

全内腔绿(黄、橙)光 He-Ne 激光器

高伯龙 丁金星 龙兴武 曾 明 周宁平

(国防科技大学应用物理系, 长沙 410073)

摘 要 全内腔绿光 He-Ne 激光器在我国已首次制成, 全内腔黄/橙光激光器也已制成。文中报道了它们的性能, 并讨论了有关原理和工艺技术的问题。

关键词 全内腔, He-Ne 激光器, 消激活。

全内腔绿光 He-Ne 激光器的应用面广、需求量大, 但绿光在 He-Ne 的 8 条可见光谱线中增益最低, 因而研制的难度很大。

国际上美国 1962 年出 He-Ne 红光, 国内是 1963 年, 并且不久后都有了商品。He-Ne 绿光是 1970 年首次在美国出现^[1], 国内则是中国计量科学研究所 1987 年首次成功, 但都是外腔型, 使用棱镜和很长的增益管。全内腔绿光 He-Ne 激光器 1985 年在美国首先制成, 1986 年推出商品, 至今还只有美国和德国有产品。作者于 1994 年 7 月制成了这种激光器, 这在国内为首次, 1995 年将小批量试售产品。与此同时还制成了全内腔黄光或橙光 He-Ne 激光器。本文是对这些激光器作一些介绍和讨论。

1 原 理

能连续发光的 He-Ne 可见光谱线的上能级都是 Ne 的 $3s_2$, 下能级为 $2p$ 系列^[2]。3.39 μm 谱线的上能级亦为 $3s_2$, 下能级为 $3p_4$ 。共上能级的谱线由于争夺发光粒子, 必有强烈竞争, 加上 3.39 μm 的增益极强(为 632.8 nm 的 $10^3 \sim 10^4$ 倍), 因而对可见光谱线有很大影响。众所周知, 较长的红光管必须抑制 3.39 μm 的作用才能得到较大的功率, 长管则必须同时采取多个抑制措施。抑制 3.39 μm 谱线对增益低的其它谱线更为重要, 全内腔激光器用膜必须强烈抑制 3.39 μm , 同时还必须抑制其它谱线。这是镀膜膜系设计的任务。

对于都普勒(Doppler)极限(即都普勒展宽占明显主要作用)的气体激光器, 在谱线中心, 单位长度的增益 G/l 为^[2, 3]

$$G/l = \sigma \Delta N, \quad (1)$$

$$\sigma = [m/(128\pi^3 kT)]^{1/2} \lambda^3 A, \quad \Delta N = N_2 - N_1 g_2/g_1. \quad (2)$$

式中 λ 为发光的波长, N_2 、 N_1 为谱线上、下能级的分子数密度, g_2 、 g_1 为相应的统计权重, A 为谱线的自发跃迁概率, m 为发光分子的质量, T 为气体温度, k 为波耳茨曼(Boltzmann)常数, σ

被称为辐射截面, 单位是 cm^2 ; ΔN 为粒子数反转密度。

对于 Ne 从 $3s_2 \rightarrow 2p_j$ 的跃迁, A 可取自文献[4]。取 $T = 390 \text{ K}$, Ne 取 ^{20}Ne , 算得各谱线的 σ (载于表 1)。由于完整的 ΔN 资料不多, 作者找到文献[5], 其工作条件为: $^3\text{He}:^{20}\text{Ne} = 7:1$, 总气压 $P = 400 \text{ Pa}$, 毛细管直径 $d = 1.4 \text{ mm}$, 辉光放电电流 $I = 1 \sim 15 \text{ mA}$, 测得的 $(N/N_0) \sim I$ 曲线, 其中 N 为 N_2 或 N_{1g_2}/g_1 , N_0 为 $I = 15 \text{ mA}$ 时的 N_2 值。并经相当精确地用以下公式拟合这些曲线:

$$\left. \begin{aligned} N_2/N_0 &= k_1 I / (1 + k_2 I), \\ (N_{1g_2}/g_1)/N_0 &= k_3 I / (1 + k_4 I), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

拟合得到 $k_1 = 0.517$, $k_2 = 0.45$, $k_4 = 0.033$, k_3 值则列于表 1。式中 I 的单位用 mA 。拟合的相对精度为 0.01, 与作图的精度基本一致。

由 (3) 式可算得 (2) 式的最大值 $(\Delta N)_{\max}$ 及最佳电流 I_{op} , 由此可得最大增益的相对值 $(G/I/N_0)_{\max}$ 。这些值也皆列于表 1。

应注意到, 这些值仅是在上述特殊条件下的最佳值。如果对充气 ($\text{He}:\text{Ne}$, Pd) 进行优化, 则最佳增益将比表中值更大。

Table 1. The physical values for the $3s_2 - 2p_j$ transitions

j	1	2	3	4	5	6	7	8	10
λ, nm	730.5	640.1	635.2	632.8	629.4	611.8	604.6	593.9	543.3
g_1	1	3	1	5	3	5	3	5	3
$\sigma, 10^{-14} \text{ cm}^2$	3.92	14.4	3.49	33.9	6.28	5.50	1.97	1.65	1.79
σ/σ_0	0.116	0.425	0.103	1	0.185	0.162	0.058	0.049	0.053
k_3	0.0267	0.0299	0.0192	0.0269	0.0318	0.0343	0.0254	0.0254	0.0740
I, mA	11.2	10.1	15.0	11.1	9.6	9.0	11.7	11.7	4.5
$\Delta N/N_0$	0.740	0.715	0.808	0.739	0.701	0.683	0.751	0.751	0.479
$G/I/N_0$	2.90	10.3	2.82	25.1	4.40	3.76	1.48	1.24	0.86
G/G_0	0.12	0.41	0.11	1	0.18	0.15	0.059	0.050	0.034
$(G/G_0)_{op}$	0.12	0.42	0.11	1	0.18	0.18	0.08	0.06	0.04

note: I , ΔN and G are the optimum values or maximums for the condition above, the $(G/G_0)_{op}$ is the maximum under the additional condition of optimum He-Ne mixture (Private communication). The unit of $G/I/N_0$ is 10^{-14} cm^2 . The g_2 of $3s_2$ equals 3. The transition for $j = 9$ is forbidden.

由于 k_2 相当大而 k_4 很小, 在电流稍大时 N_2 趋于饱和 ($I = 15 \text{ mA}$ 时达 87%), 而 N_1 总随 I 几乎成线性变化, k_3 大时 N_1 随 I 增长快, I_{op} 必然小。绿光的 k_3 为其它谱线的 2.3 ~ 3.9 倍, I_{op} 则为它们的 0.3 ~ 0.5 倍, $(\Delta N/N_0)_{\max}$ 亦较其它谱线明显地小。比较表 1 中 σ/σ_0 , G/G_0 [上述条件下的 max], 和 $(G/G_0)_{op}$ [全优化的 max] 三种值可知: 除 $j = 7, 8, 10$ 以外, 这三种值基本一致; $j = 7, 8$ 的 G/G_0 、 $(G/G_0)_{op}$ 稍受 ΔN 项影响; $j = 10$ 时 ΔN 项的影响较大。

根据文献[2], $k_1 I$ 项来源于放电电子碰撞使 He 原子从基态激发到 2^1S_0 态; $k_2 I$ 项来源于电子对 2^1S_0 态消激活, 主要可能是跃迁到较低的 2^3S_1 态; $k_3 I$ 项来源于电子碰撞使 Ne 原子跃迁到 $2p_j$ 态, 主要可能是从 $1s_i (i = 2, 3, 4, 5) \rightarrow 2p_j$ 。文献[2]中取 $k_4 = 0$ 。显然, $k_4 I$ 项的存在表明电子对 Ne $2p_j$ 消激活, 可能主要跃迁到 $1s$ 。这样, 这些系数便与 $(\text{He}:\text{Ne})$ 、 p 、 d 有关。更详细的讨论将待专题另文进行。

He:Ne 主要影响 N_2 , 因而绿(黄、橙)光的最佳气体比基本上与红光时相同。总气压对

N_2 、 N_1 都有影响, 因而最佳气压和最佳电流对各谱线是不同的。因此, 制管时基本可按红光, 仅下排气台前调整一下总气压就成了。这点已为实验所证实。实验测得绿光的最佳 pd 值较红光小。

有了这些数据, 便可作估算。例如, 放电长度 $l = 350$ mm、毛细管直径 $d = 1.4$ mm 的 He-Ne 管, 红光最大的双程增益约为 15%, 即 $G_0 = 0.15$, 按表 1 可得绿光 $G_0 = 0.006$, 由于各种原因(包括未完全优化)作者可取其八成, 即 G 估计可达 0.48%。双程衍损对绿光可估为 0.05~0.1%。这样, 留给片子的增益便不多了。镀膜的任务之一便是得到低损耗的片子。

2 镀 膜

1) 镀膜机的主机为成都南光机器厂 H44700 型, 自改造了光学系统和配置了自制的膜厚监控系统。膜厚监控精度高, 稳定可靠。

2) 在镀膜材料和工艺上作了较为细致的工作, 从而取得良好的耐放电辉光性能、较低损耗和较好均匀性。

3) 膜系设计符合三项要求: 高度抑制 $3.39 \mu\text{m}$ 和其它不需要的谱线; 损耗较低; 操作较简易。从实践证实设计很成功。

4) 自制大量检测设备, 测基片的光圈、散射和均匀性, 测薄膜在可见光和 $3.39 \mu\text{m}$ 的折射率、膜厚和损耗, 还测得散射、均匀性、稳定性等。

5) 基片要求超光滑抛光。

6) 片子达到的性能——只录下绿光片数据供参考(单位为%)。全反片: $R(543.3) > 99.9$, $R(3.39) = 0.1 \sim 0.2$; 输出片: $R(543.3) > 99.8$, $T(543.3) = 0.08 \sim 0.12$, $T(593.9) > 2$, $T(611.8) > 10$, $T(632.8) > 40$, $T(1.15) > 70$, $R(3.39) = 0.2 \sim 0.9$ 。

关于镀膜的详细理论和技术, 将在适当时机专文发表。

3 制 管

1) 管子经严格的化学、超声等清洗后在调腔台上用自己独特的钎封技术将反射片与管子封接, 具有简单、易调、对片子污染轻、封接温度较低、应力很小等优点, 若调腔有些不准, 下排气台仍可将钎加热到软化点后作微调使输出功率最大。这种方法制成的红光管寿命达四年以上。

2) 对输出片的透射率 T , 可用下式作估计^[6, 7]:

$$W = KT[G/(T + r) - 1], \quad (4)$$

式中 W 为输出功率, r 为除 T 以外的总损耗, K 是与谱线种类、工作气体成份和气压等有关的常数。当 $G = 0.48\%$, $r = 0.1 \sim 0.3\%$, 可算得 T 的最佳值为 $0.08 \sim 0.12\%$ 。实践证明该值合适。

3) 谐振腔取对称球面腔。好处为: 比较稳定, 适合低增益的绿光、黄光; 毛细管研磨后自然接近对称球面腔的高斯型光束, 有利于增益。曾试过平凹腔, 对绿光极难发光且不稳定。

4) 毛细管直径的选取应比衍损决定的理论值稍大, 如腔长 350 mm, 球面镜曲率半径 1 m, d 可取 1.4 mm。如取值偏小, 衍损增加很快且腔体微小热变形造成的衍损变化将使功率输出不稳。

5) 全部波长的管子皆使用 ^3He 和自然 Ne, 气压比 7:1。pd 值对绿光为 2.9, 黄光为 3.5, 橙光为 3.8 Torr-mm。 d 值随腔长略增, 腔长 250 mm 为 1.25 mm; 300 mm 时为 1.3 mm; 350 mm 时为 1.35 mm。

4 达到的性能指标

经测试小组在中国计量科学研究院长度处激光室测定, 所提供腔长 310~420 mm 的五根绿光(543.3 nm)管功率为 0.26~0.65 mW, 最佳工作电流 3.5 mA, 纯绿。其中一根管子(0.45 mW)为纯 TEM_{00} 模, 其余管子则混有少许非 TEM_{00} 模成份。两小时内功率的稳定性为 5.5~6.4%, 半小时内为 3.4%, 皆含非稳流电源的电流不稳定性在内。

黄光(593.9 nm)管子的功率为 0.89 mW, 纯 TEM_{00} 模, 最佳工作电流 4 mA。橙光(611.8 nm)的功率为 1.46~3.5 mW, 多模且夹黄光, 最佳工作电流 5 mA。

实验证明上面录下的绿光全反片和输出片性能是足够产生绿光而抑制其余波长的, 大部分管子夹少量非 TEM_{00} 模成份是由于毛细管直径 d 略偏大。黄光管特别是橙光管用片则抑制某些波长能力有所不足, 是靠各波长间竞争上能级发光粒子数作为补充机构以抑制其它波长的, 功能有些不足; 所以橙光管不可避免夹黄光。

世界上最为重要的一家制造商, 美国 PMS 公司, 全内腔绿光 He-Ne 激光器(543.3 nm)的性能为: 腔长 340 mm, 功率 0.2~1 mW, 单模, 功率离散度大。(国内对“单模”的理解为: 单横模, 多数可能混有些非 TEM_{00} 模)。

5 发展和改进

1) **继续提高膜片的质量** 这应该是提高功率的主要途径。从(4)式, 在使用的数据下, $r=0.3, 0.2, 0.1\%$ 所能得到的最大输出功率比为 1:2:7。膜片质量的提高同时还将使成品率和寿命大为提高。

2) **加长管长** 加简易的非均匀磁场以抑制 3.39 μm 的超辐射效应, 进一步提高功率。

3) **继续提高调腔和封接技术** 最大限度地去除残余污染和慢漏, 进一步提高功率和延长寿命。

4) **放弃过度抑制 3.39 μm** 可提高半米以下全内腔管的功率和解决橙光管夹黄光的问题。事实上, 作者的两个片子都高度抑制 3.39 μm , 这对半米长以下的管子为不必要。如果放松一个片子, 如放松全反片, 将使它的损耗减小而提高功率, 同时有利于设计抑制黄光的橙光片子。

5) **开发应用, 逐渐形成批量生产** 这对国内是重要的, 因为国内至今没有人使用过全内腔绿(橙、黄)光 He-Ne 激光器。

感谢王大珩院士的帮助和指教, 感谢中国科学院化学所朱起鹤教授、北京大学物理系黄植文教授、中国计量院刘忠有副研究员等对管子性能的严格测定, 还要感谢许多专家、教授的指教, 特别是北京大学物理系赵绥堂高级工程师提供的数据(是目前最完整的)。

参 考 文 献

- [1] D. L. Perry, CW laser oscillation at 5433 Å in neon. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1971, QE-7(2): 102
- [2] Colin S. Willett, *Introduction to Gas Lasers: Population Inversion Mechanisms*. Pergamon press, Oxford, New York, Toronto, Sydney, 1974: 124~128, 136, 407
- [3] Michell A., Zemansky M. W., *Resonance Radiation and Excited Atoms*, Cambridge Unive. press, 1961
- [4] S. Inatsugn, J. R. Holmes, Transition probabilities for the $5s^1 [1/2]_1 - 3p$ transitions of NeI, *Phys. Rev. (A)*, 1973, 8(4): 1678~1687
- [5] 游大江, 李 桦, 郑乐民等, 多谱线 He-Ne 激光器的研制及其特性分析. 北京大学学报(自然科学版), 1983, 2: 75~88
- [6] Murray Sargent III, Marlan O. Scully, Willis E. Lamb, Jr, *Lasers Physics*, London, Amsterdam, Don Mills, Sydney, Tokyo, Addison-Wiley Publishing Company, 1974: 162~170
- [7] P. W. Smith, Output power for 6328 Å He-Ne gas lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1966, QE-2(1): 62~68

Green (Yellow, Orange) He-Ne Laser with Internal Cavity

Guo Bolong Ding Jinxing Long Xingwu Zeng Ming Zhou Ningping

(Department of Applied Physics, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

(Received 17 November 1994; revised 18 July 1995)

Abstract Green He-Ne laser with internal cavity was successfully made. The yellow and orange He-Ne lasers were also made first time in our country. The paper reports their specifications and discusses the relating problems about principle and technology.

Key words internal cavity, He-Ne laser, de-excitation.