

少模光纤受激布里渊散射效应理论研究

王旭^{1**}, 秦祖军^{1,2*}, 熊显名^{1,3}, 张文涛^{1,3}

¹ 桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林, 541004;

² 广西自动检测技术与仪器重点实验室, 广西 桂林, 541004;

³ 广西高校光电信息处理重点实验室, 广西 桂林, 541004

摘要 基于波动光学理论和单模光纤受激布里渊散射(SBS)的数学模型, 推导了少模阶跃折射率光纤中 SBS 时空演化耦合振幅方程。依据光波模式和声波模式模场空间分布, 计算出不同模式对的声光耦合系数, 进一步得到不同光波模式对组合的布里渊幅度增益谱和相移谱。结果表明: 参与 SBS 过程的声波主要为低阶声波模式; 对于 LP₀₁ 模和 LP₁₁ 模, 两者更倾向于模内的 SBS 过程, 且模内耦合产生的幅度增益以及相移更大; 布里渊频移随着光波模式阶数的增加而减小。

关键词 散射; 受激布里渊散射; 少模光纤; 布里渊增益谱; 布里渊相移谱

中图分类号 O437.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.162901

Stimulated Brillouin Scattering in Few-Mode Fiber

Wang Xu^{1**}, Qin Zujun^{1,2*}, Xiong Xianming^{1,3}, Zhang Wentao^{1,3}

¹ School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

² Guangxi Key Laboratory of Automatic Testing Technology and Instruments, Guilin, Guangxi 541004, China;

³ Key Laboratory of Photoelectric Information Processing in Guangxi Universities, Guilin, Guangxi 541004, China

Abstract Herein, numerical results for stimulated Brillouin scattering (SBS) in a step-index few-mode fiber are discussed based on the theory of wave optics and a mathematical model of SBS in a single-mode fiber. The acousto-optic coupling coefficient is calculated and a series of Brillouin gain spectra and phase shift spectra are presented according to the optical and acoustic mode profiles. Numerical results demonstrate that acoustic modes involved in the SBS process are primarily those with low mode orders. Compared to inter-mode SBS in LP₀₁ and LP₁₁ modes, intra-mode SBS is more critical, wherein the latter can obtain larger Brillouin gain and phase shift. In addition, the Brillouin frequency shift evidently decreases as the optical mode order increases.

Key words scattering; stimulated Brillouin scattering; few-mode fiber; Brillouin gain spectrum; Brillouin phase shift spectrum

OCIS codes 290.5900; 060.2310; 190.4370

1 引言

受激布里渊散射(SBS)是光纤内部的一种非线性效应, 被广泛应用于光放大、光纤传感器及波长转换等方面。当两束相向传播的光信号(一般为抽运光和信号光, 且抽运光频率高于信号光)的频率差处于布里渊增益谱范围内时, 这两束光波将通过由电

致伸缩效应产生的声波场产生 SBS 效应, 致使信号光幅度得到增益, 相位发生改变^[1]。为了更深入地了解 SBS 的特性, 布里渊增益谱和相移谱成为了研究热点。目前国内外对于 SBS 的研究主要基于单模光纤, 且理论模型已经相对成熟^[2-3], 但是有关基于少模光纤(FMF)的 SBS 效应研究报道还相对较少。模间四波混频(FWM)效应是目前基于少模光

收稿日期: 2018-12-25; 修回日期: 2019-01-22; 录用日期: 2019-03-14

基金项目: 国家自然科学基金(61665001)

* E-mail: qinzj@guet.edu.cn; ** E-mail: 632811603@qq.com

纤研究模式相关功能器件(如模式转换器)的一种重要的非线性物理过程,但是四波混频过程的效率受制于其相位失配因子,而SBS的相移特性可以用于补偿基于少模光纤四波混频非线性效应的相位失配^[4-6],因此对于少模光纤布里渊效应的研究具有重要的意义。

2013年Song等^[7]利用两模椭圆芯光纤成功观察到了SBS现象,并测得了不同抽运光-信号光模式对的布里渊幅度增益谱。同年他们又基于四模圆形芯光纤测得了模内和模间的布里渊增益谱^[8]。2014年Ke等^[9]通过一系列完整的数学模型推导出多模光纤布里渊幅度增益谱的数学模型,发现其主要取决于参与SBS效应的抽运光、信号光和声波三者的模场分布函数在光纤横截面的重叠积分,同时也计算出了不同模式间的布里渊增益谱。Minardo等^[10]基于渐变折射率多模光纤,并利用有限元分析法计算出三模耦合的布里渊增益系数矩阵,发现参与SBS过程的声波主要为低阶声波模式。2015年李永倩等^[11]基于射线光学波动光学理论推导了阶跃型以及渐变型多模光纤不同模式群的布里渊频移、线宽增益谱等,次年又在文献[12]中仿真分析了SBS损耗相移的功率依赖性,发现相移与斯托克斯光功率呈良好的线性关系,基本不受抽运光功率影响。2017年张燕君等^[13]分别从理论分析和实验验证得到了布里渊增益谱的频移、线宽、峰值增益等模型。但是目前对于少模光纤SBS相移谱的相关报道甚少。

在前人工作的前提下,基于单模光纤SBS的数学模型,推导出少模光纤SBS的耦合振幅方程,并依次提取出模间/模内SBS作用的幅度增益谱以及相移谱。本文选用两模阶跃光纤进行数值模拟分析计算,从波动光学理论出发,求解得到少模光纤不同光波模式对产生的各阶声波模式,并计算声光重叠积分,再数值求解耦合振幅方程,得到不同抽运光-信号光模式对的布里渊增益谱及其相移谱。

2 抽运光与信号光耦合振幅方程组分析

SBS过程在本质上为光纤中的光波与声波相互作用的结果,为了从理论上描述这一过程,则需要从SBS过程的动力学特性开始,并从光波和声波两个角度分析,最终得到不同模式间的光波和声波的时空演化耦合振幅方程。基于文献[3]单模光纤的推导过程,推导出少模光纤SBS耦合振幅方程,并进

一步求解模式间的布里渊增益谱及其相移谱。

光波是一种电磁波,可以由麦克斯韦方程组推导出的波动方程来求解。对于声波,则需要利用物质密度方程来描述^[1]。对于本文计算的少模光纤,假设光波的电场 \mathbf{E} 为

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_{k(p)} +$$

$$\mathbf{E}_{l(s)} = \frac{1}{2} [A_{k(p)} f_{k(p)} \exp[i(\beta_{k(p)} z - \omega_p t)] +$$

$$A_{l(s)} f_{l(s)} \exp[i(-\beta_{l(s)} z - \omega_s t)] + \text{c.c.}], \quad (1)$$

式中: $\mathbf{E}_{k(p)}$ 、 $\mathbf{E}_{l(s)}$ 分别为不同模式抽运光和信号光电场,下角标 p 和 s 分别表示抽运光和信号光; k 和 l 分别代表不同的光波模式; A 、 f 、 β 、 ω 分别为光波不同模式的复振幅、归一化空间模场分布函数、传播常数以及频率;c.c.为共轭项; i 为虚数单位; z 为光波的传播距离(抽运光沿 $+z$ 方向传播,信号光相反); t 为时间。

将光波电场 \mathbf{E} 分别代入光波波动方程以及声波物质密度方程,并采用慢包络近似处理,忽略光纤的损耗,最终分别得到不同模式抽运光和信号光的时空演化耦合振幅方程,即

$$\frac{\partial A_{k(p)}}{\partial z} + \frac{n_{k(p)}}{c} \frac{\partial A_{k(p)}}{\partial t} = \frac{i q^2 \omega_p \gamma_e^2}{8 n_{k(p)} c \rho_0} \iint \frac{(f_{k(p)}^* f_{l(s)} f_{u(a)} r dr d\varphi)^2}{\Omega_{k,l,u}^2 - \Omega^2 + i \Gamma_B \Omega} |A_{k(p)}|^2 |A_{l(s)}|^2, \quad (2)$$

$$-\frac{\partial A_{l(s)}}{\partial z} + \frac{n_{l(s)}}{c} \frac{\partial A_{l(s)}}{\partial t} = \frac{i q^2 \omega_s \gamma_e^2}{8 n_{l(s)} c \rho_0} \iint \frac{(f_{k(p)} f_{l(s)}^* f_{u(a)}^* r dr d\varphi)^2}{\Omega_{k,l,u}^2 - \Omega^2 + i \Gamma_B \Omega} |A_{k(p)}|^2 |A_{l(s)}|^2, \quad (3)$$

式中: r 、 φ 为光纤横截面的积分单位; A 为抽运光或信号光复振幅; f^* 为其模场分布函数的共轭; $n_{k(p)}$ 、 $n_{l(s)}$ 分别为不同模式抽运光信号光的有效模式折射率; γ_e 为材料电致伸缩常数; ρ_0 为材料的平均密度; c 为真空中光速; $\Omega_{k,l,u}$ 为不同光波模式 k 、 l 组合下不同声波模式 u 产生的布里渊频移;声波频率 $\Omega = \omega_p + \omega_s$; q 为声波的传播常数,其大小等于抽运光和信号光的传播常数之和; $\Gamma_B = q^2 \eta_{11} / \rho_0$ 为布里渊线宽, η_{11} 为材料的黏度。需要注意的是,等式右端的重叠积分项代表着声光耦合系数, $f_{u(a)}$ 为声波模式的归一化空间模场分布函数, u 为不同的声波模式。

(3)式的右端代表着SBS效应对介质总极化率的贡献^[1],可表示信号光的复数增益(复数增益因

子),表达式为

$$g_c(\delta) = \frac{q^2 \omega_s \gamma_c^2}{8n_{l(s)} c \rho_0} \cdot \iint (f_{k(p)} f_{l(s)}^* f_{u(a)}^* r dr d\varphi)^2 \frac{|A_{k(p)}|^2}{1 + i\delta^2}, \quad (4)$$

式中: $\delta = \frac{\Omega - \Omega_{k,l,u}}{\Gamma_B/2}$, 代表归一化的失谐参量, 这里作合理近似, $\Omega + \Omega_{k,l,u} \approx 2\Omega$; $|A_{k(p)}|^2$ 为抽运光功率。本文抽运光功率取 50 mW, 信号光功率取 10 mW。根据文献[14], 当信号光功率大于等于 8 mW 时, SBS 幅度谱增益峰值随抽运光功率增加的指数增长趋势逐渐变缓直至接近线性, 本研究不考虑 SBS 增益谱、相移谱的功率依赖性。

复数增益 g_c 的实数部分与信号光幅度增益相关, 虚数部分与信号光的相移有关。以抽运光与信号光的频率差值(即声波频率 $\Omega/2\pi$)为自变量, 可以得到模式间的布里渊增益谱以及相移谱。其中关键在于求解不同模式的布里渊频移 $\Omega_{k,l,u}$, 再依据抽运光、信号光和声波的模场分布函数 $f_{k(p)}$ 、 $f_{l(s)}$ 和 $f_{u(a)}$, 进一步得到不同模式间的声光耦合系数。

3 布里渊增益谱和相移谱分析

不同抽运光-信号光模式对的布里渊增益谱以及相移谱计算过程可以分为三步。1) 计算不同模式光波和声波的归一化空间模场分布函数; 2) 根据模场分布函数求解不同抽运光-信号光模式对与不同声波模式的归一化声光耦合系数; 3) 计算少模光纤不同光波模式对的布里渊增益谱和相移谱。

3.1 光波模式与声波模式

本文采用两模阶跃折射率光纤, 光纤各结构参数如表 1 所示。抽运光波长为 1550 nm, 计算光纤的归一化频率 $V \approx 3.6493$, 允许传输两个模式: LP₀₁ 模和 LP₁₁ 模。用经典的贝塞尔函数可以求解光波波动方程, 并得到两个光波模式的归一化空间模场分布。

针对不同光波模式对产生的声波模式, 求解过程复杂得多, 需要求解模式方程^[15]

$$\nabla_{\perp}^2 f_a(r, \varphi) + \left[\frac{\Omega_{k,l,u}^2}{v_{1,2}^2} - q^2 \right] f_a(r, \varphi) = 0, \quad (5)$$

式中: ∇_{\perp}^2 为横向拉普拉斯算子; $f_a(r, \varphi)$ 为声波模式的归一化空间模场分布函数; $\Omega_{k,l,u}$ 为 k, l 光波模式组合下第 u 阶声波模式的本征频率, 即布里渊频移; $v_{1,2}$ 分别为声波在纤芯和包层的传播速度, 具体数值如表 1 所示。

表 1 两模阶跃折射率光纤各参数

Table 1 Parameters for two-mode step-index fiber

Parameter	Value
Core diameter / μm	11.9
Cladding diameter / μm	109.0
Refractive index n_{co} (core)	1.4519
Refractive index n_{cl} (cladding)	1.4440
Effective refractive index (LP ₀₁)	1.4498
Effective refractive index (LP ₁₁)	1.4468
Effective area (LP ₀₁) / μm^2	94.7
Effective area (LP ₁₁) / μm^2	99.9
Shear modulus μ_1 (core) / GPa	25.0
Shear modulus μ_2 (cladding) / GPa	0.8
Acoustic velocity v_1 (core) / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	5690
Acoustic velocity v_2 (cladding) / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	5944
Material mean density ρ_0 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2210
Material electrostriction constant γ_c	0.902

求解(5)式的关键在于求解 $\Omega_{k,l,u}$ 的值, 对于不同的光波模式, 其传播常数也不同, 因此不同的抽运光-信号光模式对导致声波的传播常数 q 不同, 对应不同的声波模式以及场分布。本文计算的光波模式包含 LP₀₁ 模和 LP₁₁ 模, 不同抽运光-信号光模式对的声波传播常数 q 值如表 2 所示。

表 2 不同抽运光-信号光模式对的 q 值

Table 2 q value of different pump-signal mode pairs

Pump-signal mode pair	Acoustic propagation constant / (10^6 m^{-1})
LP ₀₁ -LP ₀₁	11.754
LP ₀₁ -LP ₁₁	11.742
LP ₁₁ -LP ₀₁	11.742
LP ₁₁ -LP ₁₁	11.730

对于确定的抽运光-信号光模式对, $\Omega_{k,l,u}$ 满足^[15]

$$\frac{\mu_1 k_1 a J'_m(k_1 a)}{J'_m(k_1 a)} = \frac{\mu_2 k_2 a H_m^{(1)'}(k_2 a)}{H_m^{(1)}(k_2 a)}, \quad (6)$$

式中: a 为纤芯半径; μ_1, μ_2 分别为纤芯和包层的剪切模量, 具体数值如表 1 所示; $J_m, H_m^{(1)}$ 分别为第一类贝塞尔函数以及第一类汉克尔函数, m 为阶数; k_1, k_2 为声波波数, 且 $k_1 = \sqrt{\Omega^2/v_1^2 - q^2}$, $k_2 = \sqrt{q^2 - \Omega^2/v_2^2}$ 。需要注意的是, 本文只考虑光纤内导波声波模式, 忽略自由声波模式以及泄漏声波模式, 所以声波频率在 $v_1 q \leq \Omega \leq v_2 q$ 范围之内。

至此通过 q 值来计算声波的本征频率 $\Omega_{k,l,u}$, 得到声波波数 k_1, k_2 的值, 计算出每一阶声波模式 L_{mn} 的归一化空间模场分布函数 $f_a(r, \varphi)$, 声波模式的分析过程类似于光波。

3.2 不同光波模式对的声光耦合系数及布里渊增益谱

单模光纤耦合系数在文献[1]中定义为声光交叠因子,即“光波-声波-光波”三波模场分布函数重叠积分的平方,单模光纤中抽运光和信号光模场分布近似相同。对于本文计算的少模光纤,对计算得到的声光耦合系数 $\iint (f_{k(p)} f_{l(s)}^* f_{u(a)}^*) r dr d\varphi$ 作归一化处理,结果如图 1(a)、图 2(a)、图 3(a)和图 4(a)所示。需要注意的是,LP₁₁ 模有两种简并模式,LP_{11a}和 LP_{11b} (cosine 和 sine),因此需要考虑相同简并态以及不同简并态之间的耦合系数(平行耦合和垂直耦合),分别为 LP_{11a}-LP_{11a}和 LP_{11a}-LP_{11b} (LP_{11b}-LP_{11b}同 LP_{11a}-LP_{11a},为平行耦合),对应 LP₁₁ 模的模内 SBS 增益谱也有这两种形式。

(4)式代表某一阶声波模式 u 对 SBS 增益谱的

贡献,取其实部并对所有参与 SBS 效应的声波模式的增益求和,得到 k, l 光波模式组合下总的 SBS 增益谱的数学模型,即

$$G_{k,l}(\nu) = g_{k,l,u} \sum_u \iint (f_{k(p)} f_{l(s)}^* f_{u(a)}^*) r dr d\varphi)^2 \cdot \frac{(\Gamma'_B/2)^2}{(\nu - \nu_{k,l,u})^2 + (\Gamma'_B/2)^2}, \quad (7)$$

式中: $\nu = \Omega/2\pi$; $\nu_{k,l,u} = \Omega_{k,l,u}/2\pi$; $\Gamma'_B = \Gamma_B/2\pi$ 。(7)式可以看出总的 SBS 增益谱为一系列洛伦兹线型分布的线性叠加,式中 $g_{k,l,u}$ 为每一阶声波模式与抽运光-信号光模式组合产生的峰值增益系数,为简化计算,本文取其典型值 $g_{k,l,u} \approx 4 \times 10^{-11}$ m/W,每一阶声波模式产生的增益谱线宽 $\Gamma_B/2\pi \approx 32$ MHz。依据上述数学模型,计算出不同光波模式组合的 SBS 增益谱,分别如图 1(b)、图 2(b)、图 3(b)和图 4(b)所示。

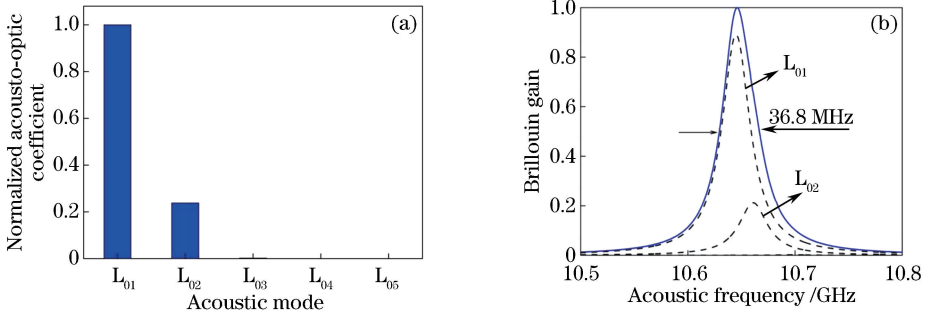


图 1 LP₀₁-LP₀₁ 模式对的声光耦合系数与增益谱。(a)归一化声光耦合系数;(b) SBS 增益谱

Fig. 1 Acousto-optic coefficients and Brillouin gain spectra of LP₀₁-LP₀₁ mode pair.

(a) Normalized acousto-optic coefficients; (b) Brillouin gain spectra

从图 1(a)可以看出,对于 LP₀₁-LP₀₁ 模式对,参与 SBS 的声波只有轴对称声波模式 L_{mm} ($m=0$),且主要为声波基模 L_{01} 和次高阶模 L_{02} 模,前两阶声波模式所占比重超过 99%,因此其余参与 SBS 效应的更高阶

声波模式可以忽略不计。图 1(b)实线为总的布里渊增益谱,虚线分别为前两阶轴对称声波模式对总的增益谱产生的贡献。此外总的 SBS 增益谱基本满足洛伦兹线型,增益谱线宽约为 36.8 MHz。

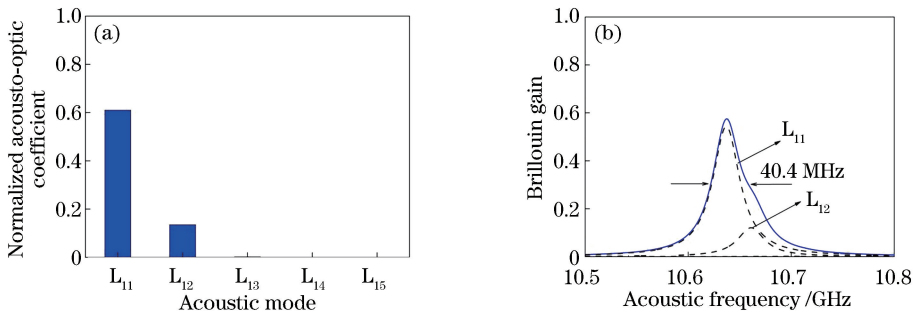


图 2 LP₀₁-LP₁₁ 模式对的声光耦合系数与增益谱。(a)归一化声光耦合系数;(b) SBS 增益谱

Fig. 2 Acousto-optic coefficients and Brillouin gain spectra of LP₀₁-LP₁₁ mode pair.

(a) Normalized acousto-optic coefficients; (b) Brillouin gain spectra

对于 LP₀₁-LP₁₁ 模式对,从图 2(a)可以看出,主要参与 SBS 作用的声波模式主要集中在前两个模

式[即声波 L_{11} 模和 L_{12} 模,其方位角系数(即 m 的值)均为 1],其余的高阶模系数可忽略。图 2(b)实

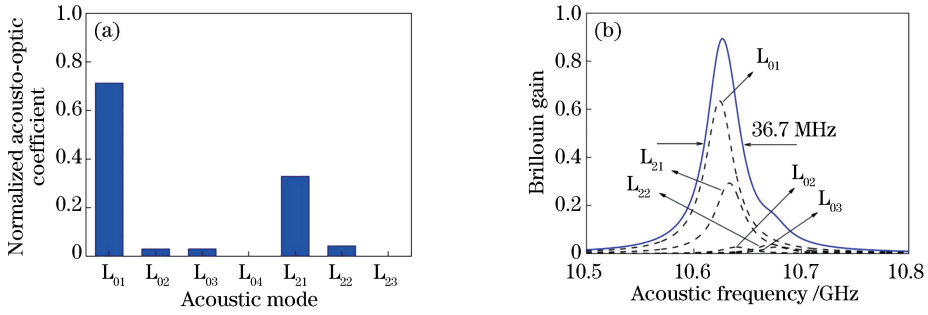


图3 LP_{11a}-LP_{11a}模式对的声光耦合系数与增益谱。(a)归一化声光耦合系数;(b)SBS增益谱

Fig. 3 Acousto-optic coefficients and Brillouin gain spectra of LP_{11a}-LP_{11a} mode pair.

(a) Normalized acousto-optic coefficients; (b) Brillouin gain spectra

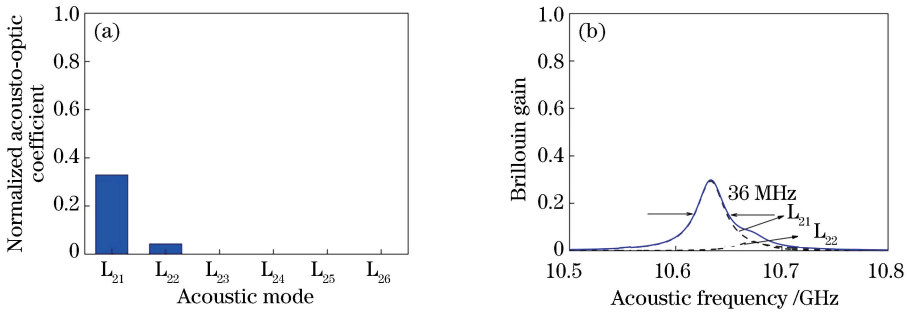


图4 LP_{11a}-LP_{11b}模式对的声光耦合系数与增益谱。(a)归一化声光耦合系数;(b)SBS增益谱

Fig. 4 Acousto-optic coefficients and Brillouin gain spectra of LP_{11a}-LP_{11b} mode pair.

(a) Normalized acousto-optic coefficients; (b) Brillouin gain spectra

线为总的布里渊增益谱,虚线分别为 L_{11} 和 L_{12} 声波模式对总的SBS增益谱产生的贡献。且可以从图2中看出 L_{12} 声波模式造成了总的增益谱左右不对称,不再完全满足洛伦兹线型分布,增益谱线宽约为40.4 MHz。需要注意的是,由于LP₀₁-LP₁₁与LP₁₁-LP₀₁两对模式组合参加SBS过程的声波传播常数 q 值相同,因此其产生的声波模场分布也相同。在这里本文只考虑前者,后者耦合系数及增益谱均与前者大致相同。

LP₁₁-LP₁₁模式对有两种耦合方式:图(3)平行耦合(LP_{11a}-LP_{11a})以及图(4)垂直耦合(LP_{11a}-LP_{11b})。

从图3(a)可以看出,对于平行耦合方式,参与SBS的声波模式不再是单一的方位角系数,其中基模 L_{01} 模所占比重最大,其次是 L_{21} 模、轴对称声波模式 L_{02} 模,而 L_{03} 模与 L_{22} 模具有较小的耦合系数且比例相当,其余的声波模式均可合理忽略。图3(b)实线为平行耦合下总的布里渊增益谱,虚线为各阶声波模式对总的增益谱产生的贡献。总的SBS增益谱大致满足洛伦兹线型分布,但一些高阶声波模式造成了增益谱左右不对称,增益谱线宽约为36.7 MHz。

从图4(a)看出,对于垂直耦合方式,上述的轴

对称声波模式(L_{0n})耦合系数被忽略,高阶声波模式对增益谱有显著贡献。图4(b)实线为垂直耦合下总的布里渊增益谱,虚线为各阶声波模式对总的增益谱产生的贡献。总的SBS增益谱大致满足洛伦兹线型分布,但一些高阶声波模式造成了增益谱左右不对称现象,增益谱线宽约为36 MHz。

对比图1(b)、图2(b)、图3(b)和图4(b),可以明显看出LP₀₁-LP₀₁抽运光-信号光模式对组合具有最大的增益峰值;LP_{11a}-LP_{11a}模式对次之;LP₀₁-LP₁₁模式对较小;LP_{11a}-LP_{11b}模式对最小。说明LP₀₁模与LP₁₁模更趋向于模内SBS过程,但LP₁₁模式的模内SBS效应主要为平行耦合,且垂直耦合耦合效率显著低于平行耦合。在光纤内与抽运光、信号光作用的声波模式主要为基模和低阶模,高阶声波模式虽然也参与SBS过程,但其作用可忽略。

3.3 模式间的相移谱

根据(4)式,取其虚部并对所有的声波模式产生的相移求和,得到总的SBS相移谱数学模型为

$$\varphi_{k,l}(\nu) = g_{k,l,u} \sum_u \iint (f_{k(p)} f_{l(s)}^* f_{u(a)}^* r dr d\varphi)^2 \cdot \frac{(\nu - \nu_{k,l,u})(\Gamma'_B/2)}{(\nu - \nu_{k,l,u})^2 + (\Gamma'_B/2)^2} \quad (8)$$

结合 3.2 节计算出的模式间声光耦合系数,利用 SBS 相移谱的数学模型(7)式,得到不同抽运光-信号光模式对相移谱,结果如图 5 所示。

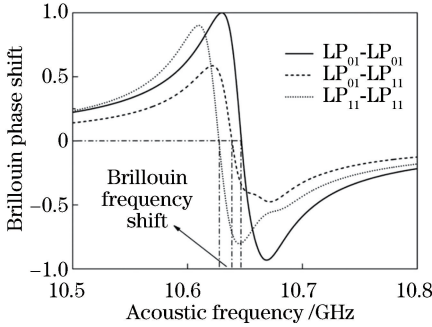


图 5 不同模式对的布里渊相移谱

Fig. 5 Brillouin phase shift spectra of different pump-signal mode pairs

从图中可以看出各个模式间的相移谱在其各自布里渊增益谱的左右半峰全宽处各取得最大值和最小值;其次在布里渊频移处。三对光波模式组合的相移均为 0,说明 SBS 过程是一个相位能够自匹配的非线性效应,且无论对于模内 SBS 还是模间 SBS 过程,布里渊频移随着光波模式阶数的增加而减少;对于不同模式对的相移,LP₀₁-LP₀₁ 模式对能够产生的最大相移在三者之中最大,LP₁₁-LP₁₁ 模式对次之,LP₀₁-LP₁₁ 模式对最小,结果与幅度增益类似。从图中分析可知,通过改变信号光的频率,产生不同的抽运光-信号光频率差,可以得到不同的相位改变,因此可以利用 SBS 相移来控制不同模式间 FWM 非线性过程的相位匹配。

3.4 SBS 相移补偿 FWM 设想

FWM 作为另一种非线性效应,其效应高度依赖于相位匹配条件^[1]。基于 SBS 相移补偿的原理是

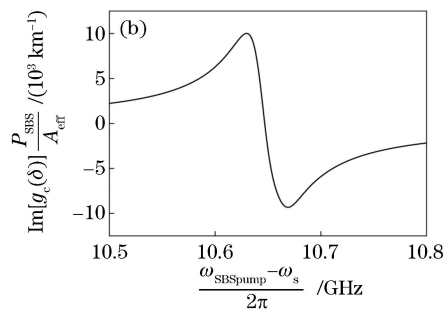
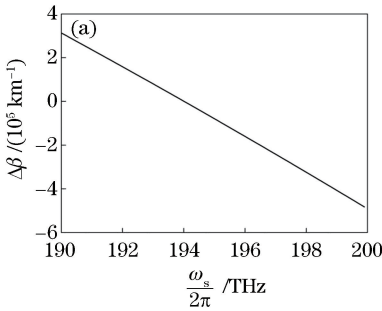


图 7 模间 FWM 相位失配因子和对应 SBS 相移特性对信号光的补偿。(a) $\Delta\beta$ 随信号光的频率变化; (b) SBS 相移产生的补偿随抽运-信号光频率差的关系

Fig. 7 Inter-mode FWM phase mismatch factor and corresponding compensation induced by SBS phase shift.

(a) $\Delta\beta$ versus signal frequency; (b) compensation induced by SBS phase shift versus pump-signal frequency difference

对于 SBS 相移补偿项,若以 LP₀₁-LP₀₁ 模式对

利用 SBS 效应中抽运光对于信号光的相位调制来改变 FWM 过程信号光的相位,从而改变其相位失配因子 κ ,原理如图 6 所示。

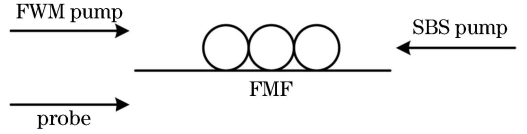


图 6 SBS 抽运光调制 FWM 信号光相位示意图

Fig. 6 Schematic of FWM signal phase modulation induced by SBS pump

忽略非线性相位失配对 FWM 的影响,相位失配因子可表示为^[4-6]

$$\kappa = \Delta\beta - | \text{Im}[g_c(\delta)] \frac{P_{\text{SBS}}}{A_{\text{eff}}} |, \quad (9)$$

式中: P_{SBS} 为布里渊抽运光功率; A_{eff} 为有效模式面积; g_c 为布里渊复数增益因子; $\Delta\beta$ 为线性失配因子,其大小与 FWM 过程抽运光与信号光的频率差及光纤的色散参数相关(具体参数参考文献[16])。对于少模光纤模间 FWM,若采用文献[16]中的第二种 FWM 过程,则 $\Delta\beta$ 可以表示为(忽略三阶及以上的色散项,且将各个入射光波的偏振态视作相同,不考虑模间偏振效应的影响)

$$\Delta\beta = (\omega_{p2} - \omega_s)(\beta_1^{01} - \beta_1^{11} + \frac{\omega_{p2} - \omega_s}{2}\beta_2^{01} - \frac{\omega_{p1} - \omega_s + \omega_i - \omega_s}{2}\beta_2^{11}), \quad (10)$$

式中: ω_{p1} 、 ω_{p2} 、 ω_s 、 ω_i 分别为 FWM 过程的抽运光 1、2,信号光和闲频光的频率; β_1^{01} 、 β_1^{11} 、 β_2^{01} 、 β_2^{11} 分别为 LP₀₁、LP₁₁ 模式的一阶和二阶色散参数。在 ω_{p1} 、 ω_{p2} 确定的前提下, $\Delta\beta$ 随信号光频率 ω_s 变化结果如图 7 (a) 所示。

变化如图 7(b) 所示 (ω_{SBSump} 为 SBS 抽运光频率)。由图可知, SBS 产生的补偿在数量级上完全可以实现对于 $\Delta\beta$ 的补偿, 通过控制 SBS 抽运光与 FWM 信号光的频率差调制信号光相位, 可以实现对 FWM 相位匹配条件的控制。

4 结 论

建立少模光纤 SBS 效应仿真模型, 忽略光纤的损耗及 SBS 效应对光功率依赖性, 推导出基于少模光纤受激布里渊散射耦合振幅方程组, 得到了不同模式间的 SBS 增益谱以及相移谱。结果表明, 在只考虑光纤中导向声波模式的前提下, 参与 SBS 过程的声波模式主要为基模以及一些低阶模; 对于 LP_{01} 模和 LP_{11} 模, 这两种模式更倾向于模内耦合, 且其模内受激布里渊散射无论是幅度增益还是相移都要高于模间受激布里渊散射; 随着光波模式阶数的增加, 布里渊频移减小; 分析发现, 不同模式的布里渊相移可以用于补偿模式间 FWM 非线性作用的相位失配, 为提高基于相位匹配机理的少模光纤非线性过程效率提供了一定的参考。

参 考 文 献

- [1] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics [M]. 5th ed. Cambridge, Massachusetts: Academic Press, 2013: 353-456.
- [2] Zhang C, Yu W F, Li Z L, *et al.* Numerical study on scattering properties for the stimulated Brillouin scattering fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35 (3): 0319005.
张聪, 余文峰, 李正林, 等. 光纤受激布里渊散射的散射特性数值研究 [J]. 光学学报, 2015, 35 (3): 0319005.
- [3] Kobaykov A, Sauer M, Chowdhury D. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers [J]. Advances in Optics and Photonics, 2010, 2(1): 1-59.
- [4] Huang C R, Guo X J, Fu X L, *et al.* Active control of gain saturation in fiber-optical parametric amplifier using stimulated Brillouin scattering [J]. Optics Letters, 2014, 39(19): 5713-5716.
- [5] Mateo E, Yaman F, Li G F. Control of four-wave mixing phase-matching condition using the Brillouin slow-light effect in fibers [J]. Optics Letters, 2008, 33(5): 488-490.
- [6] Wang L, Shu C. Dynamic control of phase matching in four-wave mixing wavelength conversion of amplitude- and phase-modulated signals [J]. Journal

- of Lightwave Technology, 2013, 31(9): 1468-1474.
- [7] 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.
 - [8] Song K Y, Kim Y H. Characterization of stimulated Brillouin scattering in a few-mode fiber [J]. Optics Letters, 2013, 38(22): 4841-4844.
 - [9] Ke W W, Wang X J, Tang X. Stimulated Brillouin scattering model in multi-mode fiber lasers [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 0901610.
 - [10] 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.
 - [11] Li Y Q, Zhao X, Zhao L J, *et al.* Brillouin scattering parameters of different modes in multimode optical fibers [J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44 (3): 0319002.
李永倩, 赵旭, 赵丽娟, 等. 多模光纤不同模式布里渊散射参数 [J]. 光子学报, 2015, 44(3): 0319002.
 - [12] Li Y Q, An Q, He Y J, *et al.* Theoretical and experimental study of power dependence of stimulated Brillouin scattering phase shift [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0906001.
李永倩, 安琪, 何玉钧, 等. 受激布里渊相移功率依赖性理论与实验研究 [J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0906001.
 - [13] Zhang Y J, Gao H L, Fu X H, *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.
 - [14] An Q. Theoretical and experimental research on the characteristics and applications of vector stimulated Brillouin scattering [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
安琪. 矢量受激布里渊散射特性及其应用的理论与实验研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
 - [15] Poulton C G, Pant R, Eggleton B J. Acoustic confinement and stimulated Brillouin scattering in integrated optical waveguides [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2013, 30(10): 2657-2664.
 - [16] Xiao Y Z, Essiambre R J, Desgroseilliers M, *et al.* Theory of intermodal four-wave mixing with random linear mode coupling in few-mode fibers [J]. Optics Express, 2014, 22(26): 32039-32059.