

# 基于数字微镜器件的可调谐掺铒光纤激光器

张策<sup>1</sup>, 陈根祥<sup>1</sup>, 高云舒<sup>2</sup>, 于超<sup>3</sup>, 吕敏<sup>1</sup>, 陈笑<sup>1</sup>, 张倩<sup>1</sup>, 王义全<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中央民族大学理学院, 北京 100081;

<sup>2</sup>北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044;

<sup>3</sup>北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876

**摘要** 光纤激光器在光纤通信、光纤传感、光谱测量等众多领域有着广泛应用。设计并研制了一种基于数字微镜器件(DMD)实现滤波功能并具有多个输出端口的宽带连续可调谐掺铒光纤激光器。用行波速率方程模型对激光器的输出特性进行理论分析和仿真研究;在此基础上,搭建了具有8个输出端口的宽带可调谐掺铒光纤激光器实验系统;结果显示:各端口输出波长范围为50 nm,完整覆盖了整个C波段,并拓展到了S和L波段;激光器的阈值抽运功率为17 mW,输出激光的3 dB带宽小于0.02 nm,边模抑制比大于50 dB。激光器在100 min内输出稳定性的实验测试结果表明,输出激光的功率波动小于0.4 dB,波长抖动小于0.02 nm。

**关键词** 激光器; 光纤激光器; 数字微镜器件; 可调谐光学滤波器; 多端口可调谐激光器

中图分类号 TN241

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.071403

## Tunable Erbium-Doped Fiber Laser Based on Digital Micromirror Device

Zhang Ce<sup>1</sup>, Chen Genxiang<sup>1</sup>, Gao Yunshu<sup>2</sup>, Yu Chao<sup>3</sup>, Lü Min<sup>1</sup>,

Chen Xiao<sup>1</sup>, Zhang Qian<sup>1</sup>, Wang Yiquan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Science, Minzu University of China, Beijing 100081, China;

<sup>2</sup> School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

<sup>3</sup> School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

**Abstract** Fiber laser is widely used in many fields, such as optical fiber communication, optical fiber sensing, spectrum measurement and so on. A broadband continuous tunable erbium-doped fiber laser with multiple output ports is designed and fabricated based on a digital micromirror device (DMD) and widely tunable optical filter. The characteristics of the laser are theoretically simulated and analyzed using a traveling-wave rate-equation model. Based on the theoretical results, an experimental system of the broadband tunable fiber laser with eight output ports is built. The experimental results show that the output wavelength range for each output port is 50 nm, which covers the whole C band and extends to S and L bands. The pumping threshold power is 17 mW, the 3 dB linewidth of the output laser is less than 0.02 nm, and the side mode suppression ratio is greater than 50 dB in the whole band. The stability of the laser output is measured within 100 min. The results show that the power fluctuation is less than 0.4 dB, and the wavelength jitter is less than 0.02 nm.

**Key words** lasers; fiber laser; digital micromirror device; tunable optical filter; multi-port tunable laser

**OCIS codes** 060.3510; 140.3550; 230.3990

## 1 引言

光纤激光器因在高分辨率光谱学、微波光子学、

光子器件表征、光纤传感、光信息处理、波分复用光通信系统等领域具有非常广阔的应用前景而备受关注。在光通信领域,密集波分复用(DWDM)技术应

收稿日期: 2018-01-09; 收到修改稿日期: 2018-01-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(61627814,61675238)

作者简介: 张策(1990—),男,硕士研究生,主要从事激光物理方面的研究。E-mail: cezhang@aliyun.com

导师简介: 陈根祥(1965—),男,博士,教授,主要从事光通信、光纤器件、半导体光电子器件物理学等方面的研究。

E-mail: gxchen\_bjtu@163.com(通信联系人)

用广泛,它的迅速发展使得通信光网络面临着一系列新问题。为了保证整个通信系统有足够的可利用波长,中心局端和光网络单元需要大量的激光光源,倘若大量使用常规的半导体激光器,将会增加整个信息交换单元的复杂度。为了解决这一问题,可以采用半导体激光器阵列,也可以采用可调谐光纤激光器。但是由于每个半导体激光器只能输出一个波长,若增加信道数量就必须增加组成阵列的激光器数量,而这将会导致系统建造和运行成本增加以及系统复杂化。因此,具有多个输出端口且各端口输出波长均可实现大范围快速调谐的激光光源在密集波分复用光通信网络中具有巨大的潜在应用价值。

目前,对可调谐光纤激光器的研究主要集中在不同的可调谐光学滤波器作为波长调谐元件,以及通过腔内滤波的方式实现激光器输出波长的调谐等方面。常用的腔内光学滤波器包括光纤布拉格光栅<sup>[1-3]</sup>、光纤型 F-P 腔<sup>[4]</sup>、光纤 Sagnac 环滤波器<sup>[5-7]</sup>、M-Z 干涉仪<sup>[8-9]</sup>等,这些滤波方法普遍存在波长调谐精度、波长调谐范围和调谐速度等方面的问题。针对这些问题,本文提出并实现了一种基于数字微镜元件(DMD)的具有多对输入、输出端口,并可实现波长大范围程控快速调谐的可调谐光学滤波器,并以该滤波器为波长调谐元件搭建了具有多个激光输出端口的宽带可调谐光纤激光器。

## 2 器件的结构和原理

DMD 是基于大规模集成电路技术制成的数字化显示器件,目前广泛应用于光学成像和投影技术领域,由众多的微反射镜阵列构成,在本实验中用作空间光学滤波器件。相比于液晶空间光调制器,DMD 具有衍射效率高、偏振不相关、开关速度快等

优点<sup>[10]</sup>。DMD 中的每一个微反射镜元都有一组独立的驱动电极,通过对微镜元施加寻址电压可以独立驱动任意一个微镜元沿对角线翻转 $\pm 12^\circ$ 角。当加载寻址电压使微镜元的若干列发生 $+12^\circ$ 翻转时(称之为“开态”),其他微镜元均处于 $-12^\circ$ 的“关态”,那么这几列 $+12^\circ$ 翻转的微镜元就构成了类似于闪耀光栅的结构,当入射光以闪耀角入射时,将会产生一级闪耀。本实验选用标准 $0.55''$ DMD,芯片由 $1024 \times 768$ 个微反射镜组成,每一个微反射镜的大小为 $10.8 \mu\text{m} \times 10.8 \mu\text{m}$ 。当入射光以闪耀角入射时,理论上可计算出这款 DMD 仅有一个多光束极大值,并且接近闪耀条件<sup>[11]</sup>。另外,由于 DMD 中的每个像素都可以独立驱动,且互不干扰,因此可以通过加载不同闪耀光栅结构来实现对光波的灵活有效调制,从而达到任意通道输出任意波长的目的。

在本实验之前,本课题组曾实现了基于 DMD 的三通道可调谐光纤激光器<sup>[12]</sup>。由于三通道激光器使用 3 个双尾纤准直器,通道间隔宽,使得 DMD 有效工作区的利用率较低,因此本实验选用八通道准直器阵列,通道间隔为 $2.4 \text{ mm}$ ,大大提高了 DMD 有效工作区的利用率。此外,三通道激光器使用 3 个掺铒光纤放大器(EDFA)作为增益器件,而本实验如果仍选用 8 个 EDFA 作为增益器件,将会使整个系统极其庞大,因此本实验选用掺铒光纤作为增益介质,采用 4 个高功率抽运源同时抽运 8 个环形腔的方式,有效缩小了整个系统的体积。

实验装置如图 1(a)所示,该激光器由一个光纤光学系统和一个体光学系统构成。光纤光学系统包括 8 个波分复用器(WDM)、8 段高掺杂铒光纤(EDF)、8 个环形器、8 个隔离器、8 个分光比为 $90:10$ 的耦合器和 1 个八通道准直器阵列,这些器件

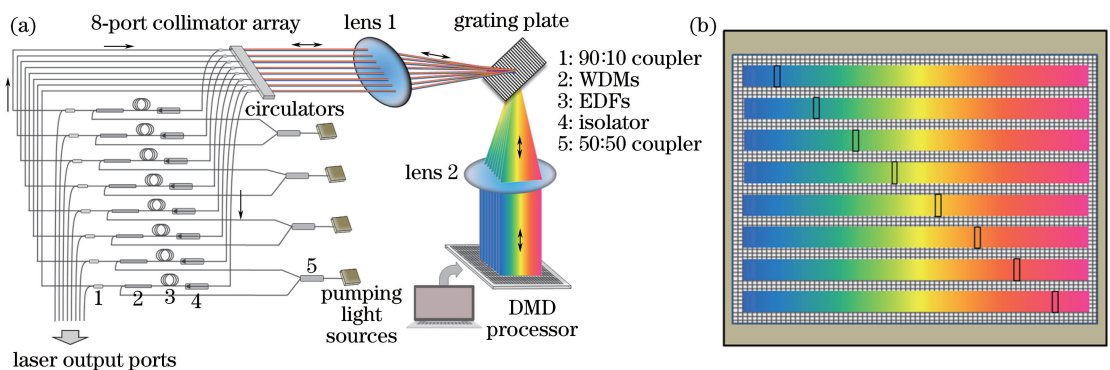


图 1 (a)多端口可调谐光纤激光器的基本组成和工作原理示意图;(b) DMD 芯片上八通道色散光分布示意图

Fig. 1 (a) Basic composition and working principle schematic of multi-port tunable fiber laser;

(b) distribution schematic of 8-port dispersion in DMD chip

共同构成了八通道环形光纤谐振腔;体光学系统包括1个透射光栅、1个DMD处理器、2块透镜,这些器件共同构成了体光学空间滤波系统。其中起到滤波作用的核心器件是DMD处理器,由于每一个微镜元都可以通过加载寻址电压独立驱动,因此将DMD分成8个工作区域,如图1(b)所示,每个区域分别独立调控一路激光选频。

理论上,DMD有效工作区越大,准直器阵列端口越多,可实现的激光通道也就越多。目前可以得到的0.5" DMD有效工作区域有限,为了最大限度地利用DMD的有效工作区,并防止通道之间相互串扰,选用了焦距3:1的4*f*系统。整个系统将8路光束有序排列在DMD芯片上,如图1(b)所示,通过调节每一条光谱带上不同位置的像素发生翻转来实现滤波作用。

实验中使用了4个最大输出功率为400 mW的980 nm抽运源,通过1个耦合器把抽运光平均分成2路,分别抽运2个环形腔。当抽运光经过WDM反向耦合进入掺铒光纤后,铒离子吸收抽运光产生的自发辐射谱在隔离器的限制下单向传输至90:10

的耦合器;90%的光传输至八通道准直器阵列,再经由透镜1聚焦在966 line/mm的光栅上,并且在第1衍射级次方向上产生色散;色散光再经透镜2被整形成为平行光照射在DMD上。如图1(b)所示,每一路光将有序分布在DMD有效工作区,不同的波长也将落在不同的像素区域。将DMD和计算机连接,通过给DMD某个条形工作区的不同像素区加载调制电压,使该区域像素发生偏转,使其所对应的波长经过空间光学系统原路反向传输<sup>[11-12]</sup>,并耦合到八通道准直器阵列对应的端口中,经过环形器后将挑选出来的信号光传输至铒光纤内受激辐射放大。经过多次循环稳定之后,最终将激光输出的10%作为激光输出。

### 3 理论模型与数值分析

实验中采用980 nm波长的光作为抽运源,对铒离子采用三能级系统进行分析。在光纤内铒离子呈轴对称均匀分布的近似情况下,以行波模型为基础<sup>[13-15]</sup>分析掺铒光纤中的光场分布。行波方程表示为

$$\frac{dN_2(z)}{dt} = \frac{\Gamma_p \sigma_{pa} P_p(z)}{Ah\nu_p} [N - N_2(z)] - \int g [N_2(z), \nu] \frac{P_{ASE}^+(z, \nu) + P_{ASE}^-(z, \nu)}{Ah\nu} d\nu - \frac{N_2(z)}{\tau}, \quad (1)$$

$$\frac{dP(z)}{dz} = -\Gamma_p \sigma_{pa} [N - N_2(z)] P_p(z), \quad (2)$$

$$\pm \frac{dP_{ASE}^\pm}{dz} = g [N_2(z), \nu] [P_{ASE}^\pm(z, \nu) + 2n_{sp}(z)h\nu], \quad (3)$$

式中: $n_{sp} = \frac{N_2(z)}{(1+\eta)N_2(z) - \eta N}$ 为粒子数反转因子; $N_2(z)$ 为在光纤 $z$ 点处处于上能级的粒子数密度分布; $N$ 为掺铒光纤中的铒离子密度分布; $\eta$ 为受激吸收截面 $\sigma_a(\nu)$ 与受激辐射截面 $\sigma_e(\nu)$ 的比值; $g [N_2(z), \nu] = \Gamma_p \sigma_e(\nu) [(1+\eta_\nu)N_2(z) - \eta_\nu N]$ 为频率为 $\nu$ 的光场在 $z$ 点处的增益系数, $\eta_\nu = \sigma_a(\nu)/\sigma_e(\nu)$ ; $\sigma_a(\nu)$ 为铒离子对频率为 $\nu$ 的光子的受激吸收截面; $\sigma_e(\nu)$ 为铒离子对频率为 $\nu$ 的光子的受激辐射截面; $\nu$ 为自发辐射光的频率; $\Gamma_p$ 为抽运光在铒掺杂区域的功率限制因子; $\sigma_{pa}$ 为抽运光的吸收截面; $A$ 为光纤中铒离子有效掺杂区域的横截面积; $h$ 为普朗克常数; $P_p(z)$ 和 $P_{ASE}^+(z, \nu)$ 、 $P_{ASE}^-(z, \nu)$ 分别为

抽运光和放大的自发辐射谱在 $z$ 点处的光功率; $\nu_p$ 为抽运光的频率; $\tau$ 为上能级铒离子的平均寿命。(1)式是掺铒光纤中的粒子数速率方程,(2)~(3)式分别表示抽运光、自发辐射谱在 $z$ 点处的光功率满足的关系式。

在真实的情况下,从抽运开始到实现稳定激光输出的过程中,铒光纤内抽运光功率、自发辐射谱功率以及上能级粒子数密度沿着光纤轴向的分布并不是均匀的。为了分析铒光纤的整个增益谱对激光器的影响,将整个增益谱分割成 $k$ 个相等的频率间隔,并且将铒光纤分成 $M$ 段, $M$ 越大,每一小段上的铒离子的浓度越接近均匀分布。因此将(1)~(3)式数值化为

$$N_{2,i,j+1} = N_{2,i,j} + \left[ W_{p,i,j} (N - N_{2,i,j}) - \sum_{k=1}^K g_{i,j,k} W_{ASE,i,j} - \frac{N_{2,i,j}}{\tau} \right] \Delta t, \quad (4)$$

$$P_{p,i+1,j+1} = P_{p,i,j} \exp[-\Gamma_p \sigma_{pa} (N - N_{2,i,j}) \Delta z], \quad (5)$$

$$P_{ASE,i+1,j+1,k}^+ = P_{ASE,i,j,k}^+ \exp(g_{i,j,k} \Delta z) + 2n_{sp,i,j,k} h\nu_k [\exp(g_{i,j,k} \Delta z) - 1] \Delta \nu, \quad (6)$$

$$P_{ASE,i,j+1,k}^- = P_{ASE,i+1,j,k}^- \exp(g_{i,j,k} \Delta z) + 2n_{sp,i,j,k} h\nu_k [\exp(g_{i,j,k} \Delta z) - 1] \Delta \nu, \quad (7)$$

式中:  $W_{p,i,j} = \frac{\Gamma_p \sigma_{pa}}{Ah\nu_p} \frac{P_{p,i-1,j} + P_{p,i,j}}{2}$ ;  $W_{ASE,i,j} = \frac{1}{Ah\nu_s} \sum_{\xi=\pm} \frac{P_{ASE,i-1,j}^{\xi} + P_{ASE,i,j}^{\xi}}{2}$ ;  $k$  为最大频率间隔数;  $\tau$  为铷离子的热弛豫时间;  $\Delta t$  为采样时间间隔;  $\Delta z$  为每段掺铷光纤的长度;  $\Delta \nu$  为频率间隔;  $\nu_k$  为第  $k$  个中心频率;  $\xi$  为沿正负两个方向传播的自发辐射谱。

为求解(4)~(7)式需要建立边界条件。如图1(a)所示,在隔离器的限制下,光只能沿着隔离器的方向单向传输。结合激光器的实际结构和参数,并考虑反向抽运,  $t=0$  时刻的边界条件如下:  $N_{2,m}=0, P_{p,m}=0, P_{ASE,m}^+=0 (m=1,2,\dots,M)$ 。

结合边界条件,使用 MATLAB 对(4)~(7)式进行仿真。其中使用的主要物理参数为:抽运功率  $P=200$  mW, 铷光纤长度  $L=2.5$  m, 铷离子的辐射与吸收截面取自文献[16]; 根据实验中所使用的铷光纤在 1530 nm 处的峰值吸收(30.87 dB)计算得到光纤内铷离子浓度约为  $5 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ ; DMD 宽带可调滤波器的滤波特性以及铷光纤与普通单模光纤间的接续损耗均采用实验测量结果(见第4节)。激光波长为 1550 nm 时,激光器输出光功率随抽运功率变化的数值分析结果如图2所示。由图2可见,激光器的阈值抽运功率约为 16 mW,内嵌图显示了激光器发生激射之前的输出光功率随抽运光功率的变化。由内嵌图可见,激光器发生激射之前,输出光功率随抽运光功率变化得非常缓慢。在抽运功率为 200 mW 的情况下,激光器输出波长在 1516~1573 nm 范围内调谐时的数值仿真结果如图3所示。

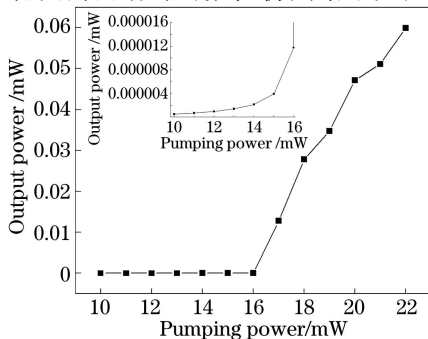


图2 波长 1550 nm 处激光器输出功率随抽运功率变化的仿真结果

Fig. 2 Simulation result of laser output power changing with pumping power at wavelength of 1550 nm

结果表明,激光器的输出功率在 1516~1573 nm 波长内基本保持一致,边模抑制比均大于 50 dB,输出波长范围大于 50 nm,能够完整地覆盖整个 C 波段,并分别向左、右延伸至 S 波段和 L 波段。

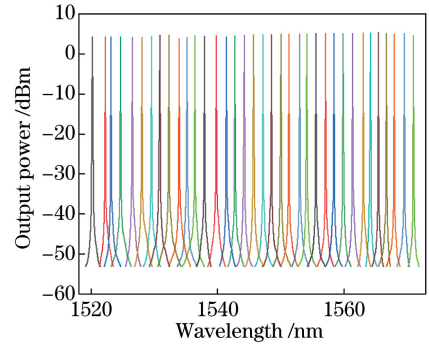


图3 抽运功率为 200 mW 时激光器波长调谐特性的仿真结果

Fig. 3 Simulated wavelength tuning characteristics of laser at pumping power of 200 mW

## 4 实验结果

通过实验测量得到了体光学部分的插入损耗为 11.2 dB,这些损耗主要来源于透镜的反射损耗、透射光栅的衍射损耗和 DMD 的衍射损耗<sup>[10-11]</sup>; 光纤光学部分损耗主要来源于铷光纤与普通单模光纤的熔接损耗,高掺杂的铷光纤模场直径为  $4.9 \mu\text{m}$ ,普通单模光纤模场直径为  $10.5 \mu\text{m}$ ,熔接时由于模场失配会产生较大的损耗,但是可以通过增加放电时间、降低预熔功率、修改重叠量来达到最佳的熔接效果(实验用光纤熔接机为 Fujikura ESM-100P)。通过 1310 nm 的监测光测得经参数优化熔接后获得的模场失配损耗为 1.85 dB。

图4是当铷光纤长度  $L=2.5$  m,抽运功率  $P=200$  mW 时,从掺铷光纤输出的放大自发辐射(ASE)谱;内插图是 ASE 经过 DMD 滤波系统后的输出谱,即 DMD 光学滤波系统的滤波特性,输出的峰值功率为  $-42.718$  dBm。该峰值功率与抽运功率和 DMD 上加载的像素数量有关,考虑到激光器达到饱和和稳态输出所需抽运功率的限制,实验中可以调节的只有 DMD 上加载的像素数量。在保持抽运功率不变的情况下,随着加载像素数量增加,返回到环形谐振腔中的频率数量也会随之增加,这将会

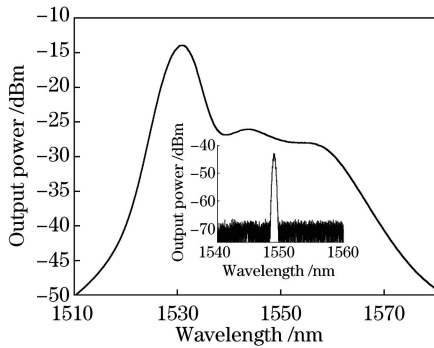


图4 抽运功率为200 mW时掺铒光纤的ASE谱  
(内插图是ASE经过可调谐DMD滤波系统的输出谱)

Fig. 4 ASE spectrum of erbium doped fiber at pumping power of 200 mW (insertion is the output spectrum of ASE filtered by tunable DMD optical filter system)

导致激光器产生严重的模式竞争问题,所以综合考虑上述因素,本实验选择加载7列像素。

图5是将DMD滤波器输出端与铒光纤输入端连接形成环形腔激光器后测量的激光器输出光功率随抽运光功率的变化,可以看出:当激光器的抽运功率小于17 mW时,输出光功率随着抽运功率增加的变化非常缓慢;当抽运功率达到17 mW时,激光器发生激射(抽运源的功率调谐精度为1 mW),这与理论仿真结果基本吻合。图6是200 mW抽运功率下激光器输出光谱的测量结果,激光输出中心波长 $\lambda=1550.3744$  nm,光谱仪上所显示的3 dB带宽为0.0159 nm(实验所用光谱仪为YOKOGAWAAQ6370C,分辨率为0.02 nm),边模抑制比(SMSR)大于50 dB。由此可见,基于DMD的可调谐掺铒光纤激光器具有较低的抽运阈值、较窄的线宽和较大的边模抑制比。

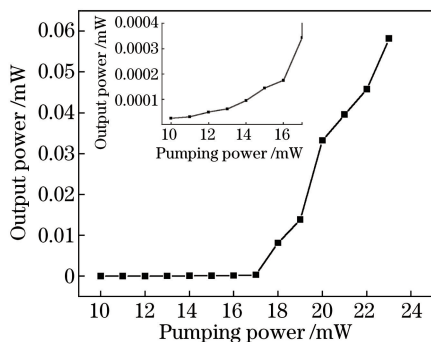


图5 激光器输出光功率随抽运功率变化的实验结果  
Fig. 5 Experimental result of laser output power changing with pumping power

图7为激光器在200 mW抽运功率下测量的第5端口的波长调谐特性。从图7中可以看出,输出波长覆盖了1520~1570 nm波段,完整覆盖了C波

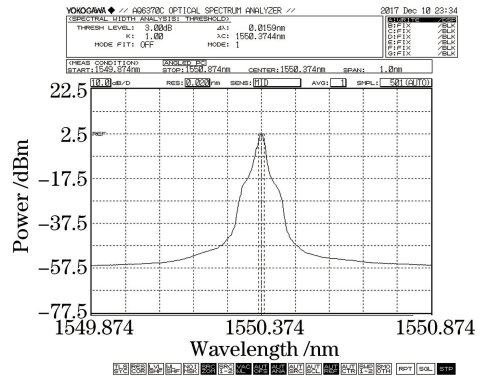


图6 200 mW抽运功率下激光器输出光谱的实验测量结果  
Fig. 6 Experimental laser output spectrum at pumping power of 200 mW

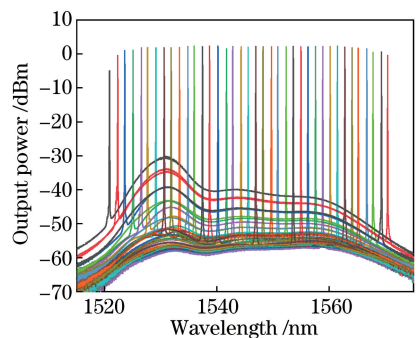


图7 在200 mW抽运功率下激光器第5端口输出激光的波长调谐特性

Fig. 7 Wavelength tuning characteristics of laser output by the 5th port at pumping power of 200 mW

段,并向左、右延伸到了S波段和L波段;C波段内各波长的输出功率基本保持一致,整个C波段内各个波长的边模抑制比均大于50 dB。图8是抽运功率为200 mW时,激光器各个端口任意波长的输出特性对比。从图8中可以看出,各个端口的输出功率具有良好的一致性,边模抑制比也均大于50 dB。图9为激光器在1550 nm附近精细调节的输出特性,调谐精度小于0.02 nm。这是由光栅色散能力、第2个透镜焦距和DMD像素共同决定的。ASE谱经过光栅之后的色散展宽越宽,第2个透镜的焦距越长,最终排列在DMD上的不同频率光斑的重叠量也就越小,从而可以实现更加精细的调谐精度。另外,因DMD像素的限制,像素越小,能够分辨的波长就精细,从而更利于实现精细调谐。但是本实验考虑到空间光学系统的结构,为了使光能够原路返回,并且将更多的能量集中在衍射第一级次上,发现只有0.55"的DMD符合条件<sup>[10]</sup>,因此暂时不考虑像素对调谐精度的影响。图10是激光器各个输出端口在100 min之内的功率稳定性,实验结果显示,

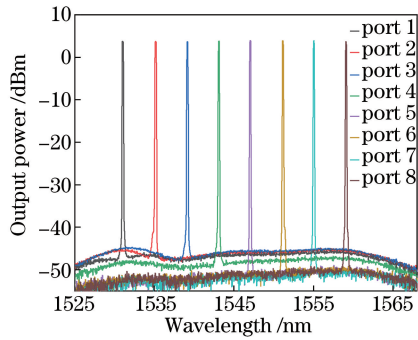


图 8 在 200 mW 抽运功率下激光器各输出端口的输出特性

Fig. 8 Output characteristic of each output ports at pumping power of 200 mW

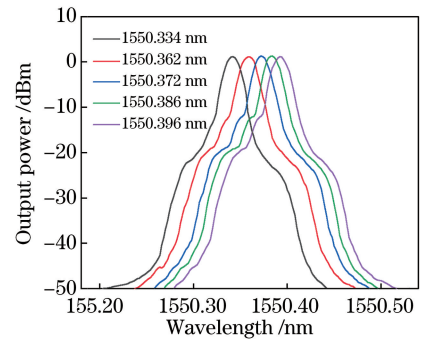


图 9 在 1550 nm 附近, 激光器精细调节特性的实验结果

Fig. 9 Experimental fine tuning characteristics of laser near wavelength of 1550 nm

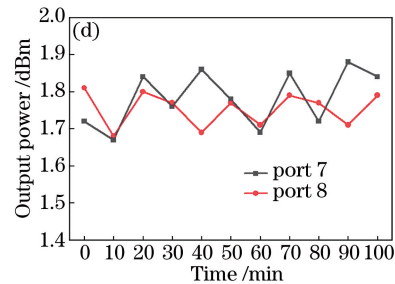
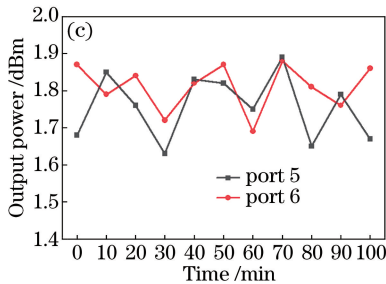
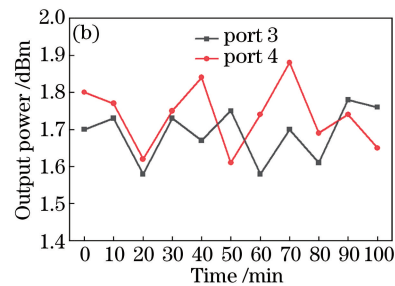
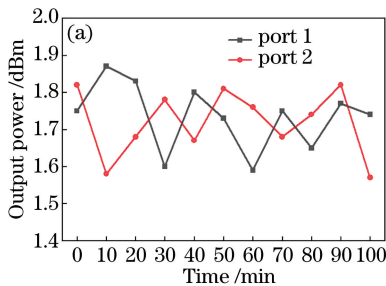


图 10 激光器各输出端口在 100 min 之内功率稳定性的实验结果。

(a) 端口 1 和端口 2; (b) 端口 3 和端口 4; (c) 端口 5 和端口 6; (d) 端口 7 和端口 8

Fig. 10 Experimental power stability of each output port of laser within 100 min.

(a) Port 1 and port 2; (b) port 3 and port 4; (c) port 5 and port 6; (d) port 7 and port 8

各通道的输出功率波动范围均小于 0.4 dB。图 11 是激光器各个输出端口在 100 min 之内任意波长的输出稳定性, 图中各个通道任意波长中心的抖动范围小于 0.02 nm, 具有良好的稳定输出特性。

## 5 结 论

研究了一种基于 DMD 实现滤波功能的多端口宽带连续可调谐掺铒光纤激光器。相比于传统的光纤激光器, 该激光器的单路设计原理与常见的光纤激光器原理相同, 但其巧妙地利用了 DMD 芯片的灵活性, 通过合理的空间光学系统设计, 实现了仅使用一块 DMD 芯片就可以同时独立、灵活、稳定地调谐多路激光输出。选用了八通道准直器阵列作为光纤光学系统和体光学系统的耦合接口, 空间结构紧

凑; 光纤光学系统摒弃了使用商品化 EDFA 作为增益器件的方案, 改用高浓度掺杂铒光纤作为增益介质和抽运分光技术, 有效减少了所需抽运激光器的数量, 从而大幅度缩小了激光器的体积, 有利于实现体积小、稳定性高的多通道可调谐掺铒光纤激光器。

实验研究结果表明: 该激光器具有非常低的抽运阈值, 当抽运光功率达到 17 mW 时, 激光器就可以发生激射; 并且该激光器的每个通道均可以独立实现 1520~1570 nm 范围内连续波长调谐, 调谐精度可以达到 0.02 nm。整个 C 波段内的输出激光边模抑制比均大于 50 dB, 3 dB 带宽均小于 0.02 nm; 并且整个 C 波段内各个波长的输出功率具有高度的一致性。激光器能够保持连续稳定输出, 功率浮动不过 0.4 dB, 中心波长抖动小于 0.02 nm。

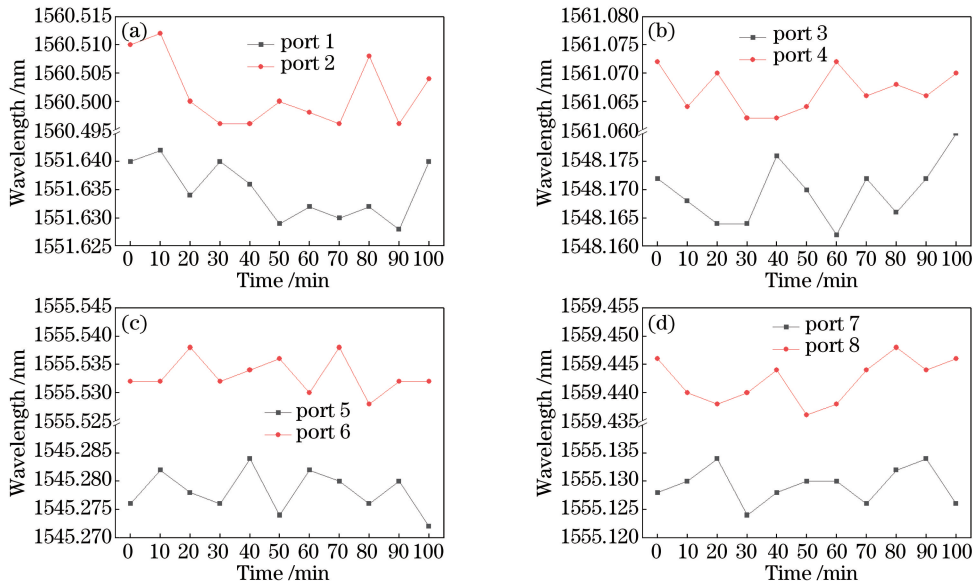


图 11 各激光输出端口在 100 min 内输出波长稳定性的实验测量结果。

(a) 端口 1 和端口 2; (b) 端口 3 和端口 4; (c) 端口 5 和端口 6; (d) 端口 7 和端口 8

Fig. 11 Experimental output wavelength stability of each laser port within 100 min.

(a) Port 1 and port 2; (b) port 3 and port 4; (c) port 5 and port 6; (d) port 7 and port 8

该激光器具有较宽的输出谱、较窄的线宽、稳定的输出功率和灵活的调谐方式,因此可以作为光通信的一个理想光源技术方案。事实上,这种调谐机制可以广泛应用在不同波段的光纤激光器中,可进一步推动光纤激光器在光纤通信、光纤传感、光电检测等领域的应用。

对于密集波分复用光网络系统、多波长分布式光传感网络等很多应用场景而言,进一步增加这种多端口激光器的端口数量具有十分重要的技术意义和 market 价值。在原理上,采用所描述的技术方案可以用一个 DMD 芯片实现数十个端口的可调谐激光输出,但需要对输入/输出光纤端口阵列以及 DMD 可调谐光学系统的光学成像质量和光斑控制技术进行更进一步的深入研究和优化设计,这也是本课题组正在努力的方向。

## 参 考 文 献

- [1] Spiegelberg C, Geng J, Hu Y, *et al.* Low-noise narrow-linewidth fiber laser at 1550 nm (June 2003) [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(1): 57-62.
- [2] Liu X, Yang X, Lu F, *et al.* Stable and uniform dual-wavelength erbium-doped fiber laser based on fiber Bragg gratings and photonic crystal fiber [J]. *Optics Express*, 2005, 13(1): 142-147.
- [3] Liu X M. A novel dual-wavelength DFB fiber laser based on symmetrical FBG structure [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(9): 632-634.
- [4] Yeh C H, Shih F Y, Wang C H, *et al.* Cost-effective wavelength-tunable fiber laser using self-seeding Fabry-Perot laser diode [J]. *Optics Express*, 2008, 16(1): 435-439.
- [5] Shu X W, Jiang S, Huang D X. Fiber grating Sagnac loop and its multiwavelength-laser application [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, 12(8): 980-982.
- [6] Chen D. Stable multi-wavelength erbium-doped fiber laser based on a photonic crystal fiber Sagnac loop filter [J]. *Laser Physics Letters*, 2007, 4(6): 437-439.
- [7] Mirza M A, Stewart G. Theory and design of a simple tunable Sagnac loop filter for multiwavelength fiber lasers [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(29): 5242-5252.
- [8] Luo A P, Luo Z C, Xu W C. Tunable and switchable multiwavelength erbium-doped fiber ring laser based on a modified dual-pass Mach-Zehnder interferometer [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(14): 2135-2137.
- [9] Chieng Y T, Minasian R A. Tunable erbium-doped fiber laser with a reflection Mach-Zehnder interferometer [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1994, 6(2): 153-156.
- [10] Xiao F, Alameh K, Lee T. Opto-VLSI-based tunable

- single-mode fiber laser[J]. *Optics Express*, 2009, 17(21): 18676-18680.
- [11] Chen X, Yan B B, Song F J, *et al.* Diffraction of digital micromirror device gratings and its effect on properties of tunable fiber lasers[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(30): 7214-7220.
- [12] Ai Q, Chen X, Tian M, *et al.* Multi-channel C-band-tunable fiber lasers based on digital-micromirror-device processor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0414001.  
艾琪, 陈笑, 田森, 等. 基于数字微镜器件的多通道 C 波段可调谐光纤激光器[J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 0414001.
- [13] Desurvire E, Simpson J R. Amplification of spontaneous emission in erbium-doped single-mode fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1989, 7(5): 835-845.
- [14] Giles C R, Desurvire E. Modeling erbium-doped fiber amplifiers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1991, 9(2): 271-283.
- [15] Cowie G J, Yu D, Chieng Y T. Brillouin/erbium fiber lasers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(7): 1198-1204.
- [16] Fu S. Theoretical study of nonlinear polarization rotation mode-locked fiber laser[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.  
付思. 非线性偏振旋转锁模光纤激光器的理论研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.