

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

Фізико-математичний факультет

Кафедра загальної фізики та моделювання фізичних процесів

«На правах рукопису»
УДК 621.785.532

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри
Віталій КОТОВСЬКИЙ
(підпис) (ім'я, прізвище)

“ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності 104 – фізика та астрономія

Освітньо – професійна програма «Комп'ютерне моделювання фізичних процесів»

на тему: «Комп'ютерне моделювання фізичних процесів у тліючому розряді з розвиненими поверхнями електродів.»

Виконав (-ла): студент (-ка) другого (магістерського) рівня вищої освіти, групи

ОФ-11мп, Щирба Анастасія Володимирівна

(шифр групи) (ПІБ)

(підпис)

Науковий керівник:

Асистент, доктор філософії, Майкут Сергій Олексійович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ПІБ)

(підпис)

Консультант:

“Дослідження нормального тліючого розряду з розвиненою поверхнею катоду”

(назва розділу)

Кандидат технічних наук, старший викладач. Факультет
електроніки, кафедра електронних пристроїв та систем.
Сидоренко Сергій Борисович

(науковий ступінь, вчене звання, ПІБ)

(підпис)

Рецензент: Професор кафедри електронних пристроїв та систем,

доктор технічних наук Кузьмичев Анатолій Іванович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ПІБ)

(підпис)

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

Студент Щирба Анастасія (підпис)

Київ – 2022_року

АНОТАЦІЯ ДО МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ

СТУДЕНТА ФМФ, другого (магістерського) рівня вищої освіти, гр. ОФ-11МП

Щирби Анастасії Володимирівни

(ПІБ)

На тему Комп'ютерне моделювання фізичних процесів у тліючому розряді з розвиненими поверхнями електродів.

Науковий керівник Доктор філософії, асистент Майкут Сергій Олексійович

(науковий ступінь, вчене звання, посада, ПІБ)

Актуальність Використання плазмових технологій на основі низькотемпературної плазми тліючого розряду має низку переваг перед традиційними методами хімічної обробки: можливість протікання процесу при малих температурах, відносно висока швидкість протікання за рахунок швидкого нагрівання до необхідної температури, можливість використання даного методу для обробки деталей складної форми. Серед останніх наукових досліджень є вивчення тліючого розряду для плоских поверхонь, для сфер, для циліндрів. Модель протікання тліючого розряду із неоднорідними поверхнями, а саме в тонких трубках, ще не було досліджено. З цієї причини дослідження є актуальним.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами кафедри

Наукова тема 2415-п(стволи)

Об'єкт дослідження Прилади для генерації тліючого розряду у газовому середовищі

Предмет дослідження Двовимірні фізико-топологічні моделі тліючого розряду, конструктивні, технологічні та електрофізичні параметри цих моделей

Мета роботи Метою дослідження є подальший розвиток та оптимізація використання тліючого розряду у промисловості, а саме для азотування металів у тонких трубках.

Методи дослідження Методи математичної фізики, фізико-топологічного моделювання і чисельного розрахунку для розробки та дослідження двовимірних фізико-топологічних моделей газорозрядних приладів для азотування тліючим розрядом

Відомості про обсяг роботи, кількість ілюстрацій, таблиць, додатків і літературних найменувань за переліком використаних

Кількість ілюстрацій: 22

Кількість таблиць: 1

Кількість літературних найменувань: 51.

Мета індивідуального завдання, використані методи та отримані результати

Метою індивідуального завдання є:

1. Експериментально дослідити тліючий розряд для неоднорідних поверхонь.
2. Створити модель тліючого розряду для неоднорідних поверхонь у програмному середовищі COMSOL MULTIPHYSICS
3. Дослідити закон Гея для розвинених поверхонь катоду
4. На підставі проведеного дослідження запропонувати загальні рекомендації для використання результатів дослідження у науковій та/або практичній діяльності

Висновок В процесі дослідження було опрацьовано експериментальні дані процесу тліючого розряду для неоднорідних поверхонь. Було досліджено та розраховано модель тліючого розряду для аргону при тисках 0,5-2 Торр. Опрацьована технологія створення тліючого розряду у вузьких трубках згідно державної теми 2415-п (стволи). Результати дослідження можуть бути використані у технології азотування металів.

Перелік ключових слів (не більше 20) тліючий, розряд, азотування, метал, трубка, малий, діаметр, методи, установки, розвинені, поверхні

Підпис керівника



SUMMARY

TO THE REPORT TO SCIENTIFIC AND RESEARCHING PRACTICE

STUDENT OF FMF, 2 COURSE OF THE MASTER LEVEL, GR. OF-11mp

Shchyrba Anastasiia Volodymyrivna

(FULL NAME)

On the topic Computer modeling of physical processes in a glow discharge with developed electrode surfaces.

Scientific supervisor Doctor of Philosophy, Assistant Sergii Maikut

(scientific degree, academic status, position, FULL NAME)

Topicality The use of plasma technologies based on low-temperature glow discharge plasma has a number of advantages over traditional methods of chemical processing: the possibility of the process proceeding at low temperatures, a relatively high flow rate due to rapid heating to the required temperature, the possibility of using this method for processing parts of a complex shape. Among the latest scientific research there is the study of glow discharge for flat surfaces, for spheres, for cylinders. The model of glow discharge flow with developed surfaces, namely in thin tubes, has not yet been investigated. For this reason, the research is relevant.

Relationship of work with scientific programs, plans, themes cathedra Scientific topic 2415-n

Object of research Devices for generating a glow discharge in gas

Subject of research Two-dimensional physical and topological models of glow discharge, design, technological and electrophysical parameters of these models

Purpose of work Further development and optimization of the use of glow discharge in industry, namely for nitriding metals in thin tubes

Research methods Methods of mathematical physics, physical and topological modeling and numerical calculation for the development and study of two-dimensional physical and topological models of gas-discharge devices for nitriding glow discharge.

Information about the volume of the report, the number of illustrations, tables, applications and literary names in the list of used ones

Number of illustrations: 23

Number of tables: 1

Number of literary titles: 34

The purpose of the individual task, the methods used and the results obtained

1. Experimentally investigate the glow discharge for developed surfaces.
2. Create a glow discharge model for developed surfaces in the COMSOL MULTIPHYSICS software environment
3. Investigate Hehl's law for developed cathode surfaces

4. On the basis of the conducted research, propose general recommendations for the use of research results in scientific and/or practical activities

Conclusion In the process of investigating experimental data of the process of glow discharge for non-homogeneous surfaces was processed. The glow discharge model for argon at pressures of 0.5-2 Torr was studied and calculated. Technology for creating a glow discharge in narrow tubes according to state topic 2415-n (barrels) was processed . The research results can be used in metal nitriding technology.

Keyword list (no more than 20) glow, discharge, nitriding, metal, tube, small, diameter, methods, installations, developed, surfaces

Signature of the head



**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Інститут/факультет фізико-математичний
(повна назва)

Кафедра загальної фізики та моделювання фізичних процесів
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерне моделювання фізичних процесів»

Спеціальність 104 – фізика та астрономія

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Віталій КОТОВСЬКИЙ
(підпис) (ім'я, прізвище)
«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Щирбі Анастасії Володимирівні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Комп'ютерне моделювання фізичних процесів у тліючому розряді з розвиненими поверхнями електродів

Науковий керівник дисертації Майкут Сергій Олексійович, доктор філософії
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «07» 11 2022 р. № 4071-с

2. Строк подання студентом дисертації 13.12.2022

3. Об'єкт дослідження: двовимірні фізико-топологічні моделі тліючого розряду, конструктивні, технологічні та електрофізичні параметри цих моделей

4. Предмет дослідження: прилади для генерації тліючого розряду у газовому середовищі



5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

1. Експериментально дослідити тліючий розряд для неоднорідних поверхонь.
2. Розрахувати модель тліючого розряду для неоднорідних поверхонь у програмному середовищі COMSOL MULTIPHYSICS.
3. Дослідити закон Геля для розвинених поверхонь катоду.
4. На підставі проведеного дослідження запропонувати загальні рекомендації для використання результатів дослідження у науковій та/або практичній діяльності.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Кількість ілюстрацій: 23

7. Орієнтовний перелік публікацій: Моделювання тліючого розряду у середовищі COMSOL MULTIPHYSICS. М.І. Данилін, А. В Щирба, С.О. Майкут, А.І. Кузьмичев. Конференція «Роль інновацій в трансформації образу сучасної науки», 23–24 грудня 2022 р. у м. Києві

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 3 Дослідження нормального тліючого розряду з розвинутою поверхнею катоду	Кандидат технічних наук Старший викладач. Факультет електроніки, кафедра електронних пристроїв та систем. Сидоренко Сергій Борисович	16.09.2022 	22.11.2022 

9. Дата видачі завдання 01.09.2022

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Проходження інструктажу з техніки безпеки та охорони праці	01.09.2022	
2	Ознайомлення з місцем роботи	03.09.2022	
3	Вивчення літературних джерел, складання огляду літератури	20.09.2022	
4	Пошук і добір фактичних матеріалів, їх групування	01.10.2022	
5	Наукові дослідження за темою МД	10.11.2022	
6	Аналіз отриманих результатів	20.11.2022	
7	Підготовка розділів МД на основі отриманих даних по темі МД	26.11.2022	

8	Підготовка звіту з МД та оформлення презентацій до захисту	28.11.2022	
9	Надання роботи на перевірку керівнику МД	28.11.2022	
10	Отримання відгуку від керівника МД	30.11.2022	
11	Перевірка МД на плагіат	01.12.2022	
12	Формування плану публікацій по темі МД або документів по впровадженню (лист з підприємства або подання проекту впровадження в «КПІ ім. Ігоря Сікорського»)	02.12.2022	
13	Подання МД на рецензію	10.10.2022	
14	Здача МД на нормо-контроль (додержання вимог до оформлення МД)	14.12.2022	
15	Попередній захист МД	05.12.2022	
16	Виправлення матеріалу МД згідно з зауваженнями комісії на попередньому захисті	07.12.2022	
17	Здача МД (друкований та електронний варіанти), Відгуку та Рецензії на кафедрі загальної фізики та МФП	16.12.2022	
18	Відправка анотації МД на сайт кафедри загальної фізики та МФП	16.12.2022	
19	Остаточний захист МД	21.12.2022	
20	Відправка матеріалів МД у бібліотеку «КПІ ім. Ігоря Сікорського» та сайт кафедри загальної фізики та ФТТ	20.12.2022	

Студент



(підпис)

Щирба А.В.

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації



(підпис)

Майкут С.О.

(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника

РЕФЕРАТ

Актуальність теми Використання плазмових технологій на основі низькотемпературної плазми тліючого розряду має низку переваг перед традиційними методами:

- можливість протікання процесу при малих температурах,
-відносно висока швидкість протікання за рахунок швидкого нагрівання до необхідної температури

-можливість використання даного методу для обробки деталей складної форми.

Серед останніх наукових досліджень є вивчення тліючого розряду для плоских поверхонь, для сфер, для циліндрів. Модель протікання тліючого розряду із неоднорідними поверхнями, а саме в тонких трубках, ще не було досліджено.

З цієї причини дослідження є актуальним.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Наукова тема 2415-п(стволи)

Об'єкт дослідження двовимірні фізико-топологічні моделі тліючого розряду, конструктивні, технологічні та електрофізичні параметри цих моделей

Предмет дослідження прилади для генерації тліючого розряду у газовому середовищі

Мета роботи експериментально дослідити та розрахувати модель тліючого розряду для неоднорідних поверхонь

Методи дослідження методи математичної фізики, фізико-топологічного моделювання і чисельного розрахунку для розробки та дослідження двовимірних фізико-топологічних моделей газорозрядних приладів для азотування тліючим розрядом

Задачі дослідження

1. Експериментально дослідити тліючий розряд для неоднорідних поверхонь.
2. Розрахувати модель тліючого розряду для неоднорідних поверхонь у програмному середовищі COMSOL MULTIPHYSICS
3. Дослідити закон Гея для розвинених поверхонь катоду.
4. На підставі проведеного дослідження запропонувати загальні рекомендації для використання результатів дослідження у науковій та/або практичній діяльності.

Наукова новизна одержаних результатів розраховано модель тліючого розряду для неоднорідних поверхонь у програмному середовищі COMSOL MULTIPHYSICS

Практичне значення одержаних результатів використання моделі тліючого розряду для розвинених поверхонь у технології азотування металів

Апробація результатів дисертації участь у роботі VI Міжнародної науково-практичної конференції «Роль інновацій в трансформації образу сучасної науки» (із публікацією тез «Моделювання тліючого розряду у середовищі COMSOL Multiphysics», секція «Інформаційні технології» 23–24 грудня 2022 р. у м. Києві

Публікації автора МД

Моделювання тліючого розряду у середовищі COMSOL MULTIPHYSICS. М.І. Данилін, А. В Щирба, С.О. Майкут, А.І. Кузьмичєв. Конференція «Роль інновацій в трансформації образу сучасної науки», 23–24 грудня 2022 р. у м. Києві

Ключові слова тліючий, розряд, азотування, метал, трубка, малий, діаметр, методи, установки, розвинені, поверхні

В роботі наведено: використаної літератури - 51, сторінок: - 75, рисунків - 22, таблиць - 1.

ABSTRACT

Actuality of theme The use of plasma technologies based on low-temperature glow discharge plasma has a number of advantages over traditional methods of chemical processing: the possibility of the process proceeding at low temperatures, a relatively high flow rate due to rapid heating to the required temperature, the possibility of using this method for processing parts of a complex shape. Among the latest scientific research there is the study of glow discharge for flat surfaces, for spheres, for cylinders. The model of glow discharge flow with developed surfaces, namely in thin tubes, has not yet been investigated. For this reason, the research is relevant.

Relationship of work with scientific programs, plans, themes Scientific topic 2415-n

Object of research Devices for generating a glow discharge in gas

Subject of research Two-dimensional physical and topological models of glow discharge, design, technological and electrophysical parameters of these devices

Purpose of work Further development and optimization of the use of glow discharge in industry, namely for nitriding metals in thin tubes

Research methods Methods of mathematical physics, physical and topological modeling and numerical calculation for the development and study of two-dimensional physical and topological models of gas-discharge devices for nitriding glow discharge.

Tasks of research

1. Experimentally investigate the glow discharge for developed surfaces.
2. Create a glow discharge model for developed surfaces in the COMSOL MULTIPHYSICS software environment
3. Investigate Hehl's law for developed cathode surfaces
4. On the basis of the conducted research, propose general recommendations for the use of research results in scientific and/or practical activities

Scientific novelty of the results The glow discharge model for developed surfaces was calculated in the COMSOL MULTIPHYSICS software environment

The practical significance of the results Use of glow discharge model for developed surfaces in metal nitriding technology

Approbation of the results of the dissertation Participation in the work of the VI International scientific and practical conference "The role of innovations in the transformation of the image of modern science" (with publication of theses "Modeling glow discharge in the COMSOL Multiphysics environment ", section "Information technologies"

23–24 december 2022, Kyiv

Publications Glow discharge modeling in the COMSOL MULTIPHYSICS environment. M. I. Danilin, A. V. Shchyryba, S. O. Maykut, A.I. Kuzmychev. conference "The role of innovations in the transformation of the image of modern science". 23–24 december 2022, Kyiv

Keywords glow, discharge, nitriding, metal, tube, small, diameter, methods, installations, developed, surfaces

The article contains: used literature - 51 , pages: - 75, pictures - 22 .

ЗМІСТ

Вступ	9
Розділ 1 Уявлення про тліючий розряд	
1.1 Історія дослідження та поняття газового розряду.....	11
1.2 Види газових розрядів	17
1.3 Області тліючого розряду.....	26
Висновки до розділу 1	34
Розділ 2 Аналіз сучасних досліджень газового розряду з середніми тисками	
2.1 Застосування тліючого розряду із метою азотування металів.....	35
2.2 Тліючий розряд всередині трубок малого діаметра.....	46
2.3 Застосування іонного азотування всередині трубок малого діаметра.....	48
Висновки до розділу 2	55
Розділ 3 Дослідження нормального тліючого розряду з розвинутою поверхнею катоду	
3.1 Фізико-математична модель тліючого розряду.....	56
3.2 Експериментальне дослідження	59
3.3 Дослідження закону Геля для розвинених поверхонь катоду.....	64
3.4 Техніка безпеки під час роботи.....	71
Висновки до розділу 3	74
Висновки	75

ВСТУП

У сучасній промисловості використання технологій, пов'язаних із плазмою, метод на основі низькотемпературної плазми тліючого розряду має низку переваг перед традиційними методами: можливість протікання процесу при малих температурах, відносно висока швидкість протікання за рахунок швидкого нагрівання до необхідної температури, а також можливість використання даного методу для обробки зразків складної форми. У сучасності трубки з тліючим розрядом знайшли практичне застосування як джерело світла - у газорозрядних лампах. Окрім джерел світла та різноманітних досліджень із фізики плазми, метод на основі тліючого розряду досліджено та використовується у текстильній промисловості (для обробки текстильних матеріалів), у металургійній промисловості (для азотування металів з метою збільшення витривалості поверхні), у медицині (для стерилізації трубок різноманітної форми та інших деталей), а також для очищення води. Дослідження тліючого розряду у промисловості є актуальним, так як його використання у багатьох випадках має цілий ряд переваг у порівнянні з іншими методами, але всі можливості використання тліючого розряду ще не досліджено. У сучасній промисловості використання технологій, пов'язаних із плазмою, метод на основі низькотемпературної плазми тліючого розряду має низку переваг перед традиційними методами: можливість протікання процесу при малих температурах, відносно висока швидкість протікання за рахунок швидкого нагрівання до необхідної температури, а також можливість використання даного методу для обробки зразків складної форми. Серед останніх наукових

досліджень є вивчення тліючого розряду для плоских поверхонь, для сфер, для циліндрів. Отже, дослідження тліючого розряду для електродів із розвиненою поверхнею із метою застосування його у технології азотування металів є актуальним. Метою даного дослідження є доповнення вже існуючих досліджень щодо азотування металів у тонких трубках, подальший розвиток та оптимізація використання тліючого розряду у промисловості. Було поставлено такі задачі:

1. Експериментально дослідити тліючий розряд для неоднорідних поверхонь.
2. Розрахувати модель тліючого розряду для неоднорідних поверхонь у програмному середовищі COMSOL MULTIPHYSICS
3. Дослідити закон Гея для розвинених поверхонь катоду.
4. На підставі проведеного дослідження запропонувати загальні рекомендації для використання результатів дослідження у науковій та/або практичній діяльності.

РОЗДІЛ 1 УЯВЛЕННЯ ПРО ТЛЮЧИЙ РОЗРЯД

РОЗДІЛ 1 УЯВЛЕННЯ ПРО ТЛЮЧИЙ РОЗРЯД

1.1 Історія дослідження та поняття газового розряду

Газовим розрядом називають набір процесів, що відбуваються під час проходження через іонізований газ електричного струму. Це явище проходження струму в електричному полі пов'язане зі значним зростанням електропровідності середовища щодо його нормального стану. Термін ж "розряд" з'явився для відокремлення процесу розрядження конденсатора через ланцюг, куди входить і газовий проміжок. Така розрядка відбувається тоді, коли напруга перевищує поріг проббою проміжку. Нині це слово використовують у більш широкому значенні.

Історія виявлення і вивчення газового розряду починається тоді, коли людина в перший раз побачила явище блискавки, яке є прикладом електричного розряду, що відбувається між різними хмарами або ж між землею і хмарою. Тобто історія починається ще до нашої ери. Так, давньоєгипетські вчені намагалися віднайти причини появи блискавки, але вони це пояснювали виключно з міфологічної та релігійної точки зору. Саме електрична причина процесу блискавки вперше була описана в дослідженнях Б. Франкліна - американського фізика. Його дослід, що стосувався електричного походження блискавки став широко відомим на весь світ. У 1752 році він опублікував роботу, де описав свій експеримент: Франклін запустив повітряного змія в час грози. Змія він зробив із був з дерев'яної заготовки, яка була обтягнута шовковою тканиною. Раніше вченим було доведено, що за допомогою цього методу можна створити пристрій для відведення атмосферної електрики від предметів і тіл – іншими словами, просто обладнати блискавковідвід. Саме тому на кінці змія було

РОЗДІЛ 1 УЯВЛЕННЯ ПРО ТЛІЮЧИЙ РОЗРЯД

встановлено металевий штир невеликого розміру. Але повітряний змій був прикріплений до дуже товстої мотузки, біля землі, де був причеплений звичайний металевий ключ від дверей. Суть досліду була в тому, щоб спровокувати влучення блискавки в металевий стрижень і перенести частину його електричного заряду по вологій мотузці на ключ.

Коли блискавка влучила в змію, навколо ключа утворився сяючий ореол, що фактично довело електричну природу даного явища. Досвід Франкліна також був детально описаний у експериментах Джозефа Прістлі. Якщо не рахувати блискавки, люди вперше почали з наукової точки зору цікавитись розрядами, коли помітили, що заряджені тертям ізольовані провідники поступово втрачають заряд. Це явище люди спостерігали вже у 1600 році. У 1785 р. Кулон своїми дослідженнями довів, що повітря також має здатність проводити електричний заряд та знайшов величину електропровідності повітря. Тепер ми знаємо, що відбувається несамостійний розряд. На протязі XVIII ст. проводили окремі дослідження з іскрами, які отримували, заряджаючи тіла за допомогою електростатичних машин, а також звертаючись до атмосферної електрики.

Вже у 1803 році був вперше помічений дуговий розряд. Вважається, що його відкрив В.В. Петров, коли працював у Санкт-Петербурзькій медико-хірургічній академії. Дуга виходила при зіткненні та подальшому розведенні вугільних електродів, приєднаних до батареї. Іноді таке явище називають дугою “Петрова”. Чому саме “дуга”? Тому що під дією сили Архімеда яскравий стовп помітно вигинався ближче до середини. Через декілька років дуговий розряд також був досліджений Деві в Англії.

Наукове дослідження тліючого розряду почалося в другій половині 19 століття і було тісно пов'язане з досягненнями у вакуумній технології. Коли високі потенціали можна було отримати разом із засобами відкачування

РОЗДІЛ 1 УЯВЛЕННЯ ПРО ТЛІЮЧИЙ РОЗРЯД

повітря із закритих скляних посудин, було помічено, що електрична іскра високої напруги між двома електродами створювала різноманітні барвисті та тихі стрічкові розряди, коли тиск газу поступово знижувався. У 1815 р. Фарадей відкрив явище тліючого розряду. Фарадей працював із трубками, відкачаними до $p \sim 1$ Тор, та джерелами напруги до 1000 В. Вже у 1844 році він виявив, що при зниженні тиску газу світло зменшується до анода газорозрядної трубки, залишаючи темний простір, демонструючи існування темного розряду електрики в газах.

Розвиток матеріалу електродів і технічний прогрес у конструкціях електродів і склокварцових трубок відіграли важливу роль у дослідженні різних форм тліючих розрядів. У середині 19 століття Гейсслер представив ртутний насос і розробив техніку виготовлення скляних газорозрядних трубок з металевими електродами всередині (1858-60).

У 1895 році Рентген відкрив рентгенівські промені, а робота

Дж. Дж. Томсона з використанням газорозрядних трубок при низькому тиску газу ($4 \cdot 10^{-4} \leq$ мм рт. ст.) призвела до відкриття електрона та вимірювання відношення заряду до маси. Після цього Дж. Дж. Томсон і Ф. В. Астон розробили мас-спектроскопію іонів після відкриття того, що «позитивні промені» можуть проходити від тліючого розряду через отвір у катоді. Таким чином, дослідження розуміння тліючого розряду відіграли важливу роль у відкритті сучасної фізики

Також варто наголосити, що історія фізики газового розряду кінця XIX – початку XX ст. дуже тісно пов'язана з історією розвитку атомної фізики. У 1895 році Рентген відкрив рентгенівські промені, а робота Дж. Дж. Томсона з використанням газорозрядних трубок при низькому тиску газу ($\leq 10^{-4}$ мм рт. ст.) призвела до відкриття електрона та вимірювання відношення заряду до маси. Після цього Дж. Дж. Томсон і Ф. В. Астон

РОЗДІЛ 1 УЯВЛЕННЯ ПРО ТЛІЮЧИЙ РОЗРЯД

розробили мас-спектроскопію іонів після відкриття того, що «позитивні промені» можуть проходити від тліючого розряду через отвір у катоді. Таким чином, дослідження розуміння тліючого розряду відіграли важливу роль у відкритті сучасної фізики. Тобто, іншими словами, дослідження явищ у розрядних трубках дало багато відомостей про елементарні процеси за участю електронів, іонів, атомів, у тому числі і збуджених, світлового випромінювання. У другій половині дев'ятнадцятого століття загалом відкриття катодних променів у газорозрядних трубках при низькому тиску призвело до періоду інтенсивних досліджень.

Починаючи з 1900 р. учень Дж. Дж. Томсона Таунсенд - засновник школи фізики газового розряду, встановив закономірності іонізації та однорідного (його називають таунсендівським) пробкою газу в електричному полі. Накопичувалося багато експериментальних даних щодо утворення різних електрон-атомних зіткнень, швидкостей дрейфу електронів та іонів, їх рекомбінацій і т. д. Все це склало основу сучасного довідкового матеріалу, без якого немислима робота дослідника у сфері розрядів. Поняття плазми було введено у 1928 т. Ленгмюром та Тонксом. Поведінка електричних розрядів постійного струму низького тиску в газах вивчалася багатьма англійськими та німецькими фізиками протягом 19-20 століття. Вони розробили різні вакуумні трубки, щоб проілюструвати дивну поведінку плазми. Ленгмюр залишив великий слід у фізиці газового розряду: зондовий метод переслідування плазми і багато іншого.

Що стосується різних частотних діапазонів, то хронологічно освоєння генераторів поля та вивчення відповідних розрядів йшли у порядку дослідження діапазонів. Високочастотний розряд спостерігав Тесла в 1891 р. Розряд легко отримати, якщо всередину соленоїда помістити відкачаний посуд і пропустити через котушку струм високої частоти. Під дією

РОЗДІЛ 1 УЯВЛЕННЯ ПРО ТЛЮЧИЙ РОЗРЯД

електричного поля, індукованого змінним магнітом, у залишковому газі виникає пробой та запалюється розряд. Однак механізм запалення розряду став у достатній мірі зрозумілим значно пізніше, фактично внаслідок робіт Дж. Дж. Томсона 1926—1927 років. Індукційні розряди потужністю в десятки кіловат було отримано до 1940 р. Г.І. Бабатом у Ленінграді.

Розвиток радарної техніки викликав великий інтерес до явищ у НВЧ-діапазоні. З кінця сорокових років С. Браун у США почав систематичне дослідження мікрохвильового пробою. Розряди в оптичному діапазоні були отримані лише після винаходу лазерів. Коли промінь рубінового лазера, дає так званий гігантський імпульс (потужністю понад 10 МВт), який сфокусували лінзою, у повітрі спалахнула іскра. Це було 1963 р.

Безперервний оптичний розряд, у якому відбувається стаціонарне підтримання щільної рівноважної плазми, що живиться енергією випромінювання, був вперше створений у 1970 р. за допомогою лазера безперервної дії на вуглекислому газі. Оптичні розряди, названі так внаслідок великої спільності їх ефектів із звичайними розрядними явищами, з самого початку привернули до себе пильну увагу.

Фізика тліючого розряду, одного з найстаріших і, здавалося б, вивчених, у 1970—80-х роках. випробувала небувале піднесення, що розкрило масу нових сторін цього явища. Підйом пов'язаний з використанням тліючого розряду в електророзрядних лазерах, особливо потужних на CO₂, призначених для лазерної технології. Подібним чином стимулом для розширення та поглиблення досліджень дугової плазми з

$p \sim 1$ атм, $T = 10^4$ К і аналогічних розрядів у всіх частотних діапазонах стало застосування генераторів щільної низькотемпературної плазми - плазмотронів в металургії, плазмохімії, для плазмового зварювання та різання та ін. Це також сталося в останні десятиліття ХХ ст. Приблизно в

РОЗДІЛ 1 УЯВЛЕННЯ ПРО ТЛІЮЧИЙ РОЗРЯД

цей же час стався сильний прорив у розумінні та дослідженнях високочастотних розрядів низького тиску ($p < 1 \text{ Тор}$). Високочастотні розряди (в основному ємнісного типу, але частково та індукційні) знайшли широке застосування у мікроелектронному виробництві. Практично всі сучасні пристрої для виробництва мікросхем, іонно-плазмового травлення, нанесення найтонших плівок та покриттів використовують високочастотні розряди низького тиску.

Вимоги сучасної енергетики та техніки високої напруги (зокрема, завдання захисту від блискавок) стимулювали поглиблене вивчення іскрового розряду, до речі, одного з найскладніших і найважчих явищ у галузі газових розрядів. Зазначені та багато інших практичних додатків фізики газового розряду поставили її до низки наук, які є фундаментом сучасної техніки. Завдяки значним дослідженням і розробкам, тліючі розряди тепер працюють не тільки при низькому тиску, але також і при високому тиску до атмосферного без необхідності вакуумної системи.

1.2 Види газових розрядів

Процеси газового розряду можуть протікати в дуже широкому діапазоні тиску газу і переносити струми в діапазоні від ледве вимірних значень до 10^6 А і більше. Вони може бути стаціонарним процесом або перехідним процесом дуже короткої тривалості. Розділяють багато видів електричного розряду у газах. На поведінку газового розряду, як правило, впливають властивості електричного кола, частиною якого він є. Вони класифікуються в залежності від виду прикладеного поля (постійні, змінні, імпульсне електричні поля), також від тиску газу, форми або розташування електродів тощо. Електричний розряд, для появи та підтримки якого необхідний вплив на газ зовнішнього (стороннього) іонізатора, називають несамостійним розрядом. У випадку, коли вплив зовнішніх чинників припиняється, зупиняється також і несамостійний розряд. При несамостійному газовому розряді не відбувається світіння газу.

Самостійний розряд може виникати під впливом сильного електричного поля в газі. Тобто це розряд, який виникає та підтримується без дії інших зовнішніх факторів або той, що залишається після зупинення впливу на поле зовнішнього чинника. Для існування самостійного розряду потрібне безперервне створення вільних заряджених частинок. Якщо продовжувати підвищувати напругу між електродами, то у певний момент можна спостерігати різке зростання сили струму.

Цей різкий стрибок кривої струму пояснюється таким чином: відбувається зростання числа іонів у газі, так як із зростанням напруги поле починає передавати іонам достатньо велику енергію, щоб при зіткненні існуючих іонів з нейтральними молекулами, молекули розчеплюються на

РОЗДІЛ 1 УЯВЛЕННЯ ПРО ТЛІЮЧИЙ РОЗРЯД

нові іони та електрони. При цьому саме дія поля визначає загальну кількість іонів. Це явище називають ударною іонізацією. Тобто, саме ударна іонізація газу є джерелом утворення нових вільних заряджених частинок.

Але у випадку, якщо зовнішнього іонізатора не буде, то тільки ударної іонізації для продовження протікання розряду буде мало. Необхідні певні умови, що призводять до створення нових електронів. Один із методів утворення нових вільних електронів - створити таке електричне поле, в якому, катіони будуть прикорюватись до такої швидкості, щоб при зіткненні з катодом вони були здатні вибити електрони. Є й інший метод. При зіткненні катіона із нейтральними молекулами, вони переходять у збуджений стан. Під час повернення стаціонарного стану, молекула випускає фотон. Ці фотони, що створюються таким чином, здатні іонізувати молекули газу. Це називається фотонною іонізацією молекул. Також фотони можуть вибивати електрони із катодів.

Усього виділяють 4 різні типи самостійного розряду: іскровий, тліючий, дуговий і коронний, в залежності від особливостей і стану газу, а також від розташування електродів і прикладеної до них напруги. При нормальному та зниженому тиску в газах спостерігаються три різні стадії самостійного розряду: темний, тліючий і дуговий.

Закони проходження електричного струму через гази можна описати за допомогою вольт-амперної характеристики (ВАХ).

На Рис. 1.1 зображено ВАХ електричного розряду в неоні при тиску 1 мм рт. ст. між двома плоскими електродами.

РОЗДІЛ 1 УЯВЛЕННЯ ПРО ТЛІЮЧИЙ РОЗРЯД

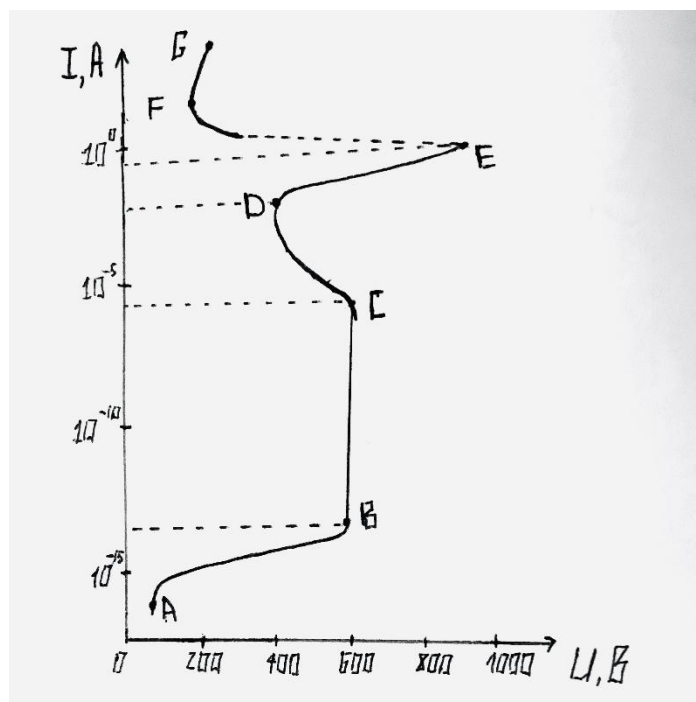


Рисунок. 1.1 — ВАХ електричного розряду в неоні при тиску 1 мм рт. ст. між двома плоскими електродами

На Рис. 1.1 видно такі основні точки ВАХ:

1. А - випадкові імпульси, спричинені іонізуючим випромінюванням від природної радіоактивності та космічного випромінювання;
2. А-В - струм насичення від природної іонізації;
3. В-С - розряд Таунсенда;
4. С - межа нормального тліючого розряду;
5. D - аномальний тліючий розряд;
6. E - нестабільна область, перехід тліючого розряду в дуговий розряд;
7. F - дуговий розряд із негативним диференціальним опором;
8. G - розвинена електрична дуга.

Зі збільшенням напруги між електродами спочатку струм зростає майже пропорційно напрузі (А). При подальшому збільшенні напруги

РОЗДІЛ 1 УЯВЛЕННЯ ПРО ТЛІЮЧИЙ РОЗРЯД

зростання струму уповільнюється. В цьому випадку всі іони, що утворилися під дією іонізатора, переносяться від одного електрода до іншого без рекомбінацій. Максимальний струм, можливий за даної інтенсивності іонізації, називається струмом насичення (А-В). При збільшенні напруги між електродами при деякому його значенні, що називається напругою запалення, струм у газі різко підвищується (ділянка В-С на рис. 3) внаслідок ударної іонізації та збудження атомів газу. Цей розряд супроводжується дуже слабким випромінюванням світла. Процес утворення іонів розвивається лавиноподібно. Тому цю ділянку називають темним лавинним розрядом Таунсенда. Розрядний проміжок виявляється заповненим іонізованим газом, що містить приблизно однакову кількість позитивних та негативних заряджених частинок - газовою плазмою. Газова плазма має велику провідність, яка збільшується з підвищенням температури. Цей розряд є початковою стадією самостійного розряду.

Лавинний розряд Таунсенда переходить у тліючий, що супроводжується більш яскравим світінням газу. Для нього характерна більша інтенсивність іонізації, у зв'язку з чим зменшується напруга на електродах (ділянка С-Е). Далі площа поверхні катода, якою проходить струм, змінюється пропорційно струму.

Тліючий розряд відбувається виключно при низькому тиску (десяті й соті частки мм рт. ст.) та із напругою величиною декілька сотень вольт або менше. Експериментально тліючий розряд створюється таким чином: до двох електродів, які впаяні у скляну вузьку трубку, прикладають напругу і поступово відкачують з трубки повітря для досягнення малого тиску. Через певний час у газі з'явиться тонка світна нитка, що напрямлена від катода до анода. Чим меншим ставатиме тиск, тим товщою і яскравішою ставатиме ця світна нитка, поки трубка повністю (крім прикатодної ділянки) буде

РОЗДІЛ 1 УЯВЛЕННЯ ПРО ТЛІЮЧИЙ РОЗРЯД

однорідно світитись. Таке явище називають додатнім стовпом. На підтримку розряду позитивний стовп впливу не має. Поблизу катода (прикатодний темний проміжок) заряджені частинки(електрони і катіони) значно прискорюються і таким чином стають здатними выбивати електрони з катода. Новоутворені вільні електрони у газі починають іонізувати молекули газу - утворювати іони. В свою чергу позитивні іони починають рухатись до катода і выбивати з нього нові електрони. Тобто таким чином іонізація може відбуватись безперервно. Завдяки цьому тліючий розряд може підтримуватись. Цікавим фактом є те, що при тисках приблизно 1,3 Па газ буде світитись менше, але більше починають світитись дальні частини трубки (стінки). Це можна пояснити так: якщо тиск газу дуже низький, то ймовірність зіштовхнення електрона із нейтральною молекулою газу відносно мала. В таких умовах ймовірність ударення електрона об стінку трубки набагато більша, в таких випадках цей процес викликає світіння. Цей процес визначають катодолюмінесценцією.

Після того як струм почне проходити через всю поверхню катода, що відповідає точці D характеристики, нормальний розряд, що тліє, переходить в аномальний тліючий розряд (D-E) , при якому щільність струму, що проходить через поверхню катода, почне зростати . Це вимагає підвищення напруги між електродами. Збільшення цього катодного падіння напруги означає зростання на цій ділянці напруженості поля, що прискорює електрони, та призводить до збільшення інтенсивності іонізації. При підвищенні напруги на проміжку до деякого значення, званого напругою запалення дуги (точка E на рис. 3), розряд, що тліє, переходить в дуговий (ділянка F-G на рис. 3). У випадку, якщо між двома електродами присутній контакт, якщо почати їх віддаляти і якщо в полі підключене достатньо потужне джерело струму, то виникає дуговий розряд. Це явище називається

РОЗДІЛ 1 УЯВЛЕННЯ ПРО ТЛЮЧИЙ РОЗРЯД

саме так, тому що світна нитка має ніби провисаючий вигляд між електродами, утворюючи дугу. При цьому сила струму може сягати декілька сотень А, а напруга може зменшуватись до значень в декілька десятків вольт. Підтримка дуги відбувається за рахунок термоелектронної емісії катода, розпеченого ударами іонів. Такий дуговий розряд називають самостійним. Термоелектронна емісія викликає збільшення числа електронів, тобто сили струму в дузі, а отже, збільшення падіння напруги на баластному опорі та зменшення напруги на електродах. Якщо термоелектронна емісія катода викликається нагріванням катода струмом від зовнішнього джерела живлення, дуговий розряд буде несамостійним.

Експериментально такий вид розряду отримують таким чином: необхідно наблизити катод і анод один до одного до зіткнення, внаслідок чого відбудеться їх розжарюванн струмом. далі при їх розведенні утворюється дуговий розряд. Цей процес відбувається при 4000 К. При цьому застосовують такий вид розряду дуже широко. Його використовують, як відомо, для зварювання металів, також застосовують для виплавляння сталі, що має високу якість (дугова піч) і навіть для освітлення у прожекторах та різноманітній проекційній апаратурі. Крім того можна зустріти дугові лампи, в які вбудовано ртутні електроди, що розміщені у кварцевих балонах. При цьому розряд з'являється у ртутній парі, якщо викачати повітря. На основі цього працюютьб кварцуві лампи. Ця дуга, яка виникає, є сильним джерелом випромінювання ультрафіолетової частини спектру.

Такий заряд в умовах низького тиску може застосовуватись для випрямлення змінного струму у ртутних випрямлювачах.

Поряд із трьома основними видами газового розряду, розглянутими вище, розрізняють ще два різновиди:

РОЗДІЛ 1 УЯВЛЕННЯ ПРО ТЛЮЧИЙ РОЗРЯД

1. Коронний розряд чи корона.
2. Іскровий розряд чи просто іскра.

У випадку, якщо обмежена величина струму протікає через газ за короткий час, виникає іскровий розряд або просто іскра. Це явище протікає при умовах високої напруги ($\approx 3 \cdot 10^6$ В/м) та тиску, близького до атмосферного. Процес іскрового розряду проходить поступово. Пояснення цього базується на стримерній теорії, відповідно до якої, спочатку виникає стример - сильно іонізований провідний канал, що з'являється в окремих потоках електронів. Після цього виникає канал іскри. Якщо дивитись на явище детальніше, то можна описати це так: напруженість електричного поля досить висока, при цьому вільний електрон прискорюється до швидкості, яка є достатньою для процесу іонізації атомів. Електрон іонізуватиме атоми, якщо вони будуть на його шляху, що менший за довжину вільного пробігу електрона. Це породжує нові лавини електронів, які в процесі наздоганяння одна одної породжують провідний місток, по яким і проходять багато електронів. Так утворюються нові канали іскрового розряду. Так, як під час цього явища виділяється значна кількість енергії і відбувається нагрівання газу до температури близько 104 К, відбувається світіння газу. Це відбувається досить швидко, тому починає зростати і тиск газу. Це і призводить до створення нових ударних хвиль. До речі, іскровий розряд супроводжується певними звуковими ефектами внаслідок цього - потріскування у слабких розрядах або гуркіт грому під час блискавки. Як відомо, блискавка - це також іскра, яка відбувається або між хмарами, або ж між хмарами та поверхнею землі. Іскра широко використовується в виготовленні техніки (запалювання горючої рідини у двигунах внутрішнього згорання, іскри, запуску, для запобігання надмірної напруги ліній передачі) та у виробництві (електрична точна обробка металів). Також

РОЗДІЛ 1 УЯВЛЕННЯ ПРО ТЛЮЧИЙ РОЗРЯД

він може бути використаний в спектральному аналізі для реєстрації заряджених частинок.

Електричний розряд високої напруги спостерігається біля провідника великої кривизни (наприклад, вістря). Тиск достатньо високий, а поле поруч із направляючим неоднорідним. Коли напруга поля біля краю досягає 30 кВ/см, навколо нього з'являється сяйво в формі коронки, що дало назву категорії - корону. Ця корона може бути додатньо зарядженою та негативною. Це залежить від заряду електрода, на якому відбувається розряд (кронштейн електрода). Знак коронки визначає метод електронів, який викликає іонізацію молекул газу. Таким чином, якщо корона негативна, то електрони можуть вириватись з катода через позитивні іони. У випадку, коли ж корона позитивна, відбувається іонізування газу аніонами, а іонізація проходить десь поблизу анода.

Польова напруга в коронки досить висока (приблизно 3,106 V), тому іонізація відбувається з атмосферним тиском. При відстані від поверхні провідника напруга швидко зменшується. Тому іонізація та пов'язаний з цим розрив газу спостерігаються в обмеженій області простору. Під час грози хмари, заряджені певним чином, здатні викликати електричні заряди протилежного знаку. Дуже великий заряд накопичується поблизу поверхонь з високою кривизною, особливо на краях. Тому, перед грозою, під час різких вершин високих об'єктів, ви можете спостерігати за конусами світла, подібними до пензлів. У стародавні часи це явище називалося вогнями св. Ельма.

Часто свідками цього явища стають альпіністи, коли навіть неметалічні предмети й кінчики волосся на голові прикрашаються маленькими пензликами.

РОЗДІЛ 1 УЯВЛЕННЯ ПРО ТЛЮЧИЙ РОЗРЯД

Так, коронний розряд, що виникає біля дротів у високовольтних лініях, може призвести до появи струмів витоку. Щоб цього не було, дроти високовольтних ліній створюють дуже товстими. Крім того, переривчастий коронний розряд може збуджувати радіоперешкоди. Коронний розряд широко використовується при очищенні промислових газів від домішок. Агрегати, що використовують для цього, називають електрофільтрами. Принцип їх дії можна описати так. Рухаючись вгору в циліндрі, по осі якого розміщений коронуючий дріт, домішки газу, що очищається, стають крупнішими. На них осідають іони зовнішньої частини корони, які притягають частинки домішок до зовнішнього некоронуючого електроду. У результаті цього домішки осідають, а газ очищається. На цьому ж принципі ґрунтується застосування коронного розряду для нанесення порошкових і лакофарбових покриттів.

1.3 Області тліючого розряду

Кожному типу розряду в газах відповідає певний стан іонізованого газу, який характеризується температурою, спектрами випромінювання і поглинання тощо. Більше того, виявляється, що стан деякого елемента газу залежить від того, в якій області розрядного проміжку міститься цей елемент, та від його відстані до електрода. У зв'язку з цим розрізняють не лише типи розрядів, а й області розрядного проміжку, що належить до того самого типу розряду.

Для спостереження тліючого розряду беруть скляну трубку 30—50 см завдовжки, в яку впаяно два електроди (катод і анод). Під час протікання процесу тліючого розряду катод випромінює електрони внаслідок бомбардування позитивними йонами, що є прискореними сильним полем поблизу поверхні катода, а також високоенергетичними світловими квантами. З цієї причини, що електрони прискорюються у напрямку анода, вони набувають достатню для іонізації атомів енергію. Нові електрони, що виникають при іонізації газу, в свою чергу також прискорюються полем, а додатні іони летять до катода, і цим викликають випромінювання нових електронів.

Причина самостійності розряду заключається у наступному: кожний електрон, що випромінюється, викликає стільки актів іонізації і збудження атомів, що в результаті бомбардування катода виникає новий електрон з катода. Таким чином, відбувається утворення все нових іонів, і розряд продовжується до тих пір, поки на електродах підтримується необхідна напруга. Тобто, іншими словами, має місце динамічна рівновага зарядів, які

РОЗДІЛ 1 УЯВЛЕННЯ ПРО ТЛЮЧИЙ РОЗРЯД

виникли, і тих, що йдуть на катод або позитивний стовп. Вихід не залежить від зовнішніх джерел іонізації.

Ми прикріплюємо електроди до джерела постійного струму з напругою в кілька тисяч вольт і поступово накачуємо повітряну трубку. З тиском атмосферного газу всередині трубки залишається темним, оскільки напруги в декількох тисяч вольт недостатньо для пробивання тривалого газового зазору. Однак, коли тиск газу зменшується (приблизно 5,3-6,7 кПа) в якийсь момент труби буде розряд, який виглядає як світлий шнур, що з'єднує анод та катод трубки. Це схоже на тонкий шнур (у повітрі - малиновий колір, в інших газах - інші кольори), який з'єднує обидва електроди. У цьому стані газова колона добре працює електроенергією. При подальшому перекачуванні газу колону легким газом розмивають і розширюються, а сійво заповнює майже всю трубку (приблизно 1,3 Па). При тиску газу, кілька десятків ртуті, розряд заповнює майже весь об'єм

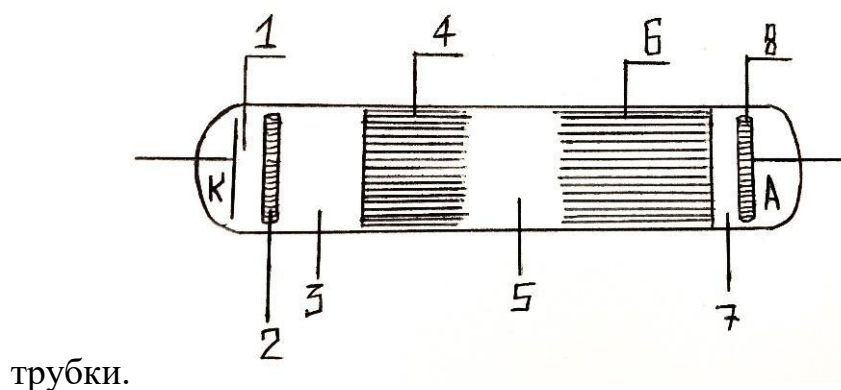


Рисунок 1.2 — Области тліючого розряду

В тліючому розряді виділяють такі області (Рис. 1.2):

1. Астонів темний простір
2. Катодний шар
3. Темний катодний простір

РОЗДІЛ 1 УЯВЛЕННЯ ПРО ТЛЮЧИЙ РОЗРЯД

4. Область тліючого світіння
5. Фарадеїв темний простір
6. Позитивний стовп розряду
7. Темний анодний простір
8. Область анодного світіння

Безпосередньо до катоду прилягає темний астонів простір. Ця область відносно вузька і темна, так як тут електрони ще мають маленькі швидкості (порядку електрон-вольта), тобто не встигають набрати достатньої енергії для збудження молекул газу. Тому поблизу катоду завжди існує область, де світіння газу відсутнє.

Електрони, пройшовши через темний астонів простір, набувають достатню енергію для збудження нейтральних молекул газу. Ця область, що світиться, відповідає максимуму функції збудження атомів даного газу. Але цієї енергії ще не достатньо для ударної іонізації. Цей шар називають першим катодним шаром чи катодною плівкою, що світиться.

За першим катодним шаром слідує катодний темний простір, що іноді також називають гіторфовим чи круковим темним простором. Існування катодного темного простору пояснюється тим, що електрони починають стикатися з атомами газу не відразу, а лише на деякій відстані від катода. Ширина катодного темного простору приблизно дорівнює середній довжині вільного пробігу електронів: вона збільшується із зменшенням тиску газу. У катодному темному просторі електрони рухаються практично без зіткнень, утворюючи електронні, або катодні промені. Якщо в катоді просвердлили малі отвори, то позитивні іони, що бомбардують катод, пройшовши через отвори проникають у простір за катодом і утворюють різко обмежений пучок, що отримав назву каналу (або позитивних) променів, що називаються зарядом, який вони несуть.

РОЗДІЛ 1 УЯВЛЕННЯ ПРО ТЛЮЧИЙ РОЗРЯД

У зоні катодного шару та темного простору катода інтенсивність електричного поля значно більша, ніж в інших областях, тобто основна крапля напруги відбувається.

Яскравість цієї області невелика порівняно з регіонами політики, тому вона називається темною. Енергії електронів у цій області достатньо, щоб викликати іонізацію газу. При низьких значеннях катода потенціал іонізації газу відбувається при електронах з атомами, а також з високим падінням та низьким тиском газу, роль та іонізація газу з позитивними іонами та швидкими нейтральними атомами можуть грати. Зі збільшенням напруги до катода відбувається максимальна зона іонізації.

Після області темного шару катода є площа тліючого саява. Це площа невеликого електричного поля. Електричного поля в ньому недостатньо для електронів. Іонізований газ -це майже квазі -інтелектуальна плазма, що характеризується потоком швидких електронів із катодного темного простору. Окрім швидких електронів, кількість повільних електронів, які втратили більшу частину своєї енергії від нееластичних сутичок у темному просторі катода, також відіграє важливу роль. Ці електрони мають енергію, близьку до максимальної функції збудження і викликають саяво газу з лінійним спектром, який визначається природою атомів. Крім того, яскраве саяво цієї області пов'язане з процесами рекомбінації електронів та іонів, що призводить до багатьох нейтральних молекул у збудженому стані.

Ближче до анода, польове напруження падає, а інтенсивність саява цієї області також зменшується від зменшення ймовірності рекомбінації.

Тобто область тліючого саява має чітку межу від катода і більш розмита від анода.

Наступна область розряду - темний простір Фарадея. Іони з високою енергією не потрапляють сюди. Тут електрони отримують енергію в

РОЗДІЛ 1 УЯВЛЕННЯ ПРО ТЛЮЧИЙ РОЗРЯД

слабкому електричному полі, але ця енергія проявляється в їх хаотичному русі. На початку позитивного стовпчика він настільки збільшується, що спостерігається помітне хвилювання та іонізація газових атомів за допомогою електронів. Основна відмінність між фарадеєм темного простору та темним простором катода полягає в тому, що в першій енергії електронів все ще занадто мало для виникнення газового саява, а в наступному - занадто великому.

Наступна область називається позитивним стовпом тліючого розряду. Він простягається від темного простору Фарадея майже до анода. Порівняно з темним простором катода, польове напруження тут було невеликим.

Фіксована напруга напруги встановлюється у фіксованому струмі, наприклад, компенсації за втрату заряджених частинок. Ці втрати спричинені або дифузією електронів та іонів на стінках трубки (якщо довжина стовпа значно більша за його діаметр), або на аноді, і в катодних областях (у випадку дуже короткого позитивного стовпа) або рекомбінацією носіїв заряду в просторі. Таким чином, позитивний стовп може розглядатися як незалежна область заряду, яка існує незалежно від частин катода. Це не потрібно для підтримки розряду. На короткі відстані між катодом і анодом він зникає.

Позитивний стовп іноді ділиться на більш темні та легкі області. Це фіксовані ділянки або рухомі зони вздовж осі трубки.

Потім є вузька темна область, яка також називається темним анодним простором і саявом анода. Це область з невеликою кількістю позитивних іонів. З цього в ньому прискорені електрони, що призводить до світла анода.

Електрони приваблюють анод, позитивні іони відштовхуються. Анод створює негативний тривимірний заряд, що спричиняє зміну потенціалу ступеня іонізації газу. Це остання область перед анодом, в якій прискорені

РОЗДІЛ 1 УЯВЛЕННЯ ПРО ТЛІЮЧИЙ РОЗРЯД

електрони втрачають енергію. Якщо ви піднесете анод до катода настільки, що він потрапляє в темний простір Фарадея, то анодне падіння потенціалу зовсім зникне.

З великим зовнішнім опором, коли струм у відокремленій трубці невеликий, поверхня катода, покрита світлом, пропорційна струму в трубці (закон Гея). У цьому випадку зменшення катода в потенціалі залишається незмінним. У цьому випадку це називається нормальним зниженням катода, а розряд називається нормальним жевріючим або тліючим розрядом. У більшості випадків його значення знаходиться в межах 100-300 В. Розмір нормального катода-рецесії не залежить від температури, поки термоелектронне випромінювання від поверхні катода не збільшиться. Це також не залежить від тиску газу, але визначається лише катодним матеріалом та складом газу (тиск на кілька десятків мм рт. ст.).

Коли, у міру збільшення струму, вся поверхня катода покрита сяйвом, катодний спад починає збільшуватися. У цьому випадку зменшення катода називається аномальним, а сам розряд – аномальним тліючим. Якщо ви продовжуєте відкачувати повітря з трубки, то при тиску близько 1,3 світіння слабшає, але стінки трубки починають світитися. Природа цього сяйва така. При низькому тиску ймовірність того, що електрон зіткнеться з молекулою газу, дуже мала. Електронні сутички зі стінами трубки набагато частіше. Коли вони потрапляють у скло, електрони викликають сяйво. Це явище називається катодолумінесценцією. Тому найбільш широко використовується категорія використовується як джерело світла в різних газових трубах. (Рис. 1.3)

РОЗДІЛ 1 УЯВЛЕННЯ ПРО ТЛЮЧИЙ РОЗРЯД



Рисунок 1.3 — Неонова лампа, в основі функціонування якої лежить тліючий розряд

Форма трубки - це найзручніша конструкція, яка працює відповідно до наступної схеми: з обох боків є електроди, які потім живляться від напруги. Під впливом атомів газу атоми газу відокремлюються від негативних електронів і беруть позитивний заряд. Крім того, заряджені атоми переходять до відємного електрода та негативно заряджені електрони - до позитивного. Заряджені атоми газу та електрони, відокремлені від них, називаються плазмою, вони утворюють електричний ланцюг неонові трубки. Радіація розряду поглинається шаром спеціальних речовин, що використовуються на внутрішній поверхні трубки, яка при дії поглиненого випромінювання, у свою чергу, починає світитися. Відтінки залежать від вибраного газу, складу речовин, прикріплених до скла, та від газових добавок для заповнення трубки. Щільність та частота електричного струму також можуть впливати на зміни кольору. Якщо взяти приклад неонові лампи, то коли щільність струму просвітництва стане помаранчевим, і коли він збільшується, він впаде в синій сегмент спектру світіння.

Вивчення спектрального складу випромінювання різних областей категорії тіні та порівняння цих даних з потенційними даними про розподіл дали можливість зробити висновок [1], що всі процеси, що призводять до утворення та підтримки поверхні катода концентруються безпосередньо

РОЗДІЛ 1 УЯВЛЕННЯ ПРО ТЛЮЧИЙ РОЗРЯД

біля поверхні катода. У формуванні тліючої категорії немає позитивної цінності. Його роль зводиться до ролі провідності.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

У Розділі 1 було розглянуто загальний опис поняття тліючого розряду, описано області тліючого розряду та проаналізовано електродні системи, в яких він створюється. Отже, газовим розрядом називають набір процесів, що відбуваються під час протікання електричного струму через іонізований газ. При нормальному та зниженому тиску в газах спостерігаються три різні стадії самостійного розряду: темний, тліючий і дуговий. Тліючий розряд - це один із різновидів стаціонарного електричного розряду. Це самостійний розряд, що з'являється при низькому тиску (порядку 0.1 мм.рт.ст./1.3 Па) та при напрузі в декілька сот вольт. В тліючому розряді виділяють такі області астонів темний простір, катодний шар, темний катодний простір, область тліючого світіння, фарадеїв темний простір, позитивний стовп розряду, темний анодний простір, область анодного світіння. Було досліджено електродні системи в яких створюється тліючий розряд та приклади їх використання. Тліючий розряд знайшов застосування у різних областях науки техніки. Найбільш широко він використовується людством як джерело світла в різних газорозрядних трубках.

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ГАЗОВОГО РОЗРЯДУ З СЕРЕДНІМИ ТИСКАМИ

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ГАЗОВОГО РОЗРЯДУ З СЕРЕДНІМИ ТИСКАМИ

2.1 Застосування тліючого розряду із метою азотування металів

З напрямком вивчення тліючого розряду, який протікає у порожнистому катоді, що виявлений Пашеном на початку ХХ століття, асоціюється багато різноманітних наукових і інших напрямів застосування струму, що тече в газовому середовищі. Навіть перші дослідники відзначили виняткові особливості виділення у випадку не порожнистого катода. Перші патенти на використання тліючої категорії як засобу "транспортування" азоту були отримані в 1930 -х роках. За рекомендаціями фізика Венельта промисловець Б. Бергхауз займався тліючим розрядом. Важливою умовою для його використання, на думку Венельта, було перетворення тодішнього 'слабострумного' тліючого розряду в стабільний 'сильнострумний'. Це вдалося Бергхаузу, який використав умови електричного розряду. При тиску в декілька мілібар ($1 \text{ бар} = 0,1 \text{ МПа}$) і напрузі в декілька сотень вольт був отриманий стабільний сильнострумний тліючий розряд з іонами азоту. Використовуючи механізми випаровування та розпилення вдалося заглибити ці іони в поверхню матеріалів на основі заліза, тобто азотувати їх. Вже в 1930 -х роках з успіхом використовувалася ця технологія азотування в тліючому розряді.

Й сьогодні тліючий розряд знайшов поширення в різних сферах промисловості – від електронної (при виготовленні іонних джерел з порожнистим катодом, газорозрядні лампи) до металообробної (для з'єднання поверхонь матеріалів концентрованими електронними пучками).

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ГАЗОВОГО РОЗРЯДУ З СЕРЕДНІМИ ТИСКАМИ

Оскільки речовина катода в тліючому розряді поступово переходить у пароподібний стан, то такий розряд широко використовується також для катодного розпилювання металів. Якщо перед катодом тліючого розряду розміщати різні предмети, то вони покриватимуться тонким шаром металу катода. При виникненні електричного розряду між електродами при низькому тиску катод повільно руйнується під впливом ударів об нього атомів і молекул газу. Частинки речовини катода залишають його поверхню у вигляді вільних атомів або хімічно пов'язаних з атомами залишкових газів. У роботі [2] проаналізовано існуючі способи нанесення вакуумних покриттів. Порівняно з термічним напиленням, катодне (йонне) розпилювання забезпечує значно більшу енергію частинок (до 2...20 eV), що істотно підвищує міцність зчеплення покриття з основою. Так виготовляють металеві дзеркала високої якості.

У техніці велика кількість частин машин та інструментів працює з ударними та значними динамічними навантаженнями, що призводить до знищення їх поверхні. Отже, важливо забезпечити оптимальне співвідношення між твердістю та пластичністю поверхневих шарів та відсутністю металів кипіння водню під час їх зміцнення. Хімічна терапевтична обробка використовується для отримання металів із підвищеною стабільністю. Залежно від типу агрегатного стану речовини, хімічна терапевтична обробка можна розділити на три групи: тверда фаза, рідка фаза, газова фаза. Поверхнева взаємодія проходить через певні стадії: адсорбція робочого середовища на обробленій поверхні, конденсація цих атомів з подальшою взаємодією або хімічною або дифузною. Для випадку азоту швидкість конденсації менша, ніж швидкість дифузійної процеси робочої речовини в глибині обробленої поверхні, створюючи дифузійний шар. Особливо ефективно виконувати азотування у плазмі. Для хімічної

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ГАЗОВОГО РОЗРЯДУ З СЕРЕДНІМИ ТИСКАМИ

обробки в плазмі в основному використовують аномальні розряди, що пробиваються, у нашому випадку в азотному середовищі, яке створюється між спеціальним електродом та поверхнею. Поверхня діє як негативний електрод, який бомбардує позитивні іони азоту, утворені в категорії, з подальшим можливістю дифузії в середині поверхні. Методи хімічної та термічної обробки металів для поліпшення їх характеристик включають в пасту газ, плазму, рідкий азот та азот, а також комбінацію цих методів. В останні роки стало відомо, що атом азоту є головним засобом, який відповідає за ефективність азоту поверхні металевих продуктів. Для управління структурою шару та механічними властивостями шару застосовують (у різні стадії процесу):

1. зміну щільності струму
2. зміну витрати азоту
3. зміну ступеня розрідження
4. добавки до азоту особливо чистих технологічних газів:
 - водню
 - аргону
 - метану

В [3] розглянуто задачу визначення вмісту атомарного азоту як активної компоненти, відповідальної за ефективність технологій модифікації поверхні металів у плазмі стаціонарного жевріючого розряду низького тиску в суміші азот-аргон, що широко застосовується в цих технологіях. Результати дослідження підтверджують визначальну роль атомарного азоту в процесі азотування металевих поверхонь. Загальним для всіх чотирьох методів азотування – нагрів деталі до температури азотування та насичення поверхні деталі азотом.

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ГАЗОВОГО РОЗРЯДУ З СЕРЕДНІМИ ТИСКАМИ

Азотування металу заключається у наступному: поверхневий шар металу дифузійно насичується азотом (азотом і вуглецем) при нагріванні у відповідному середовищі.

В результаті азотування метали набувають:

- високу твердість на поверхні;
- високу зносостійкість;
- високу межу витривалості;
- високу кавітаційну стійкість;
- добру стійкість до корозії в атмосфері, прісній воді та парі.

Приблизно в 60-их роках було створено схему азотування металів, де використовувалась плазма тліючого розряду.

Цей метод дозволяє оптимізувати властивості зміцненого поверхневого шару для забезпечення максимальних експлуатаційних характеристик з врахуванням реальних умов експлуатації конструкційних елементів. Перевагою саме такого способу азотування є той факт, що він може відбуватись при малих температурах, а також те, що шар, збагачений азотом, утворюється рівномірно. Також метод азотування за допомогою тліючого розряду відрізняється відносно високою швидкістю за рахунок швидкого нагрівання до необхідної температури. Важливим фактом є те, що розміри деталей при використанні даного методу не змінюються. Це дозволяє використовувати таку схему азотування для вже відшліфованих до необхідної геометричної форми металів.

Під час азотування металів у тліючому розряді енергія іонів, що утворились у процесі тліючого розряду, більша, ніж енергія атома азоту в дисоційованому аміаку при умовах звичайного азотування.

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ГАЗОВОГО РОЗРЯДУ З СЕРЕДНІМИ ТИСКАМИ

Атоми металу в плазмі в тліючого розряду поєднуються з азотом, що може бути в різних видах збудження, утворюючи сполуку, що адсорбується (осідає) на поверхні катода у виді рівного шару.

Процес іонного азотування має 2 етапи:

- очищення поверхні за допомогою катодного розпилювання;
- особисте насичення.

Параметри електричного та вакуумного розряду під час катодного спрею гарантують активацію поверхні та знищення оксидних плівок, а на другому етапі вони забезпечують збільшення температури поверхні до теплоти дифузії, активність газової фази, що підтримує градієнт концентрації азоту на поверхні та регуляції процесу на фазовому шарі.

Послідовність операцій під час технологічного процесу наведена нижче.

Деталі азоту встановлюються в камері, що з'єднується з негативним електродом, герметизуючи камеру та подаючи повітря до тиску 1 мм рт.ст. Після відачування повітря камеру продувають робочим газом протягом 5...15 хв при тиску ~10 мм рт. ст., потім відкачують цю камеру до низького тиску 0,2...0,4 мм рт. ст., подають на електроди певну напругу і таким чином збуджують тліючий розряд.

При напрузі 1100...1400 В починається етап катодного розпилення. Після обробки робочої поверхні протягом часу 50...60 хв по режиму катодного розпилення електричну напругу поля понижують до робочої, а тиск вже підвищують до 1...10 мм рт. ст. Коли тиск збільшується, площа катодного світіння зменшується і рівномірно розподіляється на поверхні деталі, повторюючи її контури. Розпилення катода також може бути здійснено в атмосфері водню, використання якого особливо рекомендується для азоту аустенітних сталей. Використання водневої плазми в процесі азоту

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ГАЗОВОГО РОЗРЯДУ З СЕРЕДНІМИ ТИСКАМИ

до подачі аміаку супроводжується тьмяною поверхнею (особливо інтенсивно на межах зерен), що при незначному падінні твердості покращує пластичність дифузійного шару.

Робоча температура процесу (470...580 °С) досягається протягом 15...30 хв. Швидкість нагрівання зазвичай знаходять співвідношенням площі і маси частин.

Після ізотермального впливу деталі охолоджуються до кімнатної температури під вакуумом. У цьому випадку швидкість охолодження порівняно з нагріванням печі вище, оскільки іонна обробка нагрівається лише продуктами, а нагрівання стін контейнера (робочої камери) через теплове випромінювання та конвекція в умовах розведення є незначним.

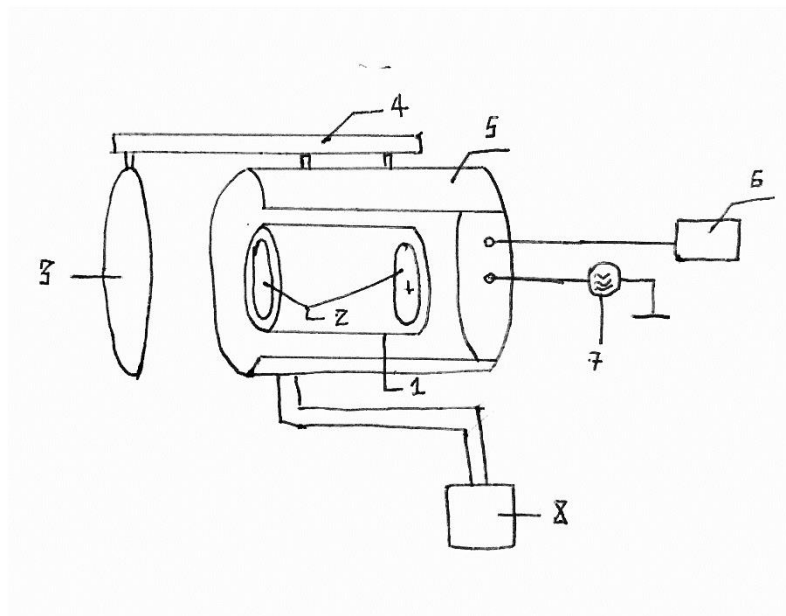
У роботі [3] та [4] розглянуто дослідження з точки зору енергоефективності з метою оптимізації процесів модифікації на основі використання тліючого розряду, а саме азотування поверхні конструкційних деталей у формі пластини. Ці процеси там вивчені експериментально і теоретично в плазмі аномального сферичного тліючого розряду у суміші N₂-Ar. У процесі азотування енергозабезпечення розряду підтримується на рівні UI ~ 60 Вт для стабілізації температури оброблюваних зразків у межах 810...820 К. Такі результати дозволяють кількісно визначити основні параметри тліючого розряду залежно від тиску.

Також заряд, що тліє, використовується для обробки текстильних матеріалів [5,6,7]. Для модифікації матеріалів застосовували тліючий розряд змінного струму при тиску газу у робочій камері 150 Па, силою струму 200 мА, що відповідало густині струму 1,5 мА/см², та часу обробки 15...90 с, в залежності від матеріалу. Внаслідок дослідження було встановлено, що модифікація поверхонь волокон за допомогою курінських скидів значно збільшує міцність волокна волокон, що використовують будівельний

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ГАЗОВОГО РОЗРЯДУ З СЕРЕДНІМИ ТИСКАМИ

матеріал і є перспективним технологічним напрямком. Фізико-хімічні процеси, які відбуваються при обробці матеріалу за допомогою тліючого розряду, спричиняють зміни структури та складу поверхневого шару матеріалу і, залежно від поверхні, так чи інакше впливають на властивості матеріалу профілю, наприклад, дуже важливою характеристикою всіх текстильних матеріалів є гідрофільність, яка є гідрофільною, яка він наливає якість матеріалу за допомогою фарби, обробки спеціальним рішенням тощо. Існує багато методів, заснованих на нагріванні матеріалу або високого рівня. Для забезпечення необхідного рівня просочення до поверхні матеріалу. Але найефективнішим способом поліпшення гідрофільності є обробка матеріалу при менших розрядах, оскільки цей метод також покращує інші характеристики (наприклад, рівномірність подальшого покриття фарби). Крім того, у багатьох випадках обробка за допомогою жевріючого розряду може усунути екологічно небезпечні речовини та технологічні процеси.

Одна із видів установок, що використовується для такої обробки - низькотемпературна плазмова установка. Вона складається з наступних частин (Рис. 1.4):



РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ГАЗОВОГО РОЗРЯДУ З СЕРЕДНІМИ ТИСКАМИ

Рисунок. 2.1 — Низькотемпературна плазмова установка

1 - робоча камера, 2 -електроди, 3 - ковпак вакуумної камери, 4 - консоль для відкриття кришки вакуумної камери, 5 - вакуумна камера, 6 - система подачі та регулювання газу, 7 - генератор, 8 - вакуумна система.

Для контролю вхідних параметрів установки використовуються діагностичне обладнання та зразковий датчик тиску для вимірювання низького тиску. Перед експериментом зразки зафіксовані в робочих затискачах камери і розташовані в просторі між електродами. Потім вакуумні насоси вмикаються, і вакуумний процес триває до встановлення необхідного тиску. Потім газ постачається до робочої камери через систему живлення. При встановленні робочого тиску в камеру (13-26 ПА) напруга подається до електродів. Параметри технологічної обробки регулюються зміною значень напруги в аноді ($U=2,5-6,0\text{кВ}$) та сили анодного струму ($I=0,3-0,7\text{ А}$). Для різного типу модифікації досліджуваних зразків використовують такі гази: аргон, аргон/повітря, аргон/азот, аргон/пропан-бутан, кисень, повітря.

Також тліючий розряд має місце у використанні під час прецизійного зварювання та паяння в процесі нагрівання зразків [8,9] .

Шляхом ударяння об поверхню деталей прискорених позитивних йонів робочого газу відбувається пряме нагрівання зразків. Головною відмінністю даного шляху є той факт, що гальванічний зв'язок між виробом і електродами розряду відсутній. Схема зварювального нагріву в нормальному тліючому розряді зображена на Рис. 1.5

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ГАЗОВОГО РОЗРЯДУ З СЕРЕДНІМИ ТИСКАМИ

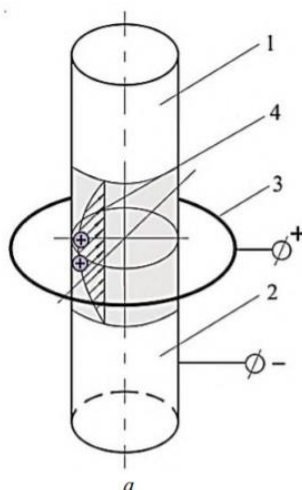


Рисунок 2.2 — Схема зварювального нагріву в нормальному тліючому розряді.

1,2 – деталі, що зварюються (катод), 3 – циліндричний анод, 4 – траєкторія руху іонів.

В [10] розраховано чисельну модель створення розрядної плазми та азотування металів і сплавів. Плазма генерувалась у порожнистому циліндричному катоді. Зразки металів відігравали роль катоду (Рис. 2.3).

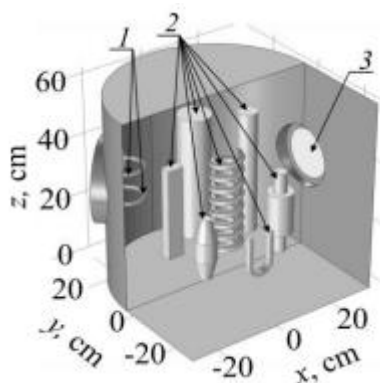


Рисунок 2.3 — Модель порожнистого катода.

1 – анод; 2 – зразки; 3 – допоміжне вивантажувальне вікно

Усередині порожнистого катода генерується плазма, падіння напруги на катоді U_c близьке до напруги розряду U . Іони плазми, прискорені в катодному шарі, забезпечують іонно-електронне випромінювання з

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ГАЗОВОГО РОЗРЯДУ З СЕРЕДНІМИ ТИСКАМИ

поверхні катода. Електрони, коливаючись у порожнистому катоді, іонізують газ і забезпечують самопідтримку розряду. Було отримано залежність напруги розряду від тиску газу (Рис.2.4). В якості плазмоутворюючого газу брали азот. Значення струму підтримували 30А.

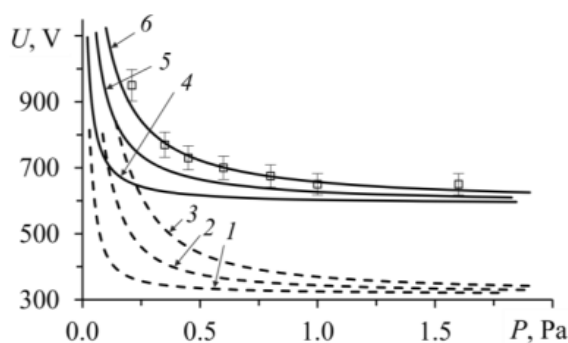


Рисунок 2.4 — Залежність напруги розряду від тиску у
несамопідтримуваному (1,2,3) і самопідтримуваному розряді (4,5,6)

(\square - експеримент)

Вимірювання проводились при різних ефективних довжинах порожнистого катода: 1,4 – $L = 6.4 \times 10^3$ см; 2,5 – 4.0×10^3 см; 3,6 – 1.6×10^3 см. Також в [10] було проведено дослід із азотування титану в несамостійній плазмі тліючого розряду з порожнистим катодом під низьким тиском і різними температурами $T = 550, 650, 850$ С протягом п'яти годин. Було отримано профілі мікротвердості для приповерхневих шарів титану VT1-0. Тильна сторона зразка розташовувалася на відстані 0,5 мм від поверхні порожнистого катода. Мікротвердість перевіряли з обох сторін зразка. Експериментальні результати щодо мікротвердості поверхні титанових зразків, оброблених при різних параметрах тліючого розряду та температури азотування показали, що мікротвердість збільшується при збільшенні густини катодного струму, напруги розряду та температури досліджуваного об'єкта. Також експеримент показав, що збільшення

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ГАЗОВОГО РОЗРЯДУ З СЕРЕДНІМИ ТИСКАМИ

концентрації азоту корелює зі збільшенням мікротвердості поверхні, а потовщення нітрованого шару забезпечує підвищення довговічності поверхні зразка.

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ГАЗОВОГО РОЗРЯДУ З СЕРЕДНІМИ ТИСКАМИ

2.2 Тліючий розряд всередині трубок малого діаметра

Для процесу створення тліючого розряду у довгих трубках з малим діаметром можна виділити такі основні параметри: тиск робочого газу (~ 1 Па), постійний струм, постійна напруга, рівномірність тиску робочого газу в розрядній системі (відхилення ~ 0.1 Па). Температурний режим поверхні аноду та позитивного електроду визначається властивостями матеріалу. При цьому основним плазмоутворюючим газом може бути:

- азот;
- водень;
- суміш азоту та водню;
- суміш аргону і водню;
- суміш аргону і азоту.

Для ізоляції процесу тліючого розряду від несприятливого впливу атмосфери і значного підвищення якості вимірювань і самого процесу зазвичай використовують вакуумні установки. Фізичний вакуум — це ідеалізована концепція простору, в якому немає частинок. Експериментально такого стану досягти неможливо; окремі атоми та іони існують навіть у розрідженому міжгалактичному просторі. У таблиці 2.1 наведено деякі характеристики різних ступенів вакууму. Чим вище тиск, тим вище концентрація азоту в розрядному проміжку і, відповідно, тим інтенсивніше іонне бомбардування і дифузія атомів аргону в поверхневі шари, що призводить до збільшення теплового навантаження на електродну систему. Крім того, зі збільшенням тиску зростає ймовірність переходу тліючого розряду в дуговий.

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ГАЗОВОГО РОЗРЯДУ З
СЕРЕДНІМИ ТИСКАМИ

Таблиця 2.1 — Характеристики різних ступенів вакууму

Характеристика	Ступінь вакууму			
	Низький	Середній	Високий	Надвисокий
Діапазон тисків, мм. рт. ст	760-1	$1-10^{-3}$	$10^{-3}-10^{-7}$	$<10^{-8}$
Концентрація молекул газу, см-3	$10^{19}-10^{16}$	$10^{16}-10^{13}$	$10^{13}-10^{10}$	10^{10}

Дугові розряди небажані, оскільки може статися руйнування дугою поверхонь електродів і виплескування крапельної фази з точок утворення дуги.

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ГАЗОВОГО РОЗРЯДУ З СЕРЕДНІМИ ТИСКАМИ

2.3 Застосування іонного азотування всередині трубок малого діаметра

Тліючий розряд може бути використаний з метою отримання видимої індикації напруги малого сигналу, отриманої від транзисторів або інших джерел малого сигналу. Дана технологія описана у [11,12]. В сучасному електронному обладнанні часто бажано мати видиму індикацію роботи транзисторних схем. Принцип роботи заснований на передачі струму між двома сусідніми катодами. Можливість індикації малого сигналу звичайною трубкою тліючого розряду залежить головним чином від стабільності напруги пробою.

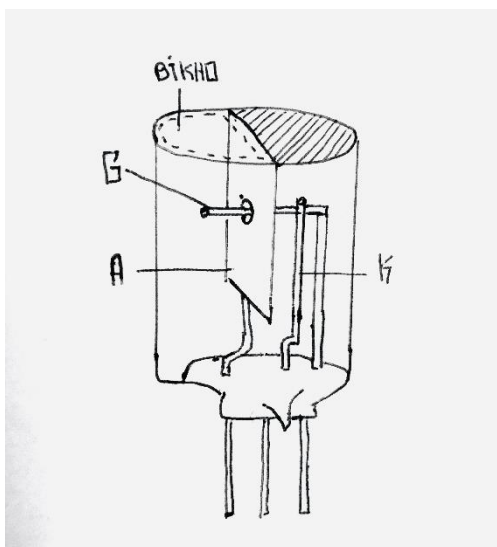


Рисунок 2.5 — Схема індикаторної трубки

На Рис. 2.5. зображено принцип роботи цієї індикаторної трубки. Внутрішня частина трубки розділена анодом на дві частини. Анод виготовлений з нікелевої пластини з невеликим отвором у центрі, через який індикаторний катод виступає так, щоб його можна було спостерігати з вікна на верхній частині трубки. З іншого боку анода підтримуючий катод

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ГАЗОВОГО РОЗРЯДУ З СЕРЕДНІМИ ТИСКАМИ

розміщений впритул з індикаторним катодом. Коли між анодом А і двома катодами К і G, які розміщені так, що один катод лежить у світлі, викликаному іншим, підтримується тліючий розряд, анодний струм поділяється між двома катодами відповідно до їх розмірів, форми, і різниці потенціалів між ними. Коли подається негативна напруга сигналу до G або позитивна напруга сигналу до К, більша частина анодного струму зміщується до G, і світіння поширюється на G, таким чином, трубка перемикається у стан «ввімкнено». Завдяки відносно постійній характеристиці напруги тліючого розряду невелика зміна потенціалу спричинить значну зміну парціального струму i , таким чином, змінить розмір світіння, пропорційний катодному струму. Після того як сигнал знімається, світіння автоматично повертається у вихідне положення завдяки падіння потенціалу. Такий принцип роботи малосигнального індикатора; тобто розмір світіння, контрольований напругою малого сигналу, прикладеною між двома катодами, використовується як індикація напруги. На додаток до своєї здатності вказувати дуже невеликі сигнали, ця трубка має кілька інших видатних особливостей. Це 1) малий розмір, 2) мале розсіювання потужності, 3) стабільні характеристики та 4) тривалий термін служби в порівнянні з іншими типами індикаторів (наприклад, лампа або індикатор із газонаповненою трубкою).

Тліючий розряд у трубці, що має звуження в поперечному перерізі, широко застосовується в ртутних лампах низького тиску, для геометричного стиснення в плазмотроні, а також для дослідження подвійного електричного шару. У роботі [14] досліджуються нормальний і аномальний режими горіння та вольт-амперні характеристики розряду постійного струму при різних значеннях діаметра поперечної діафрагми в широкому діапазоні тиску азоту. За результатами дослідження, у трубці без

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ГАЗОВОГО РОЗРЯДУ З СЕРЕДНІМИ ТИСКАМИ

діафрагми при низькому тиску розряд горить тільки в ненормальному режимі, в якому прикладена напруга зростає зі збільшенням струму. При значенні тиску 0,2 Тор і вище гістерезис на ВАХ практично зникає, оскільки світіння анода вже існує при цих значеннях тиску. При більш високих значеннях тиску, починаючи з 1,5 Тор, виділення можуть існувати не тільки в аномальному, а також у звичайному режимі.

На Рис. 2.6 показано розрядні вольт-амперні характеристики при різних значеннях тиску азоту та діафрагмі діаметром 8 мм.

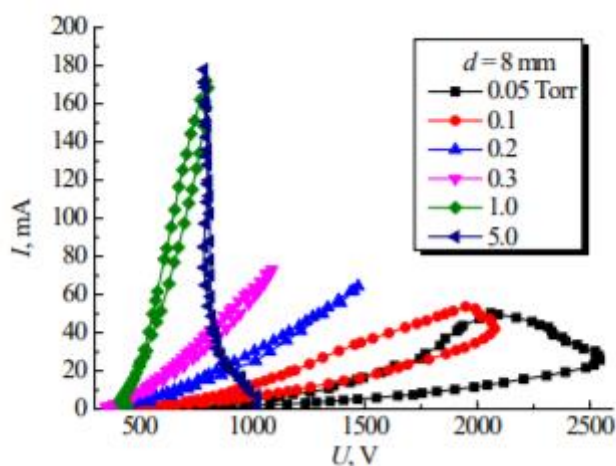


Рисунок 2.6 — Розрядні вольт-амперні характеристики при різних значеннях тиску азоту та діафрагмі діаметром 8 мм

У нагнітальних трубках з діафрагмою під тиском значення 0,05 і 0,1 Тор біля поверхні анода утворюється яскрава анодна пляма, починаючи з певного порогового значення струму, після якого ВАХ набуває негативного нахилу.

У [13] було досліджено хімічні розряди у електричних розрядах у трубках малого діаметра. Кисень пропускали через пастку, охолоджували на бані з ацетоном із сухим льодом і використовували без подальшого очищення. Після проходження через трубку із тліючим розрядом газу відкачувалися через іншу бічну трубку за допомогою механічного насоса.

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ГАЗОВОГО РОЗРЯДУ З СЕРЕДНІМИ ТИСКАМИ

На обох кінцях вимірювався тиск. Розряди підтримувалися за допомогою регульованих змінних джерел живлення. Ланцюжок резисторів, включених послідовно з розрядом, дозволив регулювати опір загальної схеми. Для спектральних вимірювань під газорозрядною трубкою встановлювався монохротатор. Потім спектр реєстрували за допомогою фотонного помножувача. Для спостереження та вимірювання коливань струму та напруги використовувався осцилограф. Під час роботи вимірювали концентрацію атомів та проводили спектральні спостереження. В результаті роботи виявлено що кількість утворених атомів кисню також залежить від характеристик розряду. Електронна температура змінюється при постійному полі поблизу анода.

Ще одним прикладом використання тліючого заряду у вузьких трубках є стерилізація інструментів складної форми або довгих вузьких трубок. Ця технологія може бути застосована у медицині для стерилізації медичних трубок. Ці технології вивчались у [15,16]. Ця техніка має ряд переваг порівняно з відомими методами сухого тепла, паровим автоклавом і газом. Основними перевагами є низький час нагрівання виробів, короткий час стерилізації та екологічна чистота. Дослідження проводили на установці плазмового стерилізатора з об'ємом камери 25 л, який відкачували форвакуумом до залишкового тиску 1 Па. В якості робочих газів використовували повітря, кисень, аргон, азот, вуглекислий газ, водень та їх суміші. Тиск газу встановлювали за допомогою значень подачі в діапазоні 10÷30 Па. Щільність потужності, що вводиться в розряд, змінювалася в межах 0,003-0,03 Вт/куб.см. На Рис. 2.7. наведені залежності кількості вижилих мікроорганізмів N від часу t дії плазми з використанням повітря та кисню як робочого газу.

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ГАЗОВОГО РОЗРЯДУ З СЕРЕДНІМИ ТИСКАМИ

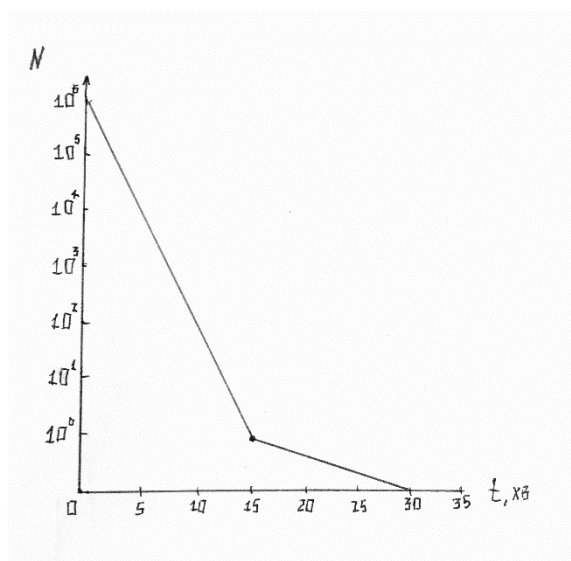


Рисунок 2.7 — Залежність кількості мікроорганізмів, що вижили, N , від часу t дії плазми

В результаті дослідження було виявлено, що найефективнішим газом, що генерує плазму щодо стерилізації, є кисень, потім йдуть повітря, вуглекислий газ, водень, аргон, азот.

Тліючий розряд у трубках малого діаметра може використовуватись також для очищення води. При постійному вдосконаленні хімічних аналітичних методів, продукти перетворення хімічних сполук все частіше виявляються у водоймах і стічних водах. Їх називають мікрозабруднювачами, так як вони зустрічаються в низьких концентраціях в діапазоні від мікрограм до нанограм на літр. До них належать харчові добавки, промислові хімікати, пестициди, фармацевтичні препарати та засоби особистої гігієни. Хоч концентрації і невеликі, ці речовини здійснюють вплив на навколишнє середовище. Технологія очищення води за допомогою тліючого розряду описана в роботі [11]. Вона заснована на прокачуванні води через герметичний циліндр, в якому молекули води в електричному розряді перетворюються в активні частинки. Найбільш реакційно-активними продуктами розряду є атомарний кисень (O) і гідроксильний радикал (OH).

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ГАЗОВОГО РОЗРЯДУ З СЕРЕДНІМИ ТИСКАМИ

Вони представляють собою потужні хімічні окислювачі, які дуже швидко реагують з більшістю з'єднань. Така технологія поєднує ефективність з невисокими витратами. У черзі такі системи будуть використовуватися там, де особливо потребують ефективного використання та екологічно безпечним повторним використанням води. Технологія очищення води із використанням тліючого розряду описана в [17, 18]. У [19, 20] запропоновано метод поверхневого зміцнення металів у вигляді порожнистих циліндрів за допомогою іонного азотування із використанням енергії тліючого розряду. Цю технологію обрано зважуючи на ряд переваг: менша тривалість процесу, чистота і, зокрема, повна нетоксичність, а також легкість, з якою контролюється зростання небажаного шару. На Рис.2.8. зображено модель конструкції, що використовувалась у цьому методі. Стрижень з нержавіючої сталі 6 мм в діаметрі використовували як анод і розташовували вздовж порожнистого циліндру всередині зразка. Робочий тиск підтримувався на рівні 0,4 Тор, при цьому використовувалася потужність 20 кВт, напруга розряду становила 500 В. Усі зразки азотували протягом 10 год. Після того, як подачу потужності тліючого розряду було припинено, зразок залишали охолоджуватися у вакуумі. Після іонного азотування зразки розрізали по колу різальним кругом на відстані 10, 50, 100, 150, і 190 мм від низу. Товщину нанесеного шару визначали за допомогою оптичного мікроскопа, оснащеного мікрометром, шляхом вимірювання відстані від поверхні до точки, де значення твердості було на 10% вище, ніж у підкладки. У результаті було встановлено, що зміни товщини сполуки залежать від ефекту розряду порожнистого катода, концентрації азоту, розподілу електричного поля та ймовірності адсорбції сполуки. Вплив електричного поля на зростання шару є менш значущим.

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ГАЗОВОГО РОЗРЯДУ З
СЕРЕДНІМИ ТИСКАМИ

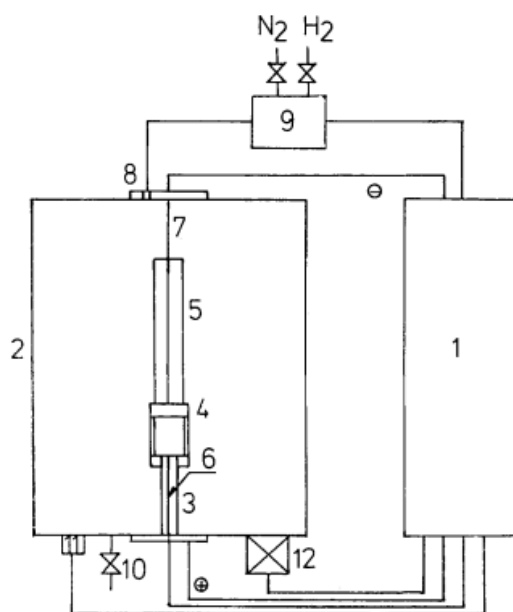


Рисунок 2.8 — Схема конструкції, що використовується для поверхневого зміцнення металів у вигляді порожнистих циліндрів:

- 1) Контрольна частина і блок живлення
- 2) Камера (анод): заземлення
- 3) Катод
- 4) Тримач зразка
- 5) Зразок
- 6) Термопара
- 7) Допоміжний анод
- 8) Вхід газу
- 9) Газоконтрольна частина
- 10) Клапан витоку
- 11) Датчик тиску
- 12) Роторний насос.

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ГАЗОВОГО РОЗРЯДУ З СЕРЕДНІМИ ТИСКАМИ

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

В розділі 2 було проведено дослідження застосування тліючого розряду, а саме з метою азотування металів. У сучасній промисловості важливим є забезпечення оптимального співвідношення між твердістю і пластичністю поверхневих шарів і відсутність водневого окрихчення металів в процесі їх зміцнення. Було виявлено, що особливо ефективно робити азотування в плазмовому розряді. Цей метод має ряд переваг над іншими методами хіміко-термічної обробки металів. Основними перевагами є те, що цей процес може відбуватись при малих температурах, легкість, з якою контролюється зростання небажаного шару, а також те, що шар, збагачений азотом, утворюється рівномірно, що дозволяє обробляти зразки складної форми. Було також досліджено етапи процесу азотування металів. Було розглянуто схему конструкції, що використовується для поверхневого зміцнення металів у вигляді порожнистих циліндрів. У результаті дослідження було виявлено, що тліючий розряд у трубках малого діаметра може бути використаний з метою отримання видимої індикації напруги малого сигналу, використовується в ртутних лампах низького тиску. Ще одним прикладом використання тліючого заряду у вузьких трубках є стерилізація інструментів складної форми або довгих вузьких трубок у медичинській галузі. Окрім того було виявлено той факт, що тліючий розряд може використовуватись для очищення води. Отже, використання тліючого розряду є одним із найефективніших способів хіміко-термічної обробки.

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ НОРМАЛЬНОГО ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ З
РОЗВИНЕНОЮ ПОВЕРХНЕЮ КАТОДУ

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ НОРМАЛЬНОГО ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ З
РОЗВИНЕНОЮ ПОВЕРХНЕЮ КАТОДУ

3.1 Математична модель тліючого розряду

Найпростіша самоузгоджена математична модель тліючого розряду постійного струму включає рівняння збереження окремо для іонів та електронів:

$$\frac{\delta}{\delta t}(n_e) + \nabla[-n_e(\mu_e \cdot E) - D_e \cdot \nabla n_e] = R_e \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_\varepsilon) + \nabla \cdot [-n_\varepsilon(\mu_\varepsilon \cdot E) - D_\varepsilon \cdot \nabla n_\varepsilon] + E \cdot \Gamma_e = R_\varepsilon \quad (3.2)$$

транспортні рівняння, у дрейфово-дифузійному наближенні (нехтуючи інерцією заряджених частинок):

$$\Gamma_e = -(\mu_e \cdot E)n_e - D_e \cdot \nabla n_e \quad (3.3)$$

n_e та n_ε – концентрація та енергетична щільність електронів,
 μ_e та μ_ε – електронна та енергетична рухливість, E – електричне поле,
 D_e та D_ε – дифузія електронів та енергії, Γ_e – потік електронів,
 R_e та R_ε джерело електронів та втрати енергії внаслідок непружних зіткнень
Дифузія електронів, енергетична рухливість та дифузія енергії обчислюються з електронної рухливості, використовуючи:

$$D_e = \mu_e T_e, \mu_\varepsilon = \frac{5}{3} \mu_e, D_\varepsilon = \mu_\varepsilon T_e \quad (3.4)$$

Коефіцієнти джерела визначаються хімією плазми з використанням коефіцієнтів швидкості. При M реакцій зростання або зменшення електронної

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ НОРМАЛЬНОГО ТЛЮЧОГО РОЗРЯДУ З РОЗВИНЕНОЮ ПОВЕРХНЕЮ КАТОДУ

густини та P нееластичних електронно-нейтральних зіткнень ($P \gg M$) і використанні коефіцієнтів Таунсенда, складова джерела електронів

$$R_e = \sum_{j=1}^M x_j a_j N_n | \Gamma_e | \quad (3.5)$$

x_j - мольна частка цільової частинки для реакції j ,

a_j - коефіцієнт Таунсенда для реакції j (m^2),

- потік електронів, як визначено вище ($1/(m^2 \cdot c)$),

N_n - загальна щільність нейтральних частинок ($1/m^3$).

Коефіцієнти Таунсенда можуть підвищити стабільність числової схеми, коли електронний потік керується полем, як це має місце при постійнострумових розрядах. Втрати енергії електронів отримують з суми втрат енергії зіткнення за всіма реакціями

$$R_\varepsilon = \sum_{j=1}^P x_j k_j N_n n_e \Delta \varepsilon_j \quad (3.6)$$

Електростатичне поле обчислюється за рівнянням Пуассона

$$-\nabla \cdot \varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla V = \rho \quad (3.7)$$

Граничні умови:

- На катоді:

$$z = h_1 \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial z} = 0, (J_e)_z = -\gamma (J_i)_z, \varphi = 0 \quad (3.9)$$

- На аноді:

$$z = h_2 \quad (3.10)$$

$$n_i = 0, \frac{\partial n_e}{\partial z} = 0, \varphi = U \quad (3.11)$$

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ НОРМАЛЬНОГО ТЛЮЧОГО РОЗРЯДУ З
РОЗВИНЕНОЮ ПОВЕРХНЕЮ КАТОДУ

- На стінках:

$$r = R \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial r} = \frac{\partial n_e}{\partial r} = 0, (J_e + J_i)_r = 0 \quad (3.13)$$

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ НОРМАЛЬНОГО ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ З РОЗВИНЕНОЮ ПОВЕРХНЕЮ КАТОДУ

3.2 Експериментальне дослідження

Загальна схема вакуумної експериментальної установки, що використовується під час створення тліючого розряду, зображена на

Рис. 3.1.

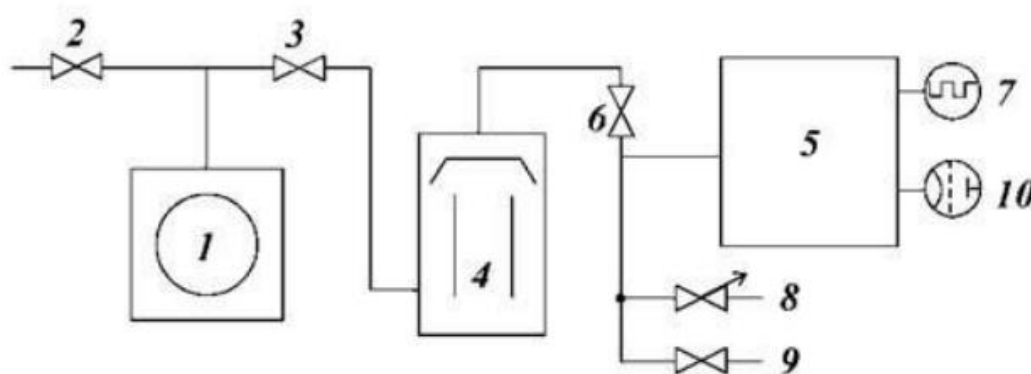


Рисунок 3.1 — Вакуумна експериментальна установка з відкачуванням на високий вакуум.

1 – форвакуумний насос, 2 – нормальновідкритий електромагнітний клапан, 3 – нормальнозакритий електромагнітний клапан, 4 – дифузійний насос, 5 – експериментальна вакуумна технологічна камера для плазмохімічного азотування, 6 – вентиль, 7 – термопарний вакуумметр, 8 – прецизійний натікач напуску азоту, 9 – натікач, 10 – іонізаційний вакуумметр.

Особливим вузлом вакуумної системи є вакуумна камера. Її реалізація повинна включати систему прецензійної прокачки газів через трубки малого діаметру (ствола) зі збереженням рівномірності тиску та всій довжині. А також потрібна можливість реалізацій охолодження електродної системи тліючого розряду. Зазвичай камера також облаштована оглядовим вікном.

Для наповнення, при необхідності, вакуумної системи визначеною кількістю того, чи іншого технологічного газу, для створення дозованого потоку

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ НОРМАЛЬНОГО ТЛЮЧОГО РОЗРЯДУ З РОЗВИНЕНОЮ ПОВЕРХНЕЮ КАТОДУ

газу и підтримуючого робочого режиму, використовують натікач 8, до яких приєднується балон з необхідним газом. Для відкачування повітря з камери використовується форвакуумний насос 1. Форвакуумні насоси дозволяють досягати розрідження до 10^{-3} мм рт. ст. (середній вакуум). Насос призначений для відкачування повітря, хімічно неагресивних газів, парів і парогазових сумішей, попередньо очищених від крапельної вологи та механічних забруднень, в вакуумних установках. Дифузійний (паромасляний) насос призначений для створення та підтримки високого вакууму в робочому обсязі установки.

Реальним прикладом такої вакуумної системи є вакуумна установка УВН-2М-1 (Рис. 2.2) ковпакового типу, оснащеної форвакуумним насосом НВР-5Д ГОСТ 14707-69 та дифузійним насосом типу НВД-400.

Тиск у вакуумній камері може вимірюватись за допомогою штатних вакуумметрів типу ВИТ-2 з манометричним перетворювачем ПМТ-2 від атмосферного тиску до вакууму 1 Па, ПМИ-2 ПММ-32-1, для високого вакууму в діапазоні тисків від $\times 10^{-5}$ до 1 Па. Величина досягнутого вакууму може бути контрольована за допомогою вакуумметра 13ВТ3-003 з манометричним перетворювачем ПМТ-6-3 в діапазоні тисків від 1×10^{-1} до 1×10^5 Па.

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ НОРМАЛЬНОГО ТЛЮЧОГО РОЗРЯДУ 3 РОЗВИНЕНОЮ ПОВЕРХНЕЮ КАТОДУ

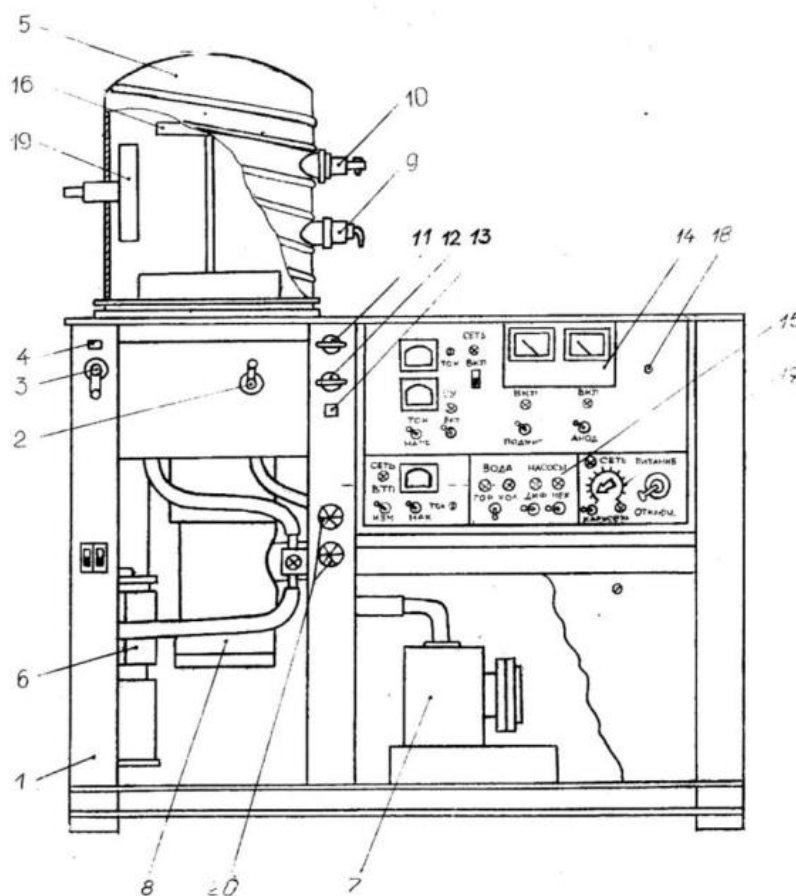


Рисунок 3.2 — Вакуумна установка УВН-2М-1

Серед технічних даних цієї установки можна перелічити такі:

1. Гранично допустиме розрідження в робочій камері з використанням азотної пастки - 10^{-6} мм.рт.ст.
2. Швидкість відкачки робочого об'єму при тиску 2×10^5 - 1×10^{-5} мм.рт.ст. - 700 л/сек.
3. Живлення установки здійснюється 3-х фазним струмом від 4-х провідної лінії (з нульовим проводом) частотою 50 Гц, напругою 380 В.
4. Електрична потужність, споживана установкою при сталому режимі, не більше 7,2 кВт.
5. Мінімальна витрата холодної води - 400 л/година.

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ НОРМАЛЬНОГО ТЛЮЧОГО РОЗРЯДУ 3 РОЗВИНЕНОЮ ПОВЕРХНЕЮ КАТОДУ

6. Габаритні розміри:

а. довжина x ширина x висота, мм - 1550x1050x1950;

б. підйом ковпака - 650 мм.

7. Вага установки - 700 кг.

Установка (Рис. 3.2) складається з металевому корпусу 1, що має знімні бічні, передні й задні щити. На передній панелі розташована рукоятка керування вакуумним затвором 2 і органи управління гідروприводу 3 і 4 і підйому ковпака 5. Вакуумний ковпак 5 виконаний з нержавіючої сталі, має два оглядових вікна 150 мм у діаметрі. Підйом і опускання ковпака здійснюється гідроприводом 6.

Вакуумна система складається з обертального насоса ВН-6-2Н (7), паромасляного високовакуумного насоса Н-2Т (8), клапанної коробки для перемикання механічного насоса, високовакуумного насоса, системи натікачів 9, 10 для напуску повітря й інших газів у ковпак, трубопроводи. Рукоятки клапанної коробки 11, 12 виведені на середню стійку каркаса. При витягуванні верхньої рукоятки 11 механічний насос відкачує робочий об'єм ковпака, при витягуванні нижньої рукоятки 12 відкачується порожнина паромасляного насоса.

Вентиль-натікач (голчастий 9), укріплений на ковпаку, дозволяє підтримувати заданий ступінь вакууму в діапазоні 10⁻¹- 10⁻⁵ мм.рт.ст. Натікач (грубий) 10 призначений для напуску атмосфери під ковпак. Електромагнітний вентиль-натікач відкриває напуск атмосфери в трубопровід обертального вакуумного насоса й може використатися для напуску повітря у високовакуумний насос при висунутій рукоятці 12. Вимір вакууму в підковпаковій частині здійснюється за допомогою приладу ВІТ-2 (14). На лівій стійці закріплені органи керування вакуумною установкою 15. У підковпаковій частині також перебуває підложкотримач і карусель 16, органи керування якої

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ НОРМАЛЬНОГО ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ З РОЗВИНЕНОЮ ПОВЕРХНЕЮ КАТОДУ

перебувають унизу стійки керування 17. У середині стійки керування розташований блок живлення 18. В якості електродної системи, для контролю та дослідження поведінки горіння тліючого розряду можна використовувати сітку з дрібними комірками (Рис. 8), що виконує в даному випадку роль катода. В якості центрального електроду, аноду, може виступати сталевий стержень діаметром 3 мм, на якому з обох боків нарізана метрична різьба. Анод через мідну втулку з внутрішньою різьбою під'єднується до ізольованого від вакуумної камери вводу.

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ НОРМАЛЬНОГО ТЛЮЧОГО РОЗРЯДУ З РОЗВИНЕНОЮ ПОВЕРХНЕЮ КАТОДУ

3.3 Дослідження закону Гея для розвинених поверхонь катоду

Для розрахунку використовувалась кінцево-різницева сітка із максимальним кроком 4 мм, мінімальним кроком 1 мм. На Рис. 3.3 зображено приклад кінцево-різницевої сітки, що використовується для розрахунку. Через те, що в області біля катоду існує прикатодне падіння потенціалу (різка зміна потенціалу під час горіння розряду), цю область необхідно дослідити детальніше. Тому, на краях області розрахунку, та на катоді, для уникнення дрейфової дифузії застосовували кількшарове ущільнення, до 4 вузлів на 1 мм (Рис. 3.3). Для інших областей ущільнення сітки не було обов'язковим, так як різких перепадів потенціалу в тих областях немає. Біля стінки області розрахунку створено умовно 10 шарів. (Рис. 3.4).

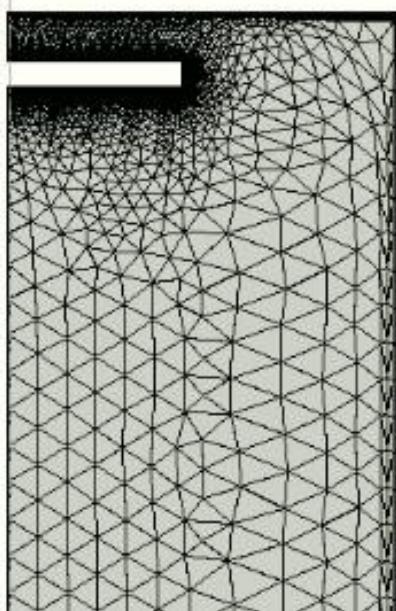


Рисунок 3.3 - Кінцево-різницева сітка

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ НОРМАЛЬНОГО ТЛЮЧОГО РОЗРЯДУ З РОЗВИНЕНОЮ ПОВЕРХНЕЮ КАТОДУ

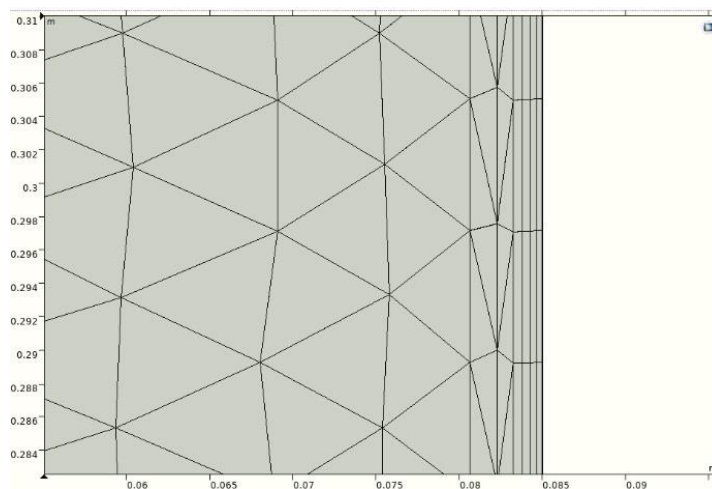


Рисунок 3.4 - Кількашарове ущільнення кінцево-різницевої сітки

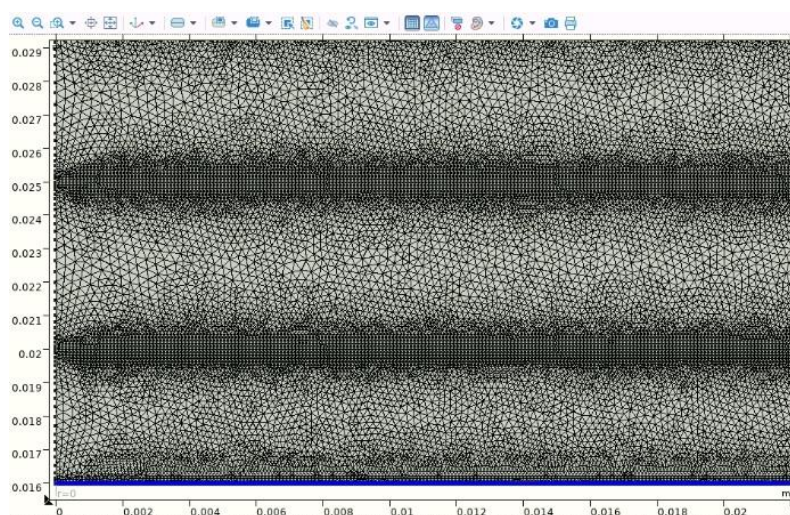


Рисунок 3.5 - Горизонтальні області з ущільненням сітки

Під час експерименту з катода вириваються електрони, розганяються та починають горіти (іонізувати газ, в данному випадку - аргон) лише на певній відстані. Ця відстань становить ~ 5 мм від поверхні катода. Відповідно у цих місцях ущільнюємо сітку, максимальний крок якої складає не більше 1 мкм (Рис. 3.5).

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ НОРМАЛЬНОГО ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ З РОЗВИНЕНОЮ ПОВЕРХНЕЮ КАТОДУ

В результаті досліджень було знайдено розподіл густини струму на катоді без виступів (Рис. 3.6). Вимірювання робились при 100-3000 В, тиску 2 Тор. По вісі абсцис можемо бачити радіус катода, по вісі ординат ж розмістили щільність струму. Видно, що при напрузі 500В нормальний тліючий розряд переходить у аномальний. При 1500 В вся площа засвічена, але має місце невеликий вигін внаслідок впливу крайових ефектів. Бічна стінка також плоска, з неї також відбувається емісія у напрямі аноду і скупчується в один вузький потік.

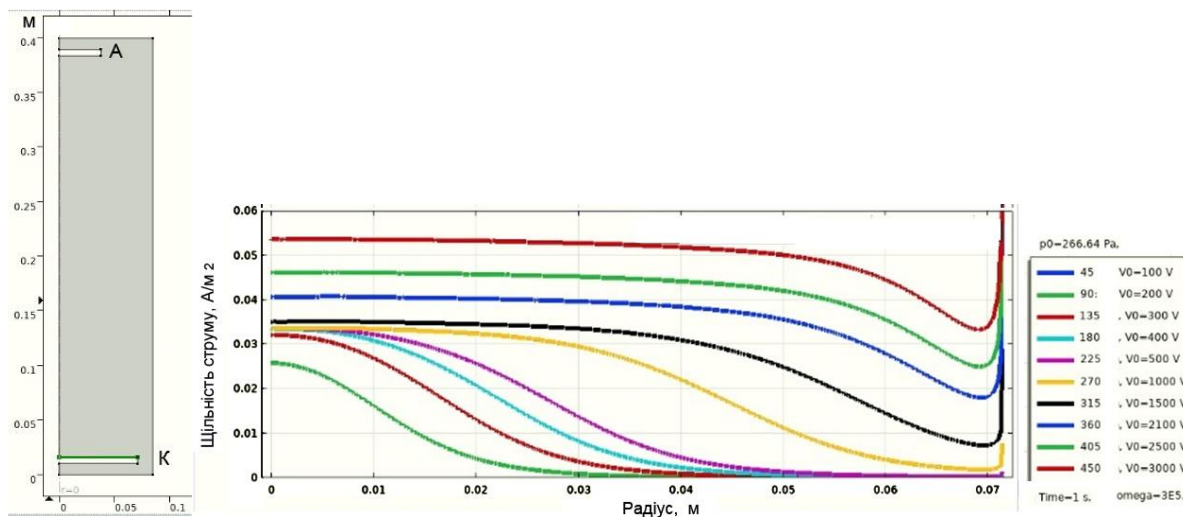


Рисунок 3.6 - Розподіл густини струму на катоді

На Рис. 3.7 зображено розподіл потенціалу на осі. При недостатній напрузі для розряду падіння потенціалу приблизно рівномірне. При достатній напрузі для протікання розряду падіння напруги різко зміщується до катода. Біля катода відбувається іонізація атомів і відповідно, підвищується потенціал і крива поступово вирівнюється, як при 200 В, так і при 3000 В. Завдяки балансному опору і конденсатору для згладження імпульсів різкої різки

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ НОРМАЛЬНОГО ТЛЮЧОГО РОЗРЯДУ З РОЗВИНЕНОЮ ПОВЕРХНЕЮ КАТОДУ

праворуч – немає. Так як падіння напруги під час розряду зазвичай стабільне і змінюється досить слабо, прилади, побудовані на основі цього, використовують в якості стабілізаторів напруги.

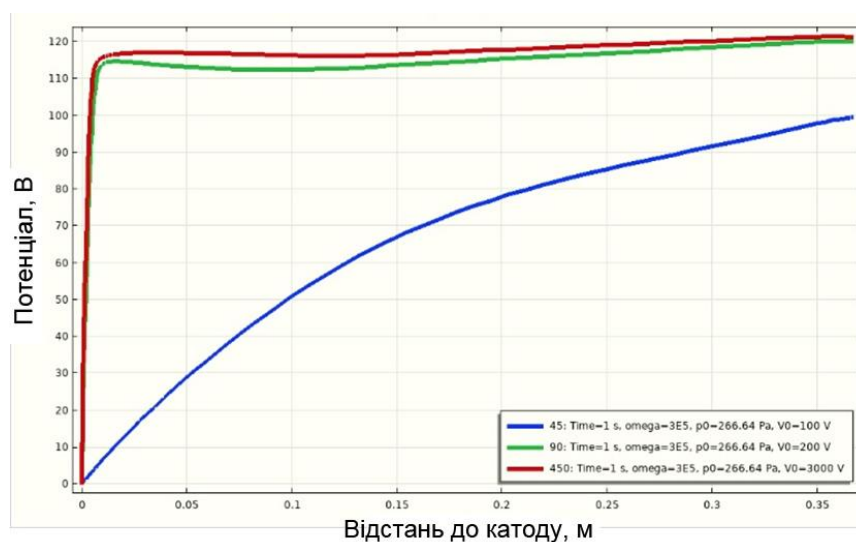


Рисунок 3.7 - Розподіл потенціалу на осі

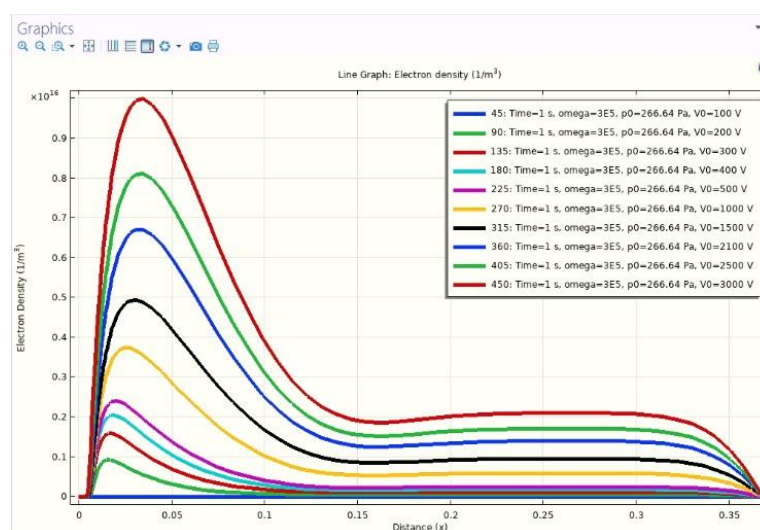


Рисунок 3.8 - Розподіл густини електронів на осі

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ НОРМАЛЬНОГО ТЛЮЧОГО РОЗРЯДУ З РОЗВИНЕНОЮ ПОВЕРХНЕЮ КАТОДУ

На Рис. 3.8 зображено розподіл густини електронів на осі при різних напругах (від 100 В до 3000 В). З рисунку видно, що найбільше електронів утворюється у прикатодній області, так як вони після тозгоду іонізуються в тій області. Далі іонізація продовжується, але з меншою інтенсивністю.

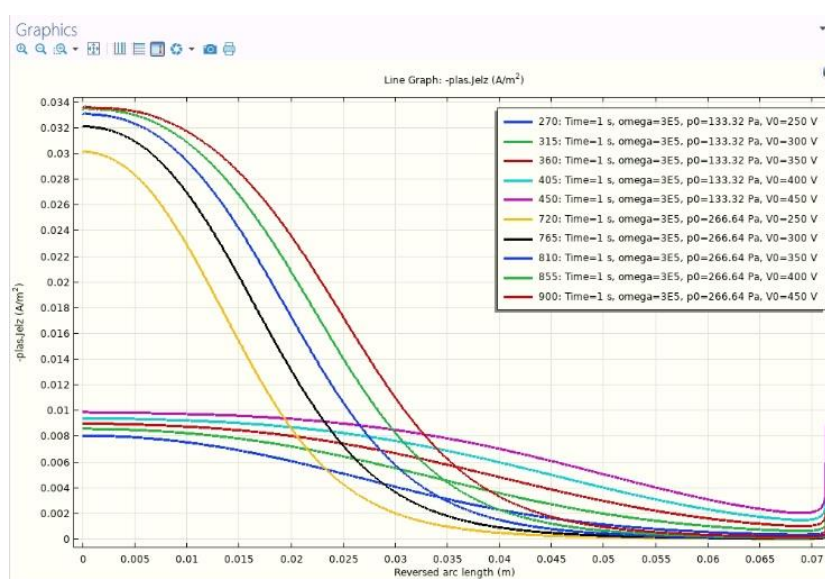


Рисунок 3.9 - Розподіл густини струму на однорідному катоді

Також дослідили показано розподіл густини струму на однорідному катоді при різних тисках (1 Тор і 2 Тор) та різних напругах (250 - 400В) для порівняння (Рис. 3.9). Видно, що при тиску 1 Тор наростання густини струму більш різке. На реальному макеті побачити такі зміни можливо, але вони менш помітні.

На Рис. 3.10 показано результати дослідження розподілу густини струму на неоднорідному катоді з виступом діаметром 1мм при різних напругах (100 – 2500 В). Видно явне зменшення щільності струму у місці впадини та збільшення у місці виступу.

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ НОРМАЛЬНОГО ТЛЮЧОГО РОЗРЯДУ З РОЗВИНЕНОЮ ПОВЕРХНЕЮ КАТОДУ

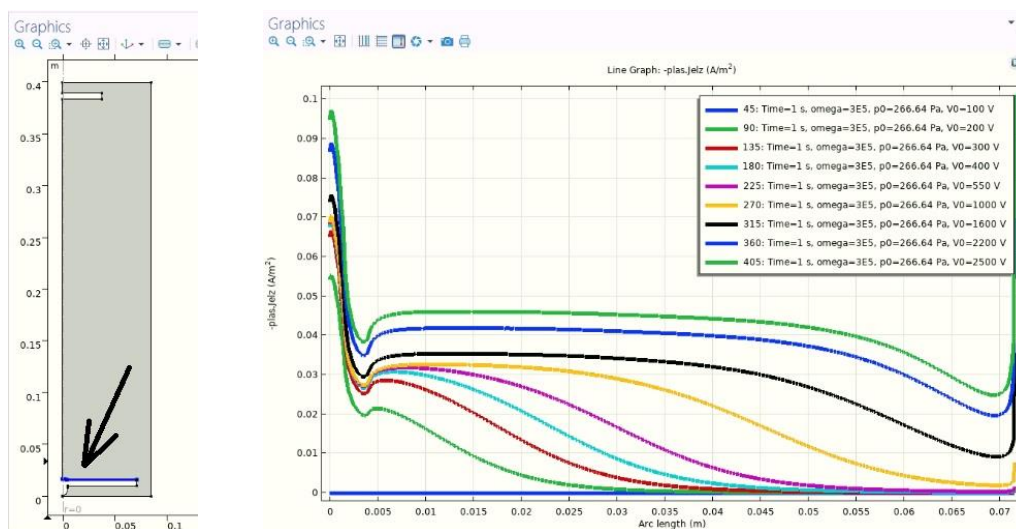


Рисунок 3.10 - Розподіл густини струму на катоді з виступом 1 мм

На Рис. 3.11 показано результати дослідження густини струму на катоді з виступом 2 мм. Видно, що у порівнянні із дослідом із виступом на катоді 2 мм зменшення густини струму більше.

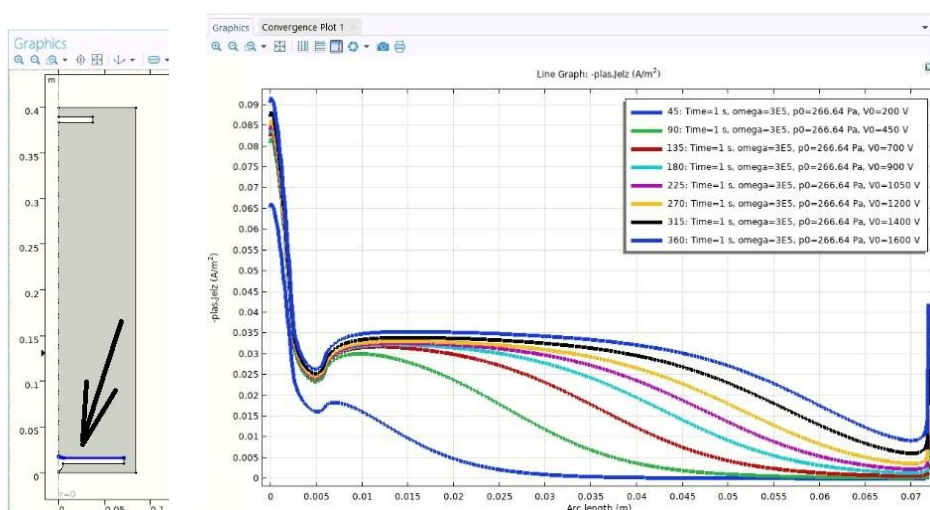


Рисунок 3.11 - Розподіл густини струму на катоді з виступом 2 мм

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ НОРМАЛЬНОГО ТЛЮЧОГО РОЗРЯДУ З РОЗВИНЕНОЮ ПОВЕРХНЕЮ КАТОДУ

3.4 Техніка безпеки під час роботи

Техніка безпеки роботи за компютером:

Працюючи за комп'ютером, рекомендуємо дотримуватися правил тривалості роботи, правильної постави, розміру шрифтів та зображень, вимог до приміщення тощо. Пропонуємо деякі принципи правильної роботи за комп'ютером:

- Не можна торкатися з'єднувальних дротів.
- Не можна дозволяти молодшим навіть підходити до комп'ютера.
- Робоче місце за комп'ютером потрібно тримати у порядку.
- Не кладіть зайвих речей на стіл біля комп'ютера і на монітор.
- Не можна залишати на самоті з комп'ютером домашніх тварин.
- У робочому приміщенні (кімнаті), де встановлений комп'ютер, щодня потрібно виконувати вологе прибирання.
- приміщення, у якому знаходиться комп'ютер(и), потрібно провітрювати щогодини.
- Після кожної години роботи рекомендується робити десяти хвилинну перерву, яку зручно суміщати з провітрюванням. За будь-яких умов безперервна робота за комп'ютером для дорослої людини не повинна перевищувати двох годин. Під час перерви не варто читати або дивитися телевізор. Перерва, яку Ви проводите також за комп'ютером просто не має сенсу.

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ НОРМАЛЬНОГО ТЛЮЧОГО РОЗРЯДУ З РОЗВИНЕНОЮ ПОВЕРХНЕЮ КАТОДУ

- Необхідно постійно слідкувати за станом екрану монітора: він має бути чистим, без плям та пилу. Крім того, обов'язково слідкуйте за чистотою окулярів – комп'ютерних чи звичайних.
- Слідкуйте за поставою: ноги твердо стоять на підлозі чи на спеціальній підставці; стегна розташовані під прямим кутом до тулуба, а гомілки – під прямим кутом до стегон; сидіти потрібно прямо або злегка нахилившись вперед; пальці рук знаходяться на рівні зап'ястків або трохи нижче – у такому положенні вони найбільш рухливі; плечі мають бути розслаблені та вільно опущені, що сприяє розслабленню рук; відстань від очей до екрану монітора – не менше 55-60 см; центр екрану має знаходитися на рівні очей чи трохи нижче; рекомендується хоча б раз на день виконувати гімнастику для очей.
- Щоб попередити „синдром сухого ока”, моргайте кожні 3-5 секунд;
- У процесі роботи за комп'ютером обов'язково звертайте увагу на дихання: воно має бути рівномірним, без затримок.
- При роботі з текстом рекомендується, щоб колір шрифту був темним, а колір фону – світлим (ідеальний варіант – чорний шрифт на білому фоні).
- Якщо шрифт занадто мілкий, то потрібно збільшити масштаб відображення на екрані.
- Якщо є можливість, необхідно змінювати вид діяльності, якою займаєтеся протягом дня.
- Якщо з'явилося відчуття втоми, напруження, сонливості, тяжкості в очах, потрібно припинити роботу та хоча б трохи відпочити.

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ НОРМАЛЬНОГО ТЛЮЧОГО РОЗРЯДУ З РОЗВИНЕНОЮ ПОВЕРХНЕЮ КАТОДУ

- Правильно організуйте освітлення робочого місця. При слабкому світлі очі напружуються і болять. Стримайте яскравість екрану. Літери і цифри на екрані це маленькі світлові промені, які йдуть прямо в очі. Потрібно відрегулювати їх контрастність, щоб світло не був дуже яскравим.

Техніка безпеки роботи з установкою:

На робочих місцях необхідно забезпечити мінімальний рівень вмісту шкідливих речовин в повітрі, низький рівень шуму при процесі формування покриття. При роботі операторів і підручних існує загроза ураження електричним струмом, одержання опіків від частин, що підлягають нагріванню, та інше. Заходи електробезпеки на ділянках і окремих робочих місцях при роботі повинні відповідати загальноприйнятим вимогам для хіміко-термічної обробки та споріднених процесів, в нашому випадку – іонному азотуванні у тліючому розряді.

Розмірні характеристики робочого місця при механізованих і автоматизованих роботах, а також розміщення органів керування і засобів відображення інформації мають відповідати вимогам ДСТУ 2456 – 94 [11]. Розташування обладнання проводимо таким чином, щоб ширина проходів складала: між стіною будинку та обладнанням – не менш 0,5 м; між стаціонарними джерелами живлення – не менш 0,8 м; між обладнанням та місцями складування – не менш 1,0 м.

Вимоги до вентиляції. Згідно з ДСТУ 2456-94 місцева вентиляція повинна використовуватись при плазмовому напиленні. Вона також повинна застосовуватись в комбінації з місцевою вентиляцією, розрахованою на видалення з виробничого приміщення шкідливих речовин не локалізованих місцевими витяжними пристроями (відсмоктувачами). 89 Швидкість руху

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ НОРМАЛЬНОГО ТЛЮЧОГО РОЗРЯДУ З РОЗВИНЕНОЮ ПОВЕРХНЕЮ КАТОДУ

повітря, що створюється місцевими відсмоктувачами біля джерел виділення шкідливих речовин, повинна бути не менше 1,3 м/с.

Безпека при роботі електроустановок забезпечується такими заходами:

використання ізоляції; відведенням струмоведучих частин у недосяжне місце; блокуваннями; ізоляцією електричних мереж від землі; використанням ізолюючих майданчиків.

При експлуатації обладнання необхідно дотримуватись правил протипожежної безпеки: необхідно суворо слідкувати за станом дротів і кабелів, не допускати їх механічного пошкодження. Корпуси агрегатів установки повинні бути надійно заземлені. Справність заземлення необхідно періодично перевіряти. Обов'язково повністю вимикати установку при:

- несправностях, які з'явилися;
- очистці, змазуванні, профілактичних роботах;
- частковій перерві роботи.

У випадку загорання установки необхідно відключити рубильник і приступити до гасіння пожежі за допомогою вогнегасника.

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ НОРМАЛЬНОГО ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ З РОЗВИНЕНОЮ ПОВЕРХНЕЮ КАТОДУ

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

Отже, у Розділі 3 було розглянуто фізико-математична модель тліючого розряду з розвиненою поверхнею катоду та проведено експериментальне дослідження. Для проведення експерименту використовувалась вакуумна установка УВМ-2М-1. За допомогою цієї установки дослідили тліючий розряд на неоднорідних поверхнях катоду. На основі експериментальних даних розраховано та досліджено фізико-математичну модель процесу горіння тліючого заряду на однорідному катоді, на катоді із виступом 1 мм та на катоді із виступом 2 мм. Також було розраховано розподіл густини електронів на осі та розподіл потенціалу на осі. Було знайдено, що густина електронів на осі більша біля катоду через прикатодне падіння потенціалу. Під час роботи дотримувались техніки безпеки, описаної у розділі.

ВИСНОВКИ

Отже, в результаті роботи було досліджено фізичну суть та механізм утворення тліючого розряду, було проаналізовано типові установки, що використовуються для створення розряду, що тліє; було проаналізовано процес тліючого розряду із метою азотування металів, роль та приклади використання даного процесу у сучасній промисловості. Окремо було проаналізовано процес створення розряду, що тліє у трубках малого діаметра та проведено дослідження застосування іонного азотування всередині трубок малого діаметра.

Проведено еспериментальне дослідження тліючого розряду в залежності від поданої напруги та тиску. На основі експериментальних даних було побудовано фізико-математичну модель процесу тліючого розряду із катодами неоднорідних поверхонь та розглянуто залежності протікання тліючого розряду від параметрів системи. Дані дослідження можуть використовуватись у промисловій та виробничій сфері у технології азотування металів.

Перелік джерел посилання та документації

1. Браун С. Элементарные процессы в плазме газового разряда. Атомиздат: М. 1961; с. 380-382
2. Гасій О. Б. Розвиток технології вакуумного йонно-плазмового напилення та напрямки її вдосконалення. Науковий вісник НЛТУ України. Львів, 2018; с. 85-91
3. Zhovtyansky V.A., Nazarenko V.G., Khomych V.O., Ryabtsev A.V., Anisimova O.V., Nevzglyad I.O., Shnyt O.Ya. Efficiency of the nitriding process in glow discharge plasma. Вопросы атомной науки и техники. 2011; с. 92-94
4. Zhovtyansky V.A., Anisimova O.V., Khomych V.O. Energy characteristics of spherical glow discharge. This volume. 2011; с. 95-97
5. Болотов Г., Прибитько І., Ганєєв Т., Корзаченко М., Ющенко С. Застосування тліючого розряду в технологіях виготовлення фібробетону. Технічні науки та технології. 2021; с. 206-2017
6. Akulova M.V., Melnikov B.N., Fedosov S.V., Sharnina L.V. Glow discharge applications in the textile and construction industries. Ivanovskiyy gos. khim.-tekhn. un-t. 2008; с. 103-110
7. Wrobel, A., Kryszewski M., Rakowski W. Effect of plasma treatment on structure and properties of polymer fabric. Polymer. 1978; с. 908-912
8. Bolotov M. G., Ganieiev T. R. Heating efficiency during welding in a glow discharge with a hollow cathode. Visnyk ChDTU – Bulletin of ChSTU. 2012; с. 126–131
9. Болотов М., Нагорна І., Прибитько І. Тліючий розряд як джерело поверхневого нагріву в процесах зеднання різнорідних матеріалі. Технічні науки та технології. 2020; с. 22-36

10. T.V. Koval, R.A. Manakov, Nguyen Bao Hung, Tran My Kim An. Numerical simulation of discharge plasma generation and nitriding the metals and alloys. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016; с. 4-12
11. Vanraes P., Nikiforov A. Y., Leys C. Electrical Discharge in Water Treatment Technology for Micropollutant Decomposition. Plasma Science and Technology. 2016; с. 430 – 442
12. Kopeika N. S., Even-Zur D., Fishbein I. Low-cost glow discharge tube microwave frequency sensor. Proceedings of the IEEE. 1976; с. 382 – 384
13. Lisovskiy V.A., Ogloblina P.A., Yegorenkov V.D. Burning modes of dc low pressure discharge with a transverse constriction. Вопросы атомной науки и техники. 2015; с. 206-210
14. Ruxdle PI. W., Gillespie K. A., Yealland R. M., Sova R., Decker J. HI. Chemical reactions in electrical discharges. The positive column in d-c. Gglow discharges through oxygen. Canadian Journal of Chemistry. 1966; с. 345-352
15. Khomich V.A., Soloshenko I.A., Tsiolko V.V., Mikhno I.L. Investigation of principal factors of the sterilization by plasma dc glow discharge. Fusion and Plasma Physics. 1998; с. 2745-2748
16. Akitsua T., Ohkawaa H., Tsujib M., Kimurab H., Kogomac M. Plasma sterilization using glow discharge at atmospheric pressure. Surface and Coatings Technology. 2015; с. 25-40
17. Xiaoyan W., Minghua Z., Xinglong J. Application of glow discharge plasma for wastewater treatment. Engineering. 2012; с. 501-512
18. Zhong H., Wang X., Gao J., Deng H., Jing-guo H., Lu Xiao-quan, Jing-wan K. A Study on Water Treatment Induced by Plasma with Contact Glow Discharge Electrolysis. Plasma Science and Technology. 2016; с. 110-115

19. Ivannikov A. A., Lelevkin V. M., Tokarev A. V., Yudanov V. A. Atmospheric-Pressure Glow Discharge Treatment of Water. *High Energy Chemistry*. 2003; с. 115-118
20. Kwon S.C., Park M.J., Baek W. S., Lee G.H. Geometric Effect of Ion Nitriding on the Nitride Growth Behavior in Hollow Tube. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 1992; с. 353 - 358
21. Lozovan A. A., Frangulov S. V., Chulkov D. V., Rodin A. I. Methods for cleaning the inner surface of small-diameter pipes with glow discharge plasma prior to depositing coatings. *Welding International*. 2010; с. 646-649
22. Howatson A. M. *An Introduction to gas discharges* second edition. Oxford and University Lecturer in Engineering Science. 1965; с. 25-55
23. Francis G. *The Glow Discharge at Low Pressure*. 1956; с. 53-62
24. Yerokhin A. L. *Plasma electrolysis for surface engineering*. *Surface and Coatings Technology*. 1999; с. 73-93
25. Kortshagen U., Tsendin Lev D. *Electron Kinetics and Applications of Glow Discharges*. *NATO Science Series B*. 1998; с. 1-18
26. Болотов М., Нагорна І., Прибителько І. Тліючий розряд як джерело поверхневого нагріву в процесах з'єднання різнорідних матеріалів. *Technical science and technologies*. 2020; с. 22-34
27. Zhong Xu, Frank F. Xiong. *Plasma Surface Metallurgy With Double Glow Discharge Technology*. 2017; с. 13-21
28. Райзер Ю.П. *Физика газового разряда*. Интеллект, Москва. 2009; с. 13-55
29. Капцов Н.А. *Электрические явления в газах и вакууме*. Радиотехника. 1947; с. 447– 448

30. Bacci T., Borgioli F., Galvanetto E., Pradelli G. Glow-discharge nitriding of sintered stainless steels. *Surface and Coatings Technology*. 2001; c. 251-256
31. Semenov M. Yu., Jian Ding Kai, Smirnov A. E., Shevchenko S. Yu., Aleksandrov V. A. Use of Glow Discharge Nitriding for Raising the Surface Hardness of Bearing Parts from Precision Nickel Alloys. *Metal Science and Heat Treatment*. 2019; c. 173–177
32. Pastukh, I. Energy model of glow discharge nitriding. 2016; c. 76-83
33. Brunet H., Rocca-Serra J. Model for a glow discharge in flowing nitrogen. *Journal of Applied Physics* 57, 1574. 1985; c. 35-37
34. Vetter J., Burgmer W., J. Perry A. Arc-enhanced glow discharge in vacuum arc machines. *Surface and Coatings Technology*. 1993; c. 152-155
35. Almeida P. G. C., Benilov M.S. Multiple solutions in the theory of DC glow discharges. Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference 2008 Hannover. 2008; c. 25-42
36. Benilov M. S., Cunha M. D. Heating of refractory cathodes by high-pressure arc . *Plasmas: II, J. Phys. D: Appl. Phys*, 36. 2003; c. 603–614
37. Schoenbach K. H., Moselhy M., Shi W. Self-organization in cathode boundary layer microdischarges. *Plasma Sources Sci. Technol*. 2004; c. 177-185
38. Boeuf J. P., Pitchford L. C., Schoenbach K. H. Predicted properties of microhollow cathode discharges in xenon. *Appl. Phys. Lett*, 86. 2005; c. 86
39. Benilov M. S. Bifurcations of current transfer through a collisional sheath with ionization and self-organization on glow cathodes. *Phys. Rev. E*. 2008; c. 1-18

40. Kudryavtsev A.A., Morin A.V., Tsendin L.D. The role of nonlocal ionization in short glow discharges. *Tech. Phys.* 2008; c. 1029-1040
41. Khomych V.O., Ryabtsev A.V., Didyk E.G. Numerical simulation of atomic nitrogen formation in plasma of glow discharge in nitrogen-argon mixture. *Tech. Phys. Let.* 2010; c. 918-922
42. Tsytovich V.N., Morfill G.E., Vladimirov S.V., Thomas H.M. *Elementary Physics of Complex Plasma*. Berlin–Heidelberg: Springer. 2008; c. 370
43. Poggie J. Numerical exploration of flow control with glow discharges. *AIAA*. 2004; c. 26-58
44. Vasiliev M.M., Antipov S.N., Petrov O.F. Large scale vortices in dc glow discharge dusty plasmas. *J. Phys. A*. 2006; c. 17
45. Lisovskiy V.A., Artushenko E.P., Yegorenkov V.D. Simple model of reduced electric field in ambipolar regime of dc discharge positive column in hydrogen. *Journal of Plasma Physics*, Volume 81 Issue 03. 2015;
46. Lisovskiy V.A, Osmayev R.O., Yegorenkov V.D. Flat electrode diameter effect on glow discharge structure and properties. *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics*. 2019; c. 160 – 163
47. Shyy W., Jayaraman B., Andersson A. Modeling of glow discharge-induced fluid dynamics. *Journal of Applied Physics*. 2002; c. 92
48. Korolev Y. D., Frants O. B., Landl N. V., Shemyakin I. A., Geyman V. G. High-current stages in a low-pressure glow discharge with hollow cathode. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2013; c. 41
49. Budilov V. V., Agzamov R. D. Ramazanov K. N. Ion nitriding in glow discharge with hollow cathode effect. *Metal Science and Heat Treatment*. 2007; c. 358-361

50. Budilov V. V., Agzamov R. D., Ramazanov K. N. A method for nitriding parts in glow discharge with hollow cathode effect. Byull. Izbr. Polez. Modeli. 2006; c. 58-60
51. Krukovich M. G. Simulation of nitriding process. Metalloved. 2004; c. 24-31