

РЕЦЕНЗІЯ

офіційного рецензента 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 та астрономія»

Актуальність теми дисертації.

Дисертаційна робота Гліба Положія присвячена впровадженню методу протонно-променевої літографії малорозмірних структур на каналі ядерного скануючого мікрозонду аналітичного прискорювального комплексу “Сокіл” Інституту прикладної фізики Національної академії наук України.

Променева літографія, зокрема протонна літографія, є на передовій лінії інноваційних технологій в області виготовлення мікросхем і наноструктур. З швидким розвитком електронних технологій існує постійна потреба в підвищенні роздільної здатності літографічних процесів для виробництва мікросхем з дедалі меншими розмірами елементів. Традиційні методи літографії, зокрема на основі ультрафіолетового (UV) випромінювання, досягли своїх фізичних меж у роздільній здатності. Протонна літографія має потенціал для досягнення більш високої роздільної здатності. Це забезпечує можливість створення мікросхем з ще більшими щільностями транзисторів і меншими розмірами компонентів, що безпосередньо вплине на продуктивність та ефективність електронних пристроїв.

Сучасні методи літографії, такі як екстремальна ультрафіолетова (EUV) літографія, стикаються з серйозними технічними викликами, включаючи складність виготовлення і експлуатації високоточних оптичних систем та дорогих матеріалів. Протонна літографія пропонує альтернативу, здатну подолати ці труднощі завдяки своїм унікальним властивостям. Вона не потребує складних оптичних систем і дозволяє досягти високої роздільної здатності за рахунок використання протонів, які мають високий енергетичний потенціал для створення детальних нано-структур. Дослідження у цій сфері також сприяють розробці нових матеріалів з унікальними електронними, оптичними і магнітними властивостями.

Зменшення залежності від дорогих і важкодоступних матеріалів, таких як рідкісноземельні елементи, та зниження використання небезпечних хімічних сполук, що використовуються в традиційних методах літографії, є важливими перевагами протонної літографії. Це не лише зменшує витрати на виготовлення мікросхем, але й зменшує екологічне навантаження, пов'язане з виробництвом електронних компонентів.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в тому, що у ході дослідження вперше проведено комп'ютерне моделювання динаміки іонного пучка в зондоформуючих системах на основі ортоморфного квадруплету магнітних квадрупольних лінз з октупольними коректорами, що теоретично дозволяє досягти роздільної здатності 10...100 нанометрів. Удосконалено методику протонно-променевої літографії малорозмірних структур шляхом впровадження векторного методу та системи швидкого скидання пучка. Вперше проведено протонно-променеву літографію на плівках хітозану, отримавши мікроструктури за векторними шаблонами. Ці досягнення сприяють розвитку високоточної літографії та управління іонними пучками в наукових і прикладних дослідженнях.

Наукові дослідження були виконані здобувачем у відділі фізики пучків заряджених частинок Інституту прикладної фізики Національної академії наук України під час виконання наукової роботи «Формування пучка в установках протонно-променевої літографії високої роздільної здатності», державний реєстраційний номер роботи 0120U101035 під керівництво доктора фізико-математичних наук, професора Пономарьова Олександра Георгійовича.

На основі цього можна зробити висновок, що у дисертаційній роботі поставлене наукове завдання з впровадження методу протонно-променевої літографії малорозмірних структур на каналі ядерного скануючого мікрозонду аналітичного прискорювального комплексу "Сокіл" виконано повністю, 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 та астрономія" та напрямкам досліджень відповідно до освітньо-наукової програми «Фізика»

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям фізики пучків заряджених частинок.

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.

Дисертація складається з розділів, що охарактеризують послідовність представлення результатів даної роботи. Структура представлення викладених результатів дисертаційного дослідження дає можливість іншим дослідникам зрозуміти крок за кроком послідовність етапів проведених досліджень. Графічний матеріал, який був представлений, як власними фотографіями, скріншотами досліджень і розрахунків, так і загальноприйнятими ілюстраціями подає матеріал зручно і стисло.

Дисертація складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації 172 сторінок.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, описано стан розробки даної тематики у вітчизняній науці та за кордоном, наведено зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, мета та завдання дослідження, об'єкт, предмет і методи дослідження, а також наукова та практична новизна отриманих результатів. Описано особистий внесок здобувача та представлена інформація щодо апробації результатів дисертації та публікацій.

У першому розділі проведено аналіз літературних джерел з дослідження існуючих проблем протонно-променевої літографії. Наведено існуючі та перспективні проекти прискорювальних систем та зондоформуючих систем. Розглянуто існуючі схеми магнітних квадрупольних лінз, їх переваги та недоліки. Наведено висновки до першого розділу.

У другому розділі наведено теоретичні дослідження динаміки пучка в зондоформуючій системі, приведено можливі варіанти поліпшення іонно-оптичних властивостей таких систем, надано характеристики експериментального обладнання. На основі методу матрицантів побудовано формалізм, який описує алгоритм визначення живлення октуполів для повної та часткової корекції сферичних аберацій. Показано, що в зондоформуючих системах на базі розподіленого ортоморфного квадруплету магнітних квадрупольних лінз з малою робочою відстанню та великими коефіцієнтами зменшення достатньо застосовувати дволінзові октупольні коректори. Наведено висновки до другого розділу.

У третьому розділі дисертаційної роботи представлено результати експериментальних досліджень створення малорозмірних структур. Впроваджено векторний метод виготовлення малорозмірних структур, що дав змогу збільшити плавність елементів та полегшити масштабування. Отримано малорозмірні структури, зроблені як растровим, так і векторним методом, що дає змогу наочно порівняти експериментальні результати. Були отримані лінійні та векторні малорозмірні структури у тонкій плівці хітозану на полікоровій підкладці і товстих плівках хітозану без підкладки, як без покриття,

так і з покриттям тонкими плівками титану, нітриду титану та оксиду цинку. Наведено висновки до третього розділу.

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 6 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 5 статей у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 1 стаття у іноземному науковому виданні, проіндексованому у базах даних Web of Science Core Collection та Scopus та віднесеному до третього квартилю (Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank.

Також результати дисертації були апробовані на 12 наукових фахових конференціях.

Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. У дисертації не розкрито літературний огляд робіт по електронно-променевої літографії. Цей метод лише згадується у першому та третьому розділах. Доцільно було б показати переваги та недоліки методу протонної літографії порівняно і з цим методом.
2. При проведенні порівняння наявних апаратних реалізацій протонно-променевої літографії, здобувач порівнює розміри зонду та струм пучка, коефіцієнт зменшення. У той же час значення початкового струму здобувачем не наводяться. Дана інформація гармонійно б доповнила порівняння різних методик та їх реалізацій.
3. Також у роботі міститься ряд технічних помилок, зокрема у списку публікацій здобувача присутні іноземні слова «Выпуск 3, Страницы 153 — 157», відсутні крапки у скороченні імен співавторів. У списку літератури джерела оформлені у різних стилях (автор – назва роботи і навпаки). У англійській версії анотації вжито помилковий термін «candidate of physical and mathematical sciences (Doctor of Philosophy)»

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. Матеріал у дисертації викладено послідовно, всі основні результати обґрунтовані і мають чітке наукове пояснення. У кожному розділі є висновки.

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 фізики пучків заряджених частинок. 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 та астрономія”.

Рецензент:

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

Сергій ЛЕБЕДИНСЬКИЙ

Підпис рецензента

с.н.с. відділу квантової електродинаміки
сильних полів, к.ф.-м.н., С.О. Лебединського
засвідчую

учений секретар

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



Олексій ВОРОШИЛО