引用格式：LI Li-jun，HOU Shang-lin，LEI Jing-li，*et al*. Slow Light of Stimulated Brillouin Scattering in Few-mode Fibers [J]. *Acta Photonica Sinica*，2019，**48**(5)：0506001

李丽君，侯尚林，雷景丽，等. 少模光纤中受激布里渊散射的慢光[J]. 光子学报，2019，**48**(5)：0506001

少模光纤中受激布里渊散射的慢光

李丽君[1]，侯尚林[1]，雷景丽[1]，王道斌[1]，李晓晓[1]，王慧琴[2]，曹明华[2]

（1 兰州理工大学 理学院，兰州 730050）

（2 兰州理工大学 计算机与通信学院，兰州 730050）

摘　要：利用全矢量有限元法计算了少模光纤中模内和模间受激布里渊散射各模式布里渊频移和布里渊增益谱，模拟了泵浦功率、有效传输长度及脉冲宽度对各模式慢光时间延迟量、脉冲展宽因子的影响. 模拟结果表明：少模光纤中不同传输模式产生的受激布里渊散射慢光特性不同，输入泵浦功率及有效传输长度越大，各模式的慢光时延量、展宽越大，且当输入泵浦功率相同时，模内的慢光时延量、展宽因子均大于模间的. 优化参数可得，在输入泵浦功率为 0.5 W，光纤有效长度为 1 km 的条件下，LP_{01}-LP_{01}、LP_{11}-LP_{11} 及 LP_{01}-LP_{11} 模式的时间延迟量分别为 643.7 ns、362.6 ns 和 213.2 ns，其展宽因子分别为 1.346、1.207 和 1.126.

关键词：少模光纤；受激布里渊散射；慢光；展宽因子；声光耦合

中图分类号：TN929.11　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.3788/gzxb20194805.0506001

Slow Light of Stimulated Brillouin Scattering in Few-mode Fibers

LI Li-jun[1]，HOU Shang-lin[1]，LEI Jing-li[1]，WANG Dao-bin[1]，
LI Xiao-xiao[1]，WANG Hui-qin[2]，CAO Ming-hua[2]

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

(2 *School of Computer and Communication*，*Lanzhou University of Technology*，*Lanzhou* 730050，*China*)

Abstract：Brillouin frequency shift and Brillouin gain spectrum of different modes in few mode fiber were calculated by full vector finite element method. In addition，the influences of pump power，effective transmission length and pulse width on the slow-light time delay and pulse broadening factor of different modes in few mode fiber were also simulated. The simulation results show that characteristics of tunable slow light of different modes in the FMF are different，the larger time delay and pulse broadening factor of different modes are achieved as pump power and effective transmission length increasing，the time delay and pulse broadening factor of intramodal stimulated Brillouin scattering are greater than intermodal stimulated Brillouin scattering for a given input pump power. By critical tuning parameters，the time delay of LP_{01}-LP_{01}，LP_{11}-LP_{11} and LP_{01}-LP_{11} mode pairs are respectively 643.7 ns，362.6 ns and 213.2 ns at a given input pump power of 0.5 W and the effective fiber length of 1 km，pulse broadening factors are 1.346，1.207 and 1.126，separately.

Key words：Few mode fiber；Stimulated Brillouin scattering；Slow light；Broadening factor；Acousto-optic coupling

OCIS Codes：060.2270；290.5900；230.1040；190.4370

基金项目：国家自然科学基金（No. 61665005），甘肃省科学基金（Nos. 17JR5RA132，17JR5RA119）

第一作者：李丽君（1991－），女，硕士研究生，主要研究方向为光纤通信与传感. Email：18394511995@163.com

导师（通讯作者）：侯尚林（1970－），男，教授，博导，主要研究方向为光纤通信与传感. Email：houshanglin@vip.163.com

收稿日期：2018－12－17；**录用日期**：2019－03－07

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

0 引言

随着通信技术的迅猛发展，信息需求及传输容量与日俱增. 为进一步提升信息容量，频分复用[1]、波分复用[2]、时分复用[3]等复用技术先后被广泛应用于通信系统中，然而，这些复用技术逐渐接近光纤传输的容量极限，亟需新的复用技术来提升信息传输容量. 空分复用(Space Division Multiplexing，SDM)技术作为一种新的技术引起了广泛关注，该技术在空间上采用多个纤芯或模式传输信息，使传输容量大大增加[4]. 近年来，基于空分复用技术的少模光纤(Few Mode Fiber，FMF)作为提升通信系统传输容量的一种有效方案受到了广泛的重视[5].

将光波在媒介中传播时的群速度与真空中速度 c 作比较，若群速度远小于 c，则称为“慢光”[6-7]. 在光纤中实现慢光具有结构简单、易于实现等特点，还具有很多现实的应用：如全光信号处理、光缓存器和量子计算等. 实现慢光有多种方式，如电磁诱导透明(Electromagnetically Induced Transparency，EIT)[8]，相干布居振荡(Coherent Pulation Oscillation，CPO)[9]，受激拉曼散射(Stimulated Raman Scattering，SRS)[10]，受激布里渊散射(Stimulated Brillouin Scattering，SBS)[11]等. 而基于 SBS 的慢光具有室温可工作、群速度灵活可调、系统设备简单、可调的工作波长、与现有通信系统兼容性好等特点，已经成为实现慢光最重要的方式之一.

光纤中 SBS 是光波和声波相互作用产生的一种非线性效应，由泵浦光引起的电致伸缩力激起弹性声波场，声波场将散射泵浦光，产生频率下移的斯托克斯光或频率上移的反斯托克斯光. 目前关于 SBS 的研究主要集中在单模光纤中，对少模光纤 SBS 的研究还很少[12-13]. 2013 年，学者 SONG K Y 等[12]实验研究了圆形纤芯的四模光纤的布里渊增益谱(Brillouin Gain Spectrum，BGS)特性，发现模内(泵浦光与 Stokes 光模式相同)的 SBS 作用强于模间(泵浦光与 Stokes 光模式不同)的 SBS. 同年，李安等[14]对圆形纤芯的两模光纤的 BGS 特性进行了实验研究，实验测得了不同光模对的 BGS 及对应的布里渊增益，结果表明，BGS 取决于参与的光模对. 2017 年，张燕君等[15]分析了圆形纤芯的五模光纤的 SBS 特性，并给出了少模光纤 SBS 增益谱的理论分析，但并未分析 FMF 的 SBS 慢光特性. 以上关于 FMF 的 SBS 的研究都集中在 BGS 和实验结果上，而对 FMF 的 SBS 慢光的理论研究却很缺乏.

本文研究了空气孔辅助型少模光纤的 SBS 的慢光特性，论证了 FMF 中不同光模对下模内 SBS 与模间 SBS 的布里渊增益谱，此外，还模拟了光纤有效传输长度、泵浦功率、输入脉宽对不同光模对的功率阈值、慢光延迟量及展宽因子的影响.

1 理论分析

假设泵浦光和信号光偏振方向相同，少模光纤 SBS 过程中泵浦光、斯托克斯光和声波的耦合方程[16]可表示为

$$\begin{cases} -\dfrac{\partial E_{\mathrm{p}}}{\partial z}+\dfrac{n_{\mathrm{fg}}}{c}\dfrac{\partial E_{\mathrm{p}}}{\partial t}=-\dfrac{\alpha}{2}E_{\mathrm{p}}+\mathrm{i}g_2E_{\mathrm{s}}Q \\ \dfrac{\partial E_{\mathrm{s}}}{\partial z}+\dfrac{n_{\mathrm{fg}}}{c}\dfrac{\partial E_{\mathrm{s}}}{\partial t}=-\dfrac{\alpha}{2}E_{\mathrm{s}}+\mathrm{i}g_2E_{\mathrm{p}}Q^* \\ \dfrac{\partial Q}{\partial t}+(\dfrac{\Gamma_{\mathrm{B}}}{2}-\mathrm{i}\Delta\omega)Q=\mathrm{i}g_1E_{\mathrm{p}}E_{\mathrm{s}}^* \end{cases} \tag{1}$$

式中，E_{s}，E_{p}，和 Q 分别是斯托克斯波、泵浦波及声波的振幅，分别表示为[17-18] $E_{\mathrm{s}}=\sum_i E_{\mathrm{s},i}$，$E_{\mathrm{p}}=\sum_j E_{\mathrm{p},j}$，和 $Q=\sum_k Q_k$，这里 $E_{\mathrm{s},i}$，$E_{\mathrm{p},j}$，和 Q_k 分别是第 i-th 斯托克斯波，第 j-th 泵浦波和第 k-th 声波的振幅. c 是真空中的光速，α 为光纤的损耗系数，n_{fg} 为无受激布里渊散射时的群折射率，$\Gamma_{\mathrm{B}}/2\pi$ 是布里渊共振时的半高全宽，$\Delta\omega=(\omega_{\mathrm{p}}-\omega_{\mathrm{s}})-2\pi\upsilon_{\mathrm{B}}$ 为角频率失谐量，υ_{B} 为布里渊频移，g_1 为布里渊散射中斯托克斯波与泵浦波的耦合系数，g_2 为声波与光波的耦合系数，$g_0=4g_1g_2/\Gamma_{\mathrm{B}}$ 为布里渊增益系数的峰值.

不同光模对的光脉冲在发生 SBS 和未发生 SBS 过程后输出信号光波形峰值间的时间差定义为少模光纤中信号光在不同传输模式下的慢光时间延迟量[19]，可表示为

$$\Delta T_{\mathrm{d},ij}=G_{ij}/\Gamma_{\mathrm{B}} \tag{2}$$

式中，$G_{ij}=g_{0,ij}L_{\mathrm{eff}}P/A_{\mathrm{eff},ij}$ 为第 i-th 斯托克斯光与第 j-th 泵浦光在 SBS 作用下产生的布里渊增益，$g_{0,ij}$ 为对

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

应模式对的布里渊增益系数，$L_{\mathrm{eff}}=(1-e^{(\alpha L)})/\alpha$ 为光纤的有效传输长度，L 为光纤的实际长度，P 为输入泵浦功率.

少模光纤中输入的泵浦功率达到布里渊功率阈值才能发生 SBS，SBS 阈值可估计为[20]

$$P_{\mathrm{th},ij}=21A_{\mathrm{eff},ij}/g_{0,ij}L_{\mathrm{eff}} \tag{3}$$

式中，$A_{\mathrm{eff},ij}$ 是不同泵浦-Stokes 光模对发生 SBS 产生的有效模场面积，可表示为[21]

$$A_{\mathrm{eff},ij}=\frac{\left(\iint|E_{\mathrm{s},i}^2(x,y)|^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y\right)\left(\iint|E_{p,j}^2(x,y)|^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y\right)}{\iint|E_{\mathrm{s},i}^2(x,y)|^2|E_{p,j}^2(x,y)|^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y} \tag{4}$$

式中，$E_{\mathrm{s},i}(x,y)$ 和 $E_{\mathrm{p},j}(x,y)$ 分别表示第 i-th 斯托克斯波和第 j-th 泵浦波的电场横向分量. 当泵浦光与斯托克斯光模式相同时（模内 SBS），二者的电场分布相同，即 $E_{\mathrm{s},i}(x,y)=E_{\mathrm{p},j}(x,y)$，式(4)可进一步表示为 $A_{\mathrm{eff},ii}=\left[\iint|E_{\mathrm{s},i}(x,y)|^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y\right]^2/\iint|E_{\mathrm{s},i}(x,y)|^4\mathrm{d}x\mathrm{d}y$，这与文献[22]一致.

对于一个给定光模对的第 k-th 声模的布里渊频移 $\upsilon_{\mathrm{B},ijk}$ 表示为[23]

$$\upsilon_{\mathrm{B},ijk}=\frac{\nu_k}{\lambda}(n_{\mathrm{eff},i}+n_{\mathrm{eff},j}) \tag{5}$$

式中，ν_k 为第 k-th 声模的声速，λ 为泵浦波长，$n_{\mathrm{eff},i}$ 为第 i-th 光模（泵浦波或 Stokes）的有效折射率. 当泵浦光与斯托克斯光模式相同时（模内 SBS），二者的折射率相同，即 $n_{\mathrm{eff},i}=n_{\mathrm{eff},j}$，式(5)可进一步表示为 $\upsilon_{\mathrm{B},iik}=2n_{\mathrm{eff},i}\nu_k/\lambda$，这与单模光纤结论一致[24].

少模光纤可以传输几个独立正交模式，且每种模式独立地传输能量，独立地与声波作用产生各自的布里渊散射谱. FMF 中每种光模与不同声波作用产生的布里渊散射谱均符合洛伦兹曲线分布，可由布里渊频移、线宽、峰值等参量描述，各模式布里渊增益谱可表示为[20]

$$g_{\mathrm{B},ijk}(\upsilon)=g_{0,ijk}\frac{(\Gamma_{\mathrm{B}}/2)^2}{(\upsilon-\upsilon_{\mathrm{B},ijk})^2+(\Gamma_{\mathrm{B}}/2)^2} \tag{6}$$

式中，$g_{0,ijk}$ 为布里渊增益系数，当泵浦光与斯托克斯光模式相同时（模内 SBS），布里渊增益系数可表示为[25] $g_{0,iik}=4\pi n_{\mathrm{eff},i}^8p_{12}^2/c\lambda^3\rho\upsilon_{\mathrm{B},iik}\Delta f_{\mathrm{B}}\cdot I$，其中 $p_{12}=0.27$ 为介质弹光系数，$\rho=2\ 203\ \mathrm{kg/m^3}$ 为介质密度，Δf_{B} 为半高全宽且在 FMF 中对于所有的声模均认为是 35 MHz[18]，I 为光纤横截面上归一化声光耦合积分，表示为 $I=\left(\iint|E_i|^2u_k^*\mathrm{d}x\mathrm{d}y\right)^2/\left(\iint|E_i|^4\mathrm{d}x\mathrm{d}y\iint|u_k|^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y\right)$，它是归一化的且小于 1[24]. 声光耦合积分反应了 SBS 的效率，即光场和声场的耦合程度.

给定光模对与不同声模耦合的布里渊频移不同，叠加后的增益谱相对展宽，叠加后的布里渊增益谱可表示为[17]

$$g_{\mathrm{B},ij}(\upsilon)=g_{0,ij}\frac{\Gamma_{\mathrm{B}}/2}{\upsilon_{\mathrm{B},1}-\upsilon_{\mathrm{B},2}}\left[\arctan\left(\frac{\upsilon_{\mathrm{B},1}-\upsilon_{\mathrm{B}}}{\Gamma_{\mathrm{B}}/2}\right)-\arctan\left(\frac{\upsilon_{\mathrm{B},2}-\upsilon_{\mathrm{B}}}{\Gamma_{\mathrm{B}}/2}\right)\right] \tag{7}$$

式中，$g_{0,ij}$ 为 SBS 增益系数，对于模间 SBS，其值是纯石英布里渊增益系数[15]，$\upsilon_{\mathrm{B},1}$ 和 $\upsilon_{\mathrm{B},2}$ 分别为 FMF 中不同传输模式下对应的布里渊频移中的较大值和较小值.

τ_{in} 为输入高斯信号光脉冲的脉冲宽度，τ_{out} 为输出脉冲信号的脉冲宽度，输出信号仍是一个高斯信号，任一给定光模对的脉冲展宽因子表示为[19]

$$B_{ij}=\frac{\tau_{\mathrm{out}}}{\tau_{\mathrm{in}}}=\sqrt{1+\frac{16\ln 2}{\tau_{\mathrm{in}}^2\Gamma_{\mathrm{B}}^2}G_{ij}} \tag{8}$$

由式(8)可知，各模式的脉冲展宽因子均大于 1，即 FMF 中信号光在经历慢光过程之后将会被展宽.

2 数值计算结果

2.1 模式分析

利用有限元法对少模光纤的模式进行分析，采用空气孔辅助少模光纤，其结构如图 1 所示. 相关参数[26]：入射光工作波长为 1 550 nm，光纤线性损耗为 0.26 dB/km，介质的弹光系数为 0.27，光纤的纤芯直径 d_1 为 13.1 μm，空气孔直径 d_2 为 8.2 μm，空气孔间距 Λ 为 13.3 μm，包层半径为 62.5 μm，包层的折射率为

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1.444，光纤的芯包折射率差为 0.36%，符合弱导近似的条件.

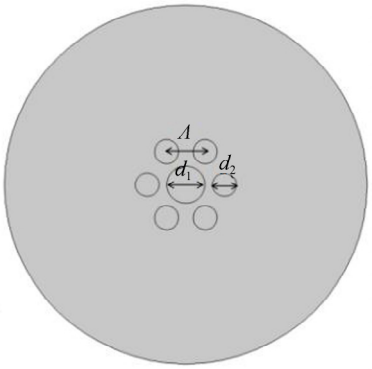

图 1　少模光纤的横截面图

Fig. 1　Transverse cross-sectional profile of the FMF

少模光纤中光传输模式不唯一，不同传输模式对应不同的有效折射率、光场分布，对应的 SBS 特性也不同. 图 2(a)、(b)分别为少模光纤中光基模 LP_{01} 和高阶模 LP_{11} 的横向电场分布，波长 1 550 nm 时，LP_{01} 和 LP_{11} 的有效折射率分别为 1.447 5 和 1.445 0. 可知，少模光纤中不同传输模式的光都集中分布在纤芯，但光基模 LP_{01} 的光集中程度明显好于 LP_{11} 模，说明 LP_{01} 模中的光相比 LP_{11} 模能更好的被限制在纤芯中.

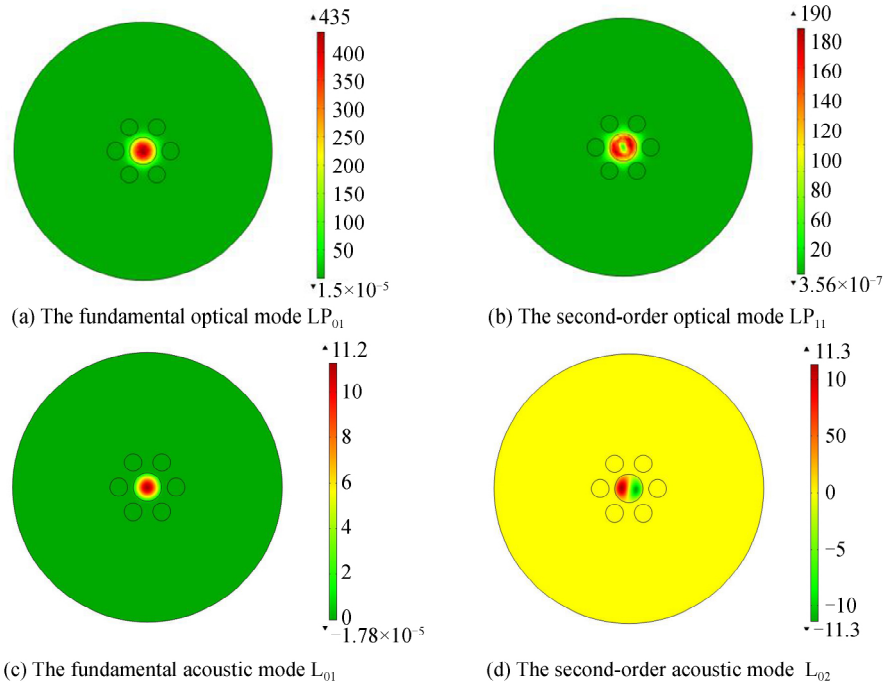

图 2　少模光纤中各光模及声模的分布

Fig. 2　The distribution of optical mode and acoustic mode in the FMF

少模光纤 SBS 过程涉及不同的光模和声模，图 2(c)、(d)分别为少模光纤中后向布里渊散射声基模 L_{01} 和一个声高阶模 L_{02} 的横向分布示意图. 由图 2(c)、(d)可知，声基模和声高阶模的大部分光都集中在光纤纤芯中，但声基模的光集中程度好于声高阶模.

2.2　布里渊增益谱

一个传输模式的布里渊增益谱主要来源于不同声模的贡献，为了证实不同声模的贡献，研究了少模光纤中两种模内 SBS 的布里渊增益谱图，如图 3 所示，分别计算模拟了泵浦光和斯托克斯光都为 LP_{01}、LP_{11} 时与不同声模耦合产生的 BGS 以及它们分别产生的总的 BGS. 由式(6)可知，BGS 图的分布符合洛伦兹曲线分布[12].

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

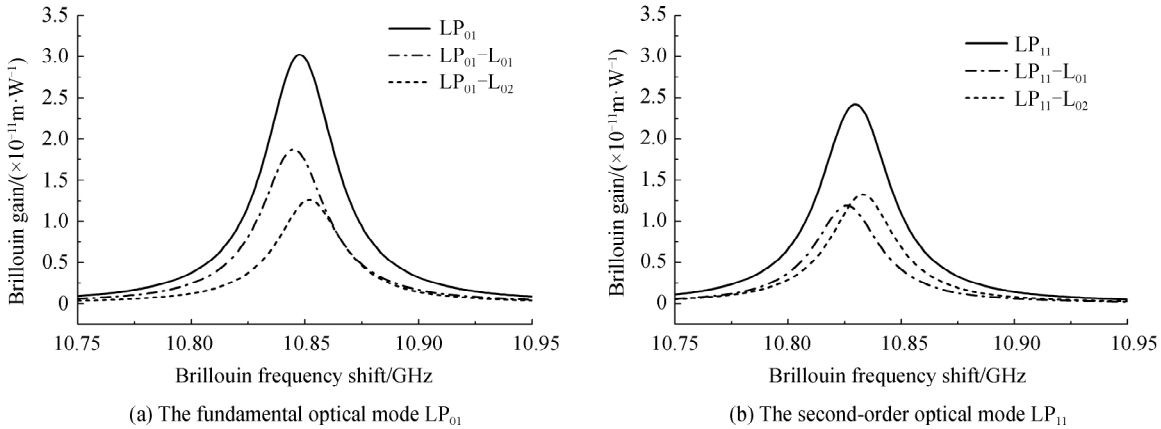

图 3　少模光纤中各模式的布里渊增益谱

Fig. 3　Brillouin gain spectrum of each mode in the FMF

从图 3 可知，对于一个给定的泵浦-Stokes 光模对，不同声模的布里渊频移不同，这是因为不同声模具有不同的声速，且声基模 L_{01} 的布里渊频移小于声高阶模 L_{02} 的频移. 表 1 给出了各模式对的布里渊频移值. 由图 3(a)可知，在 BGS 图中对应 L_{01} 的低频峰是主峰，这是因为 LP_{01} 与低频的 L_{01} 的模场分布相似，耦合积分更大，故使得与 L_{01} 的布里渊增益大. 图 3(b)中对应 L_{02} 的高频峰是主峰，这是因为 LP_{11} 模与高频的 L_{02} 的模场分布相似，耦合积分更大，故使得与 L_{02} 的布里渊增益大. 此外，在所有的泵浦-Stokes 光模对中，LP_{01}-L_{01} 的布里渊增益最大.

表 1　少模光纤中不同模式对的布里渊频移值

Table 1　BFS of different mode pairs in the FMF

Mode pairs	LP_{01}-L_{01}	LP_{01}-L_{02}	LP_{11}-L_{01}	LP_{11}-L_{02}	LP_{01}-LP_{01}	LP_{11}-LP_{11}	LP_{01}-LP_{11}
BFS/GHz	10.845	10.852	10.826	10.833	10.848	10.829	10.835

少模光纤中发生的 SBS 包括模内和模间 SBS，不同传输模式产生不同的布里渊增益谱，各模式对的布里渊增益谱如图 4. 对于模间 SBS 产生的 BGS，由于 LP_{01}-LP_{11} 的 BGS 与 LP_{11}-LP_{01} 的 BGS 相同，这里只介绍了 LP_{01}-LP_{11} 模式的 BGS[17].

由图 4 可知，不同的泵浦-Stokes 光模对产生的 BGS 和布里渊频移不同，这是因为不同模式有不同有效折射率和声速. LP_{01}-LP_{01} 的布里渊频移最大，LP_{01}-LP_{11} 次之，LP_{11}-LP_{11} 的最小，具体数据见表 1. 此外，LP_{01}-LP_{01} 产生的布里渊增益最大，且 LP_{11}-LP_{11} 产生的布里渊增益都明显大于 LP_{01}-LP_{11} 模式的，也即模内 SBS 产生的布里渊增益明显大于模间 SBS 的布里渊增益[12].

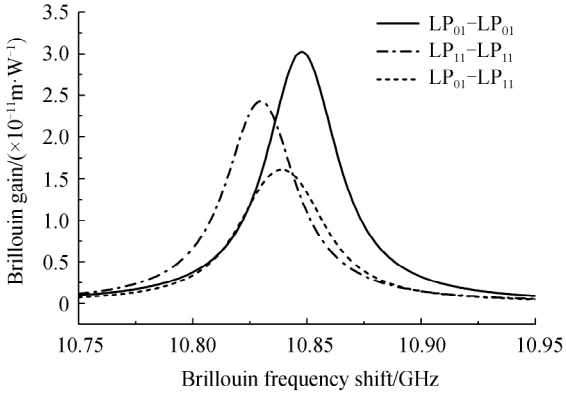

图 4　少模光纤中不同模式对布里渊增益谱

Fig. 4　Brillouin gain spectrum of different mode pairs in the FMF

2.3　受激布里渊散射阈值

受激布里渊散射产生的条件除了要满足相位匹配外，还要使输入的泵浦功率高于 SBS 阈值. 当入射的泵浦光强达到布里渊阈值时，泵浦波会将能量转移给斯托克斯受激布里渊散射光，斯托克斯光就会呈线性增长. 图 5 是少模光纤中各传输模式 SBS 阈值随传输有效长度的变化.

由图 5 可知，少模光纤中不同传输模式的受激布里渊散射阈值不同，但都随着有效传输长度的增加而减小. 当有效长度从 0.5 ～3 km 变化时，LP_{01}-LP_{01}、LP_{11}-LP_{11} 及 LP_{01}-LP_{11} 的功率阈值分别从369 mW、556 mW、447 mW 减小到 61.5 mW、92.7 mW、74.6 mW. 且对于相同的有效长度，LP_{01}-LP_{01} 模式的功率阈值最小，LP_{01}-LP_{11} 模式次之，LP_{11}-LP_{11} 模式的功率阈值最大，表明阈值随模式阶数增大而增大[12]，故

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

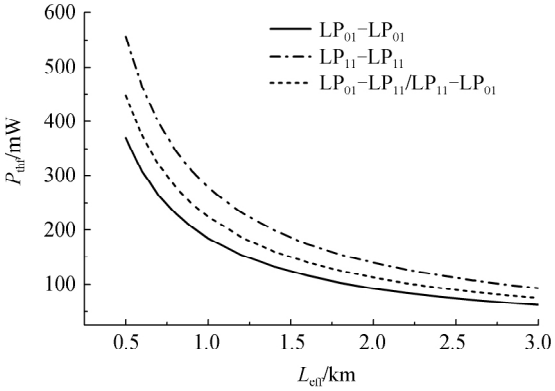

图 5　阈值随有效长度的变化

Fig. 5　Variation of Brillouin threshold with the effective length

LP_{01}-LP_{01}模式对最容易发生 SBS 效应. 由式(3)可知,这是因为泵浦功率阈值与模式有效面积成正比、与布里渊增益系数成反比,而 LP_{01}-LP_{01}模式的布里渊增益系数是大于 LP_{01}-LP_{11}和 LP_{11}-LP_{11}的,有效面积却最小,故 LP_{01}-LP_{01}的功率阈值是三种模式下最小的. 有效传输长度为 1 km 时,LP_{01}-LP_{01}、LP_{11}-LP_{11}及 LP_{01}-LP_{11}模式的功率阈值分别为 184 mW、278 mW 和 224 mW.

2.4　慢光时间延迟量

由图 5 可知少模光纤中不同传输模式在不同传输长度下的功率阈值,为满足 SBS 得发生条件,使输入泵浦功率高于受激布里渊散射阈值. 取光纤有效长度为 1 km,泵浦功率为 0.5 W,泵浦光波长为 1 550 nm. 各模式的慢光延迟量随泵浦功率和有效传输长度的变化如图 6.

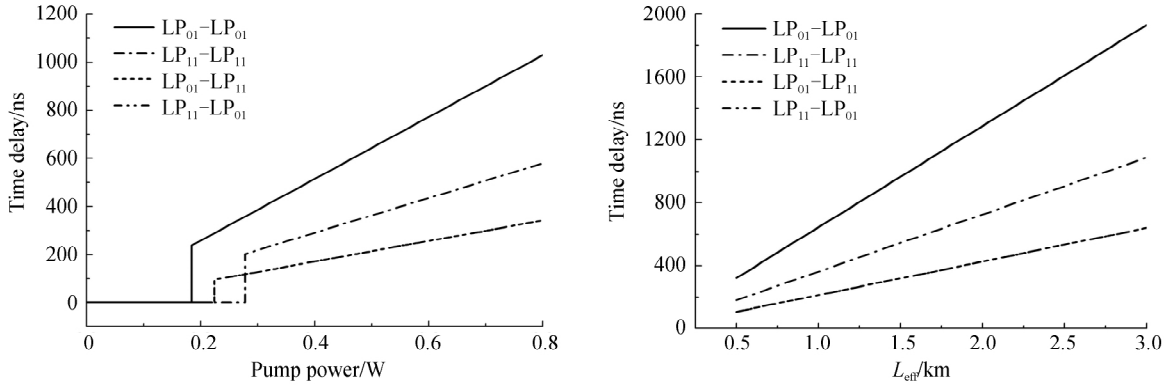

图 6　少模光纤中各模式的慢光时延量随参量的变化

Fig. 6　The effects of parameters on time delay of each mode in the FMF

由图可知各传输模式的慢光延迟量均随泵浦功率或光纤有效传输长度的增大而增大,在相同泵浦功率或有效传输长度下,模内 SBS 产生的慢光时间延迟量大于模间的,这是由于相同的泵浦功率下 LP_{01}-LP_{01}模式的布里渊增益最大;除此之外,LP_{01}-LP_{01}模式的有效模场面积较小,所以相同条件下 LP_{01}-LP_{01}模式下的时间延迟量最大. 图 6(a)是光纤有效长度为 1 km 时慢光延迟量随泵浦功率的变化,图中的转折点是不同传输模式对应达到的不同的布里渊功率阈值,由式(3)计算可得,LP_{01}-LP_{01}的布里渊阈值最小,LP_{11}-LP_{11}的最大,结果与 2.3 节一致. 可知,当泵浦功率大于功率阈值时,慢光延迟量随泵浦功率的增大而增大;但低于功率阈值无 SBS 发生,无慢光延迟量. 泵浦功率为 0.5 W 时,LP_{01}-LP_{01}、LP_{11}-LP_{11}及 LP_{01}-LP_{11}模式的时间延迟量分别为 643.7 ns、362.6 ns 和 213.2 ns. 图 6(b)是输入泵浦功率为 0.5 W 时,各模式的时间延迟量随光纤有效长度的变化,可知,时间延迟量随光纤有效长度的增加而增大;有效长度从 0.5 km 增加到3 km,LP_{01}-LP_{01}、LP_{11}-LP_{11}及 LP_{01}-LP_{11}模式的慢光延迟量分别从 321.9 ns、181.3 ns、106.6 ns 增大到 1 931.2 ns、1 087.8 ns、639.7 ns. 综上可知,要获得较大的延迟量,可以通过增大输入泵浦功率和有效传输长度的方式,但由于二者增大会使信号脉冲的展宽增大,所以还需考虑泵浦功率和有效长度对脉冲展宽因子的影响.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.5 脉冲展宽因子

脉冲展宽因子代表着信号波形的展宽程度，即波形的形变程度. 由式(8)可知，信号的脉冲展宽因子与模式的布里渊增益有关，也与输入泵浦功率和有效长度有关；除此之外，光脉冲信号的输入脉冲宽度也决定着信号的脉冲展宽因子. 图 7 为光纤有效传输长度为 1 km 时，不同泵浦功率和输入脉宽下的各传输模式的脉冲展宽因子.

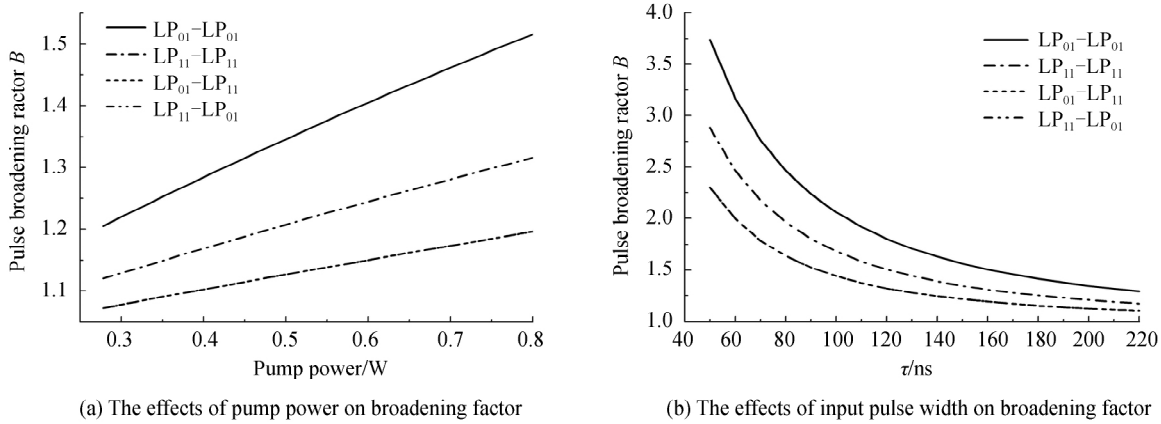

图 7 少模光纤中各模式的脉冲展宽因子随参量的变化

Fig. 7 The effects of parameters on pulse broadening factor of each mode in the FMF

图 7(a)为输入脉宽为 200 ns 时，各传输模式的展宽因子随泵浦功率的变化，可知，各模式的脉冲展宽因子均随泵浦功率的增大而增大，且在泵浦功率为 0.8 W 时达到最大，分别为 1.516、1.316 和 1.196. 输入泵浦功率相同时，LP_{01}-LP_{01} 的展宽因子最大，LP_{11}-LP_{11} 次之，LP_{01}-LP_{11} 的最小，这是因为相同条件下 LP_{01}-LP_{01} 模式的布里渊增益最大，而展宽因子与增益成正比，所以 LP_{01}-LP_{01} 模式的展宽因子最大. 图 7(b)为泵浦功率为 0.5 W 时，各模式的脉冲展宽因子随输入脉宽的变化，可知各模式的展宽因子均随输入脉宽的增大而减小，且在脉宽为 220 ns 时达到最小，分别为 1.292、1.174 和 1.106. 输入脉宽相同时，LP_{01}-LP_{01} 的展宽因子最大，LP_{11}-LP_{11} 次之，LP_{01}-LP_{11} 的最小，这是因为在输入泵浦功率和有效传输长度相同条件下，LP_{01}-LP_{01} 产生的布里渊增益最大，故其展宽因子最大. 综上，输入泵浦功率越大，或输入脉宽越小，脉冲展宽因子就越大，即信号形变越严重，故选择输入泵浦功率不能过大.

2.6 斯托克斯输出波形

由图 6、7 可知，少模光纤中各传输模式的延迟量和展宽程度不同. 为了获得尽量大的时间延迟量，减小脉冲展宽，选输入信号脉宽为 200 ns 的高斯分布信号脉冲，输入泵浦光功率为0.5 W，得到泵浦波长为 1 550 nm下少模光纤中各模式信号光的输出波形图如图 8.

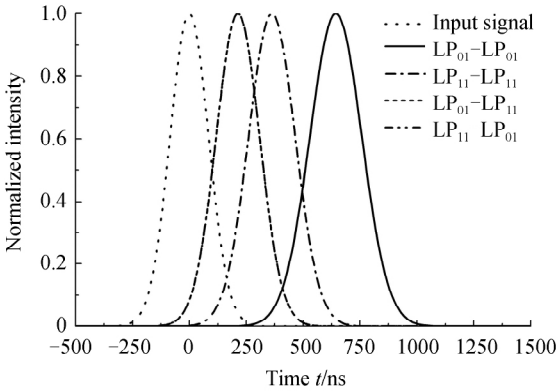

图 8 斯托克斯输出波形图

Fig. 8 Output wave of Stokes for different mode pairs

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

由图 8 可见，FMF 中各传输模式的延迟量及波形展宽程度，LP_{01}-LP_{01} 模式的时延量最大且展宽也最大，LP_{11}-LP_{11} 次之，LP_{01}-LP_{11} 模式的最小，这是因为相同条件下 LP_{01}-LP_{01} 模式的布里渊增益更大，而慢光延迟量和脉冲展宽因子都与增益成正比，故 LP_{01}-LP_{01} 模式的时延和展宽最大，结果表明慢光时延量增大的同时展宽因子也在随着慢慢增大，即慢光时延量的获得是以波形失真为代价的. 图中 LP_{01}-LP_{01}、LP_{11}-LP_{11} 和 LP_{01}-LP_{11} 模式的时间延迟量分别为 643.7 ns、362.6 ns 和 213.2 ns，三者对应的展宽因子分别为 1.346、1.207 和 1.126.

3 结论

本文对少模光纤中不同传输模式的 SBS 慢光特性进行了理论分析，并对不同传输模式的布里渊频移、布里渊增益谱、布里渊阈值、时间延迟量和脉冲展宽因子进行了数值模拟. 发现有效传输长度、输入泵浦功率对 FMF 中不同传输模式布里渊阈值、慢光延迟量及脉冲展宽因子的影响不同. 结果表明 FMF 中不同模式产生的 SBS 慢光特性不同，且模内 SBS 慢光时延量大于模间的. 有效传输长度、输入泵浦功率越大，慢光延迟量、脉冲展宽越大. 本文选择泵浦功率为 0.5 W，有效传输长度为 1 km，输入脉宽为 200 ns，使得各模式延迟量较大的同时有较小的脉冲展宽，且 LP_{01}-LP_{01}、LP_{11}-LP_{11} 和 LP_{01}-LP_{11} 模式的时间延迟量分别为 643.7 ns、362.6 ns 和 213.2 ns，三者的展宽因子分别为 1.346、1.207 和 1.126. 通过对少模光纤 SBS 慢光传输特性分析，得到了具有大传输容量、较大时延量及较小脉冲形变的少模光纤，该结果对设计慢光器件和提高传输容量具有理论指导作用.

参考文献

[1] SHIEH W, BAO H, TANG Y. Coherent optical OFDM: theory and design[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(2): 841-859.

[2] SHEN G, TUCKER R S. Energy-minimized design for IP over WDM networks[J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications & Networking*, 2009, **1**(1):176-186.

[3] NAKAZAWA M, HIROOK T, PENG R, *et al*. Ultrahigh-speed "orthogonal" TDM transmission with an optical Nyquist pulse train[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(2):1129-1140.

[4] RICHARDSON D J, FINI J M, NELSON L E. Space-division multiplexing in optical fibres[J]. *Nature Photonics*, 2013, **7**(5):354-362.

[5] VANUDEN R G H, CORREA R A, LOPEZ E A, *et al*. Ultra-high-density spatial division multiplexing with a few-mode multicore fibre[J]. *Nature Photonics*, 2014, **8**(11):865-870.

[6] HAU L V, HARRIS S E, DUTTON Z, *et al*. Light speed reduction to 17 metres per second in an ultra cold atomic gas [J]. *Nature*, 1999, **397**(6720):594-598.

[7] 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], *Physical Review Letters*, 1999, **82**(26):5229-5232.

[8] ZHANG J, HERNANDEZ G, ZHU Y. Slow light with cavity electromagnetically induced transparency[J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(1): 46-48.

[9] CHANG S W, KONDRATKO P K, SU H, *et al*. Slow light based on coherent population oscillation in quantum dots at room temperature[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2007, **43**(2):196-205.

[10] SHARPING J, OKAWACHI Y, GAETA A. Wide bandwidth slow light using a Raman fiber amplifier[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(16):6092-6098.

[11] IPPEN E P, STOLEN R H. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers[J]. *Applied Physics Letters*, 1972, **21**(11):539-541.

[12] SONG K Y, YONG H K. Characterization of stimulated Brillouin scattering in a few-mode fiber[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(22):4841-4844.

[13] SONG K Y, KIM Y H, KIM B Y. Intermodal stimulated Brillouin scattering in two-mode fibers[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(11):1805-1807.

[14] LI An, HU Qian, SHIEH W. Characterization of stimulated Brillouin scattering in a circular-core two-mode fiber using optical time-domain analysis[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(26):31894-31906.

[15] ZHANG Yan-jun, GAO Hao-lei, FU Xing-hu, *et al*. Characterization of Brillouin scattering in a few-mode fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, **66**(2): 024207.
张燕君，高浩雷，付兴虎，等. 少模光纤的不同模式布里渊散射特性[J]. 物理学报，2017，**66**(2)：024207.

[16] ZHU Zhao-ming, GAUTHIER D J, OKAWACHI Y, *et al*. Numerical study of all-optical slow-light delays via stimulated Brillouin scattering in an optical fiber[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2005, **22**(11):

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2378-2384.

[17] KE Wei-wei, WANG Xiao-jun, TANG Xuan. Stimulated Brillouin scattering model in multi-mode fiber lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, **20**(5):305-314.

[18] MINARDO A, BERNINI R, ZENI L. Experimental and numerical study on stimulated Brillouin scattering in a graded-index multimode fiber[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(14):17480-17489.

[19] OKAWACHI Y, BIGELOW M S, SHARPING J E, *et al*. Tunable all-optical delays via Brillouin slow light in an optical fiber[J]. *Physical Review Letters*, 2005, **94**(15):153902.

[20] AGRAWAL G P. Nonlinear Fiber Optics (Fifth Edition)[M]. New York: Elsevier, 2013.

[21] WARD B, MERMELSTEIN M. Modeling of inter-modal Brillouin gain in higher-order-mode fibers[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(3):1952-1958.

[22] HAN Jia-wei, ZHANG Jie. Design of cladding rods-assisted depressed-core few-mode fibers with improved modal spacing[J]. *Optical Fiber Technology*, 2018, **41**:131-138.

[23] LI An, WANG Yi-fei, HU Qian, *et al*. Few-mode fiber based optical sensors[J], *Optics Express*, 2015, **23**(2):1139-1150.

[24] CHERIF R, SALEM A B, SAINI T S, *et al*. Design of small core tellurite photonic crystal fiber for slow-light-based application using stimulated Brillouin scattering[J]. *Optical Engineering*, 2015, **54**(7):075101.

[25] CHENG Tong-lei, LIAO Mei-song, GAO Wei-qing, *et al*. Suppression of stimulated Brillouin scattering in all-solid chalcogenide-tellurite photonic bandgap fiber[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(27):28846-28854.

[26] XIA Cen, AMEZXUA-CORREA R, BAI Neng, *et al*. Hole-assisted few-mode multicore fiber for high-density space-division multiplexing[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(21):1914-1917.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61665005), the Provincial Natural Science Foundation of Gansu (Nos. 17JR5RA132, 17JR5RA119).

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net