

Новые одномодовые волоконные световоды с изменяющейся по длине плоской спектральной зависимостью хроматической дисперсии

У.Г.Ахметшин*, В.А.Богатырёв*, А.К.Сенаторов*, А.А.Сысолятин*, М.Г.Шалыгин**

Создан новый тип одномодовых волоконных световодов на основе высокочистого кварцевого стекла с изменяющейся по длине плоской спектральной зависимостью хроматической дисперсии в области 1550 нм. Предложены новая методика и технология изготовления одномодовых волоконных световодов с дисперсионными характеристиками, изменяющимися заданным образом вдоль длины.

Ключевые слова: хроматическая дисперсия, одномодовые волоконные световоды, световоды с изменяющейся по длине плоской спектральной зависимостью дисперсии.

В настоящее время создана технологическая база для изготовления одномодовых волоконных световодов (ОВС) с низким значением хроматической дисперсии в широком спектральном диапазоне. Весьма актуальной является разработка новых типов волоконных световодов, которые обладают плоской спектральной зависимостью хроматической дисперсии в области 1550 нм, сохраняющейся при вариации диаметра световода.

Световоды с W-профилем показателя преломления (ППП) впервые были получены и исследованы в 70-х годах прошлого века [1–3]. И сегодня W-профиль широко используется для получения световодов с уникальными дисперсионными характеристиками, таких как ОВС со смещенной в область 1.55 мкм длиной волны нулевой хроматической дисперсии и ОВС с плоской дисперсией [4, 5]. В настоящей работе была использована оригинальная модификация W-профиля для создания волоконного световода с уплощенной спектральной зависимостью хроматической дисперсии в области 1550 нм. Как известно, при изменении диаметра световода значение хроматической дисперсии и наклон дисперсионной кривой меняются. Задачей данной работы было создание световода с сохранением уплощенного характера спектральной зависимости хроматической дисперсии в области 1550 нм при изменении диаметра световода в процессе вытяжки.

По аналогии со световодами с плоской дисперсией (ОВС ПД), имеющими уплощенную спектральную зависимость хроматической дисперсии в области 1550 нм, и световодами с изменяющейся дисперсией (ОВС ИД), у которых хроматическая дисперсия изменяется заданным образом в рабочем диапазоне длин волн, волоконные световоды нового типа можно назвать световодами с изменяющейся по длине плоской спектральной зависи-

мостью хроматической дисперсии в области 1550 нм (ОВС ИПД), значение хроматической дисперсии которых постоянно в области 1550 нм и может меняться при изменении диаметра световода, оставаясь неизменным в области 1550 нм.

Хроматическая дисперсия в волоконных световодах может быть представлена в виде суммы двух основных компонентов – материального и волноводного [4, 6–8]:

$$D(\lambda) = M_m(\lambda) + M_w(\lambda). \quad (1)$$

Материальная дисперсия

$$M_m(\lambda) = \frac{\lambda}{c} \int_0^\infty \frac{d^2 n(r)}{d\lambda^2} E^2(r) r dr, \quad (2)$$

волноводная дисперсия

$$M_w(\lambda) = \frac{\Delta n}{\lambda c} \frac{V d^2(VB)}{dV^2}, \quad (3)$$

где $V = ka(2n_2\Delta n)^{1/2}$ – V-параметр световода со ступенчатым ППП; a – радиус сердцевинки; n_2 – показатель преломления оболочки; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; $B = (\beta^2/k^2 - n_2^2)/(n_1^2 - n_2^2)$ – нормированная частота распространения; β – постоянная распространения основной моды.

Материальный компонент хроматической дисперсии зависит, главным образом, от матрицы стекла, из которого изготовлен волоконный световод. Волноводный компонент определяется радиальной зависимостью ППП световода. Таким образом, подбор профиля показателя преломления позволяет получить необходимую спектральную зависимость хроматической дисперсии с плоским участком в относительно широком интервале длин волн. Изменение хроматической дисперсии может достигаться вариацией как разности показателей преломления сердцевина–оболочка, так и радиуса сердцевинки за счет изменения коэффициента перетяжки при вытяжке световода [4, 9].

В настоящей работе выбор структуры проводился на основе решения скалярного волнового уравнения с за-

* Научный центр волоконной оптики при Институте общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

** Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, Россия, 107005 Москва, 2-я Бауманская ул., 5

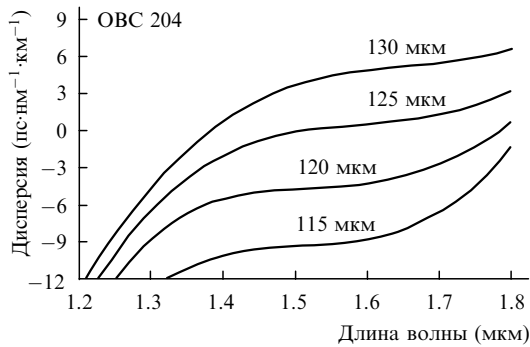


Рис.1. Спектральные зависимости хроматической дисперсии для ОВС ИПД с внешними диаметрами 115, 120, 125 и 130 мкм.

данным модельным ППП. На рис.1 показаны спектральные зависимости хроматической дисперсии для разных диаметров ОВС ИПД, изготовленного в НЦВО при ИОФ РАН. Профиль показателя преломления данного ОВС ИПД представлен на рис.2. Следует отметить, что изготовление световодов с изменяющейся плоской дисперсией весьма трудоемко, поскольку любые вариации ППП при изготовлении заготовки световода приводят к изменению оптических характеристик, и первую очередь – дисперсионных характеристик.

В НЦВО разработана цифровая система управления процессом вытяжки волоконных световодов с изменяющейся по длине хроматической дисперсией. Изменение дисперсии достигается изменением ее волноводного компонента вследствие прецизионного соответствия внешнего диаметра вытягиваемого световода D_f некоторой заданной функции:

$$D_f = f(z). \quad (4)$$

Например, при линейном изменении диаметра по длине световода $f(z) = D_{f1} + (D_{f2} - D_{f1})z/L$, где D_{f1} и D_{f2} – диаметры начального и конечного участков световода соответственно; L – длина световода; z – осевая координата.

В процессе вытяжки информация о текущих параметрах поступала в управляющий компьютер и после обработки сравнивалась с расчетными значениями. Сигнал управления, вырабатываемый в цифровом контуре, поступал на исполнительный механизм. В контуре управления использовался параметрический регулятор второго

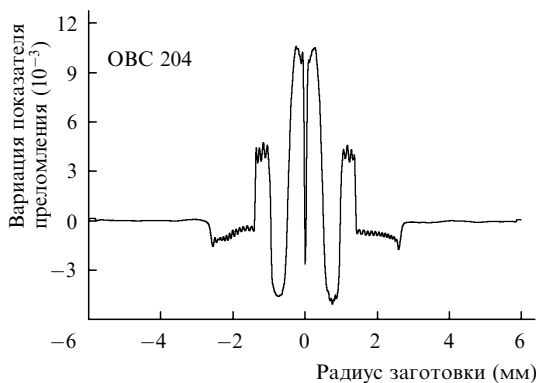


Рис.2. Профиль показателя преломления заготовки волоконного световода с изменяющейся по длине плоской спектральной зависимостью хроматической дисперсии.

порядка, синтезу которого предшествовала идентификация процесса вытяжки в реальном времени с использованием рекуррентного метода наименьших квадратов. Программное обеспечение было реализовано на алгоритмическом языке реального времени ADA (ANSI/MIL-STD-1815A). В качестве приборного интерфейса использовался КАМАК.

Синтезированный цифровой контур управления в диапазоне скоростей вытяжки 10–100 м/мин обеспечивает среднеквадратичное отклонение диаметра световода от заданного не более чем на 0.15–0.25 мкм. Максимальное отклонение диаметра световода на всей длине не превышает 2 мкм.

С использованием этих методов в ходе совместных исследований, проведенных с лабораторией оптики Массачусетского технологического института (MIT), в НЦВО был спроектирован и изготовлен ОВС ИПД длиной 50 м с дисперсией, изменяющейся от 17 до 1.5 пс·нм⁻¹·км⁻¹ [10]. Дисперсия третьего порядка также изменялась по длине световода и составляла 0.04–0.07 пс·нм⁻²·км⁻¹.

В последнее время появился ряд работ, в которых обсуждается вопрос об использовании ОВС ИПД для стабильной генерации суперконтинуума – генерации широкой спектральной полосы излучения [10–14]. В лаборатории оптики MIT с помощью ОВС ИПД, изготовленного в НЦВО, была впервые достигнута стабильная, с высокой частотой повторения генерация континуума шириной более 350 нм [10]. Импульсы волоконного лазера с частотой повторения 1 ГГц при мощности накачки 370 мВт на $\lambda = 977$ нм сжимались в световоде ОВС ИПД от 480 до 304 фс и поступали в световод с малой нормальной дисперсией и дисперсией третьего порядка 0.015 пс·нм⁻²·км⁻¹ для эффективного преобразования спектра. Выходной спектр занимал область от 1350 до 1700 нм, что соответствует максимально широкой области потенциальных применений для световодов на основе кварцевого стекла при относительно низких потерях излучения.

Установка для измерения дисперсии в полученных ОВС, собранная на основе интерферометра Маха – Цендера с воздушным опорным плечом (рис.3), позволяет исследовать волоконные световоды произвольного диаметра длиной около 1 м, что исключает влияние неоднородностей параметров волоконных световодов [8]. На рис.4 приведены расчетные и экспериментальные спектральные зависимости хроматической дисперсии ОВС со

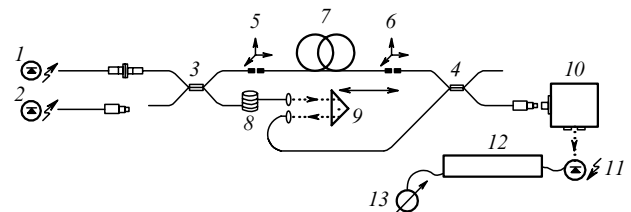


Рис.3. Схема экспериментальной установки по измерению хроматической дисперсии в волоконных световодах произвольного диаметра: 1, 2 – светоизлучающие диоды; 3, 4 – волоконные ответвители; 5, 6 – трехкоординатные микрометрические столики; 7 – исследуемый световод; 8 – модулятор; 9 – перемещаемое зеркало; 10 – монохроматор; 11 – фотодиод; 12 – селективный усилитель; 13 – гальванометр.

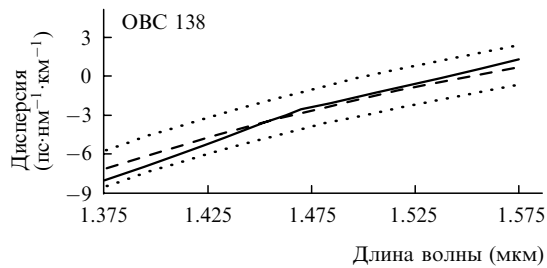


Рис.4. Расчетные и экспериментальные данные измерения хроматической дисперсии. Штриховая линия – среднее расчетное значение хроматической дисперсии для световода диаметром 119 мкм, сплошная линия – экспериментальные данные для реального световода с тем же диаметром; пунктирные линии соответствуют верхней и нижней расчетным границам и обусловлены отклонениями реальной заготовки от цилиндрической симметрии.

смещенным в область 1550 нм нулем хроматической дисперсии. Данный световод имел повышенную чувствительность дисперсионной зависимости к изменению коэффициента перетяжки световода в процессе вытяжки.

Непосредственно в эксперименте измерялась зависимость интерференционного сигнала от разности хода оптических пучков в воздухе и световоде для фиксированных длин волн. На основе этих данных строилась зависимость разности хода Δl от длины волны λ . Экспериментальная зависимость $\Delta l(\lambda)$ аппроксимируется функцией $\Delta l(\lambda) = A_1\lambda^{-4} + A_2\lambda^{-2} + A_3 + A_4\lambda^2 + A_5\lambda^4$, что обеспечивает среднеквадратичное отклонение от экспериментальных точек не более 1.1%. Хроматическая дисперсия $D(\lambda)$ связана с разностью хода $\Delta l(\lambda)$ соотношением

$$D(\lambda) = \frac{1}{Lc} \frac{d[\Delta l(\lambda)]}{d\lambda}. \quad (5)$$

На основе проведенных расчетов в НЦВО были изготовлены волоконные световоды с изменяющейся по длине плоской спектральной зависимостью хроматической дисперсии. Как видно из рис.4, экспериментальные и расчетные данные хорошо соответствуют друг другу.

Таким образом, моделирование профиля дисперсии с заданными характеристиками и анализ технологических процессов в реальном времени позволили осуществить вытяжку ОВС ИПД с новыми оптическими свойствами.

1. Kawakami S., Nishida S., Sumi M. *Proc. IEE*, **123** (6), 586 (1976).
2. Kawakami S., Nishida S. *Electron. Lett.*, **10**, 38 (1974).
3. Tanaka T.P., Onoda S., Sumi M. *Trans. Inst. Electron, Comm. Eng. Jpn.*, **J59-C**, 133 (1976).
4. Белов А.В., Курков А.С., Мирошниченко С.И., Семенов В.А. *Труды ИОФАН*, **39**, 148 (1993).
5. Беланов А.С., Кривенков В.И., Коломийцева Е.А. *Радиотехника*, № 3, 32 (1998).
6. Агравал Г. *Нелинейная волоконная оптика* (М.: Мир, 1996).
7. Geckeler S. *Practical Computation of single-Mode Optical Fiber Properties*. Siemens Forsch. – u. Entwickl. Ber. Bd. 14 (1985) Nr.3, pp. 353-357.
8. Белов А.В., Дианов Е.М., Курков А.С. *Квантовая электроника*, **13**, № 8, 1680 (1986).
9. Bogatyryov V.A., Bubnov M.M., Dianov E.M., Kurkov A.S., Mamyshv P.V., Prokhorov A.M., Romyantsev S.D., Semenov V.A., Semenov S.L., Sysoliatin A.A., Chernikov S.V., Gur'anov A.N., Devyatykh G.G., Miroshnichenko S.I. *IEEE J. Lightwave Tech.*, **9**, 561 (1991).
10. Yu C.X., Haus H.A., Ippen E.P., Wong W.S., Sysoliatin A. *Opt. Lett.*, **25**, (19), 1418 (2000).
11. Birks T.A., Wadsworth W.J., Russell P.St.J. *Opt. Lett.*, **25**, (19), 1415 (2000).
12. Okuno T., Onishi M., Nishimura M. *Trans. ECOC'97* (Edinburg, GB, 1997, p. 77).
13. Tamura K.R., Nakazawa M. *Opt. Lett.*, **26**, (11), 762 (2001).
14. Mori K., Takara H., Kawanishi S., Saruwatari M., Morioka T. *Electron. Lett.*, **33**, (21), 1806 (1997).