

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0306-04

激光二极管抽运 Yb^{3+} , $\text{Na}:\text{CaF}_2$ 晶体的激光性能

苏良碧¹, 徐 军¹, 张 丹¹, 薛迎红², 王清月², 柴 路², 杜 鹃¹, 梁晓燕¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

(²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)

摘要 研究了一种新型激光晶体 $\text{Na}^+, \text{Yb}^{3+}:\text{CaF}_2$ 在激光二极管抽运下的激光性能。该晶体仅以自调 Q 方式运转, 激光波长为 $1.05 \mu\text{m}$, 最低抽运吸收阈值功率仅 30 mW, 功率密度为 $0.60 \text{ kW}/\text{cm}^2$ 。当输入功率接近 5 W 时, 脉冲宽度稳定在 $1.5 \mu\text{s}$, 相应的重复频率为 28 kHz。采用半导体可饱和吸收镜对 $\text{Na}^+, \text{Yb}^{3+}:\text{CaF}_2$ 晶体进行被动锁模, 获得自调 Q 被动锁模激光脉冲。单束输出功率为 180 mW, 自调 Q 脉宽为 $7 \mu\text{s}$, 重复频率为 5.2 kHz, 其包络下的锁模超短激光脉冲的变换极限脉冲宽度为 1 ps, 重复频率为 183 MHz, 对应脉冲峰值功率为 27 kW。

关键词 材料; $\text{Na}^+, \text{Yb}^{3+}:\text{CaF}_2$ 晶体; 低阈值; 激光二极管抽运; 自调 Q; 被动锁模

中图分类号 TN248.1; O78 文献标识码 A

Self-Q-Switched and Passively Mode-Locked Laser of Laser Diode-Pumped $\text{Yb}^{3+}, \text{Na}^+:\text{CaF}_2$ Crystal

SU Liang-bi¹, XU Jun¹, ZHANG Dan¹, XUE Ying-hong², WANG Qing-yue²,
CHAI Lu², DU Juan¹, LIANG Xiao-yan¹

¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² School of Precision Instruments & Optoelectronics Engineering, Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science, Chinese Ministry of Education, University of Tianjin, Tianjin 300072, China

Abstract Laser performances of a new $\text{Na}^+, \text{Yb}^{3+}:\text{CaF}_2$ crystal under laser diode pumping were demonstrated. This crystal only operated in the self-Q-switched scheme, with laser wavelength of $1.05 \mu\text{m}$, and minimum pump absorbed power of 30 mW corresponding to power density of $0.60 \text{ kW}/\text{cm}^2$. On 5 W incident power, the repetition rate and width of the self-Q-switched pulses reached 28 kHz and $1.5 \mu\text{s}$, respectively. By using a semiconductor saturable absorber mirror (SESAM), simultaneous transform-limited 1 ps passively mode-locked pulses, with the average output power of one laser beam 180 mW and the repetition rate of 183 MHz, were obtained under the self-Q-switched envelope induced by the laser medium. The corresponding pulse peak power arrived at 27 kW, indicating the promising application of $\text{Yb}^{3+}, \text{Na}^+$ -codoped CaF_2 crystals in achieving ultra-short pulses and high pulse peak power.

Key words materials; $\text{Na}^+, \text{Yb}^{3+}:\text{CaF}_2$ crystal; low threshold; laser diode-pump; self-Q-switching; passive mode-locking

1 引 言

掺 Yb^{3+} 晶体是近年来激光晶体重要发展方向, 但与 Nd^{3+} 激活离子相比, 由于 Yb^{3+} 属于准三能级系统, 已发现的掺 Yb 晶体的抽运阈值普遍较高。因此, 寻找低阈值实用化晶体介质是国内外科学家追求的目标。

当 Yb^{3+} 掺入 CaF_2 晶格中取代 Ca^{2+} 时, 其外层电子结构倾向于充满 $4f$ 壳层, 形成稳定的 $4f^{14}$

(Yb^{2+}) 结构, 从而降低激活离子 Yb^{3+} 的有效浓度。而且, 三价稀土离子在 CaF_2 晶格中非常容易形成团簇结构。例如, 掺杂原子数分数为 0.05% 的 $\text{Er}^{3+}:\text{CaF}_2$ 晶体中就可以观察到 Er^{3+} 离子对的存在^[1], $\text{Yb}^{3+}:\text{CaF}_2$ 晶体中出现团聚现象的起始原子数分数为 0.2%^[2]。团簇结构中的 Yb^{3+} 离子对会产生强烈的合作发光效应。而且, 当 $\text{Yb}^{3+}:\text{CaF}_2$ 晶体含有一定比例的 Yb^{2+} 时, 团簇中处于激发态的 Yb^{3+} 和基

基金项目: 国家自然科学基金(60508016)和国家杰出青年基金(60425516)资助课题。

作者简介: 苏良碧(1979—), 男, 博士, 主要从事激光与光功能晶体的生长、结构缺陷、光谱和激光性能的研究。

E-mail: su_lb@163.com

态的 Yb^{2+} 之间的另一种合作能量转移过程也会降低 Yb^{3+} 的发光量子效率^[3]；多个 Yb^{3+} 离子同时去激发，其能量通过非辐射跃迁转移到处于非激光态的 Yb^{2+} 。

为此，提出了一种新的 $\text{Na}^+, \text{Yb}^{3+} : \text{CaF}_2$ 晶体^[4,5]。其关键是在 CaF_2 基质中同时引入 Yb^{3+} 和 Na^+ ， Na^+ 和 Yb^{3+} 在取代 Ca^{2+} 时形成电荷互补以达到系统的电荷平衡，同时起到阻止 Yb^{3+} 团簇结构和 Yb^{2+} 形成的作用，从而大大提高 $\text{Yb}^{3+} : \text{CaF}_2$ 晶体的发光效率和降低激光抽运阈值。

2 实验

$\text{Yb}, \text{Na} : \text{CaF}_2$ 晶体采用温梯法 (TGT) 生长， YbF_3 的掺杂原子数分数为 2.0%， NaF 的掺杂原子数分数为 3.0%。该晶体的吸收和发射光谱特性已在文献[4,5]中作了详细的报道。激光二极管抽运激光性能测试实验装置如图 1 所示，图中 F 为聚焦透镜 ($f=18 \text{ mm}$)， M_1 为平面双色镜， M_2 为曲面反射镜 ($R=100 \text{ m}$)， M_3 为输出耦合镜，SF10 为色散棱镜。抽运源是光纤耦合的激光二极管，最大发射功率为 4.9 W，中心波长在 975 nm，光纤的芯径为 50 μm ，数值孔径为 0.22。采用非球面镜对抽运光束整形和扩束后，再聚焦到激光晶体上，其光斑半径为 40 μm 。为了得到稳定的 TEM_{00} 模振荡，谐振腔采用稳定的三镜折叠腔结构。为了防止晶体由于热效应被打坏，将晶体通过铜片包裹固定于接有水冷循环系统的铜座上。通过在腔内的一臂上插入一个 SF10 色散棱镜，实现激光输出波长的调谐。所用样品为垂直切割，平行抛光后通光长度为 6 mm，两个抛光面未镀膜。为了得到不同的激光输出，实验中分别采用了激光透过率为 1% 和 2% 的耦合输出镜。

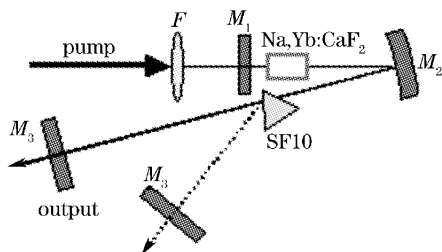


图 1 激光二极管抽运 $\text{Yb}, \text{Na} : \text{CaF}_2$ 晶体的激光装置图
Fig. 1 Structure of the laser cavity for $\text{Yb}, \text{Na} : \text{CaF}_2$ crystal

3 结果与讨论

激光二极管抽运作用下，该晶体仅以自调 Q 激光方式运转，输出激光的中心波长为 1050 nm。图 2

为吸收功率仅 100 mW 时的自调 Q 激光脉冲序列，激光脉冲能量变化小于 10%。自调 Q 激光脉冲的重复频率和脉宽随抽运输入功率的变化规律如图 3 所示。激光脉冲的重复频率随抽运功率的增加线性增加，而脉宽呈指数关系减小。当抽运功率增加到 5 W (实际吸收功率为 2.2 W) 时，脉冲重复频率为 28 kHz，脉宽则稳定在 1.5 μs 。通过在激光腔内的一臂上插入一个 SF10 色散棱镜，获得在 1036~1059 nm 波长范围内连续调谐的激光振荡。

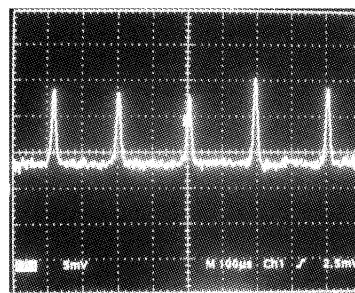


图 2 激光二极管抽运 $\text{Yb}^{3+}, \text{Na}^+ : \text{CaF}_2$ 晶体自调 Q 激光脉冲序列

Fig. 2 A sequence of self-Q-switched laser pulses from LD-pumped $\text{Yb}, \text{Na} : \text{CaF}_2$ crystal

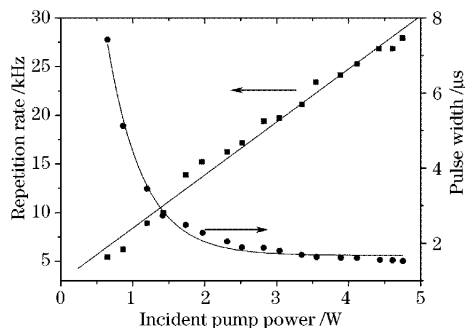


图 3 激光二极管抽运 $\text{Na}, \text{Yb} : \text{CaF}_2$ 晶体自调 Q 激光脉冲重复频率和脉宽随抽运功率的变化

Fig. 3 Repetition rate and pulse width of self-Q-switched laser pulses versus incident pump power

对于激光二极管抽运 $\text{Na}, \text{Yb} : \text{CaF}_2$ 晶体的自调 Q 激光机理，一种可能的解释是存在 F_2^- 心，即三个电子被两个近邻的阴离子空位所束缚。LiF: F_2^- 色心晶体是熟知的可饱和吸收体，吸收带的峰值波长为 1040 nm^[6]。Na: CaF_2 晶体中存在 F_2^- 心^[7]，而 Na, Yb: CaF_2 晶体中由于 Yb^{3+} 取代 Ca^{2+} 产生多余的电子，因此可能在晶体生长过程中形成 F_2^- 心。从如图 4 所示的 Na, Yb: CaF_2 晶体的吸收光谱可见，在长波段存在一峰值位于 1066 nm 的附加吸收带，与 Yb^{3+} 的吸收带相互重叠，可能是属于 F_2^- 心，

从而起到被动调 Q 的作用。

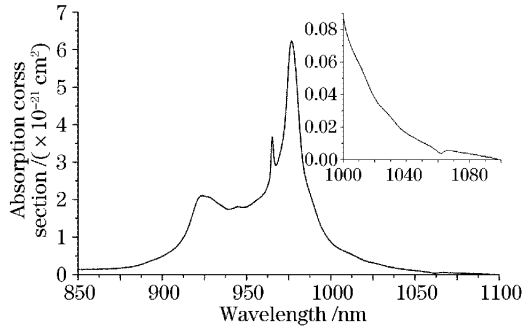


图 4 $\text{Yb}^{3+}, \text{Na}^{+}:\text{CaF}_2$ 晶体的室温吸收光谱
Fig. 4 Room temperature absorption spectrum of $\text{Yb}^{3+}, \text{Na}^{+}:\text{CaF}_2$ crystal

采用透过率分别为 1% 和 2% 的输出耦合镜时, 激光输出平均功率与吸收抽运功率的关系如图 5 所示。当输出耦合镜的透过率为 1% 时, 激光运转的阈值吸收功率仅为 30 mW。根据抽运光斑半径等于 40 μm , 可计算出抽运功率密度等于 0.60 kW/cm^2 。文献报道的 $\text{Yb}^{3+}:\text{CaF}_2$ 晶体的抽运阈值功率密度等于 1.57 kW/cm^2 (阈值功率为 75 mW, 光斑半径为 39 μm)^[8], 或 4.46 kW/cm^2 (阈值功率为 1.4 W, 光斑半径为 100 μm)^[9]。与之比较, 掺 Na^{+} 后阈值功率密度下降了好几倍。低的抽运阈值显然是由于 Na^{+} 共掺降低了晶体中 Yb^{2+} 的含量, 同时分裂了 Yb^{3+} 离子形成的团簇结构, 从而有效地提高了 Yb^{3+} 的荧光量子效率。当输出耦合镜的透过率为 2% 时, 激光输出斜率效率达 20.3%, 远高于另一种自调 Q 激光晶体 $\text{Cr}^{4+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ ($\eta=15\%$)^[10]。

采用半导体可饱和吸收镜对 $\text{Na}^{+}, \text{Yb}^{3+}:\text{CaF}_2$ 晶体进行被动锁模, 获得自调 Q 被动锁模激光脉冲。激

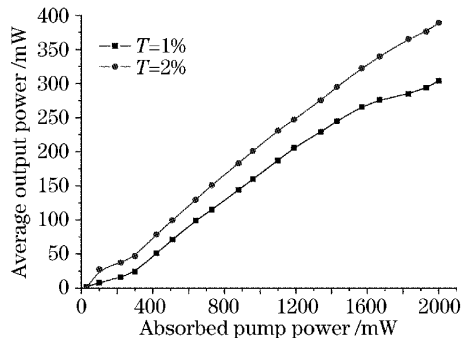


图 5 输出耦合镜的透过率分别为 1% 和 2% 时激光输出平均功率与吸收抽运功率的关系

Fig. 5 Average output power versus absorbed pump power for different output couplers with transmission of 1% and 2%, respectively

光输出波长为 1047 nm, 单束输出功率为 180 mW, 自调 Q 脉宽为 7 μs , 重复频率为 5.2 kHz, 其包络下的锁模超短激光脉冲的变换极限脉冲宽度为 1 ps, 重复频率为 183 MHz, 对应脉冲峰值功率为 27 kW。抽运吸收功率等于 3.34 W 时, 激光平均输出功率为 380 mW。 $\text{Na}^{+}, \text{Yb}^{3+}:\text{CaF}_2$ 晶体锁模激光的自调 Q 脉冲序列、随机抽取的单个自调 Q 脉冲、自调 Q 包络下的锁模脉冲序列分别如图 6(a), (b) 和 (c) 所示。

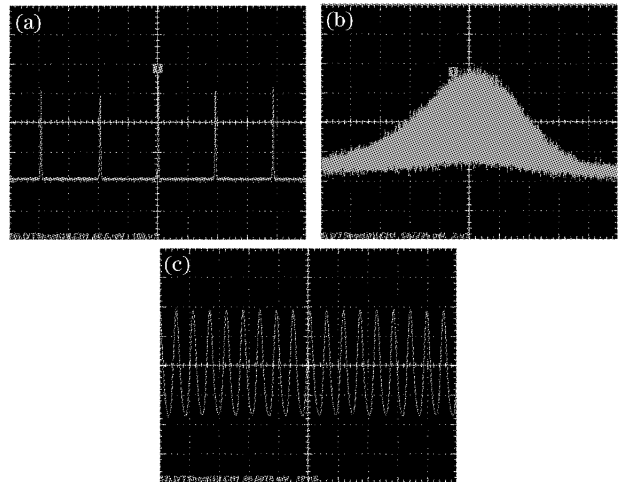


图 6 (a) $\text{Na}^{+}, \text{Yb}^{3+}:\text{CaF}_2$ 晶体锁模激光的自调 Q 脉冲序列; (b) 随即抽取的单个自调 Q 脉冲; (c) 自调 Q 包络下的锁模脉冲序列

Fig. 6 (a) Self-Q-switched pulse train of a mode-locked $\text{Na}^{+}, \text{Yb}^{3+}:\text{CaF}_2$ laser; (b) a single self-Q-switched pulse sampling from the train; (c) a pulse train of mode-locked pulses under the self-Q switched envelope

传统的调 Q 锁模中的 Q 开关包络是由于可饱和吸收体未达到完全饱和引起的^[11]。而 $\text{Na}^{+}, \text{Yb}^{3+}:\text{CaF}_2$ 晶体被动锁模的调 Q 脉冲包络则是由于晶体本身具有自调 Q 特性所引起的。一方面, 被动锁模下的调 Q 脉冲重复频率与连续运转时相一致, 即采用高反镜取代半导体可饱和吸收镜后自调 Q 脉冲重复频率也约为 5 kHz。而起源于半导体可饱和吸收镜自身的调 Q 脉冲重复频率一般要高好几个数量级。另一方面, 由于该晶体本身是以自调 Q 运转, 腔内的功率密度比连续运转提高了许多倍, 因此半导体可饱和吸收镜更容易处于深度饱和状态, 也就是说, 激光运转条件已远高于半导体可饱和吸收镜达到连续波被动锁模的稳定极限。

4 结 论

根据上述激光实验结果, 可见 $\text{Na}^{+}, \text{Yb}^{3+}:\text{CaF}_2$

晶体是一种高效率、低阈值的自调制激光晶体。同时考虑到 CaF_2 晶体物化性能优异、易生长大尺寸高质量晶体, Na^+ , Yb^{3+} : CaF_2 晶体在全固态可调谐、超快激光增益和放大介质方面具有潜在应用价值。

参 考 文 献

- 1 D. R. Tallant, J. C. Wright. Selective laser excitation of charge compensated sites in CaF_2 : Er^{3+} [J]. *J. Chem. Phys.*, 1975, **63**(5): 2074~2085
- 2 J. Corish, C. R. A. Catlow, P. W. M. Jacobs *et al.*. Defect aggregation in anion-excess fluorites. Dopant monomers and dimers [J]. *Phys. Rev. B*, 1982, **25**(10): 6425~6438
- 3 D. F. de Sousa, N. Martynyuk, V. Peters *et al.*. Quenching behaviour of highly doped Yb^+ YAG and YbAG [C]. *CLEO/Europe*, 2003. 337
- 4 Liangbi Su, Jun Xu, Hongjun Li *et al.*. Codoping Na^+ to modulate the spectroscopy and photoluminescence properties of Yb^{3+} in CaF_2 laser crystal [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(9): 1003~1005
- 5 Su Liangbi, Xu Jun, Li Hongjun *et al.*. Sites structure and spectroscopic properties of Yb -doped and Yb , Na -codoped CaF_2 laser crystals [J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2005, **406**: 254~258
- 6 W. Gellermann, A. Muller, D. Wandt *et al.*. Formation, optical properties, and laser operation of F_2^- centers in LiF [J]. *J. Appl. Phys.*, 1987, **61**(4): 1297~1303
- 7 V. A. Arkhangelskaya, A. A. Fedorov, P. P. Feofilov. Tunable room-temperature laser action of colour centres in MeF_2 - Na [J]. *Opt. Commun.*, 1979, **28**: 87~90
- 8 V. Petit, J. L. Doualan, P. Camy *et al.*. CW and tunable laser operation of Yb^{3+} doped CaF_2 [J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **78**(6): 681~684
- 9 A. Lucca, M. Jacquemet, F. Druon *et al.*. High-power tunable diode-pumped Yb^{3+} : CaF_2 laser [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(16): 1879~1881
- 10 Dong Jun, Deng Peizhen, Liu Yupu *et al.*. Performance of the self-Q-switched Cr , Yb^+ YAG Laser [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2002, **19**(3): 342~344
- 11 C. Honninger, R. Paschotta, F. Morier-Genoud *et al.*. Q-switching stability limits of continuous-wave passive mode locking [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, **16**(1): 46~56