

用于光生毫米波的双频激光放大特性

胡 淼¹ 张 飞¹ 张 翔² 郑尧元¹ 孙 骁¹ 徐亚希¹ 许伟忠¹ 葛剑虹² 项 震²

(¹ 杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江 杭州 310018
² 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 采用激光二极管端面抽运的双纵模 Nd:YVO₄ 微片激光器作为种子光源, 双端面抽运的 Nd:YVO₄ 行波放大器作为功率放大器, 获得了大频差、高功率双频激光信号输出。分析了放大过程中光谱匹配对双频激光输出特性的影响。结果表明, 随种子光入射功率从小变大变化, 放大倍率呈起伏减小的趋势; 受到放大器增益带宽的限制, 放大后双频激光频差小于种子光频差。当种子源和放大器的抽运电流分别为 14.5 A 和 40.0 A 时, 最终获得了功率为 2.38 W, 频差为 47.7 GHz 的双频激光信号输出。

关键词 激光器; 双频激光; 功率放大; 增益曲线; 光谱匹配

中图分类号 TN248.1; TN202 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1114003

Amplification of Dual-Frequency Laser for Photonic Millimeter-Wave Signal Generation

Hu Miao¹ Zhang Fei¹ Zhang Xiang² Zheng Yaoyuan¹ Sun Xiao¹
Xu Yaxi¹ Xu Weizhong¹ Ge Jianhong² Xiang Zhen²

¹ College of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China
² State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract By employing laser diodes end-pumped dual-longitudinal-modes Nd:YVO₄ microchip laser as seed source, dual-end-pumped Nd:YVO₄ traveling wave amplifier as power amplifier, a dual-frequency laser with larger frequency separation and high power output is obtained. In amplification process, spectral matching effects are analyzed. The results show that, with the increase of the seed light power, the overall magnification shows a decreasing trend, and the detail shows a wavy trend. Due to the limiting of amplifier gain bandwidth, the frequency separation of amplified signal is less than that of the seeds. When the pump currents of microchip and amplifier are 14.5 A and 40.0 A, respectively, the amplified output signal power is 2.38 W and the frequency separation is 47.7 GHz.

Key words lasers; dual-frequency laser; power-amplify; gain curve; spectral matching

OCIS codes 140.3325; 140.3480; 140.3515

1 引 言

双频激光器是在一个激光腔中同时输出两种频率激光信号的激光器, 在无线/光混合通信、激光干涉测量、激光雷达和太赫兹研究等领域有广阔的应用^[1-5]。通过双频激光外差拍频获得毫米波信号是目前微波光子学的研究热点, 也是下一代通信技术发展的关键技术之一^[6]。凭借较大的增益带宽, 掺杂

Nd³⁺ 离子的激光晶体被广泛应用于研制大频差双频激光器。如麦考瑞大学的 Aaron 等^[7]采用掺杂摩尔分数为 0.9% 的 Nd:YAG 双螺旋偏振微片激光器, 获得了功率为 50 mW, 频差在 0~100 GHz 的可调双频激光信号输出。Ren 等^[8]在微片腔内采用两块 1/4 波片产生垂直线性偏振模, 获得了频差为 14 MHz~1.5 GHz, 功率为 1~3 mW 的双频激光

收稿日期: 2014-06-04; 收到修改稿日期: 2014-07-08

基金项目: 浙江省自然科学基金(LQ13F010012)

作者简介: 胡 淼(1982—), 男, 副教授, 博士, 主要从事激光晶体、微片激光器等方面的研究。

E-mail: miao_hu@foxmail.com

信号输出;Ding 等^[9]在 Nd:YAG 微片腔内采用应力双折射效应,使腔内两横模分裂获得四个频率激光信号频差为 0~1.16 GHz 可调谐双频激光信号输出;杨清等^[10]基于 Nd:YVO₄ 薄片激光介质与微型腔结构实现连续双纵模运转,获得输出功率为 116 mW、频差为 0.1~0.2 THz 可调谐双频激光。Qiao 等^[11]采用复合 Nd:YAG-LiNbO₃ 微片激光器获得了最大频差为 14.12 GHz、效率为 12% 的毫瓦量级双频激光信号输出。Hu 等^[12]采用亚毫米腔长的 Nd:Cr:YAG 微片激光器,获得微焦量级单脉冲能量,重复频率为 20 kHz,频差为 87.4 GHz 的同步双频激光脉冲序列输出。目前,双频激光器输出的功率大多在百毫瓦量级或以内,制约了其在激光雷达信号源等大功率场合的应用^[3-5]。如何获得更高输出功率的大频差双频激光信号,成为下一步双频激光研究的难点之一。

微片激光器产生双频激光信号,具有结构简单,输出频差稳定等优点;但是由于其增益介质较短,难以直接获取高功率输出。激光放大是获取高功率激光输出的有效方法之一,二极管抽运的固体激光器(DPSSL)主控振荡器的功率放大器(MOPA)系统已经广泛应用于工业生产、科研和军事等领域^[13-14],其中单纵模微片激光器的 MOPA 系统满足了窄谱和高功率两项指标^[15]。然而,大多数激光放大系统存在放大后光束质量相对于主振荡级光束

质量退化的问题^[16]。考虑外差拍频过程对双频激光光谱稳定性的要求,退化光束质量的双频激光会影响光生毫米波的拍频效果。双端面抽运的 Nd:YVO₄ 激光放大器,具有保持甚至改善种子光光束质量的特性^[16-17],这为光谱稳定的高功率双频激光系统指明了方向。

本文考虑光谱匹配问题,采用双端抽运行波放大器^[18-19]对双频微片种子光信号进行功率放大,实验获得了高功率、大频差的双频激光输出;分析了放大过程中双频激光输入参数与输出信号的功率及频谱特性的关系。

2 实验装置介绍

图 1 为实验装置示意图。微片激光器抽运源为中心波长 808 nm 的光纤耦合输出激光器(LD),抽运光经过耦合效率为 85% 的自聚焦透镜会聚到微片晶体中,光纤芯径为 200 μm。微片晶体是掺杂摩尔分数为 1% 的 Nd:YVO₄ 晶体,尺寸为 3 mm×3 mm×0.9 mm。晶体前端面镀 1064 nm 全反射膜(HR,反射率 $R>99.8\%$)和 808 nm 增透膜(AR,透射率 $T>96\%$),后端面镀 1064 nm 增透膜($T>99.9\%$)。晶体两端面均为平面,平行度小于 5"。微片晶体后端面放置一块对 1064 nm 反射率 $R=80\%$ 的 0° 反射镜作为激光输出镜,输出镜与晶体前端面平行构成平平腔。

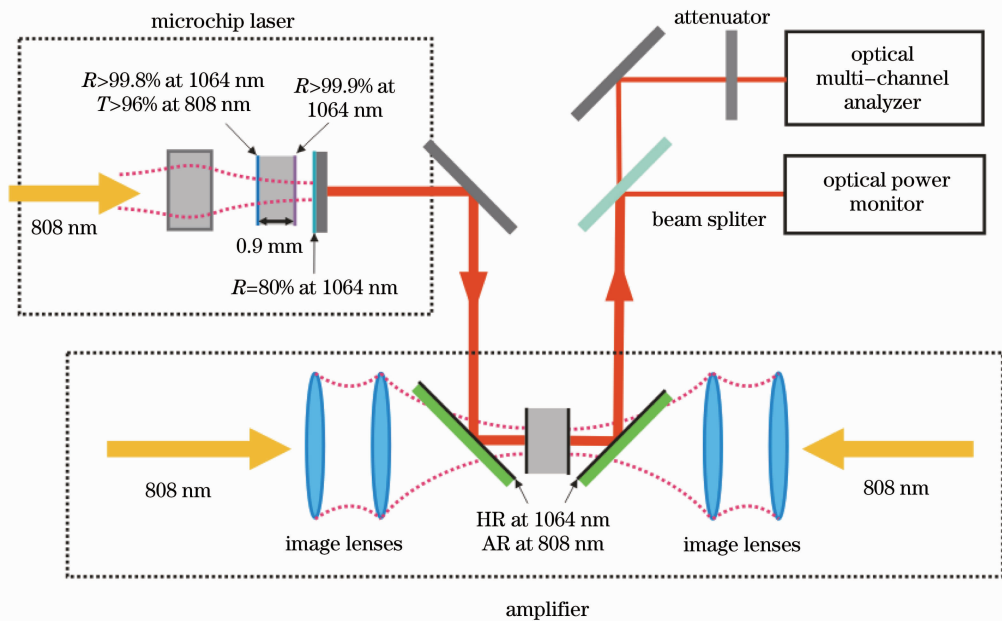


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Experimental setup

将微片激光器输出的双频种子信号,导入“U型”双端抽运行波放大器进行功率放大。放大装置晶体为 $3\text{ mm}\times 3\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 的 Nd:YVO_4 晶体,掺杂摩尔分数为 0.5% ,两端镀 0° 对 1064 nm ($T>99.9\%$)和 808 nm ($T>96\%$)高透膜;长增益介质、低掺杂浓度的双端抽运放大器结构,能使放大区域内的增益分布更加均匀,有利于放大后激光的光束质量控制。放大器两端的抽运源为中心波长 808 nm 的光纤耦合输出半导体激光器(LD),光纤芯径为 $400\text{ }\mu\text{m}$;尾纤输出的抽运光依次经过成像透镜组及 45° 角双色镜,会聚于放大器晶体中。 45° 双色镜镀 1064 nm 高反膜($R>99.8\%$)和 808 nm 高透膜($T>96\%$)。两端抽运光的光轴精确对准,形成均匀的激光放大区。

放大输出光经由 $1:1$ 分光镜分成两部分,一部分进入光功率计中进行功率测量,光功率计为以色列 Ophir 功率计,量程自动可调,最高为 30 W ;另一部分进入光谱分析仪记录其输出光谱,光谱分析仪为日本横河 AQ6370C 光谱分析仪,其波长分辨率

为 0.01 nm ,功率量程为 $+20\text{ dBm}\sim -90\text{ dBm}$,测量速度为 2 ms/nm 。

3 实验结果

在实验中,设定放大装置的双端 LD 抽运电流都为 40 A (输出功率为 10 W),微片激光器的 LD 抽运电流从 11.0 A 逐渐增大到 14.5 A (输出功率为 $1.0\sim 2.2\text{ W}$ 随抽运电流线性增长),测量种子光及放大输出光的光谱特性和功率特性。微片激光器的阈值电流为 11.0 A ;当抽运电流超过 15.0 A 时,微片晶体容易因热损伤而导致碎裂。

3.1 频谱分析

图 2(a)为当抽运电流为 $11.5\sim 12.7\text{ A}$ 时种子光输出的光谱图,光强坐标为任意单位。观察种子光输出光谱特性,当种子光抽运电流低于 12.1 A 时,种子光为单纵模输出;当抽运电流高于 12.1 A 时,种子光获得双纵模输出。

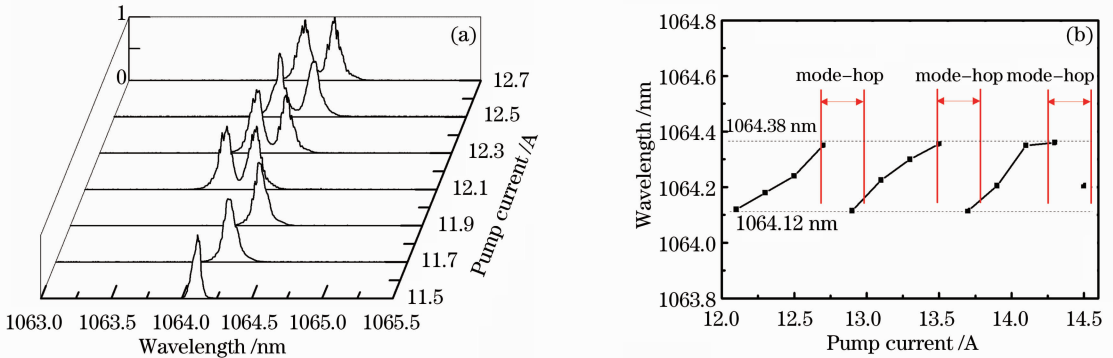


图 2 (a) $11.5\sim 12.7\text{ A}$ 范围内不同抽运电流下种子光光谱图; (b) 双频种子光源中心波长随抽运源电流变化

Fig. 2 (a) Spectra of microchip with pumping current between $11.5\sim 12.7\text{ A}$; (b) central wavelength versus pumping current of microchip

图 2(b)为双频种子光中心波长随种子光抽运电流变化图。随着种子光抽运电流的增大,由于谐振腔热效应,微片激光器输出波长呈现“红移”,并伴随有“跳模现象”发生^[19-21]。如图 2(b)所示,种子光双频输出的中心波长随着抽运电流的变化而在 $1064.12\sim 1064.38\text{ nm}$ 之间呈现周期性变化。考虑行波 Nd:YVO_4 放大器的增益区间约为 $1063.9\sim 1064.6\text{ nm}$,增益区中心波长约为 1064.25 nm 。为了减小放大器增益区对种子光中心波长的影响,选取波长靠近放大器增益曲线波长中心的种子光进行放大后的光谱分析。图 3 是当种子光抽运电流为 11.7 A 时,输出的种子光及放大输出的光谱图。

如图 3 所示,当微片抽运电流为 11.7 A 时,种

子光为单纵模输出,纵模波长为 1064.24 nm ,线宽为 0.10 nm ,此时输出功率为 56.4 mW ;此时获得放大输出也为单纵模,纵模中心波长不变,仍为 1064.24 nm ,但线宽有所减小,为 0.07 nm 。

图 4 是当种子光抽运电流为 14.5 A 时,双频种子光及放大输出的光谱特性图。图 4(a)为抽运电流为 14.5 A 时双频种子光的任意单位光谱图以及光束质量图。此时输出光功率为 247.8 mW ,波长分别为 1064.08 nm 和 1064.32 nm ,线宽分别为 0.06 nm 和 0.10 nm ,中心波长为 1064.20 nm 。双频间隔为 0.24 nm ,对应频差为 63.6 GHz ,此实验结果与公式 $\Delta\nu=c/2L$ 计算结果相符合,其中 c 为光速, L 为谐振腔光学长度^[22]。图 4(b)为双频放大

输出任意单位光谱图和光束质量图,输出光中心波长 1064.19 nm,相对于原始输出变化了 0.01 nm. 放大后输出光功率为 2.38 W,双频输出波长分别为 1064.10 nm 和 1064.28 nm,两个频率光波的线宽均为 0.06 nm,比种子光的线宽略窄;放大后两频率波长间隔为 0.18 nm,对应频差为 47.7 GHz。从

CCD 拍摄的光斑图来看,放大后的光束质量相对种子光有所改善。由图 3 和图 4 可知,放大后信号光谱线宽略小于对应的种子光线宽,但放大信号光谱曲线平滑程度下降。该现象说明放大过程中存在的噪声会导致光谱劣化,该问题将在下一步研究中详细开展。

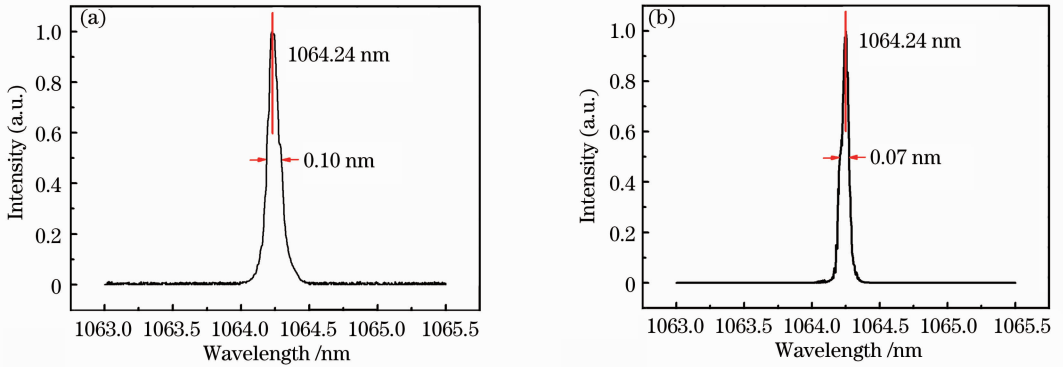


图 3 微片抽运电流为 11.7 A 时(a)种子光输出光谱和(b)放大激光光谱

Fig. 3 Spectra of (a) seed laser and (b) amplified output with microchip pump current at 11.7 A

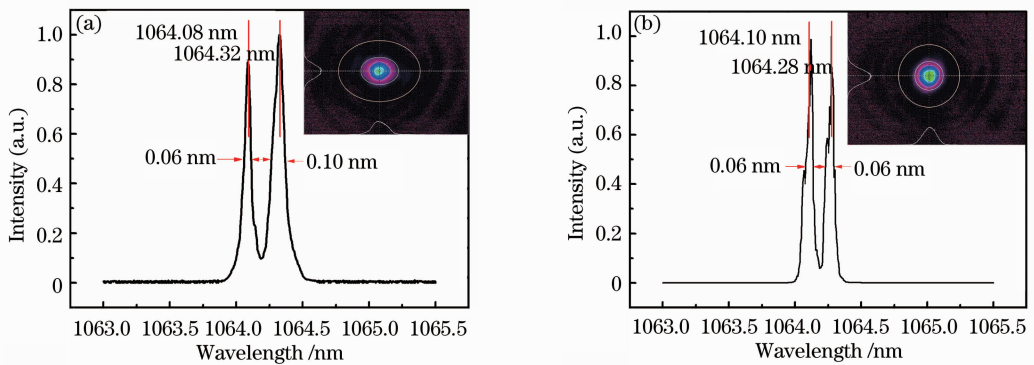


图 4 微片抽运电流 14.5 A 时(a)种子光输出光谱和(b)放大激光光谱

Fig. 4 Spectra of (a) seed laser and (b) amplified output with microchip pump current at 14.5 A

3.2 功率分析

微片种子光的阈值电流为 11.0 A,当抽运电流

为 11.5 A 时,种子光稳定输出功率为 41.8 mW,对应放大输出功率为 0.36 W。

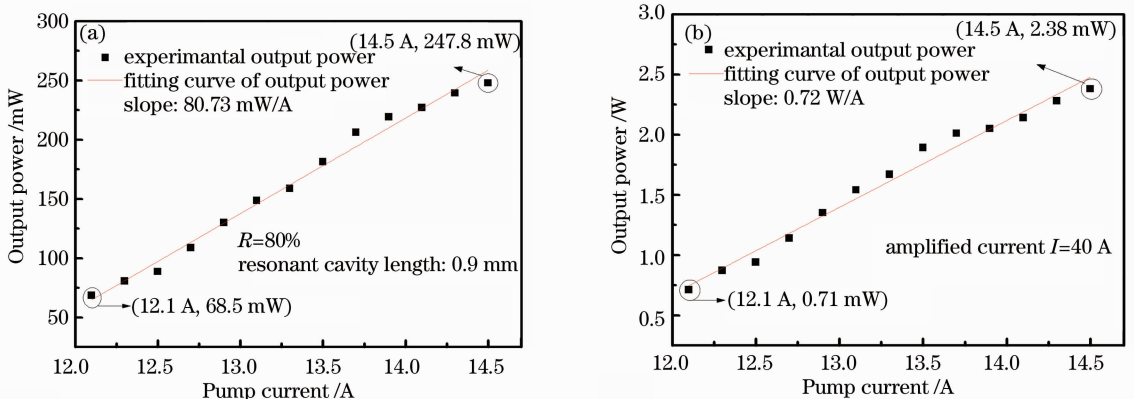


图 5 (a)种子光和(b)放大激光输出功率与种子光抽运电流的关系

Fig. 5 Output powers of (a) seed source and (b) amplifier versus pump current of microchip

当抽运功率上升到 12.1 A 时,微片激光器产生双频输出,图 5(a),(b)分别为双频种子光输出功率和放大输出光功率与微片激光器抽运电流关系图。当抽运功率为 12.1 A 时,实验获得的输出光功率为 68.5 mW,对应放大输出光功率为 0.71 W;当抽运电流上升到 14.5 A 时,种子光输出光功率为 247.8 mW,对应放大输出光功率为 2.38 W。

如图 6 所示,随着种子光源抽运电流增大,实验获得的放大倍数呈现起伏减小的趋势。当抽运电流分别为 12.5、13.3、14.5 A 时,放大倍数达到峰值。放大倍数振荡变化是因为种子光谱和行波放大器增益曲线匹配导致的。在实验中,种子光波长在一定波长范围内由于热效应导致周期漂移,增益区中心波长固定在 1064.25 nm。由于受放大器增益曲线的影响,靠近放大器增益中心波长的种子光,获得放大增益较高,偏离放大器增益中心波长的种子光则放大增益较低。因此当种子光中心波长靠近 1064.25 nm,即对应抽运电流为 12.5、13.3、14.5 A 时,放大倍数较大;反之放大倍数较小。种子光抽运电流从 12.1 A 增大到 14.5 A 过程中,放大器增益饱和和效应导致放大增益整体呈现略微减小的趋势(如图 6 中拟合曲线所示)。

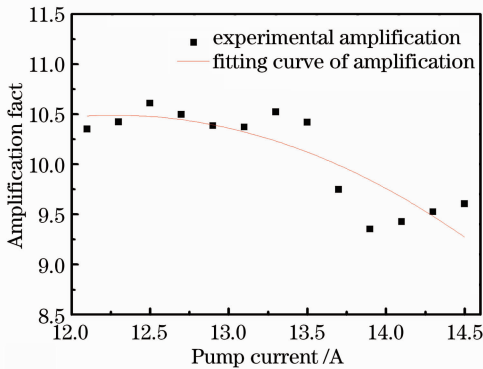


图 6 放大倍数随种子光抽运电流变化

Fig. 6 Amplification factor versus pump current of microchip

4 结 论

通过行波放大器对双频种子信号进行功率放大,获得将近 10 倍放大倍数。放大获得的激光信号仍为双频信号,放大后输出的线宽减小,光束质量也有所改善;同时,放大后信号频差相对种子光频差有一定减小,这是放大系统的光谱匹配造成的。实验获得峰值功率为 2.38 W,频差为 47.7 GHz 的双频输出信号,这种高功率、大频差、高相干性光源,在微

波通信、激光雷达等众多领域将有重要应用。

致谢 感谢浙江省数据存储传输及应用技术研究重点实验室(杭州电子科技大学)的资助。

参 考 文 献

- Bo Guangyu, Liu Dong, Wang Bangxin, *et al.*. Two-wavelength polarization airborne lidar for observation of aerosol and cloud [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1014002.
- 伯广宇, 刘 东, 王邦新, 等. 探测云和气溶胶的机载双波长偏振激光雷达[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1014002.
- Chen Qianghua, Luo Huifu, Wang Sumei, *et al.*. Mesurement of air refractive index based on surface plasmon resonance and phase detection by dual-frequency laser interferometry [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0108001.
- 陈强华, 罗会甫, 王素梅, 等. 基于表面等离子体共振和双频激光干涉相位测量的空气折射率测量[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0108001.
- Zhen Zhiwei, Lu Shunbin, Li Yin, *et al.*. Optical generation of high-power 0.1-THz continuous wave by external modulation [J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(10): 100605.
- Zhao Mingbo, He Jun, Fu Qiang. Simulation modeling and analysis of full-waveform ladar signatures [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0628002.
- 赵明波, 何 峻, 付 强. 全波形激光雷达回波信号建模仿真与分析[J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0628002.
- D G Smith, A Cooper, E P Goodwin, *et al.*. Light-Beam Scanning for Laser Radar and Other Uses [P]; U. S. Patent Application 13/840,686. 2013.
- Fang Zujie, Ye Qing, Liu Feng, *et al.*. Progress of millimeter wave subcarrier optical fiber communication technologies [J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(4): 481-488.
- 方祖捷, 叶 青, 刘 峰, 等. 毫米波副载波光纤通信技术的研究进展[J]. 中国激光, 2006, 33(4): 481-488.
- McKay Aaron, Judith M Dawes. Microwave generation using a dual-helicoidally-polarized ceramic microchip laser [C]. Microwave Photonics, 2008. 263-266.
- Cheng Ren, Zhang Shulian. Diode-pumped dual-frequency microchip Nd: YAG laser with tunable frequency difference [J]. J Physics D: Applied Physics, 2009, 42(15): 155107.
- Ding Jinyun, Zhang Liangqing, Zhang Zhifeng, *et al.*. Frequency splitting phenomenon of dual transverse modes in a Nd: YAG laser [J]. Optics & Laser Technology, 2010, 42(2): 341-346.
- Yang Qing, Huo Yujing, Duan Yusheng, *et al.*. Double-longitudinal-mode continuous-wave laser with ultra-large frequency difference used for narrowband terahertz-wave generation [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0514002.
- 杨 清, 霍玉晶, 段玉生, 等. 用于产生窄带太赫兹波的超大频差双纵模连续激光器[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0514002.
- Qiao Yunfei, Zheng Shile, Chi Hao, *et al.*. Electro-optically tunable microwave source based on composite-cavity microchip laser [J]. Opt Express, 2012, 20(27): 29090-29095.
- M Hu, R D An, H Zhang, *et al.*. Experimental investigation of a novel microchip laser producing synchronized dual-frequency laser pulse with an 85 GHz interval [J]. Laser Phys Lett, 2013, 10(1): 015801.
- P S Teh, R J Lewis, S Alam, *et al.*. 200 W diffraction limited, single-polarization, all-fiber picosecond MOPA [J]. Opt Express, 2013, 21(22): 25883-25889.
- X Wang, H J Eichler, Z Lin, *et al.*. Stable and tunable single frequency Nd:GSAG laser around 943 nm [J]. Appl Opt, 2013, 52(30): 7302-7310.

- 15 X Wang, T Riesbeck, H J Eichler. Tunable single frequency microchip Nd:YAP MOPA laser operating at $1.08\ \mu\text{m}$ [J]. Laser Phys, 2013, 23(4): 045804.
- 16 X Yan, Q Liu, X Jiang, *et al.*. The combined guiding effect in MOPA lasers [J]. Laser Phys Lett, 2013, 10(4): 045003.
- 17 Xiang Zhen, Dan Wang, Sunqiang Pan, *et al.*. Beam quality improvement by gain guiding effect end-pumped Nd:YVO₄ laser amplifiers [J]. Opt Express, 2011, 19(21): 21060–21073.
- 18 Zhao Zhigang, Dong Yantao, Pan Sunqiang, *et al.*. 50 W class double-end-pumped Nd:YVO₄ TEM₀₀ mode solid state laser oscillator [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(9): 0902001.
赵智刚, 董延涛, 潘孙强, 等. 50 W 量级双端抽运 Nd:YVO₄ 基模固体激光振荡器[J]. 中国激光, 2011, 38(9): 0902001.
- 19 Hu Miao, Tang Yongpan, An Rude, *et al.*. Study on the single-longitudinal-mode dual-frequency microchip laser for the generation of millimeter-wave signal [J]. J Optoelectronics•Laser, 2011, 22(10): 1435–1438.
胡 森, 唐拥攀, 安汝德, 等. 可光生毫米波的单纵模双波长微片激光器研究[J]. 光电子•激光, 2011, 22(10): 1435–1438.
- 20 Hu Miao, Zhang Hui, An Rude, *et al.*. Study on the dual-longitudinal mode dual-frequency microchip laser of variable frequency difference [J]. J Optoelectronics•Laser, 2012, 23(12): 2292–2297.
胡 森, 张 慧, 安汝德, 等. 频差可变的纵模双频微片激光器的研究[J]. 光电子•激光, 2012, 23(12): 2292–2297.
- 21 Hu Miao, Zhang Hui, Zhang Fei, *et al.*. Study on the thermally induced frequency difference characteristics of dual-frequency microchip laser used optical generation millimeter-wave [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(20): 204205.
胡 森, 张 慧, 张 飞, 等. 用于光生毫米波的双频微片激光器热致频差特性研究[J]. 物理学报, 2013, 62(20): 204205.
- 22 Zhao Zhigang, Dong Yantao, Pan Sunqiang, *et al.*. Investigation on LD double-end-pumped high power Q-switched YVO₄-Nd:YVO₄ fundamental mode solid state laser [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(9): 2409–2414.
赵智刚, 董延涛, 潘孙强, 等. LD 双端抽运 YVO₄-Nd:YVO₄-YVO₄ 复合晶体的高功率调 Q 基模固体激光器研究[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2409–2414.

栏目编辑: 王晓球