

XeCl 准分子激光在铅蒸气中的受激喇曼散射

霍芸生 楼祺洪 祁建平 丁泽安 王润文
(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

研究了 XeCl 准分子激光在铅蒸气中的喇曼散射的输出能量及转换效率的参数依赖关系, 得到能量 ~120 mJ、峰值功率 ~2 MW 的喇曼光输出脉冲。观察到喇曼光脉冲波形上的多峰结构, 并将其归因于喇曼散射中的合作效应。

一、引 言

随着高功率准分子激光器的发展, 准分子激光器的紫外波段激光输出在 H₂、CH₄ 等气体^[1]及铅、钡等金属蒸气^[2,3]中的受激喇曼散射也得到了广泛的研究。通过喇曼频移所产生的可见光及近紫外波段的高功率相干辐射, 填补了这个波段中高功率激光的空白, 有着广阔的应用前景。

从图 1 所示的能级图中可知, 铅原子的基态 $6s^2 6p^2 \ ^3P_0$ 到激发态 $6p7s \ ^3P_1$ 的跃迁 (35287 cm^{-1}) 与波长为 3080 \AA 的 XeCl 准分子激光的光子能量恰好近于共振; 而 $6p7s \ ^3P_1$ 能级到另一较低激发态及基态的跃迁都有着较强的振荡强度 $f^{[4]}$ 。因此 XeCl 准分子激光在铅蒸气中的受激喇曼散射有较高的增益。在此过程中所产生的波长为 4590 \AA 的喇曼光处于海水光谱的透射窗口处, 有可能被用于潜艇的激光通信^[5]。

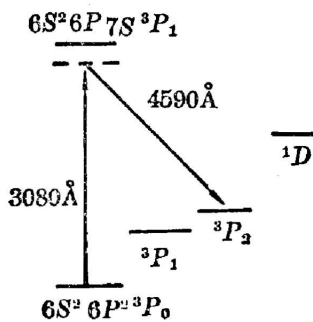


Fig. 1 Partial energy level diagram of Pb showing the Raman conversion scheme

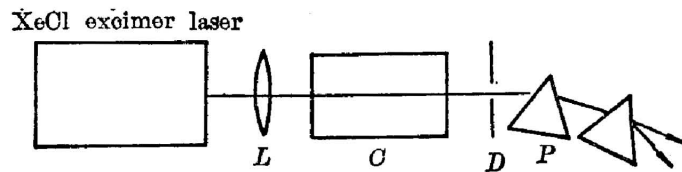


Fig. 2 Schematic of the experimental set-up
L—lens; C—Raman-cell; D—diaphragm;
P—prism

本文主要研究了 XeCl 准分子激光在铅蒸气中的受激喇曼散射能量随一些参数(如泵浦光强度、铅原子密度、缓冲气体压力等)的变化。得到能量为 120 mJ、峰值功率约 2 MW 的受激喇曼散射光脉冲,能量转换效率约 18%。实验中观察到,在一定条件下,喇曼散射光脉冲波形呈多峰结构,它可归因于铅原子电子能级间喇曼散射的合作效应。

二、实验装置

实验装置如图 2 所示。实验中的泵浦源为 X 光预电脑、横向流动 XeCl 准分子激光器^[6]。其输出能量约 1.2 J、脉宽约 60 ns 的 3080 Å 紫外激光脉冲。在输出窗口处的光束截面约 $3 \times 3 \text{ cm}^2$, 发散角约 2 mrad。喇曼池 C 是一根长约 1.7 m, 内径 28 mm 的不锈钢管。它可以被管式电炉加热到约 1200°C, 热区长度约 1 m(高纯铅粉均匀置于热区长度上, 氦气被用作缓冲气体)。近两端窗口处有水冷装置以防止铅蒸气玷污石英窗口。泵浦激光束被焦距为 180 cm 的透镜 L 聚焦于喇曼池中央, 估计焦斑处功率密度约 160 MW/cm^2 , 由铅蒸气中的受激喇曼散射所产生的波长为 4590 Å 的喇曼光, 经两块石英棱镜色散后, 进入炭斗或光二极管进行脉冲能量或波形的测量。由于在聚焦透镜及喇曼池窗口处的反射、吸收的损耗及喇曼池孔径的限制, 当喇曼池未被加热时, 在喇曼池的输出窗口处所测得的泵浦光能量约为 660 mJ。

三、结果与分析

在图 3 中给出了当泵浦光能量固定为 660 mJ, 喇曼池的温度改变时所得到的喇曼散射光能量随喇曼池中铅的蒸气压的变化。当喇曼池被加热到 1040°C 时, 开始有蓝色的喇曼光出现, 此温度下的铅蒸气压约为 3 Torr。随着喇曼池温度的升高, 喇曼散射光的能量也随之增大。当加热到管式电炉所允许的最高温度 1220°C 时, 得到 120 mJ 的喇曼散射光能量, 相应的从泵浦光到喇曼光的能量转换效率为 18%, 量子转换效率为 27%。由图 3 可见, 当

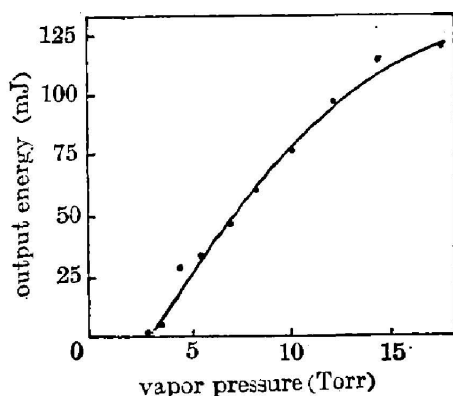


Fig. 3 Dependence of the Raman-shifted radiation energy on Pb vapor pressure in the Raman-cell

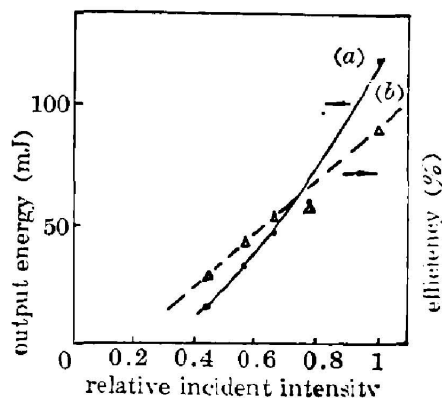


Fig. 4 Dependence of energy (a) and efficiency (b) of the Stokes emission on the relative incident laser intensity

喇曼池中铅蒸气压高于 10 Torr 时, 受激喇曼散射光能量的增长已逐渐趋于平缓。这表明在此条件下喇曼散射光能量的增长主要取决于泵浦光强度, 而不是由于铅原子数的限制^[7]。

在图 4 给出了当喇曼池温度维持在 1220°C 时 (相应的铅蒸气压约为 17 Torr), 受激喇曼散射光的能量及转换效率随泵浦激光强度的变化。泵浦光的强度是通过在图 2 所示的透镜 L 与喇曼池 C 之间插入对 3080 Å 泵浦光有不同反射率的镀介质膜的石英片而加以改变的。从图 4 中可以看到受激喇曼散射光的能量及转换效率都随泵浦激光强度的增大而上升。并且直至实验中最大可达到的泵浦光强处, 尚未出现饱和迹象。因此为提高转换效率及增大喇曼散射光的输出, 应进一步提高泵浦光强度, 我们将采用非稳腔技术进一步改善 XeCl 准分子激光输出的光束质量, 并对泵浦光束进行强聚焦。预期喇曼散射光的能量及转换效率将会有显著提高。

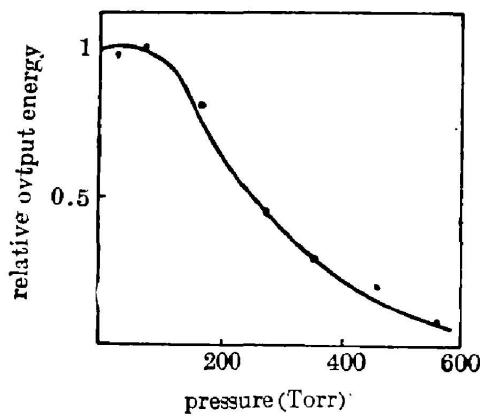


Fig. 5 Relative output energy of the Raman-shifted radiation as a function of helium pressure

率将会有显著提高。

当喇曼池温度及泵浦激光能量分别固定为 1080°C 及 660 mJ, 而改变喇曼池中缓冲气体氦气压力时, 所得喇曼散射光能量的相对变化如图 5 所示。当 He 气压低于 100 Torr 时, 喇曼光能量基本不随氦的气压而改变, 但当 He 气压进一步提高时, 喇曼光能量明显下降。在同样条件下, 对经棱镜分光后的泵浦光能量的测量表明, 它基本上不随氦气压而变化。当分别改用氩气、氦气作为缓冲气体, 也可得到类似结果。

受激喇曼散射的增益系数^[8]

$$g = \frac{8\pi^2 c^2}{\hbar \omega_s^2 \omega_p} \frac{N}{\Delta\nu} \frac{d\sigma}{d\Omega}$$

其中 ω_s, ω_p 分别是喇曼光和泵浦光的频率, N 是铅原子数密度, $\Delta\nu$ 是喇曼光线宽, $d\sigma, d\Omega$ 是自发散射的微分散射截面。由(1)式可见, 当铅原子数密度维持一定时, 受激喇曼散射的增益因子 g 与线宽 $\Delta\nu$ 成反比。XeCl 激光在铅蒸气中喇曼散射的终态 $6p^3P_2$ 是个亚稳态, 有较长的自发辐射寿命, 因此当缓冲气体氦气的压力较低时, 喇曼散射的线宽将主要由多普勒加宽^[9]

$$\Delta\nu_0 = 2\nu_0 \left(\frac{2kT}{mc^2} \ln 2 \right)^{1/2} \quad (2)$$

所决定。因而图 5 中所示的喇曼光能量在低压区域不随氦的气压而变化。由于实验中所用的喇曼池加热温度 1080°C, 可得铅蒸气中喇曼散射的多普勒线宽为 $\Delta\nu_D = 1.2 \times 10^8 \text{ sec}^{-1}$ 。随着喇曼池中缓冲气体 He 的气压的升高, He 原子与 Pb 原子的碰撞所引起的铅的喇曼散射的线宽^[9]

$$\Delta\nu_c = \frac{1}{\pi\tau_0} = A \frac{P}{T^{3/2}}, \quad (3)$$

也随着增加。(3)式中 τ_0 是铅原子的由与氦原子碰撞所决定的平均自由飞行时间, P, T 分别为喇曼池中氦气的压力及加热温度。当 He 的气压逐渐增加时, $\Delta\nu_c$ 将逐渐增加到可以与

$\Delta\nu_D$ 相比拟,以至于最终支配着铅的喇曼散射的线宽。因而在实验中可以观察到,当氦气压高于 100 Torr 时,喇曼散射光的能量随 He 气压的升高而减小。若假定,当喇曼光能量降至 50% 时,由碰撞加宽所决定的线宽 $\Delta\nu_c$ 与多普勒加宽 $\Delta\nu_D$ 大体相当。从图 5 可看出,此时对应的 He 气压约为 250 Torr。由(3)式可得, $\tau_0 \sim 0.27$ ns, 及在实验中所用 1080°C 的加热温度下, τ_0 随气压 P 的变化满足

$$\tau_0 \cdot P \sim 0.7 \times 10^{-7} (\text{s} \cdot \text{Torr}). \quad (4)$$

在图 6 中给出了泵浦光脉冲波形(a), 及当喇曼池加热温度分别为 1100°C、1150°C 及 1200°C 时的受激喇曼散射光脉冲波形(b、c、d)。实验中所用泵浦光能量为 ~ 480 mJ, 缓冲气体氦气压约为 20 Torr。如图 6(a)所示,泵浦光脉冲的半最大处的全宽度约 60 ns, 两个尖峰间隔约 30 ns, 调制度 20%。当温度为 1100°C 时,喇曼光波形由两个峰组成,调制度几乎达到 100%, 两峰间隔约 13 ns, 因此它们不能与泵浦光波形上的间隔约为 30 ns 的两个峰相对应。随着喇曼池加热温度的提高,这些尖峰的调制度逐渐减小,当加热温度提高到 1200°C 时,这种多峰结构已不明显。随着加热温度的升高,喇曼光脉冲的延续时间也逐渐增加。附加的对泵浦光与喇曼光脉冲的相对时延测量表明,喇曼光脉冲前沿相对于泵浦光脉冲前沿大约有 20 ns 的时间滞后。

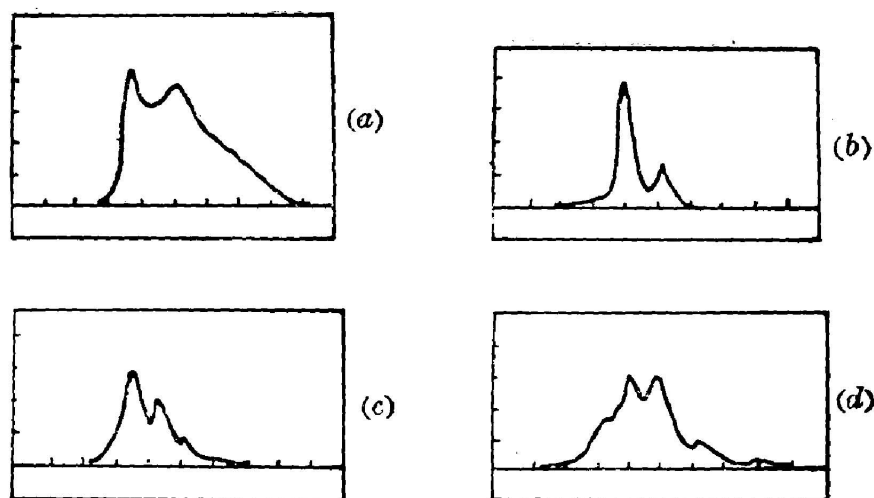


Fig. 6 Oscillograms showing (a) incident XeCl excimer laser pulse shape (time scale: 20 ns/div.); and (b)~(d) pulse shapes of the Raman-shifted radiation with Raman-cell temperature at 1100°, 1150° and 1200°C respectively (time scale: 10 ns/div.)

Dju 等人在研究 XeF 准分子激光束在钡蒸气中的受激喇曼散射时也曾观察到喇曼光波形上的双峰结构^[10]。他们将此归结为 XeF 准分子激光输出有三根光谱振荡线,且分别在不同的时刻达到峰值。作者认为 XeCl 准分子激光束包含有 4 根光谱振荡线,虽然这些振荡线的强度随时间的不同变化可能导致受激喇曼散射光波形上出现一些尖峰结构,但仍难以解释喇曼光相对于泵浦光的大约 20 ns 的时间延迟。

Черноборд 等人在研究红宝石激光在 H₂ 中的喇曼散射时,首先观察到 H₂ 的振动能级间喇曼散射中的合作效应^[11,12]。其基本特点是在喇曼光前沿与泵浦光前沿之间存在着(为

在分子间建立起相干极化所需要的)时间滞后,以及在喇曼光波形上出现的周期性尖峰结构。在文献[1]、[2]的工作中,观察到喇曼光与泵浦光之间的时间延迟可长达30 ns,喇曼光脉冲波形上尖峰结构的周期约为1.5~5 ns,调制度可达50%。将图6与文献[11]、[12]中的喇曼光波形比较,发现它们间的基本特点有相似之处。由于XeCl准分子激光在铅蒸气中的喇曼散射以亚稳态 $6p^3\ ^3P_2$ 作为终态,作为合作喇曼散射产生条件之一,喇曼光脉冲前沿与泵浦光前沿间的时间滞后应小于终态粒子数弛豫时间^[11,12]有可能得到满足。而由(4)式可以估计,在实验所用缓冲气体氦气压为20 Torr条件下,铅原子的平均自由飞行时间约为3.5 ns,与图6所示的喇曼光脉冲波形上的那些尖峰的大约5 ns的持续时间也较接近。因此,作者认为实验观察到的可能是铅原子的电子能级间的喇曼散射中的合作效应。进一步的理论与实验工作正在进行之中。

作者对魏运荣、董景星等同志在实验中所给予的支持表示感谢。

参 考 文 献

- [1] T. E. Loree, R. C. Sze *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1977, **31**, No. 1 (Jul), 37.
- [2] B. Burnham, N. Djeu; *Opt. Lett.*, 1978, **3**, No. 6 (Dec), 215.
- [3] S. J. Brosnan, H. Komine *et al.*; *Opt. Lett.*, 1982, **7**, No. 4 (Apr), 154.
- [4] C. H. Corlis *et al.*; *Experimental Transition Probabilities for Spectral Lines of Seventy Elements*, (National Bureau of Standards, Monograph 53, Washington D. C., 1962), 289.
- [5] D. Morrison; *Lasers and Applications*, 1985, No. 4 (Apr), 32.
- [6] 楼洪洪等;《中国激光》(待发表)。
- [7] D. Carter, W. Zapha; *Opt. Commun.*, 1978, **26**, No. 2 (Aug), 251.
- [8] D. C. Hanna *et al.*; *Nonlinear Physics of Free Atoms and Molecules*, Springer-Verlag, Berlin, New York, 1979, 190.
- [9] E. Loudon; *Quantum Theory of Light*, (Clarendon Press Oxford, 1973), 82.
- [10] N. Djeu, B. Burnham; *Appl. Phys. Lett.*, 1977, **30**, No. 9 (May), 473.
- [11] Б. С. Дибров *и др.*; *Известия АН УССР*, 1979, **30**, № 6 (Sep), 342.
- [12] B. C. Дибров *и др.*; *ЖЭТФ*, 1981, **81**, № 2 (Aug), 468.

Stimulated Raman scattering of XeCl excimer laser radiation in Pb vapor

HUO YUNSHENG, LOU QIHONG, QI JIANPING, DING ZEAN AND WANG RENWEN
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 21 January 1986)

Abstract

The parametric dependence of the output energies and efficiency for the Raman conversion of XeCl excimer laser radiation in Pb vapor was studied. Pulses at the Raman-shifted wavelength, with 120 mJ energy and 2 MW peak power, were obtained. Multi-peak structures of the waveforms of Raman-shifted pulses were observed; they could be attributed to the cooperative effects in Raman scattering.