

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Бурмака Геннадія Павловича «ЗАПОРОШЕНА ПЛАЗМА В РЕЖИМІ РОЗПАДУ ТА ФОРМУВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ НАНОТРУБОК В ПЛАЗМІ» яка подано на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 - фізика плазми

Актуальність теми. Дисертаційна робота Бурмака Г.П. виконана в Харківському національному університеті імені В.Н. Каразіна. В роботі розрахунково-теоретично досліджено властивості газорозрядної плазми, що містить важкі заряджені частинки (так звані, порошинки або dusty-частинки, або наночастинки). При цьому вивчається dusty-плазма не в режимі стаціонарного розряду, як у багатьох авторів до здобувача, а в режимі розпаду, що робиться вперше і є безумовною гідністю дисертації. Також вивчається вплив плазмового середовища на формування лісу вуглецевих нанотрубок при плазмохімічному осадженні з газової фази. Вивчення властивостей газорозрядної плазми, яка містить наночастинки, є актуальним завданням сучасної фізики плазми, з точки зору застосування в багатьох технологічних процесах.

Дослідження запорошеної (dusty) плазми становить особливий інтерес і для фахівців, що займаються вивченням плазми в установках КТС і в інших плазмових пристроях, що вивчають плазму іоносфери і магнітосфери Землі, плазму поблизу інших космічних об'єктів. Враховуючи, що запорошена плазма зараз активно досліджується і використовується в плазмово-технологічних процесах в провідних наукових центрах, а плазмові методи застосовуються для формування різноманітних наноструктур, можна впевнено стверджувати, що тема дисертації є цікавою і актуальною, а практичне використання її результатів буде важливим для наукової спільноти.

Публікації. Основні матеріали дисертації опубліковано в 7-и наукових статтях: 5 статей опубліковані в спеціалізованих виданнях України та 2 статті опубліковані в закордонних наукових рецензованих виданнях з фізики плазми з високим імпаکت-фактором. Основні результати досліджень доповідалися на п'яти міжнародних конференціях з фізики плазми та КТС, пройшовши гарну експертну апробацію.

Структура дисертації. Повний обсяг дисертації становить 131 сторінку, включаючи Введення, Огляд літератури, Три глави основного тексту, Висновки та Список цитованої літератури з 220 найменувань. Кількість ілюстрацій в тексті дорівнює 20. Список літературних джерел міститься на 19 сторінках.

У *вступі* надано загальну характеристику роботи, обґрунтовано її актуальність, наукову новизну та практичне значення; визначено об'єкт і предмет дослідження, сформульовано мету та завдання роботи.

У *першому розділі* надано огляд літератури з посиланнями на основні роботи за темою дисертації. Проведено огляд робіт в області запорошеної плазми та з формування вуглецевих наноструктур плазмовими методами. Увагу приділено роботам, що вивчали плазму з порошинками, які формувалися у присутності вуглеводневого робочого газу, та розглядали формування вуглецевих наноструктур у плазмі, де один із робочих газів містив вуглець. Наведено огляд теоретичних та експериментальних робіт в області запорошеної плазми, що є в режимі розпаду. При цьому, особливу увагу приділено роботам науковців Рурського університету (ФРН). Описано методи, що використовуються для формування окремих вуглецевих нанотрубок та лісу нанотрубок в плазмовому середовищі. Також наведено огляд теоретичних робіт, в яких досліджувався вплив плазми на формування вуглецевих нанотрубок.

У *другому розділі* досліджувався вплив метастабільних атомів аргону на концентрацію електронів у запорошеній аргонівій плазмі, що розпадається. У розділі представлено модель постійної густини для опису запорошеної плазми в режимі розпаду, в якій враховано втрати електронів та іонів та втрата енергії електронів на стінках розрядної камери, а також на пилових

частинках. Модель враховувала генерацію електронів у наступних процесах: іонізація атомів аргону за їх зіткнень з електронами, вторинна емісія електронів за зіткнень іонів з порошинками та зіткнення метастабільних атомів між собою, які супроводжуються генерацією електронів. Розроблену модель використано для аналізу властивостей заповненої плазми у режимі розпаду за експериментальних умов робіт науковців Рурського університету.

У *третьому розділі* розглянуто вплив вторинної електронної емісії, яка виникає за зіткнень іонів плазми з поверхнею електродів, на властивості аргонової заповненої плазми, що є в режимі розпаду та має високу концентрацію порошинок. Запропоновано теоретичну модель постійної густини, в якій вважалося, що у плазмі, яка знаходиться в режимі розпаду, існує три групи електронів: 1) теплові електрони з максвеллівською функцією розподілу за енергією, 2) енергетичні електрони, що генеруються у зіткненнях метастабільних атомів між собою; 3) вторинні електрони, що генеруються за зіткнень іонів з поверхнею електродів. Було також встановлено, що концентрація енергетичних електронів більша у заповненій плазмі, що є в режимі розпаду, ніж у незаповненій. Це пояснюється більшою концентрацією метастабільних атомів у заповненій плазмі. Водночас, концентрація енергетичних електронів менша за концентрацію теплових електронів. Концентрація вторинних електронів зменшується з часом через спадання концентрації іонів та є меншою за концентрацію енергетичних електронів, що пояснюється менш ефективною генерацією вторинних електронів у порівнянні з генерацією енергетичних електронів.

У *четвертому розділі* розглянуто ріст лісу одношарових вуглецевих нанотрубок за умов плазмохімічного осадження з газової фази. Дослідження проведено, використовуючи дифузійну модель, в якій вважалося, що вуглецеві нанотрубки зростають із напівсферичною вершиною та мають однакову довжину, а частинки каталізатору розташовано на підкладці на відстані $x = L_{NT}$ від вершин нанотрубок, де x – координата вздовж вісі нанотрубок, а L_{NT} – їх довжина. Припускалося, що атоми вуглецю вбудовуються в нанотрубки, коли досягають частинок каталізатору. Плазма (створена, наприклад, у газовому розряді, де робочим газом є суміш C_2H_2/H_2) розташована над лісом нанотрубок та являється джерелом нейтральних частинок та іонів, що містять у своєму складі вуглець та водень: вуглеводні нейтральні частинки (C_2H_2), вуглеводні іони ($C_2H_2^+$), атоми або молекули газу, що травить, (H), та іони газу, що травить (H^+). Вважалося, що вуглеводні нейтральні частинки та атомарний водень адсорбуються та десорбуються на поверхні нанотрубок та на поверхні підкладки між ними.

У *висновках* коротко викладено підсумок і результати дисертаційного дослідження за темою «Заповнена плазма в режимі розпаду та формування вуглецевих нанотрубок в плазмі»

Основні результати і цінність дисертації. У роботі вивчені властивості заповненої плазми в режимі розпаду і формування лісу одношарових вуглецевих нанотрубок в плазмі. В дисертаційній роботі вперше побудовано теорію сильно заповненої плазми, що є в режимі розпаду та враховує генерацію електронів за зіткнень метастабільних атомів між собою та генерацію вторинних електронів за зіткнень іонів з електродами.

Проведено дослідження фізичних процесів, що відбуваються в аргоновій заповненій плазмі в режимі розпаду в умовах, коли концентрація заряду наночастинок більше концентрації електронів. Вперше в моделі сильно заповненої плазми, що є в режимі розпаду, враховано втрати енергії електронів на стінках розрядної камери.

Показано, що генерація електронів в зіткненнях метастабільних атомів один з одним може істотно впливати на щільність електронів в заповненій плазмі в режимі розпаду. Вперше показано, що збільшення густини електронів у сильно заповненій плазмі, що розпадається, відбувається завдяки їх генерації за зіткнень метастабільних атомів між собою.

Вивчено вплив вторинної електронної емісії при зіткненнях іонів з електродами на властивості сильно заповненої аргонової плазми в режимі розпаду. Показано, що вторинна емісія може збільшити концентрацію електронів в пиловій плазмі, що знаходиться в режимі розпаду, приблизно на десять відсотків. Вперше досліджено вплив вторинної електронної емісії на часові залежності густини електронів у сильно заповненій плазмі, що розпадається.

Досліджено формування лісу одношарових вуглецевих нанотрубок при плазмохімічному осадженні з газової фази з урахуванням неоднорідності осадження нейтральних частинок та іонів ацетилену з плазми на поверхню нанотрубок. Вперше знайдено умови, коли швидкість росту лісу довгих одношарових вуглецевих нанотрубок більша за низьких температур поверхні нанотрубок, ніж за високих температур.

Показано, що в присутності плазми ліс нанотрубок може мати довжину більшу, ніж в разі їх зростання без плазми. Визначено, за яких умов формується вуглецева плівка між нанотрубками на підложці, яка заважає формуванню нанотрубок. Вперше теоретично показано, що для запобігання формуванню вуглецевої плівки за росту нанотрубок, потоки газу або іонів, що травлять, до основи нанотрубок повинні бути достатньо великими.

Показано, що залежно швидкостей росту лісу одношарових вуглецевих нанотрубок від довжини нанотрубок істотно відрізняються при низьких і високих температурах.

Зауваження. Дисертаційна робота має, окрім великої кількості цікавих наукових результатів, також і деякі зауваження, в основному, редакторського толку:

1. Перше зауваження пов'язано з питанням про заряд порошинок (dusty-, d-частинок). У моделях розглядається плазма з негативно зарядженими d-частинками, що мають фіксоване зарядове число Z_d . При цьому не дуже ясно чому в запропонованих моделях відсутні електрично нейтральні і позитивно заряджені d-частинки.

2. При опису процесу формування наночастинок недостатньо інформації про механізми прилипання негативно заряджених електронів до негативно заряджених d-частинок.

3. У роботі практично нічого не говориться про вплив зовнішнього магнітного поля на будівництво наноструктур в заповненій плазмі.

4. В роботі мова йде про вирощування вертикально спрямованих наноструктур в умовах близьких до експериментів в Рурському університеті (ФРН). На сторінці ж 76 зазначається, що орієнтація нанотрубок забезпечується напрямком напруженості електричного поля поблизу підкладки. А тому виникає питання наскільки важлива і принципова вертикальність напрямку росту нанотрубок? Наприклад, чому не можна вирощувати нанотрубки в напрямку зверху вниз?

5. При виробництві будь-яких нанооб'єктів важливою характеристикою є вартість 1 грама вуглецевих фулеренов або 1 мкм нанотрубок. У зв'язку з цим хотілося б почути думку дисертанта про економічну конкурентоспроможність запропонованих способів виробництва і наночастинок, і нанотрубок у порівнянні з іншими відомими методами.

6. Недостатньо роз'яснень чому в якості середньої теплової швидкості іонів обрана середньоарифметична їх швидкість, а не найбільш ймовірна або середньоквадратична. Можливо це важливо, коли визначаються ефекти 10-відсоткової різниці результатів відповідних розрахунків.

7. У другому розділі в основних рівняннях динаміки частинок плазми, (2.1)-(2.9), є відсутнім явний вид залежності 6-и коефіцієнтів різноманітних зіткнень і 3-х коефіцієнтів іонізації від температури електронів.

8. В третьому розділі, рівняння (3.4), недостатньо роз'яснень чому час втрат енергійних електронів на стінки камери визначається як середньгеометричне, а не середньоарифметичне значення між τ_{ir} и τ_{diff} ?

9. В четвертому розділі при оцінках швидкості росту нанотрубок і часу перебування атомів перебування атомів на поверхні нанотрубки виникає питання про те, як ці характеристики залежать від орієнтації нанотрубок. Однак, це є тема до майбутніх досліджень.

10. Великою цінністю роботи є числові коди розв'язку складних систем диференціальних рівнянь першого порядку. Але відсутня інформація про те, що ці коди захищені авторськими правами і доступні до користування іншими фахівцями, що працюють в даному напрямку.

11. В авторефераті вказано, що використано 216 джерел в списку літератури, а в дисертації їх 220.

Однак, наведені зауваження ніяк не відносяться до основних положень, що виносяться на захист, не впливають на достовірність отриманих результатів і не знижують високої оцінки дисертаційної роботи Бурмака Г.П.

Відповідність дисертації встановленим вимогам і оцінка в цілому. Дисертаційна робота ґрунтується на роботах, які опубліковані у провідних фахових виданнях і відповідають чинним вимогам ДАК МОН України щодо публікації результатів дисертаційних досліджень. Особистий внесок дисертанта в роботах, що виконані зі співавторами, точно відображений у дисертації та авторефераті. Матеріали дисертації доповідалися на багатьох міжнародних профільних наукових конференціях, де були добре апробовані. Робота Бурмака Г.П. являє собою закінчену науково-дослідну працю. Дисертаційна робота і автореферат написані грамотною науково-технічною мовою та містять чітке формулювання поставлених задач та висновків. Тема дисертації відповідає спеціальності 01.04.08 - фізика плазми. Результати виконаних досліджень є важливими для розвитку фізики плазми та газового розряду. Вони можуть використовуватися при поясненні експериментів з вивчення запорошеної плазми та експериментів з формування вуглецевих наноструктур плазмовими методами, наприклад, у Рурському університеті (ФРН) та Токійському інституті технологій (Японія). Результати, які одержано в дисертаційній роботі, можуть бути застосовані у Національному науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, Інституті ядерних досліджень НАН України, Інституті космічних досліджень НАН України, Інституті фізики НАН України та інших організаціях.

Вважаю, що в цілому дисертаційна робота «Запорошена плазма в режимі розпаду та формування вуглецевих нанотрубок в плазмі» і її автореферат повністю відповідають вимогам «Порядку присудження наукових ступенів» та іншим нормативним документам Державної Акредитаційної Комісії МОН України до кандидатських дисертацій, а її автор, Бурмака Геннадій Павлович, заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 - фізика плазми.

Доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник,
професор кафедри фізики Українського
державного університету залізничного транспорту

М.І. Гришанов



Особистий підпис
засвідчую _____ 20__ р.
Завідуючий канцелярією
УкрДУЗТ

Гришанов М.І.