

环形腔 YAG:Nd³⁺ 激光器

张贵芬

(中国科学院上海光机所)

提要: 在带有附加反馈镜的 YAG:Nd³⁺ 环形腔中, 得到了定向比为 30 的单向输出。谱线宽度较之驻波腔压缩了十倍, 输出功率并不降低。对其振荡时间特性提出了新的见解。

A YAG:Nd³⁺ ring laser

Zhang Guifen

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

Abstract: Directional ratio of about thirty has been obtained in a ring resonator with an additional mirror. The linewidth is compressed by ten times as compared with that of the stationary resonator without decrease of output power. A new opinion is put forward for the time characteristics of oscillation.

一、引言

众所周知, 在使用驻波腔结构的固体激光器中, 形成多纵模振荡的原因是由于腔内驻波场造成反转粒子空间烧孔效应引起的^[1]。显而易见, 消除这种空间烧孔效应就可以大大压缩输出谱宽。环形腔产生的行波场就有助于解决这一问题。环形腔的另一个优点是, 压缩谱宽并不降低输出功率。

在环形腔中实现单向运转最简单的方法是采用附加反馈镜技术^[2,3]。本文研究了这种结构的环形腔的特性。

二、实验布局的描述

实验布局如图 1 所示。 M_1 为输出耦合镜, 反射率可以变化。 $M_2 \sim M_4$ 为 45° 全反射镜, M_5 为附加反馈镜, 反射率为 99.5%。环形腔周长约为 150 厘米, 反馈镜到耦合镜为 70 厘米。YAG 棒长 $\phi 5 \times 60$ 毫米, 为消除腔内寄生反馈面, 端面磨斜 2° 角。单灯圆柱腔泵浦, 放电时间 0.2 毫秒。碳斗测量输出能量。用 F-P 标准具测量输出谱宽, DS-5305 B 双线示波器测量正、反向波的输出波形。

收稿日期: 1982 年 2 月 1 日。

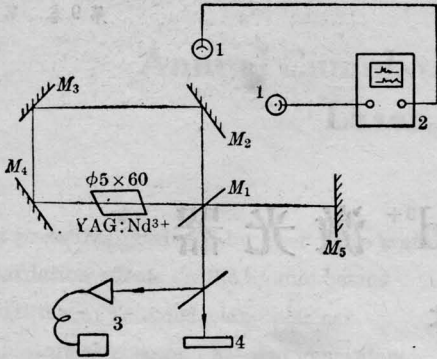


图1 带有反馈镜的环形腔结构

1—硅光二极管；2—DS-5305 B 双线示波器；
3—碳斗；4—F-P 标准具

三、实验结果

1. 输出能量的比较。首先测量了同样腔长下环行腔和驻波腔的输出能量，其结果是环行腔高于驻波腔，但驻波腔的阈值低于环行腔。测量了不加反馈镜时环行腔的双向输出能量，结果是二个方向输出基本相等。这是可以预见的，因为二个方向完全对称。加入反馈镜后，单向输出稍高于双向输出之和，结果如图2所示。

用小孔法测输出光束发散角，环行腔在1毫弧度内占80%。驻波腔在1毫弧度内占70%，二者也基本上差不多。

改变 M_1 镜反射率，对8%和70%的反射率输出能量都有显著下降。所以我们实验时采用反射率为50% (0° 入射) 的反射镜，在 45° 入射角下使用。

2. 测量定向比。定向比定义为腔内正向波强度 I_{cw} 和反向波强度 I_{ccw} 之比，即 $K = \frac{I_{cw}}{I_{ccw}}$ 。它是描述腔内行波纯度的参数。当 $K \gg 1$ 时，就表明实现了准单向振荡。

在腔内插入分光板，用二个定标过的碳斗同时测输出能量，就可以求出定向比。对仔细调整的环行腔，测得其定向比 $K=30$ 。为可靠起见，还用光二极管接受从 M_2 镜漏

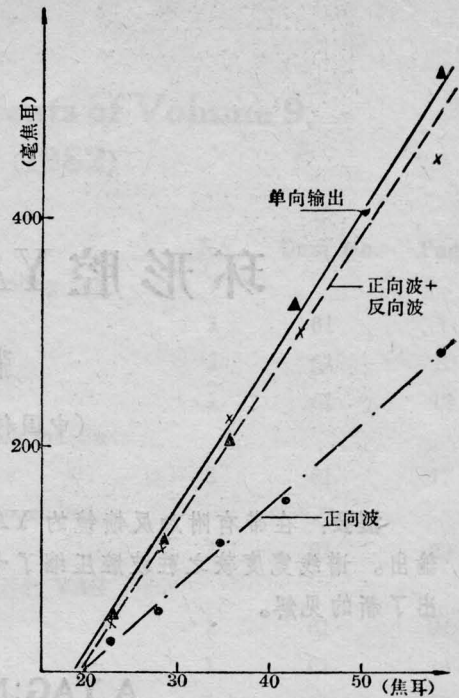
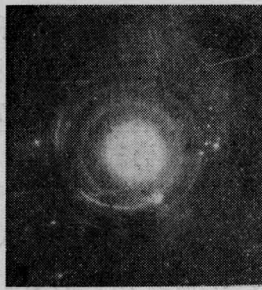


图2 环形激光器输出能量特性

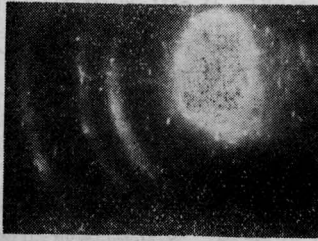
出的光，再显示在示波器上，用脉冲高度比定向比，结果和碳斗测量的一致。

改变光泵电压，测得不同光泵下的定向比表明，和光泵水平关系不显著。然而，定向比和腔内寄生反馈有很大关系，当棒端面不磨斜时，得到的定向比为3。可见消除腔内寄生反馈有重要意义。

3. 输出谱宽的测量。使用厚为3毫米的F-P板，在1.06微米处反射率为98% ($\pm 2\%$ 误差)，测量环行腔及驻波腔的谱宽，如图3所示。记录底片采用红外敏化处理。图3(a)为驻波腔干涉图，透镜焦距 $f=60$ 厘米。图3(b)为环行腔干涉图，焦距 $f=11$ 厘米。用读数显微镜测其内部干涉环的直径 r 和环宽 Δr ，根据公式 $\delta\lambda = \frac{\lambda r \Delta r}{f^2}$ 求得驻波腔谱线宽度为 $0.35 \sim 0.5 \text{ \AA}$ ，光泵在阈值上2~3倍。在同样条件下，环行腔的谱宽为 0.05 \AA 。也就是说，环行腔在有同样输出能量下，谱线变窄了十倍。用黑度计对底片进行扫描，测得 r 及 Δr 计算谱宽和上面结果



(a) 驻波腔



(b) 环形腔

图3 F-P干涉图

一致。表明结果是可靠的。

4. 输出时间特性的测量。用硅光二极管连接到 DS-5305 B 双线示波器上, 拍摄了正反波的振荡波形。图 4(a) 为没有反馈镜时正向波输出波形, 它和驻波形一样, 表现出固体激光器所特有的无规尖峰结构。图 4(b) 为有反馈镜时正向波输出。显而易见, 反馈镜存在使振荡波形发生了突然的变化。尤其是前几个尖峰接近等间距, 完全符合单横速率方程导出的阻尼振荡周期

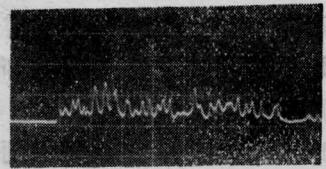
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{t_0\tau}{x-1}}$$

式中 t_0 为腔内光子平均寿命,

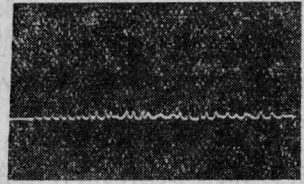
$$t_0 \approx \frac{L}{C(1-R)} \approx 10^{-8} \text{ 秒。}$$

τ 为自发荧光寿命, 对 YAG:Nd³⁺ 来说, $\tau \approx 230$ 微秒。 x 为超阈度 $x = P_{\text{泵}}/P_{\text{阈}} \approx 3$ 。这样计算 $T \approx 7$ 微秒。从图片测得周期 $T_{\text{测}} \approx 6.2$ 微秒, 两者很接近。这表明前部振荡很接近单模, 后部脉冲变乱, 显然是由于光泵热畸变等引起模变换所致。

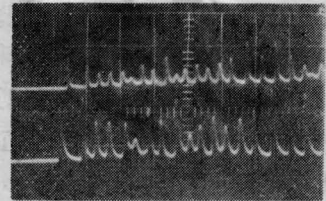
图 4(c) 为双线示波器同时记录正反波输出波形。正向波衰减了 20 倍。可以看出,



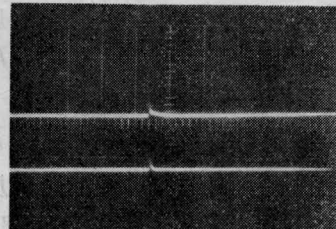
(a) 没有反馈镜时的环形腔正向波输出波形



(b) 有反馈镜时的正向波输出波形
(扫横速度 20 微秒/厘米)



(c) 有反馈镜时的正反向波输出结构
(正向波衰减 $\times 20$ 倍)



(d) BDN 调 Q 时的正反向波输出结构
(扫横速度 10 微秒/厘米)

图4 环形激光器输出时间特性

正反波脉冲形状完全一样, 尖峰间一一对应。图 4(d) 为环形腔内插入 BDN 染料调 Q, 正反波脉冲也完全对应。只是两者强度比发生了变化, 这是下面所要讨论的问题。

三、分析和讨论

从上面结果可以看出, 带有反馈镜的环形腔确实可以得到高功率和窄谱宽, 这正是很多应用所必须的。谱宽变窄说明基本消除了空间烧孔效应, 效率不降低正是均匀加宽

线形的结果。进一步压缩谱宽就需进一步提高定向比,降低各种因素引起的后向散射。下面就振荡波形进行简单的讨论。

关于正反向波的时间过程问题,已有文章作过报导。[2,3]中推导了获得单向振荡条件。[4]中报导了振荡的前几个脉冲是纯行波,反向波是在后几个脉冲才出现的。我们的结论和他们不同。我们认为,在带有反馈镜的环形腔中不可能消除反向波。正、反向波是同生同灭的。反馈镜的作用在于提高定向比。原因很简单,这种腔内正、反向波振荡阈值完全等同,正向波达到振荡阈值的同时,反向波也达到阈值,二者同时起振。一旦反向波处在振荡阈值下停止了振荡,那么正向波也就处在阈值之下,二者同时熄灭。反馈镜的作用是把反向波能量转移到正向波上来,得到单向输出。实现这个逐步转移自然要有个时间过程,所以脉冲宽度越宽定向比就可以很高。

定性地可以推导环形腔内正、反向波的强度变化。假定腔镜间距满足关系 $L_2 - L_1 = 2d$, L_2 为棒的一个面到耦合镜距离; L_1 是棒的另一个端面到同一耦合镜距离; d 为反馈镜到耦合镜距离。这表明经反馈镜反射的光和另一束光同时到达耦合镜。设强度为 I_0 的自发发射等地沿腔轴向二个方向传输,在腔内某点来测第一次强度为 $I_1^+ = I_0$, 而 I_1^- 经耦合镜反射,所以强度为 $I_1^- = I_0 R$, R 为耦合镜的反射率。环行一周后,经过了增益为 G 的介质,第二次到达该点的强度为 $I_2^+ = I_0 G (R + T^2)$, 第二项为反馈镜反射引起强度的增加。对 $I_2^- = I_0 R^2 G$ 。依此类推,经过第 n 次循环后,正、反波的强度分别为

$$I_n^+ = I_0 R^{n-2} G^{n-1} [R + (n-1)T^2],$$

$$I_n^- = I_0 R^n G^{n-1}.$$

R 和 T 分别为耦合镜的反射率和透射率,且有 $R + T = 1$ 。因此,第 n 次腔内强度比为

$$K_n = \frac{I_n^+}{I_n^-} = \frac{R + (n-1)T^2}{R^2}.$$

可以看出,定向比随着循环次数而增加。从物理过程来看,它表示了能量从反向波逐渐转移到正向波,需要有个时间过程。实验结果证明了这一点。用 BDN 染料调 Q 的环形腔,得到空间比 $K \approx 3$,如图 4(d)所示。在本实验条件下,腔内循环一次时间约为 5×10^{-9} 秒,在染料调 Q 的脉冲时间内,光只能循环二次,所以 $K_1 \approx I_1^+ / I_1^- \approx \frac{1}{R} \approx 3$ 。

在[2,3]中推导单向条件使用了阈值下的稳态工作条件,这在固体脉冲激光器中是不能满足的,所以不能得到单向运转。

从上面的实验结果和分析,可以得出如下结论:在带有反馈镜的环形腔中不能完全消除反向波,附加反馈镜只能提高定向比。定向比随脉宽增加而增加。所以这种结构只适合于宽脉冲结构,特别适合连续工作。对脉宽和腔内循环时间差不多的情况,只能得到二个强度差不多的双向脉冲,二个脉冲总是同生同灭的。这就是我们对这种结构环形腔振荡特点提出的新看法。

长春光机学院姚力同学参加了本实验的工作。

参 考 文 献

- [1] C. H. Tang *et al.*; *Phys. Rev.*, 1964, **136**, 1A, 196.
- [2] A. M. Бонч-Бруевич и др.; *ЖТФ*, 1967, **37**, №11, 2031.
- [3] В. Ю. Петрунькин и др.; *Радиот. и электр.*, 1967, **12**, №1, 146.
- [4] M. Hercher, M. Young *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1965, **36**, No. 10, 3351.