

## Исследование разряда при высокомоощном импульсном магнетронном распылении титановой мишени

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

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

✉ sharkovskiy.d@yandex.ru

**Аннотация.** Экспериментально изучен разряд в среде аргона при высокомоощном импульсном магнетронном распылении титановой мишени с целью выявления количественного влияния на напряжение разряда независимых переменных (факторов). К ним были отнесены давление аргона, ток разряда, длительность и частота следования импульсов. Новизна заключается в применении тактики активного эксперимента. План эксперимента был составлен в предположении о том, что математическую модель, описывающую влияние выделенных факторов в относительно узкой области изменения факторов, можно представить в форме полинома первого порядка. Для модели этого типа каждый фактор в эксперименте достаточно было изменять на двух уровнях. Эксперименты выполнены на сбалансированном цилиндрическом магнетроне. При этом использован план дробного факторного эксперимента типа  $2^{4-1}$ , содержащего восемь различных опытов. С помощью полученной адекватной модели был детально исследован разряд. В частности, установлено влияние каждого из выделенных факторов на напряжение разряда, мощность и энергию в импульсе при постоянных значениях других факторов. В качестве дополнительного фактора была введена скважность (коэффициент заполнения) импульсов.

**Ключевые слова:** магнетронное распыление, планирование эксперимента, полный факторный эксперимент, дробный факторный эксперимент, мишень магнетрона, модель, полином, титан

**Для цитирования:** Шаповалов В. И., Шарковский Д. С., Николаев А. В. Исследование разряда при высокомоощном импульсном магнетронном распылении титановой мишени // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. Т. 19, № 6. С. 30–41. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-6-30-41.

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

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

Original article

## Study of Discharge in High-Power Pulsed Magnetron Sputtering of a Titanium Target

V. I. Shapovalov, D. S. Sharkovskii✉, A. V. Nikolaev

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ sharkovskiy.d@yandex.ru

**Abstract.** This paper experimentally studies a discharge in an argon environment during high-power pulsed magnetron sputtering of a titanium target. The aim of the study was to quantify the influence of independent variables (factors) on the discharge voltage. These included argon pressure, discharge current, pulse duration, and repetition rate. The novelty of the work was the use of active experimentation tactics. The experimental design was developed under the assumption that a mathematical model describing the influence of the selected factors in a relatively narrow range of factor variation can be represented as a first-order polynomial. For this type of model, it was sufficient to vary each factor in the experiment at two levels. The experiments were performed on a bal-anced

cylindrical magnetron. A type  $2^{4-1}$  fractional factorial experimental design was used, containing eight different experiments. The resulting adequate model was used to study the discharge in detail. In particular, the influence of each of the identified factors on discharge voltage, power, and pulse energy was determined, with the other factors remaining constant. Pulse duty cycle was introduced as an additional factor.

**Keywords:** magnetron sputtering, design of experiment, full factorial experiment, fractional factorial experiment, magnetron target, model, polynomial, titanium

**For citation:** Shapovalov V. I., Sharkovskii D. S., Nikolaev A. V. Study of Discharge in High-Power Pulsed Magnetron Sputtering of a Titanium Target // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2026. Vol. 19, no. 6. P. 30–41. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-6-30-41.

**Funding:** The study was supported by grant No. 25-29-01003 from the Russian Science Foundation.

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

**Введение.** В англоязычной литературе для высокоомощного импульсного магнетронного распыления (ВМИП) принята аббревиатура HiPIMS (High Power Impulse Magnetron Sputtering). Первой публикацией на эту тему обычно считают статью [1]. Высокая мощность выделяется на мишени магнетрона при подаче на нее импульсов напряжения с низким коэффициентом заполнения и низкой частотой повторения. Она примерно на два порядка выше средней мощности. Основным эффектом метода ВМИП служит дополнительное распыление мишени ионизированными атомами распыленного вещества, которое получило название «самораспыление». Впервые эффект был обнаружен в 1977 г. при осаждении пленок алюминия и меди [2].

Более поздние многочисленные исследования позволили установить, что при ВМИП плотность электронов вблизи мишени была на один-два порядка выше, чем при распылении на постоянном токе [3]–[5]. Эти условия способствовали значительной ионизации атомов, распыленных с мишени, и развитию значимого эффекта самораспыления. Метод ВМИП позволял получать пленки с высокой адгезией, плотной структурой, низкой среднеквадратичной шероховатостью поверхности и превосходными твердостью и износостойкостью. Высокое качество пленок достигалось, в том числе, дополнительной бомбардировкой растущей пленки ионами распыленного материала.

Как было показано в [6], при распылении методом ВМИП медной мишени магнетрон продолжал устойчиво работать в режиме самораспыления после отключения инертного газа. Этот режим может стать полезным для осаждения сверхчистых металлических пленок.

Обсуждаемый метод прочно вошел в практику синтеза пленок металлов. Рис. 1 демонстрирует увеличение интереса к методу ВМИП за послед-

ние 20 лет. В последнее время появились статьи о синтезе этим методом пленок эквиатомных сплавов [7]–[9]. Более подробно с данным методом можно ознакомиться в обзорных работах [10]–[13].

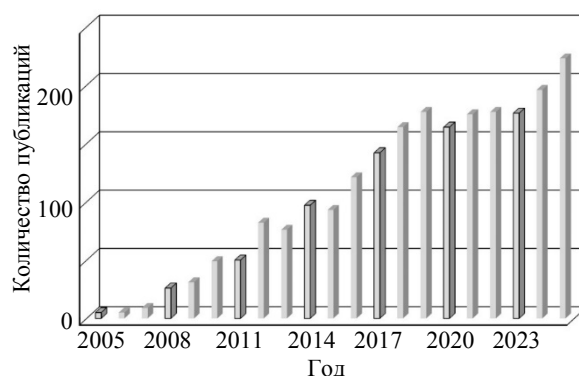


Рис. 1. Публикации о высокоомощном импульсном магнетронном распылении за период 2005–2025 гг. (по данным базы Scopus, ключевое слово «HiPIMS»)

Fig. 1. Publications on high-power pulsed magnetron sputtering for the period 2005–2025 (according to the Scopus database, keyword «HiPIMS»)

Сложность разработки технологии пленок методом ВМИП состоит в его многофакторности, поэтому предварительно необходимо изучить влияние ключевых независимых переменных (факторов) на процесс распыления. Часто изучают влияние только длительности импульса  $\tau$  [14], [15]. Иногда добавляют частоту следования импульсов  $f$  или коэффициент заполнения  $\tau f$  (скважность  $1/\tau f$ ) [5], [16]. Для более детального исследования этот перечень дополняют рабочим давлением аргона и током разряда [3], [4], [17], [18]. Иногда в список факторов включают температуру и потенциал смещения подложки [19], доводя размерность факторного пространства до шести.

Традиционно при двух или трех факторах изучение процесса распыления сводится к выполнению серий опытов, в которых один из факторов дискретно изменяют в заданном интервале,

другие поддерживают на постоянных уровнях [3]. При увеличении числа факторов применение такой тактики требует огромного числа опытов. В подобных случаях эффективны методы теории планирования эксперимента – например, как это было сделано в [20] при осаждении пленок серебра методом магнетронного распыления.

В исследованиях, описанных в данной статье, элементы теории планирования эксперимента были использованы при изучении высокоомощного импульсного магнетронного распыления титановой мишени.

Пленки титана и его простых соединений имеют широкие функциональные возможности. Рост числа публикаций об этих пленках в последние десять лет остановился на уровне более 3500 статей (рис. 2). Авторы данной статьи имеют большой опыт синтеза таких пленок методами распыления на постоянном токе [21]–[23]. С наиболее полными исследованиями пленок титана, осажденных методом ВМИР, можно ознакомиться в статьях [17], [18], [24]–[26].

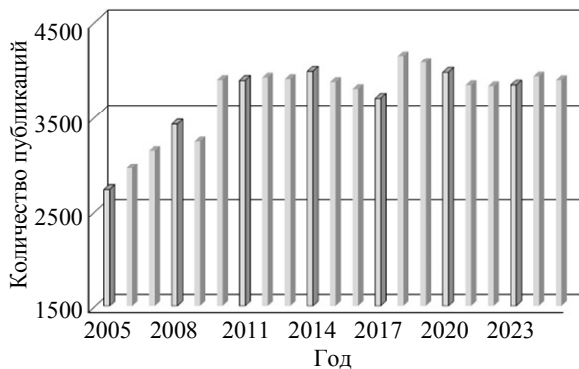


Рис. 2. Публикации о пленках титана за период 2005–2025 гг. (по данным базы Scopus, ключевые слова «film and Ti or titanium»)   
 Fig. 2. Publications on titanium films for the period 2005–2025 (according to the Scopus database, keywords «film and Ti or titanium»)

**Описание модели.** Цель исследований состояла в выявлении количественного влияния на напряжение разряда некоторых факторов. К ним были отнесены давление аргона, ток разряда, длительность и частота следования импульсов.

Рассмотрим основные понятия теории планирования эксперимента [27]–[29]. Эта теория предлагает положить в основу конструирования плана эксперимента гипотезу о математической модели изучаемого процесса. Модель обычно постулируют в виде полинома, который часто называют уравнением регрессии. В простейшем случае используют полином первого порядка. Его основанием служит возможность представить любую

функцию в окрестностях точки в форме ряда, например, Тейлора. При трех независимых  $X_1, X_2, X_3$  и одной зависимой переменной  $y$  полином первого порядка записывают в форме

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3, \quad (1)$$

где  $\beta_j$  ( $j = 0, 1, 2, 3$ ) – неизвестные коэффициенты модели, которые следует оценить по результатам эксперимента.

Для модели (1) каждый фактор достаточно изменять на двух уровнях. Обычно для составления плана эксперимента размерные факторы нормируют. В новой безразмерной системе координат наибольшему значению каждого фактора соответствует значение «+1», наименьшему – «-1». При числе факторов  $k$  план, содержащий все возможные комбинации их значений, должен состоять из  $2^k$  различных опытов. Его называют планом полного факторного эксперимента (ПФЭ). Важно, чтобы число опытов в плане было не менее числа коэффициентов в модели. При увеличении  $k$  планы ПФЭ становятся избыточными, поскольку в них количество опытов превышает число коэффициентов в модели. Теория планирования эксперимента предлагает сокращение количества опытов с помощью планов дробного факторного эксперимента (ДФЭ).

В нормированной системе координат модель (1) записывают в виде

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3, \quad (2)$$

где  $b_j$  и  $x_j$  ( $j = 0, 1, 2, 3$ ) – оценки коэффициентов модели и нормированные независимые переменные соответственно ( $x_0 \equiv 1$ ). Результаты эксперимента, состоящего из  $N$  различных опытов, обычно записывают в виде вектора-столбца  $\mathbf{Y}$ , содержащего  $N$  строк. В каждой строке записывают значение зависимой переменной  $y$ , полученное в данном опыте. Для вычисления коэффициентов модели (2) применяют метод наименьших квадратов. Он приводит к системе уравнений, решение которой в матричной форме имеет вид [30]

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{b}$  – вектор-столбец оценок коэффициентов модели;  $\mathbf{X}$  – матрица планирования. Если модель содержит  $k$  переменных, а эксперимент состоит из  $N$  различных опытов, то матрица  $\mathbf{X}$  будет иметь размер  $N \times (k + 1)$ , а вектор  $\mathbf{Y}$  – размер  $N \times 1$ . Первый столбец матрицы  $\mathbf{X}$  относится к фиктивной переменной  $x_0 \equiv 1$ . Он добавлен в  $\mathbf{X}$  для

оценки свободного члена  $b_0$  в модели (2). Произведение  $X^T X$  называют информационной матрицей.

В данных исследованиях экспериментальное изучение газового разряда в аргоне при ВМИР титановой мишени было выполнено с использованием рекомендаций теории планирования эксперимента. В качестве основной зависимой переменной было принято напряжение разряда  $U$  при четырех независимых переменных: давление аргона  $p$ , средний тока разряда  $I$ , длительность  $\tau$  и частота  $f$  следования импульсов. Буква  $f$  здесь используется как для обозначения частоты следования импульсов, так и для общего обозначения произвольной функции, что должно быть понятно из контекста.

**Результаты эксперимента.** Объектом исследования был цилиндрический сбалансированный магнетрон диаметром 130 мм, оснащенный титановой мишенью (ВТ1-00) толщиной 6 мм, чистотой 99.9 %. Исследование выполнено в вакуумной камере объемом  $7.8 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$  при остаточном давлении не более  $10^{-2}$  мторр. Высокий вакуум в камере обеспечивали диффузионный и пластинчато-роторный насосы с быстротой действия 300 и  $0.005 \text{ м}^3/\text{с}$ , соответственно. Электрическое питание магнетрона обеспечивал импульсный источник APHEL-M-5HIPMS-1K (ООО «Прикладная электроника», Россия), имеющий максимальную мощность до 5 кВт при напряжении до 1000 В, с максимально выходным током до 1 кА при точности стабилизации по току до  $\pm 3\%$ .

Эксперимент был выполнен в три этапа. Предварительные эксперименты на первом этапе имели целью выявить особенности вольтамперной характеристики (ВАХ) разряда. Эти эксперименты состояли из двух серий. В первой измеряли ВАХ, изменяя ток разряда в диапазоне 0.7...1.9 А, при  $p = 5$  мторр,  $f = 1500$  Гц,  $\tau = 80, 90$  и  $100$  мкс. Во второй – зависимости напряжения от длительности импульса, изменяя его в диапазоне 50...120 мкс, при  $p = 5$  мторр,  $I = 1.2$  А и  $f = 1500$  Гц. Его результаты позволили постулировать вид математической модели. На втором этапе эксперимент был выполнен по плану, соответствующему выбранной модели для диапазонов изменения факторов, указанных в табл. 1. Основанием для выбора модели были результаты предварительных экспериментов. На третьем этапе были выполнены десять повторных экспериментов при неизменных значениях всех факторов  $p = 5$  мторр,  $I = 1.2$  А,  $\tau = 90$  мкс и  $f = 1500$  Гц. По

результатам этих измерений была оценена дисперсия чистой (случайной) ошибки эксперимента  $\sigma_U^2$ .

Табл. 1. Размерные факторы  
Tab. 1. Dimensional factors

Уровень	$p$ , мторр	$I$ , А	$\tau$ , мкс	$f$ , Гц
$X_{j \min}$	4	0.8	80	1000
$X_{j \max}$	6	1.6	100	2000
$X_{j0}$	5	1.2	90	1500
$\Delta_j$	1	0.4	10	500

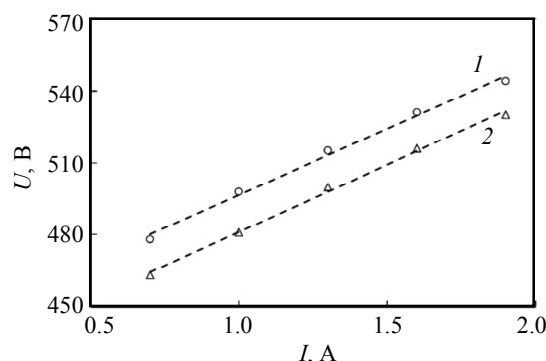


Рис. 3. ВАХ разряда магнетрона при  $p = 5$  мторр,  $f = 1500$  Гц и  $\tau$ , мкс: 1 – 80; 2 – 90 (точки – эксперимент, штриховые линии – тренд)

Fig. 3. The current-voltage characteristic of the magnetron discharge at  $p = 5$  mTorr,  $f = 1500$  Hz and  $\tau$ ,  $\mu\text{s}$ : 1 – 80; 2 – 90 (dots – experiment, dashed lines – trend)

Частично результаты предварительных экспериментов отражает рис. 3, где даны ВАХ разряда, измеренные при разных значениях других факторов. На рис. 3 даны линии тренда, построенные при достоверности 0.999 в виде полиномов первого порядка. Это дает основание принять в качестве математической модели зависимости  $U = f(p, I, \tau, f)$  тоже полином первого порядка:

$$U = f(p, I, \tau, f) = \beta_0 + \beta_1 p + \beta_2 I + \beta_3 \tau + \beta_4 f, \quad (4)$$

где величину  $\beta_0$  для общности можно трактовать как коэффициент при некоторой переменной  $X_0 \equiv 1$ , которую обычно называют фиктивной.

Для составления плана физические переменные  $p, I, \tau$  и  $f$ , указанные в табл. 1, были преобразованы в безразмерные величины  $x_j, j = 1, 2, 3, 4$ :

$$x_j = \frac{X_j - X_{j0}}{\Delta_j}, \quad (5)$$

где  $X_{j0}$  и  $\Delta_j$  – центральная точка области (центр плана) и интервал варьирования  $i$ -й переменной:

$$X_{j0} = \frac{X_{j \max} + X_{j \min}}{2}, \quad \Delta_j = \frac{X_{j \max} - X_{j \min}}{2}, \quad (6)$$

где  $X_j \max, X_j \min$  – максимальная и минимальная точки  $j$ -й переменной в области эксперимента.

Преобразование координат с помощью (5) и (6) привело модель (4) к виду

$$U = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4. \quad (7)$$

ПФЭ для модели (7), содержащий  $2^4 = 16$  опытов, избыточен, поскольку необходимо оценить только пять коэффициентов модели. Эксперимент был сокращен с помощью ДФЭ, содержащего  $2^{4-1} = 8$  опытов. Этот план задан в табл. 2. Первый столбец плана в табл. 2 соответствует фиктивной переменной  $x_0$  и нужен только при вычислении по формуле (3). Последний столбец предназначен для записи результатов измерения напряжения разряда в каждом опыте.

Табл. 2. План эксперимента  $2^{4-1}$   
Tab. 2. Experimental plan  $2^{4-1}$

Номер опыта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$U_i$
1	1	-1	-1	-1	1	$U_1$
2	1	-1	-1	1	-1	$U_2$
3	1	-1	1	-1	1	$U_3$
4	1	-1	1	1	-1	$U_4$
5	1	1	-1	-1	-1	$U_5$
6	1	1	-1	1	1	$U_6$
7	1	1	1	-1	-1	$U_7$
8	1	1	1	1	1	$U_8$

После выполнения эксперимента по заданному плану переходят к вычислению оценок параметров модели (7). При этом используют выражение (3), в котором исходными данными служат матрица планирования  $\mathbf{X}$  и вектор-столбец результатов измерений  $\mathbf{Y}$ . Поскольку в эксперименте измеряли реальную физическую переменную, заменим в (3) вектор  $\mathbf{Y}$  на  $\mathbf{U}^*$ :

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{U}^* = \begin{pmatrix} 495 \\ 516 \\ 537 \\ 528 \\ 495 \\ 428 \\ 543 \\ 473 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Компоненты вектора  $\mathbf{U}^*$  в (8) измеряются в вольтах.

Планы ПФЭ типа  $2^k$  и ДФЭ типа  $2^{k-1}$  обладают свойством ортогональности, которое означает, что

$$\sum_{i=1}^N x_{ij}x_{iu}, \quad j, u = 0, 1, \dots, k, \quad j \neq u.$$

Для такого плана матрица  $\mathbf{X}^T\mathbf{X}$  не только диагональная, но и выражается через единичную матрицу  $\mathbf{I}$ :

$$\mathbf{X}^T\mathbf{X} = N\mathbf{I}. \quad (9)$$

Ортогональность плана существенно упрощает вычисление оценок коэффициентов модели. Выражение (3) в этом случае заменяется рядом формул:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i, \quad (10)$$

$$b_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ij}y_i, \quad j = 1, 2, \dots, k.$$

Легко проверить, что использованная в (8) матрица  $\mathbf{X}$  в (9) ортогональна:

$$\mathbf{X}^T\mathbf{X} = \begin{pmatrix} 8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 8 \end{pmatrix} = 8\mathbf{I}.$$

Таким образом, при исходных данных в виде (8) полученные по формулам (10) оценки коэффициентов модели  $b_j, j = 0, 1, 2, 3, 4$  позволили записать модель (7) в виде

$$U = 502 - 17.2x_1 + 18.4x_2 - 15.6x_3 - 18.7x_4. \quad (11)$$

При необходимости модель (11) можно переписать, используя реальные физические переменные. Для этого в (11) нужно подставить выражения (5) и выполнить необходимые преобразования.

Следующим шагом служит проверка адекватности модели, под которой понимают ее соответствие экспериментальным данным. Адекватность модели (11) определяют по ее отклонению от точек реального эксперимента. Для этого вычисляют величину, которую называют дисперсией адекватности [30]:

$$\sigma_{ad}^2 = \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^N (U_i - U_i^*)^2, \quad (12)$$

где  $U_i (i = 1, 2, \dots, N)$  – значение, вычисленное по модели (11);  $U_i^*$  – измеренное значение из вектора  $\mathbf{U}^*$ .

Табл. 3. Вычисление дисперсии адекватности  
 Tab. 3. Calculation of the variance of adequacy

Номер опыта	План эксперимента					$U_i$ , В	$U_i^*$ , В	$(U_i - U_i^*)^2$ , В <sup>2</sup>
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$			
1	1	-1	-1	-1	1	495	498	9
2	1	-1	-1	1	-1	516	504	144
3	1	-1	1	-1	1	537	534	9
4	1	-1	1	1	-1	528	540	144
5	1	1	-1	-1	-1	495	500	25
6	1	1	-1	1	1	428	432	16
7	1	1	1	-1	-1	543	537	36
8	1	1	1	1	1	473	469	16
$\sigma_{ad}^2$ , В <sup>2</sup> (при числе степеней свободы $f_{ad} = 3$ )								135

Вычисления по формуле (12) сведены в табл. 3.

Величина  $\sigma_{ad}^2$  может быть обусловлена либо случайной ошибкой эксперимента, либо неадекватностью модели. Модель можно признать адекватной, если значение  $\sigma_{ad}^2$  незначительно отличается от дисперсии случайной ошибки  $\sigma_U^2$ .

Адекватность модели проверяют по критерию Фишера [31], вычисляя отношение  $F = \sigma_{ad}^2 / \sigma_U^2$ . Принято, что модель можно признать адекватной, если значение  $F$  не превышает критического значения  $F_{\alpha, f_{ad}, f_U}$  для заданного уровня значимости  $\alpha$  и степеней свободы величин, стоящих в числителе  $f_{ad} = (N - k)$  и знаменателе  $f_U = N_0 - 1$ ,

где  $N_0$  – число опытов для ПФЭ. В данном случае при значении  $\sigma_U^2 \approx 125$  В<sup>2</sup>, которое было вычислено по результатам десяти экспериментов в центральной точке плана, значение  $F = \sigma_{ad}^2 / \sigma_U^2 \approx 1.1$ . Задавая  $\alpha = 0.05$  при степенях свободы  $f_{ad} = 3$  и  $f_U = 9$ , которые соответствуют поставленной задаче, получаем критическое значение  $F_{\alpha, f_{ad}, f_U} = 3.86$  [32], что свидетельствует о приемлемости модели (11). Обратим внимание на то, что модель адекватна только в области эксперимента. Ее погрешность при экстраполяции за пределы указанной области неизвестна.

Результаты применения модели (11) для предсказания напряжения разряда в диапазоне  $50 \leq \tau \leq 120$  с вместе с экспериментальными дан-

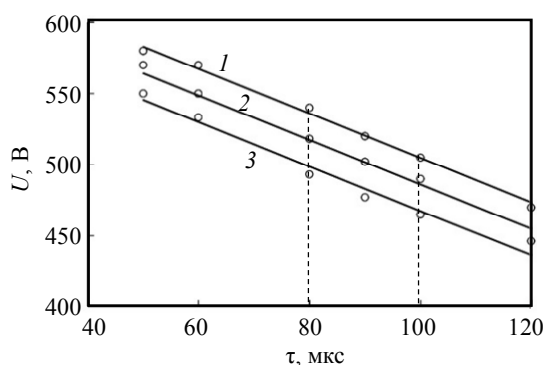


Рис. 4. Зависимости напряжения разряда от длительности импульса при  $p = 5$  мторр,  $I = 1.2$  А и  $f$ , Гц: 1 – 1000; 2 – 1500; 3 – 2000 (точки – эксперимент, сплошные линии – модель).

Штриховыми линиями ограничена область эксперимента, выполненного по плану ДФЭ  
 Fig. 4. The current-voltage characteristic of the magnetron discharge at  $p = 5$  mTorr,  $I = 1.2$  А and  $f$ , Hz: 1 – 1000; 2 – 1500; 3 – 2000 (dots – experiment, solid lines – model).

The dashed lines limit the area of the experiment carried out according to the FFE plan

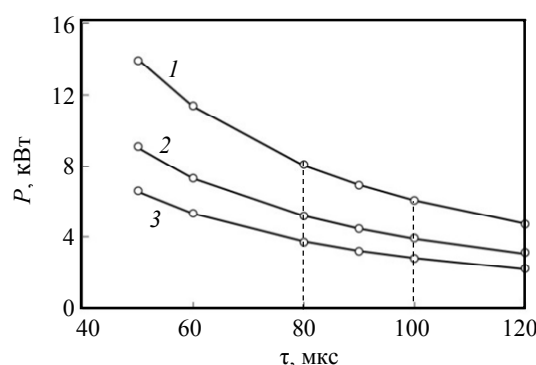


Рис. 5. Зависимости мощности в импульсе от его длительности при  $p = 5$  мторр,  $I = 1.2$  А и  $f$ , Гц: 1 – 1000; 2 – 1500; 3 – 2000 (точки – эксперимент, сплошные линии – модель).

Штриховыми линиями ограничена область эксперимента, выполненного по плану ДФЭ  
 Fig. 5. The current-voltage characteristic of the magnetron discharge at  $p = 5$  mTorr,  $I = 1.2$  А and  $f$ , Hz: 1 – 1000; 2 – 1500; 3 – 2000 (dots – experiment, solid lines – model).

Dashed lines indicate the area of the experiment performed according to the FFE plan

ными представлены на рис. 4. Различие экспериментальных и модельных зависимостей было определено по величине, которая аналогична (12):

$$\delta_U^2 = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 (U_i - U_i^*)^2, \quad (13)$$

где  $U_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 6$ ) – значение, вычисленное по модели (11) в точках, указанных на рис. 5;  $U_i^*$  – измеренное значение напряжения в тех же точках. Наибольшее значение величины (13) для трех зависимостей на рис. 4 не превысило  $50 \text{ В}^2$ , что дало относительную погрешность порядка  $\pm 5\%$  при достоверности 0.997. Такой результат можно признать приемлемым, особенно если учесть, что результаты по переменной  $\tau$ , представленные на рис. 4, выходят за границы области эксперимента (вертикальные штриховые линии).

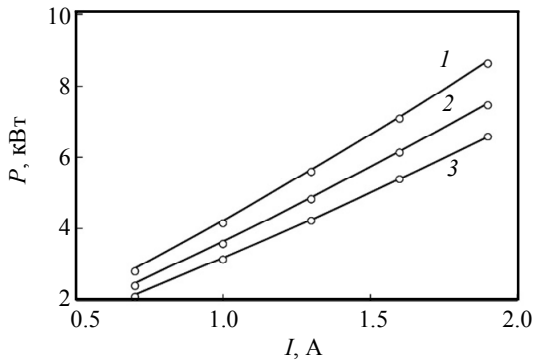


Рис. 6. Зависимости мощности в импульсе от тока разряда при  $p = 5$  мторр,  $f = 1500$  Гц и  $\tau$ , мкс: 1 – 80; 2 – 90; 3 – 100 (точки – эксперимент, сплошные линии – модель)  
Fig. 6. Pulse power dependences on discharge current at  $p = 5$  mTorr,  $f = 1500$  Hz and  $\tau$ ,  $\mu\text{s}$ : 1 – 80; 2 – 90; 3 – 100 (dots – experiment, solid lines – model)

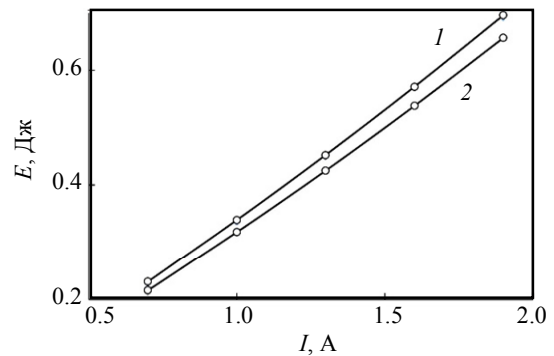


Рис. 7. Зависимости энергии в импульсе от тока разряда при  $p = 5$  мторр,  $f = 1500$  Гц и  $\tau$ , мкс: 1 – 80; 2 – 100 (точки – эксперимент, сплошные линии – модель)  
Fig. 7. Pulse energy dependences on discharge current at  $p = 5$  mTorr,  $f = 1500$  Hz and  $\tau$ ,  $\mu\text{s}$ : 1 – 80; 2 – 100 (dots – experiment, solid lines – model)

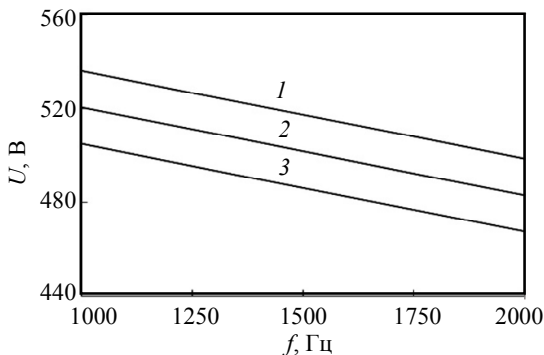


Рис. 8. Зависимости напряжения разряда от частоты следования импульсов при  $p = 5$  мторр,  $I = 1.2$  А и  $\tau$ , мкс: 1 – 80; 2 – 90; 3 – 100  
Fig. 8. Dependences of the discharge voltage on the pulse repetition rate at  $p = 5$  mTorr,  $I = 1.2$  A and  $\tau$ ,  $\mu\text{s}$ : 1 – 80; 2 – 90; 3 – 100

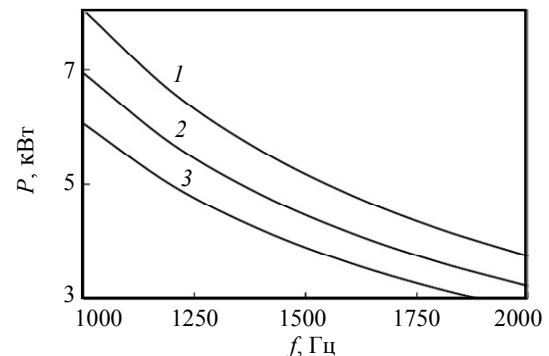


Рис. 9. Зависимости мощности в импульсе от частоты следования импульсов при  $p = 5$  мторр,  $I = 1.2$  А и  $\tau$ , мкс: 1 – 80; 2 – 90; 3 – 100  
Fig. 9. Pulse power dependences on pulse repetition rate at  $p = 5$  mTorr,  $I = 1.2$  A and  $\tau$ ,  $\mu\text{s}$ : 1 – 80; 2 – 90; 3 – 100

Модель (13) была использована для предсказания влияния выделенных факторов и на мощность в импульсе  $P = UI/\tau f$ . Для примера на рис. 5 вместе с экспериментальными данными представлены зависимости  $P = U(\tau)I/\tau f = f(\tau)_p, I, f = \text{const}$  полученные по модели (11) при постоянных значениях других факторов. При этом различие между экспериментальными и модельными значениями не превышает  $\pm 1\%$ . Отметим, что мощность в импульсе нелинейно зависит от его длительности. Такой результат очевиден, поскольку величина  $P$  обратно пропорциональна величине  $\tau$ .

Математическая модель (11) дает возможность изучать и другие зависимости, характерные для высокоомощного магнетронного распыления. К ним, например, относятся зависимости мощности  $P = f(I)_p, \tau, f = \text{const}$  и энергии  $E = f(I)_p, \tau, f = \text{const}$  в импульсе от тока разряда, показанные сплошны-

ми линиями на рис. 6 и 7 соответственно. На рис. 6 и 7, как и на рис. 4 и 5, для сравнения точками представлены экспериментальные данные. Они были вычислены по ВАХ, измеренным в предварительном эксперименте. Как и на рис. 5, наибольшее расхождение между экспериментальными и модельными значениями на рис. 6 и 7 не превышает  $\pm 1\%$ . Здесь тоже следует отметить, что интервал изменения тока в специальном эксперименте больше, чем в эксперименте, выполненном по плану ДФЭ. Но модельные зависимости при этом обеспечивают экстраполяцию соответствующих величин с высокой точностью.

Высокое качество модели (11), показанное с помощью рис. 4–7, позволяет уверенно использовать ее для предсказания влияния на зависимую переменную и других факторов. На рис. 8 и 9 даны зависимости напряжения разряда  $U(f) = f(f)_{p, I, \tau = \text{const}}$  и мощности в импульсе  $P = U(f)I/\tau f = f(f)_{p, I, \tau = \text{const}}$  соответственно.

Применение модели (11) позволило установить, что повышение длительности импульсов приводит к уменьшению напряжению разряда (рис. 4) и, следовательно, мощности в импульсе (рис. 5). Аналогичное влияние имеют частота следования импульсов (рис. 8 и 9) и рабочее давление (рис. 10 и 11).

Интерес представляет влияние на процесс скважности импульсов  $S = 1/\tau f$ . Одна из таких зависимостей дана на рис. 12, который отражает влияние скважности на напряжение разряда, носящее нелинейный характер. Однако мощность в импульсе, как это следует из рис. 13, пропорциональна скважности, но слабо зависит от частоты следования импульсов.

У читателя может возникнуть вопрос о практической ценности математической модели (7). Существует как минимум два типа задач, в которых эта модель может быть использована. В первой интерес может представить зависимость ско-

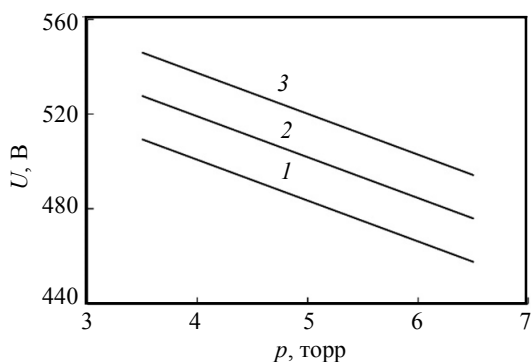


Рис. 10. Зависимости напряжения разряда от давления при  $\tau = 90$  мкс,  $f = 1500$  Гц и  $I$ , А: 1 – 0.8; 2 – 1.2; 3 – 1.6

Fig. 10. Dependences of the discharge voltage on pressure at  $\tau = 90$   $\mu$ s,  $f = 1500$  Hz and  $I$ , А: 1 – 0.8; 2 – 1.2; 3 – 1.6

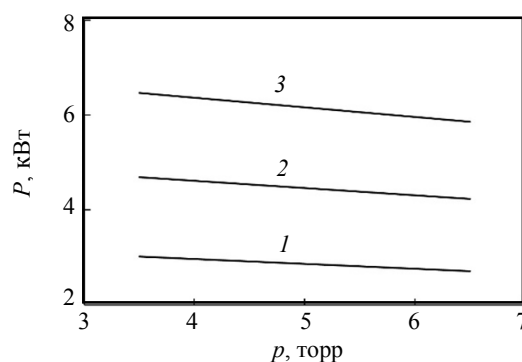


Рис. 11. Зависимости мощности в импульсе от давления при  $\tau = 90$  мкс,  $f = 1500$  Гц и  $I$ , А: 1 – 0.8; 2 – 1.2; 3 – 1.6

Fig. 11. Pulse power dependences on pressure at  $\tau = 90$   $\mu$ s,  $f = 1500$  Hz and  $I$ , А: 1 – 0.8; 2 – 1.2; 3 – 1.6

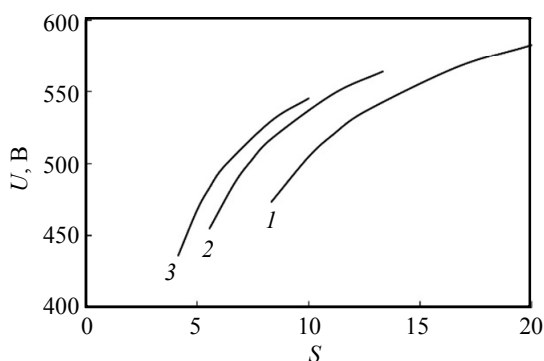


Рис. 12. Зависимости напряжения разряда от скважности импульсов при  $p = 5$  мторр,  $I = 1.2$  А и  $f$ , Гц: 1 – 1000; 2 – 1500; 3 – 2000

Fig. 12. Dependences of the discharge voltage on the pulse duty cycle at  $p = 5$  mTorr,  $I = 1.2$  А and  $f$ , Hz: 1 – 1000; 2 – 1500; 3 – 2000

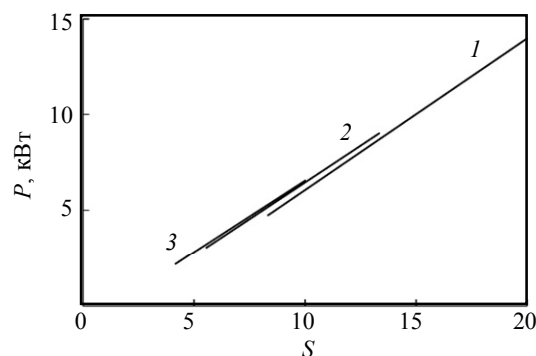


Рис. 13. Зависимости мощности в импульсе от скважности импульсов при  $p = 5$  мторр,  $I = 1.2$  А и  $f$ , Гц: 1 – 1000; 2 – 1500; 3 – 2000

Fig. 13. Pulse power dependences on the pulse duty cycle at  $p = 5$  mTorr,  $I = 1.2$  А and  $f$ , Hz: 1 – 1000; 2 – 1500; 3 – 2000

рости роста пленки от независимых переменных [14], [15]. Она пропорциональна коэффициенту распыления мишени, который, в свою очередь, приблизительно пропорционален энергии ионов распыляющего газа. Последняя величина однозначно связана с напряжением разряда.

К другой группе относятся тепловые задачи при магнетронном распылении, которые описывают уравнением Фурье [33]. В стационарном случае одно из граничных условий основано на плотности мощности на поверхности мишени. Рис. 5, 6, 9, 11 и 13 демонстрируют возможность предсказания значений этой величины в области эксперимента.

**Заключение.** Подводя итоги, отметим основные результаты. Экспериментально изучен разряд в среде аргона при высокомоном импульсном магнетроном распылении титановой мишени. Мишень была установлена на сбалансированный цилиндрический магнетрон диаметром 130 мм. Цель исследований состояла в изучении влияния

на напряжение разряда независимых переменных (факторов). К ним были отнесены давление аргона, ток разряда, длительность и частота следования импульсов. Новизной работы было применение в данной задаче тактики активного эксперимента. В качестве математической модели, связывающей напряжение разряда с выделенными факторами, был выбран полином первого порядка, содержащий пять слагаемых. Такой выбор был основан на результатах предварительного эксперимента. Для проведения эксперимента был выбран план ДФЭ типа  $2^{4-1}$ . По его результатам были определены неизвестные коэффициенты модели и установлена ее адекватность. С ее помощью был детально исследован разряд. В частности, установлено влияние каждого из выделенных факторов на мощность и энергию в импульсе при постоянных значениях других факторов. При исследовании математических моделей в качестве дополнительного фактора была введена скважность (коэффициент заполнения) импульсов.

#### Список литературы

1. A novel pulsed magnetron sputter technique utilizing very high target power densities / V. Kouznetsov, K. Macák, J. M. Schneider, U. Helmersson, I. Petrov // Surf. Coat. Technol. 1999. Vol. 122, no. 2–3. P. 290–293. doi: 10.1016/S0257-8972(99)00292-3.
2. Hosokawa N., Tsukada T., Misumi T. Self-sputtering phenomena in high-rate coaxial cylindrical magnetron sputtering // J. Vac. Sci. Technol. 1977. Vol. 14, no. 1. P. 143–146. doi: 10.1116/1.569107.
3. Short-pulse high-power dual magnetron sputtering / V. O. Oskirko, A. N. Zakharov, V. A. Semenov, A. P. Pavlov, A. S. Grenadyorov, S. V. Rabotkin, A. A. Solovyev // Vacuum. 2022. Vol. 200. P. 111026. doi: 10.1016/j.vacuum.2022.111026.
4. Ionization region model of high power impulse magnetron sputtering of copper / J. T. Gudmundsson, J. Fischer, B. P. Hinriksson, M. Rudolph, D. Lundin // Surf. Coat. Technol. 2022. Vol. 442. P. 128189. doi: 10.1016/j.surfcoat.2022.128189.
5. Novel methods for synthesizing high-quality thin films through short and ultrashort high-power pulsed magnetron sputtering / V. Yu. Kozhevnikov, V. O. Oskirko, S. V. Rabotkin, A. P. Pavlov, V. A. Semenov, A. A. Solovyev, A. S. Grenadyorov, A. N. Zakharov // St. Petersburg State Polytechnical University J. Phys. and Math. 2023. Vol. 16, no. 3.1. P. 26–30. doi: 10.18721/JPM.163.104.
6. Anders A., Andersson J. Sputtering in vacuum: A technology for ultraclean metallization and space propulsion // 2008 23<sup>rd</sup> Intern. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Bucharest, Romania: IEEE, 2008. P. 561–566. doi: 10.1109/DEIV.2008.4676856.
7. Effects of Al and Y elements on mechanical properties and LBE resistance of FeCrAl(Y) coatings prepared

- by HiPIMS / J. Ni, B. Bai, J. Li, M. Song, H. Bai, F. Meng, J. Shi, E. Fu, S. Shen, Q. Li, X. Leng, Z. Cai, Y. Huang, X. Liu // Surf. Coat. Technol. 2025. Vol. 516. P. 132733. doi: 10.1016/j.surfcoat.2025.132733.
8. Hard TiAlTaN coating by HIPIMS deposition for cutting tools: experiments, simulations and cutting tests / E. Haye, L. Chavee, J. S. Mas, E. Serag, S. Kolozsvari, N. Watiez, A. Besnard, Y. Pinot, P. Moskovkin, J. Muller, S. Lucas // Surf. Coat. Technol. 2025. Vol. 517. P. 132809. doi: 10.1016/j.surfcoat.2025.132809.
9. Epitaxial growth of TiZrNbTaN films without external heating by high-power impulse magnetron sputtering / S. K. Honnali, R. Boyd, R. Magnusson, A. le Febvrier, D. Lundin, G. Greczynsk, P. Eklund // Surf. Coat. Technol. 2025. Vol. 495. P. 131583. doi: 10.1016/j.surfcoat.2024.131583.
10. Anders A. A review comparing cathodic arcs and high power impulse magnetron sputtering (HiPIMS) // Surf. Coat. Technol. 2014. Vol. 257. P. 308–325. doi: 10.1016/j.surfcoat.2014.08.043.
11. Gudmundsson J. T. Physics and technology of magnetron sputtering discharges // Plasma Sources Sci. Technol. 2020. Vol. 29, no. 11. P. 113001. doi: 10.1088/1361-6595/abb7bd.
12. Lundin D., Minea T., Gudmundsson J. T. High power impulse magnetron sputtering: fundamentals, technologies, challenges and applications // Elsevier. 2020. 398 p. doi: 10.1016/C2016-0-02463-4.
13. Magnetron sputtered titanium carbide-based coatings: A review of science and technology / H. Larhlmi, A. Ghailane, M. Makha, J. Alami // Vacuum. 2022. Vol. 197. P. 110853. doi: 10.1016/j.vacuum.2021.110853.

14. Influence of HiPIMS pulse widths on the structure and properties of copper films / X. Liu, H. Bai, Y. Ren, J. Li, X. Liu // *Materials*. 2024. Vol. 17. P. 2342. doi: 10.3390/ma17102342.
15. Effects of HiPIMS duty cycle on plasma discharge and the properties of Cu film / Y. Ren, H. Bai, X. Liu, J. Li, X. Liu // *Materials*. 2024. Vol. 17. P. 2311. doi: 10.3390/ma17102311.
16. Influence of ion-to-neutral flux ratio on the mechanical and tribological properties of TiN coatings deposited by HiPIMS / V. Tiron, I.-L. Velicu, D. Cristea, N. Lupu, G. Stoian, D. Munteanu // *Surf. Coat. Technol.* 2018. Vol. 352. P. 690–698. doi: 10.1016/j.surfcoat.2017.11.048.
17. Energy flux measurements in high power impulse magnetron sputtering / D. Lundin, M. Stahl, H. Kersten, U. Helmersson // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2009. Vol. 42, no. 18. P. 185202. doi: 10.1088/0022-3727/42/18/185202.
18. Measuring the energy flux at the substrate position during magnetron sputter deposition processes / P.-A. Cormier, A. Balhamri, A.-L. Thomann, R. Dussart, N. Semmar, J. Mathias, R. Snyders, S. Konstantinidis // *J. Appl. Phys.* 2013. Vol. 113. P. 013305. doi: 10.1063/1.4773103.
19. Synergistic effect of deposition temperature and substrate bias on structural, mechanical, stability and adhesion of TiN thin film prepared by reactive HiPIMS / O. O. Abegunde, M. Lahouij, N. Jaghar, H. Larhlimi, M. Makha, J. Alami // *Ceramics Intern.* 2024. Vol. 50, no. 7. P. 10593–10601. doi: 10.1016/j.ceramint.2023.12.371.
20. Optimization of the deposition process parameters of DC magnetron sputtering to achieve desired deposition rate using design of experiment method / A. Allamula, K. Vir, L. Peela, J. Daljin, S. Parasuraman, S. K. Yadav // *J. Electron. Mater.* 2023. Vol. 52, no. 10. P. 6851–6863. doi: 10.1007/s11664-023-10628-y.
21. 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. doi: 10.1134/S1063784213090247.
22. 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. doi: 10.1134/S1063785012060272.
23. Shapovalov V. I., Sharkovskii D. S. Study of heat flow at substrate during sputtering of copper-titanium sandwich target // *Materials*. 2024. Vol. 17, no. 14. P. 3599. doi: 10.3390/ma17143599.
24. Influence of high power densities on the composition of pulsed magnetron plasmas / A. P. Ehasarian, R. New, W.-D. Münz, L. Hultman, U. Helmersson, V. Kouznetsov // *Vacuum*. 2002. Vol. 65, no. 2. P. 147–154. doi: 10.1016/S0042-207X(01)00475-4.
25. Ionized sputter deposition using an extremely high plasma density pulsed magnetron discharge / K. Macak, V. Kouznetsov, J. Schneider, U. Helmersson, I. Petrov // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 2000. Vol. 18, no. 4. P. 1533–1537. doi: 10.1116/1.582380.
26. Christou C., Barber Z. H. Ionization of sputtered material in a planar magnetron discharge // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 2000. Vol. 18, no. 6. P. 2897–2907. doi: 10.1116/1.1312370.
27. Czitrom V. One-Factor-at-a-Time versus designed experiments // *The Am. Statistician*. 1999. Vol. 53, no. 2. P. 126–131. doi: 10.1080/00031305.1999.10474445.
28. Creswell J. W. Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches. 3<sup>rd</sup> ed. Los Angeles. London, New Delhi, Singapore: SAGE Publications, 2018. 260 p.
29. Optimal experimental design: Formulations and computations / X. Huan, J. Jagalur, Y. Marzouk // *Acta Numerica*. 2024. Vol. 33. P. 715–840. doi: 10.1017/S0962492924000023.
30. Draper N. R., Smith H. Applied regression analysis. 3<sup>rd</sup> ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 1998. 713 p. doi: 10.1002/9781118625590.
31. Aldrich J. Fisher and Regression // *Statist. Sci.* 2005. Vol. 20, no. 4. P. 401–417. doi: 10.1214/088342305000000331.
32. F Distribution tables. URL: [https://socr.umich.edu/Applets/F\\_Table.html](https://socr.umich.edu/Applets/F_Table.html) (дата обращения: 20.01.2026).
33. 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.

#### 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](mailto: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](mailto:sharkovskiy.d@yandex.ru)

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

E-mail: [nikolaev.a2004@mail.ru](mailto:nikolaev.a2004@mail.ru)

**Вклад авторов:**

Шаповалов В. И. – общее руководство исследованием, постановка научной задачи, разработка плана эксперимента, анализ результатов расчета, подготовка и редактирование текста статьи.  
Шарковский Д. С. – анализ литературных источников, участие в проведении экспериментов и расчетов, критический анализ и доработка текста статьи.  
Николаев А. В. – участие в проведении экспериментов и расчетов, участие в обсуждении результатов, визуализация результатов.

References

1. A novel pulsed magnetron sputter technique utilizing very high target power densities / V. Kouznetsov, K. Macák, J. M. Schneider, U. Helmersson, I. Petrov // *Surf. Coat. Technol.* 1999. Vol. 122, no. 2–3. P. 290–293. doi: 10.1016/S0257-8972(99)00292-3.
2. Hosokawa N., Tsukada T., Misumi T. Self-sputtering phenomena in high-rate coaxial cylindrical magnetron sputtering // *J. Vac. Sci. Technol.* 1977. Vol. 14, no. 1. P. 143–146. doi: 10.1116/1.569107.
3. Short-pulse high-power dual magnetron sputtering / V. O. Oskirko, A. N. Zakharov, V. A. Semenov, A. P. Pavlov, A. S. Grenadyorov, S. V. Rabotkin, A. A. Solovyev // *Vacuum*. 2022. Vol. 200. P. 111026. doi: 10.1016/j.vacuum.2022.111026.
4. Ionization region model of high power impulse magnetron sputtering of copper / J. T. Gudmundsson, J. Fischer, B. P. Hinriksson, M. Rudolph, D. Lundin // *Surf. Coat. Technol.* 2022. Vol. 442. P. 128189. doi: 10.1016/j.surfcoat.2022.128189.
5. Novel methods for synthesizing high-quality thin films through short and ultrashort high-power pulsed magnetron sputtering / V. Yu. Kozhevnikov, V. O. Oskirko, S. V. Rabotkin, A. P. Pavlov, V. A. Semenov, A. A. Solovyev, A. S. Grenadyorov, A. N. Zakharov // *St. Petersburg State Polytechnical University J. Phys. and Math.* 2023. Vol. 16, no. 3.1. P. 26–30. doi: 10.18721/JPM.163.104.
6. Anders A., Andersson J. Sputtering in vacuum: A technology for ultraclean metallization and space propulsion // 2008 23<sup>rd</sup> Intern. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Bucharest, Romania: IEEE, 2008. P. 561–566. doi: 10.1109/DEIV.2008.4676856.
7. Effects of Al and Y elements on mechanical properties and LBE resistance of FeCrAl(Y) coatings prepared by HiPIMS / J. Ni, B. Bai, J. Li, M. Song, H. Bai, F. Meng, J. Shi, E. Fu, S. Shen, Q. Li, X. Leng, Z. Cai, Y. Huang, X. Liu // *Surf. Coat. Technol.* 2025. Vol. 516. P. 132733. doi: 10.1016/j.surfcoat.2025.132733.
8. Hard TiAlTaN coating by HIPIMS deposition for cutting tools: experiments, simulations and cutting tests / E. Haye, L. Chavee, J. S. Mas, E. Serag, S. Kolozsvari, N. Watiez, A. Besnard, Y. Pinot, P. Moskovkin, J. Muller, S. Lucas // *Surf. Coat. Technol.* 2025. Vol. 517. P. 132809. doi: 10.1016/j.surfcoat.2025.132809.
9. Epitaxial growth of TiZrNbTaN films without external heating by high-power impulse magnetron sputtering / S. K. Honnali, R. Boyd, R. Magnusson, A. le Febvrier, D. Lundin, G. Greczynski, P. Eklund // *Surf. Coat. Technol.* 2025. Vol. 495. P. 131583. doi: 10.1016/j.surfcoat.2024.131583.
10. Anders A. A review comparing cathodic arcs and high power impulse magnetron sputtering (HiPIMS) // *Surf. Coat. Technol.* 2014. Vol. 257. P. 308–325. doi: 10.1016/j.surfcoat.2014.08.043.
11. Gudmundsson J. T. Physics and technology of magnetron sputtering discharges // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2020. Vol. 29, no. 11. P. 113001. doi: 10.1088/1361-6595/abb7bd.
12. Lundin D., Minea T., Gudmundsson J. T. High power impulse magnetron sputtering: Fundamentals, technologies, challenges and applications // Elsevier. 2020. 398 p. doi: 10.1016/C2016-0-02463-4.
13. Magnetron sputtered titanium carbide-based coatings: A review of science and technology / H. Larhlmi, A. Ghailane, M. Makha, J. Alami // *Vacuum*. 2022. Vol. 197. P. 110853. doi: 10.1016/j.vacuum.2021.110853.
14. Influence of HiPIMS pulse widths on the structure and properties of copper films / X. Liu, H. Bai, Y. Ren, J. Li, X. Liu // *Materials*. 2024. Vol. 17. P. 2342. doi: 10.3390/ma17102342.
15. Effects of HiPIMS duty cycle on plasma discharge and the properties of Cu film / Y. Ren, H. Bai, X. Liu, J. Li, X. Liu // *Materials*. 2024. Vol. 17. P. 2311. doi: 10.3390/ma17102311.
16. Influence of ion-to-neutral flux ratio on the mechanical and tribological properties of TiN coatings deposited by HiPIMS / V. Tiron, I.-L. Velicu, D. Cristea, N. Lupu, G. Stoian, D. Munteanu // *Surf. Coat. Technol.* 2018. Vol. 352. P. 690–698. doi: 10.1016/j.surfcoat.2017.11.048.
17. Energy flux measurements in high power impulse magnetron sputtering / D. Lundin, M. Stahl, H. Kersten, U. Helmersson // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2009. Vol. 42, no. 18. P. 185202. doi: 10.1088/0022-3727/42/18/185202.
18. Measuring the energy flux at the substrate position during magnetron sputter deposition processes / P.-A. Cormier, A. Balhamri, A.-L. Thomann, R. Dussart, N. Semmar, J. Mathias, R. Snyders, S. Konstantinidis // *J. Appl. Phys.* 2013. Vol. 113. P. 013305. doi: 10.1063/1.4773103.
19. Synergistic effect of deposition temperature and substrate bias on structural, mechanical, stability and adhesion of TiN thin film prepared by reactive HiPIMS / O. O. Abegunde, M. Lahouij, N. Jaghar, H. Larhlmi, M. Makha, J. Alami // *Ceramics Intern.* 2024. Vol. 50, no. 7. P. 10593–10601. doi: 10.1016/j.ceramint.2023.12.371.
20. Optimization of the deposition process parameters of DC magnetron sputtering to achieve desired

deposition rate using design of experiment method / A. Allamula, K. Vir, L. Peela, J. Daljin, S. Parasuraman, S. K. Yadav // *J. Electron. Mater.* 2023. Vol. 52, no. 10. P. 6851–6863. doi: 10.1007/s11664-023-10628-y.

21. Kristallizacija i termohromizm v otozhzhennykh geterostrukturah, sodержashhih plenki oksidov titana i vol'frama / V. I. Shapovalov, A. E. Lapshin, A. E. Komlev, M. Ju. Arsent'ev, A. A. Komlev // *ZhTF.* 2013. T. 83, № 9. S. 73–83. doi: 10.1134/S1063784213090247. (In Russ.)

22. Kristallizacija i termohromizm v plenkah oksida vol'frama, otozhzhennykh v vakuume / V. I. Shapovalov, A. E. Lapshin, A. E. Komlev, A. A. Komlev // *Pis'ma v ZhTF.* 2012. T. 38, № 12. S. 8–16. doi: 10.1134/S1063785012060272. (In Russ.)

23. Shapovalov V. I., Sharkovskii D. S. Study of heat flow at substrate during sputtering of copper-titanium sandwich target // *Materials.* 2024. Vol. 17, no. 14. P. 3599. doi: 10.3390/ma17143599.

24. Influence of high power densities on the composition of pulsed magnetron plasmas / A. P. Ehasarian, R. New, W.-D. Münz, L. Hultman, U. Helmersson, V. Kouznetsov // *Vacuum.* 2002. Vol. 65, no. 2. P. 147–154. doi: 10.1016/S0042-207X(01)00475-4.

25. Ionized sputter deposition using an extremely high plasma density pulsed magnetron discharge / K. Macak, V. Kouznetsov, J. Schneider, U. Helmersson, I. Petrov // *J. Vac. Sci. Technol. A.* 2000. Vol. 18, no. 4. P. 1533–1537. doi: 10.1116/1.582380.

26. Christou C., Barber Z. H. Ionization of sputtered material in a planar magnetron discharge // *J. Vac. Sci. Technol. A.* 2000. Vol. 18, no. 6. P. 2897–2907. doi: 10.1116/1.1312370.

27. Czitrom V. One-Factor-at-a-Time versus Designed Experiments // *The Am. Statistician.* 1999. Vol. 53, no. 2. P. 126–131. doi: 10.1080/00031305.1999.10474445.

28. Creswell J. W. Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches. 3<sup>rd</sup> ed. Los Angeles. London, New Delhi, Singapore: SAGE Publications, 2018. 260 p.

29. Optimal experimental design: Formulations and computations / X. Huan, J. Jagalur, Y. Marzouk // *Acta Numerica.* 2024. Vol. 33. P. 715–840. doi: 10.1017/S0962492924000023.

30. Draper N. R., Smith H. Applied regression analysis. 3<sup>rd</sup> ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 1998. 713 p. doi: 10.1002/9781118625590.

31. Aldrich J. Fisher and regression // *Statist. Sci.* 2005. Vol. 20, no. 4. P. 401–417. doi: 10.1214/08834230500000331.

32. F Distribution tables. URL: [https://socr.umich.edu/Applets/F\\_Table.html](https://socr.umich.edu/Applets/F_Table.html) (data obrashhenija: 20.01.2026).

33. 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.

#### Information about the authors

**Viktor I. Shapovalov** – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of Physical Electronic Devices and Units, 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** – postgraduate student of the Department of Physical Electronic Devices and Units, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: [sharkovskiy.d@yandex.ru](mailto:sharkovskiy.d@yandex.ru)

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

E-mail: [nikolaev.a2004@mail.ru](mailto:nikolaev.a2004@mail.ru)

#### Author contribution statement:

Shapovalov V. I. – overall research supervision, formulation of the scientific problem, experimental design development, analysis of calculation results, preparation and editing of the article.

Sharkovsky D. S. – literature review, participation in experiments and calculations, critical analysis and revision of the article.

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

Статья поступила в редакцию 27.02.2026; принята к публикации после рецензирования 17.04.2026; опубликована онлайн 29.06.2026.

Submitted 27.02.2026; accepted 17.04.2026; published online 29.06.2026.