

旋转波片法测量电光调 Q 射频波导 CO_2 激光器的内部参数

田兆硕 王 骐 王雨三 李自勤

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室 哈尔滨 150001)

提要 提出了一种测量电光调 Q 射频波导 CO_2 激光器内部参数的新方法, 采用此方法可测量出激光器的小信号增益系数、内部损耗、饱和光强等内部参数, 并可推广应用到其他种类激光器内部参数的测量。

关键词 旋转波片, 电光调 Q , 射频波导 CO_2 激光器, 内部参数

1 引 言

为进一步研究和改善光栅选支电光调 Q 射频波导 CO_2 激光器性能, 需要对其内部参数 (如小信号增益系数、内部损耗、饱和强度、反转粒子数分布等) 进行测量^[1~3]。目前测量激光器内部参数的方法主要有直接测量法、极大损耗法及腔内插入可旋转耦合板法^[4,5], 但这些测量方法都要改变激光器工作状态, 测量过程较复杂。我们采用旋转调 Q 装置中的 $\lambda/4$ 波片的方法, 可以简单、方便、较准确地测量出调 Q 激光器的内部参数, 而且此方法可以推广应用到其他种类外腔式激光器, 具有实用价值。

2 实验装置及测量原理

光栅选支电光调 Q 射频波导 CO_2 激光器结构如图 1 所示, 上、下铝电极与两片 Al_2O_3 陶瓷构成截面为 $2.25 \text{ mm} \times 2.25 \text{ mm}$ 的波导通道, 波导长为 400 mm 。上下电极并联 10 个等值电感, 并联谐振于射频源频率, 使沿电极电压分布均匀。整个电极放入水冷不锈钢真空容器内, 光栅放置于距波导口 10 mm 处, 一级反射率为 95%, 可用氟橡胶 O 型圈调节角度。输出窗为两面镀增透膜的 ZnSe 窗片, 透过率为 99.5%。调 Q 装置放在透镜与输出镜之间。调 Q 装置由 ZnSe 布氏窗, CdTe 晶体, CdS 四分之一波片组成, 布氏窗与 $\lambda/4$ 波片可 360° 旋转。其中布氏窗镀有偏振介质膜, P 方向透过率为 97%, 反射率为 1%, S 方向反射率为 99%。为了测量其内部参数, 平面输出镜由全反镜代替。晶体未加电压时, 通过晶体的偏振光方向不变, 旋转 $\lambda/4$ 波片, 可以从布氏窗输出功率可变的激光。其等效光路图如图 2 所示。工作过程是: P 方向的偏振光通过偏振片及与 P 方向夹角为 α 的 $\lambda/4$ 波片, 再由全反镜反射后, 经过 $\lambda/4$ 波片时, 变成与 P 方向夹角为 2α 的线偏振光, 则此时 P 方向与 S 方向偏振光强分别为

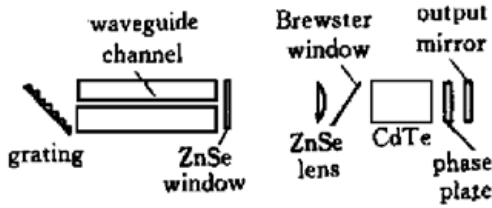


图 1 光栅选频电光调 Q 射频波导 CO₂ 激光器示意图

Fig. 1 Schematic of electrooptically Q-switched RF excited waveguide CO₂ laser tuned with a grating

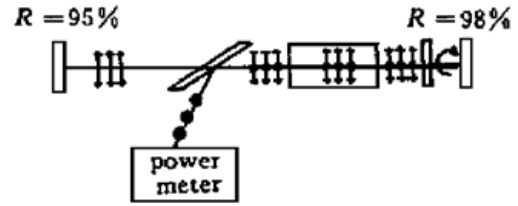


图 2 激光器等效光路图

Fig. 2 Equivalent optical circuit diagram of the laser

$$I_P = I \cos^2(2\alpha) \quad I_S = I \sin^2(2\alpha) \quad (1)$$

此偏振光经过布氏窗时, 反射输出 S 方向偏振光, 形成激光输出, 透过 P 方向偏振光, 返回到腔内。考虑到布氏窗镀有偏振介质膜, S 方向偏振反射率为 99%, 而 P 方向偏振光反射 1%。因此相当于激光器输出镜透过率为

$$T_{eff} = 0.99 \sin^2(2\alpha) + 0.01 \cos^2(2\alpha) \quad (2)$$

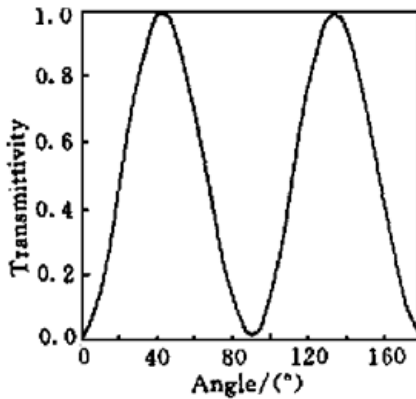


图 3 激光输出镜透过率随波片光轴角度的变化

Fig. 3 Transmittivity of output mirror of the laser as a function of angle of the optic axis of the phase plate

结果如图 3 所示。对于均匀展宽激光器, 输出功率可用 Rigrod 公式表示为^[6,7]

$$P = \frac{A I_s \sqrt{r_1} T_{eff} (g_0 l + \ln \sqrt{r_1} + \ln \sqrt{r_2})}{(\sqrt{r_1} + \sqrt{r_2})(1 - \sqrt{r_1 r_2})} \quad (3)$$

式中 I_s 为饱和强度, A 为激光束有效截面积, 可根据 EH₁₁ 波导模有效半径进行计算, g_0 为小信号增益系数, l 为放电区长度, T_{eff} 为等效输出镜透过率。式中光栅一侧反射率: $r_1 = 1 - \alpha_g - \alpha_1$, α_g 为光栅衍射损耗, α_1 为波导口耦合损耗; 全反镜一侧反射率: $r_2 = 1 - 2\alpha_f - \alpha_2 - \alpha - T_{eff}$, α_f 为光束通过透镜, 布氏窗, 晶体, $\lambda/4$ 波片的单程损耗, α_2 为波导口耦合损耗, α 为全反镜损耗。因此激光器腔内单程损耗应为

$$\alpha = \frac{1}{2}(\alpha_g + \alpha_1 + 2\alpha_f + \alpha_2 + \alpha) \quad (4)$$

采用 Rigrod 公式拟合测量数据, 可得出精确的激光器内部参数。

对于调 Q 激光器还有一个重要参数即 $\Delta n_i / \Delta n_i^{[8]}$, 其中 Δn_i 为 Q 开关打开前初始粒子数反转密度, 其值为激光刚要形成振荡时阈值反转粒子数密度

$$\Delta n_i = \frac{\delta_i}{\sigma_{21} l} \quad (5)$$

式中 σ_{21} 为受激发射截面, 谐振腔单程总损耗 $\delta_i = \alpha + T_{th}/2$, T_{th} 为阈值等效透过率。 Δn_i 为 Q 开关打开后阈值反转粒子数密度

$$\Delta n_i = \frac{\delta_i}{\sigma_{21} l} \quad (6)$$

这时谐振腔单程总损耗为 $\delta_i = \alpha + T_{opt}/2$, T_{opt} 为最佳等效透过率。因此

$$\frac{\Delta n_i}{\Delta n_e} = \frac{\delta_i}{\delta_e} \quad (7)$$

通过 $\Delta n_i/\Delta n_e$ 的值可进一步算出激光的脉冲波形、峰值功率、脉冲能量等重要的调 Q 激光输出特性。

3 实验结果和讨论

实验中, 激光器充气比例 CO₂ · N₂ · He = 1 · 1 · 3, 充气气压 8 kPa, 射频注入功率 200 W, 射频源频率 120 MHz, 平面输出镜透过率为 10%。插入调 Q 装置后, 旋转布氏窗, 使透射光偏振方向垂直于波导侧壁, 再旋转四分之一波片, 使光轴方向平行于光偏振方向, 用 Coherent 公司 model 201 功率计测量激光功率, 此时 P(20) 支激光连续输出功率为 1.5 W。为测量激光器内部参数, 把平面输出镜换成平面全反镜, 再把波片光轴旋转至与布氏窗偏振方向夹角为 45° 附近, 即 P 方向偏振光透过率接近最小, 腔内损耗接近最大, 射频气体放电时, 从布氏窗侧面不能输出激光。逐渐旋转波片, 减小与 P 方向的夹角, 当波片光轴旋转至大于阈值透过率的角度时, 从激光功率计上可观察到激光输出, 激光输出

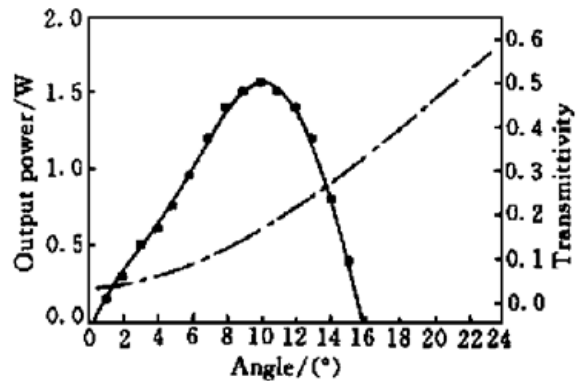


图 4 输出镜透过率及激光输出功率随波片角度的变化

Fig. 4 Transmittivity and output power of the laser as a function of angle of phase plate

功率最大时对应于最佳透过率 T_{opt} , 再减小夹角时激光输出功率逐渐减小, 当夹角为零时激光功率为最小值, 此时没有 S 方向偏振光输出, 由于布氏窗对 P 方向偏振光反射为 1%, 所以仍有激光输出。激光器输出镜透过率 T 及实验测得激光输出功率 P 随角度变化量如图 4 所示, 图中实线为输出功率, 虚线为输出镜透过率。根据理论分析, 耦合损耗取 $\alpha_1 = 1\%$, $\alpha_2 = 2\%$, 采用 Rigrod 公式拟合测量数据, 如图 5 所示, 图中的圆点为实验测量数据, 实曲线为采用 Rigrod 公式拟合曲线。可得出激光器内部参数 (P(20) 支): $g_0 = 1.1\% \text{ cm}^{-1}$; $\alpha = 0.17$; $I_s = 18 \text{ W/mm}^2$; $\Delta n_i/\Delta n_e = 1.34$ 。

为了检验此方法的测量精度, 采用晶体调压法测量了激光器的内部参数^[9, 10]。其过程是: 旋转 $\lambda/4$ 波片, 使其光轴与 P 方向夹角为 45°, 再逐渐增加晶体上的电压, 布氏窗的等效输出透过率为

$$T_e = 0.01 \sin^2 \phi + 0.99 \cos^2 \phi \quad (8)$$

式中 ϕ 为通过晶体的两偏振光相位差

$$\phi = \frac{\pi}{2} \frac{V}{V_{\lambda/4}} \quad (9)$$

式中 V 为晶体上的电压, $V_{\lambda/4}$ 为晶体的 $\lambda/4$ 电压。当晶体上的电压增加时, T_e 逐渐减小, 直至产生激光输出。激光输出功率随等效透过率的变化如图 6 所示, 图中的圆点为实验测量数据, 实曲线为采用 Rigrod 公式拟合曲线。可得出激光器内部参数 (P(20) 支): $g_0 = 1\% \text{ cm}^{-1}$; $\alpha = 0.16$; $I_s = 20 \text{ W/mm}^2$; $\Delta n_i/\Delta n_e = 1.35$ 。可见晶体调压法与旋转波片法测量的结果符合较好。

实验中所用布氏窗镀有偏振介质膜, 而多数情况下, 布氏窗不镀膜, 当采用旋转波片法测

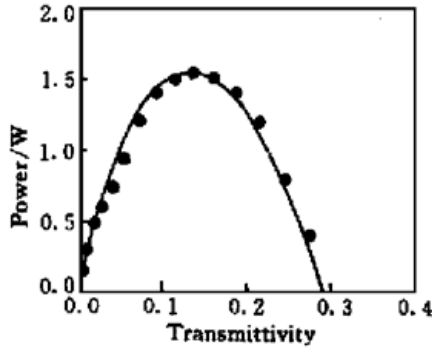


图 5 旋转波片法测量的输出功率及 Rigrod 公式拟合曲线

Fig. 5 Measurement output power using the method of rotating phase plate and the fitting curve by the Rigrod formula

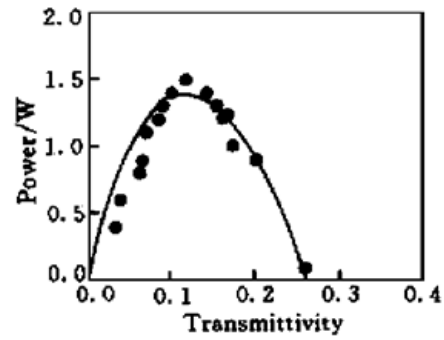


图 6 晶体调电压法测量的输出功率及 Rigrod 公式拟合曲线

Fig. 6 Measurement output power using the method of adjusting the voltage on the crystal and the fitting curve by the Rigrod formula

量内部参数时,布氏窗对 P 方向的偏振光透过率近似为 100%,而对于 S 方向的偏振光一个表面反射率为

$$R(\theta) = \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} \quad (10)$$

式中 θ_1 为布儒斯特角, $\theta_1 + \theta_2 = \pi/2$, 所以 $R(\theta) = \cos^2(2\theta_1)$ 。当忽略高次项后,布氏窗对于 S 方向偏振光总反射率为

$$R = R(\theta) + R(\theta)[1 - R(\theta)]^2 \quad (11)$$

因此 P 方向的偏振光经布氏窗部分反射后形成激光输出,另一部分透过布氏窗返回腔内。由于腔内激光振荡方向为 P 方向,则透过的 S 方向偏振光,经过波导通道,光栅反射,波片等循环一周衰减很大,可以忽略。所以实际激光器输出镜透过率为 $T = \sin^2(2\alpha)$,当用功率计测得由布氏窗的反射功率为 P_r 时,实际激光器输出功率应为 $P = P_r/R$ 。测出激光输出功率和输出镜透过率随波片光轴与布氏窗偏振方向夹角变化曲线后,可得出激光器内部参数。因此旋转波片可推广应用到其他种类的激光器。测量条件为:(1) 带有布氏窗的外腔式激光器;(2) 可旋转的 $\lambda/4$ 波片。

参 考 文 献

- 1 Dietmar Letalick, Ingmar Renhom, Anders Widen. CO₂ waveguide laser with programmable pulse profile. *Opt. Eng.*, 1989, **28**(2): 172~ 179
- 2 S. Marcus, G. M. Carter. Electrooptically Q-switched CO₂ waveguide laser. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(16): 2824~ 2826
- 3 Henrik Ahlberg, Stefan Lundqvist, Dietmar Letalick *et al.*. Imaging Q-switched CO₂ laser radar with heterodyne detection: design and evaluation. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(17): 2891~ 2898
- 4 B. S. Patel. Determination of gain, saturation intensity, and internal losses of a laser using an intracavity rotatable reflector. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1973, **9**(4): 1150~ 1151
- 5 J. J. Degnan, H. E. Welker, J. H. McElroy *et al.*. Gain and saturation intensity measurements in a waveguide CO₂ laser. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1973, **QE-9**(4): 489~ 491
- 6 W. W. Rigrod. Saturation effects in high-gain lasers. *J. Appl. Phys.*, 1965, **36**(8): 2487~ 2490
- 7 Wang Ruifeng, Tian Rongsheng. Determination and study of gain, saturation intensity and internal losses of intracavity-waveguide CO₂ lasers. *Lasers (激光)*, 1982, **9**(8): 515~ 519 (in Chinese)

- 8 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Giahua *et al.*. Theory of Laser. The first edition, National Defence Industry Press, 1987. 187~ 190 (in Chinese)
- 9 J. E. Kiefer, T. A. Nussmeier, F. E. Goodwin. Intracavity CdTe Modulators for CO_2 lasers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1972, **QE-8**(2): 173~ 179
- 10 Dai Fa, Zeng Shaoxin, He Shunhua. A method of measuring small signal gain of CO_2 lasers. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1987, **14**(6): 380~ 381 (in Chinese)

Measurement of Internal Parameters of Electrooptically Q -switched RF Excited Waveguide CO_2 Laser Using Rotatable Phase Plate

Tian Zhaoshuo Wang Qi Wang Yusan Li Ziqin

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract A novel method is presented to measure the internal parameters of electrooptically Q -switched RF excited waveguide CO_2 laser. The small-signal gain, internal losses, saturation intensity and ect can be measured by this method and it can also be applied to measure the parameters of other kinds of lasers.

Key words rotating phase plate, electrooptically Q -switching, RF excited waveguide CO_2 laser, internal parameters