

Design of Photonic Crystal Fiber with Zero Dispersion and High Nonlinearity at the Wavelength of 1 μm

Ningbo Sui, Tiancong Xu, Guosheng Wei, Jinke Li, Zhao Chen

Beijing Glass Research Institute, Beijing
Email: suiningbo@163.com

Received: Mar. 7th, 2019; accepted: Mar. 20th, 2019; published: Mar. 27th, 2019

Abstract

A kind of zero dispersion and high nonlinearity photonic crystal fiber at the wavelength of 1 μm is designed. Characteristics such as dispersion, effective mode area, and nonlinear coefficient of the fiber are investigated by the finite element method. Simulation results show that the dispersion is 0 at the wavelength of 1 μm when the air hole pitch is 4.344 μm , the effective mode area is 11.07 μm^2 and the nonlinear coefficient is 18.17 $\text{W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$. It could be widely used in the high speed optical communications, optic fiber sensors and nonlinear optics.

Keywords

Zero Dispersion, Nonlinearity, Photonic Crystal Fiber, Optic Fiber Sensors

1 μm 波段零色散高非线性光子晶体光纤的设计

隋宁菠, 徐天聪, 魏国盛, 李进科, 陈 钊

北京玻璃研究院, 北京
Email: suiningbo@163.com

收稿日期: 2019年3月7日; 录用日期: 2019年3月20日; 发布日期: 2019年3月27日

摘 要

本文设计了一种在1 μm 波段具有零色散、高非线性系数的光子晶体光纤, 采用有限元法研究了该光纤的色散特性、模场特性及非线性特性。数值计算结果表明, 当光纤包层孔间距为4.344 μm 时, 在1 μm 波

长处可获得零色散, 有效模场面积为 $11.07 \mu\text{m}^2$, 非线性系数为 $18.17 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 。这种非线性光纤在高速光通信、光纤传感及非线性光学方面具有广泛的应用前景。

关键词

零色散, 非线性, 光子晶体光纤, 光纤传感

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

色散是评价波导性能的一个重要参数, 它对飞秒激光的诸多应用都起着重要的作用[1] [2] [3], 比如孤子传输、超短脉冲产生、超连续谱产生和谐波产生等。由于脉冲的不同频率分量在光纤内传输的速度略微不同, 导致传输过程中产生延迟引起脉冲的展宽, 称之为色散, 色散在短脉冲传输中起关键作用。仅当所有的频谱分量同时到达时脉冲宽度才能保持不变。由于脉冲展宽致使前后脉冲相互重叠, 产生数字信号的码间串扰, 降低光通信质量, 所以光纤的色散一直都是光通讯领域研究的主要课题之一。在非线性的范围内, 色散和非线性的结合将会引起不同的结果。

普通石英光纤的零群速度色散(Group Velocity Dispersion, GVD)一般在 $1.27 \mu\text{m}$ 以上[4]。而光子晶体光纤可以仅由单一材料制成, 因此纤芯和包层在热力学上可以做到完全匹配, 也就是说, 纤芯和包层的折射率差不会由于材料的不相容性而受到限制。由于光子晶体光纤包层的独特结构使得芯层和包层的折射率差可以做得较大, 从而使波导色散对光纤色散的贡献变大, 可将光子晶体光纤的零色散点调节到可见光波段。因此, 零色散点可调是光子晶体光纤的一个突出特性, 只需要简单改变光子晶体光纤的结构参数, 就可以将零色散点移动到需要的波段附近, 根据不同场合的需要设计需要的光纤结构。

本文设计了一种包层结构为 6 层空气孔的光子晶体光纤, 主要应用于超短脉冲产生、超连续谱产生等方面, 通过运用有限元法研究了光纤的色散、有效模面积、非线性系数特性。通过设置合理的结构参数, 获得了 $1 \mu\text{m}$ 波段零色散的光子晶体光纤, 其有效模场面积为 $11.07 \mu\text{m}^2$ 、非线性系数为 $18.17 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$, 为其应用于高速光通信、光纤传感及非线性光学等领域提供了一定的理论依据。

2. 理论分析与光纤结构

有限元法适用于不同形状空气孔任意排列的 PCF 计算, 是分析 PCF 物理特性的一种较高效的数值方法。因此, 本文采用有限元法对 PCF 进行理论计算, 选择完美匹配层吸收边界条件, 其电磁波方程[5]为:

$$\nabla \times \left[\frac{1}{\mu_r} \nabla \times E \right] = \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \varepsilon_r \times E \quad (1)$$

其中, E 、 μ_r 和 ε_r 分别为电场强度、介质的磁导率和相对介电常数, c 和 ω 为光在真空中的速度和频率。对上式进行求解, 可以得到光纤模式的有效折射率 n_{eff} 和模场分布, 进而可以通过分析得到 PCF 的有效模面积、非线性和色散特性。

光子晶体光纤的色散 D 将通过曲线拟合的方式计算, 表示为[6]:

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

其中， λ 、 $\operatorname{Re}(n_{eff})$ 分别为光在真空中的波长、对应模式有效折射率的实部。

非线性性能用非线性系数 γ 衡量，是光纤性能的重要参数，计算公式为[6]：

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}} \quad (3)$$

其中， n_2 为石英的非线性折射率系数，值为 $3.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ ， A_{eff} 为有效模面积，可以表示为[6]：

$$A_{eff} = \frac{\left(\iint E^2 dx dy\right)^2}{\iint E^4 dx dy} \quad (4)$$

其中， E 为光传播时的横向电场分布。

本文设计的 PCF 结构如图 1 所示，在纯石英材料上，按三角格子结构均匀排列 6 层圆形空气孔，圆孔间距为 Λ ，圆孔直径为 d ，取空气孔的折射率为 1，背景材料的折射率由 Sellmeier 公式[7]得到：

$$n^2 - 1 = \frac{0.6961663\lambda^2}{\lambda^2 - 0.0684043^2} + \frac{0.4079426\lambda^2}{\lambda^2 - 0.1162414^2} + \frac{0.8974794\lambda^2}{\lambda^2 - 9.896161^2} \quad (5)$$

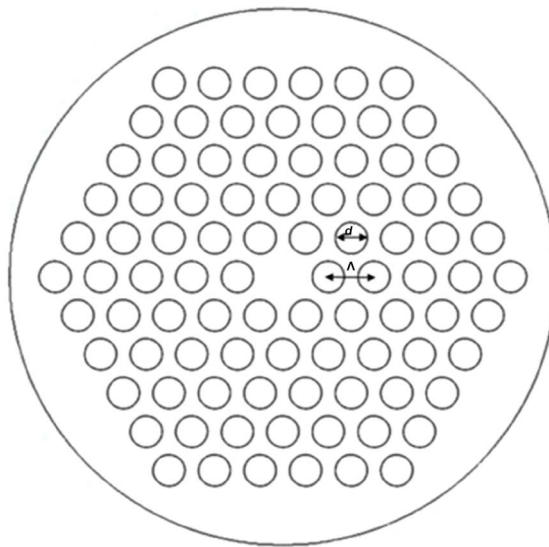


Figure 1. Schematic of the PCF
图 1. PCF 的结构图

3. 数值模拟和结果分析

本文光纤结构相对简单，仅是通过改变小孔直径、孔间距的变化来获得一种零色散的光纤，并分析其有效模面积和非线性系数的变化。仿真分析的软件基于 MATLAB 数值软件编制，对各参数设置一个变量，具体取值如各图说明。

3.1. 色散特性

色散作为光纤的一个重要性能参数，对光通信传输速率具有重要影响，同时也决定着光纤是否可以应用到超连续谱、谐波获得等领域，对于色散补偿光纤、光纤激光器的设计具有决定作用，因此光子晶

体光纤的色散控制十分重要。

图 2、图 3 为不同孔间距、不同占空比下的色散特性曲线。从图 2 或图 3 可以看出，在保持孔间距不变的情况下，随着小孔直径的增大，零色散波长向短波方向移动；从图 2 和图 3 可以看出，在保持小孔直径不变的情况下，随着孔间距的增大，零色散波长向长波方向移动。

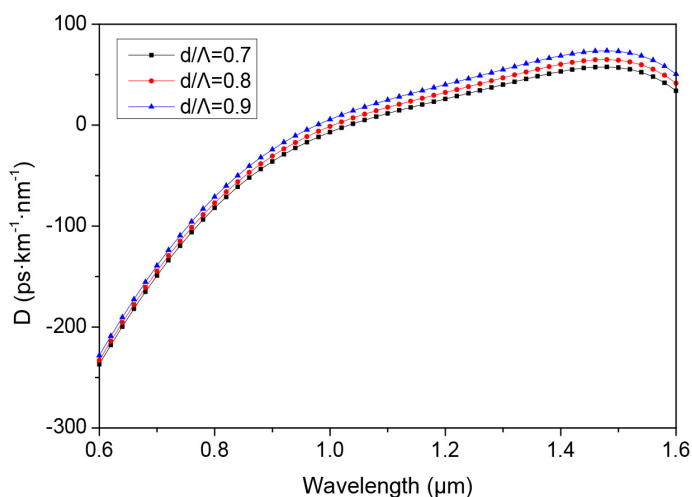


Figure 2. D change with wavelength ($\Lambda = 4 \mu\text{m}$)
图 2. 孔间距为 $4 \mu\text{m}$ 的色散曲线

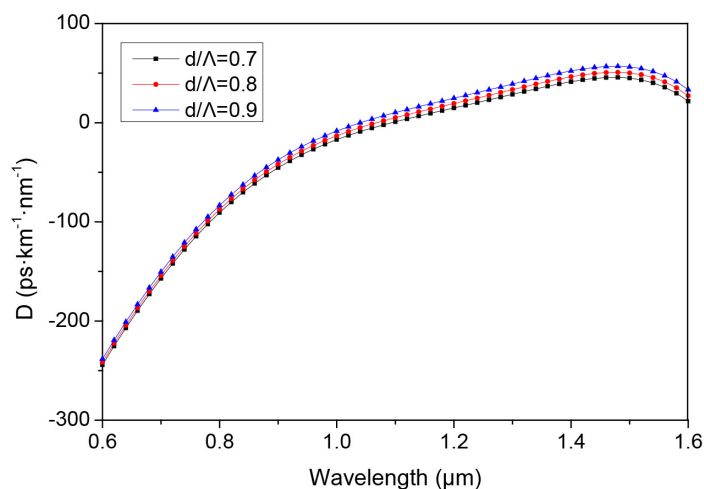


Figure 3. D change with wavelength ($\Lambda = 5 \mu\text{m}$)
图 3. 孔间距为 $5 \mu\text{m}$ 的色散曲线

虽然高的占空比有利于非线性系数的提升，但过高的占空比无法从工艺上实现，综合考虑后选择占空比为 0.9，通过调节孔间距的大小来实现零色散波长移动。结合图 2、图 3 可以发现，当占空比为 0.9 时，零色散波长值要在 $1 \mu\text{m}$ ，则孔间距应在 $4\sim 5 \mu\text{m}$ 之间，如图 4 所示。项目组又仔细分析了孔间距在 $4\sim 5 \mu\text{m}$ 之间时色散的变化曲线，如图 5 所示。经分析，当孔间距应为 $4.344 \mu\text{m}$ 时，在波长 $1 \mu\text{m}$ 处的色散为 0。光子晶体光纤的色散特性和孔间距、孔直径关系密切，通过调整光纤的结构参数，可以获得不同的色散特性以满足不同应用的需要。

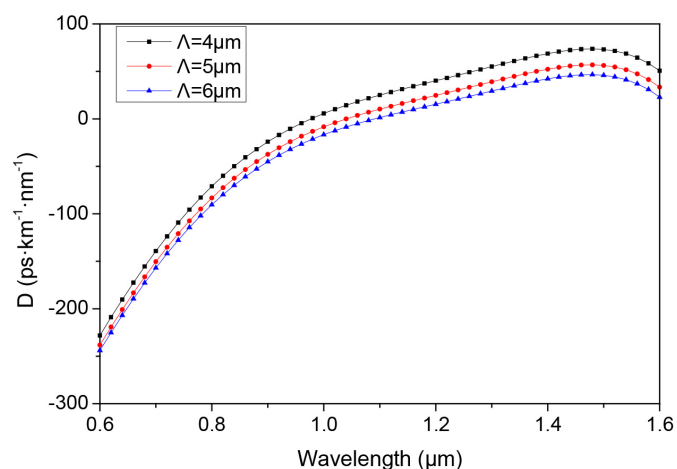


Figure 4. D change with wavelength ($d/\Lambda = 0.9$)

图 4. 占空比为 0.9 时周期变化时色散曲线

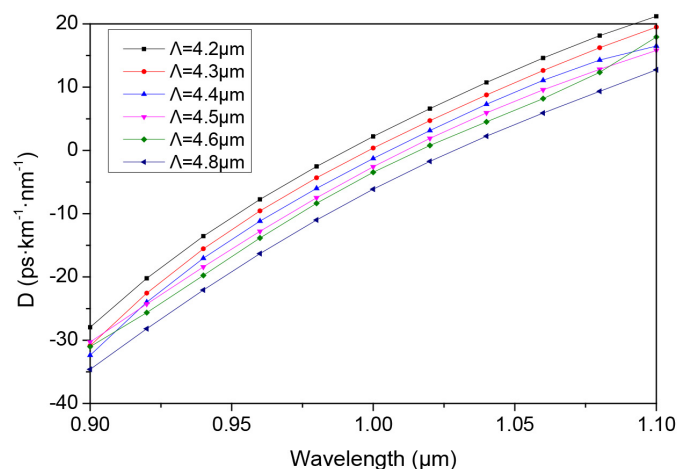


Figure 5. D change with wavelength under different Λ

图 5. 不同孔间距色散随波长的变化

3.2. 有效模场面积及非线性特性

根据 3.1 得出了合适的光纤结构参数，孔径周期为 $4.344 \mu\text{m}$ ，孔直径为 $3.910 \mu\text{m}$ ，利用有限元分析了其色散、有效模场面积与非线性系数随波长的变化关系，如图 6、图 7 所示。由图 6 可知，在 1500 nm 以前色散随波长的增加而增大，在 1500 nm 后色散呈降低趋势，零色散点在 1000 nm 。

由图 7 可见，在分析波段内非线性系数随波长的增大而降低，非线性系数变化率也呈降低趋势；模场面积随波长的增大而呈增加趋势，这是由于随着波长的增加，包层结构对光束的限制能力逐渐减弱，光场一部分能量逐渐从纤芯泄漏到包层中，导致有效模场面积逐渐增大。本文设计的光子晶体光纤在波长 $1 \mu\text{m}$ 处模场面积为 $11.07 \mu\text{m}^2$ 、非线性系数为 $18.17 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ ，具有相对较高的非线性系数，其在超连续谱、光孤子通信和光纤器件等方面具有重要应用价值。

4. 结论

本文设计了一种在 $1 \mu\text{m}$ 波段具备零色散、高非线性系数的光子晶体光纤，采用有限元法分析了该光纤的色散、有效模场面积及非线性系数特性。研究表明，当孔间距为 $4.344 \mu\text{m}$ 、孔直径为 $3.91 \mu\text{m}$ 时，

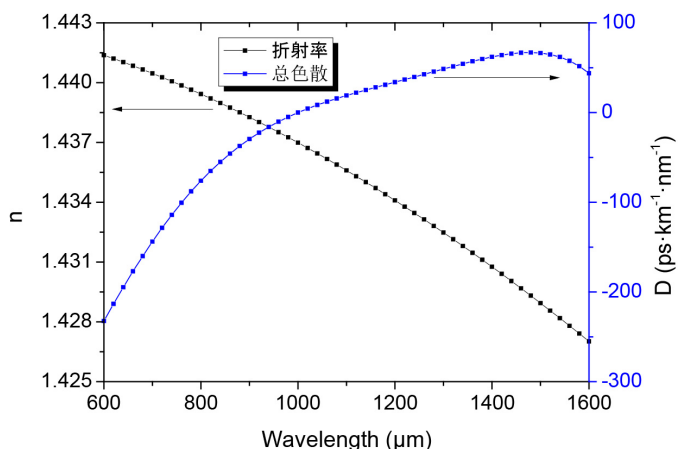


Figure 6. n_{eff} and D change with wavelength
图 6. 有效折射率与色散

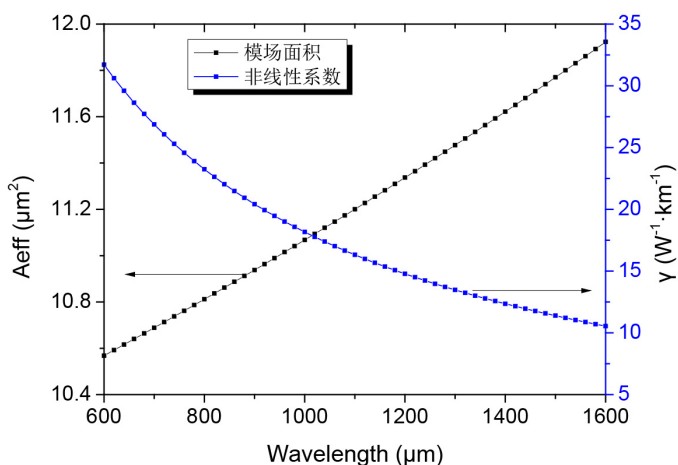


Figure 7. A_{eff} and γ change with wavelength
图 7. 模场面积与非线性系数

该光纤在 1 μm 波段具有零色散，其模场面积为 $11.07 \mu\text{m}^2$ ，非线性系数为 $18.17 \text{W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ ，可满足非线性要求较高的应用场合，有助于光纤在通信波段产生超连续谱，适用于高速光通信。综上所述，本文设计的光子晶体光纤能够实现零色散、高非线性，为其应用于高速光通信、光纤传感及非线性光学等领域提供了一定的理论依据。

参考文献

- [1] Koeford, J.G., Friis, S.M.M., Christensen, J.B., *et al.* (2017) Spectrally Pure Heralded Single Photons by Spontaneous Four-Wave Mixing in a Fiber: Reducing Impact of Dispersion Fluctuations. *Optics Express*, **25**, 20835-20849.
- [2] 王振威, 张晓娟. 反常色散光子晶体光纤中超连续谱的产生[J]. 电脑知识与技术, 2016, 12(33): 254-255.
- [3] 杨建菊, 韩颖, 王伟, 等. 高非线性光子晶体光纤深紫外超连续谱的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(4): 1215-1219.
- [4] Wang, W., Hou, L.-T., Lu, M., *et al.* (2009) Design of Double Cladding Nearly Zero Dispersion Flattened Nonlinear Photonic Crystal Fiber. *Chinese Physics Letters*, **26**, 114205-114209.
- [5] 王二垒, 姜海明, 谢康, 等. 一种高双折射高非线性多零色散波长光子晶体光纤[J]. 物理学报, 2014, 63(13):

134210.

- [6] 于程程, 励强华, 谷芊志, 等. 一种高双折射光子晶体光纤的特性研究[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2018, 34(2): 82-86.
- [7] 刘旭安, 吴根柱, 陈达如, 等. 基于椭圆孔包层和微型双孔纤芯的新型高双折射光子晶体光纤[J]. 光子学报, 2011, 40(11): 1728-1732.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-5450, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: oe@hanspub.org