

宽带 KrF 激光抽运的受激布里渊散射反射率研究^{*}

王晓慧^{1)†} 吕志伟¹⁾ 林殿阳¹⁾ 王超¹⁾ 汤秀章³⁾ 龚坤³⁾ 单玉生³⁾

1) 哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 哈尔滨 150001)

2) 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081)

3) 中国原子能科学研究院, 北京 102413)

(2005 年 4 月 21 日收到, 2005 年 6 月 20 日收到修改稿)

实验上研究了宽带 KrF 激光抽运的受激布里渊散射(SBS)随抽运功率密度、介质气压和透镜焦距这三个实验参数的变化规律. 在较低的抽运功率密度情况下, SBS 反射率随抽运功率密度呈非线性增长; 当抽运功率密度提高到一定程度, SBS 反射率接近饱和; 当功率密度继续增大, SBS 反射率随之下降. 介质气压提高能够促进 SBS 的转换. 透镜焦距长度的变化使 SBS 饱和和反射率存在一峰值. 理论上建立了宽带多模 SBS 模型, 数值模拟结果与实验结果符合得很好, 解释了宽带 SBS 反射率对实验参数的变化规律.

关键词: 宽带, KrF 激光, 受激布里渊散射(SBS), 反射率

PACC: 4265C, 4265F

1. 引 言

受激布里渊散射(SBS)相位共轭技术由于具有光束畸变修正、光束质量改善和激光脉冲压缩等特性, 可以广泛地应用于光学信息处理、图像传输、滤波以及高能激光系统等领域中, 但这些特性实验上多数是在窄带情况下^[1-8]得到的, 而很多高能激光器例如 XeF, HF, DF, KrF, XeCl 和 CO₂ 等激光器都是在宽带情况下运行的, 并且宽带激光在一些激光应用中(如激光打靶)能够抑制等离子区域的不稳定性^[9], 因此宽带 SBS 相位共轭技术研究吸引了人们的注意^[10-12].

20 年来, 关于宽带 SBS 反射率是否下降以及其与抽运功率密度的依赖关系问题进行了一些研究. 1996 年 Cook 等人^[13]利用连续可调带宽(130MHz—500GHz)的染料激光器进行了实验研究, 得到带宽增加 SBS 反射率减小, 阈值增大. 1982 年 Gower^[14, 15]实验上研究了 KrF 激光抽运的 SBS 反射率, 正己烷介质作为 SBS 介质, 结果是抽运功率密度增加 SBS 反射率随之下降, 文中分析是非线性效应竞争引起的. Perrone 等人^[16-19]报道了宽带 XeCl 激光抽运的 SBS 实验研究, 在单线(3079.8)和双线抽运的情况

下, 抽运能量 2mJ 产生 SBS 最大能量反射率分别为 30% 和 20%; 1994 年他们利用带宽 37GHz 和 75GHz 的光源在介质环己烷液体中获得 SBS 峰值功率密度反射率分别为 90% 和 60%, 当抽运功率密度 > 10GW/cm² 时, 带宽 37GHz 的反射率随抽运功率密度仍然呈上升趋势, 而带宽为 75 GHz、功率密度提高到 18GW/cm² 时反射率趋于稳定, 当抽运功率密度 > 50GW/cm² 时反射率呈下降趋势. 在介质环乙烷中也发现了同样的变化趋势, 这个现象与 Gower 的研究结果相近. 目前关于宽带 SBS 反射率出现的上述现象都还没有定量的解释.

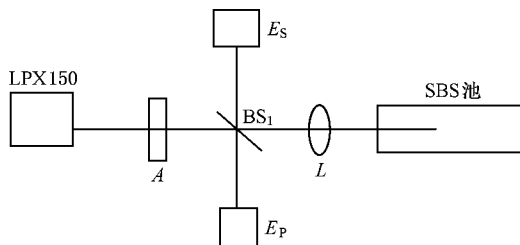


图 1 低能量下 SBS 实验装置图 (A 为衰减片, BS₁ 为 T:R = 6:1 分束片, L 为聚焦透镜, E_p, E_s 为激光能量计)

本文实验上研究抽运功率密度、介质气压和透镜焦距对宽带 KrF 激光抽运的 SBS 反射率的影响,

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

[†] E-mail: xhw@mail.nsoas.gov.cn

进而从理论上定量地分析这些因素影响宽带 SBS 反射率变化的原因.

2. 实 验

2.1. 低能量下实验

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 , 由透镜 L 聚焦到 SBS 池, 产生的斯托克斯光由原路返回经过分束片 BS_1 分束后测得. 为了防止 SBS 光脉冲再次进入放大器放大, 将 SBS 与激光器之间拉长至 8m . 分束片 BS_1 采用的分束比 (透射光与反射光之比) 是 $6:1$. 实验中 SBS 介质采用的是 SF_6 , 池长为 1.5m , 口径为 50mm . 抽运光能量 E_p 和 SBS 能量 E_s 用北京物科光电技术公司的 LE-3A 型激光能量计测量.

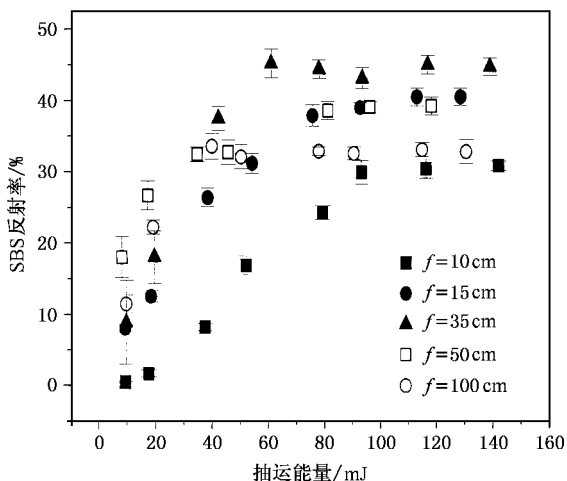


图 2 在不同的透镜焦距下 SBS 反射率随抽运能量的变化规律

在介质气压为 1.6MPa 、聚焦透镜分别采用 $10, 15, 35, 50$ 和 100cm 时, 测得 SBS 反射率随抽运能量

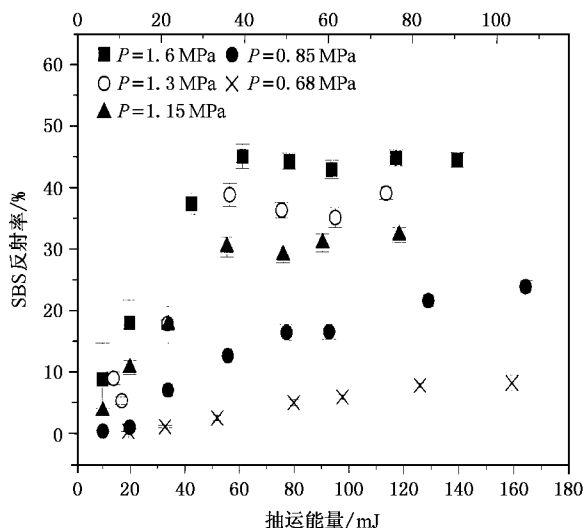


图 3 不同气压下 SBS 反射率随抽运能量的变化规律

(或功率密度)的变化规律如图 2 所示, 可以看到当抽运能量(或功率密度)较低时, SBS 增长得较快, 当抽运能量达到 40mJ 左右时反射率增长缓慢, 然后趋于稳定, 接近饱和; 不同的透镜焦距长度对 SBS 反射率有一定的影响, 当透镜焦距较长和较短时, SBS 反射率都比较低, 当透镜焦距为 35cm 时, SBS 饱和反射率最高, 透镜焦距长度在 $10, 15, 35, 50$ 和 100cm 的范围变化时, 饱和反射率分别为 $32\%, 41\%, 45\%, 40\%$ 和 33% 左右. 在透镜焦距为 35cm 、介质气压分别为 $1.6, 1.3, 1.15, 0.85, 0.68\text{MPa}$ 时, 测得抽运能量(或功率密度)对 SBS 反射率的影响如图 3 所示, 可以看到气压增大, SBS 反射率随之增大, 相应 SBS 饱和反射率分别为 $45\%, 38\%, 32\%, 25\%$ 和 10% 左右.

2.2. 高能量下 SBS 实验

实验装置如图 4 所示, 激光器由前端(放电抽运的 KrF 激光器 LPX150)、预放(电子束抽运的 KrF 激光器)和主放(电子束抽运的 KrF 激光放大器)组成, 由前端 LPX150 输出的种子光经过预放和主放放大后, 光束经过光阑和衰减片后入射到 SBS 介质中, 经过分束片分出的 Stokes 光由 E_s 能量计接收.

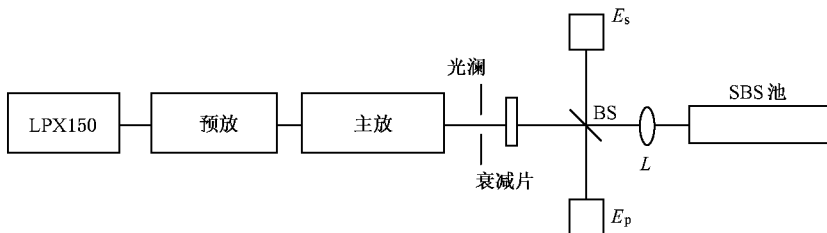


图 4 高能量下 SBS 实验装置示意图

由主放输出的光束光斑直径为 80mm,实验用镀膜镜片直径为 50mm,为使二者尺寸匹配,测量输入与输出的关系,采用一滤光光阑使光束光斑缩小,满足实验的需要. SBS 介质采用 SF₆,介质气压为 0.85MPa,透镜焦距为 2m,池长 4m,测得高能量下 SBS 反射率如图 5 所示,图中实心圆点为实验数据点. 可以看到在高能量、长焦距下随着抽运能量的提高 SBS 反射率出现下降的趋势.

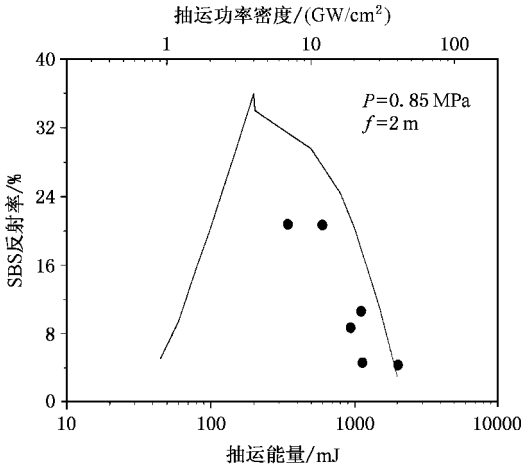


图 5 SBS 反射率随抽运能量的变化规律

3. 理论模型

为了分析上述实验结果,建立如下理论模型.

从 Maxwell 方程、波动方程和 Navier-Stokes 方程出发,假设电场振幅在空间上是慢变化的,采用慢变化近似,略去空间二阶导数,忽略时间二阶微分项,就可以获得 SBS 耦合波方程.由耦合波方程,不考虑抽运光线宽,采用一维瞬态数值模拟,就能得到窄带 SBS 反射率与入射抽运能量 E_0 的函数关系 $R(E_0)$.

假设 KrF 激光光谱为洛伦兹线形,对于带宽为

$\Delta\nu_N$ 的激光线形为 $g(\nu) = \frac{\Delta\nu_N/2\pi}{(\nu - \nu_0)^2 + (\Delta\nu_N/2)^2}$, 其

中 ν_0 为中心频率.假设宽带 KrF 激光光谱是由若干窄带 $\Delta\nu_i$ ($\Delta\nu_i \leq \Delta\nu_B$, $\Delta\nu_B$ 为布里渊线宽)组成的,各窄带产生 SBS 是相互耦合的,但又具有一定的独立性,当宽带抽运能量为 E 时,每个窄带 $\Delta\nu_i$ 的能量 $E_i = C \cdot (E - E_a) \cdot g(\nu_i) \cdot \Delta\nu_i$, 其中 C 为各独立谱线之间的耦合系数,考虑到光学击穿吸收的能量 E_a , 相应 E_i 产生的反射率为 $R(E_i)$, 则当宽带抽运能量为 E 时, SBS 反射率为

$$R = \sum_{-\infty}^{\infty} \frac{\alpha(E - E_a)g(\nu_i)R(E_i)\Delta\nu_i}{E}, \quad (1)$$

这里

$$E_a = \frac{\pi e^2 r_0^2 \tau_p k_1 \rho_{00}}{mc\epsilon p} \cdot I_0 \times \int_{-L}^L \exp\left[\left(\frac{k_1}{\xi} \frac{2e^2}{mc\epsilon \left(1 + \left(\frac{z}{za}\right)^2\right)} I - g\right) \tau_p\right] \times dz, \quad (2)$$

其中 $r_0 = f\theta/2$, $z_a = \frac{\pi \cdot r_0^2}{\lambda}$, λ 为激光波长, c 为真空中的光速, ϵ 为介电常数, ρ_{00} 为初值电子密度, η 为电离速率, g 为电子损失速率, τ_p 为激光脉宽, e 和 m 分别为电子的电荷和质量, ξ 为原子分子的电离能, I_0 为初始光强, θ 为激光发散角, f 为透镜焦距, $2L$ 为光学击穿长度. 详见文献[11]. 这里 KrF 激光在 SF₆ 气体中(气压在 0.5—1.6MPa)的击穿阈估算^[20] 为 4GW/cm².

4. 分析和讨论

利用上述理论模型,按照同样的实验条件数值模拟了 SBS 反射率随抽运功率密度的变化规律,如图 5 至图 7 所示,图中实线为数值模拟曲线,实心圆点为实验数据点,其中图 6 和图 7 的计算参数分别与图 2 和图 3 的实验参数相同. 可以看到图 6 和图 7 中的数值模拟结果与实验结果符合得很好,在能量较低时 SBS 反射率上升得较快,当能量提高到一定程度时, SBS 反射率提高得非常缓慢,趋于平稳,接近饱和,但饱和值明显地低于窄带 SBS 饱和反射率. 图 5 中的数值模拟曲线与实验结果变化的趋势是一致的,高能量下 SBS 反射率随能量的升高而下降,但有一些偏差,原因是实验中的数据点测量的数量少,误差较大.

为进一步解释实验现象,下面分别在窄带、宽带(不考虑光学击穿)和宽带(考虑光学击穿)这三种情况下数值模拟抽运功率密度对 SBS 反射率影响的变化规律,与实验结果比较如图 8(a)所示. 实验参数采用的是透镜焦距为 35cm、气压为 1.6MPa、池长为 1.5m. 图 8(a)中曲线 1 不考虑带宽,即由 $R(E_0)$ 计算得到的数值模拟 SBS 反射率曲线;曲线 2 为没有考虑到光学击穿时宽带 SBS 数值模拟曲线,即假设没有发生光学击穿时利用(1)式得到;曲线 3 是考虑到光学击穿时宽带 SBS 数值模拟曲线,即利用(1)式

计算得到.从数值模拟曲线看出不管是否考虑光学击穿,宽带 SBS 反射率增长速度明显低于窄带的增长速度,低能量下两种宽带模拟曲线都比较符合实验结果,当抽运能量进一步升高的情况下,不考虑光学击穿的模拟曲线将继续上升,没有出现饱和趋势,

考虑光学击穿的曲线上升的速度明显减慢,趋于饱和,并且与实验结果比较相符,说明考虑光学击穿时宽带 SBS 模型的假设是合理的.这一点从图 6 和图 7 中也得到了证实.

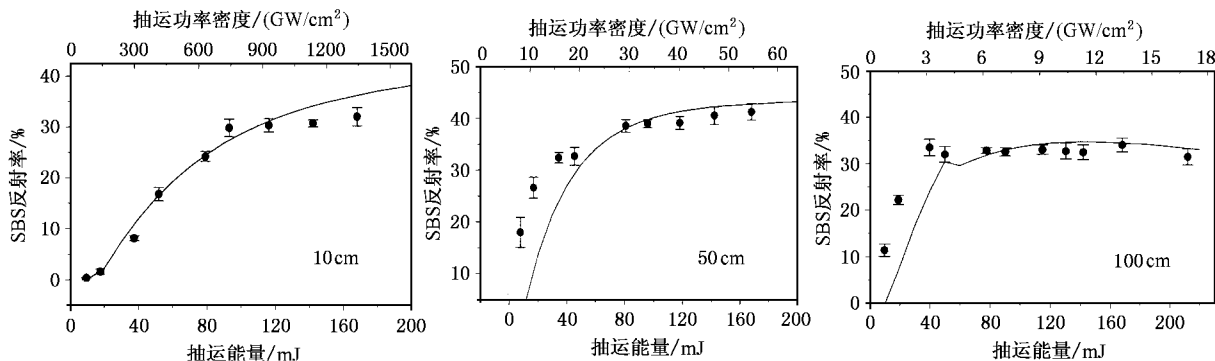


图 6 不同透镜焦距下 SBS 反射率随抽运能量(功率密度)变化曲线

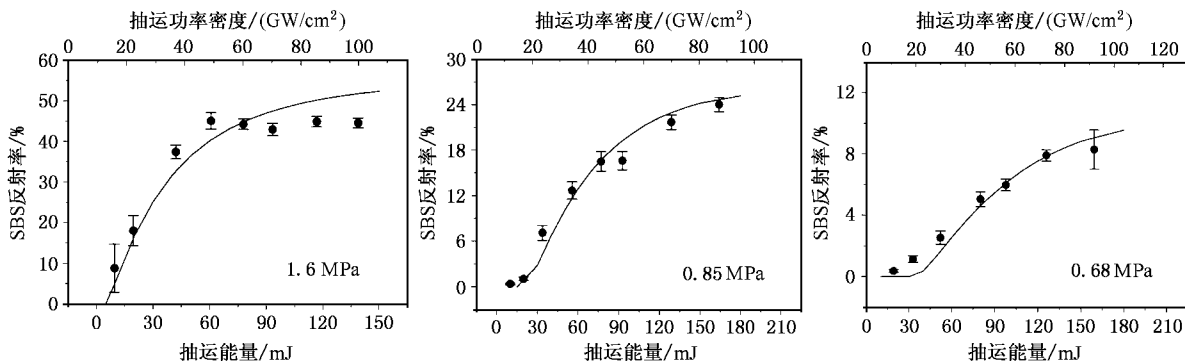


图 7 不同气压下 SBS 反射率随抽运能量(功率密度)的变化规律

与窄带 SBS 反射率相比,在抽运功率密度提高时宽带 SBS 反射率增长速度慢的原因是宽带中包含若干窄带谱线,宽带功率密度(能量)是这些窄带谱线的功率密度(或能量)之和,由于 SBS 转换效率是非线性的,对于一定的功率密度或能量,宽带中每个窄带谱线所分布的功率密度(或能量)比较低,虽然各窄线之间存在一定的耦合作用,但宽带中各窄线 SBS 转换效率大大降低,因而整个宽带 SBS 的转换效率就会明显低于窄带 SBS 的转换效率.

当抽运功率密度(或抽运能量)增加到一定值时,宽带 SBS 反射率趋于平稳,接近饱和,而饱和值明显低于窄带 SBS 反射率,这主要是由光学击穿造成的.为了清楚地了解 SBS 与光学击穿的竞争的情况请看图 8 (b)所示,图中曲线 1 是没有考虑到光学击穿时转换成 Stokes 光的能量,曲线 2 为光学击穿

吸收的能量,曲线 3 是考虑到光学击穿吸收时转换成 Stokes 光的能量,可以看出当功率密度比较小时,光学击穿吸收能量速度比 Stokes 光能量增长的速度慢,对 SBS 的影响非常小,当功率密度增大时,光学击穿吸收的速度接近 SBS 能量增长的速度,此时光学击穿吸收的能量较大,使转换 Stokes 的速度明显受到影响,使得 SBS 转换效率处于一个平稳的阶段,即 SBS 反射率进入饱和区,当抽运能量进一步提高时,光学击穿的吸收速度超过了 SBS 增长速度,使得 Stokes 转换效率受到抑制,致使反射率下降,就会出现图 5 中的实验结果,抽运功率密度提高 SBS 反射率下降,当抽运功率密度继续升高,光学击穿吸收了全部的能量,将不会产生 SBS.

从以上实验及理论曲线中还发现气压和透镜焦距对 SBS 反射率都有一定的影响.透镜焦距的长短

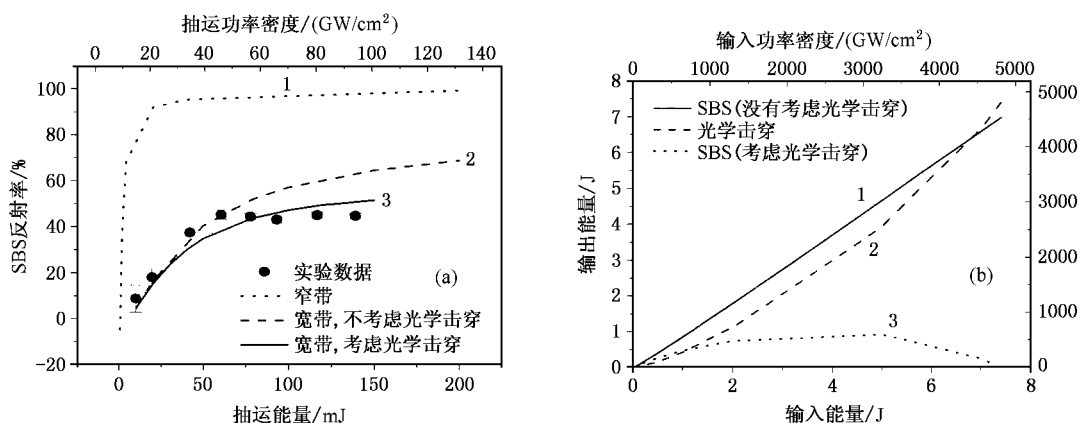


图 8 (a)窄带 SRS 数值模拟与宽带 SRS 数值模拟的比较 (b)Stokes 能量与光学击穿吸收的能量对比

一方面可以使抽运功率密度和 SRS 有效相互作用长度发生变化,另一方面,由于光学击穿的竞争使得产生 SRS 的抽运能量发生变化,最终导致 SRS 反射率发生变化.先分析透镜焦距使抽运功率密度和 SRS 相互作用长度的变化,透镜焦距增加使抽运功率密度下降,SRS 有效相互作用长度增加,但抽运功率密度下降的幅度大于 SRS 有效相互作用长度增加的幅度,使得 SRS 转换下降.另一方面由于光学击穿的竞争,当透镜焦距很短时,虽然发生光学击穿的抽运能量比较低,但此时焦点处功率密度很高,光学击穿吸收的能量大,使短焦透镜 SRS 反射率下降,当透镜焦距较长时,焦点处功率密度并不是很高,但长焦透镜一旦发生光学击穿,光学击穿吸收的能量比较高,使得长焦透镜反射率下降.因此通过上述两方面的影响使得 SRS 反射率在透镜焦距长度在 10—100cm 范围内饱和值有些差别,在透镜焦距长度 35cm 处,SRS 反射率存在一峰值.

介质气压的影响表现对介质增益的影响上,气压升高使介质增益增大,Stokes 光与抽运光相互作用增强,对 Stokes 光强转换有利,SRS 转化效率也就随之升高.

从以上理论和实验结果也可以看到光学击穿的竞争影响到宽带 KrF 激光 SRS 转换效率,抽运功率密度越高,影响越严重.出于实际利用 SRS 改善宽带 KrF 激光光束质量的需求,避免光学击穿产生,功率密度不应该太高,当气压在 1MPa 以上、透镜焦距在 30—50cm 之内,可以产生较为理想的 Stokes 光.

5. 讨论结果

1)对于带宽 0.5cm^{-1} KrF 激光,实验得到 SRS 在

SF_6 气体介质中、气压 0.6—1.6MPa 的范围内阈值在 2—12 GW/cm^2 的范围内.而同样条件下 KrF 激光击穿阈值为 $4\text{GW}/\text{cm}^2$ 左右.SRS 产生的时间 0.6—1.7ns,光学击穿产生时间 4ns 左右.说明宽带 KrF 激光中 SRS 比光学击穿产生的快.

2)宽带 SRS 转换效率低于窄带的原因是抽运光源宽带谱线包括若干窄带谱线,同样的功率密度情况下分配到每个窄带谱线的功率密度将会下降,使整个宽带谱线 SRS 转换效率下降.

3)从图 8(a)中可以看到,窄带时,SRS 阈值低,抽运能量很快就转换成 Stokes 光,没有发生光学击穿的条件,而宽带 SRS 阈值与光学击穿接近,转换效率又低,光学击穿的竞争使得宽带 SRS 饱和反射率低于窄带情况.

4)从数值模拟和实验得到介质气压、透镜焦距的长度和抽运能量对 SRS 转换效率有影响,直接影响到 SRS 增益系数,对 SRS 的产生有一定的影响.透镜焦距长度的变化一方面影响 SRS 有效相互作用长度和抽运功率密度,另一方面影响光学击穿的吸收,对 SRS 转换效率比较敏感,在透镜焦距长度 10—100cm 的范围内,SRS 饱和反射率出现一峰值.

6. 结 论

本文从实验上和理论上分别研究了抽运功率密度、介质气压和透镜焦距对宽带 SRS 反射率的影响.发现宽带 SRS 转换效率、饱和反射率明显地低于窄带情况,原因是抽运光源宽带谱线包括若干窄带谱线,同样的功率密度情况下分配到每个窄带谱线的功率密度将会下降,使整个宽带谱线 SRS 转换效率

下降,同时由于存在着光学击穿的竞争,使得宽带 SBS 转换效率处于平稳阶段,饱和反射率低于窄带情况,在高功率下,光学击穿吸收能量的速度远大于转换 Stokes 光的速度,使得 SBS 反射率随功率密度的提高出现下降的趋势.介质气压直接影响到 SBS

增益系数,对 SBS 的产生有一定的影响.透镜焦距长度的变化一方面影响 SBS 有效相互作用长度和抽运功率密度,另一方面影响光学击穿的吸收,对 SBS 转换效率比较敏感,在透镜焦距长度 10—100cm 的范围内,SBS 饱和反射率出现一峰值.

- [1] Lü Z W , Ding Y C , He W M 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1286 (in Chinese) [吕志伟、丁迎春、何伟明 2002 物理学报 **51** 1286]
- [2] Ding Y C , Lü Z W , He W M 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2767 (in Chinese) [丁迎春、吕志伟、何伟明 2002 物理学报 **51** 2767]
- [3] Ding Y C , Lü Z W , He W M 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2165 (in Chinese) [丁迎春、吕志伟、何伟明 2003 物理学报 **52** 2165]
- [4] He W M , Yang J , Lü Y L , Lü Z W , 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 472 (in Chinese) [何伟明、杨 吕月兰、吕志伟 2004 物理学报 **53** 472]
- [5] Lü Y L , Lü Z W , Dong Y K 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2174 (in Chinese) [吕月兰、吕志伟、董永康 2004 物理学报 **53** 2174]
- [6] Lü Z W , Lü Y L , Yang J 2003 *Chin. Phys.* **12** 507
- [7] Hasi W L J , Lü Z W , He W M *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 748 (in Chinese) [哈斯乌力吉、吕志伟、何伟明等 2005 物理学报 **54** 748]
- [8] Guo S F , Lu Q S , Cheng X AI *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1835 (in Chinese) [郭少锋、陆启生、程湘爱等 2004 物理学报 **53** 1835]
- [9] Deanna M P , Mark A H , Russell B W *et al* 1995 *SPIE.* **2633** 214
- [10] Lü Z W , Wang X H , Lin D Y *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1184 (in Chinese) [吕志伟、王晓慧、林殿阳等 2003 物理学报 **52** 1184]
- [11] Wang X H , Lü Z W , Lin D Y *et al* 2004 *Chin. Phys.* **13** 1733
- [12] Valley C G. 1986 *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-22** 704
- [13] Cook G , Ridley K D 1996 *Optics Communications* **9** 15
- [14] Gower M C 1982 *Opt. lett.* **7** 423
- [15] Gower M C. 1982 *Opt. lett.* **7** 162
- [16] Perrone M R , Yao T B 1994 *IEEE J. Quantum Electron.* **30** 1327
- [17] Filippo A A , Perrone M R 1992 *Optics Communications* **91** 395
- [18] Filippo A A , Perrone M R 1994 *IEEE J. Quantum Electron.* **28** 1850
- [19] Perrone M R , Yao Y B. 1994 *Appl. Phys. Lett.* **64** 19
- [20] Wang X J 1995 *High Power Laser and Particle Beams* **7** 68 (in Chinese) [王孝军 1995 强激光与粒子束 **7** 68]

Stimulated Brillouin scattering reflection pumped by broadband KrF laser^{*}

Wang Xiao-Hui^{1,2)†} Lü Zhi-Wei¹⁾ Lin Dian-Yang¹⁾ Wang Chao¹⁾
Tang Xiu-Zhang³⁾ Gong Kun³⁾ Shan Yu-Sheng³⁾

1) *Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*

2) *National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China*

3) *China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China*

(Received 21 April 2005 ; revised manuscript received 20 June 2005)

Abstract

Stimulated Brillouin scattering (SBS) reflectivity as a function of pump power density, pressure of medium and focal length for broadband KrF laser pump was investigated experimentally. SBS reflectivity increases nonlinearly, approaches to saturation and decreases with the pump power density increasing. The pressure in the medium makes the SBS reflectivity to increase. SBS saturation has a peak value with the focal length from 10cm to 100cm. Broadband multimode SBS model has been built theoretically. Experimental results agree well with the model.

Keywords : broadband, KrF laser, stimulated Brillouin scattering (SBS), reflectivity

PACC : 4265C, 4265F

^{*} Project supported by the National High Technology Inertial Confinement Fusion Foundation of China (Grand No. 863-804).

[†] E-mail : xhw@mail.nsoas.gov.cn