

铯蒸汽中受激电子喇曼散射

何克祥 刘颂豪 惠令凯

(中国科学院安徽光学精密机械研究所)

崔俊文 立群

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文报导了利用微微秒脉冲系列在铯原子蒸汽中产生受激电子喇曼散射,得到强微微秒红外脉冲的实验结果。波长为 527 nm 的绿光经喇曼频移产生 2.28 μm 的红外输出,最大能量达 1 mJ,量子转换效率为 16%。实验测量了红外辐射强度及受激电子喇曼散射的阈值对蒸汽压、泵浦光强度的依赖关系,并进行了分析和讨论。

一、前 言

近十年来,对原子蒸汽(K、Cs、Rb)^[1~3]受激电子喇曼散射的研究,主要是通过染料激光向红外波段的转换,成功地获得了新的可调谐相干红外光源。原子蒸汽中的喇曼频移较宽,在 20000~30000 cm⁻¹ 之间,用蓝色到紫外的泵浦光可得到 1~20 μm 宽的红外调谐输出。由于共振作用,可见光与红外光之间的转换效率较高。与参量振荡器、色心激光器等可调谐相干红外光源相比,它具有简单、价廉、功率大、承受破坏阈值高等优点。

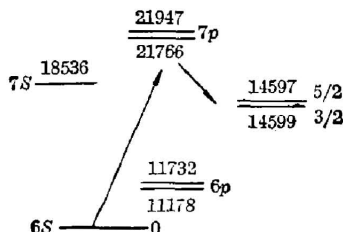


图1 铯(Cs)原子的 6s_{1/2}-5d_{5/2} 受激电子喇曼散射跃迁能级图
Fig. 1 Partial energy level diagram of atomic cesium showing 6s_{1/2}-5d_{5/2} SERS

过去,有关受激电子喇曼散射的实验大都采用 ns 激光。近年来^[4],已利用微微秒的可见光作为泵浦源实现受激电子喇曼散射。我们使用钎玻璃激光器系统的倍频光 527 nm 波长,脉宽为 20 ps 的由 40 个脉冲组成的脉冲列泵浦铯蒸汽,实现了受激电子喇曼散射,获得波长为 2.28 μm 强微微秒红外脉冲。最大输出能量为 1 mJ,量子转换效率为 16%。我们测定了红外辐射波长和有关的实验参数。对实验结果作了讨论。

铯蒸汽中受激电子喇曼跃迁能级如图 1 所示。喇曼跃迁在 6s_{1/2}-5d_{5/2} 能级之间进行,喇曼频移为 14597 cm⁻¹。红外辐射在 $\omega_s = \omega_L - \Omega_{fj} = 4378 \text{ cm}^{-1}$ 处发生。使用 527 nm 波长作为泵浦光,不能达到 np(n≥7) 态,此时有决定贡献的中间态是 6p。

二、实验装置

实验装置主要由泵浦源、热管炉和检测系统三部分组成,如图 2 所示。实验采用共线排布。微微秒光脉冲由主-被动锁模激光器产生^[5]。磷酸盐钽玻璃振荡器输出的激光波长为 $1.054\ \mu\text{m}$, 经三级放大输出能量为 300 mJ, 倍频后的绿光 $\sim 30\ \text{mJ}$, 锁模脉冲列如图 3 所示。

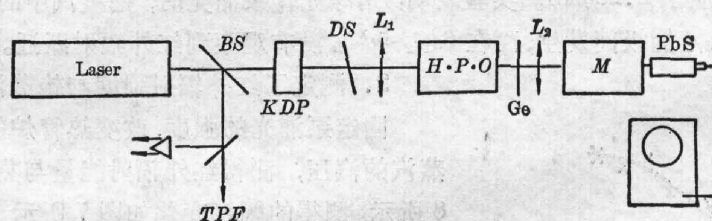


图 2 受激电子喇曼散射实验装置

Fig. 2 Schematic diagram of the experiment for SERS

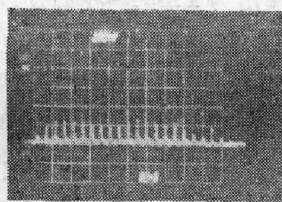


图 3 绿光脉冲系列(20 ns/div)

Fig. 3 Green light pulse train

(20 ns/div)

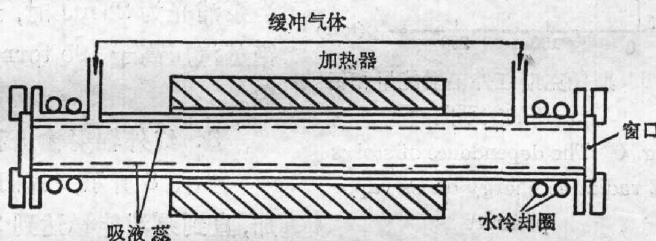


图 4 热管炉结构图

Fig. 4 Heat-Pipe oven

实验用热管炉如图 4 所示。炉体用不锈钢制成,长 48 cm, 内径 2 cm, 中间部分用电炉丝加热, 加热区长 25 cm, 管子的内壁装有三层 100 目的不锈钢网作为吸液芯。充有 20 torr 氩气作缓冲气体。炉温用精密温度控制仪自动控制, 温度用镍铬、镍铝热电偶测量, 温度可在 $200\sim 800^\circ\text{C}$ 范围内调节。炉内金属蒸汽压 P 及粒子数密度 N 与温度 T 的关系由下式^[6]给出:

$$P(\text{torr}) = \exp(-a/T + d) = \exp(-8827.38/T + 16.0007),$$

$$N = 9.66084 \times 10^{18} \frac{P(\text{torr})}{T} \quad (\text{atom}/\text{cm}^3),$$

式中 a 和 d 为实验常数。

探测用 PbS, 它是薄膜型本征红外光导探测器, 其光谱响应曲线如图 5 所示。除 PbS 探测器带有 Ge 片窗口外, 另外在光路中插入两块 Ge 平镜, 把可见光滤掉。从 PbS 探测器得到的电信号由 485 型示波器显示。

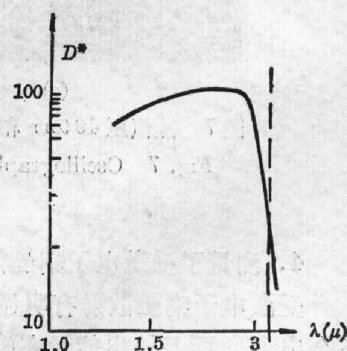


图 5 PbS 光谱响应

Fig. 5 PbS spectrum response

二、实验结果

利用上述实验装置,取得了如下的实验结果:

1. 测定了喇曼频移的红外辐射波长。

用 $f=15.3\text{ cm}$ 的石英透镜将热管炉出射光聚焦到紧贴有一块 Ge 平镜的单色仪 WDF 入射狭缝上, PbS 探测器紧贴在出射狭缝上接收信号。当鼓轮旋至读数为 2.66 时得到信号,其波长对应于 $2.28\ \mu\text{m}$ 。实验表明:用绿光作泵浦光时,铯蒸汽中的受激电子喇曼跃迁只在 $6s_{1/2}-5d_{5/2}$ 能级间发生,而在 $6s_{1/2}-5d_{3/2}$ 没有观察到红外辐射跃迁。

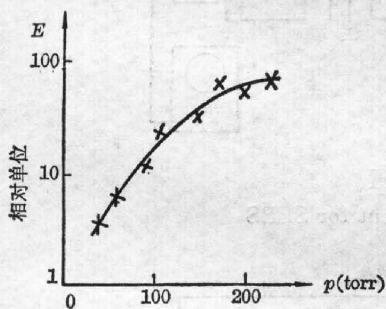


图 6 斯托克斯红外辐射能量和铯蒸汽压的关系曲线

Fig. 6 The dependence of stokes IR radiation energy on Cs vapor pressure

2. 测定了红外辐射强度与铯蒸汽压的关系。

固定泵浦光的强度,改变热管炉的温度,亦即改变铯蒸汽的汽压,测得红外辐射能量与蒸汽压的关系,如图 6 所示。测得的幅度变化如图 7 所示。图 7 表明当蒸汽从 40 torr [图 7(a)] 增加到 70 torr [图 7(b)] 时,输出有明显增加。我们在 195 torr 压力处获得了最大辐射输出。当泵浦光为 28 mJ 时,最大输出为 1 mJ。我们发现,当铯蒸汽压高于 195 torr 时,红外辐射明显地呈现饱和现象。

3. 红外辐射输出和泵浦能量的关系。

如图 8 所示,我们发现输出随泵浦能量的增加而增加,直到泵浦能量达到 28 mJ 仍未见输出出现饱和现象。

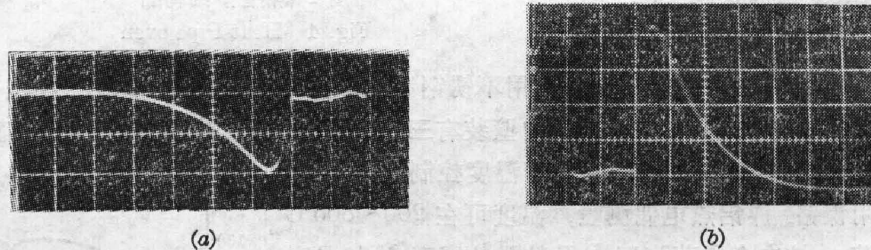


图 7 蒸汽压 40 torr 和 70 torr, 泵浦能量 28 mJ 时输出的示波器照片 (20 ms/div)

Fig. 7 Oscillograph record with vapor pressure 40 torr and 70 torr, pump energy 28 mJ (20 ms/div)

4. 测量了受激电子喇曼散射阈值同铯蒸汽压的关系。

受激电子喇曼散射有明显的阈值性,在泵浦光强度低于一定水平时,它的一系列特点都不会出现。而且输出能量在阈值附近有阶跃性。在近共焦聚焦条件下,测得 40~100 torr 之间的阈值为 1 mJ,且保持为常数。随着汽压的升高,阈值略有上升;但汽压很低时,阈值有十分显著的增高。当蒸汽压低于 10 torr 时,即使用很高的泵浦能量作用,也没有红外辐射产生。阈值泵浦能量与蒸汽压的关系见图 9。

5. 定性地研究了铯原子蒸汽中的二聚物 Cs_2 对绿光和红光吸收的差别。

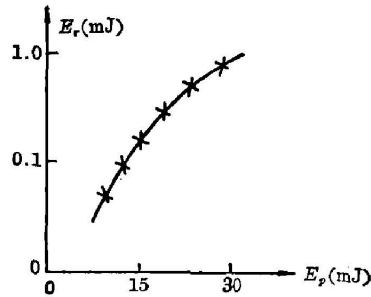


图8 斯托克斯辐射能量和泵浦能量的关系
Fig. 8 The dependence of stokes IR radiation energy on pumping energy

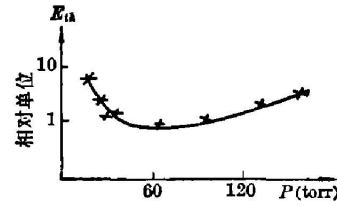


图9 阈值泵浦能量和铯蒸汽压的关系
Fig. 9 The dependence of Cs vapor pressure on threshold pumping energy

我们观察了 527 nm 和 6328 Å 两种波长的光各自透过热管炉的情况, 发现随着温度的升高, 527 nm 的光透过强度几乎没有什么变化; 二聚物 Cs_2 对绿光的吸收不超过 $4 \times 10^{-3} \text{ mJ/cm}$ 。但从 400°C 开始, 6328 Å 的光透过逐渐减少, 到 450°C 以上, 透过为零。当用白光照明热管炉入射窗口时, 从出射窗口观察炉内呈黄绿色, 并随温度的升高而逐渐加深。这个现象说明 Cs_2 吸收横截面与波长有关^[7]。

6. 观察了聚焦条件对红外辐射能量的影响。

我们在实验中使用不同焦距的透镜, 并改变透镜与热管炉的相对位置, 发现对于 25 cm 长的蒸汽柱, 使用 $f=123 \text{ cm}$ 的透镜聚焦到热管中心可使转换效率明显提高。

三、讨 论

众所周知三能级近似中受激喇曼散射增益因子的表达式为^[6]:

$$g_R = \frac{2\pi^2 r^2 e c^2}{\hbar} \cdot \frac{N \omega_s}{\Gamma} \cdot \frac{f_{fi} f_{gt}}{\Omega_{fi} \Omega_{gt}} \cdot \frac{1}{(\Omega_{ig} - \omega_L)^2}$$

代入实验数据, $\Gamma = 15 \text{ cm}^{-1}$, $N = 10^{22} \text{ m}^{-3}$, 振子强度 $f_{6s-6p} \cdot f_{6p-5d} = 1.13 \times 0.197$, $\Omega_{gt} = 1.17 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$, $\Omega_{fi} = 2.87 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$, $\Omega_{ig} - \omega_L = 7.24 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$ 以及其它各个常数, 可计算出 $g_R \sim 2 \text{ cmGW}^{-1}$; 实验中使用的泵浦光密度是 $\sim 1 \text{ GW/cm}^2$, 在 25 cm 的蒸汽程上, 对应的小信号增益为 $\sim e^{50}$ 。但是实验中测得的最大红外输出为 1 mJ, 实际增益是 $\sim e^{40}$, 比理论值要小得多。这主要是由损耗机制造成的, 其损耗机制很复杂, 主要有以下几方面:

1. 铯蒸汽二聚物 Cs_2 对泵浦光产生吸收损耗, 而且随温度的增加而增加。
2. Cs_2 对斯托克斯辐射的吸收及斯托克斯光的衍射均要损耗斯托克斯红外辐射能量。
3. 单光子吸收及多光子非线性过程的竞争也要损耗一部分泵浦光能量。

实验中, 铯原子蒸汽压高于 195 torr 时, 斯托克斯辐射出现饱和现象, 主要不是由于基态粒子数倒空引起的。因为这时的粒子数密度 $\sim 10^{23} / \text{M}^3$, 热管炉蒸汽柱的体积 $\sim 10^{-4} \text{ M}^3$, 基态粒子数为 $\sim 10^{19}$, 实验中测得该汽压下的红外辐射饱和输出 $\sim 1 \text{ mJ}$, 对应的光子数为 10^{17} , 还没有达到倒空的程度。饱和现象的出现大概是由于多光子离解的非线性竞争过程损耗了一部分泵浦能量引起的。详细讨论, 则有待进一步研究。

蒸汽中受激电子喇曼散射研究为扩展红外波和可调谐微微秒红外脉冲源提供了可能性。

感谢周平同志的热情帮助。

参 考 文 献

- [1] P. Bernage, P. Niay *et al.*; *Opt. Commun.*, 1981, **36**, No. 3 (1 Feb), 241.
- [2] D. Cotter, D. C. Hanna; *Opt. Commun.*, 1977, **9**, No. 6 (Nov), 509.
- [3] P. Niay *et al.*; *Opt. Commun.*, 1979, **29**, No. 3 (Jun), 369.
- [4] R. Wyatt, D. Cotter; *Opt. Commun.*, 1980, **32**, No. 3 (Mar), 481.
- [5] 崔俊文, 惠令凯等;《光学学报》, 1981, **1**, No. 5 (Sep), 441.
- [6] D. C. Hanna *et al.*; «*Nonlinear Optics of Free Atoms and Molecules*», (Berlin, Springer, 1979).
- [7] P. A. Karkkainen; PhD Thesis, University of Southampton, 1976.

Stimulated electronic Raman scattering in Cs vapour and picosecond pulses generation in infrared region

HE KEXIANG LU SONGHAO HUI LINGKAI

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

CUI JUNWEN LI QUN

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

(Received 23 February 1982, revised 25 October 1982)

Abstract

The generation of high-power picosecond IR pulses by stimulated electronic Raman scattering (SERS) using ps pulse trains is reported. 20 ps pulses at 527 nm have been Ramanshifted to produce 1 mJ maximum pulses at 2.28 μm with 16% quantum efficiency. IR output energy and the threshold of SERS as a function of the pumping energy and vapour pressure are measured and analysed.