

**Відгук офіційного опонента  
на дисертаційну роботу  
Артюшенко Катерини Павлівни  
«Фізичні процеси у приелектродних шарах і плазмі тліючого та  
високочастотного ємнісного розрядів»,  
подану на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук  
за спеціальністю 01.04.08 - фізика плазми**

Дисертаційна робота К.П. Артюшенко присвячена вивченню структури та властивостей катодної частини (тобто катодного шару та плазми негативного світіння) та плазми позитивного стовпа тліючого розряду постійного струму низького тиску, а також приелектродного шару та квазінейтральної плазми ВЧ ємнісного розряду низького тиску. Ці типи розрядів знайшли широке застосування у безлічі плазмових технологій (осадження нітридних, оксидних, діамантоподібних та інших тонких плівок, плазмове очищення технологічних газорозрядних камер, у плазмохімії, для накачки газових лазерів, стерилізації медичних інструментів тощо). Тому тематика цієї роботи є актуальною як з фундаментальної, так й з прикладної точки зору.

Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів з викладенням оригінальних результатів, висновків, а також переліку посилань та списку публікацій за матеріалами дисертації.

У **вступі** обгрунтовано актуальність теми дисертації, визначено мету, завдання, предмет і об'єкт досліджень, сформульовано положення, що характеризують наукову новизну отриманих результатів та їх практичне значення, оцінено особистий внесок автора в роботи, опубліковані разом із співавторами, наведено відомості про апробацію результатів на конференціях та семінарах.

У **першому** розділі дисертаційної роботи наведено стислий огляд літератури з тематики дисертації, зроблено аналіз результатів, отриманих іншими авторами, обговорено недостатньо детально до цього вивчені особливості розрядів, що досліджуються у цій роботі.

У **другому** розділі наведено опис експериментальних установок, на яких проводилися дослідження, умов проведення експериментів, методики зондових та оптичних вимірювань, а також методик обробки отриманих експериментальних результатів.

У **третьому** розділі роботі розглянуто питання про можливість застосування законів Чайльда-Ленгмюра (випадок беззіткненого руху позитивних іонів крізь катодний шар, а також два випадки з урахуванням зіткнень – для постійної довжини вільного пробігу і для постійної рухливості іонів) для опису характеристик катодного шару в  $N_2O$  та водні. Дисертантка з'ясувала, що у всьому дослідженому в її роботі діапазоні тиску водню (0,07 – 2 Тор) для опису катодного шару треба застосовувати тільки закон Чайльда-Ленгмюра для постійної рухливості іонів. Але для для  $N_2O$  ситуація

виявилась значно складнішою: закон Чайльда-Ленгмюра для випадку постійної рухливості іонів можна застосовувати лише при низькому тиску  $N_2O$  (до 0,3 Тор). Вона також знайшла, що існує перехідний діапазон тисків (від 0,3 до 0,75 Тор  $N_2O$ ), де жоден із розглянутих варіантів закону Чайльда-Ленгмюра не описує параметри катодного шару. А при більш високих значеннях тиску  $N_2O$  ( $> 0,75$  Тор) вірним є закон для постійної довжини вільного пробігу іонів.

Велику увагу у дисертації приділено також нормальному та аномальному режимам горіння тліючого розряду. З вимірних вольт-амперних характеристик було визначено величини параметра подібності  $J/p^2$  (відношення нормальної густини струму до квадрату тиску газу) в  $N_2O$ , аргоні, водні та кисні в діапазоні зміни тисків газів від 0,1 до 10 Тор. При цьому було з'ясовано, що  $J/p^2$  зберігається сталим тільки при тисках газів понад 1 Торр. А при зменшенні тисків нижче 1 Тор спостерігається швидке зростання відношення  $J/p^2$ .

У цьому розділі також наведено результати експериментальних досліджень впливу відстані між катодом і анодом (який знаходився у плазмі негативного світіння) на товщину катодного шару і падіння розрядної напруги. Знайдено, що віддалення аноду від катоду призводить до збільшення напруги на електродах та товщини катодного шару. За допомогою зондових вимірювань та розрахунків за допомогою коду ООРІС Про ("частинка в комірці") дисертантка встановила, що при фіксованому розрядному струмі густина плазми в негативному світінні в довших міжелектродних проміжках вища, ніж в коротких. Вона зробила також аналітичні розрахунки, що дозволило пояснити явище впливу відстані між катодом і анодом як на товщину катодного шару, так і падіння напруги на електродах.

У **четвертому** розділі експериментально та теоретично досліджено позитивний стовп у молекулярних та інертних газах. Зокрема, розглянуто так звані "амбіполярні" аналітичні моделі для випадку, коли пряма іонізація молекул газу електронами повинна компенсувати амбіполярні втрати заряджених частинок на стінках розрядної трубки. Відповідні рівняння балансу електронів для молекулярних та інертних газів не мають аналітичного розв'язку для приведеного електричного поля  $E/p$ . Але дисертанткою для цих рівнянь було знайдено апроксимації, за допомогою яких вона отримала прості формули для  $E/p$ . Результати розрахунків за допомогою цих формул знаходяться у добрій згоді з результатами вимірювань, проведеними іншими авторами з застосуванням ленгмюрівських зондів та кінетичних моделей.

Четвертий розділ містить також результати вимірювань  $E/p$  в плазмі позитивного стовпа розряду в аргоні методом рухомого анода. Отримані експериментальні дані добре узгоджуються з результатами розрахунків за допомогою "амбіполярної" моделі при значенням параметру  $pR \leq 1$  Тор·см (де  $R$  – радіус розрядної трубки). При більш високих величинах  $pR$  використана модель дає завищені значення  $E/p$  в порівнянні з

експериментальними даними. Було створено більш складну модель, в якій враховано процеси за участі метастабільних атомів аргону у стані  $Ar(1s_5)$ . Результати розрахунків за допомогою цієї моделі добре узгоджуються з експериментальними даними у всьому дослідженому в дисертаційній роботі діапазоні змін  $pR$ .

У п'ятому розділі наведено результати дослідження процесів в приелектродних шарах ВЧ емнісного розряду, а саме впливу режиму перенесення позитивних іонів крізь шари на нормальну густину струму слабкострумової  $\alpha$ -моди. Виміряно нормальну густину струму для водню, азоту та  $N_2O$  при різних відстанях між електродами та значеннях тиску газів. Дисертантка розробила аналітичну модель слабкострумової моди ВЧ емнісного розряду для випадків постійної довжини вільного пробігу і постійної рухливості позитивних іонів. Як теоретично, так і експериментально встановлено пряму пропорційність нормальної густини струму та тиску газу ( $J \propto p$ ).

Також було проведено дослідження приведенного електричного поля  $E/p$  в квазінейтральній плазмі (яку називають "позитивним стовпом") ВЧ емнісного розряду. Дисертантка проаналізувала рівняння для амплітуди зміщення електронів у ВЧ полі і напруженості ВЧ електричного поля в квазінейтральній плазмі  $E_p$ , за допомогою яких отримала пряму пропорційність  $E_p$  товщині приелектродного шару.

У висновках чітко сформульовано основні результати, отримані в дисертації.

#### Зауваження:

1) Щодо застосованої методи вимірювання товщини катодного шару. Як видно з тексту дисертації (рис.2.2) ця методика є суто "візуальною" з використанням фотографій у форматі jpeg. І межею катодного шару вважається місце, де яскравість світіння різко збільшується. Тут виникає кілька питань. По-перше, негативне світіння фактично складається з двох дуже різних частин – світіння, яке належить до катодного шару (тобто зони з електричним полем, яке достатнє для експоненціального розмноження утворених тут електронів) та світіння плазмової зони з малим електричним полем, де збудження та іонізація обумовлена лише швидкими електронами, які поступають з катодного шару. Тобто, межі між катодним шаром та плазмою негативного світіння відповідає максимуму світіння. По-друге, для точного визначення просторової залежності яскравості світіння фотографії у форматі jpeg не дуже підходять, оскільки ми не знаємо алгоритму, який застосовується при обробці. Тому, при проведенні фотометричних досліджень більш доцільним є використання формату RAW, який дозволяє за допомогою відповідних програм одержувати більш достовірні дані.

Це скоріше рекомендація на майбутнє, оскільки для одержання якісних залежностей  $U^m/d_{meas}^n$  використана в дисертації методика є задовільною.

2) Не зовсім зрозуміло, чому дисертант для визначення густини плазми використовувала іонну гілку струму циліндричного зонду. Справа в тому, що існуючі теорії (радіального та орбітального рухів) дають дуже великі розбіжності з даними, одержаними при використанні електронного струму насичення. Чудовий розбір проблем, які виникають при використанні цих теорій (дуже корисний для експериментаторів) зроблено в роботі V. A. Godyak and B. M. Alexandrovich, Comparative analyses of plasma probe diagnostics techniques. J. Appl. Phys., 118, 233302 (2015).

3) Видно певну недбалість при оформленні роботи. Не на всіх рисунках на осях позначено вимірювані/розраховані фізичні величини (наприклад, рис.3.5), неповні підписи під рисунками (наприклад, рис. 3.12). Катод і анод розряду весь час міняються місцями (рис.2.2 - катод справа, анод зліва, фото вверх ногами; рис.3.9 – катод справа, анод зліва; рис. 3.10-3.13 - катод зліва, анод справа). І т.п.

Зазначу, що наведені зауваження не впливають на достовірність наукових висновків та не знижують загальної високої оцінки роботи.

Аналіз роботи та опублікованих здобувачкою зі співавторами наукових праць надає змогу зробити висновок, що дисертаційна робота К.П. Артюшенко *є завершеним науковим дослідженням*, в якому успішно виконано поставлені задачі та отримано нові достовірні експериментальні та теоретичні результати, що в сукупності *вносять вагомий вклад* у розвиток фізики низькотемпературних газових розрядів низького тиску.

**Наукова значущість** дисертації полягає в отриманні науково обґрунтованих даних стосовно фізичних процесів в таких важливих частинах, як катодний шар та позитивний стовп тліючого розряду, а також у приелектродних шарах та квазінейтральній плазмі високочастотного емнісного розряду.

**Практична значущість** роботи полягає в тому, що отримані в дисертаційній роботі результати досліджень характеристик позитивного стовпа допоможуть оптимізувати лазери на основі розряду постійного струму. Виміряні значення нормальної густини струму у тліючому розряді дозволять оптимізувати мережеві фільтри. Технології травління напівпровідникових матеріалів і осадження тонких плівок з газової фази можуть бути удосконалені за допомогою отриманих результатів для нормальної густини струму слабкострумового ВЧ розряду.

Отримані результати, висновки та запропоновані на цій основі рекомендації виглядають цілком достовірними та обґрунтованими. Авторкою використано добре перевірені експериментальні та теоретичні методики та методи аналітичних та числових розрахунків, проведено порівняння експериментальних та теоретичних даних, отриманих як самим автором у цій роботі, також й іншими науковцями. Одержані результати поглиблюють наші уявлення про природу розглянутих в дисертації розрядів та відкривають нові можливості для удосконалення вже існуючих і створення нових, більш ефективних та керованих джерел плазми. Вони можуть бути використані для

фізичних досліджень та технічних застосувань тліючого та високочастотного розрядів як в Україні, так за кордоном.

Основні результати роботи повністю викладено у *10 статтях* у міжнародних та вітчизняних фахових журналах та *10 тезах доповідей* на міжнародних і національних конференціях, що також підтверджує високий науковий рівень виконаної роботи.

Тема дисертації *відповідає спеціальності* 01.04.08 – фізика плазми. *Автореферат* повністю відображає зміст дисертації, її основні положення й висновки.

Вважаю, що за обсягом проведених досліджень, їх високим науковим рівнем, новизною і практичною цінністю отриманих результатів дисертаційна робота «Фізичні процеси у приелектродних шарах і плазмі тліючого та високочастотного емнісного розрядів» *повністю відповідає всім вимогам* п.9, 11 та 13 Порядку присудження наукових ступенів, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 року № 567, які висовуються до кандидатських дисертацій. Авторка роботи *Артюшенко Катерина Павлівна заслуговує на присудження їй наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 - фізика плазми.*

Старший науковий співробітник  
Інституту фізики НАН України,  
кандидат фіз.-мат. наук,  
старший науковий співробітник

В. В. Цюлко

Підпис В. В. Цюлко засвідчую:

