

文章编号: 1000-7032(2013)09-1219-08

# LD泵浦被动调 $Q$ - $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ 微晶片激光器的优化设计

刘宗华\*, 郑 义

(北京交通大学 理学院, 北京 100044)

**摘要:** 从速率方程出发, 理论分析了泵浦功率、输出镜反射率、 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 的初始透过率和长度、 $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ 的长度对调 $Q$ 激光器的重复频率、脉冲宽度、平均输出功率、峰值功率、输出脉冲能量和单脉冲能量利用率的影响。依据理论结果设计了一个窄脉冲宽度、高峰值功率和脉冲能量的被动调 $Q$ - $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ 微晶片激光器。该激光器的脉冲宽度 $\Delta t = 199$  ps, 峰值功率 $P_m = 1.04$  MW, 输出脉冲能量 $E = 0.21$  mJ。

**关键词:** 微晶片激光器; 被动 $Q$ 调制;  $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ ;  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ ; 速率方程

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A DOI: 10.3788/fjxb20133409.1219

## Design and Optimization of LD-pumped Passively $Q$ -switched $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ Microchip Laser

LIU Zong-hua\*, ZHENG Yi

(School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

\* Corresponding Author, E-mail: bjtu\_laser@163.com

**Abstract:** Based on rate equations, effects of laser parameters, including the pumped power, the reflectance of output mirror, the initial transmittance and the length of  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ , and the length of  $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$  on the laser performance were analyzed theoretically. Then based on theoretical conclusions, we designed a LD-pumped and passively  $Q$ -switched  $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$  microchip laser with narrow pulse width, high peak power and large pulse energy. The pulse width was 199 ps, the peak power was 1.04 MW, and the pulse energy was 0.21 mJ.

**Key words:** microchip laser; passively  $Q$ -switched;  $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ ;  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ ; rate equations

## 1 引 言

调 $Q$ 微晶片激光器具有结构紧凑、体积小、成本低、散热好、效率高、脉宽窄、峰值功率高、光束质量好、性能稳定等诸多优点,在测距、遥感、激光雷达、三维成像、显微医学等领域有广泛的应用。 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体作为可饱和吸收体<sup>[1]</sup>,具有低饱和光强、高损伤阈值、高化学和热稳定性、长使用寿命等优点,已经被广泛应用

在 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 晶体的调 $Q$ 激光器<sup>[2-4]</sup>中。与 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 晶体相比, $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ 晶体具有热效应好、吸收带宽、上能级寿命长、量子效率高优点<sup>[5-6]</sup>,因此,以 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 作为可饱和吸收体的 $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ 调 $Q$ 微晶片激光器现在已成为固态激光器的研究热点。目前,国际上已经报道了脉冲宽度140 ns、脉冲能量0.13 mJ、峰值功率0.92 MW的 $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ 调 $Q$ 微晶片激光器<sup>[7]</sup>。台湾交通大学采用晶体表面冷却的方法,在3.9

收稿日期: 2013-05-11; 修订日期: 2013-06-24

作者简介: 刘宗华(1988-),男,北京人,主要从事光纤激光器和全固态激光器方面的研究。

E-mail: bjtu\_laser@163.com

W 泵浦功率时获得重复频率 3.3 kHz、脉冲能量 287  $\mu\text{J}$ 、脉冲宽度 650 ps 的调 Q 脉冲<sup>[8]</sup>。厦门大学利用 Cr, Yb: YAG 复合晶体的自调 Q 效应获得了峰值功率 7.4 kW、脉冲能量 12.4  $\mu\text{J}$ 、脉冲宽度 1.68 ns 的调 Q 激光脉冲<sup>[9]</sup>。但是,国内对  $\text{Yb}^{3+}$ : YAG 调 Q 微晶片激光器的实验研究才刚刚起步,相关理论的研究还有待进一步深入。由于考虑了抽运和自发辐射等因素,用传统的理论求解被动调 Q 激光器的耦合速率方程组较为复杂,因此我们借助 MATLAB 程序对方程组进行数值求解,理论分析了主要参数对调 Q- $\text{Yb}^{3+}$ : YAG 激光器性能的影响;并依据理论结果对激光器进行了优化,设计了窄脉冲宽度、高峰值功率和脉冲能量的调 Q- $\text{Yb}^{3+}$ : YAG 微晶片激光器。而且,为了使理论结果更加准确地指导实验,本文对速率方程进行了一定的近似修正,对理论结果进行了大量的对比分析。并且引入了单脉冲能量利用率,能够更加全面地描述各器件参数对调 Q 激光器性能的影响。

## 2 速率方程和理论分析

$\text{Yb}^{3+}$  离子的发射波长在 1  $\mu\text{m}$  以上时,其运行机制是四能级系统(严格来说是准四能级系统),如图 1(a)所示。可饱和吸收体  $\text{Cr}^{4+}$ : YAG 的简化四能级结构如图 1(b)所示。考虑到抽运速率、 $\text{Yb}^{3+}$ : YAG 的上能级寿命和信号光的重吸收、 $\text{Cr}^{4+}$ : YAG 的恢复时间和激发态吸收等因素,可以得到腔内光子数密度  $\varphi$ 、 $\text{Yb}^{3+}$ : YAG 的反转粒子数密度  $n$  和  $\text{Cr}^{4+}$ : YAG 的基态粒子数密度  $n_{\text{gs}}$  相互耦合的速率方程组:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{\varphi}{t_r} \left[ 2 \left( \sigma - \frac{\Omega_1}{\Omega_2} \sigma_{\text{sg}} \right) n_1 - 2\sigma_{\text{gs}} n_{\text{gs}} l_s - 2\sigma_{\text{es}} (n_{0s} - n_{\text{gs}}) l_s - \left( \ln \frac{1}{R} + \delta \right) \right], \quad (1)$$

$$\frac{dn}{dt} = W_p(t) \left( 1 - \frac{n}{n_{\text{tot}}} \right) - \gamma \sigma c \varphi n - \frac{n}{\tau_{21}}, \quad (2)$$

$$\frac{dn_{\text{gs}}}{dt} = \frac{n_{0s} - n_{\text{gs}}}{\tau_{\text{gs}}} - \sigma_{\text{gs}} c \varphi n_{\text{gs}}, \quad (3)$$

式中,  $t_r$  是渡越时间,  $t_r = 2l_c/c$ ,  $l_c$  是谐振腔的等效光程长度;  $\Omega_1$  和  $\Omega_2$  分别是  $\text{Yb}^{3+}$ : YAG 的激光下能级和上能级的波尔兹曼因子,  $\Omega_1 = 0.046$ ,  $\Omega_2 = 0.773$ ;  $\sigma$  和  $\sigma_{\text{sg}}$  是  $\text{Yb}^{3+}$ : YAG 的受激发射截面和信号光的重吸收截面;  $l$  是  $\text{Yb}^{3+}$ : YAG 的

长度;  $\sigma_{\text{gs}}$  和  $\sigma_{\text{es}}$  分别是  $\text{Cr}^{4+}$ : YAG 的基态和激发态吸收截面;  $n_{\text{gs}}$  和  $n_{\text{es}}$  分别是  $\text{Cr}^{4+}$ : YAG 的基态粒子数密度和激发态粒子数密度; 总粒子数密度  $n_{0s} = n_{\text{gs}} + n_{\text{es}}$ ;  $l_s$  是  $\text{Cr}^{4+}$ : YAG 沿光腔轴线的长度;  $R$  是输出镜的反射率;  $\delta$  是激光器腔体的损耗系数;  $W_p(t)$  是抽运速率;  $n_{\text{tot}}$  是  $\text{Yb}^{3+}$ : YAG 中的  $\text{Yb}^{3+}$  粒子数密度;  $c$  是真空中光速;  $\tau_{21}$  是  $\text{Yb}^{3+}$ : YAG 的激光上能级的荧光寿命;  $\tau_{\text{gs}}$  是  $\text{Cr}^{4+}$ : YAG 的恢复时间; 反转因子  $\gamma = 1 + g_2/g_1$ , 在四能级系统中值为 1, 三能级系统中值为 2;  $g_i$  表示第  $i$  个能级的简并度。  $\text{Cr}^{4+}$ : YAG 的初始透过率  $T_0 = \exp(-n_{0s} \sigma_{\text{gs}} l_s)$ 。

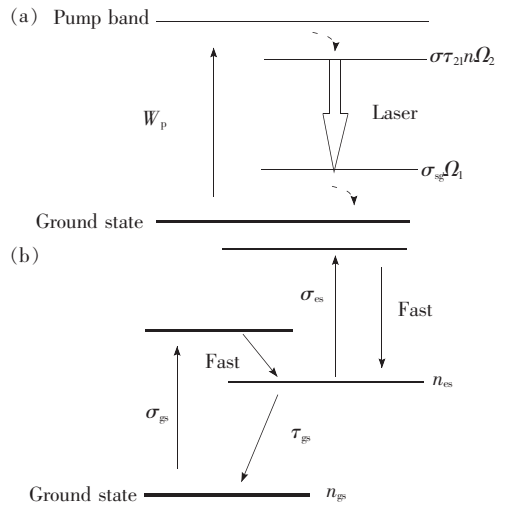


图 1  $\text{Yb}^{3+}$ : YAG 四能级系统能级跃迁的示意图 (a) 和  $\text{Cr}^{4+}$ : YAG 的能级图 (b)

Fig. 1 The energy transition for four-level system of  $\text{Yb}^{3+}$ : YAG (a) and the energy level of  $\text{Cr}^{4+}$ : YAG (b)

激光二极管是准连续抽运,但是泵浦脉冲的持续时间远大于调 Q 脉冲的脉宽,因此,  $W_p(t) = W_p = P_{\text{in}} [1 - \exp(-\alpha_0 l)] / h\nu_p \pi \omega_p^2 [10^{-11}]$ 。其中  $P_{\text{in}}$  是泵浦光的入射功率;  $h\nu_p$  是泵浦光的单光子能量;  $\omega_p$  和  $\omega_s$  分别是泵浦光束和信号光束在增益介质中的平均半径,考虑到泵浦光和信号光的模斑匹配问题,又因为腔长很短,可认为  $\omega_p = \omega_s$ ;  $\alpha_0$  是  $\text{Yb}^{3+}$ : YAG 对泵浦光的吸收系数。考虑到掺杂浓度较高,  $\text{Yb}^{3+}$ : YAG 中的最大反转粒子数较大,对抽运项添加因子  $(1 - n/n_{\text{tot}})$  作为修正。  $\text{Yb}^{3+}$ : YAG 对 1 030 nm 光有重吸收作用,因此对式(1)中的受激发射项进行了近似修改。可近似地认为:光子在腔寿命  $t_c$  时间内逸出,每个光子的能量是  $h\nu$ ,则激光器的瞬时功率:

$$P(t) = \varphi(t)Vh\nu/t_c, \quad (4)$$

式中,  $V$  是腔内光束的体积, 近似地得出  $V = \pi\omega_s^2 l_c$ ; 腔寿命  $t_c = l_c/(c\delta_R)$ , 其中, 输出损耗  $\delta_R = \ln(1/R)$ 。

调 Q 脉冲的总能量可表示为<sup>[11]</sup>

$$E = \int_0^\infty P(t)dt = \frac{Vh\nu}{t_c} \int_0^\infty \varphi(t)dt. \quad (5)$$

当腔内光子数密度达到最大值  $\varphi_m$  时, 输出功率达到最大值, 即峰值功率

$$P_m = \varphi_m Vh\nu/t_c, \quad (6)$$

调 Q 脉冲宽度近似为

$$\Delta t = E/P_m, \quad (7)$$

平均输出功率可近似为

$$\bar{P} = Ef, \quad (8)$$

其中,  $f$  是调 Q 激光器的脉冲重复频率。

对于调 Q 激光器来说, 能量利用率是一个很重要的指标。用单脉冲能量利用率  $\eta$  表示一个调 Q 脉冲从介质中提取能量的效率。

$$\eta = \frac{n_m - n_l}{n_m}, \quad (9)$$

式中,  $n_m$  和  $n_l$  是 Yb<sup>3+</sup>:YAG 中的反转粒子数密度的最大值和阈值。

从速率方程出发, 可以整理出腔内光子数密度的最大值<sup>[10]</sup>

$$\varphi_m = \frac{n_l}{4} \left( \frac{n_m}{n_l} - 1 \right)^2, \quad (10)$$

结合方程式(9)和(10), 可得到

$$\eta = \frac{2[\sqrt{\varphi_m(\varphi_m + n_m)} - \varphi_m]}{n_m}. \quad (11)$$

表1 Yb<sup>3+</sup>:YAG 的主要参数

Table 1 Main parameters of Yb<sup>3+</sup>:YAG<sup>[12]</sup>

$\tau_{21}/$ ms	$\alpha_0@941 \text{ nm}/$ $\text{cm}^{-1}$	$\sigma@1030 \text{ nm}/$ $\text{cm}^2$	$\sigma_{\text{sg}}@1030 \text{ nm}/$ $\text{cm}^2$	$n_{\text{tot}}/$ $\text{cm}^{-3}$	$n_l$
1.2	10.7	$2.0 \times 10^{-20}$	$0.1 \times 10^{-20}$	$1.38 \times 10^{20}$	1.82

表2 Cr<sup>4+</sup>:YAG 的主要参数

Table 2 Main parameters of Cr<sup>4+</sup>:YAG<sup>[1,13]</sup>

$\tau_{\text{gs}}/$ $\mu\text{s}$	$\sigma_{\text{cs}}@1030 \text{ nm}/$ $\text{cm}^2$	$\sigma_{\text{gs}}@1030 \text{ nm}/$ $\text{cm}^2$	$n_2$
3	$2.2 \times 10^{-19}$	$8.7 \times 10^{-19}$	1.80

### 3.1 主要参数对调 Q-Yb<sup>3+</sup>:YAG 微晶片激光器的影响

泵浦功率对调 Q 激光器性能的影响如图3所

### 3 数值仿真和结果分析

图2是通过程序设计的调 Q 微晶片激光器的腔结构图, 腔长  $l_{\text{tot}} = 5 \text{ mm}$ , 在考虑两晶体的热透镜效应下得到信号光束在增益介质中的平均半径  $\omega_s = 100 \mu\text{m}$ 。LD 是中心波长 940 nm 的半导体激光器, 尾纤输出光斑半径 150  $\mu\text{m}$ , 谐振腔是平平腔, 增益介质是 4 mm × 4 mm × 1 mm 的 Yb<sup>3+</sup>:YAG 晶片, Yb<sup>3+</sup> 离子的掺杂摩尔分数是 10%, 耦合系统的聚焦倍率为 1.5:1。

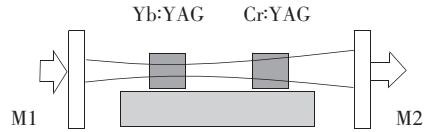


图2 调 Q 微晶片激光器的腔结构图。平面镜 M1 镀有对 941 nm 光高透且对 1 030 nm 光高反的膜, 输出端平面镜 M2 镀有对 1 030 nm 光有一定透过率的膜。

Fig. 2 The cavity's design diagram of the Q-switched microchip laser. The flat end mirror M1 has high reflection coating at 1 030 nm and high transmittance coating at 941 nm, and the flat output mirror M2 has certain reflection coating at 1 030 nm.

由于方程组(1)、(2)、(3)考虑了抽运和自发辐射等因素, 用传统的理论很难对其求解, 因此我们借助 MATLAB 程序对其进行数值求解。除了  $\delta = 0.05, l_{\text{tot}} = 5 \text{ mm}, \omega_s = 100 \mu\text{m}$  3 个基本参数外, 进行数值求解时所需要的 Yb<sup>3+</sup>:YAG 和 Cr<sup>4+</sup>:YAG 的参数值分别如表1和表2所示。

示。随着泵浦功率的增加, 重复频率和平均输出功率线性增大, 峰值功率、脉冲能量和脉冲能量利用率均是渐近式增大, 而脉冲宽度渐近式减小。因此, 仅从泵浦功率考虑, 功率越高, 越容易获得窄脉宽、高峰值功率和脉冲能率的调 Q 激光器; 但考虑到泵浦效率问题, 则泵浦功率不宜过大。

图4是输出镜反射率对调 Q 激光器性能的影响。随着输出镜反射率的增加, 重复频率和脉冲能量利用率都呈现增大的趋势; 脉冲宽度、平均输

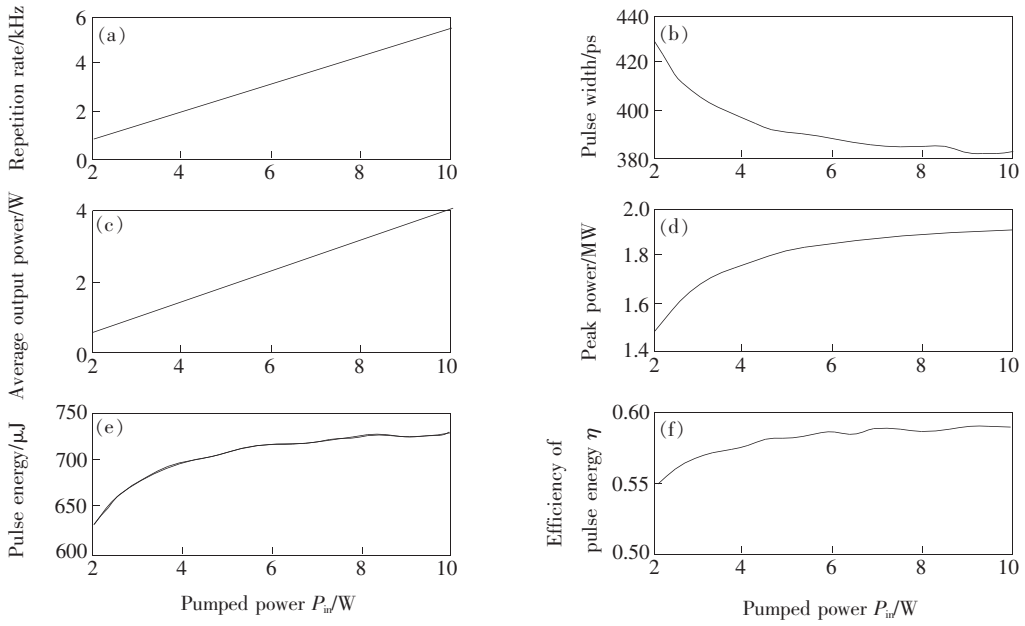


图 3 调  $Q$  激光器性能参数随泵浦功率  $P_{in}$  的变化曲线。(a) 重复频率  $f$ ; (b) 脉冲宽度  $\Delta t$ ; (c) 平均输出功率  $\bar{P}$ ; (d) 峰值功率  $P_m$ ; (e) 脉冲能量  $E$ ; (f) 单脉冲能量利用率  $\eta$ 。此时设定输出镜反射率  $R=0.90$ ,  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  的初始透射率  $T_0=0.84$ , 长度  $l_s=1$  mm,  $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$  的长度  $l=1$  mm。

Fig. 3 The performance parameters of the  $Q$ -switched laser versus the pumped power  $P_{in}$ . (a) the repetition rate  $f$ . (b) the pulse width  $\Delta t$ . (c) The average output power  $\bar{P}$ . (d) The peak power of a pulse  $P_m$ . (e) The pulse energy  $E$ . (f) The efficiency of pulse energy  $\eta$ , respectively. Set the reflectance of the output mirror  $R=0.90$ , the initial transmittance of  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$   $T_0=0.84$  and its length  $l_s=1$  mm, and the length of  $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$   $l=1$  mm.

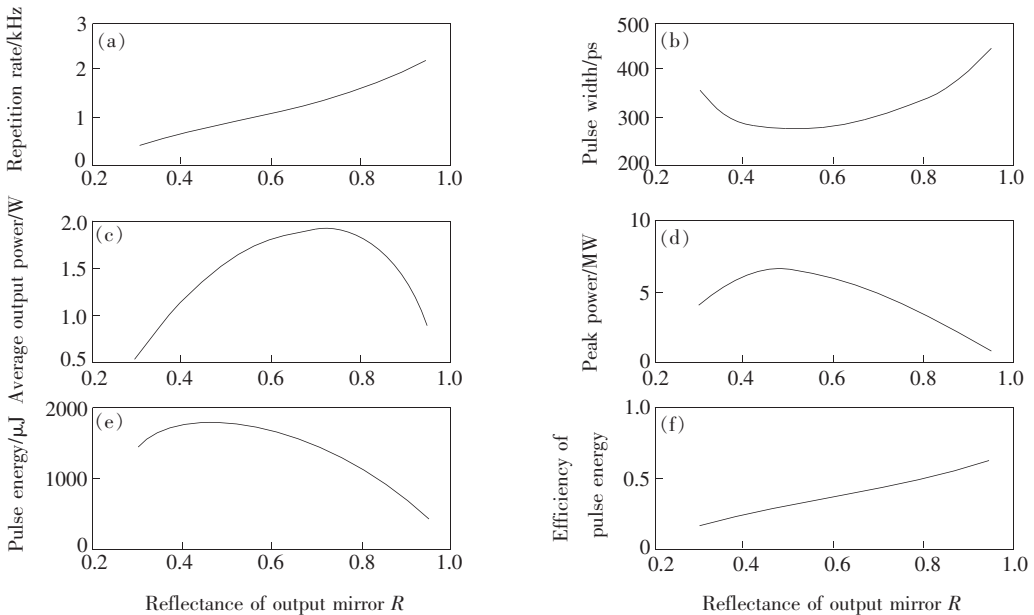


图 4 调  $Q$  激光器性能参数随输出镜反射率  $R$  的变化曲线。(a) 重复频率  $f$ , (b) 脉冲宽度  $\Delta t$ , (c) 平均输出功率  $\bar{P}$ , (d) 峰值功率  $P_m$ , (e) 脉冲能量  $E$ , (f) 单脉冲能量利用率  $\eta$ 。此时设定泵浦功率  $P_{in}=4$  W,  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  的初始透射率  $T_0=0.84$ , 长度  $l_s=1$  mm,  $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$  的长度  $l=1$  mm。

Fig. 4 The performance parameters of the  $Q$ -switched laser vs. the reflectance of the output mirror ( $R$ ). (a) The repetition rate  $f$ . (b) The pulse width  $\Delta t$ . (c) The average output power  $\bar{P}$ . (d) The peak power of a pulse  $P_m$ . (e) The pulse energy  $E$ . (f) The efficiency of pulse energy  $\eta$ . Set the pump power  $P_{in}=4$  W, the initial transmittance of  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$   $T_0=0.84$  and its length  $l_s=1$  mm, and the length of  $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$   $l=1$  mm.

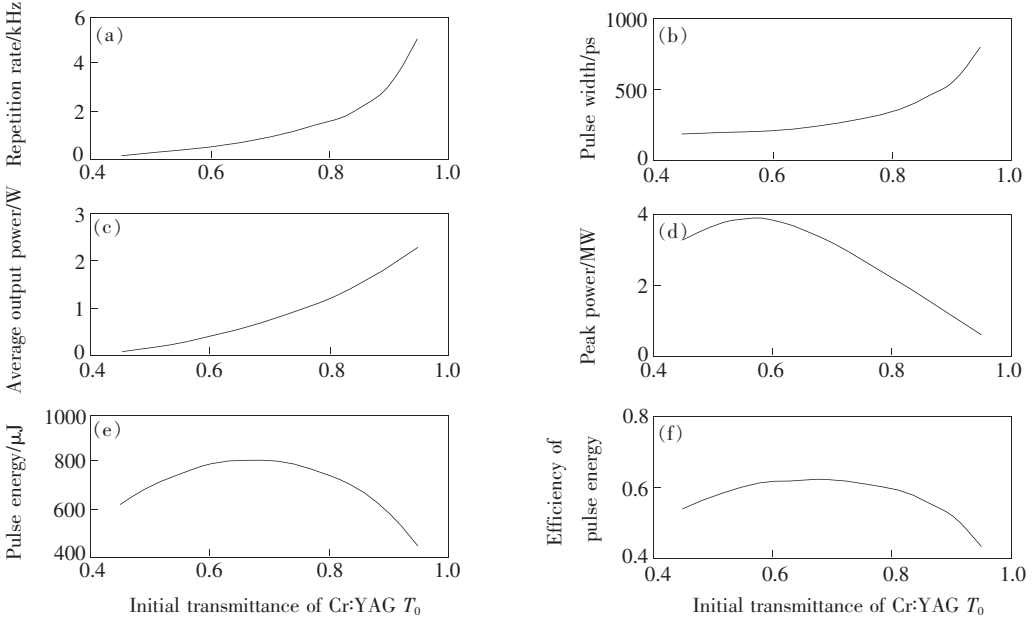


图5 调Q激光器性能参数随Cr<sup>4+</sup>:YAG的初始透过率 $T_0$ 的变化曲线。(a)重复频率 $f$ ; (b)脉冲宽度 $\Delta t$ ; (c)平均输出功率 $\bar{P}$ ; (d)峰值功率 $P_m$ ; (e)脉冲能量 $E$ ; (f)单脉冲能量利用率 $\eta$ 。此时设定泵浦功率 $P_{in}=4$  W, 输出镜反射率 $R=0.90$ , Cr<sup>4+</sup>:YAG的长度 $l_s=1$  mm, Yb<sup>3+</sup>:YAG的长度 $l=1$  mm。

Fig. 5 The performance parameters of the Q-switched laser vs. the initial transmittance of Cr<sup>4+</sup>: YAG( $T_0$ ). (a) The repetition rate  $f$ . (b) The pulse width  $\Delta t$ . (c) The average output power  $\bar{P}$ . (d) The peak power of a pulse  $P_m$ . (e) The pulse energy  $E$ . (f) The efficiency of pulse energy  $\eta$ . Set the pump power  $P_{in}=4$  W, the reflectance of the output mirror  $R=0.90$ , the length of Cr<sup>4+</sup>: YAG  $l_s=1$  mm, and the length of Yb<sup>3+</sup>: YAG  $l=1$  mm.

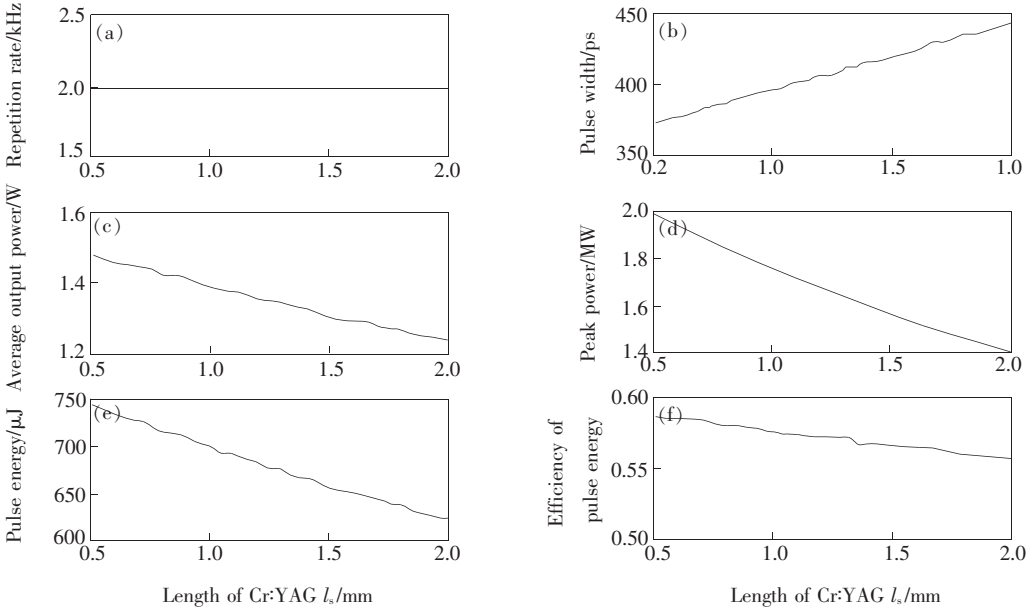


图6 调Q激光器性能参数随Cr<sup>4+</sup>:YAG的长度 $l_s$ 的变化曲线。(a)重复频率 $f$ ; (b)脉冲宽度 $\Delta t$ ; (c)平均输出功率 $\bar{P}$ ; (d)峰值功率 $P_m$ ; (e)脉冲能量 $E$ ; (f)单脉冲能量利用率 $\eta$ 。此时设定泵浦功率 $P_{in}=4$  W, 输出镜反射率 $R=0.90$ , Cr<sup>4+</sup>:YAG的初始透过率 $T_0=0.84$ , Yb<sup>3+</sup>:YAG的长度 $l=1$  mm。

Fig. 6 The performance parameters of the Q-switched laser vs. the length of Cr<sup>4+</sup>: YAG( $l_s$ ). (a) The repetition rate  $f$ . (b) The pulse width  $\Delta t$ . (c) The average output power  $\bar{P}$ . (d) The peak power of a pulse  $P_m$ . (e) The pulse energy  $E$ . (f) The efficiency of pulse energy  $\eta$ . Set the pump power  $P_{in}=4$  W, the reflectance of the output mirror  $R=0.90$ , the initial transmittance of Cr<sup>4+</sup>: YAG  $T_0=0.84$ , and the length of Yb<sup>3+</sup>: YAG  $l=1$  mm.



出功率、峰值功率和脉冲能量都出现拐点,而且脉冲宽度、峰值功率和脉冲能量的拐点值相近。因此,仅从输出镜反射率考虑,输出镜反射率有一个最优值使调  $Q$  激光器获得窄脉宽、高峰值功率和脉冲能量。

$\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  的初始透过率对调  $Q$  激光器性能的影响最明显。由图 5 可得,随着  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  的初始透过率的增加,重复频率和脉冲宽度先是平缓增大,之后剧烈增大;平均输出功率变化趋势较为平滑;峰值功率、脉冲能量和脉冲能量利用率出现拐点,但拐点值的大小不同。这主要是因为初始透过率越大越利于调  $Q$  脉冲的形成,但是调制深度随之减小,调  $Q$  作用减弱。

图 6 描述的是  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  的长度对调  $Q$  激光

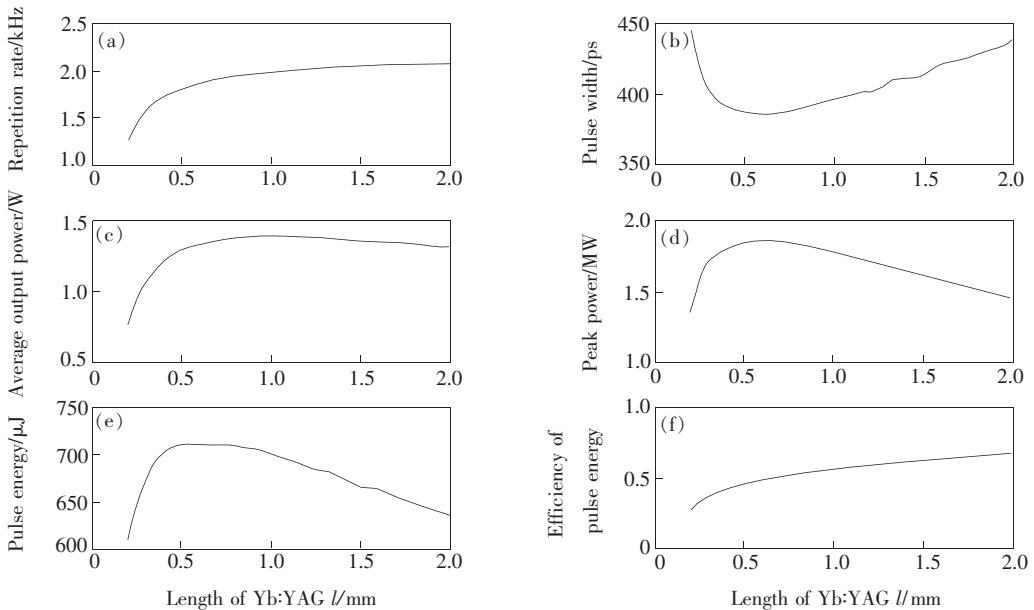


图 7 调  $Q$  激光器性能参数随  $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$  的长度  $l$  的变化曲线。(a) 重复频率  $f$ ; (b) 脉冲宽度  $\Delta t$ ; (c) 平均输出功率  $\bar{P}$ ; (d) 峰值功率  $P_m$ ; (e) 脉冲能量  $E$ ; (f) 单脉冲能量利用率  $\eta$ 。此时设定泵浦功率  $P_{in} = 4 \text{ W}$ , 输出镜反射率  $R = 0.90$ ,  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  的初始透过率  $T_0 = 0.84$ , 长度  $l_s = 1 \text{ mm}$ 。

Fig. 7 The performance parameters of the  $Q$ -switched laser vs. the length of  $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$  ( $l$ ). (a) The repetition rate  $f$ . (b) The pulse width  $\Delta t$ . (c) The average output power  $\bar{P}$ . (d) The peak power of a pulse  $P_m$ . (e) The pulse energy  $E$ . (f) The efficiency of pulse energy  $\eta$ . Set the pump power  $P_{in} = 4 \text{ W}$ , the reflectance of the output mirror  $R = 0.90$ , the initial transmittance of  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$   $T_0 = 0.84$ , and the length of  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$   $l_s = 1 \text{ mm}$ .

脉宽、高峰值功率和脉冲能量。

### 3.2 激光器的优化设计

根据以上的分析结果,综合考虑各参数对调

器性能的影响,  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  对调  $Q$  性能的影响主要反映在初始透过率参数上,当初始透过率确定时,  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  长度的变化主要引起非饱和吸收的变化。因此,初始透过率一定时,在工艺允许的情况下尽量选择短的饱和吸收体。

在调  $Q$  激光器中,  $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$  的长度具有最优值,如图 7 所示。除重复频率和脉冲能量利用率随着  $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$  的长度的增加而逐渐增大之外,其他性能参数曲线均存在拐点,并且各拐点值相近。脉冲宽度先是急剧下降,然后逐渐增大;平均输出功率、峰值功率和脉冲能量利用率都是先急剧增大,之后逐渐减小,这可以归因于增益介质的饱和吸收效应和信号光的重吸收效应。因此,增益介质长度存在最优值,使调  $Q$  激光器获得窄

$Q$  激光器性能的影响,我们设计了一个窄脉宽、高峰值功率和脉冲能量的调  $Q$ - $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$  微晶片激光器,各参数取值如表 3 所示。

表 3 激光器的优化参数取值

Table 3 The values of parameters for optimization

$P_{in}/\text{W}$	$R$	$T_0$	$l_s/\text{mm}$	$l/\text{mm}$	$\delta$	$l_{tot}/\text{mm}$
4	0.60	0.70	0.5	1	0.05	5

图8是所设计的激光器的输出脉冲时序图和单个输出脉冲,图9是调 $Q$ 激光器的平均输出功率曲线。从图中可知,激光器斜率效率 $\eta_{SE} = 63\%$ ;在泵浦功率 $P_{in} = 4\text{ W}$ 时,平均输出功率

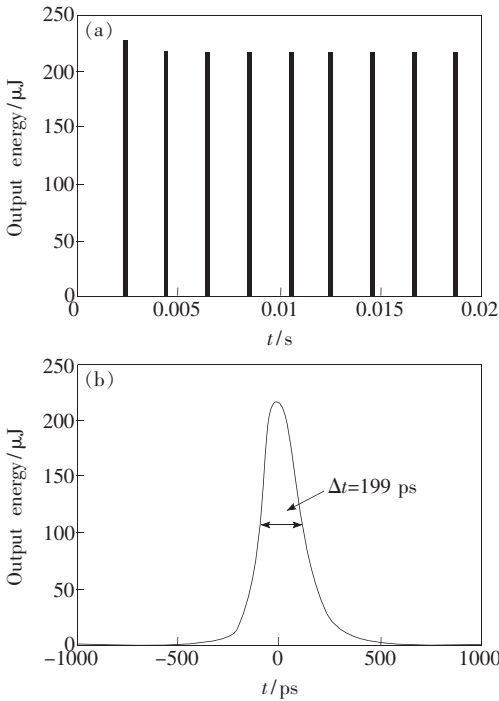


图8 所设计的激光器在 $P_{in} = 4\text{ W}$ 时的输出脉冲时序图(a)和输出单能量脉冲(b)

Fig.8 The sequence diagrams of the output pulses (a) and the single output  $Q$ -switched pulse (b) of the designed  $Q$ -switched laser at  $P_{in} = 4\text{ W}$

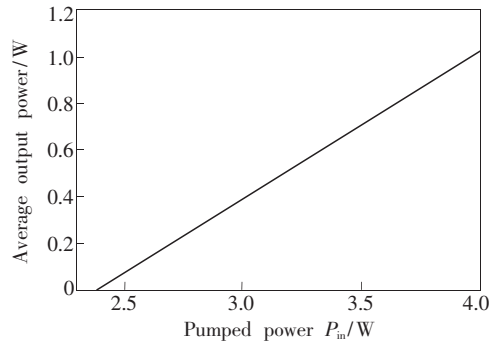


图9 所设计的激光器在不同泵浦功率时的平均输出功率

Fig.9 The average output power vs. the pumped power  $P_{in}$  of the designed  $Q$ -switched laser

1.02 W,光-光转换效率 $\eta_{OE} = 25.5\%$ ,调 $Q$ 脉冲的重复频率 $f = 490\text{ Hz}$ ,脉冲宽度 $\Delta t = 199\text{ ps}$ ,输出脉冲能量 $E = 0.21\text{ mJ}$ ,峰值功率 $P_m = 1.04\text{ MW}$ 。

## 4 结 论

借助 MATLAB 程序对被动调 $Q$ 激光器的耦合速率方程组进行数值求解,分析了主要参数对调 $Q$ -Yb<sup>3+</sup>:YAG 激光器性能的影响,并依据理论结果对激光器进行了优化,设计了窄脉冲宽度、高峰值功率和脉冲能量的调 $Q$ -Yb<sup>3+</sup>:YAG 微晶片激光器。该激光器的脉冲宽度 $\Delta t = 199\text{ ps}$ ,峰值功率 $P_m = 1.04\text{ MW}$ ,输出脉冲能量 $E = 0.21\text{ mJ}$ 。

## 参 考 文 献:

- [1] Kalisky Y. Cr<sup>4+</sup>-doped crystals: Their use as lasers and passive  $Q$ -switches [J]. *Prog. Quant. Electron.*, 2004, 28(5): 249-303.
- [2] Brian C, Jonathan L, Tom D, et al. Optical triggering of a  $Q$ -switched Nd:YAG laser via transverse bleaching of a Cr:YAG saturable absorber [J]. *Appl. Opt.*, 2009, 48(31):6008-6014.
- [3] Lee K, Kim Y, Gang J S, et al. Comparison of CW pumping and quasi-CW pumping for a passively  $Q$ -switched Nd:YAG laser [J]. *J. Korean Phys. Soc.*, 2010, 57(2):359-363.
- [4] Lee K, Lee H C, Cho J Y, et al. Passively  $Q$ -switched, high peak power Nd:YAG laser pumped by QCW diode laser [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2012, 44(7):2053-2057.
- [5] Fan T Y. Heat generation in Nd:YAG and Yb:YAG [J]. *IEEE J. Quant. Elect.*, 1993, 29(6):1457-1459.
- [6] Lacovara P, Choi H K, Wang C A, et al. Room-temperature diode-pumped Yb:YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 1991, 16(14):1089-1091.
- [7] Jan S, Tomas K, Helena J, et al. Yb:YAG/Cr:YAG composite crystal with external and microchip resonator [J]. *SPIE*, 2012:8235-8239.
- [8] Zhuang W Z, Chen Y F, Su K W, et al. Performance enhancement of sub-nanosecond diode-pumped passively  $Q$ -switched Yb:YAG microchip laser with diamond surface cooling [J]. *Opt. Exp.*, 2012, 20(20):22602-22608.

- [ 9 ] Cheng Y, Dong J, Ren Y Y. Enhanced performance of Cr, Yb: YAG microchip laser by bonding Yb: YAG crystal [J]. *Opt. Exp.*, 2012, 20(22):24803-24812.
- [ 10 ] Li G Q, Zhao S Z, Zhao H M, *et al.* Rate equations and solutions of a laser-diode end-pumped passively Q-switched intracavity doubling laser by taking into account intracavity laser spatial distribution [J]. *Opt. Commun.*, 2004, 234(1-6): 321-328.
- [ 11 ] Lu M, Chatwin C R, Young R C D, *et al.* Numerical simulation of a CW-pumped Cr: YAG passively Q-switched Yb: YAG pulsed laser [J]. *Opt. Lasers Eng.*, 2009, 47(6):617-621.
- [ 12 ] Deloach L D, Payne S A, Chase L L, *et al.* Evaluation of and emission properties of Yb<sup>3+</sup> doped crystals for laser applications [J]. *IEEE J. Quant. Elect.*, 1993, 29(4):1179-1191.
- [ 13 ] Burshtein Z, Blau P, Kalisky Y, *et al.* Excited-state absorption studies of Cr<sup>4+</sup> ions in several garnet host crystals [J]. *IEEE J. Quant. Elect.*, 1998, 34(2):292-299.

## 欢迎订阅 欢迎投稿 《光学 精密工程》(月刊)

《光学 精密工程》是中国仪器仪表学会一级学术期刊,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所主办,科学出版社出版。由国内外著名科学家任顾问,陈星旦院士任编委会主任,青年科学家曹健林博士担任主编。

《光学 精密工程》坚持学术品位,集中报道国内外现代应用光学、光学工程技术、光电工程和精密机械、光学材料、微纳科学与技术、医用光学、先进加工制造技术、信息与控制、计算机应用以及有关交叉学科等方面的最新理论研究、科研成果和新技术。本刊自 2007 年起只刊发国家重大科技项目和国家自然科学基金项目及各省、部委基金项目资助的论文。《光学 精密工程》竭诚欢迎广大作者踊跃投稿。

### 本刊获奖:

中国精品科技期刊  
中国权威学术期刊(RCCSE)  
中国科学技术协会择优支持期刊  
中国百种杰出学术期刊  
第一届北方优秀期刊  
吉林省精品期刊

### 国际检索源:

《美国工程索引》(EI Compendex)  
《美国化学文摘》(CA)  
《英国 INSPEC》(SA)  
《俄罗斯文摘杂志》(PJK)  
《美国剑桥科学文摘》(CSA)

### 国内检索源:

中国科技论文统计源期刊  
中国学术期刊(光盘版)  
万方数据系统数字化期刊网  
台湾华艺中文电子期刊网  
中国科学引文数据库  
中国物理文献数据库  
中国期刊网  
中文核心期刊要目总览(北大)  
中国学术期刊综合评价数据库  
中国科学期刊全文数据库  
中国光学文献数据库  
中国学术期刊文摘  
中国物理文摘

地 址:长春市东南湖大路 3888 号

《光学 精密工程》编辑部

邮 编:130033

电 话:(0431)86176855

传 真:(0431)84613409

E-mail: gxjmgc@ciomp. ac. cn

gxjmgc@vip. sina. com

http://www. eope. net

国内邮发代号: 12-166

国外发行代号: 4803BM

定 价: 50.00 元/期

帐 户: 中国科学院长春光学  
精密机械与物理研究所

银 行: 建行长春朝阳支行

帐 号: 22001360300054506148