

文章编号: 1001-3806(2006)05-0501-03

## 低能量抽运的增益开关型 $\text{Cr}^{4+}$ $\text{MgSO}_4$ 激光器

王加贤, 庄鑫巍, 张凤娟

(华侨大学 信息科学与工程学院, 泉州 362021)

**摘要:** 为了研究低能量的  $1.06\mu\text{m}$  调  $Q$  激光脉冲抽运的增益开关型  $\text{Cr}^{4+}$   $\text{MgSO}_4$  激光器, 对该激光器的速率方程进行数值求解, 并选取合适的初始条件, 得到输出的  $1.22\mu\text{m}$  激光脉冲的时间波形、脉冲的建立时间和脉冲宽度与抽运能量的关系, 理论计算与实验研究结果基本符合。当抽运激光脉冲的能量为  $45\text{mJ}$ 、脉冲宽度为  $30\text{ns}$  时, 激光器输出的  $1.22\mu\text{m}$  激光脉冲的能量和脉宽分别是  $7\text{mJ}$  和  $8.2\text{ns}$ 。输出激光的脉冲宽度是抽运激光的脉冲宽度的近  $1/4$ , 光-光转换效率为  $15.5\%$ 。数值计算和实验研究结果均表明, 在低能量抽运情况下, 激光脉冲的建立时间和脉冲宽度均随着抽运能量的增加而减小。

**关键词:** 激光技术; 增益开关;  $\text{Cr}^{4+}$   $\text{MgSO}_4$  激光器; 数值计算; 调  $Q$  激光脉冲

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A

### Ga in-switched $\text{Cr}^{4+}$ $\text{MgSO}_4$ laser with low pump energy

WANG Jia-xian, ZHUANG Xin-wei, ZHANG Feng-juan

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** A gain-switched  $\text{Cr}^{4+}$   $\text{MgSO}_4$  laser pumped by a  $1.06\mu\text{m}$   $Q$ -switched laser pulse with lower energy is investigated. By numerically solving the rate equations and choosing the suitable initial conditions, the temporal profile of the  $1.22\mu\text{m}$  laser pulse is obtained. Simultaneously the relations of the buildup time and the pulse-duration of the  $1.22\mu\text{m}$  laser with the pump energy are achieved respectively and the theoretical and experimental results basically coincide with each other. When the energy and the pulse-duration of the pump laser pulse are  $45\text{mJ}$  and  $30\text{ns}$  respectively, a  $1.22\mu\text{m}$  laser pulse is achieved with the energy of  $7\text{mJ}$  and the pulse-duration of  $8.2\text{ns}$ . The pulse-duration of the output laser is nearly a quarter of that of the pump laser and the transfer efficiency is  $15.5\%$ . The numerical calculation and the experimental results show that both the buildup time and pulse-duration decreased as the pump energy increasing.

**Key words:** laser technique; gain-switch;  $\text{Cr}^{4+}$   $\text{MgSO}_4$  laser; numerical calculation;  $Q$ -switched laser pulse

## 引 言

掺四价铬离子镁橄榄石 ( $\text{Cr}^{4+}$   $\text{MgSO}_4$ ) 是 1988 年出现的重要激光晶体<sup>[1]</sup>, 它的光谱覆盖范围很宽, 约为  $680\text{nm} \sim 1400\text{nm}$ , 现已实现激光调谐范围为  $1130\text{nm} \sim 1367\text{nm}$ 。十几年来,  $\text{Cr}^{4+}$   $\text{MgSO}_4$  激光器已实现用闪光灯、固体激光器、LD 抽运的连续、脉冲、调  $Q$  及自锁模运转<sup>[2~4]</sup>。作者研究低能量的  $1.06\mu\text{m}$  调  $Q$  激光脉冲抽运的  $\text{Cr}^{4+}$   $\text{MgSO}_4$  激光器的增益开关运转。当抽运光脉冲的能量为  $45\text{mJ}$ 、脉宽为  $30\text{ns}$  时, 输出激光的中心波长为  $1220\text{nm}$ 、能量为  $7\text{mJ}$ 、脉宽为  $8.2\text{ns}$ 。输出激光脉冲比抽运激光脉冲压缩了近 4 倍,

而且光-光转换效率达到  $15.5\%$ , 同时达到这两个指标, 是该类激光器目前比较好的实验结果。纳秒激光脉冲抽运的增益开关型激光器, 其激光形成的动态性能不同于主动或被动调  $Q$  激光器, 近年来, 国内外对它的时间特性作了一些理论和实验研究<sup>[5~7]</sup>, 特别是 ZHANG 推导出计算脉冲建立时间和脉冲宽度的近似式<sup>[8]</sup>。作者采取对激光器速率方程直接进行数值求解的方法, 得到激光脉冲的时间波形、以及激光脉冲的建立时间和脉冲宽度与抽运能量之间的关系, 数值计算结果与实验结果基本相符。

## 1 理论研究

### 1.1 增益开关激光器的速率方程

对于短脉冲抽运的固体激光器, 由于增益介质的激光上能级寿命 (微量量级) 远大于抽运脉冲的时间宽度 (纳秒量级), 所以在抽运期间反转粒子数密度可迅速增加, 抽运结束时反转粒子数密度达到最大值。此后, 由初始光子产生的受激辐射快速建立激光振荡,

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目 (A0310022); 国务院侨办科研基金资助项目 (05QR11)

作者简介: 王加贤 (1955-), 男, 教授, 博士, 主要从事固体激光技术与器件的研究。

E-mail: wangjx@hqu.edu.cn

收稿日期: 2005-09-13; 收到修改稿日期: 2005-12-27

并输出激光脉冲。增益开关型激光器的特点是,在抽运和激光振荡的整个过程中,腔的损耗和腔的  $Q$  值保持不变。

设作为抽运用的 Nd:YAG 调  $Q$  激光器输出的光脉冲波形近似为高斯型,其时间关系为:

$$P(t) = P_0 \exp\left[-\frac{2 \ln 2 \cdot t^2}{\tau_p^2}\right] \quad (1)$$

式中,  $\tau_p$  为抽运光脉冲的时间宽度 (FWHM),  $P_0$  为峰值功率。如果用  $E$  表示抽运脉冲能量,  $S$  表示抽运光束在增益介质中的截面积 (视为常数),  $\sigma_a$  表示晶体对抽运光的吸收截面,  $h\nu_p$  表示抽运光子能量, 则可以得到抽运速率为:

$$w(t) = \frac{E\sigma_a}{\tau_p S h\nu_p} \exp\left[-\frac{2 \ln 2 \cdot t^2}{\tau_p^2}\right] \quad (2)$$

抽运速率与抽运光脉冲的瞬时功率成正比, 所以增益开关型  $\text{Cr}^{4+} \text{MgSO}_4$  激光器的高储能 (高粒子数反转) 可以在极短的时间 (纳秒量级) 内获得。用  $N_0$  表示晶体中所掺的  $\text{Cr}^{4+}$  粒子数密度,  $c$  表示光速,  $\sigma_e$  表示晶体的发射截面,  $\tau_f$  表示激光上能级寿命,  $L_0$  表示晶体长度,  $L$  表示激光器腔长,  $\tau_c$  表示腔内光子寿命, 并且考虑到晶体中的  $\text{Cr}^{4+}$  呈四能级结构及忽略自发辐射, 则可以得到增益介质的反转粒子数密度  $N(t)$  和腔内光子数密度  $n(t)$  的速率方程为:

$$\frac{dN(t)}{dt} = w(t) [N_0 - N(t)] - c\sigma_e n(t)N(t) - \frac{N(t)}{\tau_f} \quad (3)$$

$$\frac{dn(t)}{dt} = c\sigma_e n(t)N(t) \frac{L_0}{L} - \frac{n(t)}{\tau_c} \quad (4)$$

在抽运的前半阶段 ( $t < \tau_p$ ), 可以忽略受激发射和自发发射, 这样 (3) 式简化为:

$$\frac{dN(t)}{dt} = w(t) [N_0 - N(t)] \quad (5)$$

把 (2) 式代入 (5) 式后积分, 可得到在抽运脉冲峰值时刻  $t_p$  的反转粒子数密度为:

$$N_i = N_0 \left\{ 1 - \exp\left[-\int_0^{t_p} w(t) dt\right] \right\} \quad (6)$$

把 (2) 式代入 (3) 式后, 采用四阶 Rung-Kutta 法对 (3) 式和 (4) 式进行数值求解, 就可以得到腔内光子数密度  $n(t)$  随时间的变化规律, 即输出激光的时间波形。求数值解时, 为了方便起见, 把抽运脉冲峰值时刻  $t_p$  作为时间起点, 把由 (6) 式解出的  $t_p$  时刻的反转粒子数密度  $N_i$  作为初始条件, 同时忽略初始时刻的光子数, 即取  $N(0) = N_i$ ,  $n(0) = 0$ 。

## 1.2 数值计算结果

数值计算中有关参数的取值如下: 晶体的吸收截面  $\sigma_a = 2.0 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ , 发射截面  $\sigma_e = 1.9 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ ,

激光上能级寿命  $\tau_f = 3.6 \mu\text{s}^{[9]}$ ; 晶体长度  $L_0 = 12 \text{ mm}$ , 晶体对  $1.06 \mu\text{m}$  激光的透过率  $T_0 = 40\%$ , 根据  $T_0 = \exp(-N_0 \sigma_a L_0)$ , 得到晶体中所掺的  $\text{Cr}^{4+}$  粒子数密度  $N_0 = 3.82 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ; 抽运光脉冲宽度  $\tau_p = 30 \text{ ns}$ , 抽运光子能量  $h\nu_p = 1.87 \times 10^{-19} \text{ J}$ , 晶体中的光束截面积约为  $S = 0.03 \text{ cm}^2$ ; 激光器腔长  $L = 14 \text{ cm}$ , 单程损耗估计为  $20\%$ , 由此得到腔内光子寿命  $\tau_c \approx 2.33 \text{ ns}$ 。

定义输出激光脉冲峰值相对于抽运光脉冲峰值的延迟时间为激光脉冲的建立时间  $t_b^{[8]}$ , 激光脉冲宽度  $\Delta\tau$  为半峰全宽。抽运能量为  $45 \text{ mJ}$  时, 数值求解得到的  $1.22 \mu\text{m}$  激光脉冲波形如图 1 所示, 数值计算得到的脉冲建立时间  $t_b = 38 \text{ ns}$ , 脉冲宽度  $\Delta\tau = 6.5 \text{ ns}$ 。

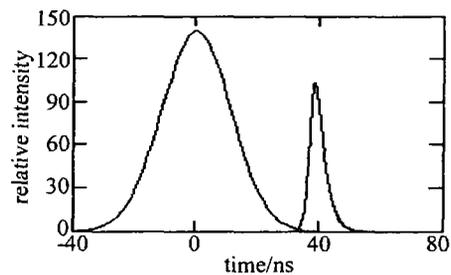


Fig 1 Theoretical temporal profile of pump laser pulse (left) and emitted laser pulse (right)

图 2 和图 3 分别是采用数值计算得到的激光脉冲

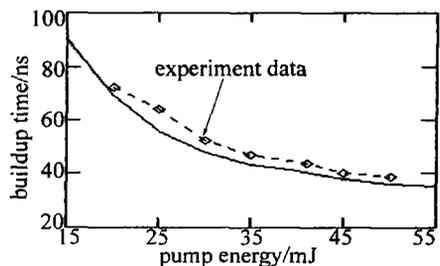


Fig 2 Laser buildup time vs pump energy

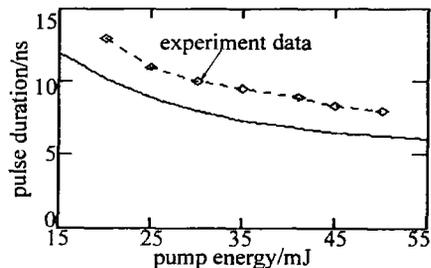


Fig 3 Pulse-duration vs pump energy

建立时间和脉冲宽度与抽运能量的关系曲线。可以看出, 二者都是随着抽运能量的增加而减少, 但这种关系并不是线性的。上述结果的解释是: 抽运能量增加使得初始时刻的反转粒子数密度增加, 所以激光脉冲的形成就加快, 同时脉冲的前后沿变陡, 脉冲变窄。

## 2 实验研究

### 2.1 实验装置

$\text{Cr}^{4+} \text{MgSO}_4$  激光器的实验装置如图 4 所示: 重

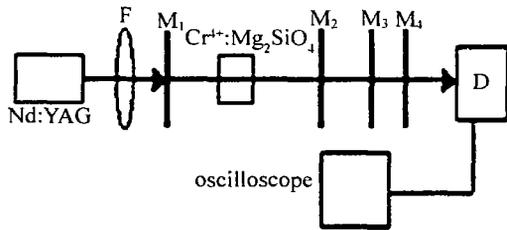


Fig 4 Experimental setup for  $\text{Cr}^{4+} \text{MgSO}_4$  laser

复频率 1Hz 的 Nd:YAG 调 Q 激光器作为抽运源, 激光脉冲的能量可调, 脉冲宽度近似为 30ns;  $\text{Cr}^{4+} \text{MgSO}_4$  激光器采用平平腔结构, 腔长 14cm, 输出镜  $M_2$  对 1.06 $\mu\text{m}$  激光高透、对 1.22 $\mu\text{m}$  激光的透过率为 15%; 长度 12mm、对 1.06 $\mu\text{m}$  激光透过率 40% 的  $\text{Cr}^{4+} \text{MgSO}_4$  晶体放在热沉板上, 通循环水冷却;  $M_3, M_4$  是对 1.06 $\mu\text{m}$  激光高反、对 1.22 $\mu\text{m}$  激光高透的滤光片, 只插入一块滤光片时仍有少量的 1.06 $\mu\text{m}$  激光透过, 插入两块滤光片时可完全滤去 1.06 $\mu\text{m}$  激光; F 是焦距 190mm 的聚焦透镜, 把抽运光束聚焦在晶体中心附近。用 InGaAs P-N 光电二极管 (G8376-05 型) 构成的探测器 D 接收激光, 并输入到 300MHz 数字存储示波器 (IDS3032B 型) 上存储和显示; 用精度为 10 $\mu\text{J}$  的激光能量计 (Molelectron 公司) 测量激光能量; 用多波段光栅单色仪 (WGD300-A 型) 测量激光光谱。

## 2.2 实验结果与分析

改变 1.06 $\mu\text{m}$  激光能量, 观察  $\text{Cr}^{4+} \text{MgSO}_4$  激光器在 20mJ, 25mJ, 30mJ, 35mJ, 40mJ, 45mJ, 50mJ 7 种抽运能量下的输出激光脉冲波形, 并测量相应的脉冲建立时间和脉冲宽度, 实验数据如图 2、图 3 所示。图 5a 和图 5b 分别是抽运能量为 25mJ 和 45mJ 时, 1.06 $\mu\text{m}$  和 1.22 $\mu\text{m}$  激光脉冲波形 (扫描时间 40ns/div, 示波器上显示的是相对强度, 并且随衰减的大小而变)。可以看出, 抽运能量为 25mJ 和 45mJ 时, 脉冲建立时间分别是 64ns 和 40ns, 脉冲宽度分别是 11ns 和 8.2ns。为了保证 Nd:YAG 被动调 Q 激光器输出单脉冲, 所以没有进行更高抽运能量的实验。

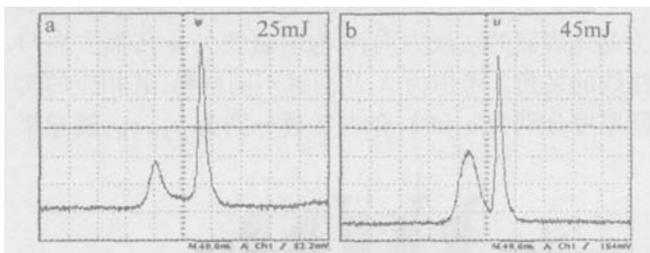


Fig 5 Emitted laser pulse and its pump pulse with pump energy of 25mJ and 45mJ

实验结果表明, 激光脉冲的建立时间和脉冲宽度都是随着抽运能量的增加而减小, 变化趋势与理论计算结果相似。

在本实验进行的低抽运能量范围内, 脉冲建立时间和脉冲宽度的实验值都略大于理论值。这主要是因为, 在理论计算中, 将晶体中的抽运光强和反转粒子数看成均匀分布。实际上, 增益介质的抽运是非均匀的, 横截面内中心处的抽运速率最大, 反转粒子数密度也最大; 离中心越远处, 反转粒子数密度越小。由于透镜对抽运光束的聚焦作用, 晶体中反转粒子数密度沿纵向的分布也是不均匀的, 靠近焦斑处, 抽运速率大, 反转粒子数密度大。因此, 晶体中不同部位的反转粒子数密度不同, 脉冲的建立时间就有较大的差别, 脉冲的衰减也略有不同。因为输出激光脉冲是晶体各个部位产生的许多脉冲的叠加, 所以实际上激光器的脉冲建立时间和脉冲宽度要比理论值大。

## 3 结论

从理论和实验上研究了低能量的 1.06 $\mu\text{m}$  调 Q 激光脉冲抽运的  $\text{Cr}^{4+} \text{MgSO}_4$  激光器的增益开关运转。对激光器速率方程进行数值求解, 得到激光脉冲的时间波形、脉冲建立时间和脉冲宽度与抽运能量的关系。当抽运光脉冲的能量为 45mJ、脉宽为 30ns 时, 输出激光脉冲能量为 7mJ、中心波长为 1220nm、脉冲宽度为 8.2ns, 比抽运光脉冲压缩了近 4 倍, 光-光转换效率达到 15.5%。数值计算和实验结果均表明, 激光脉冲建立时间和脉冲宽度都是随着抽运能量的增加而减小, 数值计算与实验结果基本符合。

## 参考文献

- [1] PETRICEVIC V, GAYEN S K, ALFANO R R *et al* Laser action in chromium-doped forsterite [J]. *Appl Phys Lett*, 1998, 52 (13): 1040~1042.
- [2] SONG D X, WU Y W, YANG Y *et al* Investigation of  $\text{Cr}^{4+} \text{MgSO}_4$  laser with high output energy [J]. *Laser Technology*, 1997, 21 (2): 101~103 (in Chinese).
- [3] RUAN Sh Ch, ZHU Q. Self-mode-locking femtosecond  $\text{Cr}^{4+}$  forsterite laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, 28 (10): 892~894 (in Chinese).
- [4] LU X, WISE F. Femtosecond  $\text{Cr}^{4+}$  forsterite laser diode pumped by a double-clad fiber [J]. *Opt Lett*, 1998, 23 (3): 129~131.
- [5] DINES GA, MOULTON P F. Performance of gain-switched  $\text{TiAl}_2\text{O}_3$  unstable resonator laser [J]. *Opt Lett*, 1990, 15 (8): 434~436.
- [6] XU B, LIN L H, OUYANG B *et al* Temporal characteristics of a gain-switched  $\text{Ti}^{3+} \text{Al}_2\text{O}_3$  laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 1993, 13 (5): 425~430 (in Chinese).
- [7] WU Q Y, XU B, ZHANG Zh Q *et al* Analysis of the temporal performance of a gain-switched  $\text{Ti}^{3+} \text{Al}_2\text{O}_3$  laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1998, 25 (8): 673~676 (in Chinese).
- [8] ZHANG G W. Temporal characteristics of the gain-switched tunable solid-state laser-theory [J]. *Laser Technology*, 1995, 19 (3): 129~134 (in Chinese).
- [9] VERDUN H R, MERKLE L. Evidence of excited-state absorption of pump radiation in the  $\text{Cr}^{4+}$  forsterite [A]. In *Advanced Solid State Lasers* [C]. Washington D C: Optical Society of America, 1991. 52~56.