

端抽运准连续 Yb:SSO 激光实验研究

姜 豪^{1,2,3} 徐 浏^{1,2} 陈小明^{1,2} 郑丽和⁴ 童立新^{1,2} 刘 娇^{1,2,3}
阮 旭^{1,2,3} 王君涛^{1,2*} 苏良碧⁴ 高清松^{1,2}

¹中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900

²中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900

³中国工程物理研究院研究生部, 北京 100088

⁴中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 200050

摘要 一种新型的掺镱硅酸盐晶体 $\text{Yb}^{3+}:\text{Sc}_2\text{SiO}_5$ (Yb:SSO) 因其良好的激光特性而在近年来受到关注。从理论上计算了 Yb:SSO 晶体在不同的抽运功率情况下的热透镜焦距, 分析了晶体材料负折射率系数对激光器的影响。实验中采用平平短腔结构, 研究了准连续 (QCW) 976 nm 激光二极管端抽运 Yb:SSO 激光特性。在重复频率为 50 Hz、脉冲宽度为 500 μs 、峰值抽运功率为 128.8 W 时, 得到峰值功率为 27.6 W 的激光输出, 光-光转换效率为 21.4%。此时 x 和 y 方向上的光束质量因子 M^2 为 1.24 和 1.20。在实验中发现激光中心波长随抽运功率变化的规律, 并理论分析了实验结果中双波长非同步起振的原因。

关键词 激光技术; 准连续波; 端面抽运; Yb:SSO 固体激光器

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1101007

Experimental Research on End-Pumped Quasi-Continuous Wave Yb:SSO Laser

Jiang Hao^{1,2,3} Xu Liu^{1,2} Chen Xiaoming^{1,2} Zheng Lihe⁴ Tong Lixin^{1,2}
Liu Jiao^{1,2,3} Ruan Xu^{1,2,3} Wang Juntao^{1,2} Su Liangbi⁴ Gao Qingsong^{1,2}

¹Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

²Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

³Graduate School, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China

⁴Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China

Abstract A new Yb-doped silicate $\text{Yb}^{3+}:\text{Sc}_2\text{SiO}_5$ (Yb:SSO) has gained considerable attention in recent years because of its advantageous laser properties. Thermal lens focal length of Yb:SSO in the case of different pump powers is calculated theoretically, and the influence of the material negative refractive index on the laser is analyzed. Quasi-continuous wave (QCW) lasing performance of the Yb:SSO end-pumped by a 976 nm laser diode (LD) in a plane-plane cavity is studied. Laser output with peak power of 27.6 W and optical-to-optical conversion efficiency of 21.4% is obtained when pump laser is with repetition rate of 50 Hz, pulse width of 500 μs and peak pump power of 128.8 W. Meanwhile, beam qualities factors (M^2) in x and y directions are 1.24 and 1.20, respectively. Finally, the law of center-wavelength movement caused by the change of pump power is observed, and the cause of dual-wavelength asynchronous oscillation is theoretically analyzed.

收稿日期: 2016-06-13; 收到修改稿日期: 2016-07-23

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院联合基金(U1530152)

作者简介: 姜 豪(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事高功率激光二极管抽运固体激光技术方面的研究。

E-mail: jiangh0724@126.com

导师简介: 高清松(1972—), 男, 硕士, 研究员, 硕士生导师, 主要从事激光二极管抽运固体激光技术方面的研究。

E-mail: 15883798199@163.com

* 通信联系人。E-mail: wangjuntao@caep.cn

Key words laser technique; quasi-continuous wave; end pumping; Yb:SSO solid state laser

OCIS codes 140.3410; 140.3580; 140.3615

1 引 言

激光二极管(LD)抽运固体激光器由于其结构紧凑、性能稳定、寿命长、成本低等优点在科技、工业、军事等方面获得了广泛应用^[1]。其中,掺 Yb³⁺ 激光介质由于具有量子亏损低、发射光谱宽、能级结构简单、荧光寿命长等特性,成为激光领域研究热点^[2-3]。

近年来,一种新型的掺镱硅酸盐晶体 Yb³⁺:Sc₂SiO₅ (Yb:SSO)受到广泛关注^[2-5]。Yb:SSO 在多个具有强场耦合效应的硅酸盐晶体中最为特殊,它具有较好的热导率(7.5 W·m⁻¹·K⁻¹)、负的折射率系数(-6.3×10⁻⁶ K⁻¹)和较宽的增益带宽(54 nm),这些特性使得其在高效、超短脉冲、可调谐、高平均功率激光等方面显示出了非常好的应用前景^[1-7]。

目前关于 Yb:SSO 激光器的研究主要集中在连续和锁模方面^[4-7]。中国科学院上海硅酸盐研究所的 Zheng 等^[4]在 2008 年首次报道了连续的 Yb:SSO 激光器,采用 LD 端抽运短腔结构,抽运功率为 9.3 W 时,获得输出功率为 3.55 W、中心波长为 1062 nm、斜率效率为 45% 的激光输出。2010 年,南洋理工大学的 Tan 等^[2]报道了 2.73 W 连续 Yb:SSO 激光输出,斜率效率为 70%。斯图加特大学的 Wentsch 等^[6]于 2012 年利用薄片结构的 Yb:SSO 介质得到了 9.4 W 的激光输出,光-光转换效率为 25.4%。同年中国科学院上海硅酸盐研究所的 Zhang 等^[1]利用块状 Yb:SSO 晶体,在吸收抽运功率为 11.7 W 时获得了 8.8 W 的连续激光输出,相对于吸收抽运光的斜率效率为 85.5%。江苏师范大学的 Xu 等^[7]于 2013 年利用半导体可饱和吸收镜获得了 71 fs 的锁模脉冲输出。

上述文献报道的 Yb:SSO 激光器均为连续抽运方式,而对于准三能级结构的 Yb:SSO 晶体而言,连续抽运会导致材料发生较严重的温升,致使产生不利的热效应,极大降低激光增益,提高激光起振阈值,降低效率。本文理论分析了材料负折射率系数对 Yb:SSO 晶体热透镜效应的影响;采用准连续(QCW)抽运方式对 Yb:SSO 激光特性进行了实验研究,并对实验结果中的双波长非同步起振现象进行了理论分析。

2 热焦距分析

对于 LD 端面抽运固体激光器而言,激光介质内抽运光束的束腰直径很小,因而抽运功率密度非常高,进而使激光器产生严重的热效应。随着抽运强度的提高,各种热效应对端面抽运固体激光系统的影响也越来越大,使得激光系统的效率降低,光束质量变差。在影响固体激光系统的几个主要热效应中,热透镜效应首当其冲。对于端面抽运方式,热透镜焦距的表达式为^[8]

$$f_T = \frac{2\pi K_c \eta_a}{\alpha P_h \int_0^{l_0} \frac{\exp(-\alpha z)}{\omega_p^2(z)} dz} \left[\frac{dn}{dT} + (n-1)(1+\mu)\alpha_T + n^3 \alpha_T C_{r,t} \right], \quad (1)$$

式中 K_c 为增益介质的热导率,在 Yb:SSO 和 Yb:YAG 中,分别取 0.75 W/cm·K 和 0.13 W/cm·K; α 为激光介质对抽运光的吸收系数,分别取 4.1 cm⁻¹ 和 3.43 cm⁻¹; l_0 为激光介质的长度,均取 0.35 cm; $\eta_a = 1 - \exp(-\alpha l_0)$ 为激光介质对抽运光的吸收效率; $P_h = \epsilon \eta_a P_{in}$ 为激光介质内的总的热量; ϵ 为热产生系数,均取 0.4; P_{in} 为注入的抽运功率; $\omega_p(z) = \omega_{p0} + \theta_p |z - z_0|$ 为沿轴向 z 处的抽运光束半径,其中 $\theta_p = D_c \cdot NA / (2n\omega_{p0})$ 为抽运光束在激光介质内的远场发散角; dn/dT 为折射率系数,分别取 -6.3×10⁻⁶ K⁻¹ 和 7.3×10⁻⁶ K⁻¹; n 为抽运光在激光介质内的折射率,均取 1.82; D_c 为光纤的芯径,取 0.2 mm; NA 为光纤的数值孔径,取 0.22; μ 为泊松比,取 0.25; α_T 为增益介质的热膨胀系数,均取 7.5×10⁻⁶ K⁻¹; $C_{r,t}$ 为激光介质在径向和切向方向上的光弹系数,均取 0.017。下面分别计算了 Yb:SSO 和 Yb:YAG 晶体的热透镜焦距。

图 1 为 Yb:SSO 和 Yb:YAG 晶体的热透镜焦距与注入抽运功率的关系曲线。随着抽运功率的增加,两者热透镜效应均越来越明显,热焦距相应地变短,且抽运光斑越小热焦距越短。由于 Yb:SSO 材料折射率系数为负数,其热透镜效应比 Yb:YAG 晶体的热透镜效应弱很多。注入平均抽运功率为 10 W 时,热透镜焦距长数米,热透镜效应对短腔激光器的影响几乎可以忽略。

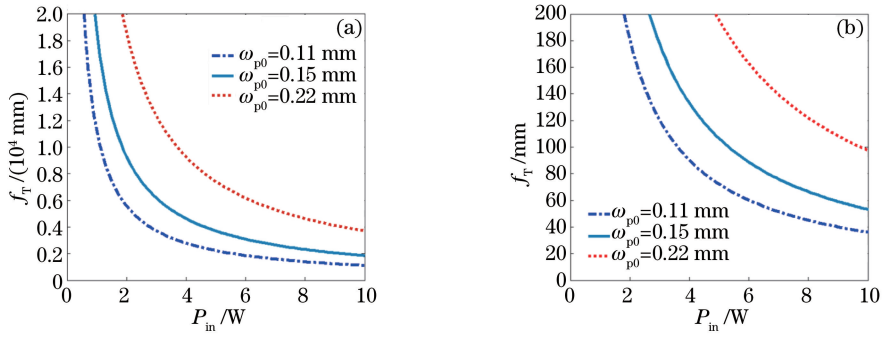


图 1 热透镜焦距与注入的抽运功率关系。(a) Yb:SSO; (b) Yb:YAG

Fig. 1 Thermal lens focal length versus input pump power. (a) Yb:SSO; (b) Yb:YAG

3 实验装置

LD(element©E18, nLinght 公司)端抽运 Yb:SSO 激光器实验装置如图2所示,它是由抽运源、抽运光耦合系统、Yb:SSO 晶体、散热装置和谐振腔组成。抽运源是带尾纤输出的 976 nm 激光二极管,输出光纤芯径为 200 μm ,数值孔径为 0.22;抽运光经透镜耦合系统准直会聚进激光晶体内,束腰直径约 270 μm ; Yb:SSO晶体沿 b 轴切割,尺寸为 3 mm \times 3 mm \times 3.5 mm,掺杂原子数分数为 3%,晶体前后表面均镀有 976 nm和 1036 nm 的增透膜;晶体用钢箔包裹后安装在导热性能良好的铜热沉上进行传导冷却,外部通循环水进行精确的温度控制,实验中设置冷却温度为 14 $^{\circ}\text{C}$;谐振腔为平行平面腔,腔长约 48 mm;输入镜 M1 镀 976 nm增透膜,透射率为 99%,同时镀 1036 nm 高反膜,M2 为耦合输出镜。

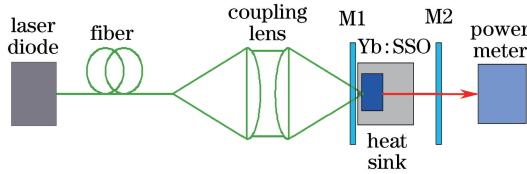


图 2 LD 端抽运 Yb:SSO 激光器示意图

Fig. 2 Schematic of LD end-pumped Yb:SSO laser

4 实验结果及分析

在抽运光作用下,Yb:SSO 晶体出现粒子数反转而形成增益,当增益超过损耗时即可实现激光振荡输出。为了得到最佳输出透射率,针对 20%,30%,35%,50%透射率输出镜做了一组对比实验,结果见表 1,在 30%透射率情况下得到了最高的输出功率和光-光转换效率。

表 1 输出功率、光-光转换效率与输出镜透射率关系

Table 1 Output power & optical-to-optical efficiency versus output coupler transmittivity

Output coupler transmittivity /%	Output power /mW	Optical-to-optical conversion efficiency /%
20	260	8.1
30	690	21.4
35	280	8.7
50	260	8.1

对于脉冲和连续两种工作模式而言,输出镜的最佳透射率存在较大差别,其原因是脉冲运转系统的峰值输入功率一般高得多,脉冲系统的增益因此也相应较高^[9]。

在谐振腔参数与抽运脉宽一定的条件下,激光平均功率与抽运强度呈现正相关性。抽运源参数设置如下:重复频率为 50 Hz,脉冲宽度为 500 μs 。在输出镜为最佳透射率情况下,实验测量了不同抽运功率时的平均输出功率(L50(300)A/NOVA,OPHIR 公司)。作出激光器输出功率、光-光转换效率与输入功率关系曲线图,如图 3 所示。当工作电流增大到 10 A 时,LD 平均抽运功率是 3.22 W,峰值抽运功率为 128.8 W,

最大平均输出功率为 690 mW,单脉冲能量为 13.8 mJ,光-光转换效率为 21.4%。在此条件下实测热透镜焦距约为 3.0 m,与前文中计算结果基本吻合。

图 4 是通过光束质量 M^2 仪(M^2 -200, Spiricon 公司)在最大抽运功率为 3.22 W 时测得的数据,两个方向上的光束质量因子分别为 $M_x^2=1.24$ 和 $M_y^2=1.20$ 。

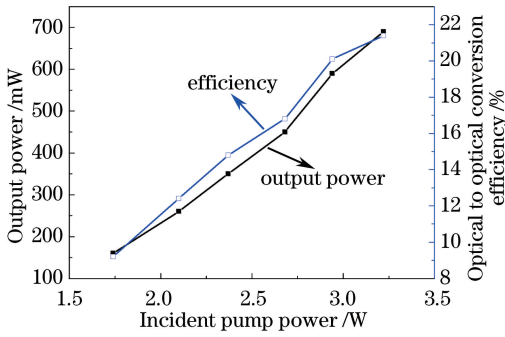


图 3 输出功率、光-光转换效率与输入功率关系

Fig. 3 Output power and optical-to-optical conversion efficiency versus incident pump power

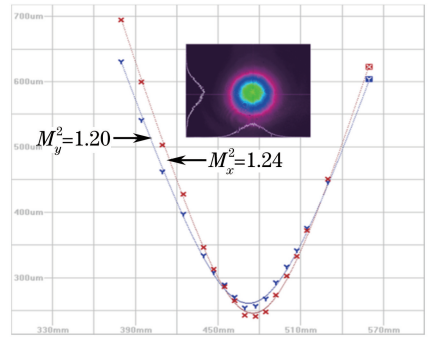


图 4 垂直于传播轴方向上的光束质量

Fig. 4 Beam quality M^2 in both propagation directions which are perpendicular to the axis

图 5 是通过光纤光谱仪(HR4000,海洋光学公司)在最大抽运功率为 3.22 W 条件下实际所得到的激光光谱分布情况。实验中所用谐振腔输出镜膜是一个宽带膜层,对 1020~1070 nm 波段均有接近于 30% 的透射率。实验中首先观察到在工作电流为 5 A、抽运功率为 1.74 W 时 1062 nm 激光起振,如图 5(a)所示;在工作电流为 7 A、抽运功率为 2.37 W 时 1036 nm 激光起振,如图 5(b)所示;随着抽运功率的增加,在工作电流为 9 A、抽运功率为 2.94 W 时 1036 nm 激光起振更强,如图 5(c)所示。

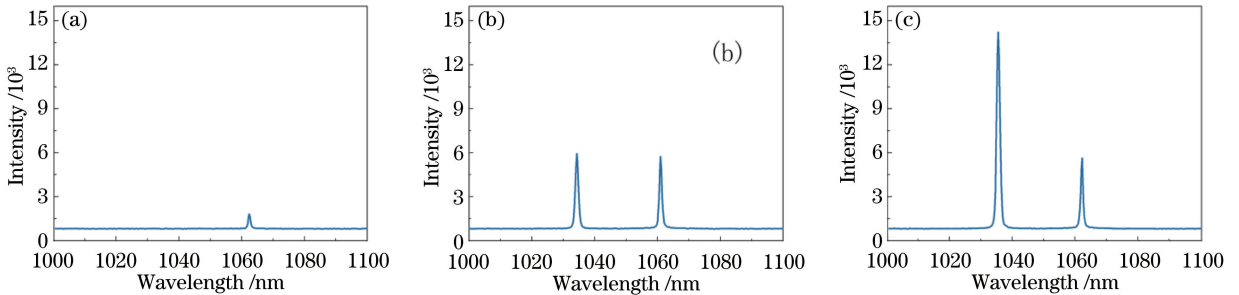


图 5 准连续脉冲光谱分布。(a) 5 A; (b) 7 A; (c) 9 A

Fig. 5 Spectral profiles of the QCW pulses. (a) 5 A; (b) 7 A; (c) 9 A

因为 Yb:SSO 晶体拥有 1036 nm 和 1062 nm 两个主要的发射峰,其中前者发射截面为 $4.4 \times 10^{-21} \text{ cm}^{-1}$,后者发射截面为 $3.8 \times 10^{-21} \text{ cm}^{-1}$ 。前者激光下能级距基态更近,常温下其上的粒子数不可能被忽略,使得这个波段的激光阈值相对较高,所以实验中后出现 1036 nm 激光^[10-11]。但是 1036 nm 的激光发射截面相对 1062 nm 的较大,在同一个谐振腔内,腔内损耗一样的情况下,前者的增益更高,这也符合实验中“增大抽运功率、后出现的 1036 nm 激光更强”这一现象。

5 结 论

从理论上分析了热透镜效应对激光系统的影响,开展了 LD 端面抽运 Yb:SSO 固体激光器的实验研究,并分析了激光器输出双波长非同步起振及强弱的原因。在平均抽运功率为 3.22 W,重复频率为 50 Hz 时获得 690 mW 的准连续激光输出,光-光效率为 21.4%。提高抽运功率,有望获得更高功率的连续激光输出。

参 考 文 献

1 Zhang H Y, Li J F, Liang X Y, *et al.* High-power and wavelength tunable diode-pumped continuous wave Yb:SSO laser [J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(11): 111404.

- 2 Tan W D, Tang D Y, Xu X D, *et al.* Passive femtosecond mode-locking and cw laser performance of $\text{Yb}^{3+}:\text{Sc}_2\text{SiO}_5$ [J]. *Optics Express*, 2010, 18(16): 16739-16744.
- 3 Li J F, Gao P, Zheng L H, *et al.* Diode-pumped $\text{Yb}:\text{SSO}$ chirped pulse amplifier with 1 ps pulse duration [J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(1): 011403.
- 4 Zheng L, Xu J, Zhao G, *et al.* Bulk crystal growth and efficient diode-pumped laser performance of $\text{Yb}^{3+}:\text{Sc}_2\text{SiO}_5$ [J]. *Applied Physics B*, 2008, 91(3-4): 443-445.
- 5 Li J F, Liang X Y, He J P, *et al.* Diode pumped passively mode-locked $\text{Yb}:\text{SSO}$ laser with 2.3 ps duration [J]. *Optics Express*, 2010, 18(17): 18354-18359.
- 6 Wentsch K S, Weichelt B, Zheng L H, *et al.* Continuous-wave Yb -doped Sc_2SiO_5 thin-disk laser [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(1): 37-39.
- 7 Xu C W, Tang D Y, Zhang J, *et al.* Sub-100 fs pulse generation in a diode pumped $\text{Yb}:\text{Sc}_2\text{SiO}_5$ laser [J]. *Optics Communications*, 2013, 294(5): 237-240.
- 8 Yao Jianquan, Xu Degang. All solid state laser and nonlinear optical frequency conversion technology [M]. Beijing: Science Press, 2007: 207-217.
姚建铨, 徐德刚. 全固态激光及非线性光学频率变换技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 207-217.
- 9 Koehler W. Solid-state laser engineering [M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang, Transl. Beijing: Science Press, 2002: 93.
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: 93.
- 10 Yu Haiwu, Xu Meijian, Duan Wentao, *et al.* Investigation on pumping dynamics and pulsed energy storage performance of Yb ions [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(7): 4158-4168.
於海武, 徐美健, 段文涛, 等. Yb 离子抽运动力学及脉冲储能特性研究 [J]. *物理学报*, 2007, 56(7): 4158-4168.
- 11 Li Jinfeng. Studies on Yb^{3+} doped high power all-solid-state ultrafast lasers [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2010: 55-57.
李进峰. 基于掺 Yb^{3+} 增益介质高功率全固态超快激光器研究 [D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2010: 55-57.