

KrF 激光受激布里渊散射反射率稳定性的研究^{*}

吕志伟 王晓慧 林殿阳 王 超 赵晓彦

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所 哈尔滨 150001)

汤秀章 张海峰 单玉生

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

(2002 年 7 月 17 日收到 2002 年 8 月 28 日收到修改稿)

实验研究发现抽运功率密度(或抽运能量)的波动引起的受激布里渊散射(SBS)反射率的不稳定程度受实验参数(抽运能量、介质气压和透镜焦距)的影响.当抽运能量、介质气压和透镜焦距这三个参数同时满足下列条件时可以获得稳定的输出:抽运能量超过 5 倍的 SBS 阈值,介质气压在 16×10^5 Pa 和透镜焦距在 15—50cm 的范围内;同时还发现当改变实验参数时 SBS 反射率与稳定性的变化规律完全一致,反射率越高稳定性越好.通过理论分析得到 SBS 反射率的相对稳定度实际上是受 *GIL* 因子的影响,理论计算与实验符合得很好.

关键词:KrF 激光,受激布里渊散射,反射率,稳定度

PACC:4265C, 4265F

1. 引言

KrF 准分子激光波长短、效率高、功率高、频带宽、有良好的脉冲整形能力等特性,使得它在薄膜沉积^[1]、平板印刷术^[2]等方面得到了广泛的应用,在惯性约束聚变^[3]等领域有很大应用潜力.通常情况下, KrF 激光工作在长脉冲,光束质量也不够理想.非线性光学相位共轭技术^[4-7]是改善光束质量和压缩激光脉冲长度的比较有效的方法.非线性光学受激布里渊散射相位共轭技术以其结构简单、频移小等优点 20 年来发展得很快^[8-10].就受激布里渊散射相位共轭技术的实际应用而言,除了受激布里渊散射(SBS)的转换效率、输出激光的光束质量和激光波形以外,受激布里渊散射的稳定度也是一个非常重要的参数.文献[11,12]研究了抽运脉冲前沿对受激布里渊散射反射率和相位共轭保真度稳定性的影响,发现快的抽运脉冲上升前沿产生的受激布里渊散射反射率不稳定,通过在快的上升前沿根部引入小的缓慢上升信号后,可以提高受激布里渊散射反射率的稳定性.文献[13]从理论上研究抽运光强起伏对受激布里渊散射反射率稳定性的影响,得到抽

运光强在阈值光强附近时,反射率的相对稳定性比抽运光强的相对稳定性差,当抽运功率密度远大于 5 倍阈值光强时,反射率的相对稳定性优于 2.4% 的抽运光强的相对稳定性.本文从实验上研究了抽运能量、介质气压和透镜焦距对受激布里渊散射反射率稳定性的影响,并进行了理论分析.

2. 实 验

实验装置如图 1 所示.采用 Lambda Physik 公司生产的商品准分子激光器 LPX150 为抽运光源,输出参数为:线宽 0.5cm^{-1} 、能量 300mJ、脉宽 40ns、束散角 0.3mrad .由 LPX150 输出的 KrF 激光经过衰减片 A、分束片 BS_1 (透射光与反射光之比是 6:1)分束后,透射光由透镜 L 聚焦到 SBS 池产生斯托克斯光,反射光由能量计 E_p 来监测,可以计算出进入到 SBS 池中的抽运光的大小;产生的斯托克斯光由原路返回经过分束片 BS_1 分束后,反射光能量由能量计测得,这样可以计算出产生的斯托克斯光的能量大小.这里之所以选择分束比为 6:1 的分束片,是为了尽可能使抽运光能量减少损失,从而可以使抽运光的能量变化范围比较宽.由于分束片不能起到隔

^{*} 国家 863 惯性约束聚变主题(批准号 863-804)资助的课题.

离作用,如果返回的斯托克斯光在放大器中与抽运光脉冲相遇就会干扰抽运光的正常输出以及造成一些其他不利的影响,这里将 SBS 池与激光器之间拉长至 $8n(\gt t_p/2)$,其中 t_p 为抽运光脉冲宽度),这样斯托克斯光返回到放大器中不能与抽运光脉冲相遇,从而起到了隔离作用.实验中 SBS 介质采用的是 SF_6 气体,池长为 1.5m,口径为 $\phi 50\text{mm}$.抽运光及斯托克斯光能量是由北京物科光电技术公司的 LE-3A 型激光能量计测量.

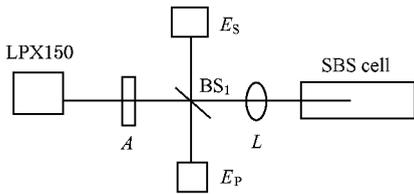


图1 实验装置图 A 为衰减片,BS₁ 为分束片, L 为聚焦透镜, E_P, E_S 为激光能量计

采用上述实验方案,调节光路.首先介质气压为 $19.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时,固定一个透镜焦距,然后调节抽运能量的大小,对抽运光和 SBS 光能量我们在每个能量点分别测得 10 个数据,这 10 个数据中抽运光和 SBS 能量是一一对应的,这样得到的 SBS 反射率的测量值是十个数据的算术平均值,从而就可计算出每个能量点的 SBS 反射率的相对稳定度(SBS 反射率相对稳定度定义为反射率的均方差与反射率的算术平均值之比),就这样通过调节抽运能量的大小,就可以得到在某透镜下的 SBS 反射率及其稳定度随抽运能量的变化规律.然后再分别改变透镜及气压,就可以得到不同透镜下 SBS 反射率及其相对稳定度的随气压和抽运能量的变化规律.抽运能量是通过加衰减片来调节,因此本实验中各抽运能量下的相对稳定度是不变的.抽运能量相对稳定度定义为抽运能量的均方差与抽运能量的算术平均值之比,实验测得 50 个抽运能量值,计算得到其相对稳定度为 2.81%.抽运能量、气压和透镜焦距的调节范围分别为 10—240mJ ($6.8—19.5$) $\times 10^5 \text{ Pa}$ 和 15—200cm.由实验测得 SBS 反射率及其相对稳定性的规律如图 2 和图 3 所示.图 2 为抽运能量在 210mJ,透镜焦距分别采用 25cm,35cm,50cm,100cm 和 200cm 时,测得 SBS 反射率及其相对稳定度随气压的变化规律.从图中可以看到气压升高 SBS 反射率增大,当气压升高到 $19.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时,SBS 反射率有所下降,这是因

为气压升高到一定程度,接近介质的饱和气压,出现了一些其他非线性效应如光学击穿等;反射率稳定度的变化趋势与反射率变化相一致,随着气压的升高,反射率稳定性越好,当气压到达 $19.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时,稳定度下降.图 3 为介质气压为 $16 \times 10^5 \text{ Pa}$,透镜焦距分别为 15cm,25cm,30cm,35cm 和 50cm 时,SBS 反射率及其相对稳定度随抽运能量的变化规律.SBS 反射率及其稳定度的变化规律也是一致的,都是随抽运能量的提高而提高,当抽运能量提高到 50mJ 左右时反射率趋于饱和,同时其稳定度也趋于平稳,接近抽运能量的稳定度.从这两个图中可以看到 SBS 反射率及其稳定性的规律有一定的对应关系,反射率越高其稳定度就越高,反之 SBS 反射率越低其稳定度就越低.

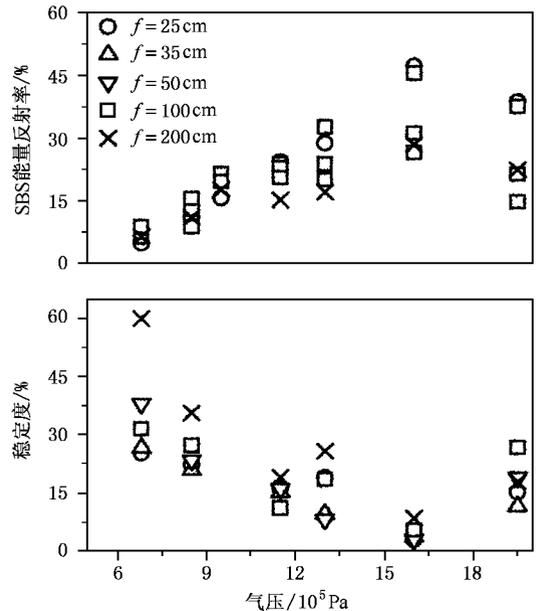


图2 SBS 反射率及其稳定度随气压的变化规律

3. 结果与讨论

由文献 [13] 可知

$$I_{l0} = \frac{1}{GL(1-R)} \ln[CR(1-R)], \quad (1)$$

其中 I_{l0} 为初始抽运光强, R 为 SBS 光强反射率(定义为后向散射光强与抽运光强之比), C 为初始光强与初始热噪声之比约等于 10^{13} , L 为 SBS 相互作用长度, G 为布里渊增益系数,它是气压的函数,记为 $G(P)$,由文献 [9] 可知其表达式为

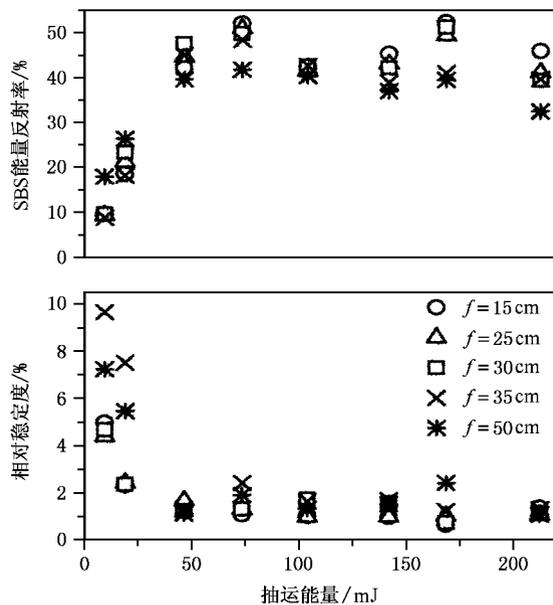


图3 SBS反射率及其稳定度随抽运能量的变化规律

$$\alpha(P) = \frac{4\pi^2 \cdot \gamma_e^2 \cdot \tau_B}{n \cdot c \cdot \lambda^2 \cdot \nu_B \cdot \rho}, \quad (2)$$

其中 γ_e , τ_B , n , ν_B , ρ , c , λ 分别为电致伸缩系数、声子寿命、介质折射率、声子速率、介质密度、光速和波长, γ_e , τ_B , n , ν_B , ρ 是气压的函数, 给定气压, 由(2)式可计算出增益 $\alpha(P)$.

假设反射率的不稳定因素主要是由抽运光强和气压的起伏引起的, 忽略其他因素的影响, 方程(1)两边对 R 求微分, 得到

$$\frac{\partial R}{R} = \frac{(1-R)^2 I_{L0} L P}{R \ln[CR(1-R)] + (1-2R)} \times \left(\frac{\alpha(P)}{P} \cdot \frac{\partial I_{L0}}{I_{L0}} + \frac{d\alpha(P)}{dP} \cdot \frac{\partial P}{P} \right), \quad (3)$$

忽略气压波动 $\left(\frac{\partial P}{P}\right)$ 对 SBS 反射率的影响, 则有

$$\frac{\partial R}{R} \approx \frac{(1-R)^2 \alpha(P) I_{L0} L}{R \ln[CR(1-R)] + (1-2R)} \cdot \frac{\partial I_{L0}}{I_{L0}}. \quad (4)$$

定义反射率的相对稳定度为 $\frac{\partial R}{R}$, 抽运光强(或抽运能量)的相对稳定度为 $\frac{\partial I_{L0}}{I_{L0}}$, SBS 反射率相对稳定度与抽运光强相对稳定度之比 $\frac{\partial R}{R} / \frac{\partial I_{L0}}{I_{L0}}$ 定义为 σ , 则 σ 为

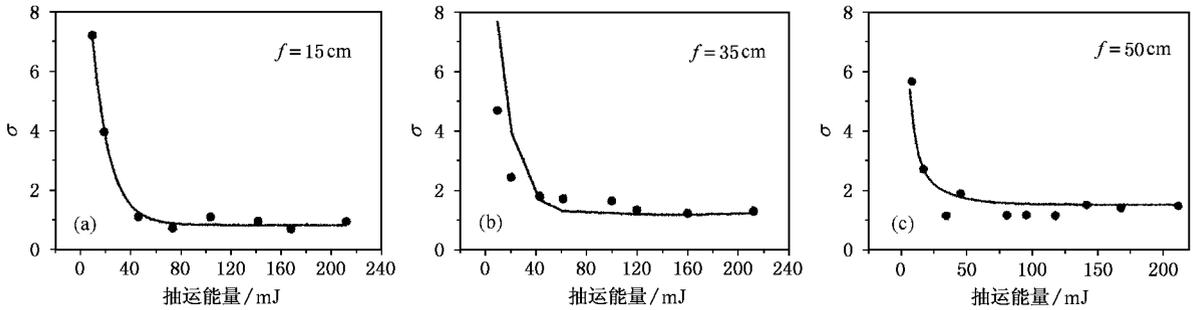
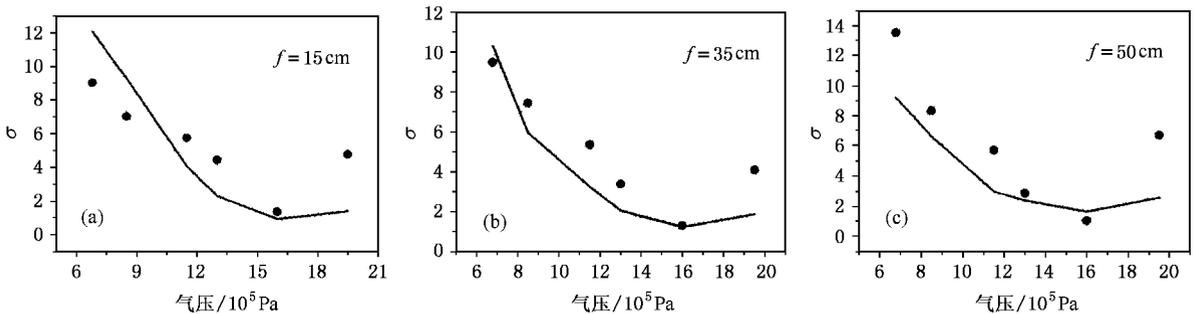
$$\sigma \approx \frac{(1-R)^2 \alpha(P) I_{L0} L}{R \ln[CR(1-R)] + (1-2R)}. \quad (5)$$

由(5)式可见 SBS 反射率相对稳定度与抽运光

强相对稳定度之比 σ 除了受 G , I_{L0} , L 的影响外, 与反射率本身还有内在的联系, 而反射率也是由 G , I_{L0} , L 决定的, 因此 SBS 反射率稳定度是由 G , I_{L0} , L 作用的综合结果. 由于(1)式的理论模型中没有考虑到带宽的因素, 而本实验中采用的抽运光源为宽带, 因此为了使(5)式更合理, 计算 σ 所用的反射率 R 值采用的是实验数据. 下面分别讨论 σ 与抽运能量、介质气压和透镜焦距的关系.

3.1. 抽运能量对 SBS 反射率稳定性的影响

由于抽运光强的波动引起 SBS 的波动, 这一波动大小受抽运光强(或抽运能量)大小的影响. 这里讨论抽运能量对 SBS 反射率稳定性的影响. 按照(5)式计算介质气压为 16×10^5 Pa、透镜焦距分别采用 15cm, 35cm 和 50cm 时, σ 随抽运能量的变化规律如图 4 所示, 可以看到理论计算结果与实验结果符合得很好, 当抽运能量在阈值附近时, 反射率的波动很大, 随着抽运能量的提高, 反射率稳定性提高得很快, 当抽运能量达到 50mJ 左右时, 反射率稳定性趋于平稳, 这是因为抽运光聚焦到 SBS 池, 在池中形成一个高度不均匀的光强分布, 产生了由噪声引起的 Stokes 光波场和声子场, 由抽运光、Stokes 光及声子场的相互作用, Stokes 光与抽运光相向传播, 抽运光能量向 Stokes 光转移, Stokes 光强 I_s 呈现非线性放大, 从而转换效率非线性增长; 当抽运能量很低时, Stokes 光在阈值附近, Stokes 光强比较弱, 此时噪声很大, Stokes 光强的波动 ΔI_s 特别大, 远远高于抽运光强的波动值, 随着抽运光强的增长, 一方面使 Stokes 光强呈 e 指数非线性增长, 其绝对波动值 ΔI_s 也是非线性增长, 其绝对稳定性下降, 另一方面由于 Stokes 光强 I_s 的增大使得 $\Delta I_s / I_s$ 下降, 也就是 Stokes 光强相对稳定度提高, 由于 I_s 呈 e 指数上升, 两方面作用综合的结果是: ΔI_s 的增长速度赶不上 I_s 的增长度, $\Delta I_s / I_s$ 下降, Stokes 光强相对稳定度提高. 又由于反射率的相对稳定度与 Stokes 光强的相对稳定度成正比, 因此随着抽运能量(抽运功率密度)的提高, 反射率的相对稳定度提高. 当抽运能量进一步提高, Stokes 光强的增长速减慢, 随抽运光强的提高接近于线性增长, SBS 反射率接近饱和, 这时 Stokes 光强的相对稳定度接近于定值, 因而反射率的相对稳定性接近于抽运光强的相对稳定性, 使得 σ 接近于 1.

图 4 SBS 反射率相对稳定性与抽运光强相对稳定性之比 σ 随抽运能量的变化规律图 5 SBS 反射率相对稳定性与抽运光强相对稳定性之比 σ 随介质气压的变化规律

3.2. 气压对 SBS 反射率稳定性的影响

调节介质气压的变化研究 SBS 反射率的波动性.按照(5)式计算抽运能量为 210mJ、透镜焦距分别为 15cm、35cm 和 50cm 时, σ 随气压的变化规律如图 5 所示,可以看到理论曲线与实验结果比较符合,气压升高 SBS 反射率的稳定性提高,当气压提高到 16×10^5 Pa 时, SBS 反射率稳定性最高,当气压继续升高, SBS 反射率波动性变大.这是因为在小信号情况下 Stokes 光强随 GIL 因子(其中 G 为增益系数, I 为抽运光强, L 为 SBS 相互作用长度)呈 e 指数非线性增长,当气压较低时,虽然抽运光强比较高,但介质增益系数比较小, GIL 因子很小,因此 Stokes 光强较小,相比之下噪声较大,此时波动很大,当介质气压升高,介质增益系数增大, Stokes 光强增长得很快,同样一方面使 ΔI_s 提高,另一方面使 $\Delta I_s/I_s$ 下降,总的结果表现为使得 Stokes 光强的相对稳定性提高,反射率相对稳定性得到提高;当气压升高到 16×10^5 Pa 时, SBS 反射率的稳定性接近抽运光强的相对稳定性;当气压进一步升高, SBS 反射率开始下降,这是因为其他非线性效应竞争的影响,使 I_s 增长速度减慢, SBS 反射率下降,使 $\Delta I_s/I_s$ 升高, Stokes

光强的相对稳定性下降, SBS 反射率相对稳定性降低.

3.3. 透镜焦距对 SBS 反射率稳定性的影响

透镜焦距的改变相当于抽运功率密度和相互作用长度同时改变,由 $I = \frac{4 \cdot E}{\pi \cdot t \cdot (f \cdot \theta)^2}$ 中可以看到功率密度与透镜焦距的平方成反比,相互作用长度与透镜焦距有关.在气压为 16×10^5 Pa、抽运能量为 210mJ 时,计算得到如图 6 所示的 σ 随透镜焦距变化的规律曲线.从中看到理论曲线与实验数据符合得很好,当透镜焦距较短时, SBS 反射率稳定性较差;当透镜焦距较长时,稳定性也比较差;只有当透镜焦距在 15—50cm 的范围内,稳定性比较高.这主要是因为当透镜焦距较短(小于 10cm)时,虽然抽运功率密度较大,但相互作用长度较短,产生的 SBS 较弱,同样的道理, SBS 反射率相对稳定性下降;当透镜焦距较长(100cm 和 200cm)时,抽运功率密度降低,由上面的理论可知反射率稳定性下降;当透镜焦距在 15—50cm 的范围内时,抽运功率密度比较高,相互作用长度又比较长,所以对产生 SBS 很有利, SBS 稳定性也就随之提高.

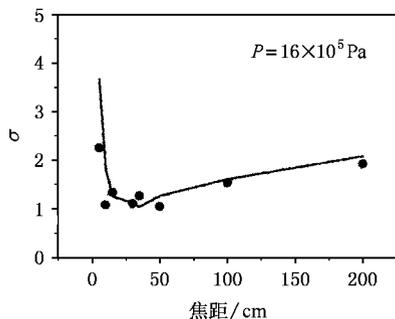


图6 透镜焦距对SBS反射率稳定度的影响

4. 结 论

本文从理论和实验上详细的研究了实验参数(抽运能量、介质气压和透镜焦距)对SBS反射率稳定性的影响,发现SBS反射率越高其稳定性越好.经过分析发现SBS反射率的稳定性实际上是由 G ,

I_{L0} , L 决定的,当 G , I_{L0} , L 满足一定的条件时,可以获得稳定的SBS输出.通过优化实验参数可以满足 G , I_{L0} , L 的要求.

1. 抽运能量(或抽运功率密度)大于5倍SBS阈值抽运能量(或抽运功率密度).

2. 对于气体介质的情况,在不接近饱和气压的情况下,介质增益系数越大越好.如果介质气压变化,增益系数存在极大值,也可以通过求极值的方法找最佳气压点.

3. 透镜焦距的变化相当于相互作用长度和抽运功率密度同时改变,透镜焦距不能太长,否则抽运功率密度过低,透镜焦距也不能太短,否则相互作用长度太短,影响SBS的稳定性.根据理论和实验结果表明透镜焦距应选择在15—50cm的范围内.

实验参数的这种优化结果不但提高了SBS反射率稳定度,而且还提高了SBS反射率,同时可获得稳定的、高效的SBS,这对实际应用非常有利.文中的稳定性的计算方法对于实际应用也有一定的借鉴作用.

- [1] Shir-Ichi Aouki, Hisatomo Miyata, Tamiko Ohshima *et al* 2002 *Thin Solid Films* **407** 126
- [2] Paufler J, Brunn St, Komer T, Kuhling F 2001 *Microelectronic Engineering* **57-58** 31
- [3] Gary JL 1994 *SPIE* **2117** 154
- [4] Li C Y *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 814 (in Chinese) [李昌勇等 2002 物理学报 **51** 814]
- [5] Liang Z J *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 252 (in Chinese) [梁志坚等 2000 物理学报 **49** 252]
- [6] Gao H 1998 *Chin. Phys.* **7** 126
- [7] Sun X D, Feng YU W, Jiang Y YU *et al* 1998 *Chin. Phys.* **7** 443
- [8] Lü Z W *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1286 (in Chinese) [吕志伟

等 2002 物理学报 **51** 1286]

- [9] Offenberger A A, Thompson D C, Fedosejevs R *et al* 1993 *IEEE J. Quantum Electron* **29** 207
- [10] Takahashi E, Kuwahara K, Matsumoto Y *et al.* 2000 *Optics Communications* **185** 431
- [11] Andreye N F, Khazanov E A, Palashov O V *et al.* 1994 *J. Opt. Soc. Am. B* **11** 786
- [12] He W M *et al* 1996 *Acta Optica Sinica* **16** 1431 (in Chinese) [何伟明等 1996 中国激光 **16** 1431]
- [13] Lin D Y *et al* 1997 *High Power Laser and Particle Beams* **9** 70 (in Chinese) [林殿阳等 1997 强激光与粒子束 **9** 70]

A study on the stability of stimulated Brillouin scattering for KrF laser *

Lü Zhi-Wei Wang Xiao-Hui Lin Dian-Yang Wang Chao Zhao Xiao-Yan

(Institute of Opto-Electronics , Harbin Institute of Technology , Harbin 150001 ,China)

Tang Xiu-Zhang Zhang Hai-Feng Shan Yu-Sheng

(China Institute of Atomic Energy , Beijing 102413 ,China)

(Received 17 July 2002 ; revised manuscript received 28 August 2002)

Abstract

The stability of reflectivity of stimulated Brillouin scattering (SBS) for KrF laser, which is caused by the fluctuation of pump power density, depends on experimental parameters including the pump energy, pressure of the medium and focal length. The stable SBS output can be obtained when the following conditions are satisfied: the pump energy exceeds 5 times the threshold energy, the SF₆ pressure is 16×10^5 Pa and the focal length is within 15—50cm. It is also discovered that the stability of SBS reflectivity is increased with the SBS reflectivity. The stability of SBS reflectivity is in fact determined by *GIL*. The theoretical calculation results are consistent with the experimental results.

Keywords : KrF laser , stimulated Brillouin scattering , reflectivity stability

PACC : 4265C , 4265F

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 863-804).