

УДК 539.23

*Максим Болотов***ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ОСАДЖЕННЯ ТОНКИХ МЕТАЛЕВИХ ПЛІВОК  
У ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ З ПОРОЖНИСТИМ КАТОДОМ***Максим Болотов***ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ  
ПЛЕНОК В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ С ПОЛЫМ КАТОДОМ***Maksym Bolotov***OPTIMIZATION OF THE DEPOSITION PROCESS OF THIN METAL FILMS  
IN GLOW DISCHARGE WITH HOLLOW CATHODE**

Наведено результати застосування методів математичного планування експерименту з метою визначення найбільш впливових на процеси формування та росту металевого тонкоплівкового покриття параметрів режиму осадження у тліючому розряді з порожнистим катодом. У результаті роботи отримано регресійну математичну модель, яка дозволяє отримати результати з 4...6 % похибкою відносно експериментальних.

**Ключові слова:** математичне планування експерименту, тліючий розряд, порожнистий катод, тонкоплівкове покриття, регресійна модель.

*Рис.: 2. Табл.: 4. Бібл.: 11.*

Приведены результаты применения методов математического планирования эксперимента с целью определения наиболее влиятельных на процессы формирования и роста металлического тонкопленочного покрытия параметров режима осаджения в тлеющем разряде с полым катодом. В результате работы получено регрессионную математическую модель, которая позволяет получить результаты с 4...6 % погрешностью относительно экспериментальных.

**Ключевые слова:** математическое планирование эксперимента, тлеющий разряд, полый катод, тонкопленочное покрытие, регрессионная модель.

*Рис.: 2. Табл.: 4. Библ.: 11.*

The results of methods of mathematical planning of the experiment application to determine the most influential on the formation and growth of metallic thin film coating deposition mode setting in the glow discharge with the hollow cathode are presented in this work. The regression mathematical model allows getting results with an error 4...6 % relative to the experimental obtained in this study.

**Key words:** mathematical experiment planning, glow discharge, hollow cathode, thin film coating, the regression model.

*Fig.: 2. Tabl.: 4. Bibl.: 11.*

**Постановки проблеми.** Тонкі металеві плівки знаходять широке застосування в різних галузях сучасної промисловості. Найбільшого розповсюдження тонкоплівкові елементи отримали, насамперед, у технологічних процесах електроніки у процесі виготовлення, наприклад, напівпровідникових приладів, у лазерній та нелінійній оптиці для надання поляризаційних, просвітлюючих або ж дзеркальних властивостей оптичним елементам, у механіці для отримання функціональних антикорозійних, зносостійких покриттів тощо. Проблема отримання структур у вигляді тонких металевих плівок є чи не найактуальнішою в мікроелектроніці у процесі виготовлення інтегральних схем.

Відомі дві основні групи методів осадження тонких металоплівкових покриттів: хімічне осадження з парової фази (CVD) і фізичне осадження з парової фази (PVD), які відрізняються між собою способом отримання плівкоутворюючого потоку атомів, іонів або молекул. До першої групи відносяться методи, в яких металеві прошарки покриття утворюються в результаті хімічних реакцій.

На сьогодні велика увага приділяється саме PVD методам, в яких необхідні для синтезу покриттів атоми та молекули металу отримують у результаті процесів, пов'язаних з випаровуванням мішені, виготовленої з певного металу або ж її розпиленням. Основними представниками цієї групи методів є розпилення катодними плямами вакуумно-дугового розряду, електронним та іонним пучками, термічне вакуумне випаровування, магнетронне розпилення тощо. Досвід застосування таких технологій у виробничих умовах поряд із перевагами дозволив визначити й основні їх недоліки, головним чином пов'язаними з низькою швидкістю осадження, поганою однорідністю покриття, незадовільною адгезією з поверхнею основи, обмеженістю оброблювальних поверхонь і т. ін.

Останнім часом для генерування необхідних потоків атомів і молекул з метою отримання металоплівкових прошарків застосування набула газорозрядна плазма анодального тліючого розряду із холодним катодом у схрещених електричному і магнітному полях при тисках нижче 1 Па. Результати досліджень, виконаних у роботах [1; 2; 3], показали, що застосування газорозрядної плазми низького тиску ініційованої в магнітному полі дозволяє отримувати металопокриття за товщиною близьких до однорідного на субстратах з великою площею поверхні. Висока швидкість розпилення, відсутність перегріву поверхні основи, відносно мала ступінь забрудненості плівок робить цей спосіб дуже ефективним джерелом спрямованих атомів й іонів металу, придатних для осадження покриттів.

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми.** Водночас практично відсутні дані стосовно застосування як джерела розпилюваних часток для вирощування металевих плівок на діелектричних підложках низькотемпературної плазми тліючого розряду із порожнистим катодом без прикладеного периферійного магнітного поля при традиційних для нього тисках 1–100 Па.

У роботах [4; 5; 6] проведено дослідження щодо застосування тліючого розряду із порожнистим катодом у різних технологічних процесах, що дозволило визначити основні його переваги, пов'язані, в першу чергу, із простотою конструкції, великим терміном роботи мішені (катода) між замінами, низькою вартістю обладнання в порівнянні з магнетронними системами. Все це обумовило економічну доцільність та актуальність досліджень застосування тліючого розряду з порожнистим катодом для осадження тонких металевих плівок на діелектричні основи.

Традиційні методи досліджень пов'язані з експериментами, що вимагають великих витрат, сил і засобів, оскільки є «пасивними» – ґрунтованими на почерговому варіюванні окремих незалежних змінних в умовах, коли інші прагнуть зберегти незмінними.

Процеси формування та росту металеві плівки здебільшого є багатофакторними, тобто, визначаються узгодженістю багатьох параметрів, таких як форма, розміри та взаємне просторове положення мішені та поверхні основи, тиск у вакуумній камері, сила струму та напруга в розрядному проміжку, час осадження, що значно ускладнює керування процесом осадження покриття.

**Мета статті.** У зв'язку з цим мета цієї роботи полягає в оптимізації умов проведення технологічного процесу осадження тонкоплівкового покриття в тліючому розряді із застосуванням ефекту порожнистого катоду, що пов'язане з вибором з усієї сукупності параметрів режиму найбільш оптимальних, тобто параметрів, найбільш тісно пов'язаних із товщиною плівки.

**Виклад основного матеріалу досліджень.** Визначення цих параметрів традиційними способами в цьому випадку ускладнено, тому їх вибір здійснювали за допомогою оцінювання коефіцієнтів при відповідних чинниках статичних моделей, побудованих за допомогою методів математичного планування експерименту [7].

У модель заносилася сукупність параметрів з урахуванням можливості визначення їх кількісної оцінки. Параметром оптимізації було призначено товщину мідного шару покриття ( $\delta$ ,  $\mu\text{м}$ ), осадженого на скляному субстраті. Як варійовані фактори приймали: відстань катод-субстрат  $L_{к-с}$  ( $X_1$ ), струм розряду  $I_p$  ( $X_2$ ), величину тиску в розрядній камері  $P$  ( $X_3$ ) та час осадження  $t$  ( $X_4$ ).

З метою зменшення впливу випадкових похибок вимірювань кожний дослід під час проведення експерименту повторювався 5 разів. Інтервали варіювання факторів і їх числові значення на верхньому і нижньому рівнях наведені в табл. 1.

Рівні та інтервали варіювання факторів

Фактори	Інтервали варіювання, ΔX	Рівні варіювання		
		Нижній рівень, (X <sub>1</sub> =-1)	Основний рівень	Верхній рівень, (X <sub>1</sub> =+1)
Відстань катод-субстрат (L <sub>к-с</sub> ), мм	10	10	20	30
Струм розряду I <sub>p</sub> , mA	25	50	75	100
Тиск у газорозрядній камері P, Па	20	20	40	60
Час осадження t, с	20	20	40	60
Параметр оптимізації – товщина мідної плівки δ, μm				

З метою визначення впливу значень варіюваних факторів на величину параметра оптимізації застосовували повний факторний експеримент, матриця якого має вид 2<sup>4</sup> (табл. 2).

Таблиця 2

Матриця планування експериментів 2<sup>4</sup>

№ досліджу	Рівні факторів				Параметр оптимізації у, μm
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	
1	-	-	-	+	Y <sub>1</sub>
2	+	-	-	-	Y <sub>2</sub>
3	-	+	-	-	Y <sub>3</sub>
4	+	+	+	+	Y <sub>4</sub>
5	-	-	-	-	Y <sub>5</sub>
6	+	-	+	-	Y <sub>6</sub>
7	-	+	+	-	Y <sub>7</sub>
8	-	+	-	+	Y <sub>8</sub>
9	+	+	-	-	Y <sub>9</sub>
10	-	-	+	+	Y <sub>10</sub>
11	-	-	+	-	Y <sub>11</sub>
12	+	+	+	-	Y <sub>12</sub>
13	+	-	-	+	Y <sub>13</sub>
14	+	+	-	+	Y <sub>14</sub>
15	+	-	+	+	Y <sub>15</sub>
16	-	+	+	+	Y <sub>16</sub>

Експерименту, що містить таку кількість дослідів, відповідатиме лінійна модель, яка має такий вигляд:

$$y_1 = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4. \quad (1)$$

Розрахунок коефіцієнтів при відповідних факторах рівняння здійснювалася за формулами, наведеними в роботі [8].

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} y_i}{N}, \quad j = 0, 1, \dots, k, \quad (2)$$

де  $\sum_{i=1}^N x_{ji}$  – алгебраїчна сума елементів вектор-стовпця кожного фактора;  $i$  – номер досліджу;  $j$  – номер фактора;  $N$  – кількість дослідів.

Коефіцієнт  $b_0$  знаходили як середнє арифметичне значення параметра оптимізації,  $b_0 = 5,987$ , при цьому  $b_1 = -1,125$ ;  $b_2 = 2,913$ ;  $b_3 = -1,375$ ;  $b_4 = 2,475$ .

Як відомо, величина коефіцієнта при відповідному факторі визначає його внесок у величину параметра оптимізації, тобто чим більше чисельна величина коефіцієнта, тим сильніше фактор впливатиме на параметр оптимізації. У зв'язку з цим можна зробити висновок, що сила розрядного струму та час осадження є найбільш позитивно впливо-

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

вими параметрами, оскільки зі збільшенням їх чисельного значення параметр оптимізації (товщина осадженого шару) зростає.

Найбільш негативно, серед досліджуваних параметрів, на процес осадження покриття в тліючому розряді з порожнистим катодом впливають збільшення відстані катод-підложка і тиску в газорозрядній камері, про що свідчить знак мінус при відповідних коефіцієнтах.

Наочно вплив кожного з факторів, що варіюються, на параметр оптимізації демонструють графіки, отримані за результатами експериментів, що наведені на рис. 1.

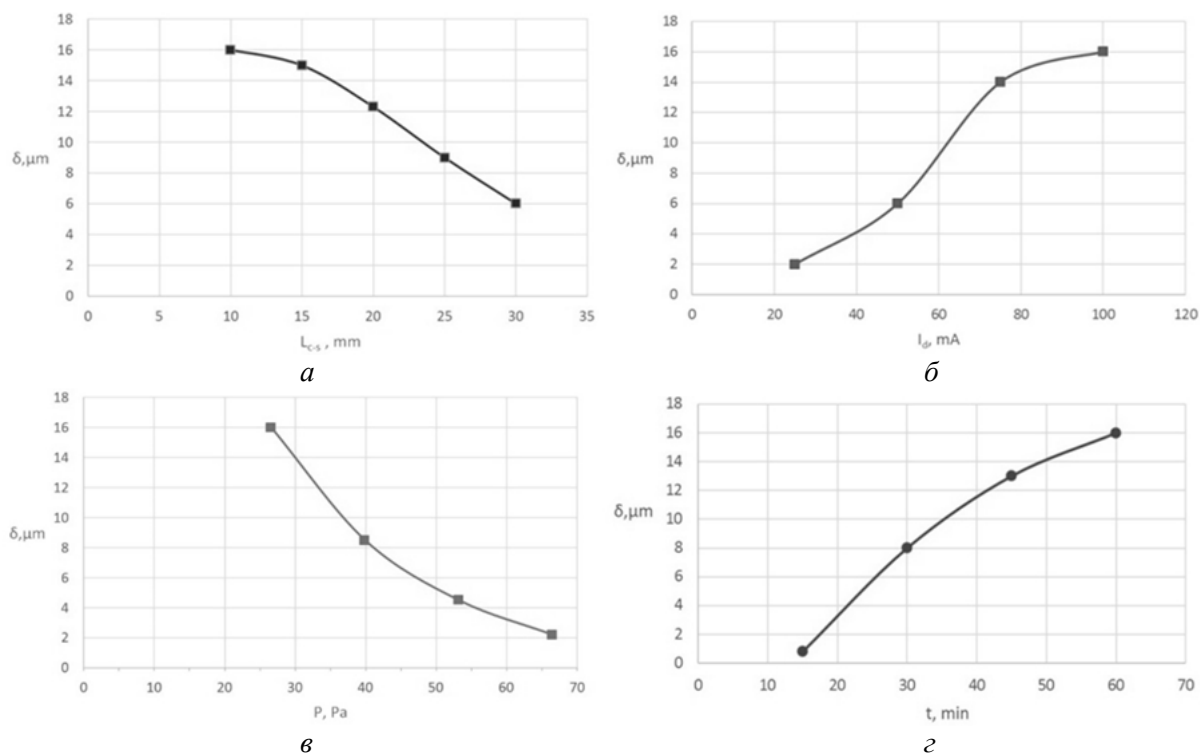


Рис. 1. Характер впливу варійованих факторів:

а – відстань катод-субстрат, мм; б – сила розрядного струму, мА; в – тиск у газорозрядному проміжку, Па; з – час осадження, хв, на функцію відгуку (товщину шару покриття,  $\mu\text{m}$ )

Розрахунок параметрів оптимізації  $y_1$ , виконаний за рівнянням (1), показав значну розбіжність відносно експериментальних даних (табл. 3). Це означає, що аналізований процес є складною системою, яку не можна описати лінійною моделлю. Тому для чистоти розрахунків необхідно враховувати не лише лінійні члени  $b_1x_1$ , але й парні або навіть потрійні взаємодії факторів.

Таким чином, з урахуванням парних взаємодій факторів регресійна модель матиме такий вигляд:

$$y_2 = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_{12} \cdot x_{12} + b_{13} \cdot x_{13} + b_{14} \cdot x_{14} + b_{23} \cdot x_{23} + b_{24} \cdot x_{24} + b_{34} \cdot x_{34}. \quad (3)$$

Розрахунок парних коефіцієнтів моделі здійснювали за формулою (2):  $b_{12} = -0,1$ ;  $b_{13} = 0,263$ ;  $b_{14} = -0,162$ ;  $b_{23} = -0,6$ ;  $b_{24} = 1,625$ ;  $b_{34} = 0,113$ .

Рівняння регресії з ефектом потрійних взаємодій факторів виглядає таким чином:

$$y_3 = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_{12} \cdot x_{12} + b_{13} \cdot x_{13} + b_{14} \cdot x_{14} + b_{23} \cdot x_{23} + b_{24} \cdot x_{24} + b_{34} \cdot x_{34} + b_{123} \cdot x_{123} + b_{124} \cdot x_{124} + b_{234} \cdot x_{234} + b_{134} \cdot x_{134}. \quad (4)$$

Потрійні коефіцієнти рівняння мають такі значення:  $b_{123} = 0,137$ ;  $b_{124} = 0,387$ ;  $b_{134} = -0,275$ ;  $b_{234} = -0,138$ .

Результати розрахунку рівнянь регресії з урахуванням ефекту парних та потрійних взаємодій ( $y_2, y_3$ ) досліджуваних факторів, наведені в табл. 3, вказують на достатньо високу точність моделі при врахуванні саме потрійних зв'язків, про що свідчить значна схожість результатів розрахунку з експериментальними.

Таблиця 3

## Результати експериментів

№ досліду	Рівні факторів				Експериментальне значення параметра оптимізації $y, \mu\text{m}$	Розрахункове значення параметра оптимізації $y_1, \mu\text{m}$	Значення параметра оптимізації з урахуванням парних взаємодій $y_2, \mu\text{m}$	Значення параметра оптимізації з урахуванням потрійних взаємодій $y_3, \mu\text{m}$
	$X_1, \text{мм}$	$X_2, \text{мА}$	$X_3, \text{Па}$	$X_4, \text{с}$				
1	10	50	20	60	6	8,05	6,3	5,9
2	30	50	20	20	2,5	0,85	2,5	2,5
3	10	100	20	20	9	8,9	8,74	8,9
4	30	100	60	60	10	9	10,54	10,13
5	10	50	20	20	4	3,1	3,712	4,1
6	30	50	60	20	1	-1,9	0,99	1,12
7	10	100	60	20	3,5	6,2	3,8	3,6
8	10	100	20	60	16	13,9	16,3	16,13
9	30	100	20	20	4,5	6,7	5,04	4,6
10	10	50	60	60	5	5,3	4,7	5,1
11	10	50	60	20	1,4	0,35	1,7	1,3
12	30	100	60	20	2,2	3,93	1,7	2,1
13	30	50	20	60	2,9	5,8	3,6	2,9
14	30	100	20	60	14	11,63	13,5	13,9
15	30	50	60	60	1,8	3,05	1,8	1,8
16	10	100	60	60	12	11,13	11,74	11,26

Для визначення зв'язку між незалежними змінними та параметром оптимізації (товщиною мідної плівки) було проведено регресійний та кореляційний аналіз.

Одним з головних показників, що визначають під час проведення кореляційного аналізу, є величина коефіцієнта множинної кореляції Пірсона ( $r$ ), розрахунок якого здійснювали за такою формулою [9]:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (5)$$

де  $(x_i - \bar{x})$  та  $(y_i - \bar{y})^2$  – квадрат різниці середніх арифметичних значень  $x$  та  $y$ .

Звідки  $r=0,916$ , що вказує на статистично сильний зв'язок між варійованими параметрами.

Другим головним параметром кореляційного аналізу, що визначає взаємозв'язок між варійованими факторами та параметром оптимізації, є коефіцієнт множинної детермінації ( $r^2$ ),  $r^2 = 0,84$ , тобто дисперсія залежної змінної становить 84 %. Таким чином, можна сказати, що такий набір незалежних змінних (варійованих параметрів) на 84 % впливає на параметр оптимізації, решта 16 % варіації забезпечується впливом інших, не врахованих у моделі параметрів. Це досить високий результат.

Проведений регресійний аналіз наведено у вигляді графіка, представлено на рис. 2.

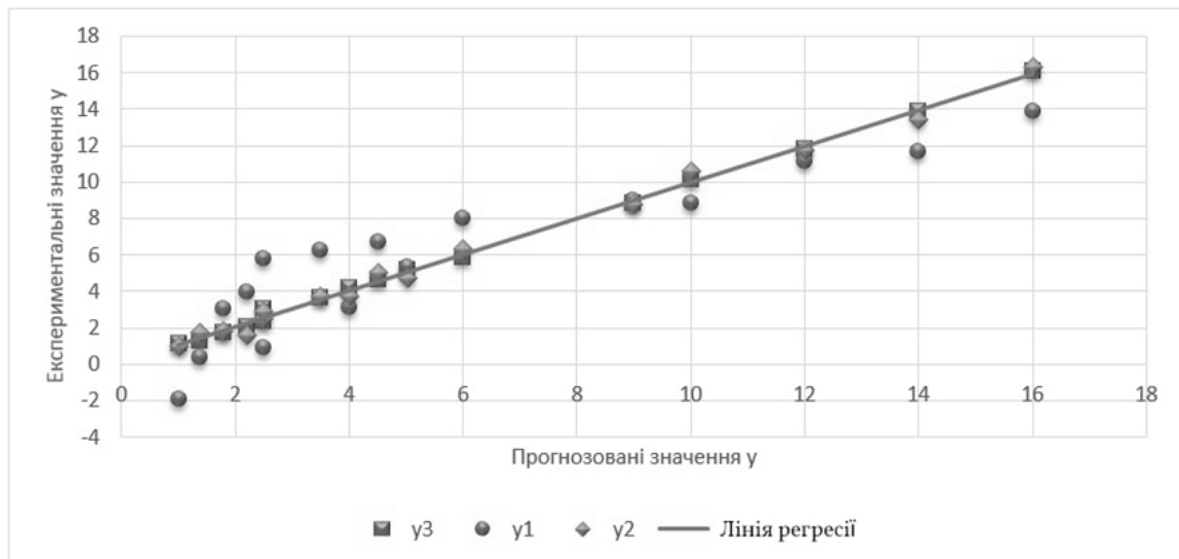


Рис. 2. Діаграма розсіювання розрахункових значень параметра оптимізації

Перевірку значущості кожного з коефіцієнтів рівняння проводили незалежно із використанням *t*-критерію Стьюдента та побудовою довірчого інтервалу.

Передусім необхідно знайти дисперсію коефіцієнта регресії, яка розраховується за формулою [10]:

$$S_{bj}^2 = \frac{S_{\epsilon_{i0}}^2}{N}, \tag{6}$$

де  $S_{\epsilon_{i0}}^2$  – дисперсія відтворюваності;  $N$  – кількість дослідів.

З урахуванням кількості проведених паралельних дослідів дисперсія відтворюваності визначається як:

$$S_{\epsilon_{i0}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^{NN} (y_u^0 - \bar{y}^0)^2}{NN - 1}, \tag{7}$$

де  $y_u^0$  – середнє арифметичне значення параметра оптимізації;  $\bar{y}^0$  – середнє арифметичне значення параметра оптимізації, отримані при паралельних дослідях;  $NN$  – кількість паралельних опитів. Як було сказано вище, в кожній точці експеримент повторювався 5 разів. У зв'язку з цим у нашому випадку  $NN-1 = 4$ .

Розрахункове значення *t*-критерію Стьюдента визначається за формулою:

$$t_j = \frac{|b_j|}{S_{bj}}, \tag{8}$$

де  $|b_j|$  – абсолютне значення коефіцієнта.

Розрахунки, проведені за формулою (8), представлені у вигляді таблиці 4. Порівняння результатів розрахунку з табличним значенням *t*-критерію Стьюдента, що для нашого числа степенів вільності дорівнює  $t = 1,795$  можна сказати, що коефіцієнти  $b_2, b_3, b_4$  значущі в межах довірчої вірогідності 0,9. Коефіцієнтом  $b_1$  можна знехтувати.

Побудова довірчого інтервалу підтвердила попередньо отримані результати. Абсолютне значення першого критерію  $b_1$  менше верхньої межі довірчого інтервалу, що свідчить про його незначущість.

Оцінювання значущості отриманої моделі і, відповідно, її адекватність здійснювалось на основі визначення  $F$ -критерію Фішера [11]:

$$F = \frac{S_{\text{зал}}^2}{S_{\text{від}}^2}, \quad (9)$$

де  $S_{\text{зал}}^2$  – залишкова дисперсія, що розраховується як:

$$S_{\text{зал}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - y_i^-)^2}{f}, \quad (10)$$

де  $\sum_{i=1}^N (y_i - y_i^-)^2$  – сума квадратів різниці експериментальних та розрахункових значень параметра оптимізації;  $f$  – число степенів вільності,  $f = N - (k+1)$ ,  $k$  – кількість факторів. Таким чином  $f = 11$ .

Результати розрахунків  $F$ -критерію, наведені у зведеній таблиці результатів (табл. 4), показують, що розрахункове значення критерію Фішера  $F_{\text{роз}} = 2,288$  дещо менше за табличне  $F_{\text{табл}} = 3,4$ , що свідчить про адекватність отриманої моделі.

Таблиця 4

Зведена таблиця результатів

Значення коефіцієнтів	t-статистика, t=1,795 для довірчої вірогідності 0,9	Довірчий інтервал		Коефіцієнт множинної кореляції, r	Коефіцієнт детермінації, r <sup>2</sup>	F- критерій
		Нижня межа bj-Δbj	Верхня межа bj+Δbj			
b <sub>0</sub> =5,987	-	-	-	0,916	0,84	2,288/3,4
b <sub>1</sub> =-1,125	1,712	-0,608	-1,642			
b <sub>2</sub> =2,913	4,431	1,347	2,742			
b <sub>3</sub> =-1,375	2,092	-0,832	-1,286			
b <sub>4</sub> =2,475	3,766	1,144	2,265			

**Висновки і пропозиції.** Результати проведених досліджень дозволяють зробити такі висновки:

1. Завдяки застосуванню методів математичного планування експерименту встановлено, що серед усіх досліджуваних параметрів найбільший позитивний вплив на процеси зародження та росту тонкоплівкового металопокриття чинять сила розрядного струму  $I_p$  та тривалість осадження  $t_{oc}$ , у той час як відстань катод-субстрат  $L_{к-с}$  та тиск у газорозрядній камері  $P$  призводять до суттєвого зменшення товщини осадженої плівки. Таким чином, можна відзначити, що процес нанесення тонких плівок на діелектричні субстрати в газорозрядній плазмі тліючого розряду ініційованого в порожнистому катоді є складним, багатофакторним процесом, що визначається узгодженістю багатьох параметрів.

2. Встановлено, що побудована регресійна математична модель дозволяє отримати результати теоретичного розрахунку з 4...6 % похибкою відносно експериментальних.

3. Проведені кореляційний та регресійний аналізи показали, що отримана модель є статистично значущою в межах довірчої вірогідності 0,9. Значення коефіцієнта множинної кореляції знаходиться на рівні 0,916, що вказує на досить тісний взаємозв'язок між вхідними параметрами і параметром оптимізації.

4. У результаті проведеного аналізу встановлено, що параметр оптимізації (товщина мідної плівки) на 84 % описується впливом сукупності досліджуваних параметрів режиму, решта 16 % варіації забезпечується впливом інших, не врахованих у моделі параметрів.

**Список використаних джерел**

1. *Исследование* характеристик плазмы в несбалансированной магнетронной распылительной системе / А. А. Соловьев, Н. С. Сочугов, К. В. Оскомов, С. В. Работкин // *Физ. плазмы*. – 2009. – Т. 35, № 5. – С. 443–452.
2. *Устройство* для осаждения тонких пленок с бомбардировкой быстрыми атомами аргона / А. С. Метель, В. П. Болбуков, М. А. Волосова, С. Н. Григорьев, Ю. А. Мельник // *Приборы и техника эксперимента*. – 2014. – № 3. – С. 114–121.
3. *Болбуков В. П.* Распыление мишени на дне полого катода источника быстрых молекул газа в неоднородном магнитном поле / В. П. Болбуков // *Вестник МГТУ «СТАНКИН»*. – 2014. – № 2. – С. 111–117.
4. *Bolotov G., Bolotov M., Rudenko M.* Modification of Materials Surface Layers by Low-Energy Ion Irradiation in Glow Discharge / *Bolotov G., Bolotov M., Rudenko M.* // *IEEE 36<sup>th</sup> International Conference “Electronics and Nanotechnology ELNANO’2016”*, pp.135–140, April 2016.
5. *Болотов М. Г.* Дослідження локальних властивостей плазми тліючого розряду з порожнистим катодом стосовно до умов зварювального нагріву / М. Г. Болотов // *Вісник ЧНТУ. Серія «Технічні науки»*. – 2013. – № 1. – С. 112–119.
6. *Болотов М. Г.* Застосування тліючого розряду з порожнистим катодом у процесах поверхневої обробки металів (огляд) / М. Г. Болотов, М. М. Руденко // *Вісник ЧНТУ. Серія «Технічні науки»*. – 2014. – № 2 (73). – С. 100–103.
7. *Новик Ф. С.* Математические методы планирования экспериментов в металловедении / Ф. С. Новик. – М. : МИСИС, 1972. – 105 с.
8. *Болотов М. Г.* Параметри керування процесом нагріву при дифузійному зварюванні в тліючому розряді з порожнистим катодом / М. Г. Болотов // *Вісник ЧНТУ. Серія «Технічні науки»*. – 2012. – № 4 (61). – С. 101–106.
9. *Адлер Ю. П.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский ; под ред. Ю. П. Адлера. – М. : Наука, 1976. – 278 с.
10. *Растрингин Л. А.* Статистические методы поиска / Л. А. Растрингин. – М. : Наука, 1968. – 376 с.
11. *Айвазян С. А.* Статистическое исследование зависимостей / С. А. Айвазян. – М. : Металлургия, 1966. – 227 с.

**References**

1. Solovev, A.A., Sochugov, N.S., Oskomov, K.V., Rabotkin S.V. (2009). *Issledovanie kharakteristik plazmy v nesbalansirovannoi magnetronnoi raspylitelnoi sisteme* [A study of plasma characteristics in an unbalanced magnetron sputtering system]. *Fiz. plazmy – Plasma Physics*, Vol. 35, no. 5, pp. 443–452 (in Russian).
2. Metel, A.S., Bolbukov, V.P., Volosova, M.A., Grigorev, S.N., Melnik, Yu.A. (2014). *Ustroistvo dlia osazhdeniia tonkikh plenok s bombardirovkoi bystryimi atomami argona* [An apparatus for depositing thin films with argon fast atom bombardment]. *Pribory i tekhnika eksperimenta – Instruments and Experimental Techniques*, no. 3, pp. 114–121 (in Russian).
3. Bolbukov, V.P. (2014). *Raspylenie misheni na dne pologo katoda istochnika bystrykh molekul gaza v neodnorodnom magnitnom pole* [Sputtering target at the bottom of the hollow cathode source of fast gas molecules in an inhomogeneous magnetic field]. *Vestnik MGTU “STANKIN” – Vestnik of MSTU “Stankin”*, no. 2, pp. 111–117 (in Russian).
4. *Bolotov, G., Bolotov, M., Rudenko, M.* Modification of Materials Surface Layers by Low-Energy Ion Irradiation in Glow Discharge. *IEEE 36<sup>th</sup> International Conference “Electronics and Nanotechnology ELNANO’2016”*, pp.135–140, April 2016.
5. Bolotov, M.H. (2013). *Doslidzhennya lokalnykh vlastyvostei plazmy tliuchoho rozriadu z porozhnystym katodom stosovno do umov zvaryvalnoho nahrivu* [The study of local properties of the glow discharge with hollow cathode plasma respect to the welding conditions]. *Visnyk ChNTU. Seriiia «Tekhnichni nauky» – Visnyk of Chernihiv State Technological University. Series “Technical sciences”*, no. 1, pp. 112–119 (in Ukrainian).
6. Bolotov, M.H., Rudenko, M.M. (2014). *Zastosuvannya tliyuchoho rozryadu z porozhnystym katodom u protsesakh poverkhnevoyi obrobky metaliv* [Application of glow discharge with hollow



cathode in processes of surface treatment of metals (review)]. *Visnyk ChNTU. Seriya «Tekhnichni nauky»* – *Visnyk of Chernihiv State Technological University. Series “Technical sciences”*, no. 2 (73), pp. 100–103 (in Ukrainian).

7. Novik, F.S. (1972). *Matematicheskie metody planirovaniia eksperimentov v metallovedenii* [Mathematical methods for design of experiments in metal science]. Moscow: MISIS (in Russian).

8. Bolotov, M.H. (2012). Parametry keruvannya protsesom nahrivu pry dyfuziynomu zvaryuvanni v tliuchomu rozryadi z porozhnystym katodom [Control parameters of heating process diffusion welding at a hollow cathode glow discharge]. *Visnyk ChNTU. Seriya «Tekhnichni nauky»* – *Visnyk of Chernihiv State Technological University. Series “Technical sciences”*, no. 4 (61), pp. 101–106 (in Ukrainian).

9. Adler, Yu.P. (ed.), Markova, E.V., Granovskii, Yu.V. (1976). *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnykh uslovii* [Planning an experiment in the search for optimal conditions]. Moscow: Nauka (in Russian).

10. Rastrigin, L.A. (1968). *Statisticheskie metody poiska* [Statistical methods of research]. Moscow: Nauka (in Russian).

11. Aivazian, S.A. (1966). *Statisticheskoe issledovanie zavisimostei* [Statistical research of dependencies]. Moscow: Metallurgiiia (in Russian).

**Болотов Максим Геннадійович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

**Болотов Максим Геннадьевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры сварочного производства и автоматизированного проектирования строительных конструкций, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

**Bolotov Maksym** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Welding Technology and CAD/CAM/CAE Systems of Building Structures, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** pilgrim.83@mail.ru

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-0915-4132>

**ResearcherID:** H-4183-2014

**Scopus Author ID:** 57190377278