

文章编号: 0258-7025(2009)07-1704-06

LD 抽运单块非平面环形腔单频激光器

高春清 高明伟 林志锋 张云山 张秀勇 朱凌妮

(北京理工大学光电学院光电子所, 北京 100081)

摘要 报道了激光二极管(LD)抽运单块非平面环形腔(NPRO)Nd:YAG 激光器和 LD 抽运单块键合晶体非平面环形腔 Tm:YAG 激光器实现单频运转的实验结果。采用 LD 抽运的单块非平面环形腔 Nd:YAG 激光器, 分别获得了 1.876 W 和 616 mW 的 1064 nm 和 1319 nm 的单频激光输出, 对应的光-光转换效率分别为 53.4% 和 19.2%。采用 LD 抽运单块键合晶体非平面环形腔 Tm:YAG 激光器, 获得了 878 mW 的 2 μ m 单频激光输出, 光-光转换效率为 18.8%。为了减小 2 μ m 激光器的热效应, 采用一种新型的 YAG+Tm:YAG+YAG 键合单块非平面晶体结构形式并取得了良好的效果。

关键词 激光器; 单频激光; 非平面环形腔; 单块结构; 键合晶体

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093607.1704

LD Pumped Monolithic Non-Planar Ring Resonator Single Frequency Lasers

Gao Chunqing Gao Mingwei Lin Zhifeng Zhang Yunshan Zhang Xiuyong Zhu Lingni

(School of Opto-Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract The experimental results of LD pumped monolithic non-planar ring resonator (NPRO) single frequency Nd:YAG laser and LD pumped monolithic bonded crystal NPRO Tm:YAG laser are proposed. 1064 nm and 1319 nm single frequency lasers with the power up to 1.876 W and 616 mW were obtained from the LD pumped NPRO Nd:YAG lasers, and the optical-optical efficiencies were 53.4% and 19.2%, respectively. The 878 mW single frequency 2 μ m laser was generated in the LD pumped monolithic NPRO Tm:YAG laser, with the optical-optical efficiency of 18.8%. For reducing the influence of heat effect in 2 μ m laser, a novel double-bonded YAG+Tm:YAG+YAG crystal was designed and good results were obtained.

Key words lasers; single frequency laser; non-planar ring resonator; monolithic structure; bonded crystal

1 引言

激光二极管(LD)直接抽运的高效、稳定、单频(单纵模、基横模)固体激光器具有体积小、成本低等优点,在科学研究和国防应用的许多方面具有重要的应用价值。目前国内外实现 LD 直接抽运固体激光介质获得单频输出的主要方法有短腔法(微片腔)、腔内标准具法(腔内插入单 F-P 或复合 F-P 标准具)、扭转模腔法、单向行波环形腔法等^[1~12]。微片腔是最简单的获得单纵模激光输出的方法,其增益介质为非常薄的微片,在微片两端分别镀全反射

和部分反射的介质膜形成谐振腔。由于微片激光器的腔长很短,在输出功率较高时容易振出高阶横模,单频激光的输出功率受到限制。腔内标准具法是利用标准具产生的多光束干涉效应,使谐振腔具有与频率有关的选择性损耗的一种单纵模选模方法。扭转模腔法是通过在谐振腔内加入两个快轴方向相对垂直的 $\lambda/4$ 波片,通过消除空间烧孔效应,使激光器最终振荡于某一模式来实现单纵模运转。腔内标准具法和扭转模腔法都需在谐振腔内插入光学元件,由于分立元件的存在,激光器的稳定性较差。单

收稿日期: 2009-03-27; 收到修改稿日期: 2009-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(60478046)和教育部“新世纪优秀人才”资助计划(NCET-05-0178)资助课题。

作者简介: 高春清(1967—),男,教授,博士生导师,中国光学学会理事,主要从事激光技术和光电子技术等方面的研究。

E-mail: gao@bit.edu.cn

向行波环形腔是另一种实现激光器单纵模输出的有效方法,在各种单向行波环形腔中,单块结构的非平面环形腔(NPRO)激光器由于采用了一体化的单块结构,具有极高的频率稳定性,同时由于谐振腔增益体积较大,可以获得高功率的单纵模基横模激光输出。美国斯坦福大学 Byer 研究小组最早研制了 LD 抽运的 1064 nm Nd:YAG 单块非平面单向行波环形腔单频固体激光器, Kubo 和 Kane 等利用 LD 抽运非平面环形腔的单块 Tm:YAG 晶体获得了 2 μm 的单频激光输出。国内一些单位对 LD 抽运的单块非平面环形腔也进行了深入研究。

本文报道了 LD 抽运单块非平面环形腔 Nd:YAG 单频激光器和单块 Tm:YAG 单频激光器的实验结果,其中在单块非平面环形腔 Tm:YAG 激光器中,为了减小 Tm:YAG 激光器存在的严重热效应,采用 YAG+Tm:YAG+YAG 的双键合晶体作为增益介质,有效地解决了 Tm:YAG 晶体的热问题,获得了较高功率的 2 μm 单频激光输出。

2 LD 抽运单块 NPRO 固体激光器实现单频运转的工作原理

单块非平面单向行波环形腔的结构示意图如图 1 所示,其中激光增益介质被加工成如图 1 所示的单块晶体形式,A 点既是抽运光的入射点,又是振荡激光的输出点,B,C,D 所在的 3 个面是全反面,在单块晶体中沿 A,B,C,D 振荡的光线形成非平面环形腔的结构形式。光在 B,C 和 D 点发生全内反射,由于全内反射引入的相位延迟,可把它们的作用与波片的作用等效。A 点的介质膜不仅要使抽运光高透,还要对振荡光的 s 偏振光和 p 偏振光有不同的透射率,相当于一个检偏器。 H 是外加磁场的方向。利用腔内顺时针和逆时针方向振荡的 s 和 p 偏振态的光在腔内不同空间取向的全反射面(图中 B, C, D 所在的面)

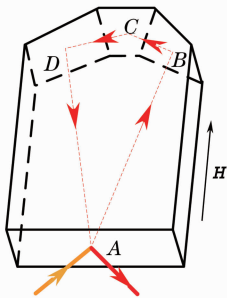


图 1 单块非平面环形腔结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the monolithic non-planar ring oscillator

上的相位延迟、由外加磁场(H)引入的法拉第旋光效应及输出耦合面的镀膜可保证腔内只有沿某一方向的一个偏振态的光起振,从而保证单频振荡。

我们根据单块非平面环形腔的理论分析结果^[13],建立了 LD 抽运单块非平面单向行波环形腔的设计模型,计算了单块非平面环形腔的本征偏振态的损耗和损耗差,确定了激光器结构参数及单块环形腔输出耦合面上对所需振荡波长 s 偏振光和 p 偏振光的反射率。当以 Nd:YAG 为激光增益介质时,分别设计了适用于 1064 nm 和 1319 nm 激光振荡的单块非平面环形腔结构,获得了 1064 nm 和 1319 nm 的单频激光振荡。当以 Tm:YAG 为激光增益介质时,设计了满足 2012 nm 波长单频激光振荡的单块非平面环形腔结构,获得了 2012 nm 的单频激光振荡。

3 LD 抽运的单块 NPRO Nd:YAG 激光器的实验

3.1 1064 nm 单频激光输出

LD 抽运单块非平面环形腔 Nd:YAG 激光器的实验系统如图 2 所示。激光器的抽运源是中心波长为 808 nm 光纤耦合半导体激光器,光纤芯径为 100 μm ,数值孔径为 0.22,单块 Nd:YAG 晶体的尺寸为 14 mm \times 12 mm \times 4mm。抽运光经过耦合光学系统后聚焦到单块 Nd:YAG 激光晶体中。为了获得 1064 nm 的单频激光振荡,在抽运面上镀了对 808 nm 增透、对 1064 nm 部分反射的介质膜,对 s 偏振的 1064 nm 激光的输出透过率为 2.5%。调整抽运光斑在单块激光晶体中的位置,当激光器的抽运功率超过阈值抽运功率时,可以从功率计监测到激光器的输出。采用中心波长为 1064 nm 的扫描 F-P 标准具监测输出激光的频谱特性。当抽运光的

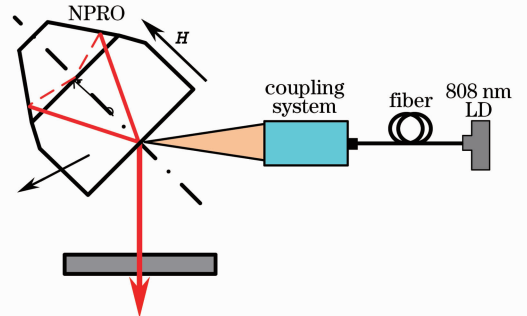


图 2 LD 抽运 1064 nm 单块 Nd:YAG NPRO 激光器实验系统示意图

Fig. 2 Experimental setup of LD pumped 1064 nm monolithic Nd:YAG NPRO laser

功率为 3.51 W 时,单块激光器输出的单频激光功率为 1.876 W。图 3 是 1064 nm 单块激光器在单频运转情况下的输入输出曲线,该激光器对应的光-光转换效率为 53.4%,斜率效率为 60.3%。图 4 是用 F-P 标准具测量的单频激光频谱图。

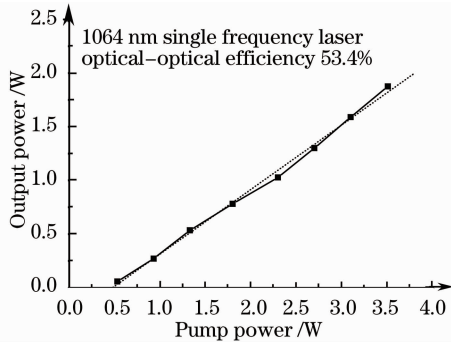


图 3 LD 抽运 1064 nm 单块 NPRO Nd:YAG 单频激光器的输出功率曲线

Fig. 3 Output power of LD pumped 1064 nm monolithic Nd:YAG NPRO single frequency laser

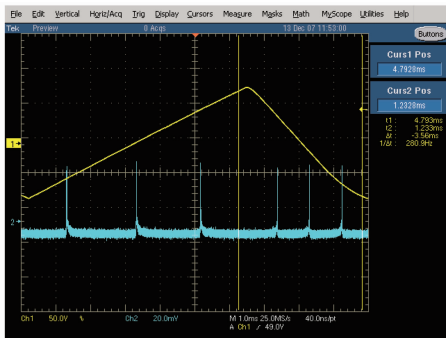


图 4 LD 抽运 1064 nm 单块 NPRO Nd:YAG 激光器的单频激光频谱图

Fig. 4 Spectrum of LD pumped 1064 nm monolithic Nd:YAG NPRO single frequency laser

3.2 1319 nm 单频激光输出

LD 抽运 1319 nm NPRO Nd:YAG 单频激光器实验系统与图 2 类似,抽运源仍采用 100 μm 光纤耦合输出的半导体激光器。由于 Nd:YAG 晶体中 1319 nm 的受激辐射截面仅为 1064 nm 受激辐射截面的 1/5,为了获得 1319 nm 的激光振荡,在单块晶体的人射面上需对 808 nm 抽运光增透、对 1064 nm 激光高透、对 1319 nm 的 s 和 p 偏振态的光具有一定反射率的介质膜,同时该膜对相邻的 1338 nm 谱线的透过率要高于 1319 nm 的透过率,以抑制 1338 nm 的振荡。实验中选取 1319 nm 的透过率为 1.5%。用波长计测量了输出的 1319 nm 单纵模激光的中心波长,测量结果显示其中心波长为 1318.87 nm。当激光器的抽运功

率是 3.2 W 时,获得的 1319 nm 单频激光的最大输出功率为 616 mW,其对应的光-光转换效率为 19.2%,斜率效率为 27.1%,当继续增大抽运功率时激光器出现多纵模振荡。为了满足光纤传感等应用的需要,还进行了 1319 nm 单频激光的单模光纤耦合技术研究,经过标准单模光纤耦合后的最大单频激光输出功率为 327 mW。对输出激光的功率稳定性进行了测试,图 5 为在单模光纤耦合输出功率为 180 mW 情况下的激光功率稳定性曲线,在不采用闭环反馈控制的条件下,该激光器在 3.5 小时测试时间内的功率稳定性为 3.9%。

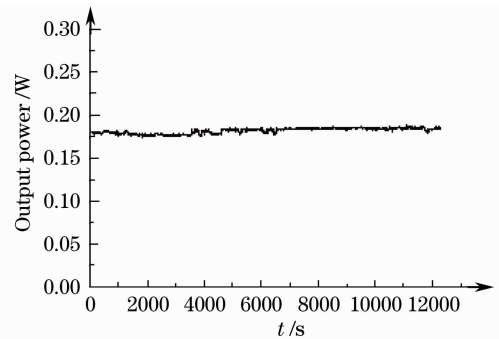


图 5 LD 抽运 1319 nm NPRO 单频激光器输出功率稳定性曲线

Fig. 5 Stability of output power of LD pumped 1319 nm NPRO single frequency laser

利用中心波长为 1319 nm 的扫描 F-P 标准具测量了该单块激光器输出的单频激光的频谱特性,如图 6 所示。在实现了 1319 nm 的单频激光输出后还研究了激光器的温度调谐技术。激光器的温度调谐是通过改变控制激光晶体温度的温控系统实现的,所研制的温控系统的温控精度为 ± 0.01 $^{\circ}\text{C}$ 。温度调谐的实验结果如图 7 所示,当温控系统的温度从 10 $^{\circ}\text{C}$ 调整到 24 $^{\circ}\text{C}$ 时,输出激光的温度调谐范围为 14 GHz,在调谐过程中输出激光经历了几次跳模位

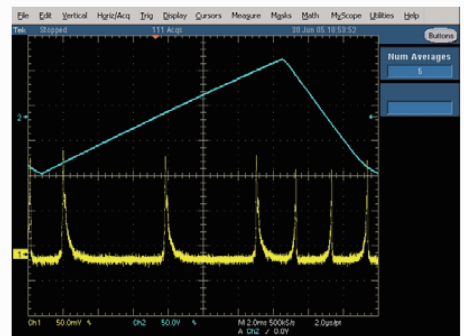


图 6 LD 抽运 1319 nm NPRO 激光器的单频激光频谱图

Fig. 6 Spectrum of LD pumped 1319 nm NPRO single frequency laser

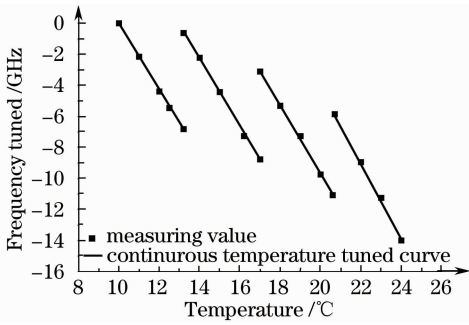


图 7 LD 抽运 1319 nm NPRO 激光器温度调谐的实验结果

Fig. 7 Temperature frequency tuning of LD pumped 1319 nm NPRO laser

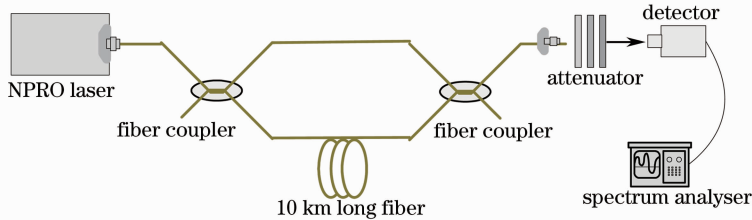


图 8 LD 抽运 1319 nm NPRO 激光器单频激光线宽测试系统

Fig. 8 Measurement system of the line-width of LD-pumped 1319 nm NPRO single frequency laser

根据光纤传感测量应用的要求，在获得了 1319 nm 单频激光输出后还研究了激光器的噪声抑制技术，抑制了激光器的弛豫振荡噪声。图 9 是 LD 抽运 1319 nm 单频激光器在单模光纤耦合输出功率为 160 mW 时噪声抑制结果，采用自行设计的噪声抑制电路实现了 1319 nm 单频 NPRO 激光器的强度噪声抑制。图 9 显示激光器在噪声抑制电路不工作时的弛豫振荡峰的频率约为 260 kHz，弛豫振荡噪声如图 9 中曲线 a 所示；噪声抑制电路工作时，噪声抑制结果如图 9 中曲线 b 所示，结果表明弛豫振荡峰值处的强度噪声幅度降低了大约 45 dB。

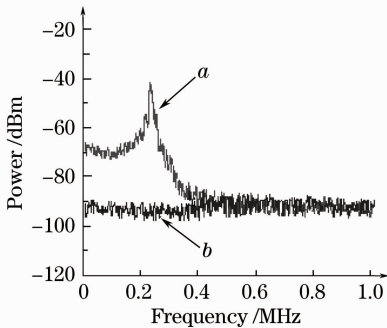


图 9 LD 抽运 1319 nm NPRO 激光器强度噪声抑制测量结果

Fig. 9 Experimental results of intensity noise suppression of LD pumped 1319 nm NPRO laser

置。根据图 7, 1319 nm 单频激光在不跳模情况下的连续调谐系数为 2.2 GHz/°C。

此外，还用光纤延时自差法测量了 1319 nm 单频激光器线宽，测试系统如图 8 所示。激光器输出的光束先耦合到单模光纤中，然后再与 3 dB 光纤耦合器的输入臂相连，光纤耦合器的两个输出臂光束分别经过一段短光纤和一段 10 km 的延迟后一同输入到另一个 3 dB 耦合器中合束，然后用低噪声探测器探测耦合后的信号，利用频谱仪观察探测器的响应信号，测试结果为激光器在 50 μs 内频率不稳定性(单频线宽)为 2.84 kHz。

4 LD 抽运 2 μm NPRO Tm:YAG 单频激光器的实验结果

我们所研制的 LD 抽运 2 μm 单块非平面环形腔单频激光器如图 10 所示，其中抽运源为中心波长 785 nm 的光纤耦合输出半导体激光器，激光增益介质是 Tm:YAG 晶体，其厚度为 4 mm，为了减少再吸收损耗的影响以及减小 Tm:YAG 晶体在 LD 抽运下的热效应影响，设计了双键合的结构形式，即在 Tm:YAG 晶体的两侧分别键合了一块厚度为 1.5 mm 的纯 YAG 晶体和一块长度为 8.5 mm 长的纯 YAG 晶体，形成一种由双键合晶体构成的单块非平面环形腔结构，其中 1.5 mm 厚的纯 YAG 用

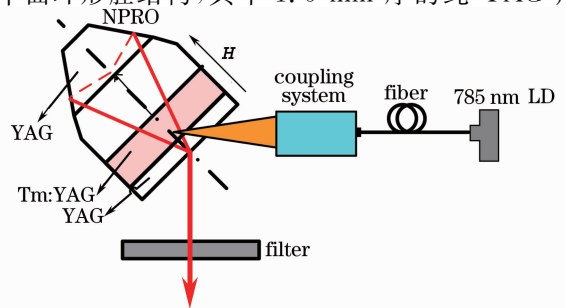


图 10 LD 抽运 2 μm Tm:YAG 键合单块 NPRO 激光器示意图

Fig. 10 Experimental setup of LD pumped 2 μm Tm:YAG bonded crystal NPRO laser

于减小抽运导致的热效应,长的纯 YAG 角锥反射镜的作用是获得 3 个全内反射面,实现与传统的非平面环形腔类似的功能。激光器的抽运源选用的光纤输出半导体激光器,光纤芯径为 $100\ \mu\text{m}$, 数值孔径为 0.22, 沿着 H 的方向加磁场。

图 11 是 $2\ \mu\text{m}$ Tm:YAG 单块非平面环形腔单频激光器的输入输出功率曲线。由图 11 可以看出激光器阈值为 $1.7\ \text{W}$, 在抽运功率为 $4.66\ \text{W}$ 时获得的最大单频激光输出功率为 $878\ \text{mW}$, 其对应的光-光转换效率为 18.8% , 斜率效率为 29.3% , 当继续增大抽运功率时, 激光器出现多模振荡。图 12 是用波长计测量的 $2\ \mu\text{m}$ 单频激光器的中心波长图, 测量结果显示激光器的中心波长为 $2012.094\ \text{nm}$ 。图 13 是用中心波长为 $2\ \mu\text{m}$ 的扫描 F-P 标准具测量的激光器单频激光的频谱图。

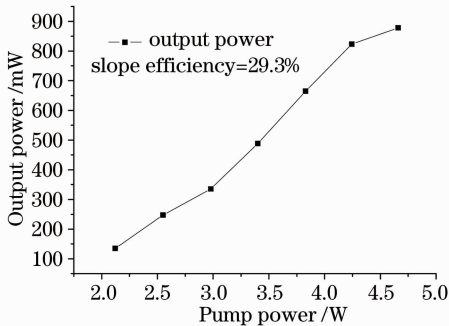


图 11 LD 抽运 $2\ \mu\text{m}$ Tm:YAG 单频激光器输出功率曲线

Fig. 11 Output power of LD pumped $2\ \mu\text{m}$ Tm:YAG single frequency laser

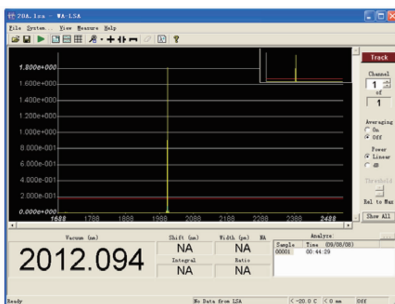


图 12 LD 抽运 $2\ \mu\text{m}$ Tm:YAG 单纵模激光器波长图

Fig. 12 Wavelength of LD pumped $2\ \mu\text{m}$ Tm:YAG single frequency laser

5 结 论

报道了以 LD 为抽运源, 以单块 Nd:YAG 晶体和键合单块 Tm:YAG 晶体为激光增益介质, 采用单块非平面环形腔的结构形式, 获得 $1064\ \text{nm}$, $1319\ \text{nm}$ 和 $2012\ \text{nm}$ 单频激光输出的实验结果。为了减小激光器热效应的影响和克服再吸收损耗的影

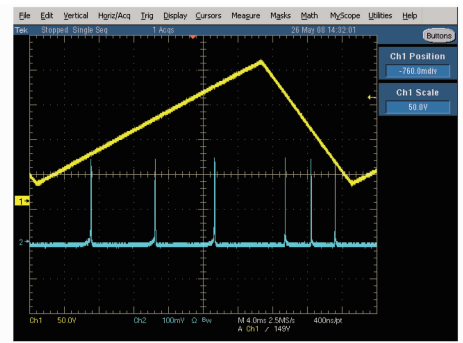


图 13 F-P 标准具测量的 $2\ \mu\text{m}$ 单纵模激光器频谱图

响, 在研制 $2\ \mu\text{m}$ 单频激光器时采用了键合晶体非平面环形腔的结构形式, 实验结果表明这种方式有效地减少了激光器的热问题, 使 $2\ \mu\text{m}$ 激光器的单频激光输出功率明显提高。

参 考 文 献

- J. J. Zayhowski. Single frequency microchip Nd lasers[J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**: 24~26
- J. J. Zayhowski. Frequency-modulated Nd:YAG microchip lasers[J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**: 618~620
- R. Knappe G. Bitz, K. J. Boller *et al.*. Compact single-frequency diode pumped Cr:LiSAF lasers[J]. *Opt. Commun.*, 1997, **143**: 42~46
- V. Evtuhov, A. E. Siegman. A "twisted-mode" technique for obtaining axially uniform energy density in a laser[J]. *Appl. Opt.*, 1965, **4**(1): 142~143
- K. Nakagawa, Y. Shimizu, M. Ohtsu. High power diode-laser pumped twisted-mode Nd:YAG laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(4): 499~501
- T. J. Kane, R. L. Byer. Monolithic, unidirectional single-mode Nd:YAG ring laser[J]. *Opt. Lett.*, 1985, **10**(2): 65~67
- I. Freitag, A. Tünnermann, H. Welling. Power scaling of diode-pumped monolithic Nd:YAG lasers to output powers of several watts[J]. *Opt. Commun.*, 1995, **115**: 511~515
- I. S. Kubo, T. J. Kane. Diode-pumped lasers at five eye-safe wavelengths [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**: 1033~1040
- E. Zang, H. Cao, K. Zhao *et al.*. Monolithic quasi-planar ring lasers[C]. *SPIE*, 1998, **3549**: 29~34
- Zheng Yaohui, Lu Huadong, Li Fengqin *et al.*. All-solid-state high-efficiency high-power Nd:YVO₄/KTP laser of single-frequency operation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 739~742
- 郑耀辉, 卢华东, 李凤琴 等. 全固态高输出功率单频 Nd:YVO₄/KTP 激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6): 739~742
- Zhang Tieli, Yao Jianquan, Wang Peng *et al.*. Laser diode end-pumped, high-power continuous-wave single-frequency Nd:YVO₄ ring laser at 1064 nm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1194~1197
- 张铁犁, 姚建铨, 王 鹏 等. 端面抽运高功率连续单频 1064 nm Nd:YVO₄ 环形腔激光器 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1194~1197
- Wang Xin, Yang Suhui, Sun Wenfeng *et al.*. Laser diode pumped high slope efficiency monolithic unidirectional single frequency ring laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2): 149~152

王 欣,杨苏辉,孙文峰等. 激光二极管抽运单块高斜度效率环
形腔单频固体激光器[J]. 中国激光, 2005, 32(2): 149~152

13 Wang Qing, Gao Chunqing, Wei Guanghui. Analysis of
monolithic nonplanar ring oscillators by considering the stress
induced birefringences [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004,

24(2): 279~283

王 青,高春清,魏光辉. 考虑晶体应力情况下的单块非平面环
形腔分析[J]. 光学学报, 2004, 24(2): 279~283

《激光与光电子学进展》“光学制造”栏目征稿启事

《激光与光电子学进展》是中国科学院上海光学精密机械研究所主办的激光、光电子领域行业性期刊,中国科技核心期刊。该刊 1964 年创刊,至今已出刊 500 余期,旨在促进国内外学术交流,沟通科研单位、生产部门与用户的联系。2009 年,《激光与光电子学进展》将加大光学制造方向的报道力度,深入研讨光学制造的技术发展及其在工业、科研各方面的应用。主要涉及方向有光学元器件、光学仪器、光学加工、光学设计、光学材料、光学薄膜、光学检测等领域。

欢迎相关的科研、技术、市场人员根据我们栏目内容定位,撰写或向我们推荐涉及上述领域的优秀技术论文。来稿不收取审稿费和版面费,一经录用将优先发表并支付丰厚稿酬。

• 本栏目基本要求:

1) 稿件内容应为光学制造领域的最新进展、研究动态、科研和新品开发成果等方面;

2) 文章要求内容新颖、论点正确、论据充分、数据可靠、文理通顺;

3) 技术文章字数一般为 5000 字左右;综述文章字数最多不超过 10000 字,且第一作者需为副教授及以上职称。

• 投稿方式:通过网上投稿系统(<http://www.opticsjournal.net/lop.htm>)直接上传稿件(主题标明“光学制造”投稿),也可以直接将稿件 word 版发至邮箱:dingjie@siom.ac.cn(主题标明“光学制造”投稿),如有问题欢迎垂询 021-69918198 与栏目编辑丁洁联系。

《激光与光电子学进展》编辑部