

# 镱钠共掺氟化钙锁模激光器产生 190 fs 光脉冲\*

葛文琦<sup>1)</sup> 柴路<sup>1)†</sup> 胡明列<sup>1)</sup> 王清月<sup>1)</sup> 苏良碧<sup>2)</sup> 李红军<sup>2)</sup> 郑丽和<sup>2)</sup> 徐军<sup>2)</sup>

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) (中国科学院上海硅酸盐研究所, 透明与光功能无机材料重点实验室, 上海 200050)

(2010 年 12 月 9 日收到; 2011 年 3 月 29 日收到修改稿)

在半导体激光器高功率抽运的镱、钠共掺氟化钙 (Yb, Na:CaF<sub>2</sub>) 激光器中, 通过对晶体的负热透镜效应的数值模拟, 进行激光器腔型的调节和优化, 使得该激光器在采用 2% 的耦合输出镜和吸收抽运功率为 7.8 W 的条件下, 获得了脉冲宽度为 190 fs、平均输出功率为 503 mW、中心波长为 1034 nm、重复频率为 82.4 MHz 的连续锁模脉冲序列. 如果计算晶体表面反射等其他形式的泄漏输出, 激光器的总平均输出功率为 905 mW.

**关键词:** Yb,Na:CaF<sub>2</sub> 晶体, 激光二极管抽运, 飞秒激光

**PACS:** 42.70.Hj, 42.55.Xi, 42.65.Re

## 1 引言

掺 Yb 离子的激光材料由于其能级结构简单、量子缺陷较低以及具有宽带发射光谱, 成为了近十几年来激光领域的研究热点. 基于这些材料, 由半导体激光器直接抽运的超短脉冲振荡器、放大器陆续出现, 不断推动激光技术, 特别是超短脉冲技术的发展与应用. 大量的掺 Yb 氧化物激光晶体已经成功应用于超短脉冲的产生或者放大, 主要包括 Yb:YAG, Yb:YVO<sub>4</sub>, Yb:GdCOB, Yb:KGW, Yb:KYW, Yb:GSO, Yb:YAB, Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等<sup>[1-9]</sup>. 而氟化物晶体则是另外一类重要的激光介质, 它具有一些独特的优点: 光谱透射范围非常宽 (可以从深紫外一直到中红外), 吸收系数低, 线性与非线性折射率较低, 损伤阈值高等. 这类激光材料主要包括 Yb:CaF<sub>2</sub>, Yb:SrF<sub>2</sub>, Yb:BaF<sub>2</sub>, Yb:KYF, Yb:YLF 等<sup>[10-12]</sup>. 其中, Yb:CaF<sub>2</sub> 晶体因具备更低的声子频率、更高的热传导率以及容易生长大尺度单晶等优点, 显现出了更好的激光特性, 自 2004 年问世以来就引起了广泛关注<sup>[13,14]</sup>. 近年来, Yb:CaF<sub>2</sub>

的激光特性的研究进展也引人注目. 在高功率运转方面, 2008 年, Boudeile 采用 Yb:CaF<sub>2</sub> 晶体, 在室温下实现了平均输出功率为 10.2 W、斜率效率为 21.6% 的连续激光输出<sup>[15]</sup>. 最近, Ricaud<sup>[16]</sup> 报道了 Yb:CaF<sub>2</sub> 在 77 K 的低温下实现了 97 W 的连续输出. 在锁模运转方面, 2009 年, Friebel 等<sup>[17]</sup> 报道 Yb:CaF<sub>2</sub> 激光器得到 99 fs 的脉冲序列, 也是目前该激光器得到的最窄脉冲纪录. 在获得高能量脉冲方面, Yb:CaF<sub>2</sub> 也在再生放大器和啁啾脉冲放大器中有了良好的应用<sup>[18,19]</sup>.

2005 年, 中国科学院上海光学精密机械研究所徐军、苏良碧等<sup>[20,21]</sup> 首次提出利用 Na<sup>+</sup> 与 Yb<sup>3+</sup> 结合成 Na<sup>+</sup>-Yb<sup>3+</sup> 离子对, 既补偿了 Yb<sup>3+</sup> 置换 Ca<sup>2+</sup> 时带来的电荷失配, 又能够有效防止 Yb<sup>3+</sup> 的团簇和非激活的 Yb<sup>2+</sup> 的生成, 从而大大地提高 Yb<sup>3+</sup>:CaF<sub>2</sub> 晶体的荧光发射效率, 由此产生了新型的镱、钠共掺的氟化钙晶体 (Yb, Na:CaF<sub>2</sub>). 与 Yb:CaF<sub>2</sub> 相比, 其低阈值特性已经在实验中得到验证<sup>[22,23]</sup>, 并在室温下条件下获得了更高效率、更高功率的连续输出<sup>[15,24]</sup>. Pugžlyis

\* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2011CB808101)、国家自然科学基金 (批准号: 60978022, 60838004, 60938001, 60778036)、教育部新世纪优秀人才支持计划 (批准号: NCET-07-0597) 和高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20090032110050) 资助的课题.

† E-mail: lu\_chai@tju.edu.cn

等<sup>[25]</sup>报道了低温冷却条件下的 Yb, Na:CaF<sub>2</sub> 晶体再生放大器, 产生了 3 mJ, 200 fs 的高能量脉冲.

本文主要报道在半导体激光器高功率抽运的镱、钠共掺氟化钙 (Yb, Na:CaF<sub>2</sub>) 激光器中, 通过对晶体的负热透镜效应的数值模拟, 进行激光器腔型的调节和优化, 使得该激光器在采用 2% 的耦合输出镜和吸收抽运功率为 7.8 W 的条件下, 获得了脉冲宽度为 190 fs、平均输出功率为 503 mW、中心波长为 1034 nm、重复频率为 82.4 MHz 的连续锁模脉冲序列. 如果计算其他各种的泄漏功率, 激光器的总平均输出功率可达到 905 mW.

## 2 实验装置

实验中所用的 Yb, Na:CaF<sub>2</sub> 晶体为垂直切割, 尺寸为 4.7 mm×4.6 mm×3.7 mm, 两个通光面抛光, 并镀增透膜 AR 960—1100 nm. 其共掺的 Yb 和 Na 的原子数分数分别为 2% 和 3%. 该晶体用铜片包裹, 并固定于接有循环水冷系统的铜座上, 水温控制在 18 °C.

实验装置如图 1 所示, 抽运源是 nLIGHT 公司生产的光纤耦合输出的激光二极管, 最大发射功率为 20 W, 中心波长为 976 nm, 光纤的芯径为 200 μm, 数值孔径为 0.22. 抽运光经过由 ( $f_1 = 25$  mm) 和 ( $f_2 = 30$  mm) 组成的透镜系统进行准直和聚焦, 进入激光晶体. 为了防止晶体两个平行表面之间形成 Fabry-Perot 效应, 晶体略有倾斜.

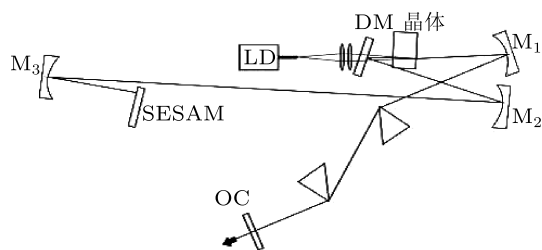


图 1 Yb, Na:CaF<sub>2</sub> 锁模激光器结构图

激光器采用半导体可饱和吸收体 (SESAM) 启动锁模, 选择的具体参数为: 中心波长为 1040 nm, 饱和吸收率为 2%, 调制深度为 1.2%, 弛豫时间为 500 fs, 饱和通量为 70 μJ/cm<sup>2</sup> (德国 Batop 公司). 色散补偿用的腔内棱镜对 (SF10) 间隔为 235 mm, 一次腔循环可以提供大约 2700 fs<sup>2</sup> 的负群延迟色

散.

DM 为对抽运光 (中心波长为 976 nm) 高透和对激光 (中心波长为 1040 nm) 高反的双色镜; M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub> 和 M<sub>3</sub> 为球面反射镜, 其中 M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub> 曲率半径为 400 mm, M<sub>3</sub> 曲率半径为 300 mm; 输出镜 OC (中心波长为 1040 nm) 的透射率  $T = 2%$ . 由于是高功率抽运条件, 因此在设计谐振腔时, 各个元件的选择距离需要考虑热透镜效应对谐振腔的影响.

## 3 实验结果与讨论

实验中采用 Coherent 公司生产的型号为 Field Mate 功率计测量激光功率, ANDO 公司生产的 AQ6315A 型光谱仪记录光谱, 脉冲宽度由 APE 公司生产的 PulseCheck 型自相关仪测得, 脉冲序列采用快响应光电二极管接收和 Iwatsu 公司生产的 SS-7840 A 型模拟示波器监控.

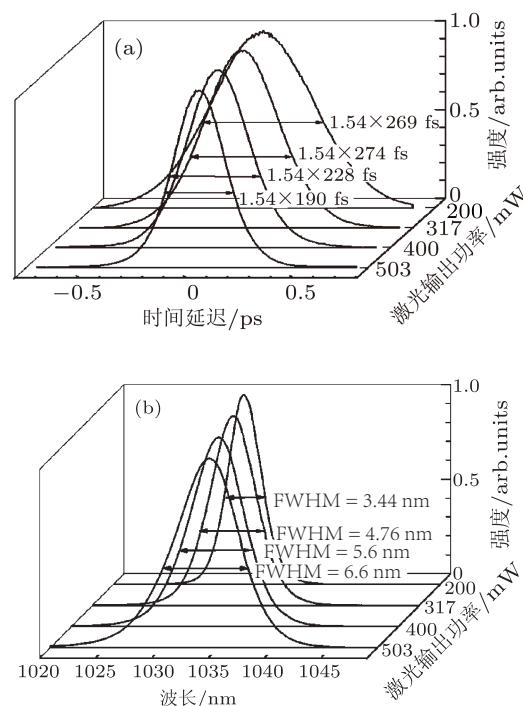


图 2 不同输出功率下的脉冲演变曲线 (a) 脉冲宽度; (b) 对应 (a) 的不同输出功率下脉冲光谱演变曲线

该激光器的激光运转阈值为吸收抽运功率 2.3 W, 此时激光器是工作在调 Q 状态. 继续增加抽运功率, SESAM 上的激光功率密度也随之增大. 当吸收抽运功率增大到 4.2 W 时, 锁模运转启动, 此时激光器输出的平均功率为 200 mW, 脉

冲宽度为 369 fs (假设脉冲形状为双曲正割型). 随着抽运功率的继续增加, 锁模激光的平均输出功率不断增大, 脉冲宽度逐渐变窄和光谱持续展宽. 该演变过程如图 2 所示, 其中, 图 2(a) 为脉冲宽度随激光输出功率的变化图线, 图 2(b) 为相应光谱宽度随激光输出功率的变化图线. 当吸收抽运功率达到 7.8 W 时, 获得了 503 mW 锁模输出, 脉冲宽度为 190 fs, 光谱半峰全宽度 (FWHM) 为 6.6 nm, 对应的时间带宽积为 0.35 (假设脉冲形状为双曲正割型), 已经接近转变极限脉冲. 如果继续增加抽运功率, 就出现脉冲分裂现象. 这说明脉冲的光谱已经受到增益线宽的耗散作用, SESAM 的可饱和和吸收的调制作用已经很小, 如果继续增加脉冲能量, 激光器一般趋于多脉冲运转 [26].

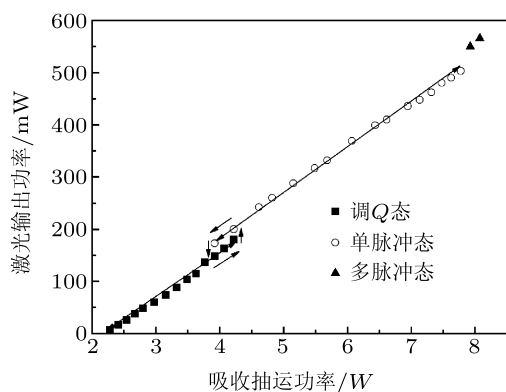


图 3 激光运转状态和输出功率相对于吸收抽运功率的变化关系

图 3 反映了该激光器的输入 - 输出关系. 其中, 在两个状态转变点, 即从调 Q 态 (方块) 到连续锁模单脉冲态 (圆圈) 和从连续锁模单脉冲态到连续锁模多脉冲态 (三角), 输出功率都有小幅跳变. 特别是在第一转变点时, 激光器状态变化有一定的滞后效应, 见图 3 中箭头所示: 下降到吸收抽运功率为 3.9 W 时 (低于上升过程中启动锁模所需的功

率), 仍然可以维持连续锁模单脉冲状态. 图 4 为采用快响应光电二极管和模拟示波器检测的锁模脉冲序列, 显示出重复频率为 82.4 MHz. 该激光器连续锁模工作状态稳定性很好, 可以连续运转数小时.

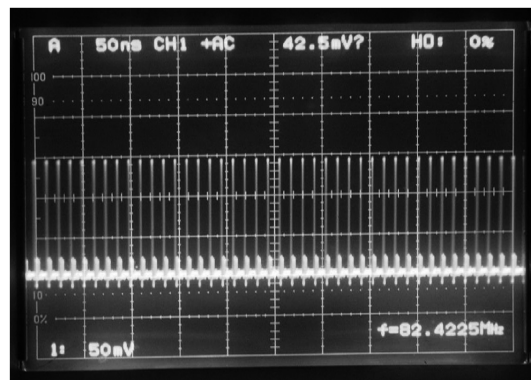


图 4 实验获得的连续锁模脉冲序列

氟化钙本身的材料色散非常小, 实验中使用的晶体的材料色散仅为  $100 \text{ fs}^2$  左右; 而且为了维持孤子型锁模运转, 腔内必须维持净负群延迟色散的状态, 因此, 我们选择的腔内棱镜对间隔能够提供往返一周约为  $2700 \text{ fs}^2$  的负群延迟色散, 即腔内提前预留了较大的负群延迟色散量. 这样在高功率运转需要增加抽运功率时, 不断增强的自相位调制效应 (SPM) 附加的正啁啾自动被这些预留的负群延迟色散不停地抵消, 使脉冲宽度逐渐被压缩, 光谱宽度不断被展宽. 在本实验中, 锁模脉冲的光谱宽度从启动锁模时的  $3.44 \text{ nm}$  扩展到  $6.6 \text{ nm}$ , 而脉冲宽度从锁模开始时的  $369 \text{ fs}$  压缩到最窄的  $190 \text{ fs}$ . 最窄脉冲时的时间带宽积为 0.35, 为变换极限 (双曲正割型为 0.315) 的 1.12 倍, 说明此时腔内预留的负群延迟色散量正好补偿了 SPM 效应不断附加的正啁啾.

表 1 测量的各种输出形式的输出功率

| 2%OC 的<br>输出功率 $P_{OC}/\text{mW}$ | 每次晶体表面<br>反射功率/ $\text{mW}$ | 每次棱镜表面<br>反射功率/ $\text{mW}$ | 镜片透射功率之和/ $\text{mW}$ | 总输出功率 $P_{total}/\text{mW}$ | $(P_{OC}/P_{total})/\%$ |
|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 503                               | 63.5                        | 15.3                        | 87                    | 905                         | 55.6                    |

鉴于最近有国外文献在计算激光器输出功率与效率时, 考虑计入腔内各种以泄漏形式的输

出 (非耦合输出镜输出)<sup>[16]</sup>, 我们也对该激光器中在晶体和棱镜表面的反射、腔镜的透射等泄漏输出

的激光进行了测量, 结果见表 2. 考虑到激光在腔内往返一周分别需要 4 次经历晶体表面反射和棱镜对表面反射损耗, 以及各个凹面反射镜透出损耗, 最后得出的泄漏出的激光功率为 402 mW, 即全部输出功率为 905 mW.

## 4 结论

在 LD 端面抽运的 Yb, Na:CaF<sub>2</sub> 晶体锁模激

光器中, 获得了平均输出功率为 503 mW、脉冲宽度为 190 fs、中心波长为 1034 nm、重复频率为 82.4 MHz 的飞秒激光脉冲, 相应的单脉冲能量为 6.1 nJ. 若考虑其他形式的激光泄漏, 该激光器的平均总输出功率为 905 mW. 该实验结果表明, 国产 Yb, Na: CaF<sub>2</sub> 晶体是一种优质的高功率超短脉冲激光材料.

- [1] Hönninger C, Paschotta R, Graf M, Morier-Genoud F, Zhang G, Moser M, Biswal S, Nees J, Braun A, Mourou G 1999 *Appl. Phys. B* **69** 3
- [2] Wang P, Dawes J, Dekker P, Piper J 2000 *Opt. Comm.* **174** 467
- [3] Brunner F, Spühler G, Ausder J A, Krainer L, Morier-Genoud F, Paschotta R, Lichtenstein N, Weiss S, Harder C, Lagatsky A 2000 *Opt. Lett.* **25** 1119
- [4] Jacquemet M, Jacquemet C, Janel N, Druon F, Balembois F, Georges P, Petit J, Viana B, Vivien D, Ferrand B 2004 *Appl. Phys. B* **80** 171
- [5] Kisel V, Troshin A, Shcherbitsky V, Kuleshov N, Matrosov V, Matrosova T, Kupchenko M, Brunner F, Paschotta R, Morier-Genoud F 2005 *Opt. Lett.* **30** 1150
- [6] Xue Y, Wang C, Liu Q, Li Y, Chai L, Yan C, Zhao G, Su L, Xu X, Xu J 2006 *IEEE J. Quantum Electronics* **42** 517
- [7] Yang Q H, Xu J, Su L B, Zhang H W 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2657 (in Chinese) [杨秋红, 徐军, 苏良碧, 张红伟 2006 物理学报 **55** 2657]
- [8] Xue Y H, Wang Q Y, Chai L, Liu Q W, Zhao G J, Su L B, Xu X D, Xu J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 456 (in Chinese) [薛迎红, 王清月, 柴路, 刘庆文, 赵广军, 苏良碧, 徐晓东, 徐军 2006 物理学报 **55** 456]
- [9] Wan Y, Han W J, Liu J H, Xia L H, Xavier M, Valentin P, Zhang H J, Wang J Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 278 (in Chinese) [万勇, 韩文娟, 刘均海, 夏临华, Xavier M, Valentin P, 张怀金, 王继扬 2009 物理学报 **58** 278]
- [10] Siebold M, Bock S, Schramm U, Xu B, Doualan J, Camy P, Moncorgé R 2009 *Appl. Phys. B* **97** 327
- [11] Coluccelli N, Galzerano G, Tonelli M, Laporta P, Svelto O 2008 *Opt. Lett.* **33** 1141
- [12] Coluccelli N, Galzerano G, Bonelli L, DiLieto A, Tonelli M, Laporta P 2008 *Opt. Express* **16** 2922
- [13] Petit V, Doualan J, Camy P, Ménard V, Moncorgé R 2004 *Appl. Phys. B* **78** 681
- [14] Lucca A, Jacquemet M, Druon F, Balembois F, Georges P, Camy P, Doualan J, Moncorgé R 2004 *Opt. Lett.* **29** 1879
- [15] Boudeile J, Didierjean J, Camy P, Doualan J, Benayad A, Ménard V, Moncorgé R, Druon F, Balembois F, Georges P 2008 *Opt. Express* **16** 10098
- [16] Ricaud S, Papadopoulos D, Camy P, Doualan J, Moncorgé R, Courjaud A, Mottay E, Georges P, Druon F 2010 *Opt. Lett.* **35** 3757
- [17] Friebe F, Druon F, Boudeile J, Papadopoulos D, Hanna M, Georges P, Camy P, Doualan J, Benayad A, Moncorgé R 2009 *Opt. Lett.* **34** 1474
- [18] Siebold M, Hornung M, Bock S, Hein J, Kaluza M, Wemans J, Uecker R 2007 *Appl. Phys. B* **89** 543
- [19] Siebold M, Hornung M, Boedefeld R, Podleska S, Klingebiel S, Wandt C, Krausz F, Karsch S, Uecker R, Jochmann A 2008 *Opt. Lett.* **33** 2770
- [20] Su L, Xu J, Li H, Wen L, Yang W, Zhao Z, Si J, Dong Y, Zhou G 2005 *J. Cryst. Growth* **277** 264
- [21] Su L, Xu J, Li H, Wen L, Zhu Y, Zhao Z, Dong Y, Zhou G, Si J 2005 *Chem. Phys. Lett.* **406** 254
- [22] Chai L, Yan S, Xue Y H, Liu Q W, Wang Q Y, Su L B, Xu X D, Zhao G J, Xu J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3553 (in Chinese) [柴路, 颜石, 薛迎红, 刘庆文, 王清月, 苏良碧, 徐晓东, 赵广军, 徐军 2007 物理学报 **56** 3553]
- [23] Su L, Xu J, Xue Y, Wang C, Chai L, Xu X, Zhao G 2005 *Opt. Express* **13** 5635
- [24] Chai L, Ge W Q, Yan J, Hu M L, Wang Q Y, Su L B, Li H J, Zheng L H, Xu J 2009 *Chin. J. Laser* **36** 1700 (in Chinese) [柴路, 葛文琦, 闫杰, 胡明列, 王清月, 苏良碧, 李红军, 郑丽和, 徐军 2009 中国激光 **36** 1700]
- [25] Pugžlys A, Andriukaitis G, Baltuška A, Su L, Xu J, Li H, Li R, Lai W, Phua P, Marcinkevičius A, Fermann M E, Giniūnas L, Danielius R, Ališauskas S 2009 *Opt. Lett.* **34** 2075
- [26] Keller U, Weingarten K J, Kärtner F X, Kopf D, Braun B, Jung I D, Fluck R, Hönninger C, Matuschek N, Aus der Au J 1996 *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron* **2** 435

# Generation of 190 fs optical pulses from a mode-locked Yb, Na: CaF<sub>2</sub> laser\*

Ge Wen-Qi<sup>1)</sup> Chai Lu<sup>1)†</sup> Hu Ming-Lie<sup>1)</sup> Wang Qing-Yue<sup>1)</sup> Su Liang-Bi<sup>2)</sup>  
Li Hong-Jun<sup>2)</sup> Zheng Li-He<sup>2)</sup> Xu Jun<sup>2)</sup>

1) (School of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Key Laboratory of Opto-Electronic Information Technology of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

2) (Key Laboratory of Transparent Opto-functional Inorganic Materials, Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences (SICCAS), Shanghai 200050, China)

(Received 9 December 2010; revised manuscript received 29 March 2011)

## Abstract

In the paper, the demonstration of a high-power LD-pumped Yb, Na:CaF<sub>2</sub> femtosecond laser is presented, which the cavity is optimized concerning the numerical simulation for the thermal lens effect. With a 2% output coupler, a continuous-wave mode-locked pulse train with a pulsewidth of 190 fs, the average output power of 503 mW, the center wavelength at 1034 nm and a repetition frequency of 82.4 MHz is obtained under the absorbed pump power of 7.8 W. If other forms of output are recorded, such as the reflection of the crystal surface, the total output power is 905 mW.

**Keywords:** Yb, Na:CaF<sub>2</sub> crystal, Laser diode-pump, femtosecond laser

**PACS:** 42.70.Hj, 42.55.Xi, 42.65.Re

\* Project supported by National Key Basic Research Special Foundation of China (Grant No. 2011CB808101), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60978022, 60838004, 60938001, 60778036), Program for New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education of China (Grant No. NCET-07-0597), and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20090032110050).

† E-mail: lu\_chai@tju.edu.cn