

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет електроніки**

**Кафедра електронних приладів та пристроїв**

«На правах рукопису»  
УДК 621.325

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Л. Д. Писаренко

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 р.

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

**зі спеціальності 171 Електроніка**

**на тему: «Нанесення діелектричних покриттів з використанням методів  
електронно-променевого випаровування»**

Виконав:

Студент II курсу, групи ДЕ-81мп

**Шнайдер Руслан Володимирович** \_\_\_\_\_

Керівник:

Професор, д.т.н

**Мельник І.В.** \_\_\_\_\_

Консультант з **назва розділу:**

**Посада, науковий ступінь, вчене звання,**

**Прізвище, ініціали** \_\_\_\_\_

Рецензент:

**Посада, науковий ступінь, вчене звання,**

**Прізвище, ініціали** \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць  
інших авторів без відповідних  
посилань.

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Факультет електроніки**  
**Кафедра електронних приладів та пристроїв**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність (спеціалізація) – 171 Електроніка (Електронні прилади та пристрої)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Л.Д. Писаренко

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на магістерську дисертацію студенту**

Шнайдеру Руслану Володимировичу

1. Тема дисертації «Нанесення діелектричних покриттів з використанням методів електронно-променевого випаровування», науковий керівник дисертації Мельник Ігор Віталійович, професор, д.т.н., затверджені наказом по університету від «07» листопада 2019 р. № 3859-с
2. Термін подання студентом дисертації \_\_\_\_\_
3. Об'єкт дослідження: діелектричні покриття отримані методами електронно-променевого випаровування
4. Вихідні дані: робочий тиск  $p_{a0} = 0,1$  Па, прискорювальна напруга  $U_{пр} = 10$ кВ, потужність гармати  $W_r = 5$  кВт, робочий газ – азот та метан, матеріал покриттів – нітрид титану та карбід титану, матеріал катода - алюміній, матеріал анода – мідь
5. Перелік завдань, які потрібно розробити
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Складальне креслення імпульсної газорозрядної електронної гармати високовольтного тліючого розряду, плакати з рисунками, графіками та висновками.
7. Орієнтовний перелік публікацій:

1. «Застосування електронно-променевої технології випаровування для осадження нанокompозитних покриттів на порошки та гранули»
2. «Формування стійких покриттів вакуумною електронно-променевим випаровуванням»

8. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Огляд науково-технічної літератури по принципам побудови та функціонування електронних гармат	04.09.2019-22.09.2019	
2.	Дослідження та аналіз процесів, які відбуваються на електродах електронно-променевої гармати. Дослідження фізичних властивостей існування високовольтного тліючого розряду.	23.09.2019-11.10.2019	
3.	Оцінка нанесених захисних діелектричних покриттів.	12.10.2019-15.10.2019	
4.	Розробка конструкторської документації та креслення на пристрій.	16.10.2019-31.10.2019	
5.	Оформлення пояснювальної записки, креслення, плакатів з формулами та графіками, підготовка доповіді.	27.11.2019-09.12.2019	
6.	Отримання відгуку та реєнзії на дипломне проектування.	10.12.2019-13.12.2019	

Студент

**Шнайдер Р.В.**

Науковий керівник дисертації

Мельник І.В.



## РЕФЕРАТ

**Нанесення діелектричних покриттів з використанням методів електронно-променевого випаровування /** Дипломний проект напряму підготовки **171 – «Електроніка».** Шнайдер Руслан Володимирович. «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Факультет електроніки, кафедра електронних приладів та пристроїв. Група ДЕ-81мп. – К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2018. – 64 с., іл. 19, табл. 1.

**Ключові слова:** електронна гармата, високовольтний тліючий розряд, імпульсний режим, захисні покриття, вакуум.

**Короткий зміст роботи:** В даній дипломній роботі представлено огляд науково-технічної літератури по електронним гарматам на основі високовольтного тліючого розряду.

Показано методи та перспективи використання таких пристроїв для різних термічних операцій в тому числі для осадження теплозахисних покриттів за допомогою потужних електронних пучків у цих гарматах. Такі електронні гармати мають ряд техніко-економічних переваг над традиційними гарматами:

- Простота управління струмом електронного пучка шляхом зміни тиску в області горіння ВТР.

- Відносна простота і дешевизна електронних гармат ВТР, а також необхідного для їх роботи вакуумного обладнання;

- Можливість роботи в низькому і середньому вакуумі в середовищі різних газів, включаючи інертні і активні;

Проведене експериментальне дослідження процесу термоіонного осадження покриттів із тугоплавких матеріалів шляхом імпульсного електронно-променевого випаровування. Отримані покриття TiN та TiC з гладкою поверхнею та густою кристалічною структурою.

## АНОТАЦІЯ

Дипломний проект присвячений розробці математичної моделі тріодних джерел електронів високовольтного тліючого розряду, а також дослідженню технологічного процесу нанесення діелектричного покриття методом імпульсного електронно-променевого випаровування.

В даній дипломній роботі представлено огляд науково-технічної літератури по електронним гарматам на основі високовольтного тліючого розряду. Показано актуальність використання даних пристроїв, що призначені для таких технологічних операцій як: пайка, плавка, зварювання, модифікація поверхонь металів та осадження діелектричних покриттів та інше.

У роботі також наводяться прості аналітичні співвідношення для розрахунку струмів основного та допоміжного розрядів та енергетичної ефективності тріодних джерел електронів високовольтного тліючого розряду. Перевагами даної моделі, що пропонується, є її універсальність та простота. Це дає можливість проводити попередні якісні та кількісні оцінки енергетики високовольтного тліючого розряду на початковому етапі проектування джерел електронів.

Отримані в роботі результати дають можливість оцінити перспективи використання таких систем для нанесення захисних діелектричних покриттів з тугоплавких матеріалів.

## S U M M A R Y

The diploma project is devoted to the development of a mathematical model of three-way sources of electrons of a high-voltage glow discharge, as well as to the study of the technological process of applying dielectric coating by pulsed electron-beam evaporation.

In this thesis the review of scientific and technical literature on electronic guns on the basis of high-voltage glow discharge is presented. The actuality of the use of these devices, which are intended for such technological operations as: soldering, melting, welding, modification of metal surfaces and deposition of dielectric coverings, and others, are shown.

The paper also presents simple analytical relations for calculating the currents of the main and auxiliary discharges and the energy efficiency of the three-source electrons of the high-voltage glow discharge. The benefits of this model are its versatility and simplicity. This makes it possible to carry out preliminary qualitative and quantitative estimates of the energy of a high-voltage glow discharge at the initial stage of the design of electron sources.

The results obtained in the work give an opportunity to evaluate the prospects of the use of such systems for the application of protective dielectric coatings from refractory materials.

# **Пояснювальна записка до магістерської дисертації**

на тему: Нанесення діелектричних покриттів з використанням методів  
електронно-променевого випаровування

Київ – 2019 року

## ЗМІСТ

	ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ .....	8
	ВСТУП .....	10
1.	ІМПУЛЬСНІ ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРОНІВ ВТР ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЦІЛЕЙ .....	13
1.1.	Електродна система високовольтного тліючого розряду.....	13
1.2.	Джерела електронів ВТР для імпульсних технологічних процесів.....	18
1.3.	Області застосування імпульсних пучків.....	23
1.4.	Короткофокусні джерела електронів.....	29
1.5.	Довгофокусні джерела електронів.....	32
	Висновки.....	38
2.	АНАЛІЗ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ТРИОДНІЙ ЕЛЕКТРОДНІЙ СИСТЕМІ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ .....	39
2.1.	Основні загальні положення.....	39
2.2.	Процеси в анодній плазмі.....	40
2.3.	Процеси на електродах.....	45
	Висновки.....	52
3.	ТЕХНОЛОГІЧНА МОЖЛИВІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ З ХОЛОДНИМ КАТОДОМ В ІМПУЛЬСНОМУ РЕЖИМІ РОБОТИ ДЛЯ НАНЕСЕННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ПОКРИТТІВ.....	53
3.1.	Технологічна можливість нанесення діелектричного покриття методом імпульсного електронно-променевого випаровування.....	53
	Висновки.....	59
4.	ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕУ НАНЕСЕННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ПОКРИТТІВ МЕТОДОМ ІМПУЛЬСНОГО ЕЛЕКТРОННО ПРОМЕНЕВОГО ВИПАРОВУВАННЯ.....	60
4.1.	Нанесення діелектричного покриття методом імпульсного електронно-променевого випаровування.....	60
	Висновки.....	64
	В И С Н О В К И .....	65
	ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	69
	ДОДАТОК 1: СПЕЦИФІКАЦІЯ.....	72

					МРП.171.081.018 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Шнайдер Р.В.			Нанесення діелектричних покриттів з використанням методів електронно-променевого випаровування <i>Пояснювальна записка</i>	Літ.	Арк.	Архів
Перевір.		Мельник І.В.					7	70
Н. Контр.		Чадюк В.О.				КПІ ім.І.Сікорського гр. ДЕ-81мп		
Затверд.		Писаренко Л.Д						

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ

ВТР	високовольтний тліючий розряд
ККД	Коефіцієнт корисної дії
ГРЕГ	Газорозрядна електронна гармата
ДЕЛ ТРАП	Джерела електронів тліючого розряду з анодною плазмою
$A_i, a_i$	напівемпіричні коефіцієнти
$B_i$	ступінь іонізації газу
$d_{\text{кп}}$	відстань від катоду до межі анодної плазми
$d_{\text{п}}$	подовжній розмір анодної плазми
$d_{\text{поп}}$	поперечний розмір розрядного проміжку
$j_{\text{ек}}$	густина потоку електронів з поверхні катоду
$j_{\text{ік}}$	густина потоку іонів
$l$	подовжній розмір розрядного проміжку
$n_e$	концентрація електронів
$n_i$	концентрація іонів
$n$	концентрація теплових часток робочого газу
$\bar{p}$	усереднене значення тиску газу
$p_{\text{а0}}$	приведений тиск у розрядному проміжку
$r_{\text{к}}$	поперечний розмір катода
$T_e$	температура електронного газу у плазмі
$U_i$	потенціал іонізації газу
$U_{\text{пр}}$	прискорююча напруга
$U_{\text{р}}$	напруга горіння розряду
$\gamma$	коефіцієнт вторинної іонно-електронної емісії
$\lambda_e$	довжина вільного пробігу електронів
$\lambda_i$	довжина вільного пробігу іонів



## Вступ

В наш час в різних галузях промисловості технологічні джерела електронів на основі високовольтного тліючого розряду (ВТР) знаходять широке застосування. Це пов'язано з тим, що електронно-променеве нагрівання має характерні переваги, основними із яких є можливість концентрації енергії до  $10^6 - 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> на поверхні обробки, проведення технологічних процесів у вакуумі, що забезпечує високу чистоту матеріалів при їх обробці, а також можливість автоматизації виконуваних процесів. Особливо актуальним є використання таких джерел електронів у електронній промисловості, у машинобудуванні, у металургії, та у приладобудуванні.

Значно розширюються технологічні можливості електронно-променевих методів при застосуванні імпульсних електронних пучків. Проте їх застосування стримується складністю існуючого обладнання. За їх допомогою можна виконувати такі термічні операції, як високошвидкісне вакуумне переплавлення тугоплавких металів із метою їх рафінування, нанесення композитних покриттів у середовищі інертних або активних газів за умови низького тиску, високошвидкісне відпалювання малогабаритних виробів, високошвидкісне зварювання тонкостінних виробів у середньому та низькому вакуумі.

Задля реального застосування електронно-променевих гармат ВТР в імпульсних технологічних процесах необхідно вирішення складних фізико-технічних питань, пов'язаних з формуванням та генеруванням інтенсивних електронних пучків, ефективністю керування їх параметрами, стабільністю

					МП.171.081.018	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

роботи та інше. Тому дослідження імпульсних режимів високовольтного тліючого розряду та розробка на їх основі газорозрядних джерел електронів, що генерують потужні імпульсні електронні пучки, є актуальною науково-технічною проблемою.

Більш масштабніше використання імпульсних методів електронно-променевої обробки матеріалів та виробів можливе при розробці та застосуванні технологічного обладнання на основі електронних гармат високовольтного тліючого розряду (ВТР) з холодним катодом. Такі гармати забезпечують генерацію електронних пучків різної потужності, можуть працювати в широкому діапазоні тиску різних газів, відносно прості і надійні в роботі

Подальший розвиток перспективних імпульсних процесів обробки матеріалів та виробів потребує розробки відносно надійного, простого, недорогого електронно-променевого обладнання, що пов'язано, в першу чергу, із створенням відповідних електронних гармат. Термо-катодні електронні гармати, що використовуються в технологічному обладнанні, не завжди відповідають необхідним вимогам через високу робочу температуру катода та складність їх конструкцій. Їх використання дозволяє спростити технологічне обладнання і більш широко застосовувати імпульсні електронно-променеві процеси в промисловому виробництві.

В останні роки вчені дуже зацікавлені впровадженням у виробництво тріодних джерел електронів на основі ВТР, у разі використання яких за рахунок ефективного керування струмом електронного пучка можна забезпечити підвищену стабільність параметрів технологічного процесу, необхідну у сучасному виробництві, насамперед у електронній промисловості та приладобудуванні. У разі використання мало-інерційного електричного керування струмом електронного пучка підвищується продуктивність електронно-променевого обладнання та відсоток виходу гідних виробів. У зв'язку з цим є необхідним подальший розвиток теорії ВТР для тріодних

					МП.171.081.018	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електродних систем. При цьому найбільш цікавими є дослідження параметрів анодної плазми та аналіз енергетики розрядного проміжку.

Отримання різних покриттів методом електронно-променевого випаровування у вакуумі є одним із найбільш поширених способів. Проте, не зважаючи на широкі технологічні можливості електронно-променевого способу випаровування, використання стаціонарного нагрівання утруднює отримання композитних покриттів, а також покриттів із хімічних сполук, випаровування яких при високих температурах супроводжується термічною дисоціацією. В процесі осадження таких покриттів необхідно витримувати з високою точністю температуру та тривалість нагрівання матеріалу, проводити осадження покриттів в атмосфері відповідних технологічних газів, якими можуть бути кисень та інші реактивні гази, в заданому діапазоні тиску.

Для осадження покриттів в наведених умовах перспективним є імпульсне електронно-променеве випаровування пучком, що генерується в високовольтному тліючому розряді з холодним катодом та активація парогазового потоку в іонізуючому розряді низького тиску в зоні випаровування. Поєднання імпульсного випаровування з використанням в широкому діапазоні тиску та складу газового середовища забезпечує можливість отримання покриттів з заданими структурою та фазовим складом.

Для реального застосування імпульсного електронно-променевого випаровування та іонно-плазмового осадження наноструктурованих покриттів необхідне достатньо глибоке теоретичне та експериментальне дослідження процесів генерації та формування електронного пучка в імпульсному режимі горіння високовольтного тліючого розряду, керування енергетичними параметрами електронного пучка, впливу параметрів розряду на процеси випаровування та конденсації композитних матеріалів та хімічних сполук, синтезу сполук при осадженні.

Метою роботи були комплексні дослідження розрядів низького тиску для застосування в технологіях отримання наноструктурованих покриттів із хімічних сполук методом імпульсного електронно-променевого випаровуван-

					МП.171.081.018	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

ня в контрольованому газовому середовищі з його іонізацією. В роботі проведено аналіз особливостей імпульсного електроннопроменевого випаровування та розглянуто можливості використання високовольтного тліючого розряду з холодним катодом для такого випаровування. Визначено залежність характеристик іонізуючого розряду в зоні випаровування від енергетичних параметрів електронного пучка та ефективність іонізації парогазового потоку при іонно-плазмовому осадженні покриттів.

					МП.171.081.018	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# РОЗДІЛ 1. ІМПУЛЬСНІ ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРОНІВ ВТР ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЦІЛЕЙ

## 1.1. Електродна система високовольтного тліючого розряду.

В електронних гарматах на основі високовольтного тліючого розряду для генерації та формування електронного пучка використовують розряд низького тиску з холодним катодом, для якого характерні висока напруга горіння та низька густина струму. Запалювання та існування ВТР можливе в середовищі різних газів в діапазоні тиску  $10^{-1} - 10^2$  Па при прискорюючій напрузі одиниці – десятки кіловольт [1 – 3].

Електродна система ВТР може бути тріодною або діодною, в тріодній є ланцюг допоміжного розряду для керування параметрами анодної плазми. Допоміжний розряд зазвичай низьковольтний (сотні Вольт) і служить автономним керованим джерелом іонів.

Струм ВТР і напруга горіння можуть змінюватись в широкому діапазоні в залежності від геометрії та матеріалів електродів, тиску та роду газу, а також режиму роботи [1, 2]. Найчастіше в технологічних джерелах електронів на основі ВТР застосовують стаціонарні розряди з прискорюючою напругою 20 – 30 кВ і струмом розряду до 10 – 15 А. При цьому густина струму на катоді в стаціонарному режимі становить  $j_{ек} \approx 0,1$  А/см<sup>2</sup>, а в імпульсному –  $j_{ек} \leq 1$  А/см<sup>2</sup>.

В імпульсному режимі роботи джерела електронів ВТР, де розпилення емісійної поверхні катоду лише в імпульсах струму буде частковим, коефіцієнт емісії буде більшим ніж в стаціонарному режимі роботи. Це підвищує ККД тріодного джерела електронів і зменшує долю енергії, яка виділяється на його електродах, що забезпечує тріодними електродними системами ВТР з алюмінієвим катодом генерацію електронних пучків потужністю десятки кВт.

					МП.171.081.018	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14





На відміну від діодної системи, де межа анодної плазми при максимальному струмі розряду приймає форму подібну до робочої поверхні катоду, в тріодній електродній системі, де густина анодної плазми залежить від умов горіння допоміжного розряду, форма межі анодної плазми при максимальному струмі розряду може приймати різну форму включно до увігнутої.

Зміна картини поля біля межі анодної плазми впливає на траєкторії руху емітованих плазмою іонів, що приводить до зменшення розміру емісійної поверхні катоду і, відповідно, кута сходження електронів пучка. Викривлення поля біля межі плазми впливає також на траєкторії руху електронів. З метою покращення умов формування електронного пучка в тріодних електродних системах застосовують різні конструкції керуючих електродів (циліндричний, конусний, пластинчатий).

Умови формування електронного пучка покращуються при використанні конусного керуючого електрода. В такій електродній системі поперечний розмір плазми обмежується уздовж вісі системи, що зменшує увігнутість її межі з боку катоду і покращує геометричні параметри електронного пучка.

В електродній системі з циліндричним керуючим електродом, який виконує роль порожнистого катода допоміжного розряду, забезпечується достатньо висока ефективність керування струмом основного розряду в діапазоні зміни напруги горіння допоміжного розряду в десятки - сотні Вольт.

В джерелах електронів ВТР при використанні їх в електронно-променевих технологіях керування струмом розряду в безперервному режимі роботи здійснюють зміною тиску газу в розрядному проміжку. В промисловому обладнанні керування струмом здійснюється в автоматичному режимі, шляхом регульованого напуску газу в розрядний проміжок при безперервному відкачуванні джерела електронів. Такий газодинамічний спосіб забезпечує керування струмом технологічних джерел електронів в усьому робочому діапазоні при безперервному режимі роботи. Проте час

						МРП.171.081.018	Арк.
							17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

регулювання струму, а відповідно і потужності електронного пучка, складає сотні мс – одиниці с, що обумовлено інерційністю газодинамічних процесів відкачування та напуску газів а також інерційністю пристроїв для напуску газів [7, 8].

					МПП.171.081.018	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18



Тому не може бути застосований для формування імпульсних електронних пучків. При роботі джерела електронів ВТР в імпульсному режимі модуляція електронного пучка здійснюється за допомогою допоміжного розряду, який при подачі на керуючий електрод імпульсів позитивної або негативної полярності (в залежності від конструкції електродної системи) змінює баланс часток в анодній плазмі згідно з величиною амплітуди напруги та частоти тривалості імпульсів. Так як для запалювання допоміжного розряду необхідний невеликий струм основного розряду (10 – 20 мА), то глибина модуляції електронного пучка в залежності від конструкції електродної системи та режимів роботи джерела електронів може перевищувати 90%. Час запалювання допоміжного розряду не перевищує 20 мкс, а час гасіння становить одиниці мкс. Такі часові характеристики свідчать, що імпульсна модуляція електронного пучка джерел електронів ВТР можлива в діапазоні, який визначається вимогами електронно-променевих технологій (частота модуляції 10 – 200 Гц, рідко до 500 Гц, тривалість імпульсів 1 - 50 мс).

## 1.2. Джерела електронів ВТР для імпульсних технологічних процесів

В тріодних електронних гарматах ВТР малоінерційне керування енергетичними параметрами електронного пучка реалізується допоміжними несамостійними низьковольтними розрядами. При цьому необхідний невеликий постійний струм основного розряду до 10 – 20 мА, який не має технологічного значення, тому такі гармати вважаються імпульсними. Допоміжний низьковольтний несамостійний розряд запалюється в об'ємі основного високовольтного тліючого розряду при подачі потенціалу в діапазоні від десятків до сотень Вольт на керуючий електрод. Зміна величини потенціалу керуючого електроду змінює густину анодної плазми, що впливає

					МП.171.081.018	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

на величину інтенсивності потоку іонів на катод і відповідно, на величину струму електронного пучка. Стала часу при електричному керуванні струмом розряду залежить від інерційності процесів в анодній плазмі і може складати до одиниць мс. Це дозволяє відносно просто здійснювати імпульсну модуляцію струму розряду, подаючи імпульси з заданими часовими параметрами на електрод допоміжного розряду з напругою, на декілька порядків нижчою від напруги основного розряду.

Існуючі тріодні гармати ВТР можна розділити на два типи за умовами генерації та формування електронного пучка: гармати з точковим та з розвиненим емітером.

В першому типі гармат розмір та форма анода забезпечують фокусування іонного пучка з плазми в пляму малої площі на поверхні холодного катода, що є точковим емітером електронів (Рис. 1.3). Прискорені в електричному полі з позитивним просторовим зарядом, електрони рухаються поблизу оптичної вісі електростатичної лінзи. В деяких конструкціях для регулювання кута розходження електронного пучка встановлений прикатодний електрод, на який подається відповідний потенціал. Ці джерела дозволяють формувати тонкі електронні пучки при струмах до 20 – 40 мА.

Гарматам ВТР з точковим емітером притаманні такі суттєві недоліки: обмежений струм і потужність пучка та малий строк служби катода у зв'язку з інтенсивним руйнуванням його робочої поверхні та утворенням кратера, що впливає на електронно-оптичні властивості системи.

Загальна потужність таких джерел пучків електронів складає не більше 1 – 2 кВт, з доступною питомою потужністю до  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>, що дозволяє їх застосування в технологічних операціях, в тому числі для зварювання металів та кераміки та для нанесення покриттів.

					МП.171.081.018	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21



струму в пучку при невеликій густині струму іонно-електронної емісії, що дозволяє різко збільшити строк служби холодного катода.

На рис. 1.4.а) показана конструкція електронної гармати ВТР з холодним катодом, що має розвинуту емісійну поверхню і використовується для зварювання металів невеликих товщин. Холодний катод з увігнутою емісійною поверхнею закріплений на масивній мідній основі, що встановлена в прохідному керамічному ізоляторі, що дозволяє виключити водяне охолодження високовольтного вузла конструкції. Перфорований порожнистий анод охоплений керуючим електродом, вертикальні ребра якого розташовані навпроти повздовжніх отворів в аноді. Для транспортування електронного пучка та його фокусування на оброблюваному виробі використовується спеціальна магнітна фокусувальна система. При прискорюючій напрузі 25 кВ та струмі до 200 мА діаметр електронного пучка на відстані 100 мм від гармати не перевищує 1,5 мм [10]. Електричне керування струмом розряду здійснюється за допомогою допоміжного розряду, що запалюється подаванням на керуючий електрод позитивного потенціалу до 300 В. При цьому можливо використання імпульсної модуляції струму пучка глибиною до 70 – 90% з частотою до 100 – 200 Гц.

Газорозрядна електронна гармата, що приведена на рис. 1.4.б, призначена для випаровування матеріалів. В гарматі також використовується холодний катод з розвиненою робочою поверхнею, що виконаний у вигляді частини сфери. Охолоджуваний водою катодний вузол встановлений на прохідному ізоляторі, виготовленому з органічного матеріалу. Конусний анод гармати ізолюваний від її корпусу та служить керуючим електродом, на який в процесі роботи подається негативний потенціал величиною 20 – 200 В. При прискорюючій напрузі 10 – 12 кВ максимальна потужність пучка складає 5 кВт [10]. Пучок виводиться з гармати в зону випаровування

					МП.171.081.018	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23



Потужність створених тріодних газорозрядних гармат ВТР з розвиненим емітером, що формують електронні пучки з точковим фокусом, не перевищують 5 - 6 кВт при прискорюючих напругах до 35 кВ.

### 1.3.Області застосування імпульсних пучків

Електронно-променеві методи термічної обробки матеріалів та речовин широко застосовуються в сучасній промисловості. Відомо, що в процесі взаємодії електронного пучка з матеріалом кінетична енергія електронів переважно перетворюється у теплову у зоні обробки. Оскільки діапазони потужності та концентрації енергії в пучку великі, то практично можливе отримання усіх видів термічного впливу на матеріали від нагрівання до заданих температур, плавлення та до випаровування, у тому числі з дуже високими швидкостями (рис. 1.5).

Основними напрямками розвитку сучасної електронно-променевої технології є плавка та випаровування у вакуумі, зварювання та прецизійна обробка, пайка.

Характерними перевагами методу є здатність концентрувати потоки енергії в широкому діапазоні від  $10^3$  до  $5 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>, можливість проведення процесу у вакуумі, що забезпечує чистоту оброблюваного матеріалу, а також можливість повної автоматизації процесу.

При плавленні використовують потужні (до кількох МВт) електронно-променеві гармати з прискорюючими напругами 20 – 30 кВ, при випаровуванні у вакуумі для нанесення плівок та покриттів – десятки та сотні кВт з такими самими прискорюючими напругами. Концентрація енергії в цих процесах невелика – не більше  $10^5$  Вт/см<sup>2</sup> [10].

Для зварювання металів створено обладнання трьох класів: низько-, середньо- та високовольтне, що охоплює діапазон прискорюючих напруг від 20 до 150 кВ. Потужність гармат становить 1 – 120 кВт та більше при

					МП.171.081.018	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25



розігрів матеріалу у порівнянні з витратами на теплопровідність. При цьому середня за період потужність пучка може бути порівняно невеликою, тобто виділення тепла відбувається за час, значно менший часу паузи. Висока питома потужність, що передається електронним пучком в імпульсі та керований обмежений час обробки дозволяють отримувати всі можливі ефекти термічного впливу.

Більш універсальні і довговічні короткофокусні ДЕЛ ТРАП з точковим фокусом. Спрощення вакуумного обладнання та системи електроживлення дозволяє при використанні спеціалізованих зварювальних систем створювати на основі універсальних гармат з точковим фокусом ефективно промислове обладнання для зварювання різних конструкційних матеріалів. Перспективно застосовувати ДЕЛ ТРАП для зварювання тонколистових матеріалів, так як їх використання у багатьох випадках буде більш ефективним, ніж, наприклад, при використанні аргонодугової зварювальної техніки. В середньому вакуумі вони дозволяють отримувати якісні зварні з'єднання швидше і дешевше, ніж при використанні інших методів зварювання в захисній атмосфері.

Довгофокусні гармати з точковим фокусом застосовуються для зварювання та мікрообробки різних деталей (листові метали, фольга, трубки, кераміка та ін.), причому процес проводять в необхідному технологічному газовому середовищі, зазвичай окисному, без зарядки поверхні діелектриків, так як утворююча плазма компенсує надлишкові заряди. Істотний недолік таких гармат - мала потужність і малий термін служби катода, а перевага - спрощення вакуумного устаткування і можливість роботи на середньому вакуумі в гарматі і технологічної камері, велика стійкість, надійність роботи, простота конструкції та експлуатації джерела електронів та системи живлення.

Також використовують довгофокусні та короткофокусні електронні гармати для зварювання фігурних швів електронними потоками відповідної

					МП.171.081.018	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

форми, що формують порожнисті циліндричні, радіальні, що сходяться до центру або лінійні потоки електронів тривалістю 0,1 - 4 с, питома потужність до  $10^5$  Вт / см<sup>2</sup> і потужністю до 25 - 50 кВт.

Найбільш відповідними джерелами електронів для пайки твердими припоями у вакуумі або середовищі інертних газів є ДЕЛ ТРАП, так як вони мають просту конструкцію, безінерційну і гнучку систему управління, досить високий ККД, дозволяють отримувати практично будь-яку форму пучка електронів, необхідну для відповідної зони нагріву. При цьому використання безмасляного відкачування і середовища інертних газів при тиску 1 - 10 Па забезпечує отримання паянних з'єднань хорошої якості при високій економічній ефективності.

Перспективним застосуванням газорозрядних гармат є також високотемпературне спікання тугоплавких матеріалів (карбіди, нітриди, борида). Спікають невеликі деталі (2 - 20 мм) у водні, аргоні при тиску 0,01 - 10 Па при витримці до десятків хвилин [2]. З металографічного аналізу зрозуміло, що при електронно-променевому нагріванні в середньому вакуумі в середовищі інертних газів можна отримувати більш якісні матеріали, ніж при інших способах нагріву. ДЕЛ трапи дозволяють успішно проводити високотемпературну обробку найрізноманітніших тугоплавких матеріалів, отриманих методами порошкової металургії, причому робоча атмосфера джерела може відповідати атмосфері в робочій камері, так як холодний катод задовільно працює як в відновному, так і в окислювальному середовищі. Це особливо важливо при спіканні гідридів, нітридів і деяких оксидів, дисоціюючих у вакуумі при високій температурі.

Для отримання різних покриттів широко використовують методи термічного напилення у вакуумі. Одним з перспективних вважають метод осадження іонів, при якому матеріал покриття випаровується при тиску 0,1 Па і іонізується додатковим розрядом. При цьому термічне випаровування здійснюється пучком електронів, а іонізація парів розрядом в середовищі

					МП.171.081.018	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

інертного газу. Цей метод осадження об'єднує переваги методу катодного розпилення і термічного напилення. Він володіє такими перевагами, як можливість очищення деталі (підкладки) іонним бомбардуванням, гарну адгезію покриття, високим коефіцієнтом використання пари матеріалу, високою швидкістю напилення (продуктивність процесу). Використання електронних гармат з термокатодом тут також досить складне, так як вони не можуть стійко працювати при робочому тиску, що застосовується при іонному осадженні. Тому використання ДЕЛ ТРАП в деяких системах для випаровування матеріалів переважно.

Ще однією перспективною сферою застосування імпульсних електронних пучків є модифікація поверхонь металічних матеріалів. При дії на метал потужного імпульсного пучка з густиною потужності  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup> та більше відбувається швидке нагрівання та охолодження поверхневого шару. Фазові та структурні перетворення в цьому випадку приводять до суттєвої зміни його фізико-хімічних характеристик та властивостей міцності. При цьому перевага електронно-променевого нагрівання полягає у тому, що, завдяки дуже гнучкому регулюванню енергії електронів, можна оперувати глибиною та профілем виділення енергії електронів, тобто товщиною шару зі змінюваною структурою.

В табл. 1.1 наведені основні параметри електронних пучків, які застосовуються в різних процесах імпульсної електронно-променевої технології, та визначені їх значення та допустимі відхилення, що задовольняють умовам проведення типових технологічних операцій.

					МРП.171.081.018	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1.

Технологічні процеси		Одиниці вимірювань	Електронно-променеве зварювання	Термічне електронно-променеве випаровування	Термічна обробка поверхонь	Моноімпульсна пайка і пайка-зварювання у вакуумі	Електронно-променева плавка
Параметри ГРЕГ							
Прискорююча напруга	робочій діапазон	кВ	20 ÷ 60	10 ÷ 20	30 ÷ 60	15 ÷ 25	20 ÷ 40
	допустиме відхилення	%	0.1 ÷ 1	1 ÷ 3	1 ÷ 3	3 ÷ 5	1 ÷ 3
	допустимий коефіцієнт пульсації	%	0.2 ÷ 4	1 ÷ 7	0.2 ÷ 4	1 ÷ 7	1 ÷ 7
Струм розряду в імпульсі	робочій діапазон	А	0.01 ÷ 0.2	0.1 ÷ 1	0.01 ÷ 0.3	0.5 ÷ 2	0.5 ÷ 20
	допустиме відхилення	%	1 ÷ 3	1 ÷ 5	1 ÷ 3	3 ÷ 5	1 ÷ 3
Тривалість імпульсів струму пучка		с	$10^{-3} \div 10^{-1}$	$10^{-3} \div 1$	$10^{-3} \div 1$	$10^{-1} \div 10$	$10^{-3} \div 10^{-1}$
Потужність розряду	в імпульсі	кВт	1 ÷ 10	5 ÷ 50	2 ÷ 20	5 ÷ 10	4 ÷ 800
	середня	кВт	0.5 ÷ 5	2 ÷ 30	1 ÷ 10	2 ÷ 5	2 ÷ 400
Питома потужність пучка у фокусі		Вт/см <sup>2</sup>	$10^5 \div 10^6$	$10^4 \div 10^5$	$10^4 \div 10^6$	$10^4 \div 10^5$	$10^4 \div 10^5$
Діаметр пучка в зоні термічного впливу		мм	0.1 ÷ 1	3 ÷ 8	1 ÷ 100	2 ÷ 5	5 ÷ 20
Робочий тиск в гарматі		Па	2.6 ÷ 10.6	3 ÷ 13.3	2.6 ÷ 10.6	5 ÷ 13.3	2.5 ÷ 10
Робочий тиск в технологічній камері		Па	< 1.33	0.01 ÷ 0.13	< 1.33	< 2.5	0.01 ÷ 0.5

#### 1.4. Короткофокусні джерела електронів

Типовим короткофокусним джерелом електронів була іонна рентгенівська трубка, яка містила холодний увігнутий катод, мішень (антикатод) і анод, включені в ланцюг високовольтного джерела живлення. В результаті їх розвитку створені досить досконалі пристрої з високими технічними показниками: середня потужність досягала десятків кіловат, струми - одиниць-десятків міліампер, напруги - десятки-сотні кіловольт, час безперервної роботи - до декількох діб. Була детально вивчена феноменологія процесів, зроблені основні удосконалення головних елементів і вузлів. Знайомство з досягненнями в цій галузі, незважаючи на їх давність, дає цінну інформацію для аналізу та синтезу сучасних джерел електронів, що працюють на тих же принципах. Загальноприйнятими вимогами до стабільності параметрів електронних пучків при використанні стандартних короткофокусних гармат є відхилення швидкості електронів не більш 1 – 2 %, струму магнітної лінзи 0,01 – 0,1 % та струму пучка 3 – 5 % від номінального значення.

Вимоги до окремих параметрів гармат також визначаються їх типом. В більшості названих процесів використовуються гармати з термокатодом, які мають відомі недоліки, пов'язані з низькою надійністю роботи термокатодів, та потребують проведення процесів у високому вакуумі. Все це ускладнює виконання технологічних операцій, збільшує час обробки і знижує економічну привабливість застосування електронно-променевиx методів.

Тому застосування у технологічних процесах газорозрядних електронних гармат (ГРЕГ) з холодним катодом, серед яких широке застосування знаходять електронні гармати високовольтного тліючого розряду (ВТР), вважається найбільш перспективним

Найбільш широко в лабораторній практиці і техніці використовували трубки Хаддінга і Зеємана (рис. 1.9, 1.10 відповідно).

					МП.171.081.018	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31



пов'язані з бомбардуванням відбитими від антикатада електронами, які мають енергію до  $\sim 0,9e U$ . Для їх поглинання використовувались порожнисті металеві аноди або спеціальні анодні чохлаи.

Для стійкої роботи в скляних трубках крім основного колектора електронів (антикатада) використовували допоміжний анод з алюмінію, який забезпечував найдовший шлях горіння розряду, його розташовували в прианодної плазмі. Якщо він знаходився в катодного темному просторі, то його вплив на розряд ставав несуттєвим. Антикатоде поміщали в катодному темному просторі і з'єднували з допоміжним анодом через котушку індуктивності. Конструкція, положення і включення анодних електродів забезпечували стійке запалювання і горіння розряду в прямому напрямку струму і захист антикатада від катодного розпилення при зворотній полярності. У деяких трубках додатково на антикатоді поміщали порожнистий воронкоподібний електрод, який при зворотній полярності напруги забезпечував в трубці режим короткого замикання, оберігаючи анодні електроди, особливо антикатод, від інтенсивного бомбардування іонами. Для цього ж перед антикатодом встановлювали металеве кільце, з'єднане з анодом, або його поміщали в металевій трубці. Це стабілізувало також фокусну відстань пучка електронів. В трубках з випрямлячами і в металевих трубках необхідність допоміжного анода відпала. В даний час системи з нееквіпотенціальними анодами можуть становити практичний інтерес при розробці сучасних імпульсних ДЕЛ ТРАП.

Важлива умова нормальної роботи іонної рентгенівської трубки - забезпечення необхідного тиску газу і його стабілізація на певному рівні в межах 0,5 - 50 Па, який залежав від роду газу і необхідної робочої напруги.

Трубки ділили на нерозбірні, з малозмінним тиском і внутрішнім генератором газу, і розбірні, з безперервною відкачкою і напуском газу з атмосфери або балона. Для збільшення стійкості роботи, терміну служби джерел електронів і кращого регулювання струму їх робочий об'єм був

					МП.171.081.018	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

доведений до 1 - 5 л, розрядна камера мала сферичну форму і іноді з'єднувалася з додатковим вакуумним об'ємом. Необхідний тиск газу і його стабілізація забезпечували в відпаяних трубках за допомогою різних генераторів газу. Найбільш часто застосовували осмотичні, вугільно-слядяні і пористі керамічні з ртутним затвором. У першому використовували явище хорошої проникності розжареної паладієвої трубки для водню, у другому - газ виділявся при проходженні іскрового розряду між спеціальними вугільно-слядяними електродами, а в останньому - пористий капіляр, що сполучається з атмосферою або об'ємом газу, перекривали ртутним затвором. Генератори газу були періодичної дії і могли включатися автоматично при деякому граничному зменшенні тиску газу в трубці. Багато авторів відзначали, що для стабільності параметрів дуже важлива ретельна вакуумно-технологічна обробка деталей трубки і їх знегажування в процесі роботи, так як гази, розчинені в електродах, істотно впливають на характеристики запалювання і горіння. Особливо істотна насиченість газом матеріалу анода. В цілому іонна трубка нестійка до зміни тиску газу і вимагає зовнішньої стабілізації режиму роботи.

В якості основних особливостей короткофокусних джерел електронів відзначимо: можливість отримання великої потужності, широкий діапазон зміни їх основних параметрів, тривалий термін служби, порівняно великий кут збіжності пучка електронів, різноманітність можливих конструкцій, універсальність. Системи, що працюють в режимі довгих імпульсів, можуть давати велику потужність і пучки електронів різноманітної форми, але вимагають застосування швидкодіючих систем автоматичного регулювання, так як протягом імпульсу змінюється щільність газу, параметри анодної плазми і, отже, струм пучка електронів і розподіл його щільності у часі і просторі.

					МП.171.081.018	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

## 1.5 Довгофокусні джерела електронів

З джерел електронів цього типу найбільш розроблені джерела осцилографічних трубок з холодними катодами.

Залежність напруги горіння розряду і робочого тиску газу від довжини розрядної трубки при постійних інших параметрах зображені на рис. 1.5. а, б. Струм пучка при певній нарузі горіння збільшується з ростом струму розряду, досягаючи граничного значення для даних умов. Він залежить від добутку тиску на діаметр катода, при цьому для більшого катода потрібно менший тиск газу. При однакових умовах опуклий холодний катод працює при меншому тиску, ніж плоский або увігнутий. Зі зменшенням відстані катод-анод ток пучка збільшується, проте допустима мінімальна відстань обмежується електричною міцністю розрядного проміжку і стійкістю горіння. Показником якості розрядної трубки служило відношення струму пучка на мішені до струму розряду, яке склало 0,15 - 0,45. У високовольтних і вузьких трубок воно вище, ніж у низьковольтних і широких.

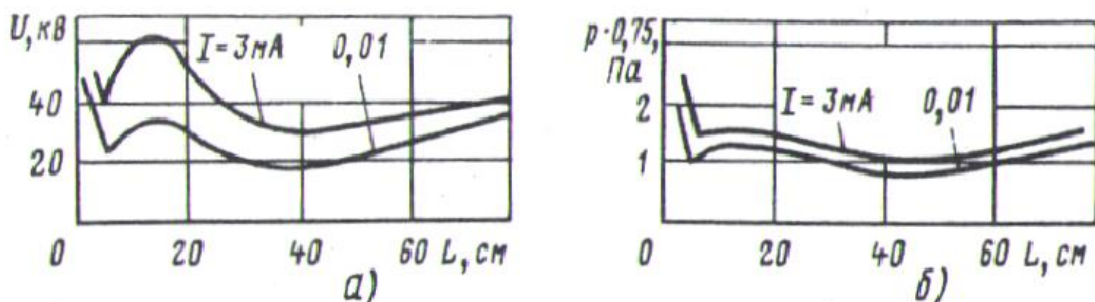


Рис. 1.5. Характеристики осцилографічних ДЕЛ ТРАП:

а - залежність напруги горіння від довжини трубки при постійному тиску ( $p = 1,6 \text{ Па}$ , діаметр трубки 20 мм; катод плоский, діаметр 15 мм, наповнення - повітря); б - залежність тиску від довжини трубки при постійній нарузі

										Арк.
										35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	МРП.171.081.018					

горіння ( $U = 35$  кВ, діаметр трубки 20 мм, катод плоский, діаметром 15 мм, наповнення - повітря)

Необхідна високовольтність джерела електронів досягається конструкцією і розмірами ізоляторів, вибором зазорів між електродами, ретельною очисткою електродів, застосуванням виморожуючих пасток. Розробка низьковольтних трубок була пов'язана зі зменшенням діаметру і підвищенням робочого тиску до 1 - 10 Па, що визначається необхідністю виконання умови самостійності розряду і режиму одноразових зіткнень для електронів. Це потребувало роздільного відкачування робочої камери осцилографа до тиску  $10^{-1}$  -  $10^{-2}$  Па, тому що в ній пучок електронів повинен був проходити відстань до 2 м. При цьому використовували анодні діафрагми з малим діаметром отвору, напуск газу в розрядну камеру трубки і паралельну відкачку окремих областей осцилографа пароструйним насосом.

Для усунення роздільного відкачування, зниження робочої напруги та зменшення перепаду тиску в джерелі електронів і робочій камері використовували магнітне поле, яке фокусувало пучок електронів і одночасно подовжувало траєкторії розсіяних електронів в розрядному проміжку (рис. 1.6). Для цього ж використовували допоміжний розряд з магнітним полем, подовження траєкторії електронів за рахунок використання відповідної конфігурації електричних полів, а також виконання розрядних трубок з додатковим катодом, розташованим навпроти основного. За допомогою допоміжного розряду можливо знизити робочий тиск у трубці на порядок, а струм пучка регулювати зміною струму і напруги на допоміжному електроді і зміною струму фокуруючої котушки.

Розроблені сучасні конструкції технологічних довгофокусних газорозрядних електронних гармат, які формують тонкі параксіальний пучки електронів з малою робочою поверхнею катода.

					МП.171.081.018	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36





циліндричний анод і катод у вигляді діафрагми, розташовані в порожнині основного анода. Потужність управління при напрузі до 100 В була близько 1 - 15 Вт і залежала від матеріалу катодної діафрагми.

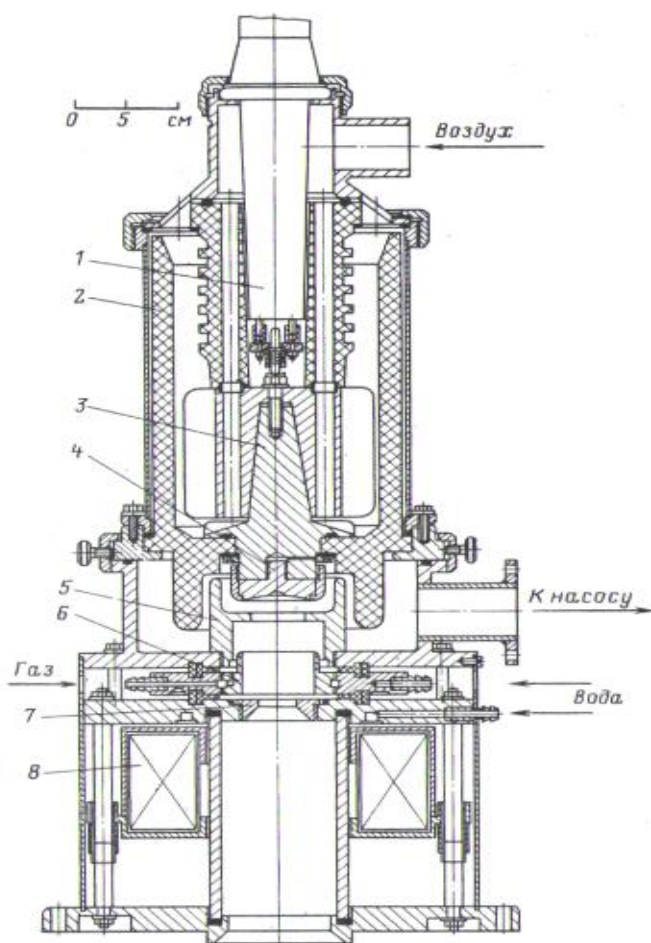


Рис. 1.8. Довгофокусна газорозрядна електронна гармата: 1 - катод; 2 - високовольтний ізолятор; 3 - високовольтний вивід; 4 - високовольтний ввід; 5 - анод; 6 - керуючий електрод; 7 - змінний електрод ланцюга допоміжного розряду; 8 - магнітна лінза

					МПП.171.081.018	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

## В и с н о в к и

Найбільш широке застосування в джерелах електронів технологічного призначення знаходять катоди з алюмінію та сплавів на його основі. Даний матеріал забезпечує відносно високий коефіцієнт іонно-електронної емісії дякуючи оксидній плівці на його поверхні.

Беручи до уваги широкі можливості імпульсного способу обробки матеріалів та виробів, можливо вважати перспективними розробку та дослідження газорозрядних гармат тріодного типу достатньо великої потужності для застосування їх в різних технологічних процесах.

У гарматах на основі ВТР для мало-інерційного керування струмом розряду можливо застосовувати низьковольтні допоміжні розряди, які забезпечать модуляцію електронного пучка з часовими параметрами, задовільними для технологічного використання.

Перспективними для імпульсних електронно-променевих технологій є тріодні газорозрядні електронні гармати на основі ВТР з холодним катодом, які відрізняються високою стабільністю та надійністю роботи у високому та середньому вакуумі у середовищі різних газів.

					МП.171.081.018	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ТРІОДНІЙ ЕЛЕКТРОДНІЙ СИСТЕМІ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ

### 2.1. Основні загальні положення

В джерелах електронів високовольтного тліючого розряду з холодним катодом використовуються газові розряди низького тиску, з малою густиною струму та високими напругами горіння. Електричні параметри таких розрядів можуть змінюватись в широкому діапазоні та залежать від розмірів, геометрії та матеріалів електродів, тиску та роду газів.

При реалізації імпульсного режиму роботи гармат ВТР застосовують електричний метод керування. Для цього на додатковий електрод, розміщений в розрядному проміжку, подається потенціал в десятки-сотні Вольт, і запалюється допоміжний низьковольтний несамоствійний тліючий розряд, що горить в області анодної плазми основного розряду. При цьому підвищується ступінь іонізації газу в розрядному проміжку в області зайнятою анодною плазмою. Наявність додаткових заряджених часток призводить до зміни зовнішніх параметрів плазми та викликає збільшення іонного потоку на катод

і збільшення струму основного розряду внаслідок вторинної іонно-електронної емісії.

Плазма при запалюванні високовольтного або допоміжного розрядів має приблизно потенціал анода і виконує дві основні функції: 1) генерує відповідну, необхідних для отримання заданого потоку електронів з катода; 2) слугує прозорим анодним електродом і в значній мірі впливає на картину електричного поля в проміжку між катодом та анодом. Положення емітуючої поверхні плазми в розрядному проміжку залежить від електронно-оптичних характеристик газорозрядного джерела електронів та режимів його роботи.

					МП.171.081.018	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

Параметри горіння ВТР з холодним катодом визначають фізичні умови, при яких можуть працювати подібні джерела пучків електронів. Їх максимальна потужність в значній мірі обмежується допустимим тепловим навантаженням, яке здатна витримати електродна система без спотворення параметрів пучка електронів, а також іонізаційними та газодинамічними ефектами в об'ємі розряду. Далі представлені теоретичні оцінки теплової потужності, що виділяється на електродах системи та в об'ємі розрядного проміжку. Проведений аналіз процесів в анодній плазмі, отримані аналітичні вирази для обчислення струмів основного та допоміжного розрядів та для оцінки середнього часу запалювання допоміжного розряду.

## 2.2. Процеси в анодній плазмі

Для визначення наближених співвідношень, які пов'язують внутрішні параметри анодної плазми ВТР з зовнішніми характеристиками розряду, використовувався аналіз розподілення потоків заряджених часток в анодній плазмі та їх взаємодії з поверхнями електродів. Оскільки плазму прийнято вважати умовно екіпотенціальною у всьому її об'ємі, рівняння поля можна не розглядати. Розподілення нейтральних часток в об'ємі плазми приймається рівномірним та таким, що не залежить від струму розряду та температури.

Як відомо з теорії ВТР, анодна плазма утворюється в результаті іонізації газу електронами. Умовно виділяють групу швидких електронів, що прискорились в області катодного падіння потенціалу, та непружно відбитих від анода з втратою енергії, а також групу повільних електронів, що утворились при іонізації атомів газу у об'ємі плазми. В усталеному процесі горіння ВТР повільні заряджені частки постійно покидають об'єм плазми внаслідок їх дифузії на електроди системи.

					МП.171.081.018	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оскільки в тріодній електродній системі ВТР для здійснення малоінерційного електричного керування запалюється допоміжний несамостійний розряд з порожнистим катодом, то дифузію іонів з плазми слід розглядати амбіполярною, так як на рух іонів впливає також сила електричного поля, що формується між керуючим електродом та анодом ВТР. З аноду допоміжного розряду під дією бомбардування іонним потоком емітуються повільні вторинні електрони, які ефективно іонізують плазму ВТР.

Таким чином, рівняння балансу заряджених часток для тріодної електродної системи ВТР в імпульсному режимі роботи можна записати у вигляді [10, 11]:

$$z_{ш} + z_{п} + z_{р} = z_{д}, \quad (2.1)$$

де  $z_{ш}$  – коефіцієнт ефективності іонізації газу швидкими електронами пучка,  $z_{п}$  – коефіцієнт ефективності іонізації газу повільними електронами плазми,  $z_{р}$  – коефіцієнт іонізації у несамостійному допоміжному розряді,  $z_{д}$  – коефіцієнт дифузійного розсіювання електронів в анодній плазмі з врахуванням їх дрейфу в електричному полі, яке створюється керуючим електродом. Для визначення цих величин в імпульсі можна використати наступні співвідношення [10 – 16]:

$$z_{ш} = \frac{j_{ек} d_{п} P_{рп} A_i U_p^{-a_i}}{e} \left( 1 + \eta_i (1 - D_{ан} (1 - d_{п} P_{рп} Q_{еп0})) \eta U^{-a_i} k_e \right), \quad \gamma = A_i U_p^{-a_i},$$

$$z_{п} = \frac{d_{п} P_{рп} n_e}{4} \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}} \bar{Q}_{еп0}, \quad \bar{Q}_{еп0} = N_0 \alpha_i \left( \varphi_i + \frac{2kT_e}{e} \right) \exp\left( -\frac{e\varphi_i}{kT_e} \right),$$

$$z_{д} = \frac{\pi^2 n_i \mu_{i0} kT_e}{d_{п} P_{рп} e}, \quad z_{р} = \frac{2\pi^2 n_i \mu_{i0} \gamma R_{кер} U_{кер} (eU_{кер} + kT_e)}{d_{п} P_{рп} \lambda_e},$$

$$\lambda_e = \frac{9kT_e (eU_{кер} + kT_e)^2}{4\pi e^4 P_{рп} \ln \left( 1,5 - \sqrt{\frac{kT_e (eU_{кер} + kT_e)^3}{\pi P_{рп}}} \right)}, \quad (2.2)$$

де  $j_{ек}$  – густина струму електронів на поверхні катоду,  $\eta_i$  та  $\eta_U$  – коефіцієнти відбиття електронів від аноду по струму та по енергії відповідно,  $D_{ан}$  – коефіцієнт прозорості аноду,  $Q_{ep0}$  – перетин розсіювання електронів на іонах газу,  $k_e$  – коефіцієнт збільшення довжин траєкторій електронів,  $n_e$  – концентрація електронів у плазмі,  $\bar{Q}_{еп0}$  – усереднений перетин іонізації газу повільними електронами плазми,  $N_0 = 2,7 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$  – постійна Лошмідта,  $\phi_i$  – потенціал іонізації газу,  $\alpha_i$  – емпірична постійна для даного газу,  $\mu_{i0}$  – рухомість іонів в анодній плазмі,  $m_e$  – маса електрона,  $T_e$  – температура електронів в плазмі з врахуванням її нагрівання електронним пучком,  $A_i$ ,  $a_i$  – напівемпіричні коефіцієнти.

З іншого боку, концентрацію іонів в анодній плазмі можливо визначити з умови самостійності горіння ВТР:

$$n_i = \frac{j_{ек} \sqrt{\frac{kT_e}{2m_e}}}{e(A_i U_p^{-a_i} + 1)} \quad (2.3)$$

Тоді рівняння (2.12), з врахуванням (2.13, 2.14), запишеться у вигляді:

$$\begin{aligned} & \frac{\pi^2 \mu_{i0} (kT_e + eU_{кер})}{(P_{рп} d_{п})^2} \left( 1 + \frac{2\gamma R_{кер}}{\lambda_e} \right) - 3(kT_e + eU_{кер}) \times \\ & \times N_0 \alpha_i \sqrt{\frac{e(kT_e + eU_{кер})}{2\pi m_e}} \exp\left( -\frac{\phi_i}{\frac{kT_e}{e} + U_{кер}} \right) = \\ & = A_i U_p^{-a_i} (A_i U_p^{-a_i} + 1) \sqrt{\frac{kT_e}{2\pi m_e}} \times (1 + \eta_i (1 - D_{ан} (1 - d_{п} P_{рп} Q_{ep0})) \eta_U^{-a_i} k_e), \end{aligned} \quad (2.4)$$

Рівняння (2.4) є кубічним відносно параметру  $d_{п}$  і має аналітичний розв'язок. Введемо наступні позначення:

$$R_1 = A_i U_p^{-a_i} (A_i U_p^{-a_i} + 1) \sqrt{\frac{kT_e + eU_{кер}}{2\pi m_e}}; \quad R_2 = D_{ан} \eta_i \eta_U^{-a_i} k_e;$$

					МП.171.081.018	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$R_3 = 3(kT_e + eU_{\text{кер}})N_0\alpha_i \sqrt{\frac{kT_e + eU_{\text{кер}}}{2\pi m_e}} \exp\left(-\frac{\Phi_i}{\frac{kT_e}{e} + U_{\text{кер}}}\right);$$

$$R_4 = \mu_{i0}(kT_e + eU_{\text{кер}}) \left(\frac{\pi}{P_{\text{рп}}}\right)^2 \left(1 + \frac{2\gamma R_{\text{кер}}}{\lambda_e}\right); \quad R_5 = R_1 R_2 P_{\text{рп}} Q_{ep0}, \quad (2.5)$$

Тоді, використовуючи формулу Кардано, розв'язок рівняння (2.4), з врахуванням (2.5), можна записати наступним чином:

$$C_y = -\frac{R_1 + R_3 + R_1 R_2}{R_5}, \quad D_y = \frac{R_4}{R_5}, \quad p = -\frac{C_y^2}{3}, \quad q = \frac{2C_y^3}{27} + D_y,$$

$$D = \left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2; \quad u = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{D}}; \quad v = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{D}}; \quad y = u + v;$$

$$d_{\text{п}} = y - \frac{C_y}{3}, \quad (2.6)$$

де  $D$  – дискримінант рівняння (2.4) з врахуванням підстановок (2.5), а  $u$  та  $v$  – допоміжні змінні.

З врахуванням того, що всі коефіцієнти в рівняннях (2.4) є додатними числами, дискримінант  $D$  в системі рівнянь (2.6) завжди більший нуля. Тому рівняння (2.4) завжди має єдиний дійсний розв'язок, що вираховується зі співвідношень (2.5, 2.6).

Тепер, коли відомий повздовжній розмір проміжку зайнятого плазмою  $d_{\text{п}}$ , концентрація іонів в анодній плазмі ВТР може бути визначена зі співвідношення:

$$n_i = A_i U_p^{-a_i} (1 + A_i U_p^{-a_i} (1 + \eta_i \eta_u^{-a_i} (1 - D_{\text{ан}} (1 - d_{\text{п}} P_{\text{рп}} Q_{ep0})))) /$$

$$(kT_e + eU_{\text{кер}}) \left( \frac{\pi^2 \mu_{i0}}{(d_{\text{п}} P_{\text{рп}})^2} \left(1 + \frac{2\gamma R_{\text{кер}}}{\lambda_e}\right) - 3N_0 \alpha_i \sqrt{\frac{e(kT_e + eU_{\text{кер}})}{2\pi m_e}} \right) \exp\left(-\frac{\Phi_i}{\frac{kT_e}{e} + U_{\text{кер}}}\right), \quad (2.7)$$

Тоді, визначаючи емісійну площу границі анодної плазми в

						МП.171.081.018	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			45

несамостійному розряді з порожнистим катодом як суму площин аноду та бокової поверхні циліндру (рис. 2.1), отримуємо аналітичне співвідношення для струму несамостійного розряду:

$$I_{\text{кер}} = en_i \pi R_{\text{кер}} (1 + \gamma) (R_{\text{кер}} + 2d_{\text{п}}) \sqrt{\frac{2eU_{\text{кер}}}{m_{\text{г}}}}, \quad (2.8)$$

де  $m_{\text{г}}$  – маса іонів робочого газу,  $d_{\text{п}}$  – повздовжній розмір анодної плазми, який визначається зі співвідношення (2.5, 2.6), а  $n_i$  – концентрація іонів в анодній плазмі, яка визначається зі співвідношення (2.7) з врахуванням (2.5, 2.6).

Тоді струм основного розряду:

$$I_e = r_{\text{к}}^2 n_i \left(1 + A_i U_{\text{уск}}^{-a_i}\right) \sqrt{\frac{\pi e d_{\text{п}} (kT_e + eU_{\text{п}})}{2m_e}}, \quad (2.9)$$

Потужність керуючого розряду становить:

$$W_{\text{кер}} = \frac{U_{\text{кер}} I_{\text{кер}} \tau_i}{T_i}, \quad (2.10)$$

Вираз для загальної потужності, що підводиться до розрядного проміжку має вигляд:

$$W_{\Sigma} = \frac{U_{\text{п}} I_{\text{п}} \tau_i}{T_i} + \frac{U_{\text{кер}} I_{\text{кер}} \tau_i}{T_i}. \quad (2.11)$$

Проведені розрахунки показали, що потужність керуючого розряду не перевищує кількох відсотків від потужності головного розряду. Тобто, проведений теоретичний аналіз свідчить про те, що енергетична ефективність імпульсних джерел електронів може складати біля 85-90%(рис.2.2), і їх технологічне застосування є перспективним. Для імпульсного режиму оцінки струму  $I_{\text{кер}}$  та потужності керуючого розряду  $W_{\text{кер}}$  можна також проводити із співвідношень (2.2 – 2.11) для мінімального і максимального струмів розряду.

					МРП.171.081.018	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

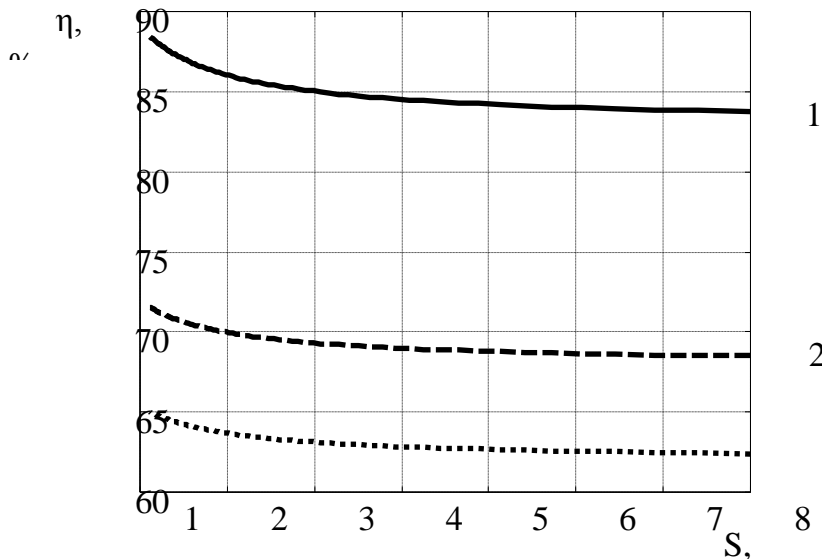


Рис. 2.2. Теоретичні оцінки залежності ККД тріодного джерела електронів від шпаруватості керуючих імпульсів. Матеріал катоду: 1 – алюміній; 2 – титан; 3 – нерж. сталь;  $U_p = 16$  кВ,  $U_{кер} = 300$  В;  $\tau_i = 1$  мс.

### 2.3. Процеси на електродах

Проміжок ВТР можливо умовно розділити на область прикатодного падіння потенціалу, область анодної плазми та анодну область, які є взаємопов'язаними та визначаються відповідними граничними умовами [1, 17].

В прикатодній області розряду електрони та іони напрямлено рухаються під дією сильного поля, що визначається напругою, прикладеною до розрядного проміжку, та положенням плазмової межі, яка розглядається як емітер іонів та як прозорий для електронів електрод із заданим потенціалом. На розподіл електричного поля впливає також просторовий заряд іонів, які надходять з області анодної плазми. Іони рухаються відносно повільно вздовж силових ліній поля з великою кількістю перезаряджень, натомість електрони отримують сильне прискорення та слабо взаємодіють із робочим газом через високу швидкість і низький тиск.

Для умов горіння ВТР можна прийняти, що іонізація в розрядному проміжку здійснюється переважно повільними вторинними електронами анодної плазми та частково швидкими електронами пучка. Електрони пучка генеруються в результаті вторинної електронної емісії з катода внаслідок бомбардування його іонами та швидкими нейтральними частками, що утворюються після перезарядок іонів. Інші механізми емісії за даних умов не мають вирішального впливу на процеси у розрядному проміжку [1, 2].

В стаціонарному режимі горіння ВТР накопичення електричної енергії в розрядному проміжку не відбувається. Тому вся потужність, яка підводиться, розподіляється наступним чином. Більша частина потужності передається на колектор електронним пучком, а решта витрачається у розрядному проміжку на розігрів електродів та робочого газу. Рівняння балансу потужності у ВТР можна записати наступним чином:

$$W_{\Sigma} = W_{\Pi} + W_{ел} + W_{об}, \quad (2.12)$$

де  $W_{\Sigma}$  – загальна потужність, що підводиться до розрядного проміжку,  $W_{\Pi}$  – потужність, що передається колектору електронним пучком,  $W_{ел}$  – потужність, що виділяється на електродах системи,  $W_{об}$  – потужність, що виділяється в об'ємі розрядного проміжку,  $W_{кер}$  – потужність допоміжного розряду. Відмінність формули (2.12) від відомих оцінок для діодних систем полягає у тому, що в ній врахована потужність допоміжного розряду  $W_{кер}$ , яка входить, як складова, у загальну потужність, що розсіюється в розрядному проміжку.

Потужність, що виділяється в об'ємі розрядного проміжку, називають об'ємними втратами [18, 19]. Якщо не враховувати конвекційний теплообмін, то потужність, яка виділяється в об'ємі, можна оцінити з виразу:

$$\overline{W_{об}} = \int_V \overline{n_e} dV \cdot \int_{v_e=0}^{v_e=v_{max}} \frac{v_e}{\lambda_e} \chi \frac{mv_e^2}{2} F_e(v_e) dv_e \quad (2.13)$$

						МРП.171.081.018	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			48

де  $V$  – об’єм розрядного проміжку,  $v_e$  – швидкість електронів,  $v_{\max} = \sqrt{\frac{2eU_p}{m_e}}$  – максимальна швидкість електронів,  $\bar{n}_e$  – їх середня концентрація,  $\bar{\chi} = \frac{2m_e}{m_a}$ ,  $\lambda_e = \frac{1}{n_a s_a + n_i s_i}$  – довжина вільного пробігу електронів,  $F_e(v_e)$  – функція розподілення електронів по швидкостям,  $\bar{n}_a$  – середня концентрація атомів газу,  $\bar{n}_i$  – середня концентрація іонів газу,  $s_r$  – перетин гальмування заряджених часток в розряді відносно електронів:

$$s_r = 4\pi \left( \frac{e^2}{(m_e v_e)^2} \right)^2 \ln \left( \frac{m_e v_e^2}{\sqrt[3]{n e^2}} \right) \quad (2.14)$$

Оцінки концентрації часток в анодній плазмі будуть проведені у підрозділі 2.3.

Враховуючи (2.3), можна стверджувати, що за умов горіння ВТР  $\bar{\lambda}_e$  становить величину, близьку до довжини розрядного проміжку  $l$  або перевищує його. Отже, потужність об’ємних втрат в області катодного падіння потенціалу, що отримуємо з (2.13), становить величину на кілька порядків меншу, ніж потужність, що виділяється на електродах системи і яка визначається зі співвідношень[1]:

$$W_{\Pi} = 0,4en_i(t)U_p D_{\text{ан}} (\gamma + 1) \sqrt{\frac{2kT_e}{m_r}} (1 - Q_{e0} P_{\text{рп}} d_{\Pi});$$

$$\eta = \frac{\gamma}{(1 + \gamma)} (1 - Q_{e0} P_{\text{рп}} d_{\Pi}) \quad (2.15)$$

де  $W_{\Pi}$  – потужність джерела електронів,  $\eta$  – к.к.д. джерела електронів,  $\gamma$  – узагальнений коефіцієнт іонно-електронної емісії в момент імпульсу, тобто максимального струму розряду,  $P_{\text{рп}}$  – тиск в розрядному проміжку,  $Q_{e0}$  – приведений перетин іонізації електронами;  $d_{\Pi}$  – повздовжній розмір

плазми,  $D_{ан}$  – коефіцієнт прозорості аноду,  $T_e$  – температура електронів в плазмі,  $k$  – постійна Больцмана,  $m_r$  – маса частки газу.

Тоді теплова потужність, що виділяється на електродах системи, складається з потужностей, що виділяються на катоді  $W_k$ , на аноді  $W_a$  та керуючому електроді  $W_{кер}$ , і може бути записана наступним чином:

$$W_k = \frac{\alpha \tau_i I_p U_p}{T_i (\gamma + 1)}, \quad W_a = W_k \gamma Q_{e0} P_{pp} d_{п}, \quad (2.16)$$

де  $\alpha\left(\frac{\tau}{T}\right)$  – коефіцієнт, що враховує потужність джерела електронів в паузі між імпульсами, тобто визначає частку від потужності в імпульсі яка характеризує потужність в паузі. Формули (2.15) та (2.16) відрізняються від відомих співвідношень для стаціонарних джерел електронів тим [1, 20], що в них враховуються часові параметри імпульсного режиму та введено додатковий коефіцієнт  $\alpha\left(\frac{\tau}{T}\right)$ , який дозволяє врахувати вплив допоміжного розряду, який запалюється в імпульсі, на розподіл потужності між електродами.

Оцінка потужності допоміжного розряду  $W_{кер}$  буде надана у наступному підрозділі.

Розігрів електродної системи ВТР, що відбувається внаслідок теплообміну між газом та стінками електродів та конвекційного переносу газу, можна оцінити скориставшись відомих рівнянням теплопровідності [5]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_r \cdot c_{rv} \cdot T_r) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_r \cdot \frac{\partial T_r}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_r \cdot \frac{\partial T_r}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_r \cdot \frac{\partial T_r}{\partial z} \right) + F_T(x, y, z), \quad (2.17)$$

де  $x, y, z$  – просторові координати,  $T_r$  – температура середовища,  $\lambda_r$  – теплопровідність середовища,  $\rho_r$  – густина середовища,  $c_{rv}$  – об'ємна теплоємність газу при постійному тиску,  $F_T(x, y, z)$  – густина джерел тепла.

					МРП.171.081.018	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Потоки теплової енергії з електродів для аксіально-симетричної системи, які схематично представлені на рис. 2.1, можна записати у вигляді таких співвідношень:

$$J_{R_{кер}} = \frac{\beta \lambda_{\Gamma} \tau_i}{T_i} \left( \frac{\partial T_{\Gamma}}{\partial r} \right)_{r=R_{кер}}, \quad J_{zк} = \frac{\beta \lambda_{\Gamma} \tau_i}{T_i} \left( \frac{\partial T_{\Gamma}}{\partial z} \right)_{z=C_k}, \quad J_{zа} = \frac{\beta \lambda_{\Gamma} \tau_i}{T_i} \left( \frac{\partial T_{\Gamma}}{\partial z} \right)_{z=C_{ка}}, \quad (2.18)$$

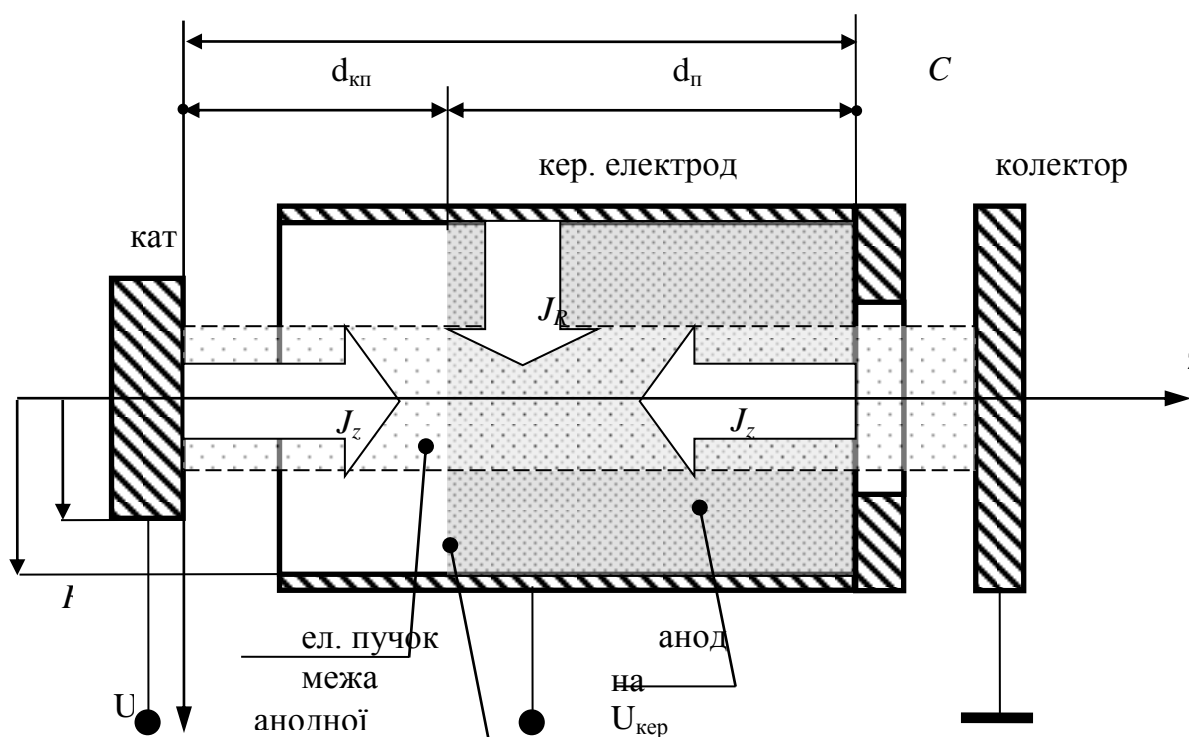


Рис. 2.1. Схематичне зображення розподілення потоків теплової енергії з поверхонь електродів в тріодній електродній системі ВТР:

$C_k, C_a$  – координати катоду та аноду,  $R_{кер}$  – радіус керуючого електроду,  $r_k$  – радіус катоду основного розряду,  $d_{кп}$  – відстань від катоду до границі плазми,  $d_{п}$  – повздовжній розмір проміжку зайнятого плазмою,  $l$  – повздовжній розмір розрядного проміжку

де  $\lambda_{\Gamma}$  – теплопровідність газу,  $\beta(\tau/T)$  – безрозмірний коефіцієнт, який враховує часові параметри імпульсу.



$\beta\left(\frac{\tau}{T}\right)$ , які дозволяють врахувати вплив допоміжного розряду на розподіл теплових потоків.

В реальних електродних системах ВТР необхідно враховувати ще один важливий механізм передачі теплової енергії, пов'язаний з проходженням потоку газу через розрядний проміжок. В процесі роботи джерела електронів ВТР при постійному його відкачуванні, відбувається натікання газу з регульованою швидкістю. При цьому газ, проходячи через розрядний проміжок, нагрівається в результаті передачі тепла від електродів, і за рахунок цього система охолоджується. Врахувати відвід тепла з об'єму в процесі відкачування газу можливо, якщо додати до системи рівнянь (2.9) додаткове співвідношення для конвекційного потоку [17]:

$$I_F = \frac{\beta \tau_i \bar{n}_a c_{rv}}{T_i} (T_r - T_{r0}) v_F, \quad v_F = \frac{2u}{C_a}, \quad (2.21)$$

де  $T_{r0}$  – температура газу, що надходить в розрядний проміжок,  $u$  – швидкість газового потоку, пропорційна швидкості відкачування газу. При визначенні температури газу в розряді величина дифузійного потоку  $I_F$  повинна відніматись від загального потоку. При використанні співвідношень (2.19) – (2.21) теплопровідність газу можна оцінити як:

$$\lambda_r = \sqrt{\frac{3kT_r}{8m_r}} \cdot \frac{k}{\pi a_r^2}, \quad (2.22)$$

де  $a_r$  – діаметр молекули газу.

З теоретичного аналізу приведених співвідношень (2.12) – (2.22) слідує, що втрати потужності ВТР відбуваються переважно за рахунок процесів на електродах системи і можуть становити до 10% від загальної потужності розряду в імпульсі. Розігрів газу в розрядному проміжку, з врахуванням впливу конвекційного охолодження відбирає не більше 1% потужності, і у більшості випадків при розгляді енергетичного балансу цими втратами можна знехтувати.

					МП.171.081.018	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

Енергетичний вплив керуючого розряду на тепловий баланс в тріодній електродній системі розглядається в наступному підрозділі.

					МПП.171.081.018	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

## В и с н о в к и

1. Запропоновані аналітичні співвідношення для оцінки залежності положення плазмової межі від струму допоміжного розряду у тріодних системах ВТР, які основані на рівнянні балансу заряджених часток в анодній плазмі та рівнянні самостійності горіння ВТР, дозволяють проводити комплексний аналіз електронно-іонної оптики та енергетики тріодних систем ВТР в імпульсному режимі.

2. Стабільне значення струму емісії з холодного катоду установлюється при досягненні динамічної рівноваги в процесі розпилення емісійної поверхні під дією іонного бомбардування та часткового її відновлення. При зменшенні струму розряду в імпульсах та збільшенні шпаруватості імпульсів коефіцієнт іонно-електронної емісії катоду підвищується. Це дозволяє за рахунок підбору часових параметрів імпульсів оптимізувати енергетичну ефективність катоду.

3. Запропоновані аналітичні співвідношення для оцінки балансу енергії на електродах тріодних систем ВТР в імпульсному режимі роботи, основані на рівняннях електричного поля та балансу потоків часток, дозволяють робити адекватну оцінку балансу енергії в тріодних імпульсних системах ВТР.

4. Для оцінки струму основного та допоміжного розряду в тріодній електродній системі ВТР та балансу енергії в розрядному проміжку необхідно визначити концентрації іонів в анодній плазмі, температуру електронів в ній та її об'єм.

					МП.171.081.018	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3. ТЕХНОЛОГІЧНА МОЖЛИВІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ З ХОЛОДНИМ КАТОДОМ В ІМПУЛЬСОНМУ РЕЖИМИ РОБОТИ ДЛЯ НАНЕСЕННЯ ДІЛЕКТРИЧНИХ ПОКРИТТІВ

#### 3.1 Технологічна можливість нанесення діелектричного покриття методом імпульсного електронно-променевого випаровування

Газорозрядні джерела електронів, в яких для генерації та формування електронного пучка використовується високовольтний тліючий розряд з холодним катодом, знаходять широке застосування в різних технологічних процесах обробки та отримання матеріалів та виробів (плавка, нанесення покриттів та інше). Таке застосування пов'язано з тим, що джерела електронів на основі високовольтного тліючого розряду при використанні їх для проведення термічних процесів у вакуумі мають низку переваг порівняно з іншими типами джерел енергії. При використанні газорозрядних джерел електронів для осадження покриттів важливе значення мають такі переваги, як досить висока загальна та питома потужність електронного пучка, що дозволяє випаровувати матеріали з різною температурою плавлення, у тому числі тугоплавкі сполуки; можливість реалізації процесів в широкому діапазоні тиску та складу газового середовища; гнучкість керування енергетичними та просторовими параметрами електронного пучка, а відповідно і параметрами технологічного процесу [21, 22, 2, 23, 9].

Запалювання та існування ВТР можливе в середовищі різних газів в діапазоні тиску  $10^{-1} - 10^2$  Па при прискорюючій напрузі одиниці – десятки кВ. В умовах сильного електричного поля та відносно низького тиску газу електрони іонізують молекули газу поблизу аноду, що сприяє утворенню

					МП.171.081.018	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

плазми в анодній області розрядного проміжку, близької за потенціалом до аноду (рис. 1.1).

Емісія електронного пучка здійснюється в результаті бомбардування поверхні холодного катода іонами, що генеруються анодною плазмою та прискорюються в полі катодного падіння потенціалу. Електродна система може бути діодною або тріодною, в якій запалюється допоміжний розряд для керування параметрами анодної плазми. У зв'язку з тим, що плазма має потенціал, близький до потенціалу анода, вона крім генерації відповідної кількості іонів, необхідних для отримання заданого потоку електронів, служить також прозорим анодним електродом і в значній мірі визначає картину електричного поля в розрядному проміжку, оскільки має збоку катода чітку еквіпотенціальну межу. Положення та форма межі плазми залежить від геометрії електродної системи та режимів горіння розряду. За умови відповідної геометрії електродної системи емітовані з поверхні катода та прискорені в полі катодного падіння потенціалу електрони формуються в пучок заданої конфігурації, який виводиться з електродного проміжку і, в залежності від його параметрів, може використовуватись для різних технологічних процесів (рис. 3.1).

Струм ВТР і напруга горіння можуть змінюватись в широкому діапазоні в залежності від геометрії, розмірів та матеріалів електродів, тиску та виду газу, а також режиму роботи. Найчастіше в технологічних джерелах електронів на основі ВТР застосовують стаціонарні розряди з прискорюючою напругою 20 – 30 кВ і струмом розряду до 10 – 15 А. Газорозрядні джерела електронів можуть також використовуватись в режимі довгих імпульсів з  $\tau \approx 1 - 5$  с і в режимі коротких імпульсів з  $\tau \approx 5 - 10$  мкс. При цьому густина струму на катоді в стаціонарному режимі становить  $j \approx 0,1$  А/см<sup>2</sup>, а в імпульсному –  $j \leq 1 - 10$  А/см<sup>2</sup>. В зв'язку з відносно невеликою густиною струму при розробці електронних гармат ВТР технологічного призначення

					МП.171.081.018	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57



Максимальна густина струму в електронному пучку ВТР обмежена ефектом теплових швидкостей. Її можна оцінити з рівнянь Ленгмюра, якщо прийняти, що електрони в пучку мають максвеловський розподіл швидкостей [3, 25]:

$$j_{\text{макс}} \approx j \left( 1 + \frac{U}{\Delta U} \right) \sin^2 \frac{\theta}{2} \approx j_{\text{екс}} \left( \frac{U}{\Delta U} \right) \left( \frac{\theta}{2} \right)^2 \quad (3.1)$$

при  $U \gg \Delta U$  та малих  $\theta$ , де  $\Delta U$  – ширина спектра енергії електронів;  $\theta$  – кут сходження пучка електронів. Ширина спектру швидкостей електронів в пучку електронної гармати ВТР  $\Delta U$  залежить від величини розкиду початкових швидкостей електронів, що емітуються з холодного катоду, розсіювання та гальмування їх при зіткненнях з позитивними іонами та атомами газу і впливу процесів парних та колективних взаємодій електронів пучка з частками анодної плазми [2, 25, 26]. Основне розширення спектру швидкостей електронів пучка відбувається при його взаємодії з анодною плазмою, в результаті чого пучок електронів на виході з газорозрядної гармати має більш широкий спектр подовжніх та поперечних швидкостей і меншу густину потужності, ніж пучок вакуумних термокатодних гармат. Максимальна питома потужність сфокусованого електронного пучка електронної гармати ВТР з аксіально-симетричною електродною системою становить при прискорюючій напрузі 30 кВ і струмі розряду 0,1 – 0,5 А близько  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup> [3].

Діапазон робочого тиску газу в розрядному проміжку ВТР становить в середньому 1 – 10 Па, що на 1 – 2 порядки вище потрібного тиску в зоні осадження покриттів із хімічних сполук. Тому при використанні електронних гармат ВТР для осадження таких покриттів необхідне розділення по вакууму розрядного проміжку і зони випаровування. З урахуванням цього для проведення сформованого в розрядному проміжку електронного пучка в зону випаровування необхідно застосувати систему, що забезпечує перепад тиску між розрядним проміжком гармати і зоною осадження покриття відповідно на 1 – 2 порядки при незначних енергетичних втратах електронного пучка.

						МРП.171.081.018	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			59

При використанні в процесах осадження покриттів із хімічних сполук різних газів, включаючи реактивні, більшість із них може використовуватися одночасно і як технологічний газ, і як робочий газ газорозрядного генератора електронного пучка.

Керування струмом розряду в електронних гарматах ВТР здійснюється зміною тиску робочого газу в розрядному проміжку, для чого застосовуються системи контрольованого напуску газу в гармату при безперервному її відкачуванні. Мінімальна стала часу при такому керуванні становить біля 0,1 с. Тому для малоінерційного регулювання енергетичними параметрами розряду і відповідно електронного пучка застосовують допоміжні розряди, які запалюються за допомогою електродів, що розміщуються в порожнині аноду і мають невисокий потенціал відносно анода та анодної плазми [27]. Зміна величини потенціалу керуючого електроду змінює густину анодної плазми, що змінює величину потоку іонів на катод і відповідно, величину струму електронного пучка. Стала часу при електричному керуванні струмом розряду залежить від інерційності процесів в анодній плазмі і не перевищує 1 мс. Це дозволяє відносно просто здійснювати імпульсну модуляцію струму розряду, подаючи відповідні імпульси на електрод допоміжного розряду. Проте керування струмом ВТР з використанням допоміжного розряду пов'язане зі зміною положення та форми межі анодної плазми, що впливає на конфігурацію електричного поля в катодній області розряду. Це потребує детального вивчення умов генерації та формування електронного пучка в тріодній електродній системі високовольтного тліючого розряду з холодним катодом. При цьому важливою вимогою при створенні тріодного генератора електронного пучка є забезпечення достатньо високої питомої потужності при загальній потужності одиниці – десятки кВт.

Таким чином, розробка електронно-променевої гармати на основі високовольтного тліючого розряду, з урахуванням умов технології імпульсного осадження покриттів із хімічних сполук та особливостей роботи газорозряд-

					МП.171.081.018	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

ної гармати, забезпечує такі технологічні можливості при отриманні покриттів із композицій і сполук:

– розгортка та амплітудно-частотна модуляція електронного пучка при нагріванні речовини в процесі випаровування;

– широкий діапазон тиску технологічних газів в зоні осадження покриттів;

– використання різних газів, включаючи реактивні;

– активація парогазового потоку в процесі осадження покриття;

– висока швидкість осадження покриття.

					МПІ.171.081.018	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

## В и с н о в к и

Беручи до уваги широкі можливості імпульсного способу обробки матеріалів та виробів, можливо вважати перспективними розробку та дослідження газорозрядних гармат тріодного типу достатньо великої потужності для застосування їх в різних технологічних процесах в тому числі і для нанесення діелектричних покриттів.

За проведеними теоретичними оцінками температура поверхні катоду ВТР в імпульсних джерелах електронів не перевищує  $150 - 200^{\circ} \text{C}$ , а його емісійні властивості в імпульсному режимі є вищими, ніж для неперервного режиму горіння розряду, що обумовлено процесом регенерації оксидної плівки на поверхні алюмінієвого катоду у паузі між імпульсами.

Використання для генерації електронного пучка холодного катоду забезпечує можливість роботи джерел електронів ВТР в широкому діапазоні тиску та складу газового середовища. Такі властивості тріодних джерел електронів ВТР у разі імпульсного осадження діелектричних покриттів, що складаються з хімічних сполук та композитних матеріалів, дозволяють забезпечувати високу швидкість та продуктивність процесу осадження із збереженням стехіометрії та фазового складу покриттів, тобто їхньої якості.

					МПІ.171.081.018	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

#### 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ НАНЕСЕННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ПОКРИТТІВ МЕТОДОМ ІМПУЛЬСНОГО ЕЛЕКТРОННО- ПРОМЕНЕВОГО ВИПАРОВУВАННЯ

##### 4.1 Нанесення діелектричного покриття методом імпульсного електронно-променевого випаровування

При розробці технології осадження покриттів різного призначення важливою проблемою є покращення їх фізичних властивостей та підвищення продуктивності технологічного обладнання. Тому експериментальні дослідження термоіонного осадження покриттів методом імпульсного електронно-променевого випаровування з іонізацією парогазового потоку були направлені на визначення залежності характеристик отримуваних покриттів від параметрів технологічного процесу (енергетичних та часових характеристик імпульсного електронного пучка, струму іонізуючого розряду, тиску та роду технологічного газу тощо).

Були проведені експерименти по нанесенню зміцнюючих покриттів шляхом імпульсного електронно-променевого випаровування титану та осадження конденсату з іонізацією парогазового потоку в контрольованому за тиском та складом газовому середовищі. Для іонізації парогазового потоку застосовувався дуговий розряд в стаціонарному режимі горіння. В роботі експериментальне осадження покриттів із оксидів здійснювалося з використанням експериментального макета тріодної електронної гармати високовольтного тліючого розряду, розробленого на основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень генерації та формування імпульсного електронного пучка [28].

					МП.171.081.018	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

Діапазон режимів процесу термоіонного осадження покриттів в різних експериментах становив:

- прискорююча напруга електронного пучка – 15-20 кВ;
- струм розряду електронної гармати – 0,2-0,5 А;
- частота імпульсів – 10-100 Гц;
- тривалість імпульсів – 1-50 мс;
- струм дугового розряду при напрузі до 40 В – 10-30 А.

Тиск газу реагенту в зоні осадження підтримувався біля 0,1 Па. При випаровуванні титану в середовищі азоту були отримані покриття нітриду титану, а в середовищі метану – покриття карбіду титану.

Дослідження швидкості випаровування титану з використанням тріодної електронної гармати ВТР показало, що при стаціонарному нагріванні швидкість випаровування при потужності пучка біля 5 кВт становить 1,5 г/хв. В імпульсному режимі швидкість випаровування значно зростає, що, відповідно, забезпечує високу швидкість осадження покриття. Так, при  $U = 20$  кВ,  $I_p = 250$  мА,  $q = 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>,  $f = 100$  Гц,  $\tau = 10^{-3}$  с швидкість осадження покриття на підкладки з нержавіючої сталі для титану досягала 0,5 – 1 мкм/с. При цьому на поверхні покриттів були відсутні краплі матеріалу, що випаровувався із тигля.

При термоіонному осадженні покриттів швидкість випаровування необхідно погоджувати з концентрацією газу-реагенту та енергетичними характеристиками іонізуючого розряду. Так як характеристики іонізуючого розряду залежать від термоемісії з розплавленого титану, то підвищення питомої потужності електронного пучка підвищує ефективність іонізації пари. При осадженні покриттів TiN та TiC у реактивному середовищі відповідних газів (азоту та метану) тиск в зоні осадження контролювався автоматичною системою напуску газу в вакуумну камеру установки у співвідношенні зі швидкістю випаровування титану. Потужність електронного пучка в різних експериментах становила 5-8 кВт при  $U = 20$  кВ,  $f = 50-100$  Гц,  $\tau = 10^{-3}$  с. Струм дугового розряду підтримувався діапазоні 20 – 30 А при  $U = 30 - 40$  В. Змі-

					МРП.171.081.018	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

щення між тиглем і підкладками встановлювалось в діапазоні 0 – 100 В. При парціальному тиску реактивного газу біля 0,1 Па швидкість осадження становила 0,3 мкм/хв.

Для дослідження фізичних властивостей покриттів використовувались зразки TiN та TiC товщиною до 3 мкм, які наносилися на підкладки із сталі 12X18H10T. Аналіз мікроструктури покриттів показав, що вони мають високу густину (рис. 4.1). Розподіл складових елементів в конденсаті майже рівномірний. Зміна концентрації газової компоненти впливає на твердість покриттів. Так для TiC максимальна твердість спостерігалась при концентрації вуглецю біля 50% і становила понад 30 Гпа. Був проведений структурний аналіз отриманих зразків покриттів з використанням дифракції у рентгенівських променях. Половина ширини піку функції спектрального розподілення дозволила оцінити розміри мікрокристалів, середній розмір яких становив приблизно 10-15 нм. Необхідні подальші дослідження покриттів, проте наведені властивості дозволяють характеризувати отримані покриття як нанокompозитні.

Наведені результати дослідження технологічного процесу імпульсного термоіонного осадження покриттів були обмежені можливостями експериментального обладнання і не несуть кінцевого результату. Проте вони дають підставу стверджувати, що розробка газорозрядного технологічного обладнання для імпульсного осадження покриттів з урахуванням особливостей цього процесу може забезпечити отримання композитних та хімічно складних покриттів високої якості, включаючи нанокompозитні.

					МП.171.081.018	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

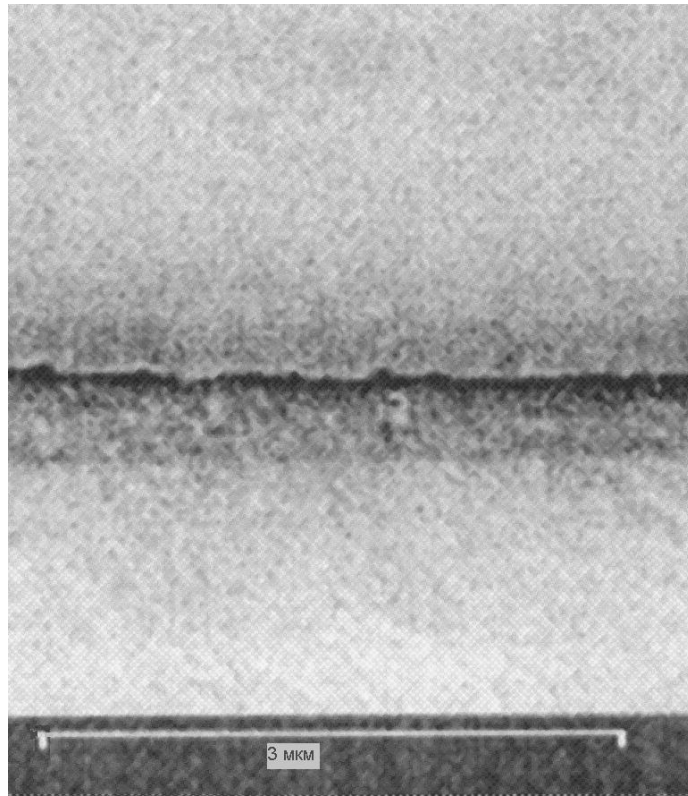


Рисунок 4.1 Мікроструктура отриманих покриттів карбіду титану

					МПП.171.081.018	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Висновки

Проведено експериментальне дослідження технології осадження теплозахисних покриттів методом імпульсного електронно-променевого випаровування за допомогою газорозрядної електронної гармати. Показано, що осадження покриттів необхідно здійснювати в середовищі відповідних технологічних газів, які використовуються одночасно в якості робочих газів газорозрядної гармати. При випаровуванні титану в середовищі азоту були отримані покриття нітриду титану, а в середовищі метану – покриття карбіду титану.

При осадженні покриттів нітриду титану та карбіду титану в реактивному середовищі відповідних газів тиск в зоні осадження контролювався автоматично системою напуску газу в вакуумну камеру установки у співвідношенні зі швидкістю випаровування. При парціальному тиску реактивного газу біля 0,1 Па швидкість осадження становила 0,3 мкм/хв.

Результати експериментальних досліджень показали, що застосування імпульсного електронно-променевого випаровування з використанням ГРЕГ ВТР в технології осадження діелектричних покриттів має широкі можливості і розробка газорозрядного технологічного обладнання для імпульсного осадження покриттів з урахуванням особливостей цього процесу може забезпечити отримання композитних та хімічно складних покриттів високої якості, включаючи нанокompозитні.

					МП.171.081.018	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

## ВИСНОВКИ

У гарматах на основі ВТР для мало-інерційного керування струмом розряду можливо застосовувати низьковольтні допоміжні розряди, які забезпечать модуляцію електронного пучка з часовими параметрами, задовільними для технологічного використання.

Стабільне значення струму емісії з холодного катода установлюється при досягненні динамічної рівноваги в процесі розпилення емісійної поверхні під дією іонного бомбардування та часткового її відновлення. При зменшенні струму розряду в імпульсах та збільшенні шпаруватості імпульсів коефіцієнт іонно-електронної емісії катода підвищується. Це дозволяє за рахунок підбору часових параметрів імпульсів оптимізувати енергетичну ефективність катода.

Перспективними для імпульсних електронно-променевих технологій є тріодні газорозрядні електронні гармати на основі ВТР з холодним катодом, які відрізняються високою стабільністю та надійністю роботи у високому та середньому вакуумі у середовищі різних газів.

Найбільш широке застосування в джерелах електронів технологічного призначення знаходять катода з алюмінію та сплавів на його основі. Даний матеріал забезпечує відносно високий коефіцієнт іонно-електронної емісії дякуючи оксидній плівці на його поверхні.

Беручи до уваги широкі можливості імпульсного способу обробки матеріалів та виробів, можливо вважати перспективними розробку та дослідження газорозрядних гармат тріодного типу достатньо великої потужності для застосування їх в різних технологічних процесах.

За проведеними теоретичними оцінками температура поверхні катода ВТР в імпульсних джерелах електронів не перевищує  $150 - 200^0$  С, а його емісійні властивості в імпульсному режимі є вищими, ніж для неперервного режиму горіння розряду, що обумовлено процесом регенерації оксидної плівки на поверхні алюмінієвого катода у паузі між імпульсами.

					МП.171.081.018	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

Проведені експериментальні дослідження технологічних процесів термоіонного осадження покриттів із хімічних сполук методом імпульсного електронно-променевого випаровування та іонізації парогазового потоку в розрядах низького тиску. Показано, що при випаровуванні тугоплавких металів (титан, молібден) доцільно застосовувати низьковольтний дуговий розряд, який підтримується при наявності термоемісії з розплавленого металу в тиглі.

При осадженні покриттів з використанням дугового розряду виявлена необхідність чіткого узгодження швидкості випаровування (густини потоку пари на підкладку) з парціальним тиском реактивного газу. При парціальному тиску 0,1 Па і швидкості осадження 0,5 мкм/хв отримані покриття TiN та TiC з високою густиною мікроструктури. Середній розмір мікрокристалів становить 10-15 нм, що дозволяє характеризувати покриття як наноккомпозитні.

Застосування газорозрядного електронно-променевого комплексу (газорозрядна електронна гармата тріодного типу, газорозрядний іонізатор пари, система автоматичного контролю тиску робочих газів та система керування енергетичними та часовими параметрами імпульсного електронного пучка) в технологіях нанесення покриттів методом імпульсного електронно-променевого випаровування та іонно-плазмового осадження має широкі можливості. Висока швидкість імпульсного випаровування і збереження стехіометрії конденсату при іонно-плазмовому його осадженні в широкому діапазоні тиску та складу газового середовища забезпечує можливість отримання покриттів з покращеними структурними та фазовими характеристиками.

					МПІ.171.081.018	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Новиков А.А. Источники электронов высоковольтного тлеющего разряда с анодной плазмой / А.А. Новиков // М.: Энергоатомиздат, 1983. – 96 с.
2. Плазменные процессы в технологических электронных пушках. // М.А. Завьялов, Ю.Е. Крейндель, А.А. Новиков, Л.П. Шантурин / М.: Атомиздат, 1989. – 256 с.
3. Болдасов В.С. Моделирование газоразрядных коммутационных приборов. Электрическая прочность приборов в предразрядный период / В.С. Болдасов, С.В. Денбновецкий, А.И. Кузьмичёв // – К.: ИСИО, 1996. – 140 с.
4. Мельник И.В. Оценка энергетической эффективности импульсных источников электронов высоковольтного тлеющего разряда с учетом электродных процессов и параметров анодной плазмы. / И.В. Мельник // Электронное моделирование. – Т. 38. – № 1. – 2016. – С. 3 – 17.
5. Рыкалин Н.Н. Основы электронно-лучевой обработки материалов / Н.Н. Рыкалин, И.В. Зуев, А.А. Углов // М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.
6. Плешивцев Н.В. Катодное распыление. / Н.В. Плешивцев // М.: Атомиздат, 1968. – 347 с.
7. Денбновецкий С.В., Кубрак А.И., Мельник В.И., Мельник И.В., Тугай Б.А. Моделирование системы автоматического управления током газоразрядной электронной пушки. – Электроника и связь, №11 (2001). – С. 51-54.
8. Denbnovetsky S.V., Melnyk V.I., Melnyk I.V., Tugay B.A. Model of control of glow discharge electron gun current for microelectronics production applications. – Proceedings of SPIE. Sixth International Conference on “Material Science and Material Properties for Infrared Optoelectronics”. – Vol. 5065 (2003). – P. 64-76.
9. Шиллер З., Гайзиг У., Панцер З. Электронно-лучевая технология. – М.: Энергия, 1980. – 528 с.
10. Мельник И.В. Исследование электронно-оптических свойств триодных электродных систем высоковольтного тлеющего разряда с учетом положения

					МПІ.171.081.018	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

и формы границы анодной плазмы / Мельник И.В., Тугай С.Б. // Электроника и связь, № 2 (61), 2011. – С. 9 – 13.

11. Мельник И.В. Аналитический расчет положения границы анодной плазмы в высоковольтном разрядном промежутке при зажигании вспомогательного разряда / Мельник И.В., Тугай С.Б. // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника – Т. 55. - № 11 – 2012. – С. 50 – 59.

12. Мельник И.В. Моделирование вольтамперных характеристик несамостоятельного вспомогательного разряда в триодных газоразрядных электронных пушках / Мельник И.В., Тугай С.Б. // Электронное моделирование – Т. 34. – №5. – 2012. – С. 103 – 114.

13. Денбновецький С.В. Моделювання вольтамперних характеристик триодних технологічних джерел електронів високовольтного тліючого розряду / Денбновецький С.В., Мельник І.В., Мельник В.Г., Тугай С.Б. // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2012. – № 5. – С. 12 – 18.

14. Мельник И.В. Моделирование вольт-амперных и энергетических характеристик триодных источников электронов высоковольтного тлеющего разряда. / Мельник И.В. // Успехи прикладной физики. – Т. 1. – № 5. – 2013. – С. 592 – 600.

15. Мельник И.В. Обобщенная методика моделирования триодных источников электронов высоковольтного тлеющего разряда. / Мельник И.В. // Электронное моделирование. – Т. 35. – № 4. – 2013. – С. 93-107.

16. Мельник И.В. Расчет энергетических характеристик триодных источников электронов высоковольтного тлеющего разряда. / Мельник И.В. // Труды XXIII международной конференции «Радиационная физика твёрдого тела» (Севастополь, 8 – 13 июля 2013 г.) под редакцией Бондаренко Г.Г. М.: ФГБНУ «НИИ ПМТ», 2013. – С. 351 – 358.

17. Райзер Ю.П. Физика газового разряда / Райзер Ю.П. - М.: Наука, 1987. – 592 с.

18. Плешивцев Н.В. Катодное распыление. / Плешивцев Н.В. – М.: Атомиздат, 1968. – 347 с.

					МП.171.081.018	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

19. Кузьмичев А.И., Цибульський Л.Ю. Патент на корисну модель. Газорозрядне джерело електронів з вторинно-емісійним катодом. № 101990, бюлетень № 19, 15.04.2015.

20. Мельник И.В. Теоретические оценки влияния нагрева электродов и рабочего газа на энергетические параметры источников электронов высоковольтного тлеющего разряда / Мельник И.В.// Электроника и связь, том 9, № 21, 2004. – С. 14 – 16.

21. Денбновецкий С.В., Мельник В.И., Мельник И.В., Тугай Б.А. Газоразрядные электронные пушки и их применение в промышленности. – Электроника и связь, тематический выпуск «Проблемы электроники», часть 2, 2005. – С. 84-87.

22. Денбновецкий С.В., Мельник В.Г., Мельник И.В., Тугай Б.А. Газоразрядный электронно-променевый випарник для осаждения наноструктурованих покриттів // Электроника и связь, № 3 (62), 2011. – С. 64 – 67.

23. Ладохин С.В., Левицкий Н.И., Чернявский В.Б., Лапшук Т.В., Шмигидин В.Г., Кравчук Л.А., Гладков А.С. Электронно-лучевая плавка в литейном производстве. – К.: „Сталь”, 2007. – 605 с.

24. Молоковский С.И., Сушков Д.И. Интенсивные электронные и ионные пучки. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.

25. Мельник И.В. Численное моделирование распределения электрического поля и траекторий частиц в источниках электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда. – Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2005. – Т. 48. – №6. – С. 61-71.

26. Мельник И.В., Тугай С.Б. Методика моделирования технологических источников электронов высоковольтного тлеющего разряда // Электронное моделирование. – Т. 32. – №3. – 2010. – С. 31-43.

27. Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц. – М.: Мир, 1987. 640 с.

28. Денбновецкий С.В., Мельник И.В., Кузьмичев А.И., Тугай С.Б., Мельник В.И. Застосування розрядів низького тиску для розробки обладнання

					МП.171.081.018	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та технології імпульсного електронно-променевого випаровування та іонно-плазмового осадження наноструктурних покриттів // Київ, 2011. – с.23-41.

29. Мельник І.В. Система науково-технічних розрахунків MatLab та її використання для розв'язання задач із електроніки: навчальний посібник у 2-х томах. Т. 1. Основи роботи та функції системи. – К.: Університет «Україна», 2009. – 507 с.

					МПІ.171.081.018	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

