

同时辐射六种可见波长的 CW-氦氖 激光器的稳频及其输出的 650 nm CW 氦氖受激 Raman 辐射

赵克功 金浩然 王庆吉
(中国计量科学研究院) (北京大学)

提 要

在中国计量科学研究院研制的 612 激光管上, 利用反射率为 99.95% 宽带激光反射镜, 得到同时辐射六种波长的连续振荡, 其波长为: 611.8, 629.3, 632.8, 635.1, 640.1 和 650 nm, 测量了它们的物理参数, 验证了 650 nm 为氦氖 Raman 激光。对六种波长在简易装置上进行了稳频, 各条激光谱线的频率稳定性优于 10^{-10} , 利用锁模技术, 各条激光谱线的频率稳定性可达 10^{-12} 。

关键词: 受激 Raman 辐射; 频率稳定; He-Ne 激光。

一、引 言

在气体低压放电条件下, 氦原子的 2S 与 3P, 3S 与 2P 以及 2S 与 2P 态之间的很多对能级间, 都可以形成粒子数反转分布。已报道有一百多条氦原子的激光谱线。在可见光波段内, 由于 633 nm 激光振荡较强, 别的激光谱线就全被抑制。这是因为 $3S_2-2P_4$ 的增益大。

作者和同事们研制的 612 激光, 突破了目前人们对氦氖激光(特别在可见光部分)的某些认识:

(1) 在可见光范围内, 计量院的 612 激光管可同时在六种波长上连续振荡, 它们是 611.8, 629.3, 632.8, 635.1, 640.1 和 650 nm^[1]。

(2) 650 nm 激光谱线是氦原子的受激 Raman 跃迁, 我们首次在 He-Ne 激光器中观察到这条腔内受激 Raman 辐射谱线。

二、650 nm CW He-Ne 受激辐射

同时辐射六种可见光波长的 CW 氦氖激光器及它的输出特性已报道过^[1]。

在多谱线激光器上, 对 650 nm 谱线进行了测量与分析。

1. 波长测量

在一台简易的光栅光谱仪上测量了多谱线激光器输出的各激光波长值(空气), 它们分别为: 611.80, 629.37, 632.82, 635.19, 640.11 和 650.00 nm。而 $2P_3-1S_4$ 的跃迁(空气)

波长值应为 650.65 nm。

2. 多谱线激光的荧光波长的测量

将多谱线激光的荧光辐射导入单色仪中, 荧光辐射的记录如图 1 所示, 所得波长值列于表 1。

Table 1 Wavelength measurement of 650 nm Raman laser

	$3S_2-2P_2$	$2P_8-1S_4$	$2P_7-1S_2$	Raman laser
Position cm	1.60	11.10	13.61	10.48
Wavelength at vacuum	640.2846 nm	650.8826 nm	653.4687 nm	650.16 nm
Wavelength at air λ	640.1076 nm	650.6527 nm	653.2880 nm	649.98 nm

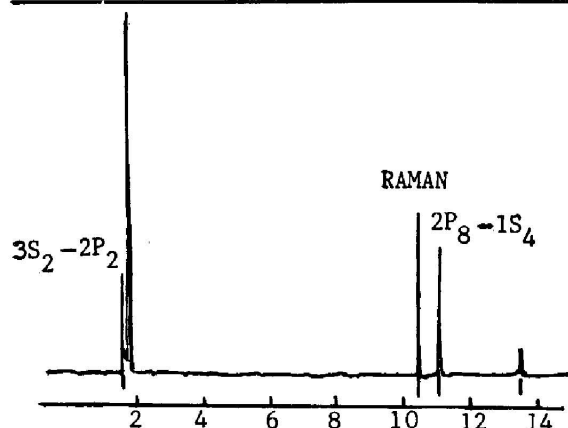


Fig. 1 Recording curve for the wavelength of 650 nm Raman emission

3. 多谱线激光的荧光强度的测量

荧光强度的变化可以反映相应跃迁的上能级粒子数的变化, 满足辐射跃迁选择定则的两能级间自发辐射的光谱强度 I_{21} 为:

$$I_{21} = N_2 A_{21} \hbar \nu_{21}, \quad N_2 = I_{21} / A_{21} \hbar \nu_{21}.$$

上能级粒子数正比于光强, 因此测量 $2P_8$ 到 $1S_4$ 和 $1S_5$ 能级的荧光相对强度, 就反映了 $2P_8$ 能级粒子数的变化, 结果列于表 2。测量荧光强度的结果表明, 无论是否有 650 nm 激光谱线辐射, $2P_8$ 能级的粒子数没有变化。说明 650 nm 的辐射与 $2P_8$ 能级无关。

Table 2

transition	relative intensity		populations of level $2P_8$	
	650 nm (presence)	650 nm (absence)	650 nm (presence)	650 nm (absence)
$2P_8-1S_4$	49.0	49.5	10.1	10.2
$2P_8-1S_5$	88.9	88.5	11.9	12.1

4. 650 nm 激光谱线的输出功率与 633 nm 激光谱线之间的关系

在实验中发现 650 nm 激光谱线的输出功率与 633 nm 激光谱线的功率有很大的依赖关系, 当 650 nm 激光谱线消失时, 多谱线激光器的 633 nm 激光谱线输出功率就提高。当有 650 nm 激光输出时, 633 nm 的输出大幅度的下降。如在多谱线激光管附近加不同磁场时, 多谱线激光输出功率产生如表 3 所示的变化。当不均匀磁场使 650 nm 激光消失时, 633 nm 激光输出功率增加了近一倍。这说明 650 nm 激光消耗了腔内 633 nm 激光功率, 即 650 nm 激光的能量来自于 633 nm 泵浦激光。

如不加磁场时, 多谱线激光输出 633 nm 激光功率为 1086 μ W。这时, 650 nm 谱线功率为 328 μ W, 谐振腔反射镜的透过率为 0.02%, 所以腔内 633 nm 功率为 5.43 W, 650 nm 腔内功率为 1.64 W, 转化效率为 30%。

5. 650 nm 激光谱线的增益线宽与模式

Table 3

number of magent	wavelength						total power (mW)
	612 nm (μ W)	629 nm (μ W)	633 nm (μ W)	635 nm (μ W)	640 nm (μ W)	650 nm (μ W)	
0	91	133	1086	119	117	223	1.88
1	83	133	1172	110	117	336	1.98
2	83	134	1310	105	103	328	2.10
3	79	138	1552	97	90	276	2.24
4	69	134	1690	91	91	233	2.36
5	59	131	1828	86	97	172	2.40
6	41	129	2069	62	88	48	2.44
7	33	129	2103	69	78	0	2.49

为了进一步验证 650 nm 谱线是 633 nm 泵浦的受激 Raman 辐射,我们考察了 650 nm 激光谱线的增益线宽和模式。如图 2 所示, 650 nm 谱线的增益线宽与 633 nm 谱线的增益线宽相等, 半宽度都为 800 MHz, 650 nm 与 633 nm 激光谱线的模式完全相同。这证明 650 nm 激光具有由 633 nm 激光泵浦的 Raman 激光的特性。

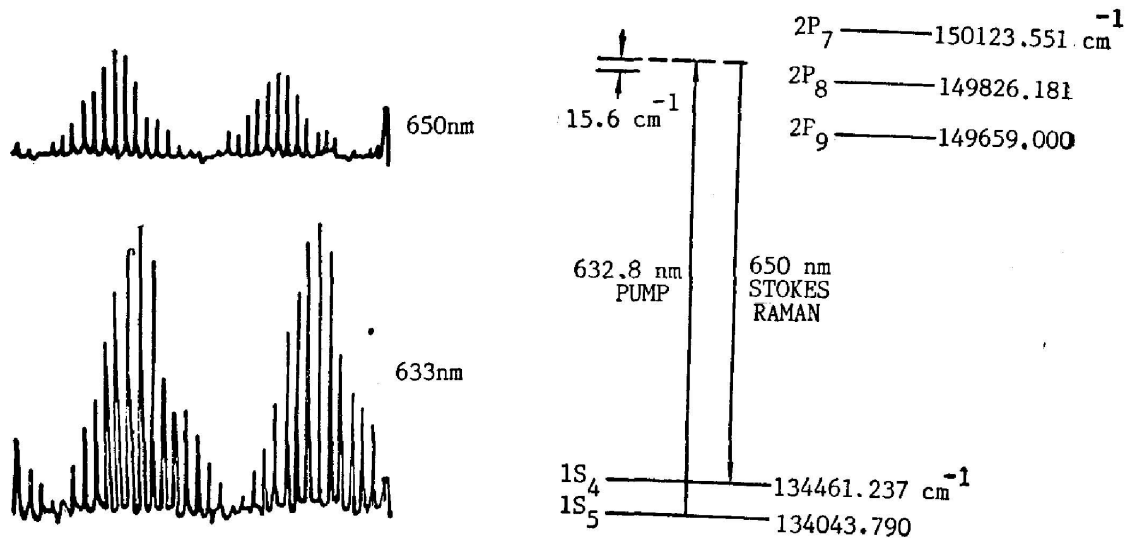


Fig. 2 Gain linewidths and modes for 633 nm and 650 nm lines

Fig. 3 Energy level diagram for selected electronic states of neon with electronic Raman transition pumped by 632.8 nm laser line

6. 650 nm 腔内 CW 受激 Raman 辐射的波长

通过上述各种测量与分析, 可认为 650 nm 是受激 Raman 过程, 其能级间跃迁如图 3 所示。 $1S_5$ 能级通过 632.8 nm 激光, 将粒子激发到 $2P_8$ 附近一个虚能级上, 然后以该虚能级通过 Stokes 散射过程辐射出 650 nm 的受激 Raman 辐射, 实现粒子从 $1S_5$ 到 $1S_4$ 的转移。通过波长测量得到空气中 650 nm Raman 辐射的波长值为 650.00 nm, 而 $2P_8-1S_4$ 跃迁理

论计算波长值 650.65 nm。通过两者的差值可计算出虚能级与 $2P_8$ 能级的能量差为 15.6 cm^{-1} , 即:

$$G_{1S_5} + G_{633 \text{ nm}} - G_{2P_8} = 15.6 \text{ cm}^{-1}.$$

由此得到的受激 Raman 辐射波长理论值应为:

$$\lambda_{\text{vac}} = 650.172 \text{ nm},$$

$$\lambda_{\text{air}} = 649.992 \text{ nm}.$$

这一理论值与实际测量值在仪器的误差范围内是完全一致的。

7. 受激 Raman 辐射增益的估算

650 nm Raman 激光是由三能级的近共振受激 Raman 散射产生的。Raman 碰撞截面为^[3~4]

$$S_R = \frac{C^4 g_1 f_1 g_2 f_2 \nu_R}{32\pi^3 \epsilon_0 m^3 h C^2 \nu_1 \nu_2 \Delta\nu^3 \Gamma}. \quad (1)$$

其中 f_1 和 f_2 是 $1S_5-2P_8$ 和 $1S_4-2P_8$ 之间的振子强度因子, g_1, g_2 为相应的能级简并度。 ν_1, ν_2 是相应的跃迁频率, ν_R 是 Raman 跃迁频率, Γ 是 Raman 增益线宽, $\Delta\nu$ 是虚能级与 $2P_8$ 的频率差。从文献[5]得到对于 $2P_8-1S_5$ 跃迁 $g_1 f_1 = 0.54$, $\nu_1 = 4.7 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$, 对 $2P_8-1S_4$ 跃迁 $g_2 f_2 = 0.95$, $\nu_2 = 4.6 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$, 测量出 $\nu_R = 4.6 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$, $\Delta\nu = 4.7 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$, 用上述值及测量的数值计算出相应 Raman 碰撞截面为 $1.1 \times 10^{-27} \text{ m}^2/\text{W}$ 。

小信号 Raman 增益系数:

$$g_R = S_R N I_P \quad (2)$$

I_P 为泵浦光强。因为 $1S_5$ 是亚稳态, 能级寿命约为 2sec, $1S_4$ 相对 $1S_5$ 来说粒子数很少, $1S_5$ 能级粒子数密度约为 $6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ [6], 相应的增益系数为:

$$g_R = 5.8 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}.$$

在我们的装置上, 激光腔内的单程损耗为 $0.1\% \text{ m}^{-1}$, 所以单程净增益系数为 $\bar{g}_R = g_R - \alpha = 0.48\% \text{ m}^{-1}$, 腔镜透过率为 0.02% , 因此 $g_R l = 24$ 。

由耦合波方程知道 Raman 光子增长是一个指数函数^[7]

$$n_R(z) = n_R(0) \exp[(g_R - \alpha)z]. \quad (3)$$

$n_R(0)$ 是 Raman 光子的量子噪声

$$n_R(z) = n_R(0) e^{24}.$$

因此, Raman 激光可由量子噪声放大产生激光输出。

通过上述实验与分析可以得出, 650 nm 激光是腔内 Ne 能级 $1S_5$ 和 $1S_4$ 间受激 Raman 散射过程。

三、讨 论

在可见光范围内, 同时辐射六种波长 CW-氦氖激光器是首次研制成功的, 对它进行稳频后, 它们的频率稳定性都优于 10^{-10} , 进行模式锁定后, 频率稳定性可达 10^{-12} [1]。在这一研究中还首先取得了 CW 650 nm 氦氖 Raman 激光, 并对它进行了初步的理论论证。

同时辐射六种波长 CW-氦氖激光的诞生, 将在计量学, 光谱学, 测量术(特别是高精度

的大距离测量)以及在医学等方面的应用都是十分有用的。

作者感谢黄植文、赵绥堂、许婕和郑乐民同志所给予的热情支持与帮助。

参 考 文 献

- [1] 赵克功;《计量学报》,1987, 8, No. 3 (Jul), 169~174。
- [2] N. Djeu and R. Burnham; *Appl. Phys. Lett.*, 1977, No. 80 (Aug), 473.
- [3] W. Heitler; "*The Quantum Theory of Radiation*", (Oxford University, London, England, 1954), p. 258.
- [4] D. Marcuse; "*Principle of Quantum Electronics*", (Academic, New York, 1980), p. 532.
- [5] J. Bridges and W. Wiese; *Phys-Rev.*, 1970, 48, No. 2 (Feb), 285.
- [6] V. B. Enamenski; *Opt. Spectrosc.*, 1968, 52, No. 15 (Sep), 7.
- [7] Y. R. Shen; "*The Principle of Neut. Optics*", (Academic, New York, 1979), p. 320.

CW He-Ne laser with simultaneous emission of six visible wavelengths, its frequency stabilization and 650 nm He-Ne stimulated Raman emission

ZHAO KEGONG

(National Institute of Metrology, Beijing)

JIN HAORAN AND WANG QINGJI

(Beijing University)

(Received 28 August 1987; revised 20 September 1988)

Abstract

Using the 612 nm He-Ne laser tube made in the National Institute of Metrology (NIM) and the wide-band mirrors with the reflectivity of 99.95%, simultaneous emission of 6 visible laser wavelengths (611.8, 629.3, 632.8, 635.1, 640.1 and 650 nm) has been observed. Various physical parameters of these lines have been measured and the laser frequency has been stabilized with simple devices. The frequency stability is better than 10^{-10} for all 6 lines. This can be improved up to 10^{-13} using modelocking technique. The 650 nm line is proved being a CW He-Ne Raman emission.

Key words: stimulated Raman emission; frequency stabilization; He-Ne laser.