

文章编号: 0258-7025(2005)02-0204-05

# 受激热散射与布里渊散射的竞争 及其共轭特性

刘安玲, 张为俊, 高晓明, 杨 颢, 屈 军, 裴世鑫, 樊 红, 李伟正, 雷丽巧

(中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光谱实验室, 安徽 合肥 230031)

**摘要** 研究了因掺杂硝酸铜而具有不同吸收系数的丙酮液体作为主振荡功率放大(MOPA)系统相位共轭镜时, 液体中受激热散射(STS)与受激布里渊散射(SBS)之间的竞争及其相位共轭输出特性。结果显示, 随着吸收系数的增加, 受激热瑞利散射(STRS)将抑制受激布里渊散射或受激热布里渊散射(STBS)而成为主导过程, 且其增益随着吸收系数的增加而增加, 能量相对起伏随着吸收系数的增加而降低; 由于阈值效应, 弱抽运时受激热瑞利散射与受激布里渊散射一样将丢失原始波前中较弱的相位信息; 在适当的吸收系数和抽运条件下利用吸收液体中的受激热瑞利散射获得高品质相位共轭是完全可能的。

**关键词** 非线性光学; 相位共轭; 受激热散射; 受激布里渊散射

**中图分类号** O 414. 14 **文献标识码** A

## Competition between Stimulated Thermal and Brillouin Scattering and Its Phase Conjugation Characteristic

LIU An-ling, ZHANG Wei-jun, GAO Xiao-ming, YANG Yong, QU Jun,  
PEI Shi-xin, FAN Hong, LI Wei-zheng, LEI Li-qiao

(Laser Spectroscopy Laboratory, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
The Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

**Abstract** It was experimentally investigated that competition between stimulated thermal scattering (STS) and stimulated Brillouin scattering (SBS) in absorbing liquids and that its phase conjugation characteristic in a master oscillator power amplifier (MOPA) system with a cell containing acetone dyed with small amounts of  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  served as phase-conjugation mirror. It was showed that the stimulated thermal Rayleigh scattering (STRS) would predominate over the stimulated Brillouin scattering or stimulated thermal Brillouin scattering (STBS) by increasing the absorption coefficient of acetone, the gain of the stimulated thermal Rayleigh scattering increased and relative fluctuation of the output energy decreased with the absorption coefficient increased; under weaker pumping conditions stimulated thermal Rayleigh scattering would loss weaker phase information in original wavefront as same as stimulated Brillouin scattering did due to threshold effect; it is really possible to obtain high-quality phase conjugation by stimulated thermal Rayleigh scattering in absorbing liquid with appreciable absorption coefficient under appreciable pumping conditions.

**Key words** nonlinear optics; phase conjugation; stimulated thermal scattering; stimulated Brillouin scattering

## 1 引 言

受激布里渊散射(SBS)相位共轭在过去的几十

年中已得到了充分的研究并获得极大的成功<sup>[1~3]</sup>, 然而, 当介质中存在吸收时, 吸收热将破坏或影响受激布里渊散射的形成<sup>[4]</sup>, 从而导致共轭品质的下

收稿日期: 2003-12-19; 收到修改稿日期: 2004-04-01

作者简介: 刘安玲(1962—), 女, 湖南省平江县人, 中国科学院安徽光学精密机械研究所博士研究生, 副教授, 主要从事量子光学和非线性光学方面的研究。E-mail: anling919@sohu.com

降<sup>[5]</sup>; 高能激光系统中, 还会存在吸收热诱导的受激热瑞利散射(STRS)与受激热布里渊散射(STBS)或受激布里渊散射之间的激烈竞争<sup>[6,7]</sup>, 如何抑制受激热散射(STS)已成为受激布里渊散射相位共轭技术应用于高能系统的难题之一。

1967年, Herman和Gray<sup>[8]</sup>对受激热散射作出了理论预言, 提出直接吸收作为媒介对受激瑞利过程非线性相互作用的影响。当在介质中加入吸收入射频率光能的分子时, 热涨落被这些高速热化的分子极大地增强。对强激光场, 介质中热瑞利散射的非线性增益可达到相当高的值足以与其他非线性增益竞争, 如受激布里渊散射增益。因此, 与其艰难地抑制受激热散射的竞争, 不如设计一个基于受激热散射的非线性矫正方案, 实现高能系统激光的高品质输出。

原则上, 能返回具有一定频移量的散射波的任意一种受激散射过程都能导致相位共轭。受激布里渊散射由于其实现及装置都比较简单, 对抽运源的均匀性要求也不高, 是到目前为止最为常用也是最为成功的产生相位共轭波的方法。同时, 受激布里渊散射形成于无吸收介质中, 因而其光学衰减问题也不会那么严重。而受激热散射除了上世纪六、七十年代在国外有一些报道之外, 其后的研究极为少见, 而关于其相位共轭性能的研究就更为少见。原因是受激热散射的出现存在一定的基本困难。不仅是抽运能量和介质吸收系数的要求高, 抽运光的谱线宽度亦不能过宽, 否则, 抽运光的相干长度将短于受激热散射的建立时间而满足受激布里渊散射的建立。

为此, 我们设计了一套窄线宽的主振荡功率放大(MOPA)系统, 采用三种不同吸收系数的液体作为相位共轭材料, 考察了其中受激热散射与受激布里渊散射之间的竞争及它们作为共轭镜的输出特性。

## 2 基本理论

当介质中存在两个或更多的非线性过程竞争时, 要观察一个特殊的过程, 则其相应的非线性增益必须大于或等于其他存在的增益。受激热瑞利散射和受激布里渊散射每单位长度增益的比较导致了下面对介质吸收系数 $\alpha$ 的条件, 用这样的 $\alpha$ 可观察到受激热瑞利散射<sup>[8]</sup>

$$\alpha \geq \alpha_{cr} = \left(\frac{n^2 - 1}{2}\right) \left(\frac{n^2 + 2}{3}\right) \frac{c_p (\Delta\omega)_B \Gamma_L + \Gamma_R}{\beta n u^2 c \Gamma_L + \Gamma_B}, \quad (1)$$

其中 $\alpha_{cr}$ 为临界吸收系数,  $n$ 为介质折射率,  $u$ 和 $c$ 分别为声速和真空中的光速,  $c_p, \beta, (\Delta\omega)_B$ 分别为定压比热、体膨胀系数、布里渊频移,  $\Gamma_B, \Gamma_L, \Gamma_R$ 分别为布里渊线宽、抽运光线宽、自发瑞利线宽。

当 $\Gamma_L$ 大于或等于 $\Gamma_R$ 及布里渊总线宽 $\Gamma'_B$ 时, 对单色理论的修正<sup>[9]</sup>得到受激热瑞利散射在反斯托克斯频移 $\Delta\omega = -(1/2)(\Gamma_L + \Gamma_R)$ 处有最大增益, 而受激热布里渊散射的最大增益产生于 $\Delta\omega \approx \pm(\Delta\omega)_B + (1/2)(\Gamma_L + \Gamma'_B)$ 处。据文献<sup>[8]</sup>报道, 瑞利线宽最大不超过几十兆赫兹, 布里渊线宽最大在几百兆赫兹量级, 丙酮中 $\alpha_{cr} = 0.34 \text{ cm}^{-1}$ ,  $(\Delta\omega)_B/2\pi = 4.6 \text{ GHz}$ 。因此, 上述频移量将成为判别受激热瑞利散射、受激热布里渊散射与受激布里渊散射的主要依据。

一般而言, 介质中热光栅的弛豫时间比抽运脉冲的持续时间长时应采用瞬态理论。弛豫时间 $\tau$ 由下式给出<sup>[10]</sup>

$$\tau \approx 1.4 \times 10^{-7} \lambda^2 / [2 \sin(\theta/2)]^2 \text{ (s)}, \quad (2)$$

其中 $\theta$ 为散射角,  $\lambda$ 为抽运波长。当 $\lambda = 1.064 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $\theta = \pi$ 时,  $\tau \approx 40 \text{ ns}$ , 大于抽运脉冲的持续时间(23 ns), 因此, 瞬态理论有效。

根据文献<sup>[11]</sup>, 介质的有效瞬态增益因子

$$g_R^0 = 8t_p g_R / G_R^0, \quad (3)$$

这里 $t_p$ 为抽运脉冲的上升时间,  $G_R^0$ 是受激热瑞利散射开始时的增益, 约为22,  $g_R = \gamma^e \alpha \beta k / 2n^2 \rho_0 c_p \Gamma_R$ 为受激热瑞利散射的稳态增益因子, 其中 $\gamma^e$ 和 $\rho_0$ 分别为介质的电致伸缩常数和密度, 因为 $g_R$ 正比于 $\alpha$ , 所以 $g_R^0$ 正比于 $\alpha$ 。

## 3 实验装置

实验装置如图1所示。Nd:YAG调Q激光振荡器经光阑和F-P标准具选模后输出激光脉宽23 ns, 线宽1.51 GHz, 经过格兰棱镜和 $\lambda/4$ 石英波片构成的光隔离器后进入放大器, 然后由焦距为64

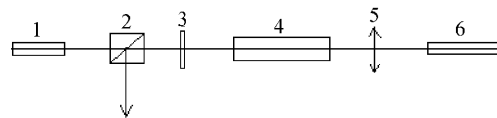


图1 实验装置图

1: Nd:YAG 振荡器; 2: 格兰棱镜; 3:  $\lambda/4$  波片;

4: Nd:YAG 放大器; 5:  $f = 64 \text{ mm}$  透镜; 6: 液体池

Fig. 1 Experimental setup

1: Nd:YAG oscillator; 2: Glan prism; 3: wave plate;

4: Nd:YAG amplifier; 5:  $f = 64 \text{ mm}$  lens; 6: liquid cell

mm 的透镜(双面镀增透膜)聚焦后进入吸收池。吸收池长 200 mm,端面窗片镀增透膜,池内充以因掺杂硝酸铜而具有不同吸收系数的丙酮溶液,池中激发的后向散射光返回放大器放大后由格兰棱镜输出,进入检测系统。

实验采用 R-938 型双通道能量计收集能量, TDS-220 型示波器采集波形,散射光的谱信息由石英 F-P 标准具提供,其厚度为 5 mm,自由光谱范围 20.5 GHz,精细度 61,分辨率为 337 MHz。光谱测量前先采用 KDP 晶体和 45° 反射式滤波片获得输出光的二次谐波,然后再由发散透镜, F-P 标准具,

聚焦透镜和 CCD 相机得到干涉环。

## 4 结果和讨论

实验中配制了三种不同掺杂浓度的丙酮液体,测得其吸收系数  $\alpha$  分别为  $0.34 \text{ cm}^{-1}$ ,  $0.362 \text{ cm}^{-1}$  和  $0.428 \text{ cm}^{-1}$ ,并在相同的实验条件下记录了其作为主振荡功率放大系统相位共轭镜在不同抽运能量下的输出谱图、远场光斑、脉冲波形及能量。

为便于比较,在表 1 中给出主振荡功率放大系统放大器电压所对应的进入液体池之前的抽运光能量。

表 1 主振荡功率放大系统放大器电压(V)所对应的进入液体池之前的抽运光能量(E)

Table 1 Voltage (V) of amplifier of MOPA system versus pump energy (E) in front of the liquid cell

V/V	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
E/mJ	5.9	7.9	10.8	14.9	19.8	26.6	36.7	50.4	64.3	81.3	91.2

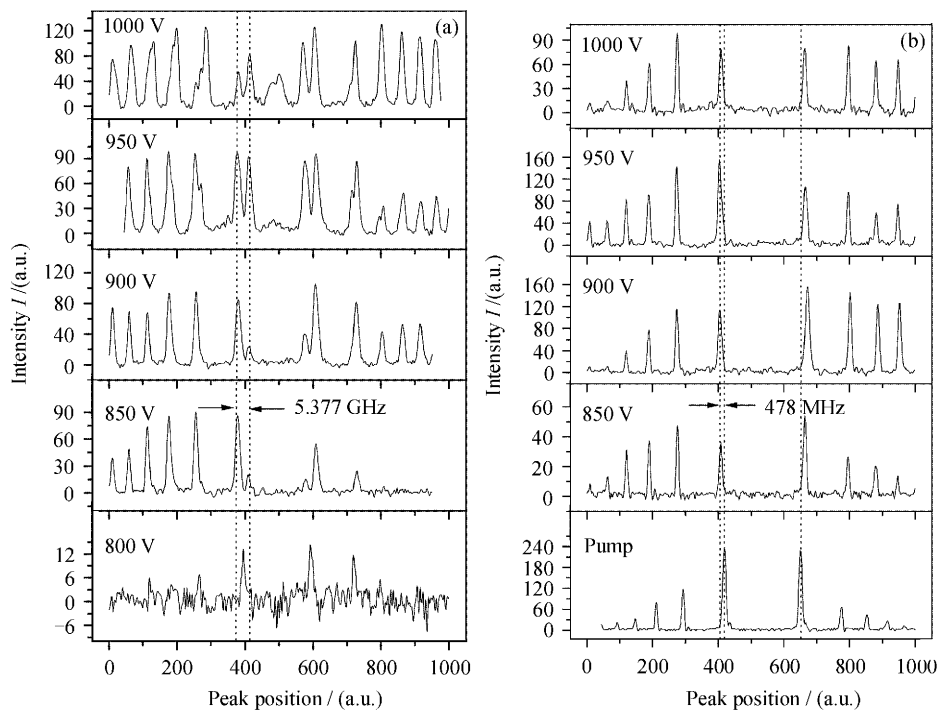


图 2 掺杂硝酸铜的丙酮溶液中受激热瑞利散射与受激布里渊散射的竞争谱图

Fig. 2 Competition between STRS and SBS in acetone colored with  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$

(a)  $\alpha = 0.304 \text{ cm}^{-1}$ ; (b)  $\alpha = 0.362 \text{ cm}^{-1}$

图 2 给出了前两种吸收系数的散射光谱图,图 2 中的图标“Pump”表示主振荡功率放大系统单程输出光即进入液体池之前的抽运光的谱图,“800~1000 V”表示系统放大器电压取此值时相位共轭镜的后向散射谱图。从图 2(a)中清晰可见,850~1000 V 的 4 幅图中始终有两个峰在竞争,其中一个

峰相对于抽运光的反斯托克斯频移为 269 MHz,这就是受激热瑞利散射(因为其频移量在我们的测量系统误差和计算误差之内接近受激热瑞利散射有最大增益的频移);另一个峰相对于受激热瑞利散射峰有 5.337 GHz 的斯托克斯频移,根据下面几个理由可以认定这是受激布里渊散射或受激热布里渊散

射:其一,随着抽运能量的升高,此峰不断增强并逐渐抑制受激热瑞利散射而成为主导过程,而此时的液体也正处于理论预言的临界吸收系数之下,与图 2(b)(高于临界吸收系数)对照,此峰已完全消失;其二,吸收液体中,由于分子散射、镜面反射等因素的影响使得受激热瑞利散射的阈值低于受激布里渊散射,因此,此峰开始时较弱;其三,此峰的频移量介于受激布里渊散射与受激热布里渊散射的频移量之间,极有可能是两种散射共同作用的结果。800 V 时的单峰频移量介于上述两峰之间,是初始时两种过程都较微弱时两峰合并的结果。图 2(b)给出的谱图明显不同于图 2(a),随着抽运能量的升高,始终只有一个峰,且从此峰 478 MHz 的反斯托克斯频移很容易判定为受激热瑞利散射。对  $\alpha = 0.428 \text{ cm}^{-1}$  的后向散射谱图分析得到类似于  $\alpha = 0.362 \text{ cm}^{-1}$  的结果(即与图 2(b)谱图类似,所以不再给出)。

图 3 为用 CCD 采集于焦距为 2 m 透镜的焦平面上的系统输出的远场光斑(图上明显的横向条纹是由于 CCD 老化,横向扫描间隔加宽所致,并不影

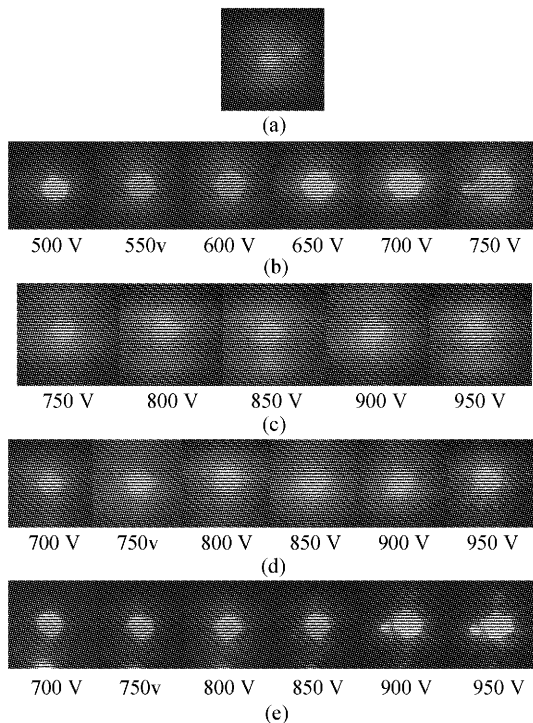


图 3 振荡级光斑及不同吸收系数和抽运能量下系统输出的远场光斑

Fig. 3 Far field spots of oscillator and the system output at different absorption coefficient and pump energy (a) spot of oscillator; (b)  $\alpha = 0.012 \text{ cm}^{-1}$ ; (c)  $\alpha = 0.304 \text{ cm}^{-1}$ ; (d)  $\alpha = 0.362 \text{ cm}^{-1}$ ; (e)  $\alpha = 0.428 \text{ cm}^{-1}$

响对现象的观察和分析)。图 3 中,(a)为振荡级(即系统单程输出)光斑,(b),(c),(d),(e)分别为不同吸收系数和抽运能量(用放大器的抽运电压表征,从表 1 中可读出其相应的能量值)下的共轭输出(即系统双程输出)光斑。仔细观察(a)可发现其右上角有一个较弱斑点。再看(b)(纯丙酮中的受激布里渊散射)和(e)(高吸收中的受激热瑞利散射)发现,抽运能量高时其光斑的左下角亦出现一个较弱斑点,这正是振荡级光斑的镜像,也就是说,此时的后向散射光基本保留了原始波前的相位信息;受激热瑞利散射与受激布里渊散射一样由于其高阈值会在抽运能量较低时丢失原始波前中的较弱信息。比较(b),(c),(d)和(e)可以发现:1)随着吸收系数的增大,受激热瑞利散射与受激布里渊散射的竞争((c)组)明显降低了共轭品质;2)高于临界吸收系数时((d)组),由于抽运光的损耗增大,受激热瑞利散射的增益较低,后向散射光中的相位共轭分量进一步减少;3)继续增大吸收系数((e)组),可见低抽运能量时(700 V)存在明显的散斑,共轭品质更差,但由于此时的受激热瑞利散射增益变大(见图 4),随着抽运能量的升高,受激热瑞利散射得到充分的发展,

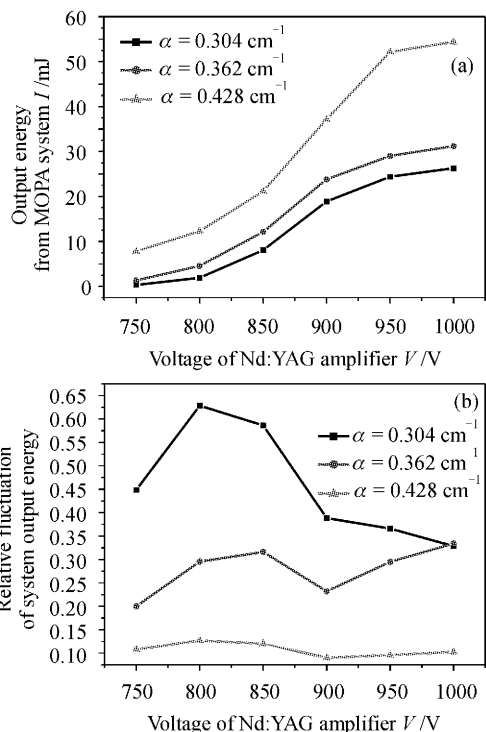


图 4 具有不同吸收系数相位共轭镜的系统输出能量(a)及其相对起伏(b)与抽运能量的关系

Fig. 4 Output energy (a) and its relative fluctuation (b) of the system with different absorption coefficient phase conjugation mirror versus pump energy

使得后向散射光中的共轭成分增加,共轭品质反而得到提高。显然,在适当的吸收系数和抽运条件下利用受激热瑞利散射获得高品质相位共轭光是完全可能的。

图 4(a)所示为不同吸收系数相位共轭镜后向散射光经放大器放大后的输出能量与放大器抽运电压的关系曲线。明显可见,相同的抽运电压下(即用相同能量抽运时),吸收系数越高,输出能量越大,也就是受激热瑞利散射的增益越大,即其增益与吸收系数成正比。而图 4(b)给出的相应条件下输出能量的相对起伏则显示出相反的结果,输出能量相对起伏与吸收系数成反比,且不随抽运能量的升高而升高。

从示波器采集的波形未见其与吸收系数和抽运能量的强关联。三种吸收系数下的脉宽压缩都达到一半,即 12 ns 左右。

## 5 结 论

1) 受激热瑞利散射与受激布里渊散射的竞争关键在于吸收系数的大小,当介质的吸收系数超过某一临界值时,受激布里渊散射或受激热布里渊散射会完全消失。因此,在介质中抑制受激布里渊散射或受激热布里渊散射的竞争是较为便利的。2) 受激热瑞利散射与受激布里渊散射一样,由于阈值效应,在弱抽运时将丢失原始波前中的较弱部分。3) 受激热瑞利散射的增益与吸收系数成正比,输出能量的相对起伏与吸收系数成反比。4) 受激热瑞利散射的共轭品质随着吸收系数的升高而变差,但在适当的吸收系数和抽运条件下,仍可能获得较高品质的相位共轭。因此,寻找合适的介质、吸收系数、抽运条件以获得高品质的受激热瑞利散射相位共轭,使之成为长脉冲高平均功率条件下受激布里渊散射的替代品,仍是十分有意义的。

## 参 考 文 献

- 1 Yu Xin, Ju Youlun, Wang Yuezhu *et al.*. Experimental investigation for improving the solid state laser beam quality with SBS [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(8):685~688  
于欣,鞠有伦,王月珠等. 利用受激布里渊散射提高固体激光系统光束质量的实验研究[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(8):685~688
- 2 Yang Ailing, Li Mingzhong, Ha Yuanqing *et al.*. Investigation of the fidelity of phase conjugation of single-cell with one focus and single-cell with two focuses [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(7):613~618  
杨爱玲,李明中,哈元清等. 单池单焦点及单池双焦点相位共轭度研究[J]. *中国激光*, 1999, **A26**(7):613~618
- 3 He Weiming, Lü Zhiwei, Wang Qi *et al.*. Beam interference driving acoustic wave enhances the stability of SBS phase-conjugation fidelity [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(8):721~724  
何伟明,吕志伟,王 骐等. 光束相干驱动声子场提高 SBS 相位共轭保真度稳定性[J]. *中国激光*, 1997, **A24**(8):721~724
- 4 Hasiwuliji, Lü Zhiwei, He Weiming. Influence of absorption coefficient on stimulated Brillouin scattering [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2003, **40**(4):38~40  
哈斯乌力吉,吕志伟,何伟明. 吸收系数影响受激布里渊散射的实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2003, **40**(4):38~40
- 5 Yu A. Anan'ev, A. V. Gorlanov, I. M. Kozlovskaya *et al.*. Mirroring by stimulated thermal scattering in absorbing liquids [J]. *Opt. Spectrosc. (USSR)*, 1986, **60**(2):240~242
- 6 G. V. Krivoshechekov, M. F. Stupak. Simultaneous and separate excitation of stimulated Brillouin and stimulated thermal scattering in wavefront reversal [J]. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1983, **13**(10):1379~1381
- 7 Liu Anling, Zhang Weijun, Gao Xiaoming. Concept and theoretical description of stimulated thermal scattering [J]. *Chinese J. Light Scattering*, 2003, **15**(3):179~183  
刘安玲,张为俊,高晓明. 受激热散射基本概念及理论描述[J]. *光散射学报*, 2003, **15**(3):179~183
- 8 R. M. Herman, M. A. Gray. Theoretical prediction of the stimulated thermal Rayleigh scattering in liquids [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1967, **19**(15):824~828
- 9 I. P. Batra, R. H. Enns, D. Pohl. Stimulated thermal scattering of light [J]. *Phys. Stat. Sol. (b)*, 1971, **48**(11):11~63
- 10 V. B. Karpov, V. V. Korobkin, D. A. Dolgolenko. Phase conjugation of XeCl excimer laser radiation by excitation of various types of stimulated light scattering [J]. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1991, **21**(11):1235~1238
- 11 K. Daree, W. Kaiser. Competition between stimulated Brillouin and Rayleigh scattering in absorbing media [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1971, **26**(14):816~819