

单频脉冲透射式 Q 开关钕玻璃激光器

赵圣之 王青圃 张行愚
(山东大学光学系, 济南, 250100)

J. E. Balmer
(瑞士伯尔尼大学应用物理研究所)

提 要

本文描述了一个单频钕玻璃激光器, 它采用脉冲透射式 Q 开关和腔反射镜选模技术, 获得了脉宽 5 ns, 能量 0.5 mJ 的单模激光脉冲。同时测量了其输出激光的空间、时间和光谱特性, 其实验结果与最佳耦合 Q 开关激光理论的预测值一致。

关键词: 单频、脉冲透射式 Q 开关, 最佳耦合 Q 开关激光理论。

一、引 言

近年来, 对于激光等离子体的研究, 特别是 X 射线激光器^[1,2], 脉宽范围 1 ns~10 ns 的钕玻璃激光器展示了广阔的应用前景。这类激光器一般由多级放大构成, 而前级振荡器是输出能量 0.1~1 mJ、时间和空间平滑的单模激光脉冲。采用通常的 Q 开关或锁模技术, 很容易获得脉宽高于 10 ns 和低于 1 ns 的单模激光脉冲。但是, 对于宽度范围 1 ns~10 ns 的脉冲, 必须采用“脉冲透射式 (PTM) Q 开关”技术。这种技术类似于连续波激光器的腔倒空, 产生 Q 开关激光的脉冲宽度仅依赖于腔的循环时间。Key^[3]曾把这种技术用于钕玻璃激光器, 但输出的激光是多模。本文描述一个单频钕玻璃激光器。

二、实验装置和原理

1. 实验装置

实验装置如图 1 所示。光学谐振腔由平-凹腔构成, 凹面镜的反射率为 100%。激活介质是 Krige Q-98 钕玻璃(76.2×6.4 mm)。泵浦源为氙闪光灯, 重复率为 0.5~1 Hz。直径为 1.5 mm 的小孔用作选择 TEM₀₀ 模, 两个平面平行、厚度为 5.5 mm 和 6 mm 的玻璃板 (BK7) 作为腔反射镜用来选择纵模, 并且从最佳耦合 Q 开关激光理论考虑, 板的每个表面镀以 14% 的增反膜。从图 1 中可以计算, 腔的光学长度为 618 mm, 其纵模间隔为 8.5×10^{-4} nm, 腔的循环时间为 4.12 ns。Q 开关由声光调制器 (Intraaction, Qs-25) 完成, 纵向运用的 KD*P 普克耳盒 (Lasermetrics, 1072) 和偏振器用作脉冲透射式 (PTM) Q 开关输出。

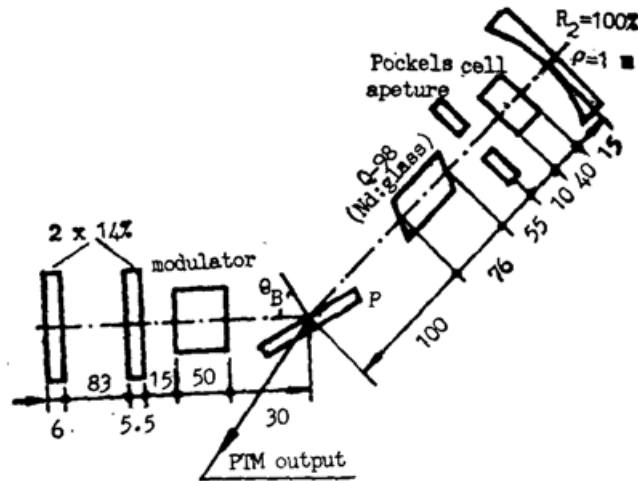


Fig. 1 Experimental setup

(P—polarizer: $\theta_B=59.4^\circ$, $R_s=1-T_s$, $T_s=0.25\%$, $T_p=99.2\%$)

2. 工作原理

首先,用氙灯泵浦并通过声光 Q 开关调制, Q 开关脉冲开始在腔内建立起来。当 Q 开关脉冲强度达到最大值时,在普克尔盒上加产生 $\lambda/4$ 位相的电压,偏振光两次通过普克尔盒,偏振方向旋转了 90° ,结果,在腔的循环时间内,储存在光腔内的总能量从偏振器输出腔外。因此输出光脉冲的宽度仅依赖于腔的长度。

三、理 论

描述 Q 开关过程是两个耦合的速率方程

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Phi}{dt} &= \frac{\Phi}{t_r} [2\sigma nl - (L - \ln R_1)], \\ \frac{dn}{dt} &= -n\Phi\sigma c, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 Φ 为腔内的光子密度, n 为反转密度, t_r 为腔的循环时间, l 为激光棒的长度, σ 为受激发射截面, L 为腔的损耗, R_1 为输出镜的反射率, c 为光在真空中的速度。方程(1)的解为

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{\max} &= (l/l') \{n_i - n_t [1 + \ln(n_i/n_t)]\}, \\ n_i - n_f &= n_t \ln(n_i/n_f), \quad n_t = (L - \ln R_1)/2\sigma l, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 Φ_{\max} 为光腔内最大的光子密度, n_i 、 n_f 为最初和最终的反转密度, n_t 为阈值反转密度, l' 为腔的长度。根据最佳耦合 Q 开关激光理论^[4],在一定的泵浦条件下,如果使用最佳的输出反射镜,能够获得最大的效率。并且从方程(1)出发,所有关键的参数能用解析式表示。其最佳输出镜的反射率 R_{opt} 为

$$\left. \begin{aligned} R_{opt} &= \exp[-L(z-1-\ln z)/\ln z], \\ z &= (n_i/n_f) = (2g_0 l/L), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 g_0 为激光棒的增益系数。

为了计算输出镜的最佳反射率,必须估计腔的损耗和激光棒的增益系数。在阈值情况下,根据公式^[5]

$$-\ln R_1 = 2KE_{in,th} - L, \quad g_0 l = KE_{in,th}, \quad (4)$$

K 为泵浦系数, $E_{in,th}$ 为阈值能量, L 和 K 的值可直接测量。因为在 L 不变的情况下, $E_{in,th}$ 是 R_1 的函数。对于本文的实验装置, 测得 K 和 L 的值分别为 $5.44 \times 10^{-3} \text{ J}^{-1}$ 和 0.47 。当 $E_{in,th} = 81 \text{ J}$, $l = 76.2 \text{ mm}$ 时, 激光棒的增益系数 g_0 为 5.783 m^{-1} 。从公式(3), 可以计算, 输出镜的最佳反射率为 84% 。

腔反射镜的反射率可用公式^[6]

$$R_1 = [(n^4 - 1)/(n^4 + 1)]^2, \quad (5)$$

计算。式中 n 为板的折射率。对于 $n = 1.5061$, $R_1 = 45\%$ 。腔反射镜 45% 的反射率不能满足最佳耦合 Q 开关激光工作的要求。为了提高其反射率, 可在玻璃板的每个表面镀增反膜。对于 $R_{opt} = 84\%$, 板的每个表面的反射率为 14% 。

在最佳耦合 Q 开关工作时, 由公式(2)和(3), 可以导出, 腔内最大的光子密度为

$$\Phi_{max} = \frac{L}{2\sigma l} \left[z - \frac{z-1}{\ln z} - \left(\frac{z-1}{\ln z} \right) \ln \left(\frac{z \ln z}{z-1} \right) \right], \quad (6)$$

脉冲透射式 Q 开关的输出能量 E_{PTM} 可由下式估算:

$$E_{PTM} = h\nu \Phi_{max} l' A = \left(\frac{h\nu AL}{2\sigma} \right) \left[z - \frac{z-1}{\ln z} - \left(\frac{z-1}{\ln z} \right) \ln \left(\frac{z \ln z}{z-1} \right) \right], \quad (7)$$

式中 $h\nu$ 为光子的能量, A 为光束的截面积。对于实验条件, 泵浦能量 81 J , $h\nu = 1.88 \times 10^{-19} \text{ J}$, $\sigma = 4.5 \times 10^{-24} \text{ m}^2$, $A = \pi(0.5 \times 10^{-3})^2 \text{ m}^2$, 由(7)式计算可得, $E_{PTM} = 0.53 \text{ mJ}$ 。

四、实验结果

1. 脉冲波形

图 2 和图 3 是用光电管和存储示波器 (7834) 测量的 Q 开关输出和脉冲透射式 Q 开关输出的激光波形。结果表明, 脉冲宽度分别为 70 ns 和 5 ns (泵浦能量为 81 J), 且波形的稳定性很好 (峰值幅度的稳定度小于 5% , 脉宽基本不变)。由于普克尔盒约 4 ns 的上升时间, 导致脉冲透射式 Q 开关的输出脉冲宽度稍大于腔的循环时间。

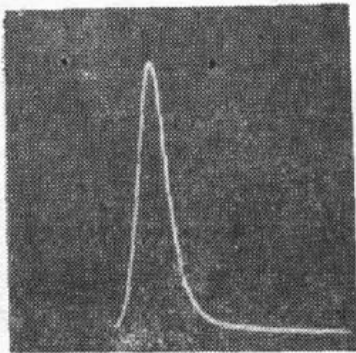


Fig. 2 Oscillator output pulse for Q-switch

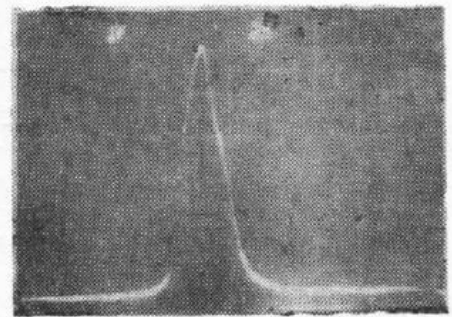


Fig. 3 Oscillator output pulse for PTM

2. 发射光谱

使用法布里-珀罗干涉仪和光电管阵列 (PDA, 256 个, 长 12.8 mm) 测量了激光发射的光谱。干涉仪的自由光谱范围为 $4 \times 10^{-4} \text{ nm}$, 足以分辨纵模间隔。

图 4 是用 PDA 记录的激光发射的光谱结构图 (泵浦能量 81 J)。从干涉环的宽度, 计

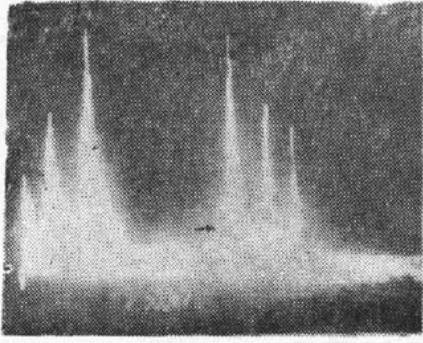


Fig. 4 Photograph of the spectral structure of laser emission

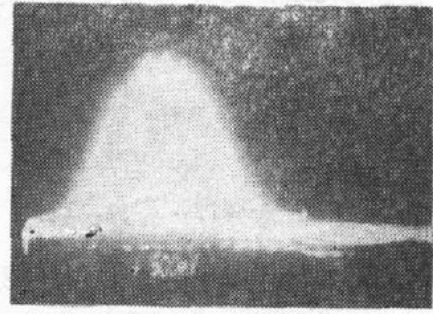


Fig. 5 Intensity distribution of emission beam

算得出相应的波长变化为 8×10^{-4} nm, 小于其纵模间隔, 说明激光发射是单频的。

3. 远场发散角

用光电管阵列(PDA)测量了光束的远场发散角。从图 1 的腔结构, 计算的远场发散角为 1.62 mrad。图 5 是在距离 6180 mm 处用 PDA 记录的光强分布图(泵浦能量 81 J)。可以看出, 光强分布是近高斯形的。从图 5 中计算得出的远场发散角为 1.26 mrad, 小于理论的预测值, 这是由于激光棒的热透镜聚焦引起的。

4. 输出能量

图 6 是用热电检测器(Gen-Tec, ED-100)测量的脉冲透射式 Q 开关的输出能量曲线。在泵浦能量 81 J 时, 获得了 0.5 mJ 的能量输出, 与理论的预测值相符。

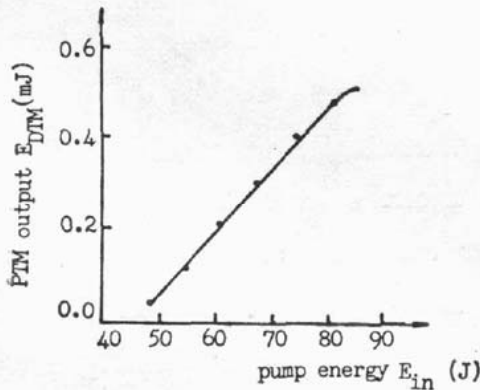


Fig. 6 Measured output energy E_{PTM} (coated RR) versus pump energy E_{in}

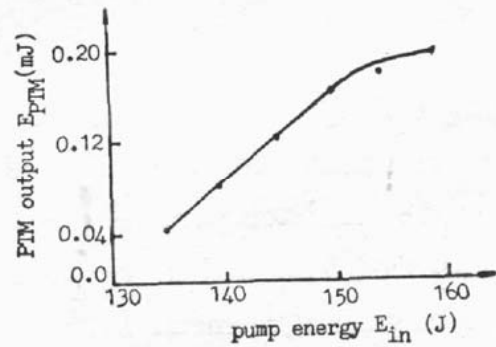


Fig. 7 Measured output energy E_{PTM} (uncoated RR) versus pump energy E_{in}

图 7 是腔反射镜没镀膜时的输出能量曲线。图 6 与图 7 相比表明, 镀膜后的腔反射镜能获得更多的输出能量。一般说来, 腔镜的反射率越高, 储存在腔内的能量就越多; 对于脉冲透射式 Q 开关工作, 输出的能量就越大。但是, 腔反射镜的反射率也不能太高。因为储存在腔内的能量增多, 对膜损害的危险变大, 另一方面, 高反射率的腔反射镜很难选择单频工作。因此从最佳耦合 Q 开关激光理论考虑选择腔反射镜的反射率是合理的。

五、结 论

采用脉冲透射式 Q 开关和腔反射镜选模技术, 获得了输出能量 0.5 mJ、脉宽 5 ns 的单模激光脉冲, 其实验结果与理论的预测值一致。从实验结果可以预料, 采用快速开关的普克

尔盒,用高折射率材料的腔反射镜以提高反射率,用这种装置,得到 4 ns 脉宽、到 1 mJ 的能量是可能的。

参 考 文 献

- [1] T. Hara; *Japan J. Appl. Phys.*, 1989, **28**, No. 6 (Jun), L1010.
- [2] C. H. Skinner; *J. O. S. A. (B)*, 1990, **7**, No. 11 (Nov), 2042.
- [3] M. H. Key; *J. Phys. (E)*, 1970, **3**, No. 11 (Nov), 932.
- [4] J. J. Degnan; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1989, **QE-25**, No. 2 (Feb), 214.
- [5] Walter Koechner; *«Solid State Laser Engineering»* (Spring Verlag, New York, 1989), 39.
- [6] J. K. Watts; *Appl. Opt.*, 1968, **7**, No. 6 (Jun), 1621.

A single-frequency Nd:glass laser with pulse transmission mode Q-switch

ZHAO SHENGZHI, WANG QINGPU AND ZHANG XINGYU
(Department of Optics, Shandong University, Jinan 250100)

J. E. BALMER
(Institute of Applied Physics, University of Berne, Switzerland)

(Received 5 April 1991; revised 10 June 1991)

Abstract

A single frequency Nd:glass laser with pulse transmission mode (PTM) Q-switch and resonant reflector (RR) as longitudinal mode selector is described. The spectral, spatial and temporal characteristics of laser emission are measured. Stable output pulses of 5 ns width, up to 0.5 mJ energy are obtained. The experimental results are in good agreement with the prediction of theory of the optimally coupled Q-switched laser.

Key words: single-frequency, pulse transmission mode (PTM) Q-switch, theory of the optimally coupled Q-switched laser.