

文章编号: 0253-2239(2005)08-1072-5

激光二极管抽运 Tm, Ho: YLF 晶体声光调 Q 激光器*

张新陆^{1,2} 鞠有伦¹ 王月珠¹

(¹ 哈尔滨工业大学光电技术研究所可调谐激光国家重点实验室, 哈尔滨 150001)
(² 哈尔滨工程大学理学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 对激光二极管端面抽运 Tm, Ho: YLF 晶体声光调 Q 激光器的激光特性进行了研究。根据粒子跃迁和能量传递过程, 在考虑能级传递上转换的前提下, 建立了 Tm, Ho: YLF 脉冲激光器的速率方程, 得到了初始反转粒子数的解析表达式, 分析了能量传递上转换效应对激光上能级反转粒子数的影响。在室温下实现了 2 μm 波长激光的脉冲输出。实验上给出并分析了 Tm, Ho: YLF 脉冲激光器的平均输出功率、单脉冲能量和脉冲宽度随抽运功率以及声光 Q 开关调制频率的变化关系。在抽运功率为 2.8 W, 重复频率为 9 kHz 时, 获得了平均输出功率为 189 mW 的激光脉冲, 光-光转换效率为 6.8%。在重复频率为 1 kHz 时, 得到最大单脉冲能量为 65 μJ, 峰值功率为 0.17 kW。

关键词: 激光技术; 激光二极管抽运; Tm, Ho: YLF 晶体; 声光调 Q

中图分类号: O433.5 文献标识码: A

Laser-Diode-Pumped Acoustooptic Q-Switched Tm, Ho: YLF Laser

Zhang Xinlu^{1,2} Ju Youlun¹ Wang Yuezhu¹

(¹ National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)
(² School of Science, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

Abstract: A laser-diode pumped actively Q-switched Tm, Ho: YLF laser is reported. The rate equation of Tm, Ho: YLF Q-switched laser is given including the energy transfer upconversion effect and the analytical expression of initial number of reversion particles is obtained. The influence of energy transfer upconversion effect on the number of upper level reversion particles is analyzed. At room temperature, 2 μm wavelength pulse output is realized. Average output power, single pulse energy and pulse width are measured at different pump power and different repetition rates. The average output power of 189 mW and a optical-optical efficiency of 6.8% are obtained at the repetition rate of 9 kHz and the pump power of 2.8 W. The maximum single pulse energy of 65 μJ and peak power of 0.17kW are obtained at the repetition rate of 1 kHz.

Key words: laser technique; laser-diode pumped; Tm, Ho: YLF crystal; acoustooptic Q-switched

1 引 言

激光二极管抽运的固体激光器(DPSSL)具有高效率、紧凑、长寿命、稳定、光束质量好等优点,在军事、工业、医学和科研等领域已经得到了广泛应用。处于人眼安全 2 μm 波长激光二极管抽运的固体激光器尤其受到人们的关注^[1~8]。这种激光器被认为是应用于医学治疗,人眼安全远程探测系统,如激光测距机、相干多普勒测风雷达、差分吸收雷达(DIAL)系统等的理想光源。并且,它还是获得 3~5 μm 波段光学参变振荡器激光输出的理想抽运源。

相比于 Nd:YAG 晶体的 230 μs 荧光寿命,2 μm 激光器具有更长的荧光寿命,其荧光寿命为 12 ms,因此,2 μm 激光器更适合于调 Q 方式运行^[8]。激光二极管抽运 2 μm 固体激光器的增益晶体在激发的过程中存在着能量传递上转换效应,该效应减小了激光上能级的有效寿命,因此减小了激光晶体存储能量的能力。即便如此,它的上能级寿命也要比其它激光器长得多,它更具有实现高能调 Q 激光器的潜力^[8]。我们曾报道了液氮致冷条件下的 Tm, Ho: YLF 激光器的激光输出特性^[9]以及以钛宝石激

* 哈尔滨工程大学基础研究基金(HEUF04014)资助课题。

作者简介: 张新陆(1972~),黑龙江伊春市人,博士,副教授,主要从事固体激光器设计与非线性光学技术研究。

E-mail: zhangxinlu1@sohu.com

收稿日期: 2004-10-08; 收到修改稿日期: 2004-11-29

光器作为抽运源的 Tm, Ho: YLF 微片激光器的激光特性^[10], 并且在理论上对连续 Tm, Ho: YLF 激光器做了详尽的研究^[11, 12]。本文在考虑了能量传递上转换效应的前提下, 建立了 Tm, Ho: YLF 调 Q 激光器的速率方程, 分析了能量传递上转换的影响, 并在实验上对 Tm, Ho: YLF 调 Q 激光器进行了较为详尽的研究。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示。谐振腔采用平-凹腔结构, 输出耦合镜的曲率半径为 100 mm, 激光腔的长度约为 100 mm。抽运源是美国相干公司的输出功率为 3 W 的激光二极管, 其型号为 S-79-3000C-200-H/L, 其中心发射波长为 792 nm。利用温控系统将发射波长调到 Tm, Ho: YLF 晶体的最强吸收峰 792 nm 处, 从而最大限度地利用抽运光。抽运光首先经焦距为 8 mm 的球面透镜进行准直, 然后用焦距为 100 mm 的柱透镜对发散角大的方向压缩光束的发散角, 再用焦距为 50 mm 的消色差透镜将抽运光束聚焦于增益晶体内。光学系统总的传输效率可达 91% 以上。实验所用的晶体为 Tm, Ho: YLF 晶体, 其中 Tm, Ho 的原子数分数分别为 6% 和 0.4%。晶体是沿 a 轴生长, $[100]$ 方向切割的, 晶体外形尺寸为 5 mm × 5 mm × 2.5 mm。激光二极管输出光的偏

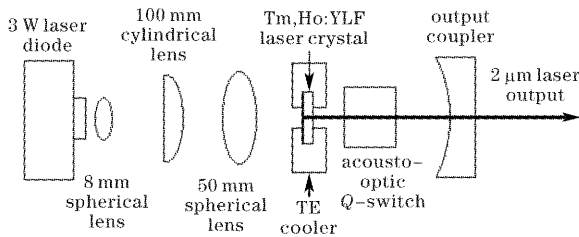


图 1 激光二极管抽运调 Q Tm, Ho: YLF 激光器
实验装置图

Fig. 1 The schematic diagram of laser-diode-pumped
Q-switched Tm, Ho: YLF laser

振方向与晶体的 c 轴平行, 这样抽运更加有效。晶

体的前后表面都经过抛光处理, 晶体前表面对 2 μm 高反, 反射率大于 99.9%, 同时对 792 nm 增透, 透射率在 85% 以上, 并把它作为激光谐振腔的一个后腔板。晶体的侧边用铝箔片包裹, 嵌入热电制冷的铜质热汇中, 热电制冷器的控温精度为 ±0.06 °C。所使用的 QSGSU-5/Q 型声光 Q 开关(中国电子科技集团公司第二十六研究所提供)的长度为 44 mm, 两个通光面镀有 2 μm 的增透膜, 衍射损耗为 85%, 调制重复频率 80 Hz ~ 10 kHz 可调, 中心频率为 27 MHz, 驱动电功率为 50 W, 电脉冲上升时间为 8 ns, 下降时间小于 80 ns。为了减小插入损耗, 声光调 Q 器件紧靠 Tm, Ho: YLF 晶体。实验中用中国科学院物理研究所的 LPE-1B 型功率计测量激光输出平均功率 P_{av} , 用美国 Tektronix 公司的 300 MHz 的 TDS3032B 型存储示波器配合响应时间为 1 ns 的光导钨化汞铬探测器观测脉冲宽度 t_p 和脉冲重复频率 f , 单脉冲能量 E 和脉冲峰值功率 P_{peak} 可由公式 $E = P_{av}/f$ 和 $P_{peak} = E/t_p$ 算出。

3 调 Q 激光器的速率方程理论

由于 Tm 离子的 3F_4 能级与 Ho 离子的 5I_7 能级能量传递的时间一般小于 20 μs, 故可以将他们看成一个耦合能级, 设耦合能级的粒子数密度为 N_u , 能级寿命为 τ , C 为能量传递上转换系数。为了分析 Q 开关打开之前的反转粒子的积累过程, 在考虑了能级传递上转换的前提下, 建立了以下速率方程:

$$\frac{dN_u}{dt} = R_p - \frac{N_u}{\tau} - CN_u^2, \quad (1)$$

其中 R_p 为抽运速率, 可以表示为

$$R_p = \frac{\eta_p P_{abs}}{h\nu_p} \frac{1}{\pi\omega_p^2 l}, \quad (2)$$

式中 η_p 为量子效率, ν_p 为抽运光的频率, l 为激光晶体的长度, P_{abs} 为晶体所吸收的抽运功率, ω_p 为抽运光在晶体中的平均光斑半径。由 (1) 式、(2) 式可以得出耦合上能级粒子数密度随时间的变化关系:

$$N_u(t) = \frac{1}{B} \left[A \frac{(1 + BN_f + A) + (1 + BN_f - A)\exp(-At/\tau)}{(1 + BN_f + A) - (1 + BN_f - A)\exp(-At/\tau)} - 1 \right], \quad (3)$$

$$A = \sqrt{1 + 4\tau^2 CR_p}, \quad (4)$$

$$B = 2\tau C, \quad (5)$$

N_f 为脉冲形成之后耦合上能级剩余的粒子数密度, 对重复频率为 f 的调 Q 激光器而言, 在 Q 开关打开前其耦合上能级的最大反转粒子数密度可以写为

$$N_{max} = \frac{1}{B} \left[A \frac{(1 + BN_f + A) + (1 + BN_f - A)\exp(-A/\tau f)}{(1 + BN_f + A) - (1 + BN_f - A)\exp(-A/\tau f)} - 1 \right], \quad (6)$$

设 f_{Ho} 为耦合上能级中 Ho 离子所占的粒子数分数, f_u, f_l 分别为 Ho 离子的 5I_7 和 5I_8 能级中对激光起作用的粒子数分数。与 Tm 离子和 Ho 离子之间的能量传递时间相比, 脉冲形成时间短得多, 可以认为耦合上能级中只有 Ho 离子对脉冲的形成起作用, 因此可以得到频率为 f 时 Tm, Ho: YLF 调 Q 激光器的初始反转粒子数 ΔN_i :

$$\Delta N_i = \frac{f_{\text{Ho}}\gamma}{B} \left[A \frac{(1 + BN_i + A) + (1 + BN_i - A)\exp(-A/\tau f)}{(1 + BN_i + A) - (1 + BN_i - A)\exp(-A/\tau f)} - 1 \right] - f_l N_{\text{Ho}}, \quad (7)$$

其中 N_{Ho} 为 Tm, Ho: YLF 晶体中 Ho 离子的掺杂原子数分数, $\gamma = f_l + f_u$ 为准三能级粒子数反转因子。令 ΔN_i 和 ΔN_t 为最终反转粒子数密度和阈值反转粒子数密度 $\Delta N_t = \frac{\delta}{2\alpha}, \Delta N_i = \frac{1}{2\alpha} \left[\ln\left(\frac{1}{1-T}\right) + \delta \right], \sigma$ 为 Ho 离子的受激发射截面, T 为输出耦合镜的透过率, δ 为输出损耗以外的其它损耗。由此, (3) 式中的 N_i 可以写为

$$N_i = (\Delta N_i + f_l N_{\text{Ho}}) / (\gamma f_{\text{Ho}}), \quad (8)$$

由(7)式可以看出, 声光 Q 开关的调制频率越高, 激光器的初始反转粒子数越小; 而能量传递上转换对激光器的影响随声光 Q 开关调制频率的降低而增加, 由于能量传递上转换的加剧, 不但使上能级的有效寿命减小, 还导致激光器热损耗的增加, 严重影响了激光器的效率, 因此, 在相同的抽运功率下, 若要得到较高单脉冲能量, 必然存在一个最佳的 Q 开关调制频率。

由声光调 Q 激光器的基本原理^[13], 当脉冲重复频率为 f 时, 脉冲激光器的平均输出功率 P_{av} , 单脉冲能量 E , 脉冲宽度 t_p 分别可以写为

$$P_{\text{av}} = \frac{Vf \ln[1/(1-T)]}{\gamma \{ \ln[1/(1-T)] + L \}} (\Delta N_i - \Delta N_t) h\nu_l, \quad (9)$$

$$E = \frac{V \ln[1/(1-T)]}{\gamma \{ \ln[1/(1-T)] + L \}} (\Delta N_i - \Delta N_t) h\nu_l, \quad (10)$$

$$t_p = \frac{2L_{\text{eff}}}{c \{ \ln[1/(1-T)] + L \}} \frac{\Delta N_i - \Delta N_t}{\Delta N_i - \Delta N_t [1 + \ln(\Delta N_i/\Delta N_t)]}, \quad (11)$$

式中 L_{eff} 为激光谐振腔的有效光学长度, ν_l 为输出激光的频率, c 为真空中的光速, V 为输出激光在晶体中的模体积。以上三式明确地给出了能量传递上转换和声光 Q 开关的调制频率对平均输出功率、单脉冲能量和脉冲宽度的影响。

4 实验结果

实验中选用了不同透过率 (1.26%, 2%, 2.97%, 4.75%, 6%, 10%) 的输出耦合镜。但用透过率为 2% 的输出耦合镜取得了最佳输出特性, 因此下面给出的实验结果只针对于透过率为 2% 的输出耦合镜。图 2 给出了激光器在连续运行和不同重复频率下的平均输出功率和抽运功率的变化关系。从图中可以看出, 在相同的抽运功率下, 重复频率越高, 平均输出功率也就越高, 在连续运转时, 输出功率最高。并且由图 2 还可以看出, 当抽运功率达到一定值时, 平均输出功率与抽运功率不再是线性关系, 即由于晶体的热效应导致输出功率出现了饱和, 而且重复频率越低, 输出功率的饱和现象出现得越早。图 3 为在不同的重复频率下, 脉冲能量随抽运功率的变化关系。由图可见, 在某一重复频率下, 抽

运功率越大, 单脉冲能量越高; 当抽运功率一定时, 重复频率越低, 单脉冲能量越高。

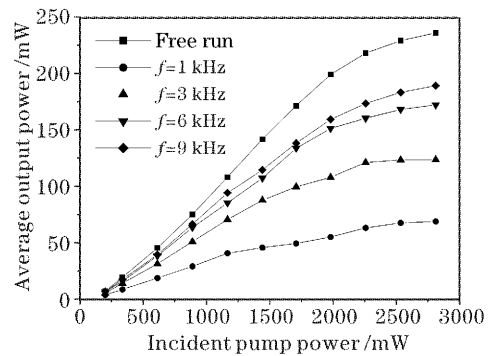


图 2 不同重复频率下平均输出功率与抽运功率的关系

Fig. 2 Average output power versus pump power at different repetition rates

图 4 给出了在不同的重复频率下, 脉冲宽度随抽运功率的变化关系曲线。由图可见, 当重复频率一定时, 脉冲宽度随抽运功率的增加而逐渐减小, 这种变化关系随着重复频率的增加而越来越明显, 但当抽运功率增加到一定程度, 随着抽运功率的增加, 脉冲宽度的减小趋缓。图 5 为当抽运功率为 1.4 W 时, 脉冲宽度随脉冲重复频率的变化关系曲线。由

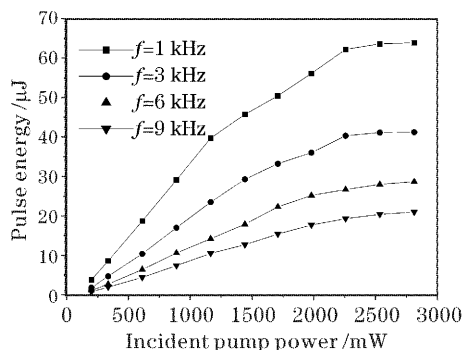


图 3 不同重复频率下单脉冲能量与抽运功率的关系

Fig. 3 Single pulse energy versus pump power at different repetition rates

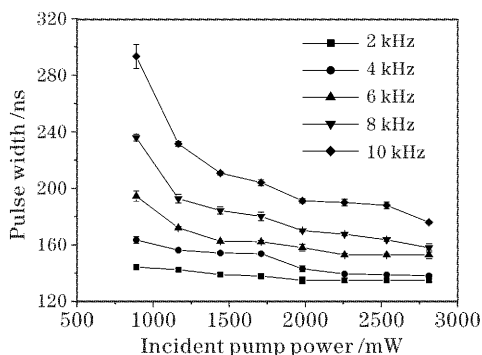


图 4 不同重复频率下脉冲宽度与抽运功率的关系

Fig. 4 Pulse width versus pump power at different repetition rates

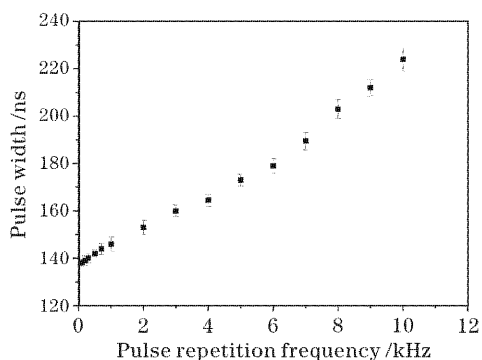


图 5 抽运功率为 1.4 W 时脉冲宽度与重复频率的关系

Fig. 5 Pulse width versus repetition rates at pump power of 1.4 W

图可见，脉冲宽度随重复频率的增加而增大。

利用示波器对不同抽运功率以及不同调制频率的调 Q 脉冲波形进行观察，发现当抽运功率较低时，输出略有不稳，而对于较高的抽运功率，激光脉冲的输出非常稳定。图 6 所示的是当重复频率为 1.5 kHz，抽运功率为 1.4 W 时，在示波器上观测的脉冲波形，脉冲的宽度为 138 ns。图 7 所示为相同条件下示波器的脉冲序列。

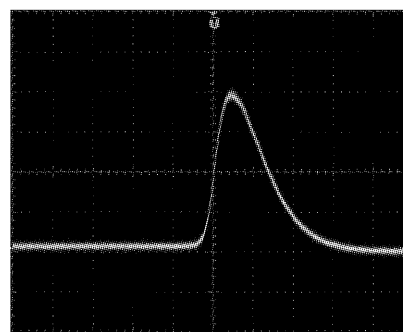


图 6 示波器显示的脉冲波形

Fig. 6 Pulse profile on the oscilloscope

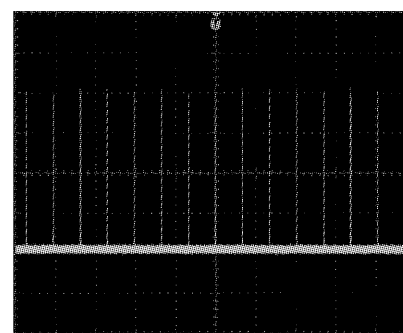


图 7 示波器显示的脉冲序列

Fig. 7 Pulse train on the oscilloscope

图 8 给出了抽运功率为 1.7 W 时，单脉冲能量随脉冲重复频率的变化关系。由实验结果可以看出，在 1 kHz 附近单脉冲能量最大。正如 (7) 式和 (10) 式所预示的那样，重复频率较高时，由于脉冲之间没有足够的时间使激光上能级的反转粒子数达到最大值，使得净增益减小，导致激光输出的单脉冲能量下降，同时也增大了脉冲宽度。如果重复频率过低，那么除了自发辐射跃迁耗掉部分上能级反转粒

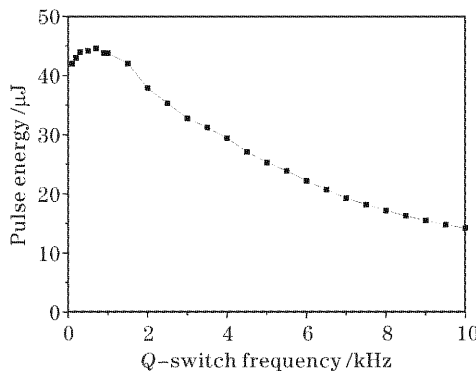


图 8 抽运功率为 1.7 W 时单脉冲能量随重复频率的变化关系

Fig. 8 Single pulse energy as a function of repetition rate at 1.7 W pump power

子外,能量传递上转换效应也比高重复频率运转时要高,同样也耗费掉了部分上能级反转粒子,最终使得热损耗增加,导致单脉冲输出能量的下降。

5 结 论

在考虑能级传递上转换的前提下,建立了 Tm, Ho: YLF 脉冲激光器的速率方程,分析了能量传递上转换效应对脉冲激光器输出特性的影响。实验上给出并分析了 Tm, Ho: YLF 脉冲激光器的平均输出功率、单脉冲能量和脉冲宽度随抽运功率以及声光 Q 开关调制频率的变化关系。在抽运功率为 2.8 W, 重复频率为 9 kHz 时,获得了平均功率为 189 mW 的激光脉冲,光-光转换效率为 6.8%。在重复频率为 1 kHz 时,得到最大单脉冲能量为 65 μ J, 峰值功率为 0.17 kW。

参 考 文 献

- 1 Norman P. Barnes, Waldo J. Rodriguez, Brian M. Walsh. Ho, Tm: YLF laser amplifiers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1996, **13**(12): 2872~2882
- 2 Brian M. Walsh, Norman P. Barnes, Baldassare D. Bartolo. On the distribution of energy between the Tm 3F_4 and Ho 5I_7 manifolds in Tm-sensitized Ho luminescence [J]. *J. Luminescence*, 1997, **75**: 89~98
- 3 Brian M. Walsh, Norman P. Barnes, Baldassare D. Bartolo. The temperature dependence of energy transfer between the Tm 3F_4 and Ho 5I_7 manifolds in Tm-sensitized Ho luminescence in YAG and YLF[J]. *J. Luminescence*, 2000, **90**: 39~48
- 4 Gilbert L. Bourdet, Guillaume Lescroart. Theoretical modeling and design of a Tm, Ho: YLiF₄ microchip laser[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(15): 3275~3281
- 5 Gunnar Rustad, Knut Stenersen. Modeling of laser-pumped Tm and Ho lasers accounting for upconversion and ground-state depletion[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1996, **32**(9): 1645~1655
- 6 Chang J. Lee, Gooywan Han, Norman P. Barnes. Ho: Tm lasers II: experiments[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1996, **32**(1): 104~111
- 7 Jun Izawa, Hayato Nakajima, Hiroshi Hara *et al.*. Comparison of lasing performance of Tm, Ho: YLF lasers by use of single and double cavities[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(15): 1418~1421
- 8 B. T. McGuckin, R. T. Menzies, H. Hemmati. Efficient energy extraction from a diode-pumped Q-switched Tm, Ho: YLiF₄ laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**(23): 2926~2928
- 9 Yuezhu Wang, Xinlu Zhang, Baoquan Yao *et al.*. Performance of a liquid-nitrogen-cooled CW Tm, Ho: YLF laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(5): 281~282
- 10 Zhang Xinlu, Wang Yuezhu, Yao Baoquan *et al.*. Performance of end-pumped Tm, Ho: YLF microchip laser[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(1): 9~12 (in Chinese)
- 张新陆, 王月珠, 姚宝权等. 纵向抽运 Tm, Ho: YLF 微片激光器激光特性的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(1): 9~12
- 11 Zhang Xinlu, Wang Yuezhu, Ju Youlun. Influence of energy-transfer up-conversion on Tm, Ho: YLF laser threshold[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(1): 117~122 (in Chinese)
- 张新陆, 王月珠, 鞠有伦. 能量传递上转换对 Tm, Ho: YLF 激光器阈值的影响[J]. *物理学报*, 2005, **54**(1): 117~122
- 12 Zhang Xinlu, Wang Yuezhu, Yao Baoquan *et al.*. Theoretical investigation of a laser diode-pumped quasi-three-level 2 μ m (Tm, Ho): YLF laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6): 787~792 (in Chinese)
- 张新陆, 王月珠, 姚宝权等. 激光二极管抽运的准三能级 2 μ m (Tm, Ho): YLF 激光器的理论研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(6): 787~792
- 13 John J. Degnan. Theory of the optimally coupled Q-switched laser[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1989, **25**(2): 214~220