

文章编号: 1001-3806(2008)06-0568-04

光纤色散效应对脉冲展宽的影响

宋 扬, 王 丽*

(北京工业大学 应用数理学院, 北京 100022)

摘要: 为了研究光通信系统中光纤色散特性对通信系统传输性能的影响, 基于单模光纤和多模光纤的色散特性, 采用数值模拟计算的方法, 对脉冲展宽、光纤内部的偏振模色散、色度色散、波导色散和模间色散的物理机制进行了分析, 分别得到了折射率 $n=1.516$ 和 $n=1.458$ 的标准单模光纤经过 10km 传输距离后色散导致脉冲展宽的结果, 比较了传输波长在 850nm 和 1310nm 时多模光纤的色散效应, 通过对不同光源 LD ($\Delta\lambda=1\text{nm}$) 和 LED ($\Delta\lambda=70\text{nm}$) 的比较, 分析了光谱宽度对脉冲展宽的影响。结果表明, 纯石英光纤在系统传输波长为 1.27 μm 处群速度色散等于 0, 折射率渐变多模光纤工作在常见的 850nm 以及 1310nm 通信窗口时, 其模内色散表现为负色散; 色度色散和模间色散引起的脉冲展宽随光纤的数值孔径、材料折射率和光源光谱线宽的增大而增大。

关键词: 光纤光学; 脉冲展宽; 群速度色散; 偏振模色散

中图分类号: O437 TN929.11 **文献标识码:** A

Effect of fiber dispersion on pulse width

SONG Yang, WANG Li

(Department of Applied Physics, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract In order to study the influence of dispersion on the information transfer capacity of the communication system, the mechanism of all kinds of dispersion for single-mode and multimode fibers, such as polarization mode dispersion, material dispersion, wave leading dispersion and mode dispersion, was studied by means of simulation. The expanded pulse width induced by dispersion in standard fibers whose refractive index $n=1.516$ and $n=1.458$ respectively was obtained after propagating 10km distance. The dispersion effect for multimode fibers with the propagation wavelength as 850nm and 1310nm respectively was compared. The effect of the spectrum width of the different laser sources, such as LD ($\Delta\lambda=1\text{nm}$) and LED ($\Delta\lambda=70\text{nm}$), on the pulse width was compared. It shows that the group velocity dispersion (group velocity dispersion is 0 when the propagation wavelength of the system is 1.27 μm for a pure silica fiber) the intramodal dispersion becomes abnormal dispersion when the graded-index multimode fiber is in the propagation window of 850nm or 1310nm and that the expanded pulse width induced by the chromatic dispersion and modal dispersion would increase with the numerical aperture, refractive index and the spectrum width of the laser source.

Key words fiber optics; pulse width; expanded; group velocity dispersion; polarization-mode dispersion

引 言

由于互联网、电子商务、多媒体以及数据传递的发展, 人们对信息的需要量呈指数式的增长。光作为载波与电波相比, 可以使信息容量增加几个数量级, 20 世纪 70 年代, 美国康宁公司 KAPRON 博士制造了世界上第 1 根光纤^[1]。早期所使用的是纤芯直径大于 50 μm 的多模光纤, 由于模间色散大, 导致一定的脉冲展宽, 制约光纤通信的传输距离和信息容量。20 世纪

80 年代, 研制了纤芯直径为 9 μm 而只能传输一种模式的单模光纤^[2]。单模光纤避免了模间色散导致的脉冲展宽, 但是色度色散和偏振模色散依然对通信系统有影响。为了提高系统的传输效率, 对光纤色散效应的研究必不可少。作者分别对单模光纤和多模光纤的色度色散、模间色散、偏振模色散的产生机理作了理论分析, 并通过数值模拟计算比较了常见多模光纤和单模光纤中色散导致的脉冲展宽效应, 获得了脉冲展宽随传输距离、工作波长、数值孔径和介质折射率的变化关系。

1 理论分析和数值计算

1.1 群速度色散参量

在远离谐振频率时, 介质的折射率由 Sellmeier 方

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目 (4062008)

作者简介: 宋 扬 (1983-), 女, 硕士研究生, 主要从事激光超短脉冲、光学频率变换、光纤中的非线性光学研究。

* 通讯联系人。E-mail: Lwang_l@bjut.edu.cn

收稿日期: 2007-09-28 收到修改稿日期: 2007-11-29

程表示:

$$n^2(\omega) = 1 + \sum_{j=1}^m \frac{B_j \omega_j^2}{\omega_j^2 - \omega^2} \quad (1)$$

由 (1) 式, 并根据 $\lambda_j = 2\pi c/\omega_j$, 得到介质折射率与传输波长之间关系为:

$$n^2(\omega) = 1 + \sum_{j=1}^m \frac{B_j \lambda_j^2}{\lambda^2 - \lambda_j^2} \quad (2)$$

在近似条件下, 对于普通石英光纤, 在常温下 (18°C), $m = 3$ 熔融石英的塞尔迈耶系数和波长为: $B_1 = 0.6961663$, $B_2 = 0.4079426$, $B_3 = 0.8974794$, $\lambda_1 = 0.0684043 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 0.1162414 \mu\text{m}$, $\lambda_3 = 9.896161 \mu\text{m}$. 光纤的色散效应由参量 β_1, β_2 表示^[31]:

$$\beta_1 = \frac{n_g}{c} = \frac{1}{v_g} = \frac{1}{c} \left(n + \omega \frac{dn}{d\omega} \right) \quad (3)$$

$$\beta_2 = \frac{1}{c} \left(2 \frac{dn}{d\omega} + \omega \frac{d^2n}{d\omega^2} \right) \quad (4)$$

式中, n_g 是群折射率, v_g 是群速度, β_2 表示群速度色散 (group velocity dispersion, GVD)。 β_1 和 β_2 均为折射率的函数, 对 β_1 和 β_2 进行数值模拟, 分别得到它们与光纤传输波长的关系曲线, 如图 1 所示。

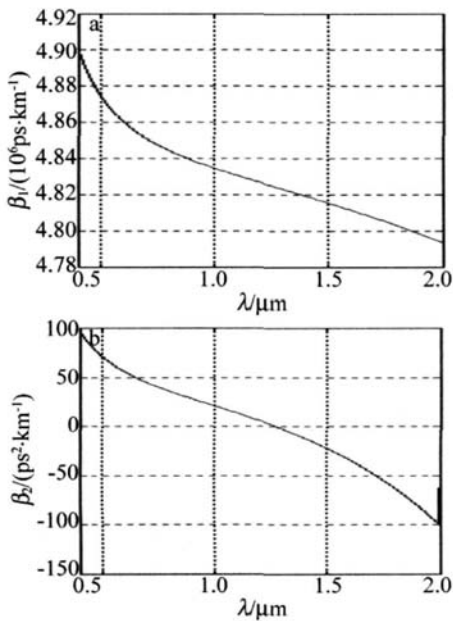


Fig 1 Variation of β_1 and β_2 while propagation wavelength change

由图 1 可知, 对于纯石英光纤, 在系统传输波长约为 $1.27 \mu\text{m}$ 处 $\beta_2 = 0$ 即 GVD 为 0 在系统工作波长小于 $1.27 \mu\text{m}$ 的范围内, GVD 为正色散; 在系统工作波长大于 $1.27 \mu\text{m}$ 的范围内, GVD 为负色散。与光纤折射率随传输波长的变化比较^[4]得到, GVD 为 0 时熔融石英的折射率约为 1.448 且光纤通信系统的传输波长越长, 介质的折射率越小, 以 1550nm 通信窗口传输时折射率约为 1.443。

1.2 偏振模色散

在单模光纤中存在着 2 个相互正交的偏振模独立

地在光纤中传输^[56]。由于光纤材料具有双折射效应, 这两个模式将具有不同的传播速率, 从而导致模式之间的时延差, 即产生偏振模色散 (polarization-mode dispersion, PMD)^[7]。

偏振模色散导致的脉冲展宽为^[11]:

$$\Delta t_{\text{PMD}} = D_{\text{PMD}} \sqrt{L} \quad (5)$$

式中, D_{PMD} 是偏振模色散系数, 与光波长无关, 其量纲为 $[\text{ps}/\sqrt{\text{km}}]$, L 为光纤长度。对于普通单模光纤^[8], $D_{\text{PMD}} = 0.5 \text{ps}/\sqrt{\text{km}}$, 对于某些低 PMD 的光纤^[3], $D_{\text{PMD}} \leq 0.2 \text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ 。在单模光纤中还存在色度色散, 色度色散引起的脉冲展宽为^[11]:

$$\Delta t_{\text{ch}} = D(\lambda)L\Delta\lambda \quad (6)$$

其中, 色度色散参量 $D(\lambda)$ 为:

$$D(\lambda) = D_{\text{mat}}(\lambda) + D_{\text{w}}(\lambda) \quad (7)$$

式中, $D_{\text{mat}}(\lambda)$ 为材料色散参量, $D_{\text{w}}(\lambda)$ 为波导色散参量。

单模光纤总色散导致的脉冲展宽为:

$$\Delta t_{\text{t}} = \Delta t_{\text{mat}} + \Delta t_{\text{w}} + \Delta t_{\text{PMD}} = D_{\text{mat}}(\lambda)L\Delta\lambda + D_{\text{w}}(\lambda)L\Delta\lambda + D_{\text{PMD}}\sqrt{L} = \frac{S_0}{4} \left(\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right) L\Delta\lambda + D_{\text{PMD}}\sqrt{L} \quad (8)$$

联立 (5) 式 ~ (8) 式, 根据 Plasmas Optical Fibre 公司生产的 267E 型单模光纤参量进行数值模拟^[3], 零色散系数 $S_0 = 0.093 \text{ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$, 零色散波长 $\lambda_0 = 1310 \text{nm}$, 工作波长为 $\lambda = 1310 \text{nm}$, 偏振模色散系数 $D_{\text{PMD}} = 0.2$, 光源线宽 $\Delta\lambda = 1 \text{nm}$, 得到单模光纤中色度色散和偏振模色散引起的脉冲展宽与传输距离的关系曲线, 如图 2 所示。

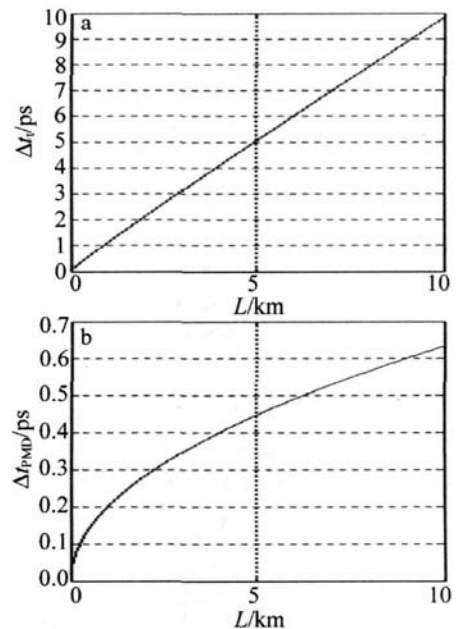


Fig 2 Comparison of total dispersion and PMD in single-mode fiber

由图 2 知, 单模光纤总色散与传输距离成线性关

系, 并且其中偏振模色散引起的脉冲展宽较小, 与总色散导致的脉冲展宽相差约一个数量级, 可知偏振模色散对脉冲展宽的影响很小, 在单模光纤中色度色散占主要地位。

1.3 多模光纤色散效应

在多模光纤中, 光纤材料、波导结构和多种模式的光脉冲信号在光纤中传输, 色度色散和模间色散是引起光脉冲展宽的主要因素^[9]。

渐变折射率 (graded index, GI) 多模光纤模间色散导致的脉冲展宽为:

$$\Delta t_{\text{modal}} = \frac{L n_1 \delta^2}{8c} = \frac{L (d_{\text{NA}})^4}{32 c n_1^3} \quad (9)$$

多模光纤色度色散导致的脉冲展宽:

$$\Delta t_{\text{ch}} = D(\lambda) L \Delta \lambda = \frac{S_0}{4} \left[\lambda - \frac{\lambda_0}{\lambda} \right] L \Delta \lambda \quad (10)$$

式中, d_{NA} (numerical aperture, NA) 为光纤的数值孔径。 $\delta = (n_1 - n_2) / n_1$, n_1 为纤芯折射率, n_2 为包层折射率, n 为平均折射率。 $D(\lambda)$ 为多模光纤中的色度色散参量。多模光纤总色散导致的脉冲展宽与模间色散和模内色散成平方和的关系^[10], 联立 (9) 式和 (10) 式, 得到多模光纤中的总色散引起的脉冲展宽为:

$$\Delta t_{\text{t}} = \sqrt{\Delta t_{\text{modal}}^2 + \Delta t_{\text{ch}}^2} \quad (11)$$

采用 Plasmas Optical Fibre 公司生产的 457E 型渐变折射率多模光纤参量^[3]。分别以 850nm 和 1310nm 作为工作波长, 得到多模光纤色散效应的理论曲线, 见图 3。图中, 多模光纤总色散与模间色散几乎相等, 即在多模光纤的色散效应中, 模间色散起了非常重要的作用。

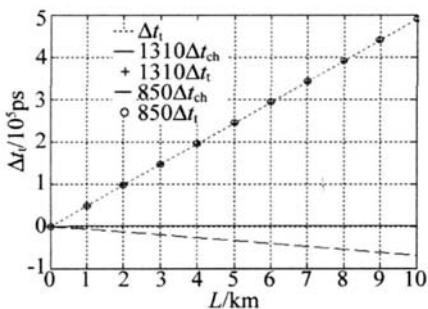


Fig 3 Dispersion in multi-mode fiber

材料色散和波导色散是引起模内色散的主要原因。对于多模光纤, 其模内色散主要来自材料色散, 多模光纤的材料色散参量由 $D_{\text{mat}}(\lambda)$ (单位为 $\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$) 表示^[11]:

$$D_{\text{mat}}(\lambda) = \frac{S_0}{4} \left[\lambda - \frac{\lambda_0}{\lambda} \right] \quad (12)$$

式中, S_0 和 λ_0 与纤芯材料、纤芯直径以及折射率分布有关。

针对光纤类型 50/125, 62.5/125 和 100/140 通过

数值模拟计算, 得到常见多模光纤模内色散的曲线关系, 如图 4 所示。由图 4 可知, 对于常见的渐变折射率

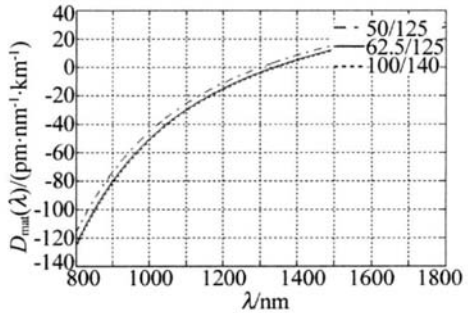


Fig 4 Material dispersion in multi-mode fiber while propagation wavelength change

多模光纤, 当其工作在 850nm 以及 1310nm 通信窗口时, 其模内色散表现为负色散, 且在工作波长为 1310nm 时, 其模内色散几乎为 0。通信系统的色散效应完全表现为模间色散。由这 3 种类型的光纤比较得知, 纤芯直径越小, 光纤的模内色散效应越小。

数值孔径 d_{NA} 是描述光纤物理性质的重要参量之一, 描述了光纤收集光的能力以及将光保持在光纤中的能力。数值孔径的计算公式^[11]:

$$d_{\text{NA}} = \sin \theta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (13)$$

再根据相对折射率定义:

$$\delta = \frac{n_1 - n_2}{n} = \frac{2(n_1 - n_2)}{n_1 + n_2} \quad (14)$$

联立 (13) 式和 (14) 式, 数值孔径可以写为:

$$d_{\text{NA}} = n \sqrt{2\delta} \quad (15)$$

光纤的数值孔径 d_{NA} 与生产光纤所用的介质材料折射率的平均值和相对差相关。在生产光纤时, 通过改变折射率的平均值和相对差, 可以在一个相对较宽的范围内改变光纤的数值孔径。现在常用的光纤大都以硅为制造材料, 数值孔径 d_{NA} 范围通常是 0.1~0.3。以工作波长为 850nm 为例, 其它光纤参量仍然采用 Plasmas Optical Fibre 公司生产的 457E 型渐变折射率多模光纤参量^[3], 选择数值孔径 d_{NA} 取不同的数值时, 多模光纤总色散导致的脉冲展宽曲线, 如图 5 所示。

从图 5 中可以看出, 随着数值孔径的增大, 多模光

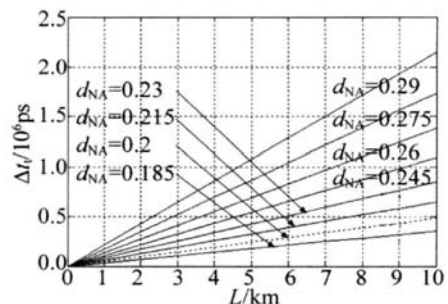


Fig 5 Dispersion in multi-mode fiber while numerical aperture change

纤色散也随之增加,且数值孔径越大,色散增加的幅度也越大。虽然尽量降低 d_{NA} 的数值可以减小光纤的色散,提高光纤的传输性能,但是由于制造过程中的技术问题,大部分多模光纤的数值孔径 $d_{NA} = 0.2$ 。

除了光纤本身的物理性质,光源辐射出的光束质量也对光纤中的脉冲展宽产生重要的影响。光源光谱宽度描述的是光源所辐射出的光的波长范围。采用 Plasmas Optical Fibre 公司生产的 457E 型渐变折射率多模光纤参量^[3],分别考察激光二极管和发光二极管等光源,其光源光谱宽度从 $\Delta\lambda = 1\text{nm}$ 到 $\Delta\lambda = 70\text{nm}$ 条件下单位长度光纤色散的情况,得到曲线如图 6 所示。

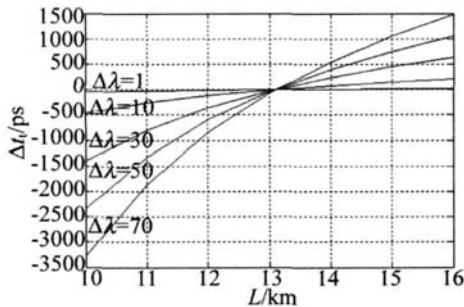


Fig 6 Chromatic dispersion in multimode fiber while laser sources change

由于模间色散导致的脉冲展宽 ((9)式)与光谱宽度无关,光源的光谱宽度主要影响多模光纤的模内色散。由图 6 可知,光源光谱宽度越窄,即输出光脉冲波长越单一,则光纤的色散越小。对于 LD 光源,光谱宽度 $\Delta\lambda = 1\text{nm}$,此时的模内色散几乎为 0。光源光谱线宽增加,则光纤模内色散引起的脉冲展宽其绝对值也将增大。

2 结 论

通过对多模光纤和单模光纤色散机制的理论分

析,得出了色度色散和模间色散引起的脉冲展宽随光纤的数值孔径、材料折射率和光源光谱线宽的增大而增大的理论结果。通过数值模拟计算,获得了纯石英光纤在系统传输波长为 $1.27\mu\text{m}$ 处 GVD 为 0 并且在系统工作波长大于 $1.27\mu\text{m}$ 的范围内, GVD 为负色散。对于常见的渐变折射率多模光纤,当其工作在常见的 850nm 以及 1310nm 通信窗口时,其模内色散表现为负色散,且在工作波长为 1310nm 时,模内色散几乎为 0。通信系统的色散效应完全表现为模间色散。

参 考 文 献

- [1] MYNBAEV D K, SCHENER L L. Fiber-optics communications technology [M]. New York: Prentice-Hall, 2001: 39-188.
- [2] CAO J Q, LU Q Sh. Influence of higher-order dispersion on super-Gaussian optical pulse in the single-mode optical fiber [J]. Laser Technology, 2006, 30(2): 209-211 (in Chinese).
- [3] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics [M]. 3rd ed. New York: New York Academic Press, 1995: 3-58.
- [4] AGRAWAL G P. Applications of nonlinear fiber optics [M]. New York: New York Academic Press, 1995: 192-254.
- [5] WANG M G, LI T J, JIAN Sh Sh. Analytical theory of pulse broadening due to polarization effects in optical fibers [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(4): 512-516 (in Chinese).
- [6] YANG A Y, WU D M, XU A Sh A. Simulation model for polarization mode dispersion in long single mode fibers [J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(12): 1461-1463 (in Chinese).
- [7] XUE M Ch, CHEN Sh YU G. Theories of polarization mode dispersion (PMD) in single mode fiber [J]. Optical Communication Technology, 1999, 23(2): 119-125 (in Chinese).
- [8] Corning Inc. Corning SM F-28 CPC 6 single-mode fiber (data sheet) [M]. New York: Corning Inc, 1997: 1-3.
- [9] LIU K, YU R J. Analysis of bandwidth of multimode G-POF [J]. Acta Photonica Sinica, 2002, 31(7): 819-823 (in Chinese).
- [10] LIU F P, SONG H Y. The model dispersion of step index fiber [J]. Acta Photonica Sinica, 2000, 29(7): 611-614 (in Chinese).
- [6] GAO J Ch, ZHU Ch H, LI Zh J. Study on the thermal effect and the optical pump limit about solid-state laser medium [J]. Laser Technology, 2004, 28(3): 271-274 (in Chinese).
- [7] OU Q F, CHEN J G, FENG G Y, et al. Analyses of thermal polarization in ring laser diode array side-pumped rod laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(7): 797-801 (in Chinese).
- [8] CIAKSON W A, FELGATE N S, HANNA D S. Simple method for reducing the depolarization loss resulting from thermally induced birefringence in solid-state lasers [J]. Opt Lett, 1999, 24(12): 820-822.
- [9] LÜB D. Devices of solid-state lasers [M]. Beijing: Beijing Post University Press, 1992: 96-98 (in Chinese).
- [10] KOECHNER W. Solid-state laser engineering [M]. 5th ed. Berlin: Springer-Verlag, 1999: 366-370.
- [11] OU Q F. Analysis of thermal effects in high power diode pumped solid-state lasers [D]. Chengdu: Sichuan University, 2005: 61-63 (in Chinese).

(上接第 562 页)

参 考 文 献

- [1] ZHOU Sh H. Thermal management in solid-state lasers [J]. Quantum Electronics Letters, 2005, 22(4): 497-509 (in Chinese).
- [2] RAPHAEL L, SHARONE G, ALON E, et al. Closing the gap using direct pumping of neodymium doped crystals [J]. SPIE, 2004, 5460: 115-122.
- [3] PAVELN, LUPEIV, SAKAWA J, et al. Neodymium concentration dependence of 0.94 μm , 1.06 μm and 1.34 μm laser emission and of heating effects under 809nm and 885nm diode laser pumping of Nd:YAG [J]. Appl Phys, 2006, B82(4): 599-605.
- [4] BOWMAN S R. Lasers without internal heat generation [J]. IEEE JQE, 1999, 35(1): 115-122.
- [5] SHI P, LI L, GAN A Sh, et al. Thermal effect research of Nd³⁺ doped laser crystals in end-pumped all-solid-state lasers [J]. Laser Technology, 2004, 28(2): 177-180 (in Chinese).