Літовко Ірина Валентинівна, старший науковий спів&shy;робітник відділу фізики плазми та плазмових технологій Інституту ядерних досліджень НАН України: &laquo;Моделю&shy;вання плазмо-оптичних пристроїв нового покоління&raquo; (01.04.08 - фізика плазми). Спецрада Д 26.001.31 у Київ&shy;ському національному університеті імені Тараса Шевченка

Інститут Ядерних Досліджень

Національна академія наук України

Київський Національний Університет імені Тараса Шевченка

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова

праця на правах рукопису

Літовко Ірина Валентинівна

ДИСЕРТАЦІЯ

МОДЕЛЮВАННЯ ПЛАЗМО-ОПТИЧНИХ ПРИСТРОЇВ НОВОГО

ПОКОЛІННЯ

Спеціальність: 01.04.08.- фізика плазми

Подається на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук

Київ - 2019

УДК 533.9, 537.5

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,

результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

 І. В. Літовко

Науковий консультант: Гончаров Олексій Антонович,

 доктор фізико-математичних наук, професор

АНОТАЦІЯ

ЗМІСТ Стор.

ВСТУП 23

1. ПЛАЗМО-ОПТИЧНА МОДЕЛЬ ЦИЛІНДРИЧНОГО ГАЗОВОГО

РОЗРЯДУ МАГНЕТРОННОГО ТИПУ 35

Вступ ………………………………………………………………………………35

1.1. Плазмодинамічні особливості циліндричних газових розрядів

магнетронного типу: теоретична модель…………………………………..…….39

1.1.1.Вихідні передумови та попередні експериментальні дані .…………..39

1.1.2. Опис моделі плазмового магнетрону…………………………………..41

1.2. Одновимірний гідродинамічний опис плазмодинамічних процесів

циліндричного газового розряду в поперечному магнітному полі із

замкнутим дрейфом електронів: теоретична модель …….……………..…..44

1.2.1. Основні рівняння та аналіз моделі …………………………………...45

1.2.2. Оцінки та припущення. Аналітичні розв’язки одновимірної моделі у

деяких конкретних випадках ………………………………………………... 50

1.2.3. Вплив температури на розв’язки для розподілу потенціалу шару.…56

 1.2.4. Чисельні розв’язки для одновимірної моделі………..……………….60

1.3. Двовимірна модель розряду…………..……………………………………..65

 1.3.1. Чисельне моделювання в циліндричний системі координат …..…...71

 1.3.2. Зрівняння з експериментом та зауваження …..……………….....…...74

1.4. Висновки………………………………...…………………………………….77

2. ПРИСКОРЮВАЧ З ЗАМКНЕНИМ ДРЕЙФОМ ЕЛЕКТРОНIВ I

ГАЗОВИМИ СТIНКАМИ 79

2.1 Вступ………………………………………………………………………..….79

2.2. Вихідні положення і результати попередніх експериментальних

 досліджень ….................................................................................................81

2.3. Теоретична модель …………………………………..………………………86

2.3.1. Гідродинамічна одновимірна модель та простіші аналітичні

розв’язки…………………………………………………………………………...….86

 А. Слабкострумовий режим (Те = 0, ne = const) ………………….….88

18

 B. Сильнострумовий режим ( Те = 0, ne ≠ const)………………………90

 C. Вплив температури………………………………………………….….92

2.3.2 Гідродинамічна одновимірна модель і чисельні розв’язки….…..….94

2.3.3 Гібридна одновимірна модель і чисельні розв’язки……………..……97

А. Стаціонарна одновимірна модель…………………………..……..…..98

В. Нестаціонарна одновимірна модель…………………………..……..101

2.4. Чисельна двовимірна циліндрична гібридна модель………………..………105

2.5 Висновки………………………………………………………………...…....116

3. ПЛАЗМОВА ЛIНЗА З ПОЗИТИВНИМ ПРОСТОРОВИМ ЗАРЯДОМ

3.1. Вступ……………………………………………………………………...….117

3.2. Модель накопичення позитивного просторового заряду, оцінка

 величини створеного електричного поля…………………..……...……....120

3.3. Простіші аналітичні розв’язки та оцінки…………………...…….………..122

3.4. Чисельна модель та результати чисельного моделювання

3.4.1. Опис простішої чисельної моделі…………..………………………...128

3.4.2. Модель без урахування магнітного поля……..……………………...133

 3.4.3. Чисельна модель з урахуванням зовнішнього магнітного поля ..….138

 3.4.4. Розрахунок для важких іонів……………………………………..…...149

3.5. Заключні зауваження………………………..………………………………152

3.6. Висновки ………………………………………………………………......154

4. КЕРУВАННЯ ПУЧКАМИ НЕГАТИВНО ЗАРЯДЖЕННИХ

ЧАСТИНОК ПЛАЗМОВОЮ ЛІНЗОЮ З ПОЗИТИВНИМ

ПРОСТОРОВИМ ЗАРЯДОМ

Вступ…………………………………………………………………..…….……155

4.1. Фокусування та транспортування пучка електронів ………………..……157

 4.1.1. Фокусування магнітною та електростатичною лінзою……..……...157

 4.1.2. Фокусування лінзою позитивного об’ємного заряду

 слабкострумових пучків…………………………………...…………....163

А. Розрахункова модель…………………………………..………………..163

19

В. Результати чисельного моделювання……………………………....167

С. Зрівняння результатів моделювання з експериментальними

даними…………………………………..…………………………………..175

Д. Вплив струму та енергії електронного пучку………………..……..178

4.2. Фокусування пучків негативно заряджених іонів водню Н-……………..182

4.3. Фокусування лінзою позитивного об’ємного заряду сильнострумових

електронних пучків ………………..……………………………………….186

4.4. Висновки ……………………..…………………………………..………....209

5. ФІЗИЧНА ТА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОПТИЧНОГО ФІЛЬТРУ

Вступ……………………………………………………………..……………….212

5.1. Одновимірна гідродинамічна модель…………………………………..….215

5.1.1 Основні рівняння та оцінки ………….………………..…………….215

5.1.2. Моделювання формування прикатодного скачку електричного

потенціалу ………………………..………………………………………...218

 5.1.3. Моделювання формування радіального пучка електронів...............220

5.2. Двохвимірна модель фільтру (циліндрична система координат) ……….223

5.2.1. Основні рівняння та чисельна модель……………..…………….....223

5.2.2. Розподіл потенціалу у шарі……………………………………..…...226

5.2.3. Формування радіального пучку електронів та розрахунок

 траєкторій електронного пучку ………………………………..…...…227

 5.2.4. Результати моделювання плазмового потоку ...................................232

 5.2.5. Фокусування іонного пучку …………………...………………………238

А. Фокус товстої лінзи ………………………………………………..……..239

В. Порівняння з експериментом……………………………………………..242

5.3. Моделювання в кінетичному наближенні з урахуванням інтегралу

 зіткнень………………………………...……………………………..…….243

5.3.1. Опис моделі……………………………..............................................243

5.3.2. Результати чисельних розрахунків…………………………..….…..248

5.3.3. Моделювання крапель………………………..……………………...250

5.4. Висновки………………………………………...…………………………...254

20

6. ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕКСТРАКЦІІ І

ТРАНСПОРТУВАННЯ ПУЧКІВ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТОК

Вступ……………………………………………………………………………...257

6.1. Основні рівняння і опис чисельної моделі………………………………...259

6.2. Моделювання створення та транспортування іонних пучків з плазмових

джерел ……………………………………..………………………………..265

6.3. Використання коду для оптимізації іонного джерела та отримання

інтенсивних пучків багатозарядних іонів неметалів для потреб іонної

імплантації ………………………………………............................................273

6.4. Керування зарядовим розподілом енергійного пучка металевих іонів та

зменшення шуму …………………………………………………………......285

6.5. Моделювання формування електронного пучка з плазми газового

 розряду на основі порожнього катоду………………………………......….291

6.5.1. Вплив геометрії електродної системи та параметрів системи на

формування електронного пучка…………………………..………………294

А. Геометрія емісійного електроду…………..…………………………294

B. Положення фокусувальної підсистеми та величина

фокусувального струму………………………..……………………………296

C. Густина емісійного струму…………………………….………….…...298

D. Прискорювальний проміжок та простір дрейфу…………………299

6.5.2 Моделювання екстракції гостро - сфокусованого електронного

пучка з плазмової електронної гармати………………………...…...……...303

6.6. Висновки та заключні зауваження…………………………..…………….310

ВИСНОВКИ …………………………………………………...………………..313

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ………………… ………………………………..…...317

ДОДАТКИ 343

Д.1. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ……………..…343

Д.2. АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИССЕРТАЦІЇ ………………..……..349

21

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВАХ —вольт-амперні характеристики

ВР —високовольтний розряд

ВЧ —високочастотний

ІС — режим імпульсного струму

КШ — катодний (прикатодний) шар

МРС —магнетронна іонна розпилювальна система

ПАШ — прискорювач з анодним шаром

ПЗДЕ — прискорювач з замкненим дрейфом електронів

ПЛ — плазмова лінза

СР — сильнострумовий режим

НР —низкострумовий режим

EB-PVD —Electron Beam Physical Vapor Deposition

IE-PVD —Ion Enhanced PVD

РIC – метод частинок в комірці (Particle-in-Cell)

MEVVA—вакуумно-дугове іонне джерело

МС – метод Монте-Карло

PIC-MC—Particle-in-Cell + Monte-Carlo

ВИСНОВКИ

Удисертаціївирішеноширокеколопроблемстосовнопобудуваннята

оптимізаціїплазмооптичнихпристроївновогопоколіннянаоснові

комп’ютерногомоделювання

Найбільшважливимирезультатамидисертаціїє

Запропонованоплазмодинамічнумодельгазовихрозрядівмагнетронного

типувосновіякоїлежитьприпущенняонаявностівдіодномупроміжкурозряду

трьохквазіавтономнихобластейяківідрізняютьсяпохарактерупереносу

струмуНабазідвохрідинноїгідродинамікизробленоаналізплазмодинамічних

процесівциліндричногогазовогорозрядувпоперечномумагнітномуполіз

замкненимдрейфомелектронівіствореномодельстаціонарниххарактеристик

розрядувзалежностівідфізичнихпараметрівсистеми

Впершерозробленомодельприскорювачахоллівськоготипуіззамкненим

дрейфомелектронівтавідкритимитобтонеобмеженимиметаломчи

діелектрикомстінкамиҐрунтуючисьнаідеїнеперервностіповногострумущо

протікаєвсистемівмежаходновимірноїгідродинамічноїмоделіотриманоточні

аналітичнірозв’язкиякіописуютьрозподілелектричногопотенціалув

прискорювальномупросторіПобудованодвовимірнугібриднумодельв

циліндричнихкоординатахврамкахякоїпоказаноможливістьстворення

позитивногопросторовогозарядунавісісистемиПоказанощопристіканні

іонівзгорбаелектричногопотенціалуможливостворенняпотужногоіонного

потокуякийрухаєтьсяповздовжвісісиметріївобидвісторонивідцентрущо

даєзмогурозглядатицюмодельвякостіпрототипумалогоракетногодвигуна

Впершепобудованатеоретичнамодельформуваннядинамічноїхмари

позитивногопросторовогозарядувумовахрозподілузонгенераціїпозитивного

зарядуійогонакопиченнянапідставіспрощеноїгідродинамічноїмоделів

рамкахякоїодержаноаналітичнірозв’язкиМетодомчастинокукомірці

побудованочисельнумодельстворенняхмарипросторовогозарядув



циліндричнихкоординатахурамкахякоїотриманоумовиоптимізаціїлінзи

просторовогозарядуяказдатнаефективнокеруватипучкамисильнострумових

електронівтанегативнозарядженихіонівМодельпідтвердженорезультатами

експериментуНаосновімоделюваннябулооптимізованеекспериментальний

зразоклінзи

Запропонованотаствореноматематичнумодельплазмооптичногофільтру

придатногодлясуттєвогоочищеннявідзапорошенняметалевоїплазмиерозійних

джерелМодельзаснованонаоригінальнійідеїствореннярадіальногопотоку

швидкихелектронівМоделюваннятазробленіоцінкипоказуютьщотакийпотік

можеслужитиефективнимджереломдодатковоїенергіїдлявипаровуванняі

подрібненнямікрокрапельПобудованокомп’ютернийкодзурахуванням

процесівіонізаціїзбудженняпружногозіткненнятаутвореннябагатозарядових

кластерівякийдозволяємоделювативиникненнявисокоенергійного

електронногопучкатааналізуватиможливіканалийогоенергетичнихвитрат

припроходженнікрізьплазмовесередовищеМоделюванняздійснюєтьсяв

кінетичномунаближеніприцьомузадачарозглядаєтьсявциліндричнійсистемі

координатірозв’язуєтьсяметодомрозщепленнярівнянняБольцмануна

підзадачірозв’язокрівнянняВласоваметодомчастиноктакорегування

знайденихтраєкторійчастинокзвикористаннямметодівМонтеКарло

Отриманоновіданістосовноумовфункціонуваннявикористаннята

побудуванняплазмооптичнихпристроївновогопоколіннядлярізноманітних

науковихтатехнологічнихпотреб

Розвиненікінетичнігідродинамічнітагібриднімоделіплазмооптичних

пристроївновогопоколіннярезультатирозрахунківзаякимидозволяють

передбачатиоптимальніпараметритахарактеристикинеобхіднідляїх

оптимальногофункціонування

Побудованокомп’ютернийкодвитягуваннятатранспортуванняпучка

зарядженихчастинокзплазмовихджерелуякомувикористовуєтьсякінцеве



різницеватехнологіятаітераційнийалгоритмрозв’язкусамоузгодженоїзадачі

наосновіякогоможнаоптимізуватиплазмоведжерело

Задопомогоюпобудованогокодубулозмодельованепобудованеі

оптимізованеіоннеджерелодлябагатоелементноїіонноїімплантаціїщо

дозволилоотриматипучкибагатозарядногофосфорузрекорднимнатойчас

зарядовимстаноматакожоптимізованоіоннеджерелодляотриманняпучків

борудляпотребіонноїімплантації

Задопомогоюпобудованогокодубулодослідженовпливгеометрії

витягувальноїсистемиодноібагатоапертурноїнапараметриотриманих

електроннихтаіоннихпучківБулопоказанощоіснуєоптимальнанапругаяка

дозволяєодержатимаксимальнуінтенсивністьпучкаімінімальнийрозбігпри

проходженнінимпросторудрейфуБулоз’ясованопараметриприякихможна

отримуватиелектронніпучкиздіаметромблизькимдодіаметруемісійного

отвору

Задопомогоюпобудованогокодубулопоказанощоаксіальнемагнітне

полевприскорювальномупроміжкуможезапобігатипробиттюісприяти

підвищеннюструмупучкатастворенаелектроннагарматазплазмовимкатодом

наякійекспериментальнобулоотриманогостросфокусованийелектронний

пучокдіаметромммзвиділяємоюпотужністюнамішеніпонадкВтмм



щоєперспективнимдлятехнологіїплавленнятазваркиматеріалівнаприклад

зварюванняелектроннимпроміннямцирконієвихсплавів

Запропонованоіреалізованоадекватнуметодикурозрахунківнаоснові

гідродинамічноготакінетичногопідходу

характеристикпотоківзарядженихчастинокякіпроходятькрізьплазмооптичнісистеми

створеннябагатозаряднихкластерівтаїхвпливнахарактеристикищільної

металевоїплазми



створенняхмарипросторовогозарядуяказдатнакеруватипотоком

зарядженихчастинок

Зарезультатамитеоретичногоаналізутамоделювання

запропонованотавипробуванооригінальнийциліндричний

розпилювальнийпристрійпобудованийнапринципахплазмооптики

побудованоекспериментальністендитамакетиплазмовоїлінзиз

позитивноюхмароюоб’ємногозарядунаякихпродемонстрованоефект

фокусуванняелектроннихсильнострумовихпучківтаотриманоефектстиснення

широкоапертурногоелектронногопучкузструмомАбільшніжвраздо

щільностіструмууфокусіАсм



побудованоекспериментальнийстендтавиконуютьсяекспериментальні

дослідженняплазмовогоприскорювачазвідкритимистінкамиякийпривабливий

длярізноманітнихтехнологічнихзастосуваньтазокремаможеслужити

прототипоммалогоракетногодвигуна

запропонованітанаданорекомендаціїдопобудуванняоптимізованого

плазмооптичногофільтрунаосновіплазмовоїлінзидляподрібненнята

випаровуваннямікрокрапельвпотоціщільноїметалевоїплазмиерозійних

джерел