

文章编号: 1001-3806(2006)03-0241-03

670 7nm 激光抽运下的祖母绿晶体激光运转实验研究

陈振强¹, 张 戈², 沈鸿元², 黄呈辉²

(1. 暨南大学 光电工程研究所, 广州 510632; 2 中国科学院 福建物质结构研究所, 福州 350002)

摘要: 为了实现我国温差水热法生长的祖母绿晶体的激光运转, 利用 Nd:YAP 的 1.3414 μ m 激光经过 LBO 晶体倍频得到的 670.7nm 红光作为抽运光源, 采用对称共焦腔实现了祖母绿晶体 732nm 红外激光的输出, 激光阈值在 0.5W ~ 0.6W 之间。在输入功率达到 2.89W 时获得了 46 μ W 的 732nm 激光输出。

关键词: 激光技术; 祖母绿; 光学特点; 对称共焦腔

中图分类号: TN204 文献标识码: A

Research of free running emerald laser pumped by 670.7nm laser

CHEN Zhen-qiang¹, ZHANG Ge², SHEN Hong-yuan², HUANG Cheng-hui²

(1. Institute of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2. Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, the Chinese Academy of Sciences, Fuzhou 350002, China)

Abstract Free running laser of hydrothermally grown emerald crystal (Cr doped $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$) is reported. With the use of 670.7nm red laser by intracavity-doubling of Nd:YAP/1.3414 μ m wavelength and symmetrical confocal resonator, 732nm laser of emerald is produced with 46 μ W laser output when the incident power was 2.89W. The laser threshold value of emerald crystal is estimated between 0.5W and 0.6W.

Key words lasers technique; emerald crystal; optical properties; symmetric confocal cavity

引 言

宽带激光发射一直是新型激光材料探索与激光器研究的热点, 尤其是目前高功率 LD 的迅速发展, 人们在不断寻找适合 LD 抽运的新型激光介质的同时, 考虑对现有激光材料进行 LD 抽运条件下的激光实验和器件研究成为目前晶体全固体激光器发展的重点。祖母绿 ($\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}:\text{Cr}^{3+}$) 晶体是一种发现较早而尚未得到利用的宽带可调激光材料, 其光学特点仅次于金绿宝石, 从 20 世纪 80 年代至今, 先后受到多个国家的重视, 在激光实验方面的研究^[1-5]和祖母绿高质量激光晶体生长技术更新方面取得了可喜成果^[6-8]。在多种抽运方式和不同腔型条件下获得了效率或高或低、功率与能量或大或小的激光输出^[1-5]。在先后报道的文献中, 以 LAI^[4]使用 K₂灯抽运方式获得 2.6W 的输出功率和 64% 的斜率效率为最高。由于祖母绿晶体自身生长困难和随后调谐范围更宽的钛宝石晶体的出现而至今未能达到实际应用。最近又有以色列^[7]、中

国^[8]、韩国^[9-10]、日本^[11]、俄罗斯^[12]等国家祖母绿晶体生长技术和激光器方面的研究成果报道, 可以预见, 随着该晶体生长工艺的改进及目前合适波长的半导体二极管价格的下降, 今后有必要对该晶体在 LD 抽运下的激光输出特点进行重新评价。

作者在对祖母绿晶体的温差水热法生长工艺^[7]、宝石学特点^[13]、光谱学特点^[14]以及折射率色散特点^[15]等研究基础上, 就 Nd:YAP 的 1.3414 μ m 经过 LBO 晶体腔内倍频获得的高功率 670.7nm 红光作为祖母绿的抽运光源进行激光运转实验的结果, 而 LD 抽运下的激光实验研究正在进行中。

1 实验材料与过程

1.1 实验材料特点

祖母绿晶体是六方晶系负单轴晶矿物, 其空间群为 D_{6h}^2-P6mm , 使用日本 Rigaku-AFC5R X 射线四圆衍射仪对水热法合成的祖母绿晶体进行了晶体结构和晶胞参数的精确测定, 结果和绿柱石结构一致。

作者在早期文章中曾经报道过非偏振状态下该晶体的吸收光谱和荧光光谱特点^[14], 本次在同样条件下使用同一块晶体切割下来的样品经过定向加工后在 PerkinElmer UV-VIS-NIR (Lambda-35) 分光光度计测定了祖母绿晶体的偏振吸收光谱, 如图 1 所示。计算了 $^4A_2 \rightarrow ^4T_1$ 平行光轴 (π 偏光) 和垂直光轴 (σ 偏光)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60278025)

作者简介: 陈振强 (1965-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事光电功能晶体生长、性能表征和新波长激光器件研究等。

E-mail: tqzchen@jnu.edu.cn

收稿日期: 2005-05-17; 收到修改稿日期: 2005-07-06

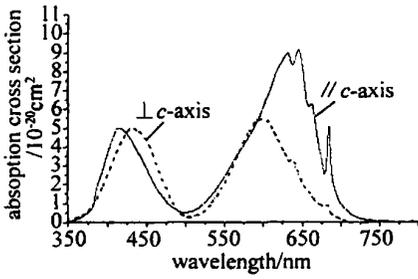


Fig 1 Polarized absorption spectra of emerald crystal

的峰值吸收截面分别为 $5.01 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 和 $5.02 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, ${}^4A_2 \rightarrow {}^4T_2$ 分别为 $9.12 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 和 $5.46 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。对于 π 偏光, 对应的吸收峰最大位置为 652nm; 对于 σ 偏光, 对应的吸收峰最大位置为 598nm。从文献 [14] 中知道, 荧光光谱由 ${}^4T_2 \rightarrow {}^4A_2$ (宽带) 和 ${}^2E \rightarrow {}^4A_2$ (锐线) 跃迁组成, 荧光波长范围从 675nm 到 850nm 之间, 半峰宽为 75nm 左右, 峰值波长为 732nm (13680 cm^{-1})。所测荧光寿命为 $63.54 \mu\text{s}$, 如图 2 所示。

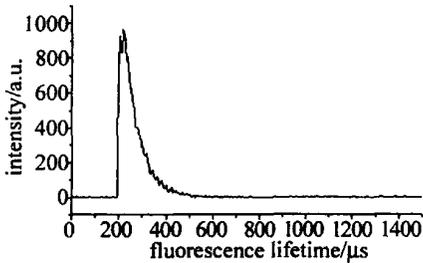


Fig 2 Fluorescence lifetime of emerald crystal

祖母绿的受激发射截面比其它一些知名的含 Cr^{3+} 激光晶体都大, 732nm 处的发射截面 $\sigma_e = 2.86 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, 该值约是金绿宝石和石榴石发射截面的 4 倍。通过光谱计算及晶体场参数的理论研究可知, 该晶体晶场参数 D_q 与 Racah 参数 B 分别为 1653 cm^{-1} 和 713 cm^{-1} , $D_q/B \approx 2.3$, $C/B = 4.1$, 同其它常见的含 Cr^{3+} 离子激光晶体晶场参数比较 (如表 1 所示), 其晶体场

Table 1 Comparison of ligand field parameters for emerald with other Cr doped crystals

material	D_q / cm^{-1}	B / cm^{-1}	D_q/B	C / cm^{-1}	C/B
$\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}^*$	1653	713	2.32	2910	4.1
BeAl_2O_4	1709	675	2.53	3245	4.8
Al_2O_3	1664	640	2.60	3300	5.2
YAB	1680	672	2.50	3225	—
GAB	1695	673	2.52	3380	5.0
GSB	1563	638	2.45	—	—

* — this work, 其余见参考文献 [16]

属于中等强度, 这些特点决定了该晶体线发射较弱而宽带发射较强, 这和实际情况是一致的。此外, 该晶体具有较小的有效声子能量和 Huang-Rhys 因子^[14], 其特点可以和许多氟化物晶体对比^[17], 说明电-声子耦

合作用较弱。这些数据综合起来说明了祖母绿晶体中的 Cr^{3+} 离子代替 Al^{3+} 离子处于中等晶场作用之下。

1.2 实验过程

实验采用如图 3 所示的对称共焦腔结构。M₁ 为

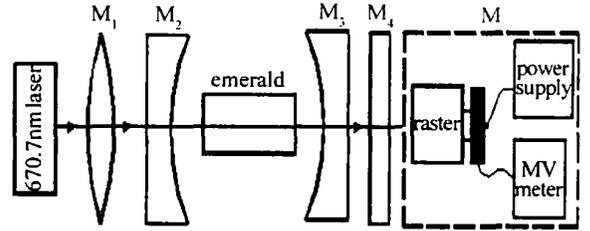


Fig 3 Schematic of symmetric confocal resonators

聚焦透镜, 表面镀 670.7nm 增透膜; M₂ 和 M₃ 均为曲率半径为 31.5cm 的凹面镜, M₂ 凹面镜对 732nm 全反和对 670.7nm 增透的双色膜, M₃ 凹面镜对 670.7nm 全反和 732nm 部分透过的双色膜。M₄ 为 600nm ~ 700nm 范围的平面滤色镜片。M 为测量装置, 主要包括光栅单色仪、光电倍增管、微安表、功率计等。使用上海光学仪器厂生产的 56W 小型凹面光栅单色仪进行分光, 其波长读数精度为 $\pm 0.5 \text{ nm}$ 。凹面全息光栅的光栅条数为 1200 line/mm, 外加光电倍增管和微安表或者直接使用功率计进行光学测量。

所用祖母绿激光棒是根据祖母绿的散射颗粒分布、生长条带方向和结晶学方位定向切割成如图 4 所示的断面为四边形的柱状体, 长度为 10.5mm, 端面尺

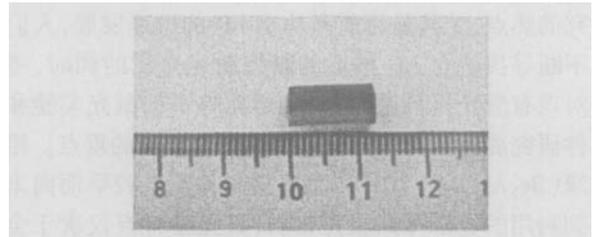


Fig 4 Polished emerald laser rod

寸为 3 mm × 5mm, 两端均镀有 670.7nm 波段的增透膜, 两端面平行度小于 1'。考虑到祖母绿晶体的最大偏振吸收特点, 避免光束分裂, 选择通光方向与晶体的光轴方向垂直, 即 670.7nm 抽运光的偏振方向平行于祖母绿晶体的光轴, 因此, 732nm 激光输出为平行于光轴的 π 偏光。为了降低激光运转过程中晶体的温升, 使用水冷模块进行通水冷却。实验中所使用的 670.7nm 激光为文献 [18] 中报道的装置, 最大输出是 3.26W, 而稳定最大输出是 2.89W, 偏振方向为水平方向, 考虑到祖母绿激光晶体的生长层面 (条带) 平行于光轴, 因此, 安置祖母绿晶体时使其光轴方向成为水平方向, 这样有利于光吸收和受激发射。

2 实验结果与讨论

实验中, 在室内温度 310K, 光电倍增管的电压为

500V、毫伏表 50 档位的测试条件下, 对不同 670.7nm 抽运功率下祖母绿晶体的 732nm 波长激光的相对输出信号进行了系统的实验(毫伏表的相对读数值), 获得的 732nm 激光输出相对信号强度与红光抽运功率的关系如图 5 所示。通过不断调整激光谐振腔各部件和光电倍增管上的电压以获得最佳的稳定激光输出。

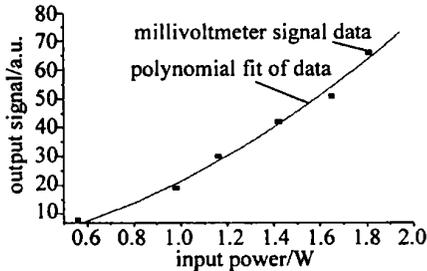


Fig 5 Relative output signal versus input power for emerald (relative signal data), testing conditions 310K, 500V

当重新调整输入红光的谐振腔参数, 获得了红光的最大输出功率达到了 2.89W 稳定输出时, 经过聚焦透镜后到达 M_2 镜后表面的功率为 2.17W, 微调祖母绿共焦腔的最佳位置, 使用北京物科光电技术有限公司生产的 LPE-1A 型功率能量计(微瓦级, 稳定度在 $\pm 8\%$)代替图 3 中的 M, 测得 732nm 激光输出为 46 μ W, 但稳定性差, 分析原因可能是受功率能量计自身的检出精度限制。在红光 1.81W 时, 测得 732nm 激光的半高宽为 20nm 左右, 如图 6 所示。这一数值和文献 [5] 中报道的助熔剂法祖母绿的半高宽 22nm 基本一致。

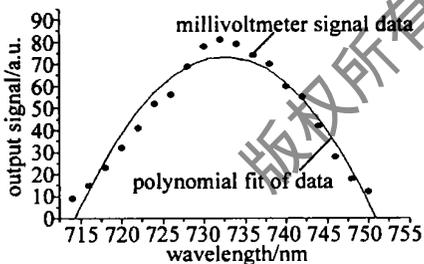


Fig 6 Bandwidth detection of emerald laser (relative signal data), testing conditions 310K, 400V

由于 640nm ~ 660nm 之间的大功率激光光源并不多见, 使用的 670.7nm 抽运源和祖母绿晶体的 π 偏光的吸收峰 652nm 有一定的差距, 加上晶体质量和镜片镀膜质量的限制等原因, 本次研究未能进行祖母绿晶体的红外 732nm 激光输出功率的多点系统测量。但从目前激光器运转情况和图 5 来看, 晶体的抽运阈值在 0.5W 与 0.6W 之间, 这个数值要比文献 [1]、文献 [2] 中报道的小而与文献 [5] 中报道的基本一致。但使用的抽运光源偏离了该晶体的最大吸收位置, 从这一点来讲, 激光抽运阈值会更低一些, 这也从侧面反映了温差水热法生长的晶体质量较好。

3 结论

祖母绿晶体的光学特点表明, 该晶体属于中等晶体场, 具有宽带辐射和线发射特点, 能级的寿命较长。由于 Cr^{3+} 离子的 ${}^2\text{E}$ 能级在 Tanabe-Sugano 能级图中处于 ${}^4\text{T}_2$ 能级的下方且距离较近, 故 ${}^2\text{E}$ 能级可作为“粒子库”, 这样易于通过热激发使 ${}^4\text{T}_2$ 能级的粒子受激发射, 从而获得较低的阈值及较高的发射强度, 使祖母绿晶体在室温下就能够获得激光输出, 这一点已经被以往的实验 [4, 5] 和本次实验所证实。

使用 670.7nm 激光对温差水热法合成的祖母绿晶体进行了激光实验, 实现了 732nm 激光输出, 但功率微弱, 当抽运功率达到 2.89W 时, 获得了 46 μ W 的微弱输出。

该晶体的输出功率小的原因是双色镜镀膜质量有待于提高, 如果使用靠近吸收主峰的合适波长激光二极管 LD 进行抽运, 还需要进一步减小晶体的通光长度。目前, 已经订购了 2.5W 650nm LD 准备进行进一步的实验。

本文中所用晶体的加工与实验是在中国科学院福建物质结构研究所进行的, 在此深表谢意。

参考文献

- [1] SHAND M L, WALLING J C. A tunable emerald laser [J]. IEEE J Q E, 1982 QE18(11): 1829~1830
- [2] BUCHERT J, KATZA, ALFANO R R. Laser action in emerald [J]. IEEE J Q E, 1983 QE19(10): 1477~1478
- [3] SHAND M L, LAI S T. CW laser pumped emerald laser [J]. IEEE J Q E, 1984 QE20(20): 105~108
- [4] LAI S T. Highly efficient emerald laser [J]. J O S A, 1987, B4(8): 1286~1290
- [5] ANTSEFEROV V V. Free-running emerald laser [J]. Technical Physics 2000 45(8): 1085~1087
- [6] CHEN Z Q, ZHANG G, SHEN H Y *et al*. Solubility of emerald in H_2SO_4 aqueous solution under hydrothermal conditions [J]. J Crystall Growth 2002, 244(3~4): 339~341.
- [7] BARILLO S N, BYCHKOV G L, KURNEVICH L A *et al*. Controlled crystallization of emerald from the fluxed melts [J]. J Crystall Growth 1999, 198/199(1): 716~722
- [8] CHEN Z Q, ZENG J L, ZHONG W Z *et al*. Research on the growth habit of hydrothermal emerald crystal [J]. Journal of Synthetic Crystal 2002, 31(2): 34~38 (in Chinese).
- [9] CHOI E K M M, JUNG C. Single crystal growth of synthetic emerald by flux circulation method of temperature gradient in used natural beryl [J]. Journal of Synthetic Crystal 1997, 23(3~4): 524 (in Chinese).
- [10] KIM L I G, YEOMA T H, CHO H B S H *et al*. ${}^{27}\text{Al}$ NMR relaxation studies of an emerald single crystal [J]. Solid State Communications 2000, 114(6): 311~314
- [11] KAYAMA M, KUWANO J. Effects of the phosphorus ion additive on the crystal habit of the emerald crystals grown from the $\text{V}_2\text{O}_5\text{-Li}_2\text{O-P}_2\text{O}_5$ fluxes [J]. J Crystall Growth, 1998, 193(4): 648~655.

性能分析在本文中的要求下主要就是硬度分布上要与理论的数值相符。

对 I 号试样的显微硬度测定得出硬度分布图, 见图 4。

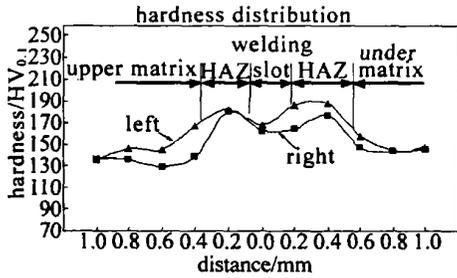


Fig 4 Vertical hardness distribution of welding slot of Na I sample

从图 4 中可以看出, 硬度在影响区边界出现最高值, 而在焊缝中间反而会降低。试样右侧硬度梯度相对较平滑, 可见其焊缝处组织变化小, 而左侧硬度梯度则相对较大, 即说明该侧焊接时组织变化较大。具体原因可理解为焊接时两侧的装夹定位有差异, 导致两侧受热冷却的速度和方式不同。和前面的显微组织分析联系起来考虑可以得出, Q235 钢带防护螺母利用激光焊接可以满足组织和性能上的要求。

对 II 号试样的硬度测定结果见图 5。

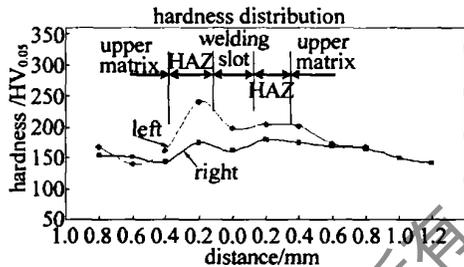


Fig 5 Vertical hardness distribution of welding slot of Na II sample

由上面的硬度分布图可以看出, H62 螺母与防护罩的焊接处硬度分布在左侧与右侧有很大区别, 左侧影响区小, 硬度梯度较大; 右侧影响区大, 硬度梯度平缓, 并且其焊缝处硬度比左侧普遍小很多, 这可以从上面的显微组织分析中得出解释, 左侧组织细密而右侧组织较为粗大。

针对该图中的硬度分布问题应该在焊接工艺和参数选择上进行优化, 首先, 在试样的装夹与定位上一定要保证不能有偏离。这也可以认为是导致左右两侧硬度出现大差距的原因之一。

3 结论

(1) 对普通 Q235 钢带防护螺母进行激光焊接, 得到的影响区比传统方法所得到的狭窄, 而且组织和硬度变化比较平缓。

(2) 对黄铜 (H62) 带防护螺母进行激光焊接, 通过组织和硬度分析可以得出: H62 在进行激光焊接时组织没有明显的长大, 硬度分布也比较合理。

(3) 对带防护螺母用激光焊接, 成本低, 得出的组织与性能完全能符合要求。

参考文献

- [1] WANG P C, EW NG K M. Effect of weld design on the fatigue strength of laser and resistance spot welded tubular T-joint for automotive applications [J]. *Welding J* 1994, 73(9~12): 209~216.
- [2] YANG Y S, LEE S H. A study on the joining strength of laser spot welding for automotive applications [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999(94): 151~156.
- [3] WU T B. Forming technology by cold press and moulds of cap nut [J]. *Mould Industry*, 1995(9): 28~30 (in Chinese).
- [4] XU Y Y, ZHANG Y K, WANG W X. A comparative study on the weld area properties of the flying hammer bracket by laser welding or with brazing [J]. *Applied Laser* 2003, 23(5): 277~280 (in Chinese).
- [5] LÜ D L, LI Y Zh. Analysis of welding metallographic [M]. Beijing China Machine Press 1987, 17~56 (in Chinese).
- [6] WANG J Ch. Development and expectation of laser welding technology [J]. *Laser Technology* 2001, 25(1): 48~54 (in Chinese).
- [7] ZHOU J M, ZHANG Y K, XU Y Y *et al*. Laser welding on hub nut of automobile wheel [J]. *Hot Working Technology*, 2004(4): 42~43 (in Chinese).
- [8] WANG Z J, OU X J, CHEN W Zh *et al*. Study on weldability of H62 brass by laser welding [J]. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 1997, 37(8): 40~43 (in Chinese).
- [9] ZHENG Q G, GU J H, WANG T *et al*. Investigation on melting pool behavior and defects of laser welding [J]. *Laser Technology*, 2000, 24(2): 90~95 (in Chinese).

(上接第 243 页)

- [12] KOMULA J I, KAMMERLING R C, DEGH INNNO D *et al*. Gemological investigation of a new type Russian hydrothermal synthetic emerald [J]. *Gems and Gemology*, 1996, 32(1): 32~39.
- [13] CHEN Z Q, ZENG J L, CAI K Q *et al*. Characterization of Chinese new hydrothermally grown emerald [J]. *Australian Gemologists* 2001, 20(1): 45~48.
- [14] CHEN Z Q, ZHANG G, SHEN H Y *et al*. Spectrum properties of hydrothermal emerald laser crystals [J]. *Acta Photonica Sinica* 2004, 33(3): 382~384 (in Chinese).
- [15] CHEN Z Q, ZHANG G, SHEN H Y *et al*. Measurement of refractive indices and thermal refractive index coefficient of $\text{Cr}^{3+}:\text{B}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$ crystal by autocollimation method [J]. *Science in China* 2004, E47(2): 186~190.

- [16] LONG X, LIN Z, HU Z *et al*. Optical study of Cr-doped $\text{LaSc}(\text{BO}_3)_4$ crystal [J]. *Journal of Alloys and Compounds* 2002, 347(1~2): 52~55.
- [17] LUO Z D, HUANG Y D. Spectrum physics of state laser materials [M]. Fuzhou: Fujian Press of Science and Technology, 2002, 113~120 (in Chinese).
- [18] CHEN Z Q, ZHANG G, SHEN H Y *et al*. High power red laser from intracavity-doubled Nd:YAG/ D_3/LBO laser [J]. *Chinese Journal of Lasers* 2003, 30(10): 873~876 (in Chinese).