

YAG:Nd³⁺ 脉冲激光器纵向选模实验研究

王 福 贵

(中国科学院上海光机所)

本文报导了 YAG:Nd³⁺ 脉冲激光器单镜 F-P、双镜 F-P 标准具选模以及晶体 Q 开关和单镜 F-P 标准具组合选模的实验技术和实验结果。

本实验获得了单纵模到 4~5 个纵模的运转。在单模运转时,相干长度为 1 米以上,与理论值相符。实践证明,组合选模方式具有良好的模式稳定性。

一、实验方案考虑

通常在光频谱振腔内,横模数 N_T 和纵模数 N_L 的乘积有

$$N = N_T N_L \gg 1 \quad (1-1)$$

在实验中应选用合理的腔结构和某些选模技术,以限制腔内模式数。在理想情况下 $N=1$ 。

1. 谐振腔

在我们的实验中采用了平-平型腔 ($g_1 g_2 = 1$)。如所周知,平-平腔具有模体积大的特点,光束有较好的方向性。

由干涉原理可知,腔内平面波参与干涉效应的相邻两波长位相差

$$\Delta\varphi = 2K\pi \quad (K=1, 2, 3\cdots)$$

满足谐振条件

$$\Delta = 2\mu L \cos \theta = K\lambda \quad (1-2)$$

即

$$\nu = K \frac{c}{2\mu L \cos \theta} \quad (1-3)$$

上两式中 Δ 是光波程差, μ 是介质折射率, L 是谐振腔几何长度, θ 是光波面法线

与腔轴夹角, λ 是相干波长, c 是真空中光速。

由(1-2)式和(1-3)式,当 $K=1$ 时,两相邻谐振模之间频率间隔有

$$\Delta\nu = \frac{c}{2L \cos \theta \left(\mu - \lambda \frac{d\mu}{d\lambda} \right)} \quad (1-4)$$

当 $\lambda \frac{d\mu}{d\lambda} \ll 1$, 介质的色散效应可以忽略,并近轴光有 $\cos \theta \approx 1$, 于是(1-4)式有

$$\Delta\nu = \frac{c}{2\mu L} \quad (1-5)$$

由(1-5)式可知,在增益线宽范围内若允许较少的纵模存在,腔长 L 应尽可能缩短。实验证明平-平型腔便于插入式的选模元件的使用,易于实现单纵模运转。为了提高光束方向性,曾选用非稳定腔 ($g_1 g_2 > 1$), 实验表明,由于腔内存在球面波,插入 F-P 标准具的选模元件,未能得到好的实验结果,改用腔外滤波器则效果较佳。

2. F-P 标准具纵向选模作用及设计参数

使用 F-P 标准具作为纵向选模元件是方便有效的,因此有广泛的应用。我们实验中使用的 F-P 标准具选模元件均为本单位加工磨制,完全达到设计要求,给出了较理想的纵向模谱分布。

由多光束干涉原理^[1], 当忽略 F-P 标准具内部损耗, 对入射角为 β 的平行光其透射光强 I_T 与反射光强 I_R 互补, 则有

收稿日期: 1978年6月2日。

$$\frac{I_R}{I_i} + \frac{I_T}{I_i} = 1 \quad (1-6)$$

(1-6)式中

$$\begin{aligned} \frac{I_R}{I_i} &= \frac{4R \sin^2 \delta/2}{(1-R)^2 + 4R \sin^2 \delta/2} \\ &= \frac{F \sin^2 \delta/2}{1 + F \sin^2 \delta/2} \end{aligned} \quad (1-7)$$

$$\begin{aligned} \frac{I_T}{I_i} &= \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R \sin^2 \delta/2} \\ &= \frac{1}{1 + F \sin^2 \delta/2} \end{aligned} \quad (1-8)$$

其中 $F = \frac{4R}{(1-R)^2}$, δ 是两相邻光线的位相差, 可写成

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{2\pi}{\lambda} \Delta \\ &= \frac{4\pi}{\lambda} \mu d \cos \beta \end{aligned} \quad (1-9)$$

上式中 β 是入射光与平板平面法线夹角, d 是 F-P 标准具两平面间距离。在理想情况下随着 R 值的增加, F 值也增加, F-P 标准具的透光条纹越锐细。可见 F 是干涉锐度因子。

由(1-8)式知, F-P 标准具的透过率是入射光频率 ν 的函数, 有

$$\begin{aligned} T(\nu) &= \frac{I_T}{I_i} \\ &= \frac{1}{1 + F \sin^2 \delta/2} \end{aligned} \quad (1-10)$$

由(1-10)式, 选定适当的 d 、 μ 、 R 以及 β , 即可有效地限制腔内纵模。

考虑到阈值条件, YAG:Nd³⁺ 的增益谱宽约 150 千兆赫, 按理论设计 F-P 标准具, d 值一般可允许三个频率模透过。如图 1 所示,

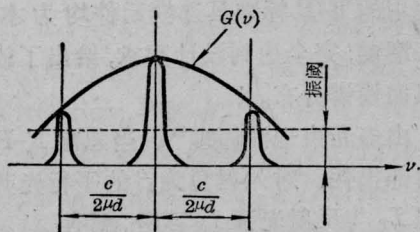


图 1 纵模频率间隔

d 值很小(仅有 1~2 毫米)难以保证满足加工要求。在我们的实验中选定 $d=10$ 毫米, 不仅为加工提供了方便, 在实验中适当调整 F-P 标准具的倾角能实现单纵模运转, 但是稳定性较差。适当地选择 R 值可提高其稳定性。

通常把涂有介质膜的 F-P 标准具称“透射式”选模元件, 不涂膜的称“反射式”选模元件。设在谐振腔内有模 n 、 m , 两模在腔内往返一次的损耗比^[2]有

$$\frac{1-\alpha_n}{1-\alpha_m} \approx 1 + \frac{8\pi^2 \mu^2 d^2 R}{L^{*2} (1-R)^2} \quad [\text{透射式}] \quad (1-11)$$

及

$$\frac{1-\alpha_n}{1-\alpha_m} \approx 1 + \frac{\pi^2 \mu^2 d^2}{L^{*2}} \left(\frac{1-R}{1+R} \right)^2 \quad [\text{反射式}] \quad (1-12)$$

上两式中 α_n 、 α_m 分别为模 n 、 m 的损耗率, L^* 是谐振腔的光学长度。

由(1-11)式和(1-12)式, 当 R 值增大时透射式选模能力增强, 但也增加了插入损耗。一般说, R 有一最佳值, 对不同的 d 值, R 的选用范围是 0.2~0.7, 需由实验确定。

3. Q 开关选模作用

合理使用 Q 开关元件可起到粗选模作用, 与 F-P 标准具组合运用能提高运转模的稳定性。

为了讨论问题方便, 我们首先说明单模运转的峰功率判据, 即主模脉冲峰功率至少比其它任一高阶模的峰功率高 10 倍则认为是单模。

在较长的巨脉冲建立时间 t 内, 可满足所需模 n 对相邻模 m 的抑制作用为 10 分贝的条件有

$$\left(\frac{1-\alpha_n}{1-\alpha_m} \right)^q > 10 \quad (1-13)$$

两模在腔内往返 q 次之后的峰功率比有

$$\frac{P_n}{P_m} = \left(\frac{1-\alpha_n}{1-\alpha_m} \right)^q (1-\alpha_n)^{q \left(\frac{g_m}{g_n} - 1 \right)} \quad (1-14)$$

上式中 g_n 、 g_m 分别是模 n 、 m 的增益。由

(1-14) 式知, 大的 q 值可使上式比值增大。而 q 值的增大正是腔内巨脉冲的慢建立过程, 从而增加高阶模式的腔损耗, 起到了选模的作用。实验与分析一致。

二、实验与结果

1. 单镜 F-P 标准具选模

实验光路如图 2 所示。

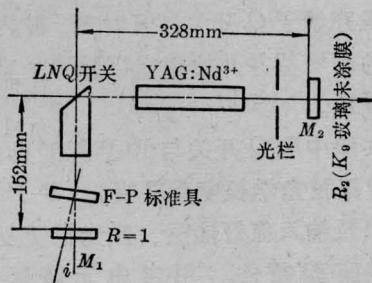


图 2 单镜 F-P 标准具插入式模选装置光路示意图

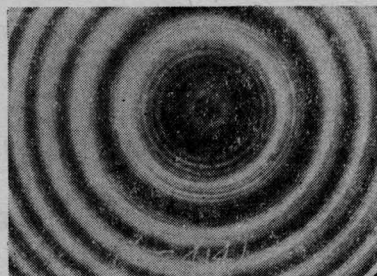
实验条件如下:

YAG:Nd³⁺ 棒 $\phi 6.7 \times 70$ 毫米; 单椭圆柱聚光器偏心率 $e=0.35$, 长轴 $2a=50$ 毫米; 脉冲氙灯 $\phi_{\text{内}} 8 \times 80$ 毫米; LN 单 45° Q 开关, 消光比 500; 谐振腔几何长度 480 毫米。

F-P 标准具材料选用折射率较大的 ZF₆ 二级玻璃 ($\mu=1.72753$), $d=10$ 毫米, $\phi 30$ (有效孔径 $\phi 25$), 两平面平行度 $\leq 1''$, $N=0.2$, $\Delta N=0.05$, 表面涂 ZnS 介质膜, 每面反射率 $R \sim 0.2$; 激光器运转重复率 1 次/秒, 插入损耗 ~ 0.1 。

输入氙灯能量 169 焦耳, F-P 标准具倾角 $i \sim 10'$ 得到 64 毫焦耳单脉冲激光输出。模谱图样与脉冲波形示于照片 1

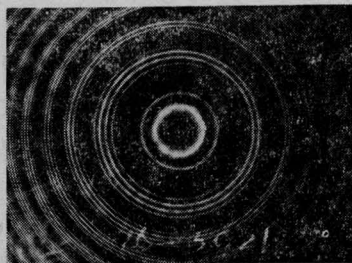
照片 1(a) 是由自由光谱区域 0.5 厘米^{-1} 的平板空气介质标准具观测记录的模谱分布; 插入单镜 F-P 标准具的模谱分布如 (b)、(c) 所示。用自由光谱区域 0.25 厘米^{-1} 的标准具观测记录, 模谱表明激光器以 1 次/秒重复率运转时纵模在 1~4 个之间变动, 稳定性较差。选用 $d=5$ 毫米 K₉ 玻璃磨制的 F-P



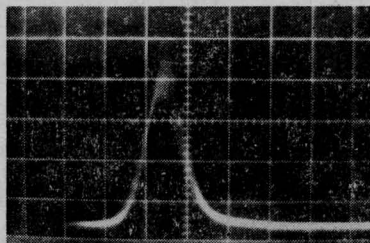
(a) 未插入选模元件时腔的模谱分布



(b) 插入单镜 F-P 标准具后的模谱分布



(c) 模谱不稳定时出现的最多模数



(d) 激光脉冲波形 (10 毫微秒/格)

照片 1 模谱分布与激光脉冲波形

标准具没有获得更好的结果。

2. 透、反式双 F-P 标准具组合选模

如图 2 所示, 把输出端腔镜 M_2 换成反射式 F-P 标准具作为耦合元件, 即构成透、反式双 F-P 标准具选模光路。

透射式选模元件平面反射率每面 $R=0.3$, $d=5$ 毫米, K₉ 玻璃, 反射式为 ZF₆。

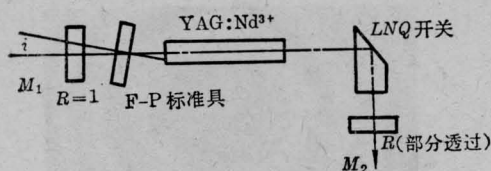


图3 单45°晶体Q开关、F-P标准具组选模光路示意图

玻璃 $d=10$ 毫米；两平面不涂介质膜。实验表明双 F-P 标准具选模也具有灵敏的倾斜效应，倾角在 $10' \sim 18'$ 范围内获得 $1 \sim 3$ 个纵模输出。稳定性好于单镜条件的实验结果。

3. 晶体 Q 开关、F-P 标准具组合选模

在我们的实验中，没有采用如文献[2]中较烦琐的两步法 Q 开关选模方案，而是把单 45° Q 开关由腔的全反射端移置于腔的输出端，如图 3 所示。这种方法不增加辅助条件，简单易行，效果良好，同样起两步选模作用。如图 4 所示，它的选模作用是明显的，当晶体 Q 开关上加有 $V_{\lambda/4}$ 电压时，氙灯泵浦的初始时刻，设腔内模 m 的噪声功率是 P_{om} ，模 n 的噪声功率是 P_{on} 。随着时间 t 增长的模 m (或 n) 的功率 P_m (或 P_n) 由下式^[2]给出一个好的近似：

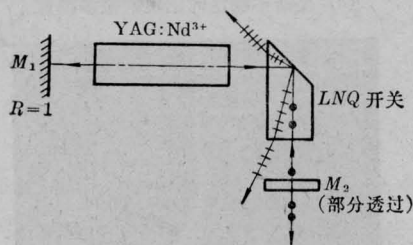


图4 晶体Q开关模选光路示意图

$$P_m(t) = P_{om} \exp[K_m(t - t_m)^2] \quad (2-1)$$

(2-1) 式中 t_m 是模 m 的净增益达到 1 时所需时间， $K_m = (1/2T) dg_m/dt$ (T 是腔内模往返一次的周期)。显然， P_m 是 t 的函数。当来自 YAG:Nd³⁺ 棒的 $P/2$ 光噪声 (P 为沿腔轴或近轴方向传播的总噪声功率) 经 Q 开关， M_2 部分透射损耗，被 M_2 镜反射回的部分光噪声经 Q 开关 45° 面偏离原光路逸出腔体，振荡回路处于“关闭”状态。沿腔轴反向传播

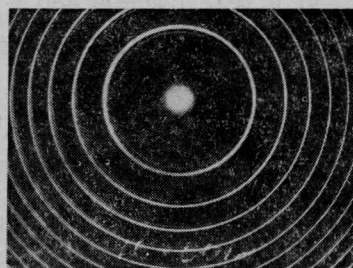
的 $P/2$ 噪声功率被 M_1 镜全反射，再次经过激光介质。无疑，这部分光噪声被放大了，并经由 Q 开关 M_2 镜损耗殆尽。

由噪声功率与线宽的关系有

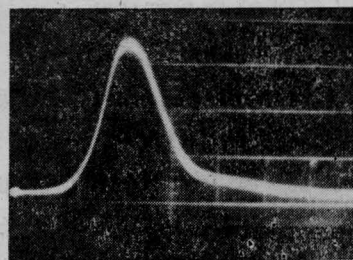
$$\delta\nu = \frac{P_m}{2\pi w} \quad (2-2)$$

式中 w 是腔内光噪声总能量， $\delta\nu$ 是光噪声线宽。由 (2-2) 式，在打开 Q 开关之前高阶模有大的损耗，从而获得高阶模的抑制作用。第二阶段开始于 Q 开关打开时刻，腔内获得低阶模的高增益并开始建立巨脉冲，直到全部功率输出。

实验中取 Q 开关与 F-P 标准具组合运用，谐振腔光学长度 522 毫米，F-P 标准具参数以及输入氙灯能量、激光器重复率均同于单镜实验条件。用自由光谱区域 0.25 厘米⁻¹ 测量标准具观测记录了模谱，获得稳定的 2 个纵模运转。如照片 2(a)，用 HMS 毫微秒示波器观测了激光脉冲波形，示于照片 2(b)。用上述组合选模不仅提高了模谱的稳定性，激光脉冲波形的稳定性也大大提高。照片 2(b) 是重复 500 次曝光拍摄的。



(a) 2个稳定的纵模输出



(b) 激光脉冲波形

照片 2 Q 开关与 F-P 标准具组合运用时的模谱分布及激光脉冲波形 (10 毫微秒/格)

表1 (激光器重复率1次/秒)

	输入氙灯能量 (焦耳)	激光输出 (毫焦耳)	脉冲半宽度 (毫微秒)	纵模个数	稳定性
单镜 F-P 插入选模	169	72	12	1~4 个	较差
Q 开关单 F-P 插入组合选模	169	65	15	2 个	较好

Q 开关 F-P 标准具组合选模较前两种选模方法有大的腔损耗, 因此激光输出功率下降约 1/3, 激光单脉冲宽度增宽。

单镜 F-P 选模、Q 开关与 F-P 单镜组合选模的实验结果列于表 1

d (毫米)	$\Delta\lambda$ (Å)	$\Delta\nu$ (厘米 ⁻¹)	$\delta\lambda$ (Å)	$\delta\nu$ (千兆周) ($\mu=1$)
10	0.14	0.5	0.007	0.75
20	0.07	0.25	0.0035	0.37
50	0.028	0.10	0.0014	0.15
100	0.014	0.05	0.0007	0.07

三、纵模谱观测及相干长度测量实验

1. 模谱观测

在 YAG:Nd³⁺ 激光器的纵模谱观测技术中, 我们用平行平面空气介质 F-P 标准具观测谱线的精细结构。为了便于直接观察和照相记录, 将 1.06 微米波长的基波通过 LI (或 KDP) 晶体倍频为 0.53 微米波长的绿光。观测光路如图 5 所示。

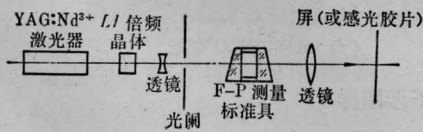


图5 F-P 标准具观测纵模谱装置示意图

平面空气介质 F-P 标准具系为我单位自行加工磨制。两平行平板用国产 K₉ II 级玻璃

$$N = \frac{\lambda}{20}, \quad \Delta N = \frac{\lambda}{60},$$

透光孔径 $\phi 42$ 毫米, 平行平板外表面楔角 $1^\circ \pm 10'$, 平行平板内表面涂多层介质膜, 每面反射率

$$R_{0.53\mu} = 97\%.$$

两平板间的隔圈为熔石英磨制。两端平行度 $0.2''$ 。条纹锐度(或称精细度)为 $20 < F < 30$, 对于不同隔圈的厚度 d 有关基本参数为:

对于鉴别 8.6 千兆周和 20 千兆周纵模间隔的选模元件, 选用 $d=10$ 毫米以及 $d=20$ 毫米, F-P 标准具的分辨限是够用的。在实际操作中必须注意严格准直光路并仔细调整成像透镜, 使观测屏(或感光胶片)与透镜像面较好地重合, 方能获得清晰明亮的模谱图。

2. 相干长度测量

相干长度测量采用了传统的双光路干涉法。如图 6 所示, 双光路迈克尔逊干涉仪测量相干长度给出了可靠直观的结果。当 M_1 镜与 M_2 镜单程差为 15、70、150、210、500 毫米时拍摄了一组干涉图照片, 示于照片 3, 它对应于 2 个稳定的纵模相干长度。在 1 米以上的总程差条件下仍能给出清晰可见的条

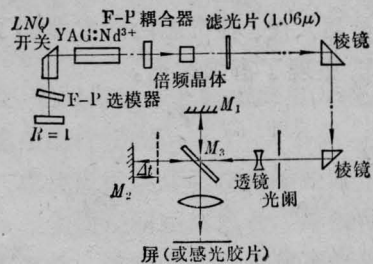
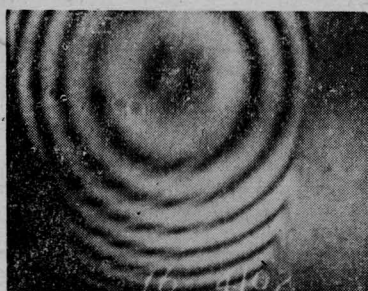
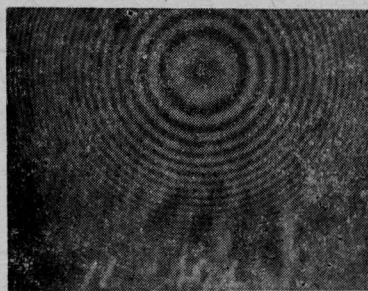


图6 双光路法测量相干长度装置示意图

M_1
 M_2
 M_3 } 组成麦氏干涉仪



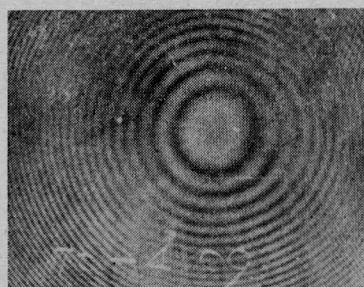
(a) 单程差 15 毫米



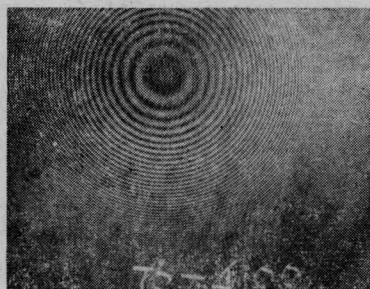
(b) 单程差 70 毫米



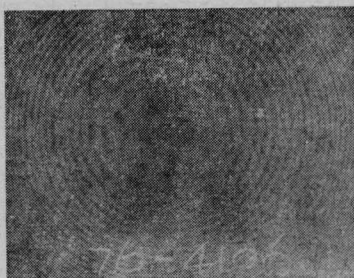
(c) 单程差 150 毫米



(d) 单程差 210 毫米



(e) 单程差 250 毫米



(f) 单程差 500 毫米

照片 3 不同程差双光路干涉图样

纹反衬度。但是纵观一组照片,随着程差的增长,条纹的反衬度递次下降。

本工作于 1976 年 4 月完成。复旦大学 76 届学员赵人俊、林奇志两同志参加了全部实验工作,整理了有关数据。

参 考 文 献

- [1] Born M., Wolf E.; Principles of Optics, p. 323 (1964 年版)。
- [2] D. C. Hanna, B. Luther-Davies; *Opto-Electronics*, 1972, 4, No 3, 249.