

文章编号: 0258-7025(2009)07-1749-05

LD 抽运 Nd : YVO₄ 连续 3 波长激光器

高兰兰¹ 檀慧明² 王 巍¹ 高缓缓¹

(¹ 长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022; ² 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要 报道了一种利用激光二极管(LD)端面抽运 Nd : YVO₄ 激光晶体,通过硼酸铋(BIBO)晶体的腔内和频(SFM)与倍频(SHG),实现 3 个二次谐波连续激光同时输出的 3 波长激光器。利用 Nd : YVO₄ 晶体的两条发射谱线(分别为 1064 nm 和 1084 nm)作为基频光,并选择长度为 1.5 mm, I 类临界相位匹配方式切割(对于 1064 nm 倍频)的 BIBO 作为非线性晶体,通过调节 BIBO 晶体对 3 个非线性过程(1064 nm 倍频, 1084 nm 倍频及 1064 nm 与 1084 nm 和频)的相位因子,即非线性过程的转换效率,使激光器同时获得了两个倍频光和一个和频光,即 3 个波长: 532 nm, 537 nm 和 542 nm 激光输出。实验结果表明当两个基频光波长相差较小时,采用相位允许角小的非线性晶体同时进行腔内和频与倍频是获得多波长固体激光器的一种实用方法。

关键词 激光器; 3 波长; 相位允许角; BIBO 晶体

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093607.1749

LD Pumped Nd : YVO₄ CW Three-Wavelength Laser

Gao Lanlan¹ Tan Huiming² Wang Wei¹ Gao Huanhuan¹

¹ College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China
² Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract A laser diode (LD) end-pumped Nd : YVO₄ three-wavelength laser is reported by BIBO intracavity second harmonic generation (SHG) and sum-frequency mixing (SFM) at the same time. Through the two different transitions(1064 nm and 1084 nm) of Nd : YVO₄ crystal as fundamental waves and a nonlinear crystal BIBO with 1.5 mm-thick and type-I phase matching cut for SHG on 1064 nm, a three-wavelength laser with two doubling waves (532 nm and 542 nm) and one SFM wave (537 nm) is obtained by adjusting the phase matching factor, nonlinear conversion efficiency, of the three nonlinear frequency conversion processes (1064 nm and 1084 nm SHG respectively, 1064 nm and 1084 nm SFM). The experimental results show that SGH and SFM of nonlinear crystal with little phase accepted angle is an efficient way to realize multi-wavelength laser when two fundamental waves with a little interval wavelength.

Key words lasers; three-wavelength; phase accepted angle; BIBO crystal

1 引 言

多波长激光器在激光测距、非线性光学混频、精密激光光谱等方面有重要的应用价值。通常,获得波长相近的多波长输出的方法主要有两种,一种是通过控制输出耦合镜对不同波长的透过率,使具有多个波长跃迁谱线的激光晶体获得多波长振荡输出^[1],这种方法得到的波长在红外波段。另外一种

是受激拉曼频移,这种方法必须采用峰值功率高的脉冲激光器^[2,3]。本文提到的方法是通过选择相位允许角小的特定方向切割的非线性晶体在腔内同时和频与倍频,实现了波长分别为 532 nm, 537 nm 和 542 nm 3 个波长的激光输出。

Nd : YVO₄ 是一种性能优良的激光晶体,研究较多的有 914 nm, 1064 nm, 1342 nm 三条发射谱

收稿日期: 2008-08-20; 收到修改稿日期: 2008-10-08

作者简介: 高兰兰(1974—),女,副研究员,博士,主要从事全固体激光技术及非线性频率变换技术的研究。

E-mail: gl_l75@163.com

导师简介: 檀慧明(1954—),男,研究员,主要从事非线性光学、全固态激光器的研究。E-mail: hmtan@mail.jl.cn

线^[4,5], 分别对应 ${}^4F_3/2 - {}^4I_9/2$, ${}^4F_3/2 - {}^4I_{11}/2$, ${}^4F_3/2 - {}^4I_{13}/2$ 的跃迁。实际上, 只在 ${}^4F_3/2 - {}^4I_{11}/2$ 跃迁内就有近 10 条发射谱线^[6,7]。1084 nm 就是其中一条。但是由于 1084 nm 距离 1064 nm 发射谱线非常近, 并且 1064 nm 谱线的受激发射截面大约是 1084 nm 的 10 倍, 如果产生 1084 nm 单一谱线振荡, 对镀膜技术的要求非常高, 故 1084 nm 谱线跃迁虽然存在, 但目前基于这一波长的激光振荡的报道很少。本文采用激光二极管(LD)端面抽运 Nd:YVO₄, 实现了 1064 nm 与 1084 nm 同时振荡, 并用 BIBO 作非线性晶体, 获得了 532 nm, 537 nm 与 542 nm 的 3 波长激光输出。BIBO 晶体是一种新型的非线性光学晶体, 物化性能稳定、不潮解、光损伤阈值高、非线性光学系数大, 可获得高效的倍频激光输出。1999 年, Petra Becker 等^[8]首次报道了 BIBO 晶体的生长习性和结构, 随后公布了该晶体的折射率拟合方程及非线性光学系数张量元, 发现它的有效非线性系数可以高达 3.2 pm/V^[9]后, 出现了大量用 BIBO 作频率转换器件的研究报道^[10,11]。

本文采用 I 类临界相位匹配的 BIBO 晶体进行腔内倍频及和频, BIBO 以 1064 nm 倍频产生 532 nm 的相位匹配角度 ($\theta=168.9^\circ$, $\varphi=90^\circ$) 切割, 适当调节 BIBO 晶体的放置角度, 可获得 532 nm, 537 nm 与 542 nm 的 3 波长输出。调节抽运源 LD 的工作电流, 3 个波长激光的输出功率出现不同的变化趋势, 这是两条基频光相互竞争及非线性耦合过程的结果。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示。LD 作为抽运源, 最大输出功率为 1 W。抽运光经过整形后直接注入到 Nd:YVO₄ 晶体上。激光晶体 Nd:YVO₄ (厚 0.7 mm, 掺杂原子数分数 2.0%) 左端面镀 808 nm 增透 ($T > 90\%$), 1064 ~ 1084 nm 高反及 532 ~ 542 nm 高反膜 ($R > 99.9\%$), 右端面镀 1064 ~ 1084 nm 及 532 ~ 542 nm 增透膜 ($T > 99\%$); 非线性晶体 BIBO (2 mm × 2 mm × 1.5 mm) 两端均镀 1064 ~ 1084 nm 及 532 ~ 542 nm 增透膜 ($T > 99\%$)。输出耦合镜 (OC) 左凹面 ($R = 100$ mm) 镀 1064 ~ 1084 nm 高反膜 ($R > 99\%$) 和 532 ~ 542 nm 增透膜 ($T > 90\%$)。右平面镀 532 ~ 542 nm 增透膜 ($T > 90\%$)。由于采用了贴片式耦合方式, 因此整个激光器的结构比较紧凑。谐振腔

的几何长度约为 12 mm, LD, Nd:YVO₄ 和 BIBO 用半导体制冷器 (TEC) 严格控温, 确保激光器稳定运行。

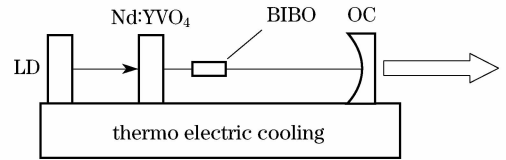


图 1 532 nm, 537 nm 与 542 nm 3 波长 Nd:YVO₄/BIBO 激光器实验装置图

Fig. 1 Setup of 532 nm, 537 nm and 542 nm three-wavelength laser

3 实验结果

将 BIBO 晶体放入谐振腔中, 微调基频光在 BIBO 晶体表面的入射角度, 在 BIBO 晶体某一个固定放置位置, 得到如图 2 的实验结果。当 LD 的工作电流为 254 mA 时, 激光器首先出现 532 nm 倍频光, 当 LD 工作电流增加到 360 mA 时激光器出现 532 nm, 537 nm 及 542 nm 3 个波长的激光输出。

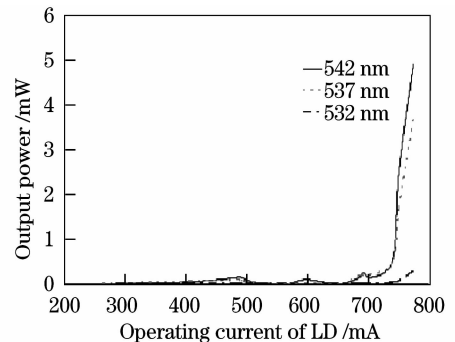


图 2 532 nm, 537 nm 和 542 nm 激光输出功率随 LD 工作电流的变化

Fig. 2 532 nm, 537 nm and 542 nm output power via LD operation current

随着 LD 工作电流的不断增大, 3 个激光波长的输出功率出现起伏 (如图 3 所示)。542 nm 与 537 nm 输出功率的变化趋势相同 (这主要是由于和频光 537 nm 的输出功率由光子数密度较小的 1084 nm 基频光来决定), 而 532 nm 输出功率的变化趋势与前两个正好相反。当 LD 工作电流达到 750 mA 及以上时, 3 个激光波长的输出功率随着 LD 工作电流的增大而增大, 而且 3 个激光波长的输出功率之间的比例趋于稳定。当 LD 工作电流大于 800 mA 时, 3 个激光波长的输出功率都未出现饱和现象。如果采用较大抽运功率的 LD, 激光器的输出功率会继续提高。

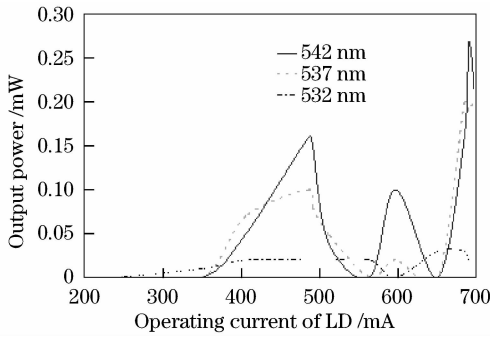


图 3 532 nm, 537 nm 和 542 nm 激光输出功率的起伏

Fig. 3 Output power fluctuation of 532 nm, 537 nm and 542 nm

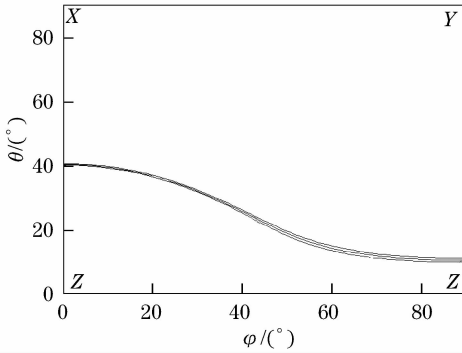


图 4 BIBO 晶体实现 3 种非线性过程的位相匹配角

Fig. 4 Phase matching angle of BIBO for the three nonlinear conversions

4 讨 论

图 4 是 BIBO 晶体实现 1064 nm 倍频, 1064 nm 与 1084 nm 和频及 1084 nm 倍频 3 种非线性频率变换时的相位匹配角。从图中可以看出 3 条曲线非常接近, 这是由于 1064 nm 与 1084 nm 波长差仅有 20 nm 的缘故。由于 3 种非线性频率转换过程对应的相位匹配角非常接近, 如果基频光的入射角度稍有偏移则 BIBO 就会从一种完全相位匹配转移到另一种完全相位匹配。不同的非线性过程之间会产生影响。如果和频对应的完全相位匹配方向在倍频的允许角度范围内则倍频过程会同时存在, 而和频光与倍频光的输出功率取决于各自的转换效率。

利用 SNLO 计算软件对 BIBO 晶体分别实现 3 个非线性过程的最佳相位匹配角进行了计算, 计算结果如表 1 所示。

从表中可以看出 BIBO 晶体对 1064 nm 倍频, 1064 nm 与 1084 nm 和频及 1084 nm 倍频的最佳相位匹配角在 θ 方向相继相差 0.6° , 即 10.47 mrad , φ 方向相同。3 种频率变换过程对应的最大允许角分

别为 $2.32 \text{ mrad}\cdot\text{cm}$, $2.5 \text{ mrad}\cdot\text{cm}$ 和 $2.89 \text{ mrad}\cdot\text{cm}$, 在满足最大相位匹配允许角时存在

$$\Delta k \cdot l = \pi = a \cdot \Delta\theta \cdot l,$$

对于 1.5 mm 厚的 BIBO 晶体, 其最大相位匹配允许角满足

$$\Delta\theta' \cdot l' |_{l=1.5 \text{ mm}} = \Delta\theta \cdot l = \frac{\pi}{a}.$$

参考表 1 中 1064 nm 和 1084 nm 和频的最大相位匹配允许角 $\Delta\theta \cdot l = 2.5 \text{ mrad} \cdot 1 \text{ cm}$ 可以计算出 1.5 mm 厚的 BIBO 晶体最大允许角 $\Delta\theta' = 16.67 \text{ mrad}$ 。将 BIBO 晶体的 3 种频率变换过程的相位匹配角和最大相位匹配允许角用平面示意图显示如图 5 所示。

表 1 BIBO 晶体非线性变换时的相位匹配参数

Table 1 Phase matching parameters for BIBO crystal

SFM/SHG	Phase matching angle ($\theta/^\circ, \varphi/^\circ$)	Mix accept angle $\Delta\theta \cdot l /$ ($\text{mrad} \cdot \text{cm}$)
1064 nm(e) + 1064 nm(e) = 532 nm(o)	(168.9, 90)	2.32
1064 nm(e) + 1083 nm(e) = 537 nm(o)	(169.5, 90)	2.5
1083 nm(e) + 1083 nm(e) = 542 nm(o)	(170.1, 90)	2.89

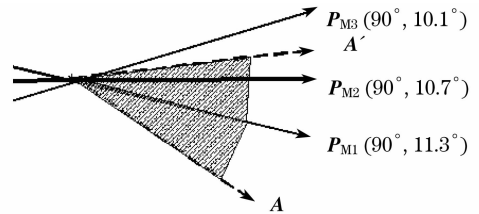


图 5 BIBO 晶体的 3 种非线性过程相位匹配角

Fig. 5 Phase matching of BIBO for three nonlinear conversion

P_{M1} , P_{M2} 和 P_{M3} 分别是 (1064 nm \rightarrow 532 nm) 倍频、(1064 nm + 1084 nm \rightarrow 537 nm) 和频和 (1084 nm \rightarrow 542 nm) 倍频的完全相位匹配方向。当基频光波矢方向分别为 P_{M1} , P_{M2} , P_{M3} 时 (1064 nm \rightarrow 532 nm), (1064 nm + 1084 nm \rightarrow 537 nm), (1084 nm \rightarrow 542 nm) 的相位因子的平方为最大值 1。此时频率转换效率分别达到最高。 A (或 A') 是 P_{M1} 对应的最大允许角方向。通过相位因子的表达式可以计算出当基频光沿 P_{M2} 和频过程的最佳匹配方向入射时, 1064 nm \rightarrow 532 nm 倍频和 1084 nm \rightarrow 542 nm 倍频过程对应的相位因子平方值的情况。计算结果如表 2 中第一列数据所示。

当基频光沿 P_{M2} 入射时, 处于 P_{M3} 和 P_{M1} 最大允许角的边缘, 两个倍频过程的相位因子的平方值比较

低,只有 68%。如果两个基频光的受激发射截面比较相近,则激光器中非线性转换效率只由相位匹配因子决定,此时应该只存在一个和频转化过程(即 P_{M_2})。但是,对于 1064 nm 和 1084 nm,由于 1064 nm 受激发射截面是 1084 nm 的 10 倍,因此非线性转换效率不仅与相位匹配因子有关,而且与 1064 nm 和 1084 nm 基频光的功率密度也紧密相关。

要实现 3 波长激光输出,考虑到 1084 nm 基频光功率密度低的原因,则基频光的入射方向必须最接近 P_{M_3} ,保证 P_{M_3} 的完全相位匹配。此时, P_{M_1} , P_{M_2} 及 P_{M_3} 的相位匹配因子的平方值如表 2 第二列数据所示,分别为 17%,68%和 1。因为 1064 nm 受激发射截面大的优势,此时激光器中仍然存在 1064 nm 倍频及 1064 nm 与 1084 nm 和频,所以激光器同时实现了 3 波长激光输出。

表 2 波矢沿不同方向入射时相位因子的平方值

Table 2 Phase value with different incident angle of foundational wave

Crystal	foundational wave					
	BIBO(P_{M_2} direction)			BIBO(P_{M_3} direction)		
Type of phase matching	P_{M_3}	P_{M_1}	P_{M_2}	P_{M_1}	P_{M_2}	P_{M_3}
Phase value	68%	68%	1	17%	68%	1

当 LD 工作电流较低时,首先得到单一波长 532 nm 激光输出。原因是 1064 nm 受激发射截面大,所以首先起振,经过 BIBO 倍频输出 532 nm 绿光。随着工作电流的逐渐增大,1084 nm 随之起振,并经过 BIBO 倍频与和频产生 542 nm 和 537 nm 激光输出。并随着 LD 工作电流的增大输出功率逐渐增强。但是 532 nm 激光输出功率在整个工作曲线范围内都低于 0.05 mW。

从图 3 中可以看出在工作电流小于 700 mA 时 3 个波长的输出能量都出现了起伏。除了阈值零点外,542 nm 和 537 nm 出现了两个零点,532 nm 出现了一个零点。而且在 542 nm 和 537 nm 零点的地方 532 nm 是最大值,在 532 nm 零点处 542 nm 和 537 nm 是最大值。这正是在工作电流较低时,激光器处于阈值附近,1064 nm 和 1084 nm 之间互相竞争的结果。1064 nm 与 1084 nm 谱线跃迁都属于 $F_{3/2} \rightarrow I_{11/2}$,当 1084 nm 起振后,由于 1084 nm \rightarrow 542 nm 倍频或 1084 nm \rightarrow 537 nm 和频效率较高因此不断消耗 1084 nm 光子,促使 1084 nm 不断产生振荡,导致 1064 nm 振荡减弱。再考虑到 BIBO 晶体放置角度偏离 1064 nm 倍频最佳相位匹配方向,因此倍频效率很低即 532 nm 输出功率很低。随着 1084 nm 光子数密

度的增加,增益逐渐降低,而 1064 nm 增益增加,1064 nm 粒子数密度增加,1084 nm 光子相继减少,因此 542 nm 和 537 nm 激光输出功率降低。这时,532 nm 激光没有出现峰值是因为倍频效率低的缘故。类似地随着 1064 nm 粒子数密度的增加,1064 nm 增益逐渐降低,而 1084 nm 增益又一次增加,1084 nm 光子数密度再次增加,542 nm 和 537 nm 激光输出功率随之增加。而 532 nm 输出功率降为 0。这样周而复始地循环使 3 个波长激光的输出功率交替出现零点和最高点,呈现起伏现象。

当工作电流超过 700 mA 时 1084 nm 和 1064 nm 增益趋于稳定,542 nm 和 537 nm 随着工作电流的增加逐渐增加。而 532 nm 由于倍频效率的限制虽然功率有所增加,但是增长的速度仍然很低。

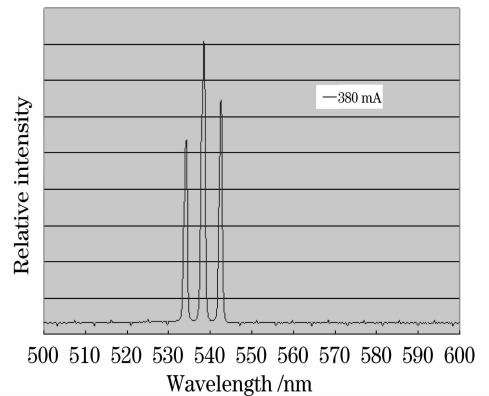


图 6 532 nm,537 nm 和 542 nm 激光在不同工作电流时的相对强度

Fig. 6 Relative intensity for 532 nm,537 nm and 542 nm via LD working current

图 6 是利用光谱仪(MFS-01,中国科学院长春光学精密机械和物理研究所研制)检测到的 LD 工作电流为 380 mA 时,3 个激光波长的输出功率相对强度图。

5 结 论

利用激光二极管端面抽运 Nd:YVO₄ 晶体,通过 BIBO 晶体腔内同时实现倍频与和频,获得了 3 个波长分别为 532 nm,537 nm 和 542 nm 激光输出的 3 波长激光器。实验结果表明,对于波长比较接近的两条谱线,可以利用双波长振荡原理,通过采用相位允许角小的非线性晶体实现多个非线性频率转换过程同时存在,使激光器实现多波长输出。此方法是实现多波长激光器的有效方法。

参 考 文 献

- 1 Zhang Qiang, Yao Jianquan, Wen Wuqi *et al.*. High power laser diode pumped Nd: YAG continuous wave dual-wavelength laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5): 577~581
张 强,姚建铨,温伍麒等.高功率激光二极管抽运 Nd: YAG 连续双波长激光器[J],中国激光,2006,**33**(5): 577~581
- 2 Hu Dawei, Wang Zhengping, Zhang Huaijin *et al.*. Stimulated Raman scattering of GdVO₄ crystal [J]. *Chinese. J. Lasers*, 2008, **35**(1): 11~16
胡大伟,王正平,张怀金等. GdVO₄ 晶体的受激拉曼散射[J]. 中国激光, 2008, **35**(1): 11~16
- 3 Jia Peng, Zhang Xingyu, Wang Qingpu *et al.*. Laser diode-pumped Nd: YVO₄ self-stimulated Raman laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1309~1313
贾 鹏,张行愚,王青圃等.激光二极管抽运的自拉曼 Nd: YVO₄ 激光器[J].中国激光,2006,**33**(10): 1309~1313
- 4 Chang Dongxia, Liu Xia, Wang Yu *et al.*. All-solid-state CW Intracavity frequency-doubled and frequency-stabilized Nd: YVO₄/LBO red laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 323~327
常冬霞,刘 侠,王 宇等.连续波 Nd: YVO₄/LBO 稳频倍频红光全固态激光器[J].中国激光,2008,**35**(3): 323~327
- 5 Gao Jing, Yu Xin, Chen Fei *et al.*. 457 nm blue laser generation by intracavity frequency doubling of acousto-optically Q-switched Nd: YVO₄ laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s1): 9~13
高 静,于 欣,陈 飞等. Nd: YVO₄ 声光调 Q 腔内倍频 457 nm 蓝光激光器[J]. 光学学报, 2008, **28**(s1): 9~13
- 6 Perry Pappas Yaney, L. G. Deshazer. Spectroscopic studies and analysis of the laser states of Nd³⁺ in YVO₄ [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**(12): 1405~1414
- 7 Z. Zhang, H. M. Tan, L. L. Gao *et al.*. Intra-cavity second harmonic generation with Nd: YVO₄/BIBO laser at 542 nm [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **267**(2): 487~490
- 8 Petra Becker, Josef Liebertz, Ladislav Bohaty. Top-seeded growth of bismuth triborate BiB₃O₆ [J]. *J. Crystal Growth*, 1999, **203**: 149~155
- 9 H. Hellwig, J. Liebertz, L. Bohaty. Exceptional large nonlinear optical coefficients in the monoclinic bismuth borate BiB₃O₆ (BIBO) [J]. *Solid State Commun.*, 1999, **109**(4): 249~251
- 10 Wang Zhengping, Du Chenlin, Teng Bing *et al.*. Third harmonic generation property of 1064 nm in nonlinear optical crystal BiB₃O₆ of low symmetry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(11): 1300~1305
王正平,杜晨林,滕 冰等.低对称性非线性光学晶体硼酸铋(BIBO)的 1064 nm 三倍频性质[J].光学学报,2003,**23**(11): 1300~1305
- 11 Fu Xihong, Tan Huiming, Li Yimin *et al.*. Laser diode-pumped continuous-wave 589 nm laser with doubly resonant intracavity sum-frequency mixing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1043~1047
付喜宏,檀慧明,李义民等.激光二极管抽运复合腔和频连续波 589 nm 激光器[J].中国激光,2007,**34**(8): 1043~1047