

多波长 He-Ne 激光器的结构及工艺研究

于澍生 李庆国 杜龙龙 张 蕾

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

提要 一米放电长度的全外腔 He-Ne 管, 采用棱镜腔片和宽带输出耦合腔片获得 633 nm, 612 nm, 604 nm, 594 nm 和 543 nm 五条谱线的独立振荡。提供了研制全内腔绿色 He-Ne 激光器的实验依据。

关键词 谱线竞争, 半棱镜腔片

Research of structure and technology for multi-wavelength He-Ne laser

YU Shusheng, LI Qingguo, DU Longlong, ZHANG Lei

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

Abstract Five laser lines corresponding to the wavelengths: 633 nm, 612 nm, 604 nm, 594 nm and 543 nm have been obtained respectively from a one meter discharged He-Ne laser with an external wide band reflector and half prism wavelength selector. The research presents an experiment basis of designing an all internal cavity green He-Ne laser.

Key words lines competition, half prism wavelength selector

1 引 言

自六十年代初期氦氖激光器问世以来,在实际应用的长期考验中,其制造工艺不断改进。七十年代中期,由于硬封技术的应用,使氦氖激光器的寿命提高到几万小时。八十年代初期^[1],由于高品质光学元件,窄带高反光学镀膜研制成功及商品化,使氦氖低增益的桔红光(612 nm),黄光(594 nm),绿光(543 nm)谱线,在不使用腔内棱镜分光时也能振荡,产生激光输出。到八十年代中期,不同波长的近红外及红、桔红、桔黄、黄、绿等可见光的小型内腔式氦氖激光器已有商品销售,输出功率从十分之一毫瓦到几毫瓦,寿命亦可达到上万小时。国内 1987 年首次报道研制成功 543 nm 氦氖激光器^[2]。但是制成半米以内,全内腔的非红波长氦氖激光器在工艺上、光学材料、光学元件的品质、高反射窄带介质膜技术上等仍有大量的困难待克服,在这些方面还没有突破性的进展。即使对外腔式波长可调的激光器,半米以内的放电长度仍难以实现绿光振荡。本文报道我们研制的放电长度 400 mm 半内腔桔红光(612 nm)氦氖激光器及

放电长度 1000 mm 波长可调的外腔式氦氖激光器。提出了研制更短放电长度、内腔式非红氦氖激光器的新结构。

Table 1 Gain ratios for He-Na lines with respect to 633 nm

Transition	λ (nm)	Spontaneous Emission		Transition	Summed spontaneous emission coefficient $\sum A$ (10^6 s^{-1})	Estimated gain ratio $\frac{3S_2 \rightarrow 2P_n}{3S_2 \rightarrow 2P_4}$
		coefficient A (10^6 s^{-1})				
$3S_2 \rightarrow 2P_1$	730	0.48		$2P_1 \rightarrow \sum 1S$	87.9	1/8
$3S_2 \rightarrow 2P_2$	640	0.57		$2P_2 \rightarrow \sum 1S$	116.6	1/5
$2S_2 \rightarrow 2P_3$	635	0.70		$2P_3 \rightarrow \sum 1S$	61.7	1/8
$3S_2 \rightarrow 2P_4$	633	6.56		$2P_4 \rightarrow \sum 1S$	51.7	1
$3S_2 \rightarrow 2P_5$	629	1.35		$2P_5 \rightarrow \sum 1S$	53.3	1/5
$3S_2 \rightarrow 2P_6$	612	1.28		$2P_6 \rightarrow \sum 1S$	53.6	1/5
$3S_2 \rightarrow 2P_7$	604	0.68		$2P_7 \rightarrow \sum 1S$	49.3	1/10
$3S_2 \rightarrow 2P_8$	594	0.56		$2P_8 \rightarrow \sum 1S$	41.2	1/15
$3S_2 \rightarrow 2P_9$	588			$2P_9 \rightarrow \sum 1S$	43.3	
$3S_2 \rightarrow 2P_{10}$	543	0.59		$2P_{10} \rightarrow \sum 1S$	33.6	1/17

Table 2 Gains of He-Ne laser relative transitions

Transition	Wavelength (nm)	Gain (db/m)
$3S_2 \rightarrow 2P_4$	633	0.5
$2S_2 \rightarrow 2P_4$	1152	0.4
$3S_2 \rightarrow 3P_4$	3391	22.0

Table 3 Weight and life times of He-Ne laser relative levels

Energy level	$2S_2$	$2S_3$	$2S_4$	$2S_5$	$3S_2$	$2P_1 \rightarrow 2P_{10}$	$3P_1$	$3P_4$	$3P_{10}$
Weight	3	1	3	5	3	1,3,1,5,3,5,3,5,7,1	1	5	1
Lifetime (10^{-9} S)	96	159	98	110	20	15~24	64	9.8	65

2 原 理

氦氖激光的很多谱线具有同一上能级,或具有同一下能级。因此,各谱线间存在着激烈的竞争。为获得某一谱线的振荡就必须为它创造极好的谐振条件,使其竞争的谱线有尽可能大的损耗。表 1^[3] 给出各跃迁能级的自发辐射几率、相应的激光波长及下能级的弛豫速率、各跃迁的小信号增益系数与 633 nm 增益系数的比值。表 2^[3] 给出三种跃迁的小信号增益系数。由表 1 看出,在 $3S_2 \rightarrow 2P_n$ 的 9 种可能的跃迁中, $2P_{10}$ 能级到 $1S_n$ 的自发辐射系数最小。因此,在 $2P$ 的各能级中, $2P_{10}$ 能级上聚集较多的粒子,对反转不利。设激光上能级的粒子数为 n_3 , 能级简并度为 g_3 , 单位时间激发到此能级的粒子数为 w_3 , τ_3 为能级寿命。相应的激光下能级的粒子数为 n_2 , 能级简并度为 g_2 , 激发速率为 w_2 , 寿命为 τ_2 , 则实现粒子数反转的条件为

$$\Delta n = n_3 - n_2(g_3/g_2) > 0 \quad (1)$$

$$\text{即 } w_3 > (g_3\tau_2/g_2\tau_3)w_2 \quad (2)$$

由表 3^[3] 给出的数值,我们可以估计出,对 $3S_2 \rightarrow 2P_4$ (633 nm) 能级, $w_3 = w_2$ (即单位时间激发到 $3S_2$ 与 $2P_4$ 能级上的粒子数相等) 就能实现粒子数反转。对 $3S_2 \rightarrow 3P_4$ (3.39 μm), 即使 $w_3 = \frac{1}{2}w_2$, 也能实现反转。但对 $3S_2 \rightarrow 2P_{10}$ (543 nm), w_3 达到 3 倍以上的 w_2 (即单位时间内激发到 $3S_2$ 能级上的粒子数应是激发到 $2P_{10}$ 能级上粒子数的 3 倍以上) 才能反转。因此, 543 nm 增益最低, 再加上由于散射和吸收引起的寄生腔损耗, 使得腔内净增益十分低, 甚至小于寄生腔损

耗。(反射镜本身眼睛看不到的微观缺陷所引起的损耗与 $1/\lambda^4$ 成比例, 波长越短散射损耗越大。对绿光, 总的寄生损耗希望控制在输出耦合为最佳时的透过率, 此值接近普通 633 nm 激光管所用的高反膜透过率)。由于 543 nm 的低增益和最大的寄生损耗, 要求 543 nm 激光器的整个制作工艺中把握最严格的品质控制, 即光学材料本身及镀膜, 应使散射吸收损耗减至最小。黄光 594 nm 增益稍高于 543 nm, 但是 594 nm 比 543 nm 容易振荡主要是由于波长较长, 使散射损耗小些, 相应地, 腔内净增益也大。使 594 nm 振荡, 主要要抑制 612 nm, 要求反射膜在 600 nm 处有一陡的边界。604 nm 桔黄线和 612 nm 桔红线, 两条谱线十分靠近, 当 612 nm 振荡时, 就抑制了 604 nm 振荡。

总之, 在 He-Ne 激光器中, 由于谱线的强烈竞争和低增益, 为获得某一非红谱线的单独振荡, 除使用窄带高反膜外, 还常使用可饱和吸收、非均匀磁场、棱镜等单独或组合应用, 抑制不要的谱线, 以使所要的谱线振荡。

3 激光管

我们研制了两种型式的激光管。

3.1 半内腔同轴激光管^[4]

此种激光管, 放电管、贮气泡、电极均同轴放置。一端为布氏角窗口, 一端为可伐头, 可贴腔片与棱镜。电极端粗大, 放电管部分细小, 便于放置磁场。结构如图 1。毛细管与外套管相距 2 mm 左右, 管外放置非均匀磁场(0.02 T 左右, 能抑制 3.39 μm 振荡即可), 磁力线可通过放电管部分, 电极泡部分粗大, 可增加贮气量, 可伐头部分贴宽带高反镜片或直角边镀膜的布氏角半棱镜, 用 633 nm He-Ne 光定棱镜方位, 调准可伐头, 可得最佳腔片方位, 我们采用的放电管内径为 1.7 mm, 放电长度为 400 mm, 总长为 480 mm, 选用平凹近半共焦腔, 凹面镜曲率半径 1 m, 腔片、布氏角窗口、布氏角半棱镜材料均为 K_9 。抑制 3.39 μm 与 633 nm, 即可实现 612 nm 桔红光振荡。输出镜对 612 nm 的透过率为 0.4~0.6% 时, 612 nm 输出功率可达 1 mW 左右。最佳放电电流为 7 mA 左右, 偏离放电电流的最佳值, 则 612 nm 不易振荡。布氏角窗口与镜面的清洁度对输出功率影响很大。本激光管由于窗片及镜面的内表面在粘贴时有些污染, 故输出功率不高。充 He^3 与 Ne^{20} , 比例为 5:1~7:1, 总气压控制在 $pd = 478.8 \text{ mm} \cdot \text{Pa}$ 左右。

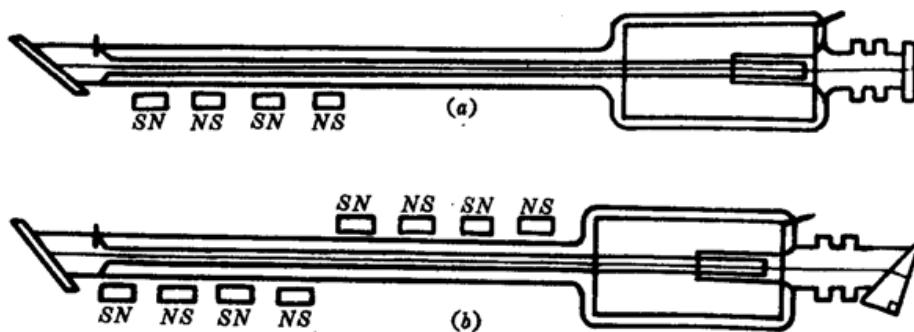


Fig. 1 Schematic diagrams of half intra-cavity He-He lasers with plat mirror (a) ; with half prism reflector (b)

3.2 全外腔输出波长可调的激光器

输出波长可调的 He-Ne 激光器, 采用全外腔结构^[5,6]。布氏角窗片及棱镜均采用高品质石英 JGS_1 , 两块布氏窗片用 He-Ne 光校准, 当光通过放电管轴按原路返回时, 调整布氏片, 使

从两布氏片上反射的光束相交于一点。激光管为单管式,阴、阳极均旁轴放置,这样可使放电更趋稳定,又可以减少放电对窗片的污染。腔型为宽带高反凹面反射镜和一直角边镀膜的布氏角半棱镜,近半共焦腔。使用半棱镜,反射面就镀在棱镜上,反射面是镜的内表面,所以反射膜是不需要清洁的。激光管结构如图 2 所示。激光管放电长度为 1 m,凹面反射镜曲率半径为 3 m,布氏角半棱镜按 543 nm 要求设计(顶角 $34^{\circ}24'$),棱镜可直接贴在布氏窗口上,用 He-Ne 633 nm 光校准,调节可伐头(图 2 未画出)棱镜对光轴旋转,使棱镜对准所要的波长,这时如果放电,就可以看到白亮的临界振荡斑。这种结构,由于棱镜调节范围有限,一般只能实现设计波长的振荡。

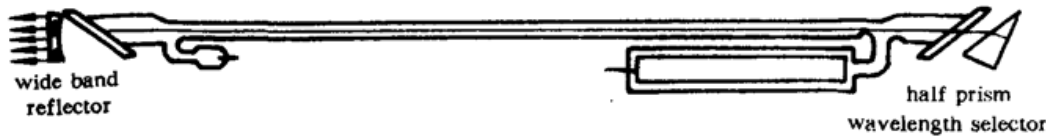


Fig. 2 Capillary He-Ne laser with side electrode

如果棱镜与激光管分开放置,棱镜调节范围加大,依赖于宽带反射镜的特性,在可见区内,可实现单波长的依次振荡。由表 1,表 2, $3S_2$ 到 $2P$ 的 9 种跃迁中都具有同一上能级 $3S_2$,而 $3S_2 \rightarrow 3P_4$ 跃迁的增益最高,在一定的放电长度下即可实现超辐射。因此,在放电管外加非均匀磁场,以抑制 $3.39 \mu\text{m}$ 振荡。同时棱镜腔使各波长分开,在 633 nm 到 543 nm 的角色散宽度为 10 nm $1.6'$ 左右,更有效地抑制了不需要的波长,采用这种形式,我们得到从红光到绿光共 5 条谱线的单独振荡。结果示于表 4。

Table 4

Wavelength (nm)	Transitions	Output power (mW)
633 (red)	$3S_2 \rightarrow 2P_4$	20
612 (orange red)	$3S_2 \rightarrow 2P_6$	1.7
604 (orange yellow)	$3S_2 \rightarrow 2P_7$	0.5
594 (yellow)	$3S_3 \rightarrow 2P_8$	0.3
543 (green)	$3S_2 \rightarrow 2P_{10}$	0.1

由于该激光管是按绿光能够振荡的条件设计的,同时,不同谱线有不同的最佳放电电流,以上参数均是在绿光的最佳电流下测得的,偏离此工作电流绿光不能振荡。改变输出耦合,期望输出功率提高。

在研制过程中与华东师范大学物理系丁良恩老师、郭增欣老师进行了有益的讨论,在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 D. L. Perry, *IEEE J. Quant. Electr.*, QE-2, 102(1971)
- 2 林贞平,刘忠有,中国激光,15(8),512(1988)
- 3 Robert G. Knollenberg, *SPIE*, 741, 2(1987)
- 4 Darwin Perry, *Optical Spectra*, 11, 35~36(1973)
- 5 源永安,陈文旋 *et al.*,激光杂志,11(3),131(1990)
- 6 林贞平,王广浩,激光杂志,11(4),185(1990)