

缓冲气体对铅蒸气受激喇曼散射的影响

祁建平

(山东大学晶体材料研究所)

楼祺洪 霍芸生 丁泽安 王润文

(中国科学院上海光机所)

提要: 理论上分析了在受激喇曼散射中的缓冲气体效应,指出,缓冲气体效应是由缓冲气体原子与铅原子的碰撞及其吸收作用的结果,分析了激光参量对喇曼转换的影响。理论结果与实验相符合。

Effects of buffer gas on stimulated Raman scattering in Pb vapor

Qi Jianping

(Institute of Crystal Materials, Shandong University, Jinan)

Lou Qihong, Hou Yunsheng, Ding Zean, Wang Runwen

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai)

Abstract: Effects of buffer gas on stimulated Raman scattering in Pb vapor are analyzed theoretically. The result shows that the effects consist of the collision between the buffer gas atoms and the Pb atoms and the absorption of the buffer gas. The dependence of Raman conversion efficiency on laser parameters is analyzed. The calculated results are in agreement with those of the recent experiments.

由于 XeCl 准分子激光在铅蒸气中,产生的受激喇曼散射有较高的增益,并且所产生的喇曼光波长为 459.0 nm 正处于海水光谱的透射窗口处,对海底激光通讯有着很广泛的应用^[1],因此,对在铅蒸气中的受激喇曼散射的研究很受人们的重视^[2,3]。

实验表明,在喇曼池中增加适量用以平衡铅蒸气压的缓冲气体,有利于喇曼光的输出,但过量的缓冲气体又会严重影响喇曼光的有效转换。霍芸生^[2]等人研究表明缓冲气体的增加,使铅原子与缓冲气体原子的碰撞几率增大,最终使喇曼增益因子降低。进一步的实验表明,在同一压力下的不同缓冲气

体对喇曼转换的影响不同,仅用铅原子与缓冲气体的碰撞效应就难以解释。本文通过引入缓冲气体分子对光束的吸收效应,并考虑了铅原子与缓冲气体分子的碰撞效应,进行了理论分析,很好地解释了两种缓冲气体对喇曼光转换的影响,并研究了其他参量对喇曼光的影响,理论结果与实验结果一致。

一、理论分析

为使理论分析简单,仅考虑稳态受激喇

收稿日期:1987年2月26日。

曼散射。在有吸收时的运动微分方程组为^[4]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_s}{\partial z} + \alpha_s I_s &= g_s I_p I_s \\ \frac{\partial I_p}{\partial z} + \alpha_p I_p &= -\frac{\omega_p}{\omega_s} g_s I_s I_p \end{aligned} \quad (1)$$

式中 I_p 、 I_s 分别为泵浦光和斯托克斯光光强, ω_p 、 ω_s 是其频率, g_s 为小信号喇曼增益系数, z 是光束传播方向坐标。 α_s 和 α_p 分别为斯托克斯光及泵浦光的吸收系数。

采用 308 nm 的 XeCl 准分子激光及波长为 488 nm 的氩激光测量不同缓冲气体压力下的透过率, 发现在上述二个波长具有相同的变化趋势和数值(见图 1), 为此我们可以假定(这里我们还假定 495 nm 斯托克斯光的吸收特性与 488 nm 一致)

$$\alpha \approx \alpha_s \approx \alpha_p$$

将上述近似关系代入公式(1), 可求得斯托克斯光强:

$$I_s = \frac{I_p(0)e^{-\alpha z}}{\left\{ \frac{\omega_p}{\omega_s} + \frac{I_p(0)}{I_s(0)} \exp[-g_s I_p(0)z] \right\} \times (1 - e^{-\alpha z}) / \alpha} \quad (2)$$

式中 $I_p(0)$ 、 $I_s(0)$ 是介质池注入端 ($z=0$) 的泵浦光和斯托克斯光强,

当 $\alpha \rightarrow 0$ 时

$$I_s = I_p(0) / \left[\frac{\omega_p}{\omega_s} + \frac{I_p(0)}{I_s(0)} \cdot \exp[-g_s I_p(0)z] \right] \quad (3)$$

与文献[6]的表达式一致。

受激喇曼散射的增益系数^[5]为:

$$g_s = \frac{8\pi^2 C^2}{\hbar \omega_s^2 \omega_p} \cdot \frac{N}{\Delta \tilde{\nu}} \frac{d\sigma}{d\Omega} \quad (4)$$

式中 N 是铅原子数密度, $\Delta \tilde{\nu}$ 是喇曼线宽, $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ 是自发散射的微分散射截面, 由(4)式可以看出, 受激喇曼散射的增益系数 g_s 与线宽 $\Delta \tilde{\nu}$ 成反比, 与铅原子数密度成正比。在喇曼池中充有缓冲气体时, 喇曼散射的线宽 $\Delta \tilde{\nu}$ 由两部分组成, 一是多普勒加宽^[7]:

$$\Delta \tilde{\nu}_0 = 2v_0 (2kT \ln 2 / mc^2)^{1/2} \quad (5)$$

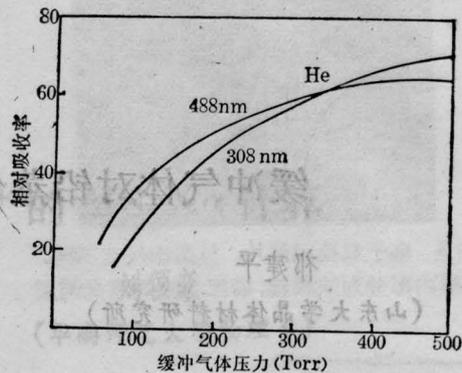


图 1 308 nm 和 488 nm 两种波长下缓冲气体 He 压力对吸收的影响

二是缓冲气体原子与铅原子的碰撞引起的铅的喇曼散射的线宽^[7]:

$$\Delta \tilde{\nu}_c = \frac{1}{\pi T_0} = A \frac{P_1}{T^{3/2}} \quad (6)$$

因此

$$\Delta \tilde{\nu} = \Delta \tilde{\nu}_0 + \Delta \tilde{\nu}_c \quad (7)$$

考虑理想气体情况, 铅原子数密度 N 由下式决定:

$$N = P/kT \quad (8)$$

将(7)、(8)式代入(4)得:

$$g_s = \frac{8\pi^2 C^2}{\hbar \omega_s^2 \omega_p} \cdot \frac{d\sigma}{d\Omega} \frac{P}{kT} \times \frac{1}{2v_0 \left(\frac{2kT}{mc^2} \ln 2 \right)^{1/2} + AP_1/T^{3/2}} \quad (9)$$

式中, P_1 、 P 分别是缓冲气体、铅蒸气的压强, T 是喇曼池的加热温度。由上式看出, 缓冲气体气压 P_1 的增加, 会导致增益系数 g 的下降, 从而使喇曼光转换能力下降, 如图 2 中的 A 曲线。铅蒸气压的增加会增大其增益, 有利于喇曼光的转换, 如图 4 所示。

二、实验与理论结果

实验装置在文献[2]中已详细描述, 在此仅讨论实验结果与理论结果的比较。

当喇曼池温为 1080°C 不变时, 此时 P 为 5 Torr, 固定泵浦光光强, 用方程(2)、(9)

计算喇曼光随缓冲气体压力的变化, 如图 2 所示。

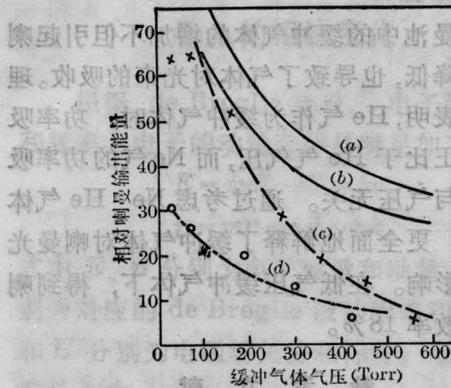


图 2 缓冲气体对喇曼光输出的影响

(a) $\alpha=0$; (b) $\alpha=0.011\text{cm}^{-1}$; (c) $\alpha=0.011(P/100)\text{cm}^{-1}$; (d) $\alpha=0.061\text{cm}^{-1}$;
“x”是 He 气作为缓冲气体时的实验值; “O”是 Ne 气作为缓冲气体时的实验值

由图 2 可见, 当 $\alpha=0$ 时, 理论曲线 (a) 与实验值有很大的偏离, 表明在计算过程中应该考虑缓冲气体的吸收。

对于 Ne 气作缓冲气体的情况, 当喇曼池温度为 1080°C , 泵浦激光能量为 600mJ , 喇曼管长度为 1.7m , 其中加热区长为 1m 时, 喇曼输出能量随 Ne 气压力增加而较缓慢下降。在公式 (2) 中引入 $\alpha=0.061\text{cm}^{-1}$, 计算缓冲气体压力对喇曼输出的影响, 结果表明, 我们的理论分析结果能很好地与实验值符合 (见图 2 曲线 (d))。

对于 He 气作缓冲气体的情况, 在相同的实验条件下, 喇曼输出能量随 He 气压力增加而急剧下降, 如取 $\alpha=0.011\text{cm}^{-1}$, 使 100Torr 氦气压力下喇曼输出与实验符合, 则高压下理论曲线明显偏离实验值 (图 2 曲线 (b))。事实上, 由图 1 可见, 吸收系数应为气压的函数, 为此我们取 $\alpha=0.011(P/100)\text{cm}^{-1}$, 这里 P 为 He 气压力 (以 Torr 为单位), 结果表明, 理论计算能很好地与实验符合 (见图 2 曲线 (c))。上述计算分析表明, 使用氦及氖气作缓冲气体有完全不同的压力特性。

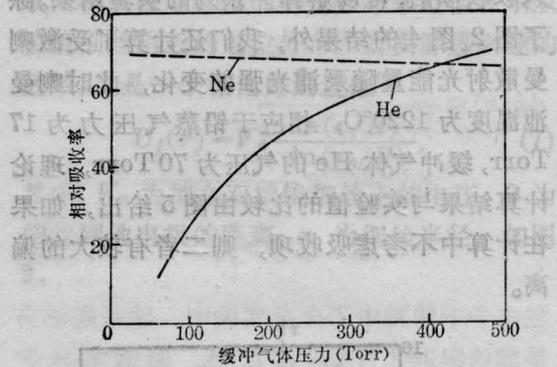


图 3 不同缓冲气体对 308nm 光束的吸收特性

为了进一步验证上述结果, 我们对比了二种不同缓冲气体压力变化对 308nm 波长光吸收的影响。结果如图 3 所示, Ne 气对 308nm 光束的吸收并不随气压的变化而变化; 相反 He 气对 308nm 光束的吸收随气压的增加而增大。

在考虑了缓冲气体的吸收效应以后, 我们还可以用上述公式计算铅蒸气压对喇曼转换效率的关系。在计算中仍固定泵浦光能量为 600mJ , 当喇曼池被加热到 1040°C 时, 开始有蓝色的喇曼光出现, 相应于铅蒸气压为 3Torr ; 随着喇曼池温度升高, 喇曼光能量也随之增大。当温度达 1220°C 时, 得到 120mJ 的喇曼光能量, 相应能量转换效率为 18% 。图 4 中的理论曲线能很好地符合上述实验结果。

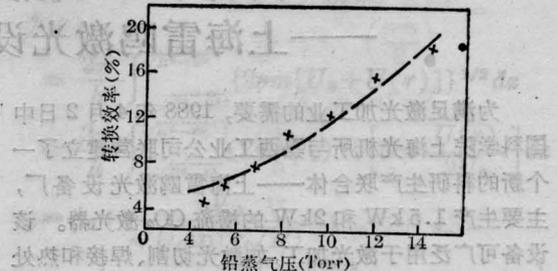


图 4 喇曼转换效率随铅蒸气压的变化

“x”: 实验值; 虚线: 计算值。
($E=600\text{mJ}$, $P(\text{He})=70\text{Torr}$)

根据以上分析, 我们可以看到缓冲气体吸收系数 α 对金属蒸气的受激喇曼散射过程有很大的影响。在受激喇曼散射方程中, 引

入吸收项后,可以解释一系列的实验结果。除了图 2、图 4 的结果外,我们还计算了受激喇曼散射光能量随泵浦光强的变化,此时喇曼池温度为 1220°C , 相应于铅蒸气压力为 17 Torr , 缓冲气体 He 的气压为 70 Torr , 理论计算结果与实验值的比较由图 5 给出,如果在计算中不考虑吸收项,则二者有较大的偏离。

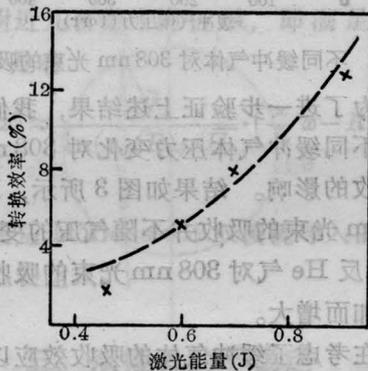


图 5 喇曼转换效率随泵浦能量的变化关系
虚线:理论值;“x”:实验值。
($T=1220^{\circ}\text{C}$, $P(\text{He})=70\text{ Torr}$)

四、结 论

喇曼池中的缓冲气体的增加不但引起喇曼增益降低,也导致了气体对光束的吸收。理论分析表明,He 气作为缓冲气体时,功率吸收系数正比于 He 气气压,而 Ne 气的功率吸收系数与气压无关。通过考虑 Ne、He 气体的吸收,更全面地解释了缓冲气体对喇曼光输压的影响。在低气压缓冲气体下,得到喇曼转换效率 18%。

参 考 文 献

- 1 Morrison D. *Laser and Application*, 1985; (4): 42
- 2 霍芸生 *et al.*《光学学报》,1986; 6(10): 880.
- 3 Brosnan SJ *et al.* *Optics Letters*, 1982; 7(4): 154
- 4 FT 阿雷克等主编. 激光手册,第五分册,科学出版社,北京,1979, 78
- 5 Hanna DC *et al.* *Nonlinear Physics of Free Atoms and Molecules*, (Springer-Verlag, Berlin, New York, 1979)190.
- 6 袁一凤 *et al.* 中国激光, 1986; 13(7): 428
- 7 Loudon R. *Quantum Theory of Light*, Clarendon Press Oxford, 1978: 82.
- 8 魏继中. 光谱化学分析,内蒙古人民出版社,1978.: 244

生产高功率 CO_2 激光器的科研生产联合体 ——上海雷鸥激光设备厂在沪建成投产

为满足激光加工业的需要,1988年4月2日中国科学院上海光机所与嘉西工业公司联营建立了一个新的科研生产联合体——上海雷鸥激光设备厂,主要生产 1.5 kW 和 2 kW 的横流 CO_2 激光器。该设备可广泛用于激光加工,如激光切割、焊接和热处理,可在汽车制造、铁路运输、纺织、机电、仪表等行业中应用。采用这种设备对材料进行热处理,可成

倍提高各种材料的硬度和耐磨性能。

上海雷鸥激光设备厂有上海光机所投入的光、机、电配套的强大技术力量和先进设备,使产品的质量和先进性能有了可靠保障。该厂热诚为国内外各企事业单位提供优质服务。

(张洪林)