

光子晶体光纤的布里渊增益谱特性

潘宇航, 路元刚*, 彭捷钦, 马海霞, 王吉明

南京航空航天大学理学院应用物理系, 江苏 南京 211106

摘要 研究内全反射型光子晶体光纤(TIR-PCF)的结构参数对光纤布里渊增益、布里渊峰的个数以及相对峰值强度等布里渊增益谱(BGS)特性的影响。分析全反射型光子晶体光纤中的声光耦合效应,利用有限元分析方法,求解光纤中的光场和声场分布及其对应的BGS,探究空气孔层数、孔间距和孔直径等PCF参数对BGS的影响,获得布里渊增益和声学模式个数随孔间距和孔直径变化的规律。提出一种空气孔直径由内到外逐渐变大的、具有类似渐变折射率分布的新型光子晶体光纤结构。设计峰值强度差为8 dB的双峰BGS的光子晶体光纤,可将其用于基于布里渊拍频谱(BBS)的光纤传感系统中,使传感系统的信噪比提升2.5倍。

关键词 非线性光学; 布里渊散射; 光子晶体光纤; 布里渊增益谱; 光纤传感; 有限元分析

中图分类号 O437.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0619001

Brillouin Gain Spectrum Characteristics of Photonic Crystal Fibers

Pan Yuhang, Lu Yuangang*, Peng Jianqin, Ma Haixia, Wang Jiming

*Department of Applied Physics, College of Science, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing, Jiangsu 211106, China*

Abstract We investigate the influence of the structural parameters of the total internal reflection photonic crystal fiber (TIR-PCF) on the Brillouin gain spectrum (BGS) characteristics, including the Brillouin gain, number of Brillouin peaks, and peak relative power. Further, the finite element analysis method is used to obtain the optical and acoustic field distributions for analyzing the acousto-optic coupling effect in the TIF-PCF; thus, the corresponding BGS of the PCF can be obtained. In addition, we discuss the effects of the PCF parameters, such as the air-hole layer number, pitch, and diameter, on the BGS. The law of the Brillouin gain and the acoustic mode number is obtained as a function of the air-hole pitch and diameter. Accordingly, we propose a novel PCF structure, whose air-hole diameters gradually increase from the inside to the outside and which exhibits a similar gradient refractive index distribution. A PCF with two peaks in its BGS and a peak power difference of 8 dB is designed and expected to be used in the fiber optic sensing systems based on the Brillouin beat spectrum to increase the signal-to-noise ratio of the sensing system by a factor of 2.5.

Key words nonlinear optics; Brillouin scattering; photonic crystal fiber; Brillouin gain spectrum; optical fiber sensing; finite element analysis

OCIS codes 290.5830; 060.2310; 060.2370; 060.4370

1 引 言

近几十年来,光纤传感技术随着光纤通信技术的发展而迅速发展起来。根据光纤中光波的特征参量易被外界信息调制的原理,可实现对温度、应变等环境物理量的测量^[1-5]。光纤中的布里渊散射是一种典型的非线性效应^[6],基于此效应的光纤传感技术可实现对光纤沿线的温度和应变信息的分布式测

量,可作为健康监测手段用于大型建筑、航空航天、军事国防等重要领域。传感光纤的布里渊散射谱对布里渊分布式光纤传感系统的性能有重要的影响,如实芯单模光纤SMF-28、SMF-28e+和大有效面积光纤(LEAF)等,具有不同的布里渊增益和布里渊谱峰数目,实现了高精度和长距离的温度与应变传感测量^[7-10]。光子晶体光纤(PCF)是一种新型光纤,其布里渊散射效应也被用于光纤传感领域^[11-13]。

收稿日期: 2019-01-02; 修回日期: 2019-01-31; 录用日期: 2019-02-26

基金项目: 国家自然科学基金(61875086, 61377086)、航空科学基金(2016ZD52042)、南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(kfj20170801)

* E-mail: luyg@nuaa.edu.cn

2016年, Xu等^[12]使用 PCF 在 1100~1200 °C 的超高温下获得了误差仅为±3.6 °C 的传感精度。2017年, Chen等^[13]使用有限元分析法研究了掺杂 As₂Se₃ 的双包层 PCF, 对比了几组结构参数下布里渊增益谱(BGS)特性的变化。PCF 的布里渊增益和布里渊峰的数目等 BGS 特性会对基于布里渊散射的光纤传感系统有重要影响。已有研究人员对 PCF 的 BGS 特性进行实验测量和仿真计算。对于实验研究, 一般只能获得某种特定 PCF 的 BGS 特性^[11-12]; 而当前的仿真研究主要针对 PCF 结构的某一个或两个参数^[13-15], 并且参数变化范围较小。而 PCF 结构复杂多变, 目前还缺乏对其主要结构参数的全面研究。为此, 本文以空气孔层数、孔间距和孔直径为光纤结构变化参数, 探索布里渊增益和声学模式个数的变化规律。

本文将分析内全反射型光子晶体光纤中的声光耦合效应, 利用有限元分析方法求解光纤中的光场和声场分布及其对应的布里渊散射谱, 探究光子晶体光纤的结构参数对布里渊增益的大小、布里渊峰的个数以及相对峰值强度等 BGS 特性的影响。在此研究的基础上, 结合文献[16]中提出的基于布里渊拍频谱(BBS)的分布式温度与应变探测方法, 设计出具有相近强度的多峰 BGS 的新型光子晶体光纤, 并将其用于基于 BBS 的光纤传感系统中, 以提升传感系统的信噪比和测量精度。

2 原 理

根据导光原理的不同, 光子晶体光纤可以分为内全反射型(TIR-PCF)和光子带隙型(PBG-PCF)。在 PBG-PCF 中, 包层为具有一定能量禁带的光子晶体, 纤芯内为空气, 当波长在能量禁带内的光在纤芯传输时, 光可以被限制在纤芯内传播, 从而实现长距离传光^[17]。而空气是一种非弹性介质, 不符合产生布里渊散射的物理条件。本研究的对象是 TIR-PCF, 这类光纤的原理是在包层中制造按一定规则排列的空气孔, 以此来降低包层的有效折射率, 使纤芯的折射率高于包层的有效折射率, 这样便可以依据全反射的原理, 获得与传统实芯光纤相同的导光效果。在实际应用中, 大部分光子晶体光纤的空气孔大小相同且按六边形规则排列, 其结构如图 1 所示, 其中 d 为空气孔直径, Λ 为孔间距。

当光纤中发生布里渊散射时, 伴随着一个或多个声学模式的传播, 每一个声学模式则对应形成了 BGS 中的一个布里渊峰。即光纤所支持传播的声

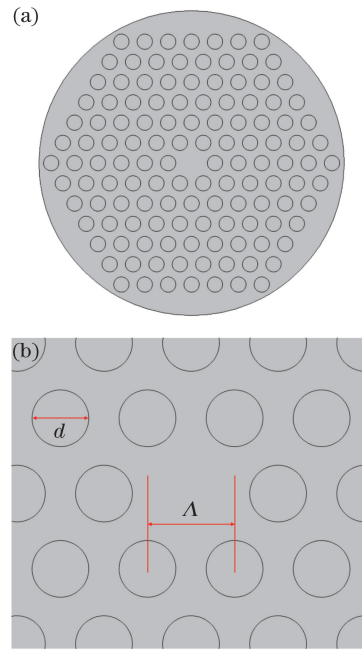


图 1 光子晶体光纤的结构示意图。

(a) 横截面图; (b) 细节图

Fig. 1 Schematic of photonic crystal fiber.

(a) Cross-sectional view; (b) detail view

学模式个数决定了 BGS 中布里渊峰的个数。第 m 个声学模式所对应的布里渊峰可以表示为^[18-19]

$$g_m(\nu) = g_m \cdot \frac{(\omega_m/2)^2}{(\nu - \nu_p + \nu_m)^2 + (\omega_m/2)^2}, \quad (1)$$

式中: ν 为散射光的频率; ν_p 为入射光的频率; ν_m 和 ω_m 分别为布里渊散射谱中第 m 个峰的布里渊频移和半峰全宽。第 m 个声模式对应的布里渊增益峰值为

$$g_m = \frac{4\pi p_{12}^2 n_{\text{eff}}^8}{c\lambda\rho_0\omega_m\nu_m A_m^{\text{ao}}}, \quad (2)$$

式中: p_{12} 为电致伸缩张量的分量; c 为光速; λ 为入射光的波长; n_{eff} 为光纤中光学基模的有效折射率; ρ_0 为光纤材料的平均密度; A_m^{ao} 为光纤中光场与声场的耦合作用强度。 A_m^{ao} 被称为声光有效面积, 其具体的形式为

$$A_m^{\text{ao}} = \left[\frac{\iint E^2(x, y) dx dy}{\iint E(x, y) u_m(x, y) dx dy} \right]^2 \cdot \iint u_m^2(x, y) dx dy, \quad (3)$$

式中: $E(x, y)$ 和 $u_m(x, y)$ 分别为光学基模和第 m 个声学模式在光纤横向截面上的场分布, 可以使用有限元分析的方法从以下两个模态方程求出^[19-20]。

$$\nabla_{\text{t}}^2 E(x, y) + \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (n^2 - n_{\text{eff}}^2) E(x, y) = 0, \quad (4)$$

$$\nabla_{\text{t}}^2 u(x, y) + \eta \left(\frac{\omega_{\text{aco}}^2}{v_{\text{t}}^2} - \beta_{\text{aco}}^2 \right) u(x, y) = 0, \quad (5)$$

式中： ∇_i^2 为 xy 平面的横向拉普拉斯算符； n 为光纤材料的折射率； v_1 是材料的声速； β_{aco} 为声场的传播常数，其计算公式为 $\beta_{\text{aco}} = 4\pi n_{\text{eff}}/\lambda$ ； ω_{aco} 是(5)式的特征值，表示声场的特征角频率； η 为考虑光子晶体的刚度矩阵 C 后得到一个系数^[20]。

$$\eta = \frac{C_{11}}{C_{44}} = \frac{2(1-k)}{1-2k} \quad (6)$$

式中： k 为二氧化硅材料的泊松比； C_{11} 、 C_{44} 为矩阵 C 的矩阵元。

PCF 的总 BGS 等于每个声学模式对应的 BGS 的总和，即：

$$G(\nu) = \sum_m g_m(\nu) \quad (7)$$

根据(1)~(7)式，若已知光子晶体光纤的结构参数，便可利用有限元分析法得到该光纤的 BGS 特性，包括声学模式个数、布里渊频移和增益等参数。为了方便比较，使用 BGS 在频域上的积分值 $g_B(\text{m/W})$ 来表征布里渊增益的大小：

$$g_B = \int G(\nu) d\nu \quad (8)$$

对于支持多个声学模式的光纤，BGS 中的峰 i 和峰 j 之间互拍形成 BBS 的峰 (i, j) 。若峰 i 和峰 j 的峰值功率分别为 P_{B_i} 和 P_{B_j} ，那么互拍峰 (i, j) 的峰值功率为^[16]

$$P_{\text{BBS}(i,j)} = 2\sqrt{P_{B_i}P_{B_j}} \quad (9)$$

若传感系统的功率测量不确定度为 ΔP ，那么 BBS 的峰值功率探测不确定度 δP 为

$$\delta P = \frac{\Delta P}{2\sqrt{P_{B_i}P_{B_j}}} \quad (10)$$

不确定度 δP 的值越小，温度与应变的测量精度就越高。从(10)式可以看出，基于 BBS 的光纤传感系统的传感精度取决于多峰 BGS 的峰值之间的相对强度。若不同光纤的 BGS 的总增益相同，那么峰值强度更接近的光纤（即 $P_{B_i} \approx P_{B_j}$ ）将有效提高传感系统的信噪比。

3 分析与讨论

3.1 单模光子晶体光纤的结构参数

由图 1 可知，在空气孔大小相同且按六边形排列的光子晶体光纤中，影响其结构的参数主要为空气孔的层数、直径 d 和孔间距 Λ 。因此，本研究将重点分析这三个参数对 BGS 特性的影响。首先，确定合理的研究范围。本研究仅考虑光学特性为单模的光子晶体光纤。在前人的研究中，已经得到了孔径相同且呈六边形排列的光子晶体光纤的单模参数区

域，如图 2 所示^[21-22]。

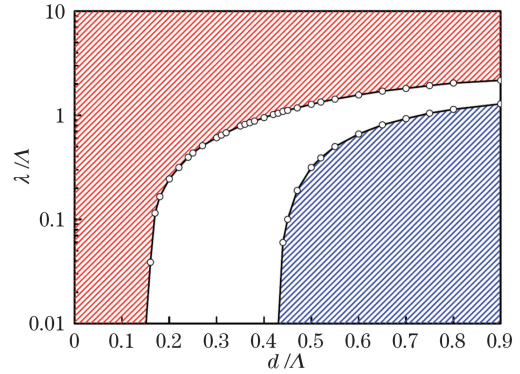


图 2 PCF 光学模式全貌图

Fig. 2 Optical mode overall view of PCF

如图 2 所示，右下角的阴影区域表示光子晶体光纤为多模光纤，即在光纤中除了光学基模外，还存在高阶模；左上部分的区域表示当空气孔越来越小时，包层与纤芯的折射率差也越来越小，光场能量将不能很好地被限制在纤芯内而被扩散到包层中，这也类似于实芯光纤中的弱导光纤，容易形成较大损耗。因此，本研究所仿真的范围为图 2 的空白区域，此处存在导光性能较好的单模光子晶体光纤。根据文献[21]所给的边界曲线公式，可以计算出入射光波长为 1550 nm 时，单模光子晶体光纤的参数范围，结果如图 3 所示。

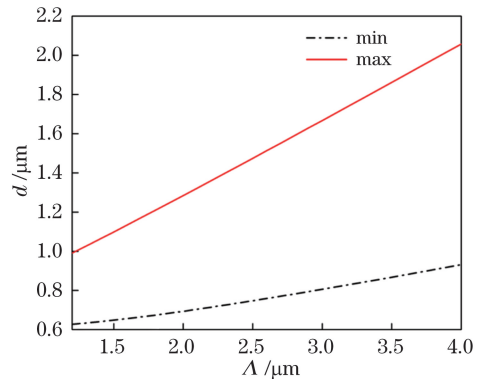


图 3 单模 PCF 的参数范围

Fig. 3 Parameter range of single-mode PCF

如图 3 所示，当孔间距 Λ 和孔直径 d 落在两条线之间的区域内时，该光纤即为光学单模光纤。

3.2 有限元分析方法的验证

为了验证有限元分析方法的正确性，选择有实验测量结果可参照的光子晶体光纤进行仿真对比。在文献[23]所报道的光子晶体光纤的受激布里渊特性研究中，给出了两种光子晶体光纤的具体结构参数和它们的实测 BGS，具体参数如表 1 所示。

表 1 PCF 的具体参数^[23]

Table 1 Detailed parameters of PCF^[23]

Fiber	$\Lambda / \mu\text{m}$	$d / \mu\text{m}$	Layer number
RB65	2.35	1.15	6
RB61	4.90	1.85	5

根据(1)~(7)式,使用有限元分析方法对这两种光子晶体光纤进行模拟仿真后,得到的 BGS 与实验结果的对比如图 4 所示。

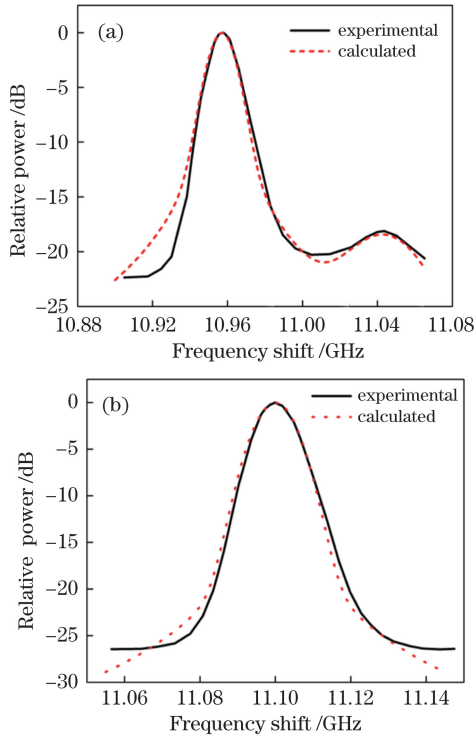


图 4 不同光纤的实验与仿真结果对比。(a) RB65; (b) RB61
Fig. 4 Comparison of experiment and simulation results in different fibers. (a) RB65; (b) RB61

由文献[23]可知, RB65 光纤的两个布里渊峰的中心频移分别为 10.96 GHz 和 11.043 GHz, RB61 光纤的布里渊峰的中心频移为 11.1 GHz。由图 4 可知,使用有限元分析方法模拟得到的 BGS 的布里渊频移和相对峰值强度均与实验结果吻合,有限元分析法可作为有效手段来模拟计算光子晶体光纤的 BGS。

3.3 空气孔层数对 BGS 的影响

首先研究空气孔的层数对光子晶体光纤 BGS 的影响。设定空气孔的层数范围为 5~10。根据 RB65 光纤的孔间距和孔直径参数,将空气孔的层数依次从 10 层减少到 5 层,其 BGS 的变化如图 5 所示。

由图 5 可知,当孔间距和孔直径不变时,不同空

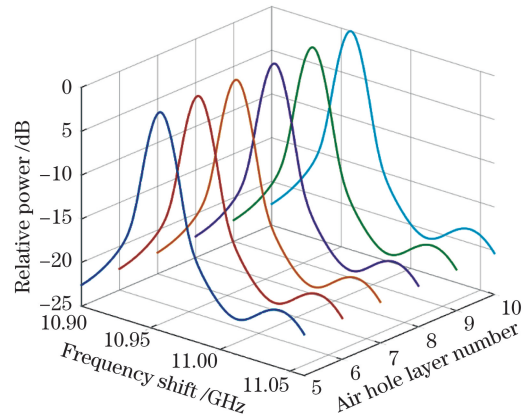


图 5 不同空气孔层数的 BGSs

Fig. 5 BGSs with different air hole layers

气孔层数下所得到的 BGS 形状几乎相同。改变空气孔的层数对 BGS 特性带来的影响微乎其微,这是因为在光子晶体光纤中,部分空气孔充当折射率低于纤芯的包层,而包层半径达到一定值后,继续增大包层半径,不对光纤的性能产生明显的影响,在实芯光纤中同样如此。因此,本研究将仿真模拟的光子晶体光纤都设为 6 层空气孔。

3.4 孔间距和直径对 BGS 的影响

如图 3 所示,当孔间距 Λ 和孔直径 d 落在两条线之间的区域内时,该光纤即为光学单模光纤。由于实际制造工艺的限制,将 Λ 的最小值设为 $1.2 \mu\text{m}$,最大值设为 $4.0 \mu\text{m}$ 。在此区域内,光子晶体光纤的总布里渊增益 g_B 和声学模式个数随孔间距 Λ 和孔直径 d 变化的关系如图 6 所示。

如图 6(a)所示,当光子晶体光纤的孔间距 Λ 为 $1.2 \sim 2.0 \mu\text{m}$, d 落在相应的范围内时,光纤的总布里渊增益较大,随着孔间距的增大,布里渊增益逐渐减小。布里渊增益 g_B 呈现出如图 6(a)所示的变化趋势的原因在于:当空气孔按六边形排列且孔径相同时,PCF 的纤芯直径 d_c 与孔间距 Λ 和孔直径 d 密切相关,即 $d_c = 2\Lambda - d$, g_B 最大的位置对应于 Λ 最小、 d 最大的情况,此时 PCF 的纤芯直径 d_c 最小,并且空气孔直径 d 相对较大,导致纤芯与包层的折射率差也相对较大。在这种情况下,光场与声场都被较好地束缚在纤芯中传播,产生了更强的声光耦合作用,致使光纤中的布里渊增益变大。另外,从图 6(b)可以看出,在空气孔直径相同的情况下,光子晶体光纤最多只支持两个声学模式,某些参数下仅有一个声学模式。为了更清晰地反映孔间距 Λ 和孔直径 d 对 BGS 特性的影响,选取一些不同参数下的光纤,对它们的 BGS 进行比较。

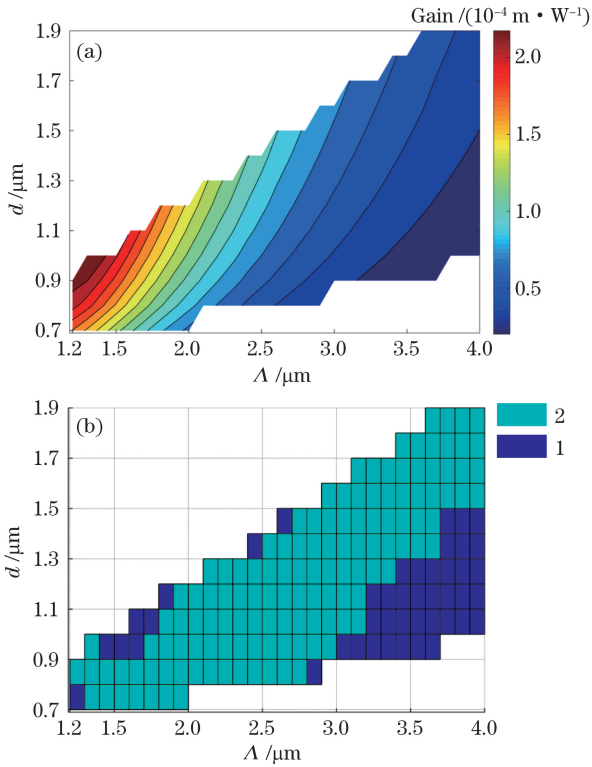


图 6 PCF 的仿真结果。(a)布里渊增益;(b)声学模式个数
Fig. 6 Simulation results of PCF. (a) Brillouin gain;
(b) acoustic mode number

如图 7 所示,1 号谱(孔间距 Λ 为 $1.3 \mu\text{m}$,孔直径 d 为 $1.0 \mu\text{m}$)的布里渊增益最高,2 号谱(孔间距 Λ 为 $2.5 \mu\text{m}$,孔直径 d 为 $1.1 \mu\text{m}$)和 3 号谱(孔间距 Λ 为 $3.5 \mu\text{m}$,孔直径 d 为 $1.1 \mu\text{m}$)的增益相较于 1 号谱逐渐减小,这与图 6(a)的结果相吻合。根据图 6(b),1 号谱和 2 号谱中应该都存在两个峰,其中 1 号谱在 11 GHz 之前存在一个较小的峰,而 2 号谱中则不存在类似的小峰,图 8 为图 7 中部分细节的放大图。

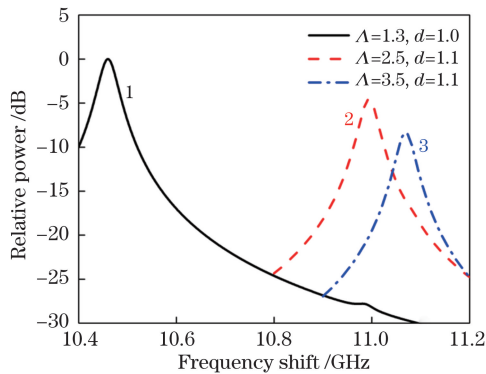


图 7 不同参数的 PCF 的 BGSs

Fig. 7 BGSs of PCF with different parameters

从图 8 可以看到,在孔径相同的光子晶体光纤中,虽然在大部分参数下光纤可以支持两个声学模

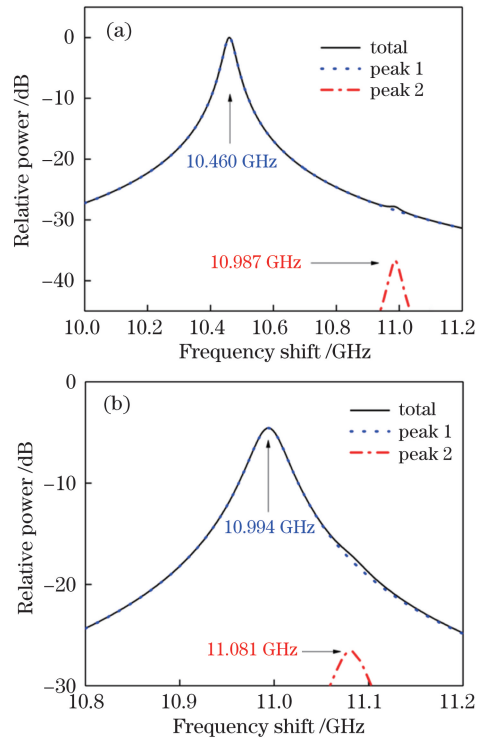


图 8 图 7 中 1、2 号谱的放大图。(a) 1 号谱;(b) 2 号谱
Fig. 8 Enlarged views of 1st and 2nd spectra in Fig. 7.
(a) 1st spectrum; (b) 2nd spectrum

式,但是第二个峰的强度相对于主峰来说都非常弱,这与本研究的设计目的,即具有相近强度的多峰 BGS 的光纤,相差甚远。因此,不能局限于孔直径相同的情况,必须考虑一些结构比较特殊的光子晶体光纤,以此来寻求更多的设计可能性。

3.5 孔径不同的 PCF 的 BGS

文献[18]所研究的一种传统实芯渐变光纤,其 BGS 表现出多峰且峰值强度相近的特性。而在孔径相同的 PCF 中,从光纤横向看,其折射率分布过于简单。受实芯渐变光纤折射率分布的启发,考虑使用不同直径的 PCF 包层空气孔,并按照由内到外逐渐变大的规律进行排列,这种结构的 PCF 具有类似渐变光纤的折射率分布,其结构如图 9 所示。在这种结构下本研究仿真了几种不同参数的 PCF,它们的具体参数如表 2 所示。

表 2 几种不同孔径的 PCF

Table 2 Several PCFs with different aperture diameters

PCF number	$\Lambda / \mu\text{m}$	$d_1 / \mu\text{m}$	$d_2 / \mu\text{m}$	$d_3 / \mu\text{m}$
1	1.2	0.7	0.8	0.9
2	1.2	0.6	0.7	0.8
3	1.0	0.6	0.7	0.8
4	1.0	0.5	0.6	0.7

经仿真计算后发现,这几种具有类似渐变折射率

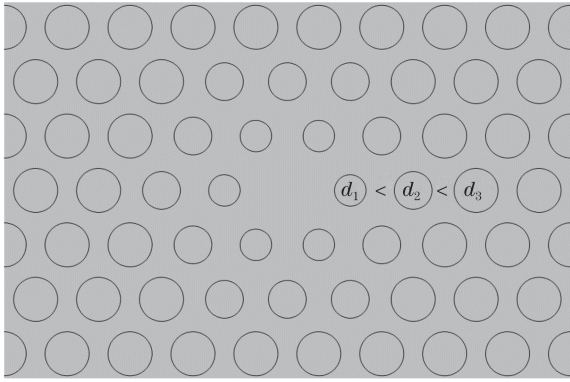


图 9 孔径不同的 PCF

Fig. 9 PCF with different aperture diameters

分布的 PCF 确实出现了 3~4 个声学模式,且与孔径相同的 PCF 相比,这几种不同孔径的 PCF 布里渊峰之间的相对强度相差较小。其中 4 号 PCF 具有 4 个布里渊峰且峰值强度最接近,其 BGS 如图 10 所示。

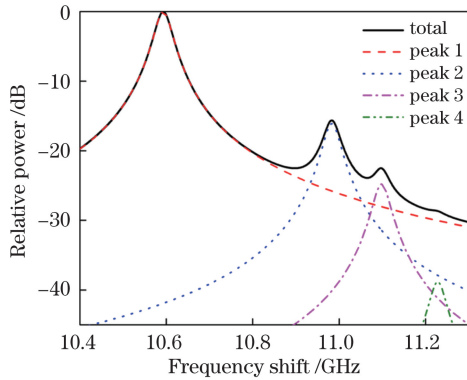


图 10 表 2 中 4 号 PCF 的 BGS

Fig. 10 BGS of 4th PCF in table 2

如图 10 所示,当 PCF 的空气孔直径由内到外逐渐变大时,其 BGS 中会出现更多的峰并且峰的强度更接近,这与渐变折射率光纤中的结果也比较一致。但是与文献[18]中渐变光纤的 BGS 相比,图 10 所示的峰值强度差异略大,这是因为文献[18]的渐变光纤具有更小的纤芯半径。从其空气孔尺寸上看,表 2 中 PCF 已经接近实际生产工艺的极限,但可以从模拟仿真的角度继续讨论尺寸更小的 PCF 的 BGS 特性。由表 2 的仿真结果可知,若孔间距和孔直径进一步缩小,所得 PCF 的布里渊峰更接近。当空气孔间距 Λ 为 $0.8 \mu\text{m}$, d_1 、 d_2 和 d_3 分别为 0.4 、 0.5 、 $0.6 \mu\text{m}$ 时,其 BGS 中的相对峰值强度分别为 0 dB 、 -11.7 dB 、 -21.7 dB 和 -31.5 dB 。与图 10 的 BGS 相比,该 PCF 的次峰与主峰更接近,但仍然相差 10 dB 以上。当空气孔间距 Λ 进一步减小至 $0.7 \mu\text{m}$, d_1 、 d_2 和 d_3 分别为 0.3 、 0.4 、 $0.5 \mu\text{m}$ 时,其 BGS 中的峰值强度将更加接近,分别为 0 dB 、

-8.0 dB 、 -23.5 dB 和 -26.8 dB ,谱线如图 11 所示。理论上,若孔径和孔间距继续缩小,仍可获得相对强度更接近的布里渊峰,只是由于目前的生产制造工艺的限制,尺寸更小的孔径已经没有实际价值。因此,本研究最终选择孔间距为 $0.7 \mu\text{m}$,孔直径分别为 0.3 、 0.4 、 $0.5 \mu\text{m}$ 的 PCF 作为具有类渐变折射率分布且孔径较小的 PCF 的典型代表,旨在说明这种类型的光纤具有产生强度相近的双峰 BGS 的可能性。

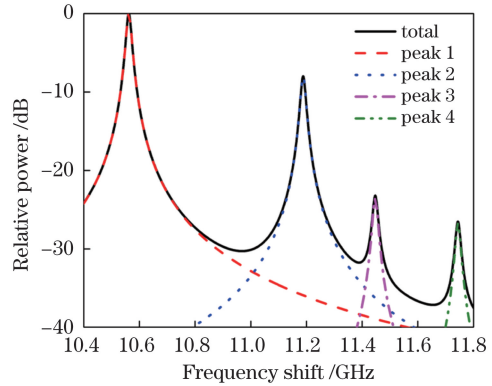


图 11 尺寸更小的 PCF 的 BGS

Fig. 11 BGS of PCF with finer air hole size

如图 11 所示,该 BGS 中的次峰与主峰的强度只相差 8 dB ,后两个峰的强度与主峰相比还是很弱。与图 7 所示的孔径相同的 PCF 相比,该 PCF 的主峰与次峰强度更加接近。该光纤可在基于 BBS 的光纤传感系统中用于温度或应变的单参量测量。文献[16]中所使用的 LEAF 光纤的 BGS 中 3 个峰的相对强度分别为 0 dB 、 -16.5 dB 和 -19 dB ,假设 LEAF 光纤 BGS 的 3 个峰功率之和与设计出的光子晶体光纤相等且都为 P_A ,那么 LEAF 前两个峰值功率分别为 $0.97P_A$ 和 $0.02P_A$;同样地,PCF 的主峰和次峰的峰值功率分别为 $0.86P_A$ 和 $0.14P_A$ 。根据(10)式可计算出 LEAF 和该 PCF 的功率探测不确定度 δP 之比:

$$\frac{\delta P_1}{\delta P_2} = \frac{P_A \sqrt{0.86 \times 0.14}}{P_A \sqrt{0.97 \times 0.02}} = 2.5. \quad (11)$$

再根据(11)式,假设 LEAF 和新设计的 PCF 在光纤传感系统中的功率-温度和功率-应变系数相等,则使用新型 PCF 进行单参量光纤传感测量时,其信噪比相比 LEAF 可提升 2.5 倍。

3.6 误差分析

如 3.5 节所述,当所设计的空气孔直径小于 $1 \mu\text{m}$ 时,对制造工艺的要求较高。为了说明最终光纤设计方案的稳健性范围,考虑了制造加工过程带来一定偏差的情况,结果如表 3 所示。

表 3 制造误差的影响
Table 3 Influence of manufacturing error

Manufacturing error	$d_1/\mu\text{m}$	$d_2/\mu\text{m}$	$d_3/\mu\text{m}$	Peak relative power		$\Delta_{\text{SNR}}/\text{times}$
				peak 1 /dB	peak 2 /dB	
Smaller	0.27	0.36	0.45	0	-7.2	2.6
Bigger	0.33	0.44	0.55	0	-8.6	2.3

最终选定的空气孔直径参数为 0.3、0.4、0.5 μm ，假定制造加工的偏差在 10% 以内，则 3 种孔径的实际尺寸为 (0.3 ± 0.03) 、 (0.4 ± 0.04) 、 (0.5 ± 0.05) μm 。经仿真计算，当加工尺寸偏小时，即 d_1 、 d_2 和 d_3 分别为 0.27、0.36、0.45 μm 时，所得 PCF 的双峰 BGS 相对强度分别是 0 dB 和 -7.2 dB，根据(11)式计算出这种情况下信噪比可提升 2.6 倍；当加工尺寸偏大时，即 d_1 、 d_2 和 d_3 分别为 0.33、0.44、0.55 μm 时，所得 PCF 的双峰 BGS 相对强度分别是 0 dB 和 -8.6 dB，根据(11)式计算出这种参数下信噪比可提升 2.3 倍。综上所述，若实际生产工艺带来的误差不超过 10%，则所得 PCF 的 BGS 特性不会产生较大变化，将其应用在单参量光纤传感系统时，其信噪比仍可比 LEAF 提升 2 倍以上。

4 结 论

研究了内全反射型光子晶体光纤的结构参数对其 BGS 特性的影响。在空气孔直径相同且按六边形排列的情况下，空气孔的层数对 BGS 的影响非常小；当孔间距和直径在单模区域内同时变化时，孔间距较小的情况下总布里渊增益相对较高；声学模式个数仅为 1~2 个，并且布里渊峰之间的强度差异较大。为了获得更多的声学模式，考虑了空气孔直径不同的 PCF。在具有类似渐变折射率分布(孔直径由内到外逐渐变大)的 PCF 中，得到了 3~4 个声学模式，次峰与主峰之间的强度差异也明显减小。并且空气孔间距和直径的尺寸越小，所得到的次峰与主峰的强度越接近。所设计的 PCF 参数为： $\Lambda = 0.7 \mu\text{m}$ ， d_1 、 d_2 和 d_3 分别为 0.3、0.4、0.5 μm ，其主峰与次峰的相对峰值功率分别为 0 dB 和 -8 dB，将其用于基于 BBS 的光纤传感系统中，有望使信噪比提升 2.5 倍。

参 考 文 献

- [1] Woyessa G, Fasano A, Markos C, *et al.* Zeonex microstructured polymer optical fiber: fabrication friendly fibers for high temperature and humidity insensitive Bragg grating sensing[J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(1): 286-295.
- [2] Jiang Y X, Fang Z J, Du Y Q, *et al.* Highly sensitive temperature sensor using packaged optical microfiber coupler filled with liquids[J]. *Optics Express*, 2018, 26(1): 356-366.
- [3] Mao C, Huang B, Wang Y, *et al.* High-sensitivity gas pressure sensor based on hollow-core photonic bandgap fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. *Optics Express*, 2018, 26(23): 30108-30115.
- [4] Zhou D W, Wang B Z, Ba D X, *et al.* Fast distributed Brillouin optical fiber sensing for dynamic strain measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328005.
周登望, 王本章, 巴德欣, 等. 用于动态应变测量的快速分布式布里渊光纤传感[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328005.
- [5] Zhang Z L, Gao L, Sun Y Y, *et al.* Strain transfer law of distributed optical fiber sensor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(4): 0410001.
章征林, 高磊, 孙阳阳, 等. 分布式光纤传感器应变传递规律研究[J]. *中国激光*, 2019, 46(4): 0410001.
- [6] Agrawal G. *Nonlinear fiber optics*[M]. 4th ed. California: Academic Press, 2012.
- [7] Zhou D W, Dong Y K, Wang B Z, *et al.* Single-shot BOTDA based on an optical chirp chain probe wave for distributed ultrafast measurement[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 32.
- [8] Zhang L X, Li Y Q, An Q, *et al.* Temperature sensing technology based on Rayleigh Brillouin optical time domain analysis with pulse coding[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1106004.
张立欣, 李永倩, 安琪, 等. 脉冲编码瑞利布里渊光时域分析温度传感技术[J]. *光学学报*, 2017, 37(11): 1106004.
- [9] Song M P, Bao C, Qiu C, *et al.* A distributed optical-fiber sensor combined Brillouin optical time-domain analyzer with Brillouin optical time-domain reflectometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(3): 650-654.
宋牟平, 鲍翀, 裘超, 等. 结合布里渊光时域分析和光时域反射计的分布式光纤传感器[J]. *光学学报*, 2010, 30(3): 650-654.
- [10] Xu P B, Ba D X, He W M, *et al.* Distributed

- Brillouin optical fiber temperature and strain sensing at a high temperature up to 1000 °C by using an annealed gold-coated fiber[J]. *Optics Express*, 2018, 26(23): 29724-29734.
- [11] Teng L, Zhang H Y, Dong Y K, *et al.* Temperature-compensated distributed hydrostatic pressure sensor with a thin-diameter polarization-maintaining photonic crystal fiber based on Brillouin dynamic gratings[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(18): 4413-4416.
- [12] Xu P B, Dong Y K, Zhou D W, *et al.* 1200 °C high-temperature distributed optical fiber sensing using Brillouin optical time domain analysis[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(21): 5471-5478.
- [13] Chen X, Xia L, Li W, *et al.* Simulation of Brillouin gain properties in a double-clad As₂Se₃ chalcogenide photonic crystal fiber[J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(4): 042901.
- [14] Tchahame J C, Beugnot J C, Kudlinski A, *et al.* Multimode Brillouin spectrum in a long tapered birefringent photonic crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(18): 4281-4284.
- [15] Jain V, Sharma S, Saini T S, *et al.* Design and analysis of single-mode tellurite photonic crystal fibers for stimulated Brillouin scattering based slow-light generation[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(25): 6791-6796.
- [16] Lu Y G, Qin Z G, Lu P, *et al.* Distributed strain and temperature measurement by Brillouin beat spectrum[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(11): 1050-1053.
- [17] Cregan R F. Single-mode photonic band gap guidance of light in air[J]. *Science*, 1999, 285(5433): 1537-1539.
- [18] Koyamada Y, Sato S, Nakamura S, *et al.* Simulating and designing Brillouin gain spectrum in single-mode fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(2): 631-639.
- [19] Kobaykov A, Sauer M, Chowdhury D. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2010, 2(1): 1-59.
- [20] Dasgupta S, Poletti F, Liu S, *et al.* Modeling Brillouin gain spectrum of solid and microstructured optical fibers using a finite element method[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(1): 22-30.
- [21] Nielsen M, Mortensen N. Photonic crystal fiber design based on the V-parameter[J]. *Optics Express*, 2003, 11(21): 2762-2768.
- [22] Folkenberg J R, Mortensen N A, Hansen K P, *et al.* Experimental investigation of cutoff phenomena in nonlinear photonic crystal fibers[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(20): 1882-1884.
- [23] McElhenny J E, Pattnaik R K, Toulouse J, *et al.* Unique characteristic features of stimulated Brillouin scattering in small-core photonic crystal fibers [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2008, 25(4): 582-593.