

正反馈选模和调 Q 技术

陈绍和 陈韬略 陈有明 斯向东 盛国平 杨 义 邓锡铭

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

把一个由 GaAs 光电导开关和激光腔中的普克尔盒组成的正反馈回路, 用于 YAG 激光器中, 选单纵模和调 Q, 获得了稳定可靠的单纵模调 Q 脉冲。

关键词: 主动标准具, 正反馈。

一、引 言

在固体激光器中, 由于其工作物质的线宽很宽, 增益高, 一般情况下腔内有许多纵模同时振荡。由于各纵模之间相互作用, 使其输出激光在时间上有严重的调制。为了获得单纵模激光输出, 通常用 F-P 标准具^[1~2]或共准反射器^[3]来限制带宽。合理地设计选频器的光学参数, 可以有效地限制带宽获得单纵模激光。这种用干涉法选模一般用于连续运转激光器或低功率增益激光器。对脉冲主动调 Q 激光器, 由于腔内增益高, 脉冲在腔内往返几十次就形成 Q 脉冲, 选频器不能充分选模, 因此对选频器的设计要求很高。总之, 对一个设计好的单纵模激光器如用 F-P 或共振反射器作选频器, 一个共同存在的问题是不能获得长时间可靠的单纵模运转。如准连续预激光方式调 Q, 虽然模式选择很有效, 但由于预激光时间长, 工作物质的热效应引起谐振腔变化(振荡纵模频率漂移), 发生多模振荡。

Q. J. Kuizenga^[4]指出: 预激光输出中包含激光腔纵模和选频器共振峰的相对位置及其变化的信息。监测准连续预激光起点和终点讯号并加以比较, 将得到的误差讯号值放大作为反馈讯号来修正腔长, 可以实现单纵模长时间运转。Livemore 实验室激光核聚变系统的单纵模振荡器^[4], 准连续预激光时间为 5 ms, 选频器是由三块石英平行平板组成的共振反射器。采用了腔长自动补偿系统。该器件输出脉冲能量达 5 mJ, 脉宽 100 ns, 峰值功率 50 kW。腔长反馈控制系统闭环工作时, 单纵模运转率达 100%。用该振荡器作为“shiva”装置的主振荡器。这种单纵模振荡器, 性能稳定可靠, 但技术性要求很高, 如腔长的自动反馈补偿系统, 共振反射器的稳定等均需要高灵敏度, 快响应时间的复杂电子学系统, 这样自然减弱了抗电干扰的能力。目前用于“神光”装置的脉冲单纵模调 Q 振荡器^[5], 用相邻两纵模起振时间特性来判断腔纵模与标准具透过曲线的相对位置, 并以此作为参考讯号一面用示波器监视信号, 一面用手工机械地控制腔长。用这种方法来实现腔长半自动控制, 提高脉冲预激光调 Q 单纵模振荡器运转的成功率, 使用上有些不便。本文介绍一种能长时间单纵模运转, 选模能力非常强的简单, 可靠方法。

二、工作原理

实验装置如图 1。实验中，增益介质是一根长 50 mm，直径 $\phi 4$ mm，两端面平行度为 $2''$ 而且无增透膜的 Nd:YAG 棒。由于它的端面平行因此它起到一个内腔标准具的作用。当激光器运转时，YAG 棒具有增益（棒内的单程增益为 G_0 ）。因此，称它为“主动式标准具”，考虑到主动标准具的增益作用，利用推导标准具透过率公式的方法，不难推出主动标准具透过率公式：

$$T(\nu) = \frac{(1-R^2) \cdot G_0}{(1-RG_0)^2 + 4RG_0 \sin^2(\delta/2)} \quad (1)$$

其中： G_0 、 R 分别是激光工作物质的

增益和端面反射率。 $\delta = \frac{4\pi}{\lambda} nl \cos \theta$ ， n 、 l 分别是工作物质的折射率和长度。从式(1)可以推得两端相邻振荡纵模单次通过主动标准具的透过率比（假定：腔模 m 位于透过率峰值，振荡的相邻腔模为 n ）：

$$T_m/T_n = 1 + 8\pi^2 n^2 l^2 R G_0 / L^2 (1 - R G_0)^2, \quad (2)$$

这里， L 为谐振腔有效长度。同样，对普通标准具：

$$T_m/T_n = 1 + 8\pi^2 n^2 l^2 R^2 / L^2 (1 - R)^2 \quad (3)$$

比较两式可知：对于一个具有增益 G_0 的“主动标准具”可以等效于增益 $G_0=1$ ，有效反射率为 $R_{\text{eff}}=RG_0$ 的标准具。描述该标准具选模能力的几个参数为：

锐度系数：

$$F = \frac{4 R_{\text{eff}}}{(1 - R_{\text{eff}})^2} = \frac{4 R G_0}{(1 - R G_0)^2}, \quad (4)$$

标准具锐度：

$$F_r = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{F} = \pi \left(\frac{\sqrt{R_{\text{eff}}}}{1 - R_{\text{eff}}} \right), \quad (5)$$

自由谱宽：

$$\Delta\nu = \frac{c}{2nl}, \quad (6)$$

透过带宽：

$$\Delta\nu' = \frac{c}{2nl} / F_{r0} \quad (7)$$

一般激光增益介质，其端面镀有增透膜，端面反射率很低（ $R \sim 0.25\%$ ）。如果去掉增透膜，其端面的反射率可由 $R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2}$ 来计算。YAG 的 $n=1.82$ ， $R=8.5\%$ 。如果取小信号增益 $G_0=8.0$ ，对 YAG(uncoated) 其等效反射率 $R_{\text{eff}}=R \cdot G_0=68\%$ ，主动标准具的锐

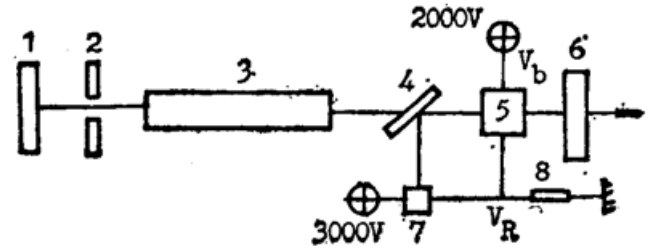


Fig. 1 Nd:YAG single longitudinal mode Q-switching oscillator. Cavity length 70cm
1—total reflect, 2—aperture ($\phi 1$ mm), 3—Nd:YAG rod ($\phi 4 \times 50$ mm), 4—polarizer, 5—Pockels cell, 6—output mirror ($T=50\%$), 7—GaAs switch, 8—resistor R_1 ,

度: $F_r=8.1$ 。假定 YAG 棒的长度为 5 cm, 则由(1)式可计算这种主动式标准具的透过带宽: $\Delta\nu'=0.0068\text{ cm}^{-1}$, 相当于等效腔长 L 为 73.5 cm 的纵模间隔。因此, 对等效腔长 $L\ll 75\text{ cm}$ 的 YAG 激光器, 在它的透过峰中, 仅有一个纵模存在。

由于工作物质有效长度较长, 主动标准具的自由谱宽较窄, $\Delta\nu_{\text{th}}=0.05\text{ cm}^{-1}$ 。因为 YAG 荧光线宽($\sim 0.45\text{ nm}$)内包含有几十个透过峰值, 当激光器在超过阈值的 20% 工作时, 仅有少数几个纵模分布在振荡线宽内, 又处于主动标准具的透过峰值中心附近, 它们可能振荡。在预激光条件下, 由于这些纵模相对激光增益轮廓位置不同, 它们有不同的增益和起始振荡时间, 具有最大增益的纵模最早振荡, 表现为预激光的第一个尖峰。

当 GaAs 开关探测到来自第一个尖峰的被偏振器反射的光束时, 它产生一个电脉冲, 这个电脉冲通过电阻 R_1 形成反馈电压 V_R , 这时加在普克尔盒上的有效电压 V_{eff} 因 V_R 的存在而减少($V_{\text{eff}}=V_b-V_R$, V_b 是加在普克尔盒上的偏压, 见图 1)。因为腔内的增益和激光功率增加, 形成一个正反馈回路, 完成了单纵模的选择, 腔内的激光功率不断增大。

当电压 V_R 使电压 V_{eff} 减少到“零电压”时, 腔内的激光功率增长到它的最大值 P_{max} , 形成调 Q 脉冲, 它的输出脉冲见图 2 和图 3。

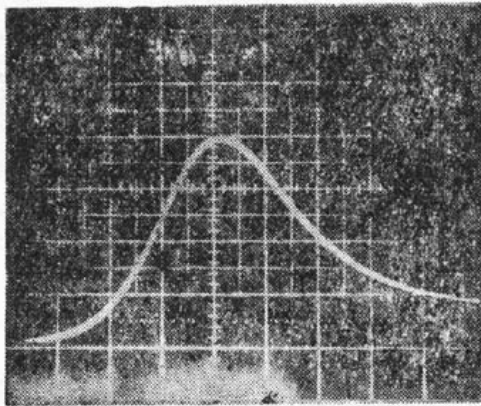


Fig. 2 Q-switching pulse waves form
(Time Scale 5 ns/div)

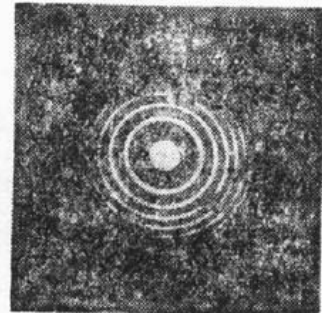


Fig. 3 Spectral output monitored by a plane F-P with free spectral range of 0.1 cm^{-1} , mirror reflectance of 90%

本文用计算机数值求解速率方程模拟正反馈作用, 表明, 当反转粒子数达到一定水平以后, 腔内光子数开始迅速增长, 由于受激辐射迅速消耗反转粒子数, 当反转粒子数下降到一定水平后, 光子数又迅速衰减, 形成 Q 脉冲, 如图 4 所示。图中 $\phi(t)$ 为腔内光子数随时间的变化, $n(t)$ 为工作物质中反转粒子数随时间的变化。图 5 为不同的反馈量对输出脉宽的影响, 图中 M' 表示反馈量, 它由加在 GaAs 光电导开关上的电压和电阻 R_1 决定。从图中可见, 当反馈量增加时, 输出脉宽要窄, 见图 6, 输出脉宽由 35 ns 减小为 $\sim 25\text{ ns}$ 。

用正反馈回路选单纵模和调 Q 与用染料(可饱和吸收体)选纵模和调 Q 的主要区别是:

1. 任何染料都有它的饱和功率 I_s , 例如, 五甲川染料, $I_s=50\text{ mW/cm}^2$, 假定腔内某一单纵模首先振荡, 由于它的功率强度远小于染料的饱和功率, 在振荡过程中, 它的强度线性增长(净增益很小), 当它的功率增长到接近 I_s 时, 往往需要较长时间, 这期间其它纵模也有机会振荡, 这时腔内辐射场实际上是多模场。一旦调 Q 发生(腔内功率密度 $= I_s$), 输出的是多模调 Q 脉冲。所以用染料作选模和调 Q 元件时, 激光器往往工作在阈值附近, 而且输出

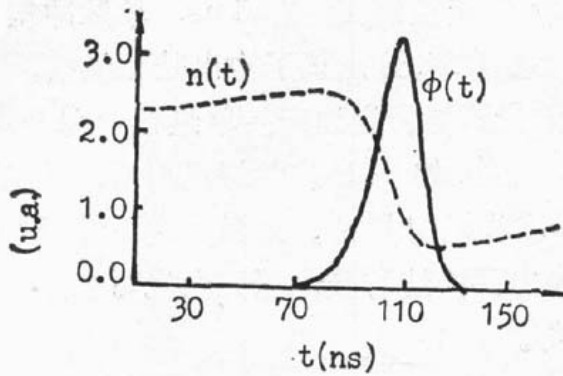


Fig. 4 The calculation variations of the photon density $\phi(t)$ and the population inversion $n(t)$ as a function of time t

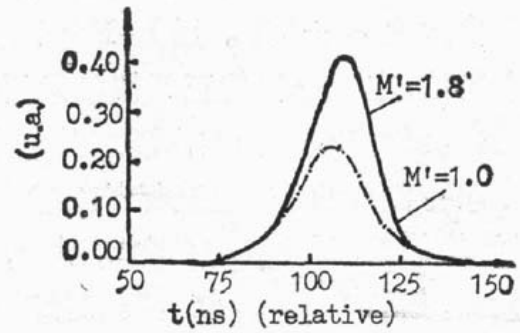


Fig. 5 The calculation variations of the pulse width with time t under the different feedback loop gains

不稳定(指单模输出)。

2. 染料固有的化学不稳定性(特别是对紫外和红外辐射),给使用带来困难。

正反馈技术选模和调 Q 克服了这个困难。一旦腔内某个单纵模振荡,它一直“跟踪”这个单纵模。在正反馈回路中,普克尔盒的透过率与光强平方有关(染料仅与光强成正比),因此,这个纵模强度增长非常快,另一方面,由于工作物质的增益饱和效应,腔内总增益迅速减少,其它模很难再有机会振荡,因此,它能确保单纵模输出。

正反馈技术与预激光调 Q 相比,主要不同点是:预激光调 Q 时, Q 开关一旦完全打开后,腔内增益猛增。如果腔内增益过高或预激光强度较小,其它模也可能振荡起来,而且抗干扰能力也较弱(其它干扰信号可能触发 Q 开关)。

总之,用正反馈回路选模和调 Q 既克服预激光调 Q 时,腔内增益“猛增”又克服染料调 Q 时腔内增益变化太慢(在染料饱和之前)的缺点。因此,它的选模能力和工作可靠性远高于以上两种工作方式。关于它的动力学过程,将在下篇文章中给出详尽的数值计算结果。

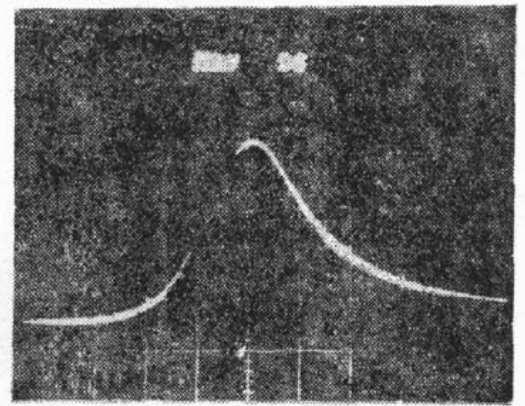


Fig. 6 Q-switched pulse waveform under the higher feedback loop gain
(Time Scale 5 ns/div)

三、实 验

实验装置见图 1,激光器有效腔长 70 cm, 1 次/秒工作,聚光腔为单椭圆水冷玻璃腔。阈值能量 25 J,工作时光泵输入为 30 J(超阈值 20%)。

测量调 Q 输出波形用一台快响应示波器(响应时间 ~ 1 ns),接收元件为进口强流光电管(与示波器输入阻抗匹配,响应时间 < 1 ns)。光谱测量用一台有效长度 $h = 10$ cm,表面涂 $R = 90\%$ 的反射膜的 F-P 标准具,它的光谱分辨限 $\delta\lambda = \frac{1-R}{\pi\sqrt{R}} \cdot \frac{\lambda^2}{2h} = 0.0017 \text{ cm}^{-1}$ 。对腔长 $L = 70$ cm 的激光器,该 F-P 足以分辨它的输出是否是单纵(模它的纵模间隔 $\Delta\nu = \frac{c}{2L} = 0.007 \text{ cm}^{-1}$)。

该激光器输出的调 Q 脉冲参数如下: 输出波形光滑无调制, 脉宽 35 ns, 单脉冲能量 30 mJ, 能量稳定度 $\sim \pm 5\%$ 。用 F-P 干涉环照片显示为单环, 这确认了输出是单纵模。

综上所述, 本文介绍的正反馈技术用于 YAG 激光器能稳定地产生单纵模调 Q 脉冲, 这种方法的主要优点是激光腔内既不外加专用的选模元件, 如 F-P 或共振反射镜, 也不需要专门的电路控制腔长, 并能确保长期稳定地产生单纵模调 Q 脉冲, 对激光电源也无特殊要求, 而且结构简单, 工作稳定, 可靠, 耐用, 抗干扰能力强。这种技术原则上也可以用于其它固体激光器, 如 Nd:YLF, 红宝石和钽玻璃激光器等。

参 考 文 献

- [1] H. G. Danjelmeyer; *IEEE J. Q. E.* 1970, **QE-6**, No. 2 (Feb), 101
- [2] W. Culshaw, J. Kannclaud *et al.*; *IEEE J. Q. E.*, 1974, **QE-10**, No. 2 (Feb), 253.
- [3] M. Hercher; *Appl. Phys. Lett.*, 1965, **7**, No. 2 (Jan), 39.
- [4] D. J. Kuizenga; *IEEE J. Q. E.*, 1981, **QE-17**, No. 9 (Sep), 1694.
- [5] Cao Weilou; *Acta Optica Sinica*, 1986, **6**, No. 9 (Sep), 769.

A novel technique of mode-selecting and Q-switching

CHEN SHAOHE, CHEN TAOLUE, CHEN YOUMING, SI XIANGDONG, SHENG GUOPING,
YANG YI AND DENG XIM NG

(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800*)

(Received 20 December 1990; revised 8 April 1991)

Abstract

The positive feedback loop Composed of a GaAs switch and a pockels Cell is applied for mode-selecting and Q-switching in the Nd:YAG laser. Stable and reliable single longitudinal mode Q-switched pulses have been generated by using this technique.

Key words: active etalon, positive feedback.