

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0207-03

宽带抽运对受激布里渊散射影响的研究

王超¹, 吕志伟¹, 林殿阳¹, 王晓慧¹, 赵晓彦¹, 汤秀章², 张海峰², 单玉生²

(¹哈尔滨工业大学光电子研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001; ²中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要 提出了一个描述宽带激光抽运受激布里渊散射的理论模型。假设宽带的连续激光光谱是由若干窄带的光谱组成, 这些相邻窄带谱线产生 SBS 的过程有一定的耦合作用。模型中包含抽运耗空和介质击穿对 SBS 过程的影响。理论和实验获得了宽带抽运对 SBS 过程影响的基本规律, 获得的最大能量反射率为 45%。数值拟合的结果与已有实验结果进行了比较, 理论与实验基本吻合, 证明了模型对宽带 SBS 的产生有一定的预测作用。

关键词 非线性光学; 受激布里渊散射; 宽带激光; 能量反射率

中图分类号 O437.2

文献标识码 A

Theory and Experiment of Stimulated Brillouin Scattering Pumped with Broadband Laser

WANG Chao¹, LÜ Zhi-wei¹, LIN Dian-yang¹, WANG Xiao-hui¹, ZHAO Xiao-yan¹
TANG Xiu-zhang², ZHANG Hai-fen², SHAN Yu-shen²

(¹Institute of Optoelectronics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)
²China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract The paper presents a theory model to describe the process of stimulated Brillouin scattering (SBS) pumped with broadband laser. The mode is assumed that the broadband spectral is made of many narrow bands. It considers the effect of pump depletion and optical breakdown on SBS. The maximum reflectivity of 45% is got in experiment. The theoretical results are consistent with the experiment.

Key words nonlinear optics; stimulated Brillouin scattering; broadband laser; energy reflectivity

1 引言

在近二十年来,关于宽带 SBS 的研究得到很大发展,在对宽带的研究中多数采用 CO₂ 激光器, HF 激光器, 准分子激光器和多模 YAG 激光器。目前关于多线多模抽运对 SBS 的影响有不同的研究结果。一种研究结果是抽运光中各谱线是各自独立地产生 SBS^[1-3], 还有一些研究结果表明多线抽运中各谱线之间不独立^[4,5]。从以上研究看出,抽运光谱线之间独立产生 SBS 的条件为谱线之间或激光各模间的间隔大于布里渊线宽,而本文所要研究的 KrF 激光的模间隔远小于布里渊线宽。本文建立了一种宽带多模 KrF 激光抽运的 SBS 理论模型,假设 KrF 激光各模产生 SBS 不是独立的,而是相互耦合的。实验采用线宽为 15 GHz(0.5 cm⁻¹)的 KrF 激光作为抽运光源,采用 SF₆ 介质研究 SBS 的反射率和脉宽压缩规律。对理论计算与实验结果进行了比较。

2 窄带数值模型

本文的宽带建立在一维瞬态的窄带理论模型 SBS 过程的数值模拟^[6]的基础上,将计算得到的窄带 SBS 反射率随抽运能量的变化规律经过非线性曲线拟合后,可以得到窄带 SBS 反射率随抽运能量变化的函数表达式,拟合函数为:

$$R(E) = y_0 + A_1 [1 - \exp(-E/t_1)] + A_2 [1 - \exp(-E/t_2)] \quad (1)$$

其中 y_0, A_1, A_2, t_1, t_2 分别为常量,抽运能量 E 的单位为毫焦耳。可以看出这种拟合函数与理论计算结果符合得很好。这里对窄带 SBS 反射率的计算规律都采用这种拟合函数进行拟合,得到在不同透镜焦距、不同气压下拟合函数 $R(E)$ 中的常量。

3 光学击穿

SBS 产生时间应该受介质内声子寿命的影响。在 SF₆ 气体介质中,在气压为 0.6~1.6 MPa 范围内,

基金项目: 国家 863 惯性约束聚变资助课题。

作者简介: 王超(1978-),男,哈尔滨工业大学博士研究生,主要从事受激布里渊散射研究。E-mail: wangchao@hit.edu.cn

介质的声子寿命为 0.6~1.7 ns 之间。光学击穿的产生时间为~4 ns^[7]。从文献中可知 SBS 阈值与光学击穿阈值基本在同一量级, SBS 产生时间与光学击穿与产生时间也是在同一量级, 因此可以认为二者是同时产生的。

4 宽带模型

根据宽带 KrF 激光的光谱结构, 假设 KrF 激光光谱为洛伦兹线形表示, 对于带宽为 $\Delta\nu$ 的激光线形为 $g(\nu) = \frac{\Delta\nu/2\pi}{(\nu-\nu_0)+(\Delta\nu/2)^2}$, 其中 ν_0 为中心频率。假设宽带 KrF 激光谱线由若干个紧密相连的窄带组成, 每个窄带的形状是矩形, 带宽为 $\Delta\nu_i$ ($\Delta\nu_i \leq \Delta\nu_B$, $\Delta\nu_B$ 为布里渊带宽)。根据宽带多模结构中测得的平均光强是各纵模光强之和, 可以认为宽带抽运能量 E 是谱线分布中所有窄带能量之和, 其中每个窄带 $\Delta\nu_i$ 的能量 E_{i1} 为:

$$E_{i1} = E \cdot g(\nu_i) \Delta\nu_i \quad (2)$$

由窄带 SBS 数值模拟可知, 对于窄带能量 E_i 所产生的 SBS 反射率为:

$$R(E_i) = y_0 + A_1 [1 - \exp(-E_i/t_1)] + A_2 [1 - \exp(-E_i/t_2)] \quad (3)$$

其中 y_0, A_1, A_2, t_1, t_2 分别为常量, 抽运能量 E_i 的单位为毫焦耳。如果各窄带之间是独立产生 SBS 的, 则每个窄带 E_i 产生的斯托克斯光的能量为 $E_i \cdot R(E_i)$, 对于宽带抽运能量为 E 时, 产生斯托克斯光的总能量为 $\sum_i E_i \cdot R(E_i)$ 。由于各窄带是紧密相连的, 在产生

SBS 过程中存在一定的耦合作用, 假设各窄带之间的耦合系数为 C 时, 则每个窄带在产生 SBS 过程中由于耦合作用所参与的能量 E_{i2} 为:

$$E_{i2} = C \cdot E \cdot g(\nu_i) \cdot \Delta\nu_i \quad (4)$$

相应产生 SBS 的总能量 E_S 为:

$$E_S = \sum_i E_{i1} \cdot R(E_{i2}) = \sum_i E \cdot g(\nu_i) \cdot \Delta\nu_i \cdot R[C \cdot E \cdot g(\nu_i) \cdot \Delta\nu_i] \quad (5)$$

考虑到光学击穿的竞争, 假设光学击穿过程中电子吸收的能量为 E_a , 则产生 SBS 过程中参与的总能量为 $E - E_a$, 每个窄带能量 E_{i1} 在产生 SBS 过程中所参与的能量 E_{i2} 变为:

$$E_{i2} = C \cdot (E - E_a) \cdot g(\nu_i) \Delta\nu_i \quad (6)$$

则产生 SBS 的总能量 E_S 变为:

$$E_S = \sum_i E_{i1} \cdot R(E_{i2}) = \sum_i (E - E_a) \cdot g(\nu_i) \cdot \Delta\nu_i \times R[C \cdot (E - E_a) \cdot g(\nu_i) \cdot \Delta\nu_i] \quad (7)$$

则对于宽带抽运能量 E 产生的 SBS 反射率 R 为:

$$R = \sum_i (E - E_a) \cdot g(\nu_i) \cdot \Delta\nu_i \cdot R(E_{i2}) / E \quad (8)$$

$$R(E_{i2}) = y_0 + A_1 [1 - \exp(-E_{i2}/t_1)] + A_2 [1 - \exp(-E_{i2}/t_2)] \quad (9)$$

这样由(8)式和(9)式及(6)式就构成了宽带 SBS 反射率的理论模型。

又由文献[8]得知光学击穿吸收能量的表达式中, 当气压比较高时则:

$$E_a = \frac{2\pi e^2 \gamma_0^2 t p}{m c p} k_p \rho_0 I_0 \times \int_{-L}^L \exp \left[\left[\frac{k_1}{\xi} \frac{2e^2}{m c \epsilon [1 + (z/z_a)^2]} I_0 - g \right] t_p \right] dz \quad (10)$$

通过实验和理论比较结果我们给出耦合系数的经验公式: 利用高斯函数进行拟合得到最佳耦合系数的函数关系式为:

$$C = 1.8 \left[1 + \exp \left[-0.02 \left(\frac{\Delta\nu_B}{\Delta} - 10 \right)^2 \right] \right] \quad (11)$$

式中 Δ 为纵模间隔, $\Delta\nu_B$ 为布里渊线宽。

由(6)式, (8)式, (9)式, (10)式和(11)式和窄带数值模拟的方法就构成了完整的宽带 SBS 反射率理论计算方法。

5 实验装置

实验中以 SF_6 气体介质作为研究对象, 采用单池聚焦抽运的 SBS 产生池, 实验装置如图 1 所示, 实验采用 KrF 激光器 (LPX150) 作为抽运光源, 波长 248 nm 的激光聚焦后进入充满 SF_6 介质的 SBS 池中。激光脉宽 40 ns, 光束的发散角为 0.3 mrad, 光斑大小 9 mm×25 mm, 聚焦透镜是平凸透镜。其中能量由北京物科光电技术公司的激光功率计 (E_1, E_2) 测得, 光波形利用滨松公司生产的 R1193U-02 型双平面光真空二极管 (D_1, D_2) 及美国 Tek 公司 TDS320 示波器测得。对将实验结果与数值模拟结果进行了对比分析, 结果如图 2 所示。

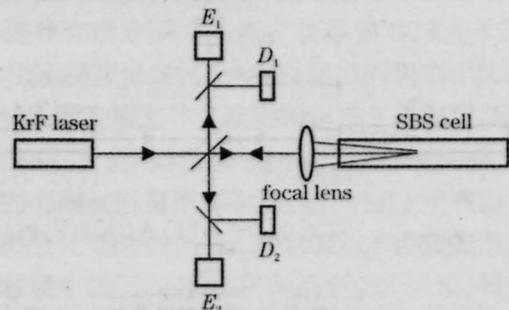


图 1 实验装置图。 E_1, E_2 : 能量计; D_1, D_2 : 强流管
Fig.1 Schematic of the experimental setup. E_1, E_2 : energy meter; D_1, D_2 : photo-electric diode

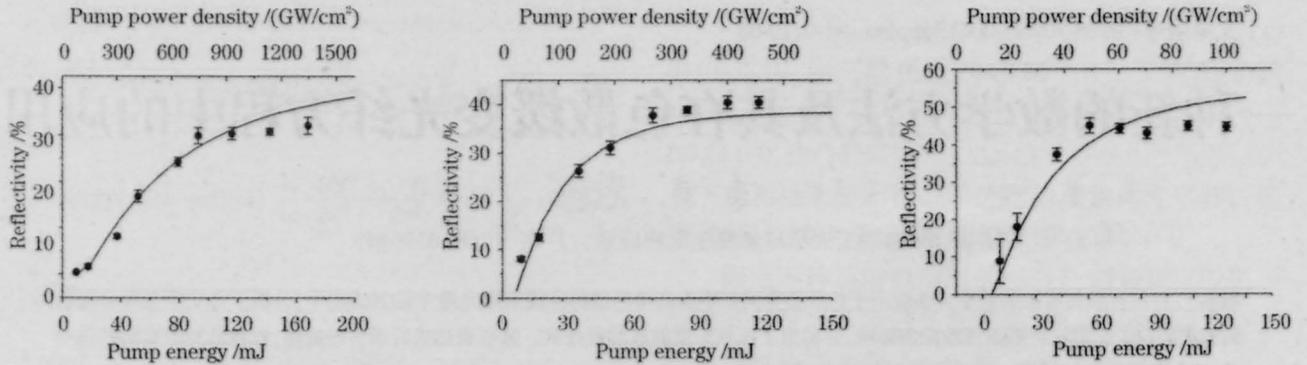


图2 气压 1.6 MPa, 不同透镜焦距下 SBS 反射率随抽运能量的变化规律

Fig.2 SBS reflectivity versus pump energy at the pressure of 1.6 MPa with different focal length

6 分析讨论

通过实验结果(如图 2)和理论分析可以看到随着抽运激光能量的增加 SBS 反射率开始呈非线性增加,然后趋于饱和,不同透镜的饱和反射率有差别。从计算和实验中发现,宽带的饱和反射率比窄带的饱和反射率低,因为综合效果,除宽带增益低外,从模型中我们可以发现,要达到与窄带抽运相同的反射率,宽带的抽运能量要比窄带高,而介质的光学击穿阈值是一定的。当抽运光能量继续升高时,受到光学击穿的影响,使 SBS 能量的反射率不能继续上升。

7 结论

文中对抽运光线宽对 SBS 产生过程的影响进行了数值模拟,实验得到了不同透镜下 SBS 的能量反射率随抽运光能量变化的规律。数值模拟结果与已有实验结果进行了比较,理论与实验基本吻合。证明了新模型对宽带 SBS 的产生有一定的预测作用。在理论与实验基础上,本文对宽带激光抽运产生 SBS 的机制进行了探讨。

参考文献

- 1 D. Depatie, D. Hauelsen. Multiline phase conjugation at 4 μm in germanium [J]. *Opt Lett.*, 1980, 5:252-254
- 2 P. Narum, M. D. Skeldon, R. W. Boyd. Effect of laser mode structure on stimulated Brillouin scattering[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1986, QE-22(11):2161-2168
- 3 W. T. Whitney. Stimulated Brillouin scattering and phase conjugation of multiline hydrogen fluoride laser radiation [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1990, 7(11):2160-2168
- 4 R. Moyer *et al.* Nonlinear optics multielement systems [R]. TWR Final Rep. AFWLTR-86-15
- 5 M. R. Perrone, Y. B. Yao. On the improvement of broadband stimulated Brillouin scattering [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, 64(1):19-21
- 6 Wang Chao, Lü Zhiwei, Lin Dianyang *et al.* Dependence of pulse duration on parameter of medium in stimulated Brillouin scattering[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(5): 713-716
王超, 吕志伟, 林殿阳等. 介质参量对受激布里渊散射脉宽压缩的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2002, 14(5): 713-716
- 7 S. B. Papernyi, V. F. Petrov, V. A. Serebryakov *et al.* Competition between stimulated Brillouin scattering and optical breakdown in argon[J]. *Soviet J. Quantum Electronics*, 1983, 13(3):293-297
- 8 Y. R. Shen. *The Principles of Nonlinear Optics* [M]. John Wiley & Sons, Inc, 1984. 528-540