

基于中阶梯光栅的高分辨率可调谐光纤激光器

马成, 李金亮, 陈笑*, 戴德政, 于笑渊, 孙洁, 张佳, 陈根祥

中央民族大学理学院, 北京 100081

摘要 提出一种基于中阶梯光栅和数字微镜器件(DMD)的高分辨率 C 波段可调谐光纤激光器。利用 DMD 的灵活波长调谐性能和阶梯光栅的高分辨率特性,在该激光器中设计了具有交叉色散结构的光路准直系统,实现了激光器高精度波长调谐功能。研究表明:通过在 DMD 上远程加载全息图,该激光器可实现 1542~1558 nm 波长范围内的灵活调谐,调谐精度为 0.036 nm,输出信号的 3 dB 线宽小于 0.02 nm,边模抑制比超过 40 dB。在室温下,1 h 内信号中心波长的漂移小于 0.013 nm,功率涨落小于 0.07 dB。

关键词 激光器; 光纤激光器; 可调谐激光器; 中阶梯光栅; 数字微镜器件

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1014001

High-Resolution Tunable Fiber Laser Based on Echelle Grating

Ma Cheng, Li Jinliang, Chen Xiao*, Dai Dezheng, Yu Xiaoyuan,

Sun Jie, Zhang Jia, Chen Genxiang

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

Abstract Herein, we propose a high-resolution C-band tunable fiber laser based on an echelle grating and a digital micromirror device (DMD). By employing the wavelength tuning performance of DMD and the high-resolution characteristics of an echelle grating, we design a cross-dispersion structure based optical alignment system, realizing the high-resolution wavelength tuning capability. Experimental results show that the laser demonstrates flexible tuning in 1542-1558-nm region by remotely loading holograms onto the DMD. The wavelength tuning resolution is approximately 0.036 nm, and the 3-dB linewidth of the output signal is less than 0.02 nm. The side-mode suppression ratio exceeds 40 dB, the center wavelength drift is less than 0.013 nm, and the power fluctuation is less than 0.07 dB within 1 h at room temperature.

Key words lasers; fiber lasers; tunable lasers; echelle grating; digital micromirror device

OCIS codes 140.3500; 140.3600; 230.1950; 050.1950

1 引 言

随着大容量光通信网络的发展和密集波分复用技术的广泛应用,多通道高精度可调谐光纤激光器成为人们的研究热点。这类激光器不仅有效减少了波分复用系统转换器、激光器以及其他模块的使用数量,降低了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,为信号传输带来前所未有的灵活性和动态性能。此外,可调谐激光器在光载射频传输系统、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较高的潜在应用价值。

目前,对多波长可调谐光纤激光器的研究主要

集中在调谐方式、调谐精度、输出功率以及稳定性等方面。为了达到上述要求,国内外的研究人员对可调谐激光器的调谐机制进行了大量的探索和尝试,并取得了丰硕的成果。目前激光波长调谐器件主要包括光纤 Bragg 光栅、光纤型法布里-珀罗(F-P)腔、声光可调光学滤波器、高双折射 Sagnac 光纤干涉仪、基于光波导的马赫-曾德尔干涉仪、数字微镜器件(DMD)、铁电液晶和硅基液晶(LCoS)空间光调制器等。例如光纤 Bragg 光栅在直流电驱动下可以实现 0.2 nm/V 的调谐精度^[1]。光纤型 F-P 腔可实现在 1534~1561 nm 波长范围内的调谐,调谐精度为 1.38 nm^[2]。声光可调谐滤波器应用在 WDM 系统中可实现 0.75 nm@1550 nm 的调谐精度^[3]。

收稿日期: 2019-05-05; 修回日期: 2019-06-02; 录用日期: 2019-06-10

基金项目: 国家重大科研仪器研制项目(61627814)

* E-mail: xchen4399@126.com

Ding 等^[4]采用马赫-曾德尔干涉法实现了精度为 0.6 nm 的小范围调谐。Parker 等^[5]利用铁电液晶实现了调谐精度为 1.3 nm@1528.6~1567.1 nm 的滤波器。2009 年,Shin 等^[6]利用 DMD 处理器搭建了调谐精度为 0.1 nm 的激光系统,并将其应用于时域反射仪中;同年,Xiao 等^[7]提出基于 LCoS 的单模激光器,实现了 0.05 nm 的调谐精度。

本课题组^[8]在前期研究中提出了基于 DMD 的多端口 C 波段可调谐光纤激光器,调谐精度为 0.055 nm。为了进一步提升波长调谐精度,本课题组在系统中引入中阶梯光栅。中阶梯光栅是一种刻线数较少的闪耀粗光栅,其刻线数一般在 30~100 line/mm,闪耀角度为 45°~76°,具有优良的波长分辨能力。目前,中阶梯光栅主要应用在紫外和可见光波段的高端光谱仪中,与传统的光谱仪相比,中阶梯光谱仪具有高分辨率、高衍射效率、宽波段和全光谱直读等特点^[9-11]。因为中阶梯光栅主要工作在高阶次,衍射角范围窄,导致衍射级次重叠,所以通常需要配合使用色散光栅或棱镜进行交叉色散和级次分离,最终形成二维色散光谱。目前,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、天津大学等课题组在中阶梯光谱仪方面做了大量工作^[12-13]。本文通过将中阶梯光栅应用在基于 DMD 的 C 波段可调谐激光器,设计出一种适用于闭环激光系统的交叉色散结构的高分辨率可调谐光纤激光器。该激光器在 C 波段内的调节精度达到 0.036 nm,3 dB 线宽小于 0.02 nm,边模抑制比为 40 dB,室温下 1 h 内激光输出功率涨落小于 0.07 dB,波长漂移小于 0.013 nm。

2 激光器基本原理

2.1 中阶梯光栅的工作条件

中阶梯光栅的光谱分布是多缝干涉和单缝衍射相互调制的结果。中阶梯光栅方程可表示为

$$m\lambda = d(\sin \alpha + \sin \beta)\cos \gamma, \quad (1)$$

式中: m 为衍射级次; λ 为波长; d 为光栅常数; α 为入射角; β 为衍射角。图 1 中, θ 为入射光线在 yz 平面上的投影与 z 轴的夹角, θ_B 为光栅闪耀角, N 为光栅法线, γ 为中阶梯光栅截面与入射光线夹角(离轴角)。此时入射角表示为

$$\alpha = \theta_B + \theta, \quad (2)$$

其中衍射角表示为

$$\beta = \theta_B - \theta. \quad (3)$$

将(2)式和(3)式代入(1)式,可得到中阶梯光栅方程

$$m\lambda = 2d \sin \theta_B \cos \gamma \cos \theta. \quad (4)$$

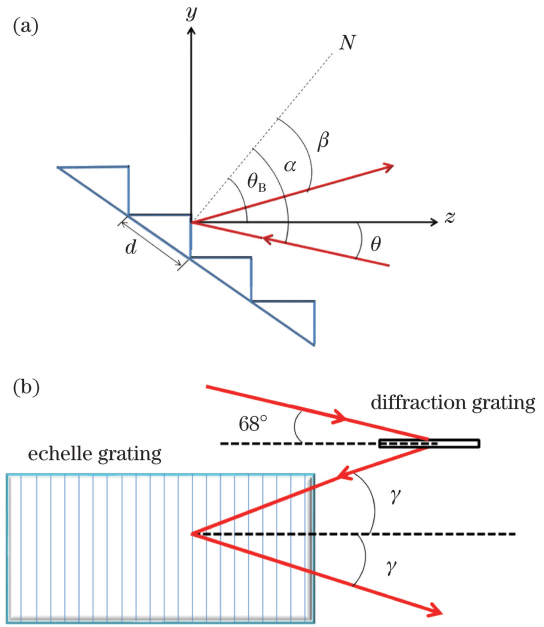


图 1 中阶梯光栅工作示意图。(a)角度分布;
(b)离轴角 γ

Fig. 1 Working schematics of echelle grating.

(a) Angle distribution; (b) off-axis angle γ

中阶梯光栅在满足 Littrow 条件,即以闪耀角 $\theta_B = \alpha = \beta$ 入射时,单级次色散角度最大,衍射效率最高。在闪耀角两侧,随着 θ 的增大,光栅的衍射效率迅速降低。但严格的 Littrow 条件给实际光路的安排造成了较大困难,因此通常采用入射光线与光栅主截面成 γ 角(离轴角)的准 Littrow 结构,即:

$$\theta = 0, \gamma \neq 0. \quad (5)$$

最终工作在准 Littrow 条件下的中阶梯光栅方程为

$$m\lambda = 2d \sin \theta_B \cos \gamma. \quad (6)$$

在实验中,选取刻线数为 79 line/mm 的中阶梯光栅,设定闪耀参数 $m = 15, \lambda = 1550 \text{ nm}, \theta_B = 75^\circ$, 计算求得准 Littrow 条件下的离轴角 $\gamma = 18.05^\circ$ 。此外,中阶梯光栅的其他特征参数表示如下:

自由光谱范围为

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{m} = \frac{\lambda^2}{2d \sin \theta_B \cos \gamma}, \quad (7)$$

角色散率为

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{2 \tan \theta_B}{\lambda}, \quad (8)$$

单级次色散角范围为

$$\Delta\theta = \Delta\lambda \frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{2 \tan \theta_B}{m}. \quad (9)$$

从(6)~(9)式可以看出,工作在准 Littrow 条件下的中阶梯光栅具有如下明显特点:

1) 自由光谱范围小,光谱级次严重重叠,因此

需要配合二次色散元件进行交叉色散使用,最终得到二维光谱;

2) 角色散率大,波长分辨能力强;

3) 单个级次的色散角较小,每一级自由光谱范围内的波长都集中在该级次的闪耀波长附近,因此中阶梯光栅可以对全波段闪耀。

2.2 基于交叉色散结构的激光器设计

目前,基于中阶梯光栅的紫外/可见光波段光谱仪大多采用棱镜作为辅色散装置来构建交叉色散结构^[14-15]。本实验所使用的激光器是工作在 C 波段(1530~1560 nm)的闭环结构,因此将 C 波段闪耀的衍射光栅与中阶梯光栅配合使用。交叉色散结构由主截面相互垂直的衍射光栅和中阶梯光栅构成。光束经过衍射光栅后产生横向色散(平行于中阶梯光栅刻线方向),中阶梯光栅对色散后的光束进行垂直方向的二次色散,构成二维光谱图,如图 2 所示。

图 3 所示为包含光纤谐振腔和体光学部分的激光器结构。谐振腔提供光抽运和铷增益,体光学部分可实现交叉色散和选模功能。考虑到衍射光栅为偏振相关器件,偏振控制器的引入有助于调控光束偏振态和腔内损耗,以达到最佳激射。激光系统中,选模由 0.55 inch(1 inch=2.54 cm)的 DMD 芯片实现,其详细工作原理和衍射特性已经在文献[16]中

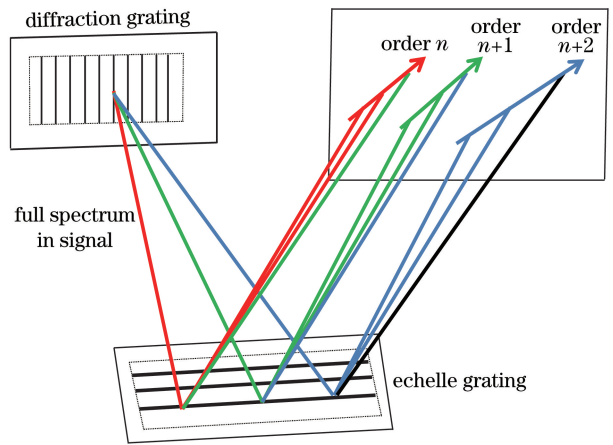


图 2 基于衍射光栅和中阶梯光栅的交叉色散光路

Fig. 2 Light path of cross dispersion based on diffraction grating and echelle grating

阐述。激光器的工作原理为:掺铷光纤放大器(EDFA)发出的 C 波段放大自发辐射谱信号,经过 90:10 的光纤耦合器后,90%的光返回环形腔,并继续通过偏振控制器、环形器和光纤准直器耦合进入体光学部分。体光学部分包括透镜(焦距 $f_0 = 100$ mm)、衍射光栅(1200 line/mm)、中阶梯光栅(79 line/mm)、柱面镜 1(焦距 $f_1 = 150$ mm),柱面镜 2(焦距 $f_2 = 100$ mm)以及 DMD(单像素为 $10.8 \mu\text{m}$)。光纤准直器和衍射光栅分别位于透镜的前后焦面。衍射光栅和中阶梯光栅相距 100 mm,

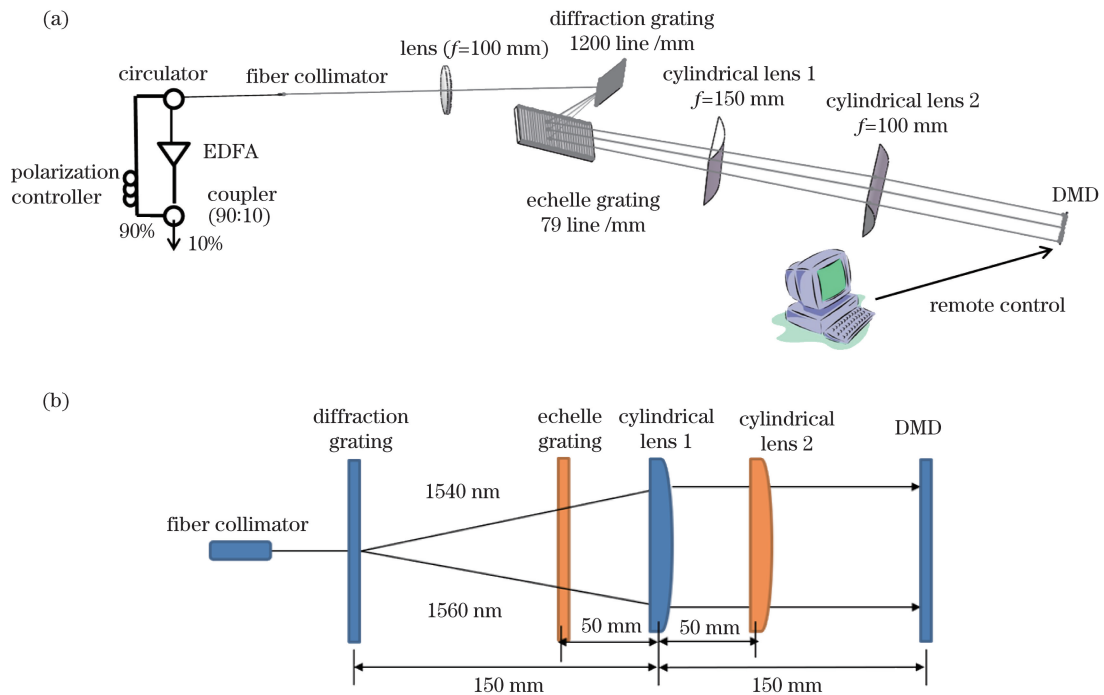


图 3 基于中阶梯光栅的可调谐光纤激光系统。(a)结构示意图;(b)体光学部分光路

Fig. 3 Tunable fiber laser system based on echelle grating. (a) Structural diagram; (b) bulk optics light path

同时为了保证中阶梯光栅工作在准 Littrow 条件, 光线以一定的离轴角 γ 入射, 以保证衍射光束和入射光束在同一水平面内。柱面镜 1 与柱面镜 2 分别放在距离中阶梯光栅 50 mm 和 100 mm 处, 且两柱面镜母线相互垂直, 同时分别对衍射光栅和中阶梯光栅的两个色散方向进行准直。衍射光栅和中阶梯光栅分别位于柱面镜 1、2 的前焦点, DMD 位于两柱面镜的后焦点, 确保二维的自发辐射谱平铺在 DMD 表面。通过在 DMD 上加载全息图, 灵活选择某一波长的光沿原路返回至谐振腔, 而其他波长溢出光学系统, 进而实现选模和波长调谐的目的。

3 实验结果与分析

图 4 为 DMD 上加载的全息示意图, 用以驱动对应 DMD 微镜片(像素)翻转实现选模。典型激光输出信号如图 5 所示, 可以看到, 激光波长为 1546.7 nm, 输出激光功率为 7.5 dBm (EDFA 的抽运功率为 120 mW), 3 dB 线宽小于 0.02 nm (受限于光谱仪分辨率), 边模抑制比超过 40 dB。

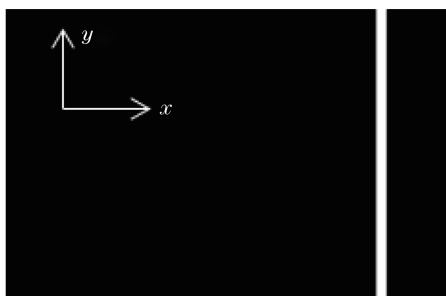


图 4 加载在 DMD 上的全息示意图
Fig. 4 Hologram uploaded onto DMD

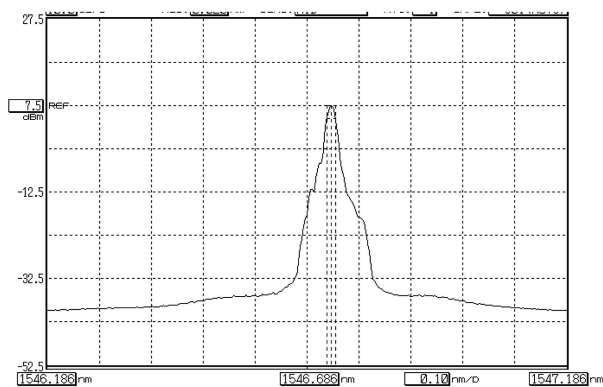


图 5 典型激光输出信号
Fig. 5 Typical signal of laser output

图 6 所示为输出信号的 3 dB 线宽与 DMD 上调制像素数的关系。当环形器与 EDFA 断开时, 系统是开环状态。在开环状态下, 当 DMD 沿 x 方

向的调制像素数为 8~12 时, 滤波信号效果最佳, 3 dB 线宽随着调制像素数的增多而增大。当系统处于闭环状态, 激光信号的 3 dB 线宽在调制像素数小于 12 时基本保持稳定, 不随调谐波长的变化而变化; 当像素数超过 12 时, 信号出现了明显的模式竞争。

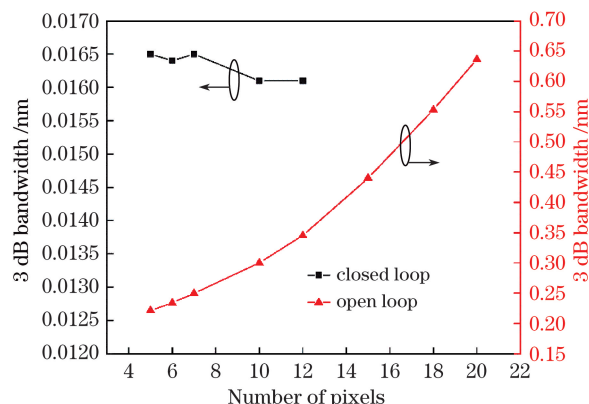


图 6 光学系统分别在闭环和开环下的 3 dB 线宽随 DMD 调制像素数的变化关系

Fig. 6 3 dB width of signal versus modulation pixel number on DMD in closed and open loops

该光纤激光器在 1542~1558 nm 范围内实现了波长可调谐输出, 如图 7(a) 所示, 对应的激光 EDFA 抽运功率为 30 mW。中阶梯光栅的引入使得激光器波长调谐精度达到了 0.036 nm (相当于 2 个像素移动), 如图 7(b) 所示, 相比于文献[7]和文献[8]报道的 0.05 nm 调谐精度有了明显改善。实验中, 中阶梯光栅离轴角也带来了部分彗差、像散以及杂散光, 同时较高的抽运功率引起的自相位调制和非线性效应影响了输出激光的轮廓^[17]。在后续工作中, 将继续优化光学系统结构和器件性能, 以进一步减小杂散光和腔内损耗, 并通过软件动态调控各波长下 EDFA 的抽运功率, 进而达到降低、匀化各波长激光阈值和拓宽波长调谐带宽的目的。

图 8 所示为在抽运功率为 40 mW 的条件下, 中心波长 1546 nm 附近的波长漂移和峰值功率涨落的分布。在室温条件下, 激光器在 1 h 内的最大波长漂移小于 0.013 nm, 最大功率涨落为 0.07 dB。

4 结 论

提出一种基于 DMD 和中阶梯光栅的高分辨率可调谐光纤激光器。利用 DMD 的灵活波长调谐性能和阶梯光栅的高分辨率特性, 在该激光器中设计了具有交叉色散结构的光路系统, 实现了高精度

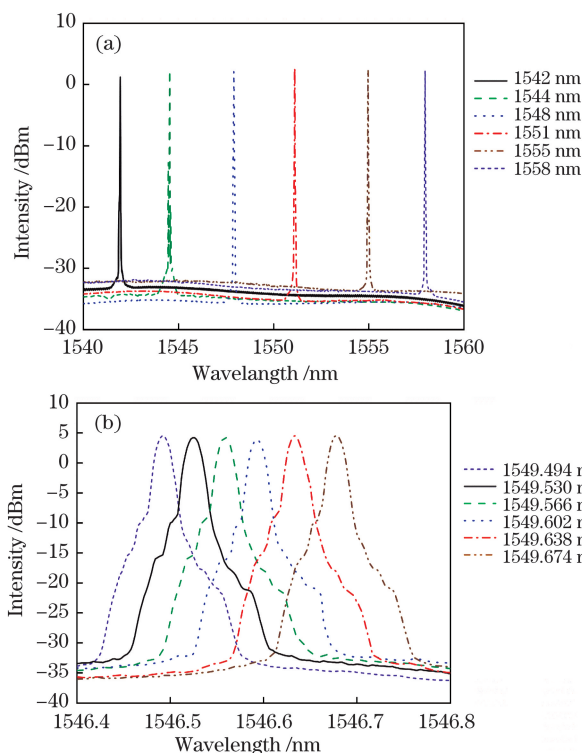


图 7 可调谐光纤激光器波长调谐输出信号。

(a) 粗调; (b) 细调

Fig. 7 Wavelength tuning output signal from tunable fiber laser. (a) Coarse tuning; (b) fine tuning

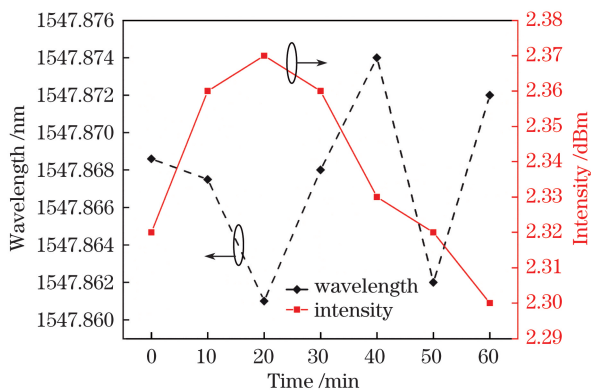


图 8 光纤激光器输出波长和功率稳定性

Fig. 8 Wavelength and power stabilities of fiber laser

波长调谐功能。实验结果表明:该激光器可以实现 1542~1558 nm 波长范围内的灵活调谐,波长调谐精度达到 0.036 nm,输出信号的 3 dB 线宽小于 0.02 nm,最大边模抑制比达到了 40 dB,最大输出功率为 7.5 dBm。在室温下,1 h 内中心波长漂移小于 0.013 nm,功率涨落小于 0.07 dB。在后续工作中,一方面将通过光路优化改善中阶梯光栅所引入的像差和杂散光,并通过软件动态调控各波长下 EDFA 的抽运功率,以期进一步提升波长调谐精度和拓宽调谐范围;另一方面在确保高精度调谐的状

态下,通过光路折返设计实现设备的小型化和集成化。

参 考 文 献

- [1] Inui T, Komukai T, Nakazawa M. Highly efficient tunable fiber Bragg grating filters using multilayer piezoelectric transducers[J]. Optics Communications, 2001, 190: 1-4.
- [2] 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.
- [3] Sapriel J, Charissoux D, Voloshinov V, *et al.* Tunable acoustooptic filters and equalizers for WDM applications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2002, 20(5): 892-899.
- [4] Ding Y H, Pu M H, Liu L, *et al.* Bandwidth and wavelength-tunable optical bandpass filter based on silicon microring-MZI structure[J]. Optics Express, 2011, 19(7): 6462-6470.
- [5] Parker M C, Cohen A D, Mears R J. Dynamic digital holographic wavelength filtering[J]. Journal of Lightwave Technology, 1998, 16(7): 1259-1270.
- [6] Shin W, Yu B A, Lee Y L, *et al.* Wavelength tunable optical time-domain reflectometry based on wavelength swept fiber laser employing two-dimensional digital micro-mirror array[J]. Optics Communications, 2009, 282(6): 1191-1195.
- [7] Xiao F, Alameh K, Lee T. Opto-VLSI-based tunable single-mode fiber laser[J]. Optics Express, 2009, 17(21): 18676-18680.
- [8] Ai Q, Chen X, Tian M, *et al.* Demonstration of multi-wavelength tunable fiber lasers based on a digital micromirror device processor[J]. Applied Optics, 2015, 54(4): 603-607.
- [9] Bykov S V, Sharma B, Asher S A. High-throughput, high-resolution echelle deep-UV Raman spectrometer [J]. Applied Spectroscopy, 2013, 67(8): 873-883.
- [10] Zhang R, Bayanheshig, Yin L, *et al.* Wavelength calibration model for prism-type echelle spectrometer by reversely solving prism's refractive index in real time[J]. Applied Optics, 2016, 55(15): 4153-4158.
- [11] Yin L, Bayanheshig, Yang J, *et al.* High-accuracy spectral reduction algorithm for the échelle spectrometer[J]. Applied Optics, 2016, 55(13): 3574-3581.
- [12] Zhang R, Bayanheshig, Yang J, *et al.* Reduction model of the transmission prism échelle spectrometer with the C-T structure[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0723001.

- 张锐, 巴音贺希格, 杨晋, 等. C-T 型棱镜透射式中阶梯光栅光谱仪谱图还原模型[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0723001.
- [13] Feng F, Duan F J, Bo E, *et al.* An optical design of small-size echelle spectrograph [J]. Opto-Electronic Engineering, 2014, 41(7): 20-25.
- 冯帆, 段发阶, 伯恩, 等. 一种小型中阶梯光栅光谱仪的光学设计[J]. 光电工程, 2014, 41(7): 20-25.
- [14] Zhang R, Pan M Z, Yang J, *et al.* Optical system of echelle spectrometer based on DMD[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(12): 2994-3000.
- 张锐, 潘明忠, 杨晋, 等. 基于数字微镜器件的中阶梯光栅光谱仪的光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2017, 25(12): 2994-3000.
- [15] Zhang Y X, Yang H D, Deng C, *et al.* Optical design of high-resolution echelle-prism cross-dispersion[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(6): 1706-1710.
- 张尹馨, 杨怀栋, 邓超, 等. 高分辨率中阶梯光栅-棱镜交叉色散光路设计[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(6): 1706-1710.
- [16] 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.
- [17] Prabhu M, Kim N S, Ueda K I. Simultaneous double-color continuous wave Raman fiber laser at 1239 nm and 1484 nm using phosphosilicate fiber[J]. Optical Review, 2000, 7(4): 277-280.