

Відгук офіційного опонента

на дисертаційну роботу **ПОГОРЕЛОВА СТАНІСЛАВА ВІКТОРОВИЧА**
**«Теоретичні та експериментальні основи створення тонкодротяних решіток
болومترів для контролю потужного лазерного випромінювання»**, подану на
здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю
01.04.01 «Фізика приладів, елементів і систем»

Актуальність теми дисертаційної роботи

Широке використання лазерних технологій у різних галузях науки, техніки, виробництва, сільському господарстві, медицині та ін. потребує відповідних методів контролю параметрів лазерних джерел випромінювання (методів оптико-фізичних вимірювань), здатних забезпечити як подальший розвиток й удосконалення таких технологій, так і підвищення якості продукції, що створюється за їх допомогою.

Суттєво підкреслити, що саме з появою лазерів діапазон оптико-фізичних вимірювань значно розширився, і на сьогодні важко уявити собі будь-яку галузь, де б не були актуальними результати точних оптико-фізичних вимірювань.

В Україні в сфері оптико-фізичних вимірювань протягом останніх років значна увага приділяється розробці методів та засобів вимірювань енергетичних характеристик лазерного випромінювання, а також методів та засобів їх метрологічного забезпечення.

На цей час вимірювання енергетичних величин в існуючих еталонах базуються на первинних вимірювальних перетворювачах (ПВП), в якості яких використовуються абсолютні радіометри калориметричного типу. Для контролю параметрів потужного лазерного випромінювання при цьому застосовуються спеціальні додаткові пристрої для ослаблення випромінювання, що ускладнює процес вимірювань, є джерелом додаткових похибок. Ситуація ще більше ускладнюється у випадках необхідності контролю параметрів потужного широкоапертурного випромінювання, для якого наявні еталонні засоби не пристосовані. Таким чином, можна констатувати, що на сьогодні існує проблема вимірювання



параметрів потужних (до декількох кіловат) широкоапертурних лазерів, тому розробка нових ПВП та методів вимірювання, які дозволяють вимірювати параметри потужного широкоапертурного лазерного випромінювання, є **актуальною задачею**.

Болометричні тонкодротяні решітки, які розглядаються у дисертації Погорелова С. В., не потребують попереднього ослаблення при вимірюванні параметрів потужних лазерів, не мають обмежень на розмір вхідної апертури та є вимірювачами прохідного типу, тому такі вимірювачі є дуже перспективними як для контролю виробничих процесів в режимі реального часу, так і для використання в якості еталонних пристроїв при вимірюваннях параметрів потужного широкоапертурного лазерного випромінювання.

Наукова новизна одержаних результатів

Наукову новизну одержаних результатів визначають виконані в роботі дослідження характеристик перетворення лазерного випромінювання як одиночними, так і решітковими платиновими дротяними болометрами, які дозволили вперше здійснити комплексне вивчення температурних залежностей болометричних параметрів складних решіткових структур на основі розв'язання рівнянь теплового балансу.

Новизна цих досліджень характеризується вперше отриманими функціональними залежностями характеристик перетворення від енергетичних параметрів, що забезпечило розробку нових методів вимірювань та обробки сигналів з болометричних елементів, які дозволяють отримувати значення енергетичних параметрів лазерного випромінювання в абсолютних величинах (з використанням сформульованих в дисертації рівнянь вимірювань).

Вперше запропоновані методи вимірювань параметрів лінійної та еліптичної поляризацій лазерного випромінювання болометричними вимірювачами, які враховують нелінійність характеристики перетворення.

Вперше розроблені методи для вимірювання енергетичних та просторових параметрів імпульсів потужних лазерних пучків Гауса. Такі методи дозволять

значно підвищити рівні енергій, які можуть бути виміряні тонкодротяними болометрами.

*Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і
рекомендацій, сформульованих у дисертації*

Основні наукові положення дисертації підтверджуються застосуванням відомих методів досліджень, коректним плануванням і виконанням експерименту, використанням строгих методів фізичного та математичного моделювання на ПК з використанням пакетів прикладних програм. В цілому наведені в дисертаційній роботі теоретичні обґрунтування та експериментальні дослідження виконані на високому науковому рівні. Результати лабораторних досліджень підтверджені експлуатаційними випробуваннями або розрахунковими моделями. Ретельний метрологічний аналіз виконаний у відповідності до відомих методів теорії похибок.

Висновки, що сформульовані у заключному розділі дисертаційної роботи, містять нові наукові положення, які відображають всі пункти наукової новизни, наведені у Вступі. Так 2 та 3 висновки підтверджують можливість використання тонкодротяних болометрів для абсолютних вимірювань енергетичних параметрів лазерного випромінювання з урахуванням температурних залежностей фізичних параметрів болометра. Висновки 4-7 описують теоретичні підходи для визначення параметрів лінійної та еліптичної поляризації випромінювання з використання дво- та трирешіткових болометрів. У 8 висновку показані результати експериментальних випробувань макетів решіток для визначення параметрів поляризації. Висновки 9-11 підтверджують основні наробки дисертації – можливість вимірювання енергетичних параметрів потужного лазерного випромінювання в абсолютних величинах решітками болометрів. Висновки 12-13 визначають додаткові переваги тонкодротяних болометрів при вимірюванні параметрів сфокусованого лазерного випромінювання, а також енергетичних та просторових параметрів гаусових імпульсів.

Оцінка змісту та завершеності дисертації

Дисертація складається з шести розділів, вступу, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації – 302 сторінки друкованого тексту, з

них 266 сторінок займає основна частина. Список використаних джерел з 251 роботи займає 27 сторінок. Додаток А містить список робіт автора, які опубліковані за темою дисертації.

У вступі автор приводить обґрунтування актуальності теми дисертації, наводить мету та задачі, які вирішуються у роботі. У вступі показаний зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, визначені об'єкт, предмет та методи дослідження, а також наукова новизна та практична значимість одержаних результатів; розглянутий особистий внесок здобувача та перелік апробацій результатів дисертації.

В першому розділі «Аналіз первинних принципів та аналогічних розробок» автор провів огляд потужних лазерів та класифікації параметрів лазерного випромінювання. Основні зусилля автор зосередив на вимірюванні параметрів лазерів в інфрачервоному діапазоні довжин хвиль, в якому генерують найбільш розповсюджені потужні лазери. Проведений ретельний аналіз існуючих первинних перетворювачів лазерного випромінювання в ІЧ області спектра. Показані переваги та недоліки основних фотонних та теплових датчиків.

Також у розділі проведений аналіз існуючих принципів та засобів визначення параметрів поляризації лазерного випромінювання. Показано, що болометричні вимірювачі, які мають дихроїчні властивості, можуть вимірювати параметри поляризації та мають певні переваги перед іншими вимірювачами параметрів поляризації – такими як пластинки та призми, принцип роботи яких ґрунтується на законах заломлення та відбиття.

Другий розділ дисертації «Аналіз основних фізичних параметрів тонкодротяних болометрів» присвячений дослідженню таких параметрів дротяних болометрів як коефіцієнт теплообміну, температурний коефіцієнт опору, питома теплоємність, фактори ефективності поглинання. Переважна увага у розділі приділена вивченню та апроксимації температурних залежностей вказаних параметрів. Розглядалися температурні залежності тонких дротинок з платини, яка має високу хімічну інертність, високу температуру плавлення, великий питомий опір та найбільш задовольняє основним вимогам до тонких болометрів. Більшість параметрів

та їх температурні залежності взяті з відомих довідників та з достатньою точністю апроксимовані поліномами. Для визначення факторів ефективності поглинання та отримання їхніх температурних залежностей в роботі запропоновані як теоретичні так і експериментальні методи. Проведені дослідження показали, що температурні залежності факторів ефективності поглинання не залежать від стану поляризації лазерного випромінювання та від діаметру болометра. Отримані у розділі 2 результати дозволяють враховувати температурні залежності основних фізичних параметрів болометрів при аналізі характеристик перетворення як складових відповідних рівнянь вимірювань.

В третьому розділі дисертації «Характеристики перетворення тонкодротяних болометрів» проведені розв'язки рівнянь теплового балансу з урахуванням температурних залежностей фізичних параметрів, які були отримані у другому розділі. Розв'язки рівнянь як для імпульсного так і для безперервного лазерного випромінювання дозволили розрахувати значення характеристик перетворення, провести їх апроксимацію з визначенням коефіцієнтів апроксимації та їх відносних середньоквадратичних відхилень (СКВ). Були отримані характеристики перетворення для одиночних болометрів, але отримані результати необхідні для визначення характеристик перетворення решіткових болометрів.

Четвертий розділ «Контроль параметрів поляризації лазерного випромінювання» присвячений обґрунтуванню методів вимірювання та контролю параметрів поляризації лазерного випромінювання за допомогою тонкодротяних болометричних решіток. Для визначення параметрів поляризації за допомогою болометричних решіток необхідно знати коефіцієнт дихроїзму, який дорівнює відношенню факторів ефективності поглинання для Н- та Е-поляризацій випромінювання, коли вектор електричного поля перпендикулярний до осі болометра та паралельний осі болометра, відповідно. В розділі представлений метод вимірювання коефіцієнта дихроїзму за допомогою дворешіткового болометра. Розрахунки показали, що коефіцієнт дихроїзму майже не залежить від температури нагріву болометричних дротинок.

Використовуючи відомий коефіцієнт дихроїзму в роботі запропоновані методи вимірювання параметрів поляризації: трирешітковим болометром можливо вимірювати параметри як лінійної так і еліптичної поляризації, а дворешітковим – тільки параметри лінійної поляризації. Проведений детальний аналіз похибок з використанням отриманих рівнянь вимірювання та проведені експериментальні дослідження запропонованих методів. Показано, що методи, які запропоновані у роботі, враховують та виключають з результатів вимірювання систематичні похибки за рахунок нелінійності характеристики перетворення. Параметрами поляризації, які дозволяють визначити представлені методи є: кут напрямку лінійної поляризації, кути напрямків великої та малої півосі еліпсу, величину великої та малої півосей еліптичної поляризації.

У п'ятому розділі «Метрологічні властивості решіткових болометричних вимірювачів енергетичних параметрів лазерного випромінювання» проведено обґрунтування методів абсолютного градуювання дворешіткового та трирешіткового болометрів. Розглянуті випадки як для безперервного, так і для імпульсного лазерного випромінювання. Запропоновані методи використовують алгоритм послідовного наближення, за допомогою якого з результатів вимірювань виключаються систематичні похибки за рахунок температурних залежностей основних фізичних параметрів платини, а також за рахунок поляризаційних властивостей болометричного вимірювача та за рахунок нерівномірності розподілу інтенсивності у лазерному пучку. В розділі проведений аналіз систематичних та випадкових похибок дво- та трирешіткових болометрів. Розглянуті методи виключення систематичних похибок за рахунок відмінності діаметрів решіток, за рахунок відмінності швидкості теплообміну у вертикальних та горизонтальних решіток, за рахунок відмінності теплових постійних часу та за рахунок екранування однієї решітки іншою.

В шостому розділі «Вимірювання параметрів потужного і сфокусованого лазерного випромінювання» розглянутий метод визначення діаметра фокальної плями за допомогою скануючого одиночного болометра. Проведений експеримент довів можливість використання тонкодротяного болометра для вимірю-

вання діаметра сфокусованого лазерного випромінювання. Також у розділі запропоновані методи вимірювання параметрів імпульсу Гауса великої потужності. Суть методів полягає в тому, що болометри розміщують на схилах інтенсивності лазерного пучка, завдяки чому можна значно підвищити граничні величини енергії імпульсу, які можуть бути виміряні тонкодротяними болометрами. Проведений аналіз відносних СКВ вимірюваних величин: енергії імпульсу, координат енергетичного центру, радіусу пучка.

Значення одержаних результатів для практики та рекомендації щодо їх можливого використання

Отримані у роботі результати дозволять проводити вимірювання параметрів потужних лазерів безпосередньо за допомогою первинного перетворювача у вигляді тонкодротяних решіток без використання систем послаблення або відгалуження. Це має значно підвищити точність вимірювань та знизить вартість їх реалізації. Тонкодротяні решітки є вимірювачами прохідного типу, тому їх використання у технологічних застосуваннях дозволить проводити контроль параметрів безпосередньо під час технологічного процесу (в режимі реального часу), що також повинно мати певний економічний ефект.

У майбутньому доцільно провести аналіз можливості використання методів, які запропоновані у роботі, для інших діапазонів довжин хвиль, провести розширені метрологічні дослідження з метою розгляду питань застосування таких вимірювачів у первинних еталонах великих потужностей та енергій імпульсу.

Повнота викладення наукових положень, висновків і рекомендацій дисертації в опублікованих працях

Наукові положення, висновки та рекомендації дисертації достатньо повно викладені у 52 наукових публікаціях у фахових наукових журналах, патентах, монографії та у матеріалах конференцій. З них 14 робіт опубліковано у реферованих закордонних журналах, в 1 монографії та у 15 публікаціях у реферованих збірках праць міжнародних наукових конференцій. За результатами досліджень отримано 6 патентів, в тому числі один патент на винахід. Результати другого розділу висвітлені у 9 публікаціях; третього розділу – у 14 публікаціях; четвертого розділу – у

18 публікаціях; п'ятого розділу – у 9 публікаціях; шостого розділу – у 4 публікаціях.

Обсяг друкованих робіт та їх кількість відповідають вимогам МОН України щодо публікації основного змісту дисертації на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук.

Відповідність змісту автореферату основним положенням дисертації

Зміст автореферату є ідентичним положенням дисертації та дозволяє судити про обсяг і якість виконаної дисертантом роботи. В авторефераті не містяться відомості, які не представлені в дисертації. Результати наукових досліджень, за якими дисертант захистив кандидатську дисертацію не увійшли до положень, які виносяться на захист.

Дискусійні положення та зауваження

Робота не позбавлена деяких недоліків:

1. У тексті не наведено розшифрування аббревіатури ПВП – первинний вимірювальний перетворювач (стор. 2).
2. По тексту дисертації постійно виникає термін «профільні сигнали» (зокрема, стосовно величини \bar{U} на стор. 95, 96, формула (2.4)), тоді як пояснень щодо цього терміну у тексті дисертації немає.
3. У першому розділі багато уваги приділено розгляду потужних лазерів та принципів роботи фотонних приймачів ІЧ- випромінювання, тоді як основною темою має бути розгляд принципів роботи та результатів попередніх досліджень тонкодротяних болометрів з метою аналізу першочергових проблем, які потрібно вирішувати для підвищення ефективності використання саме тонкодротяних болометрів.
4. На стор. 33 замість назви Національний науковий центр «Інститут метрології» помилково використано назву Харківський науково-дослідний інститут метрології та стандартизації, якого взагалі не існує.
5. На стор. 86 отримано значення $W_{100} = 1,3872$, але не надано пояснень яким чином забезпечується така точність (до речі, значення R_0 та R_{100} , за

якими визначалося значення W_{100} , мають лише 3 та 2 знаки після коми відповідно).

6. При розрахунках апроксимованих залежностей питомого опору платини (стор. 86, формула 2.1) не надається пояснень чому використовується лише лінійна апроксимація температурного коефіцієнта опору.
7. При проведенні аналізу похибок вимірювань у багатьох розділах дисертації використовуються стандартні формули з теорії похибок, які використовують частинні похідні за параметрами, що входять у рівняння вимірювання (наприклад, формули 2.7, 2.24, 2.28, 3.6, 3.27, 3.42, 4.8, 4.19, 4.22, 4.23, 4.24, 4.30, 4.47-4.51 та ін.). Вважаю, що потрібно було ввести загальну формулу для розрахунку СКВ, описати принцип її використання один раз, а потім давати посилання на цю формулу.
8. У підрозділі 6.1 (стор. 241) недоречно використовується термін «калібрування». Його слід замінити терміном градування.
9. У висновках дисертації є помилки в нумерації: після номера 8 наведені номери 4, 5, 6, а потім номери 9,10. Наприкінці висновків 1, 2, 5, 6, 4 (9), 5 (10), 9 (12) потрібно убрати зайву крапку та наприкінці висновків 5, 6, 4(9), 5(10) потрібно поставити крапку з комою.

Але зазначені недоліки не зменшують наукової цінності роботи і можуть бути враховані здобувачем при подальших дослідженнях.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Погорелова С.В. на тему «Теоретичні та експериментальні основи створення тонкодротяних решіток болометрів для контролю потужного лазерного випромінювання» поглиблює існуючі знання, а саме, є суттєвим внеском у оптико-фізичні вимірювання, зокрема параметрів лазерних пучків.

Дисертація є завершеною, самостійно підготовленою кваліфікаційною науковою працею, в якій отримані нові науково обґрунтовані та практично цінні результати, що вирішують важливу наукову проблему, яка полягає у широкоформатному дослідженні характеристик перетворення тонкодротяних болометричних

решіток та одиночних болометрів, розробці нових методів вимірювань параметрів потужного широкоапертурного лазерного випромінювання.

Актуальність обраної теми дисертації, ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, новизна та повнота викладу в опублікованих працях повністю відповідають вимогам до докторських дисертацій.

Вважаю, що за тематикою проведених досліджень, змістом та отриманими результатами дисертаційна робота Погорелова С.В. «Теоретичні та експериментальні основи створення тонкодротяних решіток болометрів для контролю потужного лазерного випромінювання», представлена на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук, відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», а її автор – Погорелов Станіслав Вікторович – заслуговує на присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 «Фізика приладів, елементів і систем».

Заступник генерального директора
з науково-метрологічної роботи
Національного наукового центру
«Інститут метрології», д.ф.-м.н., професор

О.В. Прокопов

Підпис д.ф.-м.н., проф. Погорелова С.В. засвідчую
Учений секретар ННЦ «Інститут метрології»
к.т.н., с.н.с.



В. В. Склярів