

基于数字微镜器件的多通道 C 波段 可调谐光纤激光器

艾 琪¹ 陈 笑^{1*} 田 淼¹ 颜 玢² 宋菲君³ 陈根祥¹ 桑新柱² 王义全¹

(¹ 中央民族大学理学院, 北京 100081; ² 北京邮电大学信息光子学与光通信研究院, 北京 100876)

³ 大恒新纪元科技股份有限公司光电研究院, 北京 100085

摘要 可调谐光纤激光器可广泛应用于光纤通信、光纤传感、激光光谱、精密测量和激光加工等诸多领域。针对目前可调谐激光器在调谐性、灵活性、稳定性和多波长功率均衡性等方面的不足, 提出一类新型的基于数字微镜器件(DMD)的多波长宽带可调谐光纤激光器。该激光器利用关键器件 DMD 作为波长调谐器, 掺铒光纤作为激光增益介质, 通过巧妙的光学设计, 实现仅利用一块 DMD 芯片独立、灵活、稳定调谐多波长激光输出的目的。该激光器具有 3 个输出通道, 各通道之间独立开关控制, 每个通道均可实现波长在 1530~1560 nm 之间的连续可调谐输出, 波长调谐精度 0.055 nm/pixel, 边模抑制比大于 55 dB, 激光输出功率最大值为 10 mW, 2 h 内的中心波长漂移小于 0.02 nm。

关键词 激光器; 光纤激光器; 可调谐激光器; 数字微镜器件; 掺铒光纤放大器

中图分类号 TN241 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0414001

Multi-Channel C-Band-Tunable Fiber Lasers Based on Digital-Micromirror-Device Processor

Ai Qi¹ Chen Xiao¹ Tian Miao¹ Yan Binbin² Song Feijun³ Chen Genxiang¹

Sang Xinzhu² Wang Yiquan¹

¹ College of Science, Minzu University of China, Beijing 100081, China

² State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

³ Daheng Science & Technology, Beijing 100085, China

Abstract Tunable fiber lasers are widely applied in fiber communication, optical fiber sensing, laser spectroscopy, precision measurement and laser processing etc. Considering of the deficiencies of current tunable lasers in tuning, flexibility, stability and multi-wavelength power equalization, a novel C-band tunable multi-channel fiber laser based on a digital micromirror device (DMD) is proposed. This tunable laser uses erbium-doped fibers as the laser gain medium and an opto-DMD processor as a tuner to dynamically select arbitrary lasing wavelength. The laser has three tunable output channels in 1530~1560 nm with resolution of 0.055 nm/pixel, and each channel can be controlled independently. The side mode suppression ratio of laser signals is greater than 55 dB. The maximum laser output power is about 10 mW and the fluctuation of the center wavelength within 2 h is below 0.02 nm.

Key words lasers; fiber laser; tunable laser; digital micromirror device; erbium-doped fiber amplifier

OCIS codes 060.3510; 140.3550; 230.3990

收稿日期: 2013-10-31; **收到修改稿日期**: 2013-12-02

基金项目: 国家自然科学基金(11204387)、教育部科技研究重点项目(212205)、民族地区能源资源开发利用研究创新科技平台项目(98507-010009, 98504-012004)

作者简介: 艾 琪(1989—), 女, 硕士研究生, 主要从事激光物理方面的研究。E-mail: aiqi_silawanyue@sina.com

导师简介: 王义全(1964—), 男, 博士, 研究员, 主要从事激光物理与微纳光电器件方面的研究。

E-mail: yiquanwang@gmail.com

* **通信联系人**。E-mail: xchen@pku.edu.cn

1 引言

随着激光技术在通信、传感、生物医学、仪器测试、自动控制等领域的大力发展,人们对可调谐激光器的需求增长迅速。这类激光器不但可以代替多个固定波长激光器以节省成本,还在诸多新型激光系统中发挥着不可替代的作用。例如在密集波分复用(DWDM)光通信系统中,采用多通道多波长可调谐激光器不仅可以大大降低系统的运营维护成本和备份成本,而且还可以实现对网络资源的远程动态优化配置,为网络带来前所未有的灵活性和动态性能。此外,这类可调谐激光器在光载射频(RoF)传输系统、全光波长变换、波长路由、光包交换以及基于波长的个人虚拟网络等领域也具有诸多十分重要的潜在应用价值。因此,多波长调谐、多通道输出的可调谐激光器成为近年来人们研究与开发的热点。

目前,人们对多通道多波长可调谐光纤激光器的研究主要集中在如何获得高稳定性、波长可连续调谐、波长间隔可控、输出波长数目足够多且各波长功率均衡的多波长激光。为达到以上要求,国内外研究者分别对多波长调谐机制与激光增益介质进行了大量的研究,并取得了许多重要的进展。多波长调谐器是实现多波长调谐过程的关键器件,研究者提出了诸多方法来实现,包括光纤布拉格光栅^[1-2](高双折射光纤上写入布拉格光栅,取样布拉格光栅,少量模光纤光栅等),光纤型法布里-珀罗(F-P)腔^[3],声光可调光学滤波器^[4],高双折射萨尼亚克(Sagnac)光纤干涉仪^[5],基于光波导的马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)干涉仪^[6]。这些器件在波长调谐范围、偏振敏感性、波长稳定性、调谐灵活性等方面各存在优缺点。鉴于此,提出了一种新颖的基于数字微镜器件(DMD)的波长调谐方法。DMD是通过大规模集成电路技术制造的微反射镜阵列,如XGA模式为1024 pixel×768 pixel。可以通过施加寻址电压,驱动对应DMD微镜片沿各自对角线倾斜±12°,实现对光波的有效调制,从而达到在放大器的整个增益波长范围内任意调谐一个或者多个波长的目的。基于这种新的波长调谐机制,可以在一个DMD处理器芯片上实现稳定的多波长连续程控调谐、波长间隔可控、多波长独立开关、激光波长数目足够多、可通过软件对激光器的全部功能进行远程控制等重要特性。

同样,多波长光纤激光器增益介质的研究也同时展开。目前主要报道的光纤激光器增益机制有掺铒光纤放大器(EDFA)^[7-8],光纤拉曼放大器

(FRA)^[9]以及基于光纤布里渊散射效应的放大器(FBA)。其中EDFA由于均匀增宽和交叉饱和特性无法实现稳定的多波长激光;以非均匀增宽机制为主的半导体光放大器(SOA)介质可以实现多波长激光却很难得到较好的边模抑制比;FRA和FBA需要大功率的抽运源因而增加了整个激光系统的复杂性而变得非常昂贵。虽然近年来陆续有新的技术应用于多波长激光器,包括采用液氮冷却掺铒光纤(EDF)^[10-11]、移频器反馈^[12]、混合型增益介质^[13-14]、腔内引入高非线性元件或者偏振烧孔效应^[15-16]等,但是总体来说稳定可靠、功率均衡的多波长激光器还处于起始阶段,模式竞争的问题没有得到根本解决。

针对目前可调谐激光器在调谐性、灵活性、稳定性、调谐范围、多波长功率均衡性等方面的不足,提出一类新型的基于DMD的多波长宽带可调谐光纤激光器。该激光器利用关键器件DMD作为波长调谐器,保偏EDFA作为激光增益介质,通过巧妙的光学设计,实现仅利用一块DMD芯片独立、灵活、稳定调谐多波长激光输出。

2 实验装置

多通道可调谐光纤激光器的实验装置如图1(a)所示。该激光器包括 n 个保偏(PM)光纤光学模块和一个体光学模块; n 个光纤光学模块中的每一个模块均包含掺铒光纤放大器、光纤耦合器、光纤和双尾纤准直器,其中 n 个双尾纤准直器构成准直器阵列;体光学模块包括体光栅、DMD处理器和2块透镜,其中DMD处理器上分成 n 个微镜工作区,分别与 n 个光学通道相对应。 n 个光纤光学模块中每一个EDFA发出C波段放大自发辐射谱(ASE),分别经过光纤耦合器(10/90),其中10%作为激光输出,90%的光通过光纤进入双尾纤准直器,入射光随后经过第一透镜(焦距为75 mm)聚焦至1200 line/mm的体光栅上,在第1级衍射方向上发生色散。该色散光通过第二透镜(焦距为75 mm)变为平行光垂直照射在DMD的有效工作区,且不同波长的光落在工作区的不同像素区域,如图1(b)所示。通过分别对每个工作区的某区域镜片加载寻址电压,驱动对应镜片倾斜,构成二维“闪耀”光栅,使得落在倾斜镜片上对应波长的光发生衍射。微调DMD的偏转方向,在近似闪耀条件下,确保衍射光沿原路返回,并耦合入准直器的另一个光纤中,经过EDFA增益和多次循环之后输出高品质的单模激光。多路激光通道的工作原理

与单路激光通道的工作原理相同,且每一路通道均可方便利用 DMD 实现波长的独立调谐输出。

该激光器的光学设计摒弃了常见的多通道光纤激光器内部由多个独立激光器简单组合的笨拙方案,巧妙地采用多个光纤光学模块共享同一个体光学模块,实现仅利用一块 DMD 处理器同时独立调谐多路激光输出的目的。

理论上,DMD 的有效工作区越大,可实现的激

光通道数也越多。本实验中选用 0.5" DMD 作为波长调谐器,它由 1024 pixel \times 768 pixel 构成,每个微镜尺寸为 10.8 $\mu\text{m}\times$ 10.8 μm 。一方面既要最大限度利用 DMD 的有效工作区,又要避免因通道数过多造成的信道间交叉串扰,因此综合考虑设定本实验中的通道数为 3。图 1(b)显示了 DMD 上均匀分布在不同区域的 3 条光束色散条。整套系统采用全保偏光纤设备,以提高输出激光的稳定性和偏振度^[17]。

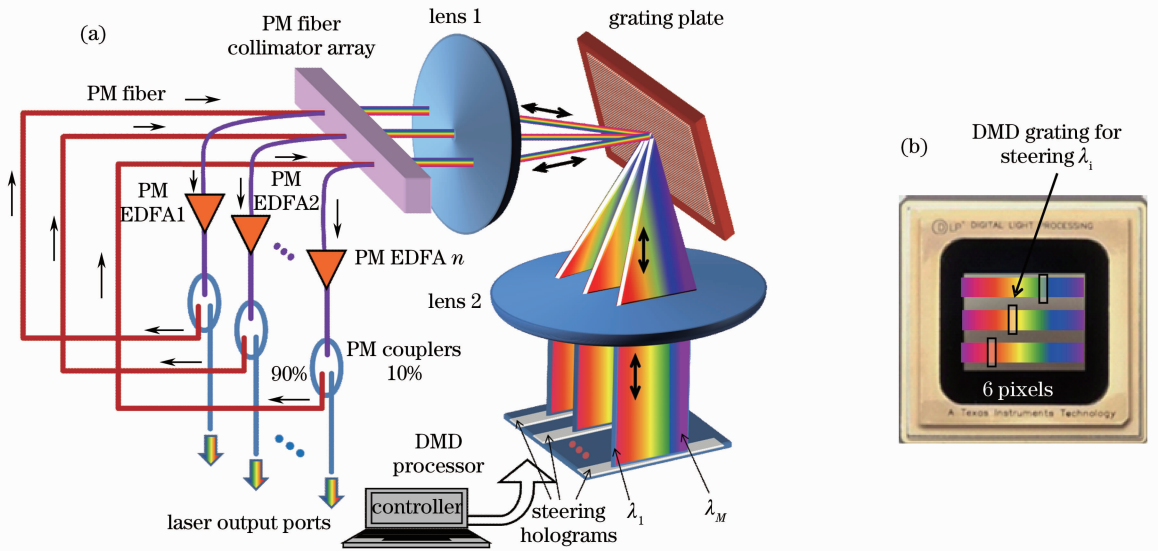


图 1 (a) 实验原理示意图; (b) DMD 上三通色散光分布示意图

Fig. 1 (a) Schematic diagram of experimental setup; (b) light dispersion distribution of three channels on a DMD processor

3 实验结果与分析

图 2 给出了 EDFA 的自发辐射谱。内插图为激光器开环时 DMD 选择的任意一种波长的信号

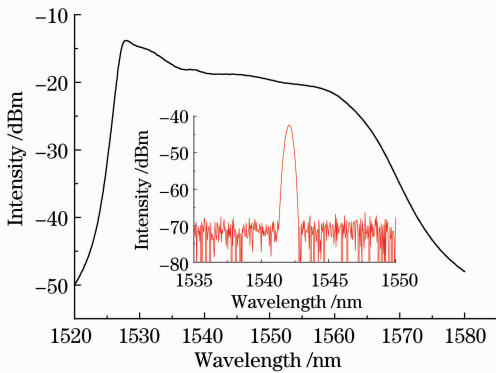


图 2 EDFA 辐射的 C 波段放大自发辐射谱。内插图为 DMD 选择的任意波长的光信号(开环)

Fig. 2 C-band ASE noise from an EDFA. The inset is intensity of an arbitrary wavelength selected by the DMD (open loop)

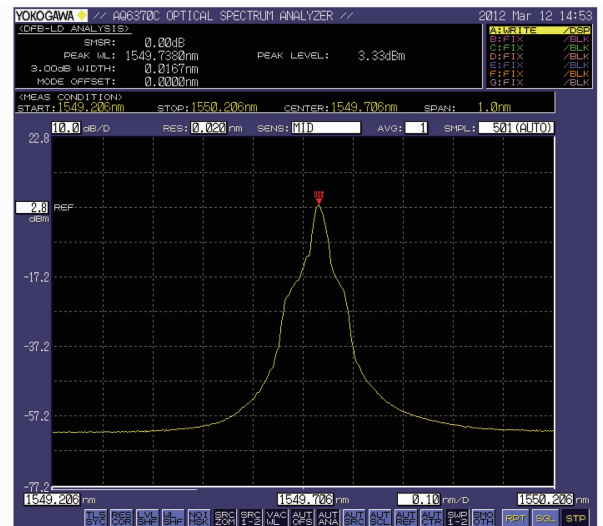


图 3 可调谐光纤激光器输出的典型信号

Fig. 3 Typical signal of tunable fiber laser

光。测量双尾纤准直器输入和输出端光功率,测得 体光学部分的总损耗为 11.6 dB,这些插损来源于: 1)透镜的反射损耗;2) 1200 line/mm 闪耀光栅的衍

射损耗(0级衍射光无空间色散,不可利用);3)DMD的衍射损耗。其中DMD的衍射损耗最大,有关DMD衍射损耗的研究可见参考文献[18—19]。

图3为可调谐光纤激光器的典型激光信号。图中激光输出的中心波长 $\lambda=1549.738\text{ nm}$,边模抑制比(SMSR)大于60 dB,3 dB线宽为0.0167 nm。图4为激光器3个通道在整个C波段内粗调的输出信号。实验中3个通道在波长1530~1560 nm内保持高度的一致性,各通道的边模抑制比均大于55 dB,3 dB带宽均小于0.02 nm,这取决于光谱仪的分辨率(实验中所用YOKOGAWA AQ6370C光谱仪分辨率为0.02 nm),各通道均具有稳定的独立可调谐输出。

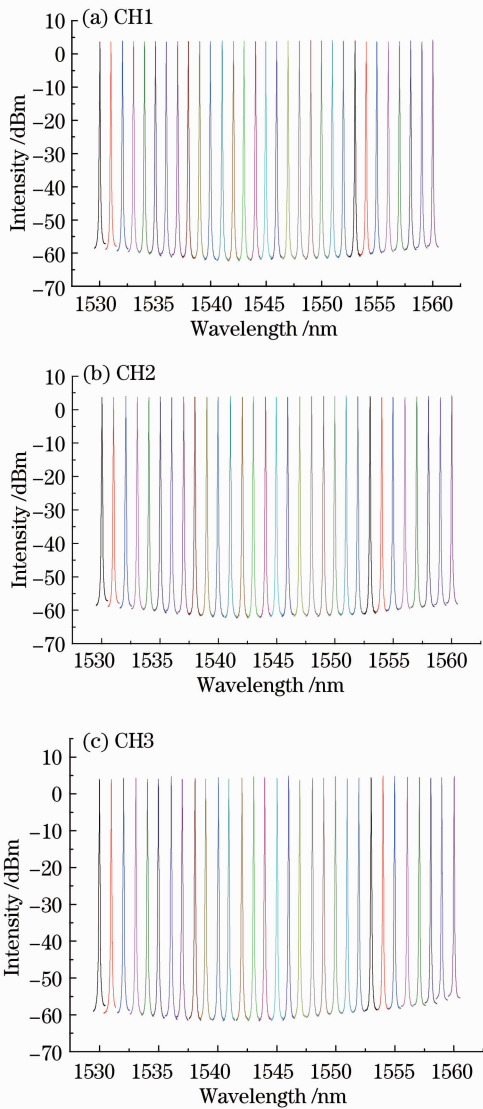


图4 3通道在C波段内的粗调输出信号

Fig. 4 Laser signals from three channels covering the whole C-band by coarse-tuning

图5为激光器在波长1550 nm附近精细调谐的输出信号。实验结果表明,每改变一个DMD像素,激光波长变化约0.055 nm(即调谐精度),且整个C波段内调谐步长比较均匀。调谐步长由透镜2的焦距以及DMD像素大小共同决定。图6和图7为3个通道激光输出的稳定性测试结果。图6表明激光输出的中心波长在2 h内的抖动小于0.02 nm(0.02 nm为光谱仪的分辨率极限)。激光器输出功率的调节可以通过改变EDFA抽运电流来实现,并利用自编软件的功率伺服系统确保输出功率的稳定性。图7为3个通道在波长1550 nm处2 h内的功率波动,并且在整个C波段均小于0.008 dB,功率调谐步长为0.02 mW。整个系统的全保偏设计确保了激光多通道输出信号的高度稳定性。

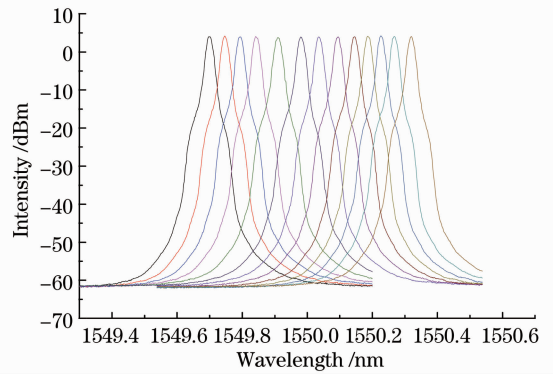


图5 可调谐光纤激光器在1550 nm附近精细调谐的输出信号

Fig. 5 Output signal from tunable fiber laser near 1550 nm by fine-tuning

此外,通过对各通道对应的DMD像素工作区域连续加载全息图像,可以实现3通道激光输出波长在C波段内独立连续扫描。系统扫描速度、扫描波长间隔以及扫描的波长范围均可单独控制,其中扫描速度受限于DMD处理器加载图像的时间(目前实验所用DMD的最快加载时间为0.1 s),扫描步长为0.055 nm。还可以让任意一个或两个通道在某一固定波长处输出,其他通道在C波段某一设定范围内单独扫描,结果如图8所示。其中通道1和2分别在固定波长1544.486 nm与1550.502 nm处输出,通道3在1545 nm与1550 nm之间进行扫描,图8给出扫描过程中某4个时刻的3通道激光输出情况。

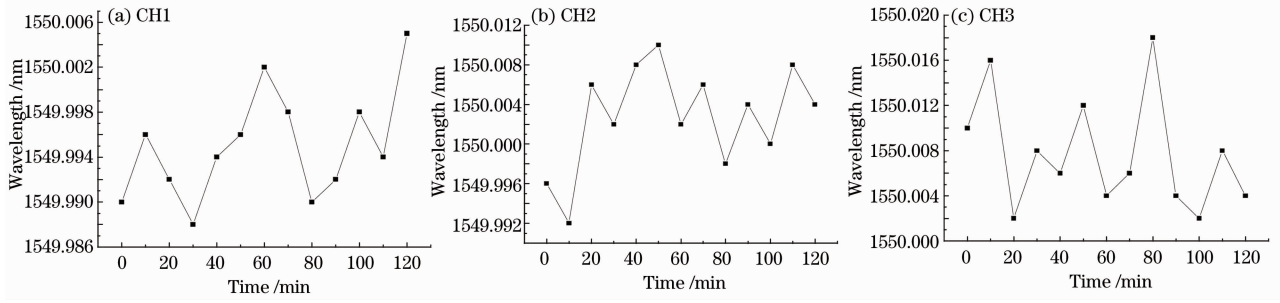


图 6 3 通道输出的中心波长在 2 h 内的波动

Fig. 6 Fluctuations of central lasing wavelength from three channels within 2 h

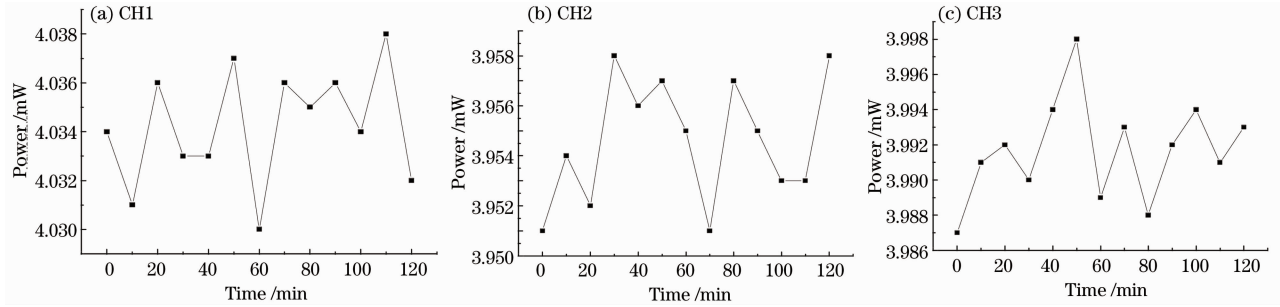


图 7 3 通道输出信号的峰值功率在 2 h 内的抖动

Fig. 7 Fluctuations of laser power from three channels within 2 h

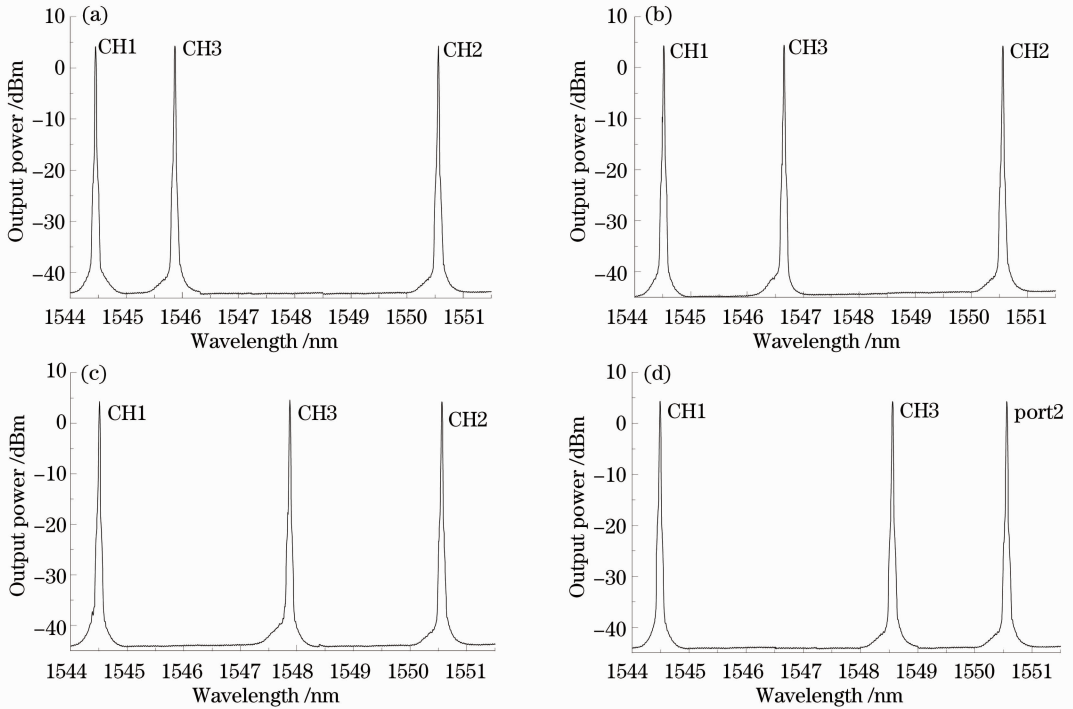


图 8 可调谐光纤激光器在扫描模式下的 3 通道输出

Fig. 8 Laser outputs of three-channel tunable fiber lasers at sweeping mode

4 结 论

提出了一类新型的基于 DMD 的多波长宽带可调谐光纤激光器。该激光器利用关键器件 DMD 作

为波长调谐器,保偏 EDFA 作为激光增益介质,通过巧妙光学设计,实现仅利用一块 DMD 芯片独立、灵活、稳定调谐多波长激光输出。相比较于目前科研和工程上常用的可调谐激光器,提出的这类激光

器的优势在于:1)波长调谐机制。提出采用 DMD 处理器作为激光器的波长调谐器,利用芯片像素阵列对光束的高效率衍射效应以及 DMD 上相应微镜片的角度控制来实现波长调谐过程,具有结构稳定可靠、调谐快速灵活、功能模块化、低驱动电压等诸多优势。2)多波长激光机制。利用先进的 DMD 处理器,通过巧妙的光学设计,可以实现无交叉串扰的多通道单波长或者单通道多波长的激光出射,并且激光输出具有多波长间隔任意可调,各波长功率独立可控,波长与通道开关不影响其他波长激光等特点。

实验研究结果表明,该激光器的每个通道均可实现 C 波段内的连续独立波长调谐,调谐精度为 0.055 nm/pixel,输出信号具有超过 55 dB 的边模抑制比,3 dB 线宽 0.02 nm。基于软件的自动功率控制系统,在室温下,每通道的输出功率波动小于 0.008 dBm,中心波长漂移小于 0.02 nm。

该激光器的研究可以促进可调谐激光器以及相关技术的发展,推动仪器在光纤通信、大气监测、光纤传感、光电检测、光数据存储、仪器仪表、医学领域和下一代相控阵雷达实时延迟波束控制光源等领域的广泛应用。

参 考 文 献

- 1 C C Lee, S Chi. Single-longitudinal-mode operation of a grating-based fiber-ring laser using self-injection feedback [J]. *Opt Lett*, 2000, 25(24): 1774–1776.
- 2 Cao Ying, Gu Zhengtian. Optical properties of cascaded long-period and fiber Bragg gratings [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(4): 91–98.
曹莹,顾铮先. 级联长周期光纤光栅和 Bragg 光纤光栅的光学特性[J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 91–98.
- 3 C H Yeh, F Y Shih, C H Wang, *et al.*. Cost-effective wavelength-tunable fiber laser using self-seeding Fabry-Perot laser diode [J]. *Opt Express*, 2008, 16(1): 435–439.
- 4 W Yang, Y Liu, L F Xiao, *et al.*. Wavelength-tunable erbium-doped fiber ring laser employing an acousto-optic filter [J]. *J Lightwave Technol*, 2010, 28(1): 118–122.
- 5 C S Kim, R M Sova, J U Kang. Tunable multi-wavelength all-fiber Raman source using fiber Sagnac loop filter [J]. *Opt Commun*, 2003, 218(4-6): 291–295.
- 6 X Rejeaunier, P Mollier, J P Goedgebuer, *et al.*. Erbium-doped fiber laser tuning using two cascaded unbalanced Mach-Zehnder interferometers as intracavity filter: numerical analysis and experimental confirmation [J]. *J Lightwave Technol*, 2001, 19

- (6): 893–898.
- 7 A W Al-Alimi, M H Al-Mansoori, A F Abas, *et al.*. A stabilized tunable dual wavelength erbium-doped fiber laser with equal output power [J]. *Laser Physics*, 2009, 19(8): 1850–1853.
- 8 J J Tian, Y Yao, Y X Sun, *et al.*. Multiwavelength erbium-doped fiber laser employing nonlinear polarization rotation in a symmetric nonlinear optical loop mirror [J]. *Opt Express*, 2009, 17(17): 15160–15166.
- 9 Z Q Luo, Z P Cai, J F Huang, *et al.*. Stable and spacing adjustable multiwavelength Raman fiber laser based on mixed cascaded phosphosilicate fiber Raman linear cavity [J]. *Opt Lett*, 2008, 33(14): 1602–1604.
- 10 D M Liang, X F Xu, Y Lin, *et al.*. Multiwavelength fiber laser based on a high-birefringence fiber loop mirror [J]. *Laser Physics Letters*, 2007, 4(1): 57–60.
- 11 R Hayashi, S Yamashita, T Saida. 16-wavelength 10-GHz actively mode-locked fiber laser with demultiplexed outputs anchored on the ITU-T grid [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2003, 15(12): 1692–1694.
- 12 Y G Han, C H Kim, S B Lee. Room-temperature multiwavelength erbium-doped fiber ring laser based on phase modulation of semiconductor optical amplifier with lasing-wavelength and spacing tunability [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(3): 210–212.
- 13 Z Chen, S Ma, N K Dutta. Multiwavelength fiber ring laser based on a semiconductor and fiber gain medium [J]. *Opt Express*, 2009, 17(3): 1234–1239.
- 14 G Bolognini, M A Soto, F D Pasquale. Fiber-optic distributed sensor based on hybrid Raman and Brillouin scattering employing multiwavelength Fabry-Pérot lasers [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2009, 21(20): 1523–1525.
- 15 X C Xu, Y Yao, X H Zhao, *et al.*. Multiple four-wave-mixing processes and its application to multiwavelength erbium-doped fiber lasers [J]. *J Lightwave Technol*, 2009, 27(14): 2876–2885.
- 16 M H Al-Mansoori, M A Mahdi. Multiwavelength L-band Brillouin-erbium comb fiber laser utilizing nonlinear amplifying loop mirror [J]. *J Lightwave Technol*, 2009, 27(22): 5038–5044.
- 17 Jiang Nuan, Li Zhizhong, Yang Huayong, *et al.*. Birefringence analysis of polarization maintaining fiber and research on characteristic of all-fiber beat-length experimental systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0706003.
姜暖,李智忠,杨华勇,等. 保偏光纤双折射分析及全光纤拍长测试方法对比研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(7): 0706003.
- 18 Chen Xiao, Yan Binbin, Song Feijun, *et al.*. Diffractive properties of DMD gratings and its new application in tunable fiber lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0705003.
陈笑,颜珍珍,宋菲君,等. DMD 光栅的衍射特性及其在可调谐激光中的应用[J]. *光学学报*, 2012, 32(7): 0705003.
- 19 X Chen, Y Q Wang, K Z Huang, *et al.*. Tunable polarization-maintaining single-mode fiber laser based on a MEMS processor [C]. *Quantum Electronics and Laser Science Conference*, 2012, JW2A. 59.

栏目编辑: 宋梅梅