

doi: 10.3788/gzxb20164501.0114001

LD 泵浦 Nd-La 共掺和 Nd-Sc 共掺 CaF_2 无序晶体的激光性能

张菊婷¹, 朱江峰¹, 王军利¹, 魏志义², 苏良碧³, 徐军⁴

(1 西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 西安 710071)

(2 中国科学院物理研究所 光物理重点实验室, 北京 100190)

(3 中国科学院上海硅酸盐研究所 透明光功能无机材料重点实验室, 上海 201800)

(4 同济大学 物理科学与工程学院, 高等研究院, 上海 200092)

摘 要: 对 790 nm 激光二极管泵浦 Nd-La 共掺和 Nd-Sc 共掺 CaF_2 无序晶体激光器的特性进行了研究, 比较了掺杂不同浓度 La^{3+} 和 Sc^{3+} 的 Nd : CaF_2 晶体的吸收光谱和输出激光特性. 在 5 W 泵浦功率下, 将 0.5 at. % Nd^{3+} 与 5 at. % La^{3+} : CaF_2 , 0.5 at. % Nd^{3+} 与 3 at. % Sc^{3+} : CaF_2 掺杂, 分别获得 1.10 W 和 0.64 W 的连续激光输出, 斜效率分别为 23.0% 和 12.8%, 阈值泵浦功率仅为 10 mW. 实验结果表明, Nd-La 共掺和 Nd-Sc 共掺的 CaF_2 晶体是一种可用于二极管泵浦且可获得高功率高效率激光输出的激光介质.

关键词: 无序晶体; Nd-La 共掺氟化钙晶体; Nd-Sc 共掺氟化钙晶体; 二极管泵浦; 连续激光输出

中图分类号: TN248

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)01-0114001-5

CW Laser Performance of Nd-La : CaF_2 and Nd-Sc : CaF_2 Disordered Crystals Pumped by A Laser Diode

ZHANG Ju-ting¹, ZHU Jiang-feng¹, WANG Jun-li¹, WEI Zhi-yi², SU Liang-bi³, XU Jun⁴

(1 School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(2 Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China)

(3 Key Laboratory of Transparent and Opto-functional Inorganic Materials, Shanghai Institute of Ceramics, CAS, Shanghai, 201800, China)

(4 School of Physics Science and Engineering, Institute for Advanced Study, Tongji University, Shanghai, 200092, China)

Abstract: The laser characteristics of the Nd-La : CaF_2 and Nd-Sc : CaF_2 co-doping disordered crystals pumped by a 790 nm laser diode were studied. Absorption spectrum and lasing performances of Nd: CaF_2 crystal with different La^{3+} - Sc^{3+} doping concentration were studied respectively. Under the pump power of 5 W, the laser power of 1.10 W and 0.64 W are obtained with the co-doping of 0.5 at. % Nd^{3+} , 5 at. % La^{3+} : CaF_2 , 0.5 at. % Nd^{3+} and 3 at. % Sc^{3+} : CaF_2 respectively, corresponding to the slope efficiencies of 23.0% and 12.8% respectively. The laser threshold for both crystals is as low as 10 mW. The results show that the new co-doped crystals are promising laser mediums for high power and high efficiency diode pumped solid-state lasers.

Key words: Disordered crystals; Nd, La-codoped CaF_2 ; Nd, Sc-codoped CaF_2 ; Diode pump; CW laser

OCIS Codes: 140.3480; 140.3530; 160.5690; 140.3580

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61205130)和科技部国家重大科学仪器设备开发专项(No. 2012YQ120047)资助

第一作者: 张菊婷(1990-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为全固态飞秒激光器. Email: 1259757706@qq.com

导师(通讯作者): 朱江峰(1980-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为超短激光脉冲技术及应用. Email: jfzhu@xidian.edu.cn

收稿日期: 2015-07-28; 录用日期: 2015-10-08

0 引言

Nd 掺杂新型无序晶体具有优良的光学和热学机械性质,与普通 Nd 掺杂单晶激光介质相比,无序结构的晶体^[1]具有更大的非均匀加宽,更宽的吸收光谱和发射光谱,因此在获得超短脉冲激光中有广泛应用.1992 年和 1993 年, M. H. Ober 等^[2-3]利用 Nd : GSAG : YSGG (Nd : (Gd₂Y₁)Sc₂(Al₂Ga₁)O₁₂) 无序晶体获得 500 fs 及 260 fs 的超短脉冲激光输出.2008 年谢国强等^[4]利用激光二极管泵浦 Nd : CLNGG (Nd : Ca₃Li_{0.275}Nb_{1.775}Ga_{2.95}O₁₂) 无序晶体产生了 900 fs 的超短激光脉冲,输出功率达 486 mW;两年后,他们又在 Nd : CNGG-CLNGG 无序晶体中利用棱镜对补偿色散,以及利用半导体可饱和吸收镜 (Semiconductor Saturable Absorber Mirror, SESAM) 启动锁模,产生了 534 fs 的超短脉冲激光^[5];2013 年,王庆等^[6]利用 Nd : LGS (Nd : La₃Ga₅SiO₁₄) 无序晶体获得 278 fs 的 SESAM 锁模飞秒激光输出.

在 Nd 掺杂无序晶体中, Nd : CaF₂ 是一种非常有潜力实现大功率激光输出的晶体,因为 CaF₂ 具有很高的热导率 (9.7 W/mK), 很低的非线性折射率系数 (0.43×10^{-13} /esu), 而且 CaF₂ 的生长工艺很成熟. 但是 Nd : CaF₂ 单晶具有很强的浓度淬灭效应, Nd³⁺ 在 CaF₂ 晶体中会形成团簇效应, 进而成为荧光淬灭中心, 阻止激光发射. 实验表明, 当 Nd³⁺ 掺杂浓度达到 0.05% 时就会形成明显的团簇效应. 为了解决这个难题, 研究者在 Nd : CaF₂ 晶体中掺杂一些“缓冲”离子, 可以有效缓解或抑制团簇效应^[7-9]. 缓冲离子可以是三价的稀土离子, 如 Sc³⁺, Y³⁺, La³⁺, Gd³⁺, Lu³⁺ 等, 还可以是单价金属离子, 如 Li⁺, Na⁺, K⁺, Ag⁺ 等. 通过共掺杂离子, 一方面可以有效抑制团簇效应, 另一方面可以有效改善荧光效率和增加发射截面, 使发射谱更加平滑, 更有利于激光输出和产生超短脉冲激光. 利用 Nd-Y 共掺 CaF₂ 晶体, 谢国强等^[10]得到了 103 fs 的超短激光脉冲, 输出功率为 89 mW; 朱江峰等^[11]采用 Gires-Tournois Interferometer (GTI) 镜补偿色散, 在 Nd-Y : CaF₂ 晶体中得到了 180 mW 的锁模激光, 脉冲宽度为 264 fs. 利用另一种氟化物晶体 Nd-Y : SrF₂, 魏龙等实现了高效率的 332 fs 的锁模激光输出, 在 1 W 钛宝石激光泵浦功率下, 获得 395 mW 的平均输出功率, 对应的光光转换效率为 39.5%, 斜效率为 69%^[12]. 随后又在氟化物晶体中获得了 97 fs 的飞秒激光脉冲^[13]. 除了 Nd-Y 共掺的氟化物晶体以外, 研究者们相继成功生长了 Nd-La 共掺和 Nd-Sc 共掺的氟化物晶体, 这些晶体与 Nd-Y 共掺氟化物晶体相比, 在减弱团簇效应, 以及增加荧光线宽和提高发射截面方面又有新的特点. 李春等^[14]利用 Nd-La 共掺的氟化钙

晶体, 实现了 488 mW 的连续激光输出以及 11 ps 的被动锁模运转, 初步验证了这种新型双掺氟化物晶体在实现超短脉冲输出方面的潜力.

本文利用两种新型的 Nd-La 共掺和 Nd-Sc 共掺 CaF₂ 无序晶体, 研究了掺杂不同浓度 La 和 Sc 的 CaF₂ 晶体的吸收特性和输出激光特性, 为利用该类晶体实现高功率二极管泵浦全固态激光器提供了参考和指导.

1 实验装置

实验装置如图 1, 采用 V 型三镜腔结构, 包括: 激光二极管 (Laser Diode, LD); M₁, 双色镜; M₂, 凹面镜; 输出耦合镜 (Output Coupler, OC). 泵浦源是光纤耦合输出的激光二极管, 中心波长为 790 nm, 最高输出功率为 15 W, 耦合光纤芯径为 100 μm, 数值孔径为 0.22. 利用一个 1 : 0.8 的聚焦耦合系统把泵浦激光聚焦进入晶体中, 在晶体内部泵浦束腰直径约为 80 μm. M₁ 为平面双色镜, 两面镀有 790 nm 的高透膜和 1 020 ~ 1 200 nm 的高反膜; M₂ 为曲率半径为 200 mm 的凹面镜, 朝腔内一面镀有 1020 ~ 1200 nm 的高反膜, 另一面镀有 800 ~ 1000 nm 的高透膜; 实验中测试了三种不同输出耦合率的输出镜, 谐振腔腔长为 662 mm, 透过率分别为 0.8%、1.6% 和 2.5%. 实验中使用的激光介质样品尺寸均为 3 mm × 3 mm × 5 mm, 光学级抛光无镀膜, 利用铝箔包裹夹持在紫铜晶体夹中, 采用循环水冷却, 水温保持在 10℃. 两类共掺晶体中 Nd³⁺ 的掺杂浓度均为 0.5 at.%, 而 Sc³⁺ 的掺杂浓度分别为 1.5 at.%, 3 at.% 和 5 at.%, La³⁺ 的掺杂浓度分别为 1 at.%, 2 at.% 和 5 at.%.

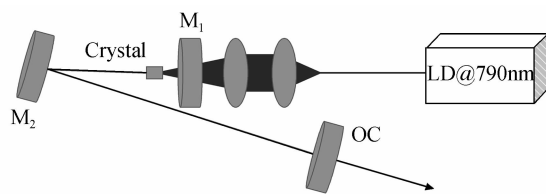


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic of the experimental setup

2 实验结果与讨论

图 2 给出了 Nd-La 共掺和 Nd-Sc 共掺 CaF₂ 晶体的吸收光谱和发射光谱性质. 可以看出, 对于不同掺杂浓度的 Nd-La : CaF₂ 和 Nd-Sc : CaF₂ 的晶体, 其主吸收峰分别在 736 nm, 791 nm 和 864 nm 附近, 且都有较宽的吸收带宽. 特别是 791 nm 的吸收峰与商业化二极管激光器波长相匹配, 使得二极管直接泵浦可实现高效率、高功率的激光输出. 通过稀土元素 La 和 Sc 的共掺, 两类晶体的发射谱均变得平滑, 两个发射峰处于 1 050 和 1 065 nm 附近, 每个发射峰的半高全宽 (Full

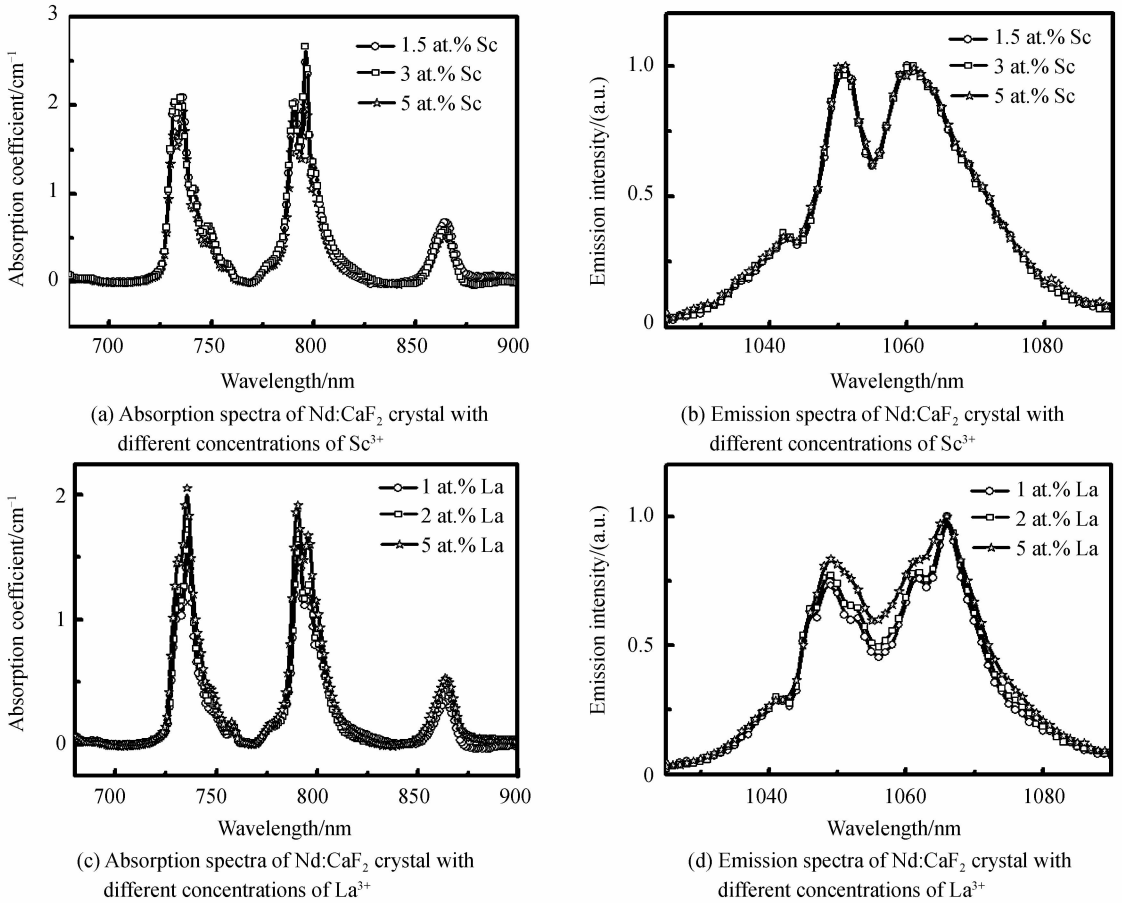


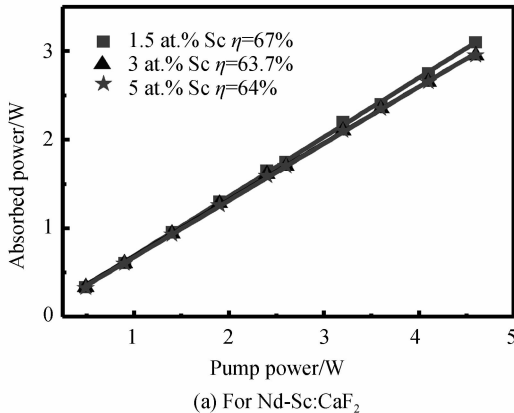
图 2 掺杂不同浓度 Sc³⁺ 的 Nd : CaF₂ 晶体、La³⁺ 的 Nd : CaF₂ 晶体的吸收谱线和发射谱线

Fig. 2 Absorption and emission spectra of Nd : CaF₂ crystal with different concentrations of Sc³⁺ and La³⁺ respectively

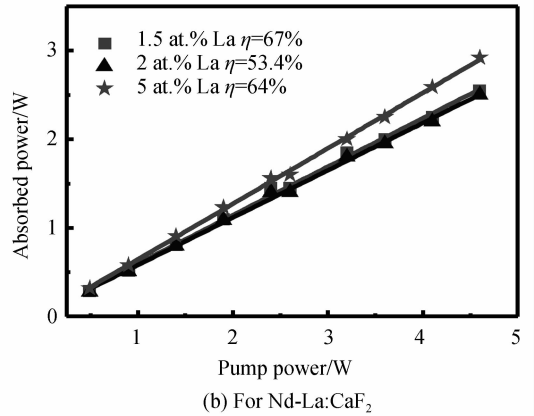
Width at Half Maximum, FWHM) 都大于 10 nm. 因此从理论上都可以利用两类共掺 CaF₂ 晶体实现锁模运转, 得到飞秒激光脉冲输出.

利用 790 nm 光纤耦合激光二极管测量了不同掺杂浓度样品对泵浦激光的吸收功率曲线, 如图 3. 对于 5 mm 的样品厚度, Nd-Sc : CaF₂ 的单程吸收率约为 64%, Nd-La : CaF₂ 约为 54%, 吸收泵浦功率效率随不同掺杂浓度略有不同.

不同掺杂浓度的 Nd-Sc : CaF₂ 和 Nd-La : CaF₂ 在输出耦合镜的输出率分别为 0.8%、1.6% 和 2.5% 时的连续激光输出功率, 结果如图 4. 实验发现, 不同



(a) For Nd-Sc:CaF₂



(b) For Nd-La:CaF₂

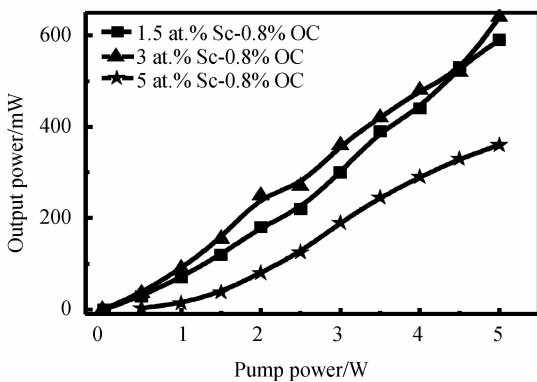
图 3 Nd-Sc : CaF₂ 和 Nd-La : CaF₂ 的吸收泵浦功率曲线

Fig. 3 Absorbed power versus incident pump power for Nd-Sc : CaF₂ and Nd-La : CaF₂ with different doping concentrations

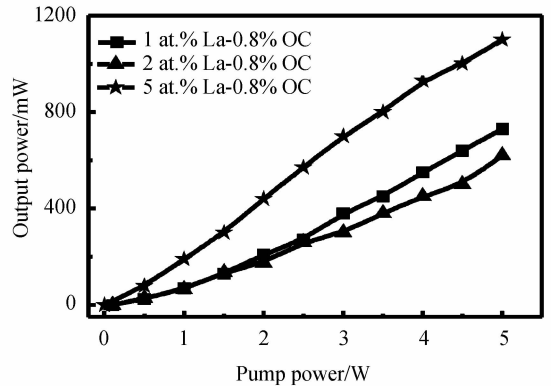
掺杂浓度的 Nd-Sc : CaF₂ 和 Nd-La : CaF₂, 0.8% 的输出耦合率对应的激光输出功率最高. Nd-Sc : CaF₂ 晶体, 3 at. % 掺杂 Sc 的样品输出功率最高, 而 5 at. % 掺杂 Sc 的最低. 由于 Sc 的原子质量比 Nd 要小很多, 因此高掺杂 Sc 会导致晶格严重失配, 从而严重影响发射激光效率, 这个现象在输出耦合率为 1.6% 和 2.5% 时更加明显, 见图 4(c) 和 (e), 随着输出耦合率的提高, 激

光输出功率快速下降。从三种掺杂浓度样品的激光效率率来看,3 at.%掺杂 Sc 最适合获得高效率激光输出。在 5 W 的二极管泵浦功率下,利用 0.8% 的输出耦合镜,得到了 0.64 W 的连续激光输出功率,斜效率为 12.8%。而对于 Nd-La:CaF₂ 晶体,5 at.% 掺杂 La 的样品输出功率最高,在 5 W 泵浦功率下,利用 0.8% 输出耦合镜获得了 1.10 W 的输出功率,对应的斜效率为 23.0%。为了避免损害晶体,所有实验最大泵浦功率限制在 5 W,从输出功率曲线可以看出,所有样品未表现出功率饱和现象,因此通过进一步加大泵浦功率和保证良好散热,可以实现更高的输出功率。对于多数样

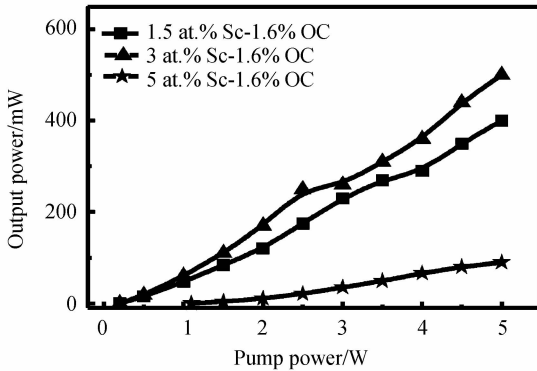
品,发现产生激光的泵浦阈值非常低,仅为 10 mW 左右,这与 Nd³⁺ 的四能级结构紧密相关。图 5 是在最大输出功率下利用 Ocean Optics 的 HR2000 光纤光谱仪测量的两种激光晶体的激光波长。由于两种晶体在 1 050nm 和 1 065 nm 附近都有较大的发射截面,实验中发现连续激光同时有三个发射波长,分别位于 1049、1 061 和 1 065 nm 附近,随掺杂类型和掺杂浓度的不同有些微差异。用 Duma Optics 的光束质量分析仪测量了输出激光的横向模式分布,如图 5,输出激光光斑接近理想的基横模高斯光束。



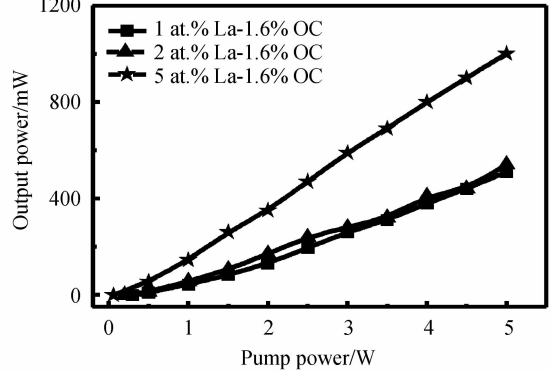
(a) CW output power versus the pump power for Nd:Sc:CaF₂ with OC of 0.8% transmission



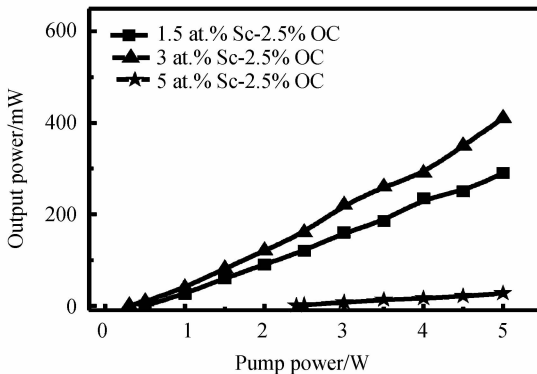
(b) CW output power versus the pump power for Nd:La:CaF₂ with OC of 0.8% transmission



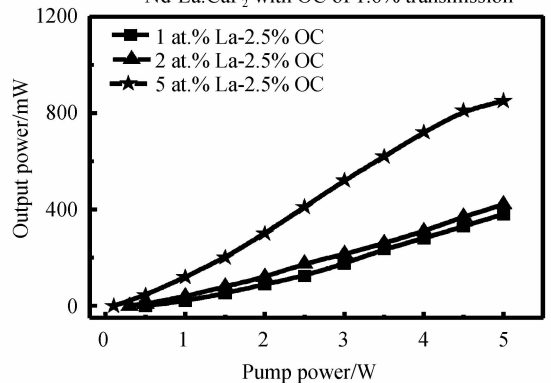
(c) CW output power versus the pump power for Nd:Sc:CaF₂ with OC of 1.6% transmission



(d) CW output power versus the pump power for Nd:La:CaF₂ with OC of 1.6% transmission



(e) CW output power versus the pump power for Nd:Sc:CaF₂ with OC of 2.5% transmission



(f) CW output power versus the pump power for Nd:La:CaF₂ with OC of 2.5% transmission

图 4 不同掺杂浓度 Nd:Sc:CaF₂ 和 Nd:La:CaF₂ 在不同输出率下的连续激光输出功率曲线
Fig. 4 CW output power versus the pump power for Nd:Sc:CaF₂ and Nd:La:CaF₂ with three OCs of 0.8, 1.6 and 2.5% transmission, respectively

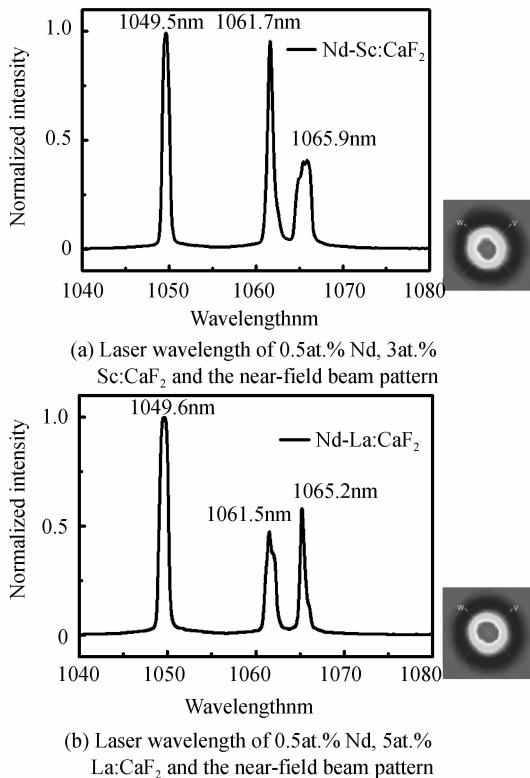


图5 输出激光波长和近场光斑模式

Fig. 5 Laser wavelength and the corresponding near-field beam pattern

3 结论

实验研究了 Nd-La : CaF_2 和 Nd-Sc : CaF_2 混晶的连续激光输出特性,通过对不同掺杂浓度样品进行激光特性测试,发现 0.5 at. % Nd^{3+} 与 5 at. % La^{3+} : CaF_2 和 0.5 at. % Nd^{3+} 与 3 at. % Sc^{3+} : CaF_2 分别在 5 W 泵浦功率下,实现了 1.10 W 和 0.64 W 的连续激光功率,斜效率分别为 23.0% 和 12.8%,阈值泵浦功率仅为 10 mW. 实验表明新型 Nd-La 共掺和 Nd-Sc 共掺 CaF_2 晶体是一种可用于高效率二极管泵浦固体激光器的激光晶体介质. 结合共掺 CaF_2 晶体光滑和较宽的荧光发射谱带宽,有望实现高功率全固态超短脉冲激光输出.

参考文献

- [1] MENMILLIOD N, ROMERO R, CHARTIER I, *et al.* Performance of various diode-pumped Nd: laser materials: influence of inhomogeneous broadening[J]. *IEEE, Quantum Electronics*, 1992, **28**(4):1179-1187.
- [2] OBER M H, SOROKIN E, SOROKINA I, *et al.* Subpicosecond mode locking of a Nd^{3+} -doped garnet laser[J]. *Optics Letters*, 1992, **17**(19): 1364-1366 .
- [3] SOROKIN E, OBER M H, SOROKINA I, *et al.* Femtosecond solid-state lasers using Nd^{3+} -doped mixed scandium garnets [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1993, **10**(8):1436-1442.
- [4] XIE G Q, TANG D Y, LUO H, *et al.* Dual-wavelength synchronously mode-locked Nd: CNGG laser [J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(16):1872-1874.
- [5] XIE G Q, QIAN L J, YUAN P, *et al.* Generation of 534 fs pulses from a passively mode-locked Nd: CLNGG-CNGG disordered crystal hybrid laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2001, **7**(7):483-486.
- [6] WANG Q, WEI Z Y, LIU J X, *et al.* Mode-locked Nd : LGS laser with femtosecond pulse duration [C]. Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), 2013.
- [7] DOUALAN J L, SU L B, BRASSE G, *et al.* Improvement of infrared laser properties of Nd : CaF_2 crystals via codoping with Y^{3+} and Lu^{3+} buffer ions[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2013, **30**(11):3018-3021.
- [8] PAYNE S A, CAIRD J A, CHASE L L, *et al.* Spectroscopy and gain measurements of Nd^{3+} in SrF_2 and other fluorite-structure hosts [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1991, **8**(4): 726-740.
- [9] FERNANDEZ J, OLEAGA A, AZKARGORTA J, *et al.* Nd^{3+} laser spectral dynamics in CaF_2 - YF_3 - NdF_3 crystals[J]. *Optical Materials*, 1999, **13**(1): 9-16.
- [10] QIN Z P, XIE G Q, MA J, *et al.* Generation of 103 fs mode-locked pulses by a gain linewidth-variable Nd, Y: CaF_2 disordered crystal[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(7):1737-1739.
- [11] ZHU J F, ZHANG L J, GAO Z Y, *et al.* Diode-pumped femtosecond mode-locked Nd, Y-codoped CaF_2 laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2015, **12**(3): 035801-035804.
- [12] WEI L, HAN H N, TIAN W L, *et al.* Efficient femtosecond mode-locked Nd, Y: SrF_2 laser[J]. *Applied Physics Express*, 2014, **7**(9): 092704-092704.
- [13] WEI L, ZHU J F, TIAN W L, *et al.* Generation of sub-100 fs pulses from mode-locked Nd, Y: SrF_2 laser with enhancing SPM[J]. *Laser Physics Letters*, submitted.
- [14] LI C, ZHANG F, LIU J, *et al.* Continuous-wave and mode-locked operation of a diode-pumped Nd-La : CaF_2 laser[J]. *Optical Materials Express*, 2015, **5**(9):1972-1978.