

РАСЧЕТ ДИСПЕРСИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОЛЬЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ

Введение

Волоконные лазеры нашли широкое применение во многих сферах деятельности. Они необходимы в различных отраслях промышленности, в медицине и научном приборостроении. Волоконные лазеры популярны в системах лазерной маркировки и лазерной обработки материалов, таких как микросварка и микрорезка, при создании, например, элементов медицинского оборудования. В металлообработке применяются для резки, сварки, наплавки, спекания порошков, термообработки. Другими областями применения могут быть: книгопечатание, производство полупроводниковых и электронных компонентов, а также микрообработка материалов, например при формировании микроизгибов.

Но не менее перспективным применением волоконных лазеров является сфера информационных технологий. В последнее время большое количество исследований волоконных лазеров проводится для обеспечения физических каналов связи, частоты которых рекомендованы международными стандартами ITU [1]. В первую очередь это присуще фемтосекундным лазерам, работающим в режиме генерации суперконтинуума. К таким лазерам относятся кольцевые волоконные фемтосекундные лазеры. [2, 3]. Но для создания таких лазеров в первую очередь необходимо исследовать волоконные составляющие резонаторов, а именно волокна входящие в состав таких резонаторов. В оптических волокнах основным нежелательным эффектом является дисперсия. Это важно при создании полностью волоконных лазеров, без дискретных оптических элементов, которые служат для компенсации дисперсии: призмы, дифракционные решетки. Т.к. дисперсия является основной причиной искажения передаваемого сигнала, то основной целью данной работы является расчет и исследование дисперсионных характеристик волокон входящих в состав резонаторов волоконных лазеров.

1. Дисперсия в оптическом волокне

Изучение характера распространения световых импульсов в волокне является одной из центральных задач волоконной оптики. Сравнение результатов численного моделирования с экспериментом позволяет оценить насколько правильно используемые физические модели, описывают реальные физические процессы. Практическая важность таких исследований связана с широким использованием оптического волокна в современных волоконных лазерах. При распространении по волокну оптического сигнала (излучения) основным фактором, влияющим на импульс, является дисперсия, проявляющаяся в размывании импульсов, увеличении его фронтов при прохождении по волокну. Эта проблема не позволяет получить длительности импульсов фемтосекундного порядка без ввода в резонатор дополнительных дискретных элементов компенсирующих дисперсию. Но для создания полностью волоконных лазеров используют волокна с различным знаком дисперсии, тем самым компенсируя эффект дисперсии.

Дисперсия в общем случае характеризуется тремя основными факторами:

- различием скоростей распространения направляемых мод;
- направляющими свойствами световодной структуры;
- свойствами материала оптического волокна.

Основные типы дисперсии, влияющие на импульс, проходящий по волокну:

- межмодовая дисперсия, характерна только для многомодовых оптических волокон.

Она возникает в многомодовых световодах из-за наличия большого числа мод с различным

временем распространения за счет различной длины пути, который отдельные моды проходят в сердцевине волокна.

- хроматическая дисперсия происходит потому, что световой импульс имеет разные длины волны, каждый из которых перемещается по волокну на различных скоростях. Хроматическая дисперсия состоит из материальной и волноводной составляющих и имеет место при распространении как в одномодовом, так и в многомодовом волокне. Однако наиболее отчетливо она проявляется в одномодовом волокне, ввиду отсутствия межмодовой дисперсии. Материальная дисперсия обусловлена зависимостью показателя преломления волокна от длины волны. Волноводная дисперсия обусловлена зависимостью коэффициента распространения моды от длины волны.

2. Математическая модель для расчета дисперсионных характеристик оптических волокон

В данной работе исследуем хроматическую дисперсию оптических одномодовых волокон, которые используются в кольцевых волоконных лазерах. С помощью математической модели стало возможным количественно оценить дисперсию. Полученные графики наглядно описывают зависимость величины дисперсии от длины волны.

Известна формула для хроматической дисперсии:

$$D = -\frac{2\pi \cdot c}{\lambda^2} \cdot \beta_2, \quad (1)$$

где β_2 – дисперсия групповой скорости, которая и влияет в зависимости от волокна на импульс, c – скорость света, λ – длина волны. Дисперсия групповой скорости β_2 , получается при разложении в ряд Тейлора β (постоянной распространения)

$$\beta(\omega) = \beta(\beta_0) + \frac{\partial \beta}{\partial \omega}(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2}(\omega - \omega_0)^2 + \dots \quad (2)$$

В соответствии с основными положениями электродинамики в однородных средах плоская электромагнитная волна распространяется с фазовой скоростью:

$$V_\phi = \frac{c}{n} = \frac{\omega}{\beta}, \quad (3)$$

де n – показатель преломления, и групповой скоростью:

$$V_{gp} = \frac{\partial \omega}{\partial \beta} = \frac{1}{\frac{\partial \beta}{\partial \omega}}. \quad (4)$$

Следовательно,

$$\beta(\omega) = \omega \cdot n(\omega) / c, \quad (5)$$

$$\partial \beta / \partial \omega = (n + \omega \cdot \partial n / \partial \omega) / c. \quad (6)$$

Тогда,

$$V_{gp} = (c/n)(1 - \omega \cdot n \cdot \partial n / \partial \omega), \quad (7)$$

$$\frac{\partial n}{\partial \omega} = \frac{\partial n}{\partial \lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial \omega}, \quad (8)$$

$$\lambda = 2\pi \cdot c/\omega, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \lambda}{\partial \omega} = \frac{-2\pi \cdot c}{\omega^2} = \frac{-2\pi \cdot c}{(2\pi \cdot c/\lambda^2)} = \frac{-\lambda^2}{2\pi \cdot c}. \quad (10)$$

После подстановки в выражение (7) выражений (8) – (10) получаем:

$$V_{gp} = (c/n) \left(1 + \frac{2\pi \cdot c}{n \cdot \lambda} \left[\frac{\partial n}{\partial \lambda} \left(\frac{-\lambda^2}{2\pi \cdot c} \right) \right] \right) = (c/n) \left(1 - \frac{\lambda}{n} \frac{\partial n}{\partial \lambda} \right), \quad (11)$$

$$\beta(\omega) = \frac{\omega}{V_{gp}(\omega)}, \quad (12)$$

$$\beta'(\omega) = \frac{\partial \beta}{\partial \omega} = \frac{1}{V_{gp}(\omega)}. \quad (13)$$

Отсюда ДГС:

$$\beta_2(\omega) = \frac{\partial^2 \beta(\omega)}{\partial \omega^2} = \frac{\partial}{\partial \omega} \left[\frac{1}{V_{gp}} \right], \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \omega} \left[\frac{1}{V_{gp}} \right] &= \frac{-\lambda^2}{2\pi \cdot c} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left[\frac{1}{c} \left(n - \lambda \frac{\partial n}{\partial \lambda} \right) \right] \frac{-\lambda^2}{2\pi \cdot c^2} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left[\frac{1}{c} \left(n - \lambda \frac{\partial n}{\partial \lambda} \right) \right] = \\ &= \frac{-\lambda^2}{2\pi \cdot c^2} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left[\left(\frac{\partial n}{\partial \lambda} - \lambda \frac{\partial^2 n}{\partial \lambda^2} - \frac{\partial n}{\partial \lambda} \right) \right] \end{aligned} \quad (15)$$

В результате получаем основное выражение для нахождения ДГС:

$$\beta_2(\lambda) = \frac{\lambda^3}{2\pi \cdot c^2} \frac{\partial^2 n}{\partial \lambda^2}. \quad (16)$$

3. Обсуждение результатов

На рис.1, а изображена зависимость дисперсии групповой скорости для одномодового волокна SMF и на рис.1, б – соответственно для эрбиевого волокна.

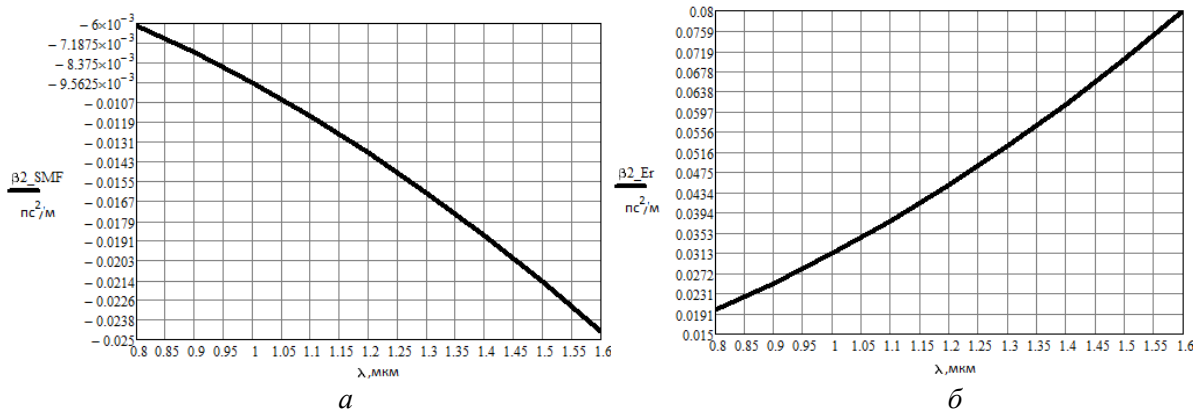


Рис. 1

В нашем случае для 1 м одномодового волокна SMF ДГС для длины волны 1,55 мкм соответствует значению $-0,028 \text{ пс}^2/\text{м}$, для эрбиевого $0,075 \text{ пс}^2/\text{м}$. Что совпадает со значениями в работах [4, 5]. Также значения хроматической дисперсии волокон можно определить из зависимостей 2, а, б. Для SMF волокна $0,018 \text{ пс}/\text{нм}^*\text{м}$, для эрбиевого $-0,058 \text{ пс}/\text{нм}^*\text{м}$. Таким образом, используя расчетные данные, можно определить, что для кольцевого резонатора волоконного лазера с длиной активного волокна (легированного эрбием) 1 м, для полной компенсации дисперсии необходимо включить в резонатор 3,22 м волокна SMF. Полная хроматическая дисперсия кольцевого волоконного лазера (эрбиевого):

$$-0,058*1+3,23*0,018 = -0,00004 \text{ пс}/\text{нм}^*\text{м}.$$

Как видно, остается небольшая отрицательная дисперсия, которая компенсируется в нашем случае на дискретных оптических элементах в резонаторе. Данные расчеты применены для создания кольцевого волоконного фемтосекундного лазера [6, 7].

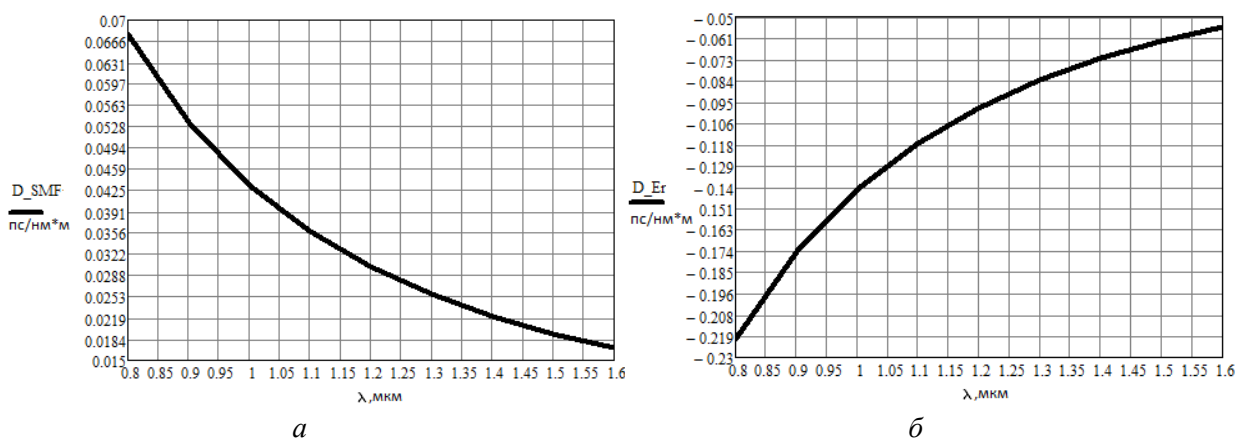


Рис. 2

Выводы

Исследованы дисперсионные характеристики оптических волокон для проектирования резонаторов волоконных лазеров. С помощью математической модели исследованы зависимости дисперсии от длины волны. Разработанная математическая модель позволяет оценить величину и знак дисперсии оптических волокон, используемых в построении волоконных лазеров. Тем самым с помощью расчетов можно избавиться от дискретных компенсаторов дисперсии.

Данная математическая модель применима для всех видов оптических волокон. Таким образом, без проведения экспериментальных исследований с помощью математических расчетов возможно оценить дисперсию в волокнах и использовать эти данные при проектировании полностью волоконных резонаторов без дополнительных дискретных компенсаторов дисперсии.

Список литературы: 1. *Andre Girard*. Guide to WDM Technology and Testing. – М. : EXFO, 2001. – P.256. 2. *M. Salhi, H. Leblond and F. Sanchez*. Theoretical study of the erbium-doped fiber laser passively mode-locked by nonlinear polarization rotation // *Physical Review A* 67, 2003. – P. 013802. 3. *M. Salhi, H. Leblond and F. Sanchez* Stability calculations for the ytterbium-doped fibre laser passively mode-locked through nonlinear polarization rotation // *Physics optics*, 8 , 2004. 4. *K. Tamura, C. R. Doerr, L. E. Nelson, H. A. Haus and E. P. Ippen* Technique for obtaining high-energy ultrashort pulses from an additive-pulse mode-locked erbium-doped fiber ring laser // *Optics letters*, Vol. 19, No. 1,1994.- P.46-48. 5. *M. E. Fermann and I. Hartl*. Ultrafast fibre lasers // *Nat. photonics*, 2013, vol.7, pp.868-874. 6. *Гнатенко, А.С., Мачехин, Ю.П.* Устойчивость режима генерации волоконного кольцевого лазера // *Радиотехника*. – 2014. – №178. – С.48-51. 7. *Гнатенко, А.С., Мачехин, Ю.П.* Исследование стабильности волоконного кольцевого лазера для DWDM систем и обработки информации // *Материалы 5-го междунар. радиоэлектрон. форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития»*. – Харьков, 2014. – С.105.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 23.06.2015