

## **ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА**

**на дисертаційну роботу**

**Положія Гліба Євгеновича**

**«Формування пучків в установках протонно-променевої літографії»  
подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань  
10 "Природничі науки" за спеціальністю 104 "Фізика та астрономія"**

### **Актуальність теми дисертаційної роботи**

Протонно-променева літографія є технологією, що сьогодні швидко розвивається, за допомогою якої можливо створювати як двовимірні, так і тривимірні структури нанометрового масштабу. Ця технологія має значний потенціал -- експериментальні дані та теоретичні прогнози вказують на те, що за її допомогою можливо створювати структури з розміром менше за 10 нм. Однак відсутність зручного для користувача комерційного інструменту з малим розміром зонда наразі стримує потенційно широкий спектр сфер застосування протонно-променевої літографії.

Подана дисертація присвячена вирішенню ряду задач протонно-променевої літографії. Дисертантом проведено комп'ютерне моделювання динаміки іонного пучка в зондоформуючих системах на основі ортоморфного квадруплету магнітних квадрупольних лінз з одним, двома та трьома октупольними лінзами-коректорами. Продемонстровано теоретичну можливість досягнення роздільної здатності в десятки нанометрів. Проведено ряд експериментальних досліджень за допомогою АПК "Сокіл" в Інституті прикладної фізики Національної академії наук України. А саме вперше проведено експерименти з протонно-променевої літографії на плівках хітозану. Удосконалено опромінення зразків завдяки впровадженню векторного методу протонно-променевої літографії малорозмірних структур. Удосконалено керування пучком протонів мегаелектронвольтової енергії.

Тому дослідження процесів та явищ, які відбуваються під час протонно-променевої літографії, удосконалення експериментального устаткування та його застосування на нових матеріалах, які проведені у дисертаційній роботі Положія Г.Є., є актуальними й важливими.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами фундаментальних та прикладних досліджень**

Дисертаційна робота виконана в Інституті прикладної фізики Національної академії наук України. Результати роботи одержані під час виконання наукової роботи «Формування пучка в установках протонно-променевої літографії високої роздільної здатності», державний реєстраційний номер роботи 0120U101035. Дисертант брав участь у виконанні зазначеної роботи як виконавець наукових досліджень та під час підготовки проміжних та заключних звітів.

### **Основні положення та висновки роботи, їх новизна, обґрунтованість та достовірність**

В світовій практиці на експериментальних установках протонно-променевої літографії розмір зонда порядку десятків нанометрів досягається за допомогою зондоформуючих систем на основі оксфордського триплету. Ці системи мають недоліки. Коефіцієнти зменшення є неоднаковими за двома осям перерізу пучка і зменшення порядку тисячі досягається тільки вздовж однієї осі. Через це такі системи мають малий аксептанс, що значно зменшує струм пучка на мішені. Дисертантом розглянуто іншу зондоформуючу систему, яка базується на основі ортоморфного квадруплету і має однакові коефіцієнти зменшення за обома осями. Щоб зменшити власні аберації магнітних квадрупольних лінз та з метою досягнення коефіцієнтів зменшення порядку тисячі в дисертаційній роботі Положія Г. Є. розглянуто зондоформуючі системи на основі ортоморфного квадруплету магнітних квадрупольних лінз з октупольними лінзами-коректорами. Проведене в роботі моделювання показало, що такі системи можуть досягати коефіцієнтів зменшення порядку тисячі при розмірі зонду 10 нм. Дисертаційна робота також містить ряд цікавих експериментальних результатів, що отримані за допомогою АПК "Сокіл" в Інституті прикладної фізики Національної академії наук України.

До найбільш значних та нових результатів дисертаційної роботи слід віднести наступні.

- Проведено комп'ютерне моделювання динаміки іонного пучка в зондоформуючих системах на основі ортоморфного квадруплету магнітних квадрупольних лінз з одним, двома та трьома октупольними лінзами-коректорами та продемонстровано теоретичну можливість досягнення нанометрової роздільної здатності.
- Проведено експерименти з протонно-променевої літографії з плівками хітозану.
- На каналі ядерного мікрозонду аналітичного прискорювального комплексу "Сокіл" Інституту прикладної фізики Національної академії наук України удосконалено опромінення зразків завдяки впровадженню векторного методу протонно-променевої літографії малорозмірних структур та удосконалено керування пучком протонів мегаелектронвольтової енергії завдяки впровадженню та випробуванню системи швидкого скидання пучка

Усе вище сказане свідчить про те, що в дисертаційній роботі було розв'язано ряд важливих задач пов'язаних з протонно-променевою літографією.

Висновки та наукові положення дисертаційної роботи впливають з досліджень, які виконані із застосуванням адекватних моделей і використовують загальноприйняті методи теоретичних досліджень. Отримані експериментально малорозмірні структури були досліджені методом растрової електронної мікроскопії. Цей метод є надійним для обґрунтування кількісних та якісних результатів досліджень. Усе це дає підставу вважати результати дисертаційної роботи достовірними та обґрунтованими.

### **Значення для науки і практики отриманих результатів**

Комп'ютерне моделювання зондоформуючих систем на основі ортоморфного квадруплету магнітних квадрупольних лінз з однією, двома та трьома октупольними лінзами-коректорами, що виконане в процесі роботи над

дисертацією, демонструє можливість створення установок для протонної літографії з роздільною здатністю десятки нанометрів. Такі системи відкривають перспективи виробництва наноелектронних пристроїв на рівні найкращих сучасних технологічних процесів. Експерименти з хітозаном демонструють можливості протонно-променевої літографії для нових матеріалів, що може бути корисним, наприклад, для біомедицини. Отримані у роботі результати можуть бути використані у лабораторіях дослідницьких установ НАН України та вищих навчальних закладів МОН України.

### **Оцінка змісту дисертаційної роботи, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності**

Дисертаційна робота Положія Гліба Євгеновича є завершеною науковою працею, яка складається з анотації, вступу, трьох розділів, висновків, переліку використаних джерел та двох додатків. Дисертацію викладено на 172 сторінках друкованого тексту.

**Анотація** належним чином відображає основний зміст дисертації, повно висвітлює наукові висновки та практичне значення даної роботи.

**У вступі** зазначається актуальність теми дисертаційної роботи, чітко визначені мета та основні завдання, описана наукова новизна та практичне значення отриманих результатів. Також відзначається особистий внесок автора, наведено дані про структуру та обсяг роботи.

**Перший розділ дисертації** присвячено літературному огляду за темою роботи. Детально розглянуто особливості протонно-променевої літографії. З'ясовано, що зондоформуючі системи в сучасних мікро- та нанозондах будуються на мультиплетах магнітних квадрупольних лінз, які мають ряд недоліків. Так розподілений триплет магнітних квадрупольних лінз (оксфордський триплет) має найбільші коефіцієнти зменшення, але вони неоднакові по двом осям. Оксфордський триплет дає змогу отримувати структури розміром десятки-сотні нанометрів, але натомість пропускає малий струм. У зв'язку з цим виникає задача дослідити можливість збільшення роздільної здатності зондоформуючої системи завдяки використанню іншої системи лінз.

**У другому розділі роботи** проведено математичне та комп'ютерне моделювання динаміки протонного пучка в магнітних квадрупольних зондоформуючих системах. Розглянуто один з варіантів поліпшення іонно-оптичних властивостей зондоформуючих систем, а саме корекцію сферичних аберацій з використанням октупольних лінзових систем. Розглянуто трьох-, двох- і однолінзові октупольні коректори. Моделювання динаміки іонного пучка базувалось на методі матрицантів, що дало змогу побудувати матриці перетворення координат фазових моментів в іонно-оптичних елементах. Побудовано формалізм, який описує алгоритм визначення живлення октуполів для повної та часткової корекції сферичних аберацій третього порядку. Оптимізація процесу формування мікрозонду дала змогу визначити оптимальні параметри системи для розміру зонда нанометрового діапазону.

**У третьому розділі дисертації** описано експериментальні дослідження зі створення малорозмірних структур з використанням системи протонного

мікрозонду електростатичного прискорювача «Сокіл» ІПФ НАНУ. Тут описані експерименти з протонно-променевої літографії з плівками хітозану, які виконані дисертантом вперше. На каналі ядерного скануючого мікрозонду удосконалено опромінення зразків завдяки впровадженню векторного методу протонно-променевої літографії малорозмірних структур та удосконалено керування пучком протонів мегаелектронвольтової енергії завдяки впровадженню та випробуванню системи швидкого скидання пучка.

**Висновки** автора належним чином адаптовані до визначених мети та завдань дисертаційної роботи. Їх структура чітко відображає основні результати наукових досліджень, проведених автором в рамках роботи.

**Академічна доброчесність.** У дисертаційній роботі та наукових публікаціях дисертанта не було виявлено порушень академічної доброчесності, що стосуються подання основних наукових результатів. Автор дотримувався високих стандартів наукової доброчесності та об'єктивності у викладенні отриманих даних. Наведені у дисертації результати є об'єктивним відображенням проведених наукових досліджень, а автор виявив належний рівень професійної етики у поданні власних висновків та інтерпретації отриманих результатів.

Оформлення дисертації відповідає вимогам, що висуваються до такого виду робіт і наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12 січня 2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації». Мова та стиль викладення результатів дисертації демонструють високий рівень дисертанта.

#### **Повнота викладу основних результатів дисертації в опублікованих працях**

Основні результати дисертаційної роботи Положія Г.Є. опубліковані у 18 працях. З них 5 статей в наукових фахових виданнях України, які індексуються в наукометричних базах Scopus та/або Web of Science Core Collection, одна стаття у іноземному науковому виданні з квантилем Q3 та 12 тез виступів на наукових конференціях.

В усіх опублікованих працях дисертантом ґрунтовно та в повному обсязі висвітлені основні наукові положення, результати та висновки дисертації. Наукові положення та результати досліджень, що отримані дисертантом, проходили апробацію на різних рівнях, обговорювалися на наукових конференціях як національного, так і міжнародного рівня

#### **Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи**

Дисертаційна робота виконана на високому професійному рівні, і в цілому залишає позитивне враження. Однак, на мою думку, має деякі недоліки.

1. В розділі 3.2.1, присвяченому дослідам з протонно-променевої літографії по хітозану, не наведені умови експерименту. Не вказано дози опромінення протонним пучком, розміри сфокусованого пучка і не описано процес проявлення опроміненої області.

2. В другому розділі для опису динаміки пучка застосований метод матрицантів, який є наближеним аналітичним методом. В даному випадку враховані розклади в ряд з точністю до третього порядку малості за

траєкторними фазовими координатами. Слід було б навести аналіз точності проведених обчислень порівняно з чисельним рішенням рівнянь руху заряджених частинок в зондоформуючій системі.

3. Недостатньо повно описаний метод скидання пучка з осі в процесі експерименту. Не наводяться параметри системи: час повного видалення пучка з осі, геометрія системи скидання, відхилення пучка при увімкненій системі скидання. Слід було б навести розрахунки фізичних параметрів системи для даного сорту іонів, даної енергії та електронну схему, яка реалізує процес скидання пучка.

4. Рівняння руху заряджених частинок в магнітному полі в другому розділі наведені в релятивістському випадку. Розрахунки формування пучка в магнітній квадрупольній зондоформуючій системі наведені для енергій протонів порядку одиниць мегаелектронвольт. Слід було б вказати наскільки важливим є урахування релятивізму у випадку пучка протонів таких енергій.

Перераховані вище недоліки, хоч і знижують загальне враження про дисертацію, але, загалом, не торкаються основних положень та результатів, що виносяться на її захист.

### **Загальний висновок про дисертаційну роботу**

Дисертаційна робота Положія Гліба Євгеновича на тему «Формування пучків в установках протонно-променевої літографії» є завершеним науковим дослідженням, яке виконане на високому науковому рівні, містить вирішення ряду важливих наукових задач в галузі протонно-променевої літографії, має як теоретичну новизну, так і практичне застосування.

Дисертаційна робота 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, а її автор Положія Гліб Євгенович – заслуговує присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

### **ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ:**

Доктор фізико-математичних наук, професор,  
професор кафедри прикладної математики та  
моделювання складних систем  
Сумського державного університету  
МОН України



Олександр ЛИСЕНКО

Підпис доктора фіз.-мат. наук, професора,  
професора кафедри прикладної математики та  
моделювання складних систем Лисенка О.В.  
засвідчую



Підпис Лисенко О  
засвідчую  
заст. начальника відділу кадрів  
Лисенко О.В.