

•信号与信息处理•

渐变折射率多模光纤中的多模干涉应用研究

陈润秋, 刘 艳, 高 松

(北京交通大学光波技术研究所全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

摘要: 论述了SMS(单模-多模-单模)光纤结构的多模干涉基本理论, 利用FD-BPM(有限差分光束传播法)对渐变折射率多模光纤和阶跃折射率多模光纤进行数值模拟, 将自聚焦位置、激发模式等特征进行对比, 给出渐变折射率多模光纤的优点。利用自聚焦效应, 对渐变折射率多模光纤的聚焦和发散作用进行了理论分析, 以较短的长度充当透镜的功能, 并总结了现阶段的主要应用。

关键词: 多模干涉; 渐变折射率多模光纤; FD-BPM; 自聚焦位置

中图分类号: TP212.4⁴

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2014)-03-0017-04

Research on Multimode Interference Application in Graded-index Multimode Fiber

CHEN Run-qiu, LIU Yan, Gao Song

(Key laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of EMC, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: A multimode interference basic theory of singlemode-multimode-singlemode (SMS) is described. Numerical simulation is performed to multimode fiber with graded-index and step-index using finite difference-beam propagation method (FD-BPM). Features such as self-focusing location and exciting mode are compared to show the advantages of multimode fiber with graded-index. According to self-focusing effect, focusing and diverging functions of multimode fiber with graded-index are analyzed on theory. The shorter fiber is used in lens and the main applications at present are summarized.

Key words: multimode interference; graded-index multimode fiber; finite difference beam propagation method (FD-BPM); self-focusing location

近年来, 以多模干涉和自聚焦效应为理论基础, 对SMS(单模-多模-单模)光纤结构的研究主要应用在光纤通信和光纤传感领域。由于SMS结构具备结构简单、易于制作等优点, 各国学者开始对其进行深入的研究, 制作了多种新型的光纤结构, 如多模光纤-无芯光纤-多模光纤(MCM)结构、单模光纤-渐变折射率多模光纤-无芯光纤-渐变折射率多模光纤-单模光纤(SGCGS)结构等。与阶跃型多模光纤相比, 渐变折射率多模光纤(GIMF)体现了自

聚焦位置短、模式色散小、激发的导波模数量少等优势, 因此受到了越来越多的关注。文中用数值模拟的方法对渐变折射率多模光纤和普通阶跃型多模光纤进行了对比, 并总结了目前国内外研究成果, 尤其对GIMF的聚焦和发散效果进行了分析。

1 理论分析

所用到的SMS光纤结构如图1所示。一段特定

收稿日期: 2014-01-29

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2013JBM005)

作者简介: 陈润秋(1988-), 女, 山东菏泽人, 硕士研究生, 主要研究方向是光纤传感。

长度的多模光纤被熔接在两段普通单模光纤之间,单模光纤作为输入端将入射光导入到相接的多模光纤,使得入射基模在多模光纤中激发多个模式,由于各个模式传输常数不同,在传输过程中发生多模干涉效应,能量重新分布,多模光纤出射端面上只有一部分光可以进入单模光纤传输。当多模光纤的长度和入射波长满足一定的条件,光传输一定距离时,多模光纤端面会出现和入射光的相位、振幅几乎完全相同的光场分布,被称为自聚焦现象^[1]。



图1 SMS光纤结构

为了分析多模光纤中的被激励的多个模式,需要确定入射光场,在线偏振模近似条件下,将入射光场近似为高斯光束公式如下

$$\bar{E}_s(r) = e^{-\frac{r^2}{w^2}} e^{-i\beta_0 z} \quad (1)$$

其中, β_0 为入射单模光纤中导模 LP₀₁ 的纵向传播常数;高斯光束的 w (半高半宽 HWHM), 可以通过下面的公式得到。

$$\bar{w} = \frac{a_0}{\sqrt{\ln 2}} (0.65 + 1.619V^{-1.5} + 2.879V^{-6}) \quad (2)$$

其中, a_0 为入射单模光纤的半径;归一化频率 $V = (2\pi a_0 / \lambda) \sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2}$; n_{core} 和 n_{clad} 分别为单模光纤的芯层折射率和包层折射率。

当 SMS 光纤结构满足旋转对称性时,多模光纤中只有高阶本征模 LP_{0m} 被激励并传播。忽略到辐射模,多模光纤中任意位置处的光场分布被描述为一系列导波模的集合。假设多模光纤中第 n 阶的模式场分布为 $\psi_n(r)$, 因此在柱面坐标下,多模光纤的传输光场表示如下面的公式。

$$\psi(r, z) = \sum_{n=1}^N c_n \psi_n(r) e^{-i\beta_n z} \quad (3)$$

其中, N 表示多模光纤中激励的模式数; β_n 和 c_n 为多模光纤中第 n 阶模式场的传输系数和激发系数。当 $z=0$, 即在多模光纤的入射端面处,式(3)可以表示为

$$\psi(r, z=0) = \bar{E}_s(r) = \sum_{n=1}^N c_n \psi_n(r) \quad (4)$$

由此可得,多模光纤的总场分布与入射场分布相等。激发系数 c_n 可以通过计算第 n 阶模式场分

布和入射场分布的重叠积分求得。

$$c_n = \frac{\int_0^\infty \bar{E}_s(r) \psi_n(r) r dr}{\int_0^\infty \psi_n(r) \psi_n(r) r dr} \quad (5)$$

为了计算激发系数,文中使用了一种常见的思路,通过计算能量耦合系数来确定各个导模的激励系数。多模光纤中各阶模式 LP_{0m} 的功率是由入射单模光纤中的基模 LP₀₁ 和多模光纤对应模式的耦合系数决定的。能量耦合系数对多模光纤中激发的某个模式的能量大小起着决定性作用。在柱坐标下,定义能量耦合系数为

$$\eta_n = \frac{\left| \int_0^\infty \bar{E}_s(r) \psi_n(r) r dr \right|^2}{\int_0^\infty |\bar{E}_s(r)|^2 r dr \int_0^\infty |\psi_n(r)|^2 r dr} \quad (6)$$

2 GIMF 和 SIMF 的多模干涉效应对比

由于阶跃折射率多模光纤的激发模式数较多,而且各个模式的传输常数不是均匀变化,因此在较短长度的多模光纤中,几乎不可能出现相位和振幅完全与入射光场相同的自聚焦现象^[2]。相比较而言,渐变折射率多模光纤具备自聚焦位置短,激发模式数少等优点。文中利用数值模拟的方法对两种多模光纤进行了光场分析。

表 1 给出了用于 Matlab 仿真的 SMF、GIMF 和 SIMF 的物理参数。GIMF 光纤的折射率计算公式为

$$n^2(r) = \begin{cases} n_1^2 [1 - 2\Delta \cdot f(r/a)], & (r \leq a) \\ n_2^2, & (a < r < b) \end{cases} \quad (7)$$

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \quad (8)$$

其中, n_1 和 n_2 表示渐变折射率多模光纤芯层中心和包层的折射率; a 和 b 表示光纤芯层和包层的半径大小^[3]。

表1 光纤的物理参数

	芯层折射率	包层折射率	芯层半径
SMF	1.450 2	1.445	4.1
GIMF	1.456	1.435	25
SIMF	1.466 2	1.45	25

在表 1 给定的光纤参数下,基于 Matlab 语言利用 FD-BPM (有限差分光束传播法) 方法^[4]进行仿真分析,对 SMF-GIMF-SMF 和 SMF-SIMF-SMF 光纤结

构的多模干涉效应、自聚焦位置、耦合效率分别进行仿真。两段单模光纤长度都取为 1 mm, GIMF 和

SIMF 光纤的长度分别取 1 mm 和 11 mm。仿真结构如图 2 所示。

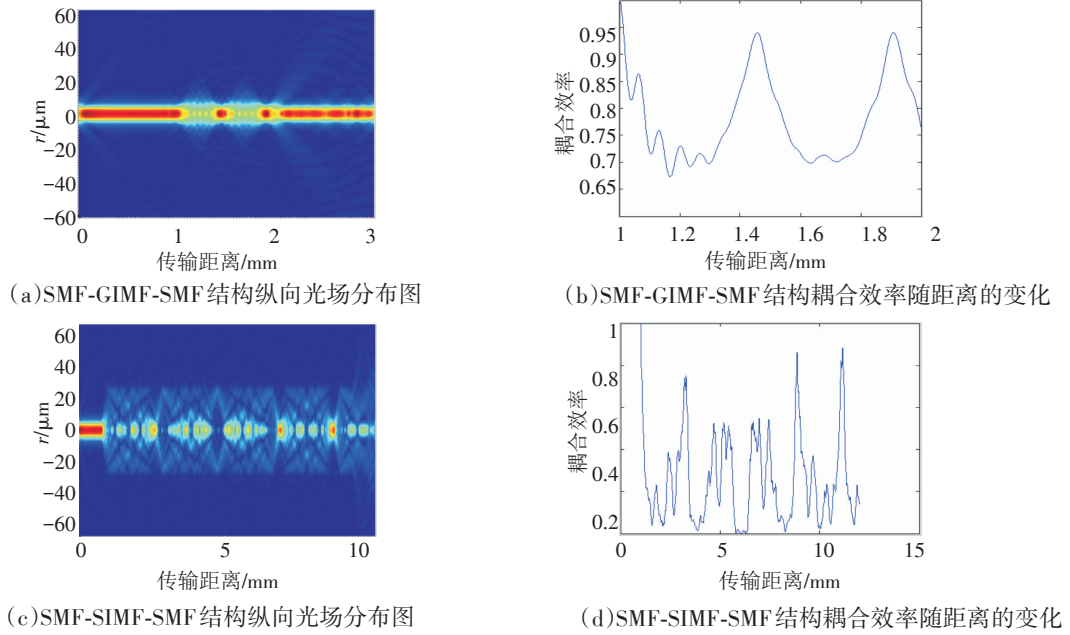


图2 两段单模光纤长度都取 1 mm, GIMF 和 SIMF 光纤长度分别取 1 mm 和 11 mm 的仿真结果

通过对比,渐变折射率多模光纤的自聚焦位置大约出现在 0.5 mm, 而阶跃折射率多模光纤的自聚焦位置大约在 11 mm。而且 GIMF 的自聚焦位置间隔是等距的, 即激发的各个高阶模式的传输常数均匀变化。对照图 2b 和图 2d, GIMF 的耦合效率明显高于 SIMF。

3 渐变折射率多模光纤的聚焦和发散效果

为了验证 GIMF 光纤的透镜功能, 文中通过改变 GIMF 的长度, 观察光纤不同位置处的横向光场分布。数值模拟过程中的 SMS 结构各个参数为; 入

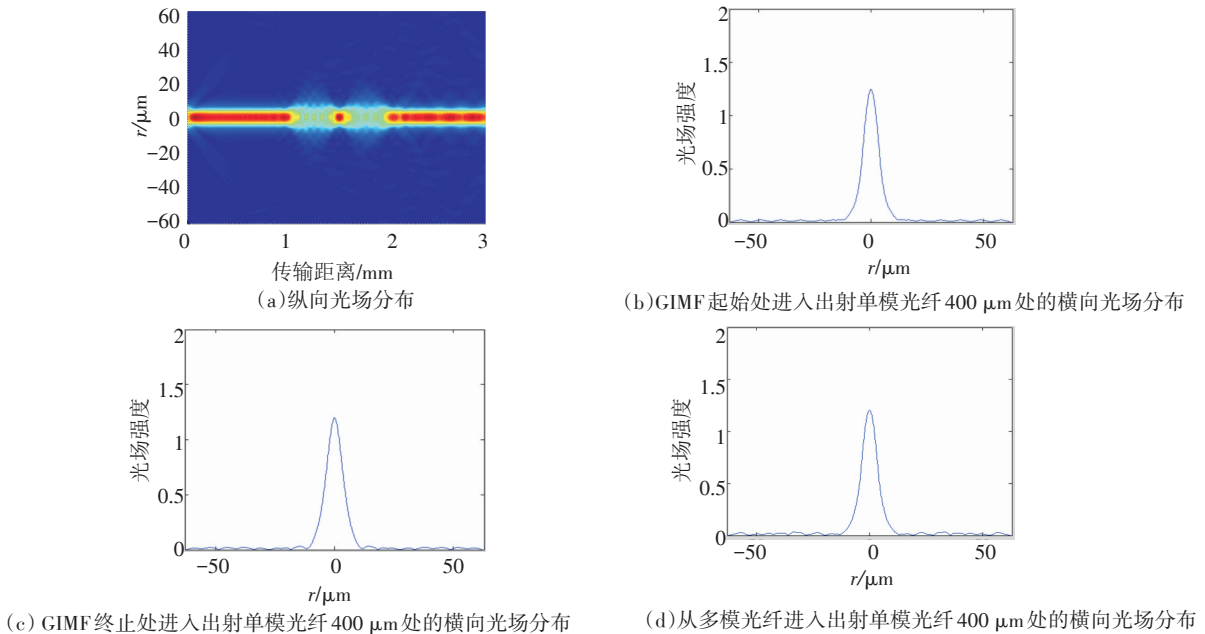
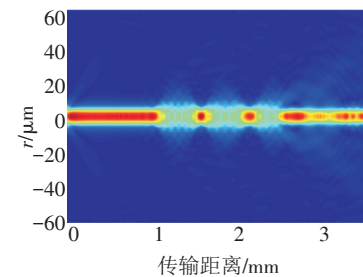
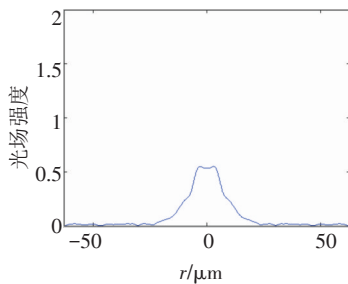


图3 1.1 mm 长度的 GIMF 仿真结果

射单模光纤和出射单模光纤芯层、包层直径分别为 $8.2\ \mu\text{m}$ 和 $125\ \mu\text{m}$, 芯/包折射率为 1.450 2 和 1.445; 渐变折射率多模光纤芯层、包层直径分别为 $50\ \mu\text{m}$ 和 $125\ \mu\text{m}$, 芯/包折射率为 1.45 和 1.435, 光纤长度分别取为 1.1 mm 和 1.375 mm。仿真结果如图 3 和图 4 所示。其中, 图 3a 是纵向光场分布图, 图 3b、图 3c、图 3d 分布是 1 mm, 即 GIMF 起始处、GIMF 终止处和从多模光纤进入出射单模光纤 $400\ \mu\text{m}$ 处的横向光场分布图。



(a) 纵向光场分布

(c) GIMF 终止处进入出射单模光纤 $400\ \mu\text{m}$ 处的横向光场分布

观察图 3, 当 GIMF 的长度为 1.1 mm 时, 入射单模光纤和出射单模光纤中的光场强度是一样的, 而图 4 显示当 GIMF 的长度为 1.375 mm 时, 出射单模光纤中的光场强度明显减弱, 这个现象也可以从纵向光场图 4a 中看出。因此, 当渐变折射率多模光纤的长度变化时, 从多模光纤出射的光场强度也随之变化, 以较短的长度就可以实现聚焦和分散的不同效果。

目前, 对 SMF-GIMF-SMF 光纤结构的研究也成

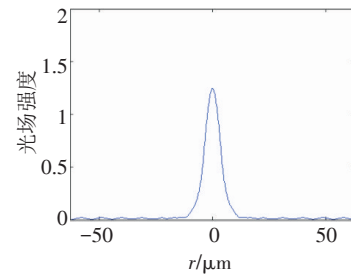
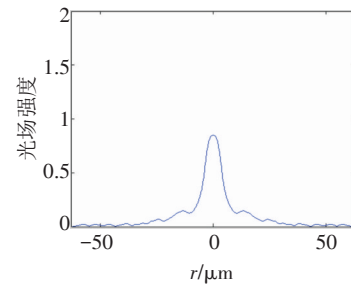
(b) GIMF 起始处进入出射单模光纤 $400\ \mu\text{m}$ 处的横向光场分布(d) 从多模光纤进入出射单模光纤 $400\ \mu\text{m}$ 处的横向光场分布

图 4 1.375 mm 长度的 GIMF 仿真结果

为热点。Anuj Dhawan 等人提出基于单模-渐变折射率多模-无芯-渐变折射率多模-单模光纤结构的传感器, 文中利用短距离的渐变折射率多模光纤充当透镜来发散和聚焦光束, 提高无芯光纤的环境灵敏度^[5]; Saurabh Mani Tripathi 等人利用渐变折射率多模光纤激发模式数少的特点实现了拉力和温度的传感^[6]; Peter Hofmann 等人详细地分析了将渐变折射率多模光纤熔接在两端单模光纤之间, 减少了因为入射单模光纤和出射单模光纤模场直径不相等带来的耦合损失, 并给出了详细的理论和实验结果; D Lorensen 等人将渐变折射率多模光纤用在了光学显微镜上, 利用了其对发散光束的聚焦特点, 用 BPM 方法给出了精确的建模和设计^[7]。

4 总结

文中利用 FD-BPM, 从数值模拟的角度分析了

渐变折射率多模光纤的一系列优点, 验证了其自聚焦位置短、耦合效率高, 并用仿真结果证实了其聚焦和发散的特点, 对之后将渐变折射率多模光纤用作透镜提供了理论数据。在光纤通信和光纤传感领域, 渐变折射率多模光纤已体现出较好的利用价值。至今, 对于渐变折射率多模光纤的应用主要集中在光纤通信领域, 而将其与多模光纤组合实现多参量传感、医学成像、光纤探针等生物医药方面, 仍然具备很大的发展空间。

参考文献

- [1] Mohammed W S, Mehta A, Johnson E G. Wavelength tunable fiber lens based on multimode interference [J]. Lightwave Technology, 2004, 22: 469-477.
- [2] Hofmann Peter, Mafi Arash, Jollivet Clemence, et al. Detailed investigation of mode-field adapters utilizing multi-

(下转第 37 页)

3 总 结

在传统的光谱分类算法中加入LBPV纹理特征,用于机载光谱成像系统飞行成像数据的处理,与单纯基于光谱特征的分类结果相比,LBPV纹理信息的加入不仅能提高分类精度,而且在分类结果的空间连续性方面得到了很大的提高,有效地消除了孤立的噪点。但是对于连续的误分类,还需要研究其他辅助手段。

参考文献

- [1] Marceau D J, Howarth P J, Dubois J M, et al. Evaluation of the grey-level co-occurrence Matrix method for land-cover classification using SPOT imagery [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28(4): 513-519.
- [2] Gong P, Marceau D J, Howarth P J. A comparison of spatial feature extraction algorithms for land-use classification with SPOT HRV data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 40: 137-151.
- [3] 彭光雄, 李京, 何宇华, 等. 利用纹理分析方法提取CBERS02星CCD图像土地覆盖信息[J]. *遥感技术与应用*, 2007, 22(1): 8-13.
- [4] 宋翠玉, 李培军, 杨锋杰. 运用多尺度图像纹理进行城市扩展变化检测[J]. *国土资源遥感*, 2006, 69(3): 37-42.
- [5] ZHANG Y. Optimization of building detection in satellite images by combining multispectral classification and texture filtering [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1999, 54: 50-60.
- [6] 李厚强, 刘政凯, 林峰. 基于分形理论的航空图像分类方法[J]. *遥感学报*, 2001, 5(5): 353-357.
- [7] Benediktsson JA, Palmason JA, Sveinsson JR. Classification of hyperspectral data from urban areas based on extended morphological profiles [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(3): 480-491.
- [8] Chen C H, Wang P S P, Maenpaa T. Texture Analysis with Local Binary Patterns [G]// *Handbook of Pattern Recognition and Computer Vision 3rd World Scientific*, 2005: 197-216.
- [9] Guo Z H, Zhang L, Zhang D. Rotation invariant texture classification using LBP variance (LBPV) with global matching [J]. *Pattern Recognition*, 2010, 43(3): 706-719.
- [10] Acqua F D, Gamba P, Ferrari A, et al. Exploiting spectral and spatial information in hyperspectral urban data with high resolution [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2004, 1(4): 322-326.
- [11] 骆剑承, 周成虎, 梁怡, 等. 支持向量机及其遥感影像空间特征提取和分类的应用研究[J]. *遥感学报*, 2002, 6(1): 50-55.
- [12] Foody G M, Mathur A. A relative evaluation of multiclass image classification by support vector machines [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(6): 1335-1343.
- [13] 沈志学, 李剑峰, 张大勇, 等. 可见光液晶光谱成像系统研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(10): 2672-2675.
- [14] 沈志学, 李剑峰, 张大勇, 等. 液晶光谱成像技术研究进展[J]. *光学与光电技术*, 2011, 9(1): 1274-1278.

(上接第20页)

- mode-interference in graded index fibers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30: 2289-2297.
- [3] 陈根祥, 路惠敏, 陈勇, 等. *光纤通信技术基础*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [4] 王玮. 基于多模干涉的光纤温度传感器的BPM模拟与实验研究[D]. 天津: 天津大学精仪学院, 2008.
- [5] Dhawan Anuj, Muth J F. In-line fiber optic structures for environmental sensing applications [J]. *Optics Letters*, 2006, 31: 1391-1393.
- [6] Saurabh Mani Tripathi. Strain and temperature sensing characteristics of single-mode-multimode-single-mode-Structures [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27: 2348-2356.
- [7] Lorensen D, Yang X, Sampson D D. Accurate modeling and design of graded-index fiber probes for optical coherence tomography using the beam propagation method [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5.