МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.

УДК 681.7.068

Исследование методики измерения хроматической дисперсии фотоннокристаллических волоконных световодов на основе интерференционного метода

Боярская С.Н., студент Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедры «Радиоэлектроника и лазерная техника»

Научный руководитель: Карасик В.Е., д.т.н., профессор Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана baryshnikov@bmstu.ru

За последнее десятилетие произошли существенные изменения в области оптики сверхкоротких импульсов, лазерной физики, оптической метрологии и нелинейной оптики. К такому прорыву привело создание новых типов оптических волокон. Наряду с обычными волокнами для решения задач оптической физики, биомедицины, фотохимии стали широко применяться волокна новой архитектуры – фотонно-кристаллические (микроструктурированные) Волноводные волоконные световоды. моды электромагнитного излучения В таких световодах формируются результате В интерференции волн, возникающих при отражении и рассеянии на микронеоднородностях показателя преломления. Уникальные свойства световодов такого типа открывают новые возможности для осуществления передачи электромагнитного излучения на большие расстояния, нелинейно-оптического преобразования лазерных импульсов, частотных преобразований, изменений спектра, управления параметрами сверхкоротких лазерных импульсов, а также позволяют с высокой эффективностью генерировать суперконтинуум [1]. Особенность фотонно-кристалических волоконных световодов заключается в возможности управления дисперсией волноводных мод за счет изменения структуры световода.

В этой связи приобретает актуальность задача контроля дисперсионных характеристик фотонно-кристаллических световодов, в частности хроматической дисперсии (ХД). Измерение данной характеристики позволит проводить оптимизацию параметров световодов, повышать эффективность нелинейно-оптических процессов, происходящих в световоде, использовать световоды в качестве компенсаторов

хроматической дисперсии, устройств сжатия импульсов, а также в усилителях и преобразователях оптических сигналов [2].

Целью работы является разработка методики измерения хроматической дисперсии фотонно-кристаллических волокнных световодов на основе интерференционного метода. При разработке методики принимались во внимание следующие аспекты:

1) необходимость проведения измерений в широком спектральном диапазоне от 400 нм до 1900 нм;

2) необходимость измерения хроматической дисперсии малых отрезков волокна;

3) измерение значений ХД с высокой точностью (порядка 0,1 пс/нм).

При разработке методики измерений был проведен обзор существующих методов измерения хроматической дисперсии. Для измерения ХД световодов малой длины могут быть использованы фазовый и интерференционный методы. Недостатком фазового метода является необходимость применения дорогостоящей высокочастотной аппаратуры – (набора модуляторов, высокочастотного генератора высокого напряжения, измерителя разности фаз). Кроме того фазовый метод существенно уступает по чувствительности и точности измерений интерференционному методу. По этим причинам для экспериментальной реализации был выбран интерференционный метод [3].

Метод основан на интерферометрическом измерении зависимости относительной групповой задержки от длины волны в исследуемом волокне. Данный метод применяется в сочетании с интерферометром Маха-Цендера, в одно из плеч которого установлен измеряемый образец волокна. Влияние хроматической дисперсии приводит к тому, что разные спектральные компоненты будут распространяться по световоду с разными групповыми скоростями. Интерференционная картина будет наблюдаться только для спектральных компонент оптического излучения, групповая задержка которых в двух плечах интерферометра будет меньше времени когерентности источника излучения.

Описание экспериментальной установки

Для проведения измерений хроматической дисперсии фотонно-кристаллического волокна была разработана установка, схема которой приведена на рис. 1. Установка состоит из источника белого света - генератора суперконтинуума (ГСК) (Supercontinuum SC400-6, Fianium) со специальным акустооптическим фильтром (АОФ) на выходе (АОТF – V1 – N1 – D, Fianium), интерферометра Маха-Цендера со светоделительными пластинами СД1 и СД2 (BSW07, Thorlabs), микропозиционерами, на которых установлены зеркала (Зер1, Зер2, Зер3), диафрагмы, поляризатора, микрообъективов и детекторов оптического излучения (S9227, Натать и Nunavut Deep-Colled InGaAs, Bayspec). Линейки S9227 и Nunavut имеют спектральный режим работы от 400 – 1000 нм

и от 900 до 1700 нм соответственно. В измерительной ветви интерферометра установлена комбинация измеряемого волокна и двух объективов (Об1 и Об2), а именно ахроматического объектива (AC080-10-B, Thorlabs) и микрообъектива (4x/0,13, Olympus). Измеряемое волокно произведено ИРЭ РАН.



Рис. 1. Схема измерителя ХД на основе интерференционного метода

Для определения смещения полос интерференционной картины был разработан специальный алгоритм. Принцип работы алгоритма заключается в измерении величины смешения по положению нескольких максимумов интерференционной картины. Величина смещения зависит от разности фаз между интерферирующими пучками, которая, в свою очередь, зависит от разности групповых задержек в плечах интерферометра.

Для обработки изображений полос интерференционной картины применяется алгоритм центра масс, который подходит для измерения положения центра масс интенсивности полосы с субпиксельным разрешением. Для работы такого алгоритма достаточно выбрать в изображении участок шириной в один период таким образом, чтобы максимум яркости одной полосы располагался как можно ближе к центру этого участка. Затем, для каждого кадра рассчитывается центр масс интенсивности в выбранном окне по формуле [5]

$$z = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} (iV_i)}{\sum_{i=0}^{N-1} V_i}$$
(1)

Зависимость ширины полосы интерференционной картины от длины волны оптического излучения устраняется посредством специальной цифровой обработки, встроенной в алгоритм определения смещения полос интерференционной картины. Для увеличения видности интерференционной картины при измерениях в широком спектральном диапазоне проводится периодическая подстройка интерферометра.

Моделирование групповой задержки для выбранной конструкции

интерферометра

Проведенное математическое моделирование на основании дисперсионных характеристик волокна, представленных предприятием – изготовителем (Таблица 1), позволило рассчитать временную задержку в диапазоне от 400 до 650 нм. Длина волокна 0,5 м.

Таблица 1

Математическое моделирование на основании дисперсионных характеристик волокна

Длина волны λ, нм	Коэффициент ХД
	D, пс/(нм·км)
800	45
1100	0

Для расчета хроматической дисперсии одномодовых волоконных световодов используется эмпирическая формула Селмейера (Sellmeier) [4]

$$\tau(\lambda) = A + B\lambda^2 + C\lambda^{-3} \tag{2}$$

Коэффициенты *A*, *B*, *C* определяются путем решения системы уравнений относительно заданных граничных условий. Коэффициент ХД может быть вычислен по формуле:

$$D(\lambda) = d\tau/d\lambda = 2B\lambda - 2C\lambda^{-3},$$
(3)

где λ - рабочая длина волны, для которой определяется удельная ХД.

Временная задержка на длине волокна L = 0,5 м рассчитывается по формуле:

$$\Delta = \tau(\lambda) \cdot L \tag{4}$$

Результаты моделирования представлены в таблице 2.

Таблица 2

. . .

т сзультаты моделирования	
Длина волны λ, нм	Временная задержка ∆,
	МКС
403	72
451	67
490	52
532	40

Результаты моделирования

Молодежный научно-технический вестник ФС77-51038

Длина волны λ, нм	Временная задержка Δ ,
	мкс
570	32
600	27
630	23
650	20

Согласно результатам моделирования можно сделать вывод, что при приближении длины волны излучения к длине волны нулевой дисперсии временная задержка уменьшается.

Согласно полученной в результате моделирования зависимости периода интерференционной картины от длины волны излучения можно сделать вывод, что при увеличении длины волны ширина полосы интерференционной картины увеличивается по линейному закону (рис. 2). Данная зависимоть может быть легко устранена при обработке результатов измерений.



Рис. 2. График зависимости ширины полосы интерференционной картины d(λ)

В результате моделирования было установлено, что точность определения временной задержки τ(λ) будет тем выше, чем меньше ширина полосы излучения АОФ. Ширина полосы излучения в 3 нм позволяет получить погрешность измерений хроматической дисперсии в пределах ± 0,05 пс/нм (рис. 3).



Рис. 3. График зависимости временной задержки τ(λ): 1 – ширина полосы АОФ 3 нм; 2 – ширина полосы АОФ 6 нм

Экспериментальные исследования

На разработанном стенде были проведены экспериментальные измерения хроматической дисперсии для образца фотонно-кристалического волокна (SC-5.0-1100) в спектральном диапазоне 400-1900 нм. Результаты измерений представлены на рисунке 4. Сплошной линией обозначена зависимость, полученная в результате моделирования, точками обозначена зависимость, полученная в результате измерений.



Рис. 4. Результаты экспериментальных измерений зависимости коэффициента удельной хроматической дисперсии D(λ)

В диапазоне 400-900 нм хроматическая дисперсия была измерена с точностью 0,1 пс/нм, что обусловлено большим количеством итераций и малой шириной полосы излучения АОФ. В диапазоне длин волн от 900 до 1900 нм было проведено три измерения, что обусловлено сложностью юстировки в ИК области спектра. Как можем видеть, Молодежный научно-технический вестник ФС77-51038

зависимость удельной хроматической дисперсии от длины волны, полученная экспериментальным путем, качественно совпадает теоретически рассчитанной.

Выводы:

Таким образом, на основе интерференционного метода предложена методика и реализована экспериментальная установка для измерения хроматической дисперсии фотонно-кристаллических волокон в спектральном диапазоне 400-1900 нм с источника излучения генератора использованием в качестве суперконтинуума. Оригинальностью установки является использование алгоритма смещения полос интерференционной картины, что позволяет исключить механическую модуляцию длины воздушного плеча интерферометра и упростить юстировку установки. Для измеряемого образца световода получено отклонение результатов от теоретических на уровне 10 %. Необходимо произвести доработку методики юстировки установки для оптимизации измерений хроматической дисперсии в ИК области спектра.

Список литературы

- Bowden C. M., Zheltikov A. M. (Eds.) Nonlinear Optics of Photonic Crystal // Featureissue. 2002. № 9. P.19-22.
- 2. Mitschke F. Fiber Optics. Physics and Technology// Springer. 2009. 301 p.
- А.Е. Левченко, А.С. Курков, С.Л. Семенов Измерение дисперсии в волоконных световодах с микроструктурированной оболочкой // Квантовая электроника. 2005. № 9. С. 835 – 838.
- Poli F., Cucinotta A., Selleri S. Photonic Crystal Fibers. Properties and Applications. Springer. 2007. 227 p.
- В.Е. Карасик, В.Л. Толстогузов Пороговая чувствительность интерференционного датчика линейного перемещения с многоэлементным приемником // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Современные проблемы оптотехники. М.: Изд-во МГТУ. 2012.