

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА**

ГРЕЧКО ЯРОСЛАВ ОЛЕГОВИЧ

УДК 537.525

**ДИНАМІКА САМОСТІЙНОГО ПЛАЗМОВО-ПУЧКОВОГО РОЗРЯДУ
ПРИ ВИСОКІЙ ГУСТИНІ ЕНЕРГІЇ**

01.04.08 – фізика плазми

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор, академік НАН України, заслужений діяч науки і техніки України
Азаренков Микола Олексійович,
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, проректор з науково-педагогічної роботи.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, старший дослідник
Соляков Дмитро Геннадійович,
Інститут фізики плазми Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, провідний науковий співробітник;

кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Ціолко В'ячеслав Володимирович,
Інститут фізики НАН України,
старший науковий співробітник відділу газової електроніки.

Захист дисертації відбудеться «6» листопада 2020 р. о 15-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.12 Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: 61108, м. Харків, просп. Академіка Курчатова, 31, ауд. 313.

З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: 61022, м. Харків, майдан Свободи 4.

Автореферат розісланий «1» жовтня 2020 року.

Учений секретар
спеціалізованої вченої
ради Д 64.051.12



Андрій ГАХ

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сьогоднішній день у науці, техніці та виробництві існує значний попит на потужні джерела випромінювання, починаючи з радіочастотного та закінчуючи рентгенівським діапазонами. Дуже потрібними є джерела екстремального ультрафіолетового (ЕУФ) випромінювання з максимумом інтенсивності на довжині хвилі 13,5 нм. Це випромінювання використовують для потреб мікро- та наноелектроніки, мікроскопії, медицини, астрофізики, тощо.

Велика потужність та ефективність, що є необхідними вимогами до джерел випромінювання, спонукають розробку таких пристроїв на основі сильноточових імпульсних розрядів з великою густиною струму, в яких є ефект стрімкого імпульсного саморозігрівання плазми до температур у мільйони градусів. Така високотемпературна плазма є джерелом потужного випромінювання в широкому діапазоні частот: від радіочастотного до м'якого рентгенівського.

У роботах українських авторів було показано, що в момент саморозігрівання плазми розряд переходить до нової форми існування – самостійного плазмово-пучкового розряду (СППР). Цей новий тип розряду посідає окреме місце серед інших типів газового розряду, оскільки дає можливість відносно просто отримувати великі рівні імпульсної потужності від 0,01 ГВт до 1,0 ГВт при початковому запасі енергії 0,01–1,0 кДж. Особливістю СППР є утворення в розрядній плазмі подвійного електричного шару об'ємного заряду, на якому зосереджується майже вся активна напруга розряду, і в якому відбувається зустрічне прискорення інтенсивних електронного та іонного пучків. Ці пучки при колективній взаємодії з плазмою передають їй енергію і за мільйонні частки секунди розігрівають її до температур, достатніх для виникнення відповідного випромінювання. Такий механізм передачі енергії плазмі є найбільш ефективним за умов низького тиску.

Проведені попередні теоретичні та експериментальні дослідження в цьому напрямку стосувались розрядів з густиною плазми не вище 10^{14} частинок у кубічному сантиметрі, коли працюють добре узгоджені теоретичні засоби опису плазми. Але в плазмі багаторазово іонізованих атомів з густиною $10^{16} - 10^{18}$ частинок у кубічному сантиметрі, яка сьогодні є найбільш привабливою для використання у надпотужних джерелах випромінювання, застосування класичних теоретичних засобів ускладнюється. Це обумовлено тим, що такі методи передбачають наявність у дебаївській сфері великої кількості частинок. У разі ж густої плазми багаторазово іонізованих атомів у цій сфері може знаходитись небагато частинок, що робить неможливим коректний опис плазмової системи гідродинамічними та кінетичними рівняннями.

Зважаючи на значні перспективи практичного застосування, а також враховуючи необхідність подальшого розвитку фізики плазми та фізики газового розряду, теоретичні та експериментальні дослідження в цьому напрямку слід вважати досить актуальними. Дисертаційну роботу присвячено експериментальному та теоретичному вивченню умов формування та динаміки СППР у сильноточовому імпульсному плазмовому діоді з просторовими та магнітними засобами стабілізації подвійного електричного шару в плазмі багаторазово іонізованих атомів олова.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано в навчально-науковому інституті «Фізико-технічний факультет» Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна відповідно до тематичних планів фундаментальних науково-дослідних робіт, зокрема, «Фізичні процеси в обмежених плазмовоподібних середовищах, метаматеріалах та надгустій плазмі» (№ державної реєстрації 0115U000470 2015–2017 рр.), «Формування мультимасштабних мікро- та наноструктур у твердих тілах при градієнтному термічному, плазмовому та лазерному впливі» (№ державної реєстрації 0115U000469 2015–2017 рр.), «Фізичні процеси в обмежених плазмовоподібних середовищах» (№ державної реєстрації 0118U002023 2018–2020 рр.). У виконанні цих робіт дисертант брав участь як виконавець.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є визначення умов формування та динаміки самостійного плазмово-пучкового розряду при високій густині енергії, а також установлення засобів стабілізації подвійних електричних шарів об'ємного заряду в плазмі багаторазово іонізованих атомів олова.

Для досягнення мети необхідно було вирішити наступні завдання:

1. Розробити методику розрахунку динаміки активної потужності в сильноточових імпульсних розрядах мікросекундного діапазону, створити необхідне діагностичне обладнання та розробити програмну реалізацію даної методики.
2. Провести теоретичні та експериментальні дослідження нестационарних подвійних електричних шарів об'ємного заряду в плазмі сильноточового імпульсного розряду з урахуванням ємнісної складової струму.
3. Експериментально дослідити динаміку СППР при високій густині енергії в сильноточовому імпульсному плазмовому діоді низького тиску з обмеженою робочою поверхнею високовольтного електрода.
4. Провести експериментальні дослідження засобів керування СППР при високій густині енергії за рахунок зменшення робочої поверхні високовольтного електрода, часткового контрагування плазмового каналу та використання зовнішнього магнітного поля.
5. Провести фізичне моделювання стаціонарного існування СППР у плазмовій електронно-променевої системі при зменшеній густині енергії.

Об'єкт дослідження: самостійний плазмово-пучковий розряд при високій густині енергії.

Предмет дослідження: динаміка активної потужності розряду, що виділяється в плазмі багаторазово іонізованих атомів олова сильноточового імпульсного плазмового діоду.

Методи дослідження. Експериментальні дослідження динаміки СППР при високій густині енергії проводилися з використанням сильноточового імпульсного плазмового діода низького тиску з обмеженою робочою поверхнею високовольтного електрода. Максимальна густина струму на високовольтному електроді становила $0,15\text{--}1,5\text{ МА/см}^2$, а густина потужності – $0,3\text{--}5\text{ ГВт/см}^2$.

Струм розряду вимірювали за допомогою індукційного датчика струму, а напругу розряду – збалансованим подільником напруги з гасінням зворотної хвилі. Дослідження динаміки розподілу потенціалу в розрядній комірці плазмового діода

проводили за допомогою системи зондової діагностики на основі одиночних зондів з убудованими ємнісними подільниками напруги. Реєстрацію сигналів здійснювали за допомогою двох чотириканальних цифрових осцилографів *Tektronix TDS 2014*.

Вивчення динаміки плазмового шнура у видимій області спектра здійснювали за допомогою швидкісної системи реєстрації зображення з наносекундною роздільною здатністю на основі електронно-оптичного перетворювача.

Розрахунок динаміки активної потужності розряду проводили за допомогою оригінальної комп'ютерної програми, реалізованої на базі *Microsoft Excel 2003*. Закладену в програму методику розрахунку активної потужності розроблено в ході виконання дисертаційної роботи.

Експериментальні дослідження фізичного моделювання стаціонарного режиму СППР при зменшеній густині енергії проводили в плазмовій електронно-променевої системі з використанням джерела первинної плазми на основі розряду з катодом розжарення. Для дослідження динаміки плаваючого потенціалу плазми використовували плоский зонд з робочою поверхнею 1 см^2 , який встановлювали в вакуумній камері поза плазмового шнура джерела первинної плазми.

При обробці експериментальних даних та проведенні теоретичних розрахунків використовували стандартні програми *Microsoft Excel 2003*, *OriginPro 8* та ін. Моделювання топології магнітного поля здійснювали за допомогою спеціалізованої комп'ютерної програми *FEMM 4.2*.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що **вперше:**

1. Експериментально встановлено, що при густині плазми понад 10^{16} см^{-3} і питомій потужності понад 2 ГВт/см^2 існування СППР за умов великої густини енергії забезпечується за рахунок багаторазової іонізації атомів у плазмі. У разі недостатньої питомої потужності для багаторазової іонізації атомів, існування СППР обумовлено нейтральною компонентою, що поступає в плазму.
2. Визначено, що при збудженні СППР за умов густої плазми (понад 10^{16} см^{-3}) можливе локальне введення великої імпульсної потужності (понад 100 МВт за питомої потужності понад 2 ГВт/см^2) при відносно невеликому енергозапасі конденсаторної батареї (до 200 Дж).
3. Встановлено можливість просторової стабілізації СППР та підвищення ефективності введення імпульсної потужності в розряд за рахунок зменшення робочої поверхні високовольтного електрода, часткового контрагування плазмового каналу діелектричною вставкою та використання зовнішнього постійного магнітного поля величиною до $0,1 \text{ Тл}$.
4. Розроблено оригінальну методику визначення активної потужності сильнотривового імпульсного розряду мікросекундного діапазону, яка дає можливість з високою точністю розраховувати її динаміку. Визначено принципові особливості, які необхідно враховувати при розрахунках.
5. Створено модель нестационарного подвійного електричного шару об'ємного заряду в плазмі сильнотривового імпульсного розряду з урахуванням ємнісної складової струму. В квазі-МГД наближенні отримано вираз для ємності сильного подвійного шару та інтегро-диференціальне рівняння для знаходження ємнісної складової струму подвійного шару.

6. Проведено фізичне моделювання формування подвійного електричного шару об'ємного заряду в плазмовій електронно-променевої системі при зменшеній густині енергії, яке продемонструвало стаціонарність існування СППР. Виявлено ефект перевищення струму електронного пучка над струмом катоду джерела первинної плазми, що пов'язано з перерозподілом напруги в розряді та виникненням за умов низького тиску несамотійного тліючого розряду.

Практичне значення отриманих результатів. СППР надає унікальну можливість для швидкого та локального введення в плазму енергії з великою (на рівні 10^9 Вт/см² і вище) густиною потужності. Це відкриває нові перспективи як для фундаментальних досліджень у галузі фізики плазми та фізики газового розряду, так і в різних галузях техніки та технологій. Такі густини потужності дають можливість отримувати густу плазму багаторазово іонізованих атомів, в дебаєвій сфері якої знаходиться один іон, тобто, певну квазі-кристалічну плазмову структуру, та яка сьогодні є найбільш привабливою для використання у технічній сфері при створенні джерел потужного (мегават і вище) спрямованого ЕУФ випромінювання. У сфері технологій – імпульсний вплив на тверді тіла при такому рівні потужності дає можливість суттєво модифікувати їх поверхневий шар, надаючи йому унікальні властивості. Як наслідок такого впливу спостерігається збільшення експлуатаційних характеристик виробів. Комбінованими плазмово-пучковими методами можна створювати на поверхні сплави зі складом та властивостями, які є неможливими з точки зору традиційної металургії.

Розроблену оригінальну методику розрахунку динаміки активної потужності розряду можна використовувати для обчислень розрядних характеристик сильнострумових імпульсних розрядів мікросекундного діапазону.

Виявлений у плазмовій електронно-променевої системі ефект перевищення струму електронного пучка над струмом джерела первинної плазми дає можливість, використовуючи малопотужне джерело первинної плазми ($I_p = 1-3$ А, $V_p = 50$ В), формувати електронний пучок на об'єкт, що обробляється, зі струмом 4–12 А та енергією до 400 еВ.

Результати дослідження можуть бути використані в освітньому процесі на кафедрі матеріалів реакторобудування та фізичних технологій і кафедрі прикладної фізики та фізики плазми Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, а також у ННЦ ХФТІ, ІЕРТ НАН України, НТУ «ХП».

Особистий внесок здобувача. Всі результати, що увійшли до дисертації, здобуто за особистої участі автора. Здобувач брав безпосередню участь у виконанні теоретичних розрахунків, підготовці та проведенні експериментів, обробці експериментальних даних, інтерпретації та обговоренні здобутих результатів, аналізі джерел наукової літератури за темою дослідження, підготовці та написанні наукових статей [1–9] та тез доповідей на наукових конференціях [10–22].

У роботах [1, 10, 12] здобувач брав участь у підготовці та проведенні експериментальних досліджень з фізичного моделювання формування подвійного шару в плазмовій електронно-променевої системі. У роботах [4, 14, 16] здобувач брав безпосередню участь у розробці та верифікації методики розрахунку активної потужності сильнострумового імпульсного розряду, розробці програмної реалізації даної методики. У роботах [5, 17] здобувач брав участь у створенні моделі

нестационарного подвійного шару в плазмі. Ним особисто було отримано вираз для ємності та ємнісної складової струму подвійного шару. У роботах [6–9, 13, 15, 18–22] здобувач особисто розраховував динаміку активної потужності розряду та енергію, що виділяється в розряді, для дослідження динаміки СППР та засобів його керування при високій густині енергії.

Апробація результатів дослідження. Основні результати дисертації представлені та обговорені на наступних наукових конференціях, школах і семінарах: International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion and The Adjoint Workshop “Nano- and micro-sized structures in plasmas” (Kharkiv, Ukraine, September 15–18, 2014); міжнародна конференція молодих учених і аспірантів ІЕФ-2015 (Ужгород, Україна, 18–22 травня 2015); Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу (Київ, Україна, 22–23 вересня 2015); 13th Kudowa Summer School “Towards Fusion Energy” (Kudowa-Zdroj, Poland, June 13–17, 2016); 27th Symposium on Plasma Physics and Technology (Prague, Czech Republic, June 20–23, 2016); International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion (Kharkiv, Ukraine, September 12–15, 2016); міжнародна конференція молодих учених і аспірантів ІЕФ-2017 (Ужгород, Україна, 23–26 травня 2017); 21st IEEE International Pulsed Power Conference PPC-2017 (Brighton, UK, June 18–22, 2017); XIII International Scientific Conference “Electronics and Applied Physics” (Kyiv, Ukraine, October 24–27, 2017); International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion (Kharkiv, Ukraine, September 10–13, 2018); міжнародна конференція молодих вчених та аспірантів ІЕФ-2019 (Ужгород, Україна, 21–24 травня 2019).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано в 22 наукових роботах, з них 8 статей [1-8] у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science, 1 стаття [9] у науковому періодичному виданні іншої держави та 13 тез доповідей на міжнародних і вітчизняних наукових конференціях [10-22].

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і одного додатку. Загальний обсяг дисертації складає 190 сторінок, з яких основний текст – 142 сторінки. Робота містить 79 рисунків та 1 таблицю. Список використаних літературних джерел налічує 163 найменування на 17 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

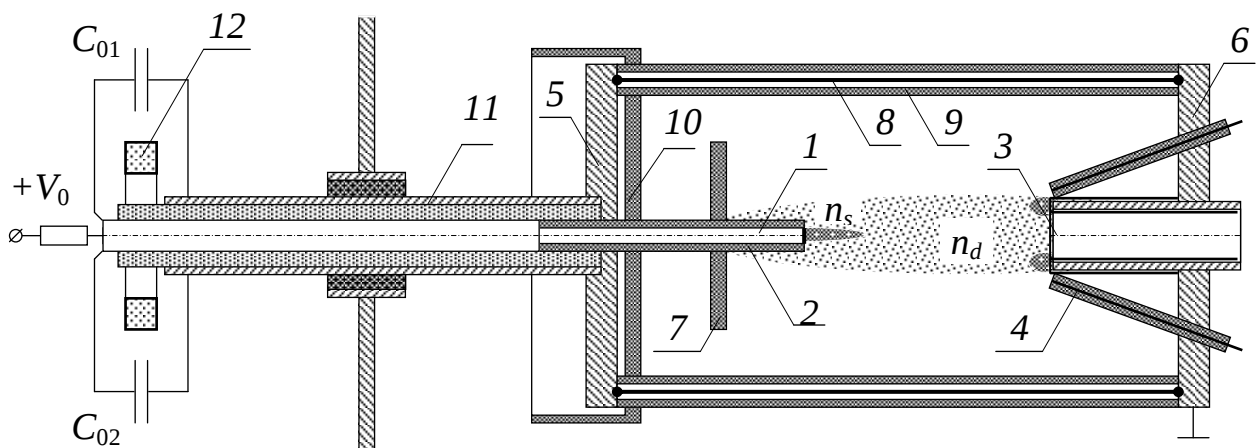
У вступі обґрунтовано актуальність теми, визначено об'єкт і предмет дослідження, сформульовано мету та завдання дисертації, показано зв'язок роботи з науковими програмами та темами, визначено наукову новизну та практичну цінність здобутих результатів, відображено особистий внесок здобувача в опублікованих наукових працях, надано інформацію про апробацію результатів і про публікації за темою дисертації, описано структуру та обсяг дисертації.

У першому розділі наведено огляд літератури за темою дисертації, в якому представлено особливості сильнотривового імпульсного розряду низького тиску та галузі його застосування. У підрозділі 1.1 розглянуто процес обмеження струму в дуговому розряді низького тиску, при якому відбувається утворення подвійного

електричного шару об'ємного заряду в струмопровідній плазмі та перехід до СППР. Підрозділ 1.2 присвячений аналізу результатів попереднього дослідження СППР при густині плазми до 10^{14} см^3 . Розглянуто характеристики розряду, умови його формування та існування. У підрозділі 1.3 коротко розглянуті основні властивості подвійного електричного шару об'ємного заряду в плазмі. Представлено аналіз робіт, присвячених теоретичному та експериментальному дослідженню подвійних шарів у плазмі. Підрозділ 1.4 присвячено джерелам інтенсивного ЕУФ випромінювання на основі сильнотривового імпульсного розряду. Розглянуто деякі існуючі плазмові джерела ЕУФ випромінювання. Особливу увагу приділено формуванню потужного спрямованого ЕУФ випромінювання з плазми багаторазово іонізованих атомів олова сильнотривового імпульсного діода. У підрозділі 1.5 коротко розглянуто особливості використання сильнотривового імпульсного розряду як засобу інтенсивного впливу на поверхню твердого тіла.

У результаті проведеного аналізу сформульовано низку задач, які були успішно розв'язані в межах дисертаційного дослідження.

Другий розділ містить опис експериментальної установки та діагностичного обладнання, що використовувалося в дисертаційній роботі. На рис. 1 представлено схематичне зображення розрядної комірки сильнотривового імпульсного плазмового діода. Особливістю даної розрядної комірки було обмеження робочої поверхні високовольтного стрижневого електрода 1 трубчастим керамічним ізолятором 2 таким чином, що робочим залишався лише торець електрода. Площа робочої поверхні високовольтного електрода варіювалася в межах $S_a = 0.02\text{--}0.2 \text{ см}^2$ та була на два порядки менша за площу робочої поверхні заземленого трубчастого електрода 3. Це давало можливість концентрувати на високовольтний електрод струм великої густини (до 2 МА/см^2) та сприяло формуванню подвійного шару об'ємного заряду біля його робочої поверхні. Імпульсне живлення розряду здійснювалося від малоіндуктивної конденсаторної батареї сумарною ємністю



1 – високовольтний стрижневий електрод; 2 – трубчастий керамічний ізолятор;
3 – заземлений трубчастий електрод; 4 – електрод підпалу; 5, 6 – фланець кріплення;
7 – дисковий керамічний гребінь; 8 – шина зворотного струму;
9, 10 – скляні ізолятори; 11 – вакуумний коаксіальний ввід; 12 – датчик струму.

Рис.1. Схематичне зображення розрядної комірки плазмового діода

$C_0 = 1,914$ мкФ, яку заряджали до напруги $V_0 = 4\text{--}14$ кВ. Розряд збуджувався при низькому тиску $\sim 2\text{--}3 \cdot 10^{-6}$ Тор після заповнення розрядного проміжку первинною плазмою ($n_d \sim 10^{12}\text{--}10^{13}$ см $^{-3}$), що створювалася за рахунок поверхневого пробоя між заземленим електродом та електродами підпалу 4. Формування густої ($n_s \sim 10^{16}\text{--}10^{17}$ см $^{-3}$) приелектродної плазми відбувалось при переході розряду від високовольтної до сильнотрмової індуктивної стадії в умовах інтенсивного випаровування поверхні високовольтного електрода та іонізації пари потужним електронним пучком, прискореним у подвійному шарі біля високовольтного електрода. Експерименти проводилися з плазмою багаторазово іонізованих атомів олова. Для цього робочі поверхні електродів покривали шаром олова товщиною ~ 1 мм. Амплітуда розрядного струму досягала ~ 40 кА, а період коливань складав $\sim 3\text{--}4$ мкс.

У розділі також представлено різні модифікації розрядної комірки плазмового діода, що використовували для дослідження засобів керування СППР при високій густині енергії. Часткове контрагування плазмового каналу здійснювали діелектричною вставкою (скляний стакан з отвором по центру), що поміщалася в розрядний проміжок між електродами діода та задавала плазмовий канал лише через її отвір. Зовнішнє магнітне поле створювали системою на постійних кільцевих магнітах з максимальною індукцією магнітного поля $\sim 0,11$ Тл та імпульсною котушкою магнітного поля з максимальною індукцією магнітного поля до 10 Тл.

Наведено опис діагностичних засобів вимірювання струму та напруги розряду, розподілу потенціалу плазми. Описано систему швидкісної реєстрації зображень у видимому діапазоні довжин хвиль на основі електронно-оптичного перетворювача, яку використовували для вивчення динаміки плазмового шнура, та систему вимірювання інтенсивності випромінювання в ЕУФ діапазоні.

Представлено опис плазмової електронно-променевої системи для проведення фізичного моделювання стаціонарного існування СППР при зменшеній густині енергії. В якості джерела первинної плазми використовували розряд з катодом розжарення. Такий спосіб створення плазми при відносно невисоких енерговитратах давав змогу отримувати за умов низьких тисків ($\sim 10^{-4}$ Тор) досить густу ($\sim 10^{11}$ см $^{-3}$) плазму.

У третьому розділі представлено методику розрахунку активної потужності сильнотрмового імпульсного розряду. Розрахунок динаміки активної потужності розряду $P_a \llcorner i_d \llcorner V_{da} \llcorner$ проводився на підставі динаміки розрядного струму $i_d(t)$ з використанням рівняння розрядного ланцюга сильнотрмового імпульсного розряду. В розрахунках враховували не всю активна потужність, а лише ту, що обумовлена пучками заряджених частинок, прискореними в подвійному шарі об'ємного заряду $P_{DL}(t)$. Саме подвійний шар відповідає за локальне введення енергії в розряд, зважаючи на потужний колективний дисипативний механізм передачі енергії від електронного пучка до плазми. Тому в активній напрузі розряду $V_{da}(t)$ розглядалася лише та її частина, яка зосереджена в подвійному шарі $V_{DL}(t)$. Згідно рівняння розрядного ланцюга ця напруга визначається виразом:

$$V_{DL} \llcorner V_0 - \frac{1}{C_0} \int_0^t i_d \llcorner d\tau - I_c + L_d \llcorner \frac{di_d \llcorner}{dt} - \frac{dL_d \llcorner}{dt} \cdot i_d \llcorner - R_c + R_{da} \llcorner i_d \llcorner, \quad (1)$$

де V_0 – зарядна напруга; C_0 – ємність конденсаторної батареї; L_c – індуктивність ланцюга живлення; $L_d(t)$ – індуктивність розрядного проміжку; R_c – активний опір ланцюга живлення; R_{da} – активний опір приелектродних шарів та плазмового стовпа.

Для визначення сумарних індуктивності $L = L_c + L_d$ та активного опору $R = R_c + R_{da}$ розрядного ланцюга використовували формулу згасаючих коливань розрядного струму в припущенні приблизної сталості параметрів розрядного ланцюга. Враховували, що індуктивність та активний опір ланцюга в непарних та парних півперіодах коливання розрядного струму можуть відрізнятися, оскільки змінюється на протилежний напрям протікання струму. У зв'язку з цим індуктивність та активний опір ланцюга визначали з відношення величин першого та третього, а також другого та четвертого максимумів струмів і відповідних їм моментів часу. Для зменшення похибки розрахунків отримані значення усереднювали.

У роботі для знаходження індуктивності розрядного проміжку $L_d(t)$ використовували просту математичну модель на підставі виразу для індуктивності коаксіального кабелю:

$$L_d(t) = 2 \cdot 10^{-3} l_d \ln \frac{r_{bc}}{r_0 - a \cdot i_d^4}, \quad (2)$$

де l_d – довжина розрядного проміжку; r_{bc} – відстань між шпильками зворотного струму та віссю системи; r_0 – початковий радіус плазмового шнура за відсутності струму; $a = 6,5 \cdot 10^{-7} \text{ кА}^{-4}$ – коефіцієнт пропорційності, i_d – розрядний струм. У виразі l_d , r_{bc} і r_0 вимірюють у см, i_d – в кА, $L_d(t)$ – в мкГн. Цю модель можна застосовувати, якщо сумарна індуктивність ланцюга значно перевищує індуктивність розрядного проміжку. В експериментах, що проводились, сумарна індуктивність ланцюга становила 140–160 нГн, а середня індуктивність розрядного проміжку – 20–25 нГн.

З урахуванням виразу для зміни індуктивності розрядного проміжку рівняння динаміки активної потужності розряду $P_{DL}(t)$ має вигляд:

$$P_{DL} = \left[V_0 - \frac{1}{C_0} \int_0^t i_d d\tau - \left(L_{cp} + 8 \cdot 10^{-3} l_d \cdot \frac{a \cdot i_d^4}{1 - a \cdot i_d^4} \right) \cdot \frac{di_d}{dt} \right] \cdot i_d - R_{cp} \cdot i_d^2, \quad (3)$$

де L_{cp} і R_{cp} – середня індуктивність і середній опір розрядного ланцюга.

Вказані принципові особливості, які необхідно враховувати при проведенні розрахунків активної потужності. Перш за все, це стосується необхідності згладжування сигналу розрядного струму. В роботі для згладжування сигналу та отримання першої похідної використовували апроксимацію методом Савицького-Голея. Показано, що для гарного згладжування сигналу та збереження його «тонкої структури» максимальна ширина вікна згладжування при апроксимації сигналу поліномами другого та третього ступеня не повинна перевищувати період «тонкої структури» сигналу, а для отримання першої похідної при апроксимації поліномами першого та другого ступеня – половини цього періоду.

Наступний важливий етап стосується необхідності відновлення розрядного струму, оскільки будь-який датчик струму спотворює дійсну форму сигналу. При розрахунках початкова похибка в декілька відсотків врешті решт призводить до значних помилок. Для індукційного датчика струму, що використовували в роботі,

отримано рівняння для відновлення сигналу розрядного струму, що спостерігається з датчика, $V_R(t)$ до його дійсного значення $i_1(t)$:

$$i_1(t) = \mu \cdot \left[\left(1 + \frac{R_w R C_p}{L} \right) \cdot V_R + R C_p \cdot \left[\frac{dV_R}{dt} - \frac{dV_R}{dt} \Big|_{t=0} \right] + \frac{R_w + R}{L} \cdot \int_0^t V_R d\tau \right], \quad (4)$$

де $\mu = L/RM$ – коефіцієнт чутливості датчика струму; L – індуктивність вимірювальної котушки; R_w – її опір; R – вимірюваний опір; C_p – паразитна ємність, що включає в себе ємність датчика, ємність кабелю та вхідну ємність осцилографа. Важливим моментом тут є те, що індуктивний опір обмотки індукційного датчика має суттєво перевищувати його активний опір $\omega L \gg R_w + R$.

Матеріали цього розділу опубліковано в роботі [4] та доповідались на конференціях [14, 16].

Четвертий розділ присвячено теоретичному та експериментальному дослідженню нестационарних подвійних електричних шарів об'ємного заряду в сильнострумових імпульсних розрядах. У квазі-МГД наближенні отримано вираз для ємності сильного подвійного шару C_{DL} , який має наступний вигляд:

$$C_{DL} \approx \sqrt{\frac{m_e}{2e}} \cdot \frac{|i_{DL}|}{|V_{DL}|^{3/2}} \cdot I(\epsilon_{ic}, \epsilon_{ea}, \phi_{ai}, \phi_{ce}), \quad (5)$$

де i_{DL} – струм подвійного шару; V_{DL} – напруга на подвійному шарі; $I(\epsilon_{ic}, \epsilon_{ea}, \phi_{ai}, \phi_{ce})$ – поправочний інтеграл, що залежить від співвідношення між температурами електронів та іонів плазми і напругою на шарі:

$$I(\epsilon_{ic}, \epsilon_{ea}, \phi_{ai}, \phi_{ce}) = -2 \left(\sqrt{0.5 + \phi_{ai}} - \sqrt{1 + \phi_{ai}} \right) - 2 \left(\sqrt{0.5 + \phi_{ce}} - \sqrt{\phi_{ce}} \right) - \epsilon_{ic} \left(\frac{1}{\sqrt{\phi_{ce}}} - \frac{1}{\sqrt{1 + \phi_{ai}}} \right) \cdot \left(e^{\frac{0.5}{\epsilon_{ic}}} - 1 \right) - \epsilon_{ea} \left(\frac{1}{\sqrt{\phi_{ai}}} - \frac{1}{\sqrt{1 + \phi_{ce}}} \right) \cdot \left(e^{\frac{0.5}{\epsilon_{ea}}} - e^{\frac{1}{\epsilon_{ea}}} \right), \quad (6)$$

де $\phi = \varphi / V_{DL}$ – відносний потенціал, $\epsilon_{ic} = T_{ic} / Z_{ic} e V_{DL}$ – відносна температура іонів на катодній межі шару, $\epsilon_{ea} = T_{ea} / e V_{DL}$ – відносна температура електронів на анодній межі шару, $\phi_{ce} = \varphi_{e0} / V_{DL}$ – початковий потенціал електронів на катодній межі шару, $\phi_{ai} = \varphi_{i0} / V_{DL}$ – початковий потенціал іонів на анодній межі шару.

Отриманий вираз для ємності сильного подвійного шару досить точно описує його ємність, яка при напрузі на шарі ~ 100 В та струмі ~ 10 кА становить $\sim 0,15$ мкФ. Показано, що з ростом напруги ємність шару зменшується, і вже при напрузі 1 кВ ємність не перевищує 5 нФ.

Отримано інтегро-диференціальне рівняння для ємнісної складової струму подвійного шару $i_C(t)$, яке при $i_C > 0$ має вигляд:

$$i_C = e^{-\int_0^t K d\tau} \cdot \int_0^t F d\tau \cdot e^{\int_0^t K d\tau}, \quad (7)$$

а при $i_C < 0$:

$$i_C = -e^{-\int_0^t K d\tau} \cdot \int_0^t F d\tau \cdot e^{-\int_0^t K d\tau}, \quad (8)$$

де $\kappa = \frac{1}{2V_{DL}} \cdot \left(\frac{2}{A} \cdot |V_{DL}|^{3/2} - \frac{dV_{DL}}{dt} \right)$; $F = \frac{d|i|}{dt} - \frac{1}{2V_{DL}} \cdot \frac{dV_{DL}}{dt} \cdot |i|$; i – загальний струм крізь шар.

Представлено динаміку ємнісної складової струму подвійного шару в сильноточковому імпульсному розряді та наведено спосіб верифікації розрахунків. Проведені чисельні розрахунки показали гарний збіг розрахункової кривої ємнісної складової струму з експериментально отриманими верифікаційними точками.

Матеріали цього розділу опубліковано в роботі [5] та доповідались на конференції [17].

У п'ятому розділі представлено експериментальні дослідження СППР при високій густині енергії та засобів його керування в плазмовому діоді з обмеженою поверхнею високовольтного електрода. Показано, що в такій системі рівень активної потужності, що локально вводиться в розряд, досягає ~ 100 МВт при початковому запасі енергії конденсаторної батареї до 200 Дж. На рис. 2 показано характерну динаміку струму розряду (а) і розраховані по ній динаміки активної

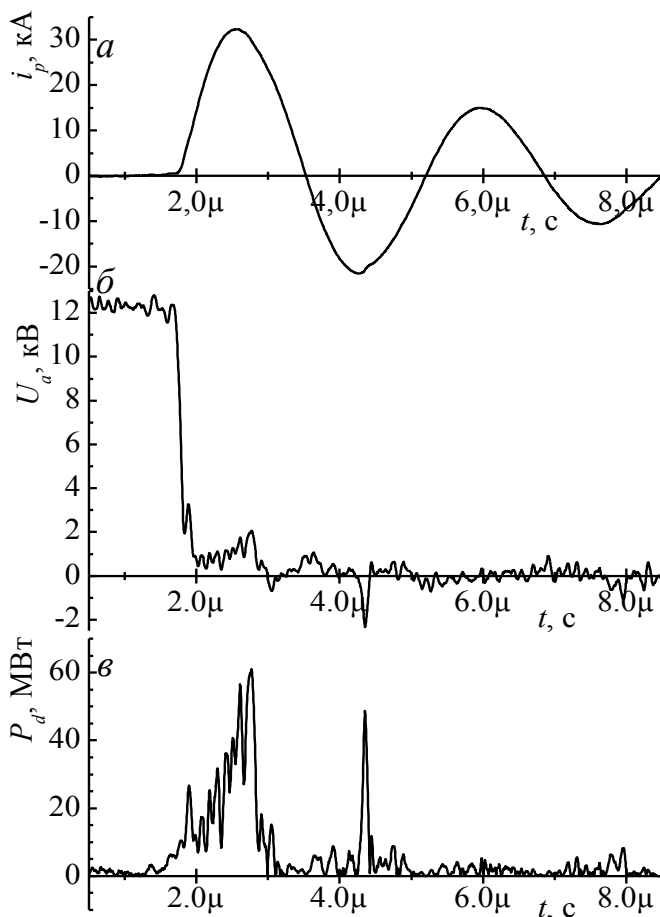


Рис.2. Динаміка струму розряду (а), активної напруги на подвійному шарі (б) та активної потужності розряду (в) при зарядній напрузі $V_0 \sim 12$ кВ

напруги на подвійному шарі (б) та активної потужності розряду (в). Представлені часові залежності відповідають зарядній напрузі конденсаторної батареї $V_0 \sim 12$ кВ та діаметру високовольтного електрода 5 мм. Різке підвищення активної потужності спостерігається на фоні стрибків активної напруги, які пов'язані з виникненням в розрядному ланцюзі додаткового активного опору за рахунок формування подвійного шару в густій плазмі. Локальне введення активної потужності в розряд спостерігається в індуктивній стадії розряду в першому, другому та третьому півперіодах коливань розрядного струму. Показано, що більшість (понад 60%) енергії виділяється в розряді в першому півперіоді. У зв'язку з цим усі подальші порівняння енергії представлені саме для першого півперіоду.

Для стабілізації розряду, управління місцем розташування подвійних шарів та підвищення рівня активної потужності розряду в роботі представлені наступні засоби керування

СППР при високій густині енергії: за рахунок зменшення робочої поверхні високовольтного електрода, часткового контрагування плазмового каналу та

використання зовнішнього магнітного поля. Показано, що для всіх наведених вище засобів спостерігається збільшення активної потужності розряду на фоні зменшення розрядного струму.

Проведені дослідження впливу розміру робочої поверхні обмеженого високовольтного електрода показали, що при зменшенні діаметра електрода від 5 мм до 1,5 мм спостерігається збільшення активної потужності розряду в середньому на 40–50%, та енергії, що виділяється в розряді – в середньому на 80% (рис. 3б). При цьому струм розряду зменшується на 10–15% (рис. 3а). Зважаючи на обмежену робочу поверхню високовольтного електрода, густина потужності, що виділяється біля поверхні електрода, збільшується з $\sim 0,3$ ГВт/см² до ~ 5 ГВт/см² при початковому запасі енергії ~ 140 Дж.

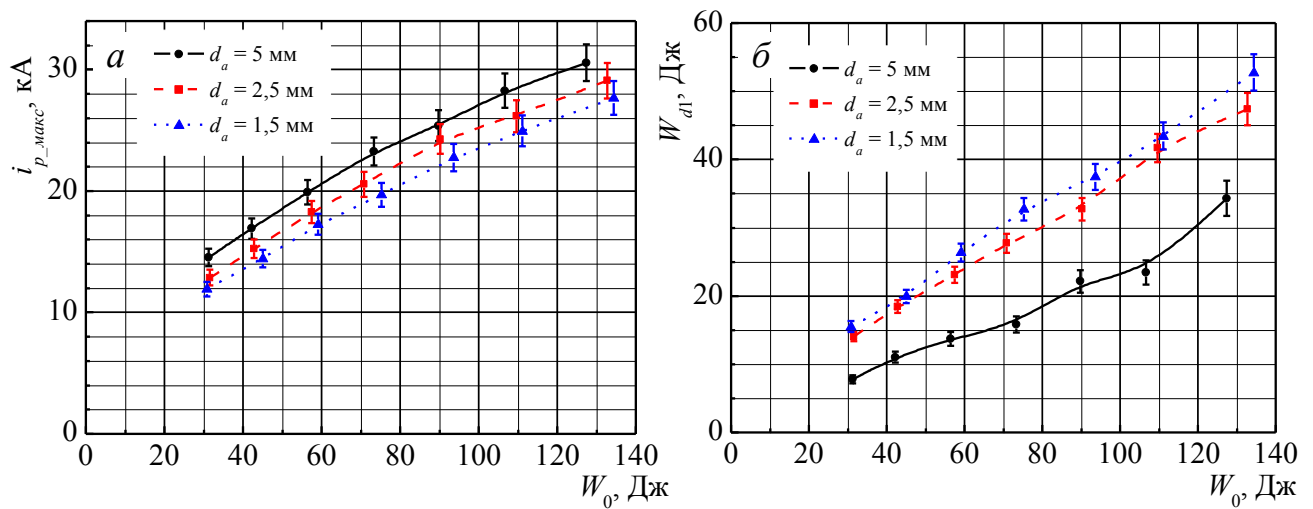


Рис.3. Залежність максимального розрядного струму (а) та енергії, що виділяється в розряді в першому півперіоді, (б) від енергії, накопиченої в конденсаторній батареї, для різних діаметрів високовольтного електрода

Дослідження часткового контрагування плазмового каналу діелектричною вставкою виявили, що у випадку частково контрагуваної системи розрядний струм (рис. 4а) в середньому (залежно від початкового запасу енергії) на 9–10% менше, ніж у неконтрагуваному випадку. При цьому рівень активної потужності розряду збільшується, в середньому, на 40%, а енергія, що виділяється в розряді, на 50–60% (рис. 4б). Запропоновано пояснення, що збільшення активної потужності розряду пов'язане з формуванням додаткового подвійного шару поблизу отвору діелектричної вставки через те, що в цьому місці перенесення струму плазмою є найбільш ускладненим, що є основною умовою утворення подвійного шару. Експериментально визначено, що для стабільного збудження розряду від імпульсу до імпульсу оптимальна відстань від торця високовольтного електрода до отвору вставки не повинна перевищувати 2–3х діаметрів отвору.

При дослідженні впливу зовнішнього магнітного поля встановлено, що попри великі значення власного магнітного поля розряду, які можуть досягати 10 Тл, зовнішнього магнітного поля величиною до 0,1 Тл специфічної конфігурації достатньо для впливу на динаміку розряду та підвищення рівня активної потужності розряду. При початковому запасі енергії до 90 Дж найбільше збільшення потужності

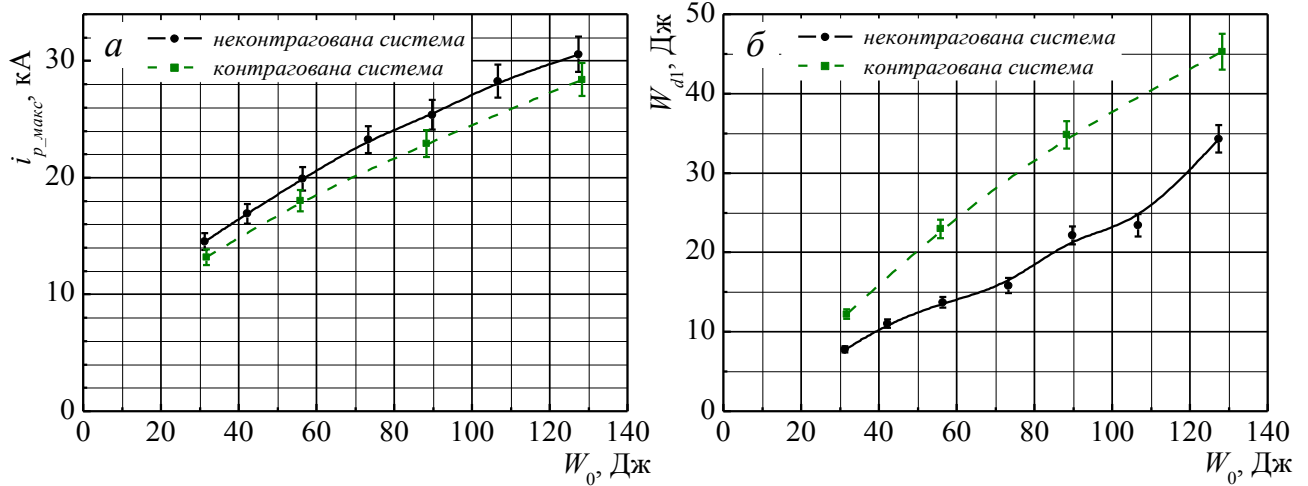


Рис.4. Залежність максимального розрядного струму (а) та енергії, що виділяється в розряді в першому півперіоді, (б) від енергії, накопиченої в конденсаторній батареї, для контрагованої та неконтрагованої системи

та енергії спостерігається для випадку, коли торець високовольтного електрода знаходиться в мінімумі магнітного поля, понад 90 Дж – в точці інверсії магнітного поля (рис. 5б). Збільшення активної потужності розряду спостерігається на фоні зменшення розрядного струму (рис. 5а). Запропоновано пояснення, що збільшення активної потужності розряду пов'язано з тим, що первинна плазма, в силу своїх діамагнітних властивостей, витісняється в область з меншим магнітним полем і концентрується поблизу точки інверсії. При цьому задається місце формування подвійного шару та зона локального введення енергії в розряд.

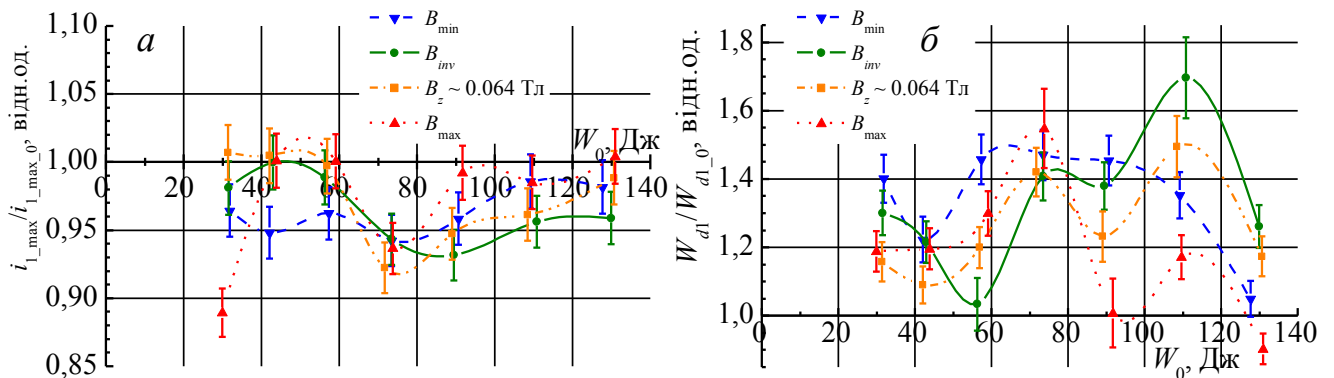


Рис.5. Вплив накопиченої енергії на відношення максимального розрядного струму (а) та енергії, що виділяється в розряді в першому півперіоді, (б) за наявності зовнішнього магнітного поля різної топології порівняно з розрядом без магнітного поля

Наведено результати дослідження зовнішнього сильного (до 10 Тл) магнітного поля для стабілізації плазмового шнура на сильнотривій індуктивній стадії розряду. Було встановлено, що в плазмовому діоді, який використовувався в дослідженнях, наявність зовнішнього сильного магнітного поля спричиняє формування додаткового розряду в схрещених електричних та магнітних полях в парах вакуумної олії. Цей розряд перешкоджає умовам розвитку сильнотривію

розряду, а саме порушуються умови формування подвійного шару, та перехоплює на себе значну частку активної потужності розряду.

Представлено результати фізичного моделювання подвійного електричного шару об'ємного заряду в плазмовій електронно-променевої системі при зменшеній густині енергії, які довели можливість існування СППР в стаціонарному режимі. Виявлено, що у такій системі струм на тигель при утворенні густої приелектродної плазми може в декілька разів перевищувати розрядний струм джерела первинної плазми. Це пов'язано з перерозподілом частини напруги між тиглем та стінкою вакуумної камери, яка за умов низького тиску починає грати роль катода несамотійного тліючого розряду.

Матеріали цього розділу опубліковано в роботах [1-3, 6-9] та доповідались на конференціях [10-13, 15, 18-22].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі досліджено динаміку самотійного плазмово-пучкового розряду при високій густині енергії в плазмі багаторазово іонізованих атомів олова сильнострумове імпульсного плазмове діода. Основні **результати** та **висновки** дисертаційної роботи полягають у наступному.

1. Проведено експериментальне дослідження самотійного плазмово-пучкового розряду при густині плазми понад 10^{16} см^{-3} та питомій потужності понад 2 ГВт/см^2 . Встановлено, що існування СППР за умов великої густини енергії забезпечується за рахунок багаторазової іонізації атомів у плазмі. Якщо для багаторазової іонізації атомів недостатньо енергії, існування СППР обумовлено нейтральною компонентою, що поступає в плазму.
2. Показано, що в сильнострумовому імпульсному плазмовому діоді з обмеженою робочою поверхнею високовольтного електрода рівень активної потужності, що локально вводиться в розряд, за умов формування в плазмі подвійного шару об'ємного заряду, може досягати $\sim 100 \text{ МВт}$ при початковому запасі енергії конденсаторної батареї до 200 Дж . Зважаючи на обмежену робочу поверхню високовольтного електрода густина енергії, що виділяється біля нього, може досягати $\sim 6 \text{ ГВт/см}^2$.
3. Встановлено, що наведені в роботі засоби керування СППР при високій густині енергії, за рахунок зменшення площі робочої поверхні високовольтного електрода, часткового контрагування плазмове каналу та використання зовнішнього постійного магнітного поля відносно невеликої величини (до $0,1 \text{ Тл}$), дають можливість керувати параметрами та місцем розташування подвійного шару в розрядному проміжку. Для всіх трьох засобів керування розрядом спостерігається збільшення активної потужності та енергії, що виділяється в розряді, на фоні зменшення розрядного струму.
4. Розроблено оригінальну методику розрахунку активної напруги та активної потужності сильнострумове імпульсного розряду мікросекундного діапазону. Визначено принципові особливості, які необхідно враховувати при розрахунках. Для індукційного датчика струму, що використовується в роботі, отримано вираз для відновлення дійсного сигналу розрядного струму по сигналу, що

спостерігається з датчика струму. Виконана програмна реалізація цієї методики, яка дає можливість досить швидко та з мінімальною похибкою визначати динаміку активної потужності розряду по осцилограмі розрядного струму.

5. Проведено теоретичні та експериментальні дослідження нестационарних подвійних електричних шарів об'ємного заряду в плазмі сильнотривового імпульсного розряду з урахуванням ємнісної складової струму. У квазі-МГД наближенні отримано вираз для ємності сильного подвійного електричного шару об'ємного заряду в плазмі та інтегро-диференціальне рівняння для знаходження ємнісної складової струму подвійного шару. Показано, що ємність подвійного шару зменшується з ростом напруги на шарі. Так, при збільшенні падіння напруги на шарі з 10^2 В до 10^4 В питома потужність шару зменшується в 10^3 раз. Проведені чисельні розрахунки показали гарний збіг розрахункової кривої ємнісної складової струму подвійного шару з експериментально отриманими верифікаційними точками.
6. Проведено фізичне моделювання формування подвійного електричного шару об'ємного заряду в плазмовій електронно-променевої системі при зменшеній густині енергії, яке продемонструвало стаціонарність існування СППР. Виявлено ефект перевищення струму електронного пучка над струмом джерела первинної плазми, що пов'язано з перерозподілом напруги в розряді та виникненням за умов низького тиску несамотійного тліючого розряду.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз:

1. Misiura I. N., Girka I. A., Azarenkov N. A., Borgun Ie. V., **Hrechko Ya. O.**, Hryhorenko A. V., Dimitrova V. D., Raybchikov D. L., Sereda I. N., Tseluyko A. F. Features of electron beam evaporation under surface electron beam formation // Problems of Atomic Science and Technology. Series: "Plasma physics". 2014. №6 (94). P. 149–152. (*Особистий внесок здобувача: участь у проведенні експерименту, обробці експериментальних даних, обговоренні результатів*). (Видання входить до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science).
2. **Hrechko Ya. O.**, Azarenkov N. A., Dimitrova V. D., Borgun Ie. V., Raybchikov D. L., Sereda I. N., Hryhorenko A. V., Tseluyko A. F. Dynamics of EUV-radiation from the partially contracted plasma diode // Problems of Atomic Science and Technology. Series: "Plasma physics". 2015. №1 (95). P. 190–193. (*Особистий внесок здобувача: участь у проведенні експерименту, обробці експериментальних даних, обговоренні та інтерпретації результатів, написанні статті*). (Видання входить до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science).
3. **Hrechko Ya. O.**, Azarenkov N. A., Babenko Ie. V., Raybchikov D. L., Vusyk N. N., Tseluyko A. F. Anisotropy of radiation from dense plasma of multiply ionized atoms // Problems of Atomic Science and Technology. Series: "Plasma Electronics and New Methods of Acceleration". 2015. №4 (98). P. 32–35. (*Особистий внесок здобувача: участь у проведенні теоретичних розрахунків, обговоренні та інтерпретації*

результатів, написанні статті). (Видання входить до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science).

4. **Hrechko Ya. O.**, Azarenkov N. A., Babenko Ie. V., Raybchikov D. L., Sereda I. N., Shovkun M. A., Tseluyko A. F. Features of active power definition in high-current pulsed discharge // Problems of Atomic Science and Technology. Series: "Plasma physics". 2016. №6 (106). P. 48–51. (*Особистий внесок здобувача: участь у проведенні теоретичних розрахунків, обробці експериментальних даних, обговоренні та інтерпретації результатів, написанні статті*). (Видання входить до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science).
5. **Hrechko Ya. O.**, Azarenkov N. A., Babenko Ie. V., Raybchikov D. L., Sereda I. N., Shovkun M. A., Tseluyko A. F. The capacitive component of double layer current in plasma // Problems of Atomic Science and Technology. Series: "Plasma physics". 2017. №1 (107). P. 219–222. (*Особистий внесок здобувача: участь у проведенні теоретичних розрахунків та експерименту, обробці експериментальних даних, обговоренні та інтерпретації результатів, написанні статті*). (Видання входить до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science).
6. **Hrechko Ya. O.**, Azarenkov N. A., Babenko Ie. V., Raybchikov D. L., Sereda I. N., Boloto D. A., Tseluyko A. F. Electrodes dimensions effect on the self-sustained plasma-beam discharge power // Problems of Atomic Science and Technology. Series: "Plasma Electronics and New Methods of Acceleration". 2018. №4 (116). P. 156–159. (*Особистий внесок здобувача: участь у проведенні експерименту, обробці експериментальних даних, обговоренні та інтерпретації результатів, написанні статті*). (Видання входить до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science).
7. **Hrechko Ya. O.**, Azarenkov N. A., Babenko Ie. V., Raybchikov D. L., Sereda I. N., Boloto D. A., Tseluyko A. F. Effect of the external magnetic field on the dynamics and power of the self-sustained plasma-beam discharge // Problems of Atomic Science and Technology. Series: "Plasma Physics". 2018. №6 (118). P. 198–201. (*Особистий внесок здобувача: участь у проведенні експерименту, обробці експериментальних даних, обговоренні та інтерпретації результатів, написанні статті*). (Видання входить до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science).
8. **Hrechko Ya. O.**, Azarenkov N. A., Tseluyko A. F., Raybchikov D. L., Sereda I. N. Methods for control the self-sustained plasma-beam discharge at high energy density power // Problems of Atomic Science and Technology. Series: "Plasma Electronics and New Methods of Acceleration". 2019. №4 (122). P. 151–154. (*Особистий внесок здобувача: участь у проведенні експерименту, обробці експериментальних даних, обговоренні та інтерпретації результатів, написанні статті*). (Видання входить до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science).

Наукові праці у наукових періодичних виданнях інших держав, що входять до міжнародних наукометричних баз:

9. **Hrechko Ya. O.**, Azarenkov N. A., Tseluyko A. F., Babenko Ie. V., Raybchikov D. L., Sereda I. N. Self-Sustained Plasma-Beam Discharge at High Energy Density // IEEE Transactions on Plasma Science. 2018. Vol. 46, No. 10. P. 3541–3546. (*Особистий*

внесок здобувача: участь у проведенні експерименту, обробці експериментальних даних, обговоренні та інтерпретації результатів, написанні статті). (Видання входить до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science).

Наукові праці апробаційного характеру (тези доповідей на наукових конференціях) за темою дисертації:

10. Misiura I. N., Girka I. A., Azarenkov N. A., Borgun Ie. V., **Hrechko Ya. O.**, Hryhorenko A. V., Dimitrova V. D., Raybchikov D. L., Sereda I. N., Tseluyko A. F. Features of electron beam evaporation under surface electron beam formation // International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion and The Adjoint Workshop «Nano- and micro-sized structures in plasmas», 15–18 Sept. 2014. : abstr. Kharkiv, 2014. P. 119. *(Особистий внесок здобувача: участь у проведенні експерименту, обробці експериментальних даних, обговоренні та інтерпретації результатів).*
11. **Hrechko Ya. O.**, Azarenkov N. A., Dimitrova V. D., Borgun Ie. V., Raybchikov D. L., Sereda I. N., Hryhorenko A. V., Tseluyko A. F. Dynamics of EUV-radiation from the partially contracted plasma diode // International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion and The Adjoint Workshop «Nano- and micro-sized structures in plasmas», 15–18 Sept. 2014. : abstr. Kharkiv, 2014. P. 132. *(Особистий внесок здобувача: участь у проведенні експерименту, обробці експериментальних даних, обговоренні та інтерпретації результатів, написанні тез доповіді).*
12. **Гречко Я. О.**, Азаренков Н. А., Бабенко Е. В., Рябчиков Д. Л., Вусык Н. Н., Целуйко А. Ф. Приповерхностное формирование интенсивных электронных пучков в системе электронно-лучевого испарения // ІЕФ-2015 : Міжнар. конф. молодих учених і аспірантів, 18–22 трав. 2015 р. : матеріали конф. Ужгород, 2015. С. 92–93. *(Особистий внесок здобувача: участь у проведенні експерименту, обробці експериментальних даних, обговоренні та інтерпретації результатів, написанні тез доповіді).*
13. **Гречко Я. О.**, Азаренков Н. А., Бабенко Е. В., Рябчиков Д. Л., Середя І. М., Вусик М. М., Целуйко О. Ф. Збільшення ефективності конверсії в плазмових джерелах ультрафіолетового випромінювання // Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу – 2015, 22–23 верес. 2015 р. : матеріали конф. Київ, 2015. С. 14. *(Особистий внесок здобувача: участь у проведенні експерименту, обробці експериментальних даних, обговоренні та інтерпретації результатів, написанні тез доповіді).*
14. **Hrechko Ya. O.**, Azarenkov N. A., Tseluyko A. F. Active power dynamics in limited plasma diode // Towards Fusion Energy : 13th Kudowa Summer School, 13–17 June 2016. : contrib. Kudowa-Zdroj, 2016. P. 69–73. *(Особистий внесок здобувача: участь у проведенні теоретичних розрахунків та експерименту, обробці експериментальних даних, обговоренні та інтерпретації результатів, написанні тез доповіді).*
15. **Hrechko Ya. O.**, Azarenkov N. A., Babenko Ie. V., Raybchikov D. L., Tseluyko A. F. Using of high-current limited plasma diode for high-gradient influence on solids // 27th Symposium on Plasma Physics and Technology, 20–23 June 2016. : Plasma Physics

- and Technology. Vol. 3, Iss. 1. Prague, 2016. P. 50. (*Особистий внесок здобувача: участь у проведенні експерименту, обробці експериментальних даних, обговоренні та інтерпретації результатів, написанні тез доповіді*).
16. **Hrechko Ya. O.**, Azarenkov N. A., Babenko Ie. V., Raybchikov D. L., Sereda I. N., Shovkun M. A., Tseluyko A. F. Features of active power definition in high-current pulsed discharge // International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion, 12–15 Sept. 2016. : abstr. Kharkiv, 2016. P. 51. (*Особистий внесок здобувача: участь у проведенні теоретичних розрахунків та експерименту, обробці експериментальних даних, обговоренні та інтерпретації результатів, написанні тез доповіді*).
 17. Shovkun M. A., **Hrechko Ya. O.**, Azarenkov N. A., Babenko Ie. V., Raybchikov D. L., Sereda I. N., Tseluyko A. F. Capacitive component of double layer current in plasma // International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion, 12–15 Sept. 2016. : abstr. Kharkiv, 2016. P. 53. (*Особистий внесок здобувача: участь у проведенні теоретичних розрахунків та експерименту, обробці експериментальних даних, обговоренні та інтерпретації результатів, написанні тез доповіді*).
 18. **Гречко Я. О.**, Азарєнков М. О., Литовченко С. В., Бабенко Є. В., Рябчіков Д. Л., Каширін А. В., Целуйко О. Ф. Подвійний електричний шар як засіб інтенсивного впливу на поверхню твердого тіла // ІЕФ-2017 : Міжнар. конф. молодих учених і аспірантів, 23–26 трав. 2017 р. : матеріали конф. Ужгород, 2017. С. 86–87. (*Особистий внесок здобувача: участь у проведенні експерименту, обробці експериментальних даних, обговоренні та інтерпретації результатів, написанні тез доповіді*).
 19. **Hrechko Ya.**, Azarenkov N., Tseluyko A., Babenko Ie., Ryabchikov D., Sereda I., Kashirin A. The efficiency of the pulsed power input in the limited plasma diode // 2017 IEEE 21st International Conference on Pulsed Power (PPC). Brighton, 2017. P. 1–4. (*Особистий внесок здобувача: участь у проведенні експерименту, обробці експериментальних даних, обговоренні та інтерпретації результатів, написанні тез доповіді*).
 20. **Hrechko Ya. O.**, Azarenkov N. A., Babenko Ie. V., Ryabchikov D. L., Sereda I. N., Kashirin A. V., Tseluyko A. F. Plasma pinch stabilization in high-current pulsed plasma diode for direction EUV radiation generation // Electronics and Applied Physics : XIII Internat. Sci. Conf., 24–27 Oct. 2017. : Proc. of the XIII Internat. Sci. Conf. “Electronics and Applied Physics”. Kyiv, 2017. P. 155–156. (*Особистий внесок здобувача: участь у проведенні експерименту, обробці експериментальних даних, обговоренні та інтерпретації результатів, написанні тез доповіді*).
 21. **Hrechko Ya. O.**, Azarenkov N. A., Babenko Ie. V., Ryabchikov D. L., Sereda I. N., Boloto D. A., Tseluyko A. F. Effect of the external magnetic field on the dynamics and power of the self-sustained plasma-beam discharge // International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion, 10–13 Sept. 2018. : abstr. Kharkiv, 2018. P. 119. (*Особистий внесок здобувача: участь у проведенні експерименту, обробці експериментальних даних, обговоренні та інтерпретації результатів, написанні тез доповіді*).

22. **Гречко Я. О.**, Азаренков М. О., Рябчиков Д. Л., Середа І. М., Целуйко О. Ф. Методи керування самостійним плазмово-пучковим розрядом при високій густині енергії // ІЕФ-2019 : Міжнар. конф. молодих вчених та аспірантів, 21–24 трав. 2019 р. : матеріали конф. Ужгород, 2019. С. 134–135. (*Особистий внесок здобувача: участь у проведенні експерименту, обробці експериментальних даних, обговоренні та інтерпретації результатів, написанні тез доповіді*).

АНОТАЦІЯ

Гречко Я.О. Динаміка самостійного плазмово-пучкового розряду при високій густині енергії. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 – фізика плазми. – Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України. – Харків, 2020.

Дисертаційну роботу присвячено експериментальному та теоретичному дослідженню умов формування та динаміки самостійного плазмово-пучкового розряду при високій густині енергії в сильнострумовому імпульсному плазмовому діоді з просторовими та магнітними засобами локалізації подвійного електричного шару об'ємного заряду. Показано, що при збудженні розряду за умов густої (понад 10^{16} см^{-3}) плазми багаторазово іонізованих атомів можливе локальне введення великої імпульсної потужності (понад 100 МВт та питомій потужності понад 2 ГВт/см^2) при відносно невеликому енергозапасі конденсаторної батареї (до 200 Дж). Встановлено засоби керування розрядом, які дають можливість підвищити ефективність введення імпульсної потужності до розряду. Розроблено методику розрахунку динаміки активної потужності сильнострумового імпульсного розряду мікросекундного діапазону. Визначено принципові особливості, які необхідно враховувати при розрахунках. Здобуто вираз для ємності сильного подвійного шару та рівняння для знаходження ємнісної складової струму подвійного шару, яке дає можливість виділити частку ємнісного струму в загальному розрядному струмі. Проведено фізичне моделювання формування подвійного шару в стаціонарній системі при зменшеній густині енергії, яке показало стаціонарність існування самостійного плазмово-пучкового розряду.

Ключові слова: імпульсна потужність, плазма багаторазово іонізованих атомів, плазмовий діод, подвійний електричний шар, самостійний плазмово-пучковий розряд, сильнострумовий імпульсний розряд.

АННОТАЦИЯ

Гречко Я.О. Динамика самостоятельного плазменно-пучкового разряда при высокой плотности энергии. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы. – Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина Министерства образования и науки Украины. – Харьков, 2020.

Диссертационная работа посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию условий формирования и динамики самостоятельного плазменно-

пучкового разряда при высокой плотности энергии в сильноточном импульсном плазменном диоде с пространственными и магнитными способами локализации двойного электрического слоя объемного заряда. Показано, что при возбуждении разряда в условиях плотной (свыше 10^{16} см^{-3}) плазмы многократно ионизированных атомов возможен локальный ввод большой импульсной мощности (свыше 100 МВт и удельной мощности более 2 ГВт/см^2) при относительно небольшом энергозапасе конденсаторной батареи (до 200 Дж). Установлены способы управления разрядом, которые позволяют повысить эффективность ввода импульсной мощности в разряд. Разработана методика расчета динамики активной мощности сильноточного импульсного разряда микросекундного диапазона. Определены принципиальные особенности, которые необходимо учитывать при расчетах. Получено выражение для емкости сильного двойного слоя и уравнение для нахождения емкостной составляющей тока двойного слоя, которое позволяет выделить долю емкостного тока в общем разрядном токе. Проведено физическое моделирование формирования двойного слоя в стационарной системе при уменьшенной плотности энергии, которое показало стационарность существования самостоятельного плазменно-пучкового разряда.

Ключевые слова: импульсная мощность, плазма многократно ионизированных атомов, плазменный диод, двойной электрический слой, самостоятельный плазменно-пучковый разряд, сильноточный импульсный разряд.

ABSTRACT

Hrechko Ya.O. Dynamics of self-sustained plasma-beam discharge at high energy density. – Manuscript.

Thesis for a Candidate Degree in Physics and Mathematics, Specialty 01.04.08 – Plasma Physics. – V. N. Karazin Kharkiv National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine. – Kharkiv, 2020.

The thesis is devoted to the experimental and theoretical study of the formation conditions and dynamics of the self-sustained plasma-beam discharge at high energy density in the high-current pulsed plasma diode of low pressure. The design feature of this plasma diode is the limitation of the high-voltage electrode working surface. This made it possible to concentrate high current density (up to 2 MA/cm^2) on high-voltage electrode and promoted the formation of the space charge double layer near its working surface.

In order to evaluate the efficiency of energy input into the plasma, a method for calculating the active power of a high-current pulsed discharge is provided. The dynamics of the discharge active power has been calculated based on the dynamics of the discharge current using the discharge circuit equation of a high-current pulsed discharge. The calculations did not take into account all the active power, but only that which is caused by charged particles beams accelerated in the double layer. The double layer is responsible for the local energy input into the discharge, due to the powerful collective dissipative mechanism of energy transfer from the electron beam to the plasma.

The fundamental features that should be taken into account when calculating active power are indicated. First of all, this concerns the calculation of the inductance and active resistance of the discharge circuit, as well as the choice of the most reliable mathematical model which is responsible for changing the inductance of discharge gap. The next feature

is related to the selection of an adequate method of smoothing the discharge current signal. To preserve the signal “fine structure”, the maximum width of the smoothing window is determined when approximating the signal and obtaining its first derivative. Another feature concerns the need to restore the discharge current, since any current sensor distorts the real waveform. For the induction current sensor used in the work, the equation for restoring the discharge current signal observed from the sensor to its real value is obtained.

The model of non-stationary double electric layer of space charge in the plasma of high-current pulsed discharge is built taking into account the current capacitive component. In the quasi-MHD approximation, an expression for the capacitance of a strong double layer and an integro-differential equation for the capacitive component of the double layer current have been obtained. The last expression allows one to select the share of the capacitive current in the total discharge current.

The experimental studies results of the self-sustained plasma-beam discharge at high energy density in the plasma diode with a limited surface of high-voltage electrode are presented. It is shown that when the discharge is excited under conditions of dense (above 10^{16} cm^{-3}) plasma of multiply ionized atoms, the local input of high pulsed power (over 100 MW and specific power over 2 GW/cm^2) is possible with a relatively small stored energy in capacitor bank (up to 200 J).

In order to stabilize the discharge, to control the double layer location, and to increase the level of discharge active power the discharge control means are identified. The decrease in the area of the high-voltage electrode working surface from $0,2 \text{ cm}^2$ to $0,02 \text{ cm}^2$ made it possible to increase the discharge active power by an average of 40–50%, and the energy released in the discharge by an average of 80%. The power density released at the electrode surface increases from $\sim 0,3 \text{ GW/cm}^2$ to $\sim 5 \text{ GW/cm}^2$ with an initial stored energy of $\sim 140 \text{ J}$. It is determined that partial contraction of the plasma channel with a dielectric insert allows one to increase the discharge active power by an average of 40%, and the energy released in the discharge by 50-60%. It is shown that the use of the external magnetic field of up to 0,1 T, which is created by a system of permanent ring magnets, allows one to influence the discharge dynamics and increase the discharge active power. At initial stored energy of up to 90 J, the greatest increase in power and energy is observed for the case when the high-voltage electrode end is located at the magnetic field minimum, more than 90 J – at the magnetic field inversion point. The results of the study of the external strong (up to 10 T) magnetic field for stabilization a plasma cord at a high-current inductive discharge stage are presented.

The results of physical modeling of the space charge double electric layer in the plasma electron-beam system at reduced energy density are presented. The results proved the possibility of the self-sustained plasma-beam discharge existence in the stationary mode. It was found that in such a system the electron beam current during the formation of dense near-electrode plasma can several times exceed the discharge current of the primary plasma source. This is due to the redistribution of the voltage in the discharge and the occurrence of a non-self-sustained glow discharge under low pressure conditions.

Keywords: pulse power, plasma of multiply ionized atoms, plasma diode, double electric layer, self-sustained plasma-beam discharge, high-current pulsed discharge.