

С.Н. Боярская, В.А. Лазарев, С.О. Леонов,
А.Б. Пнев

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ХРОМАТИЧЕСКОЙ ДИСПЕРСИИ В ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ВОЛОКОННОМ СВЕТОВОДЕ

Предложен новый подход к измерению хроматической дисперсии фотонно-кристаллических волоконных световодов на основе интерференционного метода в широком диапазоне спектра оптического излучения (400...1 900 нм). Проведено моделирование и получены предварительные результаты. Сформулированы требования к разрабатываемой измерительной установке и определены предельные возможности измерения хроматической дисперсии фотонно-кристаллических волоконных световодов.

E-mail: snboyarskaya@gmail.com

Ключевые слова: хроматическая дисперсия, фотонно-кристаллические волоконные световоды, интерференционный метод, групповая задержка, интерферометр Маха — Цендера.

За последнее десятилетие произошли существенные изменения в области оптики сверхкоротких импульсов, лазерной физики, оптической метрологии и нелинейной оптики, обусловленные применением оптических волокон новых типов — фотонно-кристаллических (микроструктурированных) волоконных световодов. Волноводные моды электромагнитного излучения в таких световодах формируются в результате интерференции волн, возникающих при отражении и рассеянии оптического излучения вследствие изменения показателя преломления. Уникальные свойства световодов такого типа открывают новые возможности для передачи электромагнитного излучения на большие расстояния, нелинейно-оптического преобразования лазерных импульсов, частотных преобразований, изменений спектра излучения, управления параметрами сверхкоротких лазерных импульсов, а также позволяют с высокой эффективностью генерировать суперконтинуум [1]. Особенность фотонно-кристаллических волоконных световодов заключается в возможности управления дисперсией волноводных мод за счет изменения структуры световода [2].

В связи с этим приобретает актуальность задача контроля 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 ХД,

устройств сжатия импульсов, а также в усилителях и преобразователях оптических сигналов.

Целью данной работы является разработка методики измерения ХД фотонно-кристаллических волоконных световодов на основе интерференционного метода без механической модуляции разности хода оптического излучения в ветвях интерферометра при проведении измерений. При этом учитывалась необходимость проведения измерений ХД в широком спектральном диапазоне 400...1900 нм малых отрезков с высокой точностью (порядка 0,1 пс/нм).

При разработке методики измерений проведен обзор существующих методов измерения ХД. Для измерения ХД световодов малой длины можно использовать фазовый и интерференционный методы. Недостатком фазового метода является необходимость применения дорогостоящей высокочастотной аппаратуры (набор модуляторов, высокочастотный генератор высокого напряжения, измеритель разности фаз). Кроме того, фазовый метод существенно уступает по чувствительности и точности измерений интерференционному методу. Для экспериментальной реализации был выбран интерференционный метод [3].

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

Описание экспериментальной установки. Для проведения измерений ХД фотонно-кристаллического волокна 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 (AOTF — V1 — N1 — D, Fianium), интерферометра Маха — Цендера со светоделительными пластинами СД 1 и СД 2 (BSW07, Thorlabs) и микропозиционерами, на которых установлены зеркала (Зер 1, Зер 2, Зер 3), диафрагмы, поляризатора, микрообъективов и детекторов оптического излучения (S9227, Hamamatsu и Nunavut Deep-Colled InGaAs, Bayspec). Рабочий спектр линеек S9227 и Nunavut 400...1000 нм и 900...1700 нм соответственно. В измерительной ветви интерферометра установлена комбинация измеряемого фотонно-кристаллического волокна (ФКВ) и двух объективов (Об 1 и Об 2): микрообъектива (4x/0,13, Olympus) и ахрома-

тического объектива (AC080-10-B, Thorlabs). Измеряемое волокно произведено в Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

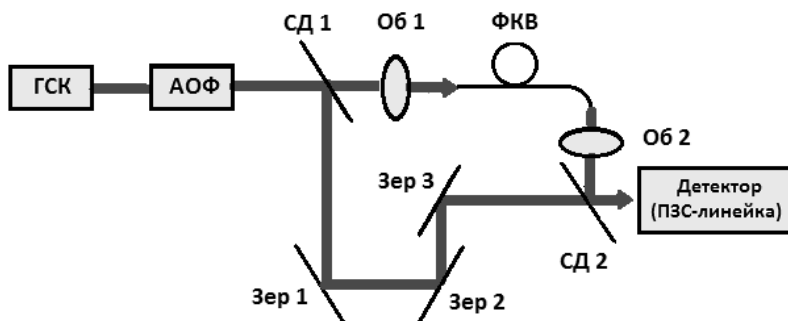


Рис. 1. Схема измерителя ХД на основе интерференционного метода

Для определения смещения полос интерференционной картины разработан специальный алгоритм, который заключается в измерении смещения по положению нескольких максимумов интерференционной картины. Смещение зависит от разности фаз между интерферирующими пучками, которая, в свою очередь, зависит от разности групповых задержек в плечах интерферометра.

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 контраста интерференционной картины при измерениях в широком спектральном диапазоне проводится периодическая подстройка интерферометра.

Моделирование групповой задержки для выбранной конструкции интерферометра. Для расчета временной задержки в диапазоне 400...650 нм, соответствующем видимому диапазону, выделяемому акустооптическим фильтром, проведено математическое моделирование на основании дисперсионных характеристик ФКВ, представленных предприятием-изготовителем. Дисперсионные характеристики ФКВ при длине волокна 0,5 м приведены ниже:

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

Для расчета ХД одномодового ступенчатого и многомодового градиентного волоконных световодов используется эмпирическая формула Селмейера (Sellmeier) [4]:

$$\tau(\lambda) = A + B\lambda^2 + C\lambda^{-3}. \quad (1)$$

Коэффициенты A , B , C определяются путем решения системы уравнений относительно заданных граничных условий. Коэффициент ХД вычисляется по формуле

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

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

Временная задержка на длине световода $L = 0,5$ м

$$\Delta = \tau(\lambda)L. \quad (3)$$

Результаты моделирования представлены ниже:

Длина волны λ , нм	403	451	490	532	570	600	630	650
Временная задержка Δ , фс	72	67	52	40	32	27	23	20

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

В соответствии с теоретически рассчитанной зависимостью периода интерференционной картины от длины волны (рис. 2) излучения при увеличении длины волны ширина полосы интерференционной картины увеличивается по линейному закону. Такая зависимость может быть легко устранена при обработке результатов измерений.

В результате моделирования установлено, что точность определения временной задержки $\tau(\lambda)$ тем выше, чем меньше ширина полосы излучения АОФ. Ширина полосы излучения 3 нм позволяет получить погрешность измерения ХД в пределах $\pm 0,05$ пс/нм (рис. 3).

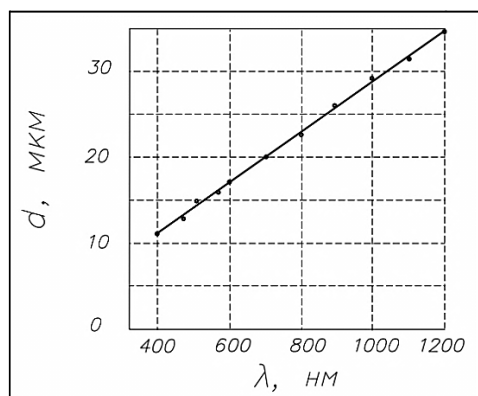


Рис. 2. Зависимость ширины полосы интерференционной картины от длины волны

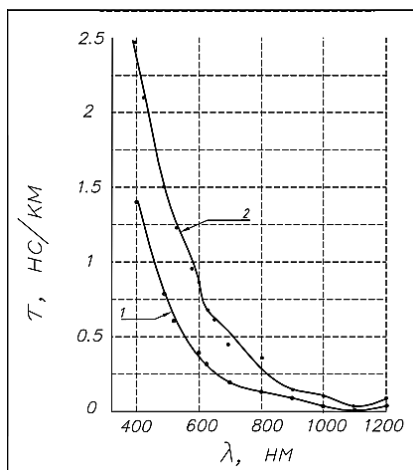


Рис. 3. Зависимость временной задержки от длины волны:

1, 2 — ширина полосы АОФ равна 3 и 6 нм соответственно

Экспериментальные исследования. На разработанной установке были проведены экспериментальные измерения ХД для образца ФКВ (SC-5.0-1100) в спектральном диапазоне 400...1 900 нм. Результаты измерений представлены на рис. 4. Сплошной линией обозначена зависимость, полученная в результате моделирования, точками — зависимость, полученная в результате измерений.

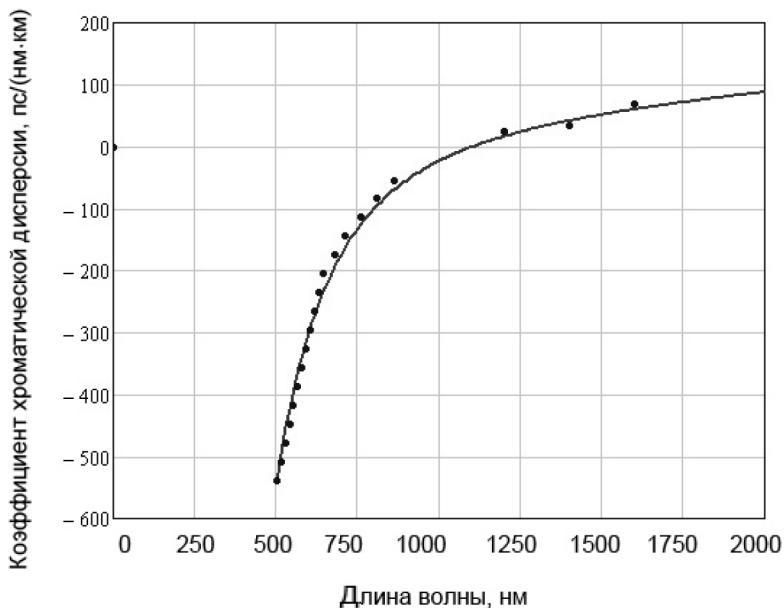


Рис. 4. Зависимость коэффициента ХД от длины волны

В спектральном диапазоне 400...900 нм ХД измерена с погрешностью 0,1 пс/нм, обусловленной большим числом итераций и малой шириной полосы излучения АОФ. В диапазоне длин волн 900...1900 нм проведены три измерения вследствие сложности юстировки установки в инфракрасной области спектра. Зависимость коэффициента ХД от длины волны, полученная экспериментально, качественно совпадает с рассчитанной зависимостью. Отклонение составляет около 10 %.

Заключение. Разработанная установка позволяет измерять ХД ФКВ с заданной точностью. Отсутствие механической модуляции длины воздушного плеча интерферометра позволяет упростить юстировку установки. Отклонение экспериментальных результатов от расчетных составляет около 10 %. Необходимо провести доработку методики юстировки установки для оптимизации измерений ХД в инфракрасной области спектра оптического излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bowden C. M., Zheltikov A. M. (Eds.) Nonlinear Optics of Photonic Crystal Featureissue // J. Opt. Soc. Am. – 2002. – Vol. 19. – No. 9.
2. Transformation and control of ultra-short pulses in dispersion-engineered photonic cristal fibers // W. H. Reeves, D. V. Skryabin, F. Biancalana et al. // Nature. – 2003. – Vol. 424. – P. 511.
3. Левченко А. Е., Курков А. С., Семенов С. Л. Измерение дисперсии в волоконных световодах с микроструктурированной оболочкой // Квантовая электроника. – 2005. – Т. 35. – № 9. – С. 835–838.
4. Poli F., Cucinotta A., Selleri S. Photonic Crystal Fibers. Properties and Applications // Springer. – 2007. – P. 227.

Статья поступила в редакцию 26.09.2012