

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Бабенко Євгенії Віталіївни

«Вакуумне ультрафіолетове випромінювання з плазми сильнострумкових імпульсних діодів», поданої на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 - фізика плазми

Актуальність

Дисертація Є.В. Бабенко присвячена актуальній проблемі – розробці компактних потужних плазмових джерел випромінювання в діапазоні вакуумного ультрафіолету (ВУФ) з довжиною хвиль $\approx 10 - 20$ нм. Актуальність та доцільність дисертаційної роботи обумовлена потребою таких джерел випромінювання для подальшого розвитку різних галузей як науки, так і технологій, наприклад при фотолітографії в наноелектроніці, УФ – спектроскопії, астрофізиці, медицині тощо. Обраний напрям досліджень дисертаційної роботи є частиною фундаментальних науково-дослідних робіт, які виконувались в межах держбюджетної теми (номер державної реєстрації № 0111U001466), у яких дисертант брав участь у якості виконавця.

Зацікавленість в розробці плазмових джерел випромінювання в діапазоні 10 – 20 нм для екстремальної ультрафіолетової літографії пояснюється рядом переваг таких джерел перед існуючими синхротронними та лазерними джерелами, в першу чергу значно меншими габаритними розмірами плазмових систем та їх відносно невисокими цінами. Розробка плазмових джерел ВУФ випромінювання передбачає повернення до активних дослідження імпульсних розрядних систем типа плазмовий фокус, Z-пінч, Θ -пінч, капілярних розрядів та їх комбінацій з лазерними ситемами. Незважаючи на те, що на даний час існує достатньо багато робіт, присвячених створенню плазмових джерел випромінювання в діапазоні екстремального ультрафіолету, але основні проблеми таких систем, а саме, низький коефіцієнт корисної дії та значні пошкодження і забруднення перших колекторних дзеркал продуктами горіння

розряду, ще так і не вирішені. Представлені в дисертації результати дослідження генерації вакуумного ультрафіолетового випромінювання з плазми сильнострумового імпульсного діоду з обмеженою робочою поверхнею електроду, можуть сприяти вирішенню цих проблем. Так, додатковий пучковий нагрів плазми, обумовлений особливістю геометрії розрядної комірки, забезпечує більш високу ефективність перетворення енергії, що вводиться до розряду, в енергію ВУФ-випромінювання. Знайдений режим направленного ВУФ випромінювання з плазми розряду дозволяє встановлювати колекторні дзеркала на безпечній, з точки зору їх пошкоджень, відстані. Крім того, розрахунки показали, що режим спрямованого випромінювання дозволяє зменшити розміри площі цих дзеркала без суттєвої втрати енергії випромінювання.

Зміст дисертації.

Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів (чотири з яких присвячені викладенню оригінальних результатів), висновків, переліку посилань, списку публікацій за матеріалами дисертації та п'яти додатків.

У **вступі** обґрунтовано 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 і семінарах.

В **першому** розділі дисертаційної роботи наведено огляд літератури по тематиці дисертації, а саме сучасного стану джерел ВУФ випромінювання для нанолітографії; приведено головні результати, отримані в інших роботах (особлива увага була приділена плазмовим джерелам випромінювання); відзначені аспекти, які раніше не були розглянуті та підлягають вивченню у цій роботі; сформульовано низку задач, які планується вирішити.

У **другому** розділі наведено опис експериментальної установки, на якій проводилися дослідження, умов проведення експериментів, розробленого апаратно-програмного комплексу вимірювання випромінювання в діапазоні довжини хвиль 12,2–15,8 нм з використанням детекторів *AXUV-20*, системи миттєвої фотореєстрації в оптичному діапазоні з тривалістю експозиції ~ 10 нс на основі електронно-оптичного перетворювача, багатокатодної фотоемісійної системи реєстрації випромінювання в широкому діапазоні вакуумного ультрафіолету, системи зондової діагностики, методик обробки отриманих експериментальних результатів. Методики калібрування апаратно-програмного комплексу на основі детекторів *AXUV-20* та багатокатодної фотоемісійної системи реєстрації ВУФ представлено в додатках А та Б, відповідно.

В **третьому** розділі досліджено умови формування в обмеженому плазмовому діоді на парах олова потужних (~ 1 МВт) пікових (тривалістю 100–200 нс) імпульсів випромінювання в діапазоні довжини хвиль 12,2–15,8 нм. Для цього детально розглянуто етапи розвитку розряду, а також процеси, що відповідають за утворення плазми високої густини на цих етапах. Встановлено залежності енергії ВУФ випромінювання від параметрів розряду для різних діаметрів потенціального електрода. На основі експериментальних даних розряду було розраховано середню індуктивність системи, середнє значення активного опору та активної напруги розряду, що дозволило розрахувати активну потужність, яка вводиться в розряд. Для з'ясування механізму вводу енергії в плазму за допомогою системи одиночних електричних зондів проведено дослідження часової динаміки просторового розподілу потенціалу плазми. Встановлено, що основну роль в генерації пікового випромінювання в діапазоні довжини хвиль 12,2–15,8 нм відіграє пучковий механізм нагріву плазми розряду.

Четвертий розділ присвячений вивченню анізотропії випромінювання в діапазоні довжин хвиль 12,2 – 15,8 нм з плазми розряду. Встановлено, що анізотропія випромінювання характерна лише для коротких пікових імпульсів тривалістю 100 – 200 нс. Знайдено залежності коефіцієнта спрямованості випромінювання I_{\parallel}/I_{\perp} (де I_{\parallel} та I_{\perp} - інтенсивності ВУФ випромінювання вздовж

та впоперек розряду, відповідно) від енергії, що вводиться в розряд, та густини розрядного струму для різних діаметрів потенціального електроду. Показано, що випромінювання у вигляді пікових імпульсів генерується у плазмових утвореннях малого розміру (довжиною 2–7 мм та діаметром 0,5–5 мм), що локалізується біля поверхні потенціального електроду. Встановлено вплив величини та топології зовнішнього магнітного поля на характеристики ВУФ випромінювання.

У **п'ятому** розділі дисертації розглянута феноменологічна модель генерації пікового ВУФ випромінювання плазмою розряду. В основу запропонованої моделі лежать припущення, що нагрівання плазми відбувається за рахунок інжекції електронного пучка, а генерація ВУФ випромінювання відбувається за рахунок радіаційно-стимульованого ефекту за участі багаторазово іонізованих іонів олова (Sn^{+6} , Sn^{+7} , Sn^{+8} , Sn^{+9} , Sn^{+610}). Розраховані залежності коефіцієнта спрямованості випромінювання від енерговмісту в розряді знаходяться в задовільній згоді з експериментальними даними.

У **висновках** чітко сформульовано основні результати, отримані в дисертації.

Наукове значення

Вперше встановлено особливості генерації потужних (до 1 МВт) коротких ($t \approx 100 - 200$ нс) імпульсів ВУФ випромінювання з довжиною хвилі ≈ 13.5 нм плазмою імпульсного розряду в парі олова. Знайдено залежності характеристик таких імпульсів ВУФ випромінювання від розрядної топології, енерговмісту в розряді тощо. Встановлено, що основну роль в нагріванні плазми в зоні генерації таких коротких імпульсів ВУФ випромінювання відіграє електронний пучок, який формується у подвійному електричному шарі об'ємного заряду поблизу потенційного електроду. Знайдено взаємозв'язок між просторовою анізотропією ВУФ випромінювання та формою плазмових утворень в розряді. Запропоновано феноменологічну модель, яка описує особливості генерації коротких імпульсів ВУФ випромінювання в таких плазмових системах.

Практичне значення

Одержані результати можуть бути використані при проектування перспективних систем генерації потужних імпульсів ВУФ випромінювання з довжиною хвилі ≈ 13.5 нм для нанолітографії, ВУФ-спектроскопії тощо.

Достовірність результатів

Отримані результати, висновки та запропоновані на цій основі рекомендації виглядають цілком достовірними та обґрунтованими. Достовірність отриманих результатів забезпечена використанням сучасних експериментальних методів і діагностичних методик, узгодженням вимірних даних з результатами числового моделювання.

Апробації

Основні наукові висновки і результати дисертаційної роботи Бабенко Є.В. досить повно відображені у 8 статтях у наукових фахових журналах, 2 з яких опубліковано у виданнях підставу стверджувати, що всі основні положення дисертації в повній мірі іноземних держав. До наукометричних баз даних Scopus та Web of Science включено 6 статей. Роботи доповідалися на наукових семінарах та 9 конференціях, 8 з яких міжнародні. Серед публікацій відсутні тотожні за змістом. Аналіз представлених публікацій дає опубліковано та апробовано на конференціях.

Автореферат адекватно відображає суть дисертації, її основні положення й висновки

ЇЗауваження

1. Рис. 3.17 та рис.3.18. Не зовсім зрозуміло, чим відрізняються ці залежності, точніше в чому відмінність $W_{\Delta\lambda}^{\max}$ від $W_{\Delta\lambda}$. В підписах до рисунків говориться: до рис. 3.17 – про максимальну конверсію, а до рис. 3.18 про відношення $W_{\Delta\lambda}^{\max} / W_0^{\max}$. Але це одне і те ж. А в той же час значення цих величин на рисунках відрізняються.

2. Ст. 96. «при повышении разрядного тока энергетическое распределение электронов плазмы резко расширяется». Чи правильно я розумію, що у ФРЭЭ плазми «відростає хвіст» з більшим, порівняно з максвелівським розподілом, вмістом високоенергетичних електронів?
3. Рис. 4.9. Не зовсім зрозумілий механізм утворення «плазменной спицы» (нижнє фото). Якщо (Если (як впливає з тексту) електронний пучок в другому на півперіоді інjektується в сторону «бувшого» високопотенційного електроду, то що є причиною появи цієї спиці, направленої в протилежну сторону?
4. Оскільки вважається, що генерація ВУФ випромінювання відбувається за рахунок радіаційно-стимульованого ефекту за участі багаторазово іонізованих іонів олова (Sn^{+6} , Sn^{+7} , Sn^{+8} , Sn^{+9} , Sn^{+610}) (це припущення покладено в основу запропонованої моделі), було б доцільно навести хоча б деякі характеристики цих іонізованих станів олова (пороги іонізації, перетини іонізації електронним ударом тощо). Це дало б можливість хоча б грубо оцінити коректність одержаних в моделі значень температури електронів (4 та 17 eV) та ступінь іонізації іона Sn^{+7} , Sn^{+8} .

Наведені зауваження не стосуються основних положень, що виносяться на захист, не знижують високу оцінку дисертаційної роботи Бабенко Є. В.. і не впливають на достовірність отриманих результатів.

Структура дисертації в повній мірі відповідає вимогам, які пред'являються до кандидатських дисертаційних робіт. Зміст дисертації послідовно відображає постановку задач і їх рішення. Тому представлена дисертація є цілісною завершеною роботою..

Дисертація Бабенко Євгенії Віталіївни «Вакуумне ультрафіолетове випромінювання з плазми сильнострумівих імпульсних діодів» за актуальністю, ступенем новизни, значенням для науки та практики, а також за структурою та об'ємом відповідає вимогам Атестаційної колегії Міністерства освіти і науки України, зокрема п.п. 9 і 11, «Порядку присудження наукових

ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника» № 567 від 24 липня 2013р., щодо кандидатських дисертацій. Вважаю, що Євгенія Віталіївна Бабенко заслуговує на присвоєння 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. Ціолко

Підпис засвідчую:
Вчений секретар ІФ НАНУ



В. С. Манжара