

文章编号: 0253-2239(2007)10-1797-5

太阳光抽运固体激光工作物质的研究*

赵 彬 赵长明 何建伟 杨苏辉

(北京理工大学信息科技学院光电工程系, 北京 100081)

摘要: 探讨了适合太阳光抽运的固体激光器工作物质的选择方法,并分析了几种备选工作物质的性质。用 Matlab 对太阳光谱的现有数据进行了三次样条插值运算,建立了太阳光谱的局部精细离散化模型,并结合红宝石、Nd:YAG、Yb:YAG、Nd:YVO₄、Cr:Nd:GSGG、掺 Nd³⁺ 的光学陶瓷和掺 Yb³⁺ 的石英光纤等激光介质的吸收光谱,进行了太阳光谱与激光介质吸收谱的匹配分析。得出各激光介质所吸收的能量占太阳常量的百分比分别为 24.51%, 15.98%, 2.35%, 6.46%, 43.91%, 15.98%, 7.63%。并在一定假设条件下,计算了各介质的阈值抽运功率密度。综合以上激光介质的材料热特性,选取对太阳光吸收较多,阈值低且热特性好的 Nd:YAG, 掺 Nd³⁺ 光学陶瓷, Cr:Nd:GSGG 为较适合的太阳光抽运激光工作物质。

关键词: 激光器; 固体激光器; 工作物质; 太阳光抽运; 光谱分析

中图分类号: TN244 文献标识码: A

The Study of Active Medium for Solar-Pumped Solid-State Lasers

Zhao Bin Zhao Changming He Jianwei Yang Suhui

(Department of Optical-Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract: The properties of several solid active material for solar pumped lasers were studied. We used Matlab software to process solar spectrum with cubic spline interpolation. A local discrete model of solar spectrum was set up. With this model, we calculated the percentage of the solar energy which can be absorbed by different laser material such as Ruby, Nd:YAG, Yb:YAG, Nd:YVO₄, Cr:Nd:GSGG, Nd³⁺-doped glass ceramic and Yb³⁺-doped silica fiber are 24.51%, 15.98%, 2.35%, 6.46%, 43.91%, 15.98%, 7.63% respectively. Then in a assumed condition, we calculated the threshold of pumped power density of each active medium. Taking the thermal property of each medium into consideration, we chose Nd:YAG, Nd³⁺-doped glass ceramic and Cr:Nd:GSGG as the most suitable medium with high couple efficiency, low threshold and good thermal property for solar-pumped solid state laser.

Key words: lasers; solid-state lasers; active medium; solar-pumping; spectrum analysis

1 引 言

太阳光是连续宽光谱光源,其辐射谱中含有许多常用的激光抽运带。该类激光器经大压缩比会聚后具有高能量密度的太阳光耦合到激光介质中,使阳光中有用的抽运光对介质进行抽运而产生激光输出。在空间中,太阳能资源比地面丰富,太阳能辐射强度几乎不受时间和气候条件的限制,所以该类

激光器在卫星激光通信、空间能量无线传输、星载激光武器上都将会有重要应用。第一台太阳光抽运的固体激光器早在 1965 年就已问世^[1]。此后国外陆续报到了太阳光抽运激光输出的实现,尤其以 Nd:YAG 激光器最为多见。太阳光抽运固体激光器最主要的研究单位有以色列的 Weizmann 科学研究所、日本的东北(Tohoku)大学和美国芝加哥大学,

* 国家自然科学基金(60578032)资助课题。

作者简介: 赵 彬(1982-),男,湖北人,博士研究生,主要从事新型激光器件与技术等方面的研究。

E-mail: eggman@bit.edu.cn

导师简介: 赵长明(1960-),男,河北人,教授,博士生导师,主要从事新型激光器件与技术、光电子信息技术与系统等方面的研究。E-mail: zhaochangming@bit.edu.cn

收稿日期: 2006-11-27; 收到修改稿日期: 2007-03-30

近期德国柏林技术大学光学所也在进行这方面的研究。选择红宝石、Nd:YAG、Yb:YAG、Nd:YVO₄、Cr:Nd:GSGG、掺 Nd³⁺ 的光学陶瓷和掺 Yb³⁺ 的石英光纤等激光介质作为研究对象,分析其与太阳光谱的匹配程度、阈值抽运功率密度、材料热特性等参数,综合选取适合太阳光抽运的固体工作物质。

2 激光介质吸收谱与太阳光谱的匹配分析

各种激光介质的吸收谱不同,与太阳光谱的重合程度也不同。从选择太阳光抽运的固体工作物质角度来说,要选择对太阳光谱能量吸收多的介质,才可能得到较高的输出功率。将太阳光谱离散化成细小的光谱能量条带,再结合各种激光介质有效吸收带所在的波段,从而进行光谱匹配分析。

2.1 太阳光谱离散化模型

“太阳常量”是指日地平均距离处垂直于太阳光线的平面上,在单位时间内单位面积上所接收到的太阳辐射能。世界气象组织(WMO)的推荐值为 1367 W/m²。

《辐射度学和光度学》一书的附表中给出平均日地距离大气层外的太阳光谱辐照度数据^[2],该数据为世界气象组织和观察仪器和方法委员会(CIMO)采纳(1981年10月)。

待分析的七种激光介质的吸收带都集中在 0.25~2.00 μm 波段内,故只对这一波段进行离散化,其分布曲线如图 1 所示。

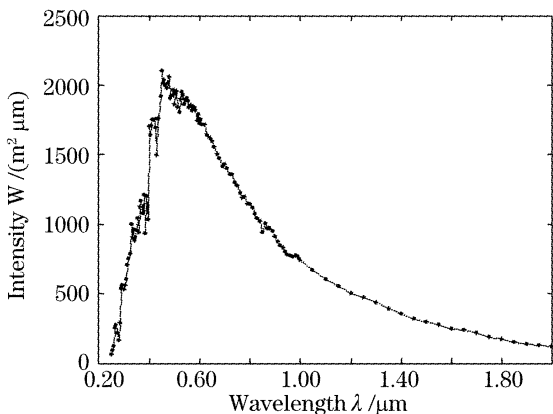


图 1 太阳光谱原始数据

Fig. 1 Original data of the solar spectrum

考虑到连续光谱曲线一般都是光滑、有连续曲率的,在 Matlab 中编写了三次样条插值的程序对原始数据点进行插值运算,将区间转换成间隔为 1nm 的 1751 个数据点。图 2 是原始数据点和插值点曲线的比较。图 3 是图 2 的局部放大。可以看出插值

运算并没有破坏原先的光谱分布,而且使得光谱曲线更加精细光滑。这样,太阳光谱 0.25~2.00 μm 的精细离散化模型就建立起来了。

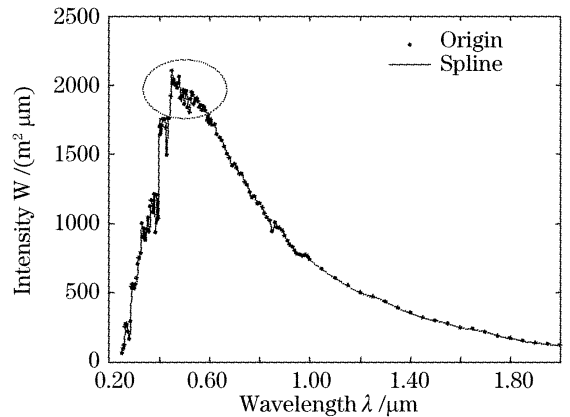


图 2 原始数据和插值数据曲线的比较

Fig. 2 Compare between the original data and the interpolated data

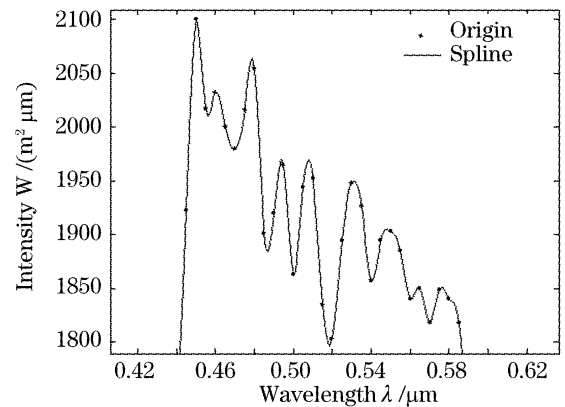


图 3 图 2 局部放大

Fig. 3 Enlargement of a part of Fig. 2

为了进一步判断插值模型的准确程度,需将插值模型的太阳辐射总照度求出来,与《辐射度学和光度学》数据表中提供的数值比较,可以大致得出模型的总误差。将插值点相应的光谱辐照度值与 1 nm 相乘,可得到每个光谱能量条带的照度值,再将 1751 个条带的能量相加可得到总照度为 1284.9 W/m²。原始数据表中,0.25~2.00 μm 段内照度值为 1283.8 W/m²。则模型值与实际值误差为 1.1 W/m²,不到千分之一,所以该模型满足用于光谱分析的要求。

2.2 匹配分析

晶体的吸收光谱是确定抽运波长和偏振方式的根据。每个抽运带对于不同偏振态的入射光吸收也不同,不过在此对偏振态并没有要求,所以对不同偏振态的吸收系数不加以区分。在此研究各晶体的主要吸收带及带宽,结合太阳光谱模型作匹配分析。计算时,不界定激光介质的尺寸,假设处于介质吸收

带内的入射太阳光全部被吸收。所讨论晶体的吸收带可能因不同方法、不同单位研制而不尽相同,在此只作研究方法性的探讨。

红宝石有两个主抽运带。蓝光波段的中心波长在 404 nm,绿光波段的中心波长在 554 nm,每个抽运带宽大约为 100 nm^[3,4]。Nd:YAG 对激光辐射有贡献的主要吸收带有五条,其中心波长按吸收系数大小排列为 810 nm,750 nm,580 nm,530 nm,870 nm,各带宽 30 nm^[5,6]。掺 Nd 的光学陶瓷主要是 Nd:YAG 多晶透明陶瓷,其吸收谱和荧光谱等光学性质和单晶 Nd:YAG 相似^[7]。与太阳光谱模型的匹配分析可参考 Nd:YAG 的结果。Yb:YAG 吸收带有 4 个:910~920 nm,935~945 nm,965~973 nm,1024~1033 nm^[8]。Nd:YVO₄ 的主要吸收带有

580 nm,750 nm,810 nm^[9],每个带宽约 21 nm^[10]。Nd:Cr:GSGG 是比较早研制成功的多掺激光晶体,利用 Cr³⁺ 充当敏化粒子,将抽运光中的短波段吸收再传递给 Nd³⁺,提高了转换效率。Cr³⁺ 的两个吸收带很宽,以 450 nm,640 nm 为中心^[4];其发射带为 700~900 nm^[11],覆盖了 Nd³⁺ 的 750 nm,810 nm,870 nm 三个吸收带。掺 Yb 的石英光纤吸收带为 860~1100 nm,考虑到其截止波长,确定有用吸收带为 860~980 nm^[12,13]。

应用太阳光谱插值模型,将吸收带内的每个小光谱带代表的辐照度值相加,可以求出吸收带吸收的能量,再求出该晶体所有吸收带所吸收的总能量及其占太阳常量的百分比。表 1 对分析结果进行了总结。

表 1 分析结果

Table 1 Result of the spectrum analysis

Active medium	Doping concentration	Doping density /cm ³	Absorption spectrum /nm	Absorbent energy /(W/m ²)	Percentage of solar constant /%
Ruby	0.05% Cr ³⁺	1.62×10 ¹⁹	354~454 504~604	335.12	24.51
Nd:YAG	1% Nd ³⁺	1.38×10 ²⁰	515~545 565~595 735~765 795~825 855~885	218.39	15.98
Yb:YAG	0.5% Yb ³⁺	0.69×10 ²⁰	910~920 935~945 965~973 1024~1033	32.09	2.35
Nd:YVO ₄	1% Nd ³⁺	—	570~590 740~760 798~818	88.3	6.46
Cr:Nd:GSGG	—	Nd ³⁺ : 2×10 ²⁰ Cr ³⁺ : 1×10 ²⁰	400~545 565~700 735~765 795~825 855~885	600.25	43.91
Yb ³⁺ -doped silica fiber	—	4×10 ¹⁸	860~980	104.34	7.63

3 各激光介质的阈值抽运功率密度计算

各种激光介质作为连续激光器的工作物质,产生激光的阈值抽运功率密度是不同的。在假设谐振腔长为 10 cm,输出镜反射率为 98%,在其他损耗不计的情况下,估算了各种介质的阈值抽运功率体密度。

依据激光原理^[14],可以得到:

1) 四能级激光器的阈值抽运功率密度为

$$P'_{pt} = \frac{h\nu_p \delta}{\eta_F \sigma_{21} \tau_s l}, \quad (1)$$

2) 三能级激光器的阈值抽运功率密度为

$$P'_{pt} = \frac{h\nu_p n}{2\eta_F \tau_s}, \quad (2)$$

以上两种能级系统的公式中,普朗克常量 h 为 $6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{S}$,平均功率单程损耗率 δ 为

$$\delta = -\frac{1}{2} \ln(1 - T), \quad (3)$$

式中 T 为输出镜透射率。前面假设输出镜反射率为 98%，那么 δ 可求得为 0.0101。 η_F 为量子效率， τ_s 为激光上能级寿命。

以上激光介质的阈值抽运功率密度的相关计算值归结为表 2，掺 Nd^{3+} 光学陶瓷性质与 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 很相近，其值可参考 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 相关数值。

表 2 阈值抽运功率密度计算结果

Table 2 The threshold of pumped power density of each active medium

	ν_p/s	n/cm^3	σ_{21}/cm^2	η_F	$\tau_s/\mu\text{s}$	$P'_{pt}/(\text{kW}/\text{cm}^3)$
Ruby	6.25×10^{14}	1.62×10^{19}	2.5×10^{-20}	0.7	3000	1.5973
$\text{Nd}:\text{YAG}$	3.7129×10^{14}	1.38×10^{20}	6.5×10^{-19}	0.6	230	2.77
$\text{Yb}:\text{YAG}$	3.1844×10^{14}	0.69×10^{20}	2.1×10^{-20}	0.9	950	842.8895
$\text{Nd}:\text{YVO}_4$	3.7129×10^{14}	—	15.6×10^{-19}	0.79	100	2.0162
$\text{Cr}:\text{Nd}:\text{GSGG}$	3.7129×10^{14}	—	3.1×10^{-19}	0.6	281	4.7541
Yb^{3+} -doped	3.0738×10^{14}	4×10^{18}	$\sigma_{s21} = 3 \times 10^{-21}$	0.9	800	565.75
Silica fiber			$\sigma_{p21} = 2.5 \times 10^{-20}$			

4 各激光介质的热特性分析

作为太阳光抽运的激光介质，必须能够承受经过成千上万倍聚焦的太阳光强带来的巨大热量。一方面要尽量滤去对抽运无用的光波，尤其是红外和紫外波段；另一方面，要选取热特性好的材料作工作物质。在此，分析文中提到的几种激光介质的热特性，从中进一步选取较合适太阳光抽运的工作物质。

从四个参数来考察工作物质的热特性：熔点、热

膨胀系数、热导率和折射率温度系数。

工作物质首先熔点要高，热膨胀系数要小，才能保证工作时不会因为大量的热聚集而出现变形、损坏的情况。其次，热导率高有利于提高制冷效果，降低工作温度；而折射率温度系数小则保证了高热状态下激光器光路的稳定性。

红宝石和 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 以及 $\text{Cr}:\text{Nd}:\text{GSGG}$ 的热特性^[4,15]列于表 3。

表 3 红宝石和 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 及 $\text{Cr}:\text{Nd}:\text{GSGG}$ 的热特性比较Table 3 Compare of the thermal property of Ruby, $\text{Nd}:\text{YAG}$, $\text{Cr}:\text{Nd}:\text{GSGG}$

	Melting point / °C	Thermal dilatability coefficient / °C	Thermal conductivity / (W/cm · K)	Thermal coefficient of refractive index / °C
Ruby	2040	// C axis: 6.7×10^{-6} ⊥ C axis: 5×10^{-6}	0.4	12.6×10^{-6}
$\text{Nd}:\text{YAG}$	1970	7.5×10^{-6}	0.14	7.3×10^{-6}
$\text{Cr}:\text{Nd}:\text{GSGG}$	1720	7.4×10^{-6}	0.06	10.5×10^{-6}

$\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体热特性差，不宜于闪光灯抽运，而且晶体易破裂和解理，难以获得高光学质量的晶体^[15]。这在所进行的实验中也已被证实： $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 与 KTP 的胶合晶体（尺寸 $4 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ ）具有阈值低，出绿光易观察等特点，但由于热特性差，不仅在太阳光抽运实验中没有出现激光输出反而因为受热过度而出现 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 与 KTP 脱落分离的情况。相比之下， $\text{Nd}:\text{YAG}$ 则能耐住巨大的热聚集，并已在实验中观察到明显的荧光现象。

掺 Nd^{3+} 光学陶瓷，尤其是 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 多晶陶瓷的性质和 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 很相近，而且热导率高，抗热冲击能力强，适合制作出大尺寸多晶陶瓷。

与 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 相比， $\text{Cr}:\text{Nd}:\text{GSGG}$ 有不足，但是

$\text{Cr}:\text{Nd}:\text{GSGG}$ 具有比 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 高的抗辐射性能。研究表明，即使 γ 射线剂量超过 100 mrad 时， $\text{Cr}:\text{Nd}:\text{GSGG}$ 仍然具有很高的损伤阈值，比 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 更适合在恶劣的环境中使用。如在空间科学研究中，要求激光器能够抵御强辐射和高能粒子的冲击， $\text{Cr}:\text{Nd}:\text{GSGG}$ 可满足这一要求。

5 结 论

红宝石是三能级系统，阈值很高，但是吸收能量较多，而且红宝石激光器技术很成熟。如果需要，可以在实验中尝试作为太阳光抽运的激光工作物质。 $\text{Nd}:\text{YAG}$ ，掺 Nd^{3+} 光学陶瓷， $\text{Cr}:\text{Nd}:\text{GSGG}$ 作为四

能级工作物质, 阈值低且吸收能量较多, 热力学性质良好, 是最适合的太阳光抽运工作物质。Yb: YAG 吸收带主要集中于近红外波段, 对太阳光中较强的可见光辐射几乎没有吸收, 与太阳光谱匹配程度低; 它是准三能级工作物质, 阈值较高。所以 Yb: YAG 不适合做太阳光抽运的工作物质。另外, 在开展太阳光抽运光纤激光器的研究时, 可以考虑掺 Yb³⁺ 的石英光纤作为激光工作物质。

太阳光抽运固体激光器的成败关键是效率。提高光-光转换效率的关键在于寻找吸收谱尽可能较宽、且与太阳光谱匹配的激光材料, 因此对可见光吸收强的多掺杂的工作物质将是首选。此外, 激光介质的形状也是值得研究的方面, 除了常规的棒状介质, 还可以考虑光纤或板条状介质。

参 考 文 献

- 1 C. G. Young. A sun-pumped CW one watt laser[J]. *Appl. Opt.*, 1966, **5**(6): 993~997
- 2 Che Nianzeng, Yan Dayuan. *Radiometry and Photometry* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1990. 476~483 (in Chinese)
车念曾, 阎达远. 辐射度学和光度学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990. 476~483
- 3 T. H. Maiman, R. H. Hoskins, I. J. D'Haenens *et al.*. Stimulated optical emission in fluorescent solids. II. Spectroscopy and stimulated emission in Ruby[J]. *Phys. Rev.*, 1961, **123**(4): 1151~1157
- 4 W. Koechner. *Solid-State Laser Engineering* [M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang transl., Beijing: Science Press, 2002. 33~77 (in Chinese)
W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文, 江泽文, 程国祥译, 北京: 科学出版社, 2002. 33~77
- 5 Li Shimin, Huang Weiling *Principle and Design of Laser Devices* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005. 168~169 (in Chinese)
李适民, 黄维玲. 激光器件原理与设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005. 168~169
- 6 Lei Shizhan. *Laser Technical Manual* [M]. Beijing: Science Press, 1992. 529~530 (in Chinese)
雷仕湛. 激光技术手册[M]. 北京: 科学出版社, 1992. 529~530
- 7 Ma Haixia, Lou Qihong, Qi Yunfeng *et al.*. Spectrum characteristics of the polycrystalline transparent ceramic [J]. *Laser Technology*, 2004, **28**(5): 488~502 (in Chinese)
马海霞, 楼祺洪, 漆云凤等. Nd: YAG 多晶透明陶瓷的光谱性质[J]. 激光技术, 2004, **28**(5): 488~502
- 8 Wang Xiaodan, Zhao Zhiwei, Xu Xiaodong *et al.*. Spectroscopic properties of Yb: Y₃Al₅O₁₂ with Yb-doping concentration 0.5 at.-% [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(5): 692~696 (in Chinese)
王晓丹, 赵志伟, 徐晓东等. Yb 掺杂原子数分数为 0.5% 的 Yb: Y₃Al₅O₁₂ 晶体的光谱分析[J]. 中国激光, 2006, **33**(5): 692~696
- 9 Meng Xianlin, Zhang Huaijin, Zhu Li *et al.*. Spectra and laser properties of Nd: YVO₄ single crystal [J]. *J. Synthetic Crystals*, 1999, **28**(2): 135~139 (in Chinese)
孟宪林, 张怀金, 祝俐等. 掺钕钒酸钇单晶光谱与激光特性[J]. 人工晶体学报, 1999, **28**(2): 135~139
- 10 R. A. Fields, M. Birnbaum, C. L. Fincher. High efficient Nd: YVO₄ diode-laser end-pumped laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **51**(23): 1885~1886
- 11 A. L. Denisov, V. G. Ostroumov, Z. S. Saidov *et al.*. Spectral and luminescence properties of Cr³⁺ and Nd³⁺ ions in gallium garnet crystals [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1986, **3**(1): 95~101
- 12 Mei Lin, Wang Ying, Wang Zhenjia *et al.*. Numerical analysis of the transient-state behavior of Yb³⁺-doped double-clad fiber laser [J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(3): 225~231 (in Chinese)
梅林, 王英, 王振佳等. 掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器的暂态数值分析[J]. 激光技术, 2006, **30**(3): 225~231
- 13 Yin Hongbing, Li Shiyu, Cheng Shuling *et al.*. Manufacture of Yb³⁺ doped fiber and its laser properties [J]. *Study on Optical Communications*, 1999, **95**(5): 23~26 (in Chinese)
尹红兵, 李诗愈, 程淑玲等. 掺 Yb³⁺ 石英光纤的制备及其激光性能[J]. 光通信研究, 1999, **95**(5): 23~26 (in Chinese)
- 14 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong *et al.*. *Laser Principle* [M]. Fourth edition. Beijing: National Defense Industry Press, 2000. 168~169 (in Chinese)
周炳琨, 高以智, 陈倜嵘等. 激光原理[M]. 第4版. 北京: 国防工业出版社, 2000. 168~169
- 15 Zhang Yulong, Tang Lei. *Synthetic Crystal-Crystal Technique, Performance and Application* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. 96~160 (in Chinese)
张玉龙, 唐磊. 人工晶体——生长技术、性能与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. 96~160