

# 光纤受激布里渊增益谱线型特性分析

刘加庆<sup>1,2</sup>, 韩顺利<sup>1,2</sup>, 刘磊<sup>1</sup>, 刘雷<sup>1</sup>, 张爱国<sup>1</sup>

1. 中电科仪器仪表有限公司, 山东 青岛 266555

2. 中国电子科技集团公司第四十一研究所电子测试技术重点实验室, 山东 青岛 266555

**摘要** 光纤受激布里渊效应是一种非常重要的光纤非线性效应, 受激布里渊增益谱的线型特性, 对于光谱分析、微波光子学、光纤传感等领域的应用, 至关重要。针对增益谱线型特性研究, 现有方法难以获取高信噪比的增益谱数据, 介绍了一种采用两个窄线宽激光器的增益谱测量方法, 其中一个激光器作为探针信号, 另一个可调谐激光器作为泵浦信号在宽波段范围内进行推扫。得益于激光器的高信噪比单谱线特性, 并利用偏振跟随特性, 实现了高信噪比的受激布里渊增益谱测量。测量并分析了不同泵浦功率, 对于谱型和线宽等受激布里渊增益特性的影响, 特别是, 直接实验测量了增益谱型从洛伦兹线型到高斯线型的演化, 揭示了泵浦功率等影响受激布里渊增益水平的因素, 对于增益谱线型的影响。实验发现, 当泵浦功率超过 15 dBm 时, 增益谱出现饱和效应, 导致测量增益谱线宽开始随泵浦功率提高而展宽, 难以直接测量得到高泵浦功率时的高斯线型的增益谱。提出通过归一化等校正处理, 以获取受激布里渊增益谱与待测信号光谱的有效卷积信息, 从而得到了近似为高斯线型的增益谱型; 针对中间增益区域增益谱型较为复杂, 缺少合适增益谱线型演化数学模型的难题, 给出了一种基于  $k$  次洛伦兹函数拟合的谱型模型, 描述从洛伦兹线型到高斯线型的完整演进过程。实验表明拟合效果良好, 是一种行之有效的受激布里渊增益谱线型数学模型, 可完整描述增益谱在不同增益时的线型。最后, 探索了受激布里渊效应在光谱分析方面的应用, 通过合理选择泵浦功率等手段, 增益谱型为高斯线型时的光谱分光效果最佳, 获取了 0.2 pm 分辨率的 6314CA 稳定光源的光谱, 显示了光纤受激布里渊效应在超高分辨率光谱分析领域的巨大技术优势, 而这对于新一代光网络的验证评估至关重要。

**关键词** 受激布里渊增益谱; 线型特性; 谱型演化; 泵浦功率; 光谱分析

**中图分类号:** O433.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)07-2307-06

## 引言

虽然受激布里渊效应对光通信系统是一个不希望的存在, 但它的应用价值, 早已被国内外研究学者所熟知, 已被应用于光纤传感、光存储、微波光子学、光谱分析、计量等领域<sup>[1-6]</sup>。

最初, 认为单模光纤的受激布里渊增益谱为洛伦兹线型。后来, Boyd 等<sup>[7]</sup>提出的分布波动源模型表明, 增益谱具有更为复杂的谱型, 并且具有很强的偏振相关特性。具体来说, 就是低增益时类似洛伦兹线型, 高增益时变为高斯线型, 中间增益时则有更为复杂的谱型。因此, 精确测量并分

析受激布里渊增益谱的功率相关特性及相应的线型, 不管对于光纤通信等需要抑制受激布里渊效应的场合, 还是光学滤波、光纤传感等应用场合都至关重要。常用的受激布里渊增益谱测量方法, 如法布里-珀罗干涉仪法、边缘测量法、自外差法、泵浦-探针法等<sup>[8-11]</sup>, 都存在一定的局限性, 难以实现高信噪比的测量, 这就使得区分洛伦兹和高斯谱型变得不可能。本文提出采用高信噪比的双窄线宽激光作为泵浦和探针信号, 并利用受激布里渊效应的偏振跟随特性消除杂散信号等的影响, 实现了增益谱的高信噪比测量和分析。本文还给出采用  $k$  次洛伦兹函数拟合的谱型模型, 用于描述受激布里渊增益谱型的演化过程, 实验结果表明, 具有很高的拟合精度。

收稿日期: 2019-06-25, 修订日期: 2019-10-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFF0106900), 国家自然科学基金项目(61727821), 电子测试技术重点实验室稳定经费支持计划项目(JCKY2019XXXXC038), 预研基金项目(JZX7Y2019XXXXX01)资助

作者简介: 刘加庆, 1986 年生, 中电科仪器仪表有限公司高级工程师 e-mail: jiaqing@mail.ustc.edu.cn

## 1 基本原理

### 1.1 光纤受激布里渊效应的基本描述

光纤中产生的受激布里渊过程, 可用式(1)~式(3)进行描述<sup>[12-13]</sup>

$$\frac{dI_p(z, \lambda)}{dz} = -\alpha I_p(z, \lambda) - \frac{g_B}{A_{\text{eff}}} I_s(z, \lambda) I_p(z, \lambda) - I_{\text{esp}}(z, \lambda) \quad (1)$$

$$\frac{dI_s(z, \lambda)}{dz} = \alpha I_s(z, \lambda) - \frac{g_B}{A_{\text{eff}}} I_s(z, \lambda) I_p(z, \lambda) - I_{\text{esp}}(z, \lambda) \quad (2)$$

$$\frac{dI_B(z, \lambda)}{dz} = \frac{g_B \left( \lambda - \frac{2\pi}{\Omega_B} \right)}{A_{\text{eff}}} I_p(z, \lambda) I_s \left( z, \frac{2\pi}{\Omega_B} \right) \quad (3)$$

式中,  $I_p$ ,  $I_s$  和  $I_B$  分别为泵浦信号、待测信号和斯托克斯后向散射信号,  $A_{\text{eff}}$  和  $\alpha$  分别为单模光纤的有效面积和衰减系数,  $I_{\text{esp}}$  为由热波动引起的分布自发布里渊散射信号,  $\Omega_B$  和  $g_B$  分别为受激布里渊频移和增益。

### 1.2 基于双窄线宽激光的受激布里渊增益谱测量方法

低增益时的受激布里渊增益谱型可用洛伦兹线型表示为

$$g_B(\delta\nu') = g_0 \frac{(\Delta\nu_B/2)^2}{(\delta\nu')^2 + (\Delta\nu_B/2)^2} \quad (4)$$

高增益时的受激布里渊增益谱型可用高斯线型表示为<sup>[14]</sup>

$$g_B(\delta\nu') = g_0 \exp \left[ -\ln 2 \left( \frac{\delta\nu'}{(\Delta\nu_B/2)^2} \right)^2 \right] \quad (5)$$

式中,  $\delta\nu' = \nu - \nu_p - \nu_D$ ,  $\nu_p$  为泵浦频率,  $\nu_D = \Omega_B/2\pi$  为多普勒频移,  $\Delta\nu_B$  为受激布里渊增益谱宽,  $g_0$  为谱峰增益。

由理论分析可知, 随着增益提高, 增益谱型由洛伦兹线型演进为高斯线型, 增益中间区域则是较为复杂的谱型。针对这一情况, 并注意到从洛伦兹线型到高斯线型的演进, 本文提出对归一化受激布里渊增益谱, 采用  $k$  次洛伦兹函数拟合的方法, 来描述增益型的演进过程, 特别是中间增益区域的增益谱型, 如式(6)

$$g_B(\delta\nu') = \left[ \left( \frac{\Delta\nu_B}{2\sqrt{2^{1/k}-1}} \right)^2 \left/ \left\{ \left( \frac{\Delta\nu_B}{2\sqrt{2^{1/k}-1}} \right)^2 + (\delta\nu')^2 \right\} \right]^k \quad (6)$$

当  $k$  为 1 时, 为常规洛伦兹函数, 对于更高  $k$  值时, 则

趋近于高斯函数。

$$g_B(\delta\nu') = \lim_{k \rightarrow \infty} \left[ \left( \frac{\Delta\nu_B}{2\sqrt{2^{1/k}-1}} \right)^2 \left/ \left\{ \left( \frac{\Delta\nu_B}{2\sqrt{2^{1/k}-1}} \right)^2 + (\delta\nu')^2 \right\} \right]^k = \exp \left[ -\ln 2 \left( \frac{\delta\nu'}{(\Delta\nu_B/2)^2} \right)^2 \right] \quad (7)$$

两个窄线宽激光分别作为泵浦信号和待测信号, 在光纤中相向传播发生受激布里渊效应, 产生并被探测器接收的后向斯托克斯散射信号  $P_{\text{det}}(\nu_s, \nu_p, \nu_D)$ , 可由式(8)给出

$$P_{\text{det}}(\nu_s, \nu_p, \nu_D) = \int g_B(\nu - \nu_p - \nu_D) P_s(\nu) d\nu \quad (8)$$

测量得到的信号  $P_{\text{det}}(\nu_s, \nu_p, \nu_D)$ , 实际上为受激布里渊增益谱与待测信号  $P_s$  的卷积, 并且存在频移, 整理式(8)可得

$$P_{\text{det}}(\nu_s, \nu_p, \nu_D) = \{g_B * P_s\}(\nu_p + \nu_D) \quad (9)$$

由于受激布里渊增益谱宽大致为 10~30 MHz, 目前商用窄线宽激光器的典型线宽, 通常在 100 kHz 以下, 即待测信号谱宽比受激布里渊增益谱宽, 窄两个数量级以上, 待测信号用  $\delta$  函数  $P_0 \cdot \delta(\nu - \nu_s)$  表示, 式(9)变为

$$P_{\text{det}}(\nu_s, \nu_p, \nu_D) = P_0 \cdot g_B(\nu - \nu_p - \nu_D) \quad (10)$$

通过连续改变泵浦信号波长, 能够直接测量得到受激布里渊增益谱  $g_B(\delta\nu')$ 。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 装置

基于双窄线宽激光的受激布里渊增益谱测量装置, 如图 1 所示, Keysight 公司的 81606A 可调谐激光器的输出光, 经掺铒光纤放大器, 产生不同功率水平的泵浦信号, 注入 3 km 长的标准单模光纤, 用作泵浦信号, 典型线宽为 10 kHz; Optilab 公司的 DFB-1550 激光器输出固定波长的光, 从另一端注入单模光纤, 作为待测光, 典型线宽为 5 kHz。泵浦信号和待测信号间的波长差连续变化时, 产生的后向散射信号, 经探测与数据获取模块产生的采样数据, 被送到计算机进行后续处理。为改善测量信噪比, 利用偏振跟随特性, 采用检偏器实现受激布里渊后向散射信号的高精度提取, 可有效剔除杂散信号等的影响。

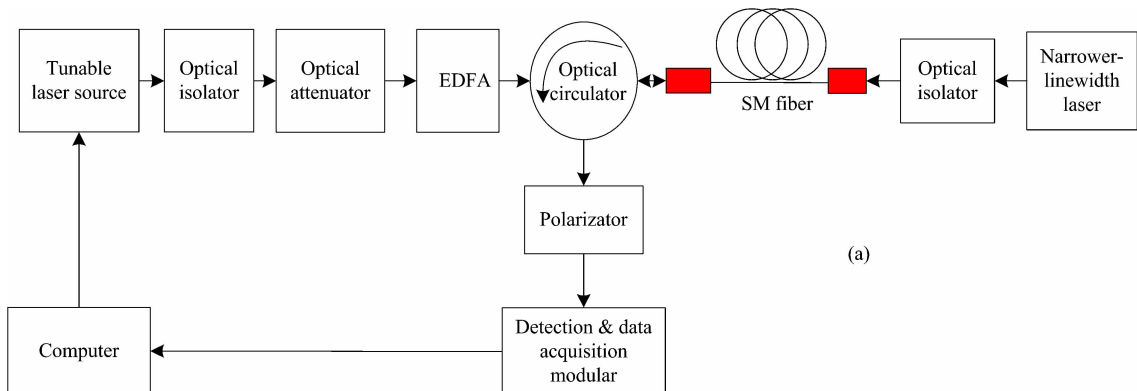




图 1 受激布里渊增益谱实验测量装置

(a): 原理框图; (b): 实验装置

Fig. 1 SBS spectrum measurement experimental setup

(a): Principle scheme; (b): Experimental setup

2.2 受激布里渊增益谱特性测量与分析

不同泵浦功率时的受激布里渊后向散射信号, 如图 2 所示, 当泵浦功率达到一定的高功率水平时, 受激布里渊增益会出现饱和和效应。在高泵浦功率条件下的增益谱线型, 由于实验装置的非线性以及受激布里渊增益自身的饱和和效应, 远比 Yenyay 等<sup>[15]</sup>给出的理论解析解复杂的多。在线性受激布里渊增益区域外, 实验测量得到的是一个存在畸变的增益谱, 此时的增益谱型与采样信号的卷积并不满足卷积关系, 用同质条件描述更为准确

$$(a \cdot f) * g = a \cdot (f * g) \quad (11)$$

式(11)中,  $a$  表示缩放因子,  $f$  和  $g$  为未被理论描述的卷积函数。

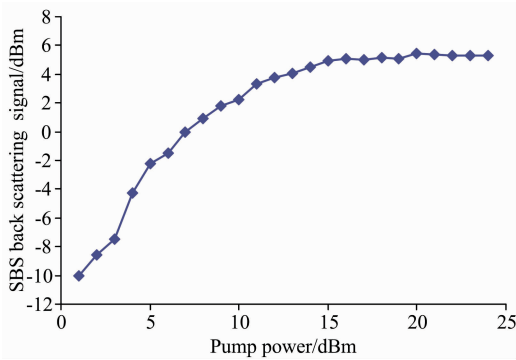


图 2 泵浦功率与后向散射信号的关系

Fig. 2 Pump power versus SBS signal

为得到高信噪比的受激布里渊增益谱型, 以便观察和分析增益谱的轮廓, 以及探索受激布里渊效应在光谱分析等方面的应用, 本文侧重分析线性增益区域的受激布里渊增益谱型。首先, 使用能产生高和低受激布里渊增益的低功率泵浦信号, 满足工作在线性增益区域的要求, 以得到低增益时的洛伦兹线型增益谱, 以及高增益时的高斯线型增益谱。并使用超低损耗单模光纤作为发生受激布里渊效应的工作介质, 以产生满足要求的条件; 其次, 是对测量得到的受激布里渊后向散射信号的功率谱进行归一化等校正处理, 以获取增益

谱型与待测信号光谱的有效卷积信息。

基于以上理论和实验分析, 我们可以测量得到两个不同的受激布里渊增益谱, 以及对应的两个不同的谱宽。其中, 实验直接测量得到的增益谱宽, 如图 3 所示, 在泵浦功率较低的线性区域, 受激布里渊增益谱宽则随着泵浦功率提高而变窄; 当泵浦功率超过 15 dBm 时, 受激布里渊效应出现增益饱和现象, 此时, 直接测量得到的增益谱宽会随泵浦功率增加而展宽, 需要经校正才能得到正确的半高全宽值。

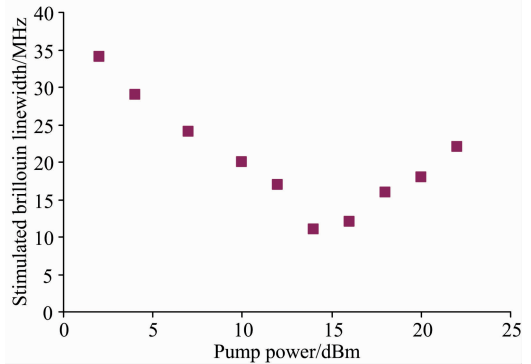


图 3 泵浦功率与增益谱宽的关系

Fig. 3 Pump power versus SBS linewidth

现有理论研究指出<sup>[2, 4]</sup>, 增益谱的线型变化依赖于增益, 即泵浦信号功率。实际上, 很难直接通过实验测量得到高泵浦功率时的高斯线型增益谱, 这是因为它实际上是受激布里渊过程的反射信号, 如果不对增益响应进行校正, 当泵浦功率达到一定的高功率水平时, 实验测量得到的增益谱不是高斯线型, 与实际增益谱不符, 并且它的半高全宽与洛伦兹线型是不同的, 如图 4(a) 所示。针对这一情况, 本文提出对增益谱进行归一化校正处理, 以得到接近真实的增益谱。实验测量结果经归一化校正后, 得到的增益谱近似为高斯线型, 如图 4(b) 所示; 低增益时, 增益谱型类似洛伦兹线型, 因为此时的增益饱和和效应可以被忽略。当待测信号处于较低功率水平, 并确保不发生泵浦功率损耗时, 不同功率水平待测信号对应的增益谱型应该是相同的, 但信噪比会随信号功

率降低而变差。实验测量结果与理论分析推导结果符合的很好，证明了本文所提方法的可行性。

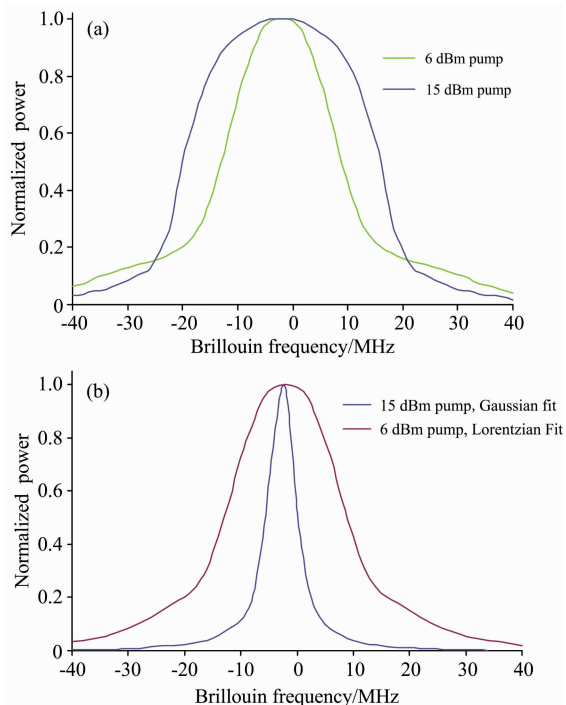


图 4 6 Bm 和 15 dBm 泵浦功率时测量得到的增益谱 (a): 直接测量得到的增益谱; (b): 经归一化校准后得到的增益谱

Fig. 4 Measured SBS gain spectrum with low (6 Bm) and high (15 dBm) pump powers

(a): Direct measured SBS gain spectrum; (b): SBS gain spectrum after linearization

在受激布里渊效应的中间增益区域，采用以上的洛伦兹线型或高斯线型进行谱型拟合时，拟合效果出现畸变，特别是增益谱滚降特性失真严重，这因为在中间增益区域，增益谱具有更为复杂的谱线轮廓，难以简单用单一谱型描述。分析不同泵浦功率时的增益谱型，发现在受激布里渊效应的线

性增益区域，增益谱型随泵浦功率提高而逐渐变得的尖锐，由低泵浦功率时的洛伦兹线型演变为高泵浦功率时的高斯线型。采用等式(6)给出的  $k$  次洛伦兹函数拟合方法，对测量得到的位于中间增益区域的受激布里渊增益谱进行拟合，重复数次迭代，发现  $k$  取 2 时，就可得到较好的拟合结果。增益谱采用不同拟合函数的拟合结果如图 5 所示。本文还基于实验数据和基于式(7)，给出了采用  $k$  次洛伦兹函数，对中间增益的受激布里渊增益谱进行拟合时，输入泵浦功率与拟合系数  $k$  的取值关系，如图 6 所示，当  $k$  取值超过 10 时，拟合谱型就已比较符合高斯线型。

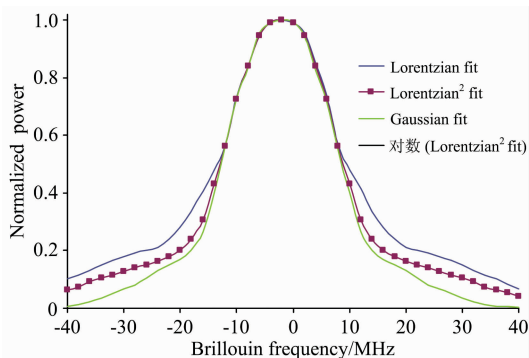


图 5 归一化受激布里渊增益谱的拟合结果

Fig. 5 Fitting for normalized SBS gain spectrum

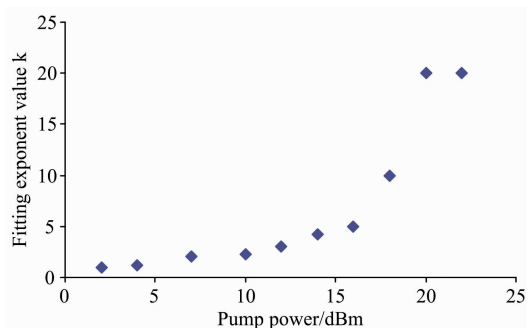


图 6 不同泵浦功率与拟合系数  $k$  的关系

Fig. 6 Different pump power versus fitting value  $k$



图 7 光谱分析实验装置

Fig. 7 Experimental setup for spectral analysis

### 2.3 光谱分析应用

根据以上分析得到的受激布里渊增益谱的谱型信息,可知,采用光纤受激布里渊效应进行光谱分析时,测量光谱数据的质量高度依赖泵浦信号功率。如图 4(b)所示,当泵浦信号为 15 dBm 时,采用光纤受激布里渊效应构建的光谱分光滤波器的带宽,可窄至 20 MHz 以内,此时滤波器的线型函数为高斯线型,是一种比较理想的光谱滤波线型函数,具有良好的滚降特性,允许实现更高的光学抑制比和更大的动态范围。

采用如图 7 所示实验装置,测量了自行研制的 6314CA

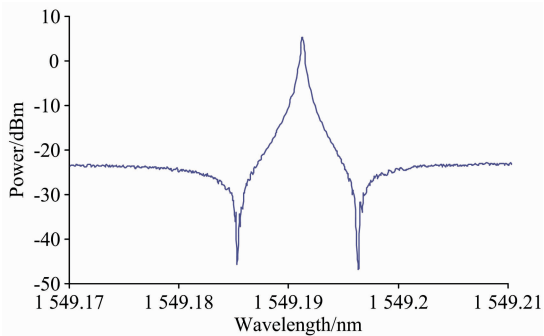


图 8 测量得到的 0.2 pm 分辨率的 6314CA 稳定光源的光谱

Fig. 8 Measured spectra of 6314CA stabilized optical source with 0.2 pm resolution

DFB 稳定光源的光谱,光源输出 0 dBm 的光用作待测光,结果如图 8 所示,实验测量光谱的分辨率约为 0.2 pm,在  $\pm 5$  pm 处的近峰动态范围超过 50 dB。得益于足够高的光谱分辨率和动态范围,能够测量并分析窄带光源的精细光谱轮廓信息。而目前常用的光栅型光谱分析仪,由于分辨率限制,只能测量得到一条窄谱线,无法获取更为精细的光谱轮廓等细节信息。显示了光纤受激布里渊效应在超高分辨率光谱分析领域的巨大技术优势,而这对于新一代光网络的验证评估至关重要。

### 3 结 论

提出并采用基于双窄线宽激光的受激布里渊增益谱的精确测量分析方法,在大泵浦功率范围内,对受激布里渊增益谱的线型特性进行了研究,重点分析了泵浦功率水平对受激布里渊增益谱的影响。通过实验直接测量了受激布里渊增益谱的线型,随着泵浦功率提高,由低增益时的洛伦兹线型演变为高增益时的高斯线型;针对中间增益时的受激布里渊增益谱型有着更为复杂的谱型,难以由现有谱型模型进行描述的问题,提出了一种新的增益谱线型数学模型,该模型采用  $k$  阶洛伦兹函数拟合增益谱型,可准确描述从洛伦兹线型到高斯线型的增益谱线型的完整演进过程,实验测量数据的拟合结果表明谱型数学模型的效果很好。最后,还探索了受激布里渊效应在光谱分析领域的应用,获取了 0.2 pm 分辨率的 6314CA 稳定光源的光谱。

### References

- [1] Fikri S, Hansan G, Volker J. *Applied Optics*, 2018, 57(4): 607.
- [2] Barrias A, Casas J, Villalba S. *Sensors*, 2016, 16(5): 748.
- [3] Elijah O, Leow C, et al. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2016, 18(2): 905.
- [4] Bai Z, Yuan H, Liu Z, et al. *Optical Materials*, 2018, 75(5): 626.
- [5] Marpaung D, Morrison B, et al. *Optica*, 2015, 2(2): 76.
- [6] ZHANG Xiao-qing, JIA Yu-dong, DONG Jian-jing(张晓青, 贾豫东, 董建晶). *Acta Optica Sinica(光学学报)*, 2016, 36(12): 1214007.
- [7] Preussler S, Schneider T. *Optical Engineering*, 2016, 55(3): 031110.
- [8] YANG Lei, ZHENG Jia-jin, HAO Li-yun, et al(杨磊, 郑加金, 郝丽云, 等). *Chinese Journal of Lasers(中国激光)*, 2017, 44(9): 0901009.
- [9] Loranger S, Lambin V, Wahbeh M, et al. *Optics Letters*, 2016, 41(8): 1797.
- [10] Kim J, Kuzyk M, Han K, et al. *Nature Physics*, 2015, 11(3): 275.
- [11] Choudhary A, Aryanfar I, Shahnia S, et al. *Optics Letters*, 2016, 41(3): 436.
- [12] Yeniay A, Delavaux J, Toulouse J. *Journal of Lightwave Technology*, 2002, 20(8): 1425.
- [13] Fabrega J, Sevillano P, Moreolo M, et al. *Optical Communications*, 2015, 342: 144.
- [14] Elias G, Amol C, Eric M, et al. *Optica*, 2018, 5(10): 1191.
- [15] David M, Blair M, Pant R, et al. *Optica*, 2015, 2(2): 76.

# Characterization of SBS Gain Spectrum Lineshape in Fiber

LIU Jia-qing<sup>1,2</sup>, HAN Shun-li<sup>1,2</sup>, LIU Lei<sup>1</sup>, LIU Lei<sup>1</sup>, ZHANG Ai-guo<sup>1</sup>

1. China Electronics Technology Instruments Co. Ltd., Qingdao 266555, China

2. Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, The 41st Research Institute of CETC, Qingdao 266555, China

**Abstract** Stimulated Brillouin Scattering(SBS) is an important nonlinear effect which is observed in optical fiber, the properties of SBS gain spectrum lineshape play a key role, for use in some applications such as spectrum analysis, microwave photonic filtering and optical fiber sensors based on Brillouin amplification. High signal to noise ratio (SNR) measurement data is impossible with current methods, limits analyzing the lineshape of SBS gain spectrum. A method for Brillouin gain spectrum measurements in standard single-mode fiber by two narrow-linewidth laser is presented, using one as the probe signal to measure, and the other as the pump signal, sweeping a wide spectral span of around the probe signal. Benefit from narrow-linewidth laser and polarization pulling of SBS, high SNR measurement of Brillouin gain spectrum is achieved. The Brillouin gain spectrum is measured for different power levels of pump signal, the relation of power levels and relevant SBS parameters such as linewidth and gain profile is studied, particularly, the evolution of the SBS gain profile from Lorentzian to Gaussian as predicted by current theory is also experimental verification and analysis, show the SBS spectrum lineshape affected by the gain level involving different optical power levels of the stimulating signal. Experimental results show that with pump power up from 15dBm, the saturation is pre-set, so if directly measured the FWHM of SBS gain spectrum, its broadens as the pump power increases. This Gaussian functional form of SBS gain spectrum could not be directly measured experimentally at high pump powers, linearizing the response is proposed, in order to get valid information of the convolution between the SBS spectrum and the measured signal spectrum, so the lineshape is confirmed to be Gaussian. In the intermediate gain region, the SBS spectral shape does not fit well with current functions, lack of proper lineshape evolution model, so a mathematical model with Lorentzian function to the power of a variable value  $k$  was proposed, to resolve the difficult fitting problems of lineshape evolution from Lorentzian to Gaussian. Experimental results with excellent accuracy, proven an effective mathematical model of SBS gain spectrum lineshape, to describe the profile of SBS spectrum with different gain level. The use of SBS response for spectral analysis is proposed. Accordingly, the quality of the SBS based spectrum analysis is highly dependent on the optical power of the pumping signal, the SBS gain as filtering with Gaussian profile is used. The optical spectrum of 6314CA stabilized optical source with 0.2 pm resolution is obtained, show a great potential candidate for ultra-high resolution spectral analysis, will be a useful diagnostic tool for new generation optical network research and development (R&D).

**Keywords** Stimulated Brillouin scattering gain spectrum; Lineshape property; Lineshape evolution; Pump signal power level; Spectral analysis

(Received Jun. 25, 2019; accepted Oct. 29, 2019)