol. 1036. P. 181716. doi: 10.1016/j.jallcom.2025.181716.
19. Quantifying protein adsorption on combinatorially sputtered Al-, Nb-, Ta- and Ti-containing films with electron microprobe and spectroscopic ellipsometry / T. M. Byrne, L. Lohstreter, M. J. Filiaggi, Z. Bai, J. R. Dahn // *Surf. Sci.* 2009. Vol. 603. P. 992–1001. doi: 10.1016/j.susc.2009.02.014.
20. Tribocorrosion of biomedical Ti-Nb-Ta alloys fabricated by directed energy deposition using elemental powders / K. Praveen Kumar, V. Gopal, S. Prasanth, G. Manivasagam, K. Chatterjee, S. Suwas // *Tribol. Int.* 2025. Vol. 211. P. 110906. doi: 10.1016/j.triboint.2025.110906.
21. Phase, mechanical property and corrosion resistance evaluation of W-Nb-Ta-Ti and W-Nb-Ta-Ti-N medium entropy alloy thin films / B.-S. Lou, C.-J. Wang, Y.-Y. Chen, S.-B. Hung, Y.-C. Lin, J.-W. Lee // *Surf. Coat. Technol.* 2022. Vol. 442. P. 128339. doi: 10.1016/j.surfcoat.2022.128339.

22. Prediction of Ti-Zr-Nb-Ta high-entropy alloys with desirable hardness by combining machine learning and experimental data / Y. Sun, Z. Lu, X. Liu, Qing Du, H. Xie, J. Lv, R. Song, Y. Wu, H. Wang, S. Jiang, Z. Lu // Appl. Phys. Lett. 2021. Vol. 119. P. 201905. doi: 10.1063/5.0065303.

23. Corrosion behavior of TiMoNbX (X = Ta, Cr, Zr) refractory high entropy alloy coating prepared by laser cladding based on TC<sub>4</sub> titanium alloy / L. Liu, H. Liu, X. Zhang, Y. Wang, X. Hao // Materials. 2023. Vol. 16, no. 10. P. 3860. doi: 10.3390/ma16103860.

24. High-entropy alloy for thin film application: A review / N. I. Muhammad Nadzri, D. S. C. Halin, M. M. Al Bakri Abdullah, S. Joseph, M. A. A. Mohd Salleh, P. Vizureanu, D.-P. Burduhos-Nergis, A. V. Sandu // Coatings. 2022. Vol. 12, no. 12. P. 1842. doi: 10.3390/coatings12121842.

25. Enhancing wear resistance: In-situ ceramic phase precipitation for strengthening and toughening FeCo-NiCrN<sub>x</sub> high-entropy alloy films / W. Liu, C. T. Wang, S. C. Zhao, L. Chen, Y. T. Li, X. Jiang, Y. X. Leng // Surf. Coat. Technol. 2024. Vol. 478. P. 130466. doi: 10.1016/j.surfcoat.2024.130466.

26. Peng H.-W., Hsueh C.-H. Effects of silicon and neodymium additions on microstructures and mechanical properties of CoCrNi medium entropy alloy films // Surf. Coat. Technol. 2024. Vol. 476. P. 130206. doi: 10.1016/j.surfcoat.2023.130206.

27. Influence of argon pressure and current density on substrate temperature during magnetron sputtering of hot titanium target / A. A. Komlev, E. A. Minzhulina, V. V. Smirnov, V. I. Shapovalov // Appl. Phys. A. 2018. Vol. 124. P. 48. doi: 10.1007/s00339-017-1458-4.

28. Kozin A. A., Shapovalov V. I. Modeling of thermal processes in magnetron with single hot target and sandwich-target // Sur. Coat. Technol. 2019. Vol. 359. P. 451–458. doi: 10.1016/j.surfcoat.2018.12.070.

29. Shapovalov V. I. Hot target. Physico-chemical model of reactive sputtering // Techn. Phys. 2019. Vol. 64, no. 7. P. 926–932. doi: 10.1134/S1063784219070211.

30. Shapovalov V. I., Ivantsov M. O., Krainov N. S. On the deposition of an Fe<sub>x</sub>Ni<sub>1-x</sub> film by the magnetron sputtering of a multilayer target // J. Surf. Invest. X-ray. 2023. Vol. 17. P. S220–S225. doi: 10.1134/S1027451023070479.

31. Mechanical properties and corrosion behavior of β-type Ti-Zr-Nb-Mo alloys for biomedical application / P. Chui, R. Jing, F. Zhang, J. Li, T. Feng // J. Alloys Comp. 2020. Vol. 842. P. 155693. doi: 10.1016/j.jallcom.2020.155693.

32. Pozuelo M., Marian J. In-situ observation of 'chemical' strengthening induced by compositional fluctuations in Nb-Mo-Ta-W // Scripta Mater. 2024. Vol. 238. P. 115750. doi: 10.1016/j.scriptamat.2023.115750.

33. High temperature oxidation behavior of Ta-Nb-Cr-Ti refractory high-entropy alloy coating / M. Shi, Z. Guan, L. Qin, T. Yue, Z. Yang, J. Zhao // Mater. Lett. 2025. Vol. 395. P. 138660. doi: 10.1016/j.matlet.2025.138660.

34. A significant improvement in corrosion resistance and mechanical properties of Cu-containing nanocrystalline Ti-Mo-Nb-Ta refractory complex concentrated alloy / S.-O. Agbedor, D. Gao, K. Li, Q. Lei, A. Kanwal, I. E. Ohiomomo, S. Xing, J. Hou, M. Sun, H. Wu // Corrosion Sci. 2025. Vol. 246. P. 112737. doi: 10.1016/j.corsci.2025.112737.

35. Betz G. Sputtering by particle bombardment. I. Physical sputtering of single element solids // Topics in Appl. Phys. Vol. 47. Ed. R. Behrisch. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1981. 336 p. doi: 10.1107/S0567739482000904.

36. Depla D., Mahieu S., De Gryse R. Magnetron sputter deposition: Linking discharge voltage with target properties // Thin Solid Films. 2009. Vol. 517. P. 2825–2839. doi: 10.1016/j.tsf.2008.11.108.

#### Information about the authors

**Viktor I. Shapovalov** – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of Electronic Instruments and Devices, Saint Petersburg Electrotechnical University. Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation.

E-mail: vishapovalov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2196-6851>

**Daniil S. Sharkovskii** – postgraduate student of the Department of Electronic Instruments and Devices, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: sharkovskiy.d@yandex.ru

**Joshua K. Zephaniah** – student gr. 1203, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: zephaniahk333@gmail.com

**Arseniy V. Nikolaev** – student gr. 2202, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: nikolaev.a2004@mail.ru

#### Author contribution statement:

Shapovalov V. I. – overall research management, formulation of the scientific problem, development of the multilayer target concept, analysis of calculation results, preparation and editing of the manuscript.

Sharkovskii D. S. – literature review, participation in the development of the mathematical model and research methodology, critical analysis and revision of the manuscript.

Zephaniah J. K. – software implementation of the algorithm, calculation setup and execution, data collection and analysis.

Nikolaev A. V. – participation in calculations, discussion of results, and visualization of results.

Статья поступила в редакцию 02.02.2026; принята к публикации после рецензирования 25.03.2026; опубликована онлайн 25.05.2026.

Submitted 02.02.2026; accepted 25.03.2026; published online 25.05.2026.

---