

文章编号: 0258-7025(2001)06-0484-03

# LD 抽运 $\text{Cr}^{4+}$ : $\text{Nd}^{3+}$ : YAG 晶体获得 1.4 W 自调 Q 激光输出\*

董 俊 邓佩珍 张影华 刘玉璞 徐 军 陈 伟 陆雨田

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

**提要** 用激光二极管(LD)抽运  $\text{Cr}^{4+}$  :  $\text{Nd}^{3+}$  : YAG 晶体获得了 1.064  $\mu\text{m}$  的自调 Q 激光输出。激光输出模式为稳定的单纵模,抽运阈值功率为 3.5 W,脉冲宽度为 50 ns,斜率效率高达 20%。当输入的抽运功率为 10.8 W 时,获得了 1.46 W 的自调 Q 激光输出。随着抽运功率的变化,脉冲宽度基本上保持不变,而重复率则在变化。

**关键词** 激光二极管,  $\text{Cr}^{4+}$  :  $\text{Nd}^{3+}$  : YAG 晶体, 自调 Q 激光

中图分类号 TN 248.1+3 文献标识码 A

## LD Pumped $\text{Cr}^{4+}$ , $\text{Nd}^{3+}$ : YAG with Self-Q-switched Laser Output of 1.4 W

DONG Jun DENG Pei-zhen ZHANG Ying-hua LIU Yu-pu

XU Jun CHEN Wei LU Yu-tian

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract** By using LD as a pumping source, the self-Q-switched laser of Cr,Nd:YAG crystal is demonstrated. The output Q-switched traces are very stable. The threshold pumping power is 3.5 W and pulse duration is 50 ns. The slope efficiency is as high as 20%. When the input power is 10.8 W, 1.46 W self-Q-switched laser at 1064 nm is obtained. The pulse width keeps nearly constant and pulse repetition rate varies with the variation of the pumping power.

**Key words** LD, Cr,Nd:YAG crystal, self-Q-switched laser

在纳秒和亚纳秒范围内具有高峰值功率和高重复率的脉冲可以被广泛地应用于微机械、测距、遥视和微型手术等方面。激光二极管(LD)抽运的被动调 Q 激光器能提供这种脉冲,而且具有结构简单紧凑、价格便宜和高效等优点。因此,近年来 LD 抽运的被动调 Q 激光器引起了人们的极大关注,已经成功地应用于被动调 Q 激光器的可饱和吸收体有染料<sup>[1]</sup>,  $\text{LiF}:\text{F}_2^-$  色心晶体<sup>[2]</sup>和掺  $\text{Cr}^{4+}$  离子的晶体等<sup>[3~10]</sup>。在这些可饱和吸收体材料中,近年来发展起来的掺  $\text{Cr}^{4+}$  离子的晶体如  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ <sup>[3~7]</sup>,  $\text{Cr}^{4+}:\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ <sup>[8]</sup>,  $\text{Cr}^{4+}:\text{GSGG}$ <sup>[9]</sup>和  $\text{Cr}^{4+}:\text{YSO}$ <sup>[10]</sup>等具有优良的光学、化学和热稳定性,以及大的吸收截面积、低的饱和强度和高的损伤阈值等优点。此外,

$\text{Cr}^{4+}$  离子与激光增益介质掺到一起可以形成自调 Q 激光<sup>[4,7]</sup>。因此,掺  $\text{Cr}^{4+}$  离子的晶体成为被动调 Q 激光器最有前途的可饱和吸收体。我们生长了  $\text{Cr}^{4+}$  :  $\text{Nd}^{3+}$  : YAG 晶体并且用 LD 作为抽运源研究了  $\text{Cr}^{4+}$  :  $\text{Nd}^{3+}$  : YAG 晶体的自调 Q 激光特性。

### 1 实验过程

用提拉法(CZ)生长了  $\text{Cr}^{4+}$  :  $\text{Nd}^{3+}$  : YAG 晶体,由于掺 Cr 和 Nd 的 YAG 晶体的熔点高达 1970 $^{\circ}\text{C}$ ,因此在晶体的生长过程中坩埚周围用氧化锆作保温材料。晶体沿 111 方向生长,晶体的提拉速度为 1 mm/h,转速为 15 r/min,然后进行 1600 $^{\circ}\text{C}$ 退火处理。作为可饱和吸收体的  $\text{Cr}^{4+}$  离子一般处在石榴石晶体中变形的四面体 Al 格位,需要一个补偿离子来形成处于四面体的  $\text{Cr}^{4+}$  离子,因此正二价的钙离子被用作  $\text{Cr}^{4+}$  :  $\text{Nd}^{3+}$  : YAG 晶体的补偿离子。吸收光谱测

\* 上海科技启明星项目(编号 97QE14027)资助项目。

收稿日期 2000-01-26;收到修改稿日期 2000-05-26

试所用的样品经 X 射线定向后,垂直于 111 方向切割,样品经粗、细磨和抛光后厚度为 1.2 mm。晶体的吸收光谱在 Perkin-Elmer Lambda 9 UV/VIS/NIR 型光谱仪上测定。

实验装置如图 1 所示,采用发射波长为 808 nm 的 AlGaAs/GaAs 单量子阱激光器作为抽运源。激光腔由一块 5 mm 长的 Cr,Nd:YAG 晶体组成,晶体的尺寸为 7 mm×7 mm×5 mm,激光腔设计为平-凹腔,后腔镜为曲率半径为 80 mm 的球面,镀 808 nm 的增透膜和 1.064 μm 的高反膜;前腔镜为平面,镀 808 nm 的高反膜和在 1.064 nm 透过率为 5% 的反射膜作为输出耦合镜。激光实验是在 5℃ 的恒温条件下进行的,恒温是通过一个恒温水冷系统实现的。调 Q 脉冲用一个硅光电倍增管来探测,并且用一个 400 MHz 的 Tektronix TDS 380 型数字示波器来记录调 Q 波形。用激光功率计测量激光输出功率。LD 输出的激光经焦距为 75 mm 的透镜整形后,得到的光斑半径为 300 μm。LD 在连续模式下运行,经过透镜后的损失大约为 8%。

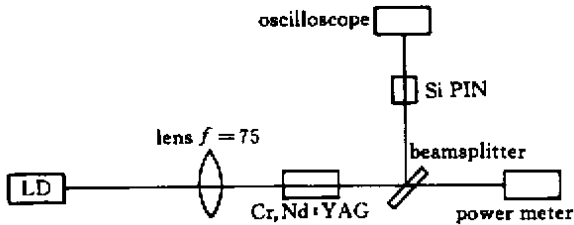


图 1 LD 抽运 Cr,Nd:YAG 自调 Q 激光实验装置

Fig.2 Schematic of LD pumped Cr,Nd:YAG self-Q-switched laser experimental setup

## 2 结果与讨论

对晶体背底的吸收加以修正后,Cr,Nd:YAG 晶体的室温吸收光谱如图 2 所示。在可见光范围内,Cr,Nd:YAG 晶体的吸收特性与 Cr:YAG<sup>[11]</sup>晶体的吸收特性相似。峰值位于 0.53,0.59,0.75 和 0.81 μm 的吸收带主要对应于 Nd<sup>3+</sup> 离子的吸收;中心位于 0.43 μm 和 0.59 μm 宽的吸收带对应于 Cr<sup>3+</sup> 离子的 <sup>4</sup>A<sub>2</sub>→<sup>4</sup>T<sub>1</sub> 和 <sup>4</sup>A<sub>2</sub>→<sup>4</sup>T<sub>2</sub> 跃迁;从 900 nm 到 1200 nm 的吸收带则对应于 Cr<sup>4+</sup> 离子的 <sup>3</sup>A<sub>2</sub>→<sup>3</sup>T<sub>1</sub> 跃迁<sup>[12]</sup>。在抽运波长 808 nm 处的吸收系数为 2.6 cm<sup>-1</sup>,在 1064 nm 处的吸收系数为 0.15 cm<sup>-1</sup>。从图 2 可以看出,Cr,Nd:YAG 晶体把激光的增益介质 Nd<sup>3+</sup> 的吸收特性与 Cr<sup>4+</sup> 离子的可饱和吸收特性结合到了一起。用 Cr,Nd:YAG 晶体作为工作物质,输出了稳定的单

纵模自调 Q 激光,其脉冲宽度在 55 ns 到 50 ns 之间。典型的自调 Q 激光脉冲波形如图 3 所示,脉冲的能量为 5 μJ,峰值半高宽(FWHM)为 50 ns,因此,其峰值功率大约为 100 W。

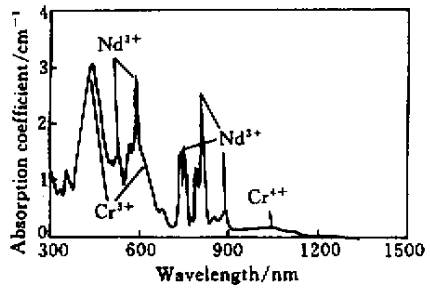


图 2 Cr,Nd:YAG 晶体的室温吸收光谱  
Fig.2 Room-temperature absorption spectrum of Cr,Nd:YAG crystal

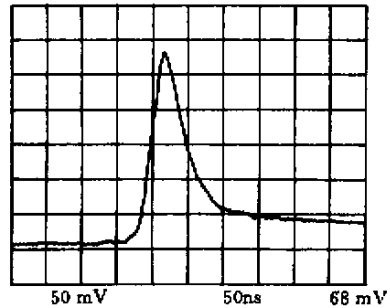


图 3 半高宽(FWHM)为 50 ns 的 Cr,Nd:YAG 自调 Q 激光脉冲波形

Fig.3 Oscilloscope trace of the self-Q-switched Cr,Nd:YAG laser with a FWHM duration of 50 ns

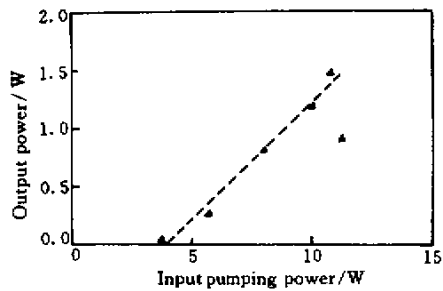


图 4 Cr,Nd:YAG 自调 Q 激光输入输出特性曲线

Fig.4 Relation between the output power and the input power, the dotted line is the best fit to the experimental points when input power is less than 10.8 W, the output power dropped dramatically when the input power is greater than 11 W because of thermal lens effects

图 4 为 LD 抽运 Cr,Nd:YAG 晶体自调 Q 激光的输入与输出功率特性曲线,晶体的阈值功率为

3.5 W, 当入射到晶体上的功率为 10.8 W 时, 得到输出功率为 1.46 W 的 1064 nm 自调  $Q$  激光, 当入射到晶体上的功率小于 11 W 时, 斜率效率为 20%, 重复率为 13 kHz。由于晶体的冷却效果不是太好, 存在热透镜效应, 因此当入射功率进一步加大时, 输出功率反而急剧下降。有必要重新设计冷却装置来满足高功率的要求, 而且 LD 入射到晶体上的光斑半径很大, 使阈值较高, 因此, 我们希望通过提高入射光的聚焦质量以及改善晶体的冷却效果来进一步得到好的激光输出。尽管调  $Q$  激光有较大幅度的波动, 但实验发现 Cr : Nd:YAG 晶体的自调  $Q$  脉冲幅度非常稳定, 这可能得归功于可饱和吸收体  $\text{Cr}^{4+}$  离子稳定的吸收特性, LD 的光束质量好和谐振腔没有受到机械振动等原因。

在调  $Q$  激光实验过程中, 随着入射到晶体上的功率的变化, 脉冲宽度基本保持不变, 而重复率则在变化, 而且随着入射功率的增大, 脉冲重复率也在增大。脉冲宽度保持不变可能是由于晶体的调  $Q$  脉冲宽度主要取决于可饱和吸收体的初始透过率。同时也发现 Cr : Nd:YAG 晶体的自调  $Q$  激光输出具有偏振性, 水平与垂直方向的比约为 200:1。用于实验的 Cr : Nd:YAG 晶体对于低的光强度既没有双折射也没有各向异性透过现象, 因此这种偏振激光输出可能是由于短的谐振腔导致存在一定数量的激光模式, 可饱和吸收体使饱和吸收产生各向异性<sup>[13]</sup>, 从而使被动调  $Q$  只允许强的激光输出模式优先振荡。尽管已经有人报道过用  $\text{Cr}^{4+}$  : YAG 作为可饱和吸收体被动调  $Q$  Nd:YAG 的激光输出是具有偏振性的<sup>[14, 15]</sup>, 但是他们只是把这种偏振输出归因于谐振腔的准直而没有给出具体的解释。根据 H. Eilers 等的研究<sup>[13]</sup>,  $\text{Cr}^{4+}$  : YAG 晶体在饱和开始以后饱和吸收具有明显的各向异性, 而且随着抽运功率的增加, 这种各向异性的饱和吸收的趋势在增加, 从而导致用  $\text{Cr}^{4+}$  : YAG 晶体作为可饱和吸收体被动调  $Q$  Nd:YAG 晶体时出现偏振输出。

### 3 结 论

用 LD 作为抽运源, 得到了脉冲幅度稳定的 Cr : Nd:YAG 自调  $Q$  激光输出, 抽运阈值功率为 3.5 W, 当入射到晶体上的功率为 10.8 W 时, 输出了 1.46 W 的 1.064  $\mu\text{m}$  自调  $Q$  激光, 脉冲宽度为 50 ns 左右, 斜率效率为 20%。当入射功率大于 11W 时, Cr :

Nd:YAG 晶体的输出功率急剧下降, 这是由于晶体的冷却效果不好导致热透镜效应造成的。如果能进一步提高晶体的冷却效果以及改善入射光的聚焦效果, 将会得到更好的激光输出数据。另外, 随着入射功率的变化, 脉冲的宽度保持不变, 而脉冲的重复率则在变化, 同时观察到了偏振率为 200:1 的偏振激光输出。这一研究有可能使 LD 抽运的自调  $Q$  激光器小型化、集成化和实用化。

### 参 考 文 献

- 1 W. Kochner. Solid State Laser Engineering, 3rd ed. Berlin, Germany : Springer-Verlag, 1992. Ch. 8
- 2 J. A. Morris, C. R. Pollock. Passive  $Q$ -switching of a diode-pumped Nd:YAG laser with a saturable absorber. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(8) :440 ~ 442
- 3 J. J. Zayhowski, C. Dill III. Diode-pumped passively  $Q$ -switched picosecond microchip lasers. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(18) :1427 ~ 1429
- 4 G. Yao, S. H. Zhou, P. Wang *et al.*. Dynamics of transverse mode in self- $Q$ -switched solid-state lasers. *Opt. Comm.*, 1995, **114**(12) :101 ~ 105
- 5 K. Spariosu, W. Chen, R. Stultz *et al.*. Dual  $Q$ -switching and laser action at 1.06  $\mu\text{m}$  and 1.44  $\mu\text{m}$  in a  $\text{Nd}^{3+}$  : YAG- $\text{Cr}^{4+}$  : YAG oscillator at 300 K. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(10) :814 ~ 816
- 6 Y. Shimony, Z. Burshtein, Y. Kalisky.  $\text{Cr}^{4+}$  : YAG as passive  $Q$ -switch and Brewster plate in a pulsed Nd : YAG laser. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31** :1738 ~ 1741
- 7 S. Zhou, K. K. Lee, Y. C. Chen. Monolithic self- $Q$ -switched Cr, Nd:YAG laser. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(7) :511 ~ 512
- 8 M. I. Demchuk, V. P. Mikhailov, N. I. Zhavoronkov *et al.*. Chromium-doped forsterite as a solid-state saturable absorber. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(13) :929 ~ 930
- 9 W. Chen, K. Spariosu, R. Stultz *et al.*.  $\text{Cr}^{4+}$  : GSGG saturable absorber  $Q$ -switch for the ruby laser. *Opt. Comm.*, 1993, **104** :71 ~ 74
- 10 Y. K. Kuo, M. F. Huang, M. Birnbaum. Tunable  $\text{Cr}^{4+}$  : YSO  $Q$ -switched Cr : LiCAF laser. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31** :657 ~ 663
- 11 N. B. Angert, N. I. Borodin, V. M. Garmash *et al.*. Lasing due to impurity color centers in yttrium aluminum garnet crystals at wavelength in the range 1.35 ~ 1.45  $\mu\text{m}$ . *Sov. J. Quantum Electron.*, 1988, **18**(1) :73 ~ 74
- 12 V. Petricevic, S. K. Gayen, R. R. Alfano. Laser action in chromium-activated forsterite for near-infrared excitation : is  $\text{Cr}^{4+}$  the lasing ion? *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **53**(26) :2590 ~ 2592
- 13 H. Eilers, K. R. Hoffman, W. M. Dennis *et al.*. Saturation of 1.064  $\mu\text{m}$  absorption in Cr, Ca :  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  crystals. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **61**(25) :2958 ~ 1960
- 14 P. Yankov.  $\text{Cr}^{4+}$  : YAG  $Q$ -switch of Nd: host laser oscillator. *J. Phys. D : Appl. Phys.*, 1994, **27** :1118 ~ 1120
- 15 Y. Shimony, Z. Burshtein, A. B. A. Baranga *et al.*. Repetitive  $Q$ -switching of a CW Nd:YAG laser using  $\text{Cr}^{4+}$  : YAG saturable absorbers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1996, **32**(2) :305 ~ 310