

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2024-41-05>

УДК 537.876.23:537.877

М. М. ДУБІНІН, Ph.D., доц.

e-mail: mykola.dubinin@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7723-9592>

В. О. МАСЛОВ, д. ф.-м. наук, проф.

e-mail: v.a.maslov@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7743-7006>

К. І. МУНТЯН, н.с.

e-mail: k.i.muntean@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6479-3511>

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,

м. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ ПЕРЕТЯЖКИ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА

Актуальність. Розглядається інтерферометричний метод виміру положення перетяжки пучка лазерного випромінювання, яке визначає початок системи координат просторових параметрів пучка. Інформація про місцезнаходження перетяжки пучка відіграє важливу роль у лазерній балістичній гравіметрії, лазерній інтерферометрії довжин, оптичній метрології та прецизійній лазерній бариметрії.

Мета роботи. Підвищення точності місцезнаходження перетяжки при одночасному зниженні трудомісткості процесу вимірювання.

Матеріали та методи. Запропоновано метод, що реалізує залежність кривизни хвильового фронту пучка від відстані до перетяжки. Вихідний лазерний пучок розщеплюється інтерферометром зсуву на опорний та інформаційний пучки, що утворюють у відбитому світлі нелокалізоване в просторі інтерференційне поле. Період інтерференційних смуг, що спостерігаються в будь-якому перерізі інтерференційного поля, несе інформацію про місцезнаходження перетяжки вихідного лазерного пучка щодо цього перерізу. Відстань від перетяжки до площини реєстрації періоду інтерференційної картини обчислюється за формулами гаусової оптики.

Результати. Розроблено інтерферометричний метод визначення місця розташування перетяжки лазерного пучка, який реалізує відомий взаємозв'язок між кривизною хвильового фронту в якомусь поперечному перерізі пучка випромінювання та відстанню від цього перерізу до перетяжки пучка. Проведені дослідження підтвердили працездатність інтерферометричного методу визначення місця розташування перетяжки пучка лазерного випромінювання, а отримані результати дозволяють рекомендувати цей метод як найточніший з відомих на даний момент.

Висновки. Дослідження вимірювальних пристроїв показали, що для лазера ЛГ-56 з кутом розбіжності близько 10' обидва методи забезпечують збіжність результатів із точністю приблизно 2%. Однак зі зменшенням кута розбіжності, а саме при зміні розташування перетяжки, точність збігу результатів погіршується. Метод перерізів, рекомендований стандартом ISO 11146-1, доцільно використовувати для визначення місця розташування перетяжки пучків із кутами розбіжності понад 30", хоча похибка при цьому становить близько 10%. Обмеження цього методу пояснюються збільшенням похибки у визначенні перетяжки. Інтерференційний метод є ефективним для визначення перетяжок пучків із кутами розбіжності понад 5', забезпечуючи похибку не більше 5%.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: лазер, гаусовий пучок, розташування перетяжки, кривизна хвильового фронту, інтерферометр зсуву, двопроточна інтерференція, період інтерференційної картини

Як цитувати: Дубінін ММ, Маслов ВО, Мунтян КІ. Визначення положення перетяжки лазерного пучка. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2024;41:50-60. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2024-41-05>

In cites: Dubinin MM, Maslov VA, Muntean KI. Determination of the laser beam waist. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Radio Physics and Electronics". 2024;41:50-60. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2024-41-05>

ВСТУП

Визначення просторових параметрів пучка лазерного випромінювання має фундаментальне значення в таких практичних застосуваннях: лазерна обробка матеріалів [1], зокрема лазерне зварювання [2] і різання [3], аерокосмічна та автомобільна промисловість, лазерно-порошкова металургія [4], лазерна терапія в медицині [5], оптична метрологія [6], розробка рефракційної [7], дифракційної [8] та відбивальної [9] оптики, просторові модулятори світла [10], акустооптичні дефлектори [11], оптичні фазовані решітки

© Dubinin MM, Maslov VA, Muntean KI., 2024

Open access. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

[12] та інші оптичні компоненти [13], узгодження власних мод оптичних приладів [14], ефективне введення лазерного випромінювання у волоконні системи [15], прецизійне лазерне трасування [16] тощо.

Для опису процесу поширення випромінювання, як у різних оптичних системах, так і у вільному просторі, нині широко використовується гаусова модель лазерного пучка. Попри те, що ця модель не задовольняє рівнянням Максвелла, вона забезпечує прийнятну точність інженерних розрахунків для більшості типових оптичних систем і задовільну відповідність результатам експериментів. Найпростіша гаусова модель описує просторові характеристики стигматичного лазерного пучка, що має циліндричну симетрію. Місце розташування перетяжки лазерного пучка відіграє фундаментальну роль у гаусовій моделі, оскільки визначає початок системи координат, яку необхідно встановлювати з максимально можливою точністю. З принципової точки зору алгоритм визначення місця розташування перетяжки є повністю зрозумілим. Спершу, з урахуванням довжини лазерного резонатора та радіусів кривизни його дзеркал, необхідно обчислити просторові параметри пучка випромінювання, зокрема місце розташування перетяжки всередині резонатора, слідуючи класичній статті Когельника та Лі [17]. Далі послідовно обчислюють зміну місця розташування перетяжки пучка після проходження кожного елемента оптичної системи, використовуючи формулу тонкої лінзи та враховуючи товщину й коефіцієнт заломлення як фокусувальних, так і нефокусувальних оптичних елементів. Цей теоретично зрозумілий підхід на практиці виявляється малоприматним, оскільки пов'язаний із великими обсягами обчислень і з низки причин не забезпечує високої точності результатів. Тому фахівці з лазерної техніки віддають перевагу експериментальному визначенню місця розташування перетяжки.

На сьогоднішній день розроблено низку експериментальних методів визначення місця розташування перетяжки [18–36] для джерел лазерного випромінювання з різними просторовими, часовими, потужностними та спектральними характеристиками. Сам факт існування великої кількості таких методів свідчить про те, що всі вони є недостатньо задовільними через брак універсальності або відносно низьку точність результатів вимірювань.

Чинний міжнародний стандарт ISO 11146-1/2/3:2021 [37–39] рекомендує визначати місце розташування перетяжки шляхом вимірювання ширини пучка щонайменше в 10 різних перерізах, розташованих уздовж оптичної осі по обидві сторони від перетяжки. При цьому вимірювання розподілу щільності випромінювання в кожному перерізі повторюють не менш ніж п'ять разів. Отримані результати апроксимують гіперболічною залежністю, а вершина гіперболи вказує на місце розташування перетяжки. Однак такий метод зазвичай рідко реалізується, оскільки на практиці перетяжка часто недоступна для прямих вимірювань або фізично не існує. У такому випадку стандарт рекомендує сформулювати штучну перетяжку за допомогою безабераційного фокусувального елемента, провести згадану процедуру вимірювань і обчислити місце розташування штучної перетяжки. Далі, виходячи з параметрів фокусувального елемента та відстаней від його головних площин до штучної й початкової перетяжок, необхідно обчислити місце розташування початкової перетяжки відповідно до [17].

Стандарт ISO 11146 передбачає використання ПЗЗ-камери для вимірювання ширини пучка, яка визначається шляхом обчислення перших і других моментів розподілу щільності потужності випромінювання за формулами, наведеними у стандарті.

У разі недоступності ПЗЗ-камери або неможливості її використання з будь-якої причини стандарт передбачає такі альтернативні методи вимірювання ширини пучка:

- метод регульованої діафрагми;
- метод ножа Фуко;
- метод рухомої щілини.

Ці методи застосовують для широких пучків випромінювання, високої потужності пучків або у випадках, коли відсутні ПЗЗ-камери, що відповідають потрібному спектральному діапазону.

Таким чином, усі відомі методи визначення місця розташування перетяжки, за винятком дифракційних [23, 24] і специфічних іонізаційних методів [21, 32], які потребують прямого доступу до перетяжки, реалізують залежність між шириною лазерного пучка в певному перерізі та відстанню від цього перерізу до перетяжки пучка.

Основними недоліками відомих методів є такі:

- зниження точності вимірювання пучків випромінювання з малою розбіжністю, які становлять найбільший практичний інтерес. Як відомо, такі пучки мають велику ширину, яка мало змінюється від перерізу до перерізу. У цьому випадку навіть незначна похибка вимірювання ширини пучка призводить до значної похибки результату вимірювань. Крім того, широкоапертурні фокусувальні елементи мають підвищені аберації, що додатково погіршує точність результату;

- значна трудомісткість, оскільки для підвищення точності результату вимірювань необхідно багаторазово вимірювати ширину пучка в максимально можливій кількості його перерізів при максимально можливій відстані між перерізами.

Мета цієї роботи полягає у підвищенні точності визначення місця розташування перетяжки при одночасному зниженні трудомісткості процесу вимірювань.

ТЕОРЕТИЧНІ СПІВВІДНОШЕННЯ

Спираючись на залежність між кривизною $R(z)$ хвильового фронту в певній точці оптичної осі лазерного пучка та відстанню від цієї точки до перетяжки пучка, ми запропонували інтерферометричний метод визначення місця розташування перетяжки лазерного пучка, який не потребує прямого доступу до перетяжки. Згідно з цим методом, вихідний лазерний пучок, місце розташування перетяжки якого необхідно визначити, розділяється на інформаційний та опорний когерентні пучки, які формують у навколишньому просторі нелокалізовану двопроменеву інтерференційну картину. Ця картина аналогічна просторовій інтерференційній картині від двох когерентних точкових джерел, тобто являє собою сімейство вкладених одне в одне двопросторинних гіперболоїдів обертання з фокусами в місці розташування уявних перетяжок лазерних пучків. Як відомо, інтенсивність двопроменевого інтерференційного поля в будь-якій точці простору залежить лише від довжини хвилі випромінювання, відстані між двома джерелами та відстані від точки спостереження до початку координат. Знаючи довжину хвилі випромінювання, відстань між двома уявними перетяжками у нашому випадку та період інтерференційної картини в певній площині реєстрації, ми можемо обчислити відстань від точки реєстрації періоду до початку координат, а отже, визначити місце розташування перетяжок. Таким чином, завдання визначення місця розташування вихідної перетяжки, яка недоступна або фізично не існує, зводиться до визначення параметрів інтерференційної картини, створеної парою уявних перетяжок.

Аналіз відомих способів формування двох інтерферуючих пучків із одного вихідного показує, що в нашому випадку придатною є лише система з двох паралельних площин, яка створює дві уявні перетяжки, відстань між якими визначається виключно параметрами самої системи формування. Будь-яка інша відома система (біпризма Френеля, білінза Біє, дзеркала Френеля і Ллойда тощо) формує джерела, відстань між якими залежить також від невідомої відстані між площиною перетяжки вихідного лазерного пучка і системою формування. Технічною реалізацією системи двох паралельних площин може бути прозора плоскопаралельна пластинка або інтерферометр Майкельсона, налаштований на нульовий порядок. У разі використання плоскопаралельної пластинки відстань $2C$ між уявними перетяжками інтерферуючих пучків визначається наступним чином (Рис. 1):

$$2C = \frac{2d \cos \alpha}{(n^2 - \sin^2 \alpha)^{\frac{1}{2}}}, \quad (1)$$

де d – товщина пластини; n – показник заломлення матеріалу пластини; α – кут падіння лазерного пучка на пластину.

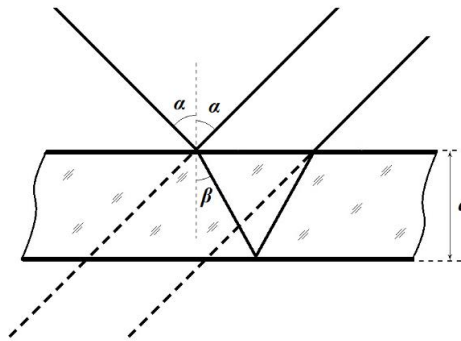


Рис. 1. Хід променів у плоскопаралельній пластині
Fig. 1. Ray path in a plane-parallel plate

З формули (1) випливає, що відстань між уявними перетяжками інтерферуючих пучків випромінювання, тобто положення фокусів сімейства двопросторинних гіперболоїдів, залежить від кута падіння лазерного пучка на плоскопаралельну пластину. Таким чином, інтерференційна картина двох гаусових пучків, сформована системою двох паралельних площин, не є повним аналогом класичної інтерференційної картини від двох реальних точкових джерел. З Рис. 2 випливає, що повна аналогія інтерференційних картин повинна спостерігатися лише у дальній зоні лазерного пучка.

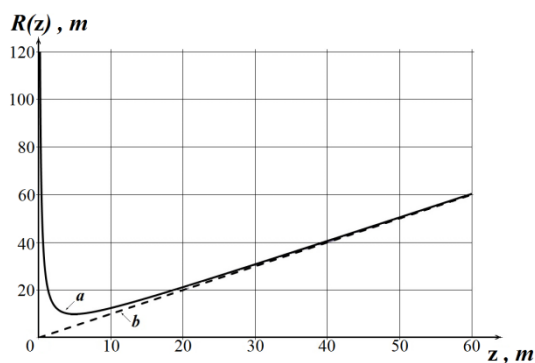


Рис. 2. Залежність кривизни хвильового фронту від відстані до центру випромінювання
 а) гауссовий пучок ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$, $\omega_0 = 1.0 \text{ mm}$), б) точкове джерело
 Fig. 2. Dependence of the wave front curvature on the distance to the radiation center
 а) Gaussian beam ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$, $\omega_0 = 1.0 \text{ mm}$), б) point source

При спостереженні інтерференційної картини в довільній площині реєстрації інтерференційні смуги можуть бути обчислені як лінії перетину цієї площини з сімейством гіперболоїдів. При цьому форма, ширина та напрямок смуг залежать виключно від обраної орієнтації площини реєстрації.

Розглянемо практичні випадки спостереження інтерференційної картини. Початок координат розміщуємо посередині між уявними перетяжками, вісь абсцис проводимо через центри обох перетяжок (Рис. 3). У всіх випадках площина спостереження розташована на відстані $l \gg 2C$ від початку координат. Можливі такі випадки розташування світлочутливої площадки фотореєстратора:

1) Вісь ординат проходить через центр світлочутливої площадки фотореєстратора перпендикулярно до нього. У цьому випадку спостерігається інтерференційна картина у вигляді ряду майже еквідистантних смуг, які з високою точністю можна вважати прямими.

2) Площадка фотореєстратора розташована під кутом до обох осей координат. Саме цей випадок найчастіше реалізується на практиці під час вимірювання просторових параметрів лазерного пучка. Інтерференційна картина виглядає як сімейство вигнутих нееквідистантних смуг.

3) Вісь абсцис проходить через центр світлочутливої площадки фотореєстратора перпендикулярно до нього. У цьому випадку інтерференційна картина набуває вигляду сімейства концентричних кілець.

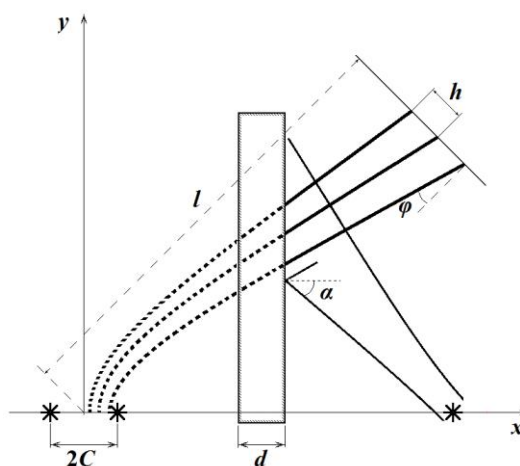


Рис. 3. Схема формування інтерферуючих пучків
 Fig. 3. Scheme of formation of interfering beams

Ці три випадки охоплюють всю сукупність спостережуваних інтерференційних картин. При формуванні інтерференційної картини за допомогою плоскопаралельної пластини можна отримати всі три положення площини реєстрації, змінюючи кут падіння пучка випромінювання на пластину. У разі формування інтерференційної картини за допомогою інтерферометра Майкельсона, налаштованого на нульовий порядок, реалізується третій випадок спостереження.

Період h інтерференційних смуг залежить від відстані l між площиною реєстрації та початком координат. Розв'язуючи спільно рівняння для оптичної різниці ходу між інтерферуючими променями та рівняння для площини реєстрації, з урахуванням (1) отримуємо розрахункову формулу для визначення відстані від площини реєстрації до початку координат за періодом інтерференційних смуг:

$$l = \frac{(hd \sin 2\alpha \cos^2 \alpha [\cos(\alpha + \varphi) + \operatorname{tg} \alpha \sin(\alpha + \varphi)])^2}{\lambda(n^2 - \sin^2 \alpha)^{\frac{1}{2}}},$$

де λ – довжина хвилі випромінювання; φ – кут падіння пучка випромінювання на площину реєстрації. Якщо розташувати площину реєстрації перпендикулярно до інтерферуючих пучків, що практично завжди можливо, то $\varphi = 0$ і розрахункова формула спрощується до:

$$l = \frac{hd \sin 2\alpha}{(n^2 - \sin^2 \alpha)^{\frac{1}{2}}}. \quad (3)$$

При використанні інтерферометра Майкельсона, замість вимірювання періоду смуг зручніше визначати діаметри концентричних кілець. У цьому випадку розрахункова формула набуває вигляду:

$$l = \left[\frac{d(D_{n+1}^2 - D_n^2)}{\lambda n} \right]^{\frac{1}{2}},$$

де d – товщина еквівалентної повітряної пластини інтерферометра Майкельсона; D_n і D_{n+1} – діаметри двох будь-яких сусідніх інтерференційних кілець.

Таким чином, задаючи кут падіння лазерного пучка на плоскопаралельну пластину та вимірюючи період інтерференційних смуг у площині реєстрації, можна за наведеною вище формулою визначити відстань від площини реєстрації до початку координат.

Похибку вимірювання місця розташування перетяжки можна оцінити, продиференціювавши

$$\text{формулу (3):} \quad \frac{\delta l}{l} \approx \left[\left(\frac{\delta h}{h} \right)^2 + \left(\frac{\delta d}{d} \right)^2 + \delta \alpha^2 + \left(\frac{\delta \lambda}{\lambda} \right)^2 + \delta n^2 \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Типові значення складових похибки такі: $\delta h/h \approx 10^{-3}$; $\delta d/d \approx 10^{-4}$; $\delta \alpha \approx 10^{-4}$; $\delta \lambda/\lambda \approx 10^{-6}$; $\delta n \approx 10^{-4}$, що дозволяють оцінити $\delta l/l \approx 10^{-3}$.

Доцільно відзначити особливість вищеописаного інтерференційного методу вимірювання, яка відрізняє його від відомих методів визначення просторових параметрів лазерного пучка та робить його перспективним для вимірювання місця розташування перетяжки пучків з малими (порядку часток кутової секунди) кутами розбіжності. У відомих методах величина вимірюваного інформаційного параметра зменшується зі зменшенням кута розбіжності лазерного пучка. Наприклад, у цих методах мала різниця ширин пучка, яка навіть за великих кутів розбіжності вимірюється з великою похибкою, зі зменшенням кута розбіжності прямує до нуля, що призводить до повної втрати інформації.

В описаному інтерференційному методі величина інформаційного параметра – період інтерференційної картини – зі зменшенням кута розбіжності пучка, навпаки, збільшується. Це дозволяє, змінюючи параметри або конструкцію системи формування інтерференційної картини, досягти більшої точності у вимірюванні місця розташування перетяжки для пучків з малими кутами розбіжності, ніж за допомогою відомих методів.

ПЕРЕВІРКА ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНОГО МЕТОДУ

Під час перевірки працездатності та точності інтерферометричного методу використовувалася така апаратура: He-Ne лазер ЛГ-56 із резонатором типу "площина – сфера" та довжиною хвилі випромінювання 0,632816 мкм; плоскопаралельна пластинка з комплекту оптичної лави типу ОСК-2 завтовшки 20,75 мм з оптичного скла К8 із відносним показником заломлення $n = 1,514627$ для довжини хвилі 0,6328 мкм; коліматор від оптичної лави ОСК-2 із фокусною відстанню об'єктива 1600 мм; гоніометр ГС-5; два геодезичні жердини 1-го розряду з номінальною довжиною 1 метр; індикаторний нутромір НІ-50 18–50; мікроденситометр МФ-2; екрани, юстувальні столики, листова фотоплівка.

Дослідження проводилися наступним чином. Перетяжка початкового пучка випромінювання лазера ЛГ-56 збігається з поверхнею його вихідного плоского дзеркала. Місцезнаходження перетяжки початкового лазерного пучка вимірювалося методом перерізів і описаним вище інтерференційним методом. Потім розбіжність пучка випромінювання зменшувалася за допомогою коліматора, і змінене місцезнаходження перетяжки пучка знову вимірювалося обома методами. Послідовне застосування цієї процедури дозволило отримати та виміряти ряд значень положення перетяжки пучка в діапазоні кутів розбіжності від $10'$ до $3''$.

Вимірювання ширини лазерного пучка методом перерізів виконувалося за допомогою екранів з листовою фотоплівкою, які послідовно встановлювалися на різних відстанях від перетяжки з кроком 5 м. Максимальна відстань від вихідного плоского дзеркала лазера становила 75 м. Відстань від вихідного дзеркала лазера визначалося методом послідовного перекладання двох геодезичних жердин номінальною довжиною 1 м. На відміряній відстані розміщувався екран з фотоплівкою. Після обробки фотоплівки діаметр отриманої на ній плями випромінювання на рівні половинної інтенсивності вимірювався за допомогою мікроденситометра МФ-2. Місцезнаходження перетяжки визначалося відповідно до стандарту ISO 11146-1 шляхом апроксимації результатів вимірювань гіперболічною функцією.

Вимірювання місцезнаходження перетяжки інтерференційним методом здійснювалося за допомогою штатної плоскопаралельної пластини від оптичної лави ОСК-2 завтовшки $20,75$ мм. Пластина встановлювалася на поворотний столик гоніометра таким чином, щоб фронтальна відбивна поверхня пластини збігалася з віссю повороту столика. Кут падіння лазерного пучка на пластину варіювався в межах $0^\circ \div 45^\circ$. Початкова відстань від вихідного дзеркала лазера до фронтальної поверхні плоскопаралельної пластини становила 75 м і визначалася, як і в попередньому випадку, методом перекладання геодезичних жердин.

У відбитому від пластини пучку випромінювання на відстані 1 м встановлювався екран з листовою фотоплівкою для реєстрації інтерференційної картини. Типовий вигляд отриманих інтерференційних картин наведено на Рис. 4. Обробка та фотометрія фотоплівок проводилися так само, як і в попередньому випадку. Місцезнаходження перетяжки відносно площини реєстрації інтерференційної картини визначалося розрахунковим шляхом за наведеною вище формулою (3).

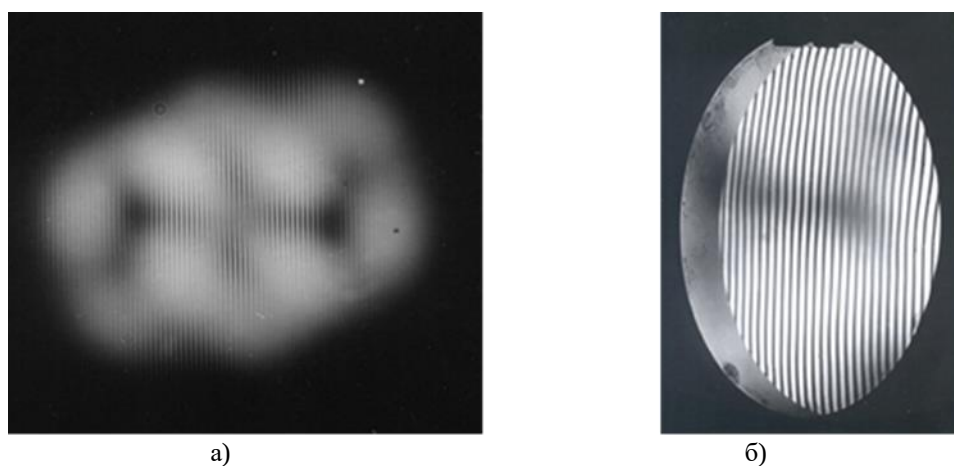


Рис. 4. Інтерференційні картини для пучків із різною розбіжністю θ
а) $\theta = 8'15''$; б) $\theta = 1'48''$ (зменшено в 3 рази)

Fig. 4. Interference patterns for beams with different divergence θ
а) $\theta = 8'15''$; б) $\theta = 1'48''$ (reduced by 3 times)

ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРАХУНКІВ ТА ЕКСПЕРИМЕНТІВ

В результаті досліджень описаних вище вимірювальних пристроїв встановлено наступне:

- для початкового пучка випромінювання лазера ЛГ-56 з кутом розбіжності $\sim 10'$ обидва методи дають результати, що збігаються один з одним з точністю близько 2% ;
- зі зменшенням кута розбіжності, тобто при зміні місцезнаходження перетяжки, точність збігу результатів зменшується;
- рекомендований стандартом ISO 11146-1 метод січень доцільно використовувати для визначення місцезнаходження перетяжки пучків з кутами розбіжності, що перевищують $30''$, при цьому похибка вимірювань складає близько 10% . Причиною обмеження діапазону вимірювань є збільшення похибки визначення місцезнаходження перетяжки;

- інтерференційний метод доцільно використовувати для визначення місцезнаходження перетяжок пучків з кутами розбіжності, що перевищують 5', при цьому похибка вимірювання не більше 5%. Причиною обмеження діапазону вимірювань є зменшення до двох кількості інтерференційних смуг, що спостерігаються в відбитому від пластини пучку випромінювання. Передбачається, що діапазон вимірювань можна розширити, змінивши розміри плоскопаралельної пластини.

ВИСНОВКИ

Розроблено інтерферометричний метод визначення місцезнаходження перетяжки лазерного пучка, що реалізує відому взаємозалежність між кривизною хвильового фронту в певному поперечному перерізі пучка випромінювання та відстанню від цього перерізу до перетяжки пучка.

Проведені дослідження підтвердили працездатність інтерферометричного методу визначення місцезнаходження перетяжки лазерного випромінювання, а отримані результати дозволяють рекомендувати цей метод як найбільш точний серед відомих на даний час.

Процес лабораторних досліджень проводився із залученням досить складних і громіздких універсальних оптичних приладів та прецизійних вимірювальних інструментів. Розробка спеціалізованого приладу, керованого мікроконтролером, дозволить суттєво скоротити час одиничного вимірювання завдяки спрощенню операцій оптичного юстування, встановлення кута вимірювання, процесу сканування інтерференційної картини та обробки отриманих даних.

Також слід зазначити, що через значно більшу складність експлуатації інтерферометр Майкельсона доцільно застосовувати для унікальних вимірювань у тих випадках, коли використання ширококутних плоскопаралельних пластин великої товщини та ваги обмежується технологічними можливостями їх виготовлення. Застосування інтерферометра Майкельсона орієнтоване на перспективні потреби, тоді як існуючий рівень потреб цілком може бути задоволений використанням тих плоскопаралельних пластин, промислове виробництво яких уже освоєно на цей час.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Mohl, S. Kaldun, C. Kunz, F. A. Muller, U. Fuchs, and S. Graf, "Tailored focal beam shaping and its application in laser material processing", J. Laser Appl. **31**, 042019 (2019). <https://doi.org/10.2351/1.5123051>
2. Y. Mi, S. Mahade, F. Sikstrom, I. Choquet, S. Joshi, and A. Ancona, "Conduction mode laser welding with beam shaping using a deformable mirror", Opt. Laser Technol. **148**, 107718 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107718>
3. N. Levichev, P. Herwig, A. Wetzig, and J. R. Duffou, "Towards robust dynamic beam shaping for laser cutting applications", Proc. CIRP, **111**, 746 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.08.116>
4. A. R. Bakhtari, H. K. Sezer, O. E. Canyurt, O. Eren, M. Shah, and S. Marimuthu, "A Review on Laser Beam Shaping Application in Laser-Powder Bed Fusion", Adv. Eng. Mater., **26**, 2302013 (2024). <https://doi.org/10.1002/adem.202302013>
5. O. Savchenko, in: Laser technologies in orthodontic practice – Achievements and prospects, Conference proceedings of the International scientific and practical conference (Seoul, Republic of Korea, 2019), pp. 109-114. <https://doi.org/10.36074/22.12.2019.v1.35>
6. K. J. Gasvik, Optical Metrology, 3rd ed., (John Wiley & Sons, Ltd, 2002), 359 p.
7. H. Le, P. Penchev, A. Henrottin, D. Bruneel, V. Nasrollahi, J. A. Ramos-de-Campos, and S. Dimov, "Effects of Top-hat Laser Beam Processing and Scanning Strategies in Laser Micro-Structuring", Micromachines, **11**, 221 (2020). <https://doi.org/10.3390/mi11020221>
8. A. Forbes, F. Dickey, M. DeGama, and A. du Plessis, "Wavelength tunable laser beam shaping", Opt. Lett., **37**, 49 (2012). <https://doi.org/10.1364/OL.37.000049>
9. M.A. Moiseev, E.V. Byzov, S.V. Kravchenko, and L. L. Doskolovich, "Design of LED refractive optics with predetermined balance of ray deflection angles between inner and outer surfaces", Optics Express, **23**, A1140 (2015). <https://doi.org/10.1364/OE.23.0A1140>
10. C. Rosales-Guzmán, and A Forbes, How to Shape Light with Spatial Light Modulators, SPIE. **30**, 57 (2017).
11. T. Häfner, J. Strauß, C. Roider, J. Heberle, and M. Schmidt, "Tailored laser beam shaping for efficient and accurate microstructuring", Applied Physics A, **124**, 111 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00339-017-1530-0>
12. C. Halbhuber, "Heat conduction joining with the multispot focusing lens: Joining plastics and metal", PhotonicsViews, **19**, 60 (2022). <https://doi.org/10.1002/phvs.202200044>

13. A. G. Nalimov, V. V. Kotlyar, S. S. Stafeev, and E. S. Kozlova, "Metalens for Detection of a Topological Charge", Optical Memory and Neural Networks, 32(S1), S187 (2023). <https://doi.org/10.3103/S1060992X23050144>
14. I. V. Petrusenko, and Yu. K. Sirenko, "Generalized Mode-Matching Technique in the Theory of Guided Wave Diffraction. Part 3: Wave Scattering by Resonant Discontinuities", Telecommunications and Radio Engineering, 72, 555 (2013). <https://www.dl.begellhouse.com/journals/0632a9d54950b268,3ec7deeb5e01313f,2b55c8e851151bf6.html?sgstd=1>
15. A. E. Mandel, and A. S. Perin, "Study of the efficiency of radiation input and losses at the joints of optical fiber", Tomsk: TUSUR, 2018. – 54 p. <https://studfile.net/preview/16874330>
16. O. B. Kovalev, I. O. Kovaleva, and V. V. Belyaev, "Ray tracing method for simulation of laser beam interaction with random packings of powders", AIP Conf. Proc., 1939, 020028 (2018). <https://doi.org/10.1063/1.5027340>
17. H. Kogelnik and T. Li, "Laser beams and Resonators", Appl. Opt., 5, 1550 (1966). <https://doi.org/10.1364/AO.5.001550>
18. J. A. Arnaud, "Gaussian laser beam-waist radius measuring apparatus", Patent United States No. 13,612,885 (10 Dec. 1969).
19. J. A. Arnaud, "Apparatus for locating and measuring the beam waist radius of a Gaussian laser beam", Patent United States No. 3617755A (11 Febr., 1971).
20. E. H. A. Granneman and M. J. van der Wiel, "Laser beam waist determination by means of multiphoton ionization", Rev. Sci. Instrum., 46, 332 (1975). <https://doi.org/10.1063/1.1134202>
21. Y. Suzaki and A. Tachibana, "Measurement of the Gaussian laser beam divergence", Appl. Opt., 16, 1481 (1975). <https://doi.org/10.1364/AO.16.001481>
22. G. N. Vinokurov, V. A. Gorbunov, V. P. Dyatlov, V. N. Sizov and A. D. Starikov, "Method for the determination of the position of the focal plane of converging laser beams", Quantum Electronics, 6, 364 (1976). <https://doi.org/10.1070/QE1976v006n03ABEH011092>
23. E. Stijns, "Measuring the spot size of a Gaussian beam with an oscillating wire", IEEE J. Quantum Electron., QE-16, 1298 (1980). <https://doi.org/10.1109/JQE.1980.1070431>
24. Y. C. Kiang and R. W. Lang, "Measuring focused Gaussian beam spot sizes: a practical method", Appl. Opt., 22, 1296 (1983). <https://doi.org/10.1364/AO.22.001296>
25. J. T. Luxon, D. E. Parker, and J. Karkheck, "Waist location and Rayleigh range for higher-order mode laser beams", Appl. Opt., 23, 2088 (1984). <https://doi.org/10.1364/AO.22.001296>
26. S. Nemoto, "Determination of waist parameters of a Gaussian beam", Appl. Opt., 25, 3859 (1986). <https://doi.org/10.1364/AO.25.003859>
27. S. Nemoto, "Waist shift of a Gaussian beam by plane dielectric interfaces", Appl. Opt., 27, 1833 (1988). <https://doi.org/10.1364/AO.27.001833>
28. P. D. Gupta and S. Bhargava, "An experiment with Gaussian laser beam", Am. J. Phys., 56, 563 (1988). <https://doi.org/10.1119/1.15555>
29. S. Nemoto, "Waist shift of a Gaussian beam by a dielectric plate", Appl. Opt., 28, 1643 (1989). <https://doi.org/10.1364/AO.28.001643>
30. P. B. Chipple, "Beam waist and M2 measurement using a finite slit", Opt. Eng., 33, 461 (1994). <https://doi.org/10.1117/12.169739>
31. C. R. C. Wang, C. C. Hsu, W. Y. Liu, W. C. Tsai, and W. B. Tzeng, "Determination of laser beam waist using photoionization time-of-flight", Rev. Sci. Instrum., 65, 2776 (1994). <https://doi.org/10.1063/1.1144615>
32. J. P. Landry, "Optical oblique-incidence reflectivity difference microscopy: Application to label-free detection of reactions in biomolecular microarrays, (University of California, Davis 2008).
33. J. Wang and J. P. Barton, "Actual focal length of a symmetric biconvex microlens and its application in determining the transmitted beam waist position", Appl. Opt., 49, 5828 (2010). <https://doi.org/10.1364/AO.49.005828>
34. A. Balbuena Ortega, M. L. Arroyo Carrasco, J. A. Dávila Pintle, M. M. Méndez Otero, and M. D. Iturbe Castillo, "New Method to characterize Gaussian beams", Proc. SPIE 8011, 22nd Congress of the International Commission for Optics: Light for the Development of the World, 80114X (25 October 2011). <https://doi.org/10.1117/12.902192>
35. Y. You, J. Urakawa, A. Rawankar, A. Aryshev, H. Shimizu, Y. Honda, L. Yan, W. Huang, and C. Tang, "Measurement of beam waist for an optical cavity based on Gouy phase", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 694, 6 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.07.022>
36. E. A. Bibikova, N. Al-wassiti, and N. D. Kundikova, "Diffraction of a Gaussian beam near the beam waist", J. Eur. Opt. Soc.-Rapid Publ., 15, 17 (2019). <https://doi.org/10.1186/s41476-019-0113-4>

37. ISO 11146-1:2021 “Lasers and laser-related equipment: – Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios – Part 1: Stigmatic and simple astigmatic beams”. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:11146:-1:ed-2:v1:en>
38. ISO 11146-2:2021 “Lasers and laser-related equipment: – Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios – Part 2: General astigmatic beams”. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:11146:-2:ed-2:v1:en>
39. ISO/TR 11146-3:2004 “Lasers and laser-related equipment: – Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios – Part 3: Intrinsic and geometrical laser beam classification, propagation and details of test methods”. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:tr:11146:-3:ed-1:v1:en>

REFERENCES

1. Mohl, S. Kaldun, C. Kunz, F. A. Muller, U. Fuchs, and S. Graf, “Tailored focal beam shaping and its application in laser material processing”, J. Laser Appl. **31**, 042019 (2019). <https://doi.org/10.2351/1.5123051>
2. Y. Mi, S. Mahade, F. Sikstrom, I. Choquet, S. Joshi, and A. Ancona, “Conduction mode laser welding with beam shaping using a deformable mirror”, Opt. Laser Technol. **148**, 107718 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107718>
3. N. Levichev, P. Herwig, A. Wetzig, and J. R. Dufloy, “Towards robust dynamic beam shaping for laser cutting applications”, Proc. CIRP, **111**, 746 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.08.116>
4. A. R. Bakhtari, H. K. Sezer, O. E. Canyurt, O. Eren, M. Shah, and S. Marimuthu, “A Review on Laser Beam Shaping Application in Laser-Powder Bed Fusion”, Adv. Eng. Mater., **26**, 2302013 (2024). <https://doi.org/10.1002/adem.202302013>
5. O. Savchenko, in: Laser technologies in orthodontic practice – Achievements and prospects, Conference proceedings of the International scientific and practical conference (Seoul, Republic of Korea, 2019), pp. 109-114. <https://doi.org/10.36074/22.12.2019.v1.35>
6. K. J. Gasvik, Optical Metrology, 3rd ed., (John Wiley & Sons, Ltd, 2002), 359 p.
7. H. Le, P. Penchev, A. Henrottin, D. Bruneel, V. Nasrollahi, J. A. Ramos-de-Campos, and S. Dimov, “Effects of Top-hat Laser Beam Processing and Scanning Strategies in Laser Micro-Structuring”, Micromachines, **11**, 221 (2020). <https://doi.org/10.3390/mi11020221>
8. A. Forbes, F. Dickey, M. DeGama, and A. du Plessis, “Wavelength tunable laser beam shaping”, Opt. Lett., **37**, 49 (2012). <https://doi.org/10.1364/OL.37.000049>
9. M.A. Moiseev, E.V. Byzov, S.V. Kravchenko, and L. L. Doskolovich, “Design of LED refractive optics with predetermined balance of ray deflection angles between inner and outer surfaces”, Optics Express, **23**, A1140 (2015). <https://doi.org/10.1364/OE.23.0A1140>
10. C. Rosales-Guzmán, and A Forbes, How to Shape Light with Spatial Light Modulators, SPIE. **30**, 57 (2017).
11. T. Häfner, J. Strauß, C. Roider, J. Heberle, and M. Schmidt, “Tailored laser beam shaping for efficient and accurate microstructuring”, Applied Physics A, **124**, 111 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00339-017-1530-0>
12. C. Halbhauer, “Heat conduction joining with the multispot focusing lens: Joining plastics and metal”, PhotonicsViews, **19**, 60 (2022). <https://doi.org/10.1002/phvs.202200044>
13. A. G. Nalimov, V. V. Kotlyar, S. S. Stafeyev, and E. S. Kozlova, “Metalens for Detection of a Topological Charge”, Optical Memory and Neural Networks, **32**(S1), S187 (2023). <https://doi.org/10.3103/S1060992X23050144>
14. I. V. Petrusenko, and Yu. K. Sirenko, “Generalized Mode-Matching Technique in the Theory of Guided Wave Diffraction. Part 3: Wave Scattering by Resonant Discontinuities”, Telecommunications and Radio Engineering, **72**, 555 (2013). <https://www.dl.begellhouse.com/journals/0632a9d54950b268,3ec7deeb5e01313f,2b55c8e851151bf6.html?sgstd=1>
15. A. E. Mandel, and A. S. Perin, “Study of the efficiency of radiation input and losses at the joints of optical fiber”, Tomsk: TUSUR, 2018. – 54 p. <https://studfile.net/preview/16874330>
16. O. B. Kovalev, I. O. Kovaleva, and V. V. Belyaev, “Ray tracing method for simulation of laser beam interaction with random packings of powders”, AIP Conf. Proc., **1939**, 020028 (2018), <https://doi.org/10.1063/1.5027340>
17. H. Kogelnik and T. Li, “Laser beams and Resonators”, Appl. Opt., **5**, 1550 (1966). <https://doi.org/10.1364/AO.5.001550>
18. J. A. Arnaud, “Gaussian laser beam-waist radius measuring apparatus”, Patent United States No. 13,612,885 (10 Dec. 1969).
19. J. A. Arnaud, “Apparatus for locating and measuring the beam waist radius of a Gaussian laser beam”, Patent United States No. 3617755A (11 Febr., 1971).

20. E. H. A. Granneman and M. J. van der Wiel, "Laser beam waist determination by means of multiphoton ionization", *Rev. Sci. Instrum.*, **46**, 332 (1975). <https://doi.org/10.1063/1.1134202>
21. Y. Suzaki and A. Tachibana, "Measurement of the Gaussian laser beam divergence", *Appl. Opt.*, **16**, 1481 (1975). <https://doi.org/10.1364/AO.16.001481>
22. G. N. Vinokurov, V. A. Gorbunov, V. P. Dyatlov, V. N. Sizov and A. D. Starikov, "Method for the determination of the position of the focal plane of converging laser beams", *Quantum Electronics*, **6**, 364 (1976). <https://doi.org/10.1070/QE1976v006n03ABEH011092>
23. E. Stijns, "Measuring the spot size of a Gaussian beam with an oscillating wire", *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-16**, 1298 (1980). <https://doi.org/10.1109/JQE.1980.1070431>
24. Y. C. Kiang and R. W. Lang, "Measuring focused Gaussian beam spot sizes: a practical method", *Appl. Opt.*, **22**, 1296 (1983). <https://doi.org/10.1364/AO.22.001296>
25. J. T. Luxon, D. E. Parker, and J. Karkheck, "Waist location and Rayleigh range for higher-order mode laser beams", *Appl. Opt.*, **23**, 2088 (1984). <https://doi.org/10.1364/AO.22.001296>
26. S. Nemoto, "Determination of waist parameters of a Gaussian beam", *Appl. Opt.*, **25**, 3859 (1986). <https://doi.org/10.1364/AO.25.003859>
27. S. Nemoto, "Waist shift of a Gaussian beam by plane dielectric interfaces", *Appl. Opt.*, **27**, 1833 (1988). <https://doi.org/10.1364/AO.27.001833>
28. P. D. Gupta and S. Bhargava, "An experiment with Gaussian laser beam", *Am. J. Phys.*, **56**, 563 (1988). <https://doi.org/10.1119/1.15555>
29. S. Nemoto, "Waist shift of a Gaussian beam by a dielectric plate", *Appl. Opt.*, **28**, 1643 (1989). <https://doi.org/10.1364/AO.28.001643>
30. P. B. Chipple, "Beam waist and M2 measurement using a finite slit", *Opt. Eng.*, **33**, 461 (1994). <https://doi.org/10.1117/12.169739>
31. C. R. C. Wang, C. C. Hsu, W. Y. Liu, W. C. Tsai, and W. B. Tzeng, "Determination of laser beam waist using photoionization time-of-flight", *Rev. Sci. Instrum.*, **65**, 2776 (1994). <https://doi.org/10.1063/1.1144615>
32. J. P. Landry, "Optical oblique-incidence reflectivity difference microscopy: Application to label-free detection of reactions in biomolecular microarrays, (University of California, Davis 2008).
33. J. Wang and J. P. Barton, "Actual focal length of a symmetric biconvex microlens and its application in determining the transmitted beam waist position", *Appl. Opt.*, **49**, 5828 (2010). <https://doi.org/10.1364/AO.49.005828>
34. A. Balbuena Ortega, M. L. Arroyo Carrasco, J. A. Dávila Pintle, M. M. Méndez Otero, and M. D. Iturbe Castillo, "New Method to characterize Gaussian beams", *Proc. SPIE 8011, 22nd Congress of the International Commission for Optics: Light for the Development of the World, 80114X (25 October 2011)*. <https://doi.org/10.1117/12.902192>
35. Y. You, J. Urakawa, A. Rawankar, A. Aryshev, H. Shimizu, Y. Honda, L. Yan, W. Huang, and C. Tang, "Measurement of beam waist for an optical cavity based on Gouy phase", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, **694**, 6 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.07.022>
36. E. A. Bibikova, N. Al-wassiti, and N. D. Kundikova, "Diffraction of a Gaussian beam near the beam waist", *J. Eur. Opt. Soc.-Rapid Publ.*, **15**, 17 (2019). <https://doi.org/10.1186/s41476-019-0113-4>
37. ISO 11146-1:2021 "Lasers and laser-related equipment: – Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios – Part 1: Stigmatic and simple astigmatic beams". <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:11146:-1:ed-2:v1:en>
38. ISO 11146-2:2021 "Lasers and laser-related equipment: – Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios – Part 2: General astigmatic beams". <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:11146:-2:ed-2:v1:en>
39. ISO/TR 11146-3:2004 "Lasers and laser-related equipment: – Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios – Part 3: Intrinsic and geometrical laser beam classification, propagation and details of test methods". <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:tr:11146:-3:ed-1:v1:en>

Стаття надійшла до редакції: 22 жовтня 2024 р.

Рекомендовано до друку: 03 грудня 2024 р.

DETERMINATION OF THE LASER BEAM WAIST

M. M. Dubinin, V. A. Maslov, K. I. Muntean

V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

Background: An interferometric method for measuring the position of the beam waist of laser radiation, which defines the origin of the coordinate system for the spatial parameters of the beam, is considered. Information about the location of the beam waist plays a crucial role in laser ballistic gravimetry, laser interferometry of

lengths, optical metrology, and precision laser barometry.

The aim of the work: Improving the accuracy of beam waist location while simultaneously reducing the complexity of the measurement process.

Materials and methods: A method has been proposed that leverages the dependence of the wavefront curvature of the beam on the distance to the beam waist. The initial laser beam is split into a reference and an information beam using a shear interferometer, forming a nonlocalized interference field in the reflected light. The period of the interference fringes, observed at any cross-section of the interference field, contains information about the position of the beam waist relative to this cross-section. The distance from the beam waist to the plane where the fringe period is registered is calculated using Gaussian optics formulas.

Results: An interferometric method for determining the position of the laser beam waist has been developed, implementing the known relationship between the wavefront curvature in a given cross-section of the radiation beam and the distance from this cross-section to the beam waist. Experimental studies confirmed the viability of the interferometric method for determining the position of the laser beam waist. The obtained results allow recommending this method as the most accurate currently available.

Conclusion: Studies of measurement devices revealed that for the LG-56 laser with a divergence angle of about 10', both methods ensure result consistency with an accuracy of approximately 2%. However, as the divergence angle decreases, particularly with changes in the beam waist position, the accuracy of result consistency diminishes. The cross-section method, recommended by ISO 11146-1 standards, is appropriate for determining the beam waist position for beams with divergence angles exceeding 30", though it involves an error of about 10%. The limitations of this method arise from increased errors in determining the waist position. The interferometric method is effective for identifying beam waists with divergence angles exceeding 5', providing an error of no more than 5%.

KEYWORDS: laser, Gaussian beam, waist location, wavefront curvature, shear interferometer, two-beam interference, period of the interference fringes.

The article was received by the editors: October 22 2024

The article is recommended for printing: December 03 2024