

文章编号: 1000-7032(2018)06-0884-07

光子晶体光纤结构与掺杂对受激布里渊散射快光的影响

牛帅斌, 侯尚林*, 雷景丽, 王道斌, 李晓晓

(兰州理工大学 理学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 由受激布里渊散射三波耦合方程导出了在小信号条件下的快光时间提前量, 通过全矢量有限元法模拟了光子晶体光纤占空比和 GeO_2 掺杂质量分数对布里渊频移、时间提前量、脉冲展宽因子及脉冲形变的影响。结果表明, 布里渊频移随着占空比和掺杂质量分数的增大而减小。在保持泵浦功率为 20 mW 和快光传输长度为 10 m 的条件下, 时间提前量随着占空比的增大而增大, 随着掺杂质量分数的增大而减小。脉冲展宽因子与时间提前量变化趋势相反。当占空比为 0.8, Ge 掺杂质量分数为 18% 时, 能够实现快光时间提前量为 29.7 ns, 脉冲展宽因子为 0.88。布里渊阈值随着占空比的增大而减小, 随着掺杂质量分数的增大而增大。

关键词: 受激布里渊散射; 光子晶体光纤; 快光; GeO_2 掺杂

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20183906.0884

Influence of Structure and Doping on Stimulated Brillouin Scattering Fast Light in Photonic Crystal Fibers

NIU Shuai-bin, HOU Shang-lin*, LEI Jing-li, WANG Dao-bin, LI Xiao-xiao

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

* Corresponding Author, E-mail: houshanglin@163.com

Abstract: Time advancement of fast light in small signal regime was derived from three wave coupling equations of stimulated Brillouin scattering (SBS) in photonic crystal fibers (PCFs), and the influence of air-filling ratio and doping (doped GeO_2) on Brillouin frequency shift, time advancement, pulse broadening factor and pulse deformation were simulated by full vectorial finite element method. The results show that the Brillouin frequency shift decreases with the increase of air-filling ratio and doping mass fraction. The time advancement increases with the increase of air filling factor, but decreases with the increase of doping mass fraction at a given pump power of 20 mW and fiber length of 10 m. The varying trend of broadening factor is just contrary to that of the time advancement. The time advancement of 29.7 ns and the pulse broadening factor of 0.88 are achieved at the air filling factor of 0.8 and GeO_2 doping mass fraction of 18%. The Brillouin threshold decreases with the increment of filling factor and decrement of doping mass fraction.

Key words: stimulated Brillouin scattering; photonic crystal fiber; fast light; GeO_2 doped

收稿日期: 2017-09-27; 修订日期: 2017-12-10

基金项目: 国家自然科学基金(61665005, 61167005, 61367007)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China(61665005, 61167005, 61367007)

1 引言

理论上根据光脉冲的群速度与光的真空速度 c 比较,如果群速度远小于 c 称为“慢光”^[1-2];大于 c 或成为负值,称为“快光”^[3-4]。近年来,学者们从色散介质材料和结构两方面开展快慢光现象研究^[5]。在材料方面,主要利用材料的吸收共振或增益共振频率范围内群折射率与频率的剧烈变化来调控群速度的快慢,主要的方法有电磁诱导透明(EIT)^[6]、相干布居数振荡(CPO)^[7]等;在结构方面,利用波导结构的空问调制使波导色散与频率有剧烈变化以调控群速度,如光子晶体^[8-9]和光纤光栅^[10]。另外还有利用与材料和结构都有关的光的非线性来进行光速调控的,如受激散射^[11-12]、参量过程^[13]等。

在光纤中实现快慢光调控具有结构简单、易于实现等特点,也具有很多现实的应用,如全光信号处理、量子计算等^[14]。在光纤中实现快慢光有多种方式,例如受激拉曼散射(SRS)^[11]、受激布里渊散射(SBS)^[12]、光参量放大(OPA)^[13]、光纤布拉格光栅(FBG)^[10]等。而基于SBS的快慢光具有室温可工作、群速度灵活可调、工作在任意波长、与现有通信系统兼容以及结构简单紧凑等特点,已经成为实现快慢光最重要的方式之一。

光子晶体光纤(PCF)是一种具有空气孔周期性排列结构的光纤^[15],相比较于普通光纤来说具有多种优点,例如色散可调特性、无截止单模传输特性、大的模场面积以及极高的非线性。由于PCF能把光束集中在纤芯很小的区域,在SBS过程中增强声光的相互耦合,从而实现比普通单模光纤高的非线性^[16],具有较高的布里渊增益或吸收。另外PCF结构灵活多变,可以根据需要改变不同参数进而改变其非线性。因此利用其高非线性特征,可以用较短的光子晶体光纤实现较大的时间延迟或提前。

本文设计了不同结构参数的PCF,并模拟了结构和掺杂对布里渊频移、快光时间提前量、脉冲展宽因子、阈值及脉冲形变的影响,结论对于设计并提高快光器件的性能具有理论指导意义。

2 理论分析

SBS过程是一种非线性过程,描述的是泵浦光、斯托克斯光以及声波之间的相互作用。一般

条件下的SBS动力学行为可以用以下三波耦合方程来表示^[17-18]:

$$\begin{cases} -\frac{\partial E_p}{\partial z} + \frac{n_g}{c} \frac{\partial E_p}{\partial t} = -\frac{\alpha}{2} E_p + i \frac{\gamma_c \omega_p}{2n_g c \rho_0} E_s \rho \\ \frac{\partial E_s}{\partial z} + \frac{n_g}{c} \frac{\partial E_s}{\partial t} = -\frac{\alpha}{2} E_s + i \frac{\gamma_c \omega_p}{2n_g c \rho_0} E_p \rho^* \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \left[\frac{\Gamma_B}{2} - i(\Omega_B - \Omega) \right] \rho = i \frac{\gamma_c q^2 \varepsilon_0}{8\Omega_B} E_p E_s^* \end{cases}, \quad (1)$$

式中 E_p 、 E_s 和 ρ 分别是泵浦波、斯托克斯波和声波的振幅; n_g 是考虑受激布里渊散射时光纤的群折射率; c 是真空中光速; α 是光纤的衰减系数; γ_c 是电致伸缩常数; ω_p 和 Ω 是泵浦波和声波的角频率; Γ_B 是布里渊吸收谱或增益谱的半高全宽,是光子寿命的倒数^[19], $\Gamma_B = 1/T_B$; Ω_B 是声波的频率,为入射泵浦光和斯托克斯光的频率差,即布里渊频移; ε_0 是真空中介电常数。

泵浦光、反斯托克斯光、声波之间的相位关系可以表示为 $\omega_{as} = \omega_p + \Omega_B$ 。式中 ω_{as} 表示反斯托克斯光的角频率。反斯托克斯光处在布里渊吸收峰的范围,其群速度会大于真空中的光速,产生快光。如果信号光与泵浦光之间的相位匹配条件满足上式,此时信号光作为反斯托克斯光会被加快,并经历吸收衰减过程。

假设较强高斯脉冲信号沿着光纤 $-z$ 方向传输,产生的斯托克斯光可以沿着 $+z$ 方向传输,此时斯托克斯光作为泵浦光传输,信号光可看作是反斯托克斯光而产生时间提前。在小信号稳态解的条件下,由式(1)可得信号光的时间提前为

$$\Delta T = \frac{G}{\Gamma_B A_{\text{eff}}} \frac{1 - [2(\omega - \Omega_B)/\Gamma_B]^2}{\{1 + [2(\omega - \Omega_B)/\Gamma_B]^2\}^2}, \quad (2)$$

式中, ΔT 是信号光在SBS过程中和未发生SBS过程中输出信号光波形峰值之间的时间差; ω 是泵浦光和信号光之间的频率差; $G = g_B L_{\text{eff}} P$ 是布里渊损耗, g_B 代表SBS吸收系数(其值等于SBS增益系数),有效长度 $L_{\text{eff}} = [1 - e^{-(\alpha L)}]/\alpha$, L 是光纤的长度, P 是斯托克斯光功率, A_{eff} 是光纤的有效模场面积,即^[20]

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left(\int_{-\infty}^{\infty} |E(x, y)|^2 dx dy \right)^2}{\int_{-\infty}^{\infty} |E(x, y)|^4 dx dy}, \quad (3)$$

当信号光中心频率处于吸收谱峰值处时,即信号光与泵浦光的频率差为一个布里渊频移 $\omega = \Omega_B$,

此时信号光获得的时间提前量最大。由式(2)可得最大快光时间提前量为

$$\Delta T = \frac{g_B L_{\text{eff}} P}{\Gamma_B A_{\text{eff}}}, \quad (4)$$

脉冲展宽因子 B 为^[12]

$$B = \frac{\tau_{\text{out}}}{\tau_{\text{in}}} = \left[1 - \frac{16(\ln 2)G}{\tau_{\text{in}}^2 \Gamma_B^2 A_{\text{eff}}} \right]^{1/2}, \quad (5)$$

τ_{in} 和 τ_{out} 分别为输入和输出信号光脉冲的半高全宽。因为 $16(\ln 2)G/\tau_{\text{in}}^2 \Gamma_B^2$ 总是小于 1, 所以脉冲展宽因子总是小于 1 的, 说明信号脉冲在经历快光过程之后会被压缩。

SBS 过程中光纤纵向声波是由多种模式组成的, 由受激布里渊散射的相位匹配条件, 可得布里渊频移

$$\Omega_{B,i} = \frac{\omega_{a,i}}{2\pi} = \frac{2n_{\text{eff}}v_i}{\lambda_p}, \quad (6)$$

$\omega_{a,i}$ 表示第 i 阶声波的角频率, v_i 是光纤中纵向声波的速度, β_a 是声波的纵向传播常数, v_i 表示第 i 阶与光场相互作用的声波模式的有效声速, $v_i = \omega_{a,i}/\beta_a$ 。

光场基模和第 i 阶声场 u_i 的非线性耦合效应可以用重叠积分表示:

$$I_i = \frac{\left(\int |E|^2 u_i^* dx dy \right)^2}{\int |E|^4 dx dy \int |u_i|^2 dx dy}, \quad (7)$$

各阶布里渊吸收谱与吸收系数的关系为

$$g_{B,i}(\Omega) = \frac{g_{0,i} I_i (\Gamma_B/2)^2}{(\Omega - \Omega_{B,i})^2 + (\Gamma_B/2)^2}, \quad (8)$$

式中, $g_{0,i} I_i$ 是第 i 阶声波模式对应的布里渊吸收系数。光纤中掺 GeO_2 质量分数与 Γ_B 之间的关系可以表示为^[21]

$$\Gamma_B = 17.5 + 0.71 \times w_{\text{GeO}_2}, \quad (9)$$

w_{GeO_2} 表示 GeO_2 的掺杂质量分数。当频移为 Ω_B 时, 第 i 阶声波模式对应的布里渊吸收系数为^[22-23]

$$g_{B,i} = \frac{4\pi n_{\text{eff}}^8 p_{12}^2}{c \lambda_p^3 \rho_0 \Gamma_B \Omega_{B,i}} I_i, \quad (10)$$

式中 p_{12} 为石英介质的弹光系数, ρ_0 为介质的密度。掺杂后折射率、横向纵向声速、密度随 GeO_2 掺杂质量分数的变化关系为 $n = 1.458(1 + 1.0 \times 10^{-3} w_{\text{GeO}_2})$, $V_L = 5944(1 - 7.2 \times 10^{-3} w_{\text{GeO}_2})$, $V_s = 3749(1 - 6.4 \times 10^{-3} w_{\text{GeO}_2})$, $\rho = 2202(1 + 6.4 \times 10^{-3} w_{\text{GeO}_2})$ ^[21]。

当泵浦功率能量接近最大布里渊阈值 P_{max} 时, 输入信号脉冲有较大失真, 所以泵浦功率要小

于 P_{max} ^[24]

$$P_{\text{max}} = \frac{21A_{\text{eff}}}{g_B L_{\text{eff}}}, \quad (11)$$

SBS 发生在布里渊增益大于光纤总体损耗时, 发生 SBS 的最小布里渊阈值 P_{min} 为

$$P_{\text{min}} = \alpha \frac{21A_{\text{eff}}}{g_B L_{\text{eff}}}, \quad (12)$$

当泵浦功率位于 P_{max} 和 P_{min} 之间时, 时间提前量和泵浦功率之间成线性关系。根据式(4)可知, 在保证其他参量不变的前提下, 可以通过改变泵浦功率来获得不同的快光时间提前量。

3 数值计算结果

3.1 模场分布

图 1(a) 为 PCF 的结构图, d 为空气孔的直径, Λ 为节距, $d/\Lambda = 0.8$, 空气孔为正六边形排列,

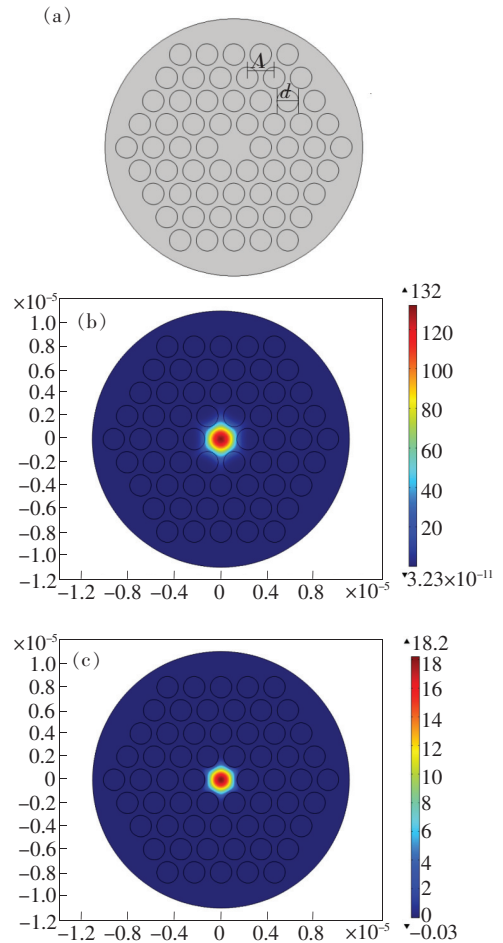


图 1 (a) PCF 的结构图; (b) 光场基模分布; (c) 声场基模分布。

Fig. 1 (a) Cross-section of proposed PCF. (b) Distribution of fundamental optical mode. (c) Distribution of fundamental acoustic mode.

层数为4层。图1(b)和图1(c)为光场基模和声场基模的模式分布。可以看出,由于PCF对光束强烈的限制作用,光场紧密分布在纤芯中,且由于PCF的声波导结构,声波基模也是被紧紧地束缚在纤芯中。

3.2 布里渊频移

设泵浦功率为20 mW,信号光脉冲宽度为220 ns,泵浦光波长为1 550 nm,节距 $\Lambda = 2.3 \mu\text{m}$ 。图2反映了不同占空比和不同掺杂质量分数下有效声速的变化规律。在模拟中只考虑布里渊主峰声模的频移,根据 $v_i = \omega_{a,i}/\beta_a$ 可以计算出相应的主峰声模的有效声速。图2(a)表明了无掺杂时占空比和有效声速的关系,随着占空比的增大,有效声速逐渐增大。而图2(b)中,占空比保持不变,可以看到掺杂质量分数和有效声速成反比。

计算得到有效声速后,相应的频移可用式(6)计算出。图3(a)表示无掺杂PCF中布里渊频移随占空比的变化。可见随占空比的增大,布里渊频移是逐渐减小的。这是因为占空比越大,空气孔所占光纤截面的比重越大,相应的有效折射率 n_{eff} 就越小,虽然有效声速随着占空比增大,但有

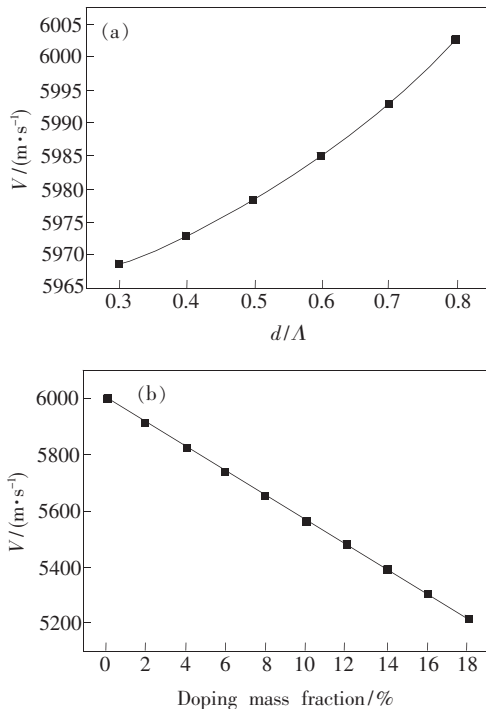


图2 有效声速随着占空比(a)和掺杂质量分数(b)的变化

Fig.2 Effective acoustic speed varies with filling factor(a) and doping mass fraction(b)

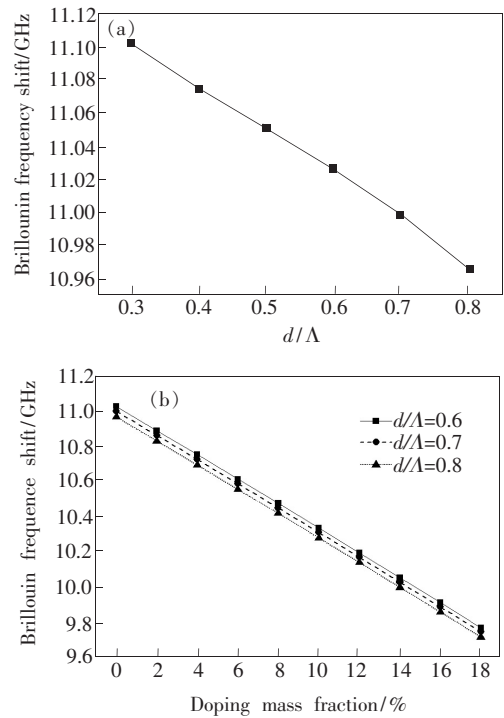


图3 布里渊频移随占空比(a)和掺杂质量分数的变化(b)
Fig.3 Brillouin frequency shift varies with filling factor(a) and doping mass fraction(b)

效折射率相对于有效声速的变化较快,所以布里渊频移逐渐减小。图3(b)表明掺杂质量分数随布里渊频移的变化关系,在3种占空比下布里渊频移随着掺杂质量分数的变化均为线性关系,随着掺杂质量分数的增大,布里渊频移也是逐渐减小的。由式(10)可知,光纤折射率随着掺杂质量分数的增大而增大,有效声速随着掺杂质量分数的减小而减小,但有效声速的变化量相对于有效折射率的变化较快,所以布里渊频移随着掺杂质量分数的增大而减小。占空比对于布里渊频移的影响较小,掺杂质量分数对于布里渊频移的影响较大。当占空比为0.8,掺杂质量分数为18%时,布里渊频移为9.72 GHz。而且单位掺杂质量分数下布里渊频移的平均变化量为69.5 MHz。从图3(a)、(b)得出布里渊频移都是随着占空比和掺杂质量分数的增大而减小的,且随着掺杂质量分数的均匀变化也是均匀变化的。

3.3 布里渊阈值的变化

根据式(11)和(12),可以得到在不同结构和掺杂下的布里渊阈值,如图4所示。可以看出,随着占空比的增大, P_{max} 和 P_{min} 逐渐减小,而且占空比越大, P_{max} 和 P_{min} 的变化量越小。因为PCF可以将光束限

制在纤芯更小的区域,降低了 PCF 中 SBS 发生的面积,所以 PCF 能够允许的最大的泵浦功率减小。如果泵浦功率大于 P_{max} , 输出信号脉冲将产生失真,泵浦功率小于 P_{min} 时,将不会发生受激布里渊散射。图 4(a)反映了未掺杂光纤中阈值的变化。当占空比从 0.3~0.8 变化时,最大的泵浦阈值功率范围为 321~1 114 mW,最小泵浦阈值功率范围为 0.16~0.56 mW。从图 4(b)可以看出,在 3 种不同占空比的

PCF 中,随着掺杂质量分数的增大,布里渊阈值都是逐渐增大的。这是因为掺 GeO_2 抑制了 SBS,所以需要更大的泵浦功率来发生 SBS。当占空比为 0.6, 光纤掺杂质量分数为 0%~18% 时,最大的泵浦阈值功率范围为 426~620 mW,最小泵浦阈值功率范围为 0.21~0.31 mW。可以得出布里渊阈值随着占空比的增大而减小,随着掺杂质量分数的增大而增大。

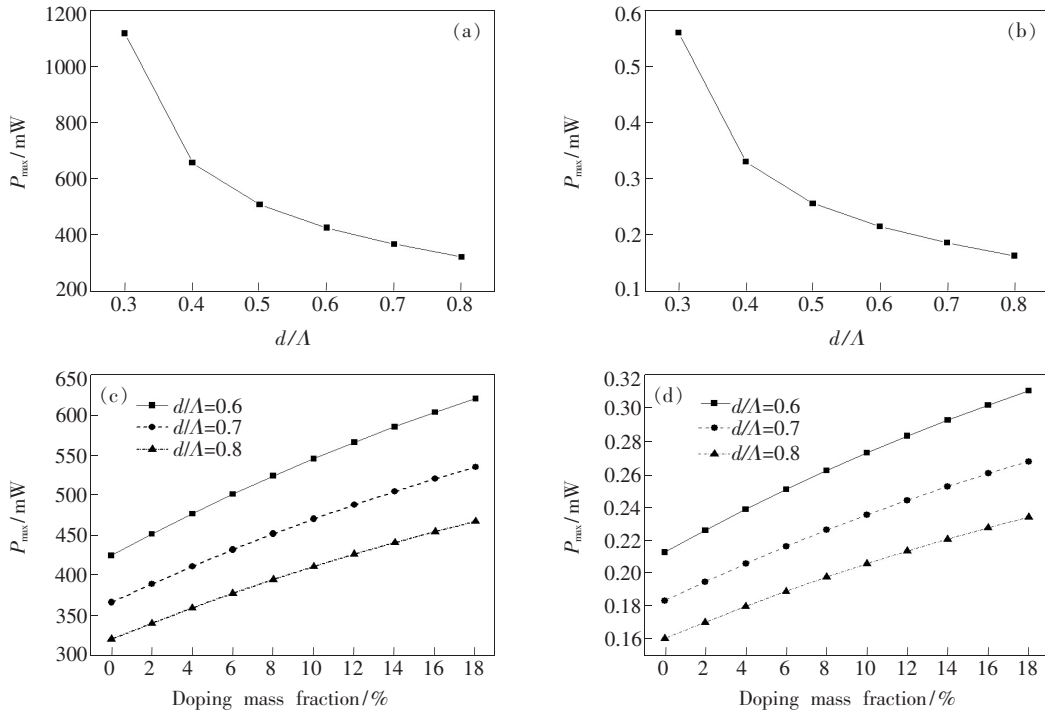


图 4 P_{max} (a) 和 P_{min} (b) 随占空比、 P_{max} (c) 和 P_{min} (d) 随掺杂质量分数的变化。

Fig. 5 P_{max} (a) and P_{min} (b) varies with filling factor, and P_{max} (c) and P_{min} (d) varies with doping mass fraction, respectively.

3.4 快光时间提前量和脉冲展宽因子的变化

根据式(4)和(5)可得快光时间提前量和脉冲展宽因子如图 5 所示。可以看出,随着占空比的增大,快光时间提前量是逐渐增大的。这是因为占空比越大,就有更多的光束被限制在纤芯

中,增强了 SBS 过程,所以快光时间提前量增大。而随着掺杂质量分数的增大,布里渊快光时间提前量是逐渐减小的。这是因为随着掺杂质量分数的增大,布里渊线宽 Γ_B 增大,所以快光时间提前量减小。在占空比从 0.3 变化至 0.8

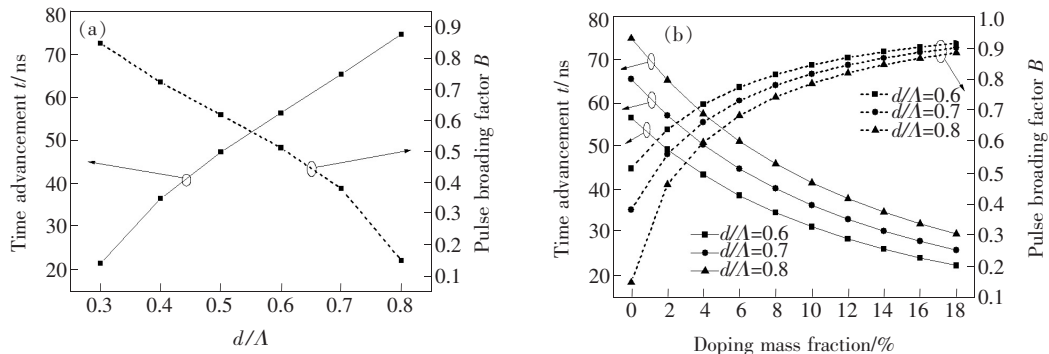


图 5 快光时间提前量和脉冲展宽因子随占空比(a)和掺杂质量分数的变化(b)

Fig. 5 Time advancement and pulse broadening factor varies with filling factor(a) and doping mass fraction(b)

并且无掺杂的条件下,快光时间提前量由 21.5 ns 变化至 74.7 ns。在占空比为 0.8,掺杂质量分数由 0% 变化至 18% 时,快光时间提前量由 74.7 ns 变化至 29.7 ns。而且可以看出脉冲展宽因子 B 随着占空比增大而变小,随着掺杂质量分数的增大而增大。因为快光过程是一个信号光脉冲衰减的过程。信号光经历的时间提前越大,相应的脉冲变化越剧烈,此时脉冲展宽因子变化越大。

3.5 脉冲信号波形的变化

图 6 为信号光脉冲波形变化图,设输入信号

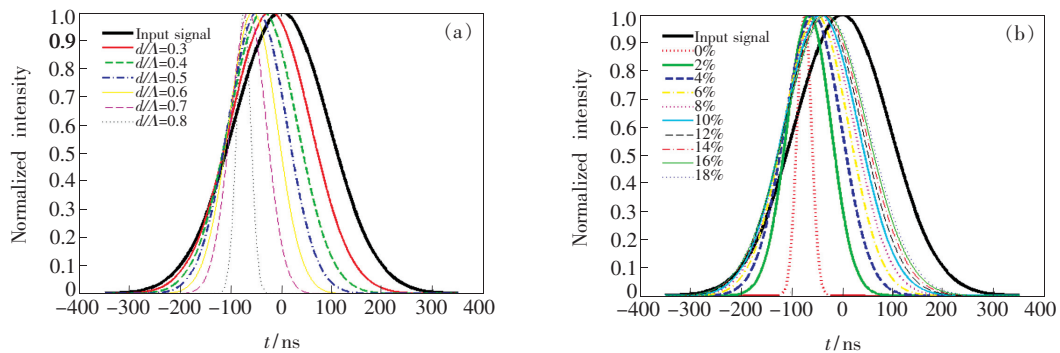


图 6 脉冲信号波形随占空比(a)和掺杂质量分数(b)的变化

Fig. 6 Pulse waveform varies with filling factor(a) and doping mass fraction(b)

4 结 论

通过对不同结构和掺杂条件下的 PCF 的有效声速、布里渊频移、布里渊阈值、时间提前量和展宽因子进行数值模拟,发现不同占空比、掺杂质量分数均能够对布里渊阈值和快光时间提前量造成影响。占空比越小,掺杂质量分数越大,布里渊阈值越大。在保证输入泵浦功率一定的情况下,占空比越大,掺杂质量分数越小,

脉宽为 220 ns 的高斯信号脉冲。图 6(a) 表示在无掺杂条件下泵浦光功率为 20 mW、泵浦波长为 1 550 nm 时,信号光输出波形随着不同占空比的变化。可以看出,随着占空比的增大,信号光脉冲是被逐渐压缩的,占空比越大,脉冲压缩的越剧烈,而且时间提前越大。这与图 5 的结论是一致的。图 6(b) 表示占空比为 0.8,不同掺杂质量分数对脉冲波形的影响。由图可见随着掺杂质量分数的增大,信号脉冲形状相对较小,而且时间提前越来越小。信号光的脉冲宽度变化和快光脉冲展宽因子的变化相对应。

相应的时间提前量越大,同时信号脉冲形变越严重。在占空比为 0.8,掺杂质量分数为 18% 时,泵浦阈值功率范围可从 0.21 mW 变化至 468 mW,相应的布里渊频移为 9.72 GHz,快光时间提前量为 29.7 ns,脉冲展宽因子为 0.88。本文通过模拟不同 PCF 结构的 SBS 快光传输特性,并优化 PCF 结构参数,获得了具有更大快光时间提前量的 PCF。结论对于设计合理的光缓存器件具有理论指导作用。

参 考 文 献:

- [1] HAU L V, HARRIS S E, DUTTON Z, *et al.*. Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas [J]. *Nature*, 1999, 397:594-598.
- [2] KASH M M, SAUTENKOV V A, ZIBROV A S, *et al.*. Ultraslow group velocity and enhanced nonlinear optical effects in a coherently driven hot atomic gas [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, 82(26):5229-5232.
- [3] CHU S, WONG S. Linear pulse propagation in an absorbing medium [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1982, 48(11):738-741.
- [4] STENNER M D, GAUTHIER D J, NEIFELD M A. The speed of information in a “fast-light” optical medium [J]. *Nature*, 2003, 425:695-698.
- [5] BOYD R W, GAUTHIER D J. Controlling the velocity of light pulses [J]. *Science*, 2009, 326:1074-1077.
- [6] HARRIS S E, FIELD J E, IMAMOGLU A. Nonlinear optical processes using electromagnetically induced transparency [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, 64(10):1107-1110.

- [7] HILLMAN L W, BOYD R W, KRASINSKI J, *et al.*. Observation of a spectral hole due to population oscillations in a homogeneously broadened optical absorption line [J]. *Opt. Commun.*, 1983, 45(6):416-419.
- [8] MORI D, BABA T. Wideband and low dispersion slow light by chirped photonic crystal coupled waveguide [J]. *Opt. Express*, 2005, 13(23):9398-9408.
- [9] HAO R, CASSAN E, LE R X, *et al.*. Improvement of delay-bandwidth product in photonic crystal slow-light waveguides [J]. *Opt. Express*, 2010, 18(16):16309.
- [10] PISCO M, RICCIARDI A, CAMPOPIANO S, *et al.*. Fast and slow light in optical fibers through tilted fiber Bragg gratings [J]. *Opt. Express*, 2009, 17(26):23502-23510.
- [11] SHARPING J, OKAWACHI Y, GAETA A. Wide bandwidth slow light using a Raman fiber amplifier. [J]. *Opt. Express*, 2005, 13(16):6092.
- [12] OKAWACHI Y, BIGELOW M S, SHARPING J E, *et al.*. Tunable all-optical delays *via* Brillouin slow light in an optical fiber [C]. *Lasers and Electro-Optics. IEEE, Sydney, Australia*, 2005:511-513.
- [13] DAHAN D, EISENSTEIN G. Tunable all optical delay *via* slow and fast light propagation in a Raman assisted fiber optical parametric amplifier; a route to all optical, buffering [J]. *Opt. Express*, 2005, 13(16):6234.
- [14] THEVENAZ L. Slow and fast light in optical fibers: review and perspectives [C]. *Lasers and Electro-Optics, 2009 and 2009 Conference on Quantum electronics and Laser Science Conference, IEEE, Belek-Antalya, Turkey*, 2009:1-2.
- [15] HASSANI A, DUPUIS A, SKOROBOGATIY M. Low loss porous terahertz fibers containing multiple subwavelength holes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 92(7):071101-1-3.
- [16] SINHA R K, KUMAR A, SAINI T S. Analysis and design of single-mode As₂Se₃-chalcogenide photonic crystal fiber for generation of slow light with tunable features [J]. *IEEE J. Select. Top. Quant. Electron.*, 2016, 22(2):1-6.
- [17] KALOSHA V P, CHEN L, BAO X. Slow and fast light *via* SBS in optical fibers for short pulses and broadband pump [J]. *Opt. Express*, 2007, 14(26):12693-12703.
- [18] KALOSHA V P, CHEN L, BAO X. Slow light of subnanosecond pulses *via* stimulated Brillouin scattering in nonuniform fibers [J]. *Phys. Rev. A*, 2007, 75(2):441-445.
- [19] QIN G, SOTOBAYASHI H, TSUCHIYA M, *et al.*. Stimulated Brillouin scattering in a single-mode tellurite fiber for amplification, lasing, and slow light generation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, 26(5):492-498.
- [20] AGRAWAL G. *Applications of Nonlinear Fiber Optics* [M]. Oxford: Cademic Press, 2001.
- [21] KOYAMADA Y, SATO S, NAKAMURA S, *et al.*. Simulating and designing Brillouin gain spectrum in single-mode fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, 22(2):631-639.
- [22] CHENG T, LIAO M, GAO W, *et al.*. Suppression of stimulated Brillouin scattering in all-solid chalcogenide-tellurite photonic bandgap fiber [J]. *Opt. Express*, 2012, 20(27):28846-54.
- [23] DASGUPTA S, POLETTI F, LIU S, *et al.*. Modeling Brillouin gain spectrum of solid and microstructured optical fibers using a finite element method [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2011, 29(1):22-30.
- [24] JAIN V, SHARMA S, SAINIT S, *et al.*. Design and analysis of single-mode tellurite photonic crystal fibers for stimulated Brillouin scattering based slow-light generation [J]. *Appl. Opt.*, 2016, 55(25):6791.



牛帅斌(1994 -),男,甘肃兰州人,硕士研究生,2015年于河南大学获得学士学位,主要从事光纤受激布里渊散射快慢光的研究。
E-mail: niushuaibin@126.com



侯尚林(1970 -),男,甘肃天水人,博士,教授,2008年于北京邮电大学获得博士学位,主要从事光纤通信与光纤传感的研究。
E-mail: houshanglin@163.com