

全波段正常色散光子晶体光纤中超连续谱的产生*

李曙光[†] 朱星平 薛建荣

(燕山大学理学院, 亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室, 秦皇岛 066004)

(2013年5月27日收到; 2013年6月17日收到修改稿)

设计了一种铅硅酸盐 SF57 材料的光子晶体光纤, 利用有限元法数值模拟了该光纤的色散特性. 研究结果显示在整个透明波段光纤具有正常色散. 利用自适应分布傅里叶法求解非线性薛定谔方程, 对中心波长为 1550 nm, 初始脉宽为 150 fs 的脉冲在该光纤中传输进行了模拟, 获得了关于入射脉冲中心波长对称的展宽范围超过了 600 nm 的超平坦连续光谱, 并且光谱具有极其稳定和相干的特性.

关键词: 光子晶体光纤, 超连续谱产生, 正常色散

PACS: 42.65.-k, 42.79.Nv, 42.81.-i

DOI: 10.7498/aps.62.204206

1 引言

光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 也叫微结构光纤, 是 20 世纪末出现的一种新型的波导介质 [1-3]. 由于其具有灵活可控的色散和非线性特性, 因此常被人们作为产生超连续谱的媒介 [4,5]. 通常情况下, 选择入射到 PCF 中的超短激光脉冲中心波长位于该光纤的近零反常色散区, 来获得超宽的连续光谱. 其展宽的机理主要受孤子分裂的主宰. 但是, 孤子分裂容易受到抽运激光噪声和入射脉冲波动的影响 [6]. 因此, 研究者们急需获得一种超宽带的平坦光谱, 且其不受入射脉冲在能量和相位等波动的影响.

一种有效获得高相干稳定光谱的方法是将入射到 PCF 中的超短激光脉冲中心波长位于该光纤的两个近零色散点之间, 这样可以抑制在其中传输的脉冲所产生的光孤子分裂 [7]. 这种方法产生了在零色散点两边的正常色散区具有峰值的稳定相干光谱, 已经成功地用于反斯托克斯散射显微镜学之中 [8]. 进一步的研究发现, 将这种光纤拉锥处理后可获得一定长度的在光传输的整个波段范围内为正常色散的光纤. 利用这种光纤可以更好地提高连续光谱的稳定性.

当入射超短激光脉冲的中心波长位于光纤的正常色散区时, 可以有效地抑制孤子波动和相关的问题, 但是光谱的展宽程度会受到很大的限制 [9]. 在以前的数值模拟和实验研究中, 为了获得高相干特性、超平坦以及高宽带的连续谱, 设计了各种在入射抽运波长处色散平坦的全波段正常色散 PCF [10]. 2005 年 Falk 等 [11] 通过利用双零色散 PCF 拉锥得到了一种全波段正常色散光纤, 从此全波段正常色散光纤的研究拉开了序幕. 2010 年 Heibt 等 [12] 理论和实验研究了两种从可见到近红外波段全正常色散的石英 PCF. 实验结果显示, 产生的光谱具有超平坦、宽带宽、高稳定以及高相干等优良特性. 2011 年 Hossain 等 [13] 利用全波段正常色散的掺铈高非线性 PCF 产生超连续谱, 并将此用于光学相干断层分析系统. 2012 年 Jing 等 [14] 数值和实验研究了 80 cm 的单模全正常色散 PCF 超连续谱的产生.

本文设计了一种非硅基高非线性铅硅酸盐 SF57 玻璃 PCF. 利用有限元法数值模拟了该光纤的色散特性. 数值模拟结果显示, 该光纤的色散值在整个波段为正常色散并且在大于 1200 nm 的波长范围内光纤的色散趋于平坦. 进一步利用自适应分布傅里叶法数值模拟了同一超短激光脉冲在不同长度光纤的传输过程中光谱的演变、不同入射脉

* 国家自然科学基金 (批准号: 61178026) 和河北省自然科学基金重点项目 (批准号: E2012203035) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: shuguangli@ysu.edu.cn

冲能量在同一长度的光纤中传输时光谱的变化. 通过上述的详细研究, 获得了 1300 nm 到 1900 nm 的平坦对称超连续谱, 为进一步获得高稳定性的相干超连续谱的研究提供了重要的理论依据.

2 光纤基本结构与理论基础

PCF 的结构与普通光纤相比要复杂得多, 由此它具有了传统光纤所无法比拟的许多优良特性. 由于 PCF 的色散值高度依赖于包层中空气孔的直径和空气孔间距的大小, 因此本文通过改变 PCF 包层中的几何参数来获得优良的色散特性.

2.1 光纤基本结构

图 1 所示为背景材料为铅硅酸盐 SF57 玻璃的 PCF 横截面示意图. 从图 1 中可以清楚地看出, 该光纤横截面为三角形阵列结构排列, 包层中心抽去一个小空气孔构成纤芯. 包层由两种不同直径的空气孔组成, 内层小空气孔直径为 d_1 , 最外层大空气孔直径为 d_2 , 相邻两空气孔之间的距离 (孔间距) 为 Λ .

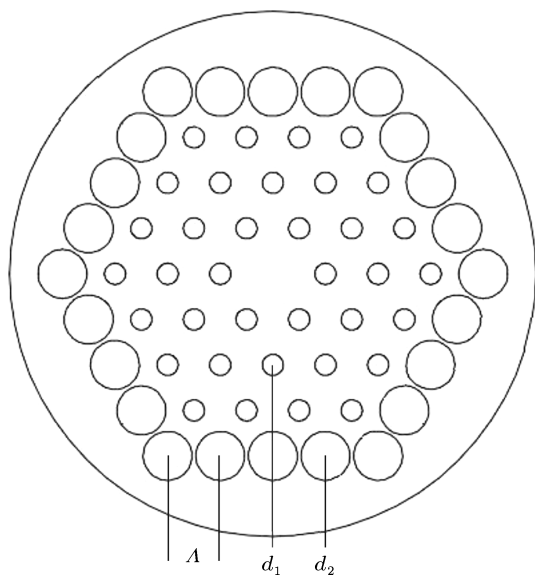


图 1 SF57 玻璃的光子晶体光纤结构图

2.2 理论基础

铅硅酸盐 SF57 玻璃的折射率可以通过贝塞尔方程得到:

$$n(\lambda) = \sqrt{1 + \frac{B_1 \lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2 \lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3 \lambda^2}{\lambda^2 - C_3}}, \quad (1)$$

其中, $B_1 = 1.81651371$, $B_2 = 0.428893641$, $B_3 = 1.07186278$, $C_1 = 0.0143704198$, $C_2 = 0.0592801172$, $C_3 = 121.419942$ ^[15], 非线性折射率 $n_2 = 4.1 \times 10^{-19} \text{m}^2/\text{W}$ ^[16].

色散是指在光纤中传输的不同频率成分的电磁波与电介质中的束缚电子相互作用, 介质的响应通常与光波频率有关的特性. 色散也是一个很难控制的物理参量. 在超连续谱的理论模拟和实验研究中, 必须要考虑到光纤的色散参量随波长的变化. 下式为色散随波长的变化关系:

$$D(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}(\lambda)}{d\lambda^2}, \quad (2)$$

其中 n_{eff} 表示利用有限元法计算的光纤基模模式下的有效折射率, c 为光在真空中传播的速度, λ 为波长. 超短激光脉冲在光纤中传输满足的广义非线性薛定谔方程为

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{\alpha(\omega)}{2} A + \left(\sum_{n \geq 2} \frac{i^{n-1}}{n!} \beta_n(\omega) \frac{\partial^n A}{\partial t^n} \right) A = i\gamma(\omega) \left[|A|^2 A + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial (|A|^2 A)}{\partial T} - T_{\text{RA}} \frac{\partial |A|^2}{\partial T} \right], \quad (3)$$

式中, $A(z, t)$ 为光纤中脉冲传输的慢变振幅; z 是脉冲的传输距离; $\alpha(\omega)$ 表示由瑞利散射和光纤吸收等组成的光纤损耗, 在实际的模拟过程中常常为了简化将其忽略不计; $T = t - z/v_g$ 表示以群速度 v_g 移动的参考系的时间坐标; t 表示时间; $\gamma(\omega)$ 表示非线性系数; β_n 为 n 阶的色散参量; ω_0 为脉冲的中心角频率.

3 模拟与结果分析

3.1 色散

本文中设计了一种全波段正常色散 PCF, 我们将此光纤命名为 ANPCF (all-normal dispersion PCF). 如图 1 所示, 具体参数为 $d_1/\Lambda = 0.4$, $\Lambda = 1.4 \mu\text{m}$, $d_2 = 1.3 \mu\text{m}$.

图 2 中虚线表示铅硅酸盐 SF57 的材料色散曲线. 正如我们所料, 材料色散与传输波长有关, 材料的色散值随着波长的增加单调增加. PCF 的色散值随着波长的增加先增大后减小, 在 1550 nm 附近具有最大的色散值, 在大于 1200 nm 波段区域表现出超平坦的色散分布, 且在整个透明波段具有正常色散. 可见, PCF 对色散的调节起到了非常重要的

作用.

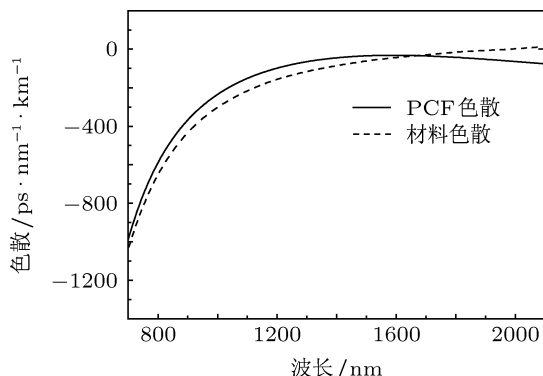


图2 光子晶体光纤色散随波长的变化

3.2 超连续谱产生

为了进一步指导超连续谱产生的实验研究, 首先需要通过理论设计计算光纤的基本特性, 以及数值模拟超短激光脉冲在其中传输时光谱的演变情况. 为使模拟结果与实际结果尽可能地相同, 因此选择合适的模拟方法显得尤为重要. 本文通过利用有限元法求解离散, 求解域内泛函的极值问题来获

得光纤中基模的有效模式折射率 n_{eff} 的大小. 其次, 为了更加清楚地了解超短激光脉冲在设计光纤中的传输过程中光谱的演变, 利用自适应分布傅里叶法求解非线性薛定谔方程来模拟脉冲的演变. 由于其具有运算速度快、计算精确、对电脑要求比较低等优点, 越来越受到大多数研究者的欢迎.

为了解超短激光脉冲在 ANPCF 中传输时光谱的展宽和频率转换过程, 本文根据实验室现有的光纤飞秒激光器 (FPL-04TTYSU11 Calmar Opt-com, Inc.) 的参数, 利用自适应分布傅里叶法求解非线性薛定谔方程来数值模拟超短激光脉冲在该光纤中的传输过程. 整个模拟过程在关于脉冲的频域内进行, 相比时域具有运算更迅速、高精度的特点. 在 1550 nm 处, ANPCF 的非线性系数 $\gamma = 380 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$. SF57 拉曼散射参量 T_R 与拉曼增益谱的斜率有关. 其中, 本文中 PCF 的背景材料为铅硅酸 SF57, 该玻璃 $f_R = 0.18$. 为了使模拟结果尽可能地接近实际值, 模拟中我们将色散考虑到第 15 阶, 表 1 所示为 1550 nm 处 ANPCF 的各阶色散值. 同时, 为了提高计算速度, 在模拟过程中不考虑光纤的损耗.

表1 ANPCF 的各阶色散值

| — | β_2 | β_3 | β_4 | β_5 | β_6 | β_7 | β_8 |
|----------------|------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| s^n/m | 3.6×10^{-26} | -6.5×10^{-41} | 1.5×10^{-54} | -8.3×10^{-69} | 3.8×10^{-83} | -1.9×10^{-97} | -1.1×10^{-111} |
| — | β_9 | β_{10} | β_{11} | β_{12} | β_{13} | β_{14} | β_{15} |
| s^n/m | 8.2×10^{-125} | -1.5×10^{-138} | 9.4×10^{-153} | 1.5×10^{-166} | -4.7×10^{-180} | 6.4×10^{-193} | 5.7×10^{-208} |

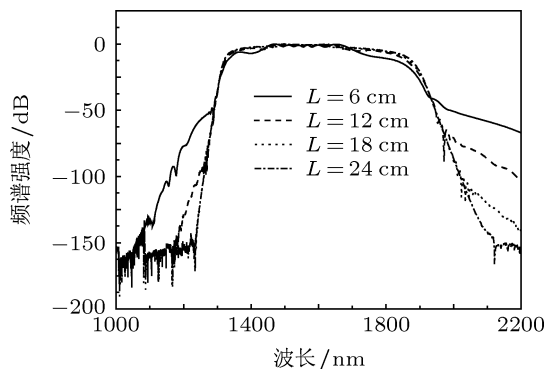


图3 入射脉冲传输不同距离后的频谱变化

根据文献 [7] 中报道可知, 对于全波段正常色散的 PCF, 当抽运波长接近该 PCF 的最大色散值所对应的波长时, 有望获得最宽的平坦超连续光谱. 本文模拟所使用的 ANPCF 的最大色散值为

$28 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, 其对应的中心波长在 1545 nm. 模拟中我们选择了双曲正割型脉冲, 其中心波长为 1550 nm, 重复频率 $f = 50 \text{ MHz}$, 脉宽 $T_0 = 150 \text{ fs}$, 入射脉冲的平均能量 P_{av} , PCF 的长度是可调的.

当中心波长为 1550 nm 的双曲正割型脉冲耦合到 ANPCF 中, 入射脉冲的平均功率为 80 mW 时, 随着传输距离 L 的增加, 输出脉冲频谱的变化如图 3 所示. 从图 3 可以看出, 入射脉冲随着传输距离的增加, 频谱随之逐渐对称地展宽. 该光谱的展宽机理可解释为: 在脉冲传输的初始一段距离中, 主要是由于自相位调制导致光谱的展宽; 随着传输距离的增加, 由于受到了包括四波混频等光波分裂的作用, 光谱进一步得到展宽. 当传输距离达到 24 cm 时, 获得了从 1300 nm 到 1900 nm 的几乎对称的平坦的超连续谱. 中红外对称平坦超连续谱在光学断层分析、红外激光医疗器件等方面有重要

的应用.

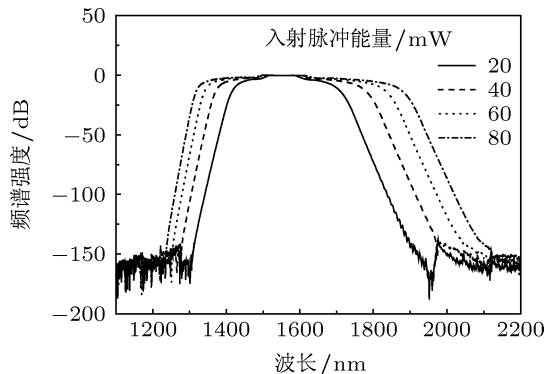


图4 输出频谱随入射脉冲能量的变化

利用中心波长为 1550 nm 的双曲正割型的超短激光脉冲耦合到长度为 $L = 30$ cm 的 ANPCF 中, 当入射脉冲的平均能量改变时, 输出脉冲的频谱变化如图 4 所示. 从图 4 可以看出, 输出光谱随着入射脉冲的能量增加而逐渐展宽. 当入射脉冲的平均能量达到 80 mW 时, 获得了最大展宽可达到 600 nm 的对称平坦超连续光谱.

脉冲的展宽受到色散、非线性、入射脉冲能量、中心波长等多种因素的影响. 同时, 光纤中的色散和非线性系数作为两个非常重要的影响因素, 在超连续谱的产生中起了决定性作用. 在正常色散区域, 光纤光谱的展宽正比于孤子因子 $N = \sqrt{L_D/L_{NL}}$.

4 结论

本文设计了一种全波段正常色散的 SF57 PCF, 利用有限元法数值模拟了光纤的色散特性. 模拟结果显示, 在 1550 nm 处附近, 该光纤具有最大的色散值, 且在全波段为正常色散. 基于上述这两点, 通过改变入射脉冲能量和光纤的长度, 采用自适应分布傅里叶方法数值模拟了超短激光脉冲在其中传输时光谱的演变情况, 详细地分析了超连续谱产生的机理. 最后获得了大约 600 nm 的平坦对称的中红外超连续光谱. 这对中红外光谱的进一步研究具有一定的指导意义, 有助于新型光电子器件的进一步研制.

- [1] Yan F P, Wang L, Mao X Q, Gong T R, Liu P, Tao P L, Peng W J 2010 *Opt. Commun.* **283** 3658
- [2] Li L L, Feng G Y, Yang H, Zhou G R, Zhou H, Zhu Q H, Wang J J, Zhou S H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7005 (in Chinese) [李林栗, 冯国英, 杨浩, 周国瑞, 周昊, 朱启华, 王建军, 周寿桓 2009 物理学报 **58** 7005]
- [3] Yan H F, Yu Z Y, Tian H D, Liu Y M, Han L H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3273 (in Chinese) [闫海峰, 俞重远, 田宏达, 刘玉敏, 韩利红 2010 物理学报 **59** 3273]
- [4] Harun S W, Akbari R, Arof H, Ahmad H 2011 *Laser Phys.* **21** 1215
- [5] Wang Y B, Xiong C L, Hou J, Lu Q S, Peng Y, Chen Z L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 014201 (in Chinese) [王彦斌, 熊春乐, 侯静, 陆启生, 彭杨, 陈子伦 2011 物理学报 **60** 014201]
- [6] Dudley J M, Genty G, and Coen S 2006 *Rev. Mod. Phys.* **78** 1135
- [7] Hilligsøe K M, Andersen T, Paulsen H, Nielsen C, Mølmer K, Keiding S, Kristiansen R, Hansen K, Larsen J 2004 *Opt. Express* **12** 1045
- [8] Andresen E R, Paulsen H N, Birkedal V, Thøgersen J, Keiding S R 2005 *J. Opt. Soc. Am. B* **22** 1934
- [9] Zhu X P, Li S G, Du Y, Han Y, Zhang W Q, Ruan Y L, Ebendorff-Heidepriem H, Afshar H, Monro T M 2013 *Chin. Phys. B* **22** 014215
- [10] Heidt A M 2010 *J. Opt. Soc. Am. B* **27** 550
- [11] Falk P, Frosz M, Bang O 2005 *Opt. Express* **13** 7535
- [12] Heidt A M, Hartung A, Bosman G W, Krok P, Rohwer E G, Schwoerer H, Bartelt H 2011 *Opt. Express* **19** 3775
- [13] Hossain M A, Namihira Y, Razzak S M A, Islam M A, Liu J, Kaijage S F, Hirako Y 2012 *Opt. Laser Technol.* **44** 976
- [14] Jing Q, Ma H, Zhang X, Huang Y, Ren X 2012 *Opt. Commun.* **285** 2917
- [15] *Schott Optical Glass Catalogue* 2007 <http://www.schott.com> [2013-05-26]
- [16] Kalashnikov V L, Sorokin E, Sorokina I T 2007 *Appl. Phys. B* **87** 37

Supercontinuum generation in all-normal dispersion photonic crystal fiber*

Li Shu-Guang[†] Zhu Xing-Ping Xue Jian-Rong

(Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology, College of Science, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

(Received 27 May 2013; revised manuscript received 17 June 2013)

Abstract

A kind of lead silicate photonic crystal fiber (PCF) is proposed in this paper. The dispersion characteristics of this SF57 PCF are studied by the finite element method. The results demonstrate that the PCF presents all-normal dispersion profiles in the visible and infrared spectral regions. We use an adaptive split-step Fourier method to study the propagations of the 1550 nm and 150 fs laser pulse in the PCF. The resulting spectral profiles are extremely flat from 1300 nm to 1900 nm and have excellent stabilities and coherence properties.

Keywords: photonic crystal fiber, supercontinuum generation, normal dispersion

PACS: 42.65.-k, 42.79.Nv, 42.81.-i

DOI: 10.7498/aps.62.204206

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61178026) and the Key Program of the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grant No. E2012203035).

[†] Corresponding author. E-mail: shuguangli@ysu.edu.cn