

LD 抽运 Yb :GSO 实现 1090 nm 低阈值激光运转*

薛迎红¹⁾ 王清月¹⁾ 柴 路^{1)†} 刘庆文¹⁾ 赵广军²⁾ 苏良碧²⁾ 徐晓东²⁾ 徐 军²⁾

1) 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

2) 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

(2005 年 6 月 1 日收到, 2005 年 6 月 29 日收到修改稿)

用 Yb :Gd₂SiO₅ (Yb :GSO) 晶体实现激光运转. 利用 940 nm 的二极管激光器作为抽运源, 得到 Yb :GSO 激光器的激光中心波长为 1090 nm, 抽运阈值功率密度仅为 1.27 kW/cm², 小于 Yb :YAG 的理论阈值 1.53 kW/cm². 利用 2% 的输出镜得到最大输出功率为 360 mW, 相应的斜效率为 19%.

关键词: Yb :GSO 晶体, 激光二极管抽运, 阈值

PACC: 7855, 4255, 4270F

1. 引 言

最近, 随着高功率、高度亮 InGaAs 激光二极管 (laser diode, LD) 的发展, 对于掺 Yb 介质的研究越来越受到关注, 10 年来产生了很多新型晶体. 目前应用最广泛的主要是氧化物 Yb :YAG^[1,2], 此外, 有钨酸盐单斜晶体 Yb :KYW 和 Yb :KGW^[3,4], 钒酸盐 Yb :GdVO₄^[5], 磷灰石 Yb :FAP^[6], 硼酸盐 Yb :YAB^[7,8], Yb :GdCOB^[9] 和 Yb :BOYS^[10], 氟化物 Yb :CaF₂^[11] 和 Yb :Na :CaF₂^[12]. 然而, 掺 Yb 介质属于三能级系统, 与具有四能级系统的掺 Nd 介质相比, 激光运转的阈值较高, 这被认为是掺 Yb 介质的缺点之一^[7]. 从而, 寻求低阈值的掺 Yb 激光介质是当前的发展方向之一.

本文首次研究了一种新的 Yb :GSO 晶体在 LD 抽运条件下的激光特性. 得到了低的激光运转阈值仅为 1.27 kW/cm². 因为强的晶场耦合作用, Yb³⁺ 离子的 4f 电子能级产生非常大的晶场劈裂 (> 1000 cm⁻¹), 导致该晶体在 1090 nm 附近以近似四能级机理实现激光运转, 具有低的抽运阈值.

2. Yb :GSO 晶体的特征

Yb :GSO 晶体是中国科学院上海光学精密机械研究所采用提拉法最新生长的. 晶体中 Yb 的掺杂浓度为 10 at. %. 室温下 (采用 Jasco V-570 UV/VIS/NIR) 分光光度计测试 Yb :GSO 的吸收光谱如图 1 所示. 940 nm LD 抽运作用下, 采用 Triax550 荧光光谱仪测试 Yb :GSO 的发射光谱如图 2 所示.

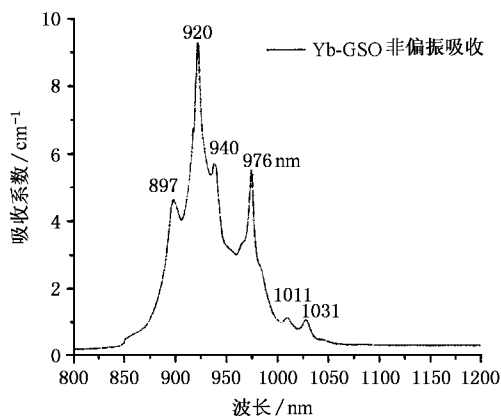


图 1 Yb :GSO 晶体的非偏振吸收光谱

从图 1 可见 Yb :GSO 晶体的主要吸收峰位于

* 国家重点基础研究发展计划项目 (批准号: G1999075201-2, 2003CB314904), 国家杰出青年基金 (批准号: 60425516) 资助的课题.

† E-mail: ull@tju.edu.cn

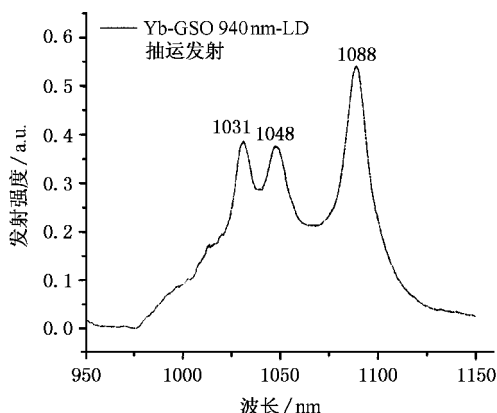


图2 Yb :GSO 晶体的 940 nm LD 激发发射谱

920 nm 相应的吸收截面为 $0.60 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, 它的次吸收峰在 940 nm 对应的吸收截面 $0.2 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$. 该晶体宽的吸收光谱非常有利于采用不同波长的高亮度 LD 进行激发. 图 2 给出了室温下利用 940 nm 抽运源激发得到的 Yb :GSO 晶体的荧光光谱, 它的覆盖范围为 980—1150 nm. 其半高宽达到 70 nm (FWHM), 三个主要发射峰的波长分别为 1031 nm, 1048 nm 和 1088 nm. 根据吸收和发射光谱, 确定了 Yb 离子在 GSO 基质中的 Stark 能级分裂结构, 如图 3 所示. 对于波长为 1088 nm 的发射, 终止能级和基态的最低子能级之间的能量差 $\Delta E = 1067 \text{ cm}^{-1}$. 如

此大的能量差使得该波长的激光运转近似为四能级机理, 理论上应具有非常低的激光运转阈值.

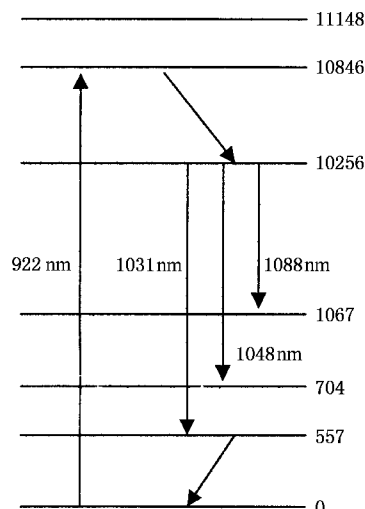


图3 Yb 离子在 GSO 基质中的 Stark 能级分裂图

Yb :GSO 晶体的光谱参数列入表 1, 并与几种典型的掺 Yb 激光晶体进行了对比. 当采用 940 nm LD 作抽运源时, 理论计算 Yb :GSO 晶体在 1090 nm 实现激光运转时的阈值功率密度 I_{min} 等于 0.28 kW/cm^2 , 仅为 Yb :YAG 晶体的 1/5. 由于 Yb :GSO 在 920 nm 具有更高的吸收截面, 采用该波长进行抽运时, 激光运转的阈值功率将更低, 理论计算值为 0.17 kW/cm^2 .

表 1 几种掺 Yb 激光晶体的光谱参数对比

光谱参数	吸收波长/nm	发射波长/nm	发射截面/ 10^{-20} cm^2	荧光半高宽/nm	能级寿命/ms	理论阈值(kW/cm^2)	文献
GSO	940	1090	0.4	70	0.9	0.28	本文
YAB	975	1040	0.8	25	0.68	0.38	[7]
YAG	942	1031	2	10	0.95	1.53	[1]
YCOB	976	1050	0.18	45	2.28	1.31	[13]
GdCOB	976	1032	0.36	44	2.85	1.22	[9]

3. 激光实验和讨论

试验中, 为了得到更好的模式输出, 我们采用了稳定的三镜腔结构, 如图 4 所示.

抽运源为美国阿波罗公司的 InGaAs 二极管激光器, 中心波长为 940 nm, 发射光为水平线偏振光. 抽运光由一个焦距为 50 mm 的聚焦透镜 F , 经过一个平面双色镜 M_1 达到晶体中心. 双色镜镀膜为 $\text{HT} > 92\% @ 976 \text{ nm}$, $\text{HR} > 99.5\% @ 1040 \text{ nm}$; 折叠镜

M_2 是一个曲率半径为 10 cm 的平凹透镜, 它的镀膜和平面双色镜相同; 实验中我们采用了对中心波长 1060 nm 的透过率为 1% 和 2% 两个不同的输出镜 M_3 . 谐振腔的总长度为 230 mm, 晶体中心的激光模半径为 $48 \mu\text{m}$. 试验所用样品是两面抛光未镀膜晶体, 它的垂直切割尺寸为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$, 考虑到 GSO 晶体的偏振特性, 转动晶体的方向使其对抽运光的吸收最大达到 70%. 为了更好地保证晶体的散热, 用铜片将晶体包裹固定于通有水冷的铜质水冷套上, 水冷箱的温度在试验中始终保持在 18°C .

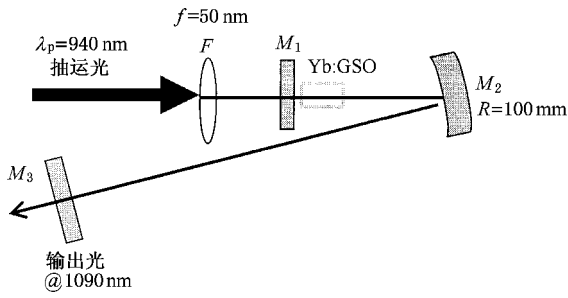


图 4 Yb:GSO 激光器的试验装置图示

初始采用 1% 的输出镜进行调节,当抽运源的电流达到 8.1 A 时,相应的晶体吸收功率为 350 mW,便得到稳定的激光输出,用光谱仪(Ist-rees Laser Spectrum Analyzer)测量输出光谱的中心波长为 1090 nm,输出激光为明显的 σ 线偏振光.图 5 展示了抽运源电流为 10 A 时测量的光谱,光谱出现三个比较稳定的波峰,分别位于 1089.1 nm,1092.1 nm 和 1090.5 nm.同时,测量了输出的激光功率随着吸收抽运功率变化的曲线,它的最大斜效率为 10%,见图 6 中的三角点线.

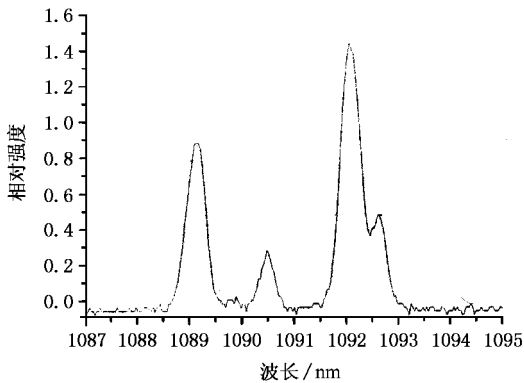


图 5 Yb:GSO 激光器的激光发射光谱

为了进一步优化激光输出,我们换用了 2% 的输出镜,经过仔细调节,在 2% 的输出镜的情况下,获得了低至 215 mW 的激光阈值,计算此时的功率密度为 1.27 kW/cm²,尽管这一数值已经低于典型 Yb:YAG 晶体的理论阈值功率密度 1.53 kW/cm²,但

仍高于表 1 中列出的 Yb:GSO 晶体的理论值.我们相信通过激光样品两端镀膜减小抽运光损耗,进一步优化谐振腔结构,改善腔镜镀膜等手段可以使激光阈值更加降低.利用 2% 输出镜得到抽运-输出曲线在图 6 中以圆点线表示,在吸收抽运功率 3.4 W 时,得到最大的激光输出功率为 360 mW,相应的激光斜效率为 19%,再增加抽运功率晶体很容易被打破.试验中观测,在各种抽运功率下输出激光始终保持 TEM₀₀ 状态.

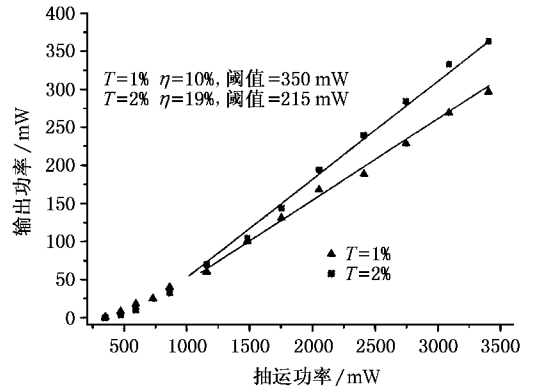


图 6 输出激光功率和抽运功率的关系曲线

4. 结 论

Yb³⁺ 在 GSO 晶体强的晶场耦合作用产生非常大的 Stark 能级劈裂,基态²F_{7/2} 能级分裂达到 1067 cm⁻¹.Yb:GSO 晶体在 1090 nm 实现激光运转时近似为四能级机理,理论计算 940 nm 抽运作用下的抽运阈值功率密度仅为 0.28 kW/cm².我们利用 940 nm 的 LD 抽运源进行激发,实现了该晶体在 1090 nm 的激光运转,获得了低至 1.27 kW/cm² 功率密度的激光运转阈值,这比一般掺 Yb 晶体的理论计算最小激光阈值还要低,我们相信通过改善腔镜镀膜等条件可以使激光阈值进一步降低.采用 2% 的输出镜进行耦合输出,在 3.4 W 的抽运功率下,我们得到了最大为 360 mW 的激光输出,相应的最大激光斜效率为 19%.

[1] Spühler G J, Stüdemeyer T, Paschotta R, Moser M, Weingarten K J, Keller U 2000 *Appl. Phys. B* **71** 19

[2] Liu Q, Gong M L, Li C, Gong W P, Lu F Y, Chen G 2005 *Acta*

Phys. Sin. **54** 721 [in Chinese] 柳 强、巩马理、李 晨、宫武鹏、陆富源、陈 刚 2005 物理学报 **54** 721]

[3] Shah L, Ye Q, Eichenholz J M, Hammons D A, Richardson M,

- Chai B H T , Peale R E 1999 *Opt. Comm.* **167** 149
- [4] Brunner F , Spöhler G J , Aus der Au J , Krainer L , Mourier-Genoud F , Paschotta R , Lichtenstein N , Weiss S , Harder C , Lagatsky A A , Abdolvand A , Kuleshov N V , Keller U 2000 *Opt. Lett.* **25** 1119
- [5] Petit J , Viana B , Goldner P , Vivien D , Louiseau P , Ferrand B 2004 *Opt. Lett.* **29** 833
- [6] Mao Y L , Zhao Z W , Deng P Z , Gan F X 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1524 (in Chinese) [毛艳丽、赵志伟、邓佩珍、干福熹 2004 物理学报 **53** 1524]
- [7] Wang P , Dawes J M , Dekker P , Piper J A 2000 *Optics Communications* **174** 467
- [8] Xue Y , Wang Q , Zhang Z , Chai L , Wang Z , Han Y , Sun H , Li J , Wang J , Wang Y , Ma X , Song Y 2004 *Chinese Opt. Lett.* **2** 466
- [9] Augé F , Druon F , Balembois F , Georges P , Brun A , Mougél F , Aka G , Vivien D 2000 *IEEE J. Quantum Electron* **36** 598
- [10] Chenais S , Druon F , Balembois F , Georges P , Brenier A , Boulon G 2003 *Opt. Mater.* **22** 99
- [11] Lucca A , Debourg G , Jacquemet M , Druon F , Balembois F , Georges P , Camy P , Doualan J L , Moncorgé R 2004 *Opt. Lett.* **29** 2767
- [12] Su L , Xu J , Yang W , Li H , Zhao Z , Si J , Dong Y , Zhou G 2005 *Opt. Lett.* **30** 1003
- [13] Aron A , Aka G , Viana B , Kahn-Harari A , Vivien D , Druon F , Balembois F , Georges P , Brun A , Lenain N , Jacquet M 2001 *Optical Materials* **16** 181

A novel LD pumped Yb :GSO laser operating at 1090 nm with low threshold *

Xue Ying-Hong¹⁾ Wang Qing-Yue¹⁾ Chai Lu¹⁾ Liu Qing-Wen¹⁾ Zhao Guang-Jun²⁾
Su Liang-Bi²⁾ Xu Xiao-Dong²⁾ Xu Jun²⁾

1) (School of Precision Instruments and Opto-electronics Engineering , Key Laboratory of Opto-electronic information Science and Technology of Ministry of Education , Tianjin University , Tianjin 300072 , China)

2) (Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics , Chinese Academy of Sciences , Shanghai 201800 , China)

(Received 1 June 2005 ; revised manuscript received 29 June 2005)

Abstract

We report what we believe to be the first demonstration of laser operation with a novel laser material of Yb³⁺-doped Gd₂SiO₂(Yb :GSO) pumped by a laser diode at 940 nm. We obtained a low lasing threshold of 1.27 kW/cm² with the center wavelength of 1090 nm , which is lower than the value of 1.53 kW/cm² predicted for Yb :YAG. The maximal output power of 360 mW was obtained with a 2% output , which corresponds to a slope efficiency up to 19% .

Keywords : Yb :GSO crystal , laser diode pumped , threshold

PACC : 7855 , 4255 , 4270F

* Project supported by the National Key Basic Research Special Foundation of China (Grant Nos. G1999075201-2 , 2003CB314904) , and the National Outstanding Youth Foundation (Grant No. 60425516) .