

文章编号: 1001-3806(2011)02-0193-03

Cr,Nd:YAG 陶瓷作为太阳光抽运材料的可行性研究

张立伟,赵长明*,杨苏辉,罗萍萍,刘 诚
(北京理工大学 光电学院,北京 100081)

摘要: 为了研究 Cr,Nd:YAG 陶瓷作为太阳光抽运材料的可行性,采用光纤光谱仪实际测量了太阳光谱及其吸收光谱,计算了吸收系数曲线,以及 Cr,Nd:YAG 陶瓷吸收谱与太阳光谱的匹配程度,并在一定假设条件下,计算了介质的阈值抽运功率密度。结果表明,Cr,Nd:YAG 陶瓷在可见光和近红外波段具有较宽的吸收带,其各个吸收带的总能量占太阳常数的 38.44%,达到了很高的光谱匹配程度,证实了 Cr,Nd:YAG 陶瓷是太阳光抽运激光器工作物质的理想选择。

关键词: 材料;激光器;太阳光抽运;Cr,Nd:YAG 陶瓷;光谱分析;抽运阈值

中图分类号: TN204 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2011.02.014

Study on the feasibility of Cr,Nd:YAG ceramic used for solar pumped lasers

ZHANG Li-wei, ZHAO Chang-ming, YANG Su-hui, LUO Ping-ping, LIU Cheng
(School of Optical Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to study the feasibility of Cr,Nd:YAG ceramic used for solar-pumped lasers, the absorption spectra of Cr,Nd:YAG ceramic and solar spectrum were measured with a fiber optic spectrometer actually, the absorption coefficient curve was calculated, the percentage of the solar energy which could be absorbed by Cr,Nd:YAG ceramics was calculated. In an assumed condition, the threshold of pumped power density of the medium was calculated. The results show that the Cr,Nd:YAG ceramic have broad absorption bands at visible light and near-infrared band and the matching degree reached 38.44%, so Cr,Nd:YAG ceramic can be chosen as the most suitable medium for solar-pumped lasers.

Key words: materials; lasers; solar-pumped; Cr,Nd:YAG ceramic; spectrum analysis; pump threshold

引 言

随着社会经济的快速发展,人类所面临的能源问题和环境问题越来越突出,太阳能作为一种可再生的清洁能源,无疑受到各国的普遍重视。太阳光直接抽运激光器作为一种很具前景的太阳能利用方式,它是以太阳光辐射能为抽运源,把宽波段、非相干的太阳光转换成窄波段、相干的激光,直接进行光光转换,具有效率高、结构简单、无污染等优点。

太阳光由连续光谱构成,是一种宽光谱的非相干光,其大部分的能量集中在可见光和近红外波段。因此,选择激光工作物质时,首先,研究其在可见光和近红外波段是否具有宽的吸收光谱,这是能作为太阳光抽运激光器工作物质的必备条件,而且工作物质的吸收谱与太阳光谱的匹配程度越高,对太阳光的吸收就越高效,就越有利于抽运效率的提高。

铬、钕双掺的钇铝石榴石($\text{Cr}^{3+}, \text{Nd}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$)通常简称为 Cr,Nd:YAG,是在作为基质的钇铝石榴石 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 陶瓷中掺入铬、钕的氯化物进行混合制成的新型固体激光材料。由于 Cr^{3+} 对可见光波段具有宽的吸收带,将其作为敏化剂掺入 Nd:YAG 中,可以将 Cr^{3+} 吸收的能量传递给 Nd^{3+} ,这样大大提高了抽运效率^[1]。理论上,这种激光材料的吸收谱与太阳光谱具有很高的匹配程度,而且 Cr,Nd:YAG 陶瓷以 4 能级方式运转,具有较低的激光阈值,因此,是太阳光抽运激光器工作物质的理想选择。

1 Cr,Nd:YAG 透明陶瓷的基本性质

Cr,Nd:YAG 属立方晶系,光学上各向同性,硬度高。其主要的物理、光学特性如表 1 所示^[2-4]。由表 1 可以看出,这种新型的透明陶瓷激光增益介质具有好的热传导系数和较强的抗热冲击能力,可较好地抑制抽运过程中的热效应;具有较大的受激发射截面,阈值相对较低,有利于高效的提取能量;具有较长的荧光寿命,便于储能;由于 Cr^{3+} 的掺入,在可见光波段具有较宽的吸收带,这大大提高了抽运效率。另外,这种透明陶瓷材料与晶体相比,制备周期短,制备成本较低;

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60978029)

作者简介:张立伟(1986-),男,硕士研究生,主要从事新型固体激光器方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: zhaochangming@bit.edu.cn

收稿日期:2010-06-22;收到修改稿日期:2010-07-05

Table 1 Physical and optical characteristics of Cr,Nd:YAG ceramic

chemical formula	Cr ³⁺ , Nd ³⁺ :Y ₃ Al ₅ O ₁₂
Cr ³⁺ density (atomicity fraction)	0.001
Nd ³⁺ density (atomicity fraction)	0.010
density/(g · cm ⁻³)	4.56
melting point/°C	1970
Young's modulus/GPa	308
Poisson's ratio	0.233
stimulated-emission cross-section of 1064nm/cm ²	6.5 × 10 ⁻¹⁹
spontaneous fluorescence lifetime/μs	<600
index of refraction	1.82
thermal conductivity/(W · cm ⁻¹ · K ⁻¹)	0.14
absorption bands/nm	Cr:350 ~ 740

可以制作各种形状并便于制作大尺寸;掺杂离子浓度较高,掺杂离子分布均匀,而且可以掺杂多种激活离子;烧结的温度比晶体熔点低^[5]。

2 Cr,Nd:YAG 陶瓷吸收谱与太阳光谱的匹配分析

2.1 Cr,Nd:YAG 陶瓷吸收谱分析

分析材料的吸收谱一般采用光谱仪对材料的吸收谱线进行测量,一般的方法是测量样品吸收前和吸收后两组光谱曲线,将两组曲线对应的值相除,再对所得到的数值取自然对数并除以样品的长度,即可得到样品在被测量谱线的吸收系数。具体的表达式为:

$$A(\lambda) = \frac{1}{l} \ln \frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda)} \quad (1)$$

式中, $I_0(\lambda)$ 表示样品吸收前测量的光谱曲线, $I(\lambda)$ 表示样品吸收后测量的光谱曲线, l 为样品的长度,吸收系数单位为 cm^{-1} 。

实验中所采用的光谱测量仪器是美国 Ocean Optics 公司出品的 S2000 型微型光纤光谱仪。该光谱仪通过 USB 接口与计算机连接,依靠计算机供电,无需外接电源,可即插即用。光纤光谱仪入射狭缝 25 μm,光栅刻线密度 600lp/mm,闪耀波长 750nm,测量波长范围 450nm ~ 1100nm,探测器为 2048 元件线性硅片 CCD 阵列,光谱分辨率为 1nm。测量信号通过一根单芯光纤(数值孔径 $d_{NA} = 0.22$)进入光谱仪,测量结果经过仪器应用软件处理在计算机上实时显示。仪器参量设置为:积分时间 3ms,采样平均数 100,平滑点数 3。由于大气成分的影响,采用光谱仪测量地面太阳光谱时,需注意测量时刻及测量条件对所得光谱准确度的影响^[6]。

首先,测量时刻对太阳光谱测量的影响。早上和傍晚时刻,峰值波长向长波移动,这是由于当太阳升起和落下时,太阳光穿过大气层到达地面的路径较长,大

气对短波长成分的总衰减大,进入光谱仪的长波段能量较多;相比之下,正午时刻太阳光穿过大气的路径最短,大气对短波长成分的衰减减小,故测得的太阳光谱与大气上界的太阳光谱分布较为类似。因此,采用光谱仪测量太阳光谱适宜在正午进行。

另外,由于大气对太阳光的散射作用,到达地面的太阳光谱包括太阳直射的光谱和经过大气散射后的光谱,这样测得的光谱就与大气上界的太阳光谱分布相比差距较大。因此,使用光谱仪测量时,光纤头倾斜角度需与该时刻的太阳高度角一致(即太阳直射),这样在所测得的光谱中以太阳直射光谱为主。

作者采用 S2000 型微型光纤光谱仪,对 Cr,Nd:YAG陶瓷棒的太阳光谱的吸收曲线进行了测量,图 1 为实测太阳光直射情况下吸收光谱的测量截图,图 2 为将实测的光谱按(1)式处理后,得到的 Cr,Nd:YAG陶瓷对太阳光的吸收系数曲线。

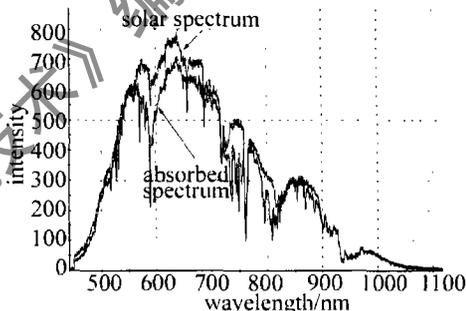


Fig. 1 Absorption spectra of Cr,Nd:YAG ceramic

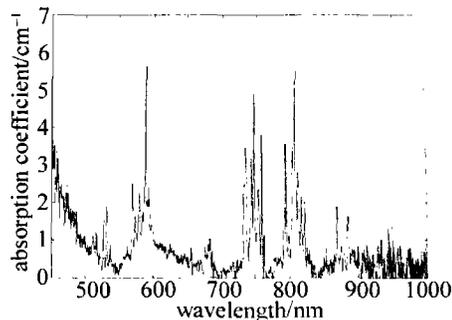


Fig. 2 Absorption coefficient curve of Cr,Nd:YAG ceramic

2.2 Cr,Nd:YAG 陶瓷吸收谱与太阳光谱的匹配计算

分析激光工作物质吸收光谱与太阳光谱的匹配程度,是选择适合太阳光抽运工作物质的依据。研究工作物质吸收光谱对太阳光谱的匹配程度,作者可以通过对工作物质主要吸收谱波段在太阳光谱分布中所占比例的计算来分析。根据图 2 中计算得到的 Cr,Nd:YAG陶瓷对太阳光谱的吸收系数曲线,结合图 1 中实际测量到的地面太阳光谱,就可计算出 Cr,Nd:YAG陶瓷棒实际吸收的太阳光谱能量,其与太阳光谱内的总能量的比值即可反映吸收谱与太阳光谱的匹配程度。

按照上述计算方法,计算所得的各主要吸收带的

辐射度及吸收总能量占太阳常数的百分比见表 2。

Table 2 Result of the spectrum analysis

active medium	absorption spectrum/nm	absorbent energy/(W · m ⁻²)	percentage of solar constant/%
Cr,Nd:YAG	450 ~ 490	96.56	38.44
	510 ~ 540	68.32	
	560 ~ 630	168.72	
	675 ~ 690	31.76	
	730 ~ 760	66.32	
	790 ~ 825	51.28	
	865 ~ 890	42.55	

由图 2 可知,Cr,Nd:YAG 陶瓷棒对太阳光的吸收带大致可分为 450nm ~ 490nm,510nm ~ 540nm,560nm ~ 630nm,675nm ~ 690nm,730nm ~ 760nm,790nm ~ 825nm,865nm ~ 890nm。从表 2 可以看出,Cr,Nd:YAG 陶瓷各个吸收带的总能量占太阳常数的 38.44%,因此,Cr,Nd:YAG 陶瓷吸收谱与太阳光谱有较好的匹配,而且匹配程度远高于其它工作物质,比较适合作为太阳光抽运激光器的工作物质。

3 Cr,Nd:YAG 陶瓷的阈值抽运功率密度计算

根据参考文献[7]中所建立的太阳光抽运固体激光器的理论计算模型,可以得到阈值抽运功率密度的计算公式:

$$P_{\text{solar,th}} = \frac{hc}{\eta\sigma\tau} \frac{\delta}{2L} \frac{1}{\int_V r_0(x,y,z) s_0(x,y,z) dV} \times \frac{1}{\sum_i \lambda_i \eta_i \bar{\alpha}_i} \quad (2)$$

式中, h 为普朗克常量, c 为光速, η 为量子效率, σ 为增益介质受激发射截面, τ 为增益介质荧光寿命, δ 为激光器损耗, r_0 和 s_0 分别为归一化的抽运速率分布和腔内光子数分布, η_i 表示各吸收带的太阳辐射功率占整个太阳光谱辐射功率的比例, $\bar{\alpha}_i$ 表示整个吸收带内的平均吸收系数, λ_i 为波长。

从(2)式可以看到,在实际的阈值抽运功率计算中,需要确定的因子有 δ , $\int_V r_0(x,y,z) s_0(x,y,z) dV$, L 和 $\sum_i \lambda_i \eta_i \bar{\alpha}_i$, 它们分别代表激光器的损耗、模体积 V 的光束重叠因子、谐振腔的光学长度和被吸收的光谱功率。

太阳光抽运情况下,由于抽运光在激光介质内的分布远大于谐振腔模体积的分布,因此,可认为 $\int_V r_0(x,y,z) s_0(x,y,z) dV = 1$ 。激光器谐振腔的损耗在建立实际的腔型前为未知,为方便分析,假设损耗都来源于耦合输出镜的输出,即 $\delta = T$, T 为输出镜的透过

率。对阈值的计算,只需确定被吸收的光谱功率的影响,即确定 $\sum_i \lambda_i \eta_i \bar{\alpha}_i$, 该因子可通过对 Cr,Nd:YAG 陶瓷棒的吸收光谱的测量分析得到,在图 2 中已经给出了 Cr,Nd:YAG 陶瓷棒对太阳光的吸收谱。

对图 2 中各吸收波长点取值,即可计算 $\sum_i \lambda_i \eta_i \bar{\alpha}_i$, 其中, η_i 由下式确定,表示吸收波长的光强占光纤光谱仪测量范围内的太阳辐射光强的比例,计算时,依据图 1 中所示的光谱仪测量得到的地面太阳光谱为:

$$\eta_i = \frac{\int_{\lambda_i} E(\lambda) d\lambda}{\int_{450}^{1100} E(\lambda) d\lambda} \quad (3)$$

式中, E 为强度。基于图 2 吸收系数曲线数据,计算 $\sum_i \lambda_i \eta_i \bar{\alpha}_i$ 所得的计算结果,如表 3 所示。

Table 3 Calculated result of absorption curve of Cr,Nd:YAG ceramic

range/nm	450 ~ 490	510 ~ 540	560 ~ 630	675 ~ 690	730 ~ 760	790 ~ 825	865 ~ 890
$\sum_i \lambda_i \eta_i \bar{\alpha}_i / \text{nm}$	2.36	2.89	9.66	1.09	4.02	4.67	1.2

假设谐振腔腔长 12.5cm (Cr,Nd:YAG 陶瓷棒长 10cm), 输出镜的反射率 99%, 将设计的各参量代入(2)式,即可估算 Cr,Nd:YAG 陶瓷的阈值抽运功率密度。其中各参量取值为 $hc = 1.986 \times 10^{-23} \text{ W} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}$, $\delta = T = 0.01$, $\eta = 0.88$, $\sigma = 6.5 \times 10^{-9} \text{ cm}^2$, $\tau = 600 \mu\text{s}$, $L = 20.7 \text{ cm}$, $\sum_i \lambda_i \eta_i \bar{\alpha}_i = 25.88 \times 10^{-9} \text{ m}$, 单位体积 Cr,Nd:YAG 陶瓷的太阳光抽运阈值功率为:

$$P_{\text{solar,th}} = \frac{hc}{\eta\sigma\tau} \frac{\delta}{2L} \frac{1}{\sum_i \lambda_i \eta_i \bar{\alpha}_i} = 51 (\text{W}/\text{cm}^3) \quad (4)$$

4 结 论

提高太阳光抽运固体激光器的光光转换效率的关键在于寻找吸收谱尽可能宽、且与太阳光谱匹配的激光介质,通过对 Cr,Nd:YAG 陶瓷吸收谱的测量分析以及与太阳光谱的匹配计算,发现这种激光介质由于 Cr³⁺ 作为敏化剂的掺入,在可见光波段具有较宽的吸收带,而且各个吸收带的总能量占太阳常数的 38.44%;同时,通过对其抽运阈值功率密度的计算,发现 Cr,Nd:YAG 陶瓷这种激光材料具有较低的抽运阈值,有利于高效地提取抽运能量;另外,这种透明陶瓷材料又便于制作大尺寸且成本较低,具有好的热传导系数和较强的抗热冲击能力。综上所述,Cr,Nd:YAG 陶瓷材料是太阳光抽运激光器工作物质的理想选择,这也为下一步太阳光抽运固

(下转第 209 页)

区两部分,其中硬化区的主要组织为针状马氏体、残余奥氏体和石墨球,热影响区在激光淬火时的温度比硬化区低,冷却速度慢,转变后的主要组织为残余奥氏体,石墨球和屈氏体。热影响区以下即为原始基体组织,主要成分为铁素体、珠光体和石墨球。图2中描述

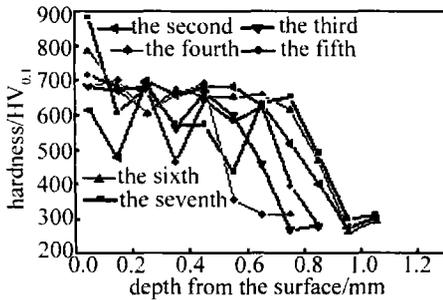


Fig.2 Hardness gradient

了第2、第3、第5、第6和第7道的硬度随硬化层深的变化规律。

微观硬度大于400的区域可视为硬化区域^[10]。由硬度梯度图可得各道硬化层的深度分别为:第2道约0.85mm,第3道约0.7mm,第4道约0.55mm,第5道约0.75mm,第6道约0.9mm,第7道约0.92mm,这与计算结果是基本吻合的。试验结果偏低是因为吸收层的热阻作用迟滞了热量的传输,以及工艺参量的选择不佳造成的光斑在定区域的停留时间不足,奥氏体来不及形核长大或者奥氏体化不充分,保留了加热前的组织。

4 结论

使用层深预测公式进行球墨铸铁 QT600-3 硬化深度的解析计算预测,所需材料参量较少,容易查询,函

数 $\text{ierfc}(x)$ 的估算程序简化了相应的计算过程,使计算过程更加简单,从而可以快速得到激光表面淬火后的硬化深度值。试验结果较好地验证了这种计算方式的正确性。

参 考 文 献

- [1] FAN X Y, WU G, SHI J. Analysis of the energy transfer coefficients associated with laser quenching using ANSYS software [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(5): 546-548 (in Chinese).
- [2] PATWA R, SHIN Y C. Predictive modeling of laser hardening of Al-Si150H steels [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, 47(2): 307-320.
- [3] ZHANG L W, PEI J B. Numerical analysis and technical parameter optimization system of laser transformation hardening process [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2001, 24(3): 42-44 (in Chinese).
- [4] ZHAN H X, WANG Y, LI Ch W. Computational and experimental study of a melt-hardened zone on a roller modified by wide-band laser treatment [J]. *Optics & Laser Technology*, 2009, 41(3): 251-257.
- [5] LI J Ch. Diffraction of laser and calculation on thermal acting [M]. Beijing: Science Press, 2002: 341-432 (in Chinese).
- [6] MAIER C. Calculation of the temperature profile for laser treatment of metallic samples [J]. *Materials Science and Engineering*, 1992, 150(2): 271-280.
- [7] BOKOTA A. Numerical prediction of the hardened zone in laser treatment of carbon steel [J]. *Acta Materialia*, 1996, 44(2): 445-450.
- [8] LI Zh Zh. Laser surface hardening [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1992: 41-46 (in Chinese).
- [9] SULITAN, SONG Y D, GULIMEILA. Reckoning of $\text{erfc}(\lambda)$ and $\text{ierfc}(\lambda)$ approximation formula in non-stable groundwater flows and their application in tarim river watershed [J]. *Arid Land Geography*, 2003, 26(4): 323-328 (in Chinese).
- [10] BA F H, YAN G Q, WU W, et al. Microhardness distribution of ductile iron modified by laser with space array [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(2): 287-291 (in Chinese).

(上接第195页)

体激光器的实验研究打下基础。

参 考 文 献

- [1] MASAMORI E. Optical characteristics of Cr^{3+} and Nd^{3+} codoped $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ceramics [J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, 42(4): 610-616.
- [2] TAKU S, KAZUO I, MOTOKOSHI S, et al. Disk-type Nd/Cr:YAG ceramic lasers pumped by arc-metal-halide-lamp [J]. *Optics Communications*, 2006, 268(1): 155-159.
- [3] PAYZIYEV S, BAKHRAMOV S, YAGI H, et al. Ceramic Nd^{3+} :

Cr^{3+} :YAG laser pumped by high power concentrated solar flux [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6871: 687126/1-687126/8.

- [4] YAGI H, YANAGITANI T, NUMAZAWA T, et al. The physical properties of transparent $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ Elastic modulus at high temperature and thermal conductivity at low temperature [J]. *Ceramics International*, 2007, 33(5): 711-714.
- [5] MA H X, LOU Q H, QI Y F, et al. Spectrum characteristics of the polycrystalline transparent ceramic [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(5): 488-490 (in Chinese).
- [6] HE J W. Study of solar pumped solid state laser [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2009: 42-45 (in Chinese).