

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу

Положія Гліба Євгеновича

на тему «Формування пучків в установках

протонно-променевої літографії»

представлену на здобуття ступеня доктора філософії

в галузі знань 10 – Природничі науки

за спеціальністю 104 – Фізика і астрономія

Актуальність теми дисертації.

Дисертаційна робота Положія Г.Є. присвячена дослідженню можливості збільшення роздільної здатності протонно-променевої літографії, а також розвиненню нових методів виготовлення малорозмірних структур за допомогою протонної літографії.

Прогрес в галузі виробництва електроніки та метаматеріалів ставить нові вимоги до контрольованого виготовлення малорозмірних структур розміром одиниці нанометрів. Наразі в світовій промисловості успішно використовується EUV літографія, яка, однак, має недолік у вигляді великої вартості обладнання. Однією з альтернатив може стати технологія протонно-променевої літографії, в якій для нанесення зображень та створення малорозмірних структур використовуються протонні пучки з енергією декілька МеВ. Порівняно з іншими технологіями, протонно-променева літографія має ряд унікальних переваг, зокрема можливість прямого нанесення зображення на матеріал без необхідності виготовлення маски, та здатність створення тривимірних структур з високим аспектним співвідношенням.

Суттєвою проблемою, що стоїть на заваді широкого використання протонної літографії, є низька роздільна здатність установок за умови достатньої сили струму протонного пучка. Збільшення роздільної здатності супроводжується падінням струму пучка до значень, які роблять непрактичним промислове використання протонної літографії. Дослідження здобувача, безумовно, є актуальним, оскільки спрямоване на подолання вказаної проблеми та збільшення роздільної здатності зондоформуючої системи на базі розподіленого ортоморфного квадруплету магнітних квадрупольних лінз.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Проведено теоретичне моделювання зондоформуючої системи на базі розподіленого ортоморфного квадруплету з повною корекцією сферичних аберацій трьома октупольними лінзами-коректорами, а також частковою

корекцією двома і однією октупольними лінзами. Показано можливість зменшення розміру пучка в такій системі до 10 нм.

Експериментальну частину дослідження було проведено на базі аналітичного прискорювального комплексу «Сокіл» Інституту прикладної фізики НАН України (м. Суми), де здобувачем було впроваджено векторний метод створення малорозмірних структур за програмно заданими шаблонами.

Достовірність результатів забезпечується використанням перевірених теоретичних методів, зокрема методу матрицантів для моделювання динаміки пучка в зондоформуючій системі.

Можна зробити висновок, що поставлене наукове завдання з розробки методики збільшення роздільної здатності зондоформуючої системи на базі ортоморфного квадруплету квадрупольних лінз було виконане в дисертаційній роботі, а здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Положія Г.Є. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 104 – Фізика і астрономія та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми «Фізика» .

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Положія Гліба Євгеновича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота написана українською мовою.

Матеріал роботи викладений структуровано і послідовно, що дає іншим дослідникам можливість зрозуміти методи та результати дослідження. Дисертація проілюстрована графічним матеріалом у вигляді ілюстрацій, графіків з результатами розрахунків, фотографіями та одержаними на експериментальній установці.

Дисертація складається зі вступу, 3 розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації 172 сторінки.

У **вступі** розглянуто сучасний стан досліджень в галузі протонно-променевої літографії, її переваги та недоліки, сформульовано мету і завдання дослідження та обґрунтовано його актуальність, вказано методи дослідження, а

також зв'язок дисертаційного дослідження з науковою тематикою Інституту прикладної фізики НАН України.

У **першому розділі** проведено огляд основних типів прискорювачів та зондоформуючих систем, які використовуються в наукових установах світу. Розглянуто переваги та недоліки іонно-оптичних зондоформуючих систем, зокрема розподіленого триплету та ортоморфного квадруплету магнітних квадрупольних лінз.

Другий розділ присвячено теоретичному моделюванню динаміки пучка в зондоформуючій системі методом матрицантів. Показано можливість зменшення розміру пучка до 10 нм в системі на базі ортоморфного квадруплету шляхом корекції сферичної аберації за допомогою трьох октупольних лінз-коректорів. Розглянуто доцільність часткової корекції сферичних аберацій за допомогою меншого числа лінз-коректорів. Перевагою часткової корекції є менша кількість лінз-коректорів, що значно спрощує побудову та налаштування зондоформуючої системи.

У **третьому розділі** представлено результати експериментальних досліджень. Наведено зображення малорозмірних структур, отриманих на каналі ядерного скануючого мікрозонда Інституту прикладної фізики НАН України. Здобувачем було впроваджено векторний метод створення структур, та проведено пілотні експерименти з протонно-променевої літографії по хітозану, а також швидкого створення лінійних структур пучком, сфокусованим в лінію.

Основний текст дисертації завершено висновками дослідження. Дисертація містить два додатки. В додатку А наведено перелік публікацій здобувача за темою дисертації. Додаток Б містить матрицанти оптичних елементів зондоформуючої системи – квадрупольної лінзи та дрейфового проміжку, записані у вигляді лістингу мовою програмування С.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Наукові результати дисертації висвітлені у 18 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 5 статей у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України та 1 стаття в зарубіжному науковому фаховому виданні; 6 статей у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та Scopus, з яких 4 статті у виданнях, віднесених до третього квартилу (Q3) та 2

статті у виданнях, віднесених до четвертого квартилю (Q4) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank.

Апробація результатів дисертаційної роботи висвітлена в 12 доповідях на наукових фахових конференціях.

Описані в дисертаційній роботі наукові результати повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. В розділі 2 дисертації описана процедура моделювання динаміки пучків методом матрицантів. Доцільно було також дати коротку характеристику самого методу та області його застосування.

2. В формулі (2.1) і наступних використовується поняття релятивістської маси, що залежить від швидкості. В сучасній науковій літературі, однак, загальноприйнятим є використання поняття інваріантної маси (маси спокою), та релятивістських виразів для імпульсу та енергії частинки. Доцільно було також навести обґрунтування необхідності використовувати саме релятивістські рівняння руху в діапазоні енергій протонів, характерних для протонної літографії.

3. Параграфи «3.2.3. Фотоніка та рідинні мікроструктури» та «3.2.4. Мікро- та наноштампи» доцільно було розмістити в першому розділі, оскільки вони носять в основному оглядовий характер.

4. В анотації англійською мовою в першому абзаці використовується застарілий термін «candidate of physical and mathematical sciences».

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу.

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Положія Гліба Євгеновича на тему «Формування пучків в установках протонно-променевої літографії» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань 10 – Природничі науки. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.6 – 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня

доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Положій Гліб Євгенович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 104 – Фізика і астрономія.

Рецензент:

Старший науковий співробітник
відділу квантової електродинаміки сильних полів
Інституту прикладної фізики НАН України,
кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник



Олександр НОВАК

Підпис рецензента

с.н.с. відділу квантової електродинаміки
сильних полів, к.ф.-м.н., с.н.с., О.П. Новака
засвідчую.

Учений секретар

Інституту прикладної фізики НАН України,
к.ф.-м.н., с.н.с



Олексій ВОРОШИЛО