

УДК 681.708; 535.231; 535.08

ИЗМЕРЕНИЕ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРОВ Исаевич А.В.

*ГНУ «Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассмотрены методы измерения волнового фронта и измерительная установка для контроля формы волнового фронта в поперечном сечении лазерного пучка. Приводятся методы реконструкции волнового фронта и результаты исследования метрологических характеристик установки.

Ключевые слова: волновой фронт, измерительная установка, форма волнового фронта, лазерный пучок, датчик Шака-Гартмана.

MEASURING THE WAVE FRONT OF LASER RADIATION Isaevich A.

*B.I. Stepanov Institute of Physics of the NAS of Belarus
Minsk, Belarus*

Abstract. Methods of wavefront measurement and a measuring unit for monitoring the shape of the wavefront in the cross section of a laser beam are considered. The methods of reconstruction of the wavefront and the results of the study of the metrological characteristics of the unit are presented.

Keywords: wavefront, measuring unit, wavefront shape, laser beam, Shak-Hartman sensor.

*Адрес для переписки: Исаевич А.В., пр. Независимости, 68-2, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: a.isaevich@ifanbel.bas-net.by*

Введение. Измерение волнового поля оптического излучения необходимо для решения широкого круга исследовательских и прикладных задач оптической метрологии, лазерной физики, медицины, адаптивной оптики, астрономии и многих других областей науки и техники. Прежде всего, такие задачи возникают в лазерной физике, где требуется контроль качества генерируемых лазерных пучков, а также при создании адаптивных оптических систем.

Методы измерения волнового фронта. Форма волнового фронта непосредственно связана с фазой волны, но в оптическом диапазоне фаза не может быть измерена непосредственно, в связи с этим необходимо трансформировать фазу волны в интенсивность. Поэтому методы измерений формы волнового фронта в оптике основаны на таком преобразовании исходного поля излучения, в результате которого появляется зависимость интенсивности оптического излучения на фотоприемнике от искомой фазовой функции. Устройства, измеряющие форму волнового фронта, можно разбить на два вида: интерферометрические и геометрические.

В интерферометрических датчиках используется интерференция двух пучков излучения, взятых от монохроматического источника, причем один из них служит опорным, а другой отличается от него на величину оптической разности хода, подлежащей измерению. На сегодняшний день интерферометры обладают наилучшими точностными характеристиками среди всех устройств, предназначенных для фазовых измерений в оптике. Однако в силу своих особенностей они применимы только для решения достаточно узкого круга задач и не могут являться

оптимальным решением задачи измерения волнового фронта излучения лазеров.

Другими широко распространенными устройствами для измерения фазы оптического волнового поля являются датчики, основанные на законах геометрической оптики и использующие метод Гартмана [1]. Исследуемый волновой фронт разбивается на отдельные пучки, для каждого из которых определяется направление его распространения, которое соответствует локальному наклону исходного волнового фронта в данной точке. По локальным наклонам волнового фронта восстанавливается распределение фазы исследуемого волнового поля. Основными преимуществами метода Гартмана являются простота реализации и интерпретации результатов, а также возможность измерить фазовый фронт на всей апертуре исследуемого волнового пучка за одно измерение. В то же время метод Гартмана обладает рядом серьезных недостатков.

Устранить недостатки метода Гартмана позволяет датчик Шака-Гартмана, в котором вместо диафрагмы используется растр из микролинз [2]. Волновой фронт исследуемого пучка излучения разбивается растром из микролинз на субапертуры. Каждый из образовавшихся пучков фокусируется соответствующей линзой, в результате чего в фокальной плоскости линз образуется массив фокальных пятен, по положению которых, зарегистрированному при помощи фотоприемника, определяют локальный наклон волнового фронта, падающего на каждую из микролинз. Когда проходящий волновой фронт плоский, все сфокусированные изображения расположены в правильной сетке, обусловленной расположением линз. Если падающая волна имеет какие-либо искаже-

ния, то изображения смещаются со своих номинальных значений. Изображение фокальных пятен называется гартманограммой. По ее виду можно судить об искривленности волнового фронта.

Измерительная установка. Основными элементами установки для контроля формы волнового фронта и пространственных характеристик излучения лазеров, созданной в Институте физики НАН Беларуси [3] являются датчики Шака-Гартмана производства фирмы Imagine Optic и анализаторы профиля лазерного пучка производства фирмы Orhir Optronics Solutions. Принцип работы измерительной установки основан на одновременном измерении распределений плотности мощности $E(x,y,z)$ [энергии $H(x,y,z)$ для импульсных лазеров] и фазы $\Phi(x,y,z)$ лазерного излучения в поперечном сечении пучка с координатой z . Для этого анализатор профиля лазерного пучка и датчик Шака-Гартмана помещается в положение с координатой z нормально к направлению распространения излучения или используется оптическая система, проецирующая изображение плоскости с координатой z на приемные площадки анализатора и датчика Шака-Гартмана.

С помощью специального программного обеспечения производится обработка изображений и определяются распределения плотности мощности (энергии) на основании которых рассчитываются пространственные характеристики лазерного излучения, а также положения пятен на детекторе датчика Шака-Гартмана. Эти положения затем выражаются как локальные наклоны с использованием расстояния между пикселями детектора и точного расстояния между матрицей микролинз, и приемной поверхностью детектора. Поверхность волнового фронта или волновой фронт получается в результате расчета, основанного на локальных наклонах, измеренных датчиком Шака-Гартмана. Реконструкция волнового фронта осуществляется двумя методами: прямого численного интегрирования (зональная реконструкция) и модальной аппроксимации с использованием полиномов Цернике или Лежандра. Преимущества зональной реконструкции волнового фронта: может адаптироваться к любой возможной форме зрачка. Ее концепция интегрирования сигналов локальных наклонов позволяет сохранить всю пространственную высокочастотную информацию. Недостатки: реконструированный волновой фронт чувствителен к любому шуму, присутствующему на локальных наклонах. При зональной реконструкции не вычисляются коэффициенты полиномов, которые часто полезны в оптической метрологии.

Преимущества модальной реконструкции заключается в обеспечении наилучшего определения низких пространственных частот волнового фронта. Эти низкие частоты часто представляют интерес для пользователей (наклоны, кривизна и

абберации третьего порядка). Этот метод вычисляет коэффициенты многочленов восстановления (Лежандра или Цернике). Многочлены Цернике часто используются в области оптической метрологии. Основным недостатком метода модальной реконструкции является то, что «он фильтрует» высокие пространственные частоты. Пространственные высокочастотные данные фильтруются во время реконструкции. Он также вводит ограничение: зрачок должен иметь простую форму (круглую или прямоугольную).

Возможности установки. Установка позволяет измерять в поперечном сечении лазерного пучка, перпендикулярном его распространению, пространственные характеристики излучения и распределения локальных градиентов волнового фронта непрерывных и импульсных лазеров, на основании которых рассчитываются в соответствии с требованиями СТБ ИСО 15367-2-2016 [5] следующие параметры лазерного излучения: измеренный и скорректированный волновой фронт, функция абберации волнового фронта, дефокус, нерегулярность волнового фронта, взвешенная среднеквадратическая деформация, коэффициенты полиномов (для модальной реконструкции волнового фронта), воспроизводимость волнового фронта и др.

Исследования метрологических характеристик установки показали, что она обеспечивает измерения локальных наклонов волнового фронта лазерного излучения, на основании которых осуществляется вычисление градиентов волнового фронта и последующая модальная и зональная реконструкция волнового фронта излучения в спектральном диапазоне от 350 до 1700 нм с пространственным разрешением 100 мкм. Максимальный наклон измеряемого волнового фронта излучения составляет $\pm 3^\circ$, минимальный наклон волнового фронта – 0,8 мкрад, минимальный радиус кривизны – 0,01 м, стандартная неопределенность абсолютных измерений волнового фронта не превышает 3 нм, относительных измерений – 1 нм.

Литература

1. Hartmann, J. Objectivuntersuchungen / J. Hartmann // Z. Instrum. – 1904, № 1. – P. 33–97.
2. Platt, B. C. History and principles of Shack-Hartmann wavefront sensing / B. C. Platt, R. Shack // J. Refract Surg. – 2001. – Vol. 17. – P. 573–577.
3. Длугунович, В. А. Установка для измерения волнового фронта излучения лазеров. / В. А. Длугунович, Д. О. Дунец, А. В. Исаевич // Метрология-2019: Тезисы докладов Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27-28 марта 2019 г. / Под общ. ред. канд. техн. наук Гуревича В. Л. – Мн. : БелГИМ, 2019. – С. 89–93.
4. Лазеры и относящееся к лазерам оборудование. Методы испытаний для определения формы волнового фронта лазерного пучка. Часть 2. Датчики Шака-Гартмана : СТБ ISO 15367-2-2018. – Введ. 01.12.18. – Минск: Госстандарт, 2018. – 30 с.