

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

Артюшенко Катерина Павлівна



УДК 537.521.7

Фізичні процеси у приелектродних шарах і плазмі тліючого та високочастотного
ємнісного розрядів

Спеціальність 01.04.08 - фізика плазми

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2018

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Дисертація є рукописом.

Робота виконана в Харківському національному університеті імені
В.Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України та в Науковому фізико-
технологічному центрі Міністерства освіти і науки та НАН України.

Науковий керівник:

доктор фізико-математичних наук, с.н.с.,

Лісовський Валерій Олександрович, Харківський національний
університет імені В.Н. Каразіна, професор кафедри матеріалів
реакторобудування та фізичних технологій.

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, професор

Маслов Василь Іванович,

ННЦ Харківський фізико-технічний інститут,

Інститут плазмової електроніки та нових методів
прискорення

провідний науковий співробітник

кандидат фізико-математичних наук

Цюлко В'ячеслав Володимирович,

Інститут фізики НАН України, м. Київ

старший науковий співробітник відділу газової
електроніки.

Захист відбудеться "___" _____ 2018 року о ___ годині на засіданні
спеціалізованої вченої ради Д 64.051.12 в Харківському національному
університеті імені В.Н. Каразіна за адресою: 61108, м Харків, пр. Курчатова,
31, аудиторія 301.

З дисертацією можна ознайомитися в Центральній науковій бібліотеці
Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна Міністерства
освіти та науки України за адресою: 61022, м. Харків, пл. Свободи, 4.

Автореферат розісланий "___" _____ 2018 р

Вчений секретар
спеціалізованого
вченої ради Д 64.051.12



Гак А.Г.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Незважаючи на те, що тліючий розряд відомий вже більше 200 років, інтерес до нього не слабшає через його широке застосування в газорозрядних лазерах, діодних розпилювальних системах, мережевих фільтрах (surge protectors). Одним з найбільш важливих технологічних процесів з використанням тліючого розряду є плазмове азотування сплавів на основі заліза. Перспективним є також використання тліючого розряду для плазмової стерилізації медичного інструменту та устаткування. Тому велика увага приділяється вивченню процесів, що відбуваються у різних частинах розряду.

Найбільш важливою частиною тліючого розряду є катодний шар, вивченню властивостей якого присвячена велика кількість робіт. У розрядних камерах плазма зазвичай контактує з їх стінками та електродами. В області цього контакту формується перехідна область, яку називають приелектродним (пристінковим) шаром. Для опису такого шару використовують співвідношення, що пов'язує падіння напруги на шарі U , товщину шару d_{sh} , а також густину іонного струму крізь шар J . Це співвідношення називають законом Чайльда-Ленгмюра (закон "3/2"), який був отриманий для випадку руху заряджених частинок крізь шар без зіткнень з молекулами. Однак іони, які перетинають катодний шар, можуть зіштовхуватися з молекулами газу, тому для випадку із зіткненнями використовуються відповідні закони (умовно будемо називати їх також законами Чайльда-Ленгмюра), в яких або довжина вільного пробігу λ_i , або рухливість μ_i іонів не залежать від їх швидкості. Тому становить інтерес з'ясувати, який із законів Чайльда-Ленгмюра може бути використаний для опису характеристик катодного шару у різних газах.

Тліючий розряд може існувати у двох різних режимах (нормальному та аномальному). У нормальному режимі розряд займає лише частину поверхні катоду. Зазвичай вважається, що відношення густини струму до квадрату тиску газу J/p^2 та напруга на катодному шарі в нормальному режимі зберігаються постійними. Однак у роботі [V.A. Lisovskiy *et al.* // The Journal of Kharkov National University (Physical series "Nuclei, Particles, Fields"). – 2009. – No.4. – p. 75] було експериментально показано, що в азоті у нормальному режимі J/p^2 слабо змінюється тільки при достатньо великому тиску газу, а зниження тиску призводить до помітного зростання J/p^2 . Цікавим є дослідити поведінку J/p^2 також в інших газах, оскільки саме нормальний режим використовується в мережевих фільтрах.

У роботі Гюнтершульце (Zeitschrift für Physik, Vol.30, p. 175, 1924) було виявлено, що якщо при фіксованому розрядному струмі змінювати відстань між електродами, то це впливає не лише на довжину позитивного стовпа, темного фарадеєвого простору та негативного світіння, а й на падіння напруги U на катодному шарі та його товщину d_{sh} . Гюнтершульце припустив, що на аноді міститься плівка з адсорбованих газів і що електрони високої енергії, прискорені в катодному шарі, можуть створити в ній більше

позитивних іонів, ніж в зазорі між електродами. Однак Пеннінг [Zeitschrift für Physik, Vol.70, p. 782, 1931] перед проведенням вимірювань нагрівав анод до високої температури, що призвело до його знегажування, і виявив, що для чистого анода ефект все ще спостерігається. Фішер [Zeitschrift für Physik, Vol.110, No.3-4, p. 197, 1938] запропонував своє пояснення цього ефекту, яке пов'язане з охолодженням газу поблизу поверхні холодного анода, що спричиняє підвищення його густини. Але результати Пеннінга для нагрітого аноду спростовують й це припущення. Як бачимо, у наведених роботах (надалі інтерес до цієї проблеми зменшився) не було надано задовільного пояснення залежності характеристик катодного шару від відстані між електродами, що спостерігається. Тому доцільно дослідити залежність напруги на електродах від зазору L між ними у широкому діапазоні відстаней між електродами, зондовим методом визначити осьові профілі параметрів плазми, а також з'ясувати механізм процесів, що відбуваються в тліючому розряді при зміні відстані між електродами.

У дисертаційній роботі розглядався також позитивний стовп тліючого розряду. Важливим параметром є зведене електричне поле E/p (E – напруженість електричного поля, p – тиск газу), яке визначає частоти пружних та непружних зіткнень електронів з молекулами газу, тому значна увага приділяється його експериментальному та теоретичному визначенню. Отже, становить інтерес отримати аналітичні формули для зведеного електричного поля E/p в позитивному стовпі тліючого розряду в інертних та молекулярних газах, які використовуються, наприклад, у газорозрядних лазерах.

Досліджений також у цій дисертаційній роботі ВЧ ємнісний розряд широко застосовується для травління напівпровідних матеріалів, осадження тонких плівок, зміцнення поверхні інструментів, накачування газорозрядних лазерів тощо. При цьому ще з роботи Яценка [ЖТФ, т.52, с. 1220, 1982] відомо, що ВЧ розряд може горіти як в аномальному, так і нормальному режимах. Так як з ростом розрядного струму ВЧ напруга в приелектродних шарах підвищується, а падіння напруги на плазмовій області зменшується, то вольт-амперна характеристика всього розряду має мінімум, якому і відповідає нормальний режим. Авторами [Yu.P. Raizer, M.N. Shneider, N.A. Yatsenko, *Radio-frequency capacitive discharges*, Boca Raton, FL: CRC Press, 1995] отримано формулу для нормальної густини струму J_n , яка не дуже добре узгоджується з результатами експериментів. Тому ефект нормальної густини струму слабкострумової моди ВЧ розряду потребує більш докладних досліджень, як теоретичних, так і експериментальних.

Отже, дослідження тліючого і високочастотного розрядів низького тиску є **актуальними** і становлять значний науковий та прикладний інтерес.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, що містяться в дисертації, були проведені у відповідності з наступною фундаментальною науково - дослідницькою роботою на кафедрі матеріалів реакторобудування та фізичних технологій фізико-технічного факультету Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна:

«Дослідження імпульсних газових розрядів та створення на їх основі обладнання і технологій» (номер держреєстрації 0115U000477, 2015–2017 рр.). Дисертант брала також участь у фундаментальних науково-дослідних роботах, що проводяться в Науковому фізико-технологічному центрі Міністерства освіти і науки НАН України: «Розробка технологій кластерного реактивного іонно-плазмового синтезу наноструктур для потреб електроніки, біомедицини, ядерної енергетики та машинобудування» (номер держреєстрації 0112U006974, 2013–2014 рр.); «Дослідження процесів екстракції з плазми суміщеного іонно-електронного потоку для синтезу і модифікації наноструктур» (номер держреєстрації 0112U000362, 2012–2014 рр.); «Технології формування наноструктур для електроніки, медицини та ядерної енергетики методом кластерного реактивного іонно-плазмового синтезу» (номер держреєстрації 0115U000497, 2015–2016 рр.).

Мета і завдання дослідження. Головною метою дисертаційної роботи є з'ясування структури та властивостей катодного шару та позитивного стовпа тліючого розряду, а також приелектродного шару та квазінейтральної плазми ВЧ ємнісного розряду. Для досягнення цієї мети були сформульовані та визначені наступні завдання про режими горіння тліючого та ВЧ ємнісного розрядів, осьової їх структури, вивчення катодного та приелектродного шарів, а також властивостей позитивного стовпа та квазінейтральної плазми слабкострумового ВЧ розряду:

1. Виміряти товщину і падіння напруги на катодному шарі при різних розрядних струмах і тисках водню та N_2O і встановити, який із законів Чайльда–Ленгмюра може бути використаний для опису його властивостей.
2. Експериментально дослідити нормальний і аномальний режими тліючого розряду в різних газах і виміряти нормальну густину струму в широкому діапазоні тиску (0,05–10 Торр). Дослідити осьову структуру тліючого розряду методом рухомого анода в широкому діапазоні тиску газів і розрядного струму.
3. Методом рухомого анода виміряти зведене електричне поле E/p в позитивному стовпі у аргоні. Розробити аналітичні моделі для зведеного електричного поля у позитивному стовпі у молекулярних та інертних газах.
4. Виміряти нормальну густину струму слабкострумового ВЧ ємнісного розряду в молекулярних газах. Розробити аналітичні моделі для нормальної густини струму для різних режимів руху позитивних іонів крізь приелектродні шари ВЧ ємнісного розряду.

Об'єкт дослідження – тліючий та ВЧ ємнісний розряди за різних умов горіння.

Предмет дослідження – вольт-амперні характеристики тліючого та ВЧ ємнісного розрядів, характеристики катодного шару в широкому діапазоні розрядного струму і тиску газу, залежності внутрішніх та зовнішніх параметрів плазми тліючого розряду від відстані між електродами, осьові профілі параметрів плазми тліючого розряду, режими існування (нормальний і аномальний) тліючого та ВЧ ємнісного розрядів, зведене електричне поле позитивного стовпа у молекулярних та інертних газах.

Методи дослідження – вимірювання вольт-амперних характеристик тліючого та ВЧ ємнісного розрядів, дослідження осьової структури тліючого розряду методом зонда Ленгмюра та методом рухомого анода, вимірювання спектрів випромінювання розряду, фотографування світіння розряду, отримання товщини катодного шару методом обробки фотографій. Розробка аналітичних моделей для позитивного стовпа тліючого розряду та приелектродних шарів ВЧ ємнісного розряду.

Наукова новизна дисертації

1. Встановлено, що в усьому дослідженому діапазоні тиску (0,07 – 2 Торр) водню для опису катодного шару можна застосовувати закон Чайльда-Ленгмюра для постійної рухливості іонів. Для катодного шару у закису азоту при тиску менш ніж 0,3 Торр виконується закон для постійної рухливості іонів, при тиску понад 0,75 Торр – закон для постійної довжини вільного пробігу іонів, а в перехідному діапазоні тиску (між 0,3 і 0,75 Торр) жоден із варіантів закону Чайльда-Ленгмюра не описує коректно катодний шар тліючого розряду у закису азоту.

2. Показано, що відношення нормальної густини струму до квадрату тиску газу J/p^2 зберігається сталим лише при тиску закису азоту, аргону, водню і кисню понад 1 Торр, але при зниженні тиску J/p^2 зростає внаслідок втрат швидких електронів на поверхні аноду.

3. Встановлено причину, яка викликає необхідність збільшення падіння напруги на електродах і товщини катодного шару при віддаленні аноду крізь негативне світіння. Для підтримки фіксованим розрядного струму на анод, що рухається крізь негативне світіння, потрібно підвищувати напругу на електродах, щоб забезпечити досить високий струм швидких електронів, що вийшли з катодного шару й переважно переносять струм на анод.

4. Розроблено аналітичну модель для позитивного стовпа тліючого розряду в інертних та молекулярних електропозитивних газах. Отримано прості формули для зведеного електричного поля, які добре описують результати експериментів.

5. Розроблено аналітичну модель для позитивного стовпа тліючого розряду в аргоні, що враховує вплив метастабільних атомів на величину зведеного електричного поля.

6. Розроблено аналітичну модель слабкострумової моди ВЧ ємнісного розряду, в якій розглянуто окремі випадки постійної довжини вільного пробігу і постійної рухливості позитивних іонів в приелектродних шарах. Експериментально та теоретично показано, що нормальна густина струму ВЧ ємнісного розряду пропорційна тиску газу.

Практичне та теоретичне значення отриманих результатів

Результати досліджень характеристик позитивного стовпа, отримані в дисертаційній роботі, допоможуть оптимізувати лазери на базі тліючого розряду в аргоні, азоті та водні. З'ясований механізм впливу відстані між електродами на падіння напруги на електродах і товщину катодного шару дозволить покращити джерела ультрафіолетового випромінювання, лазери м'якого рентгенівського випромінювання, а також ряд плазмових

технологічних пристроїв на основі тліючого розряду. Отримані результати для нормальної густини струму слабкострумового ВЧ розряду можуть бути використані при удосконаленні технологій травління напівпровідникових матеріалів і осадження тонких плівок з газової фази на зразки і електроди великої площі, а також щілинних лазерів з ВЧ накачуванням.

Особистий внесок здобувача.

В усіх роботах, опублікованих за темою дисертаційної роботи, здобувач брала активну участь у проведенні експериментів, обробці експериментальних результатів, розробці аналітичних моделей, а також написанні тексту статей. З робіт, опублікованих у співавторстві, в дисертації використані лише ті результати, які були отримані автором особисто:

- у роботах [1, 20] здобувач виміряла вольт-амперні характеристики ВЧ розряду в азоті, водні та N_2O , визначила нормальну густину струму, а також розробила аналітичні моделі для нормального режиму слабкострумового ВЧ розряду;
- в роботах [2, 9, 11, 12, 19] здобувач особисто виміряла нормальну густину струму тліючого розряду в N_2O , аргоні, водні та кисні;
- в роботах [3, 8, 13] здобувач особисто обробила фотографії катодного шару за різних розрядних умов, з'ясувала, який із законів Чайльда-Ленгмюра може бути застосований для опису катодного шару розряду постійного струму в N_2O та водні;
- в роботах [4, 5, 7, 15, 16, 18] здобувач розробила аналітичні моделі для зведеного електричного поля у позитивному стовпі тліючого розряду в молекулярних і інертних газах, а також виміряла величину зведеного електричного поля методом рухомого анода;
- в роботах [6, 10, 14] здобувач дослідила вплив відстані між електродами на товщину катодного шару і падіння напруги, обробила фотографії розряду, виміряла осьові профілі параметрів плазми за допомогою ленгмюрівського зонда, розробила аналітичну модель переносу струму на анод швидкими електронами;
- в роботі [17] здобувач особисто виміряла і обробила спектри випромінювання тліючого і високочастотного розрядів.

Апробація результатів дослідження.

Отримані результати неодноразово доповідалися на семінарах кафедри та міжнародних наукових конференціях, а саме: 65th Annual Gaseous Electronics Conference, Austin, Texas, October 22-26, 2012; Intern. Conf.-School on Plasma Physics and Controlled Fusion, Alushta, September 17-22, 2012; 66th Annual Gaseous Electronics Conference, September 30-October 4, 2013, Princeton, New Jersey; 67th Annual Gaseous Electronics Conference, Raleigh, North Carolina, November 2-7, 2014; X International Scientific Conference «Electronics and Applied Physics», October 22-25, 2014 року, Kyiv, Ukraine; International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion, Kharkov, Ukraine, September 15-18, 2014; Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу - 2015 Київ, 22-23 вересня 2015

p. ; XI Intern. Conf. "Electronics and applied physics", Kyiv, October 21-24, 2015; Intern. Conf.-School on Plasma Physics and Controlled Fusion, Kharkiv, Ukraine, September 12-15, 2016. Це також підтверджує обґрунтованість та достовірність отриманих результатів.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 20 наукових робіт, зокрема 10 статей в наукових журналах, причому всі 10 статей опубліковано в журналах, які включені в наукометричні бази Scopus і Web of Science. 6 статей за темою дисертації опубліковані в закордонних фахових виданнях. 10 робіт було опубліковано в матеріалах і тезах доповідей на наукових конференціях. Наведені публікації повно відображають зміст дисертації.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота містить вступ, п'ять розділів основного тексту, 81 рисунок, висновки і список використаних літературних джерел з 219 найменувань. Повний обсяг дисертації становить 180 сторінок. Список використаних літературних джерел займає 20 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено мету та завдання роботи, показано зв'язок роботи з науковими програмами і темами, наведені наукова новизна отриманих результатів та їх практичне значення, особистий внесок здобувача в наукових працях і відомості про апробацію результатів.

У першому розділі наведено короткий огляд літератури за темою цієї дисертації, проведено аналіз основних результатів інших авторів. У цьому розділі було сформульовано низку наукових завдань, які були розв'язані в рамках дисертаційної роботи.

У другому розділі наведено опис розрядних трубок, в яких проводилися експерименти, умов їх проведення, використаного діагностичного обладнання. Детально описана методика зондових вимірювань параметрів плазми і обробки отриманих результатів. Для з'ясування властивостей катодного шару і позитивного стовпа тліючого розряду використовувалася камера, блок-схема якої показана на рис. 1. Розрядна трубка мала внутрішній діаметр 56 мм. Відстань між плоским катодом і рухомим плоским анодом могла змінюватися в діапазоні $L = 5 - 385$ мм. При цьому використовувалися електроди з нержавіючої сталі діаметром

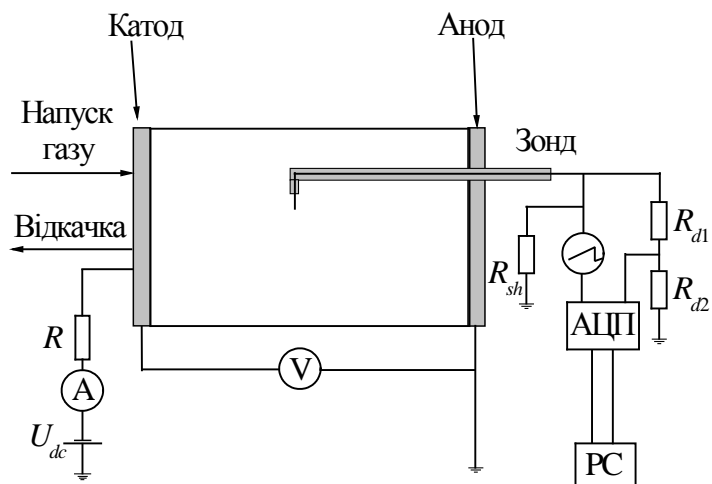


Рис.1. Блок-схема експериментальної установки для дослідження тліючого розряду.

55 мм і в ряді випадків 12 мм. Тліючий розряд запалювався в азоті, закису азоту, кисні, водні, N_2O і аргоні в діапазоні тиску $p = 0,05 - 10$ Торр, в діапазоні струму до 100 мА та прикладених напруг до 4000 В.

Для дослідження ВЧ емнісного розряду використовувалася установка, блок-схема показана на рис. 2. ВЧ напруга з амплітудою $U_{rf} < 1500$ В і частотою $f = 13,56$ МГц від генератора подавалася через узгоджувальний пристрій на потенціальний електрод, а інший електрод був заземлений. Експерименти проводилися в азоті, водні та N_2O у діапазоні тиску $p \approx 0,04 - 6$ Торр при відстанях між електродами $L = 7 - 31$ мм. Плоскі електроди з нержавіючої сталі мали діаметр 98 мм. Між електродами вакуумно ущільнювався відрізок кварцової трубки з внутрішнім діаметром 100 мм. Для видалення постійної напруги між електродами підключався дросель індуктивністю $L_c = 4$ мГн. За допомогою пояса Роговського вимірювалася амплітуда ВЧ струму, при

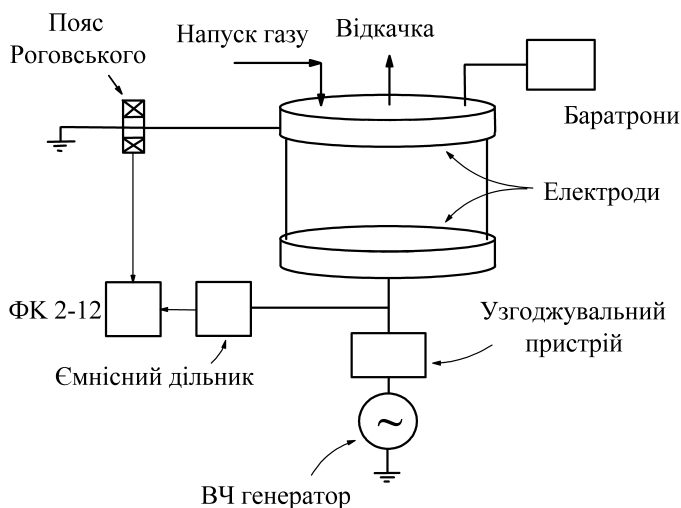


Рис. 2. Схема експериментальної установки для вивчення ВЧ емнісного розряду.

цьому сигнал з пояса надходив на вимірювач різниці фаз ФК 2-12. Для вимірювання амплітуди ВЧ напруги до потенціального електрода підключався ємнісний дільник, сигнал з якого також надходив на ФК 2-12.

У третьому розділі з'ясовано, який із законів Чайльда-Ленгмюра (за умови руху іонів крізь шар без зіткнень з молекулами газу, а також з урахуванням зіткнень з постійною довжиною вільного пробігу і постійною рухливістю позитивних іонів) потрібно використовувати для опису катодного шару при низькому тиску N_2O та водню. Закони Чайльда-Ленгмюра можна записати в загальному вигляді як

$$I = C \cdot \frac{U^m}{d^n}, \quad (1)$$

де $I = J \cdot S$ – розрядний струм, S – площа катода. Для закону без зіткнень іонів з молекулами газу $m = 1,5$, $n = 2$; для законів з постійною довжиною вільного пробігу $m = 1,5$, $n = 2,5$ і постійною рухливістю $m = 2$, $n = 3$, відповідно.

Вимірявши одночасно величини розрядного струму I , падіння напруги у катодному шарі U і товщини катодного шару d для різних фіксованих тисків газу, можна побудувати залежності струму I від відношення U^m/d^n . Якщо для однієї з пар m і n експериментальні залежності $I(U^m/d^n)$ будуть добре описуватися прямою лінією, проведеної з початку координат, то закон

Чайльда-Ленгмюра, якому ця пара m і n відповідає, може бути використаний для опису катодного шару. Результати для N_2O представлені на Рис. 3.

З Рис. 3 випливає, що для тисків N_2O від 0,06 до 0,3 Торр найбільш близька до лінійної залежність спостерігається для $m=2$ та $n=3$ (для постійної рухливості). При тиску 0,5 Торр жодна із залежностей $I=f(U^m/d^n)$ для різних m та n не вкладається на пряму лінію. І при тиску N_2O , починаючи з 0,75 Торр, лінійною є залежність для $m=1,5$ та $n=2,5$ для постійної довжини вільного пробігу іонів в катодному шарі. Мабуть, при низькому тиску відбувається значна дисоціація молекул N_2O електронним ударом з подальшою іонізацією молекул NO , що утворилися. Позитивні іони NO^+ при зіткненнях з молекулами N_2O не можуть перезаряджатися, так як потенціал іонізації молекул NO 9,26 еВ менше, ніж потенціал іонізації N_2O 12,89 еВ. Отже, їх рух крізь катодний шар має описуватися законом Чайльда-Ленгмюра для постійної рухливості іонів.

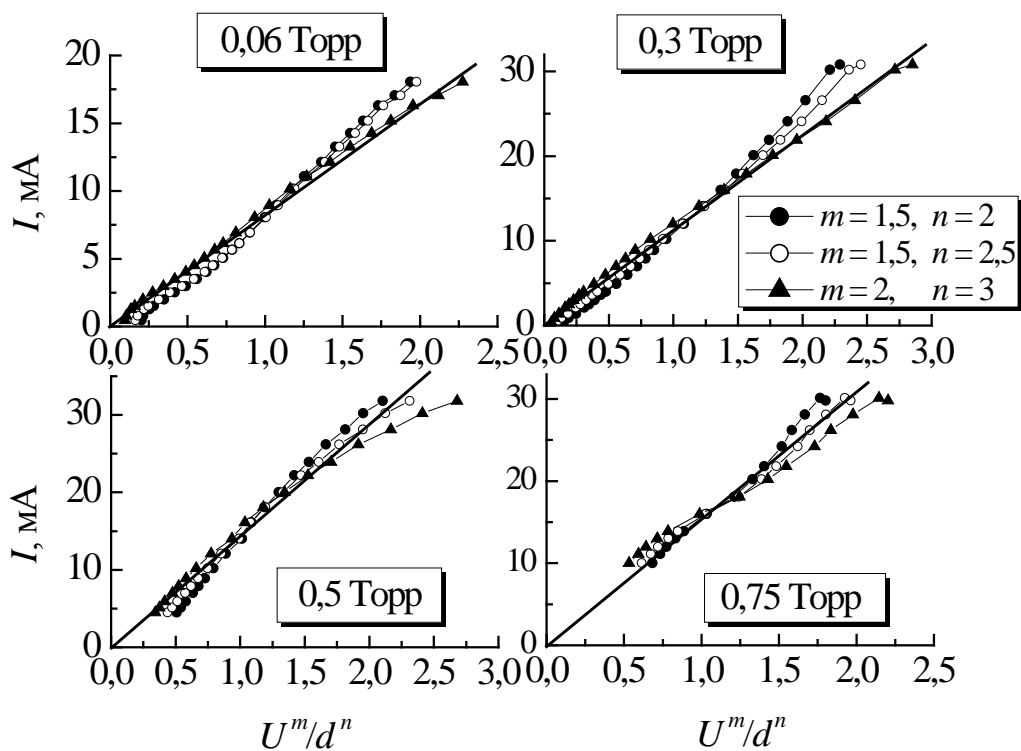


Рис. 3. Залежності розрядного струму від величини відношення U^m/d^n ($m=1,5, n=2$; $m=1,5, n=2,5$; $m=2, n=3$) для різних значень тиску N_2O .

У всьому дослідженому нами діапазоні тиску водню (0,07 – 2 Торр) показано, що для опису катодного шару може бути застосовний тільки закон Чайльда-Ленгмюра для постійної рухливості μ_i іонів. Оскільки в катодному шарі домінуючими є позитивні іони H^+ і H_3^+ , які перезаряджаються з молекулами водню тільки при високих енергіях, то на рух іонів можуть впливати сили поляризації. Зіткнення іонів з молекулами газу в катодному шарі відбуваються як зіткнення жорстких куль завдяки тому, що іони в сильному електричному полі набувають високу енергію. Це призводить до того, що дрейфова швидкість іонів пропорційна не тільки зведеному

електричному полю $(E/N)^{0.5}$, але і обернено пропорційна квадратному кореню з перерізу σ_{in} іон-молекулярних зіткнень. У цій роботі аналітично отримано, що з урахуванням залежності перерізу σ_{in} від енергії іонів закон для постійної рухливості μ_i іонів виконується навіть у сильному електричному полі катодного шару.

Процеси в катодному шарі (і тільки в ньому) вважають відповідальними за існування двох різних режимів горіння тліючого розряду: нормального і аномального. У цій роботі з

виміряних вольт-амперних характеристик було визначено величини параметра подібності J/p^2 в N_2O , аргоні, водні та кисні в діапазоні тиску газу від 0,1 до 10 Торр. Отримано, що відношення нормальної густини струму до квадрату тиску газу J/p^2 зберігається сталим тільки при тиску газу понад 1 Торр (див. Рис.4) – для N_2O $J/p^2 = 0,44 \pm 0,03$ мА/(см·Торр)², для H_2 – $J/p^2 = 0,072 \pm 0,02$ мА/(см·Торр)², для O_2 $J/p^2 = 0,33 \pm 0,05$ мА/(см² Торр²) та $J/p^2 = 0,092 \pm 0,02$ мА/(см² Торр²) для аргону. Однак зниження тиску (менш ніж 1 Торр) призводить до швидкого зростання відношення J/p^2 , яке може бути в десятки і сотні разів вище, ніж при тиску газу понад 1 Торр. Запропоновано механізм, відповідальний за це явище – це підвищена втеча швидких електронів, які вийшли з катодного шару, крізь негативне світіння на анод в разі низького тиску газу і малих відстаней між електродами, а також певною мірою, можливо, втрати заряджених частинок з плазмового шнура нормального режиму внаслідок амбіполярної дифузії. Тому умови виникнення нормального режиму визначаються не лише процесами в катодному шарі, але і в інших частинах тліючого розряду.

Той факт, що параметри катодного шару залежать ще й від процесів в негативному світінні, яке межує з ним, підтверджується проведеною в цій роботі серією експериментів щодо впливу відстані між катодом і анодом на товщину катодного шару і падіння напруги на електродах. Було показано, що якщо анод є рухомим і віддаляється від катода, перебуваючи при цьому в негативному світінні, то падіння напруги на електродах і товщина катодного шару збільшуються. Але переміщення анода крізь темний фарадеевський простір і позитивний стовп не впливає на товщину катодного шару.

Методом ленгмюрівського зонда для вузького розрядного проміжку (коли розряд складається тільки з катодного шару і негативного світіння) показано, що при одній і тій самій величині розрядного струму густина

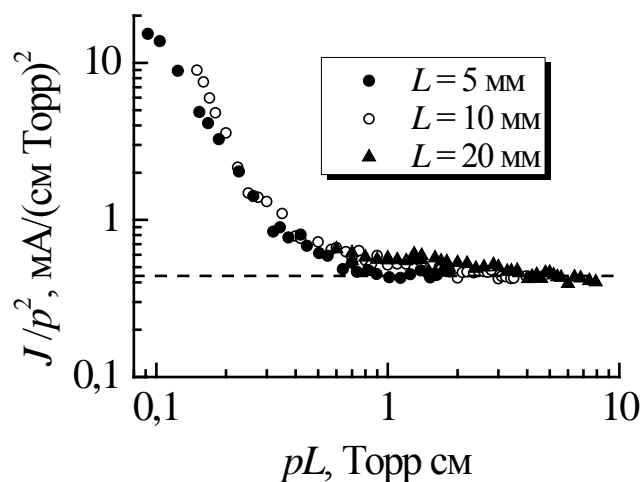


Рис. 4. Залежність J/p^2 від добутку pL при різних відстанях між електродами для N_2O .

плазми в негативному світінні в довгих зазорах між електродами вища, ніж в коротких (див. рис.5). Аналогічний результат отримано також за допомогою коду ООРІС Pro (“частинка в комірці”).

У цій роботі пояснено, як впливає відстань між катодом і анодом на падіння напруги на електродах і на товщину катодного шару (коли анод перебуває в негативному світінні). Оскільки струм на анод (що розташований в негативному світінні) переноситься переважно швидкими електронами, які вийшли з катодного шару, то віддалення анода від межі катодного шару призводить до послаблення потоку цих швидких електронів через їх непружні зіткнення з молекулами газу. Тоді для підтримки розрядного струму на анод фіксованим потрібно підвищувати напругу на електродах, щоб забезпечити досить високий струм швидких електронів. У свою чергу, це призведе до збільшення і товщини катодного шару, і густини плазми в негативному світінні. Аналітичні розрахунки, наведені в кінці 3 розділу, підтверджують коректність запропонованого в дисертаційній роботі пояснення.

У четвертому розділі наведена аналітична модель для позитивного стовпа тліючого розряду в інертних та молекулярних газах. Розглянуто випадок, коли народження заряджених частинок відбувається внаслідок прямої іонізації молекул газу електронним ударом, при цьому єдиним механізмом їх втрат є амбіполярна втеча на стінки розрядної трубки. У позитивному стовпі частота іонізації ν_i і коефіцієнт амбіполярної дифузії D_a зв'язані співвідношенням

$$\frac{\nu_i}{D_a} = \frac{1}{\Lambda^2} = \left(\frac{2.405}{R} \right)^2 \quad (2)$$

де Λ - дифузійна довжина, R – радіус трубки. Частоту іонізації запишемо у вигляді $\nu_i = \alpha \cdot V_{dr}$, де α - перший коефіцієнт Таунсенда для іонізації.

У молекулярних газах (азот, водень)

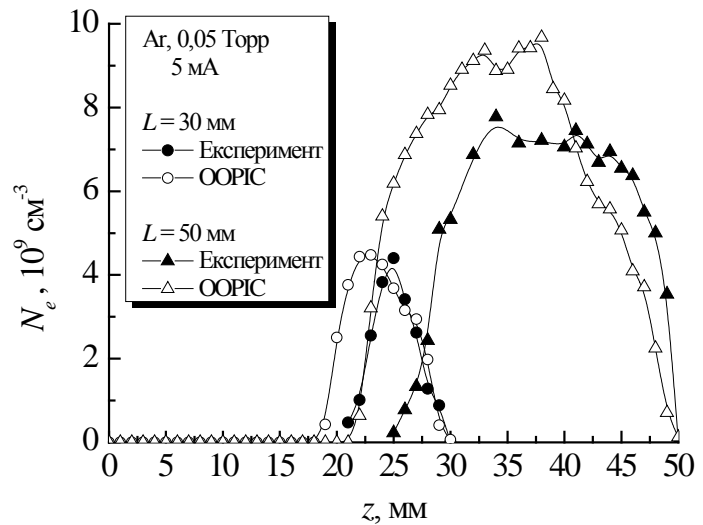


Рис. 5. Осеві профілі густини плазми при тиску аргону 0,05 Торр і струмі 5 мА для зазорів між електродами 30 мм і 50 мм. Суцільні символи – експериментальні дані, порожні символи – розрахунок за допомогою ООРІС Pro кода.

$$\frac{\alpha}{p} = A \cdot \exp\left(-\frac{B}{E/p}\right) \quad (3)$$

де A і B - константи, що залежать від сорту газу. Дрейфова швидкість електронів дорівнює $V_{dr} = \mu_e \cdot E = \mu_{e1} \cdot E/p$, де μ_{e1} - рухливість електронів при тиску 1 Торр. Коефіцієнт амбіполярної дифузії можна записати у вигляді

$$D_a = \frac{1}{p} \cdot \left(D_{i1} + D_{e1} \cdot \frac{\mu_{i1}}{\mu_{e1}} \right) \quad (4)$$

Введемо допоміжну змінну $z = B/(E/p)$, тоді з (2) – (4) випливає

$$z \cdot \exp(z) = \frac{A \cdot B \cdot \mu_{e1}}{D_{i1} + D_{e1} \cdot (\mu_{i1}/\mu_{e1})} \cdot \frac{(pR)^2}{(2.405)^2} \quad (5)$$

Рівняння балансу (5) не має аналітичного розв'язку для зведеного електричного поля через його трансцендентність. Тому бажано підібрати прийнятну апроксимаційну формулу для $F(z) = z \cdot \exp(z)$. Величини z звичайно знаходяться в діапазоні 10 – 100. У цьому діапазоні знайдена наступна апроксимаційна формула для $F(z)$:

$$F(z) = z \cdot \exp(z) \approx Fa(z) = 10 \cdot [\exp(z^{1.007}) - 1]. \quad (6)$$

Далі підставимо праву частину (6) в (5) і після простих перетворень отримаємо формулу для зведеного електричного поля E/p :

$$\frac{E}{p} = B \cdot \left\{ \ln \left[1 + \frac{A \cdot B \cdot \mu_{e1}}{10 \cdot [D_{i1} + D_{e1} \cdot (\mu_{i1}/\mu_{e1})]} \cdot \frac{(pR)^2}{(2.405)^2} \right] \right\}^{-0.992}. \quad (7)$$

З формули (7) видно, що у випадку позитивного стовпа в амбіполярному режимі з прямою іонізацією молекул газу зведене електричне поле E/p залежить тільки від добутку pR та від сорту газу. На Рис.6 представлені результати наших розрахунків для водню за допомогою рівняння (7), а також експериментальні дані [Amorim J. *et al.* // J. Appl. Phys. – 1997. – Vol.82. – p. 2795] і результати кінетичного моделювання [Gordiets V. *et al.* // Plasma Sources Sci. Technol. – 1998. – Vol.7. – p. 363]. Розрахована нами залежність зведеного електричного поля E/p від добутку pR добре узгоджується як з експериментальними, так і

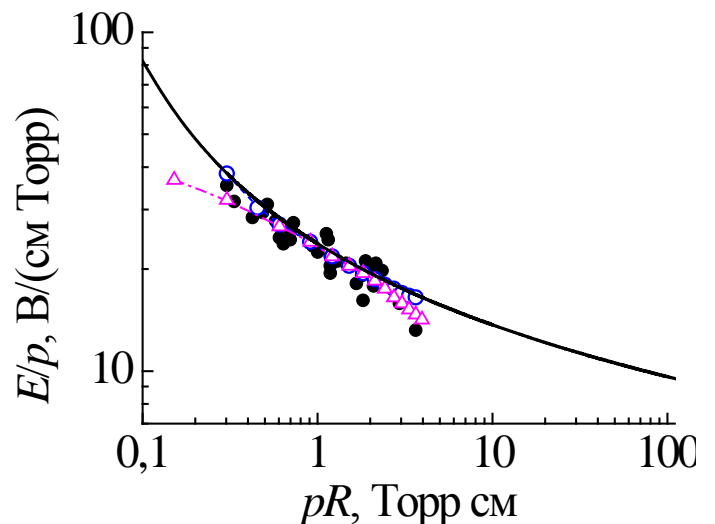


Рис.6. Залежності зведеного електричного поля E/p для водню від добутку pR . Суцільна лінія - розрахунок за допомогою рівняння (7), суцільні точки - зондові вимірювання [Amorim J.], порожні трикутники - модель [Amorim J.], порожні точки - модель [Gordiets V.].

теоретичними даними інших авторів.

Також експериментально і теоретично досліджений позитивний стовп розряду постійного струму в аргоні. Методом рухомого анода виміряне зведене електричне поле E/p в діапазоні добутку тиску газу і радіуса трубки $0,01 < pR < 30$ Торр·см. Отримано добре узгодження як експериментальними даними інших авторів при $pR \leq 1$ Торр·см, так і з чисельними моделями в діапазоні $pR \leq 0,3$ Торр·см.

Запропоновано дві аналітичні моделі для зведеного електричного поля E/p в інертних газах. У першій з них було розглянуто однорідний позитивний стовп в амбіполярному режимі (як і в наведеному вище випадку для молекулярних газів). При цьому було враховано, що для інертних газів перший коефіцієнт Таунсенда (3) залежить від $(E/p)^{1/2}$, а не від E/p . Результати розрахунків добре узгоджуються з експериментальними даними в діапазоні $pR \leq 0,3$ Торр·см. Однак ця модель не враховує процеси за участю метастабільних атомів аргону в підтримці позитивного стовпа.

У другій моделі розглянуті такі процеси, як пряма іонізація атомів аргону електронним ударом (із частотою ν_i), народження метастабільних атомів електронним ударом (з константою швидкості K_m) ступінчаста іонізація (K_{sw}), втрати метастабільних атомів при зіткненнях з електронами при ударах другого роду з електронами (K_d), а також процеси збудження з метастабільного рівня на випромінюючі (K_{me1}) і на резонансні рівні (K_{me2}), втрати метастабільних атомів при парних зіткненнях один з одним (K_{mi}), і дифузійна втеча метастабільних атомів на стінки розрядної трубки (з коефіцієнтом D_m).

Були записані рівняння балансу для електронів та метастабільних атомів в стаціонарному позитивному стовпі, які беруть до уваги наведені вище процеси. В результаті отримано рівняння для зведеного електричного поля, яке залежить від густини розрядного струму j_e , тиску газу і радіуса трубки:

$$\frac{j_e \cdot \left[\nu_i - \left(\frac{D_a}{\Lambda^2} \right) + K_m \cdot N \right]}{e \cdot V_{dr} \cdot \left(\frac{D_m}{\Lambda^2} \right) + j_e \cdot (K_d + K_{me})} = \frac{-b + \sqrt{D}}{2 \cdot K_{mi} \cdot (K_d + K_{me})}, \quad (8)$$

де

$$D = \left[K_{mi} \cdot \frac{D_a}{\Lambda^2} - \nu_i \cdot K_{mi} - K_{sw} \cdot \frac{D_m}{\Lambda^2} - K_{mi} \cdot K_m \cdot N \right]^2 + 4 \cdot K_{mi} \cdot (K_d + K_{me}) \cdot \frac{D_m}{\Lambda^2} \cdot \left(\nu_i - \frac{D_a}{\Lambda^2} \right),$$

$$b = K_{mi} \cdot \left(\frac{D_a}{\Lambda^2} - \nu_i - K_m \cdot N \right) - K_{sw} \cdot \frac{D_m}{\Lambda^2}.$$

Результати розрахунків за допомогою цієї моделі добре узгоджуються з нашими експериментальними даними у всьому дослідженому діапазоні pR (див. Рис.7).

У п'ятому розділі представлені результати експериментального дослідження ВЧ ємнісного розряд у водні, азоті та N_2O при частоті ВЧ поля 13,56 МГц, різноманітних відстанях між електродами і тисках газів. Показано, що при низькому тиску розряд горить тільки в аномальному

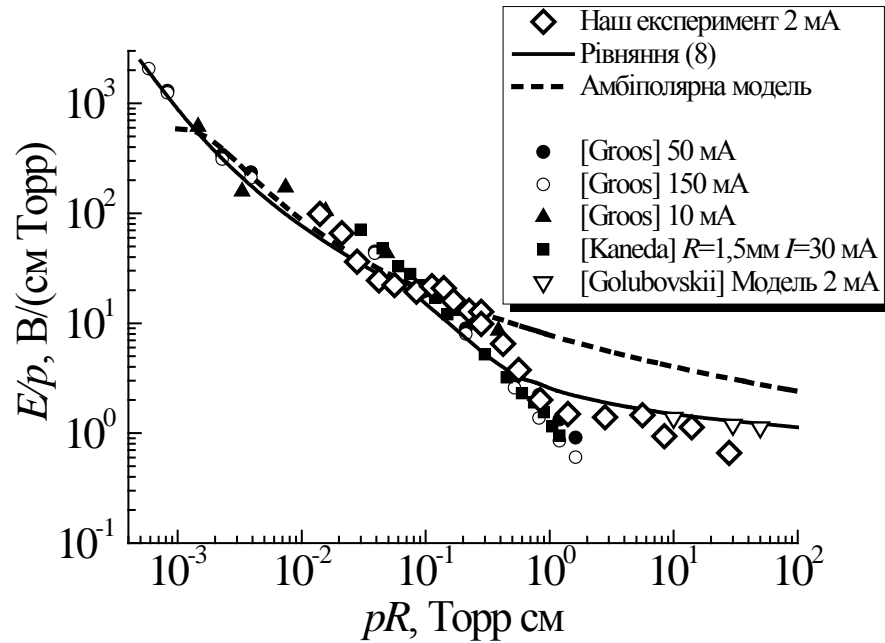


Рис.7. Залежності зведеного електричного поля E/p від добутку pR в аргоні. Пунктирна лінія - розрахунок за допомогою амбіполярної моделі.

Суцільна лінія - розрахунок за допомогою рівняння (8). Порожністі ромби - наші експериментальні результати для розрядного струму 2 мА, суцільні точки, порожністі точки і трикутники - експериментальні результати [O. Groos, *Zeitschrift für Physik*, Vol.88, No. 11-12, pp. 741-756, 1934], квадрати - експериментальні результати [T. Kaneda, *J. Phys. D: Appl. Phys*, Vol. 23, No.5, pp. 500-503, 1990]. Порожністі трикутники - розрахунок [Yu.V. Golubovskii, *Plasma Sources Sci. Technol*, Vol. 24, No.2, P. 025027, 2015.].

режимі. При більш високому тиску ВЧ розряд горить спочатку в нормальному режимі, а після повного покриття поверхні електродів переходить в аномальний режим.

Представлена аналітична модель слабкострумової моди ВЧ ємнісного розряду, в якій розглянуті окремі випадки постійної довжини вільного пробігу і постійної рухливості позитивних іонів під час їх руху крізь приелектродні шари. Виведено формули для вольт - амперних характеристик ВЧ розряду, що складається з двох приелектродних шарів і квазінейтральної плазми. Диференціювання цих формул дозволило знайти вирази для нормальної (мінімальної) густини струму. З отриманих експериментальних і теоретичних результатів випливає, що нормальна густина струму звичайно прямо пропорційна тиску газу, тобто $J \propto p$ (див. Рис.8).

З аналізу рівнянь для амплітуди зміщення електронів в ВЧ електричному полі і напруженості ВЧ поля в квазінейтральній плазмі E_p , наведених в книзі [Yu.P. Raizer *et al. Radio-frequency capacitive discharges*. 1995, CRC Press] отримана формула, згідно з якою поле в плазмі E_p прямо пропорційне товщині приелектродного шару. Визначені за допомогою цієї формули значення E_p відповідають, мабуть, напруженості ВЧ електричного

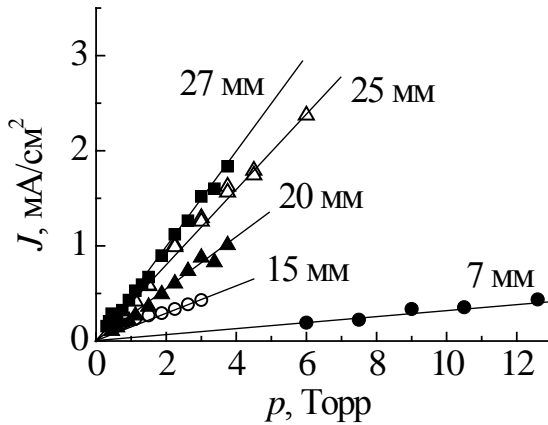


Рис.8. Залежності нормальної густини струму від тиску водню при різних відстанях між електродами.

центральної області розряду не перевищує 15–20%.

поля на межі приелектродного шару, а не в центральній частині розрядного проміжку. Цей висновок підтверджується розрахунками за допомогою коду Siglo-RF.

Був визначений ступінь дисоціації молекул водню у високочастотному розряді з вимірних інтенсивностей ліній випромінювання H_{α} , H_{β} і молекулярного водню H_Q (Fulcher- α системи). Показано, що максимальний ступінь дисоціації становить 30% поблизу межі шарів, а в

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі досліджено процеси в шарах, що прилягають до електродів (катодному шарі тліючого розряду і приелектродних шарах ВЧ ємнісного розряду), а також в плазмовій області (в позитивному стовпі тліючого розряду і квазінейтральній плазмі ВЧ розряду). Отримані наступні основні результати:

З'ясовано, який із законів Чайльда–Ленгмюра (для руху позитивних іонів крізь шар без зіткнень з молекулами газу, а також із зіткненнями з постійною довжиною вільного пробігу і постійної рухливості позитивних іонів) потрібно використовувати для опису катодного шару тліючого розряду в N_2O і водні. Для N_2O показано, що закон Чайльда–Ленгмюра для випадку постійної рухливості іонів може бути застосований для опису катодного шару тільки при низькому тиску (до 0,3 Торр). У перехідному діапазоні тиску (між 0,3 і 0,75 Торр) жоден із законів Чайльда–Ленгмюра не може бути коректно використаний для опису катодного шару тліючого розряду. При високому тиску N_2O (вище 0,75 Торр) потрібно використовувати закон для постійної довжини вільного пробігу іонів. У всьому дослідженому діапазоні тиску водню (0,07 – 2 Торр) показано, що для опису катодного шару може бути застосований тільки закон Чайльда–Ленгмюра для постійної рухливості μ_i іонів. Аналітично отримано, що з урахуванням залежності перерізу σ_{in} від енергії іонів закон для постійної рухливості μ_i іонів виконується навіть в сильному електричному полі катодного шару.

Визначено величини відношення нормальної густини струму до квадрату тиску газу J/p^2 в N_2O , аргоні, водні та кисні в діапазоні тиску газу від 0,1 до 10 Торр. Отримано, що J/p^2 зберігається постійним тільки при тиску газу вище 1 Торр (для N_2O $J/p^2 = 0,44 \pm 0,03$ mA/(cm·Torr)², для H_2

$J/p^2 = 0,072 \pm 0,02 \text{ mA}/(\text{cm} \cdot \text{Torr})^2$, для O_2 $J/p^2 = 0,33 \pm 0,05 \text{ mA}/(\text{cm}^2 \text{ Torr}^2)$ та $J/p^2 = 0,092 \pm 0,02 \text{ mA}/(\text{cm}^2 \text{ Torr}^2)$ для аргону. Однак зниження тиску (нижче 1 Torr) призводить до швидкого зростання відношення J/p^2 , яке може бути в десятки і сотні разів вище, ніж при тиску газу вище 1 Torr. Запропоновано механізм, відповідальний за це явище.

Методом ленгмюрівського зонда для вузького розрядного проміжку (коли розряд складається тільки з катодного шару і негативного світіння) показано, що при фіксованому розрядному струмі густина плазми в негативному світінні в довгих зазорах між електродами вища, ніж в коротких. Аналогічний результат отримано також за допомогою коду OORIS Pro (“частинка в комірці”). У цій дисертаційній роботі запропоновано механізм впливу відстані між катодом і анодом на падіння напруги на електродах і на товщину катодного шару.

Представлена аналітична модель та отримані прості формули для зведеного електричного поля E/p в молекулярних газах в амбіполярному режимі, коли пряма іонізація молекул газу електронним ударом повинна компенсувати втрати заряджених частинок через їх втечу внаслідок амбіполярної дифузії.

Розроблено дві аналітичні моделі для зведеного електричного поля E/p в інертних газах. У першій з них було розглянуто однорідний позитивний стовп в амбіполярному режимі. У другій моделі враховувалася не тільки пряма іонізація атомів аргону електронним ударом, але і такі процеси за участю метастабільних атомів, як ступінчаста іонізація, їх втрати при зіткненнях з електронами (при ударах другого роду з електронами, а також процеси збудження з метастабільного рівня на випромінюючі і на резонансні рівні) і при їх парних зіткненнях один з одним, а також дифузійна втеча метастабільних атомів на стінки розрядної трубки. Результати розрахунків за допомогою цих моделей добре узгоджуються з експериментальними даними.

Представлені результати експериментального дослідження режимів горіння ВЧ емнісного розряду у водні, азоті та N_2O при різних відстанях між електродами і тисках газу. Отримано, що при низькому тиску розряд горить тільки в аномальному режимі і вкриває всю поверхню електродів. При більш високому тиску ВЧ розряд горить спочатку в нормальному режимі, але після повного заповнення поверхні електродів переходить в аномальний режим. Була розроблена аналітична модель слабкострумової моди ВЧ емнісного розряду для випадків постійної довжини вільного пробігу і постійної рухливості позитивних іонів. З результатів моделі і експериментів випливає, що нормальна густина струму в ВЧ емнісному розряді зазвичай прямо пропорційна тиску газу, тобто $J_n \propto p$.

Було виконано аналіз рівнянь для амплітуди зміщення електронів у ВЧ полі і напруженості ВЧ електричного поля у квазінейтральній плазмі E_p , наведених авторами книги [Yu.P. Raizer *et al.* *Radio-frequency capacitive discharges*. 1995, CRC Press], і отримана проста формула. Згідно з нею E_p прямо пропорційна товщині приелектродного шару. Показано, що визначені за допомогою цієї формули значення E_p відповідають напруженості ВЧ

електричного поля на межі приелектродного шару, а не в центральній частині розряду.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

[1] V. Lisovskiy, V. Yegorenkov, E. Artushenko, J.-P. Booth, S. Martins, K. Landry, D. Douai, and V. Cassagne, “Normal regime of the weak-current mode of an rf capacitive discharge”, *Plasma Sources Sci. Technol*, Vol.22, No.1, P. 015018 (12 pp), 2013.

[2] V.A. Lisovskiy, E.P. Artushenko, V.A. Derevyanko, V.D. Yegorenkov, “Normal and abnormal regimes of dc discharge burning in N_2O ”, *Problems of Atomic Science and Technology. Series «Plasma Physics»*, № 1, pp. 210-212, 2013.

[3] V. A. Lisovskiy, E. P. Artushenko, and V. D. Yegorenkov, “Applicability of Child–Langmuir collision laws for describing a dc cathode sheath in N_2O ”, *J. Plasma Physics*, Vol. 80, part 3, pp. 319–327, 2014.

[4] V.A. Lisovskiy, E.P. Artushenko, V.D. Yegorenkov, “Calculating reduced electric field in diffusion regime of dc discharge positive column”, *Problems of atomic science and technology, Series: Plasma Physics*, № 1, pp. 205-208, 2015.

[5] V.A. Lisovskiy, E.P. Artushenko, and V.D. Yegorenkov, “Simple model of reduced electric field in ambipolar regime of dc discharge positive column in hydrogen”, *J. Plasma Physics*, Vol. 81, P. 905810312, 2015.

[6] V. A. Lisovskiy, K.P. Artushenko, and V. D. Yegorenkov, “Inter-electrode distance effect on dc discharge characteristics in nitrogen”, *Problems of atomic science and technology*, №4 (98), pp. 202-205, 2015.

[7] V.A. Lisovskiy, K.P. Artushenko, V.D. Yegorenkov, “Reduced electric field in the positive column of the glow discharge in argon”, *Vacuum*, Vol.122, pp. 75–81, 2015.

[8] V.A. Lisovskiy, K.P. Artushenko, V.D. Yegorenkov, “Child–Langmuir law applicability for a cathode sheath description of glow discharge in hydrogen”, *Physica Scripta*, Vol. 91, No.8, p. 085601, 2016.

[9] V.A. Lisovskiy, K.P. Artushenko, V.D. Yegorenkov, “Normal mode of dc discharge in argon, hydrogen and oxygen”, *Problems of atomic science and technology, Series: Plasma Physics*, № 6 (22), pp. 223-226, 2016.

[10] V.A. Lisovskiy, K.P. Artushenko, and V.D. Yegorenkov, “Influence of the inter-electrode gap on the cathode sheath characteristics (voltage drop across it and its thickness)”, *Physics of Plasmas*, Vol. 24, No.5, P. 053501 (12 pages), 2017.

[11] V. Lisovskiy, E. Artushenko, V. Yegorenkov, “Normal regime of dc discharge in N_2O ”, *Bulletin of the American Physical Society*, Vol. 57, No.8, p. 79, 2012; 65th Annual Gaseous Electronics Conference, Austin, Texas, October 22–26, 2012.

[12] V.A. Lisovskiy, E.P. Artushenko, V.A. Derevyanko, V.D. Yegorenkov, “Normal and abnormal regimes of dc discharge burning in N_2O ”, in *Book of Abstracts, Alushta-2012 Intern. Conf.-School on Plasma Physics and Controlled Fusion*, Alushta, 2012, p. 174.

[13] V. Lisovskiy, E. Artushenko, V. Yegorenkov, “The Child-Langmuir laws and cathode sheath in the N_2O ”, *Bulletin of the American Physical Society*, Vol.58, No.8, p.22, 2013; 66th Annual Gaseous Electronics Conference, Princeton, New Jersey, September 30–October 4, 2013.

[14] V. Lisovskiy, E. Artushenko, V. Yegorenkov, “Effect of inter-electrode gap on dc cathode sheath characteristics”, *Bulletin of the American Physical Society*, Vol. 59, No. 16, GT1.00074, 2014; 67th Annual Gaseous Electronics Conference, Raleigh, North Carolina, November 2–7, 2014.

[15] V.A. Lisovskiy, K.P. Artushenko, V.D. Yegorenkov, “Analytical model of reduced electric field in the positive column in noble gases”, *X International Scientific Conference «Electronics and Applied Physics»*, Kyiv, Ukraine, October 22-25, 2014, p. 136-137.

[16] V.A. Lisovskiy, E.P. Artushenko, V.D. Yegorenkov, “Calculating reduced electric field in diffusion regime of dc discharge positive column”, *International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion*, Kharkov, Ukraine, September 15-18, 2014, p. 145.

[17] В.О. Лісовський, К.П. Артюшенко, “Оптичні дослідження тліючого та високочастотного розрядів низького тиску у водні”, *Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу*, Київ, 22-23 вересня 2015, с. 39.

[18] V.A. Lisovskiy, K.P. Artushenko, V.D. Yegorenkov, “Positive column of the glow discharge in argon”, *XI Intern. Conf. “Electronics and applied physics”*, Kyiv, October 21-24, 2015, p. 143-144.

[19] V.A. Lisovskiy, K.P. Artushenko, V.D. Yegorenkov, “Normal mode of dc discharge in argon, hydrogen and oxygen”, in *Book of Abstracts of Intern. Conf.-School on Plasma Physics and Controlled Fusion*, Kharkiv, Ukraine, September 12-15, 2016, p. 133.

[20] V.A. Lisovskiy, K.P. Artushenko, V.D. Yegorenkov, “Reduced electric field in the quasi-neutral plasma of the radio frequency capacitive discharge”, *XII International Scientific Conference “Electronics and Applied Physics”*, Kyiv, October 19–22, 2016, p. 208–209.

АНОТАЦІЇ

Артюшенко К.П. “Фізичні процеси у приелектродних шарах і плазмі тліючого і високочастотного ємнісного розрядів” – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 – фізика плазми. Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, 2018.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню характеристик катодного шару і позитивного стовпа тліючого розряду, а також приелектродного шару і квазінейтральної плазми ВЧ ємнісного розряду. Отримано, що в усьому дослідженому діапазоні тиску водню (0,07 – 2 Торр) для опису катодного шару треба застосовувати тільки закон Чайльда–Ленгмюра для постійної рухливості іонів. Для катодного шару в N_2O при тиску нижче 0,3 Торр справедливий закон для постійної рухливості іонів, при тиску вище 0,75 Торр

– закон для постійної довжини вільного пробігу іонів, а в перехідному діапазоні тиску (між 0,3 і 0,75 Торр) жоден із законів Чайльда–Ленгмюра не описує коректно катодний шар тліючого розряду. Показано, що відношення нормальної густини струму до квадрату тиску газу J/p^2 зберігається постійним тільки при тиску N_2O , аргону, водню і кисню вище 1 Торр, але при зниженні тиску J/p^2 швидко зростає. Встановлено причину, яка викликає необхідність збільшення падіння напруги на електродах і товщини катодного шару при віддаленні аноду крізь негативне світіння. Для підтримки фіксованим розрядного струму на анод, що рухається крізь негативне світіння, потрібно підвищувати напругу на електродах, щоб забезпечити досить високий струм швидких електронів, що вийшли з катодного шару й переважно переносять струм на анод. Розроблено аналітичну модель для зведеного електричного поля для E/p в позитивному стовпі тліючого розряду в інертних і молекулярних газах. Отримано прості формули для E/p , що добре описують результати експериментів. Розроблено аналітичну модель для позитивного стовпа тліючого розряду в аргоні, що враховує вплив метастабільних атомів на величину зведеного електричного поля. Розроблено аналітичну модель слабкострумової моди ВЧ ємнісного розряду, в якій розглянуті окремі випадки постійної довжини вільного пробігу і постійної рухливості позитивних іонів в приелектродних шарах. Експериментально і теоретично показано, що нормальна густина струму ВЧ ємнісного розряду пропорційна тиску газу.

Ключові слова: тліючий розряд, закон Чайльда–Ленгмюра, катодний шар, нормальний та аномальний режими, позитивний стовп, зведене електричне поле.

Артюшенко Е.П. “Физические процессы в приэлектродных слоях и плазме тлеющего и высокочастотного емкостного разрядов” - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы. Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Харьков, 2018.

Диссертация посвящена исследованию характеристик катодного слоя и положительного столба тлеющего разряда, а также приэлектродного слоя и квазинейтральной плазмы ВЧ емкостного разряда. Получено, что во всем исследованном диапазоне давления водорода для описания катодного слоя следует применять только закон Чайльда–Ленгмюра для постоянной подвижности ионов. Для катодного слоя в N_2O при давлении ниже 0,3 Торр справедлив закон для постоянной подвижности ионов, при давлении выше 0,75 Торр – закон для постоянной длины свободного пробега ионов, а в переходном диапазоне давления (между 0,3 и 0,75 Торр) ни один из законов Чайльда–Ленгмюра не описывает корректно катодный слой. Показано, что отношение нормальной плотности тока к квадрату давления газа J/p^2 сохраняется постоянным только при давлении N_2O , аргона, водорода и кислорода выше 1 Торр, но при понижении давления J/p^2 быстро возрастает.

Установлена причина увеличения падения напряжения на электродах и толщины катодного слоя при удалении анода через отрицательное свечение. Для поддержания фиксированным разрядного тока на анод, который движется через отрицательное свечение, нужно повышать напряжение на электродах, чтобы обеспечить необходимый ток быстрых электронов, которые вышли из катодного слоя и преимущественно переносят ток на анод. Разработана аналитическая модель приведенного электрического поля E/p для положительного столба тлеющего разряда в инертных и молекулярных газах. Получены простые формулы для E/p , которые хорошо описывают результаты экспериментов. Разработана аналитическая модель для E/p в положительном столбе тлеющего разряда в аргоне, учитывающая процессы с участием метастабильных атомов. Разработана аналитическая модель слаботочной моды ВЧ емкостного разряда, в которой рассмотрены частные случаи постоянной длины свободного пробега и постоянной подвижности положительных ионов в приэлектродных слоях. Экспериментально и теоретически показано, что нормальная плотность тока ВЧ емкостного разряда пропорциональна давлению газа.

Ключевые слова: тлеющий разряд, закон Чайльда–Ленгмюра, катодный слой, нормальный и аномальный режимы, положительный столб, приведенное электрическое поле.

Artushenko E.P. Physical processes in the electrode sheaths and the plasma of the glow and the radio-frequency capacitive discharges. – Manuscript.

Thesis for Candidate of Science degree in Physics and Mathematics with the specialization in 01.04.08 – plasma physics. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, 2018.

The thesis is devoted to studying the processes in the sheaths adjoining the electrodes (the cathode sheath of the dc glow discharge and near-electrode sheaths of the RF capacitive glow discharge), as well as within the plasma region (in the positive column of the dc glow discharge and in the quasi-neutral plasma of the RF discharge). For N_2O it has been shown that the collision-related Child–Langmuir law version for constant ion mobility may be applied for the description of the cathode sheath only at low pressure (up to 0.3 Torr). In the transient pressure range (between 0.3 and 0.75 Torr) none of the Child–Langmuir law versions can be correctly applied for describing the cathode sheath of the glow discharge. At higher N_2O pressure (above 0.75 Torr) one has to apply the law version for the constant ion mean free path. Only the Child–Langmuir law version for the constant ion mobility μ_i is demonstrated to be applicable throughout the total hydrogen pressure range studied (0.07 – 2 Torr). The law version associated with the constant ion mobility is analytically shown to be applicable even in a high electric field of the cathode sheath.

Ratio J/p^2 values of the normal current density to the gas pressure squared in N_2O , argon, hydrogen and oxygen within the gas pressure range from 0.1 to 10 Torr have been determined. The ratio J/p^2 has been found to be constant only at

the gas pressure above 1 Torr ($J/p^2 = 0.44 \pm 0.03 \text{ mA}/(\text{cm}\cdot\text{Torr})^2$ for N_2O , $J/p^2 = 0.072 \pm 0.02 \text{ mA}/(\text{cm}\cdot\text{Torr})^2$ for H_2 , $J/p^2 = 0.33 \pm 0.05 \text{ mA}/(\text{cm}\cdot\text{Torr})^2$ for O_2 and $J/p^2 = 0.092 \pm 0.02 \text{ mA}/(\text{cm}\cdot\text{Torr})^2$ for Ar). However lowering the pressure (below 1 Torr) produces the fast growth of the J/p^2 ratio which may be tens and hundreds times higher than one at the gas pressure above 1 Torr. A mechanism responsible for this phenomenon is suggested.

The measurements with the Langmuir probe have demonstrated that at the fixed discharge current the plasma concentration in the negative glow in long inter-electrode gaps is larger than in short ones. This thesis suggests a mechanism how a distance between the cathode and the anode affects the voltage drop across the electrodes and the cathode sheath thickness.

An analytical model for the reduced electric field E/p in molecular gases in the ambipolar regime is presented when the direct ionization of gas molecules via electron impact has to cancel the loss of charged particles due to their escape because of ambipolar diffusion. Simple formulas have been obtained for E/p furnishing a good description of experimental data.

Two analytical models for the reduced electric field E/p in noble gases have been developed. The first of them deals with the uniform positive column in the ambipolar regime. The second model takes into account not only the direct ionization of argon atoms via electron impact but also such processes with the participation of metastable atoms as the step-wise ionization, their loss under collisions with electrons (under second-kind collisions with electrons and excitation transitions from the metastable level to the radiative ones and to the resonant levels) and under their binary collisions with one another, as well as the diffusion escape of metastable atoms to the walls of the discharge tube. Calculation data obtained within the framework of these models are in good agreement with our experimental data.

There are presented the results of the experimental study into the modes of the RF capacitive discharge in hydrogen, nitrogen and N_2O with the different values of the inter-electrode gap and pressure. An analytical model of the weak-current α -mode of the RF capacitive discharge has been developed for the cases of the constant mean free path and the constant mobility of positive ions. It follows from the model data and experimental ones that the normal current density in the RF capacitive discharge is usually directly proportional to the gas pressure e.g. $J_n \propto p$.