

doi:10.3788/gzxb20154405.0506005

掺杂和结构对光纤中去极化型声波导布里渊散射 频移与散射效率的影响

张雯豫¹, 侯尚林¹, 刘延君¹, 雷景丽¹, 李晓晓¹, 王道斌¹, 武刚¹, 徐永钊²

(1 兰州理工大学 理学院, 兰州 730050)

(2 东莞理工学院 电子工程学院, 广东 东莞 523808)

摘 要:利用全矢量有限元法研究了单模光纤及光子晶体光纤中掺杂材料及浓度、光纤结构对去极化型声波导布里渊散射频移和散射效率的影响。结果表明增大包层掺氟浓度或纤芯掺锗浓度均会减小光纤布里渊频移, 也会增大单模光纤散射效率。光子晶体光纤中整体掺氟浓度不变时, 空气孔层数的增加会减小布里渊频移; 而纤芯掺锗浓度不变时, 随空气孔层数的增加 $TR_{2,3}$ 模式的布里渊频移增大, 而 $TR_{2,7}$ 模式的布里渊频移减小。

关键词: 光纤; 布里渊散射; 矢量有限元; 去极化型声波导; 布里渊频移; 散射效率

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)05-0506005-6

Effects of Doping and Structure on Brillouin Frequency Shift and Scattering Efficiency of Depolarized Guided Acoustic Wave in Fibers

ZHANG Wen-yu¹, HOU Shang-lin¹, LIU Yan-jun¹, LEI Jing-li¹,

LI Xiao-xiao¹, WANG Dao-bin¹, WU Gang¹, XU Yong-zhao²

(1 School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

(2 Institute of Electronic Engineering, Dongguan Univ. of Tech., Dongguan, Guangdong 523808, China)

Abstract: The effects of the doping material, concentration and fiber structure on the frequency shift and Brillouin scattering efficiency of depolarized guided acoustic wave Brillouin scattering in single mode fiber and photonic crystal fiber are investigated by the all-vector finite element method. The results show that the Brillouin frequency shift of the two kinds of fibers decrease and scattering efficiency of the single mode fiber increase with the increase of doped F concentration in the cladding and doped GeO_2 concentration in the core. The Brillouin frequency shift decreases with the increasing number of air holes rings at the given doped F concentration in photonic crystal fiber. The Brillouin frequency shift of $TR_{2,3}$ mode increases, but that of $TR_{2,7}$ mode decreases with the increasing number of air holes rings at a given doped GeO_2 concentration in fiber core.

Key words: Fiber; Stimulated Brillouin scattering; Vectorial finite element; Depolarized guided acoustic wave; Brillouin frequency shift; Scattering efficiency

OCIS Codes: 060.3510; 290.5900; 060.2290

0 引言

光纤是由具有电致伸缩效应的硅材料制成, 这种材料会产生热噪声, 而光纤中的热噪声激发会产生声

波, 声波将引起后向的自发布里渊散射、受激布里渊散射(Stimulated Brillouin Scattering, SBS)^[1]和前向的声波导布里渊散射(Guided Acoustic Wave Brillouin Scattering, GAWBS)^[2]。GAWBS 不同于由沿轴向传

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61167005, 61367007)、甘肃省自然科学基金(Nos. 1112RJZA018, 1112RJZA017)、东莞科技计划项目(No. 2008108101002)和留学人员科技活动项目择优项目资助

第一作者:张雯豫(1988-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感. Email: zwyctbu@126.com

导师(通讯作者):侯尚林(1970-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤通信器件和传感. Email: houshanglin@163.com

收稿日期:2014-11-19; **录用日期:**2015-02-16

<http://www.photon.ac.cn>

播的纵向声波模式引起的后向布里渊散射,它是由在光纤横截面的纵向声波和横向声波共同作用引起的.参与 GAWBS 的声波模式分别为径向 R_{0m} 模式和简并扭转径向 TR_{2m} 模式.其中 R_{0m} 模式对偏振不敏感,在其作用下产生了极化型 GAWBS; TR_{2m} 模式根据振动方向不同又分为 $90^\circ/0^\circ$ 振动形式和 $45^\circ/-45^\circ$ 振动形式,它们是互相简并的. $90^\circ/0^\circ$ 振动形式由于其对偏振不敏感,它将产生极化型 GAWBS, $45^\circ/-45^\circ$ 振动形式将调制入射光的偏振态,它将产生去极化型 GAWBS^[3]. 去极化型 GAWBS 由于其泵浦光与散射光的偏振态不同,可用于制作可变光衰减器^[4],而极化型 GAWBS 可用于产生梳状频率和制作光衰减器、锁模光纤激光器^[5]等.极化型和去极化型 GAWBS 在单模光纤与光子晶体光纤 (Photonic Crystal Fiber, PCF)^[6] 中都被广泛关注^[7-8].

目前,对于 GAWBS 的研究主要集中在光纤结构与外界环境对声波的影响及其在传感领域中的应用等方面.如 Nori Shibata 等^[9] 实验研究表明增大 PCF 空气孔面积可以减小横纵声波波速比. Jean-Charles Beugnot 等^[10] 研究指出通过调节 PCF 的空气孔包层结构可以使极化型 GAWBS 的声波基模被有效地限制在纤芯区,随后 Beugnot 等^[11] 又提出电致伸缩力的弹性动力学方程,并以此推导出单模光纤与 PCF 的声波位移场分布,与实验所得结果相吻合.对去极化型 GAWBS 布里渊频移而言,它对光纤结构和环境条件较敏感,可应用于测量声波速度、光纤包层直径、温度以及应力等传感领域. Yosuke Tanaka 等^[12-13] 研究得出了普通光纤中去极化型 GAWBS 过程中边带频率的应变系数和温度系数.本课题组也研究了结构、温度和应力等对去极化型 GAWBS 的布里渊频移的影响^[14-16]. 据了解,还没有文献报道过掺杂材料及浓度和 PCF 中空气孔层数对布里渊频移和散射效率的影响.

本文通过数值求解单模光纤及 PCF 声波的微小位移方程和散射效率方程,研究了光纤中掺杂材料及浓度对去极化型 GAWBS 布里渊频移及散射效率的影响,以及 PCF 中空气孔层数对去极化型 GAWBS 布里渊频移的影响,得到了一系列的结论.这些结论为设计新型光纤通信及光纤传感器件可提供理论依据.

1 理论分析

1.1 光纤模型

本文采用 SMF28 单模光纤和三种光子晶体光纤作为研究对象. SMF28 光纤的纤芯半径 $4.2\mu\text{m}$, 光纤半径 $62.5\mu\text{m}$. 光子晶体光纤的半径为 $62.5\mu\text{m}$, 孔间距 Λ 为 $8\mu\text{m}$, 空气孔直径 d 为 $3\mu\text{m}$, 包层中空气孔分别取一层、两层、三层三种 PCF 进行对比研究,其中两层空气孔 PCF 在两层的基础上外层分别去掉或添加一层空气孔,掺氟为整体掺杂,而掺锗只在纤芯(直径 $d_c = 6\mu\text{m}$)内,包层为纯石英. 纯石英的折射率 n 为 1.458, 声波的纵向声速 V_L 为 5944m/s , 横向声速 V_s 为 3749m/s , 密度 ρ 为 2202kg/m^3 . 掺氟和掺锗浓度不同引起的一些物理量的变化如表 1 所示.

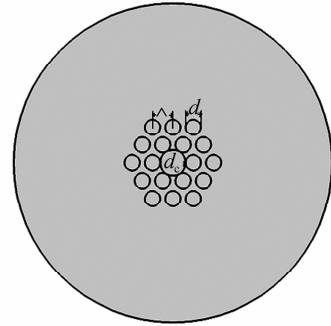


图 1 两层空气孔 PCF

Fig. 1 Two air holes layers PCF

表 1 光纤参量随掺杂的变化

Table 1 Fiber parameters for various doped concentration

Doped F(GeO ₂)	n	V_L (m/s)	V_s (m/s)	ρ (kg/m ³)
0.3%(2%)	1.4566(1.4609)	5896(5858)	3719(3701)	2200(2230)
0.6%(4%)	1.4551(1.4638)	5848(5773)	3688(3653)	2198(2258)
0.9%(6%)	1.4537(1.4667)	5800(5687)	3658(3605)	2195(2287)
1.2%(8%)	1.4522(1.4697)	5751(5602)	3628(3557)	2193(2315)
1.5%(10%)	1.4508(1.4726)	5703(5516)	3597(3509)	2191(2343)
1.8%(12%)	1.4493(1.4755)	5655(5430)	3567(3461)	2189(2371)

1.2 GAWBS 的布里渊频移

GAWBS 中的声波只在横截面振动,因此本文只考虑 xy 平面内的情形.无外力作用时声波质点位移矢量方程为^[17,18]

$$\nabla \cdot ([c] \nabla_s \mathbf{u}) + \omega^2 \rho \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

式中

$$[c] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$C_{11} \sim C_{66}$ 为材料的刚度系数, ω 为角频率, ∇ 和 ∇_r 由 Auld 定义^[18].

纯石英属于各项同性介质, 有

$$[c] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{11} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{12} & c_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中刚度系数与材料的杨氏模量(E)、泊松比(σ)之间的关系为^[19-20]

$$E = \frac{C_{44}(3C_{12} + 2C_{44})}{C_{12} + C_{44}}, \sigma = \frac{C_{12}}{2(C_{12} + C_{44})},$$

$$C_{11} = C_{12} + 2C_{44}, V_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1-\sigma)}},$$

$$V_L = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{(1+\sigma)(1-2\sigma)\rho}}$$

掺氟浓度 ω_F 或掺锗浓度 ω_{GeO_2} 与光纤各参数之间的关系为^[21]

$$n = 1.458(1 + 1.0 \times 10^{-3} \omega_{GeO_2} - 3.3 \times 10^{-3} \omega_F) \quad (4)$$

$$V_L = 5944(1 - 7.2 \times 10^{-3} \omega_{GeO_2} - 2.7 \times 10^{-2} \omega_F) \quad (5)$$

$$V_s = 3749(1 - 6.4 \times 10^{-3} \omega_{GeO_2} - 2.7 \times 10^{-2} \omega_F) \quad (6)$$

$$\rho = 2202(1 + 6.4 \times 10^{-3} \omega_{GeO_2} - 3.4 \times 10^{-3} \omega_F) \quad (7)$$

1.3 GAWBS 的散射效率

散射效率描述了 GAWBS 散射能力的强弱^[3], 在计算去极化型声波导布里渊散射频移对布里渊散射效率的影响时, 假设采用了石英圆柱模型, 输入光波为高斯脉冲, 则光纤的去极化型声波导布里渊散射效率为^[2]

$$\eta_F = \frac{n^6 \omega^2 k T (A_1 - \alpha^2 A_2)^2 (P_{11} - P_{12})^2}{64 \pi c^2 \rho V_s^2 a^2 T_m} \quad (8)$$

式中 n 光波基模的有效折射率, $\alpha = V_s/V_L$, a 为光纤半径, P_{11} 、 P_{12} 为弹光系数, A_1 、 A_2 和 T_m 表示为

$$A_1 = (6 - y_m^2) J_2(\alpha y_m) \quad (9)$$

$$A_2 = \left(6 - \frac{y_m^2}{2}\right) J_2(y_m) - 3y_m J_3(y_m) \quad (10)$$

$$T_m = \int_0^1 \{ [u_r(z)]^2 + [u_\varphi(z)]^2 \} z dz \quad (11)$$

式中

$$u_r(r/a) = A_1 \frac{2}{(r/a)} J_2 \left[\frac{y_m r}{a} \right] - A_2 \left[\frac{2}{(r/a)} J_2 \left[\frac{\alpha y_m r}{a} \right] - \alpha y_m J_3 \left[\frac{\alpha y_m r}{a} \right] \right] \quad (12)$$

$$u_\varphi(r/a) = A_2 \frac{2}{(r/a)} J_2 \left[\frac{\alpha y_m r}{a} \right] - A_1 \left[\frac{2}{(r/a)} J_2 \left[\frac{y_m r}{a} \right] - y_m J_3 \left[\frac{y_m r}{a} \right] \right] \quad (13)$$

研究单模光纤中掺杂浓度对去极化型 GAWBS 散射效率的影响时, 首先通过式(4)-(7)求出不同浓度下

的光纤各参数值, 代入(8)对散射效率分别求解, 即可得出两者之间的关系.

2 数值模拟结果及讨论

2.1 SMF28 光纤中不同掺杂对去极化型 GAWBS 布里渊频移的影响

联立式(4)~(7)代入式(1), 根据全矢量有限元法得出 SMF28 光纤的 $TR_{2,3}$ 和 $TR_{2,7}$ 模式分布如图 2. 这两种模式分别出现在 69.6MHz 与 139.0MHz 处, 这与文献[2]计算得到的 68.4MHz 和 135.14MHz 相比差异很小, 这种差异的存在是由于所选取的材料参数与计算过程中的简化等不同引起的.

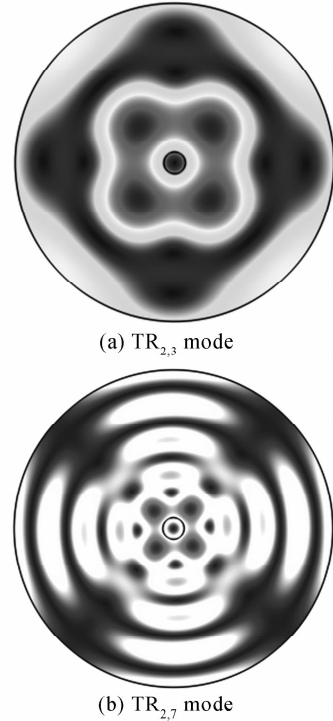
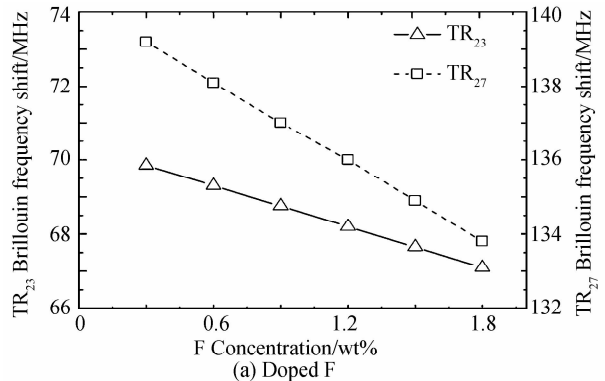


图 2 SMF28 光纤 $TR_{2,3}$ 、 $TR_{2,7}$ 模式的声波模式分布
Fig. 2 Acoustic mode distribution of the $TR_{2,3}$ and the $TR_{2,7}$ mode of the SMF 28

对于单模光纤 SMF28, 将以上所求数据代入式(1), 并取 $TR_{2,3}$ 与 $TR_{2,7}$ 模式为研究对象, 可得出包层掺氟、纤芯为纯石英时不同掺杂浓度对 GAWBS 频移的影响如图 3(a) 所示, 纤芯掺锗、包层为纯石英时不



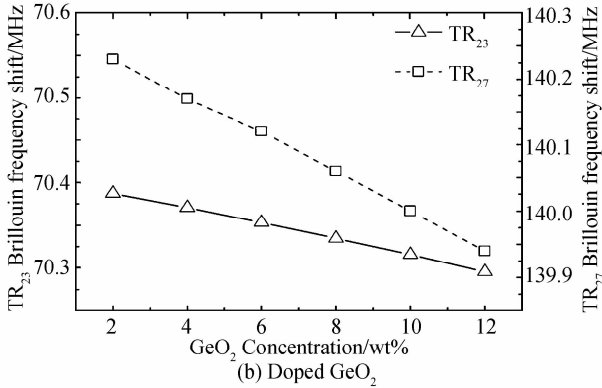


图3 TR_{2,3}、TR_{2,7}模式去极化型GAWBS频移随掺杂浓度的变化关系

Fig. 3 Frequency shift of De-GAWBS versus doped F and doped GeO₂ concentration for the TR_{2,3} mode and the TR_{2,7} mode of the SMF28

同掺杂浓度对GAWBS频移的影响如图3(b)所示。

由图3(a)可以得出在包层掺氟浓度从0.3%变化到1.8%的过程中, TR_{2,3}模式的布里渊频移从69.85MHz减至67.1MHz, TR_{2,7}模式布里渊频移也从139.2MHz减至133.8MHz. 即TR_{2,3}、与TR_{2,7}模式的布里渊频移均随包层掺氟浓度的增大而减小, 且TR_{2,7}模式较TR_{2,3}模式的变化幅度大; 而由图3(b)可以得出纤芯掺锗浓度从2%变化到12%的过程中, TR_{2,3}模式的布里渊频移从70.39MHz减至70.296MHz, TR_{2,7}模式的布里渊频移从140.23MHz减至139.94MHz, 与图3(a)相比变化甚小. 即包层掺氟浓度对GAWBS频移的改变量较大, 且同样TR_{2,7}模式较TR_{2,3}模式敏感. 究其原因, 纤芯尺寸相比光纤尺寸较小, 在利用有限元法计算的过程中, 对整体的影响并不明显. 同时, 从物理意义来看, 无论是随包层掺氟还是纤芯掺锗浓度的增加, 材料的杨氏模量、纵横声速均减小, 从而导致布里渊频移减小。

2.2 SMF28 光纤中不同掺杂对GAWBS散射效率的影响

联立式(8)~(13), 可得出包层掺氟浓度对GAWBS散射效率的影响如图4(a)所示, 纤芯掺二氧化锗对GAWBS散射效率的影响如图4(b)所示。

从图4(a)得出随包层掺氟浓度从0.3%增至1.8%, TR_{2,3}模式的散射效率从 $5.572 \times 10^{-11} \text{ cm}^{-1}$ 增至 $5.857 \times 10^{-11} \text{ cm}^{-1}$, TR_{2,7}模式的散射效率从 $3.33 \times 10^{-11} \text{ cm}^{-1}$ 增至 $3.6 \times 10^{-11} \text{ cm}^{-1}$. 从图4(b)得出纤芯掺锗浓度从2%增至12%的过程中, TR_{2,3}模式的散射效率从 $5.54 \times 10^{-11} \text{ cm}^{-1}$ 增至 $5.87 \times 10^{-11} \text{ cm}^{-1}$, 同时TR_{2,7}模式的散射效率从 $2.45 \times 10^{-11} \text{ cm}^{-1}$ 增至 $2.61 \times 10^{-11} \text{ cm}^{-1}$. 对比两图得出包层掺氟对去极化型GAWBS的散射效率影响较大, 且TR_{2,3}模式对散射效率的敏感度较高. 究其原因, 掺杂浓度的变化会改变

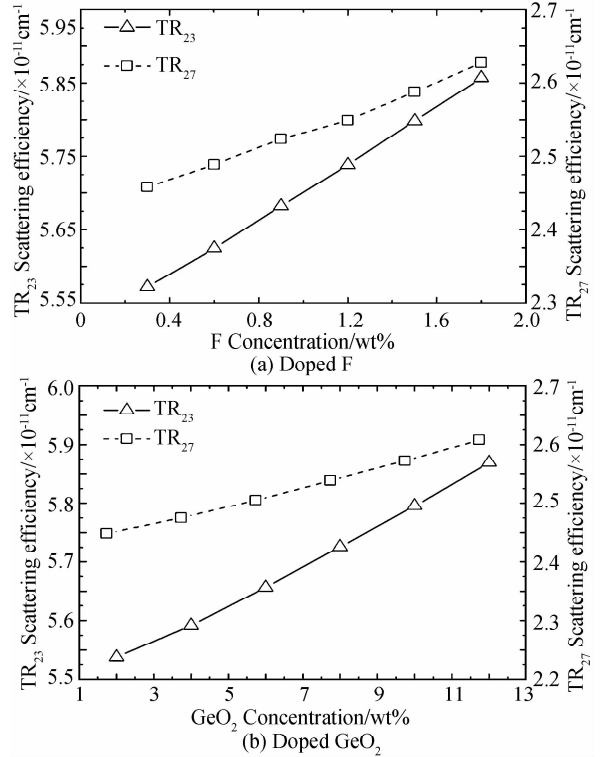


图4 TR_{2,3}、TR_{2,7}模式去极化型GAWBS散射效率随掺杂浓度的变化关系

Fig. 4 Scattering efficiency of De-GAWBS versus doped F and Fiber core doped GeO₂ concentration for the TR_{2,3} mode and the TR_{2,7} mode of the SMF28

光纤的纵横声速、密度和折射率, 这些参数均会改变GAWBS的散射效率, 且模式不同参数的影响也存在差异. 因此, 不论纤芯还是包层掺杂其散射效率都会随掺杂浓度的增加而增加, 且包层掺杂相比纤芯掺杂较敏感, TR_{2,3}模式较TR_{2,7}模式敏感。

2.3 PCF中不同掺杂对GAWBS布里渊频移的影响

利用2.1所述PCF结构可以得出一层、两层、三层空气孔的三种光纤. 对该三种PCF进行研究, 整体掺氟浓度对TR_{2,3}和TR_{2,7}模式布里渊频移的影响如图5所示. 可以看出, 整体掺氟浓度从0.3%到1.8%的变化过程中, 对具有一层、两层和三层空气孔的三种PCF, 其TR_{2,3}模式的布里渊频移分别从64.08MHz降至60.97MHz, 64.25MHz降至61.63MHz和65.67MHz降至62.99MHz, TR_{2,7}模式的布里渊频移分别从169.65MHz降至161.39MHz, 167.04MHz降至159.12MHz和154.28MHz降至148.05MHz. 即随掺氟浓度的增大布里渊频移均减小, 同时可以得出TR_{2,7}模式比TR_{2,3}模式对浓度变化较敏感, 且掺杂浓度不变时, 随着空气孔层数的增加布里渊频移显著减小. 这是由于空气孔层数增加会使声波的横向声速降低, 降低了包层中的声光耦合作用, 使声光互作用集中在纤芯附近, 从而减小布里渊频移。

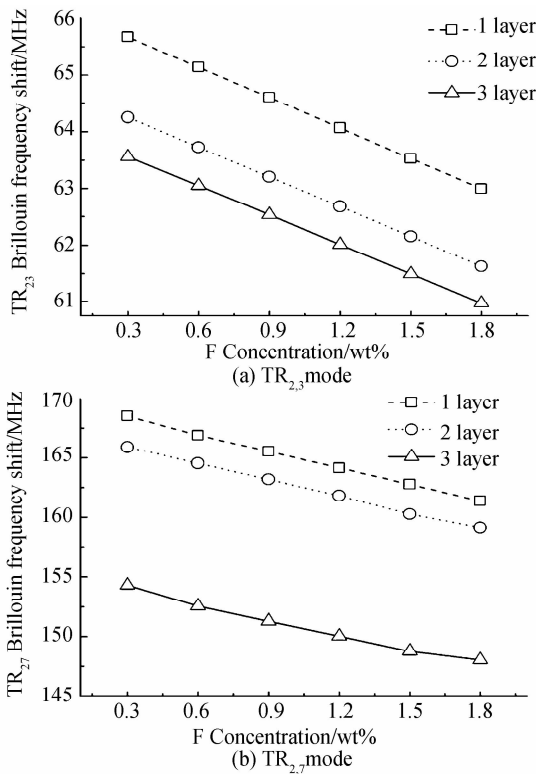


图5 PCF中去极化型GAWBS频移随掺氟浓度的变化关系

Fig. 5 Frequency shift of De-GAWBS versus the doped F concentration for TR_{2,3} mode and TR_{2,7} mode of the PCF

纤芯掺锗浓度对该两种模式布里渊频移的影响如图6所示.从图6可以得出,纤芯掺锗浓度从2%到12%的变化过程中,对具有一层、两层和三层空气孔的三种PCF,其TR_{2,3}模式的布里渊频移分别从64.07MHz降至64MHz,64.78MHz降至64.74MHz和66.2MHz降至66.13MHz. TR_{2,7}模式的布里渊频移分别从169.64MHz降至169.62MHz,160.4MHz降至160.17MHz和155.04MHz降至154.96MHz.即随掺杂浓度的增加布里渊频移减小,然而趋势不明显,但掺杂浓度相同时,TR_{2,3}模式随空气孔层数的增加其布里渊频移显著增大,TR_{2,7}模式随空气孔层数的增加其布里渊频移显著减小.对于这种现象的原因还有待继续研究.

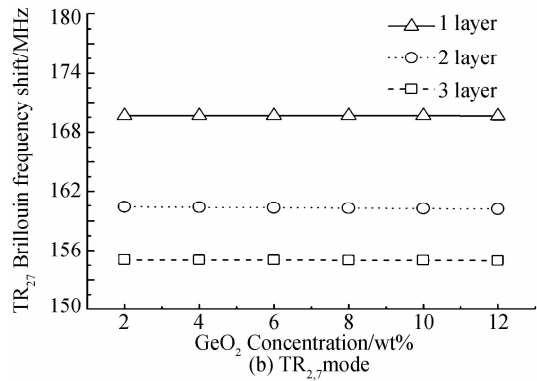
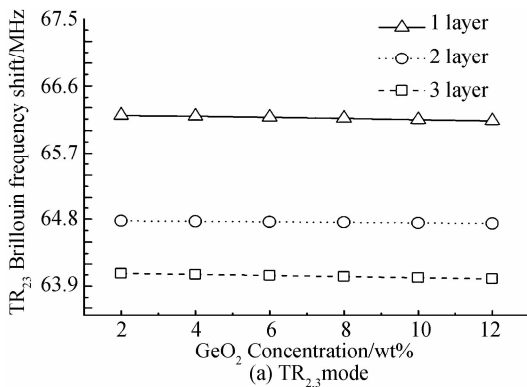


图6 PCF中去极化型GAWBS频移随掺锗浓度的变化关系

Fig. 6 Frequency shift of De-GAWBS versus the doped GeO₂ concentration for TR_{2,3} mode and TR_{2,7} mode of the PCF

2 结论

利用全矢量有限元法模拟了不同掺杂材料及浓度情况下光纤中的去极化型声波导布里渊散射频移变化规律,讨论了空气孔层数及不同掺杂材料及浓度对光子晶体光纤中TR_{2,3}模式和TR_{2,7}模式的去极化型声波导布里渊散射频移的影响.应用石英圆柱模型研究了不同掺杂材料及浓度对去极化型声波导布里渊散射的散射效率的影响.研究了光纤中掺杂材料及浓度对去极化型GAWBS频移及散射效率的影响,以及光子晶体光纤中空气孔层数对去极化型GAWBS频移的影响.结果表明增大包层掺氟浓度或纤芯掺锗浓度均会减小光纤布里渊散射的频移;而增大包层掺氟浓度或纤芯掺锗浓度均会增大其散射效率,且TR_{2,3}模式较TR_{2,7}模式的增大幅度显著.对光子晶体光纤,增大整体掺氟浓度或纤芯掺锗浓度均会减小其布里渊频移,而纤芯掺锗浓度对布里渊频移的改变量不明显,同时对整体掺氟的PCF,掺杂浓度不变时,随着空气孔层数的增加布里渊频移显著减小,而对纤芯掺锗的PCF,掺杂浓度不变时,其TR_{2,3}模式随空气孔层数的增加其布里渊频移显著增大,TR_{2,7}模式随空气孔层数的增加其布里渊频移显著减小.本文结论为设计新型光纤通信及光纤传感器件提供了理论依据.

参考文献

- [1] COTTER D. Stimulated Brillouin scattering in monomode optical fiber[J]. *Journal of Optical Communication*, 1983, 4(1): 10-19.
- [2] SHELBY R M, LEVENSON M D, BAYER P W, et al. Guided acoustic-wave Brillouin scattering [J]. *Physical Review. B*, 1985, 31(8):5244 - 5252.
- [3] WANG Jing. Researches of the forward Brillouin scattering and the sagnac loop filter [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
王静. 前向 Brillouin 散射和光纤 sagnac 环滤波性的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [4] CHEN Tao, LIANG Zhong-cheng, XU Rong-qing. A variable

- optical attenuator based on liquid optical wedge [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(12): 1478-1481.
- 陈陶, 梁忠诚, 徐荣青. 可变透镜边沿模拟顶角可调棱镜的可变光衰减器[J]. *光子学报*, 2013, **42**(12): 1478-1481.
- [5] CHEN Zu-cong, RUAN Shuang-chen, GUO Chun-yu, *et al.* Passively mode-locked erbium doped fiber ring laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(3): 267-270.
- 陈祖聪, 阮双琛, 郭春雨, 等. 环形腔被动锁模掺饵光纤激光器[J]. *光子学报*, 2012, **41**(3): 267-270.
- [6] SHEN Jun-feng, LUO Feng-guang. Super-continuum spectrum based on photonic crystal fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(S1): 46-49.
- 沈君凤, 罗风光. 光子晶体光纤产生的超连续谱[J]. *光子学报*, 2014, **43**(S1): 46-49.
- [7] POUSTIE A J. Bandwidth and mode intensities of guided acoustic-wave Brillouin scattering in optical fibers[J]. *Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics*, 1993, **10**(4): 691-696.
- [8] STILLER B, DELQUÉ M, BEUGNOT J C, *et al.* Frequency-selective excitation of guided acoustic modes in a photonic crystal fiber[J]. *Optical Society of America*, 2011, **19**(8): 7689-7694.
- [9] SHIBATA N, NAKAZONO A, TAGUCHI N, *et al.* Forward Brillouin scattering in holey fibers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, **18**(2): 412-414.
- [10] BEUGNOT J C, SYLVESTRE T, MAILLOTTE H, *et al.* Guided acoustic wave Brillouin scattering in photonic crystal fibers[J]. *Optics Letters*, 2007, **32**(1): 17-19.
- [11] BEUGNOT J C, LAUDE V. Electrostriction and guidance of acoustic phonons in optical fibers[J]. *Physical Review. B*, 2012, **86**(22): 224304.
- [12] TANAKA Y, OGUSU K. Tensile-strain coefficient of resonance frequency of depolarized guided acoustic-wave Brillouin scattering[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, **11**(7): 865-867.
- [13] TANAKA Y, OGUSU K. Temperature coefficient of sideband frequencies produced by depolarized guided acoustic-wave Brillouin scattering[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, **10**(12): 1769-1771.
- [14] HOU Shang-lin, XUE Le-mei, LI Suo-ping, *et al.* Study on characteristics of acoustic modes via stimulated Brillouin scattering in photonic crystal fiber[J]. *Chinese Journal of Physics*, 2012, **61**(13): 134205.
- 侯尚林, 薛乐梅, 黎锁平, 等. 光子晶体光纤中布里渊散射声波模式特性的分析[J]. *物理学报*, 2012, **61**(13): 134205.
- [15] HOU Shang-lin, XUE Le-mei, WANG Ju-wei, *et al.* Temperature and stress response of depolarized guided acoustic Brillouin scattering in photonic crystal fibers[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, **34**(4): 500-505.
- 侯尚林, 薛乐梅, 王菊巍, 等. 光子晶体光纤中去极化声波导布里渊散射温度及应变响应[J]. *发光学报*, 2013, **34**(4): 500-505.
- [16] HOU Shang-lin, LYU Rui, LIU Yan-jun, *et al.* Investigation on frequency shift and scattering efficiency of depolarized guided acoustic Brillouin scattering in photonic crystal fibers[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, **35**(1): 113-118.
- 侯尚林, 吕瑞, 刘延君, 等. 光子晶体光纤中去极化型声波导布里渊散射频移和散射效率研究[J]. *发光学报*, 2014, **35**(1): 113-118.
- [17] ENOMORI I, SAITOH K, KOSHIBA M, *et al.* Localized acoustic modes in photonic crystal fibers[J]. *Electronics and Communications in Japan*, 2005, **88**(2): 312-319.
- [18] AULD B A. Acoustic fields and waves in solids. [M]. Melbourne, FL: Krieger, 1973.
- [19] MCELHENNY J E. Acoustic waves in small-core photonic crystal fibers: An investigation through Brillouin scattering [D]. Bethlehem: Lehigh University, 2009.
- [20] LANDAU L D. Theory of elasticity [M]. M. Oxford: Pergamon Press, 1986.
- [21] KOYAMADA Y, SATO S, NAKAMURA S, *et al.* Simulating and designing Brillouin gain spectrum in single-mode fibers[J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2004, **22**(2): 631-639.