

DOI:10.16136/j.joel.2022.01.0340

# 色散补偿微结构光纤拉曼放大特性的研究

赵丽娟<sup>1,2,3</sup>, 黄雯利<sup>1</sup>, 徐志钮<sup>1\*</sup>, 杨志<sup>1,2,3</sup>

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071003; 2. 华北电力大学 河北省电力物联网技术重点实验室, 河北 保定 071003; 3. 华北电力大学 保定市光纤传感与光通信技术重点实验室, 河北 保定 071003)

**摘要:**为了提高光纤拉曼放大器的放大性能,设计了一种高拉曼增益系数和较大负色散的光子晶体光纤。利用全矢量有限元分析方法对包层为正八边形的光子晶体光纤进行数值分析,探究空气孔结构和纤芯掺锗浓度的改变对有效模场面积和拉曼增益系数的影响,最后得到一种小模场面积、高拉曼增益系数和较大负色散的光子晶体光纤。研究结果表明:在泵浦波长为1450 nm且信号波长为1550 nm处包层空气孔直径为1 μm、孔间距为1.2 μm的掺锗光子晶体光纤结构可获得19.97 W<sup>-1</sup> · km<sup>-1</sup>的高拉曼增益系数,同时在1550 nm处可获得-327.6 ps/(nm · km)的较大负色散,该光纤的综合特性对于拉曼放大器放大性能的提高有重要意义。

**关键词:**正八边形光子晶体光纤;有效模场面积;拉曼增益系数;掺锗;色散

中图分类号:TN913.7 文献标识码:A 文章编号:1005-0086(2022)01-0091-07

## Research on Raman amplification properties of dispersion compensation microstructure fiber

ZHAO Lijuan<sup>1,2,3</sup>, HUANG Wenli<sup>1</sup>, XU Zhiniu<sup>1\*</sup>, YANG Zhi<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China; 2. Hebei Provincial Key Laboratory of Power Internet of Things Technology, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China; 3. Baoding Key Laboratory of Optical fiber Sensing and Optical Communication Technology, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China)

**Abstract:** In order to improve the amplification performance of the fiber Raman amplifier, a photonic crystal fiber with high Raman gain coefficient and larger negative dispersion was designed. The full vector finite element analysis method is used to numerically analyze the photonic crystal fiber with a regular octagonal cladding, explore the effects of changes in air pore structure and core doped germanium concentration on effective mode field area and Raman gain coefficient. Finally, a photonic crystal fiber with small mode field area, high Raman gain coefficient and large negative dispersion is obtained. The research results show that the germanium-doped photonic crystal fiber structure with a cladding air hole diameter of 1 μm and a hole spacing of 1.2 μm at a pump wavelength of 1450 nm and a signal wavelength of 1550 nm can obtain a high Raman gain coefficient of 19.97 W<sup>-1</sup> · km<sup>-1</sup>. At the same time, a large negative dispersion of -327.6 ps/(nm · km) can be obtained at 1550 nm. The comprehensive characteristics of this fiber are of great significance to the improvement of the amplification performance of the Raman amplifier.

**Key words:** regular octagonal photonic crystal fiber; effective mode field area; Raman gain coefficient; germanium doped; dispersion

\* E-mail: wzcnjxx@163.com

收稿日期:2021-05-22 修订日期:2021-06-19

基金项目:国家自然科学基金(62171185, 61775057)、河北省自然科学基金(E2019502177, E2020502010)、河北省省级科技计划(SZX2020034)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(2021MS072, 2019MS085)资助项目

## 1 引言

在光通信系统中,拉曼放大作为一种平衡光纤固有损耗的工具变得越来越重要。拉曼放大器因其噪声较低、带宽较宽且在任何波长都可实现增益等优点已逐渐成为扩展密集波分复用的有效手段<sup>[1]</sup>。拉曼增益是衡量光纤拉曼放大器的一个重要标准,它代表了放大器对信号的放大能力,而拉曼增益系数是代表拉曼增益的重要参数。拉曼放大器的增益介质是传输光纤本身,为了在较短的光纤长度内获得足够的拉曼放大信号增益,选择高拉曼增益系数或小有效模场区域的特殊光纤是提高拉曼增益的有效手段<sup>[2]</sup>。

近年来,光子晶体光纤(photon crystal fiber, PCF)因其包层的特殊微结构使其具有许多优良特性而得到广泛关注,如无截�单模传输、低的光纤损耗、高双折射性以及更高非线性等特性<sup>[3]</sup>。BIRKS等<sup>[4]</sup>利用在二维光子晶体中嵌入1 μm间距的六边形气孔阵列的中心芯来制作全石英光纤,并证明了通过该方法可以制作任意波长的单模光纤。已有学者证明,光子晶体光纤的非线性特性可以用于拉曼放大<sup>[5]</sup>。FUOCH等<sup>[6]</sup>证明了通过设计良好的三角晶格PCF可以增大其拉曼增益系数,从而提高拉曼增益性能。王旭东等<sup>[7]</sup>研究了不同掺锗半径和掺锗浓度对正六边形PCF一些特性的影响,证明了对纤芯掺锗可以提高光纤非线性系数。另外,色散补偿对于光纤通信和非线性光学的实际应用是非常重要的<sup>[8]</sup>。YONG等<sup>[9]</sup>设计出了一种双折射可达 $1.5 \times 10^{-3}$ 、负色散值为 $-150 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 的PCF。PRABU等<sup>[10]</sup>提出了一种外包层为八边形空气孔的高双折射混合包层光子晶体光纤,最后得到 $6.1 \times 10^{-3} \text{ dB/km}$ 的低限制性损耗和 $-274.5 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 的较低负色散。这种外包层为八边形空气孔的光子晶体光纤显示了优异的光纤性能,但目前尚未有学者将其应用于拉曼放大器设计。

基于以上分析,本文使用了常见的正八边形PCF进行研究。首先利用全矢量有限元法建模研究了不同空气孔直径、孔间距和纤芯掺锗浓度下PCF的电场强度,利用计算结果分析获得了这3种参数对有效模场面积及拉曼增益系数的影响规律,参数优化后最终得到一种小模场面积且高拉曼增益系数的PCF,同时验证了该光纤的较低负色散特性,有良好的色散补偿效果。结果证明,可将八边形PCF应用于拉曼放大器的设计从而提升放大器的性能。

## 2 基本原理

### 2.1 拉曼放大器的理论模型

拉曼放大的增益机制是受激拉曼散射(stimulated Raman scattering,SRS),能量通过非线性散射过程从一个波长转移到一个较长的波长。当用强泵浦将弱信号发射到光纤时,信号由于泵浦和信号之间的拉曼相互作用而被放大,形成受激拉曼散射。对于小信号状态,可以忽略由开关磁阻引起的泵损耗。在连续波(continuous wave,CW)情况下,根据从泵到信号的功率传输,通过以下等式描述信号放大<sup>[11]</sup>。

$$\frac{dP_S}{dZ} = \gamma_R P_S P_P - \alpha_S P_S, \quad (1)$$

$$\frac{dP_P}{dZ} = -\alpha_P P_P, \quad (2)$$

式中, $P_S$  和  $P_P$  分别是信号和泵浦功率, $Z$  是传输距离, $\alpha_S$  和  $\alpha_P$  是在斯托克斯和泵浦频率的衰减系数,且  $\gamma_R$  是拉曼增益系数<sup>[6]</sup>,它与有效模场面积有如下关系:

$$\gamma_R = \frac{g_R}{A_{\text{eff}}}, \quad (3)$$

式中, $g_R$  是在泵浦和信号之间测得的拉曼增益效率<sup>[6]</sup>, $A_{\text{eff}}$  是有效模场面积。

当泵浦光和信号光相互作用时, $A_{\text{eff}}$  由式(4)表示:

$$A_{\text{eff}} = \frac{\iint_S I_S(x, y) dx dy \iint_S I_P(x, y) dx dy}{\iint_S I_S(x, y) I_P(x, y) dx dy}, \quad (4)$$

式中, $I_S$  是斯托克斯信号的强度, $I_P$  是泵浦强度。 $I$  与横电场矢量  $E$  的关系表示为  $I = E^2$ 。

$\gamma_R$  的值与纤芯是否掺锗有关,可以通过以下关系式进行计算<sup>[9]</sup>:

$$\begin{aligned} \gamma_R = C_{\text{SiSi}} & \iint_S (1 - 2m(x, y)) i_S(x, y) i_P(x, y) \\ & dx dy + C_{\text{GeSi}} \iint_S (1 - 2m(x, y)) \\ & i_S(x, y) i_P(x, y) dx dy, \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $i_S$  和  $i_P$  分别是归一化的信号强度和泵浦强度,且与  $I_S$ 、 $I_P$  有如下关系:

$$i_k(x, y) = I_k(x, y)/P_k, \quad (6)$$

$$P_k = \iint_S I_k(x, y) dx dy, \quad (7)$$

式中, $k = S, P$ 。式(5)中, $m(x, y)$  表示掺锗浓度。 $C_{\text{SiSi}}$  和  $C_{\text{GeSi}}$  分别是纯硅光纤的泵浦光和信号光之间的增益谱,与频移  $\Delta v$  有关。频移关系如下<sup>[12]</sup>:

$$\Delta v = v_P - v_S = \frac{1}{\lambda_P} - \frac{1}{\lambda_S} (\text{m})^{-1}, \quad (8)$$

式中, $v_P$  和  $v_S$  分别是泵浦和信号频率, $\lambda_P$  和  $\lambda_S$  分别是

泵浦和信号波长。本文中泵浦和信号波长分别采用 1 450 nm 和 1 550 nm, 此时,  $C_{\text{SiSi}} = 3.34 \times 10^{-14}$  m/W,  $C_{\text{GeSi}} = 1.18 \times 10^{-13}$  m/W。

## 2.2 色散的计算

PCF 的色散计算式如下:

$$D(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \operatorname{Re}[n_{\text{eff}}]}{d\lambda^2}, \quad (9)$$

式中,  $\operatorname{Re}[n_{\text{eff}}]$  是有效折射率的实部,  $c$  是真空中的光速。

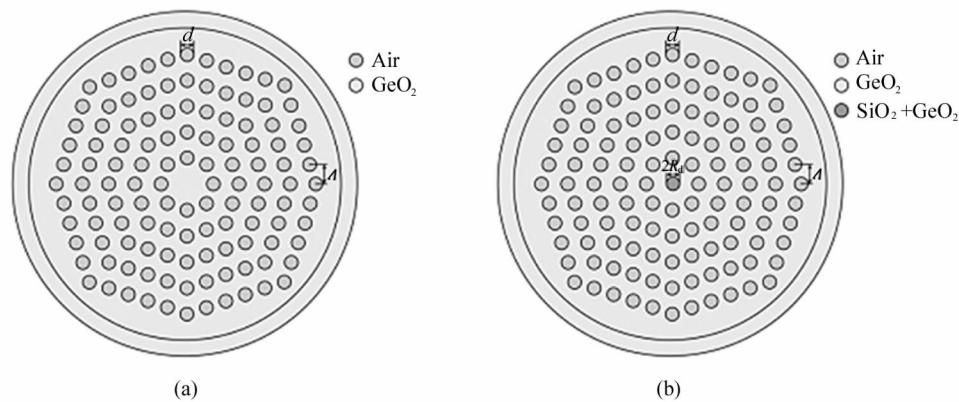


图 1 PCF 横截面示意图:(a) 未掺杂 PCF; (b) 掺杂 PCF

Fig. 1 Schematic diagram of PCF cross section: (a) Undoped PCF; (b) Doped PCF

在理论研究中, 光纤包层背景材料为纯石英, 不同波长下的有效折射率可通过式(10)所示的 Sellmeier 公式计算得到<sup>[13]</sup>, 根据文献[14], 掺锗光纤的有效折射率可由式(11)计算得到。

$$n^2(\lambda) = 1 + \sum_{i=1}^3 \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - l_i^2}, \quad (10)$$

$$n^2(\lambda) = 1 + \sum_{i=1}^3 \frac{[SA_i + x(GA_i - SA_i)]\lambda^2}{\lambda^2 - [Sl_i + x(GL_i - Sl_i)]^2}, \quad (11)$$

式中,  $A_i$ 、 $l_i$ 、 $SA_i$ 、 $Sl_i$ 、 $GA_i$ 、 $GL_i$  都为 Sellmeier 系数,  $x$  为掺锗浓度。系统调研后纯硅和掺杂硅的 Sellmeier 系数见表 1 所示。

表 1 纯硅和掺杂硅的 Sellmeier 系数

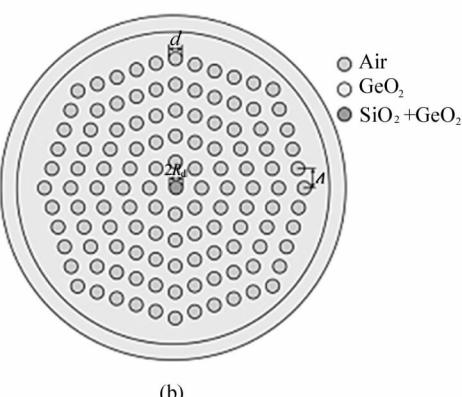
Tab. 1 Sellmeier coefficients of pure silicon and doped silicon

| $\text{SiO}_2$ | Sellmeier coefficients | $\text{GeO}_2$ | Sellmeier coefficients |
|----------------|------------------------|----------------|------------------------|
| $SA_1$         | 0.6961663              | $GA_1$         | 0.80686642             |
| $SA_2$         | 0.4079426              | $GA_2$         | 0.71815848             |
| $SA_3$         | 0.8974994              | $GA_3$         | 0.85416831             |
| $Sl_1$         | 0.0684043              | $Gl_1$         | 0.068972606            |
| $Sl_2$         | 0.1162414              | $Gl_2$         | 0.15396605             |
| $Sl_3$         | 9.896161               | $Gl_3$         | 11.841931              |

## 3 数值模拟和结果分析

### 3.1 光子晶体光纤的结构

本文选用空气孔为正八边形的光子晶体光纤结构, 图 1 为 PCF 横截面示意图, 设  $d$  为包层空气孔直径,  $\Lambda$  为包层中两个相邻空气孔中心之间的距离,  $R_d$  为纤芯掺锗半径, 本文所做的研究中  $R_d$  的变化对测量结果无显著影响, 则依照文献[6]将  $R_d$  设为  $\Lambda/2$ 。



将 PCF 参数设定完成后, 基于有限元法设计光纤结构并建立电磁场模型, 结合完美匹配层对该模型进行模拟计算。通过求解式(12)所示的 PCF 的电磁波动方程, 得到光纤模式的有效折射率、电场强度等参数。

$$\nabla \times [\frac{1}{\epsilon_r} \nabla \times \mathbf{H}] = [\frac{\omega}{c}]^2 \mu_r \mathbf{H}, \quad (12)$$

式中,  $\mathbf{H}$  为磁场强度,  $\epsilon_r$  和  $\mu_r$  分别为介质的相对介电常数和磁导率,  $\omega$  和  $c$  分别为光波的角频率和光在真空中中的光速。

如图 2 所示, 得到在未掺锗和掺锗情况下的 PCF 模式电场分布图。针对 3.1 节图 1(a)所示的光纤结构模拟计算得到的模式电场分布如图 2(a)所示。图 1(b)所示的光纤结构模拟计算得到的模式电场分布如图 2(b)所示。对比图 2(a)和 2(b), 可以分析出纤芯掺杂 PCF 的模场束缚能力强, 基模能量将更多地向纤芯掺杂部分集中, 横电场分布更紧密, 从而导致纤芯掺锗部分能量较大。

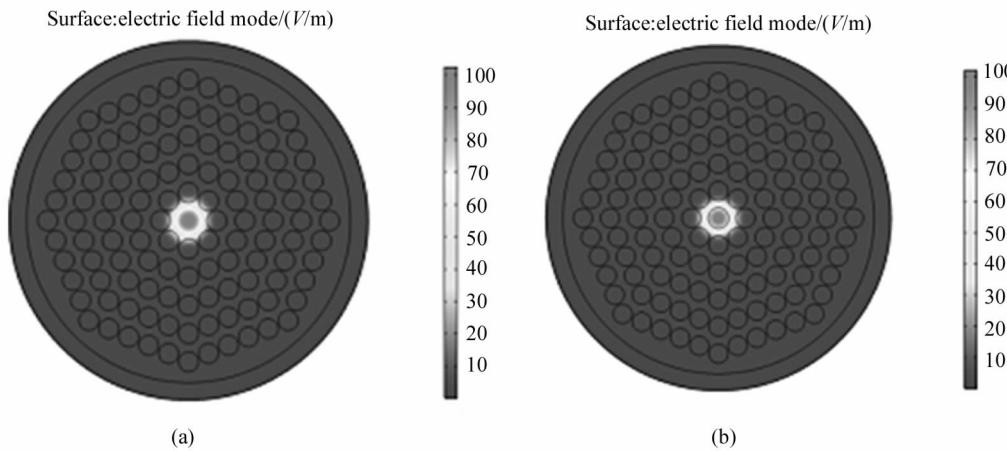


图 2 模式电场分布图:(a) 未掺杂 PCF; (b) 掺杂 PCF

Fig. 2 Pattern electric field distribution map:(a) Undoped PCF; (b) Doped PCF

### 3.2 PCF 空气孔结构参数的影响

图 3 给出了不同孔间距  $\Lambda$  下有效模场面积  $A_{\text{eff}}$  和有效拉曼增益系数  $\gamma_R$  与空气孔直径  $d$  的关系。此时,设定  $d$  的取值范围为  $0.7 \mu\text{m}$  至  $1.1 \mu\text{m}$ ,  $\Lambda$  给定取值分别为  $1.2 \mu\text{m}$ 、 $1.7 \mu\text{m}$  和  $2.2 \mu\text{m}$ , PCF 纤芯未掺杂。

可见,其他条件相同时,  $A_{\text{eff}}$  随  $d$  的增大而减小,这是因为空气孔越大,模式电场将更紧密地束缚在纤芯里,横向电场分布更窄,从而导致  $A_{\text{eff}}$  越小。另外,  $\gamma_R$  随  $d$  的增大而增大,该结果与式(3)吻合。已知  $\gamma_R$  可作为衡量拉曼增益特性的重要标准之一,则需要选择  $\gamma_R$  更高的光纤。图 3 中  $d=1.1 \mu\text{m}$  时  $\gamma_R$  最大。

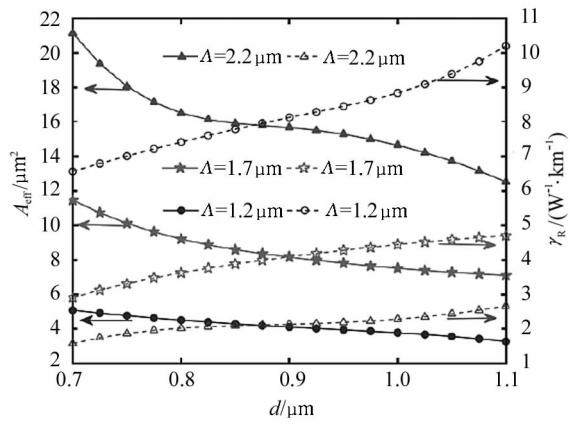
图 3  $A_{\text{eff}}$  和  $\gamma_R$  与空气孔直径的关系Fig. 3 The relationship between  $A_{\text{eff}}$  and  $\gamma_R$  and air hole diameter

图 4 所示了不同孔直径  $d$  下有效模场面积  $A_{\text{eff}}$

和有效拉曼增益系数  $\gamma_R$  与空气孔间距  $\Lambda$  的关系。根据实际制造工艺情况<sup>[15]</sup>, 将  $\Lambda$  的取值范围设置为  $1.2 \mu\text{m}$  至  $2.2 \mu\text{m}$ 。同时,  $d$  给定取值分别为  $0.7 \mu\text{m}$ 、 $0.9 \mu\text{m}$  和  $1.1 \mu\text{m}$ , 纤芯未掺杂。从图 4 可以分析出, 若不改变其他参数,  $A_{\text{eff}}$  随  $\Lambda$  的增大而增大, 证明了  $\Lambda$  的增大导致横向电场分布越广,  $A_{\text{eff}}$  越大; 同时,  $\gamma_R$  随  $\Lambda$  的增大而减小, 该图中  $\Lambda = 1.2 \mu\text{m}$  时  $\gamma_R$  最大。

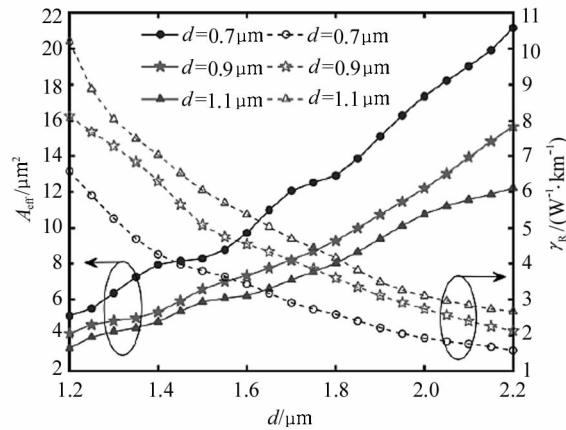
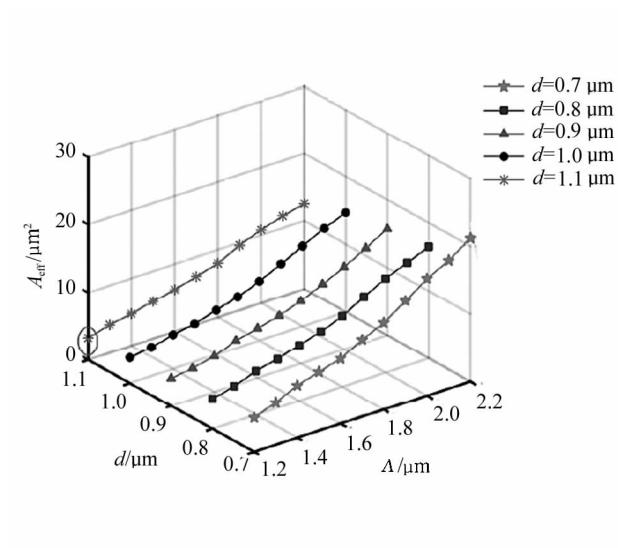
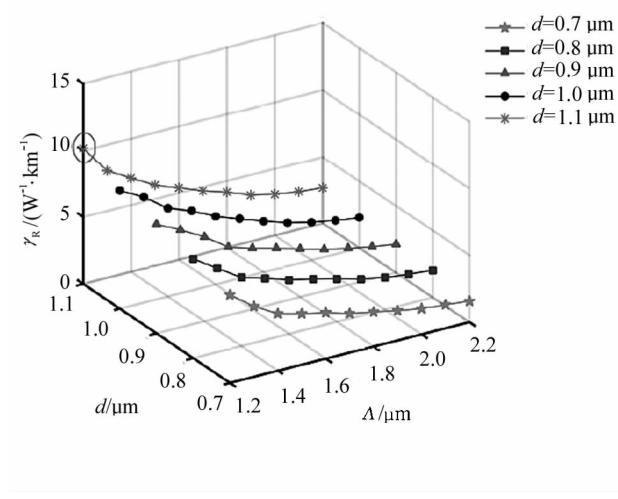
图 4  $A_{\text{eff}}$  和  $\gamma_R$  与空气孔间距的关系Fig. 4 The relationship between  $A_{\text{eff}}$  and  $\gamma_R$  and air hole spacing

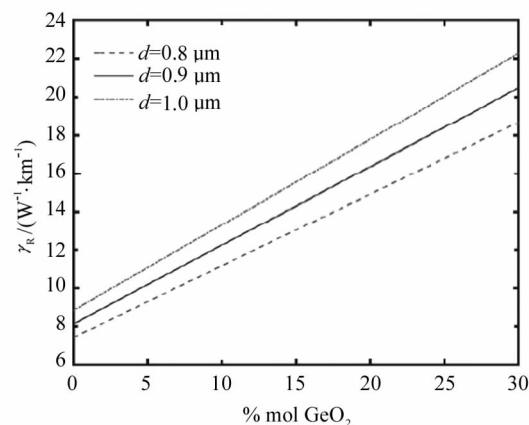
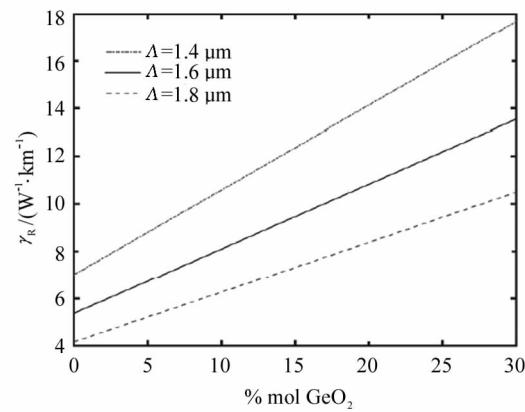
图 5 和图 6 分别表示了  $A_{\text{eff}}$  和  $\gamma_R$  随  $d$  和  $\Lambda$  的变化曲线, 可以更直观更准确地选择  $A_{\text{eff}}$  更小、 $\gamma_R$  更大的 PCF 最优参数。如两图中圆圈处所示, 可得  $d = 1.1 \mu\text{m}$ 、 $\Lambda = 1.2 \mu\text{m}$  时  $A_{\text{eff}}$  最小且  $\gamma_R$  最大。结果证明, 若要得到  $A_{\text{eff}}$  更小的 PCF, 需要其包层空气孔  $d$  越大或者  $\Lambda$  越小。换句话说, 应尽可能地选择比率  $d/\Lambda$  值大的 PCF。这是因为, 通过高的场紧密密度可实

现纤芯和包层的高折射率差,从而得到光纤的更小模场面积。综上所述,在可以实现的实验环境中,选择空气孔越大且越密集的PCF对拉曼增益性能的提高有更好的帮助。

图 5  $A_{\text{eff}}$  随  $d$  和  $\Lambda$  的变化曲线Fig. 5 The curve of the change of  $A_{\text{eff}}$  with  $d$  and  $\Lambda$ 图 6  $\gamma_R$  随  $d$  和  $\Lambda$  的变化曲线Fig. 6 The curve of the change of  $\gamma_R$  with  $d$  and  $\Lambda$ 

### 3.3 掺锗浓度对拉曼增益系数的影响

根据表1提供的数据,可获得不同掺锗浓度下的模式基准折射率,进而对PCF进行建模分析。根据式(5),可以计算出不同浓度下的 $\gamma_R$ 值。如图7和图8所示,不同 $d$ 和 $\Lambda$ 下掺锗浓度和 $\gamma_R$ 的关系PCF随掺锗浓度增加而 $\gamma_R$ 的变化趋势基本相同, $\gamma_R$ 与掺锗浓度呈线性关系,随着纤芯掺锗浓度的增加,可以更好地提高拉曼增益特性。

图 7 不同  $d$  下掺锗浓度和  $\gamma_R$  的关系Fig. 7 The relationship between doped germanium concentration and  $\gamma_R$  under different  $d$ 图 8 不同  $\Lambda$  下掺锗浓度和  $\gamma_R$  的关系Fig. 8 The relationship between germanium doping concentration and  $\gamma_R$  under different  $\Lambda$ 

### 3.4 最优化PCF参数和色散特性的讨论

由3.3节可知,无论选择哪种PCF结构参数,其掺锗浓度都与 $\gamma_R$ 有近似线性关系。研究发现,过高的掺杂浓度会导致光纤过度损耗<sup>[16]</sup>。因此,本文直接选定20% mol的低掺锗浓度。

图9和图10分别展示了20% mol GeO<sub>2</sub>时 $A_{\text{eff}}$ 和 $\gamma_R$ 随 $d$ 和 $\Lambda$ 的变化曲线。图中圆圈处为 $A_{\text{eff}}$ 取到最小值,同时 $\gamma_R$ 取到最大值,最终可以得到3.38 μm<sup>2</sup>的小模场面积和19.97 W<sup>-1</sup> · km<sup>-1</sup>的高拉曼增益系数。经过分析,一个设计良好的光纤的 $\gamma_R$ 能够达到5—6 W<sup>-1</sup> · km<sup>-1</sup><sup>[4]</sup>,与现有的一些光子晶体光纤相比,本文所设计的PCF可获得高拉曼增益系数。

另外,良好的色散补偿特性对于拉曼放大器的性能提高也很关键。图11为结构参数优化后的未

掺锗 PCF 和掺锗 PCF 的色散及有效折射率变化曲线,从中可以分析出,纤芯掺锗导致光纤有效折射率变大,从而可以实现 PCF 的更大负色散特性。最终,该 PCF 在 1550 nm 处可实现  $-327.6 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$  的色散,与现有 PCF 相比,其负色散值较大。

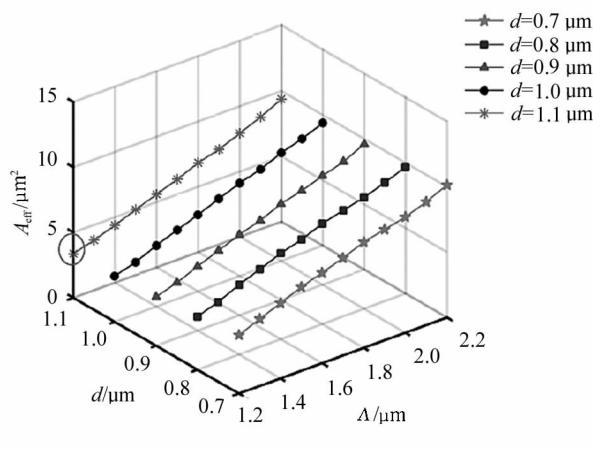


图 9 20% mol  $\text{GeO}_2$  时  $A_{\text{eff}}$  随  $d$  和  $\Lambda$  的变化

Fig. 9 The change of  $A_{\text{eff}}$  with  $d$  and  $\Lambda$  at 20% mol  $\text{GeO}_2$

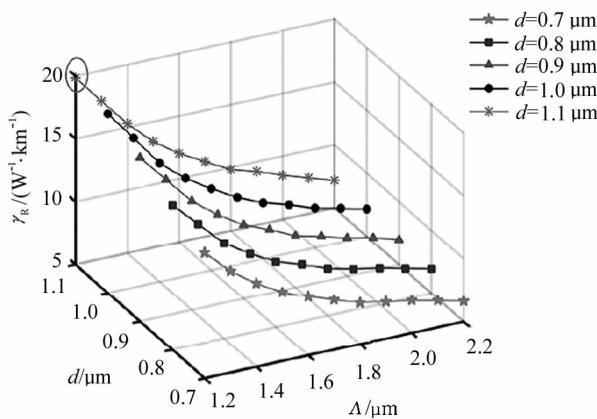


图 10 20% mol  $\text{GeO}_2$  时  $\gamma_R$  随  $d$  和  $\Lambda$  的变化

Fig. 10 The change of  $\gamma_R$  with  $d$  and  $\Lambda$  at 20% mol  $\text{GeO}_2$

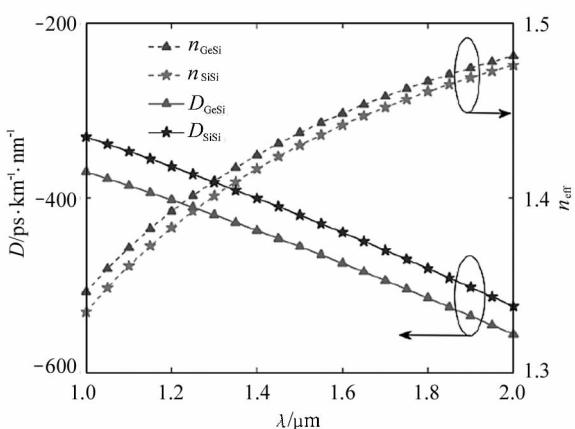


图 11 未掺锗 PCF 和掺锗 PCF 的色散及折射率

Fig. 11 Dispersion and refractive index of undoped germanium PCF and germanium doped PCF

对于本文所设计的 PCF,由上述模拟计算和数据分析可知,空气孔直径为 1  $\mu\text{m}$ 、孔间距为 1.2  $\mu\text{m}$  的纤芯掺锗光纤结构最优,将其与现有的波长为 1550 nm 处的光子晶体光纤进行了进一步的比较,本文所设计光纤与现有 PCF 的性能比较如表 2 所示。可以得出,本文所设计的光子晶体光纤的拉曼放大特性及色散补偿效果更好,将对拉曼放大器的性能提高有很大的帮助。

表 2 本文所设计光纤与现有 PCF 的性能比较

Tab. 2 Performance comparison of the optical fiber designed in this article and the existing PCF

| Fiber type                 | $A_{\text{eff}}$<br>$/(\mu\text{m}^2)$ | $\gamma_R$<br>$/(W^{-1} \cdot \text{km}^{-1})$ | Dispersion<br>$/(\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km}))$ |
|----------------------------|--|--|--|
| PCF <sup>[12]</sup>        | 1.7                                    | —  | -274.5   |
| PCF <sup>[17]</sup>        | 25                                     | 3.28   | —  |
| PCF <sup>[18]</sup>        | 16.01                                  | —  | -280   |
| PCF <sup>[19]</sup>        | —                                      | —  | -298   |
| PCF <sup>[20]</sup>        | —                                      | —  | -290   |
| PCF designed in this paper | 3.38                                   | 19.97  | -327.6   |

## 4 结 论

为了提高拉曼放大器的增益特性,本文选用包层空气孔为正八边形的 PCF 研究全内反射型光子晶体光纤结构参数的改变对其拉曼增益系数的影响。设定 PCF 的泵浦光为 1450 nm 且信号光为 1550 nm,研究发现,可以通过调整包层空气孔的大小和孔间距,使得有效模场面积更小,从而使得拉曼增益系数更大。在本文研究中,  $d = 1.1 \mu\text{m}$ 、 $\Lambda = 1.2 \mu\text{m}$  的光子晶体光纤具有小有效模场面积和高拉曼增益系数,这是因为在该参数下的 PCF 包层空气量较大,这强烈地限制了模场。另外,对该 PCF 进行了纤芯掺锗分析,最后得到一种拉曼增益系数高达  $19.97 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 、色散值为  $-327.6 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$  的光子晶体光纤。未来若能继续改用其他更好的非线性掺杂材料,则可使得拉曼增益系数达到更高,本文可为优化拉曼放大器的性能提供一个良好的思路。

## 参 考 文 献:

- [1] DENG H Q, LI Q. Study on gain flattening of fiber Raman amplifier by TDM pumping [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2016, 37(3):345-348.
- 邓华秋,李琴.TDM 抽运光纤拉曼放大器增益平坦的研究[J].半导体光电,2016,37(3):345-348.

- [2] YUSOFF Z,LEE J H,BELARDI W,et al. Raman effects in a highly nonlinear holey fiber: amplification and modulation[J]. Optics Letters,2002,27(6):424-426.
- [3] LI Z W,CAI X D,LI L B,et al. Study on the power and temperature characteristics of photonic crystal fiber laser [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2018, 29 (8) : 817-820.  
李志伟,蔡晓东,厉力波,等.光子晶体光纤激光器功率与温度特性研究[J].光电子·激光,2018,29(8):817-820.
- [4] BIRKS T A,KNIGHT J C,RUSSELL P S J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber[J]. Optics Letters,1997, 22(13):961-963.
- [5] MATOS C J S D,HANSEN K P,TAYLOR J R. Experimental characterisation of Raman gain efficiency of holey fibre[J]. Electronics Letters,2003,39(5):424-425.
- [6] FUOCHI M,POLI F,SELLERI S,et al. Study of Raman amplification properties in triangular photonic crystal fibers [J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21 (10):2247-2254.
- [7] WANG X D,LIU M,DONG C P,et al. Study on the impacts of doped core on photonic crystal fiber properties[J]. Optical Communication Technology,2010,34(10):31-33.  
王旭东,刘敏,董传培,等.纤芯掺杂对光子晶体光纤特性的影响研究[J].光通信技术,2010,34(10):31-33.
- [8] VENGASARKAR A M,REED W A. Dispersion-compensating single-mode fibers: efficient designs for first-and second-order compensation[J]. Optics Letters, 1993, 18 (11) : 924-926.
- [9] LEE Y S,LEE C G,KIM S. Dispersion compensating photonic crystal fiber using double-hole assisted core for high and uniform birefringence[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics,2017,147:334-342.
- [10] PRABU K,MALAVIKA R. Highly birefringent photonic crystal fiber with hybrid cladding [J]. Optical Fiber Technology,2019,47:21-26.
- [11] PRAMANIK S,SARKAR S. Effect of dip in refractive index profile on fiber Raman gain amplifier performance [J]. Optics Communications,2014,329:145-150.
- [12] BANDYOPADHYAY P K,SARKAR S N. Effect of sinusoidal ripples in refractive index profile distribution on the performance characteristics of dual concentric core step index fiber Raman amplifier[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125 (14) : 3679-3684.
- [13] WANG C C,WANG M H,WU J. Heavily germanium-doped silica fiber with a flat normal dispersion profile[J]. IEEE Photonics Journal,2015,7(2):1-10.
- [14] FLEMING J W. Dispersion in  $\text{GeO}_2\text{-SiO}_2$  glasses[J]. Applied Optics,1985,23(24):4486-4493.
- [15] PAN Y H,LU Y G,PENG J Q,et al. Brillouin gain spectrum characteristics of photonic crystal fibers[J]. Acta Optica Sinica,2019,39(6):284-291.  
潘宇航,路元刚,彭健钦,等.光子晶体光纤的布里渊增益谱特性[J].光学学报,2019,39(6):284-291.
- [16] TSUJIKAWA K,TAJIMA K,OHASHI M. Rayleigh scattering reduction method for silica-based optical fiber [J]. Journal of Lightwave Technology, 2000, 18 (11) : 1528-1532.
- [17] SHANG T,LI F,LIU Z J. Numerical analysis of Raman amplifier based on triangular photonic crystal fiber[J]. Journal on Communications,2008,29(8):63-68.  
尚韬,李峰,刘增基.基于光子晶体光纤的拉曼放大器特性研究[J].通信学报,2008,29(8):63-68.
- [18] WANG W,QU Y,ZHANG C,et al. Novel design of broadband dispersion compensating photonic crystal fiber with all solid structure and low index difference[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2017, 156:279-288.
- [19] DAS S,DE M,SINGH V K. Single mode dispersion shifted photonic crystal fiber with liquid core for optofluidic applications [J]. Optical Fiber Technology, 2019, 53: 102012.
- [20] SMHAA B,BMYB C,SSAOA C,et al. Highly negative dispersion dual-core liquid crystal photonic crystal fiber[J]. Optical Fiber Technology,2020,60:102330.

## 作者简介:

徐志钮 (1979—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事分布式光纤传感及其在电力系统中的应用方面的研究。