

LCoS 平面光栅的衍射特性及其在 $1 \times N$ 型波长选择开关中的应用

田淼¹ 陈笑^{1*} 高云舒² 陈瀛¹ 王珊¹ 张景¹ 张颖¹ 陈根祥¹ 王义全¹

¹中央民族大学理学院, 北京 100081

²北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044

摘要 硅基液晶(LCoS)是一种新型可编程的衍射光学元件,已广泛应用于光学显示、通信与存储等领域。研究了LCoS的光束衍射特性,并将其作为波长切换器应用于 $1 \times N$ 型波长选择开关中,成功实现了输入与任意输出端口之间的波长切换。利用光学标量衍射理论计算得到LCoS上1级光强分布及衍射效率与各物理参量的关系。结果表明:单位周期内相位阶数不低于10时,衍射损耗可稳定控制在5 dB内。在此基础上,巧妙设计了基于LCoS的 $1 \times N$ 型波长选择开关(WSS),利用LCoS相位光栅设置的高度灵活性实现输出通道间隔的灵活可调。通道之间低串扰且独立可控。实验测得WSS系统损耗为10 dB~14 dB。

关键词 光栅; 硅基液晶; 波长选择开关; 衍射; 二元阶梯光栅; 相位阶数

中图分类号 TN256

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.090502

Diffraction Properties of LCoS Gratings and its Application in $1 \times N$ Wavelength Selective Switches

Tian Miao¹ Chen Xiao¹ Gao Yunshu² Chen Ying¹ Wang Shan¹ Zhang Jing¹
Zhang Ying¹ Chen Genxiang¹ Wang Yiquan¹

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

²School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract Liquid crystal on silicon (LCoS) is a novel programmable diffraction optical element, which has been widely used in optical display, communication and storage etc. The diffraction of LCoS is analyzed and applied into $1 \times N$ wavelength selective switch (WSS) as a wavelength selector, which has succeeded in switching the input wavelength to any output port. Based on the optical scale diffraction theory, the 1st diffraction distribution and efficiency of LCoS are discussed. The results show that the diffraction loss of LCoS is stable and lower than 5 dB when the grating phase order is greater than 10 pixels. Further, an LCoS-based $1 \times N$ WSS is designed and the flexible modulation of channel space is realized. The WSS crosstalk is low and each output can be controlled independently. The total system loss is around 10 dB~14 dB.

Key words gratings; liquid crystal on silicon; wavelength selective switch; diffraction; binary step grating; phase order

OCIS codes 050.1950; 060.1810; 230.3720

1 引言

随着光纤传输容量的巨幅增长和光通信中密集波分复用技术的广泛应用,20世纪90年代以来被广泛应用的同步数字体系早已不堪重负,构建以波长交换为基础的下一代智能化全光通信网逐渐成为通信研究和产业领域的重要共识。能够通过软件进行远程控制的光交叉连接器(OXC)和光分插复用器(ROADM)作为

收稿日期: 2014-02-15; 收到修改稿日期: 2015-03-15; 网络出版日期: 2015-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(11204387)、教育部科学技术研究重点项目(212205)

作者简介: 田淼(1988—),男,硕士研究生,主要从事光通信方面的研究。E-mail: tianmiaoeveryone@126.com

导师简介: 王义全(1964—),男,博士,研究员,主要从事光电器件以及系统集成方面的研究。

E-mail: yiquanwang@gmail.com

未来全光通信网络发展所必需的关键基础性设备,具有极其重要的研究价值和广阔的国际市场需求^[1]。

波长选择开关(WSS)是 OXC 和 ROADMs 的核心元件,它可以实现将来自输入端口的任意一个或一组波长从任意端口输出的功能。目前国际上许多著名的光通信研究机构和光器件供应商均投入大量的人力物力开展相关 WSS 的研发工作,并取得了许多重要的进展。现有 WSS 所采用的核心技术主要包括基于电控微反射镜阵列的微机电系统(MEMS)或数字微镜元件(DMD)、基于硅基液晶(LCoS)的空间相位调制器阵列、基于阵列波导光栅(AWG)和热光开关的平面光波回路(PLC)光子集成技术、基于电光或热光效应微环形谐振腔可调谐光学滤波器阵列的 PLC 技术以及 PLC 和 MEMS 相结合的技术等^[2-7]。2004 年,加拿大 Metconex 公司的 Ducellier 等^[7]采用 PLC 结合 MEMS 的 WSS 结构,实现了 1×9 端口、通道数 39、通道间隔 100 GHz、插入损耗小于 7.6 dB、串扰低于 -35 dB、0.5 dB 带宽大于 50 GHz 的技术指标。但由于 PLC 芯片中采用 AWG 技术所带来的不可避免的本身局限性,这种 WSS 不具有通带上的频谱灵活性,也不易实现高端口数和高通道数。因此,基于 MEMS 和 LCoS 的 WSS 是目前 WSS 研发的主要技术方向,被各器件供应商广泛采用^[8-11]。其中,JDSU 实现了 1×9 端口、通道数 44、通道间隔 100 GHz 和 50 GHz、串扰低于 -40 dB 的 WSS;Finisar 和 Capella 均于 2011 年 9 月推出了自己的 1×20 端口 WSS 产品;Oclaro 于 2012 年 3 月推出了号称迄今最高端口数的 1×23 端口 WSS。与此同时,国内包括武汉邮电科学研究院、华中科技大学、上海交通大学和中兴通讯公司在内的各机构也在积极参与基于 MEMS 芯片和 PLC 的波长选择开关的研究^[12-13]。综上对国内外研究进度的比较,考虑到 LCoS 相位光栅编码的高度灵活性,本文提出了采用可编程控制的 LCoS 芯片作为波长切换器,设计具有大的通带调谐灵活性与兼容性的 1×32 端口的 WSS^[14-16]。

2 LCoS 平面光栅的衍射特性

2.1 LCoS 衍射特性的理论分析

LCoS 作为一种新型可编程的衍射光学元件,对于其衍射特性(衍射光的空间分布和衍射效率)的研究是非常重要的,这决定了 LCoS 能否成功应用于 WSS 系统。液晶像素的结构特性使得光波相位的控制不能连续变化,因此这类闪耀光栅通常采用二元阶梯光栅来逼近,以获得较高衍射效率和可控衍射方向。

在实验中,选用的是 HOLOEYE 公司的 C 波段反射型纯相位硅基液晶空间光调制器(LCoS-Pluto),其对角线长 0.72,像素 1920 pixel×1080 pixel,单像素大小为 8 μm×8 μm。在该 LCoS 上加载一套全息相位分布图,如图 1 所示。选用波长为 λ₀ 的平面光波入射到 LCoS 光栅上,通过光栅形成多光束干涉,并在对应方向上形成各级衍射。

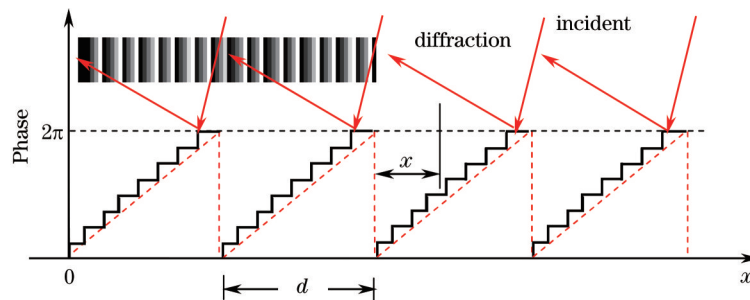


图 1 阶梯光栅衍射示意图

Fig.1 Schematic diagram of diffraction of step grating

光栅方程为:

$$d(\sin\theta \pm \sin\phi) = q\lambda_0, \quad (1)$$

其中, $q = \pm 1, \pm 2, \dots$; $d = Na$ (d 为光栅常数, a 为像素大小, N 为相位阶数)。

在第 m 个周期, 距离该周期一端 x 处 dx 微元所辐射的光振动为:

$$dE = A_0 \exp[ik_0(\Delta_1 + \Delta_2)] dx, \quad (2)$$

其中, 括号内为 dx 处衍射光相对于原点出射衍射光的相位差, 由 Δ_1 和 Δ_2 两部分构成, 其中,

$$\Delta_1 = (m-1)d \sin\theta, \quad (3)$$

$$\Delta_2 = x \sin\theta + f(x), \quad (4)$$

其中, $f(x)$ 为液晶周期单元中的相位调制函数。

由此 M 个周期的总贡献为:

$$E = \sum_{m=1}^M A \exp[ik_0(m-1)d \sin \theta] \times \int_0^d \exp\{-ik_0[x \sin \theta + f(x)]\} dx, \quad (5)$$

其中, 求和部分为 M 个周期干涉的结果, 积分则为单个周期函数的贡献。在透镜的焦平面(即透镜的傅里叶变换平面)上的强度分布则表现为后者对前者幅度的调制。

设定有足够多的相位台阶数来逼近锯齿形的相位轮廓, 因此液晶加载全息相位图抽样分布近似为:

$$f(x) = \frac{2\pi}{k_0} \left(\frac{x}{d} \right), \quad (0 \leq x \leq Na), \quad (6)$$

将其代入(5)式得:

$$E = \sum_{m=1}^M A_0 \exp[ik_0(m-1)d \sin \theta] \times \int_0^d \exp\left\{-ik_0 \left[x \sin \theta + \frac{2\pi}{k_0} \left(\frac{x}{d} \right) \right]\right\} dx =$$

$$dA_0 \sin c \left(\frac{k_0 d \sin \theta + 2\pi}{2} \right) \frac{\sin \left(\frac{\pi}{\lambda_0} M d \sin \theta \right)}{\sin \left(\frac{\pi}{\lambda_0} d \sin \theta \right)} \exp \left[-i \frac{\pi}{\lambda_0} (M-1) d \sin \theta \right] \exp \left[\frac{-i(k_0 d \sin \theta + 2\pi)}{2} \right], \quad (7)$$

对应总光强为:

$$I = EE^* = d^2 A_0^2 \frac{\sin^2 \left(\frac{k_0 d \sin \theta + 2\pi}{2} \right) \sin^2 \left(\frac{\pi}{\lambda_0} M d \sin \theta \right)}{\left(\frac{k_0 d \sin \theta + 2\pi}{2} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{\pi}{\lambda_0} d \sin \theta \right)}, \quad (8)$$

将光强归一化后:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\sin^2 \left(\frac{k_0 Na \sin \theta + 2\pi}{2} \right) \sin^2 \left(\frac{\pi}{\lambda_0} M Na \sin \theta \right)}{\left(\frac{k_0 Na \sin \theta + 2\pi}{2} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{\pi}{\lambda_0} Na \sin \theta \right)}, \quad (9)$$

上式为 M 个周期阶梯光栅的衍射图样强度分布。

设入射光束光斑直径为 1 mm, 以每个光栅周期分别包含 $N=3, 5, 10, 20$ 个像素计, 忽略像素间的缝隙 (Pluto 液晶填充因子大于 87%), 在光斑区域内对应光栅周期个数为 $M=41, 23, 12, 6$ 。计算中设定波长 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 的光束垂直入射 LCoS, 计算得到 1 级衍射位置与强度分布图, 如图 2 所示。1 级衍射角随着光栅周期 (Na) 的增大而减小, 由此可通过改变相位阶数 N 或单像素大小 a 来实现对衍射光束空间指向的精准调控, 进而有效减小 WSS 系统中通道间的信号交叉串扰。另外阶梯光栅的 1 级衍射效率也取决于相位阶数 N , 具体表示为:

$$\eta = \sin^2 \left(\frac{\pi}{N} \right). \quad (10)$$

衍射效率随着 N 的增大而增大, 当 $N=3$ 时, $\eta=68\%$; 当 $N>10$ 时, 衍射效率 η 几乎可以达到 100% ^[15-16]。

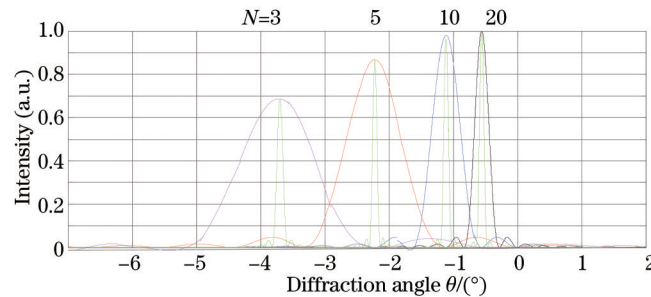


图 2 不同光栅周期下 1 级衍射角与强度分布图

Fig.2 Distribution of 1st diffraction angle and intensity at different gratig periods

2.2 LCoS衍射效率的实验测试

实验中,影响LCoS衍射效率的主要因素是液晶填充因子、光栅周期数 M 与单位周期内的相位阶数 N 、光栅灰度值分布以及偏振等因素^[17]。液晶填充因子越大,相邻像素间的“死区”对光能利用率影响越小,衍射效率越高^[17-18]。考虑到实际所用Pluto型液晶的填充因子大于87%,因此测得最大衍射效率为60%。光栅周期数与相位阶数的增大均有助于提高衍射效率,由于实际入射光斑面积有限以及液晶工作窗口大小的制约,相位阶数 N 越多,周期数 M 就相应越少,因此周期数与相位阶数需要同时兼顾,以获得最佳衍射效率以及最多通道数。图3为不同相位阶数下1级衍射损耗分布。当 $N < 10$ 时,由于相位抽样不充分,偏离理想锯齿光栅,因此衍射效率较低;而当 $N \geq 10$ 时,衍射损耗稳定,基本控制在5 dB附近,理论与实验基本一致,可用于WSS系统中。

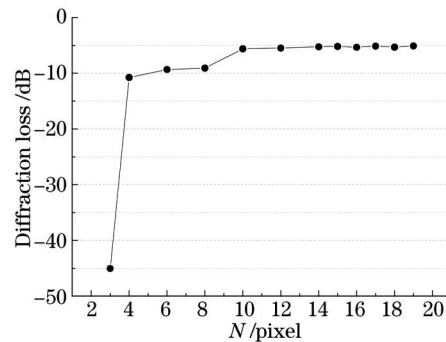


图3 LCoS在不同相位阶数下1级衍射损耗分布

Fig.3 Diffraction loss of 1st order on LCoS at different phase orders

3 LCoS在 $1 \times N$ 型WSS中的应用

在LCoS衍射特性研究的基础上,将其应用于 $1 \times N$ 型WSS系统中。系统结构如图4所示。掺铒光纤放大器(EDFA)发出C波段自发辐射谱(ASE),通过偏振控制器,由光纤耦合微透镜阵列中心COM端口进入体光学部分。体光学部分为 $2-f$ 光学系统,平凸透镜与透射光栅贴近放置,平凸透镜和LCoS分别位于柱面镜的前后焦面上,各器件在空间位置上的优化排布,大幅度的降低了实验损耗。光束经过透镜(焦距300 mm)入射到966 mm的透射体光栅上,在1级衍射方向上发生色散。该色散光通过柱面镜(焦距150 mm)发生光斑形变后照射在LCoS的有效工作区。实验系统中巧妙利用柱面镜这一光学元件,不仅可以将通过透射光栅色散开的光束变为平行光照射在LCoS平面上,减小系统的插损和串扰;还可以在镜片横轴方向压缩光斑,增加波长信道数。LCoS上的光束色散条分布如图4中所示。色散光中不同波长覆盖在LCoS不同区域,通过在LCoS上加载不同周期(相位阶数均取 $N \geq 10$)的闪耀光栅灰度图像,不同波长的衍射光以不同角度返回并切换到任意输出端口中输出。此外,端口设计选用光纤微透镜阵列,通过调节光纤阵列与微透镜的距离来改变光斑大小以提高在LCoS上的覆盖面积,充分利用LCoS提高衍射效率,另外还可以在有限的衍射角内增加输出端口数。

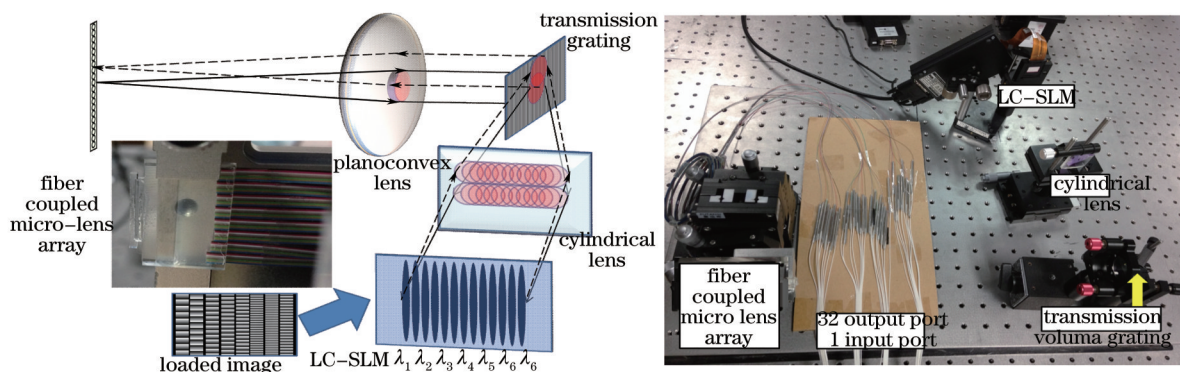


图4 基于LCoS的 $1 \times N$ 型WSS原理示意图与实物图

Fig.4 Schematic diagram of LCoS-based $1 \times N$ WSS system

图5为通过LCoS选频后从任意端口输出的信号,输出信号波长可在1530~1560 nm之间任意选择(图中

虚线是EDFA的ASE谱)。由于液晶设置的高度灵活性使得输出波长的通道间隔灵活可调。实验中按照ITU-T标准,可将信道间隔设为100 GHz,这样可以实现通道间低串扰,且每个输出端口都是相互的独立。该WSS系统的损耗为10~14 dB。这一损耗的主要来源有:1) 966 mm 闪耀光栅的衍射损耗;2) LCoS的衍射损耗;3) 液晶像素有限大小造成衍射角度的不连续与光纤排线(排线间隔为250 mm)位置不能完全耦合造成的插入损耗。其中后两者损耗占主要,这些损耗可以通过选择更小像素的液晶,或者通过算法优化改善相位分布得到进一步减小。

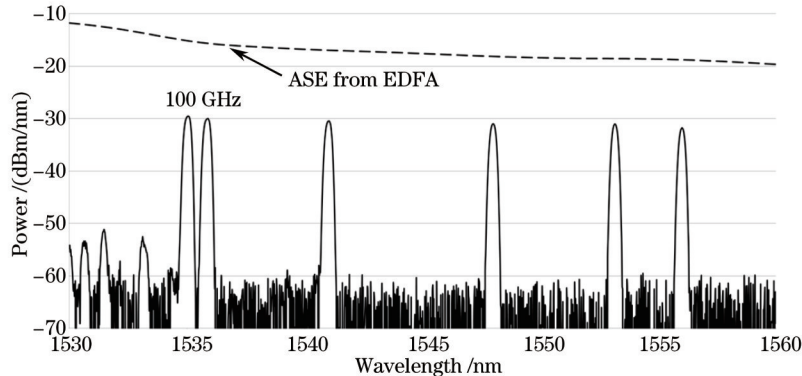


图5 基于LCoS的 $1\times N$ WSS任一输出端口信号

Fig.5 Output signals of arbitrary port from LCoS-based $1\times N$ WSS

4 结 论

研究利用LCoS的衍射特性作为波长切换器,并将其应用于 $1\times N$ 型WSS系统中。通过衍射标量模型,分析了不同光栅周期和相位阶数对LCoS上1级衍射分布与衍射强度的影响。结果表明:周期内相位阶数不低于10时,衍射效率较高且相对稳定。在此基础上,巧妙设计出基于LCoS的 $1\times N$ 型WSS,由于液晶设置的高度灵活性使得输出波长的通道间隔灵活可调。实验测得WSS系统损耗为10~14 dB。目前基于LCoS的 $M\times N$ 型WSS的研究工作正在进行中。

参 考 文 献

- 1 Basch E B, Egorov R, Gringeri S, *et al.*. Architectural tradeoffs for reconfigurable dense wavelength-division multiplexing systems[J]. *IEEE Selected Topics in Quantum Electronics*, 2006, 12(4): 615-626.
- 2 Hu Qiangao. Research of Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010.
胡强高. 可重构光分插复用器的研究[D]. 武汉: 武汉华中科技大学, 2010.
- 3 H Chi, J Tsai, M C Lee, *et al.*. Integrated 1×4 WSS with on-chip MEMS micromirrors[J]. *CLEO*, 2005, JThe58.
- 4 Liu Yongjun, Xuan Li, Hu Lifa, *et al.*. Investigation on the liquid crystal spatial light modulator with high precision and pure phase[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(12): 1682-1686.
刘永军, 宣 丽, 胡立发, 等. 高精度纯相位液晶空间光调制器的研究[J]. *光学学报*, 2005, 25(12): 1682-1686.
- 5 Fondeur B, Crafts D E, Ranalli E. Planar Lightwave Circuit Based Wavelength Selective Switch: US, 7440650[P]. 2008.
- 6 G Baxter, S Frisken, D Abakoumov, *et al.*. Highly programmable wavelength selective switch based on liquid crystal on silicon switching elements[C]. *OFCC*, 2006, OTuF2.
- 7 T Ducellier, A Hnatiw, M Mala, *et al.*. Novel high Performance hybrid waveguide-MEMS 1×9 WSS in a 32-cascade loop experiment[C]. *ECOC*, 2004, Th4.22.
- 8 Paul Colbourne, Sheldon McLaughlin, Stephen Robert de Hennin, *et al.*. $M\times N$ Wavelength Selective Switch: US: 8391709 [P]. 2012.
- 9 Randy Clinton Giles, Dan Mark Marom, David Thomas Neilson, *et al.*. Optical Device with Configurable Channel Allocation: US, 7016098[P]. 2006.
- 10 Yasuki Sakurai. Wavelength Selective Optical Switching Devices: US, 20130128215[P]. 2013.
- 11 Steven James Frisken, Wayne Baxter, Cibby Pulikkaseril, *et al.*. Optical Wavelength Selective Swith Calibration System:

- US, 20120328291[P]. 2012.
- 12 Sheng Zhonghua, Li Yong. A design of WSS based on MEMS switch[C]. The Academic Annual Meeting of China Institute of Communications, 2008.
申中华, 李 勇. 一种基于 MEMS 光开关的波长选择开关的设计[C]. 中国通信学会学术年会, 2008.
- 13 Hu Qiangao, Sun Liping, Shi Wei, *et al.*. The Hitless Wavelength Selective Switching: CN 2011940342009. 1[P]. 2008.
胡强高, 孙莉萍, 施 伟, 等. 具有无干扰切换的波长选择开关: 中国 CN2011940342009. 1[P]. 2008.
- 14 Cai Xiangbao. Diffraction field distribution in a binary optical element illuminated by planar wave[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications, 1999, 19(2): 54-56.
蔡祥宝. 平面波入射时二元光学型光栅的衍射场分布[J]. 南京邮电大学学报: 自然科学版, 1999, 19(2): 54-56.
- 15 Feng Yujun, Zhou Jin, Tan Suqing, *et al.*. Diffraction factor research of phase-type diffraction optical element[J]. Laser Journal, 1999, 20(3): 18-19.
封余军, 周 进, 谈苏庆, 等. 位相型衍射光学元件单元结构衍射因子的研究[J]. 激光杂志, 1999, 20(3): 18-19.
- 16 Cai Dongmei, Yang Huizhen, Ling Ning, *et al.*. Diffraction effect of liquid crystal spatial light modulator using for beam deflection[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(4): 491-495.
蔡冬梅, 杨慧珍, 凌 宁, 等. 液晶空间光调制器用于光束偏转控制的衍射效应[J]. 中国激光, 2008, 35(4): 491-495.
- 17 Ge Aiming, Sui Zhan, Su Junhong. Research on characteristics of amplitude modulation of a reflective liquid crystal on silicon device[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(3): 346-350.
葛爱明, 隋 展, 苏俊宏. 反射式液晶器件振幅调制特性的研究[J]. 中国激光, 2005, 32(3): 346-350.
- 18 Ai Qi, Chen Xiao, Tian Miao, *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 淼, 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.

栏目编辑: 韩 峰