

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Пак Анастасія Олегівна

УДК 621.375.826:681.7.069

**МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОТУЖНОГО ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ
ГРАТЧАСТИМИ БОЛОМЕТРИЧНИМИ ПРИЙМАЧАМИ
З УРАХУВАННЯМ НЕЛІНІЙНИХ ЕФЕКТІВ**

01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2014

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна, Міністерство освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Кокодій Микола Григорович
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
професор кафедри квантової радіофізики.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Григорук Валерій Іванович
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
завідувач кафедри квантової радіофізики;

кандидат фізико-математичних наук
Радіонов Володимир Петрович
Інститут радіофізики та електроніки імені О.Я. Усикова НАН України,
науковий співробітник відділу квазіоптики.

Захист відбудеться «15» травня 2014 р. о 15⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.04 Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14, ауд. № 13.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

Автореферат розісланий «8» квітня 2014 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

О.Г. Пащенко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Лазери використовуються в різних галузях науки і техніки – фізиці, хімії, біології, медицині, системах зв'язку, застосовуються в різних технологічних процесах. Для їх практичного використання завжди необхідно знати характеристики випромінювання. Тому разом з лазерною технікою розвиваються і методи вимірювань.

Проблема визначення просторово-енергетичних, поляризаційних та часових характеристик і параметрів інтенсивного широкоапертурного випромінювання потужних лазерів залишається принциповою у зв'язку з постійним удосконаленням лазерів і підвищенням вимог до функціональності й точності вимірювальних приладів. Це актуальне й складне завдання лазерної фізики.

Лазерне випромінювання перекидає спектральний діапазон від рентгенівського до радіохвиль, а діапазон потужностей – від кількох мікровольт до сотень терават. Труднощі, що виникають у процесі створення приладів для вимірювання випромінювання потужних лазерів, пов'язані з можливістю руйнування приймачів і небезпечним впливом на довкілля відбитого або розсіяного випромінювання. Тому для високих рівнів потужностей і поперечних розмірів пучків від кількох сантиметрів до кількох метрів перспективними є ґратчасті вимірювачі. У них приймальними елементами служать ґратки з тонких металевих дротів, які розташовані на шляху поширення лазерного пучка. Лазерне випромінювання нагріває дроти, і вони змінюють свій електричний опір, тобто працюють як болометри. Алгоритми оброблювання сигналів із приймача подібні до тих, що застосовуються в медичній томографії. Але алгоритми, які використовуються в лазерних вимірюваннях, мають певні відмітні особливості. До того ж, використовуючи потужні джерела випромінювання, тобто в умовах нагрівання приймального елемента приймача (болометрів) до температур плавлення, необхідно враховувати нелінійні ефекти, що при цьому виникають.

Вагомі результати в галузі дослідження болометричних приймачів отримали такі науковці: Кузьмичов В. М., Латинін Ю. М., Перепечай М. П., Золотайкін О. В., Катрич О. Б., Худошин О. В., Яременко Р. Г., Погорелов С. В., Балкашин В. П., Сафронов Б. В., Приз І. О. Це далеко не повний список розробників, які направили свої зусилля на вирішення практичних задач метрології. Проте усе вищевказане зумовлює актуальність дослідження, спрямованого на розвиток методів вимірювання й обчислювальних алгоритмів для потужних джерел випромінювання, які необхідні для розв'язання класу зворотних задач у лазерних технологіях.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі квантової радіофізики Харківського

національного університету імені В. Н. Каразіна та пов'язана з виконанням таких програм і тем досліджень: Науково-дослідна робота «Розробка методів вимірювання оптичних параметрів тонкодротяних болометрів інтенсивного й широкоапертурного лазерного випромінювання» (номер державної реєстрації 0109U000532), Науково-дослідна робота «Зворотні задачі оптики й теплопередачі в методах вимірювання характеристик лазерного випромінювання» (номер державної реєстрації 0111U002463), у яких автор розробляє обчислювальні методи для оброблення результатів вимірювання.

Мета і завдання дослідження.

Мета роботи: розроблення методів вимірювання просторово-енергетичних, поляризаційних, часових параметрів й характеристик лазерного випромінювання за допомогою тонкодротяних болометрів в умовах їх нагрівання до високих температур та врахування нелінійних ефектів, що виникають при цьому, з використанням інтеграла Радона.

Завдання:

- проаналізувати математичні моделі й обчислювальні методи, на яких базуються сучасні засоби комп'ютерної діагностики пучків лазерного випромінювання;
- розробити алгоритми оброблення сигналів для визначення просторово-енергетичних, поляризаційних та часових характеристик і параметрів лазерного випромінювання за допомогою тонкодротяних болометрів, провести метрологічний аналіз цих алгоритмів;
- здійснити порівняльну характеристику ефективності роботи існуючих алгоритмів і розробити нові алгоритми з урахуванням нелінійностей характеристик приймача, що виникають, та залежності результатів вимірювання параметрів лазерного випромінювання від напрямку поляризації. Внести відповідні поправки в алгоритми оброблювання сигналів із приймача випромінювання;
- розвинути й експериментально перевірити методики вимірювання профілю пучка, напрямку лінійної поляризації та форми імпульсу лазерного випромінювання, тривалість якого менша за теплову постійну часу приймача.

Об'єкт дослідження: теплові процеси в болометрах під час взаємодії з ними потужного лазерного випромінювання.

Предмет дослідження: алгоритми оброблювання сигналів, що враховують залежність теплофізичних параметрів болометрів від температури і характер поляризації випромінювання.

Методи дослідження: методи математичного моделювання процесів та експериментальні дослідження, зокрема інтегральні методи томографії; методи вимірювання оптичних і теплофізичних параметрів болометрів, методи розроблення й реалізації програмного забезпечення; метод найменших квадратів під час організації та оброблювання експериментальних даних і результатів комп'ютерного експерименту; методи оцінки непрямих похибок.

Як основний метод оброблювання сигналів із ґратчастого приймача використано алгоритм, заснований на перетворенні Радона.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Уперше розроблено:

- алгоритм оброблювання сигналів, який враховує нелінійні ефекти в болометрах під час сильного нагрівання; визначено вплив нелінійних ефектів на значення максимальної і середньої температури нагріву, часовий перебіг нагрівання й охолодження болометра;

- алгоритми оброблювання сигналів з ґратчастого приймача на основі інтеграла Радона і програми, що їх реалізують, в умовах малоракурсної геометрії задачі, визначено оптимальну кількість ґраток у пристрої та кількість болометрів у ґратці;

- метод абсолютних вимірювань фактора ефективності поглинання (ФЕП) лазерного випромінювання тонкими дротяними болометрами. Встановлено характер залежності ФЕП від температури в різних спектральних діапазонах. Запропоновано спосіб вимірювання оптичних параметрів тонких металевих дротів.

2. Набули подальшого розвитку:

- метод вимірювання форми імпульсу падаючого випромінювання, тривалість якого набагато менша за теплову постійну часу болометрів;

- метод вимірювання напрямку поляризації й дослідження впливу характеру поляризації лазерного випромінювання на результати вимірювання його характеристик для розроблення алгоритмів оброблювання сигналів з урахуванням зазначених особливостей.

Практичне значення одержаних результатів. Проведені в дисертації дослідження належать до важливих наукових напрямів розвитку сучасної радіофізики і лазерної фізики. Отримані результати дисертаційної роботи дають можливість створювати прилади на основі болометричних ґратчастих перетворювачів для одночасного вимірювання просторово-енергетичних, поляризаційних та часових характеристик випромінювання лазерів, що дає змогу контролювати характеристики лазерного випромінювання в експериментах і на виробництві.

Результати, отримані в дисертації, сприяють поглибленню розуміння фізичних явищ, що відбуваються у процесі взаємодії потужного лазерного випромінювання з речовиною. Результати досліджень можуть використовуватися в метрології і вимірвальній техніці для діагностики лазерних пучків з високою густиною потужності безперервного випромінювання та енергії імпульсного випромінювання.

Особистий внесок. Усі основні наукові положення, результати, висновки й рекомендації дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У публікаціях, написаних у співавторстві, здобувачеві належать такі результати: розроблення алгоритмів для оброблювання сигналів за допомогою

перетворення Фур'є, здійснення ряду числових розрахунків, які полягають у порівнянні алгоритмів оброблювання сигналів, заснованих на перетворенні Фур'є і Радона, визначення критеріїв порівняння числових методів оброблювання результатів вимірювання, оцінка похибки результатів вимірювань [2, 10, 11]; розроблення числових методів для визначення залежності теплофізичних параметрів болометрів від температури [3, 4, 13, 14]; розроблення комп'ютерного експерименту [5, 15]; до програми оброблення включено відповідний блок для підвищення точності відновлення розподілу інтенсивності випромінювання [6, 7]; розроблення методу вимірювання напрямку лінійної поляризації [8]; дослідження питань вимірювання просторово-енергетичних характеристик лазерів, реалізація комп'ютерного забезпечення й виконання ряду експериментів, розроблення комп'ютерного моделювання і розв'язання теоретичних завдань [1], розроблення методу вимірювання форми імпульсу випромінювання [12] за допомогою вдосконаленого ґратчастого приймача [9].

Апробація результатів дисертації. Дисертація неодноразово обговорювалась на наукових семінарах кафедри квантової радіофізики радіофізичного факультету Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Основні положення і результати дисертаційного дослідження апробовані у вигляді доповідей на 6 міжнародних конференціях: The International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL) (Alushta, Ukraine - 2008, Sevastopol, Ukraine - 2010); Международные научно-технические конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций» (РТ) (Севастополь - 2009, 2010); The International Young Scientists' Conference on Applied Physics (ICAP) (Kyiv, Ukraine - 2010); The International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (LFNM) (Kharkov, Ukraine - 2011).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи відображено в 15 публікаціях. Із них 1 монографія, 6 статей у наукових фахових виданнях України, і 1 в закордонному науковому періодичному виданні, 1 патент України, а також 6 тез доповідей у збірниках праць міжнародних науково-технічних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків і списку використаних джерел (178 позицій). Текст роботи містить 99 рисунків і 24 таблиці. Загальний обсяг дисертації становить 185 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету, завдання дослідження, наукову новизну та практичне значення одержаних результатів. Висвітлено зв'язок роботи з науковими програмами і планами,

особистий внесок автора та відомості про апробацію та публікацію результатів дослідження.

У першому розділі подано огляд літератури за тематикою дослідження, проведено аналіз сучасних вимірювальних пристроїв, які використовують як приймальний елемент лазерного випромінювання болометричну ґратку. Розглянуто прецизійні пристрої дослідницького експерименту та обмеження при їх застосуванні в технологічних процесах. Розглянуто сучасні прилади моніторингу параметрів випромінювання, які вимірюють розподіл інтенсивності випромінювання. Виявлено нерозв'язані проблеми й перспективні напрями дослідження, розроблення яких може призвести до поліпшення параметрів і функціональних можливостей потужних лазерів.

Основні наукові результати розділу опубліковано в [6, 9].

Другий розділ дисертаційної роботи присвячено розвитку математичних алгоритмів оброблювання сигналів з ґратчастого приймача для визначення характеристик пучка випромінювання. Порівняння характеристик кількох алгоритмів дало можливість визначити найбільш раціональний алгоритм для застосування на практиці.

Зокрема, розглянуто алгоритм оброблювання сигналів, математичною основою якого служить зворотне інтегральне перетворення Радона, яке дає змогу обчислити функцію розподілу інтенсивності в пучку випромінювання $I(x, y)$ за допомогою такого співвідношення:

$$I(x, y) = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^{\pi+R} \int_{-R}^R \frac{1}{x \cos \theta + y \sin \theta - l} \frac{\partial u(l, \theta)}{\partial l} dl d\theta, \quad (1)$$

де $u(l, \theta)$ – сигнал з болометра, l – відстань болометра від центра вікна приладу, θ – кут відхилення болометра від вертикалі (рис. 1).

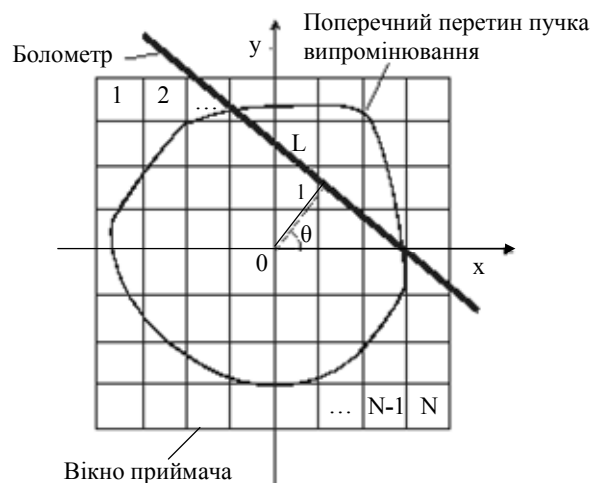


Рис.1. Вікно ґратчастого приймача. Геометрія задачі

Програму, що реалізує цей алгоритм, випробувано під час проведення числового експерименту для приймача з 4 ґратками по 8 болометрів у кожній. Отримані результати показано на рис. 2. Для перевірки роботи алгоритма обрано функцію розподілу інтенсивності в пучку лазерного випромінювання у вигляді суми двох функцій Гауса. Похибка результату відновлення складає 4,4 %.

Розроблені алгоритми й програми, що їх реалізують, перевірено експериментально, підтверджено їхню працездатність. Здійснено аналіз основних джерел похибок вимірювань. На основі результатів цих даних визначено оптимальну кількість ґраток і болометрів у них.

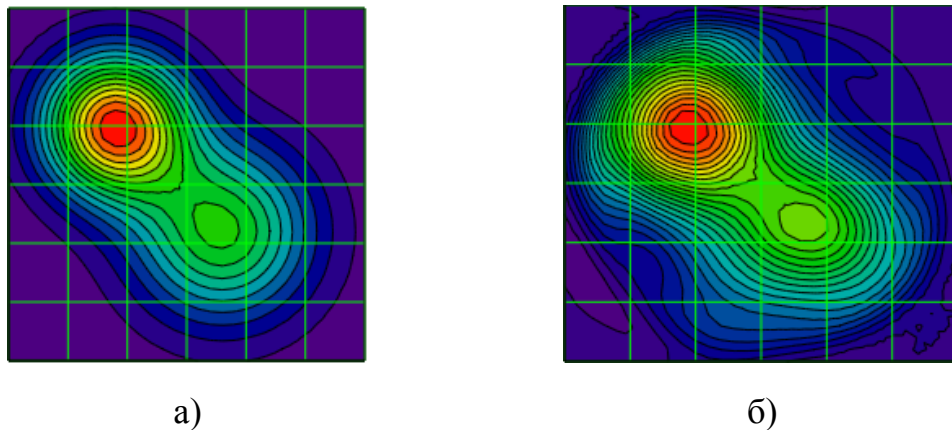


Рис. 2. Вихідна (а) і відновлена (б) функції розподілу інтенсивності за допомогою інтегрального перетворення Радона

Основні наукові результати розділу опубліковано в [2, 10, 11].

Третій розділ дисертаційної роботи присвячено експериментальним дослідженням теплофізичних властивостей тонких металевих болометрів із платини й нікелю в діапазоні температур від кімнатної до близької до температури плавлення. Виміряно коефіцієнт теплообміну із зовнішнім середовищем, ФЕП випромінювання у видимому та інфрачервоному діапазоні, постійну часу нагрівання й охолодження болометра.

Для вимірювання широкого діапазону потужностей і великих апертур лазерних пучків перспективним є застосування ґратчастих вимірювачів. Матеріал для виготовлення болометрів повинен витримувати високі температури й підходити за своїми фізичними і хімічними властивостями для висунутих завдань.

При використанні кількох ґраток, у яких болометри розташовані під різними кутами відносно вертикалі, можна отримати інформацію про кілька характеристик лазерного випромінювання – потужність або імпульсну енергію, розподіл інтенсивності в перетині пучка, його діаметр, положення енергетичного центра, характер поляризації, форму імпульсу випромінювання.

Для коректного розв'язання цих завдань необхідно враховувати такі особливості перебігу теплових процесів у ґратчастих болометричних приймачах:

- необхідність працювати з малою кількістю сигналів;
- теплофізичні параметри металів, із яких виготовлено болометри, залежать від температури їх нагрівання, яка під час вимірювання випромінювання потужністю в кілька сотень ват і більше або енергією в кілька сотень джоулів і більше може досягати таких високих значень, коли виникають нелінійності, що суттєво впливають на результати експериментів;
- у результаті оброблення сигналів із приймача фактично відновлюється не розподіл інтенсивності випромінювання в розкритті болометричної ґратки, а розподіл температури нагріву болометрів.

Вплив і врахування цих особливостей у розробленому алгоритмі оброблювання сигналів із ґратчастого приймача розглянуто в цьому розділі.

Для вимірювання ФЕП випромінювання болометром у дисертаційній роботі було проведено наступні експерименти.

У першому експерименті досліджено залежність сигналу з болометра від його температури при вимірюванні енергії імпульсу випромінювання ксенонової лампи, спектр випромінювання якої розташований, в основному, у видимій частині спектра. Випромінювання не поляризоване. Значення енергії контролюється піроелектричним приймачем. Зростання температури болометра після впливу енергії оптичного імпульсу E невелике – від 0,1 % до 3 % від початкової температури T_1 . За таких умов фізичні процеси, що відбуваються, можуть бути описані лінійними залежностями. ФЕП можна визначити за формулою

$$Q_{abs} = \frac{mc(T_1)}{E} \left[\frac{1}{\alpha_R(T_1)} + T_1 \right] \frac{\Delta U}{U_1}, \quad (2)$$

де m – маса болометра, c – питома теплоємність, α_R – температурний коефіцієнт опору болометра, U – сигнал з болометра, $\Delta U = U_{max} - U_1$, у лінійному наближенні $U_1 = iR_1 = iR_0(1 + \alpha_R T_1)$, $U_{max} = iR_{max} = iR_0(1 + \alpha_R T_{max})$.

Формула (2) визначає лише перебіг температурної залежності, а не абсолютні значення ФЕП за різних температур. Тому обчислюються значення для дротів із платини і нікелю при значеннях комплексного показника заломлення для видимого діапазону. Для неполяризованого випромінювання вони дорівнюють 0,478 – для платинового дроту діаметром 10 мкм, 0,458 – для платинового дроту діаметром 20 мкм і 0,378 – для нікелевого дроту діаметром 40 мкм. Величини, отримані в експерименті, нормовані так, щоб їх значення за кімнатної температури відповідали обчисленим. Одержані залежності для кількох дротів показано на рис. 3.

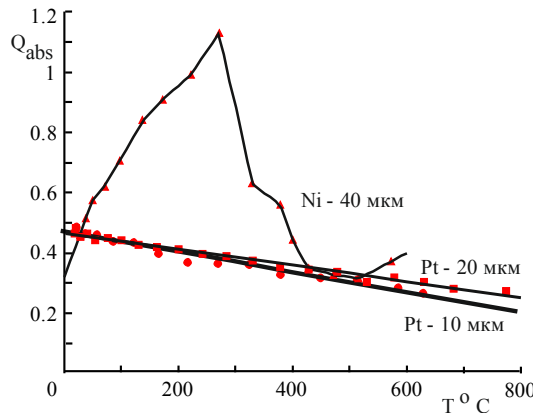


Рис. 3. Залежність ФЕП від температури під час вимірювання енергії імпульсу випромінювання ксенонової лампи-спалаху

Другий експеримент було проведено за допомогою неодимового лазера, і виявилось, що в обох експериментах (і з джерелом випромінювання лампою-спалахом, і з неодимовим лазером) ФЕП зменшується зі зростанням температури. Цей результат пояснюється механізмами поглинання випромінювання у видимому діапазоні.

У теоретичних дослідженнях використовується рівняння теплопровідності (3) для тонкого дроту діаметром D за нульових граничних умов з урахуванням залежності від температури T питомої теплоємності матеріалу болометра $c(T)$, теплопровідності $k(T)$, ФЕП $Q_{abs}(T)$ та погонного коефіцієнта теплообміну із зовнішнім середовищем $\alpha_p(T)$ (нелінійне рівняння теплопровідності).

$$\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} - \left(\frac{4\alpha_p(T)}{\pi k(T)D^2} \right)^2 T(x,t) - \frac{c(T)\rho}{k(T)} \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = -\frac{4Q_{abs}(T)I(x,t)}{\pi k(T)D}. \quad (3)$$

На рис. 4 подано результати розрахунків для потужності в пучку випромінювання 1000 Вт. Лінійне рівняння теплопровідності, тобто рівняння теплопровідності без урахування залежності від температури теплофізичних параметрів болометрів, дає завищені значення температури нагрівання. Різниця в результатах розв'язання лінійного та нелінійного рівнянь збільшується зі зростанням температури нагріву болометра. На рис. 5 показано розподіл температури вздовж болометра для потужності випромінювання в пучку 10000 Вт. Температура в максимумі досягає 900°C . Лінійне рівняння дає результат 3265°C , що сильно відрізняється від реального.

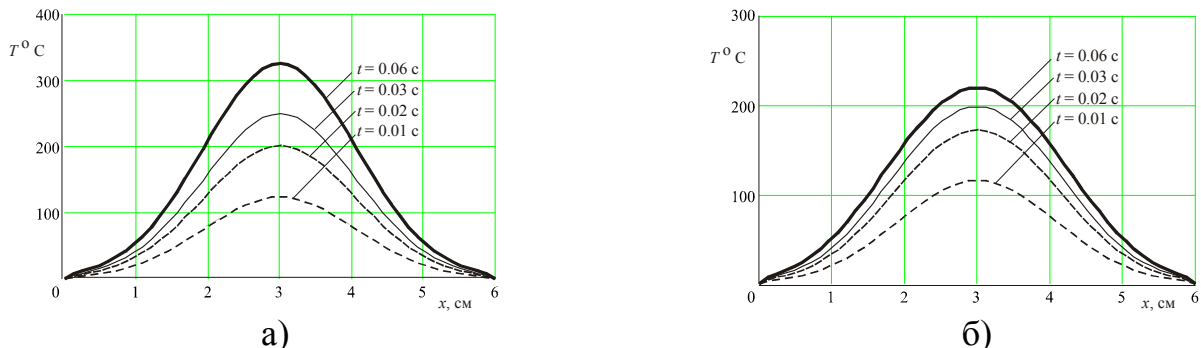


Рис. 4. Розподіл температури вздовж болометра (Pt, $D = 20$ мкм, $P = 1000$ Вт), розв'язок лінійного (а) та нелінійного (б) рівняння теплопровідності

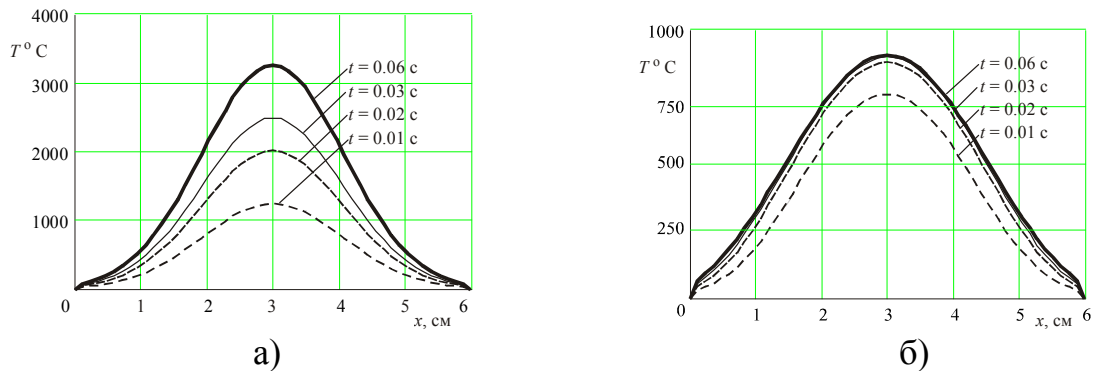


Рис. 5. Розподіл температури вздовж болометра ($P_t, D = 20 \text{ мкм}, P = 10000 \text{ Вт}$), розв'язок лінійного (а) та нелінійного (б) рівняння теплопровідності

Під час сильного імпульсного нагрівання болометра нелінійні ефекти також виявляються, але слабше, ніж під час безперервного нагрівання. На рис. 6 відображено розподіл температури вздовж платинового болометра діаметром 20 мкм під час нагрівання його гаусовим пучком випромінювання з геометричними параметрами – середнім квадратичним радіусом 15 мм і положенням максимуму інтенсивності посередині болометра. Тривалість імпульсу випромінювання становить 1 мс, енергія в імпульсі – 100 Дж.

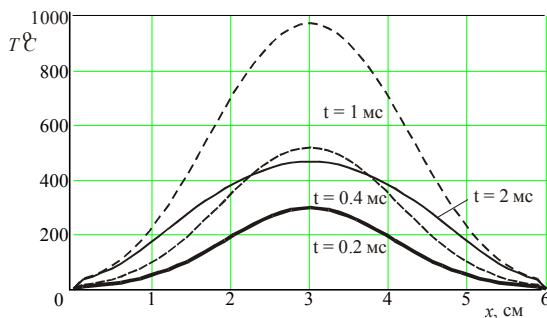


Рис. 6. Розподіл температури вздовж болометра (імпульсне нагрівання), ($P_t, D = 20 \text{ мкм}, E = 100 \text{ Дж}$), розв'язок нелінійного рівняння теплопровідності

Температура в максимумі досягає 1000°C – приблизно така ж, як під час нагрівання цього болометра безперервним випромінюванням потужністю 10000 Вт. Але під час імпульсного нагрівання значення температури, яке виходить при розв'язанні лінійного рівняння теплопровідності, становить приблизно 1500°C , що відрізняється в 1,5 рази від результату розв'язання нелінійного рівняння, тоді як під час безперервного нагрівання різниця досягає 3,5 разів.

На рис. 7 наведено графіки розподілу інтенсивності випромінювання проекційної лампи: рис. 7а – результати обчислень за лінійним алгоритмом, тобто без урахування залежності теплофізичних параметрів болометрів від температури, рис. 7б – за нелінійним алгоритмом, що враховує залежності теплофізичних параметрів болометрів від температури.

На рис. 8а показано горизонтальні перерізи, що проходять через максимум графіків, на рис. 8б – аналогічні вертикальні перерізи. На краях графіків, побудованих за допомогою лінійного алгоритму (крива 1), є локальні максимуми і плоскі ділянки, яких у досліджуваному випромінюванні немає,

на графіках (крива 2), побудованих за алгоритмом, що враховує нелінійні ефекти в болометрах, вони відсутні.

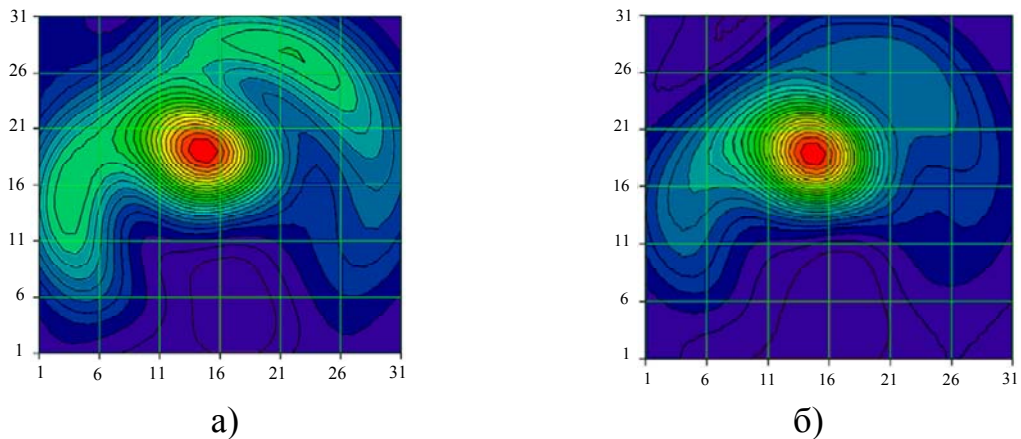


Рис. 7. Відновлена функція розподілу інтенсивності випромінювання за допомогою лінійного (а) та нелінійного (б) алгоритмів

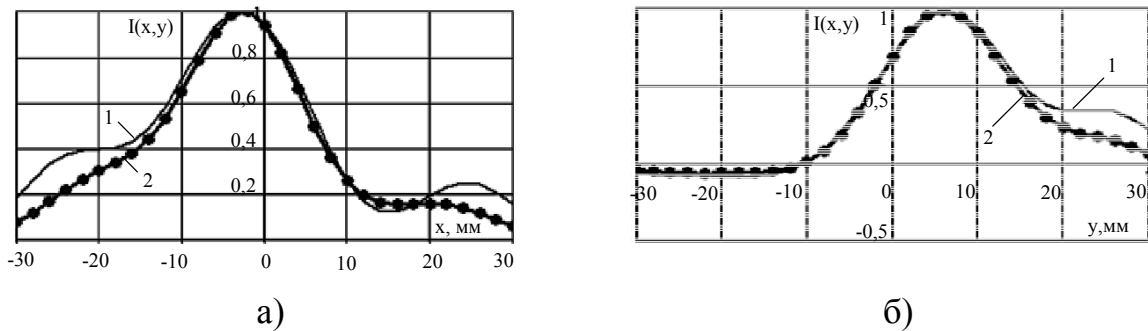


Рис. 8. Відновлена за лінійним (1) і нелінійним алгоритмами (2) функція розподілу інтенсивності випромінювання:
а) горизонтальні перерізи, б) вертикальні перерізи

Обчислені параметри пучка випромінювання за допомогою лінійного та нелінійного алгоритмів представлені в таблиці 1.

Таблиця 1. Параметри пучка випромінювання

| параметри | лінійний алгоритм | нелінійний алгоритм |
|---|------------------------------------|-----------------------------------|
| Координати енергетичного центра | $x_c = -2,4$ мм, $y_c = 9,2$ мм | $x_c = -2,1$ мм $y_c = 7,6$ мм |
| Діаметр пучка за координатами x та y | $D_x = 62$ мм, $D_y = 62$ мм | $D_x = 54$ мм $D_y = 31$ мм |
| Середнє геометричне значення діаметра пучка | $D = 49$ мм | $D = 41$ мм |

Значення параметрів, що отримані за допомогою лінійного алгоритма, є завищеними відносно результатів обчислень з використанням нелінійного алгоритма.

Щоб у перетворенні Радона (1) врахувати відмінність у функціях розподілу інтенсивності випромінювання і розподілу температури вздовж болометра, за допомогою рівняння теплопровідності (3) вирішена теплова задача, що описує цей процес, для нікелевого болометра довжиною 6 см і діаметром 80 мкм. На рис. 9 показаний результат рішення рівняння (3). На болометр падає гаусів пучок випромінювання з середнім квадратичним радіусом 15 мм, максимум якого знаходиться на середині болометра. Значення функції інтенсивності випромінювання $F_I(x)$ та функції розподілу температури $F_T(x)$ в центрі пучка нормовані по відношенню до максимального значення. На рис. 10 представлені результати оцінки відмінності між цими функціями.

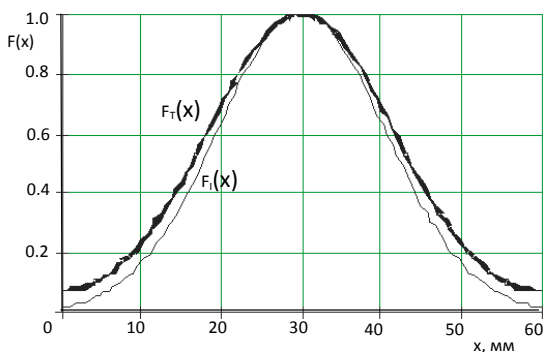


Рис. 9. Розподіл інтенсивності випромінювання $F_I(x)$ і температури $F_T(x)$ вздовж болометра

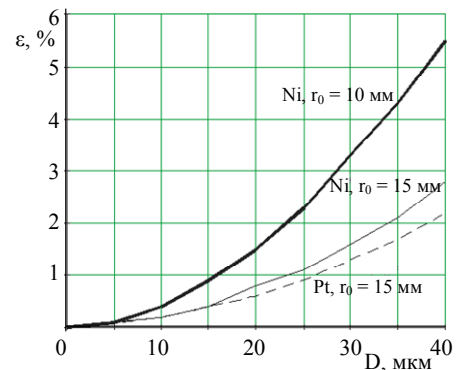


Рис. 10. Різниця в розподілі інтенсивності випромінювання $F_I(x)$ і температури $F_T(x)$ вздовж болометра

Значення похибки залежить від діаметра пучка випромінювання, що падає на болометр. При зменшенні діаметра пучка похибка збільшується. Ростає вона і при збільшенні діаметра болометра – пропорційно площі поперечного перерізу. Для нікелевого болометра діаметром 40 мкм і при радіусі пучка 15 мм вона дорівнює 2,8 %, а для діаметра 40 мкм при радіусі пучка 10 мм досягає 5,5 %. Для платиного болометра похибка менше, тому що теплопровідність платини менше, ніж теплопровідність нікелю.

У болометрів, що мають діаметр до 40 мкм, при радіусах пучка більш 15 мм відмінність у розподілі інтенсивності і температури не перевищує 3% і не позначається на результатах відновлення розподілу інтенсивності в пучку випромінювання за допомогою алгоритму на основі інтеграла Радона.

Таким чином, врахування в алгоритмі оброблювання зазначених нелінійних ефектів у болометрах сприяє більш точному відновленню картини розподілу інтенсивності в пучку випромінювання.

Основні наукові результати розділу надруковано в [1, 3-5, 7, 13, 14].

У четвертому розділі описано, як за допомогою розроблених алгоритмів оброблювання сигналів, математичною основою яких служить інтегральне перетворення Радона, були одночасно обчислені такі характеристики й параметри випромінювання:

- розподіл інтенсивності в поперечному перерізі пучка (профіль пучка);
- координати енергетичного центра пучка;
- діаметр пучка;
- поляризаційні характеристики;
- часові характеристики.

Залежність ФЕП випромінювання в ґратці від напрямку поляризації дає змогу визначити параметри поляризації падаючого випромінювання. У дисертаційній роботі для розв'язання цього завдання описано більш зручний для використання в комп'ютерному оброблюванні сигналів алгоритм.

Нехай є дві ґратки – i , j , елементи яких розташовані під кутами θ_i і θ_j до вертикалі, u_i і u_j – сумарні сигнали з усіх елементів ґраток. Оскільки ці сигнали пропорційні ФЕП Q_{iabs} і Q_{jabs} , то після певних перетворень можна вивести таке рівняння для визначення напрямку поляризації – кута між електричним вектором хвилі і вертикаллю:

$$f_{i,j}(\varphi) = \frac{1 + (k_D - 1) \sin^2(\varphi - \theta_i)}{1 + (k_D - 1) \sin^2(\varphi - \theta_j)} - \frac{u_i}{u_j} = 0. \quad (4)$$

Розв'язавши рівняння (4), знаходимо напрямок електричного вектора \vec{E} випромінювання, що падає на приймач. Для більш точного результату необхідно використовувати кілька ґраток (три і більше) та кілька рівнянь (4) – для всіх можливих комбінацій пар ґраток.

В експерименті випромінювання імпульсного неодимового лазера падає на скляну пластину під кутом Брюстера так, що відбите від пластини випромінювання поляризоване перпендикулярно площині падіння. Це випромінювання потрапляє на ґратчастий приймач, елементи першої (ближньої до лазера) ґратки якого розташовано під кутом 80° до вертикалі.

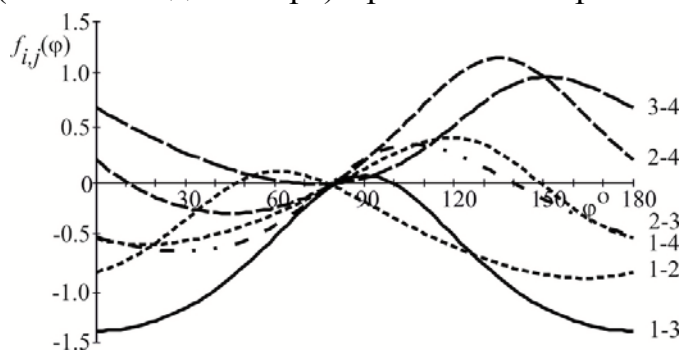


Рис. 11. Розв'язок системи рівнянь графічним способом

Якщо прийняти цей напрямок за початок відліку, то напрямок поляризації випромінювання повинен дорівнювати 80° . Значення коефіцієнту дихроїзму k_D приймається рівним 1,93.

Розв'язку рівняння (4) відповідають точки перетину графіків функції $f_{i,j}(\varphi)$ із віссю

абсцис (рис. 11). Кожна крива перетинає цю вісь у двох точках. Але в діапазоні значень кута φ близько 80° вісь абсцис перетинають усі криві. Це і є діапазон розв'язку, що має фізичний зміст.

Результати обчислень напрямку поляризації наведено в таблиці 2.

Таблиця 2. Значення кута напрямку поляризації для всіх можливих комбінацій ґраток

| ґратки | 1-2 | 1-3 | 1-4 | 2-3 | 2-4 | 3-4 |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|
| φ° | 77,0 | 81,0 | 81,1 | 79,0 | 79,5 | 81,3 |

Середнє з шести отриманих значень і його похибка при довірчій імовірності 0,95 дорівнюють:

$$\varphi = 79,8^\circ \pm 1,8^\circ$$

Ця величина добре узгоджується з істинним значенням кута поляризації лазерного випромінювання.

Теплова постійна часу ґратчастих приймачів з тонких металевих дротів невелика – від кількох мілісекунд до кількох десятків мілісекунд. У звичайному режимі такими приймачами можна вимірювати форму імпульсу, тривалість якого не менш ніж у 10 разів більша за постійну часу приймача. Однак за допомогою розробленого алгоритма оброблення сигналу з болометра можна проаналізувати форму імпульсу, тривалість якого набагато менша за теплову постійну часу болометра. В основу методу вимірювань, розглянутого в дисертаційній роботі, покладено рівняння теплового балансу:

$$mc \frac{dT(t)}{dt} + \alpha_p LT(t) = P(t), \quad (5)$$

де $T(t)$ – функція зміни температури болометра, $P(t)$ – функція зміни потужності випромінювання, що потрапило на болометр, тобто форма імпульсу випромінювання, L – довжина болометра.

Зазначимо, що в цьому розділі висвітлено методику вимірювання форми імпульсу випромінювання в разі, коли враховуються залежності теплофізичних параметрів болометрів від температури. Рівняння теплового балансу можна переписати з урахуванням залежності від температури питомої теплоємності $c(T)$, теплової постійної часу $\tau(T)$, ФЕП $Q_{abs}(T)$ випромінювання таким чином:

$$P(t) = \frac{mc(T)}{Q_{abs}(T)} \left[\frac{dT(t)}{dt} + \frac{1}{\tau(T)} T(t) \right]. \quad (6)$$

В експерименті джерелом випромінювання служить неодимовий лазер, що працює в режимі вільної генерації. Енергія імпульсу дорівнює 15 Дж, діаметр пучка випромінювання – 15 мм, тривалість імпульсу випромінювання –

близько 1 мс. Сигнали з усіх елементів ґратки через аналого-цифровий перетворювач вводяться в комп'ютер, і обробляються за алгоритмом, що використовує формулу (6). Це дозволяє через сумарний сигнал (функцію $T(t)$) знайти форму імпульсу (функцію $P(t)$), що впливає на приймач випромінювання.

Результати вимірювання форми імпульсу випромінювання неодимового лазера показано на рис. 12. Імпульс випромінювання має тривалість близько 1 мс, що відповідає значенням параметрів випромінювання такого лазера.

Середня температура болометрів, розташованих у діапазоні максимальної інтенсивності випромінювання, досягає 400°C , максимальна – 1500°C . У такому діапазоні температур на результати вимірювань настільки впливають нелінійності, які при цьому виникають, що необхідне їх врахування.

На рис. 13 за допомогою кривої 1 відображено форму імпульсу випромінювання лазера, виміряну фотодіодом, кривої 2 – результати відновлення форми імпульсу випромінювання з використанням формули (6). Криві добре збігаються між собою. Пунктирна крива 3 показує результати оброблення сигналу за формулою (6) без урахування залежності параметрів болометра від температури. Крива 3 значно відрізняється від кривої 1.

Основні наукові результати розділу надруковано в [1, 8, 12, 15].

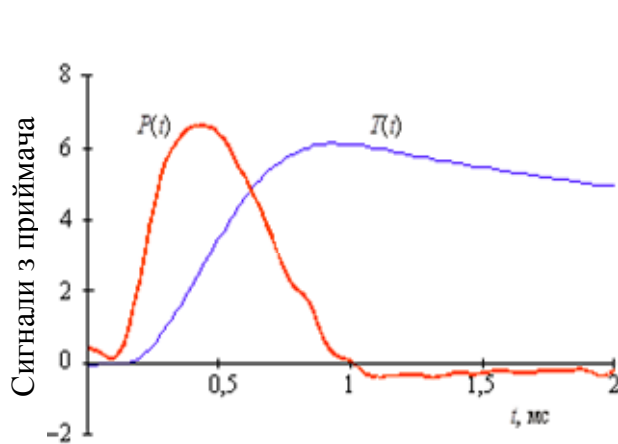


Рис. 12. Форма імпульсу й перебіг температури випромінювання неодимового лазера

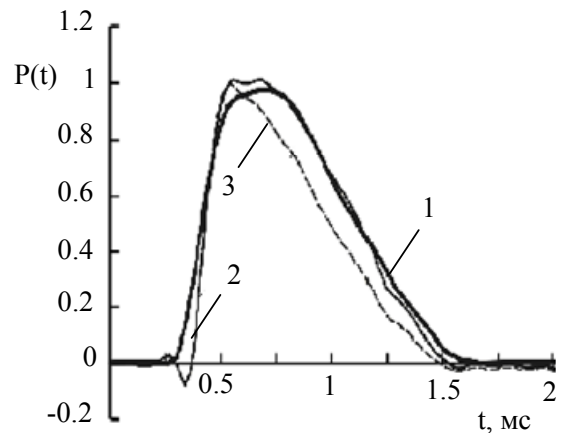


Рис. 13. Форма імпульсу випромінювання лазера

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано важливе наукове завдання – розроблено алгоритми оброблювання сигналів із ґратчастих болометричних приймачів лазерного випромінювання, призначених для вимірювання його просторово-енергетичних, поляризаційних та часових характеристик. Алгоритми враховують нелінійні ефекти, які виникають унаслідок залежності теплофізичних характеристик болометрів від температури, і характер поляризації випромінювання. Для цього досліджено процеси, які відбуваються в болометрах при їх нагріванні потужним поляризованим лазерним випромінюванням.

Для розв'язання цієї проблеми вперше адаптовано алгоритм оброблювання сигналів, заснований на перетворенні Радона.

Основні результати дисертаційної роботи полягають у такому:

1. Проведено огляд та порівняльний аналіз наявних алгоритмів оброблювання сигналів із ґратчастих приймачів випромінювання стосовно малоракурсної геометрії. Запропоновано алгоритм, в основі якого є інтегральне перетворення Радона, швидкість роботи його перевищує швидкість алгоритма, заснованого на перетворенні Фур'є, удвічі. У процесі аналізу також виявлено, що згорткові алгоритми менш чутливі до шумів та похибок у вихідних даних, ніж алгебраїчні ітераційні алгоритми.

2. Надано рекомендації з вибору кількості болометрів у ґратці (8-10) та кількості ґраток у приймачі (3-4).

3. Проаналізовано існуючі методи оцінювання відносної похибки вимірювання функціональної залежності (розподілу інтенсивності випромінювання в просторі, форми імпульсу випромінювання тощо), та запропоновано нові методи оцінювання цієї похибки.

4. Досліджено теплові процеси, які відбуваються під час нагрівання болометрів потужним лазерним випромінюванням.

- Оцінено відмінність у розподілі інтенсивності випромінювання, що падає на болометр, та розподілі температури вздовж болометра. Запропоновано метод корекції сигналу з болометра, який зменшує похибку, викликану цією відмінністю.

- Проведено експериментальні дослідження теплофізичних і оптичних параметрів тонких болометрів у діапазоні температур від кімнатної до плавлення. Знайдено залежність погонного коефіцієнта теплообміну болометра з навколишнім середовищем, ФЕП та теплової сталої часу від температури. Проведено їх апроксимацію аналітичними виразами. З'ясовано, що існує нехтувано мала залежність коефіцієнта теплообміну від діаметра дроту. Розраховано внесок конвекції та теплового випромінювання у теплообмін.

- Встановлено, що у видимому та інфрачервоному діапазонах залежності ФЕП випромінювання в тонких дротинках від температури якісно відмінні. У видимому діапазоні ФЕП зменшується зі зростанням температури, в інфрачервоному – зростає. Коефіцієнт дихроїзму від температури не залежить.

- Показано, що значення ФЕП, одержане в експериментах, приблизно удвічі менше за теоретичне, отримане з використанням табличних значень оптичних сталих металу. Ця відмінність зумовлена відмінністю значень оптичних параметрів тонких дротинок від оптичних параметрів масивних зразків з того ж матеріалу внаслідок різної структури поверхні. Запропоновано спосіб вимірювання оптичних сталих тонких дротинок за їхнім ФЕП.

- Знайдено і встановлено ступінь впливу нелінійних ефектів, викликаних залежністю теплових і оптичних параметрів болометрів від температури, на результати вимірювань. Розроблено методи введення в алгоритми оброблювання сигналів поправок на вплив нелінійних ефектів, що дозволило зменшити похибку до 2-3 %.

5. Виявлено вплив напрямку поляризації випромінювання на результат вимірювань. Розроблено алгоритм оброблювання сигналів з болометричного приймача, який враховує характер поляризації, що дозволило зменшити похибку визначення параметрів й характеристик лазерного випромінювання з 7% до 5%. Запропоновано новий спосіб вимірювання напрямку лінійної поляризації випромінювання ґратчастим приймачем.

6. Розроблено алгоритм оброблювання сигналів з приймача, який дає змогу вимірювати форму імпульсів випромінювання, тривалість яких у 10-20 разів менша від теплової сталої часу приймача.

7. Створено алгоритми і програми, що їх реалізують, для одночасного вимірювання таких характеристик й параметрів лазерного випромінювання:

- безперервної потужності або енергії імпульсу (відносні вимірювання);
- розподілу інтенсивності в поперечному перерізі пучка;
- діаметра пучка;
- координат енергетичного центра пучка;
- напрямку лінійної поляризації;
- форми імпульсу.

Оцінено похибки вимірювань.

Запропоновані математичні моделі й отримані результати орієнтовані на розв'язання завдань щодо створення нових приймачів, які працюють в умовах високих потужностей і енергій, та розроблення методів вимірювання просторово-енергетичних характеристик лазерного випромінювання, а також призначені для застосування в експериментах з розроблення і використання потужних лазерів та контролю їхніх характеристик і параметрів.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Прямые и обратные задачи теплопередачи в лазерной технике и метрологии : монографія / [Н. Г. Кокодий, В. А. Свич, В. А. Тиманюк, С. В. Погорелов, А. О. Пак, Ли Чженьхуа]. – Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2012. – 240 с.

2. Кокодий Н. Г. Алгоритмы обработки сигнала с решетчатого приемника для измерения характеристик лазерного излучения / Н. Г. Кокодий, А. О. Пак // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». – 2009. – вип. 14. (№853). – С. 35–41.

3. Кокодий Н. Г. Исследование температурных зависимостей параметров болометрического приемника лазерного излучения / Н. Г. Кокодий, А. О. Пак // Український метрологічний журнал. – 2010. – № 3. – С. 40–44.

4. Кокодий Н. Г. Теплофизические параметры решетчатого приемника лазерного излучения в широком диапазоне температур / Н. Г. Кокодий, А. О. Пак // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». – 2010. – вип. 16. (№927). – С. 36–42.

5. Пак А. О. Поглощение оптического излучения тонкими металлическими проволоками при сильном импульсном нагреве / А. О. Пак, Н. Г. Кокодий // Радіофізика та електроніка. – 2011. – Т. 2 (16), № 4. – С. 92–95.

6. Пак А. О. Решетчатый приемник для измерения характеристик лазерного излучения / А. О. Пак, Н. Г. Кокодий // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». – 2011. – вип. 19. (№983). – С. 72–76.

7. Кокодий Н. Г. Измерение временных характеристик интенсивного оптического излучения / Н. Г. Кокодий, А. О. Пак // Теплофизика высоких температур. – 2012. – Т 50, №1. – С. 137–142.

Перекладено в журналі:

Kokodii N. G. Measuring of Temporal Characteristics of Intense Optical Radiation / N. G. Kokodii, A. O. Pak // High Temperature. – 2012. – Vol. 50, No. 1. – pp. 131–136.

8. Кокодий Н. Г. 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. 17–20.

9. Пат. 68466 Україна, МПК G 01 J 1/04, H 01 S 3/00. Пристрій для вимірювання енергетичних параметрів випромінювання лазерів / Кокодій М. Г., Пак А. О., Балкашин В. П., Сафронов Б. В., Приз І. О., Козлов І. І.; заявник та патентовласник Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна. – № u201110944 ; заявл. 12.09.2011 ; опубл. 26.03.2012, Бюл. № 6.

10. Kokodiy N. G. Algorithms for signal processing of grid receiver for laser radiation / N. G. Kokodiy, V. A. Timanyuk, A. O. Pak // International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL'2008) : the 4-th Int. conf., 29 Sept.-4 Oct. 2008 : conf. proc. – Alushta, 2008. – P. 325–327.

11. Пак А. О. Алгоритмы обработки сигнала с решетчатого приемника для измерения характеристик лазерного излучения / А. О. Пак // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2009 : V-th Международная научно-техническая конференция, 20-25 апр. 2009 : тезисы докл. – Севастополь, 2009. – С. 178.

12. Пак А. О. Измерение формы импульса оптического излучения проволочным болометром / А. О. Пак // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2010 : VI-th Международная научно-техническая конференция, 19-24 апр. 2010 : тезисы докл. – Севастополь, 2010. – С. 266.

13. Kokody N. G. Research of dependence of bolometer parameters of the latticed receiver of laser radiation on temperature / N. G. Kokody, A. O. Pak // International Young Scientists' Conference on Applied Physics : the X-th Int. conf., 16-19 June 2010 : conf. proc. – Kyiv 2010. – P. 13–15.

14. Kokody N. G. Research of bolometer parameters of the trellised receiver of laser radiation / N. G. Kokody, A. O. Pak, B. V. Safronov, V. P. Balkashin, I. A. Priz, M. P. Perepechai // International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL'2010) : the 5-th Int. conf., 10-14 Sept. 2010 : conf. proc. – Sevastopol, 2010. – P. 202–204.

15. Pak A. O. Grid receiver for measuring of laser radiation characteristics / A. O. Pak, N. G. Kokody // International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (LFNM'2011) : the 11-th Int. conf., 4-8 Sept. 2011 : – Kharkov, 2011. – P. 1–3.

АНОТАЦІЯ

Пак А. О. Методи вимірювання енергетичних характеристик потужного лазерного випромінювання ґратчастими болометричними приймачами

з урахуванням нелінійних ефектів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2014.

Дисертаційну роботу присвячено розвитку методів вимірювання просторово-енергетичних, поляризаційних та часових характеристик і параметрів потужного лазерного випромінювання за допомогою ґратчастого болометричного приймача. Дослідження спрямоване на підвищення якості й точності розв'язання зворотної задачі відновлення розподілу інтенсивності

випромінювання за рахунок розвитку методів оброблювання результатів вимірювань і методів комп'ютерного моделювання.

Для вдосконалення методів відновлення енергетичного розподілу інтенсивності випромінювання розроблено алгоритми оброблювання сигналів із гратчастого приймача на основі інтегрального перетворення Радона. Запропоновано спосіб оцінювання показників якості відновлення, який базується на порівнянні вихідної й відновленої функцій розподілу інтенсивності.

Показано необхідність урахування залежності теплофізичних параметрів болометрів від температури з метою підвищення точності одержуваних результатів і їх надійності.

Набули подальшого розвитку методи вимірювання напрямку лінійної поляризації та форми імпульсу, тривалість якого набагато менша за теплову постійну часу.

Ключові слова: алгоритми оброблювання сигналів, болометрична гратка, просторово-енергетичні характеристики, зворотна задача, потужний лазер.

АННОТАЦІЯ

Пак А. О. Методы измерения энергетических характеристик мощного лазерного излучения решетчатыми болометрическими приемниками с учетом нелинейных эффектов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – физика приборов, элементов и систем. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2014.

Диссертационная работа посвящена развитию методов измерения пространственно-энергетических, поляризационных и временных характеристик и параметров мощного лазерного излучения с помощью решетчатого болометрического приемника. Исследование направлено на повышение качества и точности решения обратной задачи восстановления распределения интенсивности излучения за счет развития методов обработки результатов измерений и методов компьютерного моделирования.

С целью усовершенствования методов восстановления энергетического распределения интенсивности излучения разработаны алгоритмы обработки сигналов с решетчатого приемника на основе интегрального преобразования Радона. Предложен способ оценки показателей качества восстановления, который основывается на сравнении исходной и восстановленной функций распределения интенсивности.

Показана необходимость учета зависимости теплофизических параметров болометров от температуры с целью повышения точности получаемых результатов и их надежности.

Получили дальнейшее развитие методы измерения направления линейной поляризации и формы импульса, длительность которого намного меньше тепловой постоянной времени.

Ключевые слова: алгоритмы обработки сигналов, болометрическая решетка, пространственно-энергетические характеристики, обратная задача, мощный лазер.

ABSTRACT

Pak A. O. Methods of measuring the energy characteristics of powerful laser radiation with latticed bolometer taking into account nonlinear effects. – Manuscript.

Thesis in the fulfillment of requests of the scientific degree of candidate of physical and mathematical science in the major 01.04.01 – physics of devices, elements and systems. – Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, 2014.

The thesis is devoted to the development of the measurement methods of the spatial, energy, polarization, and temporal characteristics and parameters of powerful laser radiation with the aid of grid bolometers. The research is aimed at improving the quality and accuracy of the solution of inverse problem of recovering the intensity distribution of the radiation thanks to the development of methods of processing the results of measurements and computer modeling.

It has been shown the necessity of consideration of the temperature dependence of physical parameters of bolometers to improve the accuracy of the results obtained and their reliability, that is, the probability of the solution compliance to restrictions caused by physical laws.

In order to improve the methods of restoring the energy distribution of the radiation intensity, it has been developed the signal processing algorithms based on the integral Radon transform for the grid receiver. It has been proposed an evaluation method of the quality characteristics of recovery, based on comparison of the original and restored intensity distribution functions.

The measuring methods of the direction of the linear polarization and the shape of the pulse with the duration much smaller than the thermal time constant, have got further development.

Keywords: signal processing algorithms, bolometric grid, spatial and energy characteristics, inverse problem, powerful laser.