

太阳光泵浦固体激光阈值的理论分析

张军斌^{1,2,3}, 黄志云^{1,2,3*}

1. 福建师范大学 光电与信息工程学院 激光与光电子技术研究所, 福建 福州 350007;
2. 福建省光子技术重点实验室, 福建 福州 350007;
3. 医学光电科学与技术教育部重点实验室, 福建 福州 350007)

摘要: 为了选择适合太阳光泵浦的激光材料, 本文从四能级速率方程出发, 综合考虑了太阳辐射带状光谱特性和激光材料对泵浦光吸收能力, 建立了太阳光泵浦固体激光理论模型。利用该模型推导得到了单束光侧面泵浦和椭球腔侧面泵浦方式下的泵浦阈值表达式, 并结合 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 、 $\text{Nd}^{3+}:\text{glass}$ 、 $\text{Nd}^{3+}:\text{Cr}^{3+}:\text{GSGG}$ ($\text{Nd}^{3+}:\text{Cr}^{3+}:\text{Gd}_3\text{Sc}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$)、 $\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$ 和 $\text{Cr}^{3+}:\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 等激光材料的光谱参数, 计算了这些材料的泵浦阈值光强。结果表明: 在单束光侧面泵浦和椭球腔侧面泵浦方式下, $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 的泵浦阈值光强分别为 448 个太阳常数和 224 个太阳常数, 是比较适合用太阳光泵浦的激光材料。由于椭球腔的特殊结构, 采用椭球腔侧面泵浦激光介质, 阈值光强比较低。分析了泵浦阈值光强与材料直径的关系。该模型可用于从现有的激光材料中筛选出在太阳光泵浦下最易输出激光的工作物质。

关键词: 固体激光器; 太阳光泵浦; 速率方程; 理论分析; 泵浦阈值光强

中图分类号: TN224 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20160902.0241

Theoretical analysis on threshold of solar pumped solid state lasers

ZHANG Jun-bin^{1,2,3}, HUANG Zhi-yun^{1,2,3*}

1. *Institute of Laser and Optoelectronics Technology, College of Photonics and Electronic Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;*
 2. *Fujian Provincial Key Laboratory for Photonics Technology, Fuzhou 350007, China;*
 3. *Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology for Medicine of Ministry of Education, Fuzhou 350007, China)*
- * *Corresponding author, E-mail: zhiyunhuang@fjnu.edu.cn*

Abstract: In order to select suitable solar pumped laser materials, a theoretical model is established based on the four-level rate equation, taking the solar spectrum into account. By this model, the pump intensity thresholds of $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$, $\text{Nd}^{3+}:\text{glass}$, $\text{Nd}:\text{Cr}:\text{GSGG}$ ($\text{Nd}^{3+}:\text{Cr}^{3+}:\text{Gd}_3\text{Sc}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$), $\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$ and $\text{Cr}^{3+}:\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ for the different pump schemes are analyzed. The results show that the pump intensity threshold of $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ is 448 sun constant when it is side pumped by a single beam and is 224 sun constant when it is side pumped inside a ellipsoidal cavity, respectively, indicating that $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ is suitable for solar pumped laser

收稿日期: 2015-11-03; 修订日期: 2015-12-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61008062)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61008062)

material. Due to the special structure of the ellipsoidal cavity, the pump intensity threshold is relatively low when it is side pumped inside a ellipsoidal cavity. The relationship between the pump intensity threshold and the diameter of the material is also analyzed. The model could be applied to select suitable materials which are easier to achieve laser output from the existing laser materials.

Key words: solid state lasers; solar pumped; rate equation; theoretical analysis; pump intensity threshold

1 引言

利用太阳光直接泵浦工作物质输出激光在太空领域有着广阔的应用前景^[1-6]。目前太阳光泵浦激光输出功率还有待提高,关键在于选择适合的激光材料和提高聚光器太阳光会聚密度。

太阳是宽光谱、低辐射密度光源,需要经过会聚才能有效泵浦工作物质。原则上可以认为激光材料的吸收带与太阳光谱的匹配度越高,吸收的太阳辐射能量就越多,就容易实现粒子数反转^[7-11]。因此,适合太阳光泵浦的激光材料一般应满足吸收带处于太阳最强或较强的发射波段内,这样才可以比较充分地利用太阳光。但是材料所吸收的太阳光除了能够使粒子数泵浦跃迁到激光上能级的那些外,其余的对激光输出实际上是没有贡献的。如工作物质吸收红外波段的能量将以热的形式存储下来,这对于激光器的运转是不利的;紫外光容易损伤工作物质等^[12]。适合太阳光泵浦的激光材料还应该具有较大的吸收系数、熔点高、热导率高和热膨胀系数小等特点^[10]。

由于太阳光谱与 LD(Laser Diode) 光谱有很大区别,直接用 LD 泵浦固体激光的理论来分析太阳光泵浦固体激光器,结果也会存在一定偏差^[10, 12-14]。以掺杂 Nd^{3+} 的激光材料为例,采用 808 nm(该波长对不同的基质材料略有不同)的半导体激光泵浦时, Nd^{3+} 离子从基态 $^4\text{I}_{9/2}$ 能级跃迁到 $^4\text{F}_{5/2}$ 能级;而在采用 880 nm 的半导体激光泵浦时, Nd^{3+} 离子则从基态 $^4\text{I}_{9/2}$ 能级跃迁到 $^4\text{F}_{3/2}$ 能级。采用这两种波长的半导体激光泵浦时, Nd^{3+} 激光的阈值是不同的。太阳作为广谱发射源,其波长覆盖了这两个波长。在这种情况下,用半导体泵浦的阈值结果来分析太阳光泵浦的阈值是有

瑕疵的。鉴于此,本文从四能级系统速率方程出发,在考虑太阳辐射带状光谱特性和激光材料对泵浦光吸收的前提下,推导了太阳光泵浦固体激光的速率方程。着重从泵浦阈值的角度分析比较了几种常用固体激光材料在单束光侧面泵浦和椭圆腔侧面泵浦下实现激光输出的难易程度。通过分析材料泵浦阈值光强的方法,可以从现有的激光材料中遴选出适合太阳光泵浦的候选工作物质。

2 理论模型

目前,只在少数几种材料中实现了太阳光泵浦的激光输出,基本属于四能级系统^[1-3, 7-8, 10-15]。究其原因,在于四能级激光容易实现粒子数反转,从而泵浦阈值较低。如图 1 所示,太阳的发射光谱较宽,存在不止一个波长将激光下能级粒子激发到激光上能级。考虑到能级精细结构,不同波长的光使下能级粒子泵浦到不同的上能级,泵浦效果上也是有区别的。此外,LD 的发射光谱很窄,一般 LD 泵浦固体激光器的四能级系统速率方程,将其光谱假设成 δ 函数形式,这是合理的。而太阳光属于宽光谱光源,在建立太阳光泵浦激

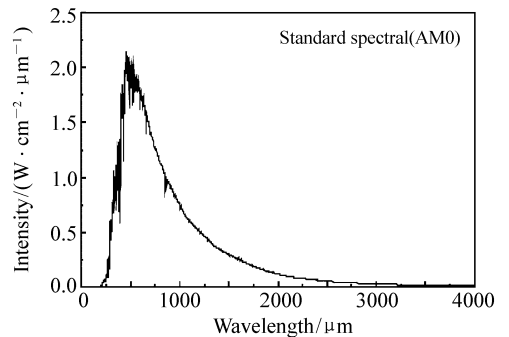


图 1 大气层外太阳光谱图

Fig. 1 Solar spectrum at upper atmosphere

光的模型时,显然不能将其光谱假设成 δ 函数形式,因此上述LD泵浦的四能级系统速率方程并不太适用于太阳光泵浦激光。

考虑到太阳光泵浦激光的具体特点,其速率方程应为:

$$\begin{aligned} \frac{dN_2(x,y,z)}{dt} = & \int_{\nu_p} \sigma_p(\nu_p) \frac{i_p(x,y,z,\nu_p)}{h\nu_p} \times \\ & \Delta N_p(x,y,z,\nu_p) d\nu_p - \sigma_e \frac{I_e(x,y,z)}{h\nu_e} \times \\ & \Delta N(x,y,z) - \frac{N_2(x,y,z)}{\tau_f}, \quad (1) \end{aligned}$$

式中, x,y 为晶体的横截面坐标, z 是晶体的纵向坐标, $N_2(x,y,z)$ 、 $i_p(x,y,z,\nu_p)$ 、 $\Delta N_p(x,y,z,\nu_p)$ 、 $I_e(x,y,z)$ 、 $\Delta N(x,y,z)$ 表示空间 (x,y,z) 处的上能级粒子数密度、聚焦后频率为 ν_p 的泵浦光强、参与频率为 ν_p 的泵浦过程的粒子数密度、激光光强和反转粒子数密度, $\sigma_p(\nu_p)$ 为频率 ν_p 处的吸收截面, h 为普朗克常量, τ_f 为上能级荧光寿命, σ_e 为受激发射截面, ν_e 为激光频率。式中对泵浦频率 ν_p 的积分正是考虑了太阳光带状泵浦的结果。如果是单一波长泵浦,则该式和LD泵浦的速率方程一致。

考虑到太阳光泵浦激光一般都以四能级系统运转,其参与泵浦过程的粒子数密度近似等于激活离子浓度,且反转粒子数近似等于激光上能级粒子数,即:

$$\int_0^L dz \int_S \sigma_e S_e(x,y,z) \frac{\int_{\nu_p} \sigma_p(\nu_p) \frac{I_p(x,y,z) S_p(\nu_p)}{h\nu_p} N_0 d\nu_p}{\sigma_e \frac{I_e(x,y,z)}{h\nu_e} + \frac{1}{\tau_f}} dS = \delta L - \ln \sqrt{1-T}, \quad (7)$$

式中, δ 为晶体单位长度的损耗, L 为晶体长度, T 为输出镜透过率, $S_e(x,y,z)$ 为激光的光强分布。

一般认为,激光光强分布由谐振腔的结构决定。通过架构合适的谐振腔,可以使激光光强为高斯光束,即

$$S_e(x,y,z) = \frac{2}{\pi w^2(z)} e^{-2\frac{x^2+y^2}{w^2}}, \quad (8)$$

式中, $w(z)$ 为 z 处高斯光束的光斑半径。将式(8)代入式(7)并令 $I_e(x,y,z)=0$,则可得泵浦阈值光强为:

$$\Delta N_p(x,y,z,\nu_p) \approx N_0, \quad (2)$$

$$\Delta N(x,y,z) \approx N_2(x,y,z), \quad (3)$$

式中, N_0 为激活离子浓度。稳态时,可得:

$$N_2(x,y,z) = \frac{\int_{\nu_p} \sigma_p(\nu_p) \frac{i_p(x,y,z,\nu_p)}{h\nu_p} N_0 d\nu_p}{\sigma_e \frac{I_e(x,y,z)}{h\nu_e} + \frac{1}{\tau_f}}. \quad (4)$$

腔内的泵浦光强 $i_p(x,y,z,\nu_p)$ 与入射太阳光强 I_{p0} 、太阳光谱的归一化频率分布 $S_p(\nu_p)$ 、晶体内部 (x,y,z) 处对频率为 ν_p 的太阳光强的吸收有关,其中:

$$S_p(\nu_p) = \frac{I_p(\nu_p)}{I_{\text{sun}}}, \quad (5)$$

式中, I_{sun} 为太阳常数(Sun Constant, 1 S. C. = 1 368 W/m²), $I_p(\nu_p)$ 为大气中频率 ν_p 处的太阳光强。基于此种理由,式(4)可写为:

$$\begin{aligned} N_2(x,y,z) = & \left[I_{p0} \int_{\nu_0} \frac{\sigma_p(\nu_p) r_p(x,y,z,\nu_p) S_p(\nu_p)}{h\nu_p} \times \right. \\ & \left. N_0 d\nu_p \right] / \left[\sigma_e \frac{I_e(x,y,z)}{h\nu_e} + \frac{1}{\tau_f} \right]. \quad (6) \end{aligned}$$

上式可以认为太阳光经过会聚后光谱是不变的,即会聚前后照射到材料表面的辐射光谱是相同的,只是会聚后光强变大^[15]。

稳态时,激光器应满足增益条件^[16-17]:

$$\begin{aligned} I_{\text{pth}} = & (\delta L - \ln \sqrt{1-T}) / \\ & \left[N_0 \tau_f \sigma_e \int_0^L dz \int_S S_e(x,y,z) \right. \\ & \left. \int_{\nu_p} \frac{\sigma_p(\nu_p) r_p(x,y,z,\nu_p) S_p(\nu_p)}{h\nu_p} d\nu_p dS \right], \quad (9) \end{aligned}$$

式中, $r_p(x,y,z,\nu_p)$ 为泵浦光强的分布。

太阳光通常采用侧面泵浦,会聚的结果是使泵浦光沿着横截面平均分配,即所谓高帽型。因此,泵浦光强可以认为和纵向 z 无关。对于小增益小损耗激光,考虑到输出耦合镜的透过率一般

很小,可以认为激光沿着纵向 z 不发生变化。则由式(9)可近似得到:

$$I_{\text{pth}} = (\delta L - \ln \sqrt{1 - T}) / [N_0 \tau_t \sigma_e L \int_S S_e(x, y) dS \int_{\nu_p} \sigma_p(\nu_p) \frac{r_p(x, y, \nu_p) S_p(\nu_p)}{h \nu_p} d\nu_p] \quad (10)$$

(1) 单束光侧面泵浦

一根长为 L , 半径为 R 的圆棒状材料, 它对频率 ν_p 的泵浦光的吸收系数为 $\alpha(\nu_p) = \sigma_p(\nu_p) N_0$ 。光强为 I_0 的光从侧面入射, 如图 2 所示。则在圆棒内任一空间点 (x, y, z) 处的泵浦光强分布为:

$$r_p(x, y, \nu_p) = e^{-\alpha(\nu_p)M} = e^{-\sigma_p(\nu_p)N_0(\sqrt{R^2 - y^2} - x)} \quad (11)$$

式中, $-\sqrt{R^2 - y^2} \leq x \leq \sqrt{R^2 - y^2}$, M 表示光入射到 (x, y, z) 处所经过的光程。

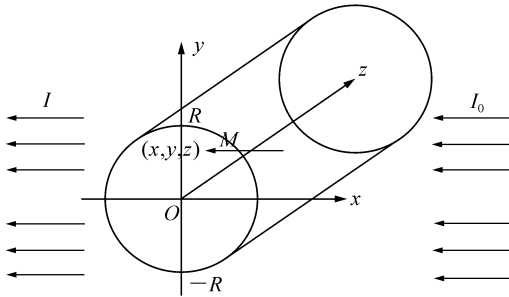


图2 单束光侧面泵浦示意图

Fig.2 Schematic of side-pumped by a single beam

将式(11)代入(10), 化简得:

$$I_{\text{pth}} = \frac{\delta L - \ln \sqrt{1 - T}}{N_0 L \tau_t \sigma_e \int_{-R}^R \int_{-\sqrt{R^2 - y^2}}^{\sqrt{R^2 - y^2}} \int_{\nu_p} \sigma_p(\nu_p) \frac{2}{\pi w^2} e^{-2\frac{x^2 + y^2}{w^2}} \frac{S_p(\nu_p)}{h \nu_p} [e^{-\alpha(\nu_p)(R - \sqrt{x^2 + y^2})} + e^{-\alpha(\nu_p)(R + \sqrt{x^2 + y^2})}] d\nu_p dx dy} \quad (14)$$

令 $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$, 则上式化简为

$$I_{\text{pth}} = \frac{\delta L - \ln \sqrt{1 - T}}{N_0 L \tau_t \sigma_e \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^R d\rho \int_{\nu_p} \sigma_p(\nu_p) \frac{2\rho}{\pi w^2} e^{-2\frac{\rho^2}{w^2}} \frac{S_p(\nu_p)}{h \nu_p} [e^{-\alpha(\nu_p)(R - \rho)} + e^{-\alpha(\nu_p)(R + \rho)}] d\nu_p} \quad (15)$$

$$I_{\text{pth}} = (\delta L - \ln \sqrt{1 - T}) / [N_0 \tau_t \sigma_e L \int_{-R}^R dy \int_{-\sqrt{R^2 - y^2}}^{\sqrt{R^2 - y^2}} dx \int_{\nu_p} \frac{2\sigma_p(\nu_p) S_p(\nu_p)}{\pi w^2 h \nu_p} e^{-2\frac{x^2 + y^2}{w^2}} e^{-\sigma_p(\nu_p)N_0(\sqrt{R^2 - y^2} - x)} d\nu_p] \quad (12)$$

(2) 椭球腔侧面泵浦

椭球腔的特点是一个焦点上发出的光将反射到另一个焦点上。采用椭球腔作为太阳光泵浦腔, 圆棒激光介质放在腔内其中一个焦点上, 则可以认为泵浦光沿着棒的侧面入射, 如图 3 所示。

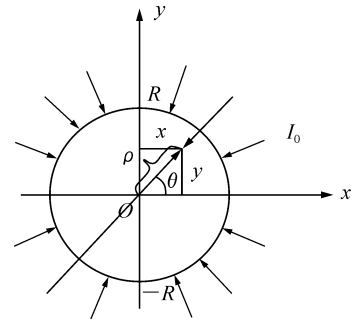


图3 椭球腔侧面泵浦示意图

Fig.3 Schematic diagram of side-pumped inside an ellipsoidal cavity

由于激光介质内泵浦光强分布具有圆柱对称性, 在圆棒内任一空间点 (x, y, z) 处泵浦光强分布为:

$$r_p(x, y, \nu_p) = e^{-\alpha(\nu_p)(R - \sqrt{x^2 + y^2})} + e^{-\alpha(\nu_p)(R + \sqrt{x^2 + y^2})} \quad (13)$$

将式(13)代入(10), 化简得:

3 数值分析

$\text{Cr}^{3+} : \text{GSGG} (\text{Nd}^{3+} : \text{Cr}^{3+} : \text{Gd}_3 \text{Sc}_2 \text{Ga}_3 \text{O}_{12})$ 、 $\text{Cr}^{3+} : \text{BeAl}_2 \text{O}_4$ 、 $\text{Cr}^{3+} : \text{Nd}^{3+} : \text{YAG}$ 等常用激光材料的光谱参数。

表 1 列出了 $\text{Nd}^{3+} : \text{YAG}$ 、 $\text{Nd}^{3+} : \text{glass}$ 、 $\text{Nd}^{3+} :$

表 1 几种常用激光材料的光谱参数
Tab.1 Spectral parameters of some laser materials

Active medium	$\text{Nd}^{3+} : \text{YAG}$	$\text{Cr}^{3+} : \text{BeAl}_2 \text{O}_4$	$\text{Nd}^{3+} : \text{glass}$	$\text{Nd}^{3+} : \text{Cr}^{3+} : \text{GSGG}$ ($\text{Nd}^{3+} : \text{Cr}^{3+} : \text{Gd}_3 \text{Sc}_2 \text{Ga}_3 \text{O}_{12}$)	$\text{Cr}^{3+} : \text{Nd}^{3+} : \text{YAG}$
Doping	1.38×10^{20}	2.9×10^{19}	2.85×10^{20}	$\text{Nd}^{3+} = 2 \times 10^{20}$	$\text{Cr}^{3+} = 1.39 \times 10^{19}$ 0.1 at. %
Density/cm ³	1 at. % ^[10]	0.1 at. % ^[12]	3 at. % ^[18]	$\text{Cr}^{3+} = 1 \times 10^{20}$ ^[10]	$\text{Nd}^{3+} = 1.39 \times 10^{20}$ 1 at. % ^[19] $\text{Nd}^{3+} ; 510 \sim 540$
Absorption band/nm	515 ~ 545		515 ~ 545	400 ~ 545	560 ~ 630
	565 ~ 595		565 ~ 595	565 ~ 700	730 ~ 760
	735 ~ 765	360 ~ 460	735 ~ 765	735 ~ 765	790 ~ 825
	795 ~ 825	500 ~ 600 ^[21]	795 ~ 825	795 ~ 825	$\text{Cr}^{3+} ; 450 \sim 490$
	855 ~ 885 ^[20]		855 ~ 885 ^[18]	855 ~ 885 ^[10]	510 ~ 540 865 ~ 890 ^[19]
Absorption cross section/cm ²	0.56×10^{-20} (530 ~ 550)			0.39375×10^{-20} (400 ~ 545)	
	0.84×10^{-20} (570 ~ 600)	1.04×10^{-19} (360 ~ 460)		0.355×10^{-20} (565 ~ 700)	
	1.41×10^{-20} (750 ~ 775)	1.9×10^{-19} (500 ~ 600) ^[21]	1.33×10^{-20}	0.125×10^{-20} (735 ~ 765)	2.518×10^{-19}
	1.69×10^{-20} (800 ~ 820) ^[14]			0.11×10^{-20} (795 ~ 825)	
				0.078×10^{-20} (855 ~ 885) ^[22]	
Fluorescence Lifetime/ μs	230 ^[12]	260 ^[12]	350 ^[23]	$\text{Nd}^{3+} ; 280$ $\text{Cr}^{3+} ; 120$ ^[24]	600 ^[13]
Emission cross section/cm ²	6.5×10^{-19} @ 1 064 ^[13]	0.7×10^{-20} @ 760 ^[25]	3×10^{-20} @ 1 064 ^[26]	3.2×10^{-19} @ 1 060 ^[27]	2.35×10^{-19} @ 1 064 ^[28]

计算中未列于上表的其他参数为: $R = 3 \text{ mm}$, $L = 100 \text{ mm}$, $T = 0.05$, $\delta = 0.002 \text{ cm}^{-1}$ 。计算结果如下,泵浦阈值光强分别为单束光侧面泵浦方式下 $\text{Nd}^{3+} : \text{YAG}$ ($6.134 \times 10^5 \text{ W/m}^2 = 448 \text{ S. C.}$)、 $\text{Cr}^{3+} : \text{BeAl}_2 \text{O}_4$ ($5.399 \times 10^7 \text{ W/m}^2 = 39470 \text{ S. C.}$)、 $\text{Nd}^{3+} : \text{glass}$ ($6.882 \times 10^6 \text{ W/m}^2 = 5031 \text{ S. C.}$)、 $\text{Nd}^{3+} : \text{Cr}^{3+} : \text{GSGG}$ ($1.239 \times 10^7 \text{ W/m}^2 = 9057 \text{ S. C.}$) 和 $\text{Cr}^{3+} : \text{Nd}^{3+} : \text{YAG}$ ($9.864 \times 10^5 \text{ W/m}^2 = 721 \text{ S. C.}$)。

); 椭球腔侧面泵浦方式下 $\text{Nd}^{3+} : \text{YAG}$ ($3.067 \times 10^5 \text{ W/m}^2 = 224 \text{ S. C.}$)、 $\text{Cr}^{3+} : \text{BeAl}_2 \text{O}_4$ ($2.7 \times 10^7 \text{ W/m}^2 = 19740 \text{ S. C.}$)、 $\text{Nd}^{3+} : \text{glass}$ ($3.441 \times 10^6 \text{ W/m}^2 = 2515 \text{ S. C.}$)、 $\text{Nd}^{3+} : \text{Cr}^{3+} : \text{GSGG}$ ($6.197 \times 10^6 \text{ W/m}^2 = 4530 \text{ S. C.}$) 和 $\text{Cr}^{3+} : \text{Nd}^{3+} : \text{YAG}$ ($4.932 \times 10^5 \text{ W/m}^2 = 360 \text{ S. C.}$)。

从图 4 中可以看出,在单束光侧面泵浦方式下 $\text{Nd}^{3+} : \text{YAG}$ 和 $\text{Cr}^{3+} : \text{Nd}^{3+} : \text{YAG}$ 的泵浦阈值光

强分别为 448 个太阳常数和 721 个太阳常数;在椭球腔侧面泵浦方式下 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 和 $\text{Cr}^{3+}:\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 的泵浦阈值光强分别为 224 个太阳常数和 360 个太阳常数。与其他几种材料相比, $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 和 $\text{Cr}^{3+}:\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 泵浦阈值光强较低,采用太阳光泵浦比较容易实现激光输出。

从图 4 中还可以看出,采用椭球腔侧面泵浦,材料的阈值光强要低于单束光侧面泵浦。从几何光学角度分析,这是因为椭球腔中一个焦点发出的光在腔壁内无论如何反射都会聚焦于另一个焦点上,那么放置于该焦点上的圆棒工作物质,其侧面都将受到泵浦光的激励。在入射泵浦光强一定的条件下,这种泵浦方式能吸收更多泵浦光功率,更充分地激励工作物质中的激活离子,从而降低了泵浦阈值。

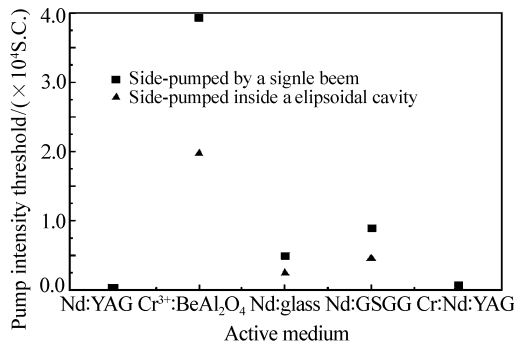


图 4 不同材料的阈值光强

Fig. 4 Pump intensity thresholds for different materials

图 5 给出了阈值光强随 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 直径变化的曲线,由图可见,在单束光侧面泵浦和椭球腔侧面泵浦方式下, $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 圆棒的最佳泵浦直径约为 0.2 mm。圆棒激光介质之所以存在最佳泵浦直径,是由于泵浦光在介质中能量呈指数衰减,那么传播某一段长度后就会出现增益小于损耗的情况,这一段长度通常与入射泵浦光光强和输出功率有关。图 5 反映的正是最佳泵浦直径与入射

泵浦光强的关系,从泵浦阈值光强分析得到的 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 圆棒的最佳泵浦直径偏小。要指出的是,这仅是从泵浦阈值光强的角度对直径所做的优化。如果从激光输出功率角度优化,则须使功率最大的直径大于使泵浦阈值光强最低的直径。

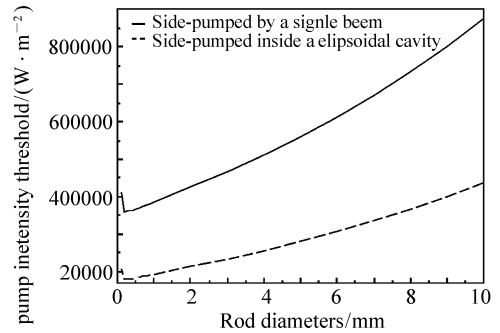


图 5 不同直径 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 的阈值光强

Fig. 5 Pump intensity thresholds versus different $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ rod diameters

4 结 论

本文提出了一种分析太阳光泵浦固体激光阈值光强的模型。不同于以往的理论,在该模型中考虑了太阳带状光谱的性质。结果表明,在单束光侧面泵浦和椭球腔侧面泵浦方式下 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 的泵浦阈值光强分别为 448 个太阳常数和 224 个太阳常数,是比较适合用太阳光泵浦的激光材料。由于椭球腔的特殊结构,采用椭球腔侧面泵浦方式,激光介质能吸收更多泵浦光功率,更充分地激励工作物质中的激活离子,泵浦阈值较低。从泵浦阈值光强与材料直径的关系曲线可以看出存在一个最佳的泵浦直径。如果从激光输出功率角度考虑最佳泵浦直径,通过对激光器优化设计,有可能进一步提高其工作效率。

参考文献:

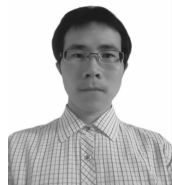
- [1] DINH T H, OHKUBO T, YABE T. Development of solar concentrators for high-power solar-pumped lasers [J]. *Appl. Opt.*, 2014, 53 (12): 2711-2719.
- [2] HE Y, XIONG S J, LIU X L, *et al.*. Key techniques for space-based solar pumped semiconductor lasers [C]. International Symposium on Optoelectronic Technology and Application 2014. International Society for Optics and Photonics, 2014: 92940P-1-92940P-8.

- [3] GRAHAM-ROWE D. Solar-powered lasers[J]. *Nat. Photon.*,2010,4(2):64-65.
- [4] 吴从均,颜昌翔,高志良. 空间激光通信发展概述[J]. *中国光学*,2013,5(6):670-680.
WU C J,YAN CH X,GAO ZH L. Overview of space laser communications[J]. *Chin. Opt.*,2013,5(6):670-680. (in Chinese)
- [5] APOLLONOV V V. High power lasers for space debris elimination[J]. *Chin. Opt.*,2013,6(2):187-195.
- [6] APOLLONOV V V. Laser weapons-myths and prospects[J]. *Chin. Opt.*,2014,3(7):491-498.
- [7] LIANG D,ALMEIDA J,GARCIA D. Comparative study of Cr:Nd:YAG and Nd:YAG solar laser performances[J]. *SPIE*,2013,8785:8785Y-1-8785Y-7.
- [8] UEDA A,HIGUCHI M,YAMADA D,*et al.*. Float zone growth and spectral properties of Cr:Nd:CaYAlO₄ single crystals[J]. *J. Cryst. Growth*,2014,404(4):152-156.
- [9] SUZUKI T,IWATA Y,NOGATA K,*et al.*. Optical characterization of Er-doped glasses for solar-pumped laser applications[J]. *Opt. Components & Materials X*,2013,8621(2):393-408.
- [10] 赵彬,赵长明,何建伟,等. 太阳光抽运固体激光工作物质的研究[J]. *光学学报*,2007,27(10):1797-1801.
ZHAO B,ZHAO CH M,HE J W,*et al.*. The study of active medium for solar-pumped solid-state lasers[J]. *Acta Optica Sinica*,2007,27(10):1797-1801. (in Chinese)
- [11] NOTER Y,ORON M,SHWARTZ J,*et al.*. Solar pumped Nd:Cr:GSGG laser[J]. *SPIE*,1989:512-520.
- [12] 刘馨阳. 太阳光泵浦紫翠宝石激光器研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007:13-37.
LIU X Y. The study of solar-pumped alexandrite laser[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2007:13-37. (in Chinese)
- [13] BOUADJEMINE R,LOUHIBI D,KELLOU A. Comparison between the performance of Nd:YAG, Nd:Cr:GSGG and Nd:Cr:YAG ceramic lasers with quasi-solar pumping[J]. *SPIE*,2015:94471M.
- [14] 戚伟佳. 太阳光泵浦 Nd:YAG 激光器的研究[D]. 长春:长春理工大学,2011:8-16.
QI W J. Research of solar-pumped Nd:YAG laser[D]. Changchun:Changchun University of Science and Technology,2011:8-16. (in Chinese)
- [15] LU Y,SHEN Z,ZHOU Y. Spectral distribution of Xe lamp focused by Fresnel lens on focal plane and design of Fresnel lens for solar-pumped Cr:Nd:YAG ceramic[J]. *J. Opt. Lett.*,2013,38(8):474-479.
- [16] FAN T Y,BYER R L. Modeling and CW operation of a quasi-three-level 946 nm Nd:YAG laser[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*,1987,23(5):605-612.
- [17] RISK W P. Modeling of longitudinally pumped solid-state lasers exhibiting reabsorption losses[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*,1988,5(7):1412-1423.
- [18] 李适民,黄维玲. 激光器件原理与技术[M]. 北京:国防工业出版社,2005:171-173.
LI SH M,HUANG W L. *Principle and Technology of Laser Device*[M]. Beijing:National Defend Industry Press,2005:171-173. (in Chinese)
- [19] 芦宇. 阳光泵浦 Cr:Nd:YAG 陶瓷激光研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013:15-19.
LU Y. Research on solar pumped Cr:Nd:YAG ceramic laser[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2013:15-19. (in Chinese)
- [20] 徐军. 激光材料科学与技术前沿[M]. 上海:上海交通大学出版社,2007:186-190.
XU J. *Laser Materials Science and Technology Frontier*[M]. Shanghai:Profile of Shanghai Jiao Tong University Press,2007:186-190. (in Chinese)
- [21] PUGH-THOMAS D,WALSH B M,GUPTA M C. Spectroscopy of BeAl₂O₄:Cr³⁺ with application to high-temperature sensing[J]. *Appl. Opt.*,2010,49(15):2891-2897.
- [22] KOECHNER W. *Solid-State Laser Engineering*[M]. New York:Springer,2010:38-101.
- [23] ZAPATA L E,WILLIAMS M D. Analysis of Nd³⁺:glass, solar-pumped, high-power laser systems[R]. NASA, Hampton,VA(USA). Langley Research Center,1989.
- [24] OSTROUMOV V G,PRIVIS Y S,SMIMOV V A,*et al.*. Sensitizing of Nd³⁺ luminescence by Cr³⁺ in gallium garnets[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*,1986,3(1):81-94.
- [25] SHAND M L. Alexandrite laser technology[J]. *Scientific & Engineering Applications of Commercial Laser Devices*,1986,

610;81-86.

- [26] 周炳琨,高以智,陈倜嵘,等. 激光原理[M]. 北京:国防工业出版社,2010:335-340.
ZHOU B K,GAO Y ZH,CHEN T R,*et al.*. *Laser Principle*[M]. Beijing:National Defend Industry Press,2010:335-340. (in Chinese)
- [27] FRENCH S E,BROWN D J,KNOWLES D S,*et al.*. Pulse-stacking technique for enhanced performance of a solid-state laser pumped by a high-pulse-rate source[J]. *Appl. Opt.*,1998, 37(3):536-539.
- [28] DONG J,DENG P,BASS M. Cr,Nd:YAG self-Q-switched laser with high efficiency output[J]. *Opt. Laser Technol.*, 2002,34(7):589-594.

作者简介:



张军斌(1988—),男,福建三明人,硕士研究生,主要从事激光物理与激光技术方面的研究。E-mail:jimbinzhang@gmail.com



黄志云(1977—),男,福建闽清人,博士,教授,2000年于南京大学获得学士学位,2005年于中国科学院福建物质结构研究所获得博士学位,2005~2006年于法国巴黎综合理工大学(Ecole Polytechnique)LULI实验室从事博士后研究,主要从事激光物理与固体光电子方面的研究。E-mail:zhiyunhuang@fjnu.edu.cn

《光学 精密工程》(月刊)

- 中国光学开拓者之一王大珩院士亲自创办的新中国历史最悠久的光学期刊
- 现任主编为国家级有突出贡献的青年科学家曹健林博士
- Benjamin J Eggleton, John Love 等国际著名光学专家为本刊国际编委

《光学 精密工程》主要栏目有现代应用光学(空间光学、纤维光学、信息光学、薄膜光学、光电技术及器件、光学工艺及设备、光电跟踪与测量、激光技术及设备);微纳技术与精密机械(纳米光学、精密机械);信息科学(图像处理、计算机应用与软件工程)等。

- * 美国工程索引 EI 核心期刊
- * 中国出版政府奖期刊提名奖
- * 中国精品科技期刊
- * 中文核心期刊
- * 百种中国杰出学术期刊
- * 中国最具国际影响力学术期刊

主管单位:中国科学院

主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

中国仪器仪表学会

地址:长春市东南湖大路 3888 号

电话:0431-86176855

电邮:gxjmgc@sina.com

定价:100.00 元/册

邮编:130033

传真:0431-84613409

网址:http://www.eope.net