

受激布里渊散射光束空间光强分布

龚华平^{1,2} 吕志伟¹ 林殿阳¹

(¹ 哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001; ² 中国计量学院光电子技术研究所, 浙江 杭州 310018)

摘要 将调 Q 的 Nd:YAG 激光脉冲聚焦到 FC-72 介质池中, 利用电荷耦合器件 (CCD) 和数字图像处理技术, 实验研究了后向受激布里渊散射 (SBS) 光斑的光强分布, 获得了其光强分布及光斑大小随入射能量的变化规律。结果表明, 在入射光束为基模高斯光束的条件下, 随着入射光能量增大, 受激布里渊散射光斑的空间光强分布由近高斯型变为高斯型。并且受激布里渊散射光斑大小总体上是随着入射光能量的增大而逐渐减小的。当入射能量在受激布里渊散射阈值附近时, 受激布里渊散射光斑大小达到最大 (大于入射光斑); 当入射能量为 3 倍阈值以上时, 受激布里渊散射光斑大小达到最小 (小于入射光斑)。

关键词 受激布里渊散射; 空间光强分布; 电荷耦合器件; 光斑大小

中图分类号 O437.2 **文献标识码** A

Spatial Intensity Profile of Stimulated Brillouin Scattering Beam

Gong Huaping^{1,2} Lü Zhiwei¹ Lin Dianyang¹

(¹ Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)
(² Institute of Opto-Electronics, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract Through focusing Q-switched laser pulses into FC-72 medium, the intensity profile of backward stimulated Brillouin scattering (SBS) spot is investigated experimentally by charge-coupled device (CCD) camera and digital image processing technology, and the rules of intensity profile and spot size versus pump energy are obtained. The results show that the intensity profile of backward SBS spot turns from quasi-Gaussian to Gaussian profile when the pump energy increases. And the size of SBS spot decreases gradually in a whole with pump energy. When pump energy is near the SBS threshold, the size of SBS spot is maximum, and larger than that of pump spot. When pump energy is three times larger than the SBS threshold, the size of SBS spot is minimum and smaller than that of pump spot.

Key words stimulated Brillouin scattering; spatial intensity distribution; charge-coupled device; spot size

1 引 言

自从 1972 年前苏联 B. Ya. Zeldovich 等^[1]发现相位共轭现象以来, 相位共轭技术得到了广泛而深入的研究。受激布里渊散射 (SBS) 相位共轭技术是获得相位共轭光的重要手段之一, 与其他非线性相位共轭技术相比, 受激布里渊散射相位共轭镜具有结构简单、自抽运的特点, 以及实时产生相位共轭波、修正任意波前畸变的能力。所以, 受激布里渊散射相位共轭技术已广泛地应用于激光脉冲压缩以及高功率激光系统的波前畸变修正、退偏补偿等方面^[2~4]。一直以来, 对受激布里渊散射相位共轭技术的研究主要集中在时间波形控制、能量反射率和

相位共轭保真度等方面^[5~9], 而对受激布里渊散射光束的空间光强分布却很少有研究报道。但是对于受激布里渊散射相位共轭技术的应用来说, 受激布里渊散射光束的空间光强分布直接影响其光束质量, 在激光打孔、激光焊接、激光扫描等应用方面是一个很重要的参量。在已发表的文章中有一些提到了受激布里渊散射光斑的空间光强分布问题^[8], 但是对于受激布里渊散射光斑在不同入射光能量下的光强分布及其变化, 还未见相关报道。为此, 本文利用 CCD 采集激光光斑, 并利用数字图像处理技术对图像进行分析, 以获得受激布里渊散射光斑的空间光强分布和变化规律。

基金项目: 国家自然科学基金(10476009, 60278033)资助课题。

作者简介: 龚华平(1977—), 男, 湖北人, 讲师, 主要从事受激布里渊散射方面的研究。E-mail: gonghp@163.com

导师简介: 吕志伟(1961—), 男, 辽宁人, 教授, 博士生导师, 主要从事非线性光学方面的研究。Email: zw_lu@sohu.com

2 实验装置

实验采用图 1 所示的实验装置。由全反镜 M_1 和部分反射镜 M_2 构成 Nd:YAG 振荡级的谐振腔,染料片调 Q, 偏振片 P_1 作为起偏器,以便从 Nd:YAG 振荡级获得偏振光输出。激光系统中加入小孔光阑以控制激光单模输出。激光器输出能量 35 mJ, 波长 1064 nm, 脉冲宽度约为 8 ns, 重复频率为 1 Hz。为了防止后向散射斯托克斯光脉冲进入激光系统, 采用了偏振片 P_2 和 $\lambda/4$ 波片组成的隔离器。 R 为部分反射镜, 经其反射的光进入能量计 ED200, 用来监测入射光的能量。 L 为焦距 30 cm

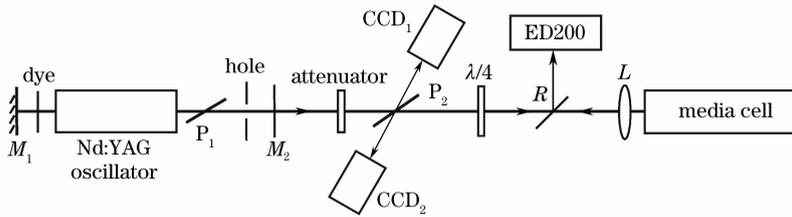


图 1 实验光路图

Fig. 1 Experiment setup

3 实验结果与讨论

图 2 是实验中采集到的入射光光斑图像和受激布里渊散射光斑图像, 由于使用的电荷耦合器件为标准视频设备, 其工作方式为隔行扫描, 当激光为短脉冲的条件时会导致图像 y 方向的数据不完整, 所以出现如图的显示效果。当入射能量变化时使用不同衰减率的衰减片来避免 CCD 光强饱和, 所以图像中的

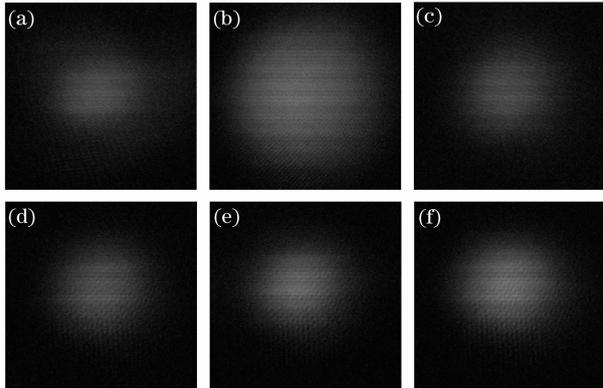


图 2 入射光斑图像 (a) 和不同入射能量下的受激布里渊散射光斑图像, (b) $E_m = 4.6$ mJ, (c) $E_m = 9.8$ mJ, (d) $E_m = 15$ mJ, (e) $E_m = 26$ mJ, (f) $E_m = 34$ mJ

Fig. 2 Images of pump spot (a) and SBS spots captured by CCD camera, (b)~(f) corresponding to pump energy 4.6 mJ, 9.8 mJ, 15 mJ, 26 mJ, 34 mJ, respectively

的聚焦透镜, 将入射光聚焦到布里渊介质池中, 采用 FC-72 为介质, 池长 60 cm。由于偏振片 P_2 会反射少量的入射光, 可以利用 CCD_1 在偏振片的一侧测量入射光光斑, 在另一侧利用 CCD_2 测量受激布里渊散射光斑。 CCD_1 和 CCD_2 的前面都放置适当的衰减片, 防止激光损伤 CCD, CCD 型号为敏通公司的 MTV-1881EX, 成像面尺寸约为 $8\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 。进行实验时固定 CCD 的位置不动, 通过衰减片改变入射光能量, 用 CCD 测量不同入射能量下的入射光光斑和受激布里渊散射光斑。对于每一个入射能量值, 都采集 10 次以上的光斑图像, 然后进行分析和统计。

光强不具有可比性。由于隔行采集的方式, 仅对 x 方向进行图像分析。而且入射光束基本上是中心对称的, 所以 y 方向的结果与 x 方向类似, 在此不再赘述。

利用数字图像处理技术对图 2 中的光斑图像进行分析, 首先对 CCD 图像进行噪声滤除, 然后分别采用快速傅里叶变换 (FFT) 平滑和高斯拟合得到光斑的光强分布曲线。其中, 由于快速傅里叶变换平滑处理的结果更具有一般代表性, 所以将快速傅里叶变换平滑处理的结果作为激光光斑的实际光强分布曲线。入射光斑的光强分布如图 3 所示, 从图 3 中可以看出, 入射光斑的快速傅里叶变换平滑和高斯拟合的曲线几乎重合, 这与入射光为高斯光束的条件是一致的。受激布里渊散射光斑的光强分布如

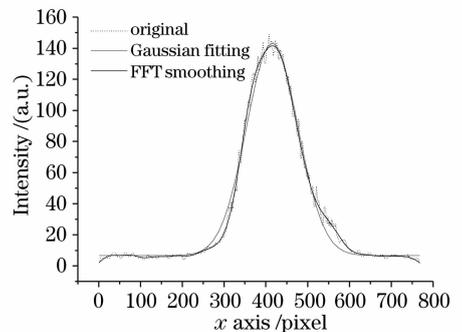


图 3 入射光斑的空间光强分布

Fig. 3 Intensity profile of pump spot

图 4 所示。从图 4 中可以看出，当入射光能量为 4.6 mJ 时，也就是阈值附近（实验中此条件下的能量阈值约为 4.5 mJ），其受激布里渊散射光斑的光强分布曲线与高斯拟合曲线的差别较大，此时可以称为近高斯分布；而当入射光能量增大到 2 倍阈值以后，其受激布里渊散射光斑的光强分布曲线与高斯拟合曲线几乎重合，此时称为高斯分布。因此，随

着入射光能量从阈值增大到数倍阈值，受激布里渊散射光斑的光强分布从近高斯分布变为高斯分布。出现这种变化的原因，与相位共轭保真度有关。随着入射能量逐渐增大，受激布里渊散射的相位共轭保真度也是增大的^[9]，因此受激布里渊散射的相位共轭特性就表现得很明显，使光斑的光强分布变好，文献[7]中的部分实验结果也证明了这一点。

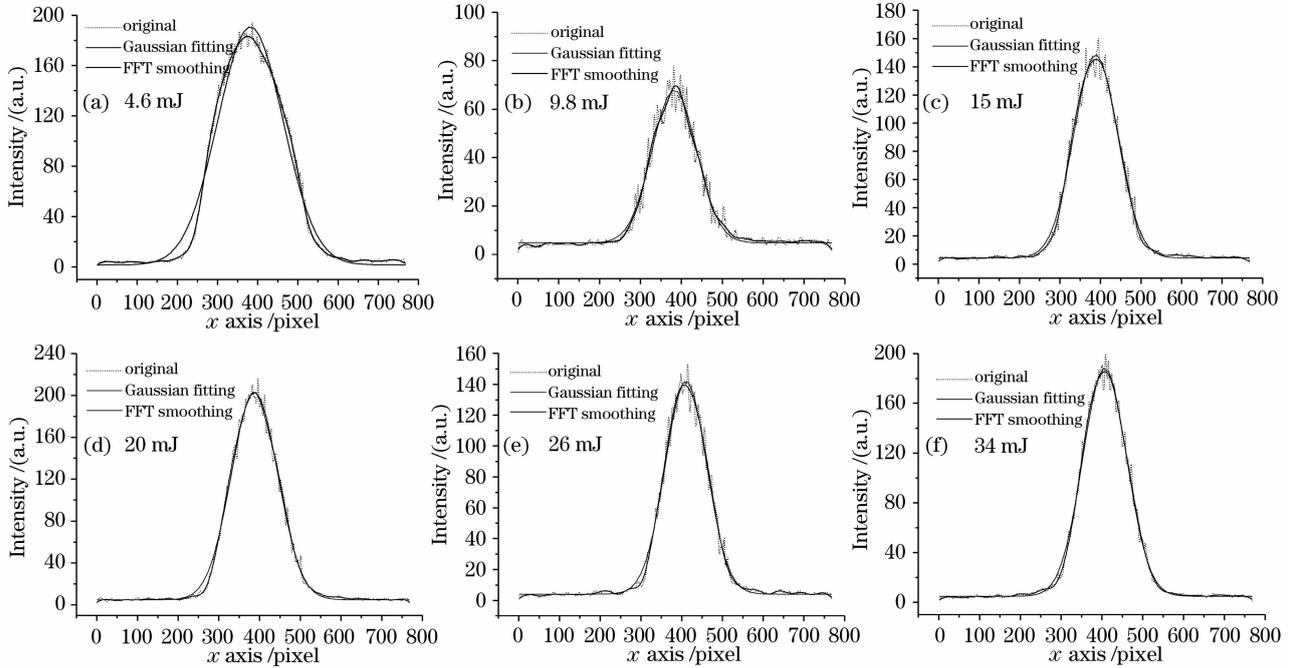


图 4 不同入射能量下受激布里渊散射光斑的空间光强分布

Fig. 4 Intensity profiles of SBS spots with different pump energies

取光强分布曲线的最大值的 $1/e^2$ 所对应的 x 轴像素数为光斑大小，统计每个入射能量下的入射光斑大小和受激布里渊散射光斑大小，如图 5 所示（图中实线为拟合曲线）。从图 5 中可以看出，入射光斑大小随入射能量变化不大，基本上在 2.5 mm 附近波动。这是因为，入射光束在固定位置的光斑大小和激光的能量没有关系，因此从理论上来说，使

用衰减片只能改变入射光束的能量而不会改变光斑大小。图 5 中入射光斑的大小出现波动主要是由于 CCD 图像采集和图像处理所引起的误差造成的。然而受激布里渊散射光斑大小表现出明显的变化，随着入射能量从 4.6 mJ 增大到 15 mJ，受激布里渊散射光斑大小迅速减小。在入射能量为 4.6 mJ 时（也就是阈值附近），受激布里渊散射光斑大小达到最大(2.95 mm)。在入射能量为 9.8 mJ 时(约 2 倍阈值)，受激布里渊散射光斑大小为 2.5 mm，几乎与入射光斑大小相等。在入射能量为 15 mJ 时(约 3 倍阈值)，受激布里渊散射光斑大小为 2.2 mm，比入射光斑还小一些。随着入射能量从 15 mJ 增大到 34 mJ，受激布里渊散射光斑大小变化不大，基本上在 2.2 mm 附近波动。受激布里渊散射光斑大小随入射能量出现这样的变化是因为，当入射能量在阈值附近时，后向散射的受激布里渊散射光束中仍存在一部分非相位共轭成分，导致其发散角较大，所以造成了受激布里渊散射光斑较大。随着入射能量增

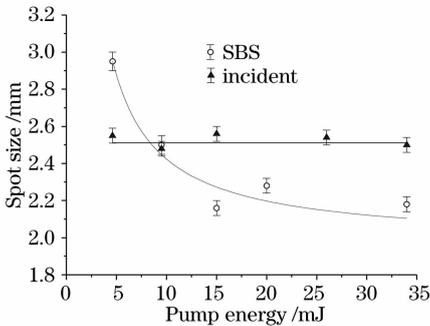


图 5 光斑大小随入射能量的变化

Fig. 5 Spot size of the incident and SBS spot versus pump energy

大,后向散射的受激布里渊散射光束中非相位共轭成分减小,其发散角减小,所以造成受激布里渊散射光斑也逐渐减小。受激布里渊散射光斑大小在入射能量从 15mJ 增大到 34mJ 时出现较大波动,除了上述原因以外,还有受激布里渊散射产生过程的不稳定性导致的结果^[10]。

4 结 论

将调 Q 激光脉冲聚焦到 FC-72 介质池中,利用 CCD 和数字图像处理技术,实验研究了后向受激布里渊散射光斑的空间光强分布,获得了光强分布和光斑大小随入射能量的变化规律。结果表明,在入射光束为高斯光束的条件下,当入射光能量增大时,受激布里渊散射光斑的空间光强分布由近高斯型变为高斯型。并且,受激布里渊散射光斑大小总体上是随着入射光能量的增大而逐渐减小的。当入射能量在受激布里渊散射阈值附近时,受激布里渊散射光斑大小达到最大,且大于入射光斑;当入射能量约为 2 倍阈值时,受激布里渊散射光斑大小和入射光斑大小近似相等(约 2.5 mm);当入射能量为 3 倍阈值以上时,受激布里渊散射光斑大小达到最小,在 2.2 mm 附近波动。

参 考 文 献

1 B. Ya. Zeldovich, V. I. Popovichev, V. V. Ragulskii *et al.*. Connection between the wave fronts of the reflected and exciting light in stimulated Mandel'shtam-Brillouin scattering[J]. *JETP*

- Lett.*, 1972, **15**: 109~112
- 2 Norman A. Kurnit, Scott J. Thomas. Application of a phase-conjugation Brillouin mirror to generation of high-quality variable-duration KrF pulses[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, **25**(3): 421~429
- 3 Stephan Schiemann, Wim Ubachs, Wim Hogervorst. Efficient temporal compression of coherent nanosecond pulses in a compact SBS generator-amplifier setup[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(3): 358~366
- 4 C. B. Dane, L. E. Zapata, W. A. Neuman *et al.*. Design and operation of a 150 W near diffraction-limited laser amplifier with SBS wavefront correction[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(1): 148~163
- 5 Youlun Ju, Baoquan Yao, Sheng Qi. High power 1.57- μm OPO pumped by MOPA with SBS[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(6): 358~360
- 6 Deng Shaoyong, Zhu Yongxiang, Guo Shaofeng *et al.*. Experiments of stimulated Brillouin scattering for pulse compression and energy reflectivity in K9 Glass and fused silica[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 219~224
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): 219~224
- 7 Liu Danping, Hu Yu. Experimental study of overcoming laser rod's thermal effect with stimulated Brillouin scattering phase conjugation mirror[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **32**(2): 184~187
刘丹平, 胡 渝. 利用受激布里渊散射相位共轭镜克服激光棒热效应的实验研究[J]. *中国激光*, 2007, **32**(2): 184~187
- 8 D. C. Jones, K. D. Ridley, Gary Cook *et al.*. Fidelity of Brillouin amplification with Gaussian input beams[C]. *SPIE*, 1991, **1500**: 46~52
- 9 V. Vlad, H. J. Eichler, V. Babin *et al.*. High reflectivity and fidelity SBS phase conjugation mirrors for solid state lasers[C]. *SPIE*, 2004, **5581**: 571~581
- 10 Boyd R. W., Rzazewski K., Narum P.. Noise initiation of stimulated Brillouin scattering[J]. *Phys. Rev. A*, 1990, **42**(9): 5514~5521