

谱线可调折迭-复合腔的稳定性研究

赵有源 高如芳 钱红声 何懋麒
(复旦大学物理系)

提 要

一般的红外调谐激光器,不仅功率低,而且谱线稳定性和功率稳定性都很差。外界条件的变化很容易造成谱线和强度的起伏。我们曾用折迭-复合腔获得高功率可调谱线 CO₂ 激光输出。它的特点是用普通玻璃基板的红外光栅可获得 80 W 高功率输出^[1]。本文着重讨论用这种腔怎样获得长时间的谱线稳定性和功率稳定性(功率起伏小于 5%/hr),并试图解释谱线稳定度的自动控制现象。

一、原 理

图1是折迭-复合腔激光器装置。M₁和M₂二镜片间采用三折迭长腔。放电长度2.4m,可分段放电,腔长3.6m。

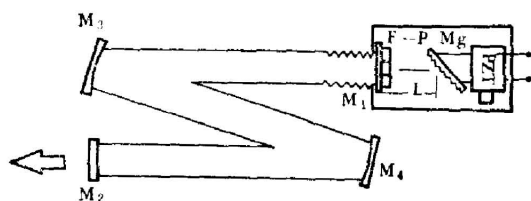


图1 折迭-复合腔激光器

Fig. 1 Folded-compound cavity laser

CO₂ 激光器在气压为 20 托时,增益轮廓约为 100 MC。3.6m 长的腔纵模间隔约为 40 MC。这样在某一谱线增益轮廓内约有三个纵模。它的输出功率起伏要比在轮廓内只有单一纵模的短腔所引起的起伏小得多^[2,3]。

由光栅 M_g 和具有一定反射率的错片 M₁ 组成 F-P 总反射率 R_{tot}^[2] 为

$$R_{tot} = \frac{(\sqrt{R_1} - \sqrt{R_g})^2 + 4\sqrt{R_1 R_g} \sin^2 \alpha}{(1 + \sqrt{R_1 R_g})^2 + 4\sqrt{R_1 R_g} \sin^2 \alpha} \quad (1)$$

其中 $\alpha = \frac{\omega L}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} L$ 为单程相位差, L 为 F-P 的腔长。由(1)式看出,适当提高 R₁, 通过 L 控制 α , 可用较低反射率的光栅获得一个 F-P 型可调谐高反射率窄带的色散元件。式中的 R_{tot} 随 α 的改变而改变。当 R_{tot} 在最大值时,所调谐的谱线将有输出,当 R_{tot} 在最小值时,所调谐的谱线较难振荡,因此 L 的变化对谱线的稳定性和功率的稳定性有影响。根据 M_g 和 M₁ 之间的距离变化,得到复合腔的反射率曲线如图 2。

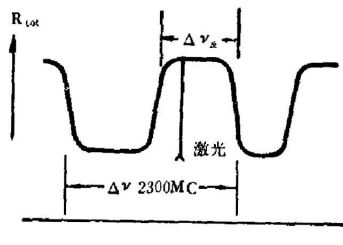


图2 R_{tot} 与频率关系示意图
Fig. 2 Total intensity reflectivity R_{tot} versus frequency

由反射率为 R 的镜片组成 F-P, 具有高透射率的频率宽度 $\delta\nu$ 和纵模间隔 $\Delta\nu$, 可由下二式决定: $\delta\nu = c(1-R)/L$, $\Delta\nu = c/2L$, 式中 c 为光速。也就是说在二纵模间隔内,除一部分具有很高的透射率外,其它部分则有较高的反射率。

收稿日期: 1981年6月22日

有较高反射率部分的频宽为:

$$\Delta\nu_{\text{反}} = \Delta\nu - \delta\nu = \frac{c}{L} \left(R - \frac{1}{2} \right). \quad (2)$$

如反射率 $R=70\%$, $L=6.5\text{ cm}$, 则有 $\Delta\nu=2300\text{ MC}$, $\delta\nu=1380\text{ MC}$, $\Delta\nu_{\text{反}}=900\text{ MC}$, 对应图 3 反射率曲线, 其最大值和最小值由 (1) 式决定。从 (2) 式得到的复合腔的高反射率的频宽为 900 MC , 比激活介质的增益轮廓 100 MC 大得多, 比激光谱线线宽大得更多。因此通过改变距离 L 来改变 α , 使调谐谱线落在具有高反射率的频率宽度中间位置, 就会使激光输出在很长的时间内较难移出这个轮廓, 激光的输出谱线和功率将具有很高的稳定性。虽然 F-P 型色散元件的反射率曲线宽度远远地大于激光的增益轮廓, 但它与光栅本身的可分辨宽度比较又要小得多, 因而此复合腔的应用可以提高谱线的分辨本领。

综上所述, 我们得到图 3 所示的折迭-复合腔的工作频率特性示意图。

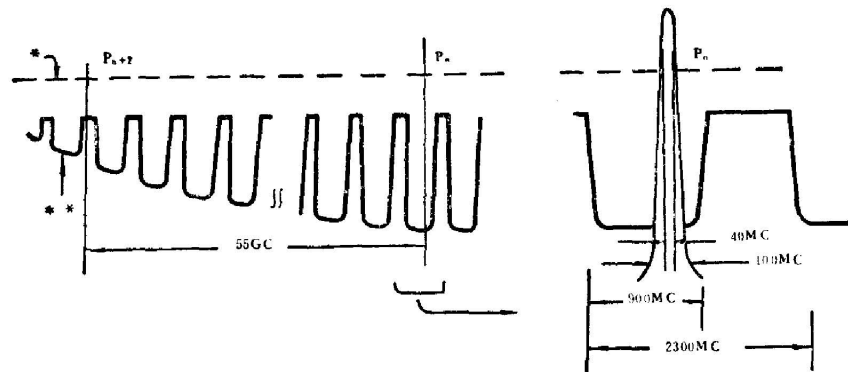


图 3 折迭-复合腔频率特性示意图

图中 * 虚线表示未装置光栅时, 激光器的长腔阈值线;

** 实线表示加置等效 F-P 后激光器的复合阈值线;

P_n 表示 CO_2 激活介质所对应的某一谱线; P_{n+2} 表示它的相邻谱线

Fig. 3 Schematic diagram of frequency characteristics of the folded-compound cavity

* Dotted line—threshold of long cavity of laser without a grating;

** Solid line—threshold of folded-compound cavity of laser with equivalent F-P;

P_n —A branch of CO_2 lasing medium; P_{n+2} —A branch next to P_n

二、实验装置和测量

图 4 中 $\pm 500\text{ V}$ 直流电源控制 PZT 的电压, 即控制 F-P 的长度 L 。水温控制器控制放电管水温, 功率计测量激光功率。x-y 记录仪记录室温和谱线稳定性随时间的变化情况, 及谱线与 L 的变化关系曲线。He-Ne 激光器用于调整光路。

(1) 改变 PZT 上的电压 V , 就可改变 M_1 和 M_2 组成的 F-P 的距离 L , 当光栅调谐在某一谱线, 改变 V 即改变了 F-P 的反射率 R_{tot} , 也就改变激光的输出强度, 从而说明测出的 $P \sim V$ 曲线反映出等效的 F-P 反射率随 L 的关系。图 5 是对应调谐在 $001^\circ \sim 1^\circ 00$ 带的 P_{18} 支线时, 记录仪扫出的 F-P 反射率与 $L(\alpha)$ 关系曲线。其它谱线也类似。

(2) 当激光调谐在所需要的谱线上后, 将 PZT 上电压加到反射率曲线轮廓中部所对应的电压, 然后用单色仪和 x-y 记录仪监视谱线及其功率的变化。图 6 是记录室温和 R_{24} 谱

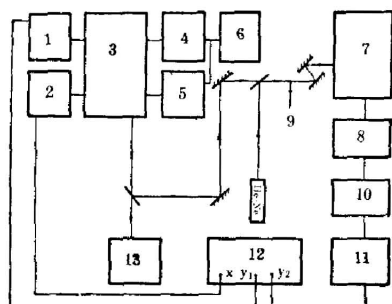


图 4 实验装置图

1—测温器; 2—直流电源; 3—折迭复合腔激光器;
4—水温控制器; 5—直流高压电源; 6—交流稳压器;
7—光栅单色仪; 8—探测器; 9—斩波器; 10—选放;
11—毫伏表; 12—x-y 函数记录仪; 13—功率计

Fig. 4 Apparatus arrangement for measurements

1—temperature detector; 2—D.C. power supply;
3—folded compound cavity laser; 4—water temperature controller; 5—D.C. high voltage power supply;
6—A.C. voltage stabilizer; 7—grating monochromator; 8—detector; 9—chopper; 10—selective amplifier; 11—millivoltmeter; 12—x-y recorder; 13—powermeter

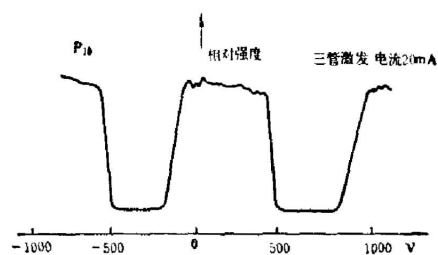


图 5 等效 F-P 反射率测量曲线图

Fig. 5 Relative output power P versus voltage of the PZT

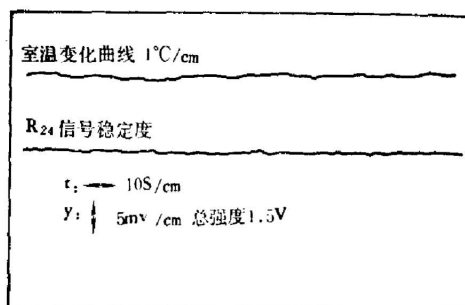


图 6 R_{24} 支线输出稳定性的部分曲线

Fig. 6 Output power stability curve for R_{24} (part)

线输出长时间稳定性的一小部分。在三个小时中, 室温从 28.7°C 变化到 30.8°C (约 2°C), 水温变化 0.3°C , 放电管电流变化 1.5mA , 激光始终是 R_{24} 输出, 功率起伏小于 2% , 若环境温度、水温、流速及放电电流变化较大时, 功率起伏小于 $5\%/\text{hr}$ 。

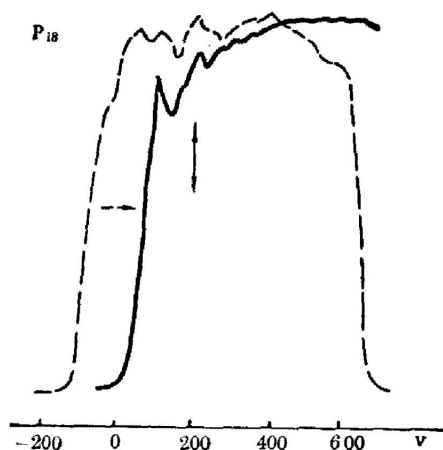


图 7 反射率轮廓长时间 (三小时) 漂移情况

Fig. 7 Shift of the intensity reflectivity profile during the three hours

图 7 更好地反映谱线长时间稳定性情况。此图是这样测得的, 当激光调谐到 P_{18} 支线上后, 改变 PZT 上电压, 扫出虚线所示的轮廓, 范围约从 -100V 到 700V , 这时将电压加在 $+200\text{V}$ 数值。(激光工作点约在轮廓的中间位置。)进行稳定性试验, 约三小时后, 再一次改变 PZT 的电压扫出此时的轮廓, 发现由于室温等因素变化的影响, 使轮廓向右移动近 150V (实线所示), 即约移动 $1/5$ 的轮廓距离。此时图中所示的激光谱线调谐工作点还是在轮廓内。反之, 可认为激光调谐工作点三小时移动 $1/5$ 的轮廓距离 (实际是轮廓本身移动), 还未超出轮廓。由此可以说明所调谐的激光谱线可以有更长时间的稳定性, 不会发生换线的现象。我们曾经作过实验, 室温在四小时内自然地变化 1°C 左右, 轮廓仅移动 $1/8$ 的距离。

(3) 对用 GG17 玻璃制作的激光器腔体进行了如

下实验,当色散元件调谐到某一支线后,改变长腔部分的温度,如用电扇吹长折迭腔部分,并改变风扇对腔的相对距离,使长腔部分温度变化,并同时测量谱线变化和强度起伏。结果表明谱线始终无变化而强度起伏亦在上述的范围内。

冷却水温的影响:在电流和室温基本不变的情况下,水温保持在 $\pm 1.5^\circ\text{C}$ 范围以内,谱线不会换线,功率变化较小。

激发电流影响激光的增益,由于长折迭激光器激发电流的范围较大,三管同时放电时电流从 10 mA 到 40 mA 都有激光输出,而在 20 mA 到 35 mA 内,输出功率曲线较为平坦。所以在电流最佳值附近,电流变化小于 5 mA 时功率影响不大。无需稳流措施就可得到较稳定的功率输出,而调谐好的谱线在一定的电流起伏范围内亦不会发生变化。

三、稳定度的自动控制及失控点

在稳定性实验中,若经过长时间后室温升高,图 7 所示的高反曲线会进一步漂移,使激光调谐工作点移到轮廓的边缘。如图 8 所示,亦可相对地说,工作点从 A 点移到了 B 点,若我们让室温继续升高,按理所调谐的谱线会消失,但事实上谱线继续稳定存在,功率只不过有一个长周期的微小起伏。

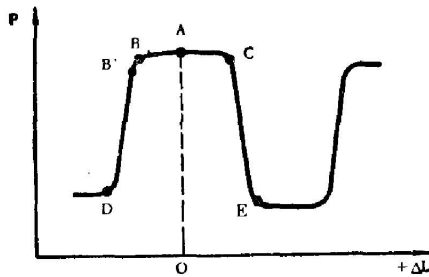


图 8 自动控制工作点示意图

Fig. 8 Schematic diagram of inherent automatism effect for stability control

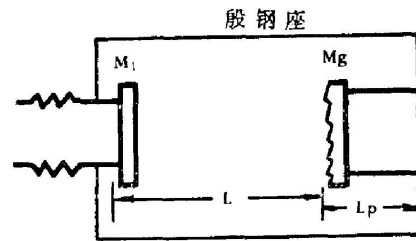


图 9 等效 F-P 装置示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the effective Fabry-Perot

对这种现象我们可以解释如下:由 M_1 和 M_2 组成的 F-P 座落在殷钢座上(图 9),设殷钢座、光栅 M_2 、压电陶瓷和锗片的长度或厚度及其热膨胀系数分别为 $L_i, \alpha_i; L_g, \alpha_g; L_p, \alpha_p; L_{Ge}, \alpha_{Ge}$; 锗的折射率为 n_{Ge} 。在这种装置中,若要等效的 F-P 不受环境温度变化的影响,它们之间线膨胀系数的补偿需满足:

$$\alpha_i L_i - \alpha_p L_p - \alpha_g L_g + \frac{d(L_{Ge}, n_{Ge})}{dT} - L_{Ge} \alpha_{Ge} = 0,$$

即

$$\alpha_i L_i + \left[(n_{Ge} - 1) \alpha_{Ge} L_{Ge} + L_{Ge} \frac{dn_{Ge}}{dT} \right] = \alpha_p L_p + \alpha_g L_g \quad (3)$$

我们知道,殷钢的 α_i 约比压电陶瓷及玻璃低一个量级,而在我们的装置中, L_i 约为 $(L_g + L_p)$ 的 3 倍,所以明显地有

$$\alpha_p L_p + \alpha_g L_g > \alpha_i L_i, \quad (4)$$

这里先未考虑式(3)第二项。 M_2 由水冷却,与室温关系不大。

如室温为 T_0 时, 各距离是 L_i, L_g, L_p , 此时光栅在激光辐照下温度为 T_g 。当室温升到 T_1 时, 此时光栅温度升到 $T_g + (T_1 - T_0)$, 各种材料的线度亦相应地伸长, 从(4)式知道 $L_g + L_p$ 要比 L_i 伸长得更多, 这样使得 F-P 的间距反而从 L_0 减小到 $L_1, L_1 - L_0 = \Delta L < 0$ 。温度升高, 使图 8 曲线移动相当于工作点从 A 点变到 B 点, 若室温继续缓慢升高, 工作点移向 B' 点, 激光功率将下降, 这样使光栅 M_g 上的辐照及吸收热量下降, 材料将收缩, 使 L_g 减小, ΔL 增加, 并使工作点又回到 B 点, 功率又逐渐增加达到原来数值。室温继续升高, 工作点又推向 B' 点, 功率下降又使工作点拉回到 B 点, 出现自动控制情况。结果使室温升高一个较大的范围, 谱线和功率都很稳定。我们认为 B 点及 BD 线是对室温变化而谱线功率能稳定自动控制的控制点及控制线。而对应图 8 中的 C 点, 若室温在此时不是上升而是继续下降, 工作点会很快落到 E 点, 这样的调谐谱线会失调。如果失调的话, 这时需要控制电压, 使工作点重新回到 BC 部分。C 点即是失控点。当然以上讨论应考虑式(3)中的第二项影响。

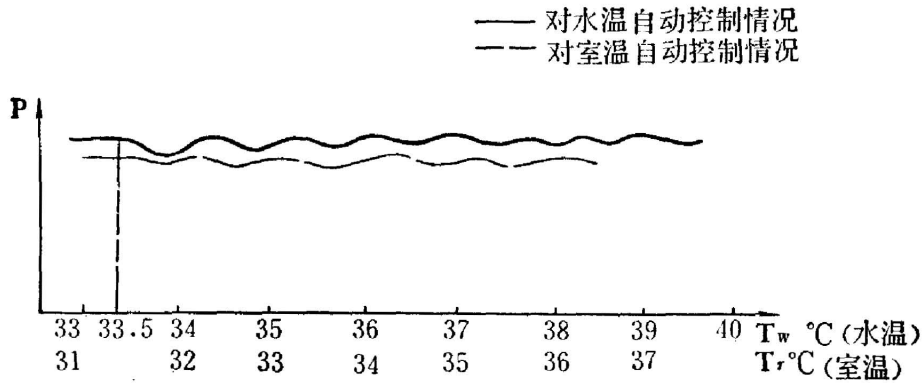


图 10 复合腔对水温或室温的自动控制光强效应

Fig. 10 Automatic control intensity effect of compound cavity under the cooling water temperature and room temperature rising

对冷却水温变化, 此装置也有自动控制作用。此时, 特别要考虑到(3)式的第二项作用, 即锗的折射率随水温和辐照功率变化而引起光程的较快地自动调整作用。从式(3)可知, 水温的控制作用和室温正好相反, 水温升高使图 8 的高反曲线向左移动。它的控制线正是室温的控制线。这里就不加叙述了。关于自动控制现象的进一步解释还有待进行深入的研究。

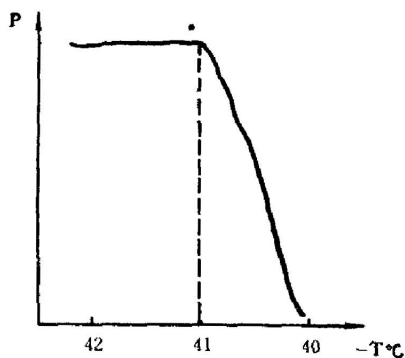


图 11 失控效应图

Fig. 11 Schematic diagram of the effect getting out of control

图 10 反映复合腔对水温和室温的自动控制作用。水温升高到 33.5°C 时, 相当于工作点从 A 点移到控制点, 继续升高到一定范围内有碍自动控制作用。调谐的谱线稳定输出。温度上升越缓慢, 功率起伏越小, 图中所示的曲线在约每两分钟升高 1°C 时测得, 室温的升高所显示的功率起伏较小, 因为它约在 4 分钟内改变 1°C 。实际上日常的温度变化要缓慢得多, 因而起伏是很小的。至于可控温度的范围

取决于谐振谱线的振荡功率。功率越大可控温度范围也越大。

由上所述,从图 8 所示的曲线轮廓看出,不仅曲线的 BC 部分对应于有很宽的温度范围使谱线稳定输出,而且由于有自动控制点的存在,所以能在更大的室温和水温变化范围内自动控制稳定输出,使之长折迭。复合腔激光器,不需要苛刻的室温、水温及电流稳定的条件,就具有高稳定度的谱线和功率输出的特性。

图 11 即是工作点达到图 8 中 C 点后,调谐失控效应图。如果等效 F-P 中各元件和底座的材料在装置前更好地考虑它们之间的线膨胀系数的补偿,那末谱线的长时间的稳定度可望进一步提高。

本工作得到章志鸣副教授指导,特此感谢。

参 考 文 献

- [1] 何懋麒等;《激光》, 1980, 7, No. 5~6 (May~Jun), 58.
- [2] 何懋麒等;《激光》, 1980, 7, No. 8 (Aug), 15.
- [3] M. W. Sasnett, R. S. Reynolds; *IEEE J. Q. E.*, 1971, QE-7, No. 7 (Jul), 372.

Stability of the folded compound cavity in tunable CO₂ lasers

ZHAO YOUYUAN GAO RUFANG QIAN HONGSHENG AND HO MAOQI

(Department of Physics, Fudan University, Shanghai)

(Received 22 June 1981)

Abstract

Common tunable CW CO₂ lasers only have limited output power with unstable branch and intensity due to the environment variations which will cause the branch jumping and the intensity fluctuation predominantly. But the branch and intensity stabilities are rather important for many applications as same as high power output. In a previous paper^[1], we have reported that the output more than 80W with a folded compound cavity was obtained. In the present paper, we report the influences of the folded compound cavity on both the branch and intensity stabilities. With this cavity, the folded compound cavity configuration will show some frequency characteristics and compensation effect for the variation of the environmental condition, and hence long-term stability of the branch and the intensity output are obtained. We have observed that the output power fluctuation was less than 5% with branch stabilized for a relaxed environment conditions as the fluctuations of discharge current in the plasma tube within 2mA, the temperature of cooling water within 1.5°C and the room temperature within 3°C. We find that there will be an inherent automatism effect for stability controlling of the branch by suitable initial setting of the cavity, and this novel phenomenon is discussed and explained also.