

## Напыление пленок сплава $M_1xM_2(1-x)$

Н. М. Иванов, В. И. Шаповалов<sup>✉</sup>, Д. С. Шарковский

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

<sup>✉</sup> vishapovalov@mail.ru

**Аннотация.** Проанализирован процесс напыления пленок двойного сплава  $M_1xM_2(1-x)$  с помощью магнетрона, оснащенного новым двухслойным распыляемым узлом. Внутренняя пластина узла, изготовленная из металла  $M_2$ , эффективно охлаждалась проточной водой и распылялась через прорезы во внешней пластине из металла  $M_1$ , которая работает в горячем режиме. Два прореза, расположенные симметрично в кольцевой зоне распыления внешней пластины, имели форму секторов кольца. Выполненный анализ потоков атомов металлов, которые генерировал распыляемый узел, позволил установить, что при изменении относительной площади прорезей от 0 до 1 стехиометрический коэффициент  $x$  пленки  $M_1xM_2(1-x)$  мог изменяться от 1 до 0. Результаты анализа были использованы для изучения влияния ток разряда и угла сектора кольца на химический состав пленки сплава  $Ta_xTi_{1-x}$ . Установлено, что при токе разряда меньше 6 А испарение танталовой пластины незначимо и стехиометрический коэффициент в химической формуле пленки не зависел от тока разряда. Влияние на состав пленки угла сектора кольца задавала простая функция. Показано, что выполненный анализ дал возможность изучать влияние независимых переменных процесса распыления на физико-химические свойства пленок. Для примера установлено влияние угла сектора кольца на износостойкость пленки  $Ta_xTi_{1-x}$ .

**Ключевые слова:** магнетрон, распыление, распыляемый узел, пленка, сплав, тантал, титан

**Для цитирования:** Иванов Н. М., Шаповалов В. И., Шарковский Д. С. Напыление пленок сплава  $M_1xM_2(1-x)$  // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 1. С. 22–29. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-1-22-29.

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

Original article

## Alloy Films Sputtering $M_1xM_2(1-x)$

N. M. Ivanov, V. I. Shapovalov<sup>✉</sup>, D. S. Sharkovskii

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

<sup>✉</sup> vishapovalov@mail.ru

**Abstract.** The purpose of this work was to analyze the deposition of  $M_1xM_2(1-x)$  binary alloy films using a magnetron equipped with a new two-layer sputtering unit. The internal plate of the unit made of  $M_2$  metal was effectively cooled with running water and was sputtered through slits in the external plate made of  $M_1$  metal, which operated in the hot mode. Two slits located symmetrically in the annular sputtering area of the external plate had the shape of ring sectors. The analysis performed of the metal atom fluxes generated by the sputtering unit made it possible to establish when the relative area of the slits changes from 0 to 1, the stoichiometric coefficient  $x$  of the  $M_1xM_2(1-x)$  film could change from 1 to 0. The results obtained were used to study the effect of the discharge current and the ring sector angle on the chemical composition of the  $Ta_xTi_{1-x}$  alloy film. It was found that at a discharge current of less than 6 A, the evaporation of the tantalum plate is insignificant and the stoichiometric coefficient in the chemical formula of the film does not depend on the discharge current.

The effect of the ring sector angle on the film composition was determined by a simple function. It is shown that the performed analysis made it possible to study the effect of independent variables of the sputtering process on the physical-chemical properties of the films. For example, the effect of the ring sector angle on the wear resistance of the  $Ta_xTi_{1-x}$  film was established.

**Keywords:** magnetron, sputtering, sputtered unit, film, alloy, tantalum, titanium

**For citation:** Ivanov N. M., Shapovalov V. I., Sharkovskii D. S. Alloy Film Sputtering  $M_1xM_2(1-x)$  // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 1. P. 22–29. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-1-22-29.

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

В современной технике пленки и покрытия играют огромную роль [1]–[3]. Их многочисленные применения основаны на богатстве физико-химических свойств. Легче назвать области деятельности, где пленки и покрытия еще не нашли применения. Например, к ним можно отнести черную и цветную металлургию. Однако, если обратить внимание на любую машиностроительную отрасль, авиа- и судостроение, строительство зданий и сооружений, то в них обязательно найдется место, где используют материалы в пленочном исполнении толщиной от долей до сотен микрон. Очень популярен для осаждения пленок в силу своей гибкости метод магнетронного распыления, который имеет несколько разновидностей, определяемых типом газового разряда (на постоянном или переменном токе, импульсный и др.) [4]. В зависимости от количества компонентов в пленке для ее осаждения используют магнетроны, оснащенные разными распыляемыми узлами. Для пленок бинарных сплавов применяют сплавную мишень или сораспыление, при котором в процессе участвуют не менее двух магнетронов, оснащенных мишенями из разных металлов [5]. Задача усложняется при увеличении числа компонентов сплава.

Одним из новых путей развития технологии магнетронного распыления является многослойный распыляемый узел [6]–[8]. Он содержит несколько соосных пластин, количество которых определяется составом сплава. В каждой из них, за исключением внутренней, выполнены прорезы, через которые распыляется нижележащая пластина. В этой конструкции только внутренняя пластина работает в холодном режиме, остальные подвержены нагреванию за счет ионного тока. Наиболее эффективно такое устройство при осаждении пленок бинарных и тройных сплавов. Оценим возможности предложенного варианта узла для осаждения пленок сплава  $M_1xM_2(1-x)$ .

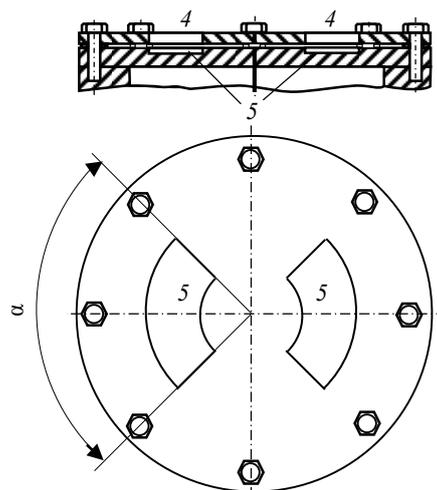


Рис. 1. Распыляемый узел: 1 – корпус магнетрона; 2 – внутренняя пластина; 3 – внешняя пластина; 4 – прорезы; 5 – распыляемая область внутренней пластины

Fig. 1. Sputtered unit: 1 – magnetron housing; 2 – inner plate; 3 – outer plate; 4 – slots; 5 – sputtered area of the inner plate

Желаемым свойством магнетрона является широкий диапазон изменения  $x$ . Он не должен зависеть от порядка расположения пластин. Хотя предпочтительно внешнюю пластину сделать из материала, обладающего более высокой температурой плавления. Она, работая в горячем режиме, может быть нагрета без разрушения до 2500 К и выше. Предположим, что внешняя пластина изготовлена из металла  $M_1$ . Получивший развитие распыляемый узел с прорезами в форме отверстий во внешней пластине [8], не дает возможности осаждать пленки с  $x < 0.5$ . Рассмотрим особенности распыляемого узла другого типа (рис. 1). Он содержит две пластины (2 и 3), но во внешней (3) прорезы выполнены в форме секторов кольца с углом  $0 \leq \alpha < 180^\circ$ , расположенных симметрично в ее зоне распыления. Принципиально не запрещено и значение  $\alpha = 180^\circ$ , однако тогда во внешней пластине возникает отверстие с оче-

видным диаметром. В этом случае значимо будет расплываться только внутренняя пластина, и состав пленки определит значение  $x \approx 0$ . Зону эрозии 5 внутренней пластины задает суммарная площадь прорезей  $s_{Me_1}$ . Для внешней пластины площадь аналогичной области равна  $(s - s_{M_1})$ . Здесь через  $s$  обозначена полная площадь кольцевой области, которую расплывает поток ионов. Величина  $s_{Me_1}$ , наряду с током разряда, – независимый параметр процесса распыления, который влияет на состав пленки  $M_1xM_2(1-x)$ . Оценим это влияние.

Примем в качестве независимой переменной относительную суммарную площадь прорезей во внешней пластине:

$$\delta = \frac{s_{M_1}}{s}. \quad (1)$$

Определим влияние величины (1) на стехиометрический коэффициент  $x$ .

При распылении пластины становятся источниками потоков металлов  $Q_{M_1расп}$  и  $Q_{M_2расп}$ . Кроме этого нагревание внешней пластины может привести к появлению значимого испаренного потока  $Q_{M_1исп}$ . Полный поток от внешней пластины состоит из двух потоков:  $Q_{M_1полн} = Q_{M_1расп} + Q_{M_1исп}$ . В отличие от этого полный поток от внутренней пластины не имеет составляющей  $Q_{M_2исп}$ . Соотношение компонентов в пленке  $M_1xM_2(1-x)$  зададим величиной:

$$x = \frac{Q_{M_1полн}}{Q_{M_1полн} + Q_{M_2полн}}. \quad (2)$$

Одновременно с этим каждый из компонентов в (2) известным образом [8] зависит от величины (1). В нашем случае, например,

$$Q_{M_1полн} = Q_{M_1расп} + Q_{M_1исп} = (1 - \delta)s \left[ \frac{jS_{M_1}}{e(1 + \gamma_{M_1})} + \frac{10^{A_{M_1} - B_{M_1}/T_{M_1}}}{\sqrt{2\pi m_{M_1} k T_{M_1}}} \right], \quad (3)$$

где  $j$  – плотность тока разряда, А/см<sup>2</sup>;  $e = 1.6 \times 10^{-19}$  Кл – заряд электрона и для внешней пластины:  $S_{M_1}$  – коэффициент распыления;  $\gamma_{M_1}$  – коэффициент ионно-электронной эмиссии;  $A_{M_1}$  и  $B_{M_1}$  – постоянные, задающие давление насыщенного пара;  $m_{M_1}$  – масса атома;  $T_{M_1}$  – температура пластины;  $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана.

Поток металла, который генерирует внутренняя пластина, работающая в холодном режиме, по аналогии с (3) зададим выражением:

$$Q_{M_2полн} = Q_{M_2расп} = \delta s \frac{jS_{M_2}}{e(1 + \gamma_{M_2})}, \quad (4)$$

где для внутренней пластины:  $S_{M_2}$  – коэффициент распыления;  $\gamma_{M_2}$  – коэффициент ионно-электронной эмиссии.

В качестве независимой переменной в рассматриваемой задаче в связи с формой прорезей удобнее принять угол  $\alpha$  в градусах, соответствующий сектору кольца (см. рис. 1). Связь между величинами  $\alpha$  и  $\delta$  легко установить с помощью известных соотношений геометрии. Площадь двух прорезей в кольце, имеющем внутренний  $r_1$  и внешний  $r_2$  радиусы,

$$s_{M_1} = 2 \frac{\pi\alpha}{360} (r_2^2 - r_1^2). \quad (5)$$

С учетом (5) соотношение (1) примет вид

$$\delta = \frac{s_{M_1}}{s} = \frac{\alpha}{180}. \quad (6)$$

Из (6) видно, что при изменении угла от 0 до 180° относительная площадь прорезей формально может изменяться от 0 до 1. Таким образом, в предложенном на рис. 1 варианте распыляемого узла влияние величины (1) на стехиометрический коэффициент  $x$  можно определить с помощью выражений (2)–(4). Оценим возможность его применения для осаждения пленок сплава  $Ta_xTi_{1-x}$ .

Внимание, уделяемое этому материалу, обусловлено его привлекательными свойствами [9]–[14] – хорошей механической прочностью (10...12 МПа) и пониженным модулем упругости (74...84 ГПа) [9], превосходной коррозионной стойкостью и биосовместимостью. Сплав в бинарной системе Ti–Ta является потенциальным кандидатом на материалы для имплантатов [10], спрос на которые в настоящее время значительно возрастает. Традиционные материалы для имплантатов – нержавеющая сталь, сплавы Co–Cr, титан и его сплавы, уже много лет широко используются в медицинской сфере. Однако эти материалы потенциально могут вызвать некоторые проблемы со здоровьем пациентов из-за выделения токсичных ионов металлов и привести к резорбции прилегающих костных тканей вследствие большой разницы в модуле упругости между имплантатом и прилегающими костными тканями.

Этим не исчерпываются возможности обсуждаемых сплавов. Так, в [12] наблюдали его мартенситное превращение при температуре 225...250 °С, что делает материал полезным для изготовления высокотемпературных приводов в микроэлектромеханических системах. Много внимания уделено исследованию пленок твердых растворов оксидов, нитридов и оксинитридов титана и тантала [15]–[20].

Распыляемый узел был установлен на цилиндрическом сбалансированном магнетроне диаметром 130 мм. Внешняя пластина изготовлена из жаропрочного тантала, внутренняя – из титана. Кольцевая зона распыления внешней пластины имела внутренний и внешний диаметры 38 и 78 мм, соответственно. Выполним далее анализ процесса осаждения пленки  $Ta_xTi_{1-x}$  с помощью данного магнетрона, используя выражения (1)–(6), заменив в них подстрочные индексы  $M_1$  и  $M_2$  на  $Ta$  и  $Ti$ , соответственно.

Для определения величины  $Q_{Ta_{исп}}$  была использована оценка зависимости температуры внешней пластины от тока разряда  $I$  в форме экспоненты, полученная нами путем моделирования с помощью пакета COMSOL (рис. 2):

$$T_{Ta}(I) = 2830 - 2490e^{-0.264I} \quad (7)$$

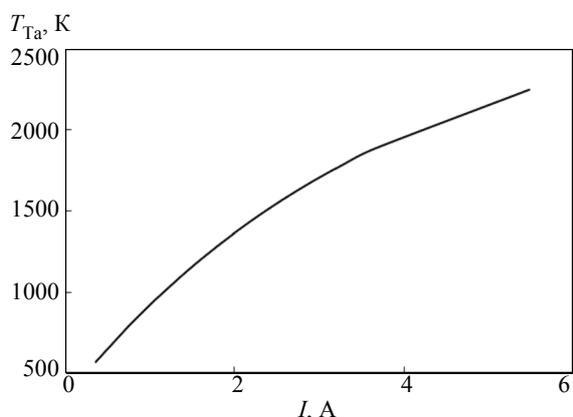


Рис. 2. Температура внешней пластины  
Fig. 2. External plate temperature

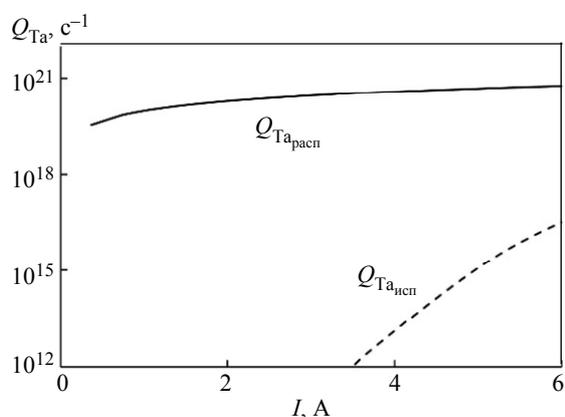


Рис. 3. Поток тантала  
Fig. 3. Tantalum flows

На рис. 3 представлены зависимости компонентов полного потока (3) для тантала. Вычисления, выполненные при значениях  $S_{Ta} = 0.6$  [21],  $\gamma_{Ta} = 0.082$  [22];  $A_{Ta} = 12.27$  и  $B_{Ta} = 40\,550$  К [23] с учетом (7), как это видно из рис. 3, позволяют считать испаренный поток с внешней пластины незначимым.

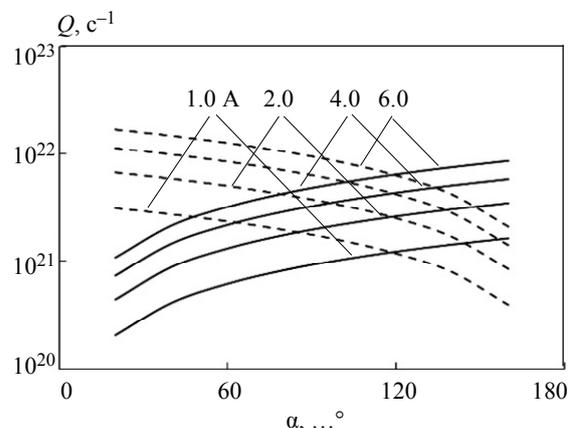


Рис. 4. Поток атомов металлов, распыляемых с пластин, при токах разряда 1.0...6.0 А (титан – сплошные линии, тантал – штриховые)  
Fig. 4. Flows of metal atoms sputtered from the plates at discharge currents of 1.0...6.0 А (titanium – solid lines, tantalum – dashed lines)

На рис. 4 даны зависимости потоков  $Ta$  (штриховые линии) и  $Ti$  (сплошные линии) от тока разряда, полученные с помощью выражений (3) и (4) соответственно. Из рис. 4 видно, что увеличение площади прорезей за счет увеличения угла сектора кольца способствует увеличению потока титана и уменьшению потока тантала. Однако это вовсе не означает, что ток разряда влияет на состав пленки  $Ta_xTi_{1-x}$ . Учитывая соотношение между потоками тантала на рис. 3, запишем (2), подставив в него (3) и (4):

$$x = \frac{(1-\delta)s \frac{jS_{Ta}}{e(1+\gamma_{Ta})}}{(1-\delta)s \frac{jS_{Ta}}{e(1+\gamma_{Ta})} + \delta s \frac{jS_{Ti}}{e(1+\gamma_{Ti})}} \quad (8)$$

Упрощая (8), приходим к простой формуле

$$x = \frac{1}{1 + \frac{\delta}{(1-\delta)} \frac{S_{Ti}(1+\gamma_{Ta})}{S_{Ta}(1+\gamma_{Ti})}} = \frac{180-\alpha}{180-0.482\alpha} \quad (9)$$

Преобразования в (9) выполнены при значениях  $S_{Ti} = 0.32$  [21],  $\gamma_{Ti} = 0.115$  [22]. Как следует из (9), состав пленки  $Ta_xTi_{1-x}$  не зависит от тока разряда. На него влияют только параметры металлов и площадь прорезей. Зависимость  $x = f(\alpha)$

представлена на рис. 5, из которого видно, что за счет изменения угла  $\alpha$  можно изменять состав пленки в широких пределах.

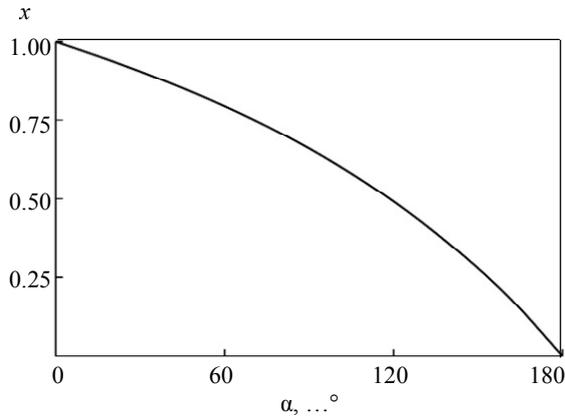


Рис. 5. Зависимость химического состава пленки сплава  $Ta_xTi_{1-x}$  от угла  $\alpha$

Fig. 5. Dependence of the chemical composition of the  $Ta_xTi_{1-x}$  alloy film on the angle  $\alpha$

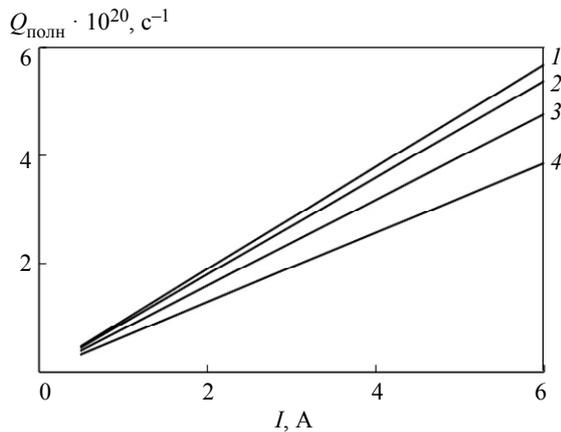


Рис. 6. Зависимость полного потока от тока разряда при  $\alpha, \dots^\circ$ : 1 – 0; 2 – 20; 3 – 60; 4 – 120

Fig. 6. Dependence of the total flow on the discharge current at  $\alpha, \dots^\circ$ : 1 – 0; 2 – 20; 3 – 60; 4 – 120

Ток разряда, как независимая переменная изучаемого процесса, значимо влияет главным образом на скорость роста пленки  $v$ , которая пропорциональна полному потоку  $Q_{\text{полн}}$ :

$$v \sim Q_{\text{полн}} = Q_{Ta_{\text{полн}}} + Q_{Ti_{\text{полн}}} = \frac{js}{e} \left[ (1 - \delta) \frac{S_{Ta}}{(1 + \gamma_{Ta})} + \delta \frac{S_{Ti}}{(1 + \gamma_{Ti})} \right]. \quad (10)$$

Из выражения (10) следует очевидная пропорциональность скорости роста пленки от тока разряда  $I = js$ , которую иллюстрирует рис. 6. Из этого рисунка видно также уменьшение скорости роста пленки  $Ta_xTi_{1-x}$  при увеличении угла  $\alpha$ , связанное с неравенством  $S_{Ta} > S_{Ti}$ .

Твердость долгое время считалась основным свойством материала, определяющим износостойкость [24]. Поэтому до некоторого времени научные исследования в области материаловедения пленок были направлены в основном на достижение сверхвысокой твердости с соответствующим высоким модулем упругости, последний из которых, как предполагает традиционная теория механики разрушения, также желателен для улучшения износа (за счет предотвращения распространения трещин). Однако имеются убедительные доказательства того, что модуль упругости также может оказывать важное влияние на поведение при износе. В частности, упругая деформация до разрушения, которая связана с соотношением твердости  $H$  и модуля упругости  $E$ , как было показано рядом авторов [12], более подходит для прогнозирования износостойкости, чем только твердость. В связи с этим представляет интерес влияние условий осаждения пленки сплава  $Ta_xTi_{1-x}$  на отношение  $H/E$  для нее.

В [12] приведены экспериментальные результаты, которые позволили в диапазоне  $0 < x < 1$  выразить зависимость  $H/E = f(x)$  в виде степенной функции

$$H/E = 0.121x^{0.36}. \quad (11)$$

После подстановки (9) в (11) была получена зависимость, приведенная на рис. 7.

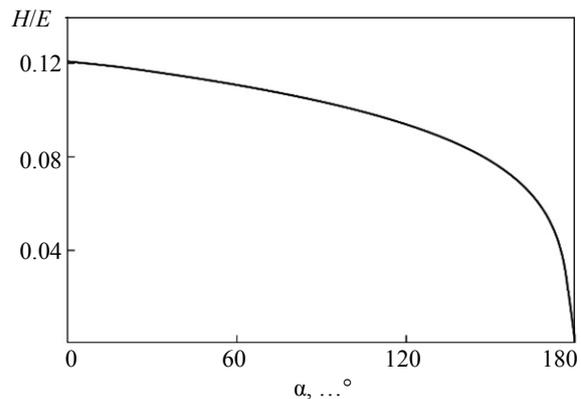


Рис. 7. Зависимость величины  $H/E$  от угла  $\alpha$   
Fig. 7. Dependence of the  $H/E$  value on the angle  $\alpha$

Из рис. 7 видно, что в диапазоне примерно  $0 \leq \alpha < 120^\circ$  величина  $H/E$  изменяется слабо ( $0.09 < H/E < 0.12$ ). В соответствии с (9) в этом диапазоне стехиометрический коэффициент изменяется от 0 до примерно 0.5. Выбор практически необходимого состава пленки сплава определяется ее реальным техническим применением.

Таким образом, в данной статье рассмотрена возможность применения для осаждения пленок сплава  $M_1xM_2(1-x)$  цилиндрического сбалансированного магнетрона, оснащенного новым двухслойным распыляемым узлом. Внутренняя пластина узла, изготовленная из металла  $M_2$ , эффективно охлаждалась проточной водой и распылялась через прорези во внешней пластине из металла  $M_1$ . Две прорези, расположенные симметрично в кольцевой зоне распыления внешней пластины, имели форму секторов кольца. Внешняя пластина работала в горячем режиме, подвергаясь нагреванию током разряда до высокой температуры, при которой в суммарном потоке металла  $M_1$  мог быть значимым испаренный компонент.

Анализ потоков атомов металлов, которые генерировал распыляемый узел, позволил установить, что при изменении относительной площади прорезей от 0 до 1 (угла сектора кольца от 0 до 180°) стехиометрический коэффициент  $x$  пленки  $M_1xM_2(1-x)$  мог изменяться от 1 до 0.

Результаты анализа были использованы для изучения влияния независимых переменных магнетронного распыления двухслойной мишени (тока разряда и угла сектора кольца) на химический состав пленки сплава  $Ta_xTi_{1-x}$ . В этом узле внешняя пластина, работающая в горячем режиме, была изготовлена из тантала, внутренняя холодная пластина – из титана. Установлено, что при токе разряда, который не превышал 6 А, испарение танталовой пластины незначимо и стехиометрический коэффициент в химической формуле пленки не зависел от тока разряда. Влияние на состав пленки угла сектора кольца задавала простая функция. Выполненный анализ дал возможность изучить влияние независимых переменных процесса распыления на физико-химические свойства пленок. Для примера установлено влияние значения угла сектора кольца на параметр, определяющий износостойкость пленки  $Ta_xTi_{1-x}$ .

Список литературы

1. Kumar A., Singh G. Surface modification of  $Ti_6Al_4V$  alloy via advanced coatings: Mechanical, tribological, corrosion, wetting, and biocompatibility studies // *J. Alloys Comp.* 2024. Vol. 989. P. 174418. doi: 10.1016/j.jallcom.2024.174418.

2. Cui Y.-W., Wang L., Zhang L.-C. Towards load-bearing biomedical titanium-based alloys: From essential requirements to future developments // *Progr. Mater. Sci.* 2024. Vol. 144. P. 101277. doi: 10.1016/j.pmatsci.2024.101277.

3. Binary and ternary metal oxide semiconductor thin films for effective gas sensing applications: A comprehensive review and future prospects / K. Sivaperuman, A. Thomas, R. Thangavel, L. Thirumalaisamy S., Palanivel, S. Pitchaimuthu, N. Ahsan, Y. Okada // *Progr. Mater. Sci.* 2024. Vol. 142. P. 101222. doi: 10.1016/j.pmatsci.2023.101222.

4. A comparative study on the hardness, stress and surface free energy of HfN films grown by HIPIMS and direct-current magnetron sputtering / K. Wang, Y. Liu, J. Katagiri, H. Sun, Y. Wang, L. Wang // *Surf. Coat. Technol.* 2024. Vol. 477. P. 130405. doi: 10.1016/j.surfcoat.2024.130405.

5. Li J., An Q., Fang H. Monte Carlo simulation of deposition uniformity in the triple-target magnetron co-sputtering system // *Appl. Surf. Sci.* 2024. Vol. 646. P. 158914. doi: 10.1016/j.apsusc.2023.158914.

6. Shapovalov V. I., Minzhulina E. A. Studying heating of magnetron target based on measurement of substrate temperature // *Vacuum.* 2019. Vol. 161. P. 324–327. doi: 10.1016/j.vacuum.2019.01.001.

7. Mechanical properties of titanium nitride films obtained by reactively sputtering with hot target / R. V. Babina, V. V. Smirnov, K. S. Kravchuk, E. V. Gladkikh, V. I. Sha-

povalov, I. L. Mylnikov // *J. Phys.: Confer. Ser.* 2017. Vol. 872. 012035. doi: 10.1088/1742-6596/872/1/012035.

8. Kozin A. A., Shapovalov V. I. Modeling of thermal processes in magnetrons with single hot target and «sandwich-target» // *Surf. Coat. Technol.* 2019. Vol. 359. P. 451–458. doi: 10.1016/j.surfcoat.2018.12.070.

9. Thampi V. V. A., Ramanathan S. Corrosion behavior of anodized Ti-Ta binary surface alloys in various physiological fluids for implant applications // *Corrosion Sci.* 2023. Vol. 219. P. 111233. doi: 10.1016/j.corsci.2023.111233.

10. 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 Combinatorial Sci.* 2018. Vol. 20, no. 3. P. 137–150. doi: 10.1021/acscombsci.7b00135.

11. A Study of Ti-Ta library and microstructure manufactured by magnetron sputtering / S. Barbos, A. Novac, R. Sprincenatu, M. Condol, I. Mitelea, C. Craciunescu // *Solid State Phenom.* 2016. Vol. 254. P. 97–101. doi: 10.4028/www.scientific.net/ss.

12. Compositional and Tribo-mechanical characterization of Ti-Ta coatings prepared by confocal dual magnetron co-sputtering / A. Bahrami, J. P. Álvarez, O. Depablos-Rivera, R. Mirabal-Rojas, A. Ruiz-Ramírez, S. Muhl, S. E. Rodil // *Adv. Engin. Mater.* 2017. Vol. 20, no. 3. P. 1700687. doi:10.1002/adem.201700687.

13. Nanostructured Ti-Ta thin films synthesized by combinatorial glancing angle sputter deposition / Y. Motemani, C. Khare, A. Savan, M. Hans, A. Paulsen, J. Frenzel, W. W. Schmahl, G. Eggeler, A. Ludwig // *Nanotechnol.* 2016. Vol. 27, no. 49. P. 495604. doi: 10.1088/0957-4484/27/49/495604.

14. Microstructure, shape memory effect and functional stability of  $Ti_{67}Ta_{33}$  thin films / Y. Motemani, P. M. Kadletz, B. Maier, R. Rynko, C. Somsen, A. Paulsen, J. Frenzel, W. W. Schmahl, G. Eggeler, A. Ludwig // *Advanced Engin. Materials*. 2015. Vol. 17, no. 10. P. 1425–1433. doi: 10.1002/adem.201400576.
15. Stress evolution in magnetron sputtered Ti–Zr–N and Ti–Ta–N films studied by in situ wafer curvature: Role of energetic particles / G. Abadias, L. E. Koutsokeras, P. Guerin, P. Patsalas // *Thin Solid Films*. 2009. Vol. 518, no. 5. P. 1532–1537. doi: 10.1016/j.tsf.2009.07.183.
16. Structural, optical and mechanical properties of Ti-doped  $Ta_2O_5$  films for PV glass covers / C. Rui, C. Haichao, L. Hang, L. Wenxue, X. Yujun // *Opt. Mater.* 2024. Vol. 147. P. 114680. doi: 10.1016/j.optmat.2023.114680.
17. Low-temperature Ta-doped  $TiO_x$  electron-selective contacts for high-performance silicon solar cells / L. Zhang, J. Qiu, Hao Cheng, Yu. Zhang, S. Zhong, L. Shi, H. Yin, R. Tong, Z. Sun, W. Shen, X. Song, Z. Huang // *Solar Energy Mater. Solar Cells*. 2024. Vol. 266. P. 112703. doi: 10.1016/j.solmat.2024.112703.
18. Thapliyal P., Panwar N. S., Rao G. M. Influence of post-deposition annealing on electrical and optical properties of  $(Ta_2O_5)_{1-x}(TiO_2)_x$  thin films,  $x \leq 0.08$  // *Ceram. Intern.* 2021. Vol. 47, no. 12. P. 16746–16751. doi: 10.1016/j.ceramint.2021.02.246.
19. Barybin A., Shapovalov V. Modification of Pawlow's thermodynamical model for the melting of small single-component particles // *J. Appl. Phys.* 2011. Vol. 109, no. 3. P. 034303-9. doi: 10.1063/1.3544468.
20. Simulation of the effect of argon pressure on thermal processes in the sputtering unit of a magnetron with a hot target / V. I. Shapovalov, H. Ahmedov, A. A. Kozin, A. Demir, B. Korutlu // *Vacuum*. 2021. Vol. 192. P. 110421. doi: 10.1016/j.vacuum.2021.110421.
21. Zhu S., Wang F., Wu W. Abnormal steady states in reactive sputtering // *J. Vac. Sci. Technol.* 1999. Vol. 17, no. 1. P. 70–76. doi: 10.1116/1.581552.
22. Depla D., Mahieu S., De Gryse R. Magnetron sputter deposition: Linking discharge voltage with target properties // *Thin Solid Films*. 2009. Vol. 517, no. 9. P. 2825–2839. doi: 10.1016/j.tsf.2008.11.108.
23. Dushman S. Scientific foundations of vacuum technique. New York and London: John Wiley and Sons Inc., 1962. 614 p. URL: <https://archive.org/details/in.ernet.dli.2015.7979/page/n17/mode/2up> (дата обращения: 10.10.2024).
24. Leyland A., Matthews A. On the significance of the H/E ratio in wear control: a nanocomposite coating approach to optimised tribological behaviour // *Wear*. 2000. Vol. 246, no. 1–2. P. 1–11. doi: 10.1016/s0043-1648(00)00488-9.

#### Информация об авторах

**Иванов Никита Максимович** – студент гр. 8205 СПбГЭТУ «ЛЭТИ».  
E-mail: [nikitosiv@list.ru](mailto:nikitosiv@list.ru)

**Шаповалов Виктор Иванович** – д-р техн. наук, профессор кафедры физической электроники и технологии СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Почетный работник высшего профессионального образования РФ.  
E-mail: [vishapovalov@mail.ru](mailto:vishapovalov@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0003-2196-6851>

**Шарковский Даниил Сергеевич** – студент гр. 9208 СПбГЭТУ «ЛЭТИ».  
E-mail: [sharkovskiy.d@yandex.ru](mailto:sharkovskiy.d@yandex.ru)

#### References

1. Kumar A., Singh G. Surface modification of  $Ti_6Al_4V$  alloy via advanced coatings: Mechanical, tribological, corrosion, wetting, and biocompatibility studies // *J. Alloys Comp.* 2024. Vol. 989. P. 174418. doi: 10.1016/j.jallcom.2024.174418.
2. Cui Y.-W., Wang L., Zhang L.-C. Towards load-bearing biomedical titanium-based alloys: From essential requirements to future developments // *Progr. Mater. Sci.* 2024. Vol. 144. P. 101277. doi: 10.1016/j.pmatsci.2024.101277.
3. Binary and ternary metal oxide semiconductor thin films for effective gas sensing applications: A comprehensive review and future prospects / K. Sivaperuman, A. Thomas, R. Thangavel, L. Thirumalaisamy S., Palanivel, S. Pitchaimuthu, N. Ahsan, Y. Okada // *Progr. Mater. Sci.* 2024. Vol. 142. P. 101222. doi: 10.1016/j.pmatsci.2023.101222.
4. A comparative study on the hardness, stress and surface free energy of HfN films grown by HIPIMS and direct-current magnetron sputtering / K. Wang, Y. Liu, J. Katagiri, H. Sun, Y. Wang, L. Wang // *Surf. Coat. Technol.* 2024. Vol. 477. P. 130405. doi: 10.1016/j.surfcoat.2024.130405.
5. Li J., An Q., Fang H. Monte Carlo simulation of deposition uniformity in the triple-target magnetron co-sputtering system // *Appl. Surf. Sci.* 2024. Vol. 646. P. 158914. doi: 10.1016/j.apsusc.2023.158914.
6. Shapovalov V. I., Minzhulina E. A. Studying heating of magnetron target based on measurement of substrate temperature // *Vacuum*. 2019. Vol. 161. P. 324–327. doi: 10.1016/j.vacuum.2019.01.001.
7. Mechanical properties of titanium nitride films obtained by reactively sputtering with hot target / R. V. Babinova, V. V. Smirnov, K. S. Kravchuk, E. V. Gladkikh, V. I. Sha-

povalov, I. L. Mylnikov // J. Phys.: Confer. Ser. 2017. Vol. 872. 012035. doi: 10.1088/1742-6596/872/1/012035.

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

9. Thampi V. V. A., Ramanathan S. Corrosion behavior of anodized Ti-Ta binary surface alloys in various physiological fluids for implant applications // Corrosion Sci. 2023. Vol. 219. P. 111233. doi: 10.1016/j.corsci.2023.111233.

10. 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 Combinatorial Sci. 2018. Vol. 20, no. 3. P. 137–150. doi: 10.1021/acscombsci.7b00135.

11. A Study of Ti-Ta library and microstructure manufactured by magnetron sputtering. / S. Barros, A. Novac, R. Sprincenatu, M. Condel, I. Mitelea, C. Cra-ciunescu // Solid State Phenom. 2016. Vol. 254. P. 97–101. doi: 10.4028/www.scientific.net/ss.

12. Compositional and Tribo-mechanical characterization of Ti-Ta coatings prepared by confocal dual magnetron co-sputtering / A. Bahrami, J. P. Álvarez, O. Depablos-Rivera, R. Mirabal-Rojas, A. Ruíz-Ramírez, S. Muhl, S. E. Rodil // Adv. Engin. Mater. 2017. Vol. 20, no. 3. P. 1700687. doi:10.1002/adem.201700687.

13. Nanostructured Ti-Ta thin films synthesized by combinatorial glancing angle sputter deposition / Y. Motemani, C. Khare, A. Savan, M. Hans, A. Paulsen, J. Frenzel, W. W. Schmahl, G. Eggeler, A. Ludwig // Nanotechnol. 2016. Vol. 27, no. 49. P. 495604. doi: 10.1088/0957-4484/27/49/495604.

14. Microstructure, shape memory effect and functional stability of  $Ti_{67}Ta_{33}$  thin films / Y. Motemani, P. M. Kadletz, B. Maier, R. Rynko, C. Somsen, A. Paulsen, J. Frenzel, W. W. Schmahl, G. Eggeler, A. Ludwig // Advanced Engin. Materials. 2015. Vol. 17, no. 10. P. 1425–1433. doi: 10.1002/adem.201400576.

15. Stress evolution in magnetron sputtered Ti-Zr-N and Ti-Ta-N films studied by in situ wafer curvature: Role of energetic particles / G. Abadias, L. E. Koutsok-

ras, P. Guerin, P. Patsalas // Thin Solid Films. 2009. Vol. 518, no. 5. P. 1532–1537. doi: 10.1016/j.tsf.2009.07.183.

16. Structural, optical and mechanical properties of Ti-doped  $Ta_2O_5$  films for PV glass covers / C. Rui, C. Haichao, L. Hang, L. Wenxue, X. Yujun // Opt. Mater. 2024. Vol. 147. P. 114680. doi: 10.1016/j.optmat.2023.114680.

17. Low-temperature Ta-doped  $TiO_x$  electron-selective contacts for high-performance silicon solar cells / L. Zhang, J. Qiu, Hao Cheng, Yu. Zhang, S. Zhong, L. Shi, H. Yin, R. Tong, Z. Sun, W. Shen, X. Song, Z. Huang // Solar Energy Mater. Solar Cells. 2024. Vol. 266. P. 112703. doi: 10.1016/j.solmat.2024.112703.

18. Thapliyal P., Panwar N. S., Rao G. M. Influence of post-deposition annealing on electrical and optical properties of  $(Ta_2O_5)_{1-x}(TiO_2)_x$  thin films,  $x \leq 0.08$  // Ceram. Intern. 2021. Vol. 47, no. 12. P. 16746–16751. doi: 10.1016/j.ceramint.2021.02.246.

19. Barybin A., Shapovalov V. Modification of Pawlow's thermodynamical model for the melting of small single-component particles // J. Appl. Phys. 2011. Vol. 109, no. 3. P. 034303-9. doi: 10.1063/1.3544468.

20. Simulation of the effect of argon pressure on thermal processes in the sputtering unit of a magnetron with a hot target / V. I. Shapovalov, H. Ahmedov, A. A. Kozin, A. Demir, B. Korutlu // Vacuum. 2021. Vol. 192. P. 110421. doi: 10.1016/j.vacuum.2021.110421.

21. Zhu S., Wang F., Wu W. Abnormal steady states in reactive sputtering // J. Vac. Sci. Technol. 1999. Vol. 17, no. 1. P. 70–76. doi: 10.1116/1.581552.

22. Depla D., Mahieu S., De Gryse R. Magnetron sputter deposition: Linking discharge voltage with target properties // Thin Solid Films. 2009. Vol. 517, no. 9. P. 2825–2839. doi: 10.1016/j.tsf.2008.11.108.

23. Dushman S. Scientific foundations of vacuum technique. New York and London: John Wiley and Sons Inc., 1962. 614 p. URL: <https://archive.org/details/in.ernet.dli.2015.7979/page/n17/mode/2up> (data obrasheniya: 10.10.2024).

24. Leyland A., Matthews A. On the significance of the H/E ratio in wear control: a nanocomposite coating approach to optimised tribological behaviour // Wear. 2000. Vol. 246, no. 1–2. P. 1–11. doi: 10.1016/s0043-1648(00)00488-9.

#### Information about the authors

**Nikita M. Ivanov** – student gr. 8205, Saint Petersburg Electrotechnical University.  
E-mail: [nikitosiv@list.ru](mailto:nikitosiv@list.ru)

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

E-mail: [vishapovalov@mail.ru](mailto:vishapovalov@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0003-2196-6851>

**Daniil S. Sharkovskii** – student gr. 9208, Saint Petersburg Electrotechnical University.  
E-mail: [sharkovskiy.d@yandex.ru](mailto:sharkovskiy.d@yandex.ru)

Статья поступила в редакцию 29.07.2024; принята к публикации после рецензирования 19.11.2024; опубликована онлайн 27.01.2025.

Submitted 29.07.2024; accepted 19.11.2024; published online 27.01.2025.