

## Моделирование кинетики нагрева подложки при распылении сэндвич-мишени медь-титан

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

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

✉ vishapovalov@mail.ru

**Аннотация.** Статья посвящена изучению особенностей формирования теплового потока при распылении в аргоне сэндвич-мишени, содержащей внутреннюю медную и внешнюю титановую пластины. Кинетика теплового потока, который генерирует внешняя пластина, была определена численным решением двумерного однородного уравнения Фурье с совокупностью граничных и нулевом начальном условиями. Для численных расчетов был использован модуль «Теплопередача» пакета COMSOL Multiphysics. При расчетах размер элемента сетки был выбран равным 3.64 мм, что обеспечивает погрешность расчета  $\leq 5\%$ . Результаты решения уравнения Фурье во временном диапазоне 0...500 с с шагом 1 с представляли собой совокупность распределений поверхностной температуры внешней пластины. При изучении тепловых потоков внешняя пластина была представлена в виде совокупности концентрических источников излучения с постоянной температурой поверхности. Центральный источник имел форму диска, все остальные – кольца. Геометрические размеры источников и их температуры были определены посредством решения задачи ступенчатой аппроксимации распределения поверхностной температуры внешней пластины с относительной погрешностью 10%. В данной статье представлены отдельные результаты расчетов для мощности 1000 Вт и относительной суммарной площади прорезей 0.25. Выполнено сравнение расчетных и экспериментальных данных.

**Ключевые слова:** магнетронное распыление, сэндвич-мишень, тепловой поток

**Для цитирования:** Шаповалов В. И., Шарковский Д. С. Моделирование кинетики нагрева подложки при распылении сэндвич-мишени медь-титан // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 7. С. 5–14. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-7-5-14.

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

Original article

## Modeling of the Substrate Heating Kinetics During Sputtering of a Copper-Titanium Sandwich Target

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

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ vishapovalov@mail.ru

**Abstract.** This study focuses on the special aspects of the heat flow formation during the sputtering of a sandwich target with an internal copper plate and an external titanium one in argon. The kinetics of the heat flow generated by the external plate was determined by the numerical solution of the two-dimensional uniform Fourier's equation with a set of boundary and zero initial conditions. The Heat Transfer Module of the COMSOL

Multiphysics software was used for numerical calculations. In calculations, the grid element size was chosen to be 3.64 mm, which ensures a calculation error of  $\leq 5\%$ . Solving the Fourier's equation in the time range of 0...500 s with a step of 1 s resulted in a set of the surface temperature distributions of the external plate. When studying heat flows, the external plate was presented as a set of concentric radiation sources with a constant surface temperature. The central source had the shape of a disk, all the others were ring-shaped. The geometric dimensions of the sources and their temperatures were determined by solving the problem of stepwise approximation of the external plate's surface temperature distribution with a relative error of 10%. This article provides calculation results for power of 1,000 W and total relative area of the cutouts of 0.25. The comparison of calculated and experimental data is presented.

**Keywords:** magnetron sputtering, sandwich target, heat flow

**For citation:** Shapovalov V. I., Sharkovskii D. S. Modeling of the Substrate Heating Kinetics During Sputtering of a Copper-Titanium Sandwich Target // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2023. Vol. 16, no. 7. P. 5–14. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-7-5-14.

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

**Введение.** Большое внимание в мире привлекают неорганические пленки и покрытия в виде бинарных сплавов или бинарных твердых растворов простых соединений (оксидов, нитридов и др.) разных металлов. В настоящее время задачей синтеза этих покрытий заняты многие ведущие мировые исследовательские центры. Наибольшее внимание в них уделяют нитриду TiAlN [1], [2]. Кроме этого, к таким соединениям относятся оксиды TiTaO [3], TiAlO [4], TiCrO [5], MoAlO [6] или нитриды TiCrN [7], MoCrN [8] и др.

Для нанесения данных пленок обычно используют два магнетрона с холодными мишенями [2], магнетрон с комбинированной холодной мишенью [8] или магнетрон с одинарной прессованной мишенью [9], [10]. Каждый из этих методов имеет преимущества и недостатки. Традиционно в таких устройствах мишень эффективно охлаждается.

Одновременно с этим изучают возможности магнетронов с мишенями, которые могут быть нагреты вплоть до температуры плавления и выше [11]–[15]. Режим горячей мишени обеспечивают за счет отвода тепла от нее через зазор шириной до 1 мм и по элементам крепления. Нагревание подложки при распылении горячих мишеней изучены многими авторами [16]–[19].

Развивая технику магнетронного распыления, мы предложили магнетрон, оснащенный распыляемым узлом, который назвали сэндвич-мишенью [20], [21]. Сэндвич-мишень, имеющая перспективы для осаждения пленок бинарных сплавов или бинарных твердых растворов простых соединений металлов, содержит две параллельные пластины, закрепленные с малым зазором (1–2 мм) на одной оси. Внутренняя пластина работает в холодном режиме, внешняя – в горячем и имеет

прорези, через которые распыляется внутренняя пластина. Магнетроны с сэндвич-мишенями находятся на начальной стадии исследования.

Цель данных исследований состояла в теоретическом и экспериментальном изучении тепловых процессов при распылении сэндвич-мишени, содержащей внутреннюю медную и внешнюю титановую пластины.

**Моделируемая мишень.** Объектом исследования в данной работе служил плоский цилиндрический сбалансированный магнетрон постоянного тока диаметром 130 мм, оснащенный сэндвич-мишенью. Мишень состояла из внутренней водоохлаждаемой медной пластины толщиной 4 мм, на которой с зазором 1 мм была закреплена внешняя пластина из титана толщиной 1 мм, работающая в горячем режиме. В экспериментально установленной кольцевой области распыления внешней пластины, имеющей площадь  $36.5\text{ см}^2$ , были изготовлены восемь круглых прорезей заданного диаметра. Было принято, что диаметры прорезей составляют 12 мм и мощность, выделяемая на мишени за счет ее бомбардировки ионами аргона, равна 1000 Вт. Причем вся она расходуется исключительно на нагревание сэндвич-мишени. Моделирование, выполненное только для одной мощности, позволило выявить характерные особенности тепловых процессов на сэндвич-мишени и уточнить методику вычислений. Принято, что для экспериментального исследования тепловых процессов, происходящих на подложках, использован термопарный датчик с чувствительным элементом в виде медного диска, имеющего площадь  $100\text{ мм}^2$ .

Поскольку площадь стенки вакуумной камеры существенно превышает площадь чувствительного

элемента теплового датчика, можно допустить, что она, имея температуру  $\approx 300$  К, служит основным приемником излучения нагретой мишени.

Кинетика нагревания сэндвич-мишени была изучена по изменению распределения температуры поверхности внешней пластины, для чего использовалось двухмерное однородное уравнение Фурье [20]

$$\frac{dT(x, y, t)}{dt} - a^2 \Delta T(x, y, t) = 0, \quad (1)$$

где  $x$  и  $y$  – координаты на поверхности пластины;  $a$  – коэффициент теплопроводности.

Для решения уравнения (1) был использован модуль «Теплопередача» пакета COMSOL Multiphysics. С особенностью геометрической модели системы вакуумная камера–мишень магнетрона можно ознакомиться в [22], там же приведены граничные условия задачи. В качестве начального условия принято  $T(x, y, 0) = 293$  К.

**Результаты и обсуждение.** Результат решения уравнения (1) дает возможность определить кинетику теплового потока, генерируемого нагретой внешней пластиной. При незначительном градиенте поверхностной температуры этот поток связан с эффективной температурой:

$$T_{\text{эф}}(t) = \frac{1}{F_{\text{изл}}} \iint T(x, y, t) dx dy, \quad (2)$$

где  $F_{\text{изл}}$  – площадь излучающей поверхности верхней пластины. При этом тепловой поток в соответствии с законом Стефана–Больцмана равен

$$Q_{\text{рад}}(t) = \sigma(\epsilon_{\text{миш}} T_{\text{эф}}^4(t) - \epsilon_{\text{п.и}} T_{\text{п.и}}^4) F_{\text{изл}}, \quad (3)$$

где  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$  Вт  $\cdot$  м<sup>-2</sup>  $\cdot$  К<sup>-4</sup> – постоянная Стефана–Больцмана;  $\epsilon_{\text{миш}}$  – коэффициент излучения мишени;  $\epsilon_{\text{п.и}}$  и  $T_{\text{п.и}}$  – коэффициент излучения и температура приемника излучения.

На рис. 1 приведены части типичных мгновенных распределений температуры поверхности внешней пластины при  $x > 0$  в осевом сечении, проходящем между прорезями. Очевидно, что в сечениях, которые включают прорези, температура в этих интервалах будет скачками уменьшаться до значений, соответствующих температуре внутренней пластины. Стационарное состояние возникает при  $t > 500$  с. Характерной чертой распределений на рис. 1 являются максимумы, расположенные вблизи распыляемой области пластины, имеющей форму кольца. На рис. 2 даны кинетические кривые для четырех характерных точек в сечении пластины ( $x = 0$  – центр;  $x_{T_{\text{max}}}$  – точка максимальной температуры;  $x_{T_{\text{max}}/2}$  – точка, соответствующая половине максимальной температуры;  $x = 65$  мм – точка на краю пластины). Кривые построены по распределениям, приведенным на рис. 1. Как видно из рис. 1 и 2, процесс увеличения температуры во всех точках пластины имеет экспоненциальный характер.

Нет оснований полагать, что вплоть до плавления форма мгновенного распределения температуры поверхности внешней пластины зависит от мощности, выделяемой на мишени. Такая зависимость возможна только для основных параметров

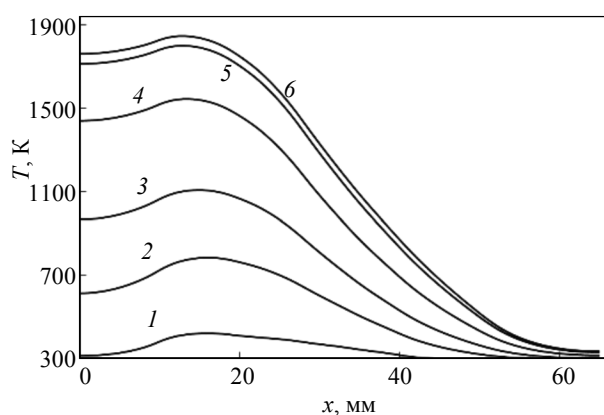


Рис. 1. Распределения температуры поверхности внешней пластины в разные моменты времени: 1 –  $t = 1$  с; 2 –  $t = 5$  с; 3 –  $t = 10$  с; 4 –  $t = 20$  с; 5 –  $t = 40$  с; 6 –  $t > 500$  с

Fig. 1. The outer plate's surface temperature distributions at different time points:

1 –  $t = 1$  s; 2 –  $t = 5$  s; 3 –  $t = 10$  s; 4 –  $t = 20$  s; 5 –  $t = 40$  s; 6 –  $t > 500$  s

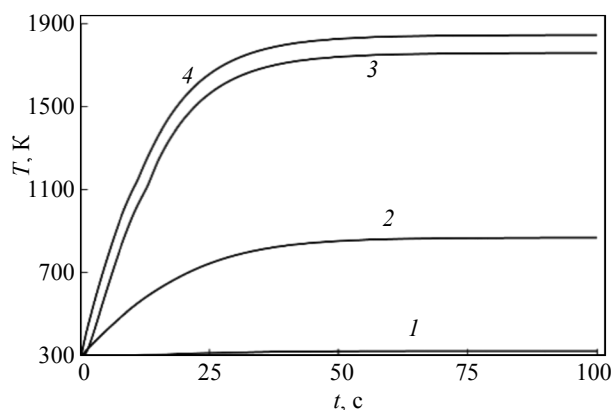


Рис. 2. Кинетические кривые нагревания поверхности внешней пластины в характерных точках:

1 –  $x = 65$  мм; 2 –  $x = x_{T_{\text{max}}/2}$ ; 3 –  $x = 0$  мм; 4 –  $x = x_{T_{\text{max}}}$

Fig. 2. Kinetic curves of heating of the surface of the outer plate at characteristic points:

1 –  $x = 65$  мм; 2 –  $x = x_{T_{\text{max}}/2}$ ; 3 –  $x = 0$  мм; 4 –  $x = x_{T_{\text{max}}}$

этого распределения, к которым относятся распределение температуры в стационарном состоянии и постоянная времени его достижения.

Из рис. 1 видно, что в связи со значительным градиентом  $T(x, y)_{t=\text{const}}$  прямое применение (2) для определения потока (3) приведет к значительной ошибке, поэтому для расчета теплового потока, который генерирует внешняя пластина, используем модель. В ней поверхность пластины представим в виде ряда концентрических фигур. Центральную область образует круг при  $x = 0$  с радиусом  $r_1$ . Все последующие будут представлять собою концентрические кольца с внутренним и внешним радиусами  $r_i$  и  $r_{i+1}$ ,  $i = 1, 2, \dots, N-1$ , соответственно. Допустим, что распределение температуры на поверхности каждого кольца  $T^*(x_i)$  постоянно и может быть вычислено в виде среднего значения:

$$T^*(x_i) = \frac{T(r_{i+1}) + T(r_i)}{2}, \quad (4)$$

где  $x_i = (r_{i+1} + r_i)/2$  – радиус центральной окружности  $i$ -го кольца;  $T(r_{i+1})$  и  $T(r_i)$  – расчетные значения температуры  $T(x)$  (см. рис. 1) на его границах. Для отыскания значений  $r_i$  и  $T^*(x_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, N-1$ , была выполнена ступенчатая аппроксимация зависимости  $T(x)$  для каждого значения  $t$  при заданной суммарной относительной погрешности  $\delta^2$ . При вычислениях было учтено, что  $r_{i+1} \leq 65$  мм.

Для центрального круга с радиусом  $r_1$  выражение (4) приняло вид

$$T^*(0) = \frac{T(0) + T(r_1)}{2}, \quad (5)$$

где  $T(0)$  – расчетное значение температуры в центре пластины (см. рис. 1 при  $x = 0$ ).

Пример результата аппроксимации с учетом (4) и (5) приведен на рис. 3 (числами над кривой обозначены номера фрагментов внешней пластины мишени). Полные сведения об аппроксимации  $T(x)$  для каждой  $i$ -й фигуры даны в столбцах табл. 1.

Используем далее предложенную модель для оценки кинетики теплового потока, падающего на поверхность удаленного чувствительного элемента теплового датчика, использованного в данной статье.

В каждой  $i$ -й строке табл. 1 содержатся данные о кинетике нагревания  $i$ -й фигуры в принятой модели поверхности внешней пластины. Каждая из них в соответствии с (4) излучает поток тепла:

$$Q_{\text{рад},i}(t) = \sigma [\varepsilon_{\text{миш}} T_i^{*4}(t) - \varepsilon_{\text{п.и}} T_{\text{п.и}}^4] \Delta F_i, \quad (6)$$

где  $\Delta F_i$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, N-1$  – площадь концентрической фигуры внешней пластины ( $i = 0$  соответствует центральному кругу).

Табл. 1. Ступенчатая аппроксимация функций  $T(x, t)$   
Tab. 1. Stepwise approximation of functions  $T(x, t)$

| $i$                   | $r_i$ , мм | $x_i$ , мм | $T^*(x_i)$ , К |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------|------------|------------|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                       |            |            | $t$ , с        |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|                       |            |            | 1              | 5    | 10   | 20   | 30   | 40   | 60   | 100  | 200  | 500  |
| 0                     | –          | 0          | 319            | 623  | 975  | 1445 | 1642 | 1717 | 1756 | 1763 | 1764 | 1764 |
| 1                     | 4          | 6          | 338            | 658  | 1006 | 1470 | 1664 | 1737 | 1776 | 1783 | 1784 | 1784 |
| 2                     | 8          | 10         | 381            | 722  | 1061 | 1514 | 1703 | 1775 | 1813 | 1820 | 1821 | 1821 |
| 3                     | 12         | 14.5       | 415            | 772  | 1098 | 1530 | 1712 | 1782 | 1819 | 1827 | 1827 | 1827 |
| 4                     | 17         | 20         | 412            | 758  | 1058 | 1450 | 1622 | 1689 | 1726 | 1734 | 1734 | 1734 |
| 5                     | 23         | 24.5       | 396            | 708  | 977  | 1324 | 1484 | 1550 | 1586 | 1594 | 1595 | 1595 |
| 6                     | 26         | 27.5       | 383            | 654  | 891  | 1198 | 1348 | 1412 | 1448 | 1456 | 1457 | 1457 |
| 7                     | 29         | 30         | 371            | 604  | 812  | 1084 | 1224 | 1285 | 1321 | 1329 | 1330 | 1330 |
| 8                     | 31         | 32.5       | 358            | 554  | 735  | 975  | 1104 | 1162 | 1198 | 1206 | 1206 | 1206 |
| 9                     | 34         | 36.5       | 337            | 482  | 624  | 820  | 930  | 983  | 1015 | 1023 | 1023 | 1023 |
| 10                    | 39         | 41         | 314            | 408  | 513  | 664  | 753  | 797  | 825  | 832  | 832  | 832  |
| 11                    | 43         | 44.5       | 301            | 364  | 443  | 561  | 633  | 669  | 693  | 698  | 699  | 699  |
| 12                    | 46         | 47         | 296            | 341  | 404  | 499  | 558  | 588  | 608  | 613  | 613  | 613  |
| 13                    | 48         | 50.5       | 294            | 321  | 363  | 429  | 470  | 492  | 506  | 509  | 509  | 509  |
| 14                    | 53         | 55.5       | 293            | 304  | 324  | 358  | 380  | 391  | 399  | 401  | 401  | 401  |
| 15                    | 58         | 61.5       | 293            | 297  | 307  | 325  | 337  | 344  | 348  | 349  | 349  | 349  |
| $Q_{\text{рад}}$ , Вт | –          | –          | 0.59           | 8.27 | 32.4 | 118  | 188  | 223  | 245  | 249  | 250  | 250  |

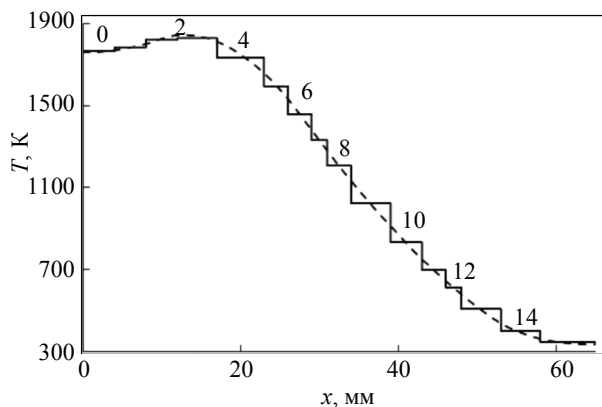


Рис. 3. Ступенчатая аппроксимация распределения температуры поверхности внешней пластины для стационарного режима

Fig. 3. Stepwise approximation of the outer plate's surface temperature distribution for the stationary mode

На рис. 4 для примера представлена часть кинетических кривых мощности, излучаемой фрагментами внешней пластины. Точки перегиба на всех зависимостях, показанных на рис. 4, связаны с уменьшением влияния на обмен энергией постоянной температуры стенки при возрастающей температуре внешней пластины.

Кинетику суммарного излучения мощности внешней пластиной отражают последняя строка табл. 1 и рис. 5. Как видно из рис. 5, в стационарном режиме при мощности 1000 Вт, выделенной на сэндвич-мишени, излучаемая мощность не превышает 250 Вт. При выполнении этих расчетов было учтено, что часть колец содержит фрагменты отверстий, через которые происходит распыление внутренней пластины. Излучающие площади этих колец (см. (6)) были соответствующим образом уменьшены.

На удаленной поверхности с учетом (6) внешняя пластина создает поток

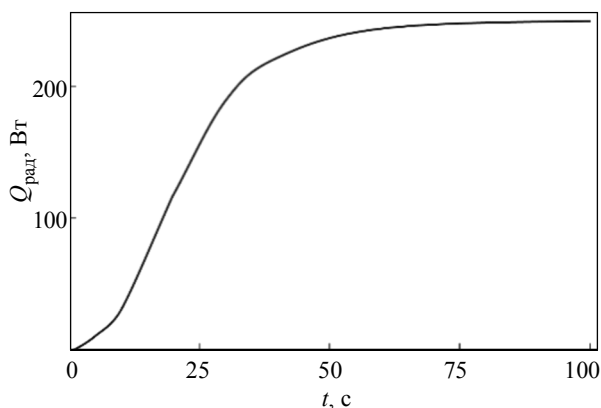


Рис. 5. Кинетика суммарного теплового потока, излучаемого внешней пластиной сэндвич-мишени

Fig. 5. Kinetics of the total heat flux emitted by the sandwich target's outer plate

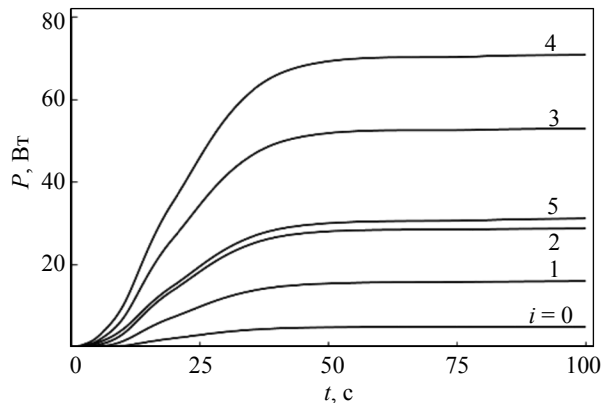


Рис. 4. Кинетические кривые мощности, излучаемой i-ми фрагментами внешней пластины мишени (концентрическими фигурами)

Fig. 4. Kinetic curves of the power emitted by the  $i^{\text{th}}$  fragments of the target's outer plate (concentric figures)

$$Q_{\text{рад}}(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \varphi_i Q_{\text{рад}_i}(t), \quad (7)$$

где  $\varphi_i$  – угол видимости или угловой коэффициент излучения, определяемый как доля теплового потока, падающего на заданную поверхность, от полного теплового потока, излучаемого источником. Напомним, что приемником излучения служит диск площадью 100 мм<sup>2</sup>, который расположен на одной оси с внешней пластиной на расстоянии 110 мм. Вычисления были выполнены по данным из табл. 1 с помощью методик из [23]. Результаты сведены в столбец 2 табл. 2. Кроме этого в последующих столбцах даны потоки, которые излучает каждый  $i$ -й фрагмент внешней пластины в моменты времени 1, 5, 10 с и т. д.

Для наглядности на рис. 6 показано распределение угла видимости на поверхности внешней пластины, которое имеет максимум при  $x = 0$ . В последней строке табл. 2 и на рис. 7 даны результаты вычисления с помощью (7) кинетической зависимости полного потока при стационарном состоянии мишени, падающего на поверхность чувствительного элемента теплового датчика.

Проверка адекватности результата, приведенного на рис. 7, была выполнена нами путем сравнения с результатами измерения кинетики нагрева чувствительного элемента теплового сенсора.

На рис. 8 даны типичные экспериментальные результаты, полученные для сэндвич-мишени, описанной выше, при давлении аргона 4 мторр. Рис. 8, а отражает фрагмент зависимости от тока разряда мощности, выделяемой на мишени. Зависимость построена по вольтамперной характеристике разряда, которая имела характерный для

Табл. 2. Углы видимости и тепловые потоки на датчике  
Tab. 2. Visibility angles and heat fluxes on the sensor

| i                            | $\varphi_i \cdot 10^{-3}$ | $Q_{\text{рад}}, \text{ мВт}$ |      |      |      |       |       |       |       |       |       |
|------------------------------|---------------------------|-------------------------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                              |                           | t, с                          |      |      |      |       |       |       |       |       |       |
|                              |                           | 1                             | 5    | 10   | 20   | 30    | 40    | 60    | 100   | 200   | 500   |
| 0                            | 2.62                      | 0.004                         | 0.2  | 1.27 | 6.18 | 10.30 | 12.32 | 13.48 | 13.70 | 13.73 | 13.73 |
| 1                            | 2.61                      | 0.02                          | 0.8  | 4.3  | 19.7 | 32.4  | 38.5  | 42.1  | 42.8  | 42.9  | 42.9  |
| 2                            | 2.59                      | 0.10                          | 1.9  | 8.8  | 36.7 | 58.8  | 69.4  | 75.6  | 76.8  | 76.9  | 76.9  |
| 3                            | 2.55                      | 0.28                          | 4.4  | 18.1 | 68.4 | 107.3 | 126.0 | 136.8 | 139.2 | 139.2 | 139.2 |
| 4                            | 2.49                      | 0.43                          | 6.5  | 25.2 | 89.2 | 139.7 | 164.3 | 179.2 | 182.5 | 182.5 | 182.5 |
| 5                            | 2.46                      | 0.14                          | 1.9  | 7.1  | 24.3 | 38.3  | 45.6  | 50.0  | 51.0  | 51.2  | 51.2  |
| 6                            | 2.43                      | 0.09                          | 1.1  | 4.1  | 13.4 | 21.5  | 25.9  | 28.6  | 29.3  | 29.4  | 29.4  |
| 7                            | 2.41                      | 0.06                          | 0.6  | 2.1  | 6.6  | 10.8  | 13.1  | 14.6  | 15.0  | 15.0  | 15.0  |
| 8                            | 2.37                      | 0.09                          | 0.8  | 2.7  | 8.5  | 14    | 17.2  | 19.4  | 20.0  | 20.0  | 20.0  |
| 9                            | 2.28                      | 0.15                          | 1.3  | 3.9  | 12.1 | 20.2  | 25.2  | 28.7  | 29.6  | 29.6  | 29.6  |
| 10                           | 2.23                      | 0.06                          | 0.5  | 1.5  | 4.6  | 7.8   | 9.8   | 11.3  | 11.7  | 11.7  | 11.7  |
| 11                           | 2.20                      | 0.02                          | 0.2  | 0.6  | 1.8  | 3.0   | 3.8   | 4.4   | 4.6   | 4.6   | 4.6   |
| 12                           | 2.18                      | 0.005                         | 0.1  | 0.3  | 0.8  | 1.2   | 1.6   | 1.8   | 1.9   | 1.9   | 1.9   |
| 13                           | 2.07                      | 0.005                         | 0.1  | 0.4  | 0.9  | 1.5   | 1.8   | 2.1   | 2.1   | 2.1   | 2.1   |
| 14                           | 1.99                      | 0.001                         | 0.04 | 0.14 | 0.34 | 0.50  | 0.60  | 0.67  | 0.69  | 0.69  | 0.69  |
| 15                           | 1.86                      | 0.0001                        | 0.02 | 0.08 | 0.21 | 0.30  | 0.36  | 0.40  | 0.41  | 0.41  | 0.41  |
| $Q_{\text{рад}}, \text{ Вт}$ | –                         | 1.4                           | 20.4 | 80.5 | 294  | 468   | 556   | 609   | 621   | 622   | 622   |

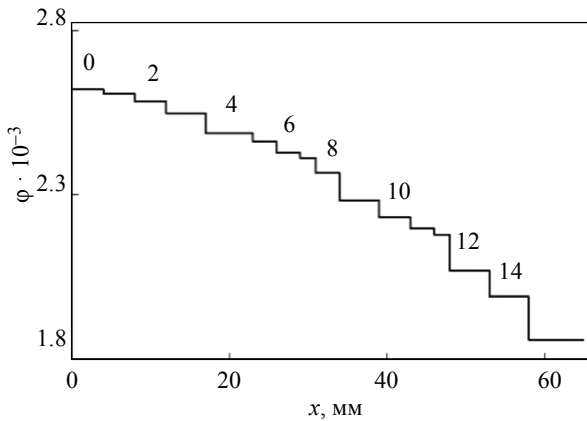


Рис. 6. Угловой коэффициент излучения фрагментов внешней пластины мишени (концентрических фигур)  
Fig. 6. Angular emission coefficient of the fragments of the target's outer plate (concentric figures)

магнетрона с сэндвич-мишенью максимум [20]. Известно, что в процессе распыления часть мощности (до 20 %) расходуется на инициирование эмиссионных процессов (эмиссия атомов мишени, электронов, фотонов и др.). Рис. 8, а позволяет считать, что принятая при расчетах мощность 1000 Вт попадает в область реальных значений мощности > 1000 Вт при токе разряда более 3 А.

Стационарная температура чувствительного элемента, исходя из рис. 8, б, изменяется так, как показано на рис. 9. Используя методику из [13], по кривым на рис. 8, б были определены потоки тепла, нагревающие чувствительный элемент (рис. 10).

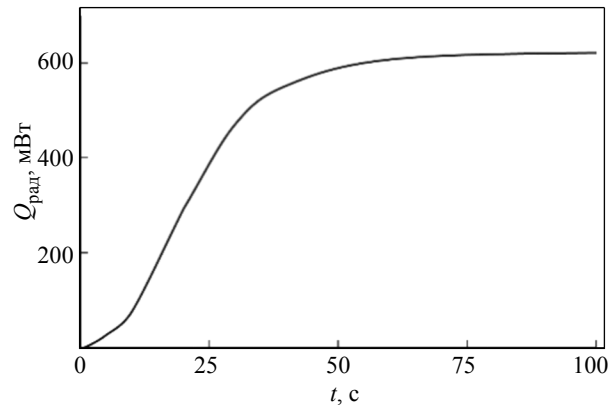


Рис. 7. Кинетика суммарного теплового потока, который достигает подложки  
Fig. 7. Kinetics of the total heat flow reaching the substrate

Расчетное значение потока тепла на чувствительном элементе датчика, исходя из рис. 7, незначительно превышает 600 мВт. Из экспериментального результата, показанного на рис. 10, следует, что при токе более 3 А поток тепла на этом элементе превышает 1.2 Вт. Это может означать, что разогрев элемента происходит не только за счет теплового излучения мишени. Существуют дополнительные потоки тепла, которые переносят распыленные атомы, связанные с фазовыми переходами осажденных на элемент атомов и излучением разряда [24].

**Заключение.** Кинетика нагревания сэндвич-мишени была изучена с помощью численного

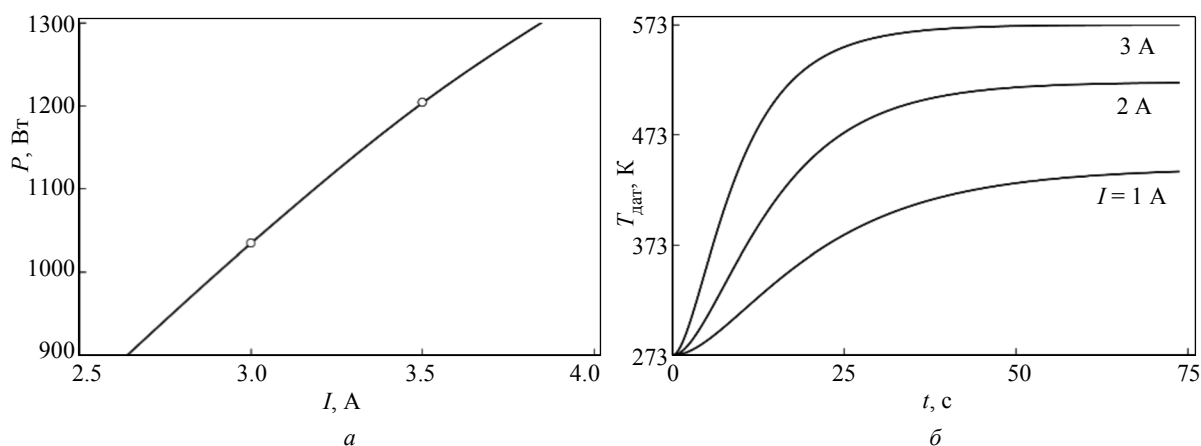


Рис. 8. Мощность, выделяемая на мишени с учетом вольт-амперной характеристики (а), и кинетические кривые нагревания чувствительного элемента датчика (б) при давлении 4 мторр и трех значения силы  
 Fig. 8. The power allocated to the target taking considering the current-voltage characteristic (a) and the kinetic heating characteristics of the sensor sensor element (б) at a pressure of 4 mTorr and current

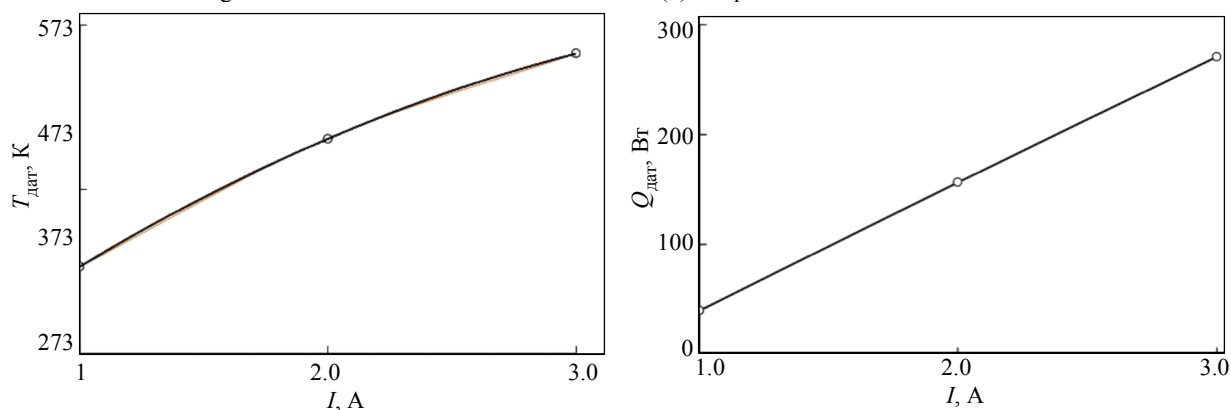


Рис. 9. Температура чувствительного элемента датчика в стационарном состоянии при давлении 4 мторр  
 Fig. 9. The temperature of the sensitive element of the sensor in a stationary state at a pressure of 4 mTorr

Рис. 10. Поток тепла, поглощаемый чувствительным элементом датчика при давлении 4 мторр  
 Fig. 10. The heat flow absorbed by the the sensitive element of the sensor at a pressure of 4 mTorr

решения двумерного однородного уравнения Фурье. Установлено, что при мощности 1000 Вт, выделяемой на мишени, процесс увеличения температуры во всех точках пластины имеет экспоненциальный характер. Нет оснований полагать, что вплоть до плавления форма мгновенного распределения температуры поверхности внешней пластины  $T(x, y)_{t = \text{const}}$  зависит от мощности, выделяемой на мишени. Такая зависимость возможна только для основных параметров этого распределения, к которым относятся температуры в характерных точках поверхности (в центре при  $x = 0$  и на окружности, соответствующей максимальной температуре) в стационарном состоянии и постоянная времени его достижения.

В стационарном состоянии распределение температуры поверхности внешней пластины  $T(x, y)$  при мощности 1000 Вт характеризуется смещенным относительно  $x = 0$  максимумом  $T_{\text{max}} = 1840$  К. Он расположен на окружности с

радиусом 12.9 мм. Эта окружность расположена вне кольца с внутренним и внешним радиусами 19 и 39 мм соответственно, в котором выделяется энергия ионов аргона, распыляющих мишень. Размеры кольца установлены экспериментально. Время достижения стационарного состояния незначительно превышает 500 с.

Для расчета теплового потока, генерируемого внешней пластиной, была использована модель, в которой поверхность пластины представлена в виде ряда концентрических фигур. Центральную область образовал круг с центром при  $x = 0$ . Остальные фигуры имели форму колец с внутренним и внешним радиусами  $r_i$  и  $r_{i+1}$ ,  $i = 1, 2, \dots, N-1$ , соответственно. Геометрические размеры фигур были вычислены при помощи ступенчатой аппроксимации мгновенных распределений температуры поверхности пластины с заданной суммарной относительной погрешностью 10 %.

Применение указанной модели позволило установить, что кинетическая кривая излучаемого

теплового потока внешней пластины содержит точку перегиба, которая связана с уменьшением влияния на обмен энергией постоянной температуры стенки вакуумной камеры при возрастающей температуре внешней пластины. В стационарном режиме суммарный излучаемый внешней пластиной поток тепла не превышает 250 Вт. При этом поток тепла, достигающий чувствительного элемента датчика площадью  $100 \text{ мм}^2$ , располо-

женного на расстоянии 110 мм от поверхности пластины, незначительно превышает 600 мВт. Экспериментально показано, что полученный расчетный результат – это только часть теплового потока, нагревающего чувствительный элемент. Существуют дополнительные потоки тепла, которые переносят распыленные атомы, связанные с фазовыми переходами осажденных на элемент атомами и излучением разряда.

### Список литературы

1. Grzesik W., Matecka J. The oxidation behaviour and notch wear formation of TiAlN coated tools using different oxidation techniques // *Materials*. 2021. Vol. 14. P. 1330. doi: 10.3390/ma14061330.
2. Chang C.-L., Yang F.-C. Effect of target composition on the microstructural, mechanical, and corrosion properties of TiAlN thin films deposited by highpower impulse magnetron sputtering // *Surf. Coat. Technol.* 2018. Vol. 352. P. 330–337. doi: 10.1016/j.surfcoat.2018.08.023.
3. Fabrication of tantalum-doped titanium-oxide electron-selective contacts with high passivation quality / S. Yamaguchi, H. Lee, A. Ogura, A. Masuda, Y. Ohshita // *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 2021. Vol. 10. P. 045009. doi: 10.1149/2162-8777/abf759.
4. Fan H.-P., Yang X.-X., Lu F.-H. Air-based deposition of titanium-aluminum oxynitride thin films by reactive magnetron sputtering // *Sur. Coat. Technol.* 2022. Vol. 436. P. 128287. doi: 10.1016/j.surfcoat.2022.128287.
5. Transported properties and low-temperature magnetic behaviors of  $\text{Ti}_x\text{Cr}_{1-x}\text{O}_2$  films / Z. Zhang, M. Z. Cheng, Z. Zou, J. Xu, Y. Liu, Z. Lu, R. Xiong // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2021. Vol. 54. P. 135004. doi: 10.1088/1361-6463/abd20f.
6. Preparation of aluminum-molybdenum alloy thin film oxide and study of molecular CO+NO conversion on its surface / T. T. Magkoev, D. G. Mustafaeva, V. B. Zaalishvili, O. G. Ashkhotov, Z. T. Sozaev // *Materials*. 2022. Vol. 15. P. 2245. doi: 10.3390/ma15062245.
7. Mehr Al. K., Mehr Ab. 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. P. 4921–4929. doi: 10.1016/j.ceramint.2021.11.030.
8. Composition driven phase evolution and mechanical properties of Mo-Cr-N hard coatings / F. F. Klimashin, H. Riedl, D. Primetzhofer, J. Paulitsch, P. H. Mayrhofer // *J. of Appl. Physics*. 2015. Vol. 118. P. 025305. doi: 10.1063/1.4926734.
9. Effect of thermal annealing on the optoelectronic properties of Cu-Fe-O thin films deposited by reactive magnetron co-sputtering / H. B. Jbara, E. Aubry, M. Kanzari, A. Billard, M. Arab, P. Yazdi // *Thin Solid Films*. 2021. Vol. 721. P. 138538. doi: 10.1016/j.tsf.2021.138538.
10. Yeung G., Wolde C. A. Controlling conduction band alignment and carrier concentration in gallium-doped magnesium zinc oxide by reactive cosputtering // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 2021. Vol. 39. P. 022802. doi: 10.1116/6.0000784.
11. Merces D., Perry F., Billard A. Hot target sputtering: A new way for high-rate deposition of stoichiometric ceramic films // *Sur. Coat. Technol.* 2006. Vol. 201. P. 2276–2281. doi: 10.1016/j.surfcoat.2006.03.035.
12. Tesař J., Martan J., Rezek J. On surface temperatures during high power pulsed magnetron sputtering using a hot target // *Sur. Coat. Technol.* 2011. Vol. 206. P. 1155–1159. doi: 10.1016/j.surfcoat.2011.08.005.
13. Substrate heating and cooling during magnetron sputtering of copper target / V. I. Shapovalov, A. S. Bondarenko, P. B. Baykov, V. V. Karzin // *Phys. Lett. A*. 2016. Vol. 380. P. 882–885.
14. Hot target magnetron sputtering process: Effect of infrared radiation on the deposition of titanium and titanium oxide thin films / R. Gailliot-Vuillecot, A.-L. Thomann, C. Cachoncinlle, E. Millon, A. Caillard // *Vacuum*. 2020. Vol. 181. P. 109734. doi: 10.1016/j.vacuum.2020.109734.
15. Shapovalov V. I., Zav'yalov A. V., Meleshko (Morozova) A. A. Current-voltage characteristics of a magnetron with a hot titanium target in chemically active environments // *Sur. Coat. Technol.* 2021 Vol. 417. P. 127189. doi: 10.1016/j.surfcoat.2021.127189.
16. Cormier P.-A., Stahl M., Thomann A.-L. On the measurement of energy fluxes in plasmas using a calorimetric probe and a thermopile sensor // *J. Phys. D, Appl. Phys.* 2010. Vol. 43. P. 465201. doi: 10.1088/0022-3727/43/46/465201.
17. Energy transferred from a hot nickel target during magnetron sputtering / A. Caillard, M. El'Mokh, N. Semmar, R. Dussart, T. Lecas, A.-L. Thomann // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2014. Vol. 42. P. 2802–2803. doi: 10.1109/TPS.2014.2338742.
18. Energy influx measurements with an active thermal probe in plasma-technological processes / R. Wiese, H. Kersten, G. Wiese, R. Bartsch // *EPJ Techniq. Instrum.* 2015. Vol. 2. P.1–10. doi: 10.1140/epjti/s40485-015-0013-y.
19. 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. 48–52. doi: 10.1007/s00339-017-1458-4.



20. 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 25.

21. Shapovalov V. I. Deposition of solid solution films using reactive magnetron sputtering of a sandwich target // *J. Phys.: Confer. Ser.* 2021. Vol. 1954. P. 012041. doi: 10.1088/1742-6596/1954/1/012041.

22. 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.

23. Блох А. Г., Журавлев Ю. А., Рыжков Л. Н. Теплообмен излучением: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 432 с.

24. Thornton J. A. Substrate heating in cylindrical magnetron sputtering sources // *Thin Solid Films.* 1978. Vol. 54. P. 23–31. doi: 10.1016/0040-6090(78)90273-0.

### Информация об авторах

**Шапвалов 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

**Шарковский Даниил Сергеевич** – студент гр. 9208 СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: sharkovskiy.d@yandex.ru

### References

1. Grzesik W., Matecka J. The oxidation behaviour and notch wear formation of TiAlN coated tools using different oxidation techniques // *Materials.* 2021. Vol. 14. P. 1330. doi: 10.3390/ma14061330.

2. Chang C.-L., Yang F.-C. Effect of target composition on the microstructural, mechanical, and corrosion properties of TiAlN thin films deposited by highpower impulse magnetron sputtering // *Surf. Coat. Technol.* 2018. Vol. 352. P. 330–337. doi: 10.1016/j.surfcoat.2018.08.023.

3. Fabrication of tantalum-doped titanium-oxide electron-selective contacts with high passivation quality / S. Yamaguchi, H. Lee, A. Ogura, A. Masuda, Y. Ohshita // *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 2021. Vol. 10. P. 045009. doi: 10.1149/2162-8777/abf759.

4. Fan H.-P., Yang X.-X., Lu F.-H. Air-based deposition of titanium-aluminum oxynitride thin films by reactive magnetron sputtering // *Surf. Coat. Technol.* 2022. Vol. 436. P. 128287. doi: 10.1016/j.surfcoat.2022.128287.

5. Transported properties and low-temperature magnetic behaviors of  $Ti_xCr_{1-x}O_2$  films / Z. Zhang, M. Z. Cheng, Z. Zou, J. Xu, Y. Liu, Z. Lu, R. Xiong // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2021. Vol. 54. P. 135004. doi: 10.1088/1361-6463/abd20f.

6. Preparation of aluminum-molybdenum alloy thin film oxide and study of molecular CO+NO conversion on its surface / T. T. Magkoev, D. G. Mustafaeva, V. B. Zaalishvili, O. G. Ashkhotov, Z. T. Sozaev // *Materials.* 2022. Vol. 15. P. 2245. doi: 10.3390/ma15062245.

7. Mehr Al. K., Mehr Ab. 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. P. 4921–4929. doi: 10.1016/j.ceramint.2021.11.030.

8. Composition driven phase evolution and mechanical properties of Mo-Cr-N hard coatings / F. F. Kli-

mashin, H. Riedl, D. Primetzhofer, J. Paulitsch, P. H. Mayrhofer // *J. of Appl. Physics.* 2015. Vol. 118. P. 025305. doi: 10.1063/1.4926734.

9. Effect of thermal annealing on the optoelectronic properties of Cu-Fe-O thin films deposited by reactive magnetron co-sputtering / H. B. Jbara, E. Aubry, M. Kanzari, A. Billard, M. Arab, P. Yazdi // *Thin Solid Films.* 2021. Vol. 721. P. 138538. doi: 10.1016/j.tsf.2021.138538.

10. Yeung G., Wolde C. A. Controlling conduction band alignment and carrier concentration in gallium-doped magnesium zinc oxide by reactive cosputtering // *J. Vac. Sci. Technol. A.* 2021. Vol. 39. P. 022802. doi: 10.1116/6.0000784.

11. Mercs D., Perry F., Billard A. Hot target sputtering: A new way for high-rate deposition of stoichiometric ceramic films // *Surf. Coat. Technol.* 2006. Vol. 201. P. 2276–2281. doi: 10.1016/j.surfcoat.2006.03.035.

12. Tesař J., Martan J., Rezek J. On surface temperatures during high power pulsed magnetron sputtering using a hot target // *Surf. Coat. Technol.* 2011. Vol. 206. P. 1155–1159. doi: 10.1016/j.surfcoat.2011.08.005.

13. Substrate heating and cooling during magnetron sputtering of copper target / V. I. Shapovalov, A. S. Bondarenko, P. B. Baykov, V. V. Karzin // *Phys. Lett. A.* 2016. Vol. 380. P. 882–885.

14. Hot target magnetron sputtering process: Effect of infrared radiation on the deposition of titanium and titanium oxide thin films / R. Graillot-Vuillecot, A.-L. Thoman, T. Lecas, C. Cachoncinlle, E. Millon, A. Caillard // *Vacuum.* 2020. Vol. 181. P. 109734. doi: 10.1016/j.vacuum.2020.109734.

15. Shapovalov V. I., Zav'yalov A. V., Meleshko (Morozova) A. A. Current-voltage characteristics of a magnetron with a hot titanium target in chemically active environments // *Surf. Coat. Technol.* 2021 Vol. 417. P. 127189. doi: 10.1016/j.surfcoat.2021.127189.

16. Cormier P.-A., Stahl M., Thomann A.-L. On the measurement of energy fluxes in plasmas using a calorimetric probe and a thermopile sensor // *J. Phys. D, Appl. Phys.* 2010. Vol. 43. P. 465201. doi: 10.1088/0022-3727/43/46/465201.

17. Energy transferred from a hot nickel target during magnetron sputtering / A. Caillard, M. El'Mokh, N. Semmar, R. Dussart, T. Lecas, A.-L. Thomann // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2014. Vol. 42. P. 2802–2803. doi: 10.1109/TPS.2014.2338742.

18. Energy influx measurements with an active thermal probe in plasma-technological processes / R. Wiese, H. Kersten, G. Wiese, R. Bartsch // *EPJ Techniq. Instrum.* 2015. Vol. 2. P.1–10. doi: 10.1140/epjti/s40485-015-0013-y.

19. 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. 48–52. doi: 10.1007/s00339-017-1458-4.

20. 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 25.

21. Shapovalov V. I. Deposition of solid solution films using reactive magnetron sputtering of a sandwich target // *J. Phys.: Confer. Ser.* 2021. Vol. 1954. P. 012041. doi: 10.1088/1742-6596/1954/1/012041.

22. 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.

23. Bloh A. G., Zhuravlev Ju. A., Ryzhkov L. N. *Teplobmen izlucheniem: Spravochnik.* M.: Jenergoatomizdat, 1991. 432 s. (In Russ.).

24. Thornton J. A. Substrate heating in cylindrical magnetron sputtering sources // *Thin Solid Films.* 1978. Vol. 54. P. 23–31. doi: 10.1016/0040-6090(78)90273-0.

#### Information about the authors

**Viktor I. Shapovalov** – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of Physical Electronics and Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: vishapovalov@mail.ru

**Daniil S. Sharkovskii** – student gr. 9208 of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: sharkovskiy.d@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 11.05.2023; принята к публикации после рецензирования 18.05.2023; опубликована онлайн 25.09.2023.

Submitted 11.05.2023; accepted 18.05.2023; published online 25.09.2023.

---