

波导激光器调谐宽度的分析

王明常 王梧成 陈杏凤
(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

研制出内腔调谐波导激光器。对影响调谐宽度的因素进行了分析,计算了截尾效应的影响,给出调谐的实验结果。

一、引 言

波导激光器的一大特点是管径细、充气压高、调谐范围宽。在激光光谱学、激光雷达和激光通信等方面都有广泛的应用。因此,近年来引起人们的极大重视。

我们分析了波导激光器 EH_{11} 波导模的传输损耗和耦合损耗,研制成功内腔 Pyrex 玻璃波导激光器^[1]。在此基础上,采用双压电陶瓷片对波导谐振腔的长度进行了调谐,从而达到调谐振荡波长的目的。实验中利用迈克尔逊干涉仪测定了不同尺寸(厚度和直径)和不同材料的双压电陶瓷片弯曲形变的微小位移量,给出了直径为 24.5 毫米、厚度为 0.36 毫米的双压电陶瓷片的灵敏度为 0.32 微米/伏,频率调谐的灵敏度约为 60 兆赫/伏。

实验发现,这种 Pyrex 玻璃波导激光器的振荡在 CO_2 的 $00^{\circ}1 \sim 02^{\circ}0$ 带上占优势。单支谱线的功率大于 0.1 瓦的共有十三支,其中 $P(18)$ 、 $P(20)$ 、 $P(22)$ 等支(均为第二谱带)的功率在 0.5 瓦以上。第二谱带在波导谐振腔中的振荡占优势的内容将另文讨论。

本文讨论影响波导激光器调谐宽度的因素,除了气压和温度等因素以外,截尾效应的影响是严重的。已有文章虽提出过^[2],但未有进一步讨论。本文给出定量的分析和计算,并由实验结果进行验证。总气压在 130 托时,压力加宽使谱线宽度可达 500 兆赫以上,截尾效应的影响使单支谱线仅能在 300 兆赫范围内调谐。

我们研制出的调谐器件仍采用内腔封离式结构。通过巧妙的设计,将压电陶瓷片封于激光管内,而不用调整装置。封离后谐振腔两平面镜不平行度小于 $5''$,调谐时反射镜移动的不平行度小于 $10''$ 。这种结构适用于制成紧凑的小型化调谐波导激光器件。

二、理论分析

普通低气压(十几托)的 CO_2 激光器的调谐范围受 CO_2 激光跃迁的 Doppler 加宽的限制,大约为几十兆赫。对于波导激光器,气压在 100 托以上,发射谱线不再受 Doppler 加宽的限制,而是压力加宽的 Lorentzian 线型。这是均匀加宽的线型,其谱线宽度与气体的压

力和温度有关,表达式为^[3]

$$\Delta\nu = 7.58(\psi_{\text{CO}_2} + 0.73\psi_{\text{N}_2} + 0.6\psi_{\text{He}})P \left(\frac{300}{T} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

其中, ψ_x 为第 x 气体与总气压之比; P 为总气压(单位为托); T 为工作气体的绝对温度。

在典型情况下,室温 $T = 300^\circ\text{K}$ 时,压力加宽随气压增加的比例系数约为 5.3 兆赫/托。在波导激光器运转时,由下面的分析和计算可求出,放电时气体的平均温度约为 $T = 400^\circ\text{K}$,由上式可求出压力加宽的比例系数下降为 4.5 兆赫/托。本实验的混合气体比例为 $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 17:8:100$,总气压为 130 托,由(1)式求得

在 $T = 300^\circ\text{K}$ 时, $\Delta\nu = 658$ 兆赫,

在 $T = 400^\circ\text{K}$ 时, $\Delta\nu = 570$ 兆赫。

混合气体的平均温度表达式为^[4]

$$T = \frac{Q}{\pi L} \left[\frac{0.178}{K_g} + \frac{1}{2K_M} \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \right] + T_0, \quad (2)$$

其中, Q/L 为单位放电长度的输入功率; R_1, R_2 分别为放电管的内、外半径; K_g, K_M 分别为混合气体和管壁材料的热导率; T_0 为放电管外表面的温度。

在典型实验条件下,放电电流为 3 毫安,波导管管压降为 10 千伏。此时, $Q/L = 2$ 瓦/厘米。代入有关数值 $K_g = 9.7 \times 10^{-4}$ 瓦/厘米 $\cdot^\circ\text{K}$, $K_M = 0.011$ 瓦/厘米 $\cdot^\circ\text{K}$, $T_0 = 300^\circ\text{K}$,则由上式可求出平均气体温度在 $T = 400^\circ\text{K}$ 左右。我们的讨论局限于这一温度范围内。

将全反射镜贴在双压电陶瓷晶片上,片两端与直流电源 +、- 极相连,改变直流电压使腔长发生微小移动,实现频率的连续调谐。频率的调谐宽度是指在一个振荡支内的频率变化范围。调谐的宽度与压力加宽的线宽和谱线的增益有关。调谐范围的理论公式为^[3]

$$\Delta\nu_{\text{调谐}} = \Delta\nu \left[\frac{g_0 L}{\ln(\tau_1 \tau_2)^{-1/2}} - 1 \right]^{1/2}, \quad (3)$$

其中, τ_1, τ_2 分别为谐振腔两端的反射率, g_0 为小信号增益, $\Delta\nu$ 为单支谱线的压力加宽。

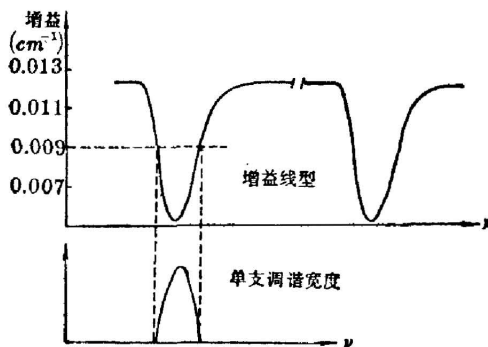


图 1 截尾效应和增益的关系

我们分别取 $\tau_1 = 98\%$, $\tau_2 = 85\%$,则在 $g_0 < 0.0065$ 厘米 $^{-1}$ 时,式(3)方括号中为负,即表示此时不能振荡。在 0.006 厘米 $^{-1} < g_0 < 0.013$ 厘米 $^{-1}$ 范围内,调谐的振荡线宽小于压力加宽的 $\Delta\nu$ 值,出现截尾效应。它表明,在增益系数较小时,发射线两翼不能产生振荡,所以 $\Delta\nu_{\text{调谐}} < \Delta\nu$ 。这种情况如图 1 所示。显然可以看出,单支谱线的增益线型是比较宽的,能够产生振荡的调谐宽度只是增益线型的一半左右。

根据实际测出的调谐宽度,可以求得本激光器的增益系数约为 0.009 厘米 $^{-1}$ 。这与我们在文献[1]中的分析和计算是一致的。表 1 是不同增益系数 g_0 时频率调谐宽度的变化。为了消除截尾效应,增加调谐范围,必须提高 g_0 ,使其大于 0.013 厘米 $^{-1}$ 。此外,由式(3)可见,提高输出端的反射率和加长放电长度 L ,都可降低对 g_0 的要求,从而达到同样的效果。例如取 $\tau_2 = 90\%$,如若不出现截尾效应,就只要求增益系数 $g_0 \geq 0.009$ 厘米 $^{-1}$ 。

表 1 对于不同增益系数 g_0 值, 频率调谐宽度的允许范围 ($\Delta\nu=570$ 兆赫)

g_0 (厘米 ⁻¹)	0.006	0.007	0.008	0.009	0.010	0.011	0.012	0.013	0.014
$\Delta\nu_{\text{调谐}}/\Delta\nu$	—	0.28	0.48	0.62	0.73	0.83	0.92	1.0	1.07
$\Delta\nu_{\text{调谐}}$ (兆赫)	—	159.6	273.6	353.4	416.1	473.1	524.4	570.0	570.0

波导激光器的调谐, 由于谱线是均匀加宽的, 全部高能级粒子数都对单支振荡谱线有贡献, 因此可以获得较强的单支输出。除此之外, 由于波导谐振腔的腔长很短, 相邻纵模之间的频率间隔 $\Delta\nu_{\text{腔}}=C/2L=1$ 千兆赫。这比普通 CO_2 激光器件大得多, 因此在振荡过程中不易“跳支”。易于获得稳定的单支波长的振荡, 为稳频工作提供了良好的基础。上述分析已由实验结果证实。

三、实验结果

实验装置的方框图如图 2 所示。调谐激光输出由热敏电阻接收, 输入到 $X-Y$ 记录仪的 Y_1 轴, 记录调谐谱线的功率值。 Y_2 轴监测放电电阻的变化。 X 轴是输入双压电陶瓷片的直流电源。分光镜 P 分出一束光进入谱线分析仪, 监测激光调谐的支数。

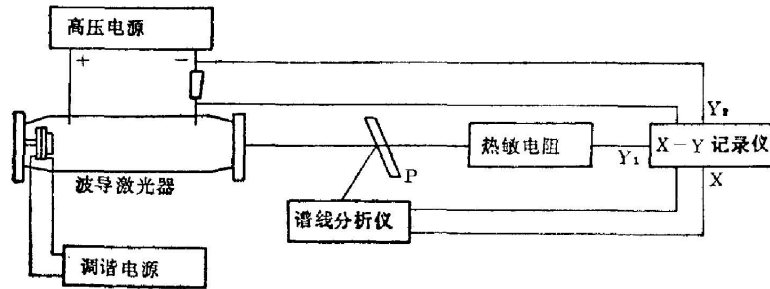


图 2 调谐实验装置的方框图

调谐用的双压电片是将两厚度相同而极性相反的压电陶瓷片用导电胶胶合在一起, 在两边仔细焊好正、负电极, 接通调谐的直流电源时, 由于逆压电效应一片伸长, 另一片缩短, 产生凸(或凹)形弯曲形变, 移动反射镜引起腔长的变化。谐振腔腔长 L (即放电长度) 的微小变化 ΔL 会使振荡频率发生相应的改变, 频率调谐宽度 $\Delta\nu_{\text{调谐}}=(\Delta L/L)\nu$ 。

用迈克尔逊干涉仪测量了不同材料和不同尺寸(厚度和直径)的双压电片的弯曲形变。最后选用直径为 24.5 毫米, 厚度为 0.36 毫米的双压电片, 为锆钛酸铅 $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ 材料, 其压电系数 $d_{33}=750\times 10^{-12}$ (库仑/牛顿)。结果给出弯曲形变的电压灵敏度约为 0.32 微米/伏, 频率调谐灵敏度为 60 兆赫/伏。

激光谐振腔腔长 $L=14$ 厘米, 测量出的自由光谱范围为 5.0 微米, 与计算出的 $\Delta\nu_{\text{腔}}=1.07$ 千兆赫一致。由此也可以验证测量的正确性。每次实验, 调谐用的直流电源电压调节范围在 50 伏以上, 可出现几个自由光谱区(每个自由光谱区电压间隔约为 16 伏)。各光谱区出现振荡支线的重复性由图 3 曲线可以看出, 各支谱线出现的次序、谱线的形状、频率调谐的宽度基本相同。随着调谐电压的增高, 调谐宽度有一定的非线性变化。

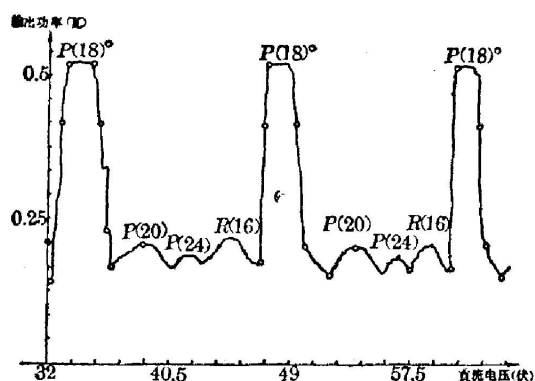


图3 改变调谐的直流电压由 X-Y 记录仪画出的激光输出的调谐曲线。支线上标 0 为 $00^{\circ}1 \sim 02^{\circ}0$ 谱带

我们共进行了十几次的综合测量, 不同实验次数出现的振荡波长不完全相同。图 3 的曲线是第十四次测量的结果。总的说来, 单支谱线输出功率在 100 毫瓦以上的有十三支先后出现, 其详细参数参见表 2。图 3 中 $P(18)^{\circ}$ 支谱线由于截掉两翼, 显得十分陡峭, 使调谐的宽度变窄。这和图 1 曲线的形状是一致的。

用迈克尔逊干涉仪测量激光管放电时腔长的变化发现, 在气体放电时压电陶瓷受温度的影响也会产生应变, 引起腔长的不规则移动。测量结果表明, 激光器每次运转必须经过 3~4 分钟后达到温度平衡, 才能开始正

式的调谐。利用热电偶测量了气体放电时全反射腔片附近的温度, 放电电流为 3 毫安时, 气体温度为 $340^{\circ}\text{K} \sim 360^{\circ}\text{K}$ 。

表 2 调谐谱线的支数、调谐宽度及其输出功率

所属谱带	支 数	波长(微米)	调谐宽度(兆赫)	激光功率(瓦)
$00^{\circ}1 \sim 02^{\circ}0$	$P(16)$	9.520	228	>0.1
	$P(18)$	9.536	325	>0.5
	$P(20)$	9.553	194	>0.5
	$P(22)$	9.570	325	>0.5
	$P(24)$	9.586	190	>0.5
	$P(26)$	9.604	164	>0.5
	$R(18)$	9.283	226	>0.5
	$R(14)$	9.305		
$00^{\circ}1 \sim 10^{\circ}0$	$P(20)$	10.591	289	>0.1
	$P(22)$	10.611	204	>0.1
	$P(24)$	10.632	271	>0.1
	$R(16)$	10.274	109	>0.1
	$R(18)$	10.260	90	>0.1
	$R(20)$	10.247	97	>0.1

激光器采用高压直流稳流电源激励, 放电电流变化很小, 故图 3 没有画出电流的监测曲线。高压电源的负极接地, 监测电流的取样电阻为 2 欧姆。波导管内径为 1.5 毫米, 激光器件采用放电、水冷、贮气三套管同轴结构。直径为 10 毫米的镀金膜全反射镜贴在双压电片上, 必须仔细和严格地贴在正中心位置, 以避免双压电片弯曲时反射镜产生倾斜。经过不断地修正, 使这项误差引起腔的不平行度控制在 $10''$ 以内。全反射镜离波导口距离约为 3.5 毫米, 中间有一小孔光阑, 以防止电极的溅射。

综上所述, Pyrex 玻璃波导激光器的增益较低, 截尾效应严重, 使调谐宽度受到影响。而调谐宽度和增益有关, 实质上是波导腔内各支谱线的竞争效应。为了抑制不需要的波长, 可在腔内加入波长选择元件, 例如, 加入光栅进行选支, 使特定的波长获得振荡。

参 考 文 献

- [1] 王明常等;《激光》1979, **6**, No. 6 (Jun), 55.
王明常等;《激光》1980, **7**, No. 4 (Apr), 19.
- [2] M. Lyszyk; *J. Phys (E)*, 1977, **10**, No. 11 (Nov), 1110~1117.
- [3] J. Degnan; *J. A. P.*, 1974, **45**, No. 1 (Jan), 257.
- [4] H. Shirahata *et al.*; *J. A. P.*, 1976, **47**, No. 6 (Jun), 2452.

Analysis on tuning linewidth of the waveguide laser

WANG MINGCHANG, WANG WUCHENG and CHENG XINFEN
(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica*)

(Received 23 December 1980)

Abstract

An intracavity tunable waveguide laser has been developed. Some factors affecting the tuning linewidth were analyzed. The effect of lineshape truncate were calculated quantitatively. The results of the tuning experiments were presented.