

文章编号: 0258-7025(2010)11-2803-04

# 半导体激光器抽运的连续锁模镱钠共掺氟化钙激光器

葛文琦<sup>1</sup> 柴路<sup>1</sup> 闫杰<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>

(<sup>1</sup> 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)  
<sup>2</sup> 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)

**摘要** 报道了半导体激光器抽运的连续锁模镱钠共掺氟化钙(Yb,Na:CaF<sub>2</sub>)激光器中,利用半导体可饱和吸收镜(SESAM)启动被动锁模, SF10 棱镜对进行腔内色散补偿,在吸收抽运功率为 9 W 的条件下,采用 1% 的耦合输出镜,获得了脉冲宽度为 406 fs,输出功率为 80 mW,中心波长在 1043 nm 附近,重复频率为 94.8 MHz 的连续脉冲序列。

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

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103711.2803

## Laser Diode-Pumped Continuous-Wave Mode-Locked Yb,Na:CaF<sub>2</sub> Laser

Ge Wenqi<sup>1</sup> Chai Lu<sup>1</sup> Yan Jie<sup>1</sup> Hu Minglie<sup>1</sup> Wang Qingyue<sup>1</sup> Su Liangbi<sup>2</sup> Li Hongjun<sup>2</sup>  
Zheng Lihe<sup>2</sup> Xu Jun<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Information Technical Science of Ministry of Education, School of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China  
<sup>2</sup> Key Laboratory of Transparent Opto-Functional Inorganic Materials, Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China

**Abstract** The demonstration of a laser diode (LD)-pumped continuous-wave (CW) mode-locked Yb,Na:CaF<sub>2</sub> laser is presented. By employing a semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) for initiating the passively mode locking and a pair of SF10 prisms for the dispersive compensation, a pulse series with a duration of 406 fs and a repetition frequency of 94.8 MHz is obtained. With a 1% output coupler, the maximum of average output power centered at 1043 nm is 80 mW under the absorbed pumping power of 9 W.

**Key words** lasers; laser diode-pump; Yb,Na:CaF<sub>2</sub> crystal; mode-locking

## 1 引 言

掺 Yb 离子的激光材料,由于其较低的量子缺陷、宽带发射光谱,已经广泛地应用于 1 μm 波段的超短脉冲振荡器、放大器。在众多的激光材料基质中,氧化物材料研究最为广泛,如 Yb:YAG, Yb:YVO<sub>4</sub>, Yb:YAB, Yb:KGW, Yb:GSO, Yb:LSO, Yb:YSO 等<sup>[1~9]</sup>。而与氧化物材料相比,氟化物晶体具有非常宽的光谱透射范围(可以从深

紫外一直到中红外)、低的吸收系数、线性与非线性折射率较低、损伤阈值高等特点。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>,其中氟化钙(CaF<sub>2</sub>)晶体具有更低的声子频率(328 cm<sup>-1</sup>)和更高的热传导率[9.7 W/(m·K)]以及容易生长大尺度单晶等优点,因此,Yb:CaF<sub>2</sub>的激光特性表现得十分突出,并引起了广泛关注。2004 年,V. Petit 等<sup>[13]</sup>首次报道采用

收稿日期: 2010-03-16; 收到修改稿日期: 2010-05-28

基金项目: 国家 973 计划(2006CB806002)、国家自然科学基金(60978022,60838044,60938001,60778036)和高等学校博士学科点专项科研基金(20070056083,20070056073)资助课题。

作者简介: 葛文琦(1983—),男,博士研究生,主要从事全固态激光器方面的研究。E-mail:gewqi@163.com

导师简介: 柴路(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事超快激光技术及其应用等方面的研究。E-mail:lu\_chai@tju.edu.cn

钛宝石 920 nm 激光抽运的 Yb:CaF<sub>2</sub> 晶体实现连续波激光运转,斜率效率达 50%。随后, A. Lucca 等<sup>[14]</sup>实现了 Yb:CaF<sub>2</sub> 晶体高功率可调谐激光运转。之后,他们又实现了连续锁模运转,获得了脉宽 150 fs,平均输出功率为瓦量级的锁模脉冲序列<sup>[15]</sup>。2008 年,他们采用 Yb:CaF<sub>2</sub> 晶体,在 64 W 的激光二极管(LD)抽运下,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,这是目前报道的 LD 抽运 Yb:CaF<sub>2</sub> 连续激光器的最高功率水平<sup>[16]</sup>。在锁模运转方面,2009 年, F. Friebe 等<sup>[17]</sup>又报道了 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。除了在振荡器方面, Yb:CaF<sub>2</sub> 也有应用于再生放大器和啁啾脉冲放大器中的报道<sup>[18,19]</sup>。

然而,在单掺 Yb<sup>3+</sup> 的氟化钙晶体中,掺入 Yb<sup>3+</sup> 时往往容易形成团簇结构,导致双光子发射,也会由于电荷平衡而趋向形成非激活的 Yb<sup>2+</sup>,即降低了有效激活离子 Yb<sup>3+</sup> 的浓度,这样使得在 1 μm 波段的荧光发射强度降低。针对这一问题,2005 年中国科学院上海光学精密机械研究所徐军等<sup>[20~22]</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> 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 Yb<sup>2+</sup> 的生成,从而大大地提高 Yb<sup>3+</sup>:CaF<sub>2</sub> 晶体的发光效率和降低激光阈值,由此产生了新型的铯钠共掺的氟化钙晶体(Yb, Na:CaF<sub>2</sub>)。当年就实现了这种新型晶体在 1050 nm 的低阈值自调 Q 激光输出<sup>[23~25]</sup>和调 Q 锁模脉冲<sup>[26]</sup>。最近, A. Pugzlys 等<sup>[27]</sup>也报道了在低温冷却的条件下,通过 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。2009 年,本课题组利用国产 Yb, Na:CaF<sub>2</sub> 晶体,在吸收 18.5 W 的抽运功率的条件下获得了 14.2 W 的连续激光输出<sup>[28]</sup>。

但与 Yb:CaF<sub>2</sub> 相比, Yb, Na:CaF<sub>2</sub> 的激光运转更容易趋于自调 Q,目前还未见该晶体连续锁模的报道。这不仅是由于 Yb, Na:CaF<sub>2</sub> 晶体的上能级寿命长,而且实验证明该晶体在大于 1050 nm 区域具有可饱和吸收作用<sup>[29,30]</sup>。本文报道了通过适当选择腔镜镀膜与半导体可饱和吸收镜(SESAM)吸收边结合,并仔细调节腔以控制激光运转避开可饱和作用波长,实现了 LD 抽运的 Yb, Na:CaF<sub>2</sub> 晶体的连续锁模运转,获得了脉冲宽度为 406 fs,平均输出功率为 80 mW 的脉冲序列。

## 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,未镀膜。掺 Yb 和 Na 的原子数分数分别为 2% 和 3%。晶体用铜片包裹,并固定于接有水冷循环系统的铜座上,水温控制在 16 °C。实验装置如图 1 所示,抽运源是光纤耦合输出的 LD(nLIGHT 公司),最大发射功率为 20 W,中心波长为 975 nm,光纤的芯径为 200 μm,数值孔径为 0.22。采用非球面镜 F1(焦距 11 mm)和 F2(焦距 18 mm)构成的准直和聚焦系统将抽运光聚焦到激光晶体上。由于 Yb, Na:CaF<sub>2</sub> 晶体通光面为平面切割,且没有镀膜,为了减少晶体通光面之间和晶体与平面双色镜之间的法布里-珀罗(F-P)效应,把晶体按布儒斯特角入射放置。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;HR 为平面反射镜(中心波长为 1040 nm);M1, M2 和 M3 为球面反射镜,其中 M1, M3 曲率半径为 200 mm, M2 曲率半径为 100 mm;输出镜 OC(中心波长为 1040 nm)的透射率 T=1%。激光器采用 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 1%,调制深度 0.5%,弛豫时间 500 fs,饱和通量为 90 μJ/cm<sup>2</sup>(德国 Batop 公司)。考虑到 SESAM 上的聚焦光斑功率密度既要保证维持锁模运转,又不能因功率密度过高将其打坏,设计了以下的腔型参数,HR 到 M3 的光程, M3 到 DM 的间距, DM 与 M1 的间距, M1 与 OC 的间距, OC 与 M2 的间距, M2 与 SESAM 的间距分别为 650, 110, 105, 355, 305 以及 50 mm。腔内由一对 SF10 棱镜提供色散补偿,棱镜对位于 HR 与 M3 之间,间隔 205 mm。由 ABCD 矩阵计算得到,子午面和弧矢面方向上, SESAM 处的激光光斑半径分别为 29 μm 和 35 μm。

实验中采用 Coherent 公司的功率计(Field Mate)

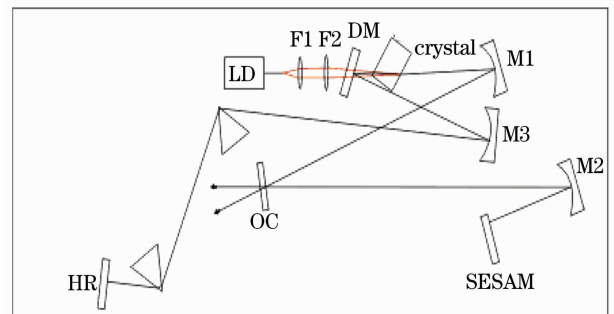


图 1 Yb, Na:CaF<sub>2</sub> 锁模激光器示意图  
Fig. 1 Schematic of the CW mode-locked Yb, Na:CaF<sub>2</sub> laser

测量激光功率, ANDO 公司的光谱仪(AQ6315A)记录光谱, 脉冲宽度由 APE 公司的 PulseCheck 自相关仪测得, 脉冲序列采用高速光电二极管接收和 Iwatsu 公司模拟示波器 SS-7840A 监控。

### 3 实验结果

当吸收抽运功率 6.7 W 左右获得激光运转后, 仔细调节腔镜和 SESAM 使激光器工作在 1050 nm 以下, 此时为 SESAM 调 Q 运转。随着抽运功率的增加, SESAM 上的功率密度也随之增大。当吸收抽运功率增大到 7 W 时, 锁模运转启动, 此时激光器输出功率为 34 mW。随着抽运功率的继续增加, 锁模脉冲序列越来越稳定。当吸收 9.5 W 抽运功率时, 获得最大为 80 mW 锁模输出, 重复频率为 94.8 MHz。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如图 2 所示。采用自相关仪对脉冲宽度进行实时监测, 并通过调节第二个棱镜的插入量和棱镜对之间的距离以获得最佳压缩的脉冲。图 3 为调节棱镜插入量后得到最窄锁模脉冲的自相关曲线。自相关曲线的宽度为 0.627 ps, 假设脉冲形状为双曲正割型, 则估计的脉冲宽度为 406 fs。

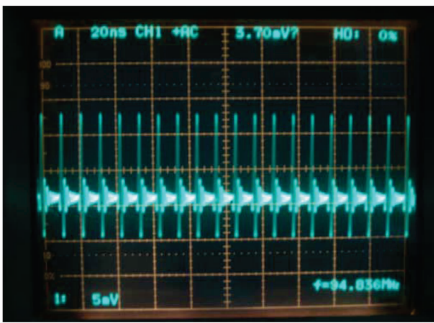


图 2 实验获得的连续锁模脉冲序列

Fig. 2 Pulse train of the CW mode-locked Yb, Na:CaF<sub>2</sub> laser

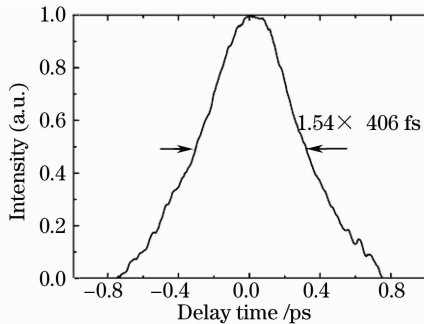


图 3 连续锁模脉冲序列的自相关曲线

Fig. 3 Autocorrelation of the CW mode-locked Yb, Na:CaF<sub>2</sub> laser

图 4 为锁模运转的光谱图。从光谱上可以看出, 锁模激光运转的中心波长在 1043~1044 nm 附近, 在中心波长两侧各有一个“台阶”。可认为该光谱已经出现了调制现象, 其对应于时域中的子脉冲产生。下面通过数值模拟来说明该谱调制现象。考虑到腔内存在一个主脉冲(强度为  $I_1$ )和一个子脉冲(强度为  $I_2$ ), 则该频谱信号为:  $S(\omega) = I_1 [1 + \eta + 2\sqrt{\eta} \cos(\omega\tau)]$ , 其中  $\eta = I_2/I_1$ ,  $\omega$  为圆频率,  $\tau$  为主脉冲和子脉冲的时间间隔。在  $\tau = 0.627$  ps 和  $\eta = 3.35\%$  时的拟合结果如图 4 所示, 图中实线为测量结果, 虚线为数值模拟结果, 二者吻合得很好。这种微弱的子脉冲可能由色散波经过适当增益产生。该激光器工作稳定, 可以连续锁模运转数小时。目前连续锁模激光的输出功率较低是由于晶体倾斜放置、棱镜插入损耗和输出镜透射率较小造成的。

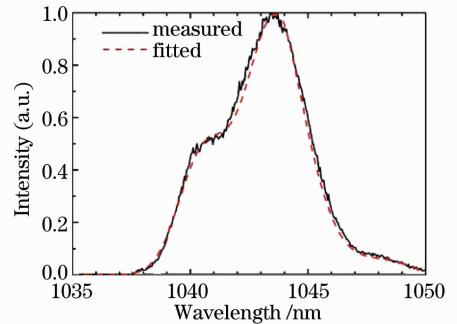


图 4 连续锁模运转的光谱

Fig. 4 Spectrum of the CW mode-locked Yb, Na:CaF<sub>2</sub> laser

### 4 结 论

利用 LD 端面抽运的 Yb, Na:CaF<sub>2</sub> 晶体, 借助于 SESAM 辅助锁模, 实现了该晶体激光器的被动连续锁模运转, 获得了输出功率为 80 mW, 脉冲宽度为 406 fs, 中心波长在 1043 nm 附近, 重复频率为 94.8 MHz 的稳定锁模脉冲序列。实验结果表明, 国产 Yb, Na:CaF<sub>2</sub> 晶体是一种有潜力的高功率超短脉冲激光材料。

### 参 考 文 献

- Honninge, R. Paschotta, M. Graf *et al.*. Ultrafast ytterbium-doped bulk lasers and laser amplifiers[J]. *Appl. Phys. B*, 1999, **69**(1): 3~17
- P. Wang, J. M. Dawes, P. Dekker *et al.*. Highly efficient diode-pumped ytterbium-doped yttrium aluminum borate laser [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **174**(5-6): 467~470
- F. Brunner, G. J. Sphler, J. Ausder Au *et al.*. Diode-pumped femtosecond Yb-KGW laser with 1.1-W average power [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(15): 1119~1121
- M. Jacquemet, C. Jacquemet, N. Janel *et al.*. Efficient laser action of Yb:LSO and Yb:YSO oxyorthosilicates crystals under high-power diode-pumping [J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **80**(2): 171~176

- 5 V. Kisel, A. Troshin, V. Shcherbitsky *et al.*. Femtosecond pulse generation with a diode-pumped  $\text{Yb}^{3+} : \text{YVO}_4$  laser [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(10): 1150~1152
- 6 Y. H. Xue, C. Y. Wang, Q. W. Liu *et al.*. Characterization of diode-pumped laser operation of a novel  $\text{Yb} : \text{GSO}$  crystal [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2006, **42**(5): 517~521
- 7 Duan Wentao, Jiang Xinying, Jiang Dongbin *et al.*. 10 Hz joule-class laser diode end-pumped V-shaped water-cooled  $\text{Yb} : \text{YAG}$  oscillator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 44~48  
段文涛, 蒋新颖, 蒋东镛等. 激光二极管端面抽运的焦耳级 10 Hz “V”型水冷  $\text{Yb} : \text{YAG}$  激光器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 44~48
- 8 Zhou Binbin, Zou Yuwan, Li Dehua *et al.*. Experimental study of continuous-wave mode-locked picosecond  $\text{Yb} : \text{LSO}$  laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1806~1809  
周斌斌, 邹育婉, 李德华等. 连续锁模皮秒  $\text{Yb} : \text{LSO}$  激光实验研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1806~1809
- 9 Wang Weiwei, Chen Fei, Hong Zhengping *et al.*. A diode pumped  $\text{Yb} : \text{LSO}$  self-mode-locked laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1802~1805  
王伟卫, 陈飞, 洪正平等. 激光二极管抽运  $\text{Yb} : \text{LSO}$  自锁模激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1802~1805
- 10 M. Siebold, S. Bock, U. Schramm, *et al.*.  $\text{Yb} : \text{CaF}_2$ ——a new old laser crystal [J]. *Appl. Phys. B*, 2009, **97**(2): 327~338
- 11 N. Coluccelli, G. Galzerano, M. Tonelli *et al.*. Diode-pumped  $\text{Yb}^{3+} : \text{KYF}_4$  femtosecond laser [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(10): 1141~1143
- 12 N. Coluccelli, G. Galzerano, L. Bonelli *et al.*. Diode-pumped passively mode-locked  $\text{Yb} : \text{YLF}$  laser [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(5): 2922~2927
- 13 V. Petit, J. L. Doualan, P. Camy *et al.*. CW and tunable laser operation of  $\text{Yb}^{3+}$  doped  $\text{CaF}_2$  [J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **78**(6): 681~684
- 14 A. Lucca, M. Jacquemet, F. Druon *et al.*. High-power tunable diode-pumped  $\text{Yb}^{3+} : \text{CaF}_2$  laser [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(23): 1879~1881
- 15 A. Lucca, G. Debourg, M. Jacquemet *et al.*. High-power diode-pumped  $\text{Yb}^{3+} : \text{CaF}_2$  femtosecond laser [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(23): 2767~2769
- 16 J. Boudeile, J. Didierjean, P. Camy *et al.*. Thermal behaviour of ytterbium-doped fluorite crystals under high power pumping [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(14): 10098~10109
- 17 F. Friebe, F. Druon, J. Boudeile *et al.*. Diode-pumped 99 fs  $\text{Yb} : \text{CaF}_2$  oscillator [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(9): 1474~1476
- 18 M. Siebold, M. Hornung, S. Bock *et al.*. Broad-band regenerative laser amplification in ytterbium-doped calcium fluoride ( $\text{Yb} : \text{CaF}_2$ ) [J]. *Appl. Phys. B*, 2007, **89**(4): 543~547
- 19 M. Siebold, M. Hornung, R. Boedefeld *et al.*. Terawatt diode-pumped  $\text{Yb} : \text{CaF}_2$  laser [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(23): 2770~2772
- 20 L. Su, J. Xu, H. Li *et al.*. Crystal growth and spectroscopic characterization of  $\text{Yb}$ -doped and  $\text{Yb}$ ,  $\text{Na} : \text{CaF}_2$  laser crystals by TGT [J]. *J. Cryst. Growth*, 2005, **277**(1-4): 264~268
- 21 L. Su, J. Xu, H. Li *et al.*. Sites structure and spectroscopic properties of  $\text{Yb}$ -doped and  $\text{Yb}$ ,  $\text{Na}$ -codoped  $\text{CaF}_2$  laser crystals [J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2005, **406**(1-3): 254~258
- 22 L. Su, J. Xu, H. Li *et al.*. Codoping  $\text{Na}^+$  to modulate the spectroscopy and photoluminescence properties of  $\text{Yb}^{3+}$  in  $\text{CaF}_2$  laser crystal [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(9): 1003~1005
- 23 Chai Lu, Yan Shi, Xue Yinghong *et al.*. Luminescence properties of  $\text{Yb}^{3+} / \text{Na}^+$  codoped  $\text{CaF}_2$  crystal and laser operation with low threshold [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(6): 3553~3558  
柴路, 颜石, 薛迎红等. 共掺  $\text{Na}^+$  的  $\text{Yb}^{3+} : \text{CaF}_2$  晶体的荧光分析与低阈值激光运转[J]. *物理学报*, 2007, **56**(6): 3553~3558
- 24 Xue Yinghong, Wang Qingyue, Chai Lu *et al.*. Characterization of laser-diode-pumped self-Q switched laser operation of a  $\text{Na}, \text{Yb}^{3+} : \text{CaF}_2$  single crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10): 1313~1316  
薛迎红, 王清月, 柴路等. 激光二极管抽运  $\text{Na}, \text{Yb}$  共掺  $\text{CaF}_2$  晶体自调 Q 激光特性的研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(10): 1313~1316
- 25 L. Su, J. Xu, Y. Xue *et al.*. Low-threshold diode-pumped  $\text{Yb}^{3+}, \text{Na}^+ : \text{CaF}_2$  self-Q-switched laser [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(15): 5635~5640
- 26 J. Du, X. Y. Liang, Y. G. Wang *et al.*. 1 ps passively mode-locked laser operation of  $\text{Yb}^{3+}, \text{Na}^+ : \text{CaF}_2$  crystal [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(20): 7970~7975
- 27 A. Pugzlys, G. Andriukaitis, A. Baltuska *et al.*. Multi-mJ, 200-fs, CW-pumped, cryogenically cooled,  $\text{Yb}, \text{Na} : \text{CaF}_2$  amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(13): 2075~2077
- 28 Chai Lu, Ge Wenqi, Yan Jie *et al.*. High-power laser diode-pumped  $\text{Yb}, \text{Na} : \text{CaF}_2$  continuous-wave laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1700~1703  
柴路, 葛文琦, 闫杰等. 高功率激光二极管抽运的镱钠共掺氟化钙连续激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1700~1703
- 29 L. Su, D. Zhang, H. Li *et al.*. Passively Q-switched  $\text{Yb}^{3+}$  laser with  $\text{Yb}^{3+}$ -doped  $\text{CaF}_2$  crystal as saturable absorber [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(5): 2375~2379
- 30 Chai Lu, Yan Shi, Xue Yinghong *et al.*. Saturable absorption of  $\text{Yb}^{3+} / \text{Na}^+$  codoped  $\text{CaF}_2$  crystals at 1050 nm [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(5): 2966~2970  
柴路, 颜石, 薛迎红等. 镱、钠共掺的氟化钙晶体在 1050 nm 的可饱和吸收作用[J]. *物理学报*, 2008, **57**(5): 2966~2970