

Cr⁴⁺:YAG 晶体在固体激光器中的应用研究

余先伦^{1,2}, 罗映祥^{1,2}, 杨伯君², 张晓光²

(1. 重庆三峡学院电子工程系, 重庆万州 404002; 2. 北京邮电大学理学院, 北京 100876)

摘要: Cr⁴⁺:YAG 晶体具有良好的物理化学性质, 其在激光器的研究中有着十分重要的作用, 这篇文章第一次全面概括了 Cr⁴⁺:YAG 晶体在固体激光器中的三种应用。Cr⁴⁺:YAG 晶体既可作为调 Q 晶体用于其它固体激光器中, 用来改善输出激光的性能, 同时它也可作为激光增益介质, 制作成宽带可调谐的激光器系统, 用于光纤通信技术、量子通信、光电子器件等等当中。

关键词: Cr⁴⁺:YAG 晶体; 调 Q 晶体; Cr⁴⁺:YAG 激光器

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编码: 0253-2743(2004)01-0015-03

The application of Cr⁴⁺:YAG crystals in solid-state laser

YU Xian-lun^{1,2}, LUO Ying-xiang^{1,2}, YANG Bo-jun², ZHANG Xiao-guang²

(1. Department of Electronics Engineering, the Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404000, China)

(2. Department of Physics, School of Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: The Cr⁴⁺:YAG crystals has well-known properties in physics and chemistry, and has widespread applications in the research of solid-state lasers. This paper first summarizes three uses of Cr⁴⁺:YAG crystals in solid-state lasers. The Cr⁴⁺:YAG crystals uses in other solid-state lasers as a Q-switched element to improve the performance of lasers. Simultaneous, the Cr⁴⁺:YAG crystals used for laser gain media makes the broadly tunable lasers. The systems utilize in the optical fiber communication, quantum communication, photoelectron devices and so on.

Key words: Cr⁴⁺:YAG crystals; Q-switched crystals; Cr⁴⁺:YAG laser

1 引言

上个世纪八十年代, 我国电子工业部 11 所首先对 Cr⁴⁺:YAG 晶体进行了研究, 由于 Cr⁴⁺:YAG 晶体具有良好的导热特性、高的损伤阈值、稳定的物理化学性质以及吸收截面大、饱和光强小、掺杂浓度高、无退化现象、寿命长等特点, 国内外对这种晶体在固体激光器中的应用进行了广泛的研究。Cr⁴⁺:YAG 晶体在固体激光器的研制中具有广泛的应用前景, 作为调 Q 器件可使激光器结构非常简单、激光输出非常稳定, 可在激光雷达、激光测距、遥感技术、材料加工、非线性光学处理等方面有着广泛的应用。而 Cr⁴⁺:YAG 宽带可调谐激光器系统在光纤通信技术、光电子器件、光孤子系统、量子通信中也有着很潜在的应用。

2 Cr⁴⁺:YAG 晶体光谱特性

Cr⁴⁺ 离子是典型的三能级结构, 在 YAG 中掺入 Cr⁴⁺ 离子其能级发生分裂形成能带, 其结构图如图 1 所示^[1]。

Cr⁴⁺:YAG 晶体室温下的吸收带主要有 0.48 μ m, 0.65 μ m, 1 μ m, 其吸收谱如图 2 所示^[2]。其中 1 μ m 的红外吸收带是一个很宽的吸收带, 在 850nm~1150nm 范围内有很好的吸收效率, 其主要因素是因为粒子在 ³A₂ 和 ³T₂ 之间的跃迁, 其吸收

截面在 1064nm 波长处大约是 $(7 \pm 0.8) \times 10^{-18} \text{ cm}^2$, 同时 Cr⁴⁺:YAG 晶体在这个波段范围除有很强的基态吸收外, 还存在较强的激发态吸收, 其主要原因是粒子从 ³T₂ 亚稳态到更高的激发态 ³T₁ 的跃迁, 其吸收截面大约是 $(2 \pm 0.3) \times 10^{-18} \text{ cm}^2$, 但粒子在 ³T₁ 态的寿命很短, 大约是 50ps, 它会很快跃迁回 ³T₂ 态。这种晶体的激光发射中心在 1400nm 附近这个区域, 这主要是粒子从 ³B₂ 态向 ³B₁ 态跃迁的结果。

3 Cr⁴⁺:YAG 晶体作为激光器的调 Q 晶体

在固体激光器中, 为了获得高功率、高性能、非常稳定的激光输出, 常常采用调 Q 技术, 调 Q 脉冲激光器是应用最为广泛的脉冲激光器之一, 调 Q 技术有主动调 Q 和被动调 Q 两大类。可饱和吸收材料是一种非线性介质, 可作为激光器的被动调 Q 开关, 它对腔内激光的吸收是随着光场强度而发生变化的, 当光场较弱时其对光的吸收很强, 因此光通过率就很低, 当光场强度增加时其吸收就减少, 当光强达到特定的值时其饱和光透率达 100%, 使强度最大的激光脉冲经受最小的损耗, 这样就可以得到输出功率很高的调 Q 脉冲。在激光器中饱和吸收材料有染料、色心材料和掺四价铬的系列材料等。从图 2 可知 Cr⁴⁺:YAG 晶体在 850~1150nm 范围内是一个很宽的吸收带并具有良好的可饱和吸收特性, 特别适合作为钕激光器的被动调 Q 开关, 是一种非常理想的调 Q 开关材料。

收稿日期: 2003-10-08

作者简介: 余先伦, 讲师, 重庆三峡学院电子工程系, 北京邮电大学硕士研究生, 主要从事光电子器件、激光器、量子通信等方面研究。

从上个世纪九十年代以来, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体作为激光器的调 Q 晶体得到了广泛的研究, 这种调 Q 激光器容易实现高峰值输出功率、高脉冲重复频率和高稳定的激光脉冲输出, 同时能制作出结构简单、体积小、性能优良的全固化激光器^[3,4]。应用 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体作为被动调 Q 开关, 可产生

1064nm 的红外激光, 也可以对其输出激光波长转换, 倍频产生绿光输出^[7], 对这类激光器腔进行优化设计, 还可制作成微芯片激光器^[8], 使其调 Q 脉冲更窄, 并且能实现单纵模运转, 它们可以广泛用于激光雷达、激光测距、遥视、非线性光学处理、材料加工、三维成像、目标识别等方面。

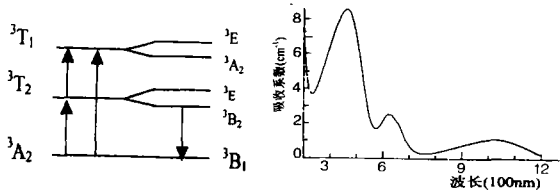


图 1 在 YAG 中 Cr 离子能级结构图

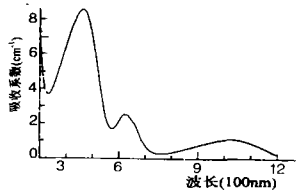


图 2 室温下 Cr, Ca: $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 的吸收谱

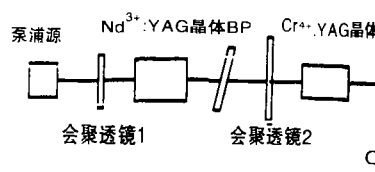


图 3 被动调 Q Nd³⁺: YAG 激光器实验装置

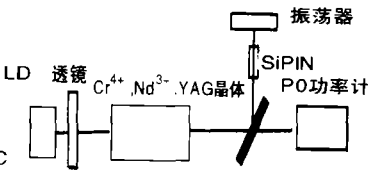


图 4 LD 泵浦的 $\text{Cr}^{4+}, \text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 自调 Q 激光器实验装置

采用 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体作被动调 Q 晶体制作固体激光器虽有不同设计方式, 但其基本原理都基本相同, 1997 年, A. Agnesi 等人采用 10W 的光纤耦合二极管对 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 进行端面泵浦, 选用 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体作饱和吸收晶体进行激光特性的研究^[6], 其实验装置如图 3 所示。

其中, 泵浦源采用激光二极管阵列, 会聚透镜 1 对泵浦光进行会聚到 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 晶体中, BP 是一个光束偏振片, 会聚透镜 2 是光学内腔会聚透镜, OC 是一个输出耦合镜, 采用端面泵浦耦合方式, 激光晶体所需长度很短, 与厚度同样很薄的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体 Q 开关结合, 可大大减小激光器腔长, 缩小激光器的体积。他们对设计结构进行了优化, 获得了 TEM_{00} 模最大输出单脉冲能量大约是 200 μJ , 脉宽 17ns, 重复频率 6KHz, 其中峰值功率为 11.76kW, 平均输出功率可达 1.2W 的激光脉冲。他们对平均输出功率进行优化, 获得了最大平均输出功率 1.92W、脉冲宽度为 32ns、重复频率为 20KHz 的激光脉冲输出。

4 $\text{Cr}^{4+}, \text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 自调 Q 激光器

将 Cr^{4+} 和 Nd^{3+} 共同掺杂于同一 YAG 基质内, 制成 $\text{Cr}^{4+}, \text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 晶体, 它把激光器的增益介质 Nd 的增益特性与 Cr^{4+} 的可饱和吸收特性结合到了一起, 用 $\text{Cr}^{4+}, \text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 晶体作为激光工作物质可以输出很稳定的单纵模自调 Q 激光, 其输出的脉冲幅度也非常稳定。用它做成自调 Q 激光器, 可使激光器结构更简单, 体积更小。1993 年 Shiqun li 等人率先报导了 $\text{Cr}^{4+}, \text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 自调 Q 激光器^[9], 2000 年, 中科院上海光学精密机械研究所报导了采用二极管泵浦的 $\text{Cr}^{4+}, \text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 自调 Q 激光器^[10], 其实验装置如图 4 所示。

泵浦源采用光纤耦合的 AlGaAs - GaAs 单量子阱激光器, 泵浦波长 808nm, $\text{Cr}^{4+}, \text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 晶体做成平凹几何形状, 后腔镜凹面的曲率半径是 80mm, 镀上一层薄膜对 808nm

有高透过率, 对 1064nm 有高反射率, 前腔镜平面镀上一层对 1064nm 有 95% 的反射率, 对 808nm 是全反射的薄膜作为输出耦合镜, 调 Q 脉冲用一个硅光电倍增管来探测, 用一个 400MHz 的 Tektronix TDS 380 型数字示波器来记录波形, 用激光功率计来测量激光输出功率。

在这个实验里他们获得了稳定的调 Q 脉冲输出, 脉冲宽度是 50ns, 其输出脉冲波形如图 5 所示, 他们得到的输出激光功率与泵浦光功率的关系如图 6 所示, 峰值功率大约 100W, 输出脉冲能量是 5 μJ , 斜效率高达 20%。

5 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 激光器

N. B. Angert 等人最早把 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体用作固体激光器中的激光晶体进行研究^[11], $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 激光器系统的发射谱处在 1300nm ~ 1600nm 波段, 它是在人眼的安全波段和光纤的低损耗、低色散区域, 采用 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体作激光器的增益介质可制成宽带可调谐超短光脉冲激光器系统。这种激光器可采用连续激光器、脉冲激光器或二极管作为泵浦源进行端面泵浦, 其谐振腔设计可采用 Z 型腔、L 型腔等, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 激光器可在室温下连续波运转, 其输出脉冲的脉宽可达到几十个 fs 量级, 调谐范围可达几百 nm, 输出功率可在 150mW ~ 400mW 之间, 并能产生孤子脉冲^[2,3,12-15]。 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 激光器系统可广泛用于光孤子通信系统、光纤通信系统、量子通信系统等当中, 它在未来的光通信中将会有十分重要的作用。

I. T. Sorokina 等人 1999 年首先提出了可调谐连续波二极管泵浦的室温下 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 激光器^[13], 其实验装置如图 5 所示。

$\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体长 6 ~ 10mm, 温度控制在 16℃, 其一端是平行端面, 涂有一层二向色性介质, 在 1300 ~ 1600nm 具有高反射性, 在 970 ~ 1064nm 间有高透过率, 另一端面涂有防反射层, 泵浦光源采用 InGaAs 激光二极管, 其入射光功率

可调节,谐振腔由 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体的一端面和 OC 组成, R 是一个曲率半径为 10cm 的平凹镜构成,在 OC 之前加上一个熔

硅三棱镜和一个滤波片对输出光波长进行调谐。

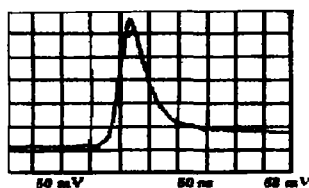


图 5 半高宽为 50ns 的 $\text{Cr}^{4+}:\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 自调 Q 激光脉冲波形

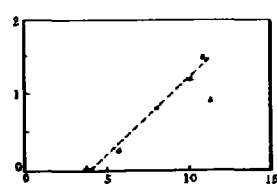


图 6 $\text{Cr}^{4+}:\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 自调 Q 激光输入输出特性曲线 (横坐标入射功率,纵坐标输出功率,单位 W)

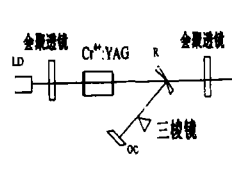


图 7 二极管双端面泵浦 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 激光器实验装置 LD 二极管泵浦源,OC 输出耦合镜

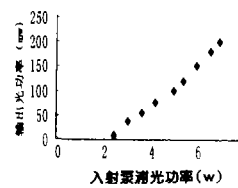


图 8 激光输出光功率与泵浦光功率的关系图

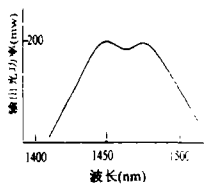


图 9 输出激光调谐范围图

在这个实验中获得了最大单脉冲输出功率为 200mW, 输出激光的调谐范围是 1415 ~ 1535nm, 其输出光功率与泵浦光功率的关系见图 8, 调谐范围见图 9。

6 结束语

这篇文章全面总结了 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体在固体激光器中的应用, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体可作为激光器中的饱和吸收晶体进行调 Q 和被动锁模运转, Cr^{4+} 离子与其它离子混合掺杂于 YAG 晶体中可制作成自调 Q 激光器, 其还可作为激光器的激光增益介质实现激光器的可调谐激光输出, 构成一个宽带可调谐系统。我们正在研制一种可产生光子纠缠态的新型 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 激光器可调谐系统。

参考文献

- [1] Alphan Sennaroglu, Clifford R. Pollock. Efficient continuous-wave chromium-doped YAG laser[J]. Opt. Soc. Am. B, 1995, 12(5): 930-937.
- [2] Hergen Eilers, William M. Dennis, William M. Yen et al. Performance of a Cr:YAG laser[J]. IEEE J. Quantum Electron., 1993, 29(9): 2508-2512.
- [3] Y. Shimony, Z. Burshtein, Y. Kalisky. $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ as Passive Q-switch and Brewster Plate in a Pulsed Nd:YAG laser[J]. IEEE J. Quantum Electron., 1995, 31(10): 1738-1741.
- [4] Yung-Fu Chen, S. W. Tsai, S. C. Wang. High-power diode-pumped Q-switched and mode-locked Nd:YVO₄ laser with a $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ saturable absorber[J]. Opt. Lett., 2000, 25(19): 1442-1444.
- [5] Y. Shimony, Z. Burshtein, A. Ben-Amar Baranga et al. Repetitive Q-switching of a cw Nd:YAG laser using $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ saturable Absorbers[J]. IEEE J. Quantum Electron., 1996, 32(2): 305-310.
- [6] A. Agnesi, S. Dell'Acqua et al. Diode-pumped Neodymium lasers Repetitively Q-switched by $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ solid-state Saturable Absorbers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electron., 1997, 3(1): 45-52.
- [7] Y. F. Chen, T. M. Huang, et al. Passive Q-switched diode-pumped Nd:YVO₄/ $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ single-frequency microchip laser[J]. Electronics Letters, 1997, 33(2): 1880-1881.
- [8] Y. F. Chen. Passive Q-switching of an intracavity frequency doubled diode-pumped Nd:YVO₄/KTP green laser with $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1997, 9(11): 1481-1483.
- [9] Shiqun Li, Shouhuan Zhou, et al. Self-Q-switched diode-end-pumped Cr,Nd:YAG laser with polarized output[J]. Opt. Lett., 1993, 18(3): 203-204.
- [10] Jun Dong, Peizhen deng, Yutian Lu et al. laser-diode-pumped $\text{Cr}^{4+}:\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ with self-Q-switched laser output of 1.4W[J]. Opt. Lett., 2000, 25(15): 1101-1103.
- [11] N. B. Angert, N. I. Borodin, V. M. Garmash et al. Lasing due to impurity color centers in yttrium aluminum garnet crystals at wavelengths in the range 1.35-1.45 μm [J]. Sov. J. Quantum Electron., 1988, 18: 73-74.
- [12] D. J. Ripin, C. Chudoba, J. T. Gopinath et al. Generation of 20-fs pulses by a prismless $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ laser[J]. Opt. Lett., 2002, 27(1): 61-63.
- [13] I. T. Sorokina, S. Naumov, E. Sorokin et al. Directly diode-pumped tunable continuous-wave room-temperature $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ laser[J]. Opt. Lett., 1999, 24(22): 1578-1580.
- [14] B. C. Collings, K. Bergman. True fundamental solitons in a passively mode-locked short-cavity $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ laser[J]. Opt. Lett., 1997, 22(14): 1098-1100.
- [15] D. J. Ripin, C. Chudoba, J. T. Gopinath et al. Generation of 20-fs pulses by a prismless $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ laser[J]. Opt. Lett., 2002, 27(1): 61-63.