

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Погорелов Станіслав Вікторович

УДК 53.082.6:537.872:621.317.794

**ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ
ТОНКОДРОТЯНИХ РЕШТОК БОЛОМЕТРІВ ДЛЯ КОНТРОЛЮ
ПОТУЖНОГО ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ**

01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Харків – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному фармацевтичному університеті Міністерства охорони здоров'я України та Харківському національному університету ім. В.Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор фізико-математичних наук, професор КУЗЬМИЧОВ ВОЛОДИМИР МИХАЙЛОВИЧ, Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, професор кафедри квантової радіофізики.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор **ПРОКОПОВ ОЛЕКСАНДР ВАСИЛЬОВИЧ**, Національний науковий центр «Інститут метрології», заступник генерального директора з науково-метрологічної роботи;

доктор фізико-математичних наук, професор **ЛЕПІХ ЯРОСЛАВ ІЛІЧ**, Міжвідомчий науково-навчальний фізико-технічний центр (МННФТЦ) Міністерства освіти і науки Національної академії наук України при Одеському національному університеті імені І.І. Мечникова, директор;

доктор технічних наук, професор **МАЧЕХІН ЮРІЙ ПАВЛОВИЧ**, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри фотоніки та лазерної інженерії.

Захист відбудеться «___» _____ 2017 р. о _____ на засіданні спеціалізованої вченої ради. Д 64.052.04 Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м Харків, проспект Науки, 14.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, Харків, пр. Науки 14.

Автореферат розісланий «___» _____ 2017 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради
к.т.н., доц.

Є.А. Разумов-Фризюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Лазери є джерелами електромагнітного випромінювання, що має унікальні властивості, які відрізняють його від будь-яких інших джерел випромінювання. Лазерне випромінювання розповсюджується, як правило, у вигляді пучка і тому вздовж певного напрямку. Такі лазерні пучки мають високу, а іноді і дуже високу просторову когерентність. Саме просторова когерентність дозволяє лазерному випромінюванню долати значні відстані і бути максимально сфокусованим.

У більшості випадків використовується висока щільність оптичної інтенсивності лазерного випромінювання, що призводить до інтенсивного нагрівання, іноді до випарювання та збудження плазми. Використання лазерного випромінювання в промисловості дає значні переваги перед механічними методами. Лазери дозволяють проводити високоякісну обробку дуже тонких структур, уникаючи механічних деформацій, що виникають при механічному свердлінні, різанні тощо. Для одних промислових процесів з використанням лазерного випромінювання визначними є енергетичні параметри лазерного випромінювання, а для інших – якість пучка, яка характеризується такими параметрами як M^2 або BPP (beam parameter product). Так, для лазерного маркування на пластику використовуються малопотужні лазери, тоді як для різання, зварювання або свердління металів необхідно використовувати високопотужні лазери (до декількох кіловат). Спаювання потребує високих потужностей та не вимагає високої якості пучка, тоді як безконтактне зварювання потребує дуже високої якості пучка.

Завдяки високій направленості випромінювання лазери широко використовуються у складі різноманітних вимірювальних приборів та пристроїв, у тому числі для визначення орієнтації об'єкту у просторі.

Лазери є основним компонентом більшості сучасних методів зв'язку (оптоволоконні мережі, зв'язок з космічними об'єктами), де використовується здатність лазерних пучків долати великі відстані з малою розбіжністю. Лазерна спектроскопія, лазерні мікроскопи, лазерні охолоджувачі, оптичні пінцети, а також інші методи та прибори з використанням лазерів знаходять широке використання в різних наукових дослідженнях. Для військових цілей лазери використовуються для знищення ракет, реактивних снарядів або мін, а також широко використовуються для наведення на ціль.

Зараз проводяться дослідження можливості використання високопотужних лазерних систем для ядерного синтезу як альтернатива іншим типам ядерних реакторів, а також для розділення ізотопів.

Важливою умовою ефективного використання лазерів є постійний контроль усіх параметрів лазерного випромінювання. Для цього на теперішній час існує великий вибір вимірювальних приборів, а їхня кількість постійно зростає. При цьому вдосконалюються як первинні перетворювачі, так і системи обробки сигналів.

Широкий спектральний та динамічний діапазони лазерного випромінювання призводить до необхідності розробки нових і удосконаленню існуючих принципів і методів вимірювання і контролю параметрів лазерного випромінювання. На

теперішній час для контролю параметрів потужного лазерного випромінювання за допомогою стандартних первинних перетворювачів необхідно використовувати різноманітні додаткові прилади (ослаблювачі, відгалужувачі та ін.), що призводить до певного спотворення випромінювання. Ще більші труднощі виникають при вимірюванні параметрів широкоапертурного випромінювання. В цьому випадку використовувати методи вимірювання класичної фотометрії практично неможливо, оскільки вони не дозволяють проводити аналіз і контроль параметрів лазерного випромінювання по всій апертурі пучка.

Тому розробка та вдосконалення методів безпосереднього контролю параметрів потужного і широкоапертурного лазерного випромінювання є актуальною задачею. При цьому при вимірюванні параметрів потужного лазерного випромінювання величезну перевагу мають первинні перетворювачі прохідного типу, які поглинають тільки невеликі частки випромінювання. До такого типу первинних перетворювачів відносяться тонкодротові болометри.

Під дією потужного лазерного випромінювання виникає суттєвий нагрів первинного перетворювача, що призводить до нелінійності його характеристики перетворення. Нелінійність перетворення посилюється також за рахунок нерівномірності розподілу лазерного випромінювання по площі поверхні первинного перетворювача. Ці основні фактори приводять до необхідності градування тонкодротових болометричних перетворювачів за допомогою еталонних вимірювачів, що значно ускладнює виробництво тонкодротових вимірювачів і сам процес вимірювання. Незважаючи на велику кількість різноманітних принципів роботи відомих вимірювачів, існує лише один принцип вимірювання потужності та енергії лазерного випромінювання, який забезпечує найвищу точність, – калориметричний. Однак використання калориметрів для градування та калібрування болометричних решіток обмежене розмірами вхідної апертури калориметрів і не може бути проведене для решіток великих розмірів.

Таким чином, при використанні тонкодротових болометричних перетворювачів для контролю та аналізу параметрів потужного та широкоапертурного лазерного випромінювання розробка методів визначення характеристик перетворення первинного болометричного перетворювача є актуальною і практично значущою проблемою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота була виконана відповідно до плану науково-дослідних робіт Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна в межах держбюджетних тем: «Розробка методів вимірювання параметрів інтенсивного лазерного випромінювання тонкодротовими болометрами підвищеної точності» (номер держреєстрації 0100U003332), «Розробка методу абсолютного калібрування тонкодротяних болометричних вимірювачів енергетичних параметрів лазерного випромінювання» (номер держреєстрації 0103U004235), «Розробка методів вимірювання стану поляризації інтенсивного та широкоапертурного лазерного випромінювання тонкодротовими болометрами» (номер держреєстрації 0106U001552), «Розробка методів вимірювання оптичних параметрів тонкодротяних

болометрів інтенсивного та широкоапертурного лазерного випромінювання» (номер держреєстрації 0109U000532). Автор є виконавцем зазначених робіт.

Робота також була частиною міжнародного конкурсного проекту (Німеччина, Швеція, Росія) INTAS (International association for the promotion of co-operation with scientists) «Thermal effects of laser radiation in metal micro-wires and their application in measuring technique» (Ref. Nr. 03-51-4924) 2004-2006 pp., де автор також є виконавцем.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційного дослідження є розробка теорії і техніки використання тонкодротових решіткових болометрів для прецизійного багатопараметричного дослідження випромінювання потужних лазерів.

Для досягнення поставленої мети вирішувались такі завдання:

1. Проведення теоретичних та експериментальних досліджень теплофізичних властивостей тонких платинових дротин у діапазоні температур від 0°C до температури плавлення та їх аналітичне моделювання.
2. Розробка теоретичних та експериментальних методів і техніки вимірювання факторів ефективності поглинання, коефіцієнта дихроїзму.
3. Теоретичне та експериментальне обґрунтування визначення характеристик перетворення одиничних та решіткових болометрів.
4. Теоретичне та експериментальне обґрунтування методів визначення просторових параметрів та параметрів поляризації потужного лазерного випромінювання тонкодротовими болометричними решітками.
5. Пошук принципів мінімізації основних джерел систематичних і випадкових похибок.
6. Створення експериментальних зразків болометричних пристроїв для контролю параметрів потужного лазерного випромінювання та верифікація можливостей їх теоретичного градування.
7. Розробка методів вимірювання параметрів пучка Гауса потужного імпульсного лазерного випромінювання, що дозволяють значно підвищити верхню границю енергії, що вимірюється.

Об'єкт дослідження – енергетичні, просторові, поляризаційні параметри та характеристики лазерного випромінювання.

Предмет дослідження – теплові та електромагнітні ефекти у тонких металевих дротах під дією інфрачервоного лазерного випромінювання, коли реалізується болометричний ефект при нагріванні їх випромінюванням.

Методи дослідження. У роботі використовуються розрахунково-теоретичні та числові методи досліджень, творчо доопрацьовані та адаптовані для вирішення поставлених у дисертаційній роботі завдань.

При аналізі взаємодії лазерного випромінювання з тонкими металевими циліндрами та визначенні характеристик перетворення використовувались методи математичної фізики, електродинаміки, числові методи розв'язання диференціальних рівнянь математичної фізики та методи числового моделювання.

При метрологічному аналізі методів вимірювання параметрів лазерного випромінювання використовувалась теорія похибок та методи обробки випадкових похибок.

Наукова новизна одержаних у дисертаційній роботі результатів полягає у наступному:

1. У дисертації вперше виконані широкоформатні теоретичні та експериментальні дослідження тонкодротових болометрів, зокрема решіткових, для вимірювання енергетичних, просторових та поляризаційних параметрів лазерного випромінювання у широкому динамічному та спектральному діапазонах. Для цього були розроблені та обґрунтовані методи для визначення характеристик перетворення.
2. Вперше розроблені та експериментально підтверджені методи вимірювання температурних залежностей факторів ефективності поглинання тонкодротових болометрів на довжинах хвиль випромінювання 1,06 та 10,6 мкм. Уперше показано, що температурна залежність фактора ефективності поглинання залишається незмінною у широкому діапазоні величин діаметрів болометра і не залежить від стану поляризації випромінювання.
3. Вперше обґрунтований та експериментально перевірений метод вимірювання коефіцієнта дихроїзму тонкодротових болометрів у широкому діапазоні інтенсивностей лазерного випромінювання, який є основним параметром болометра при вимірюванні стану поляризації лазерного випромінювання.
4. Обґрунтовані методи вимірювання параметрів лінійної та еліптичної поляризації інтенсивного і широкоапертурного лазерного випромінювання трьома тонкодротовими болометричними решітками, які мають нелінійну характеристику перетворення. Створені експериментальні макети та проведені експериментальні дослідження вимірювання стану поляризації випромінювання.
5. Вперше запропонований та обґрунтований метод вимірювання лінійної поляризації лазерного випромінювання з використанням дворешіткового болометра. Створений експериментальний макет та експериментально підтверджений запропонований метод.
6. Вперше обґрунтовані методи вимірювання абсолютних значень безперервної потужності або енергії імпульсу інтенсивного лазерного випромінювання дворешітковим та трирешітковим профільними тонкодротовими болометрами, в яких реєструються сигнали кожного болометричного елемента. Розроблені алгоритми обробки сигналів із решітчастих болометричних приймачів з поправками на температурні залежності теплофізичних параметрів болометрів. Отримані результати дозволяють створювати абсолютні болометричні вимірювачі енергетичних параметрів інтенсивного та широкоапертурного лазерного випромінювання.
7. Обґрунтований метод та експериментально показана можливість вимірювання діаметрів сфокусованих пучків лазерного випромінювання від десятка мікрометрів і вище тонкодротовим болометром.

8. Вперше запропоновані та обґрунтовані методи вимірювання параметрів пучка Гауса імпульсу лазерного випромінювання тонкодротовими болометрами, розташованими на схилах розподілу інтенсивності. Ці методи дозволяють вимірювати енергію імпульсу, модуль напрямку лінійної поляризації випромінювання, середній квадратичний радіус пучка, координати енергетичного центра пучка. Методи істотно підвищують верхній рівень вимірюваної енергії імпульсу лазера.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновані та обґрунтовані методи вимірювання параметрів інтенсивного і широкоапертурного лазерного випромінювання тонкодротовими болометричними решітками істотно допомагають при дослідженнях параметрів потужних лазерів, сприяють удосконаленню та використанню як самих лазерів, так і лазерного випромінювання для різних наукових і технічних завдань. Впровадження розроблених методів та експериментальних макетів дасть суттєвий економічний ефект, оскільки значно знизить похибки вимірювання енергетичних параметрів інтенсивного та широкоапертурного лазерного випромінювання.

Тематика цих досліджень використовується в навчальному процесі при виконанні студентами бакалаврських та магістерських робіт. Результати роботи можуть бути використані для удосконалення існуючих болометричних вимірювачів у Харківському науково-дослідному центрі «Інститут метрології», на Харківському заводі імені Малишева, в Українському науково-дослідному інституті технології суднобудування (м. Миколаїв).

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні положення та обробка результатів експериментальних досліджень дисертації виконані особисто здобувачем. У друкованих наукових працях, виконаних у співавторстві, здобувач запропонував та розробив математичні методи обробки результатів експериментальних досліджень; розробив числові методи розв'язання диференційних рівнянь математичної фізики (теплового балансу і теплопровідності) з нелінійними коефіцієнтами; провів аналіз похибок отриманих результатів досліджень, розробив алгоритми застосування розв'язання задач дифракції електромагнітної хвилі для болометричних вимірювачів. Автором розроблені алгоритми чисельних експериментів для зворотних задач при дослідженні взаємодії лазерного випромінювання з металевими циліндрами; знайдені характеристики перетворення болометра при вимірюванні енергії імпульсу і безперервної потужності з урахуванням нерівномірності розподілу інтенсивності випромінювання по площині вхідної апертури решітки. Здобувач брав участь у створенні експериментальних макетів вимірювальної системи. У працях [1, 28] розроблений метод розв'язання рівняння теплопровідності, розраховані діаметри лазерного пучка та проведена оцінка похибок отриманих результатів; у працях [2, 3, 5-8, 10, 22, 24, 29-32, 37, 43-45] отримані температурні залежності основних фізичних параметрів тонких платинових дротинок, апроксимації всіх температурних залежностей і проведений аналіз похибок оцінок коефіцієнтів залежностей. Розроблено метод та розв'язане диференційне рівняння теплового балансу з коефіцієнтами, що залежать від температури. Проведені розрахунки функції перетворення платинового

болметра залежно від енергії імпульсу або потужності безперервного лазерного випромінювання на довжинах хвиль 10,6 та 1,06 мкм. У працях [9, 11, 12, 16, 20, 22, 25-27, 34, 35, 38, 40, 41, 46, 48, 50] здобувач запропонував методи визначення параметрів поляризації лазерного випромінювання тонкодротовими платиновими болометрами з виключенням домінуючих похибок за рахунок нелінійності характеристики перетворення болометрів, розробив числові експерименти та провів обробку експериментальних результатів. У працях [4, 15] здобувач обґрунтував методи вимірювання параметрів потужних пучків Гауса. У працях [17, 18, 36, 38, 39, 47, 49] автор брав участь у створенні експериментальних макетів, розробив алгоритми обробки експериментальних результатів та здійснив аналіз похибок отриманих результатів. У праці [21] автором написані розділи 3 і 4 разом із М. Г. Кокодієм, розділ 6 написаний автором особисто.

Апробація результатів дисертації. Результати роботи доповідались та обговорювались на міжнародних конференціях: 4-th International Workshop "Laser and Fiber-Optical Networks Modelling (LFNM'2002)", Kharkiv, Ukraine; International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers CAOL'2003 Alushta, Crimea, Ukraine; 6-th International Conference on Laser & Fiber-Optical Networks Modeling LFNM'2004, Kharkiv, Ukraine; Міжнародна наукова конференція „Каразінські природознавчі студії”, 2004 р., Харків; 2-nd International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers CAOL'2005, Yalta, Crimea, Ukraine; 8-th International Conference on Laser & Fiber-Optical Networks Modeling LFNM'2006, Kharkiv, Ukraine; 4-th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers CAOL'2008, Alushta, Crimea, Ukraine; 5-th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers CAOL CAOL'2010, Sevastopol, Crimea, Ukraine; 11-th International Conference on Laser & Fiber-Optical Networks Modeling LFNM'2011, Kharkiv, Ukraine; 6-th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers CAOL'2013, Sudak, Crimea, Ukraine.

Публікації. Результати дисертаційних досліджень опубліковані у 52 наукових працях, з них: 1 монографія; 20 основних наукових статей у фахових журналах (з них 14 опубліковано у реферованих закордонних журналах); 6 патентів: 1 патент на винахід та 5 патентів на корисну модель; 10 додаткових статей у фахових журналах України, 15 публікацій у реферованих збірниках праць міжнародних конференцій.

Обсяг і структура дисертації. Дисертаційна робота викладена на 302 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Обсяг основного тексту дисертації складає 266 сторінки друкованого тексту. Робота ілюстрована 17 таблицями та 69 рисунками. Рисунків і таблиць, які повністю займають всю площу сторінки, немає. Список використаних джерел містить 251 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі висвітлено актуальність теми дослідження та обґрунтовано необхідність виконання роботи, її зв'язок з науковими програмами, визначено мету та задачі дослідження, визначено об'єкт і предмет дослідження, перелічено використані методи, наведено дані про апробацію, висвітлено особистий внесок автора в

публікаціях, сформульовано одержані нові результати та висвітлено їх практичне значення.

Розділ 1 «Аналіз первинних принципів та аналогічних розробок» присвячений огляду сучасних принципів вимірювання параметрів лазерів. Зроблений огляд існуючих потужних лазерів. На сьогодні альтернативою CO₂-лазерам при обробці матеріалів є твердотілі лазери (YAG-лазери та волоконні лазери), випромінювання яких також знаходиться в інфрачервоному діапазоні. Такі лазери мають суттєві переваги перед CO₂-лазерами: більш високе поглинання у металах, можливість використання оптоволоконних кабелів, а також більш висока якість пучків. Однак більшість переваг не реалізуються із-за значно більшої вартості реалізації.

Проведено огляд принципів вимірювання параметрів лазерного випромінювання. На вибір принципу вимірювання найбільше впливає спектральний та динамічний діапазони вимірювань. Для потужних лазерів, які працюють здебільшого в інфрачервоному діапазоні довжин хвиль особливо важливо удосконалювати існуючі та розробляти нові більш ефективні інфрачервоні перетворювачі.

Для вимірювання параметрів енергетичної групи широке розповсюдження отримали теплові та фотоелектричні принципи перетворення.

Найбільший розвиток отримали інфрачервоні приймачі напівпровідникового типу, які відносяться до фотонних або квантових приймачів. В останній час стали інтенсивно розвиватись детектори фотонного типу, що охолоджуються, а також детектори на квантових ямах. Однак виготовлення великоформатних фотодіодних матриць, особливо з малим (15-20 мкм) кроком елементів натикається на суттєві проблеми, які пов'язані з дефектами та структурними недосконаlostями епітаксіальних шарів, виникненню в забороненій зоні напівпровідникового матеріалу «пасток», що значно погіршує однорідність розподілу фоточутливості елементів по площі матриці.

У теплових детекторах падаюче випромінювання поглинається, що призводить до зміни температури матеріалу приймача. Параметри теплових приймачів, як правило, практично не залежать від довжини хвилі в доволі широкому спектральному діапазоні. Такі детектори зазвичай працюють при кімнатній температурі без охолодження, вони дешеві та зручні, мають відносно невисоку чутливість та швидкодію. Розвиток технологій виготовлення теплових приймачів призвів до ряду переваг, завдяки чому теплові детектори починають займати домінуючі позиції. Однак теплові детектори мають і ряд недоліків. До них можна віднести конструктивні та технологічні складнощі термоізоляції первинних детекторів один від одного та від підкладки матричних приймачів, чутливість до коливань температури та вібрацій, інерційність відгуку та невисоку однорідність зображення.

Визначення параметрів потужних лазерних пучків накладає додаткові вимоги на засоби вимірювання. Більшість датчиків не витримують високих щільностей інтенсивності і потребують ослаблення випромінювання, що ускладнює вимірювання та приводить до певного його спотворення.

У випадках вимірювання енергетичних та просторових параметрів широкоапертурних пучків найбільші труднощі пов'язані з малою апертурою переважної більшості перетворювачів.

Цих недоліків позбавлені вимірювальні системи з просторовим розподілом взаємодії випромінювання з первинним перетворювачем, наприклад, на основі болометричних решітчастих перетворювачів, які дозволяють створювати вимірювачі прохідного типу з малими втратами енергії основного пучку. Болометричні решітчасті перетворювачі на відміну від матричних перетворювачів не дозволяють безпосередньо вимірювати відносний розподіл щільності потужності або енергії випромінювання. На відміну від інших типів багатоелементних перетворювачів, сигнали болометричного профільного вимірювача є дискретним представленням проекції функції розподілу у напрямку осей болометрів.

В розділі розглянуті також методи визначення параметрів поляризації лазерного випромінювання. Більшість методів використовує пластинки та призми. Ці методи базуються на законах заломлення та відбиття оптичного випромінювання, на властивостях матеріалу пластинок та поляризаторів.

Вимірювання параметрів поляризації болометричним вимірювачем базується на поляризаційній чутливості болометричного елемента при нормальному падінні випромінювання, визначається анізотропією його форми та характеризується коефіцієнтом дихроїзму.

В розділі проведено огляд вимірювальних систем, які виготовляються промислово. Найбільш відомими виробниками вимірювальних приладів в лазерній фотометрії є фірми Primes (Німеччина), Ophir-Spiricon (Ізраїль, США, Японія, Німеччина), Coherent (США, Німеччина), Prometec (Німеччина), Hamamatsu (Японія), FLIR Systems, Inc. (США) та ін. Для дослідження широкоапертурних лазерних пучків фірма Coherent пропонує моделі первинних термопарних перетворювачів PM5K-200 та PM5K-100 з величиною апертури 200 та 100 мм, відповідно. Ці детектори дозволяють вимірювати потужності до 5 кВт.

Розділ 2. «Аналіз основних фізичних параметрів тонкодротових болометрів» присвячено визначенню зміни властивостей основних фізичних параметрів тонкодротяного болометра під дією безперервного та імпульсного лазерного випромінювання у різних діапазонах довжин хвиль, рівнів енергії та потужності лазерного випромінювання. Основне завдання, яке розв'язується в другому розділі, є визначення температурних залежностей цих параметрів.

В принципі роботи первинних болометричних вимірювачів використовується явище зміни електричного опору металевого циліндру, матеріал якого має кінцеву провідність, під час його взаємодії з електромагнітним випромінюванням лазера.

Одним із кращих матеріалів для болометрів є платина. Вона має високу температуру плавлення – 1769°C, є антикорозійною й немагнітною. Відома таблична залежність питомого опору платини у діапазоні температур 0°C.....1500°C методом найменших квадратів апроксимована поліномом другого ступеня.

Таблична температурна залежність питомої теплоємності платини від 0°C до 1500°C апроксимована методом найменших квадратів поліномом другого ступеня $c(T) = c_0' + c_1T + c_2T^2$. Показано, що залежність $c(T)$ дуже близька до лінійної.

При опроміненні металевого циліндра частина випромінювання, що попадає на нього, поглинається. Нагрівання циліндра обумовлює зміну його електричного опору (болOMETричний ефект). БолOMETричний ефект визначається частиною випромінювання, яка поглинається первинним перетворювачем. Ступінь поглинання лазерного випромінювання болOMETром визначають його фактори ефективності поглинання q^{EH} для E і H - поляризованого випромінювання і коефіцієнт дихроїзму болOMETра $K_D = \frac{q^H}{q^E}$.

Фактори ефективності поглинання болOMETра залежать від кута падіння на циліндр Θ , довжини хвилі випромінювання λ , комплексного показника заломлення $m = m' - im''$, де m' й m'' показники заломлення і поглинання матеріалу, з якого виготовлений циліндр, відношення радіуса циліндра до довжини хвилі випромінювання a/λ і ступеня еліптичності циліндра в його поперечному перерізі.

Визначена залежність комплексного показника заломлення платини на довжині хвилі випромінювання 10,6 мкм у зазначеному діапазоні температур. Труднощі склалися в обчисленні функцій Бесселя й Ханкеля для великих значень комплексних аргументів цих функцій, обумовлених комплексним показником заломлення для більшості металів для випромінювання з довжиною хвилі 10 мкм, і значеннями $a/\lambda > 10$.

Необхідною умовою можливості використання даного методу є те, щоб час релаксації вільних електронів τ був менший за період коливань електромагнітного поля τ_i . Використовуючи співвідношення для визначення часу релаксації, одержали, що для $T_0 = 0^\circ\text{C}$ воно відповідає $\tau = 2,17 \cdot 10^{-14}$ с і для $T_0 = 1000^\circ\text{C}$ відповідно $\tau = 0,538 \cdot 10^{-14}$ с при $\tau_i = 3,53 \cdot 10^{-14}$ с. Необхідна умова виконується. Визначивши комплексний показник заломлення платини для фіксованих температур, обчислили фактори ефективності поглинання та коефіцієнти дихроїзму K_D для $\frac{a}{\lambda} < 30$.

Визначення факторів ефективності поглинання лазерного випромінювання на довжині хвилі 1,06 мкм натикається на ряд труднощів. Табличні значення комплексного показника заломлення платини в цьому діапазоні з різних джерел дають доволі великий розбіг.

В роботі для визначення факторів ефективності поглинання лазерного випромінювання на довжині хвилі 1,06 мкм були запропоновані, обґрунтовані та експериментально перевірені методи вимірювання фактора ефективності поглинання платинового болOMETра. Показано, що для довжини хвилі 1,06 мкм розрахунки коефіцієнтів поглинання у наближенні геометричної оптики добре узгоджуються з результатами експерименту по вимірюванню факторів ефективності поглинання. Показано, що основну похибку в результати вимірювань вносить похибка абсолютних вимірювань енергії імпульсу лазера калориметром, відносно СКВ якого складає $\pm 2,5$ %.

В роботі запропоновані методи вимірювання температурної залежності фактора ефективності поглинання платинового тонкодротового болOMETра в

діапазоні температур 0 ... 1500° С. Показано, що фактор ефективності поглинання у вказаному діапазоні температур збільшується в 2,2 рази та не залежить в межах оцінених відносних СКВ від діаметра болометра і стану поляризації лазерного випромінювання.

Отримані результати дозволяють створити абсолютні болометричні вимірювачі безперервної потужності і енергії імпульсу лазерного випромінювання.

У розділ 3. «Характеристики перетворення тонкодротових болометрів» визначені характеристики перетворення одиничних болометрів для безперервного та імпульсного лазерного випромінювання. Втрати тепла болометра через теплообмін із зовнішнім середовищем і через теплопровідність матеріалу болометра з елементарної ділянки за час дії оптичного імпульсу мізерно малі, і тому розподіл температури нагрівання болометра $T(x)$ близький до розподілу падаючої на нього енергії $E(x)$.

Розглянемо болометр довжиною $2l$, спрямований уздовж осі, початок координат якої розташовано посередині болометра. По закінченню імпульсу випромінювання розподіл підвищення температури уздовж болометра буде $T(x)$ відносно температури навколишнього середовища T_0 . Якщо залежність температурного коефіцієнта опору болометра визначається поліномом другого ступеня, то повний приріст відносного опору болометра буде:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = (\alpha_0 + \alpha_1 \delta \bar{T}) \bar{T}, \quad (1)$$

де R_0 - початковий опір болометра; $\alpha_0 = \alpha'_0 + \alpha_1 T_0$ і α_1 - лінійний і квадратичний температурні коефіцієнти опору (ТКО) болометра (α'_0 - ТКО при $T_0 = 0^\circ\text{C}$);

$\bar{T} = \frac{1}{2l} \int_{-l}^{+l} T(x) dx$ - середня температура нагрівання болометра; $\frac{1}{2l} \int_{-l}^{+l} T^2(x) dx = \bar{T}^2$ -

середній квадрат температури нагрівання болометра, що може бути представлений $\bar{T}^2 = \sigma_T^2 + \bar{T}^2 = (1 + \sigma_{T_0}^2) \bar{T}^2 = \delta \bar{T}^2$ (тут σ_T й σ_{T_0} - абсолютне й відносне середні

квадратичні відхилення температури від середнього значення \bar{T} ; $\delta = 1 + \sigma_{T_0}^2$ - введений коефіцієнт нерівномірності розподілу температури уздовж болометра). Співвідношення (1) показує, що нерівномірність розподілу температури підсилює нелінійність приросту опору болометра в σ раз.

Рівняння теплового балансу для елементарної частки болометра буде

$$mc [T(x)] dT(x) = q [T(x)] \cdot E(x), \quad (2)$$

де m - погонна маса болометра; $E(x)$ - погонна падаюча енергія на болометр. Усереднений по довжині болометра вираз (2) має вигляд:

$$\frac{c'_0 + c_1 \delta \bar{T}}{q'_0 + q_1 \delta \bar{T} + q_2 (\delta \bar{T})^2} d(\delta \bar{T}) = d \left(\frac{\delta E}{m} \right), \quad (3)$$

у якому $c'_0 = c_0 + c_1 T_0$, де T_0 - температура навколишнього середовища;

$q'_0 = q_0 + q_1 T_0 + q_2 T_0^2$; $q_1 = q'_1 - 2q_2 T_0$; $\delta = 1 + \sigma_{E_0}^2$ - коефіцієнт нерівномірності розподілу падаючої енергії, σ_{E_0} відносне СКВ падаючої енергії. Величини σ_{T_0} й σ_{E_0} дуже близькі. Введемо ефективну температуру $T_{ef} = \delta \bar{T}$ й ефективну погонну падаючу енергію $E_{ef} = \delta \bar{E}$. Розв'язок рівняння (3) з початковою умовою $E_{ef}/m = 0$ й $T_{ef} = 0$ вийде

$$\frac{E_{ef}}{m} = \frac{1}{\sqrt{-\Delta}} \left(c'_0 - c_1 \frac{q_1}{2q_2} \right) \ln \frac{(2q_2 T_{ef} + q_1 - \sqrt{-\Delta})(q_1 + \sqrt{-\Delta})}{(2q_2 T_{ef} + q_1 + \sqrt{-\Delta})(q_1 - \sqrt{-\Delta})} + \frac{c_1}{2q_2} \ln \frac{q'_0 + q_1 T_{ef} + q_2 T_{ef}^2}{q'_0}, \quad (4)$$

де $\Delta = 4q_2 q'_0 - q_1^2 < 0$. Залежності $\frac{E_{ef}}{m}$ від T_e для значень T_{ef} від 0 до 1500°C були обчислені для температури навколишнього середовища $T_0 = 0^\circ\text{C}$, 20°C и 40°C .

Відносне СКВ обчислення $\frac{E_{ef}}{m}$ склало $\sigma_{E_{ef}} = 0,013$.

Відносний приріст опору болометра (1) можна записати:

$$\frac{\Delta R}{R} = \eta_0 F \left(\frac{E_{ef}}{m} \right) \frac{\bar{E}}{m}, \quad (5)$$

де $\eta_0 = \frac{\alpha_0 q_0}{c_0}$ й

$$F \left(\frac{E_{ef}}{m} \right) = \frac{c_0}{q_0} \left(1 + \frac{\alpha_1 T_{ef}}{\alpha_0} \right) \frac{T_{ef}}{E_{ef}/m} = 1 + a_E \frac{E_{ef}}{m} + b_E \left(\frac{E_{ef}}{m} \right)^2. \quad (6)$$

Обчислені значення $F(E_{ef}/m)$ були апроксимовані методом найменших квадратів поліномом другого ступеня із знаходженням коефіцієнтів a_E й b_E . Отримані результати наведені в табл. 1. Залежності $F(E_{ef}/m)$ показані на рис. 1. Видно, що систематична похибка нелінійності характеристики перетворення $\Theta = (E_{ef}/m) - 1$ може досягати +18%. Початковий коефіцієнт перетворення η_0 в зазначеному діапазоні температур навколишнього середовища лінійно зростає на 4%.

Основний внесок у нелінійність характеристики перетворення вносить температурна залежність фактора ефективності поглинання.

Коефіцієнт перетворення болометра безперервної потужності визначається температурним коефіцієнтом опору платини $\alpha(T)$, фактором ефективності поглинання $q(T)$ і коефіцієнтом теплообміну із зовнішнім середовищем $\gamma(T)$. Використовуючи рівняння теплового балансу для елементарної ділянки болометра

$$\gamma[T(x)] dT(x) = q[T(x)] \cdot dP(x) \quad (7)$$

де $P(x)$ – погонна падаюча потужність, і залежності $q(T)$ й $\gamma(T)$ у вигляді поліномів другого ступеня, отриманий розв'язок для усередненого по довжині

болометра рівняння (7) у вигляді залежності ефективної падаючої потужності $\overline{P}_{ef} = \delta \overline{P}$ від ефективної температури нагрівання $T_{ef} = \delta \overline{T}$.

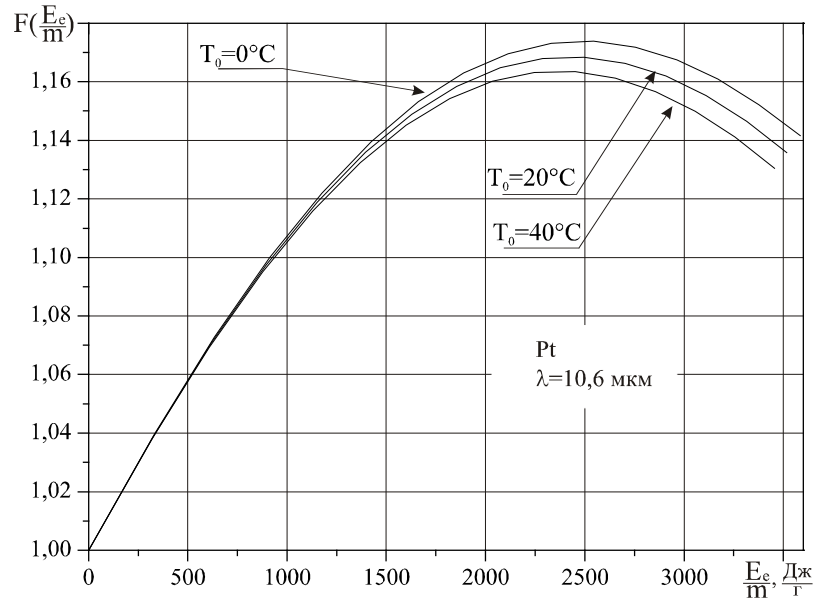


Рис.1. Нормовані коефіцієнти перетворення болометра $F(E_{ef}/m)$ для трьох температур навколишнього середовища

Використовуючи цей розв'язок, методом найменших квадратів отримана залежність нормованого коефіцієнта перетворення:

$$F(P_{ef}) = 1 + a_p P_{ef} + b_p P_{ef}^2 \quad (8)$$

і рівняння виміру болометра:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \eta_{op}(P_{ef}) \overline{P}, \quad (9)$$

де $\eta_{op} = \frac{\alpha_0 q_0}{\gamma_0}$ – початковий коефіцієнт перетворення болометра. Відносні СКВ виразу (9) дорівнюють: $\sigma_{\eta_{op}} = 0,01$, $\sigma_{a_p} = 0,05$ і $\sigma_{b_p} = 0,06$ для різних температур T_0 .

Таблиця 1

Коефіцієнти апроксимації функції перетворення

T_0 °C	0	20	40
$\eta_0, \text{г/Дж}$	1,136	1,159	1,181
$\eta_{op}, \text{см/Вт}$	0,493	0,494	0,495
$a_E, \text{г/Дж}$	$1,367 \cdot 10^{-4}$	$1,361 \cdot 10^{-4}$	$1,354 \cdot 10^{-4}$
$a_p, \text{см/Вт}$	$-6,3 \cdot 10^{-3}$	$-8,0 \cdot 10^{-3}$	$-9,6 \cdot 10^{-3}$
$b_E, \text{г}^2 / \text{Дж}^2$	$-2,71 \cdot 10^{-8}$	$-2,76 \cdot 10^{-8}$	$-2,82 \cdot 10^{-8}$
$b_p, \text{см}^2 / \text{Вт}^2$	$-1,5 \cdot 10^{-3}$	$-1,4 \cdot 10^{-3}$	$-1,3 \cdot 10^{-3}$

На рис. 2 показані залежності $F(P_{ef})$. Видно, що систематична похибка нелінійності характеристики перетворення болометра $\theta = F(P_{ef}) - 1$ може досягати 15%.

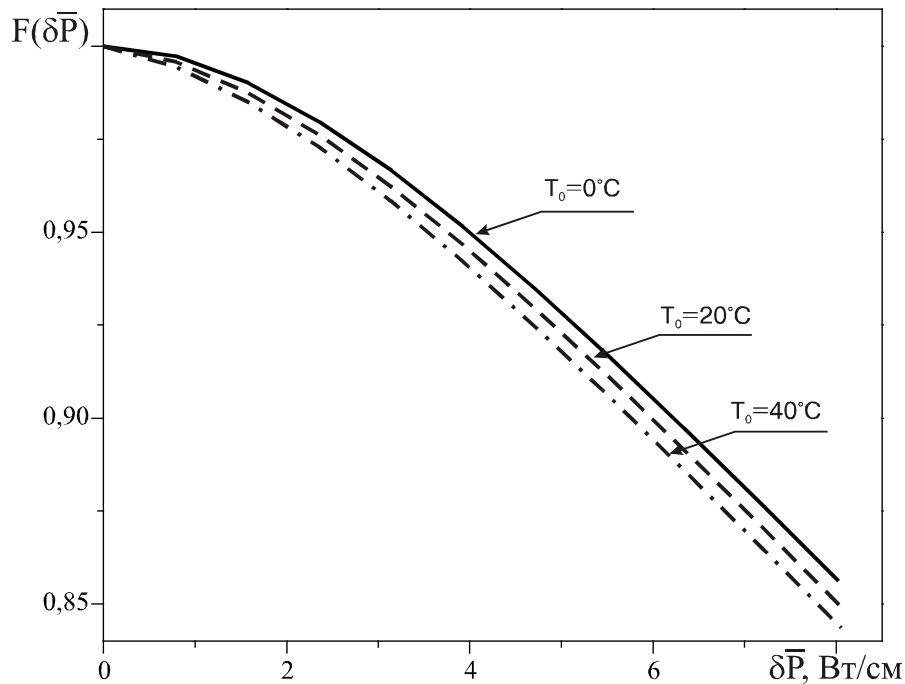


Рис. 2. Нормовані коефіцієнти перетворення болометра $\delta\bar{P}$ для трьох температур навколишнього середовища

У розділі 4. «Контроль параметрів поляризації лазерного випромінювання» розглянуті методи визначення параметрів лінійної та еліптичної поляризації випромінювання дво- та трирешітковим болометричним вимірювачем.

Визначення куту напрямку лінійної поляризації може бути виконане дворешітковим болометром. Кути напрямків елементів решіток $\psi_1 = 0$ й $\psi_2 = \frac{\pi}{2}$. Нормовані сигнали решіток на величину, пропорційну повній інтенсивності випромінювання, що є сумою сигналів решіток, будуть

$$U_{in} = \frac{U_i}{\eta_0 E/m} = (K_D + 1) \frac{U_i}{U_1 + U_2} = k_i, \quad i=1,2 \quad (10)$$

і вони дорівнюють поляризаційним коефіцієнтам взаємодії k_i . Значення кутів $\varphi_{i,2}$ для кожної решітки будуть

$$\varphi_{i,2} = \psi_i \pm \left\{ \frac{1}{K_D - 1} \left[(K_D + 1) \frac{U_i}{U_1 + U_2} - 1 \right] \right\}^{1/2}. \quad (11)$$

Для кожної решітки одержуємо два кути $\varphi_{i,2}$, а неоднозначність вимірювання кута φ усувається збігом кутів щодо решіток у перерізі оптичного пучка.

Експериментальні вимірювання проводилися в такий спосіб. Попередньо для болометрів діаметром 10 мкм вимірювся коефіцієнт K_D . Решітки поверталися відносно напрямку лінійної поляризації випромінювання з кроком 10° . Реєструвалися

їхні сигнали й, використовуючи співвідношення (10), визначалося значення K_D . По 20 вимірам було одержано середнє значення $K_D = 1,8285$ з абсолютним СКВ $\sigma_{K_D} = 0,52 \cdot 10^{-2}$. Для повороту решіток на кут 30° одержали сигнали решіток $U_1 = 0,1859$ й $U_2 = 0,2491$. Обчислені по співвідношенню (11) кути вийшли $\varphi_{11,12} = \pm 30,13^\circ$ й $\varphi_{21,22} = +90 \pm 59,87^\circ$. Обмірюване значення кута поляризації $\bar{\varphi} = \frac{1}{2}(\varphi_{12} + \varphi_{22}) = 30,13^\circ$, що добре збігається із установленим кутом. Аналіз похибок показав, що абсолютне СКВ обмірюваного кута напрямку поляризації становить $\sigma_{\bar{\varphi}} = 0,23^\circ$.

Для визначення параметрів еліптичної поляризації випромінювання використовують трирешітковий болометр, кути напрямків елементів яких $\psi_1 = 0$, $\psi_2 = +\frac{\pi}{3}$ і $\psi_3 = -\frac{\pi}{3}$. Сума поляризаційних коефіцієнтів дорівнює

$$\sum_{i=1}^3 k_i = 1,5(K_D + 1) \quad (12)$$

і не залежить від стану поляризації випромінювання й пропорційна повної інтенсивності випромінювання. Нормовані сигнали решіток будуть

$$U_{ii} = \frac{U_i}{\eta_0 E / m} = 1,5(K_D + 1) \frac{U_i}{\sum_{i=1}^3 U_i} = k_i, \quad i=1,2,3 \quad (13)$$

і вони дорівнюють поляризаційним коефіцієнтам взаємодії решіток.

Обираючи початок відліку кута від елементів i -ої решітки, було визначено значення проєкцій відносних інтенсивностей випромінювання ξ_{xi}^2 й ξ_{yi}^2 на вісь елементів i -ої решітки та вісь перпендикулярну до неї

$$\xi_{xi}^2 = \frac{K_D - U_i}{K_D - 1}; \quad \xi_{yi}^2 = \frac{U_i - 1}{K_D - 1}; \quad i=1,2,3. \quad (14)$$

Показано, що кут φ напрямку більшої осі еліпса є сумою кутів повороту еліпса з $\alpha = \frac{\pi}{2}$ і додаткового повороту за рахунок того, що $\alpha \neq \frac{\pi}{2}$, задовольняє співвідношенню

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{A_{ij} \cos 2\varphi_i - \cos 2\varphi_j}{\sin 2\varphi_j - A_{ij} \sin 2\varphi_i}, \quad (15)$$

де

$$A_{ij} = \frac{\xi_{xj}^2 - \xi_{yj}^2}{\xi_{xi}^2 - \xi_{yi}^2}. \quad (16)$$

Відносні інтенсивності випромінювання пов'язані з відносними квадратами осей еліпса випромінювання ξ_{η}^2 й ξ_{ζ}^2 наступною системою лінійних рівнянь із двома невідомими:

$$\begin{aligned}\xi_{xi}^2 &= \xi_{\eta}^2 \sin^2(\varphi - \psi_i) + \xi_{\eta}^2 \cos^2(\varphi - \psi_i); \\ \xi_{xi}^2 &= \xi_{\eta}^2 \cos^2(\varphi - \psi_i) + \xi_{\eta}^2 \sin^2(\varphi - \psi_i).\end{aligned}\quad i=1,2,3 \quad (17)$$

Розв'язок цієї системи рівнянь дає значення ξ_{ξ}^2 й ξ_{η}^2 .

Результати експерименту з болометрами, діаметр яких дорівнює 10 мкм, дає наступні результати. При повороті решіток щодо лінійної поляризації випромінювання на кут 60° нормовані сигнали мають значення $U_{1n} = 1,6061$, $U_{2n} = 1,6136$ і $U_{3n} = 1,00018$. Кути напрямку більшої осі еліпса вийшли $\varphi_{12} = -59,70^\circ$, $\varphi_{12} = -59,69^\circ$ і $\varphi_{23} = -59,51^\circ$. Середнє значення кута $\bar{\varphi} = -59,63^\circ$. Обчислення по співвідношенню (17) дають наступні результати: $\xi_{\eta_1}^2 = 0.0018$ і $\xi_{\xi_1}^2 = 1.0018$; $\xi_{\eta_2}^2 = 0.0023$ і $\xi_{\xi_2}^2 = 0.9975$; $\xi_{\eta_3}^2 = -0.0016$ і $\xi_{\xi_3}^2 = 0.9999$. Маємо випадок виродження еліпсу у відрізок прямої лінії.

Середні значення виходять $\bar{\xi}_{\eta}^2 = 0.0003$ й $\bar{\xi}_{\xi}^2 = 0.9997$. Аналіз похибок дає абсолютне СКВ $\sigma_{\varphi} = 0,13^\circ$ й абсолютні СКВ $\sigma_{\xi_{\xi}}^2 = \sigma_{\xi_{\eta}}^2 = 1,2 \cdot 10^{-2}$.

Болометром з трьома решітками можна виміряти й кут напрямку лінійної поляризації випромінювання. Для тих же нормованих сигналів решіток кут поляризації випромінювання визначається за виразом

$$\varphi_{i1,i2} = \psi_i \pm \arcsin \left\{ \frac{1}{K_D + 1} \left[1,5(K_D + 1) \frac{U_i}{\sum_{i=1}^3 U_i} - 1 \right] \right\}^{1/2}, \quad i=1,2,3. \quad (18)$$

Обчислення дають наступні результати: $\varphi_{12} = -59,77^\circ$, $\varphi_{21} = -59,71^\circ$ і $\varphi_{32} = -60,78^\circ$. Середнє значення кута $\bar{\varphi} = -60,09^\circ$. Абсолютне СКВ виміру кута φ становить $\sigma_{\varphi} = 0,52^\circ$.

У розділі 5. «Метрологічні властивості та показники решітчастих болометричних вимірювачів енергетичних параметрів лазерного випромінювання» розглянуті дво- та трирешіткові болометричні вимірювачі, обґрунтовано методи абсолютних вимірювань енергетичних параметрів лазерного випромінювання, проведено експериментальні дослідження запропонованих методів та аналіз похибок отриманих результатів.

Для вимірювання безперервної потужності і енергії однократних імпульсів лазерного випромінювання були запропоновані пристрої у вигляді двох або трьох практично ідентичних болометричних решіток, які виготовлені з тонких металевих волокон. Решітки розташовані близько одна до одної, мають сталий період. При вимірюванні енергії лазерного імпульсу необхідно, щоб його тривалість була набагато меншою від теплової сталої часу болометра. При цих умовах приріст опору болометра буде пропорційний поглиненій оптичній енергії. Решітки виконують просторове інтегрування розподілу інтенсивності випромінювання в перерізі пучка.

Похибка інтегрування в 1% досягається, якщо круговий пучок з рівномірним розподілом перетинає не менш 10 елементів решітки. Для випадку гауссового розподілу енергії або потужності у перерізі лазерного пучка період решітки повинен бути менше двох середніх квадратичних радіусів пучка.

Розглянуто роботу болометричного вимірювача як у лінійному режимі, коли приріст опору болометра пропорційний поглиненій їм інтенсивності випромінювання, і параметри болометра залишаються практично незмінними, так і в нелінійному режимі.

Для дворешіткового болометра з кутами напрямків його елементів $\psi_1 = 0$ і $\psi_2 = \frac{\pi}{2}$ сума поляризаційних коефіцієнтів $k_1 + k_2 = 1 + K_D$ як для лінійної, так й еліптичної поляризації випромінювання. Сигналом решітки є відносний приріст її опору під дією випромінювання, тобто

$$U_i = \frac{\Delta R_i}{R_{i0}} = \frac{e_i - e_{i0}}{e_{i0}},$$

де R_{i0} й ΔR_i - початковий опір решітки і його приріст; e_{i0} - стала напруга електричного зсуву на болометрі і e_i - максимальна напруга на решітці під дією випромінювання. При вимірюванні енергії імпульсу випромінювання сума сигналів решіток U_1 і U_2 буде

$$U_1 + U_2 = \frac{\Delta R_1}{R_{10}} + \frac{\Delta R_2}{R_{20}} = \frac{\alpha_0 q_0^E}{C_0} (1 + K_D) \frac{\bar{E}}{m}. \quad (19)$$

Повна енергія E пучка лазерного випромінювання виходить:

$$E = S \frac{m}{d_\delta} \left(\frac{\bar{E}}{m} \right) = \frac{m l x n c_0}{d_\delta \alpha_0 q_0^E (1 + K_D)} \left(\frac{\Delta R_1}{R_{10}} + \frac{\Delta R_2}{R_{20}} \right) \quad (20)$$

де S - площа однієї решітки; d_δ - діаметр болометра.

Повна потужність P неперервного випромінювання буде:

$$P = S \frac{\bar{P}}{d_\delta} = \frac{l x n c_0}{d_\delta \alpha_0 q_{0P}^E (1 + K_D)} \left(\frac{\Delta R_1}{R_{10}} + \frac{\Delta R_2}{R_{20}} \right) \quad (21)$$

У сумарну похибку вимірювання енергії E і потужності P при використанні для реєстрації сигналів решіток високочутливих і малоінерційних аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) основний внесок вносить похибка вимірювання q_0^E .

Для визначення ряду параметрів випромінювання (коефіцієнта нерівномірності розподілу інтенсивності випромінювання δ , узагальненої площі оптичного пучка S_0 , середнього квадратичного радіуса (СКР) пучка σ , діаметра пучка із заданою часткою інтенсивності випромінювання, координат енергетичного центру пучка) використовується профільний болометр, у якому сигнали реєструються з кожного болометричного елемента решіток з використанням багатоканального високочутливого й швидкодіючого АЦП типу ЛА-2USB-14 із запам'ятовуванням результатів в комп'ютері. Більшість експериментальних досліджень проводилося з болометричними решітками із платинових мікродротів

діаметром 10 мкм і 20 мкм. Період елементів решіток був $\lambda=4$ мкм, їхня довжина становила $\ell=80$ мкм й їхня кількість $n=16$. Опір кожного елемента при кімнатній температурі близько 100 Ом і 25 Ом. Діаметр входної апертури дорівнював 65 мм. Схема дворешіткового болометра показана на рис. 3а. Болометричні елементи живлялися від джерела сталої напруги e через навантажувальні опори R , значно перевищуючі опори елементів. Входні опори каналів АЦП перевищували 1 МОм і тому сигнали з елементів були пропорційні напругам на них. Джерелом випромінювання був неодимовий лазер ГОС-1001, що працює в режимі вільної генерації із тривалістю імпульсу 0,8 мс і з діаметром вихідного променя близько 45 мм. Схема експериментальної установки показана на рис. 4, на якій 1 – лазер; 2 – скляна пластинка, розташована під кутом Брюстера до падаючого випромінювання, і відбите від неї лінійно поляризоване випромінювання спрямоване вертикально і проходить через дворешітковий болометр 3; 4 – АЦП; 5 – комп'ютер; 6 і 7 – калориметри. Решітки розташовані горизонтально й мають однаковий теплообмін із зовнішнім середовищем. З елементів решіток, що мають координати x_i і y_i і $i, j = 1, \dots, n$, реєструються сигнали $U_{i,j}$.

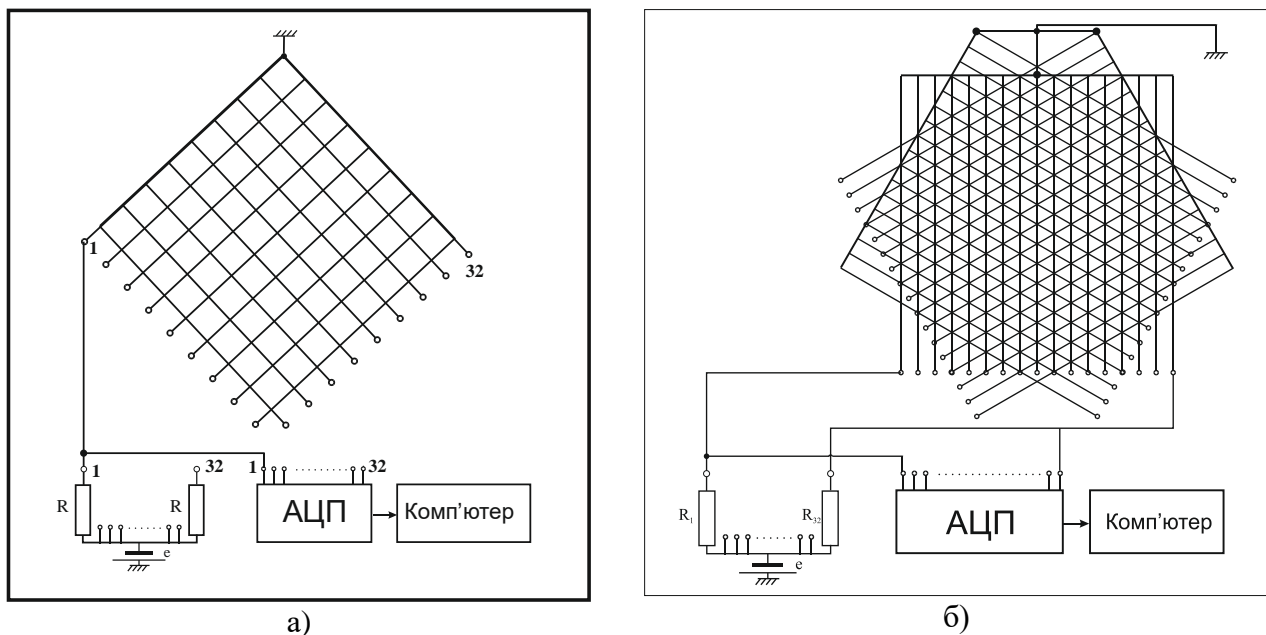


Рис.3. Схема болометричного вимірювача параметрів лазерного випромінювання. а) дворешітковий вимірювач; б) трирешітковий вимірювач

Координати енергетичного центру пучка будуть

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \frac{U_i}{U_x}; \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j \frac{U_j}{U_y}. \quad (22)$$

СКР пучка уздовж координати X буде

$$r_x = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \frac{U_i}{U_x} \right]^{1/2}. \quad (23)$$

За аналогічним виразом знаходиться СКР пучка r_y уздовж координати y , а середній СКР пучка буде визначатися середньо геометричним значенням з r_x й r_y :

$$r = (r_x \cdot r_y)^{1/2}. \quad (24)$$

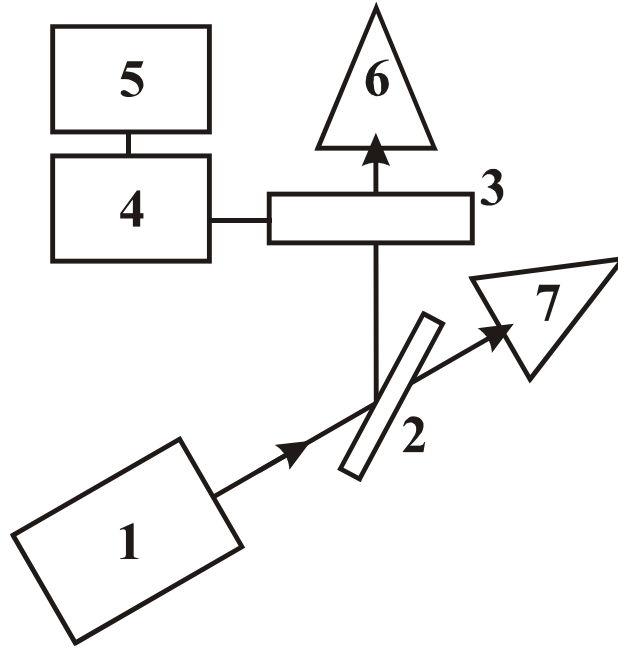


Рис.4. Схема експериментальної установки

Коефіцієнти нерівномірності розподілу інтенсивності випромінювання уздовж осей координат визначаються виразом

$$\delta_{x,y} = \frac{1}{n} \sum_{i,j=1}^n \frac{U_{i,j}^2}{U_{x,y}^2}, \quad (25)$$

а коефіцієнт усього пучка буде $\delta = \delta_x \cdot \delta_y$.

Узагальнена площа пучка становить $S_0 = S / \delta$.

Для визначення діаметра пучка із заданою часткою інтенсивності випромінювання будується залежність $F(x_k) = \sum_{i=1}^k \frac{U_i}{U_x}$, що є аналогом функції розподілу в теорії ймовірностей і змінюється від 0 до 1.

По заданій частці інтенсивності випромінювання $p = 1 - \beta$ визначаються значення координат x' і x'' зі співвідношень $F(x') = \frac{\beta}{2}$ й $F(x'') = 1 - \frac{\beta}{2}$. Діаметр пучка уздовж координати x буде дорівнювати $d_x = x'' - x'$. Аналогічним чином визначається для цієї частки інтенсивності випромінювання діаметр пучка уздовж координати y , що буде дорівнювати $d_y = y'' - y'$. Діаметр пучка буде визначатися середньгеометричним значенням з d_x й d_y , тобто $d = (d_x d_y)^{1/2}$

Для визначення стану поляризації лазерного випромінювання, коли болометри працюють у нелінійному режимі, використовуються три решітки (Рис. 3б). Необхідно визначити повну енергію імпульсу E або повну потужність P оптичного пучка зі знаходженням поляризаційних коефіцієнтів взаємодії решіток k_i і коефіцієнта нерівномірності розподілу інтенсивності випромінювання δ . Після цього визначаються лінеаризовані сигнали решіток U_i і стан поляризації випромінювання. Розгляд проводився для неперервного випромінювання з довжиною хвилі 10,6 мкм, для якої визначені нелінійні характеристики перетворення платинових болометрів діаметром 10 мкм. Були обчислені ФЕП болометра для E - і H -поляризованого випромінювання $q^{E,H}(T)$ в діапазоні температур $T=0..1500^\circ C$ і середній коефіцієнт $K_D=1,381$ у зазначеному діапазоні температур з абсолютним СКВ $\sigma_{K_D}=0,003$. Для знаходження погонної падаючої потужності P необхідно розв'язати рівняння виміру

$$\sum_{i=1}^3 U_i = \eta_{0P} \bar{P} \sum_{i=1}^3 F_i(k_i \delta \bar{P}) k_i. \quad (26)$$

У цьому співвідношенні $F_i(k_i \delta \bar{P})$ - нормовані коефіцієнти перетворення болометра, а k_i й δ залежать від рівня інтенсивності випромінювання. Рівняння розв'язується методом послідовних наближень. При першому наближенні розглядається робота болометрів у лінійному режимі. Тоді поляризовані коефіцієнти взаємодії будуть

$$k'_i = \frac{1,5(K_D + 1)}{1 + \frac{U_{i+1}}{U_i} + \frac{U_{i+2}}{U_i}}, \quad i=1,2,3 \quad (27)$$

а коефіцієнт нерівномірності розподілу інтенсивності

$$\delta = (\delta_1 \delta_2 \delta_3)^{2/3}, \quad (28)$$

де δ_i - коефіцієнт нерівномірності i -ої решітки, що які розраховуються за виразом, аналогічним (25).

Рівняння (26) після підстановки виразів $F_i(k_i \delta \bar{P})$ приймає вигляд

$$M(\bar{P}) = -U_\Sigma + c\bar{P} + d\bar{P}^2 + f\bar{P}^3 = 0, \quad (29)$$

де

$$U_\Sigma = \frac{1}{\eta_{0P}} \sum_{i=1}^3 U_i; \quad c = \sum_{i=1}^3 U_{in}; \quad d = a_P \delta \sum_{i=1}^3 U_{in}^2; \quad f = b_P \delta^2 \sum_{i=1}^3 U_{in}^3 \quad (30)$$

а U_{in} є нормовані сигнали решіток. Рівняння (29) має один дійсний розв'язок, що визначає перше наближення \bar{P}' . У першому наближенні визначається і ефективна потужність $\delta \bar{P}'$. Після цього вводяться поправки на систематичні похибки величин δ и k_i

Друге наближення коефіцієнтів k_i'' знаходиться за виразом (27), тільки замість величин U_i беруться $F_i'(k_i' \delta \bar{P}') \cdot k_i'$. На рис. 6 показані залежності відношення k_i/k_i' залежно від k_i' й $\delta \bar{P}'$. За отриманими залежностями визначається множник для другого наближення k_i'' . На рис. 6 показані аналогічні криві при вимірюванні енергії імпульсу.

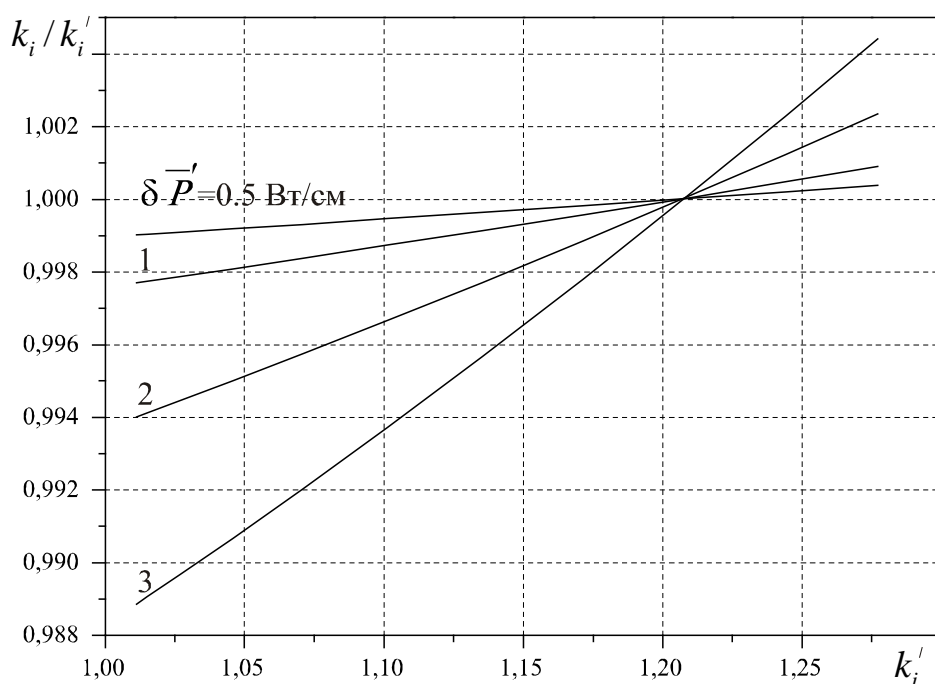


Рис.5. Залежності поляризаційного коефіцієнту k_1 від виміряного значення k_1' для різних значень $\delta \bar{P}$

На рис. 7 показані залежності нормованого на δ_0 коефіцієнта нерівномірності розподілу інтенсивності випромінювання δ залежно від ефективної потужності $\delta \bar{P}$ або ефективної питомої енергії. Дані криві отримані розрахунковим шляхом при фіксованому пучку падаючого випромінювання залежно від інтенсивності випромінювання. Криві дозволяють виключити систематичну похибку у другому наближенні значення δ'' .

Знов розв'язується рівняння (29) із скорегованими значеннями коефіцієнтів s , d й f , і знаходиться друге наближення \bar{P}'' . Аналогічним чином можна проводити наступні наближення до досягнення необхідної похибки визначення величини \bar{P} . Повна потужність оптичного пучка буде

$$P = \frac{\bar{P}}{d_\delta} S. \quad (31)$$

Для вимірювання енергії імпульсу E або безперервної потужності \bar{P} лазерного випромінювання можна використовувати дворешітковий болометр при роботі його елементів у нелінійному режимі, використовуючи вирази (26)-(30), у яких

підсумовування виконується за параметрами тільки двох решіток. Для виключення систематичних похибок у визначенні поляризованого коефіцієнта взаємодії k_i й коефіцієнта нерівномірності розподілу інтенсивності δ використовуються ті ж залежності (рис.5-7), що й для трирешіткового болометра.

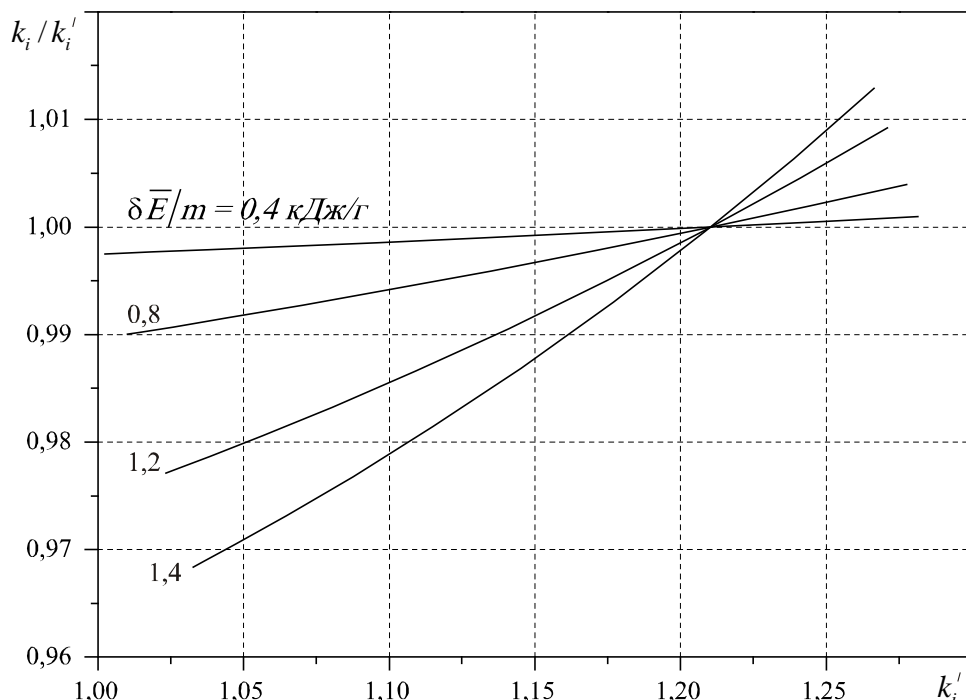


Рис.6. Залежності поляризаційного коефіцієнту k_1 від виміряного значення k_1' для різних значень $\delta \bar{E}/m$

Визначивши k_i , δ і \bar{P} , знаходяться нормовані коефіцієнти перетворення $F_i(k_i, \delta \bar{P})$ й лінеаризовані сигнали решіток

$$U_i' = \frac{U_i}{F_i(k_i, \delta \bar{P})}, \quad i=1,2,3 \quad (32)$$

а за ними і стан поляризації лазерного випромінювання. Використана апаратура дозволяє одержати СКВ $\sigma_{U_i'} = 1,1 \cdot 10^{-3}$.

Проведений аналіз випадкової і систематичної похибки результату вимірювань енергетичних параметрів дво- і трирешітковими болометрами показав, що створений профільний решітковий тонкодротовий платиновий болометр дозволяє проводити абсолютні вимірювання енергії імпульсу лазерного випромінювання з відносним СКВ 0,87 % в лінійному режимі роботи для невисоких енергій імпульсу лазерного випромінювання і з відносним СКВ 1,6 % при вимірюванні високих енергій імпульсу, коли болометр працює в нелінійному режимі.

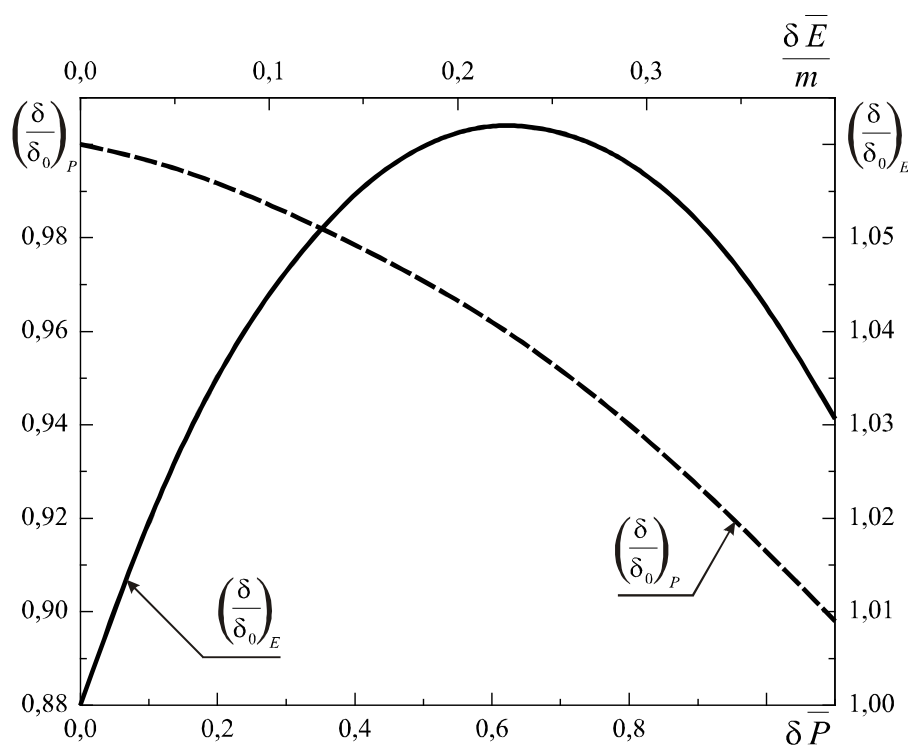


Рис.7. Залежності відносних коефіцієнтів нерівномірності розподілу δ/δ_0 від $\delta \bar{P}$ та $\delta \bar{E}/m$.

У розділі 6. «Вимірювання параметрів потужного та сфокусованого лазерного випромінювання» обґрунтовано й експериментально перевірено метод вимірювання діаметра фокальної плями лазерного випромінювання скануючим тонкодротовим болометром та методи значного підвищення порогової енергії імпульсу імпульсного випромінювання при вимірюваннях параметрів пучка Гауса тонкодротовими болометрами.

Для вимірювання параметрів фокальної плями використовували скануючий тонкодротяний болометр з діаметром 3 мкм та довжиною 8,4 мм. Джерелом випромінювання був одномодовий лазер ЛГН-302 з довжиною хвилі 0,63 мкм. Переміщення робочого болометру проводилось у фокальній плямі у перетині оптичного випромінювання.

Абсолютна випадкова похибка вимірювань СКР оптичних пучків склала 0,014 мкм для відстані між сусідніми вимірами $\Delta x=0,5$ мкм.

Діаметри оптичного пучка D визначались як чотири середньоквадратичні радіуси. Виміряні значення діаметрів оптичних пучків для Е- та Н-поляризацій випромінювання та абсолютних випадкових похибок з довірливою вірогідністю 0,95 склали $D_E=(8,16\pm 0,12)$ мкм і $D_H=(8,00\pm 0,12)$ мкм.

Для підвищення порогових значень інтенсивностей лазерного випромінювання, які можуть бути виміряні тонкодротовими болометрами, був запропонований метод, в якому використовуються чотири тонкі платинові болометри. Болометри розташовуються попарно перпендикулярно один одному та розміщуються горизонтально та вертикально на деякій відстані від центру лазерного пучка з гаусовим розподілом інтенсивності в перетині (рис. 8).

Якщо тривалість імпульсу випромінювання значно менше теплової постійної часу болометру, то для вимірювання енергії імпульсу можна реєструвати

максимальний приріст його опору U_R або площу під його вихідним сигналом під час остигання U_S . У нелінійному режимі роботи болометрів ці сигнали мають протилежні нелінійності характеристики перетворення. Ці сигнали можуть бути представлені у вигляді

$$U_{R_i, S_i} = \eta_{R,S}^E F_{R_i, S_i} k \frac{\bar{E}_i}{m} = \eta_{R,S}^E \left[1 + a_{R,S} k \frac{\delta \bar{E}_i}{m} + b_{R,S} \left(k \frac{\delta \bar{E}_i}{m} \right)^2 \right] k \frac{\bar{E}_i}{m}, \quad (33)$$

$\eta_{R,S}^E$ – коефіцієнти перетворення болометра в лінійному режимі для Е-поляризованого випромінювання; $F_{R,S}$ – нормовані на $\eta_{R,S}^E$ коефіцієнти перетворення болометра в нелінійному режимі; k – поляризаційний коефіцієнт взаємодії болометра з випромінюванням; E_i – погонна падаюча енергія на i -ий болометр; m – погонна маса болометра; δ – коефіцієнт нерівномірності розподілу падаючої енергії випромінювання по довжині болометра; $a_{R,S}$ и $b_{R,S}$ – коефіцієнти поліномів другого ступеня, які визначають нелінійність характеристики перетворення болометра для відповідних вихідних сигналів.

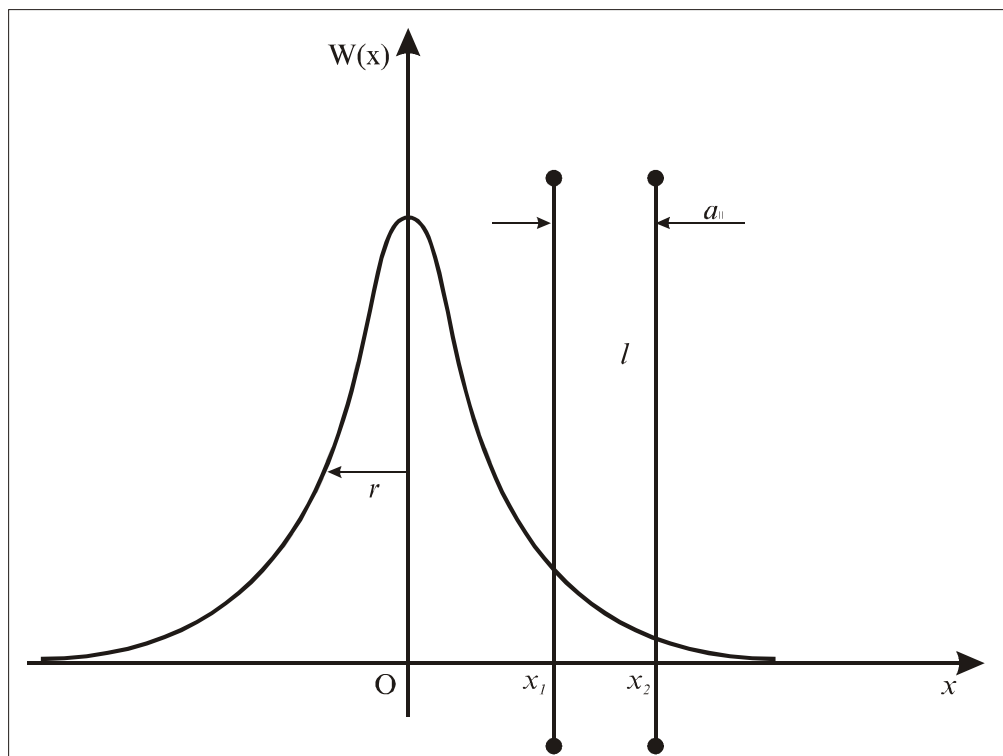


Рис. 8. Розташування вертикальних болометрів відносно профільного розподілу $W(x)$

Відношення сигналів (33) для двох болометрів буде

$$\gamma_1 = \frac{U_{R_1} F_{R_2}}{U_{R_2} F_{R_1}} = e^{\frac{x_2^2 - x_1^2}{2r^2}}, \quad (34)$$

з нього знаходиться значення x_1 , яке дорівнює

$$x_1 = \frac{r^2 \ln \left(\frac{U_{R_1} F_{R_2}}{U_{R_2} F_{R_1}} \right)}{a_1} - \frac{a_1}{2}. \quad (35)$$

За аналогічними виразами знаходяться значення y_1 для горизонтальних болометрів. З виразів для перших вертикальних та горизонтальних болометрів отримуюмо відношення:

$$\gamma_{xy} = \frac{U_{//R_1} F_{=R_1}}{U_{=R_1} F_{//R_1}} = \frac{k_{//}}{k_{=}} e^{\frac{y_1^2 - x_1^2}{2r^2}} = \frac{1 + k_D \operatorname{tg}^2 \varphi}{\operatorname{tg}^2 \varphi + K_D} e^{\frac{y_1^2 - x_1^2}{2r^2}} \quad (36)$$

і значення модулю кута лінійної поляризації

$$|\varphi| = \pm \operatorname{arctg} \left(\frac{\left(\gamma_{xy} K_D - e^{\frac{y_1^2 - x_1^2}{2r^2}} \right)^{1/2}}{K_D e^{\frac{y_1^2 - x_1^2}{2r^2}} - \gamma_{xy}} \right). \quad (37)$$

За виразами для вертикальних та горизонтальних болометрів знаходиться значення енергії імпульсу E_{ox} и E_{oy} у вигляді

$$E_{ox} = \frac{U_{//R_1} m l r \sqrt{2\pi}}{\eta_R^E F_{//R_1} d} \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}{1 + K_D \operatorname{tg}^2 \varphi} e^{\frac{x_1^2}{2r^2}}, \quad (38)$$

$$E_{oy} = \frac{U_{=R_1} m l r \sqrt{2\pi}}{\eta_R^E F_{=R_1} d} \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}{\operatorname{tg}^2 \varphi + K_D} e^{\frac{y_1^2}{2r^2}}.$$

Найбільш достовірним значенням енергії імпульсу лазера E_0 буде середнє між E_{ox} и E_{oy} , а саме

$$E_0 = \frac{1}{2} (E_{ox} + E_{oy}). \quad (39)$$

Проведений аналіз похибок вимірюваних параметрів випромінювання. Показано, що відносне СКВ вимірювання енергії імпульсу пучка Гауса становить $\sigma_{E_0} = 2,2 \cdot 10^{-2}$ у нелінійному режимі та $\sigma_{E_0} = 3,7 \cdot 10^{-2}$ у лінійному режимі роботи вимірювачів, а також були розраховані відносні СКВ радіусу оптичного пучка $\sigma_r = \sigma_{r_{//}} / \sqrt{2} = 0,85 \cdot 10^{-2}$. На відміну від відомих методів, запропоновані методи дозволяють значно підвищити верхній граничний рівень вимірювання енергії імпульсу лазерного випромінювання без використання систем ослаблення або відгалуження при вимірюваннях енергетичних і просторових параметрів лазерного випромінювання у вигляді пучків Гауса.

ВИСНОВКИ

Запропоновані, обґрунтовані, створені і експериментально досліджені пристрої тонкодротових болометричних вимірювачів параметрів інтенсивного і широкоапертурного лазерного випромінювання суттєво допомагають при дослідженнях і створенні потужних лазерів, а також при використанні їх випромінювання в різних наукових і технічних застосуваннях.

Вирішена важлива наукова проблема вимірювання тонкодротовими болометрами абсолютних значень енергетичних параметрів інтенсивного і широкоапертурного лазерного випромінювання у широкому спектральному діапазоні.

Основні результати роботи

1. Огляд вимірювальних систем провідних світових виробників показав, що тільки деякі виробники включають у свої системи ПВП для широкоапертурних пучків, але їх розміри обмежені 200 мм. Тому розробка методів абсолютних вимірювань тонкодротяними болометричними перетворювачами дозволить більш ефективно використовувати їх у промислових вимірювальних системах.
2. Вперше розроблені та експериментально перевірені методи вимірювання температурних залежностей факторів ефективності поглинання платинових тонкодротових болометрів на довжинах хвиль випромінювання 1,06 мкм і 10,6 мкм. Показано, що фактор ефективності поглинання в діапазоні температур 0 ... 1500° С збільшується в 2,2 рази та не залежить в межах оцінених відносних СКВ від діаметра болометра і стану поляризації лазерного випромінювання. Показано, що основну похибку в результати вимірювань вносить похибка абсолютних вимірювань енергії імпульсу лазера калориметром, відносно СКВ якого складає $\pm 2,5$ %.
3. Отримані характеристики перетворення одиночними тонкодротовими болометрами енергії імпульсу і безперервної потужності лазерного випромінювання на довжинах хвиль 1,06 мкм і 10,6 мкм. Виконане градування одиночного болометра: визначені коефіцієнти рівняння вимірювання енергії імпульсу лазерного випромінювання платиновими тонкодротовими болометрами η_0 a і b та їхні відносні СКВ. Показано, що рівняння вимірювання є кубічним відносно середньої погонної питомої енергії \bar{E}/m , а залежність $\Delta R/R_0$ від \bar{E}/m є однозначною і безперервною функцією у розглянутому діапазоні ефективної питомої енергії $\delta \bar{E}/m$.
4. Розроблений метод вимірювання коефіцієнта дихроїзму тонкодротових болометрів. Коефіцієнт дихроїзму визначається діапазоном довжин хвиль, матеріалом і геометричними розмірами болометра і практично не залежить від температури нагріву болометра.
5. Обґрунтований метод вимірювання лінійної поляризації інтенсивного і широкоапертурного лазерного випромінювання трьома болометричними решітками з тонкодротовими платиновими елементами, які мають нелінійні характеристики перетворення. Запропоновані три методики вимірювань, які

виключають з отриманих результатів систематичні похибки за рахунок нелінійності характеристики перетворення болометрів. Показано, що абсолютне СКВ вимірюваних кутів напрямків лінійної поляризації випромінювання складає $0,10^\circ$.

6. Вперше обґрунтований метод вимірювання лінійної поляризації безперервного і імпульсного лазерного випромінювання двома болометричними решітками зі взаємонеперпендикулярними напрямками болометричних елементів. Показано, що абсолютне СКВ кута напрямку лінійної поляризації випромінювання складає $0,23^\circ$.
7. Вперше розроблений метод вимірювання параметрів еліптичної поляризації потужного лазерного випромінювання трьома нелінійними тонкодротовими болометричними решітками, який дозволяє врахувати початковий кут напрямку великої півосі еліпса поляризації і її додатковий поворот за рахунок зсуву фаз між електричними складовими поля випромінювання.
8. Створені експериментальні зразки ПВП у вигляді дво- і трирешіткових тонкодротових платинових болометрів для вимірювання параметрів лінійної та еліптичної поляризації лазерного випромінювання. Показано, що при реєстрації сигналів решіток з відносними СКВ $4,5 \cdot 10^{-3}$ вимірювання кута напрямку лінійної поляризації випромінювання проводиться з абсолютним СКВ $0,52^\circ$; кут напрямку великої півосі еліпса випромінювання визначається з абсолютним СКВ $\sigma_\varphi = 0,13^\circ$, а квадрати півосей еліпса з абсолютними СКВ $1,2 \cdot 10^{-2}$.
9. Проведений аналіз всіх етапів градування визначення характеристики перетворення тонкодротових болометрів. Створені вимірювальні перетворювачі у вигляді дво- та трирешіткових тонкодротових болометрів енергії імпульсу і безперервної потужності лазерного випромінювання в абсолютних величинах.
10. Запропонований метод визначення характеристики перетворення, в якому по профільних сигналах платинових болометричних елементів і відомих початковому і нормованому коефіцієнтах перетворення болометрів знаходять початкові наближення поляризаційних коефіцієнтів взаємодії випромінювання з решітками, коефіцієнт нерівномірності розподілу інтенсивності і власне значення енергетичного параметра. Показано, що послідовними наближеннями зі вказаних параметрів можна виключити систематичні похибки за рахунок нелінійності характеристики перетворення болометрів. Розраховане значення енергії імпульсу лазера $18,9$ Дж, і вимірювана енергія калориметром складала $18,7$ Дж.
11. Отримані значення відносних СКВ всіх коефіцієнтів і параметрів апроксимованих залежностей. Показано, що відносне СКВ вимірюваної середньої погонної питомої енергії в основному визначається відносним СКВ вимірювання фактора ефективності поглинання σ_{q_0} . Відносне СКВ вимірювання повної енергії пучка лазера дворешітковим болометром становить $\sigma_E = 1,6 \cdot 10^{-2}$. Отримані результати дозволяють створювати болометричні вимірювачі безперервної потужності і енергії імпульсу

лазерного випромінювання в широкому динамічному діапазоні з виключенням домінуючих похибок за рахунок нелінійності характеристики перетворення болометра.

12. Експериментально показана можливість вимірювання діаметрів сфокусованих пучків лазерного випромінювання від 8 мкм і більше тонкодротовим скануючим болометром. За допомогою платиного болометра діаметром 3 мкм виміряні діаметри пучків: $D^E=(8,16\pm 0,12)$ мкм і $D^H=(8,00\pm 0,12)$ мкм.
13. Вперше розроблені методи вимірювання параметрів імпульсу лазерного випромінювання з розподілом Гауса щільності енергії з використанням тонкодротових болометрів, розташованих у перерізі оптичного пучка за межами його основної інтенсивності. Запропоновані методи дозволяють вимірювати положення координат енергетичного центру пучка, його середній квадратичний радіус, модуль кута напрямку лінійної поляризації випромінювання і повну енергію пучка. Проведений аналіз похибок вимірних параметрів випромінювання. Показано, що відносне СКВ вимірювання енергії імпульсу пучка Гауса становить $\sigma_{E_0} = 2,2 \cdot 10^{-2}$ у нелінійному режимі та $\sigma_{E_0} = 3,7 \cdot 10^{-2}$ у лінійному режимі роботи вимірювачів. На відміну від відомих методів, запропоновані методи дозволяють значно підвищити верхній граничний рівень вимірювання енергії імпульсу лазерного випромінювання без використання систем ослаблення або відгалуження при вимірюваннях енергетичних і просторових параметрів лазерного випромінювання у вигляді пучків Гауса.

Перспективні напрямки подальших досліджень: дослідження болометричних вимірювачів для інших довжин хвиль інфрачервоного діапазону (зокрема для діапазону випромінювання потужних хімічних лазерів – 2,7÷4,1 мкм), розробка зручного програмного забезпечення для автоматизованої обробки результатів вимірювань, застосування розроблених методів для підвищення якості відтворення розподілу інтенсивності у пучку.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у реферованих закордонних журналах:

1. Измерение микрометровых диаметров сфокусированного лазерного излучения тонкопроволочным болометром / В. М. Кузьмичев, Б. В. Сафронов, С. В. Погорелов, В. П. Балкашин // Измерительная техника. – 2002. – № 3. – С. 28-30.
2. Kuzmichov V. M. Calibration of the wire platinum bolometers for pulsed laser power measurements / V. M. Kuzmichov, S. V. Pogorelov // Telecommunication and Radio Engineering. – 2002. – Vol. 58, № 11-12. – P. 133-143.
3. Кузьмичев В. М. Температурная зависимость фактора эффективности поглощения тонкопроволочного платинового болометра / В. М. Кузьмичев, С. В. Погорелов // Измерительная техника. – 2003. – № 3. – С. 20-22.

4. Kuzmichov V. M. Measuring of Gaussian beam laser pulse parameters with nonlinear thin-wire bolometer / V. M. Kuzmichov, S. V. Pogorelov // *Telecommunication and Radio Engineering*. – 2003. – Vol. 59, № 7-9. – P. 151-158.
5. Kuzmichov V. M. Improving the accuracy of temperature dependence measurements for absorption efficiency factor of platinum bolometers / V. M. Kuzmichov, S. V. Pogorelov // *Telecommunication and Radio Engineering*. – 2003. – Vol. 60, № 1-2. – P. 104-107.
6. Кузьмичев В. М. Определение характеристики преобразования платинового болометра для измерения преобразования энергии импульса лазера / В. М. Кузьмичев, С. В. Погорелов // *Измерительная техника*. – 2004. – № 5. – С. 23-25.
7. Transformation of the continuous laser power on the wave length 10.6 microns by the thin-wire platinum bolometer / V. M. Kuzmichov, S. V. Pogorelov, I. A. Priz, B. V. Safronov, V. P. Balkashin, P. Kohns // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2005. – Vol. 63, № 5. – P. 461-471.
8. Измерение фактора эффективности поглощения тонкопроволочного болометра / В. М. Кузьмичев, С. В. Погорелов, И. А. Приз, Б. В. Сафронов, В. П. Балкашин, П. Коонс // *Измерительная техника*. – 2007. – № 7. – С. 28-30.
9. Измерение коэффициента дихроизма тонкопроволочного болометра и состояния поляризации лазерного излучения / В. М. Кузьмичев, С. В. Погорелов, Б. В. Сафронов, В. П. Балкашин, И. А. Приз, П. Коонс // *Метрология (Ежемесячное приложение к научно-техническому журналу "Измерительная техника")*. – 2007. – № 5. – С. 40-44.
10. Profile thin-wire bolometer of lazer pulse energy / V. M. Kuzmichov, S. V. Pogorelov, B. V. Safronov, I. A. Priz, V. P. Balkashin, P. Kohns // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2007. – Vol. 66, № 10. – P. 907-913.
11. Двухрешеточный болометрический измеритель линейной поляризации лазерного излучения / В. М. Кузьмичев, С. В. Погорелов, Б. В. Сафронов, В. П. Балкашин, И. А. Приз // *Метрология (Ежемесячное приложение к научно-техническому журналу "Измерительная техника")*. – 2009. – № 5. – С. 17-22.
12. Bolometric measurer of linear polarization of laser radiation / S. V. Pogorelov, I. A. Priz, B. V. Safronov, V. P. Balkashin, I. V. Krasovsky // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2013. – Vol. 72, № 15. – P. 1423-1429.
13. Pogorelov S. V. Calibration of thin-wire bolometer of laser pulse energy on the wavelength 1.06 micron / S. V. Pogorelov // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2015. – Vol. 74, № 8. – P. 745-752.
14. Pogorelov S. V. Measurements of intense and wide-aperture laser radiation parameters with thinwire bolometers / S. V. Pogorelov // *Advanced Lasers*,

Volume 193 of the series Springer Series in Optical Sciences. – 2015. – Vol. 193, Chapter 12. – P. 183-197.

Статті у фахових журналах України

15. Кузьмичев В. М. Измерение параметров импульса пучка лазера тонкопроволочными болометрами / В. М. Кузьмичев, С. В. Погорелов // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т. 8, № 4. – С. 369-374.
16. Измерение линейной или эллиптической поляризации лазерного излучения трехрешеточным болометром / В. М. Кузьмичев, С. В. Погорелов, Б. В. Сафронов, В. П. Балкашин, И. А. Приз, П. Коонс // Радиофизика и радиоастрономия. – 2009. – Т. 14, № 2. – С. 214-221.
17. Профільний болометр параметрів лазерного випромінювання / С. В. Погорелов, Б. В. Сафронов, В. П. Балкашин, И. А. Приз, И. В. Красовский // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна №1038. Серія «Радіофізика та електроніка». – 2012. – Вип. 21. – С. 73-76.
18. Измерение температурной зависимости факторов эффективности поглощения платинового болометра на длине волны излучения 1,06 мкм / С. В. Погорелов, Б. В. Сафронов, В. П. Балкашин, И. А. Приз // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. – 2014. – Т. 11, № 2. – С. 40-46.
19. Погорелов С. В. Измерение энергетических параметров лазерного излучения трехрешеточным тонкопроволочным болометром / С. В. Погорелов // East European Journal of Physics. – 2014. – Vol. 1, № 2. – P. 73-79.
20. Кузьмичев В. М. Модифицированный двухрешеточный болометрический измеритель линейной поляризации лазерного излучения / В. М. Кузьмичев, С. В. Погорелов // Радиотехника. – 2014. – Вып. 178. – С. 63-66.

Монографія

21. Прямые и обратные задачи теплопередачи в лазерной технике и метрологии / Н. Г. Кокодий, В. А. Свич, С. В. Погорелов, В.А. Тиманюк, А.О. Пак, Ли Чженьхуа – Харьков : Изд-во Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина, 2012. – 240 с.

Патенти

22. Пат. № 79796 Україна, МПК G 01 R 35/00, G 01 J 5/20. Спосіб абсолютного калібрування профільного тонкодротяного болометру енергії імпульсу лазера у довгохвильовому діапазоні / Кузьмичов В. М., Погорелов С. В., Похілько С. М., Коонс П.; заявник та власник патенту Національний фармацевтичний університет. – № а 2005 00111 ; заявл. 04.01.05 ; опубл. 25.07.07, Бюл. № 11.
23. Пат. № 27210 Україна, МПК G 01 J 1/04. Спосіб вимірювання коефіцієнта дихроїзму тонкодротяного болометра / Кузьмичов В. М., Сафронов Б. В., Балкашин В. П., Приз І. О., Погорелов С. В., Кьонс П.; заявник та власник патенту Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна. – № u 2007 05508 ; заявл. 21.05.07 ; опубл. 25.10.07, Бюл. № 17.

24. Пат. № 28304 Україна, МПК G 01 J 1/04. Спосіб вимірювання факторів ефективності поглинання тонкодротяних болометрів / Кузьмичов В. М., Сафронов Б. В., Балкашин В. П., Приз І. О., Погорелов С. В.; заявник та власник патенту Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна. – № у 2007 05014 ; заявл. 07.05.07 ; опубл. 10.12.07, Бюл. № 20.
25. Пат. № 35374 Україна, МПК G 01 J 1/04, G 01 J 5/00. Вимірювач поляризації лазерного випромінювання / Кузьмичов В. М., Сафронов Б. В., Балкашин В. П., Приз І. О., Погорелов С. В., Коонс П.; заявник та власник патенту Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна. – № у 2008 05632 ; заявл. 30.04.08 ; опубл. 10.09.08, Бюл. № 17.
26. Пат. № 41319 Україна, МПК G 01 J 1/04, G 01 J 5/00. Спосіб вимірювання параметрів еліптичної поляризації лазерного випромінювання трирешітковим болометром / Кузьмичов В. М., Погорелов С. В., Сафронов Б. В., Балкашин В. П., Приз І. О.; заявники та власники патенту Кузьмичов В. М., Погорелов С. В., Сафронов Б. В., Балкашин В. П., Приз І. О. – № у 2009 00507 ; заявл. 23.01.09 ; опубл. 12.05.09, Бюл. № 9.
27. Пат. № 41595 Україна, МПК G 01 J 1/04, G 01 J 5/00. Спосіб вимірювання лінійної поляризації лазерного випромінювання двогратовим болометром / Кузьмичов В. М., Погорелов С. В., Сафронов Б. В., Балкашин В. П., Приз І. О.; заявники та власники патенту Кузьмичов В. М., Погорелов С. В., Сафронов Б. В., Балкашин В. П., Приз І. О. – № у 2009 00465 ; заявл. 22.01.09; опубл. 25.05.09, Бюл. № 10.

Опубліковані праці апробаційного характеру (тези міжнародних конференцій):

28. Measuring of micrometer diameters of focused laser radiation by bolometer from thin-wire / V. M. Kuzmichov, B. V. Safronov, S. V. Pogorelov, V. P. Balkashin, I. A. Priz // Proceedings of LFNМ'2002 IV-th International Workshop on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling, Kharkiv, Ukraine, June 3-5, 2002. – P. 252-255.
29. Kuzmichov V. M. Transformation of the continuous laser power on wavelength 10,6 microns with thin-wire bolometer / V. M. Kuzmichov, S. V. Pogorelov, P. Kohns // Proceedings of LFNМ 2004 6-th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling, Kharkiv, Ukraine, 6-9 September, 2004. – P. 238-241.
30. Mathematical modeling of devices for measuring of laser radiation characteristics by wire grids / N. G. Kokody, S. V. Pogorelov, D. N. Kokody, V. E. Dobrova, V. A. Timanyuk, P. Kohns // Proceedings of LFNМ 2004 6-th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling, Kharkiv, Ukraine, 6-9 September, 2004. – P. 140-142.
31. Kuzmichov V. M. Calibration method of thin-wire platinum bolometer of laser radiation pulse energy / V. M. Kuzmichov, S. V. Pogorelov // Proceedings of CAOL'2003 1-st International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, Alushta, Crimea, Ukraine, 16-20 September, 2003. – Vol. 2. – P. 165-168.

32. Кузьмичов В. М. Перетворення тонкодротовим платиновим болометром безперервної потужності лазера на довжині хвилі 10,6 мкм / В. М. Кузьмичов, С. В. Погорелов // Міжнародна наукова конференція Каразінські природознавчі студії, м. Харків, Україна, 14-16 червня 2004. – С. 165-167.
33. Kuzmichov V. M. Power and energy measurement of laser pulse radiation with three profile bolometric gratings / V. M. Kuzmichov, S. V. Pogorelov, P. Kohns // Proceedings of CAOL 2005 2-nd International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, Yalta, Crimea, Ukraine, September 12-17, 2005. – Vol. 2. – P. 272-275.
34. Kuzmichov V. M. Measuring of laser radiation polarization state with three profile bolometric gratings / V. M. Kuzmichov, S. V. Pogorelov, P. Kohns // Proceedings of CAOL 2005 2-nd International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, Yalta, Crimea, Ukraine, September 12-17, 2005. – Vol. 2. – P. 216-219.
35. Measuring of the factor of absorption efficiency of thin-wire bolometer / V. M. Kuzmichov, I. A. Priz, B. V. Safronov, V. P. Balkashin, S. V. Pogorelov, P. Kohns // Proceedings of CAOL 2005 2-nd International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, Yalta, Crimea, Ukraine, September 12-17, 2005. – Vol. 2. – P. 313-315.
36. Profile bolometer of laser radiation parameters / V. M. Kuzmichov, S. V. Pogorelov, B. V. Safronov, V. P. Balkashin, I. A. Priz, I. I. Kozlov, P. Kohns // Proceedings of LFNМ 2006 8-th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling, Kharkiv, Ukraine, 29 June - 1 July, 2006. – P. 237-240.
37. Kuzmichov V. M. Transformation of laser pulse energy on wavelength 1.06 micron with platinum bolometer / V. M. Kuzmichov, S. V. Pogorelov, P. Kohns // Proceedings of LFNМ 2006 8-th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling, Kharkiv, Ukraine, 29 June - 1 July, 2006. – P. 241-244.
38. Laser radiation polarization state measurement with three-gratings bolometer / V. M. Kuzmichov, S. V. Pogorelov, B. V. Safronov, V. P. Balkashin, I. A. Priz, P. Kohns // Proceedings of CAOL 2008 4-th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, Alushta, Crimea, Ukraine, September 29 - October 4, 2008. – P. 338-342.
39. Profile thin-wire bolometer of laser pulse energy / V. M. Kuzmichov, S. V. Pogorelov, B. V. Safronov, V. P. Balkashin, I. A. Priz, P. Kohns // Proceedings of CAOL 2008 4-th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, Alushta, Crimea, Ukraine, September 29 - October 4, 2008. – P. 343-347.
40. Measurement of linear polarization of laser radiation with two-grating thin-wire bolometer / V. M. Kuzmichov, S. V. Pogorelov, B. V. Safronov, V. P. Balkashin, I. A. Priz // Proceedings of CAOL'2010 5-th International

Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, Sevastopol, Crimea, Ukraine, 10-14 September, 2010. – P. 173-174.

41. Estimation of linear polarization angle of laser radiation with two-grating thin-wire bolometer / V. M. Kuzmichov, S. V. Pogorelov, B. V. Safronov, V. P. Balkashin, I. A. Priz // Proceedings of LFNМ*2011 11-th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling, Kharkov, Ukraine, September 4-8, 2011. – 3 p.
42. Pogorelov S. V. Absolute calibration of profile thin-wire bolometric gauge of laser pulse energy / S. V. Pogorelov // Proceedings of CAOL'2013 6-th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, Sudak, Crimea, Ukraine, 9-13 September, 2013. – P. 334-336.

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

43. Кузьмичев В. М. Преобразование платиновым тонкопроволочным болометром энергии импульса лазера / В. М. Кузьмичев, С. В. Погорелов // Український метрологічний журнал. – 2003. – № 2. – С. 42-47.
44. Кузьмичев В. М. Повышение точности определения температурной зависимости фактора эффективности поглощения тонкопроволочного платинового болометра / В. М. Кузьмичев, С. В. Погорелов // Український метрологічний журнал. – 2004. – № 1. – С. 42-43.
45. Кузьмичев В. М. Преобразование тонкопроволочным платиновым болометром непрерывной мощности лазера на длине волны 10,6 мкм / В. М. Кузьмичев, С. В. Погорелов, П. Коонс // Український метрологічний журнал. – 2005. – № 3. – С. 39-41.
46. Кузьмичев В. М. Измерение состояния поляризации лазерного излучения тремя профильными болометрическими решетками / В. М. Кузьмичев, С. В. Погорелов, П. Коонс // Український метрологічний журнал. – 2007. – № 3. – С. 38-42.
47. Погрешность метода замещения конусного калориметра / В. М. Кузьмичев, С. В. Погорелов, Б. В. Сафронов, Н. И. Зинченко, В. П. Балкашин, И. А. Приз, П. Коонс // Український метрологічний журнал. – 2008. – № 2. – С. 31-36.
48. Кузьмичев В. М. Измерение параметров эллиптической поляризации лазерного излучения тонкопроволочным болометром / В. М. Кузьмичев, Е. В. Кузьмичева, С. В. Погорелов // Український метрологічний журнал. – 2009. – № 2. – С. 35-38.
49. Калибровка двухрешеточного болометрического измерителя параметров лазерного излучения / В. М. Кузьмичев, С. В. Погорелов, Б. В. Сафронов, В. П. Балкашин, И. А. Приз // Український метрологічний журнал. – 2009. – № 4. – С. 31-34.
50. Измерение направления линейной поляризации лазерного излучения решетчатыми болометрическими приемниками / Н. Г. Кокодий, С. В. Погорелов, А. О. Пак, М. В. Кайдаш, Б. В. Сафронов, В. П. Балкашин, И.

- А. Приз, И. П. Стороженко // Український метрологічний журнал. – 2012. – № 2. – С. 32-36.
51. Погорелов С. В. Калибровка тонкопроволочного болометра энергии импульса лазера на длине волны 1,06 мкм / С. В. Погорелов // Український метрологічний журнал. – 2013. – № 2. – С. 25-27.
52. Погорелов С. В. Калибровка тонкопроволочного болометра энергии импульса лазера на длине волны 1,06 мкм / С. В. Погорелов // Радиофизика и электроника. – 2014 – Т. 5(19), № 3. – С. 98-101.

Анотація

Погорелов С.В. Теоретичні та експериментальні основи створення тонкодротяних решіток болометрів для контролю потужного лазерного випромінювання. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2017.

У роботі запропоновані, обґрунтовані, теоретично й експериментально досліджені характеристики перетворення тонкодротяних болометрів та розроблені методи абсолютного вимірювання параметрів і характеристик інтенсивного й широкоапертурного лазерного випромінювання, що досягає у неперервному режимі до десятків кіловатів, а в імпульсному режимі до десятків кілоджоулів. Болометричні вимірювачі здатні працювати в широкому спектральному діапазоні є пристроями прохідного типу, а максимальний розмір вхідної апертури в них необмежений.

Розроблено методи абсолютного вимірювання енергії імпульсу та безперервної потужності лазерного випромінювання, методи вимірювання факторів ефективності поглинання, коефіцієнту дихроїзму, методи вимірювання параметрів поляризації болометричними вимірювачами. Досліджені нелінійності характеристики перетворення болометра, проведено оцінку, а також виключено з результатів систематичні похибки за рахунок температурних залежностей основних фізичних параметрів болометра, нерівномірності розподілу інтенсивності вздовж болометричного елемента, стану поляризації випромінювання при вимірюванні параметрів лазерного випромінювання. Вимірюваними параметрами випромінювання є безперервна потужність, енергія однократних імпульсів, кут напрямку лінійної поляризації, параметри еліптичної поляризації, коефіцієнт нерівномірності розподілу інтенсивності, узагальнена площа, діаметр оптичного пучка й координати його енергетичного центру, а характеристиками - профільні розподіли уздовж певних напрямків.

Ключові слова: болометр, лазер, енергія, потужність, лазерне випромінювання, поляризація, дихроїзм, ІЧ-датчик, вимірювання.

Аннотация

Погорелов С.В. Теоретические и экспериментальные основы создания тонкопроволочных решеток болометров для контроля мощного лазерного излучения. – на правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – физика приборов, элементов и систем. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2017.

Диссертационная работа посвящена исследованию характеристик преобразования тонкопроволочными болометрами лазерного излучения. Анализ характеристик преобразования позволил разработать и обосновать методы, позволяющие проводить контроль параметров мощного и широкоапертурного лазерного излучения. В диссертации предложен метод измерения параметров лазерного излучения проволочными болометрическими решетками, позволяющий проводить абсолютные измерения энергетических параметров без использования калибровки по эталонным измерителям. Предложены, обоснованы, теоретически и экспериментально исследованы методы измерения тонкопроволочными болометрами параметров и характеристик интенсивного и широкоапертурного лазерного излучения, которое может достигать в непрерывном режиме десятков киловатт, а в импульсном режиме – десятков килоджоулей. Болометрические измерители способны работать в широком спектральном диапазоне.

Болометрические решетки являются устройствами проходного типа и размер входной апертуры у них не имеет ограничений на максимальный размер. Измеряемыми параметрами излучения являются непрерывная мощность, энергия однократных импульсов, угол направления линейной поляризации, параметры эллиптической поляризации, коэффициент неравномерности распределения интенсивности, обобщенная площадь, диаметр оптического пучка и координаты энергетического центра, а характеристиками – профильные распределения вдоль определенных направлений.

В работе проведен анализ температурных зависимостей основных физических параметров платиновых тонких проволок, которые используются в первичном болометрическом преобразователе. Предложены теоретические и экспериментальные методы определения факторов эффективности поглощения и их температурных зависимостей для лазерного излучения с длинами волн 1,06 мкм и 10,6 мкм. Расчет температурной зависимости фактора эффективности поглощения платинового тонкопроволочного болометра в диапазоне температур 0 ... 1500°С показал, что она не зависит от диаметра болометра и состояния поляризации лазерного излучения.

Решено усредненное по длине болометра уравнение теплового баланса с учетом аппроксимированных температурных зависимостей физических параметров болометра и определены характеристики преобразования болометра непрерывного и импульсного лазерного излучения на длинах волн 1,06 и 10,6 мкм.

Тонкопроволочные болометры обладают дихроическими свойствами, то есть поглощают одну компоненту электрического поля лучше, чем другую. Такое свойство позволяет использовать тонкопроволочные болометры для определения

состояния поляризации лазерного излучения. При этом такие свойства проволочных болометров требуют учета параметров поляризации при измерении энергетических параметров лазерного излучения.

В работе предложены и обоснованы методы измерения параметров линейной и эллиптической поляризации двух и трехрешеточными болометрами. Созданы экспериментальные образцы в виде двух- и трехрешеточного тонкопроволочных платиновых болометров для измерения параметров линейной и эллиптической поляризации лазерного излучения.

Учет температурных зависимостей, параметров поляризации и неравномерности распределения интенсивности по длине болометра позволяет оценить нелинейность характеристики преобразования тонкопроволочными болометрами лазерного излучения.

Для двухрешеточного и трехрешеточного болометров в работе разработаны методы и получены уравнения для абсолютных измерений энергетических параметров лазерного излучения, позволяющие исключить систематические погрешности за счет нелинейности преобразования из результатов измерения. По профильным сигналам платиновых болометрических элементов и известному начальному и нормированному коэффициенту преобразования болометров находятся начальные приближения поляризационных коэффициентов взаимодействия излучения с решетками, коэффициент неравномерности распределения интенсивности и само значения энергетического параметра. Последовательными приближениями из указанных параметров исключаются систематические погрешности за счет нелинейности характеристики преобразования болометров. Показано, что относительное СКО измеренной средней погонной удельной энергии в основном определяется относительным СКО измерения фактора эффективности поглощения. Относительное СКО измерения полной энергии пучка лазера двухрешеточным болометром равно $\sigma_E = 1,6 \cdot 10^{-2}$.

Для лазерных пучков, имеющих гауссово распределение интенсивности в поперечном сечении пучка, впервые предложены методы измерения, практически не имеющие ограничений на верхний предел энергии излучения. Предложенные методы позволяют измерять энергию пучка, положение координат энергетического центра пучка, его средний квадратический радиус, модуль угла направления линейной поляризации излучения. Методы позволяют значительно повысить верхний предельный уровень измерения энергии импульса лазерного излучения без использования систем ослабления или ответвления при измерениях энергетических и пространственных параметров лазерного излучения в виде гауссовых пучков.

Ключевые слова: болометр, лазер, энергия, мощность, лазерное излучение, поляризация, дихроизм, ИК-датчик, измерение

Abstract

Pohorielov S.V. Theoretical and experimental basis for creating gratings thin-wire bolometers to control a high energy laser radiation. - The manuscript.

Doctor of Physical and Mathematical Sciences Thesis, discipline 01.04.01 – physics of devices, components and systems. - Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2017.

The work theoretically and experimentally investigated transformation characteristics of wire bolometric gauges and methods of measuring parameters and characteristics of intense broad-aperture laser radiation, which amounts to tens of kilowatts in continuous mode and tens of kilojoules in a pulse mode, using thin-wire bolometers are proposed, and grounded. Bolometers capable of operating in a wide spectral range are the pass through devices, and they have unlimited maximum size of the input aperture.

The methods for absolute measurements of pulse energy and continuous laser radiation power, methods for measuring absorption efficiency factors, dichroic factor, and methods for measuring polarization parameters using bolometers have been developed. Nonlinearity of bolometer`s characteristic of transformation has been investigated, systematic errors due to temperature dependences of basic physical parameters of bolometer, non-uniformity of intensity distribution along bolometric element, and polarization state when measuring laser radiation parameters have been evaluated and eliminated from the results. Measured radiation parameters include continuous power, single pulse energy, linear polarization directional angle, elliptical polarization parameters, nonuniformity coefficient of intensity distribution, generalized area, optical beam diameter and coordinates of its energy center; measured characteristics include distribution profile along certain directions.

Key words: bolometer, laser, energy, power, laser radiation, polarization, dichroism, IR-sensor, measurement