

光学击穿对宽带受激布里渊散射及 受激拉曼散射特性的影响

何兴道 徐进军 史久林 陈 蔚 莫小凤 刘 娟

(南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室, 江西 南昌 330063)

摘要 实验上分析了在多模激光抽运的条件下,水中宽带受激布里渊散射(WSBS)及前向受激拉曼散射(FSRS)产生的物理机制及二者之间能量变化的关系。实验结果表明,在多模激光抽运过程中,WSBS 能量与 FSRS 能量处于不断变化的状态。聚焦长度较短或抽运光能量相对较低时,WSBS 在散射过程中占据主导地位;随着聚焦长度和抽运光能量的增加以及光学击穿的产生,FSRS 在散射过程中逐渐占据优势。

关键词 非线性光学;宽带受激布里渊散射;前向受激拉曼散射;聚焦长度;光学击穿

中图分类号 O437.2; O437.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0619005

Influences of Optical Breakdown on Wideband SBS and Forward SRS

He Xingdao Xu Jinjun Shi Jiulin Chen Wei Mo Xiaofeng Liu Juan

(Key Laboratory of Nondestructive Test, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University,
Nanchang, Jiangxi 330063, China)

Abstract Wideband stimulated Brillouin scattering (WSBS) and forward stimulated Raman scattering (FSRS) in water pumped by a multi-longitudinal-mode laser are studied. The experimental results indicate that in the pump process of multi-longitudinal-mode laser, energy changes exist between WSBS and FSRS. WSBS will be dominant when the focal length is shorter or the pump energy is lower; on the contrary, FSRS will be dominant with the increase of focal length and pump energy or the appearance of optical breakdown.

Key words nonlinear optics; wideband stimulated Brillouin scattering; forward stimulated Raman scattering; focal length; optical breakdown

OCIS codes 190.5890; 290.1350; 290.5830; 290.5860

1 引 言

受激布里渊散射(SBS)和受激拉曼散射(SRS)是典型的光与介质相互作用的非弹性散射过程。以往的研究主要集中于窄带 SBS 与后向受激拉曼散射(BSRS)^[1~6],实验表明二者之间是相互竞争的关系,SBS 的产生在某种程度上会抑制 BSRS,并且 SBS 的能量要比 BSRS 能量大 2 或 3 个数量级。Shi 等^[7,8]利用窄带激光单池聚焦证明了 SBS 与 SRS 之间存在着除竞争之外的另外一种物理机制,即 SBS 对 BSRS 有抽运放大作用,而且有效增益长

度越长,这种放大作用越明显,这为后续的非线性研究提供了新的思路。随着宽带 SBS(WSBS)在光纤通信^[9]以及准分子激光器^[10]等方面的使用,近年来对 WSBS 进行了大量的研究。Narum 等^[11]在激光模间隔大于布里渊线宽的条件下利用多纵模理论对 WSBS 进行了讨论,理论结果是当激光相干长度远大于 SBS 特征增益长度时,SBS 增益与带宽无关。Eichler 等^[12]在宽带 XeCl 激光 SBS 相位共轭镜的研究中,指出 SBS 阈值与相干长度和瑞利长度的比值有关。当焦距很短时,如果相干长度大于相互作用

收稿日期: 2012-01-12; 收到修改稿日期: 2012-02-22

基金项目: 国家自然科学基金(41066001,61177096)资助课题。

作者简介: 何兴道(1963—),男,博士,教授,主要从事光散射技术方面的研究。E-mail: xingdaohe@126.com

(中国光学学会会员号: 2009067)

用长度,宽带与窄带 SBS 阈值相等;如果相干长度小于相互作用长度,WSBS 阈值与线宽有关。Wang 等^[13]在宽带 KrF 激光抽运的 SBS 研究中指出抽运光各纵模之间在一定范围内存在耦合,WSBS 与抽运光线宽有关。林殿阳等^[14]对 WSBS 的研究主要集中在理论分析上,并利用多纵模理论,针对自由运转激光,通过引进不同纵模的随机初始相位,推导出了模间隔不受任何限制的宽带多纵模 SBS 耦合波方程,讨论了 WSBS 阈值与抽运光线宽、模数、模间隔、布里渊线宽及有效相互作用长度之间的关系并给出了推导公式。但他们都没有对 WSBS 与光学击穿、SRS 等非线性过程的关系进行相应的实验研究。本文在理论分析的基础上,利用宽带多纵模激光作为抽运源,对水中的 WSBS 与前向 SRS

(FSRS)、光学击穿之间的相互关系进行了较详细的研究。实验结果表明 WSBS 与 FSRS 之间能量变化有着交替占优的关系,而这种相互关系依赖于光学击穿以及激光的聚焦长度。

2 理论基础

2.1 WSBS

抽运光线宽大于布里渊线宽时的 SBS 称为 WSBS。其增益与介质属性、抽运光带宽、抽运光强度和相互作用长度有关。所以,WSBS 阈值与介质和抽运光的属性(线宽、模数等)有关。根据文献^[14]报道,当相互作用长度大于抽运激光的相干长度时,散射光光强为

$$I_s = \begin{cases} I_{s0} \exp(gI_P L) & (L < L_C^M) \\ I_{s0} \exp(gI_P L_C^M) \exp\left[g \frac{m}{N} I_P (L - L_C^M)\right] & (L \geq L_C^M) \end{cases}, \quad (1)$$

式中 I_{s0} 为散射光的初始光强, I_P 为抽运光的光强, g 为增益系数, L_C^M 为抽运光的相干长度, N 为抽运光的纵模数, m 为 WSBS 的纵模数, L 为相互作用长度。WSBS 阈值定义为

$$I_{th}^M \approx \begin{cases} C/(gl) & (L < L_C^M) \\ C/\left[gL_C^M + g \frac{m}{N} (L - L_C^M)\right] & (L \geq L_C^M) \end{cases}, \quad (2)$$

式中 C 为常数,其值大小为 $25 \sim 30$ ^[11]。从(2)式可以看出,如果相互作用长度大于抽运光的相干长度,WSBS 阈值与抽运光的相干长度(线宽)、相互作用长度等有关。

2.2 FSRS

在拉曼介质内部,与衍射损失平衡的强度增益是形成斯托克斯模式的阈值,也称为模式阈值^[15]。假设聚焦抽运光束呈高斯分布,且会聚在拉曼介质池内 z_f 处,则最低阶模振幅可表示为

$$\ln A(z) = \frac{\tilde{P} - 2\tilde{P}^{1/2}}{4K} \arctan \gamma - \frac{1}{2} \ln(1 + \gamma^2), \quad (3)$$

式中 \tilde{P} 为无量纲化的抽运光功率, $\tilde{P} = 2gnv_P PK/c$, $K = k_s/k_p (k_p, k_s$ 分别为抽运光及散射光波数), $\gamma = (z - z_f)/z_R$, z_f 为聚焦长度, $z_R = k_p W_{P0}^2/2$ 为拉曼池最佳输出窗口。假设介质池长为 L_1 , 当抽运光聚焦在池的中间时, $z_f = L_1/2$, 则

$$\ln \frac{A(L_1)}{A(0)} = \frac{\tilde{P} - 2\sqrt{\tilde{P}}}{4K} \arctan \frac{L_1}{2z_R}, \quad (4)$$

斯托克斯光有增益的条件是 $\ln[A(L_1)/A(0)] \geq 0$, 当 $z_f \neq L_1/2$ 时, (4)式可变为

$$\tilde{P} - 2\tilde{P}^{1/2} \geq 2K \left\{ \ln \left[1 + \frac{(L_1 - z_f)^2}{z_R^2} \right] - \ln \left(1 + \frac{z_f^2}{z_R^2} \right) \right\} / \left(\arctan \frac{z_f}{z_R} + \arctan \frac{L_1}{z_R} \right). \quad (5)$$

由(5)式可知,当抽运光聚焦在拉曼池前半部分 ($z_f < L_1/2$) 时,由于式中右侧对数部分大于0,则式中左侧恒大于0,即需要更高的抽运光功率;当抽运光聚焦在拉曼池后半部分 ($z_f > L_1/2$) 时,式中对数部分小于0,即需要相对较低的抽运光功率。

3 实验装置

实验装置如图1所示。激光器为种子注入式 Nd:YAG 激光器,脉宽为 7 ns,重复频率 10 Hz,宽带线宽为 30 GHz,532 nm 单脉冲能量约为 1.1 J,激光发散角为 0.45 mrad。激光器输出竖直偏振光,经 $\lambda/2$ 波片后变成水平偏振并以高透射率通过光束分束镜 BS。功率计 D₃ 用来监测入射光功率;透射光经 $\lambda/4$ 波片后变成圆偏振,圆偏振光经过透镜组 L₁、L₂ 后会聚到长为 2 m 的 SBS 池。当宽带多纵模激光会聚到水中并达到某一阈值后,宽带多纵模 SBS 被激发,由于相位共轭特性,再次经过 $\lambda/2$

波片变成垂直偏振光被 BS 以高反射率反射到探测器 D_0 (Molelectron PM 500A)。前向传输的脉冲光, 经透镜 L_3 准直后入射到棱镜 P 上, 不同频率的 FRS 及剩余抽运光 S_0 分别用功率计 D_1 、 D_2 (Newport 842-PE, 818P-001-12) 测量。

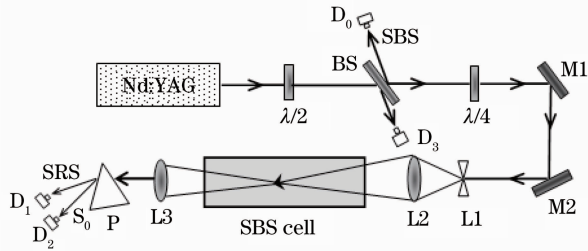


图 1 WSBS 及 FRS 测量原理图

Fig. 1 Experimental layout for measuring WSBS and FRS

为了实验数据的可比性, 在实验过程中通过移动 SBS 池来获得不同的相互作用长度, 透镜 L_1 、 L_2 的位置固定不变, 保证激光以相同的发散角会聚到水槽中。另外, 为了保证水槽的端面反射光不影响 WSBS 信号的接收, 激光入射方向与水槽前表面之间形成 5° 夹角。

4 实验结果及分析

实验所用水的衰减系数约为 0.06 m^{-1} 。图 2 为抽运激光能量在 0.55 J 时测得的 WSBS-FRS 光谱图, 图中中心波长 650 nm 为发生红移的斯托克斯光, 中心波长 532 nm 为后向 WSBS 光。

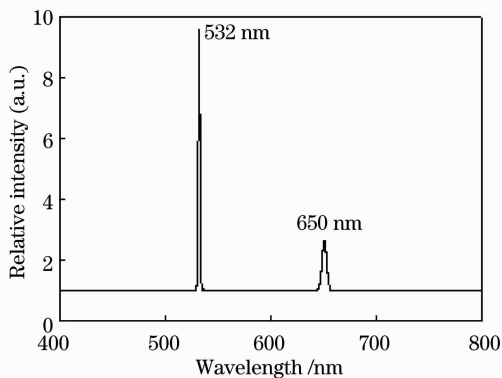


图 2 抽运激光能量为 0.55 J 时测得的 WSBS、FRS 光谱图

Fig. 2 Measured spectra of WSBS and FRS signals when the pump energy is 0.55 J

图 3 (彩图请参照网络电子版) 显示的是聚焦长度为 0.6 m 时所测得的后向 WSBS 及 FRS。从图中可以清楚地看出, 抽运光能量小于 0.2 J 时, WSBS 能量随抽运光几乎呈线性增长趋势; 当抽运

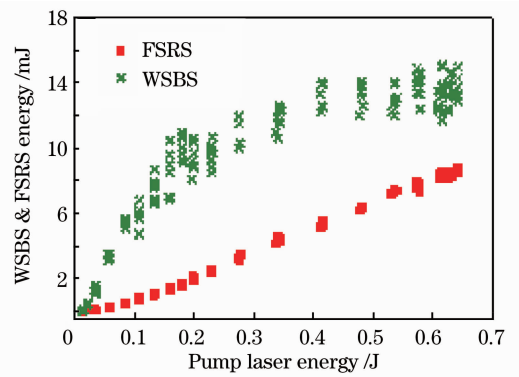


图 3 聚焦长度为 0.6 m 时测得的 WSBS、FRS 能量
Fig. 3 WSBS and FRS energies versus pump laser energy when the laser is focused at 0.6 m in water

光能量大于 0.2 J 时, WSBS 增长变缓, 在抽运光能量为 0.65 J 时达到最大值 15.7 mJ 。FRS 能量随抽运光呈线性增长趋势, 最大值达到 8.5 mJ 。同 FRS 相比, WSBS 能量占据绝对优势。为了更形象地表示二者之间的关系, 图 4 (彩图请参照网络电子版) 给出了聚焦长度分别为 0.8 、 1.0 、 1.6 、 1.8 m 情况下的能量关系图。

图 4(a) 为聚焦长度等于 0.8 m 时的 WSBS、FRS 能量对比图。相对于图 3, WSBS 能量最大值降低为 12 mJ , 并且当抽运光能量大于 0.2 J 时, 能量增加变缓, 在抽运光能量为 0.35 J 左右时达到最大值, 随后 WSBS 能量几乎稳定不变。相对于 WSBS, FRS 在抽运光能量为 0.65 J 左右时达到最大值, 最大值与 WSBS 几乎相等, 但此时, WSBS 能量仍然占据主导。当聚焦长度继续增加时, WSBS 能量明显减小, 且在抽运光能量达到一定值后, 能量呈下降趋势, 如图 4(b)~(d) 所示。而 FRS 的能量则会随聚焦长度的增加而增加, 并且在抽运光能量达到某一定值后, FRS 的能量要大于 WSBS 的能量, 从而在受激散射过程中占据优势。这种 WSBS 与 FRS 能量交替占优的过程, 通过二者的时域关系也能清楚地看出, 如图 5 (彩图请参照网络电子版) 所示。

图 5 显示的是抽运光会聚在水池 1.2 m 处采集的 WSBS、FRS 时域波形图, 图中标注的延时是由实验光路延迟所造成的。接收 FRS 的光电探头距离水槽出光口的光学距离约为 1 m , 接收 WSBS 的光电探头离水槽的入光口光学距离约为 2 m , 反映在示波器上, 二者的时间延迟约为 4.6 ns 。从图中可以清楚地看出, FRS 的极小值总是对应着 WSBS 的极大值。这种现象可能包含两种物理机

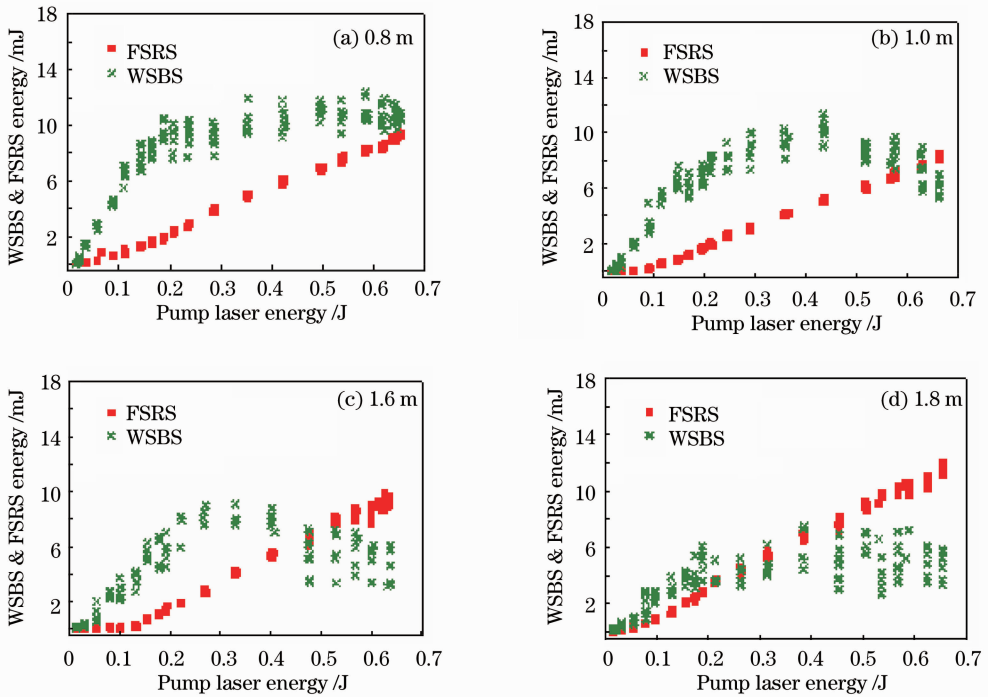


图 4 不同聚焦长度下,WSBS 及 FSRS 能量随抽运光的变化

Fig. 4 WSBS and FSRS energies versus pump laser energy with different focal lengths

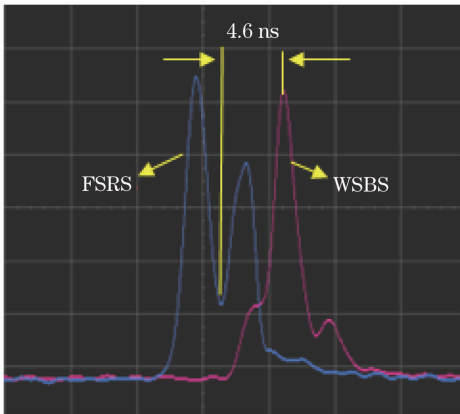


图 5 聚焦长度为 1.2 m,抽运光能量为 0.3 J 时,WSBS、FSRS 时域轮廓图。图中显示每格为 5 ns

Fig. 5 Time profile of WSBS and FSRS signals. Pump laser energy is 0.3 J, focal length is 1.2 m, and abscissa is 5 ns/div

制,一种是 SBS 与 SRS 同向传输,SBS 能量转移到 SRS 上,SBS 对 SRS 有抽运放大的效应,文献[8]中也观察到这种现象的发生;另外一种情况是同一束抽运光在激发 SBS 与 SRS 的过程中,SBS 与 SRS 能量处于竞争状态,其中一者的极大值对应另外一者的极小值。考虑到 WSBS 与 FSRS 的矢量性,前者对后者不会有能量转移的现象,因此,图 5 所显示的现象更符合二者能量相互竞争的机制。

抽运激光线宽为 30 GHz,对应的相干长度为

0.01 m。由于激光脉宽为 8 ns,其对应的相互作用长度约为 2 m,定义在相互作用长度内的激光聚焦长度为有效相互作用长度。有效相互作用长度远大于抽运激光的相干长度,由前面的理论基础得知,如果相互作用长度大于抽运光的相干长度,WSBS 阈值与抽运光的相干长度(线宽)、相互作用长度等有关。由(2)、(5)式可知,随着相互作用长度的增加,WSBS 及 FSRS 的阈值抽运功率减小,这也就意味着长的相互作用长度对应较高的 WSBS 及 FSRS 输出能量。但实际上并非如此,如图 3、4 所示,随着有效相互作用长度的增加,WSBS 的能量反而减小,在抽运能量达到某一值后,甚至出现急剧下降的趋势。造成这种现象的原因,可以认为是高能量的脉冲激光在聚焦的情况下会产生极高的峰值功率,在水中形成光学击穿从而损耗大量抽运光能量。图 6 所示的是有效相互作用长度(聚焦长度)为 1.6 m,抽运光能量为 0.25 J 时拍摄的水中光学击穿现象。光学击穿会在介质的局部形成等离子体,产生额外的高强度的声波场,这种高强度的声波场会造成相位失配,在一定程度上抑制抽运光能量向 WSBS 转移。与 WSBS 不同的是,FSRS 的阈值受激光带宽的影响相对较小,这主要是因为 SRS 声子衰减速率要比 SBS 声子衰减速率大很多,因此,宽带抽运激光相对于 SRS 来说仍然可认为是窄带。另外,SBS

产生的声波是相干波,在SBS发展过程中提供放大所需的相干声子源,击穿破坏了这种声子源,而SRS产生的声子是短波长光学声子,抽运光穿过宏观击穿区时,仍能生成相干光学声子波,因此当抽运光超过击穿阈值后SBS的信号光不再增加,而SRS的信号光却继续增加。

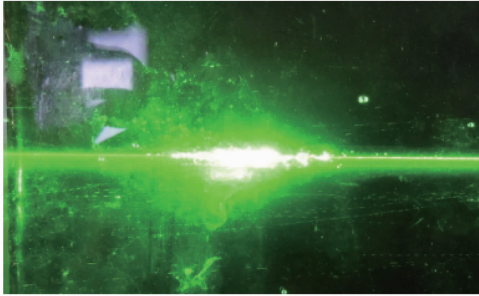


图6 水的光学击穿现象

Fig. 6 Optical breakdown in water

5 结 论

实验结果及分析表明,在激光抽运过程中,WSBS与FSRS能量处于交替占优的状态(与窄带模式下不同的是,WSBS对FSRS没有放大作用,并且WSBS与FSRS能量大小几乎处于同一数量级),而聚焦长度、抽运光能量及光学击穿决定二者在能量交替过程中谁占据主导优势。聚焦长度较短或抽运光能量相对较低时,WSBS能量占据主导地位;随着聚焦长度和抽运光能量的增加以及光学击穿的产生,FSRS能量逐渐占据优势。

参 考 文 献

- 1 N. Tcherniega, A. Sokolovskaia, A. D. Kudriavtseva *et al.*. Backward stimulated Raman scattering in water [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **181**(1-3): 197~205
- 2 William R. Trutna, Yong Kwan Park, Robert L. Byer. The dependence of Raman gain on pump laser bandwidth [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1979, **15**(7): 648~655

- 3 X. Hua, J. Leng, H. Yang *et al.*. Highly efficient Raman conversion in O₂ pumped by a seeded narrow band second-harmonic Nd: YAG laser [J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **81**(4): 525~530
- 4 J. L. Shi, J. Liu, S. J. Li *et al.*. Unconventional physical mechanisms between stimulated Brillouin scattering and backward stimulated Raman scattering in liquid water [J]. *J. Opt.*, 2011, **13**(7): 075201
- 5 J. H. Bai, J. W. Shi, M. Ouyang *et al.*. Method for measuring the threshold value of stimulated Brillouin scattering in water [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(13): 1539~1541
- 6 J. W. Shi, X. D. Chen, M. Ouyang *et al.*. Theoretical investigation on the threshold value of stimulated Brillouin scattering in terms of laser intensity [J]. *Appl. Phys. B*, 2009, **95**(4): 657~660
- 7 J. W. Shi, M. Ouyang, X. D. Chen *et al.*. Stimulated Raman scattering enhanced by stimulated Brillouin scattering [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(7): 977~979
- 8 D. H. Liu, J. W. Shi, M. Ouyang *et al.*. Pumping effect of stimulated Brillouin scattering on stimulated Raman scattering in water [J]. *Phys. Rev. A*, 2009, **80**(3): 033808
- 9 K. Y. Song, M. G. Herraez, L. Thevenaz. Observation of pulse delaying and advancement in optical fibers using stimulated Brillouin scattering [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(1): 82~88
- 10 Deanna M. Pennington, Mark A. Hennesian, Russel B. Wilcox. Four-color beam smoothing irradiation system for laser-plasma interaction experiments at LLNL [C]. *SPIE*, 1995, **2633**: 214~229
- 11 P. Narum, M. D. Skeldon, R. W. Boyd. Effect of laser mode structure on stimulated Brillouin scattering [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1986, **22**(11): 2161~2167
- 12 H. J. Eichler, R. Konig, H. J. Patzold. SBS mirrors for XeCl lasers with a broad spectrum [J]. *Appl. Phys. B*, 1995, **61**(1): 73~80
- 13 X. H. Wang, Z. W. Lü, D. Y. Lin *et al.*. Investigation of stimulated Brillouin scattering for broadband KrF laser [J]. *Chinese Physics*, 2004, **13**(10): 1733~1737
- 14 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
- 15 Xia Jiangfan, Wang Naiyan. The influence of the focus position of broadband pump laser on SRS initiation process [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, **10**(4): 505~512
夏江帆, 王乃彦. 宽带泵浦激光的聚焦位置对SRS发生过程的影响 [J]. *强激光与粒子束*, 1998, **10**(4): 505~512

栏目编辑: 李文喆