

文章编号: 0258-7025(2007)12-1612-05

# 全固态频移反馈激光器的谱宽稳定特性

陆成强, 巩马理

(清华大学精密仪器系, 北京 100084)

**摘要** 从速率方程出发,把激光介质的增益带宽以环程频移量为单位划分为若干频带并进行移频处理,仿真分析了基于 Nd:YVO<sub>4</sub> 介质的频移反馈(FSF)激光器在连续输出情况下的特性,给出了在改变抽运功率水平、声光调制器(AOM)衍射效率、环程频移量、介质增益带宽等条件下频移反馈激光器的输出谱宽、频谱位移等的仿真计算结果。实验中,采用端面抽运驻波腔结构并以声光调制器作为腔内移频器,构建了基于 Nd:YVO<sub>4</sub> 介质的全固态频移反馈激光器,实验研究验证了理论计算的结果,并得到了 1 W 以上的连续激光输出。研究结果表明频移反馈激光器的输出频谱在不同抽运水平下具有谱宽基本稳定的特点。

**关键词** 激光器;频移反馈激光器;Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体;速率方程;频谱宽度

**中图分类号** TN 248.1 **文献标识码** A

## Spectrum-Width Stability of All Solid-State Frequency-Shifted Feedback Laser

LU Cheng-qiang, GONG Ma-li

(Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** The continuous-wave output of the frequency-shifted feedback (FSF) laser with Nd:YVO<sub>4</sub> crystal was analyzed, with laser rate equations by dividing the gain spectrum of laser crystal into many bands in unit of round-trip frequency shift and frequency-shifting. The output spectrum width and spectrum shift with varied pumping power level, diffraction efficiency of acousto-optical modulator (AOM), round-trip frequency shift and gain spectrum width of laser crystal were given in details. Based on a resonator structure of end-pumping and frequency-shifter of AOM, an all solid-state FSF laser with Nd:YVO<sub>4</sub> crystal was constructed. The experimental results were in consistent with the simulated ones, and output power higher than 1 W is also obtained. The result proves the spectrum-width stability of the FSF laser at variant pumping levels.

**Key words** laser; frequency-shifted feedback laser; Nd:YVO<sub>4</sub> crystal; rate equations; spectrum width

### 1 引言

频移反馈(FSF)谐振腔一般采用在常规法布里-珀罗(F-P)腔内插入一个移频器并反馈被移频后的衍射光场来实现,基于该腔型激光器的反馈特点是反馈光场的频率相对于入射光场的频率产生了一定的移动,这种持续的频率移动破坏了腔内多光束干涉的条件,从而抑制了纵模的形成。频移反馈激光器在锁模脉冲产生、电调谐、频率梳产生、啁啾光源与宽谱光源产生等方面有特殊的应用<sup>[1~9]</sup>,工作

介质从早期的气体、半导体逐步扩展至光纤和固体介质。Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体由于其优异性能而获得广泛的应用<sup>[10~12]</sup>,基于 Nd:YVO<sub>4</sub> 介质的频移反馈激光器<sup>[5~7]</sup>在光学频域测量、光纤群速度及偏振模色散测量、三维面型测量、大气平均温度测量、海底水压监测等方面有重要的应用。本文使用频移反馈激光器作为放大器特别是光纤介质放大器的种子源,以改善输出光谱的特性,同时该放大器的输出应用于光学非线性过程,如倍频、光学参变振荡等。对某些基于 Nd:YVO<sub>4</sub> 介质的商业声光调 Q 激光器的输出

收稿日期:2007-04-17;收到修改稿日期:2007-06-25

作者简介:陆成强(1975—),男,福建人,博士研究生,目前主要从事激光二极管抽运的固体激光器研究。

E-mail:lucq04@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介:巩马理(1959—),男,四川人,教授,博士生导师,目前研究方向为激光技术与光电子信息工程。

E-mail:gongml@mail.tsinghua.edu.cn

进行分析以及我们实验研究的结果表明,输出光谱在不同输出功率、不同脉冲重复频率条件下的输出光谱宽度有很大的变化。在低功率时可能为单模振荡,因此谱宽很窄,但在高功率时多模起振导致谱宽很宽;或者在低重复频率下输出谱宽为0.1 nm以上的水平,但在高重复频率条件下则可能降到0.06 nm以下(受光谱仪分辨率限制)。因此,作为放大器的种子源激光器,这种特性带来不利的影响。特别在光纤介质内,非线性过程特别是受激布里渊散射过程严重地限制了输出功率的提高,而受激布里渊散射的阈值与光场频谱的宽度为线性比例关系<sup>[13,14]</sup>,因此在改变功率水平或脉冲重复频率的同时保持频谱宽度的相对稳定具有实际意义。

本文基于四能级激光系统,给出了采用速率方程处理频移反馈激光器的基本思想,包括对光子数演化速率方程的处理方法以及求解方法;基于上述处理方法,给出了基于 Nd:YVO<sub>4</sub> 介质的频移反馈激光器的若干稳态特性。已有的研究表明,与常规激光器相比,频移反馈激光器的输出在频谱方面具有宽连续、频率啁啾等特点,本文仿真研究结果还表明频移反馈激光器的输出频谱在不同抽运水平下具有谱宽稳定的特点。在实验上,本文构建了基于 Nd:YVO<sub>4</sub> 介质的频移反馈激光器,在不同的功率水平下测量了频谱的谱宽以及频谱位移,并与理论计算结果进行了比较。

## 2 频移反馈激光器的速率方程处理

与文献[15]的处理方法类似,采用速率方程理论处理频移反馈激光器的基本思想是:把激光增益介质的带宽以环程频移量为单位划分为若干频带,单一频带内的光子数满足通常的光子数演化方程,频移过程由相邻频带间光子数的修正来实现。

### 2.1 光子数演化方程

描述各频带内光子数  $M_q$  ( $q$  为整数,用以标识各频带) 演化的速率方程为

$$\frac{dM_q}{dt} = B_q N M_q - \frac{\gamma_q}{\tau_r} M_q + A_q N, \quad (1)$$

(1) 式右边第一项为受激发射,常数  $B_q$  代表与频率相关的受激发射系数,与受激发射截面成正比: $B_q = \sigma_q c / V_m$ ,其中  $c$  为真空中光速; $V_m$  为模式体积; $\sigma_q$  为受激发射截面,对于 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光介质为高斯型函数; $N$  为反转粒子数;(1) 式右边第二项为腔内损耗,包括常数损耗以及与频谱相关的损耗, $\tau_r$  为腔

内环程时间, $\gamma_q = -\ln[(1-l_c)(1-l_o)(1-l_q)]$  为腔内环程损耗,其中  $l_c$  为除有用输出损耗外的其他损耗,如吸收损耗、衍射损耗等; $l_o$  为有用输出损耗; $l_q$  为与频谱相关的损耗,如腔内插入标准量具(Etalon)用以控制输出谱宽时产生的损耗等;(1) 式右边第三项为自发发射,常数  $A_q$  代表与频率相关的自发发射系数,与受激发射系数的关系为: $A_q = B_q \tau_r \Delta$ , $\Delta$  为环程频移量。腔内总的光子数  $M = \sum_q M_q$ 。

### 2.2 反转粒子数演化方程

描述反转粒子数  $N$  演化的速率方程为

$$\frac{dN}{dt} = \frac{P_a}{h\nu_p} - \frac{N}{\tau_f} - N \sum_q B_q M_q, \quad (2)$$

(2) 式右边第一项代表抽运源增加的反转粒子数, $P_a$  为增益介质吸收的有效抽运功率, $h$  为普朗克常数, $\nu_p$  为抽运光子频率;(2) 式右边第二项代表因自发辐射而减少的反转粒子数, $\tau_f$  为自发辐射寿命,其倒数为自发辐射速率;(2) 式右边第三项代表因受激辐射而减少的反转粒子数。

### 2.3 求解速率方程

频移特性的处理通过把频带  $q$  内的光子数  $M_q$  在经过时间  $\tau_r$  后全部赋给频带  $q+1$  内的光子数  $M_{q+1}$ 。通过求解速率方程(1),(2) 式以及对频移的处理,可以求得腔内光子数与反转粒子数随时间的演化,同时可以求得腔内光子数在频谱上的分布;通过分析腔内光子数随时间在频谱上分布的演化过程,有助于理解频移反馈激光器的若干暂态或稳态行为,以及特定参数对这些行为特性的影响。

实时输出功率为

$$P_o = \frac{l_o}{\tau_r} h\nu_l \sum_q M_q, \quad (3)$$

式中  $\nu_l$  为激光频率。通过对一段时间  $T$  内的实时输出功率进行平均,可以得到平均输出功率为

$$\overline{P_o} = \frac{1}{T} \sum_{t_j \in T} P_o(t_j). \quad (4)$$

频移反馈激光器系统的有效增益表达式为

$$G_q = B_q N \tau_r - \gamma_q, \quad (5)$$

在稳态情况下,有效增益  $G_q \geq 0$  的频谱范围定义了放大过程的带宽  $\Delta\nu_g$ 。

## 3 仿真研究结果

基于上述处理方法,计算了掺杂原子数分数为1.0%的 Nd:YVO<sub>4</sub> 介质的频移反馈激光器的特性。计算步长1 ns,通过联立几千个常微分方程,得到图1~图5的仿真计算结果。表1给出了进行仿真计

表 1 仿真激光器的参数

Table 1 Parameters for simulated laser

Parameters	Value
Mode volume / $m^{-3}$	$4.2 \times 10^{-9}$
Gain bandwidth (FWHM) /GHz	200
Diffraction efficiency of AOM (denoted as $\gamma$ )	0.75
Laser output ( $1 - \gamma^2$ )	0.4375
Center wavelength of the atomic transition /nm	1064.3
Round-trip frequency shift /MHz	140
Center wavelength of pumping laser diode /nm	808.5
Round-trip time /s	$2 \times 10^{-9}$
Stimulated emission cross section / $m^2$	$15.6 \times 10^{-23}$
Spontaneous emission lifetime /s	$100 \times 10^{-6}$
Constant loss	0.01

算的激光器参数。

在一定的增益条件下,频移反馈激光器在经历一段暂态弛豫振荡后可得到稳定的输出,图 1 给出在 5 W 吸收功率下得到的计算结果。在图 1(a)所示的时间窗口 50~55  $\mu s$ 内,仿真结果表明输出已经达到稳态,输出频谱分布为高斯型曲线。计算得到的输出功率为 2.80 W,频谱位移 48.65 GHz,频谱宽度 23.38 GHz,反转粒子数为  $2.78 \times 10^{13}$ 。图 1(b)给出了稳态时的有效增益曲线,可以看出与常规的激光器有本质的差异,这表明频移反馈激光器实质上是一个信号放大器。

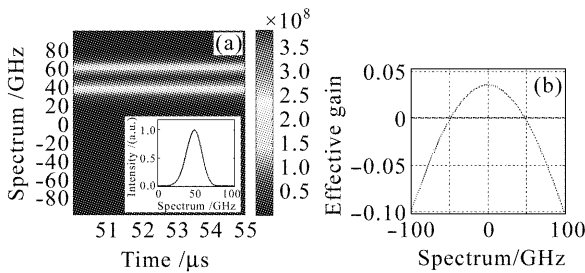


图 1 稳态时输出频谱(a)与有效增益曲线(b)的计算结果

Fig. 1 Calculated results for (a) output frequency spectrum, (b) effective gain curve in stable state

图 2 给出了频移反馈激光器的频谱特性在声光调制器(AOM)衍射效率取不同值时与抽运功率的关系曲线。在声光调制器衍射效率一定的情况下,随抽运功率的增加频谱位移略有增大,同时频谱宽度略有减小但基本保持稳定。

图 3 给出了频移反馈激光器的频谱特性在不同抽运功率水平下与声光调制器衍射效率的关系曲线。虽然在数学处理上可得到衍射效率较小的结

果,但考虑衍射效率太低实际激光器将不能工作,因此图中相应低衍射效率的一段仅供参考。在抽运功

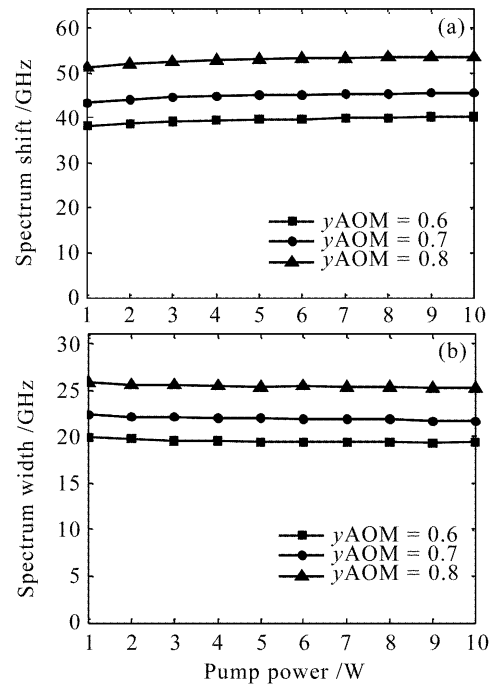


图 2 频谱位移(a)与频谱宽度(b)在声光调制器取不同值时与抽运功率的关系

Fig. 2 Spectrum shift (a) and spectrum width (b) varying with pump power at different diffraction efficiency of AOM

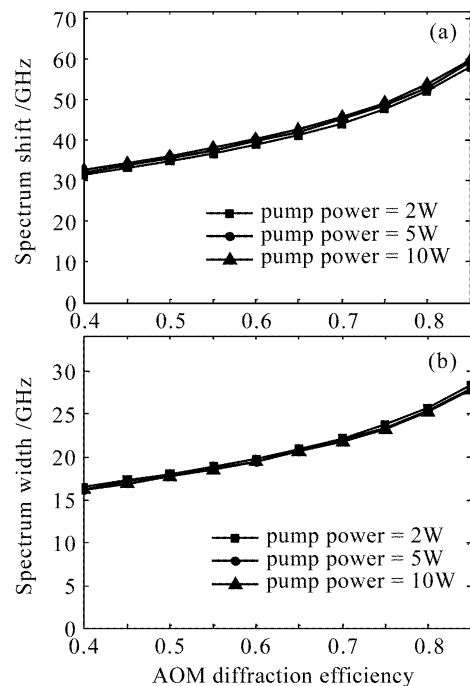


图 3 频谱位移(a)与频谱宽度(b)在不同抽运功率水平下与声光调制器衍射效率的关系

Fig. 3 Spectrum shift (a) and spectrum width (b) varying with diffraction efficiency of AOM at different pump power

率一定的情况下,随声光调制器衍射效率的增加频谱位移增大,同时频谱宽度也增大。图中三条曲线基本重合,这表明频谱位移与频谱宽度随抽运功率的变化基本保持恒定。

图 4 给出了频移反馈激光器的频谱特性在不同介质增益谱宽(SW)条件下与抽运功率的关系曲线。在介质增益谱宽一定的情况下,随抽运功率的增加频谱位移略有增大,同时频谱宽度略有减小。频谱宽度随介质增益谱宽变化明显。因此通过在腔内插入适当的标准量具可以控制输出的频谱宽度,代价是引入与频谱相关的额外损耗。

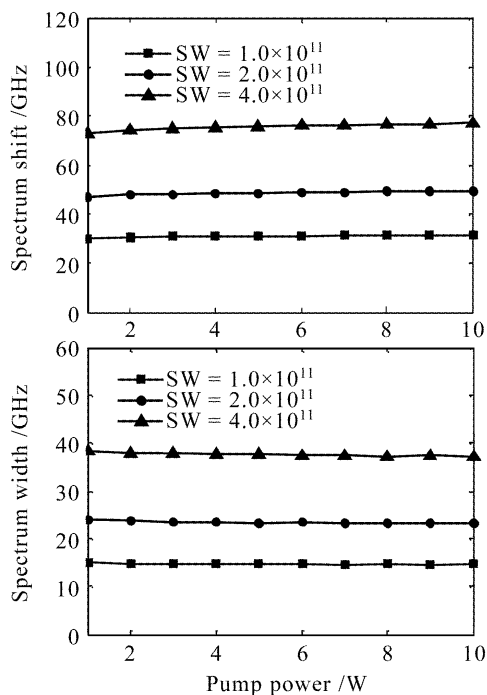


图 4 频谱位移(a)与频谱宽度(b)在不同介质增益谱宽时与抽运功率的关系

Fig. 4 Spectrum shift (a) and spectrum width (b) varying with pump power at different gain width

图 5 给出了频移反馈激光器的频谱特性在不同环程频移(SF)量条件下与抽运功率的关系曲线。在环程频移量一定的情况下,随抽运功率水平的增加频谱位移略有增大,同时频谱宽度略有减小。频谱位移与频谱宽度随环程频移量变化明显。因此,通过改变环程频移量即声光调制器的射频频率可以控制输出频谱的宽度,但由于频移反馈激光器的啁啾速率、布拉格衍射分离角都与声光调制器射频频率相关,因此如何选择该值应予综合考虑。

## 4 实验结果

图 6 为基于声光调制器的频移反馈激光器的实

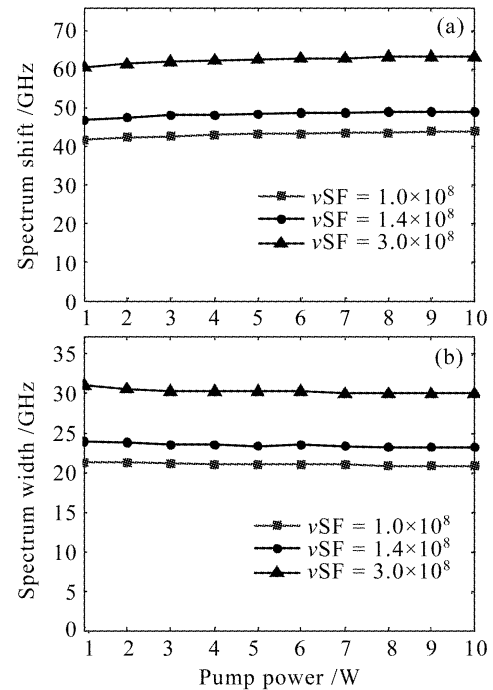


图 5 频谱位移(a)与频谱宽度(b)在不同环程频移量与抽运功率的关系

Fig. 5 Spectrum shift (a) and spectrum width (b) varying with pump power at different round-trip frequency shift

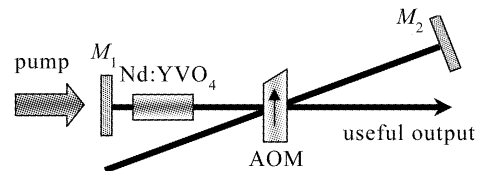


图 6 实验装置示意图

Fig. 6 Schematic figure of experimental setup

验装置图。该激光器采用端面抽运驻波腔结构,实际腔长约250 mm。抽运激光二极管(LD)工作波长为808 nm,采用7根光纤束耦合输出,总芯径400  $\mu\text{m}$ ,数值孔径0.37,最大输出光功率为10 W。激光介质为 Nd:YVO<sub>4</sub>, a 轴切割,尺寸为3 mm  $\times$  3 mm  $\times$  5 mm,掺杂原子数分数为1.0%;左端面镀808 nm与1064 nm双色增透膜,右端面镀1064 nm增透膜。腔镜  $M_1$  为平凹镜,凹面曲率半径  $R_1 = 500$  mm,镀808 nm增透和1064 nm全反双色膜,平面镀808 nm增透膜。腔镜  $M_2$  为平-平镜,镀1064 nm全反膜。布拉格型声光调制器的最大衍射效率约为75%,射频频率为70 MHz,有效尺寸为1 mm。该实验装置目前可得到大于1 W的有用激光输出,对输出光谱及纵模结构所进行的分析验证了频移反馈激光器连续谱输出、谱宽稳定的特性。

图 7 给出频移反馈激光器在连续输出情况下的

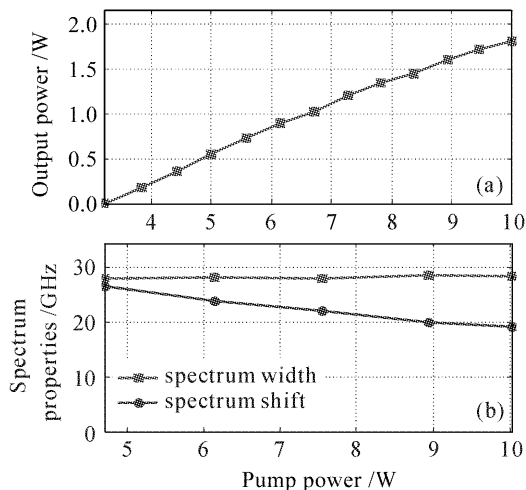


图7 连续频移反馈激光器输出特性

(a) 输出功率; (b) 频谱宽度与频谱位移

Fig. 7 Output characteristics of continuous-wave frequency-shifted feedback laser

(a) output power; (b) spectrum width and spectrum shift

输出特性。图7(a)为输出功率曲线,该激光器存在两路输出(比值约为0.75:1.0),图中给出的为两输出端的功率和;出光阈值为3.2 W,有用输出端可得到超过1 W的输出功率。实验得到的效率较低,这一方面可能因为抽运光与腔模匹配不佳,另一方面因为输出耦合比例太大所致。图7(b)为输出频谱宽度及频谱位移与激光二极管抽运功率的关系曲线,从图中可以看出频谱的宽度基本保持恒定,约27 GHz,包括在阈值附近,这与常规激光器有实质的不同。对比实验结果与理论计算结果,发现两者在谱宽稳定上是相符合的,但在具体数值上有些差异,实验值比理论值大约4 GHz。对于这个差异,我们认为是光谱仪分辨率限制以及实际腔长与理论计算腔长稍有差异所致。从图7(b)中还发现频谱位移随激光二极管抽运功率呈现减小的趋势,这是因为随抽运功率水平的提高晶体温度同步提高导致频移反馈的位移被温度引起的位移部分抵消的结果,但该效应对谱宽的影响不显著。

## 5 结 论

给出了频移反馈激光器基于速率方程的处理方法及仿真计算结果。通过分析得到以下结论:在稳态连续输出的情况下,有效增益曲线与常规的激光器有本质的差异,表明频移反馈激光器实质上是一个信号放大器。同样在连续输出的情况下,频谱位移与频谱宽度随抽运功率变化不显著,这验证了频

移反馈激光器谱宽稳定的特点,但频谱位移与频谱宽度随声光调制器衍射效率、介质增益谱宽、环程频移量的变化显著,因此可以通过调节这些参数使输出谱宽满足应用的要求。由于仿真过程没有考虑光场的相位特性从而忽略了光场的相干性,因此没能求解与相位相关的特性。尽管如此,本文所给出的分析结果对理解、研究和设计该类激光器仍然有一定的借鉴意义和指导作用。

## 参 考 文 献

- 1 L. Curtis Foster, M. D. Ewy, C. Burton Crumly. Laser mode locking by an external Doppler cell [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1965, **6**(1):6~8
- 2 F. V. Kowalski, J. A. Squier, J. T. Pinckney. Pulse generation with an acousto-optic frequency shifter in a passive cavity [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **50**(12):711~713
- 3 F. V. Kowalski, S. J. Shattil, P. D. Hale. Optical pulse generation with a frequency shifted feedback laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **53**(9):734~736
- 4 F. V. Kowalski, P. D. Hale, S. J. Shattil. Broadband continuous-wave laser [J]. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(8):622~624
- 5 Koichiro Nakamura, Fumitoshi Abe, Kumio Kasahara *et al.*. Spectral characteristics of an all solid-state frequency-shifted feedback laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(1):103~111
- 6 Kumio Kasahara, Koichiro Nakamura, Manabu Sato *et al.*. Dynamic properties of an all solid-state frequency-shifted feedback laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(1):190~203
- 7 Koichiro Nakamura, Toshiharu Miyahara, Hiromasa Ito. Observation of a highly phase-correlated chirped frequency comb output from a frequency-shifted feedback laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **72**(21):2631~2633
- 8 Yimin Wang, Norihito Saito, Satoshi Wada *et al.*. Narrow-band, widely electronically tuned frequency-shifted feedback laser [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(7):515~517
- 9 Hu Shuling, Yang Guangrong, Gao Chunqing *et al.*. Self-starting widely tunable ps pulses generation from Yb-doped double-clad fiber laser [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(9):1029~1031
- 10 胡妹玲, 杨广荣, 高春清 等. 自启动、宽调谐的 ps 掺 Yb 双包层光纤激光器 [J]. *光电子 • 激光*, 2005, **16**(9):1029~1031
- 11 Wang Chunyu, Li Xiaoli, Zang Huaguo *et al.*. Laser diode continuous-wave-pumped repetitive electro-optic Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11):1441~1446
- 12 王春雨, 李小莉, 臧华国 等. 激光二极管连续抽运电光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(11):1441~1446
- 13 Li Haifeng, Zhou Rui, Zhao Pu *et al.*. 1386 nm continuous wave output from laser diode end-pumped 1386 nm Nd:YVO<sub>4</sub> laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7):1069~1072
- 14 李海峰, 周睿, 赵璞 等. 激光二极管端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 实现 1386nm 连续波激光输出 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(7):1069~1072
- 15 Zhiqiang Cai, Wuqi Wen, Yonggang Wang *et al.*. 5.3-W Nd:YVO<sub>4</sub> passively mode-locked laser by a novel semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(6):342~344
- 16 Changgeng Ye, Mali Gong, Ping Yan *et al.*. Linearly-polarized single-transverse-mode high-energy multi-ten nanosecond fiber amplifier with 50 W average power [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(17):7604~7609
- 17 Govind P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. Boston: Academic Press, 2001. 263~268
- 18 M. Stuppflug, G. Bonnet, B. W. Shore *et al.*. Dynamics of frequency shifted feedback lasers; simulation studies [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(17):2060~2080