

受激布里渊散射相位共轭镜产生 高质量短脉冲 XeCl 激光

周卫东 余吟山 洪玲 季明 高晓明 张为俊
(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

摘 要 利用受激布里渊散射(SBS)相位共轭镜改善 XeCl 激光光束质量和压缩脉冲宽度, 给出了脉宽与泵浦能量、焦点位置的关系。光脉冲宽度从 50 ns 压缩到 17 ns, 光束发散角也减小到原来的 1/3, 散射光功率密度也较泵浦光得到了提高。

关键词 相位共轭镜, XeCl 激光, 光束质量, 脉冲压缩。

1 引 言

多年来, 受激布里渊散射被广泛用于非线性光学相位共轭^[1, 2]和脉冲压缩领域^[3, 4]的研究, 特别是大功率脉冲激光系统中用以改善光束质量^[5]。放电泵浦的准分子激光作为大功率紫外光源, 在许多领域有独特的应用。准分子激光脉宽通常为数十纳秒, 改善其光束质量, 减小脉冲宽度是许多应用的共同要求, 近年来, 国际上广泛开展了准分子激励的受激布里渊散射的研究^[6-8]。作者在宽带 XeCl 振荡-放大的准分子激光系统中, 用正己烷作相位共轭镜, 较详细地研究了共轭反射光的脉冲压缩特性以及能量、阈值和光束质量。

2 实验装置

图 1 为实验装置图, 采用自制的振荡-放大准分子激光系统。它有两个放电区, 分别作为振荡-放大系统振荡腔和双程放大腔, 用同一个闸流管控制放电, 布里渊池放在单程放大的激光后面, 产生相位共轭反射光, 该共轭光再次通过放大腔, 进行第二次放大。除能补偿光束在第一次放大过程中产生的畸变外, 布里渊镜对第一次放大后光脉冲中的放大的自发辐射 (ASE) 成分的反射可以忽略, 因此有利于抑制光束中的放大的自发辐射成分, 而如果使用通常的反射镜, 放大的自发辐射光经两次通过放大腔后将在输出光中占相当大的比例, 降低了光束质量。

放电区窗口采用高质量的石英片密封, 窗口调倾斜以免石英窗口与高反镜片构成谐振腔。两个直径为 8 mm 的小孔光栏分别放在放大腔放电区的两端, 以抑制输出激光中放大的自发辐射。光路中加入若干分束镜以便记录泵浦激光和共轭光的波形和能量。最后进入布里

渊池的是一光斑直径 8 mm、脉冲宽度 50 ns (FWHM)、发散角 2×3 mrad、输出能量 14 mJ 的激光。使用的布里渊介质是正己烷。其吸收系数^[9]为 0.11 cm^{-1} 。

LPT-1B 型能量计分别置于图中 J_{m1} 、 J_{m2} 的位置，用于泵浦光和散射光的能量检测，泵浦光和散射光脉冲波形由快速响应紫外光的 EMI9558QB 型光电倍增管 PD_1 、 PD_2 接收，分别进入 COS6100G 示波器观察记录。

3 实验结果

3.1 脉冲宽度和脉冲形状

首先，准分子激光束被聚焦到正己烷溶

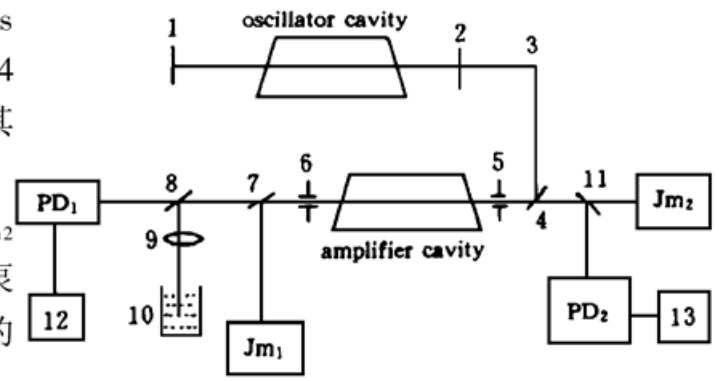


Fig. 1 Diagram of experiment setup. 1, 2, 3: high reflecting mirror; 2, 4: 50% reflecting silica mirror; 5, 6: aperture; 7, 11: silica beam splitter; 9: lens; 10: phase-conjugate mirror; 12, 13: oscilloscope

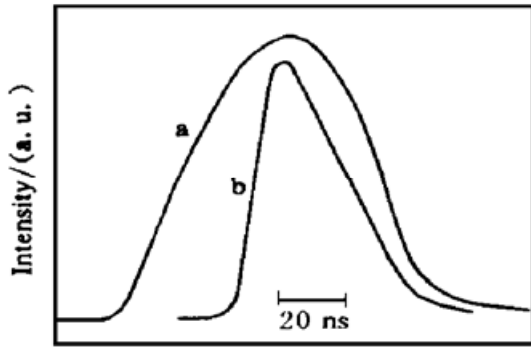


Fig. 2 Temporal waveforms of bump pulse (a) and SBS pulse (b)

液中研究泵浦能量对受激布里渊散射能量和脉冲宽度的影响。在实验中仔细调整光路，以避免光线被液面和聚焦透镜表面反射。图 2 是准分子激光脉冲波形和经放大后的受激布里渊散射光脉冲波形。受激布里渊散射光脉冲宽度主要由泵浦光脉冲宽度以及布里渊介质达到受激散射阈值的时间决定^[10]。本文的泵浦光脉宽 50 ns (FWHM)，散射光脉宽约 24 ns (FWHM)，脉冲压缩比为 2.0 倍。特别值得提到的是受激布里渊散射光脉冲前沿小于 7 ns，而泵浦激光脉冲上升前沿约 18 ns，快的受激布里渊散射光脉冲前沿反映了受激布里渊散射瞬态相应特性。

通过降低泵浦光能量能得到更短的受激布里渊散射光脉冲。

采用焦距 76 mm 的聚焦透镜，当泵浦能量从 2.5 mJ 逐渐增加到 5 mJ 时，相应的后向受激布里渊散射光脉宽 (FWHM) 从 17 ns 增加到 25 ns，散射光强度也相应降低，如图 3 所示。采用更高的泵浦能量泵浦，散射光脉宽不再出现明显变化，表明散射光脉宽将趋于饱和。需要指出的是，整个实验过程中，没有观察到泵浦光脉宽的明显变化。受激布里渊散射光脉宽在低泵浦能量条件下明显减小的原因是，随着泵浦能量的增加，泵浦光能量变化率增大，相应地达到阈值泵浦功率密度的时间缩短，因而散射光脉冲对泵浦光脉冲的延时缩短，受激布里渊散射效率也得到提高。

图 4 是采用焦距为 76 mm 的聚焦透镜，在 14 mJ 泵浦能量条件下，改变焦点在布里渊介质中的位置，得到的不同焦点位置下受激布里渊散射光脉宽。其中 d 是焦点在布里渊池中的深度。当焦点在液面下约 5 mm 时，有最强的相位共轭反射光。移动焦点位置发现，焦点在布里渊池中越深，受激布里渊散射光脉宽越窄。

值得指出的是，改变透镜焦点在布里渊介质中的位置比改变泵浦能量能更有效的压缩脉冲宽度，且散射光能量和脉宽都比较稳定。

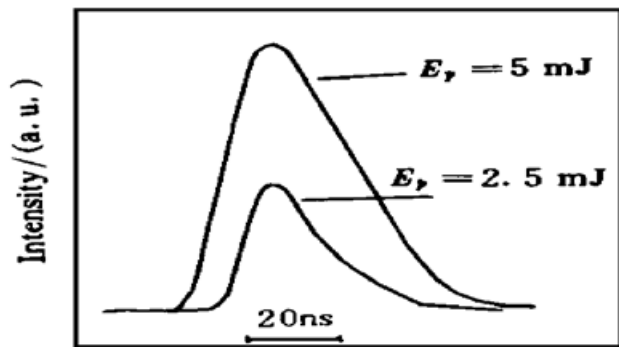


Fig. 3 Temporal waveforms of SBS pulse under different pump energy

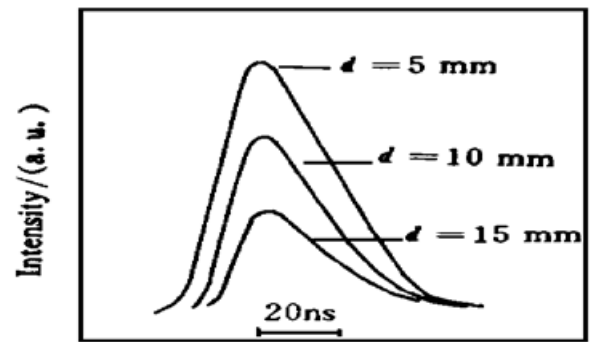


Fig. 4 SBS pulse waveforms under different depth of the lens focus into the SBS mirror

3.2 受激布里渊散射能量与阈值

表 1 是采用 76 mm 的聚焦透镜、焦点在液面下 5 mm 时, 不同泵浦能量 E_{in} 条件下的受激布里渊散射双程放大输出能量 E_{out} 和功率 P_{out} 。

Table 1. The influence of pump energy on the double-pass amplified SBS output beam energy and power

E_{in}/mJ	E_{out}/mJ	E_{out}/E_{in}	P_{in}/MW	P_{out}/MW	P_{out}/P_{in}
2.5	0.8	0.32	0.05	0.057	1.14
6.5	4.1	0.63	0.13	0.164	1.26
11.0	8.3	0.75	0.22	0.332	1.51
14.0	10.7	0.76	0.28	0.428	1.53
15.5	12.0	0.77	0.31	0.480	1.55

表 2 是泵浦能量 14 mJ、不同焦点位置时的受激布里渊散射双程放大输出能量 E_{out} 。

Table 2. The influence of the position (d) of focus point under the SBS medium on the double-pass amplified SBS output beam energy

d/mm	3	4	5	6	7	8	9	10
E_{out}/mJ	1.3	2.3	10.7	9.0	6.3	4.6	4.3	4.3

通过逐渐减小泵浦能量的方法, 得到了不同透镜焦距下受激布里渊散射阈值。这里定义受激布里渊散射光刚刚出现时的泵浦能量为阈值泵浦能量。对于焦距 f 为 76 mm 和 360 mm 的透镜, 测到的阈值泵浦能量分别为 1.5 mJ 和 5 mJ。显然, 随着透镜焦距的增加, 后向受激布里渊散射的阈值泵浦能量也相应增加。因此, 布里渊池前面的聚焦透镜焦距非常重要, 它直接影响受激布里渊散射相互作用长度, 从而影响阈值能量和反射率的大小。

除掉放大腔前后的小孔光栏, 光束发散角变成 6×12 mrad, 采用焦距 76 mm 的聚焦透镜, 测得阈值能量增大到 15 mJ, 明显大于较小泵浦光发散角时的阈值。这是由于泵浦激光光束发散角越大, 相应焦点处的功率密度越低, 就越不容易产生后向受激布里渊散射。另外还发现, 较大的光束半径, 其能量反射率也较低, 这可能是由于随着光束半径的增大, 泵浦光束的均匀性和空间相干性变差而导致的。

3.3 受激布里渊散射光束质量的测量

通过测量光束发散角来确定受激布里渊散射光束质量。发散角是通过测量放在一焦距为 2 m 的透镜后面小孔的能量确定, 并使得小孔通过 90% 的激光能量来确定光束直径。这样测得泵浦激光发散角为 2×3 mrad, 后向散射放大后的光束发散角为 0.6×0.9 mrad。此外还发

现,同泵浦光相反,散射光表现出一定程度的收敛性,从另一个侧面证实了后向散射光的共轭特性。

测量结果表明,散射光束的发散角比入射激光好,因而光束质量较泵浦激光有一定程度的改善。作者认为,在近阈值和短焦距时,泵浦激光聚焦在布里渊池中,光束质量好的部分聚焦好,功率密度高,达到阈值而被反射,光束质量差的部分(即高空间频率部分)聚焦差,远离焦点功率密度达不到阈值,因而不能发生受激布里渊散射,所以受激布里渊散射光束质量应比泵浦光束质量好。

光栏孔径的增加,受激布里渊散射光束质量也变差。这是由于随着光栏孔径的增加,竖直方向更多的放电区被利用,焦点处竖直方向上光能向两侧逐渐减小,但并不随孔径增大而呈线性关系,显示出该方向上光束质量有所变差。

从表 1 中可以看出,当焦点位于液面下 5 mm、泵浦功率为 0.31 mW 时,受激布里渊散射双程放大光功率是泵浦激光的 1.55 倍,若考虑光斑大小的因素,则其功率密度更高。采用受激布里渊散射相位共轭镜,可以获得高亮度、低发散角的共轭激光。

4 分析与讨论

4.1 增益与阈值

XeCl 激光泵浦正己烷时,由于泵浦光脉冲宽度为 50 ns,远大于声子寿命(约 0.1 ns),采用稳态理论来分析受激布里渊散射阈值。对于一般的 XeCl 激光,自由频带宽度 $\Delta\nu_L = 1500$ GHz,使用焦距 76 mm 的聚焦透镜,其特征增益长度 l_g (12 cm) 大于相干长度 L_c (0.2 mm),因此布里渊增益因子 g_B 取值^[4]

$$g_B = \frac{\omega_L^2 (\mathcal{Y}^e)^2}{\rho_0 c^3 n v_a (\Gamma_L + \Gamma_B)} \quad (1)$$

式中 v_a 为非线性介质中声子波速, \mathcal{Y}^e 为电致伸缩常数, ρ_0 和 n 分别为介质密度和折射率, Γ_L 和 Γ_B 分别为激光和声子波线宽,且 $\Gamma_L = 2\pi\Delta\nu_L$, $\Gamma_B = 2\pi\Delta\nu_B$, c 为光速。上式可以写成:

$$g_B = \frac{g_B^0}{1 + \Delta\nu_L/\Delta\nu_B} \quad (2)$$

这里,

$$g_B^0 = \frac{\omega_L^2 (\mathcal{Y}^e)^2}{2\pi\rho_0 c^3 n v_a \Delta\nu_B} \quad (3)$$

为 $\Delta\nu_L = 0$ (单色光) 泵浦时的受激布里渊散射增益, $\Delta\nu_B$ 为声子波频宽^[9], 且

$$\Delta\nu_B = \frac{\Gamma_B}{2\pi} = \frac{2\eta n^2 \omega_L^2}{\pi\rho_0 c^2} \quad (4)$$

由于 g_B^0 和 $\Delta\nu_B$ 决定于非线性介质,因此,在同样泵浦条件下,宽带受激布里渊散射的能量反射率将下降一个因子,如文献[2]中采用线宽 1.4 μm 的泵浦源,反射率高达 72%,而本文的反射率仅为 8%。相应地宽带受激布里渊散射阈值比窄线宽高。

此外,比较差的光束质量则是受激布里渊散射反射率比较低的另一个重要因素。本文的激光束发散角为衍射极限角的 30 倍,它直接影响焦点处泵浦光能量分布以及相互作用长度(在聚焦束条件下认为等于共焦参数),从而影响受激布里渊散射增益。

4.2 泵浦能量和脉冲宽度的关系

激光作用于布里渊介质, 要经过一定的时间才能达到或超过产生受激布里渊散射的阈值光强度。对于一定的相干长度的激光束和布里渊介质, 聚焦透镜一定, 有效相互作用长度是确定的, 其阈值光强度也是定值。而泵浦光强度可以由下式求出。

$$I_p = \frac{1}{\pi\omega^2} \frac{dE}{dt} \quad (5)$$

在泵浦光脉冲前沿一定时, 随着泵浦光能量的增大, 相应地到达阈值光强度的时间缩短, 表现为受激布里渊散射光相对于泵浦光脉冲延时缩短, 受激布里渊散射光脉冲展宽, 这与本文的实验结果是一致的。

结 论 利用频带宽度远大于声子频率的 XeCl 激光泵浦正己烷介质, 进行受激布里渊散射实验, 压窄激光脉冲宽度, 并利用受激布里渊散射镜补偿双程放大激光的空间畸变, 改善激光光束质量, 取得了较好的实验结果:

1) 激光脉冲宽度在近阈值附近, 成功地压缩到 17 ns, 是人射激光脉宽的 1/3, 该压缩是斯托克斯光非线性放大和受激布里渊散射阈值效应共同作用的结果, 在近阈值工作状态下, 受激布里渊散射阈值效应对脉冲宽度的压缩起了很大的作用。且斯托克斯光波形上升前沿陡峭, 干净。

2) 在宽频带激光作用下, 产生的散射光同样具有相位共轭特性; 受激布里渊散射镜能够很好地抑制双程放大激光中放大的自发辐射成分, 光束质量得到改善, 光束发散角明显减小。此外, 经放大后的斯托克斯光亮度较泵浦光有明显提高。

3) 散射光脉冲宽度明显依赖于泵浦光脉冲能量和聚焦透镜焦点在布里渊介质中的位置, 在近阈值附近, 有最小的散射光脉冲宽度。另外, 透镜焦点在受激布里渊散射池中的位置对受激布里渊散射反射率有很大的影响。

4) 宽频带受激布里渊散射散射阈值较窄频带时提高了许多, 受激布里渊散射反射率也较窄频带时低得多, 因此进行宽频带泵浦时, 应相应提高泵浦光的功率密度。

参 考 文 献

- [1] M. C. Gower, KrF laser amplifier with phase conjugate Brillouin retroreflectors. *Opt. Lett.*, 1982, **7** (9): 423~ 425
- [2] E. Armandillo, D. Proch, High efficient, high quality phase conjugate reflection at 308 nm using stimulated Brillouin scattering. *Opt. Lett.*, 1983, **8**(10): 523~ 525
- [3] R. Fedosejevs, A. A. Offenberger, Subnanosecond pulses from a KrF laser pumped SF₆ Brillouin amplifier. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1985, **QE-21**(10): 1558~ 1562
- [4] P. Narum, R. W. Boyd, Effect of laser mode structure on stimulated Brillouin scattering. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1986, **QE-22**(11): 2161~ 2167
- [5] C. Brent Dand, William A. Neuman, Lloyd A. Hackel, High energy SBS pulse compression. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1994, **QE-30**(8): 1907~ 1915
- [6] A. A. Filippo, M. R. Perrojnec, Experimental study of stimulated Brillouin scattering by broad-pump-ing. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **QE-28**(9): 1859~ 1863
- [7] N. A. kurnit, S. J. Thomas, Application of a phase-conjugate brillouin mirror to generation of high-quality variable-duration KrF pulse. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1989, **QE-25**(9): 421~ 429
- [8] M. R. Perrone, Y. B. Yao, Stimulated Brillouin scattering dependence on the XeCl laser spectrum. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1994, **QE-30**(5): 1327~ 1331

- [9] W. Kaiser, M. Maier, Stimulated Rayleigh, Brillouin, and Raman spectroscopy. *Laser Handbook*, Vol. 2 T. F. Arecchi, E. D. Schuaz-dubois, eds. Amsterdam, North-Holland, 1972 : 1077~ 1150
- [10] A. D. Case, M. R. Osborne, M. T. Damzen *et al.*, A flashlamp-pumped dye laser with SBS phase-conjugate resonator. *Opt. Commun.*, 1989, **69**(3, 4) : 311~ 314

Phase-Conjugate Mirror for Generation of High Quality and Short Pulse XeCl Laser

Zhou Weidong Yu Yinshan Hong Ling Ji Ming
Gao Xiaoming Zhang Weijun

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

(Received 4 June 1997; revised 4 August 1997)

Abstract Stimulated Brillouin scattering (SBS) phase-conjugate mirror was used to produce XeCl laser beam of good optical quality and short time duration. The amplified phase-conjugate beam duration could vary from 50 ns to 17 ns, by changing the pump pulse energy or the depth of the lens focus into the SBS medium. The spatial quality of this beam was improved.

Key words phase-conjugate mirror, XeCl laser, high quality, pulse compression.