

钠蒸气中受激电子喇曼散射*

马祖光 韩晓峰 吕振国
(哈尔滨工业大学激光教研室)

提 要

本文报道了钠原子 $3S-4S$ 跃迁的受激电子喇曼散射的首次观测。获得了 $2.38\mu\text{m}\sim 2.65\mu\text{m}$ 的可调谐红外输出; 计算了受激电子喇曼散射的功率增益系数并测量了红外输出随染料激光频率调谐的变化, 其结果符合较好; 给出了泵浦功率阈值随钠蒸气压变化的实验曲线; 测得光子转换效率约为 30%。在此同时, 观测到了钠原子 $4S-3P$ 跃迁的放大自发辐射。

一、引 言

1967年 Rokni 等^[1]和 Sorokin 等^[2]首先观测到了受激电子喇曼散射现象。受激电子喇曼散射具有大的喇曼频移, 可以实现紫外和可见光向红外谱区的转换, 在近红外和中红外获得宽范围可调谐、高效的相干辐射源。金属原子的能级结构比较简单, 更多的光学跃迁为人们所熟悉。典型地, 碱金属原子的喇曼频移为 $20000\text{cm}^{-1}\sim 30000\text{cm}^{-1}$ 。1973年 Sorokin 等^[2]在钾蒸气中观察到 $2.63\mu\text{m}\sim 2.79\mu\text{m}$ 的可调谐受激电子喇曼散射。继之, Cotter 等^[3]将调谐范围扩大到 $2.56\mu\text{m}\sim 3.5\mu\text{m}$ 。后来的许多工作集中在 K、Cs、Rb 等蒸气的受激电子喇曼散射^[4~7]和 Na 等蒸气的受激超喇曼散射方面^[8,9]。有关钠原子 $3S-4S$ 跃迁的受激电子喇曼散射尚未见报道。我们用准分子激光器泵浦的染料激光器激励钠蒸气, 观测到了钠原子 $3S-4S$ 跃迁的红外受激电子喇曼散射, 当染料激光波长在 $334.0\sim 338.8\mu\text{m}$ 范围调谐时, 受激电子喇曼散射的斯托克斯线在 $2.38\mu\text{m}\sim 2.65\mu\text{m}$ 范围内可调谐。我们对受激电子喇曼强度与泵浦光波长的关系曲线进行了分析和讨论, 我们相信如果泵浦功率在染料激光调谐曲线的两侧仍能超过激励阈值的话, 受激电子喇曼散射的可调谐范围还会扩大, 在近共振一侧的强度也会大大增加。在此同时, 我们观测到了钠原子 $4S-3P$ 跃迁的放大自发辐射, 波长在 $1.14\mu\text{m}$ 处, 是受激电子喇曼散射过程固定波长的串级辐射。

二、基本理论

钠原子能级如图 1 所示。钠原子 $3S-4S$ 跃迁的喇曼频移 $\Omega = 25739.86\text{cm}^{-1}$, $3S$ 基态原子由紫外染料激光近共振激发到 $4P_{1/2, 3/2}$ 态附近, 由介质的三次非线性极化增强作用, 辐射出红外斯托克斯光子到达 $4S$ 态, 产生可调谐的受激电子喇曼散射过程。从耦合波

收稿日期: 1986年5月20日

* 本课题由中国科学院科学基金资助。

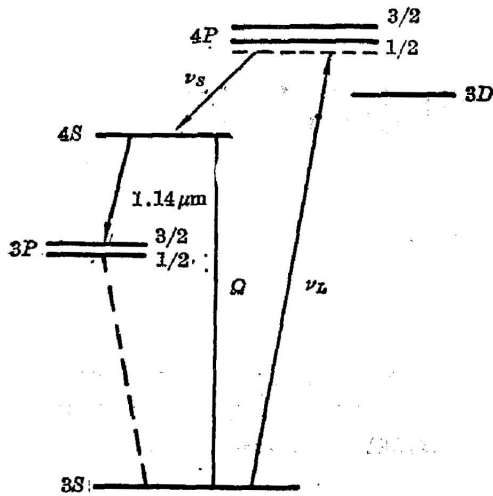


Fig. 1 Partial level diagram of Na atom showing the 3S-4S SERS

方程出发,作适当的近似,得到斯托克斯线的增益系数表达式^[10]

$$g_s = \frac{4\pi\omega_s}{c} |6\chi_{xxxx}^{(3)}(\omega_s)| |E(\omega_L)|^2, \quad (1)$$

其中

$$|\chi_{xxxx}^{(3)}(\omega_s)| = 3.145 \times 10^{17} \times \frac{N}{I} [2(\nu_{(n+1)P_{1/2}} - \nu_L)^{-1} + (\nu_{(n+1)P_{3/2}} - \nu_L)^{-1}] \times |\langle n+1PO_{1/2} | x | n + 1SO_{1/2} \rangle \langle nSO_{1/2} | x | n + 1PO_{1/2} \rangle|^2, \quad (2)$$

式中 N 是原子密度。对于钠蒸气,在 $T=560^\circ\text{C}$ 时, $N \approx 1.59 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, $\nu_{4P_{3/2}} = 30272.51 \text{cm}^{-1}$, $\nu_{4P_{1/2}} = 30266.88 \text{cm}^{-1}$, $\langle 4PO_{1/2} | x | 4SO_{1/2} \rangle = -3.12 \times 10^{-8} \text{cm}$, $\langle 3SO_{1/2} | x | 4PO_{1/2} \rangle = -0.124 \times 10^{-8} \text{cm}$; I 近似取激光线宽 0.5cm^{-1} ,

并利用关系式 $|E(\omega)|^2 = 8\pi I(\omega)/c$ 计算出 $g_s(\omega_s)/I(\omega_L)$ 与 ν_L 的关系曲线,如图 2 所示。可以看出,只要泵浦光功率足够大,即可获得大范围可调谐的红外输出。

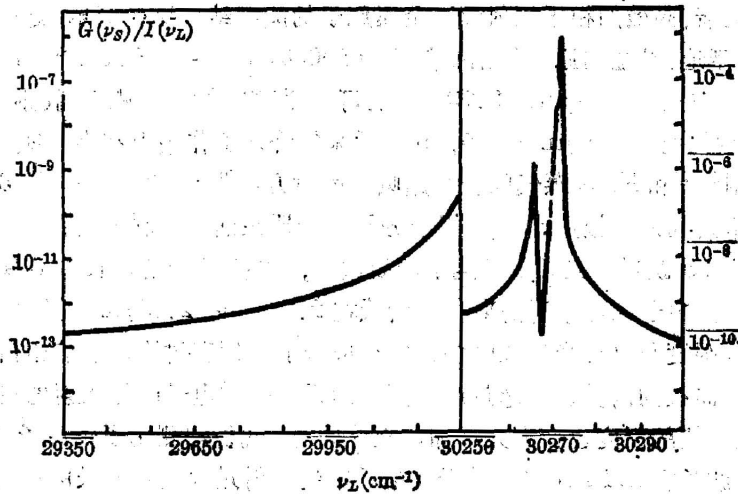


Fig. 2 Calculated power gain curve of the 3S-4S SERS in Na atom

三、实验装置

实验装置如图 3 所示。EMG101 型 XeCl 准分子激光器 1 泵浦 FL2002 型染料激光器 2, 激光染料为 P-Terphenyl(334~347 nm), 激光线宽 $\leq 0.05 \text{\AA}$; 钠蒸气由热管炉装置产生, 钠热管 3 全长 $\sim 90 \text{cm}$, 中间加热区长 $\sim 35 \text{cm}$, 热管两端设有冷却套, 通循环水冷却, 使扩散到热管加热区以外的钠蒸气迅速冷凝, 借助热管内壁的不锈钢网的毛吸作用回流到加

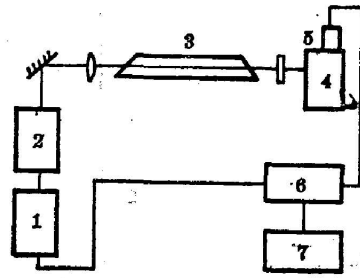


Fig. 3 Experimental setup

1—excimer laser; 2—dye laser; 3—Na-heat-pipe; 4—monochromator;
5—PbS detector; 6—Boxcar integrator; 7—X-Y recorder

热区,重新被蒸发,热管两端的窗口(石英片)依靠管内缓冲气体 Ar 保护,以防蒸气的污染,这样的热管炉装置易于产生大体积、均匀的金属蒸气;染料激光束沿热管轴向激励钠蒸气,WDG30 型扫描单色仪 4 用于接收前向光信号,单色仪入射狭缝前放置一锗片,用以消除 $<1.8 \mu\text{m}$ 信号对有用光信号记录的干扰(记录 $1.14 \mu\text{m}$ 辐射时,锗片由 $0.88 \mu\text{m}$ 长通滤光片代替);单色仪出射狭缝装有 PbS 红外探测器 5,其响应光谱范围 $0.1 \mu\text{m} \sim 3.0 \mu\text{m}$;来自探测器的信号经 Boxcar 平均积分器 6 处理,由 K200 型 X-Y 记录仪 7 记录。

四、实验结果及分析讨论

采用上述实验装置,在热管炉温度为 570°C 染料激光波长为 335.31 nm 时,观测到 $2.45 \mu\text{m}$ 的强受激辐射,具有明显的泵浦功率阈。当改变泵浦激光波长时,受激辐射光波长相应改变,保持固定频移 $\Omega = 25739 \text{ cm}^{-1}$,正与钠原子的 $3S-4S$ 跃迁的喇曼频移符合。该受激辐射过程是钠蒸气中 $3S$ 基态原子由紫外光子 ν_L 激发到 $4P_{1/2}$ 态附近的虚态,然后受激辐射到 $4S$ 态发出红外斯托克斯光子 ν_s ,属于钠原子的 $3S-4S$ 跃迁的受激电子喇曼散射。对应每一个 ν_s ,在 $1.14 \mu\text{m}$ 处总能观测到一固定波长的放大自发辐射,符合钠原子的 $4S-3P$ 跃迁,从而进一步证实了 $3S-4S$ 跃迁的受激电子喇曼散射过程的存在。我们测量了受激电子喇曼散射强度与泵浦激光频率 ν_L 之间的关系曲线,如图 4 所示,受激电子喇曼散射强度随泵浦光子 ν_L 能量接近 $4P_{1/2}$ 能级而增强,与理论计算的功率增益系数曲线符合(见图 2)。在 $\nu_L = 29789 \text{ cm}^{-1}$, $T = 560^\circ\text{C}$, $P_{\text{Ap}} = 15 \text{ mm Hg}$ 时,测得光子转换效率约 30%。我们认为如果泵浦激光在更短波长输出能够达到泵浦功率阈值的话,受激电子喇曼散射的强度还会大大增加,并且斯托克斯线的可调范围还会扩大。从不同蒸气压下的泵浦功率阈值曲线看(如图 5 所示),以 $P_{\text{Na}} = 13.7 \text{ mm Hg}$ 时,泵浦功率阈值为最低,与最佳温度对应的钠蒸气压是一致的(如图 6 所示)。当泵浦功率达到阈值后,斯托克斯线强度随泵功率的增大而大大增强,如图 7 所示,与理论的指数增长关系基本符合。在实验中我们看到,在 $500 \sim 590^\circ\text{C}$ 范围内均可产生受激电子喇曼散射过程,对应钠蒸气压为 $4 \sim 30 \text{ mm Hg}$,见图 6,最佳温度为 560°C ;相当 13.7 mm Hg 蒸气压,钠原子密度为 $1.59 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。可见,金属蒸气的受激电子喇曼散射对蒸气压要求不严格,温度易于控制。

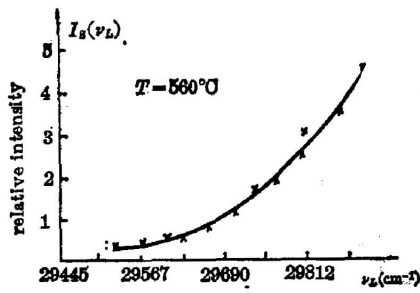


Fig. 4 SERS intensity vs. dye laser frequency ν_L

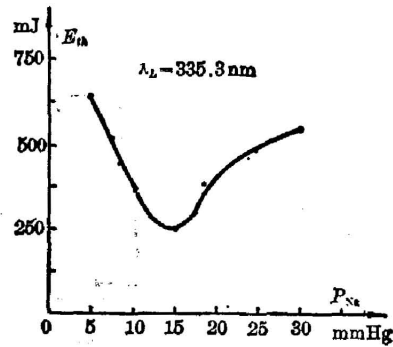


Fig. 5 Dependence of pumping energy threshold on Na vapor pressure

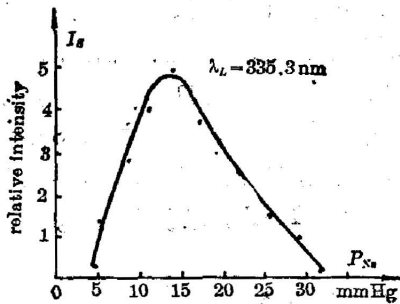


Fig. 6 Dependence of SERS intensity on Na vapor pressure

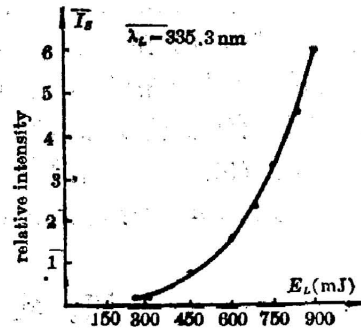


Fig. 7 Dependence of SERS intensity on pumping energy

五、结 束 语

我们获得了钠蒸气 $2.38 \mu\text{m} \sim 2.65 \mu\text{m}$ 的可调谐红外输出, 理论和实验证实是钠原子 $3S-4S$ 跃迁的受激电子喇曼散射过程。碱金属蒸气大的喇曼频移, 其受激电子喇曼散射可作为红外宽范围可调谐相干辐射源, 在许多红外光谱学研究中具有很大的应用价值。

参 考 文 献

- [1] M. Rokni, S. Yatsiv; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1967, **QE-3**, No. 8 (Aug), 329~330.
M. Rokni, S. Yatsiv; *Phys. Lett. (A)*, 1967, **24A**, No. 5 (27 Feb), 277~278.
- [2] P. P. Sorokin et al.; *Appl. Phys. Lett.*, 1967, **10**, No. 2 (15 Jan), 44~46.
- [3] P. P. Sorokin et al.; *Appl. Phys. Lett.*, 1973, **22**, No. 8 (Apr), 342~344.
- [4] D. Cotter et al.; *Opt. Commun.*, 1975, **15**, No. 2 (Oct), 143~146.
- [5] D. Cotter, D. G. Hanna; *Opt. & Quant. Electron.*, 1977, **9**, No. 6 (Nov), 509~513.
- [6] 路轶群; 《应用激光》, 1985, **5**, No. 2 (Apr), 73~74.
- [7] 王阿连, 邹英华; 《光学学报》, 1983, **3**, No. 6 (Sep), 507~512.
- [8] D. Cotter et al.; *Opt. Commun.*, 1977, **22**, No. 2 (Aug), 190~194.
- [9] D. Krökel et al.; *Opt. Commun.*, 1983, **48**, No. 1 (1 Nov), 57~60.
- [10] Y.-B. Shen; 《Nonlinear Infrared Generation》, (Berlin, Springer, 1977).

Stimulated electronic Raman scattering in sodium vapor

MA ZUGUANG, HAN XIAOFENG AND LU ZHENGUO

(Laser Division, Harbin Institute of Technology)

(Received 20 May 1986)

Abstract

The first observation of the $3S-4S$ stimulated electronic Raman scattering (SERS) in sodium vapor with the infrared output tunable from $2.38\mu\text{m}$ to $2.65\mu\text{m}$ is reported. The calculation for the power gain factors and the measurement for the infrared output as a function of a dye laser tuning are made and both results are in good agreement. The pumping threshold in dependence of sodium vapor pressures are measured. The photon-conversion efficiency is about 30%. Simultaneously, the amplified spontaneous emission (ASE) on the Na $4S-3P$ transition is also observed.