

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 535.41:535.8

DOI: 10.17223/00213411/64/3/166

С.Д. ИВАНОВА¹, В.Б. ОШУРКО¹, Д.Д. ШЕМОНАЕВ²**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИНЫ КОГЕРЕНТНОСТИ
С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРФЕРОМЕТРА С ТРЕУГОЛЬНЫМ ХОДОМ ЛУЧЕЙ ***

Ключевые слова: длина когерентности, лазерное излучение, временная когерентность, интерферометр с треугольным ходом лучей.

Длина когерентности является одним из основных параметров излучения лазера. Она важна при построении оптических схем для различных задач интерферометрии, оптической обработки информации, голографии [1–3]. На практике часто именно длина когерентности лазера накладывает ограничения на размеры объекта и зоны наблюдения интерференционной картины. Когерентность источника излучения также влияет на качество восстановленного голограммой изображения. Временная когерентность определяет максимально возможную глубину сцены, пространственная когерентность – качество изображения в направлении, перпендикулярном оптической оси. Эти две независимые характеристики излучения, как правило, исследуют отдельно: пространственную когерентность – при условиях, когда модуль функции временной когерентности можно считать равным единице, временную когерентность – при условиях, когда модуль функции пространственной когерентности можно считать равным единице.

В данной работе исследовалась временная когерентность. Временная когерентность определяет корреляцию фаз в разных точках волнового поля, отличающихся некоторой временной задержкой, которая не может быть сколь угодно велика для данного источника когерентного излучения. Максимальное значение временной задержки t_c , при которой излучение ещё можно считать когерентным, называется временем когерентности. Время когерентности определяется монохроматичностью излучения и связано со спектральной шириной излучения $\Delta\nu$ обратной зависимостью:

$$t_c = 1 / \Delta\nu. \quad (1)$$

Длина когерентности определяется как произведение t_c на скорость света c :

$$l_c = ct_c. \quad (2)$$

Поэтому длина когерентности связана со спектральной шириной излучения:

$$l_c = c / \Delta\nu. \quad (3)$$

В работе [4] была предложена оптическая схема для измерения длины когерентности лазерного излучения с помощью записи голограммы плоской диффузно-отражающей поверхности. Эта поверхность освещалась наклонно, поэтому разность оптических путей между объектным и опорным пучками непрерывно менялась вдоль поверхности от нуля до значения, заведомо превышающего длину когерентности. Там, где разность оптических путей (оптическая разность хода) превышала длину когерентности, объектный и опорный пучки не интерферировали и изображение на голограмму не записывалось, а при нулевой разности хода фиксировалась максимально контрастная интерференционная картина. Соответственно интенсивность света восстановленного изображения менялась от максимального значения (для нулевой разности хода) до нуля (при разности хода более длины когерентности). Измеряя расстояние, на котором интенсивность падала до нуля, можно было определить длину когерентности излучения лазера.

Однако при попадании лазерного излучения на диффузно-отражающую поверхность неизбежно возникал спекл-эффект. В результате на голограмму записывалась случайная спекл-структура, что приводило к появлению шумов в восстановленном изображении. Восстановление такого «лишнего» изображения существенно искажает результаты измерений.

Избежать спекл-эффекта можно, если не использовать диффузно-отражающую поверхность. Соответствующая оптическая схема изображена на рис. 1.

Эта схема представляет собой модифицированную схему циклического интерферометра Харихарана – Сена с треугольным ходом лучей [5], в которой формируются распространяющиеся вдоль одной оси опорная и объектная волны. На фотопластинку (голограмму) записывается результат интерференции двух волн от одного и того же источника, при этом разность оптических путей непрерывно меняется за счет наклонно-

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания, заявка № 0707-2020-0025.

го расположения фотопластинки. Лазерное излучение 1 делится по амплитуде с помощью полупрозрачного зеркала 2 . Зеркала 3 и 4 направляют два получившихся пучка на фотопластинку 5 (на нее записывается голограмма). Если обозначить Δx – расстояние от прямой OO' до фотопластинки (вдоль оптической оси), то разность оптических путей будет равна

$$x = 2\Delta x. \quad (4)$$

На основании геометрии схемы записи разность оптических путей (разность хода) x определяется для каждой точки по расстоянию y от этой точки до оптической оси (проходящей через центр фотопластинки) и тангенсу угла α между осью OO' и фотопластинкой:

$$x = 2\Delta x = 2y \operatorname{tg} \alpha. \quad (5)$$

Таким образом, разность оптических путей плавно меняется от нуля в центре фотопластинки до максимального значения на краях.

Восстанавливается изображение по стандартной схеме тем же лазерным излучением. Для удобства наблюдения используется полупрозрачное зеркало (отраженный пучок света является восстанавливающим, а прошедший – восстановленным). Интенсивность восстановленного изображения

максимальна при $x = 0$ (точка $y = 0$) и минимальна при $x = l_c$ (точка $y = \frac{l_c}{2 \operatorname{tg} \alpha}$). Тогда длина когерентности

определяется через расстояние Δy между точками максимальной и минимальной интенсивности восстановленного изображения в направлении, перпендикулярном оптической оси:

$$l_c = 2\Delta y \operatorname{tg} \alpha. \quad (6)$$

При $\alpha = 45^\circ$ получается $l_c = 2\Delta y$, т.е. длина когерентности равна поперечной ширине восстановленной плоской волны, измеренной перпендикулярно оптической оси (параллельно прямой OO').

Исследование когерентности источников излучения важно для многих прикладных задач когерентной оптики. Для разных областей применения требования к когерентности источников различны. Для интерферометрии и голографии требуются источники с высокой когерентностью излучения и соответственно с большой длиной когерентности [6]. Излучение с низкой временной когерентностью используется для когерентной томографии [7], где данные о времени и длине когерентности могут быть использованы для расчета разрешения. Предложенный метод измерения длины когерентности лазерного излучения, в отличие от описанного в работе [4], позволяет избежать использования диффузно-отражающих элементов и связанного с этим спекл-эффекта, приводящего к искажениям и зашумленности восстановленного изображения. Оптическая схема записи голограммы является довольно простой в плане сборки и отличается устойчивостью к вибрациям, так как содержит небольшое число оптических элементов, нуждающихся в юстировке и закреплении. Описанный способ измерения длины когерентности обладает наглядностью и может иметь методологическое значение, в том числе для визуализации информации о когерентных свойствах излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kreis T. Handbook of Holographic Interferometry: Optical and Digital Methods. – Berlin: Wiley Blackwell, 2005.
2. Кречет В.Г., Ошурко В.Б., Иванова С.Д. // Изв. вузов. Физика. – 2019. – Т. 62. – № 2. – С. 89–95.
3. Кречет В.Г., Ошурко В.Б., Иванова С.Д. // Изв. вузов. Физика. – 2019. – Т. 62. – № 12. – С. 3–11.
4. Денисюк Ю.Н., Стаселько Д.Н., Смирнов А.Г. // Опт. и спектр. – 1969. – Т. 26. – № 3. – С. 413–420.
5. Hariharan P. and Sen D. // J. Opt. Soc. Am. – 1959. – V. 49. – No. 11. – P. 1105–1105.
6. Штанько А.Е., Каленков Г.С., Иванова С.Д., Калужков О.А. // Измерительная техника. – 2013. – № 11. – С. 23–26.
7. Вишняков Г.Н., Левин Г.Г., Минаев В.Л., Некрасов Н.А. // Опт. и спектр. – 2016. – Т. 121. – № 6. – С. 1020–1028.

Поступило в редакцию 03.08.2020.

¹ Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва, Россия

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия