

用位相共轭镜实现多模光纤束光束 发散角压缩及光学不均匀性补偿*

陆祖康 陈 军 刘百宁

(浙江大学光科系, 现代光学国家重点实验室, 杭州 310027)

摘 要 数值孔径为 0.07 的多模光纤束与受激布里渊散射位相共轭镜组成的双光程装置中, 输出光束的远场分布呈典型的二维列阵孔径的衍射花样, 输出光能分布在 0.026 rad 内, 即由单根光纤芯径的衍射极限所决定的范围内, 远小于由数值孔径所决定的高阶模相应的发散角范围, 并且补偿了由光纤束不均匀性带来的缺陷。

关键词 位相共轭, 受激布里渊散射, 光纤束激光器。

1 引 言

光纤束激光器由于其优良的冷却散热条件而允许有很高的泵浦功率及脉冲重复率, 已成为高功率激光器的一种潜在的技术改进途径^[1,2]。据报道, 光纤束激光器的输出功率容量已达 250 W/cm²^[3], 而且由于光纤束允许相当高的 Nd³⁺ 掺杂浓度, 已运用光纤束锁模激光器输出 8 ps 的锁模短脉冲^[4]。但是活性多模光纤束的数值孔径目前还不能低于 0.15, 另一个严重问题是光纤束中每根光纤在激光谐振腔内形成互不关联的受激振荡, 因此光纤束激光器输出光束发散角大、光斑成散点状。改善光纤束激光振荡器及放大器的光束质量将是决定光纤束激光器能否实际应用的关键。

由受激布里渊散射形成的位相共轭镜应用于双程激光放大器补偿热畸变、应用于振荡器中作自调 Q 开关及减少远场发散角已取得了显著的效果^[5,6]。探索应用受激布里散射位相共轭镜于光纤束激光器以改善其光束质量是本研究的目的。作为研究的第一步, 以无源多模光纤束为对象, 探索利用受激布里渊散射位相共轭镜补偿光纤束不均匀性及压缩光束发散角的可能性, 得到了令人感兴趣的实验结果。

2 实验装置

所用的光纤束由芯径 100 μm、包层直径为 125 μm 的石英光纤按图 1 所示方式融熔为光纤束, 束长为 15 mm, 芯及包层均为石英, 单根光纤数值孔径为 0.07。选择高增益的受激布

* 本课题得到国家教委归国留学人员基金资助。

收稿日期: 1993 年 12 月 17 日; 收到修改稿日期: 1994 年 5 月 6 日

里渊散射介质 CS_2 ，其阈值在 $0.2 \sim 0.4 \text{ mJ}$ ，这一数值与文献[3]报道的光纤束激光器的每根光纤输出能量相当，因此有望应用于光纤束激光器中。实验装置如图 2 所示。由 Nd:YAG 振荡器发出的调 Q 激光脉冲经二级放大，激光束发散度接近衍射极限，约 $0.7 \sim 0.8 \text{ mrad}$ ；激光束经格兰棱镜及法拉弟旋转器组成的光学隔离器后进入一个三倍的倒置望远镜，输出光斑直径约为 0.6 mm (FWHM)，大约可以照明 30 余根光纤束中的光纤；通过光纤的光经透镜 1 会聚于 CS_2 布里渊散射池内，其返回光用 W_1 分光并用透镜 2 及 CCD 摄象机在焦面上记录远场分布；用 W_2 分光测量受激布里渊散射的反射率。为了使受激布里渊散射具有较低的阈值及较高的反射保真度，必须保证：1) 入射光具有较大的相干长度；2) 光脉冲上升时间应大于受激布里渊散射介质的声子寿命 τ_B 。第二个条件实质上是保证受激布里渊散射在各种受激散射模式竞争中占绝对优势的必要措施。这是因为， CS_2 的受激布里渊散射增益系数是比较大的 ($g_{\text{SBS}} = 130 \text{ cm/GW}$)，因此，

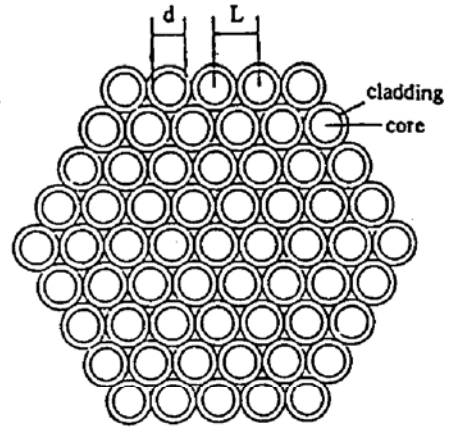


Fig. 1 Sketch for the used passive fibre bundle: d stands for the diameter of each fibre core ($d = 100 \mu\text{m}$) and L for the distance between two neighbour fibres and corresponds to the diameter of cladding ($L = 125 \mu\text{m}$)

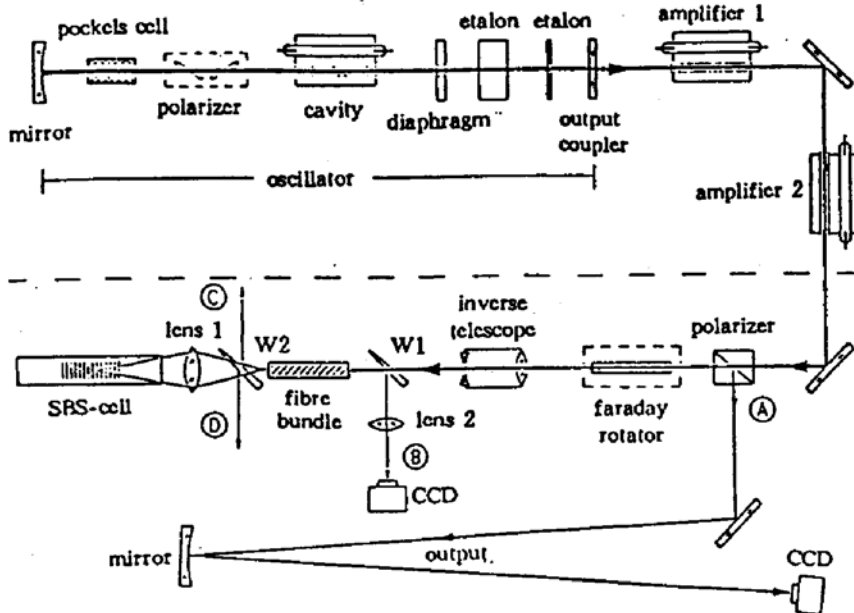


Fig. 2 Experimental setup; the laser system consists of an oscillator and two amplifiers (upper panel); a double-pass configuration for the passive fibre bundle incorporating a SBS-PCM (lower panel)

最易被激发。但是 CS_2 的受激拉曼散射增益系数 $g_{\text{SBS}} = 31 \text{ cm/GW}$ ，也具有相当的数值，而且 CS_2 的声子寿命较短 ($\tau_B = 16.7 \text{ ns}$)，因此，假如入射光脉冲宽度比声子寿命短，一方面受激布里渊散射在光脉冲入射时尚未完全建立达到最强，另一方面却由于光脉冲短的上升时间而造成入射初期较高的功率密度而极易激发其它的受激散射模式，这时后向散射波前反演的保

真度将会出现强烈的无规则大幅度涨落^[7]，各种模式的受激散射反射光将混杂在一起，这不仅影响位相共轭波前的质量，还严重影响反射波通过光纤束后的实际反射率。为抑制其它受激散射模产生，采用了加大入射光脉冲宽度 ($\Delta T = 60 \text{ ns}$)，并使光脉冲上升沿平滑，取得了显著的效果。为比较入射光的不同相干长度及脉冲形状对后向散射的影响，先在不加光纤束的三种条件下进行了实验：

1) 若用 LiF^- 色心晶体作被动调 Q 元件，工作在单峰域，激光器的单脉冲输出能量为 5 mJ，相干长度约为 6 cm，脉冲上升时间为 12 ns，由于此值小于 CS_2 的声子寿命 τ_s ，用它来泵浦 CS_2 的受激布里渊散射虽然仍能获得低的受激布里渊散射阈值及高的受激布里渊散射反射率。但只要输入能量稍稍超过受激布里渊散射阈值时，就在 CS_2 池中频繁出现等离子体激发而严重破坏了返回光质的质量。

2) 若用 KD^*P 泡克尔盒作主动调 Q 元件，并在 Nd:YAG 振荡器中插入厚度为 20 mm 及 2 mm、端面反射率为 50~70% 的法布里-珀罗标准具，振荡能级量控制在 2~3 mJ。经放大后输出脉冲宽度为 60 ns，上升沿为 30 ns。由于仍有多个纵模起振，脉冲波形存在调制，使光脉纵上升沿出现局部陡峭结构，如图 3(a) 所示。这种条件下，当输入能量为 3~5 倍受激布里渊散射阈值时仍不时在 CS_2 池中产生等离子体及光分解现象。

3) 最后采用了在 KD^*P 泡克尔盒上串联 100 μH 的电感的方法，使 Q 开关速度放慢，以利于激光振荡起始期内纵模竞争，从而获得了较为光滑的脉冲上升沿见图 3(b)，脉冲宽度

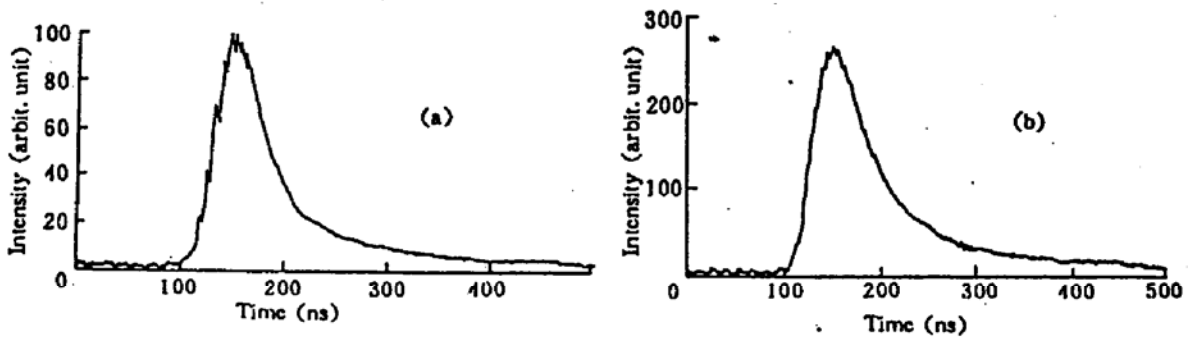


Fig. 3 Pulse form in case of active Q-switching with a KD^*P pockels cell (a) and after connecting a coil with 100 μH inductance to the KD^*P pockels cell in series (b)

为 60 ns。同时仍插入二个与实验 2) 中相同的法布里-珀罗标准具，使相干长度大于 0.6 m。将该激光脉冲会聚在 CS_2 介质中，得到的受激布里渊散射反射率曲线如图 4 所示，最高反射率大于 80%，其受激布里渊散射阈值为 0.4 mJ。当输入能量为数十倍于受激布里渊散射阈值时，仍未在 CS_2 介质中发现明显的等离子体激发。在图 2 中的 A 处(返回光从格兰棱镜反射出去的光)用黑照相纸接收受激布里渊散射反射后再次通过望远镜及法拉弟盒后的光，发现黑纸上的激光焦斑均匀而呈圆形，此时受激布里渊散射后向散射位相共轭光波保真度良好。

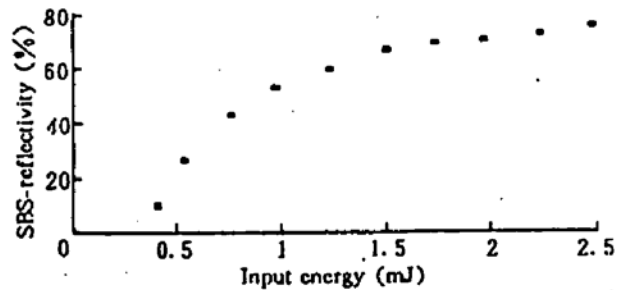


Fig. 4 The SRS reflectivity curve in CS_2 medium by excitation with pulses shown in Fig. 3(b), the SRS threshold in this case is 0.4 mJ

比较上述三种实验条件可见，在实验 3) 中由于脉冲宽度大，上升沿光滑，并使用二个标准具而有长的相干长度，从而使受激布里渊散射在受激散射模竞争中获胜，单一模式被激发而保证了好的位相共轭光质量。在此基础上，利用上述实验 3) 中确定的实验装置，对加入光纤束后的受激布里渊散射位相共轭进行了如下实验研究。

3 实验结果

用直径为 0.7 mm 的 He-Ne 激光束直接照射光纤束端而任一区域，接收屏离光纤束 1.2 m。图 5(a) 是中心区域曝光过度的远场分布图，测得衍射光场分布在直径为 70~80 mm 的圆域内，此值正相应于由光纤的数值孔径(0.07)所确定的范围、微调光纤束方向可见到一直径为 18~20 mm 的暗环在移动，这是由单根光纤芯径决定的第一衍射暗环，图 5(b) 是对中心区域适度曝光的图像，可见到光纤列阵远场衍射呈规则排列，二个邻近点相距 6 mm。当 He-Ne 光照明在某些不均匀的光纤束部位或不光滑端面部位时，则衍射点阵变得模糊不清。

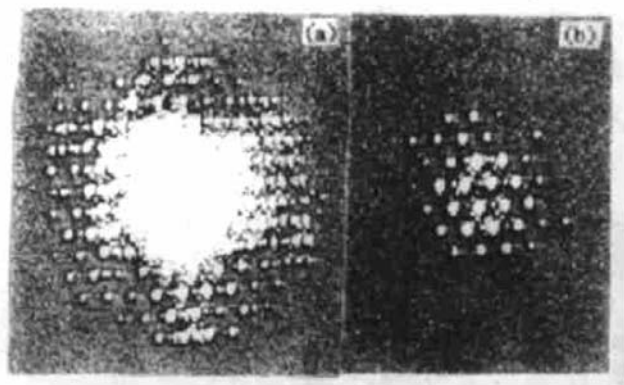


Fig. 5 Nearly far-field distribution of fibre bundle in case of an illumination with a He-Ne laser beam, the overexposed center area of this diffraction wave (a) and with a proper exposure of this center area (b)

用 Nd:YAG 激光束照明光纤束，并用一块 $f = 100$ mm, $\phi = 30$ mm 透镜对出射光束聚焦若透过部位的光纤束质量完好，则在透镜焦平面上得到类似图 5 的规则衍射点阵，而在光纤束出口的像平面上(离焦平面 50 mm 处)出现一个高功率密度的光斑。在此二个平面之间的位置上均可能激发受激布里渊散射位相共轭，其总体效果应是干涉迭加。如图 6 所示。

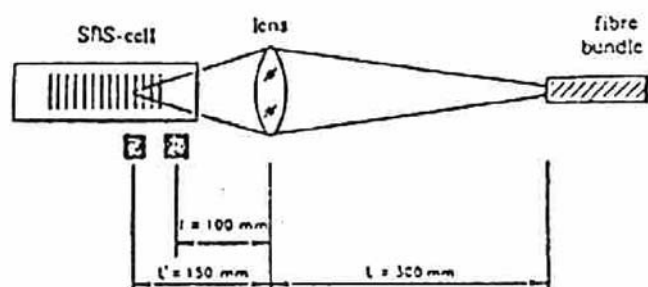


Fig. 6 Sketch for SRS process near the focal plane and picture plane of the focussing lens

在图 2 的位置上用 CCD 摄像机记录了位相共轭光再次通过光纤束后的远场分布状况如图 7 所示。特别值得指出的是，即使让 Nd:YAG 激光束入射到光纤束中均匀性极差的局部区域，也能获得如图 7 所示的清晰规则的图形。这与前面所述用 He-Ne 光观察通过光学畸变区域所发生的现象存在本质上的差异，显示了受激布里渊散射位相共轭镜对光学畸变的补偿作用。

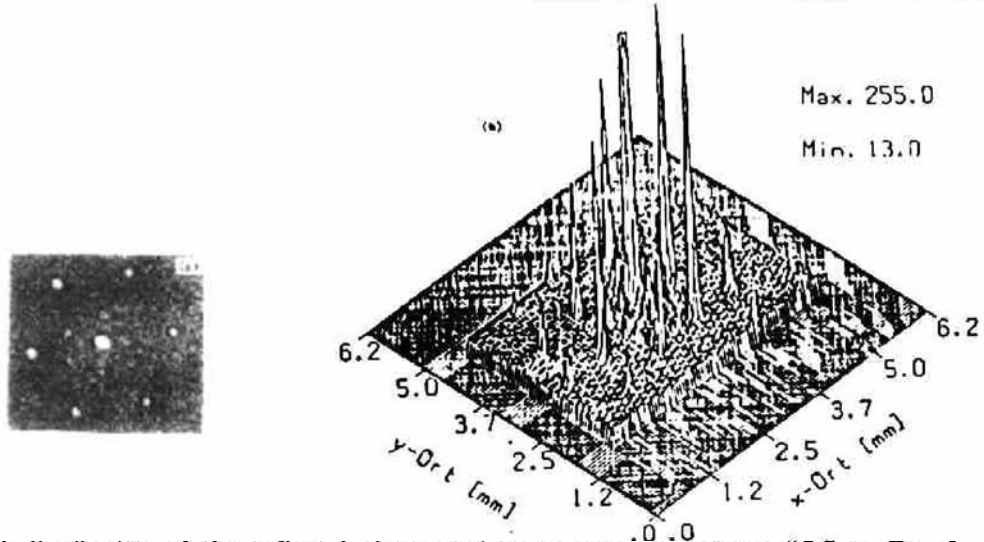


Fig. 7 Far-field distribution of the reflected phase conjugated beam at position "B" in Fig. 2; two dimensional pattern (a) and three dimensional pattern (b)

4 讨 论

不同于连续的光学畸变介质, 光纤束的不连续的芯径列阵排列导致了位相共轭波在再次经过光纤束后波面的空间分割, 这种波面的空间有序分割必将产生类似于二维列阵孔径的衍射效应。完全可以用衍射理论对此进行讨论:

1) 图 7 所示的远场衍射光场分布范围是由单根光纤的衍射角决定的。衍射角 $\theta = 1.22 \lambda/d$, 对于 $d = 100 \mu\text{m}$ 的光纤, $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$. 可得全张角为 $2\theta = 26 \text{ mrad}$

2) 衍射图样正是由按图 1 所示的六等分排列的光纤孔径列阵的傅里叶变换所得。各个斑点间的间隔则是由单根光纤间的间隔而确定, 它近似地等于光纤包层直径 $L = 125 \mu\text{m}$, 因此, 衍射斑点间的衍射张角为 $\alpha = \lambda/L = 8.4 \text{ mrad}$ 。

3) 每个斑点的大小则是由光纤束被激光照明的范围所确定, 照明范围为直径为 $D = 0.6 \text{ mm}$ 的圆域则由圆域函数 $\text{Cirl}(\tau/[D/2])$ 的傅里叶变换即贝塞尔函数一级零点确定了每个斑点的衍射张角为

$$2\beta = 2 \times 1.22(\lambda/D) = 4.3 \text{ mrad}$$

衍射的中心亮斑经 3 倍扩束望远镜并从格兰棱镜输出后, D 增加了 3 倍, 2β 降至 1.43 mrad 。图 7 中给出的实验结果与以上计算完全相符。

与图 4 所示的不经过光纤束时的受激布里渊散射反射率相比, 经过光纤束后受激布里渊散射阈值为 2.5 mJ , 而反射率仅为 20%, 见图 8。设想若采用二次傅里叶变换的 4F 光学系统取代单透镜聚焦以增加光纤束被照明范围, 甚至超过光纤束口径, 使每根光纤入射的光功率基本相等, 则通过光纤束后的受激布里渊散射反射率预期会有显著增加。

结 论 本研究成功地演示了受激布里渊散射-位相共轭镜对光纤束的光学不均匀性的有效

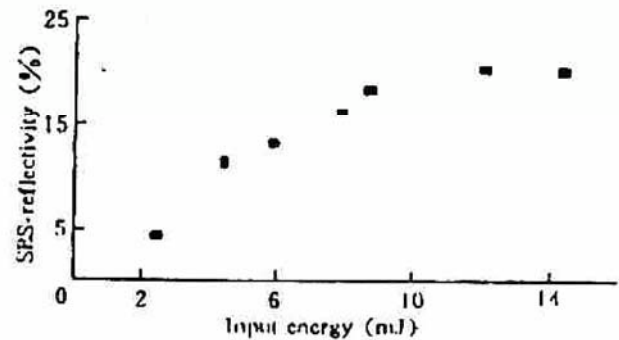


Fig. 8 The SBS reflectivity curve in CS_2 medium by excitation with pulses shown in Fig. 3(b); the SBS threshold in this case is 2.5 mJ

补偿,并使光纤束在双程光学系统中的输出光束发散角从原有的数值孔径大小压缩到单根光纤的衍射极限内,并且从理论及实验上证明了其输出波前远场分布与光纤束列阵孔径衍射一致。这些结果为利用受激布里渊散射-位相共轭镜改善光纤束激光器及放大器的光束质量提供了有益的结果。实际应用中,如光纤的退偏效应、各光纤之间的光振荡耦合问题及放大器应用中的振荡器激光与光纤束放大器耦合问题等等还需作进一步研究。

本工作是在柏林工业大学光学所激光组进行的,作者得到了 DAAD 资助。在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] U. Griebner, R. Grunwald, R. Koch, *Proc. Int. Conf. on Laser*, 1993, : 319~325
- [2] L. E. Zapeta, Continuous-Wave 25 W Nd³⁺; glass fiber bundle laser. *J. Appl. Phys.*, 1987, 62(8): 3110~3115
- [3] U. Griebner, R. Gruwald, R. Koch, 35 W average power flashlamp-pumped Nd: glass fibre bundle laser of only 0.2 cm³
- [4] P. Glas, A. Schirmacher, H. Schonagel *et al.*, Phase locked ultrashort pulse generation in an array of fibre lasers. *Proc. EQEC' 93*, 1993: 18~20
- [5] D. A. Rochwell, M. S. Mangir, J. J. Ottusch, Energy scaling of phase-conjugated solid state lasers. *Proc. SPIE*, 1992, 1627: 56~64
- [6] H. J. Eichler, R. Menzel, D. Schumann, 10 W singel-rod Nd: YAG laser with stimulated Brillouin scattering Q-switching mirror. *Appl. Opt.*, 1992, 31(24): 20~25
- [7] C. B. Dane, W. A. Neuman, L. A. Hackel, Pulse shape dependence of stimulated Brillouin scattering phase conjugated on fidelity for high input energies. *Opt. Lett.*, 1992, 17(18): 1271~1273

Compensation of Beam Divergence and Optical Inhomogeneity in a Multimode Fiber Bundle with Phase Conjugating Mirror

Lu Zhukang Chen Jun Liu Baining

(Department of Optical and Scientific Instrumentation Engineering

The State Key Laboratory of Modern Optical Instruments, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 17 December 1993; revised 6 May 1994)

Abstract Insert a multimode optical fiber bundle with a numerical aperture of 0.07 into the double-pass SBS-phase conjugate master oscillator-power amplifier arrangement, we have got the typical far field diffraction pattern of the two-dimensional matrix aperture. The output laser energy was concentrated into a angular aperture of 26 mrad. which corresponds to the diffraction limit of the singel fiber diameter and is much smaller than the beam divergence of the high order mode according to the numerical aperture of the optical fiber. Also the compensation of the optical inhomogeneity of the fiber bundle has been observed.

Key words phase conjugation, SBS, optical fiber bundle laser.