

文章编号 1000-5013(2006)01-0039-04

Nd YAG 调 Q 脉冲泵浦的 Cr⁴⁺ Mg₂SiO₄ 激光器

庄鑫巍 王加贤 张凤娟

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要 采用 Nd YAG 调 Q 激光器输出的 1.06 μm 光脉冲泵浦掺铬镁橄榄石(Cr⁴⁺ Mg₂SiO₄)晶体,实现 Cr⁴⁺ Mg₂SiO₄ 激光器的增益开关运转. Cr⁴⁺ Mg₂SiO₄ 在 46 mJ 的泵浦能量下,输出激光脉冲的中心波长约为 1.22 μm,能量和脉宽分别为 4.8 mJ 和 8.2 ns,其光-光转换效率达到 12%. 同时,研究激光器的光-光转换效率随聚焦透镜焦距的变化特性.

关键词 掺铬镁橄榄石晶体, Nd YAG, 调 Q 激光器, 热透镜, 泵浦, 转换效率

中图分类号 TN 248.3+40.1

文献标识码 A

1988 年, Petricevic 等人^[1]报道了掺铬镁橄榄石(Cr⁴⁺ Mg₂SiO₄)的激射作用,通过对其光谱特性的研究,证实产生该谱区的辐射中心为 Cr⁴⁺,其光谱范围很宽,为 680~1 400 nm. 目前,产生激光的调谐范围为 1 167~1 354 nm,处于近红外波段,对人眼相对安全,而且长波端接近光纤的零色散区,所以颇受重视. 它在超快光学、光纤通信和激光医学等领域有着广泛的应用前景. 十几年来, Cr⁴⁺ Mg₂SiO₄ 激光器已经实现用闪光灯、固体激光器、LD 激光二极管泵浦的连续、脉冲、调 Q 及锁模运转. 1997 年,雷海容等人^[2]用调 Q 的 1.06 μm Nd YAG 激光泵浦,得到能量大于 29 mJ 宽带激光振荡输出. 1998 年,宋定熙等^[3]采用 1.06 μm Nd YAG 脉冲激光器作为泵浦源,当泵浦的静态能量约为 1.5 J 时,得到中心波长为 1.23 μm 的 135 mJ 的高能量脉冲激光输出. 1999 年,阮双琛等^[4]用 Nd YAG 激光器泵浦,实现自锁模运转,得到脉宽 85 fs、中心波长 1 246 nm、平均功率 200 mW 的超短脉冲输出. 本文采用调 Q 的 1.06 μm 激光脉冲纵向泵浦 Cr⁴⁺ Mg₂SiO₄,实现该激光器的增益开关运转,从理论和实验上研究了激光器的光-光转换效率与聚焦透镜焦距之间的关系. 在较佳的实验条件下, Cr⁴⁺ Mg₂SiO₄ 在 46 mJ 的泵浦能量下,其输出能量和脉宽分别为 4.8 mJ 和 8.2 ns,总的光-光转换效率为 12%.

1 实验装置

纵向泵浦的 Cr⁴⁺ Mg₂SiO₄ 激光器的实验装置,如图 1 所示. 泵浦源采用 Nd YAG 调 Q 激光器,工作重复率为 1 Hz,输出的激光脉冲宽度为 30 ns. M₁

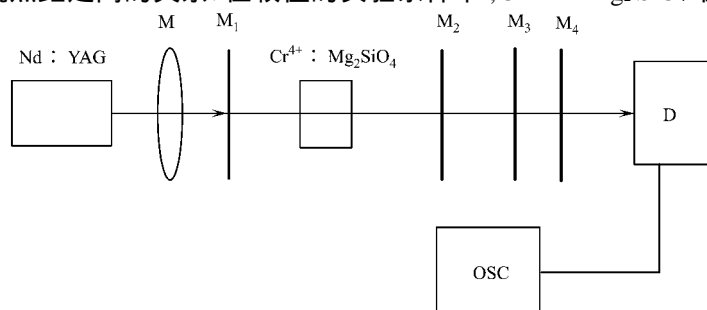


图 1 Cr⁴⁺ Mg₂SiO₄ 激光器实验装置

是对 1.06 μm 泵浦激光高透、对中心波长 1.22 μm 的振荡激光高反的宽带平面反射镜; M₂ 是对泵浦激光高透、对振荡激光有一定透过率的平面耦合输出镜; M₃, M₄ 均为对泵浦激光高反、对振荡激光高透的平面镜,重叠放置以滤去 1.06 μm 泵浦激光,让大部分中心波长为 1.22 μm 的激光通过. 通光长度 12

收稿日期 2005-05-09

作者简介 庄鑫巍(1981-),男,硕士研究生,主要从事固体激光技术与器件的研究. E-mail: xinwei@hqu.edu.cn

基金项目 福建省自然科学基金资助项目(A0310022)

mm,对 $1.06 \mu\text{m}$ 激光吸收为 60% 的 $\text{Cr}^{4+} \text{Mg}_2\text{SiO}_4$ 晶体置于热沉板上,通循环水冷却。 $\text{Cr}^{4+} \text{Mg}_2\text{SiO}_4$ 晶体中心与 M_1 镜和 M_2 镜的距离分别为 d_1 和 d_2 。 $1.06 \mu\text{m}$ 的激光经过凸透镜 M 聚焦作为 $\text{Cr}^{4+} \text{Mg}_2\text{SiO}_4$ 激光器的泵浦光。为了不让晶体的前端面被泵浦激光损伤,沿光轴方向移动凸透镜,使泵浦光聚焦后的光斑处于 $\text{Cr}^{4+} \text{Mg}_2\text{SiO}_4$ 晶体的中心附近。激光器的输出脉冲由 InGaAs PIN 光电二极管(G 8376-05 型)构成的探测器 D 接收,并输入到 300 MHz 数字存储示波器(TDS 3032B 型)上存储和显示。用精度为 $1.0 \mu\text{J}$ 的激光能量计(Molelectron 公司)测量输出能量,用多波段光栅单色仪(WGD 300-A 型)测量激光光谱。

2 理论和实验研究

2.1 光束半径的计算

Nd YAG 激光器采用腔长 29 cm 的平凹腔,其全反射凹面镜的曲率半径为 300 cm。经过简单计算可知其光腰半径为 0.546 9 mm,光腰处于平面输出镜上^[5]。Nd YAG 激光器的输出光束经过透镜聚焦后,其光腰半径和光腰位置(透镜与聚焦后光腰的距离)分别为^[6]

$$\frac{2}{p} = \frac{F^2 \frac{2}{0}}{(F-l)^2 + \left(-\frac{2}{0}\right)^2}, \quad (1)$$

$$l = F + \frac{(l-F)F^2}{(F-l)^2 + \left(-\frac{2}{0}\right)^2}, \quad (2)$$

在式(2)中, l 为 Nd YAG 激光器的平面输出镜与透镜间的距离, F 为透镜焦距。

在 $1.06 \mu\text{m}$ 激光的纵向泵浦下, $\text{Cr}^{4+} \text{Mg}_2\text{SiO}_4$ 晶体必将产生热透镜效应,使 $\text{Cr}^{4+} \text{Mg}_2\text{SiO}_4$ 激光器的平凹腔变为实际上的凹面腔。采用文[7]介绍的 CCD 法可以测量热透镜焦距,它与激光器的重复率、泵浦能量及散热条件有关^[8-10]。对于图 2 所示的含热透镜的谐振腔,由于晶体长度远远小于腔长,所以可得到腔内光束的单程传输矩阵为

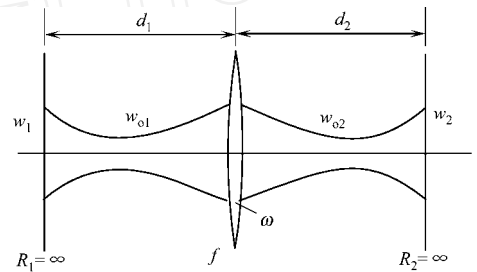


图 2 等效热透镜谐振腔

$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{d_2}{f} & d_1 + d_2 - \frac{d_1 d_2}{f} \\ -\frac{1}{f} & 1 - \frac{d_1}{f} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

在式(3)中, f 是热透镜焦距。在满足稳定性条件的情况下,可以得到腔内晶体中心处的振荡激光光束半径为^[11]

$$2 = \frac{4 d_1 d_2 \left(1 - \frac{d_2}{f}\right) \left(1 - \frac{d_1}{f}\right) + (d_1 - d_2)^2}{\sqrt{\left[1 - \frac{d_2}{f}\right] \left[1 - \frac{d_1}{f}\right] \left[1 - \left(1 - \frac{d_2}{f}\right) \left(1 - \frac{d_1}{f}\right)\right]}}. \quad (4)$$

在 46 mJ 的泵浦能量下,测得热透镜焦距 f 约为 300 cm,根据式(4)及谐振腔参数为 $d_1 = 5.1 \text{ cm}$, $d_2 = 8.9 \text{ cm}$,可计算出晶体中心处的振荡激光光束半径 $w = 0.505 5 \text{ mm}$ 。采用 3 种不同焦距的聚焦透镜,根据式(1)计算出晶体中心处的泵浦光光束半径 p ,以及泵浦光光束半径与振荡激光光束半径之比 ($\beta = p/w$) 分别为 $F = 190 \text{ mm}$ 时, $p = 0.171 0 \text{ mm}$, $\beta = 0.232$; $F = 150 \text{ mm}$ 时, $p = 0.092 52 \text{ mm}$, $\beta = 0.183$; $F = 100 \text{ mm}$ 时, $p = 0.061 6 \text{ mm}$, $\beta = 0.122$ 。

2.2 不同聚焦透镜的实验比较

采用 3 种不同焦距的聚焦透镜进行实验,分别测量输出能量 (E_{out}) 与泵浦能量 (E_{in}) 之间的关系,如

图 3 所示,其中每个数据点都是 10 次测量的平均值,直线是一次曲线拟合.从图 3 可以看出,当 $F = 190 \text{ mm}$ 时,总的光-光转换效率为 12%,在 46 mJ 的泵浦能量下,测得激光输出能量和脉宽分别为 4.8 mJ 和 8.2 ns;当 $F = 150 \text{ mm}$ 时,总的光-光转换效率为 9.3%,在 46 mJ 的泵浦能量下,测得激光输出能量和脉宽分别为 3.7 mJ 和 8.8 ns;当 $F = 100 \text{ mm}$ 时,基本不出光,在 46 mJ 的泵浦能量下,激光输出能量仅为 0.3 mJ.光-光转换效率和晶体中心处的泵浦光光束半径与振荡激光光束半径之比有很大关系.因此,采用焦距合适的聚焦透镜,使晶体内的泵浦光光束与振荡激光光束达到较好的匹配,可以提高激光器的输出能量.由于实验中泵浦光的焦斑很难准确定位在晶体中心,所以实际上晶体中心处泵浦光的光束半径要比上述的理论计算值略大些.

2.3 输出激光的波形和光谱曲线

选择 Cr⁴⁺ Mg₂SiO₄ 激光器输出镜的透过率为 15%,腔长 14 cm,聚焦透镜的焦距为 190 mm,在 46 mJ 的泵浦能量下,得到的激光脉冲波形如图 4(a)所示,脉宽仅为 8.2 ns,能量为 4.8 mJ.与图 4(b)

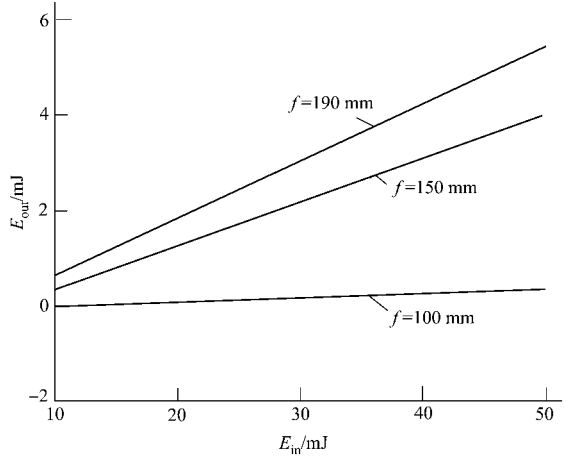
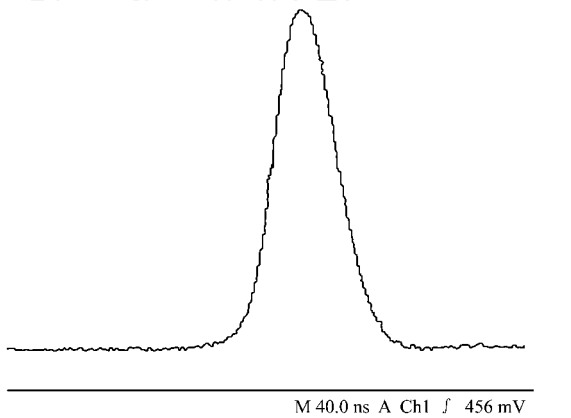
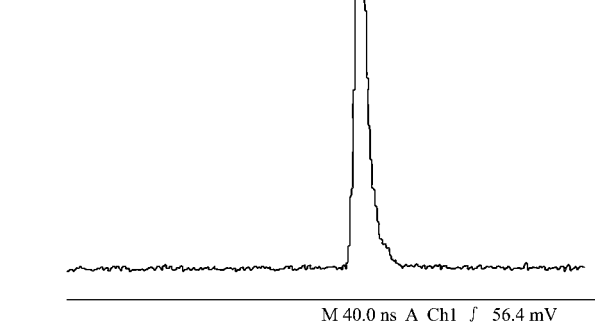


图 3 在不同焦距透镜下的输入输出曲线

所示的泵浦激光脉冲比较,可知脉冲压缩了将近 4 倍,而且没有出现双脉冲或多脉冲现象.由多波段光栅单色仪(WGD 300-A 型)测得 Cr⁴⁺ Mg₂SiO₄ 激光器输出的激光光谱,如图 5 所示,其中每个数据点的值都是 20 个脉冲能量的平均值(E_r 为相对能量).从图 5 可以看出,波长范围为 1.195 ~ 1.255 μm ,中心波长为 1.22 μm ,带宽(半高宽度)为 32 nm.



(a) 1.22 μm (脉宽 8.2 ns)

(b) 1.06 μm (脉宽 30 ns)

图 4 激光脉冲

所示的泵浦激光脉冲比较,可知脉冲压缩了将近 4 倍,而且没有出现双脉冲或多脉冲现象.由多波段光栅单色仪(WGD 300-A 型)测得 Cr⁴⁺ Mg₂SiO₄ 激光器输出的激光光谱,如图 5 所示,其中每个数据点的值都是 20 个脉冲能量的平均值(E_r 为相对能量).从图 5 可以看出,波长范围为 1.195 ~ 1.255 μm ,中心波长为 1.22 μm ,带宽(半高宽度)为 32 nm.

2.4 腔长和耦合输出镜对激光输出的影响

在图 1 的实验装置中,还进行了一些有意义的实验,并对实验结果分析如下.(1) 移动 M_2 镜,在一定范围内改变腔长.实验结果表明,随着腔长的增加,能量变化不大,但脉冲宽度变大.在腔长为 25 cm 时,脉宽为 16 ns;当腔长为 14 cm 时,脉宽仅为 8.2 ns.(2) 选择透过率为 6%和 15%的两块平面耦合输出镜进行实验.在耦合输出镜的

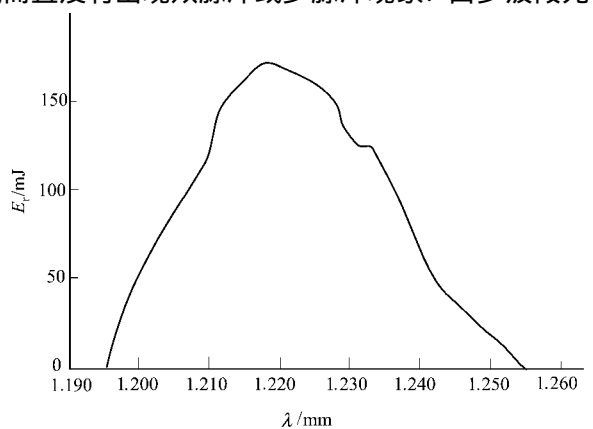


图 5 Cr⁴⁺ Mg₂SiO₄ 激光器激光光谱曲线

透过率为 $T=15\%$ 条件下,测得泵浦能量为 46 mJ 时的输出能量为 4.8 mJ,其总的光-光转换效率为 12%;把耦合输出镜改为 $T=6\%$,则测得泵浦能量为 46 mJ 时的输出能量仅为 1.5 mJ,总的光-光转换效率仅为 3.3%。因此,采用透过率为 15% 的平面耦合输出镜是比较合适的。

3 结束语

本实验采用 46 mJ 的 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光泵浦 $\text{Cr}^{4+}:\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ 激光器,得到中心波长为 $1.22\ \mu\text{m}$,能量和脉宽分别为 4.8 mJ 和 8.2 ns 的激光脉冲,其总的光-光转换效率达到 12%。在实验中还研究了晶体中心处,泵浦光光光束半径和振荡光光束半径的比例因子与光-光转换效率之间的关系。如果能进一步优化腔参数,使 β 增大,则有望使泵浦光与振荡光能得到更好的模匹配,从而提高转换效率^[12-14]。在本实验中没有观察到双脉冲或者多脉冲现象,这是因为泵浦脉冲的脉宽(30 ns)远远小于工作物质的荧光寿命(3.2 μs)。在激光开始振荡时,泵浦已经结束,上一能级的粒子在激光脉冲终止时已经耗尽,所以不会出现双脉冲。

参 考 文 献

- Petricevic V, Gayen S K, Alfano R R. Laser action in chromium-doped forsterite[J]. Appl Phys Lett, 1998, 52(13): 1040~1042
- 雷海容,刘宏发,严柏生,等. 四价铬镁橄榄石激光器特性研究[J]. 红外与激光工程, 1997, 26(6): 25~28
- 宋定熙,吴有武,杨勇,等. 高输出能量激光器的实验研究[J]. 激光技术, 1997, 21(2): 101~103
- 阮双琛,朱勤. 自锁模飞秒掺铬的镁橄榄石激光器的实验研究[J]. 光子学报, 1999, 28(10): 892~894
- 克希耐尔 W. 固体激光工程[M]. 孙文,等译. 北京:科学出版社, 2002. 176~180
- 周炳昆,高以智,陈侗嵘,等. 激光原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2003. 79~84
- Neuenschwander B, Weber R, Weber H P. Determination of end-pumped solid-state lasers with stable cavities[J]. IEEE J Quantum Electron, 1995, 31(6): 1082~1087
- 候学元,李余飞,孙渝明,等. 热焦距的动态测量[J]. 光电子·激光, 1999, 10(3): 276~277
- 许弼军,陆璇辉,薛大建,等. 热透镜效应和谐振腔参数的选择对激光输出的影响[J]. 光学仪器, 2002, 24(4-5): 47~51
- 余锦,檀慧明,钱龙生,等. 纵向泵浦固体激光介质热透镜效应的理论研究[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(1): 27~31
- 曹清,罗治江,张为俊,等. 动态热不敏感谐振腔分析[J]. 物理学报, 1993, 42(9): 1452~1458
- 范安辅,周昕,黄援朝,等. 关于 Nd:YAG 泵浦掺铬镁橄榄石激光器的研究[J]. 四川大学学报(自然科学版), 1999, 36(4): 768~770
- 王加贤. 掺 Cr^{4+} 离子的激光材料与器件[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2004, 25(3): 225~230
- 张国威. 增益开关型固体可调谐激光器的时间特性——理论[J]. 激光技术, 1995, 19(3): 129~134

Chromising Forsterite Laser Pumped by Q-Switched Pulsed Nd:YAG Laser

Zhuang Xinwei Wang Jiaxian Zhang Fengjuan

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

Abstract Chromising forsterite ($\text{Cr}^{4+}:\text{Mg}_2\text{SiO}_4$) crystal was pumped with $1.06\ \mu\text{m}$ light pulse from a Q-switched Nd:YAG laser, the gain switching operation of chromising forsterite laser was realized. Using pumping energy of 46 mJ to pump chromising forsterite crystal, the output laser pulse with the energy of 4.8 mJ and pulse duration of 8.2 ns and central wavelength near $1.22\ \mu\text{m}$ was obtained, the light-light transfer efficiency was up to 12%. Furthermore, the changing properties of the light-light transfer efficiency versus to the focal length of the lens were investigated.

Keywords chromising forsterite crystal, Nd:YAG, Q-switched laser, thermal lens, pump, transfer efficiency