

文章编号: 0258-7025(2008)02-0163-05

# 宽带 KrF 激光抽运 SF<sub>6</sub> 受激布里渊散射的脉宽稳定性

林殿阳<sup>1</sup> 蒋萧村<sup>1,2</sup> 王淑杰<sup>3</sup> 王双义<sup>1</sup> 吕志伟<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001  
<sup>2</sup> 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065; <sup>3</sup> 哈尔滨工业大学管理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

**摘要** 从理论和实验上对利用宽带 KrF 激光抽运 SF<sub>6</sub> 产生的受激布里渊散射(SBS)的脉宽稳定性进行了研究。获得了受激布里渊散射脉宽稳定性随抽运功率密度稳定性、抽运脉宽稳定性及介质气压变化的规律。发现受激布里渊散射脉宽的稳定性与抽运激光的稳定性直接相关,抽运激光的稳定性越好,获得的受激布里渊散射脉宽相对稳定性也越好。抽运光脉宽和能量的不稳定都会造成所产生的受激布里渊散射脉宽不稳定。在较低抽运功率密度情况下抽运光脉宽和能量的波动对受激布里渊散射脉宽稳定性的影响都不可忽略,但在较高抽运功率密度情况下受激布里渊散射脉宽稳定性主要受抽运光脉宽波动的影响。对结果进行了分析和讨论,获得脉宽稳定性较好的受激布里渊散射输出的条件是,使用脉宽稳定性较好的抽运光和在保证没有其他非线性效应产生的情况下,尽可能提高抽运光的功率密度和介质气压。

**关键词** 非线性光学;受激布里渊散射;脉宽稳定性;宽带 KrF 激光

**中图分类号** TN 248. 2;O 437. 2 **文献标识码** A

## Pulse Duration Stability of Stimulated Brillouin Scattering in SF<sub>6</sub> Pumped by a Broadband KrF Laser

Lin Dianyang<sup>1</sup> Jiang Xiaocun<sup>1,2</sup> Wang Shujie<sup>3</sup> Wang Shuangyi<sup>1</sup> Lü Zhiwei<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Key Laboratory of Tunable Laser Technology,  
Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China  
<sup>2</sup> Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an, Shaanxi 710065, China  
<sup>3</sup> School of Management, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

**Abstract** The pulse duration stability of stimulated Brillouin scattering (SBS) in SF<sub>6</sub> gas pumped by a broadband KrF laser was studied theoretically and experimentally. The dependence of the pulse duration stability of SBS on the power density stability, pulse duration stability of the pump laser and medium gas pressure was obtained. The results showed that the pulse duration stability of SBS is directly correlated with the stability of the pump laser; the pulse duration stability of the SBS increases as the stability of the pump laser does. The instability of SBS pulse duration occurs when pulse duration and energy of pump laser were instability. Under lower pump power density, the influence of the pulse duration and pump laser energy fluctuation on the pulse duration of SBS is not ignored; but under higher pump power density, the pulse duration stability of SBS is mainly influenced by the fluctuating in pump pulse-width. The experimental results were analyzed and discussed. And for obtaining better pulse duration stability of SBS, pump laser with stable pulse duration should be used. And enhancing pump density of pump laser and medium gas pressure without other nonlinear effects are also necessary.

**Key words** nonlinear optics; stimulated Brillouin scattering; pulse duration stability; broadband KrF laser

收稿日期:2007-07-10; 收到修改稿日期:2007-09-04

基金项目:哈尔滨工业大学跨学科交叉性研究基金(HIT, MD2003. 08)、国家 863 惯性约束聚变专题(863-804-6)和哈尔滨工业大学优秀团队支持计划资助项目。

作者简介:林殿阳(1963—),男,内蒙古人,教授,博士,主要从事受激光散射及光束质量控制等非线性光学效应及应用研究。E-mail:dianyanglin@hit.edu.cn

## 1 引 言

KrF 准分子激光在薄膜沉积、平板印刷术、材料处理等方面已得到了广泛的研究和应用。通常情况下,目标和目的不同,对激光的光束质量、脉冲形状和脉冲宽度的要求也不同。例如,在激光惯性约束核聚变中要求作为驱动器的激光具有短波长、短脉冲、高度空间平滑和时间整形能力等特性<sup>[1]</sup>。因此,控制激光光束质量和激光脉冲就具有十分重要的意义。非线性光学相位共轭技术是改善激光光束质量和压缩激光脉冲长度的比较有效的方法之一。其中受激布里渊散射(SBS)相位共轭技术以其结构简单、频移小、能同时进行脉宽压缩和进行光束相位畸变补偿等优点一直受到广泛的关注<sup>[2~9]</sup>,已经成为一些窄带商用激光器改善光束质量和压缩激光脉宽的一项重要技术。受激布里渊散射在宽带准分子激光器上的应用却存在一些问题,其中比较典型的是受激布里渊散射反射率和脉宽压缩的稳定性问题。与窄带激光器相比,准分子激光多数运转在宽带情况下,所产生的受激布里渊散射是宽带受激布里渊散射,而宽带受激布里渊散射与窄带受激布里渊散射在机制上有一定差别,目前还没有一个完善的理论可以统一解释已经观察到的所有宽带受激布里渊散射现象<sup>[10~12]</sup>,对宽带受激布里渊散射规律的认识还有待更深入的研究和探索,主要集中在受激布里渊散射反射率、反射率稳定性和脉宽压缩等方面<sup>[13~16]</sup>。但是,用受激布里渊散射对长脉冲 KrF 激光进行脉冲压缩后,压缩脉宽的稳定性的也是在实际应用中的一个重要指标。大多数介质在 KrF 激光工作的 248 nm 波段的受激布里渊散射阈值较高,增益较小,且容易产生其他非线性效应。而 SF<sub>6</sub> 气体介质在这一波段吸收小、受激布里渊散射增益高、阈值低,是目前比较广泛采用的受激布里渊散射介质。本文从理论上和实验上对利用 KrF 激光抽运 SF<sub>6</sub> 产生的受激布里渊散射的脉宽稳定性进行了研究,获得了受激布里渊散射脉宽的稳定度随抽运功率密度稳定性和抽运脉宽稳定度的变化规律,并对结果进行了分析讨论。

## 2 基本理论

在慢变化振幅近似下,窄带瞬态受激布里渊散射耦合波方程为<sup>[15]</sup>

$$\frac{n}{c} \frac{\partial E_L}{\partial t} - \frac{\partial E_L}{\partial z} = -i g_L Q E_S, \quad (1)$$

$$\frac{\partial E_S}{\partial z} + \frac{n}{c} \frac{\partial E_S}{\partial t} = -i g_S Q^* E_L, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \Gamma_B \rho = -i g_a E_L E_S^*, \quad (3)$$

式中  $E_L$ ,  $E_S$ ,  $Q$  分别表示抽运光、受激布里渊散射光和声波的慢变化振幅,  $n$  为介质的折射率,  $c$  为光速,  $\rho$  为介质的密度,  $\Gamma_B$  为受激布里渊散射线宽,并且

$$g_L = \frac{\gamma \omega_L}{4 \rho_0 n c}, \quad g_S = \frac{\gamma \omega_S}{4 \rho_0 n c}, \quad g_a = \frac{\gamma q^2}{16 \pi \Omega}, \quad (4)$$

式中  $\gamma$  为电致伸缩系数,  $\rho_0$  为介质的平均密度,  $\omega_L$ ,  $\omega_S$  分别表示抽运光和受激布里渊散射光的频率,  $q$  为声波的波矢,  $\Omega$  为声波的频率。

对于受激布里渊散射,  $\omega_L \approx \omega_S$ , 所以,  $g_L \approx g_S$ 。定义  $g^0 = 2 g_a g_S / \Gamma_B$  为窄带受激布里渊散射增益系数。当抽运光为宽带时,受激布里渊散射增益系数可计算为<sup>[5]</sup>

$$g = \frac{g^0}{1 + (\Delta \nu_L / \Delta \nu_B)}, \quad (5)$$

式中  $\Delta \nu_L$  为抽运激光线宽,  $\Delta \nu_B$  为受激布里渊散射线宽。

受激布里渊散射脉宽相对稳定度  $\sigma$  定义为受激布里渊散射脉宽的均方差与算术平均值之比,即  $\sigma = \Delta \tau_S / \tau_S$ 。对于脉冲抽运产生的受激布里渊散射,由于脉冲激光的输出能量和脉宽总是在一定范围内波动的,因此不同脉冲产生的受激布里渊散射脉宽不同。当介质增益不变时,其脉宽稳定性主要受抽运光脉冲宽度和能量稳定性的影响。一般宽带 KrF 激光产生受激布里渊散射所采用的介质是 SF<sub>6</sub> 高压气体。介质气压不同,增益也不同,导致在不同气压下受激布里渊散射具有不同的脉宽稳定性。

## 3 受激布里渊散射脉宽稳定性的数值模拟

带宽 0.5 cm<sup>-1</sup>, 脉宽 40 ns, 光束发散角 0.2 × 0.3 mrad, 光斑为 0.9 cm × 2.5 cm 的 KrF 激光, 采用池长 1.5 m 的 SF<sub>6</sub> 气体作为散射介质, 气压在 0.45 ~ 1.95 MPa 范围内变化时, 可以通过数值模拟, 获得受激布里渊散射脉宽稳定度随介质气压、抽运功率密度变化的规律。不同 SF<sub>6</sub> 气压下, 介质的参数可利用文献[6]中的方法计算得到。

图 1(a) 所示为增益系数  $g$  分别取 0.5 cm/GW 和 1 cm/GW 时, 只考虑抽运激光能量波动对受激布里渊散射脉宽稳定度  $\sigma$  的影响。数值模拟中抽运光功率密度波动设定为 5%。从图中可看出, 受激布

里渊散射脉宽稳定度随着抽运功率密度的增加而迅速减小。抽运功率密度越大,受激布里渊散射脉宽稳定性越好。当抽运功率密度达到一定数值后,受激布里渊散射脉宽相对稳定性基本不变。图 1(b) 为相同条件下,只考虑抽运激光脉宽波动对受激布里渊散射脉宽稳定度  $\sigma$  的影响。计算时将抽运光脉宽的波动设为 5%,从图中看出,在抽运功率密度比较小时,受激布里渊散射脉宽稳定性较差;随着抽运功率密度增加,受激布里渊散射脉宽稳定性变好。

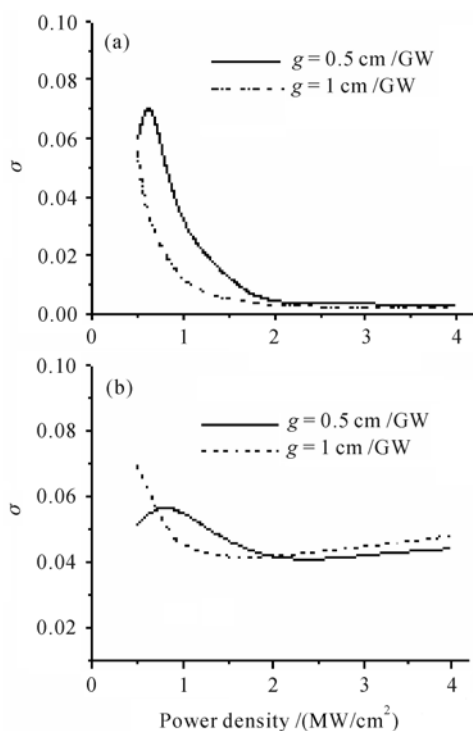


图 1 只考虑抽运光功率密度波动(a)和抽运光脉宽波动(b)时,受激布里渊散射的脉宽稳定度随抽运功率密度的变化曲线

Fig.1 Relationship of pulse duration stability with instability of pump power density (a) and instability of pump pulse duration, respectively

图 2(a) 是综合考虑抽运激光功率密度和脉宽同时波动对受激布里渊散射脉宽稳定度  $\sigma$  的影响。在相同条件下,将抽运功率密度和脉宽的波动分别设定为 5%。可以看到当抽运功率密度较小时,受激布里渊散射相对稳定性较差,与图 1 相比可知,此时抽运功率密度和脉宽的波动对受激布里渊散射脉宽的影响都不可忽略;随着抽运功率密度逐渐的增加,受激布里渊散射相对稳定性变好。此时受激布里渊散射脉宽的稳定度主要受抽运光脉宽波动的影响。通过改变抽运光脉宽稳定性和抽运功率密度稳定性,对受激布里渊散射脉宽稳定性进行数值模拟

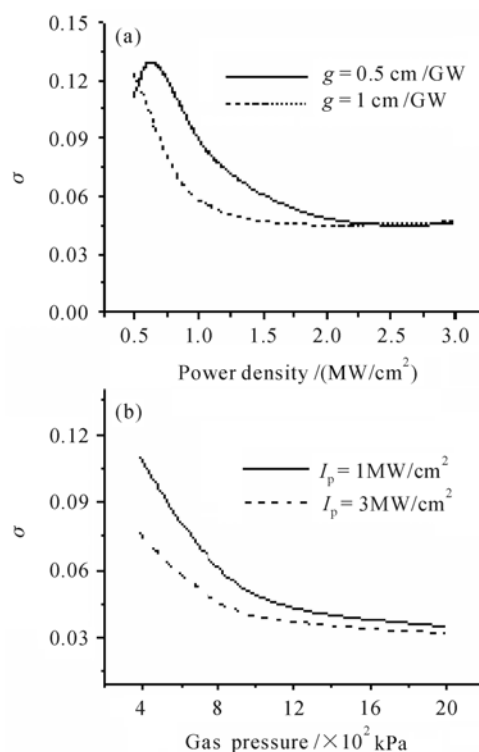


图 2 受激布里渊散射脉宽稳定度随抽运功率密度(a)和介质气压(b)的变化曲线

Fig.2 Dependence of the SBS pulse duration stability on the pumping power density (a) and medium gas pressure (b)

可以看出,抽运光的稳定性直接决定了受激布里渊散射脉宽的稳定度,受激布里渊散射脉宽的稳定度是二者稳定性影响的综合结果。抽运光稳定性越好,脉宽稳定性也越好。在较高抽运功率密度下,脉宽稳定性受抽运光脉宽稳定性的影响更大。

图 2(b) 所示为数值模拟受激布里渊散射脉宽稳定度随介质气压变化的曲线。随着介质气压的增加,受激布里渊散射脉宽稳定性越来越好,且较高抽运功率密度情况下,受激布里渊散射脉宽稳定性优于较低抽运功率密度情况下的受激布里渊散射脉宽稳定性。

## 4 实验结果与分析

实验装置与文献[15]中图 1 所示的实验装置相同,激光器采用的是德国 Lambda Physik 公司生产的商品准分子激光器 LPX150,激光线宽为 15 GHz,激光脉宽为 40 ns,稳定性小于 5%,光束发散角为  $0.2 \times 0.3$  mrad,光斑尺寸为  $0.9 \text{ cm} \times 2.5 \text{ cm}$ 。KrF 激光经分束片分束后,透射光由透镜聚焦到受激布里渊散射池产生斯托克斯光。反射光用来监测抽运

光能量和脉宽;产生的斯托克斯光由原路返回经过分束片分束,反射光用来监测受激布里渊散射光能量和脉宽。实验中受激布里渊散射介质采用的是 $\text{SF}_6$ 气体,池长为1.5 m,口径为 $\phi 50$  mm。抽运光及斯托克斯光能量由北京物科光电技术公司生产的LE-3A型激光能量计测量,激光脉宽由滨松公司生产的R1193U-02型双平面光真空二极管及泰克公司生产的TDS320型示波器测量。

当介质气压为1975.84 kPa时,在不同透镜焦距下受激布里渊散射脉宽稳定度随抽运光能量变化的曲线如图3所示。可以看出,在抽运能量(或功率密度)较小情况下,即受激布里渊散射阈值附近时,受激布里渊散射脉宽稳定性较差;随着抽运能量的增大,受激布里渊散射脉宽稳定性逐渐变好。这与图2(a)的理论结果一致。进一步提高抽运能量,受激布里渊散射脉宽稳定性又变差,与图2(a)的理论结果不同。受激布里渊散射脉宽稳定性最好的点出现在透镜焦距为35 cm,抽运能量为140 mJ处,此时受激布里渊散射脉宽稳定度为0.018。理论与实验的差别是由于在高抽运能量情况下在介质内产生了光学击穿等非线性效应引起的。实验中可以清晰地听到有啪啪的声响,观察到焦点处有火花产生。可见由于光学击穿等非线性效应的产生,增加了受激布里渊散射脉宽的不稳定性。

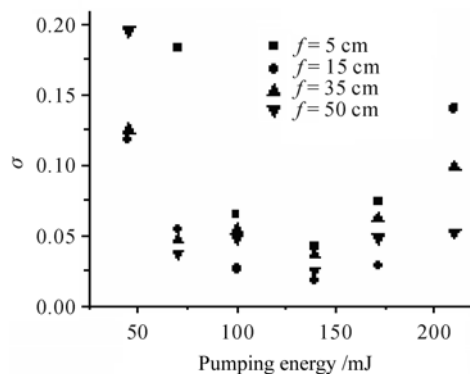


图3 不同透镜焦距下受激布里渊散射脉宽稳定度随抽运能量的变化关系

Fig. 3 Dependence of the SBS pulse duration on the pumping energy for different focal length

图4是采用焦距分别为25 cm,35 cm,50 cm的聚焦透镜,在抽运能量为77 mJ时,获得的受激布里渊散射脉宽稳定度随 $\text{SF}_6$ 的气压变化的实验曲线。可以看出,随着 $\text{SF}_6$ 气压的增大,受激布里渊散射脉宽稳定度迅速减小,即受激布里渊散射脉宽相对稳定性显著提高。这是因为随气压增大,受激布里

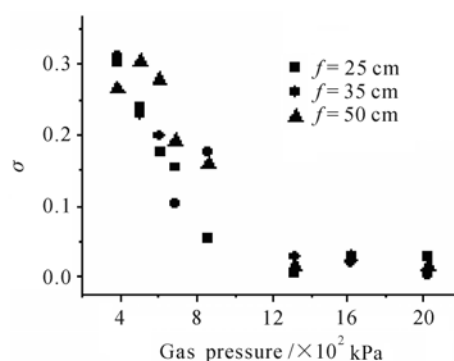


图4 受激布里渊散射脉宽稳定度随气压的变化关系

Fig. 4 Dependence of the SBS pulse duration on gas pressure

渊散射增益系数增大,受激布里渊散射反射率增大,脉宽逐渐趋于抽运光脉冲宽度<sup>[15]</sup>,从而导致受激布里渊散射脉宽稳定性逐渐变好。这与图2(b)的数值模拟结果是一致的。

## 5 结 论

通过对宽带 KrF 激光抽运  $\text{SF}_6$  介质产生的受激布里渊散射脉宽稳定性的理论和实验研究,发现受激布里渊散射脉宽的稳定性与抽运激光的稳定性直接相关。抽运激光的稳定性越好,获得的受激布里渊散射脉宽相对稳定性也越好。抽运光脉宽和能量的不稳定都会造成脉宽不稳定。在较低抽运功率密度情况下抽运光脉宽和能量的波动对受激布里渊散射脉宽稳定性的影响都不可忽略。但在较高抽运功率密度情况下受激布里渊散射脉宽稳定性主要受抽运光脉宽波动的影响。获得脉宽稳定性较好的受激布里渊散射输出的条件是,应使用脉宽稳定性较好的抽运光,在保证没有其他非线性效应的情况下,尽可能提高抽运光的功率密度和介质气压。

## 参 考 文 献

- 1 D. B. Harris, J. A. Sullivan, S. V. Coggeshall. Design and performance of future KrF laser-fusion facilities [C]. *Proceedings-Symposium on Fusion Engineering*, 1989, 1:735~738
- 2 G. G. Kochemasov, F. A. Starikov, A. O. Shkrebko. Effect of spherical aberrations in laser beam on quality of phase conjugation at SBS [C]. *Proceedings of CAOL*, 2003, 1:214
- 3 Li Liu, Zhiwei Lü. Experimental investigation on the stability of Nd:YAG laser with SBS phase conjugator [C]. *Proceeding of CAOL*, 2005, 1:134~137
- 4 R. Buzelis, A. Dement'ev, E. Murauskas. Effective SBS pulse compression to <100 ps in liquid  $\text{CCl}_4$  and fluorocarbon [C]. *Lasers and Electro-Optics Europe, Conference Digest*. 2000 Conference, 1
- 5 V. Nassisi, A. Pecoraro. Stimulated Brillouin and Raman scattering for the generation of short excimer laser pulse [J].

- IEEE J. *Quantum Electron.*, 1993, **29**(9):2547~2552
- 6 Deng Shaoyong, Zhu Yongxiang, Guo Shaofeng *et al.*. Experiments of stimulated Brillouin scattering for pulse compression and energy reflective in K9 glass and fused silica [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2):219~223  
邓少永, 朱永祥, 郭少锋 等. K9 玻璃与熔石英玻璃中纵向受激布里渊散射的脉宽压缩和能量提取效率[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2):219~223
  - 7 Yang Jun, He Weiming, Lü Yuelan *et al.*. Enhancing SBS phase-conjugation fidelity by a special dual spectral-line pump [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(6):512~514  
杨 珺, 何伟明, 吕月兰 等. 双频抽运提高 SBS 相位共轭保真度[J]. *中国激光*, 2003, **30**(6):512~514
  - 8 Youlun Ju, Qi Wang, Deying Chen *et al.*. Compensation laser wave-front aberration in atmosphere 1.27 km away with SBS [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(12):683~685
  - 9 Wuliji Hasi, Zhiwei Lü, Weiming He *et al.*. Experimental investigation on the improvement of SBS characteristics by purifying the mediums [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(12):718~721
  - 10 George C. Valley. A review of stimulated Brillouin scattering excited with a broad-band pump laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1986, **QE-22**(5):704~712
  - 11 Lin Dianyang, Gao Hongyan, Wang Shuangyi *et al.*. Threshold of stimulated Brillouin scattering pumped by a multi-longitudinal mode laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(9):4151~4156  
林殿阳, 高洪岩, 王双义 等. 多纵模受激布里渊散射阈值[J]. *物理学报*, 2005, **54**(9):4151~4156
  - 12 Dianyang Lin, Hongyan Gao, Zhiwei Lü *et al.*. Dependence of stimulated Brillouin scattering on the bandwidth, mode number and mode separation of a laser [C]. *SPIE*, 2005, **6344** I:63441G-1~63441G-6
  - 13 Lü Zhiwei, Wang Xiaohui, Lin Dianyang *et al.*. A study on the stability of stimulated Brillouin scattering for KrF laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(5):1184~1189  
吕志伟, 王晓慧, 林殿阳 等. KrF 激光受激布里渊散射反射率稳定性的研究[J]. *物理学报*, 2003, **52**(5):1184~1189
  - 14 Wang Xiaohui, Lü Zhiwei, Lin Dianyang *et al.*. Investigation of stimulated Brillouin scattering for broadband KrF laser [J]. *Chinese Physics*, 2004, **13**(10):1733~1737
  - 15 Zhiwei Lü, Chao Wang, Dianyang Lin *et al.*. Investigation on stimulated Brillouin scattering pumped by broadband KrF laser [C]. *SPIE*, 2005, **5627**:363~368
  - 16 Wang Xiaohui, Lü Zhiwei, Lin Dianyang *et al.*. Stimulated Brillouin scattering reflection pumped by broadband KrF laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(3):1224~1230  
王晓慧, 吕志伟, 林殿阳 等. 宽带 KrF 激光抽运的受激布里渊散射反射率研究[J]. *物理学报*, 2006, **55**(3):1224~1230