

650 nm 可见光波段全复合材料热光开关

张海鑫 王 雷 牛小艳 孙小强 王 菲 陈长鸣* 张大明

(吉林大学电子科学与工程学院, 集成光电子学国家重点联合实验室, 吉林省光通信用聚合物
波导器件工程实验室, 吉林 长春 130012)

摘要 提出并设计了 650 nm 波段的全复合材料倒脊型马赫-曾德尔热光开关, 优化了该热光开关的主要参数, 并利用 COMSOL 和 Rsoft 软件对器件传输效果进行了理论模拟。该有机-无机复合材料为实验室自主合成。由于材料主体为 Si-O-Ti 刚性无机骨架, 热稳定性效果得到提高, 并具有较高的热光系数。改变材料中 Ti 的含量以改变材料的折射率, 制得两种不同折射率的该材料, 分别作为芯和包层。该材料具有好的成膜特性和可加工性, 制作工艺简单。该器件损耗低, 并且具有潜在传感应用。对制作的热光开关进行了测试, 得到了良好的近场输出光斑, 插入损耗 6.5 dB, 传输损耗 0.85 dB/cm, 上升时间为 190 μ s, 下降时间为 350 μ s, 消光比 8.5 dB。该热光开关在塑料光纤传输系统中具有广阔的应用前景。

关键词 光学器件; 可见光信号; 有机-无机复合材料; 倒脊型光波导; 热光开关

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0906002

650 nm Visible Band Thermo-Optic Switch Based on Bonded Organic-Inorganic Hybrid Materials

Zhang Haixin Wang Lei Niu Xiaoyan Sun Xiaoqiang Wang Fei
Cheng Changming Zhang Daming

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, POLYPLC Engineering Lab of Jilin Province,
College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China)

Abstract We propose and design a kind of 650 nm band all organic-inorganic hybrid material embedded Mach-Zehnder (MZ) thermo-optic switch. The main parameters of the thermo-optic switch are optimized, and theoretical transmission simulations of this device are carried out by COMSOL and Rsoft. The material is synthesized in our laboratory. The thermal stability of the material has been greatly improved, since the body of this material is a rigid inorganic backbone of Si-O-Ti chains, and the material has a higher thermo-optic coefficient. By altering the refractive index through changing the Ti content in the material, we get the core and clab materials respectively. The material has good film characteristic and workability, which make the production process simple. The device is low loss, and has potential sensing applications. The thermo-optic switch is tested and we get a good near-field output spot. The insertion loss of the device is 6.5 dB, the propagation loss is 0.85 dB/cm, the rise response time is 190 μ s and the fall response time is 350 μ s, the extinction ratio is 8.5 dB. The thermo-optic switch has broad application prospects in plastic optical fiber transmission system.

Key words optical devices; visible light signal; organic-inorganic hybrid material; embedded waveguide; thermo-optic switch

OCIS codes 060.2330; 060.4510; 130.4815; 160.6840; 160.4890

收稿日期: 2013-03-12; **收到修改稿日期**: 2013-03-26

基金项目: 国家自然科学基金(61107019, 61077041, 61177027)、教育部高等学校博士点专项科研基金(20110061120054)、中国博士后科学基金面上项目(2011M500597)、中国博士后科学基金特别资助项目(2012T50277)、吉林省科技发展计划项目(20110315)、吉林省青年科学基金(20100174)、吉林大学大学生创新创业训练计划项目(2012B51124, 2012A51136)

作者简介: 张海鑫(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事聚合物平面光波导器件及集成方面的研究。

E-mail: zhelsing@163.com

导师简介: 张大明(1970—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事高速光电子器件、有机光子器件及集成技术等方面的研究。E-mail: zhangdm@jlu.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: chencm@jlu.edu.cn

1 引 言

当今时代社会信息化程度越来越高,大幅提高通信速度和质的要求迫在眉睫。目前接入网普遍采用铜质电缆的电信号方式,主干网上高速的光信号在接入用户端之前转为电信号后传输速率大大降低。光纤传输“最后一公里”问题成为亟待攻克的技术难点。光纤到户^[1]就是要架设主干网到终端的全光网络。由于塑料光纤^[2]具备制造工艺简单、柔韧性好、材料多样可调、价格便宜等优点,塑料光纤传输系统成为解决“最后一公里”难题的最佳方案。塑料光纤的低损耗窗口在 650 nm 附近。

光开关^[3]作为光通信网络节点的核心器件具有关键作用。解决“最后一公里”难题首先要有良好的技术支撑,而热光开关因具有驱动功率低、串扰小、易于大规模集成等优点,已成为目前研究较多,最具有实用价值的一种光开关。

本文基于自行合成的有机-无机复合功能材料,研制出了一种工作在 650 nm 可见光波段的倒脊型马赫-曾德尔(MZ)热光波导开关。传输损耗为 0.85 dB/cm,插入损耗为 6.5 dB,上升时间为 190 μs,下降时间为 350 μs,消光比为 8.5 dB,具备很好的工作稳定性和热光特性。在塑料光纤传输系统中具有很大的应用潜力。

2 热光开关工作原理

热光开关工作原理是基于材料的热光效应,对

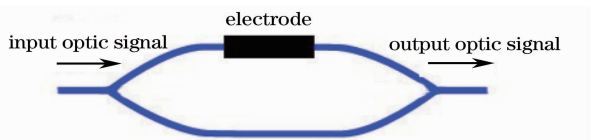


图 1 MZ 型热光开关结构示意图

Fig. 1 Structure of MZ thermo-optic switch

电极加热以改变材料的折射率,从而调制光场实现开关功能。以 MZ 型热光开关^[4](图 1)为例。

热电极加在 MZ 波导的一条臂上,电流流过热电极时产生热量。相对于未加热的波导,被加热的波导折射率发生变化,两臂输出光发生干涉,输出光强发生变化。相移臂上的相位变化符合关系式:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T_w l, \quad (1)$$

式中 $\frac{\partial n}{\partial T}$ 为热光系数, l 为臂长。

半波调制情况下,干涉光强为零时 $\Delta\varphi_1 = \pi$,此时波导的温度升高了

$$\Delta T_w(T) = \left(\frac{\partial n}{\partial T}\right)^{-1} \frac{\lambda_0}{2l}. \quad (2)$$

假设热电极作用长度为 5 mm,热光系数为 $-1 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, 5 μm 波导达到 π 相移需要温度升高 5 °C^[5]。

3 材料的制备

纯聚合物材料^[6-9]制作的热光开关热稳定性效果较差,难以实现商用的极端要求。实验室为解决这一问题利用溶胶-凝胶技术^[10]自主合成了有机-无机非线性复合材料^[11]。由于该材料分子中含有 Si-O-Ti 键的无机网络骨架,同时分子中键连有机柔性侧链,因而该材料兼有有机和无机材料的特点。该材料与纯有机材料相比具有高热稳定性和优良的光学特性,而较之纯无机材料在热光系数、成膜性和可加工性方面具有明显的优势,材料的热光系数数量级为 10^{-4} K^{-1} 。利用该材料制作光器件工艺简单,损耗低,并且具有传感的潜在应用。

原材料为分散红(DR19)、硅烷偶联剂(KH560)、钛酸正四丁酯等。通过调节反应物中钛酸正四丁酯的含量,可以改变材料的折射率。材料

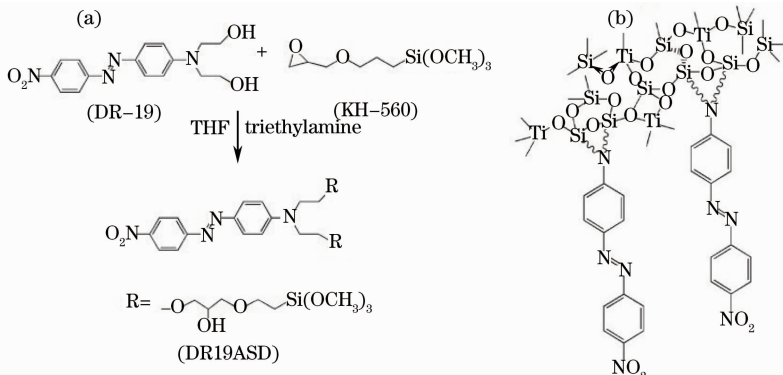


图 2 (a) DR19ASD 的合成过程; (b) 复合材料的结构示意图

Fig. 2 (a) Synthesis process of DR19ASD; (b) structure of hybrid material

合成示意图以及结构式如图 2 所示。

接下来测试了材料的热稳定性,测量所得材料的热重分析(TGA)曲线如图 3 所示。由图可知该材料的热分解温度为 300 ℃左右,表明该材料热稳定性良好。

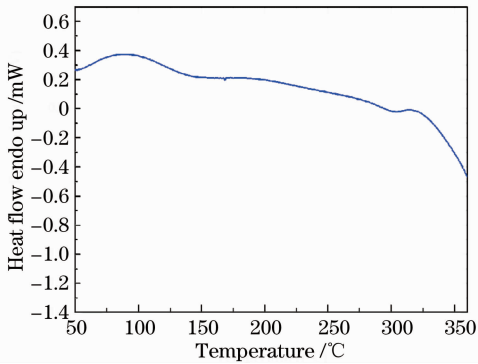


图 3 材料热重分析曲线

Fig. 3 TGA curve of the material

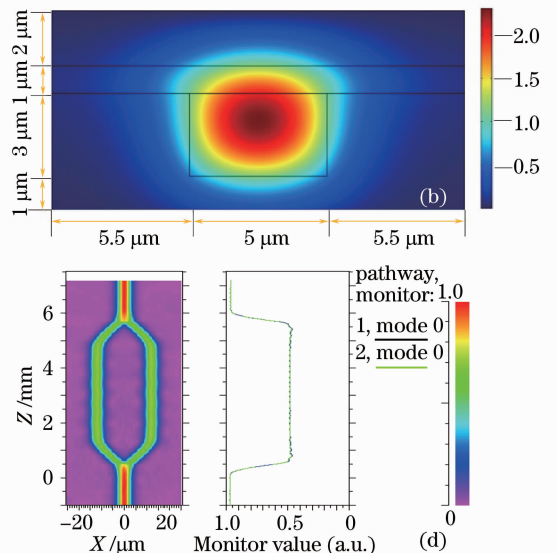
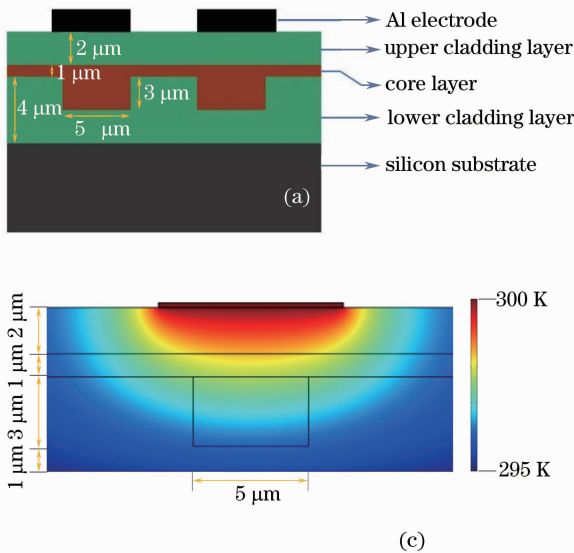


图 4 波导光场模拟图。(a) 倒脊型波导结构示意图；(b) 端面光场模拟图；

(c) 电极热场模拟图；(d) 波导光场传输分布图

Fig. 4 Optical field distribution simulation of the waveguide. (a) Structure of embedded waveguide; (b) optical field distribution of the cross-section; (c) simulation of electrode thermal field; (d) optical field distribution of the waveguide

5 器件的制作

以该有机-无机复合材料作为芯包层制作 MZ 型热光开关^[14]。用铝掩模法结合电感耦合等离子体(ICP)刻蚀技术^[15]制备倒脊形光波导器件。

制备器件的工艺流程如下。1) 清洗硅衬底; 2) 旋涂全复合材料下包层: 匀胶机参数为: 前转 6 s, 600 r/min, 后转 20 s, 3000 r/min, 然后将样品放入烘箱中缓慢升温至 120 ℃, 烘焙固化 1 h, 自然降至室温; 3) 蒸镀铝膜: 在下包层上真空蒸镀铝掩模, 该层掩模越薄越好; 4) 涂光刻胶: 在样品上旋涂 BP-

4 波导结构的选取

由于该复合材料中含有金属 Ti, 成膜后刚性较大难以刻蚀, 因此采用倒脊型的波导结构^[12], 波导芯层槽宽 5 μm, 槽深 3 μm, 平板厚度为 1 μm。利用椭圆偏振仪测得芯层材料的折射率为 1.524, 包层材料的折射率为 1.504。利用 COMSOL 软件对波导端面光场分布和电极热场分布进行模拟^[13], 并利用 Rsoft 软件对波导传输光场分布进行了优化分析。

图 4(a)为倒脊型波导结构示意图; 从图 4(b)可以看出该倒脊型波导结构能很好地实现光信号的单模传输; 图 4(c)模拟的是电极热场分布, 温度的横向分布基于电极位置, 以电极为中心扩散, 在电极温度提高 5 K 后能实现开关效果; 图 4(d)为波导光场传输分布图, 该倒脊型 MZ 热光开关功率传输能达到 95%。

212 正型光刻胶, 80 ℃烘焙 20 min, 自然降至室温; 5) 光刻显影, 形成掩模图形; 6) ICP 刻蚀; 7) 除铝膜, 旋涂芯层, 然后旋涂上包层, 采用同样方式烘焙固化; 8) 制作铝电极, 完成器件的制备^[16-17]。旋涂完芯层的截面扫描电子显微镜(SEM)照片如图 5 所示, 刻蚀的凹槽形貌良好, 芯层和下包层边缘清晰无互溶, 平板层厚度为 1 μm。

图 6 为倒脊型 MZ 热光开关实物照片, 该器件的长度为 4 cm。实验制备过程中的波导工艺加工尺寸误差会直接影响热光开关的插入损耗、消光比

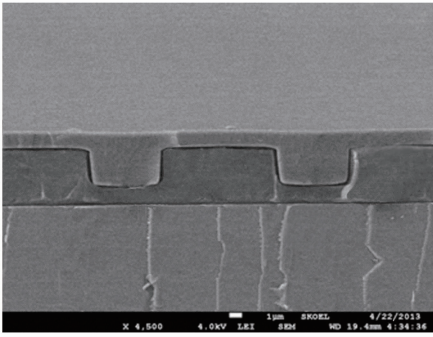


图 5 旋涂芯层后的波导截面 SEM 照片

Fig. 5 A cross-sectional SEM view of the waveguide after the core layer spin coated

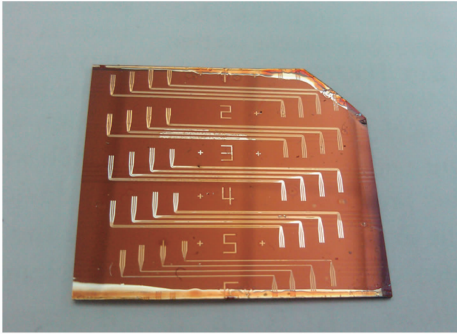


图 6 器件实物图

Fig. 6 Photograph of the fabricated device

和开关时间等重要参数。

6 器件的测试

激光器发出的 650 nm 波长的信号光经单模光纤^[18-19]耦合进热光开关的输入端,输出端耦合进入输出光纤并接至光电探测器,接入示波器的一个通道,信号发生器发出的信号接入示波器的另一个通道。测试装置如图 7 所示。

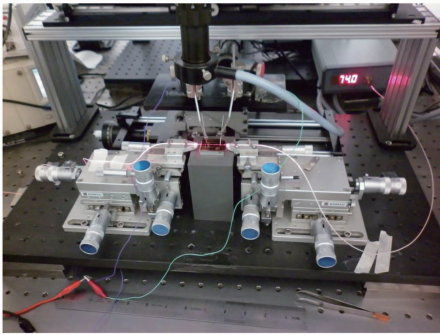


图 7 测试装置图

Fig. 7 Test picture of the switch

利用 650 nm 激光发射器测得器件在 0.1 mW 下的通光效果如图 8 所示,信号光在波导中传输良好。利用截断法测得器件传输损耗为 0.85 dB/cm。



图 8 波导近场输出光斑

Fig. 8 Near-field output speckle of waveguide

实验测得的开关效果如图 9 所示。黄色的波形是方波信号源的波形图,蓝色的波形是热光开关在 100.4 Hz 方波信号下的响应曲线。测得开关的上升时间为 190 μs ,下降时间为 350 μs 。测得未抛光器件的插入损耗为 10.5 dB,消光比为 8.5 dB。所制得的器件在热电极加热情况下连续工作 20 h,并未发现波长漂移及明显的插入损耗变化,因而基于该材料制作的器件具有高热稳定性。

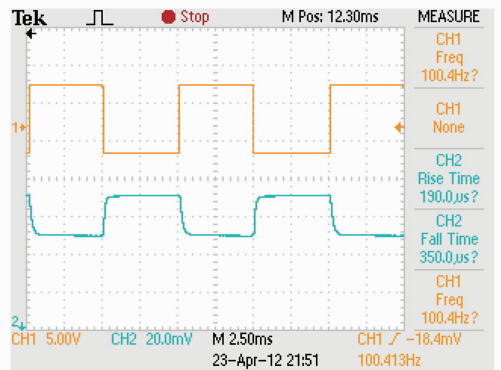


图 9 热光开关响应曲线

Fig. 9 Thermo-optic response curves of the device

为了进一步减小器件插入损耗,对芯片进行了抛光处理来降低光纤与波导间的耦合损耗,并改用拉锥光纤以有效改进信号光的模式匹配,在同等条件下对抛光后的器件进行了多次测试,器件的插入损耗能减小 4 dB 左右,即为 6.5 dB。而这其中由工艺误差及分支散射所引起的损耗约为 1 dB。这项技术可进一步提高热光开关的工作性能,有助于实现聚合物材料热光开关与其他光电器件的大规模集成。

7 结 论

利用溶胶-凝胶法制备出不同折射率的杂化材料分别做芯层和包层,制作的热光开关器件性能良好,测得热光开关的插入损耗为 6.5 dB,传输损耗

为 0.85 dB/cm, 上升和下降时间分别为 190 μs 和 350 μs , 消光比 8.5 dB. 这种全复合材料的热光开关具有良好的热光特性、高热稳定性, 具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- Li Ning, Sun Huijiao, Feng Chunfang, *et al.*. Research on the key technologies and operation mode of PFTTH [J]. Telecommunications for Electric Power System, 2011, 32(5): 123–128.
栗宁, 孙慧皎, 冯春芳, 等. 光纤到户关键技术及运营模式研究[J]. 电力系统通信, 2011, 32(5): 123–128.
- Chen Peng. Research on technical development and application analysis of POF[J]. Telecommunications Science, 2011, 27(8): 94–100.
陈鹏. 塑料光纤技术发展与应用分析研究[J]. 电信科学, 2011, 27(8): 94–100.
- Yang Fanghui, Jiang Xiaoqing, Yang Jianyi, *et al.*. Research and progress in polymeric thermo-optic switch [J]. Semiconductor Technology, 2001, 26(9): 38–41.
杨方辉, 江晓青, 杨建义, 等. 有机聚合物热光开关的研究进展[J]. 半导体技术, 2001, 26(9): 38–41.
- Feng Zhenhua, Fu Songnian, Tang Ming, *et al.*. Investigation on agile bias control technique for arbitrary-point locking in lithium niobate Mach-Zehnder modulators [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1206002.
冯振华, 付松年, 唐明, 等. LiNbO₃ 马赫-曾德尔调制器任意偏置工作点锁定技术的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1206002.
- Yang Fanghui. Study of Polymer Thermo-Optical Switch Based on Silicon[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002. 21–22.
杨方辉. 硅基有机聚合物热光开关的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2002. 21–22.
- Wang Wei, Sun Xiaoqiang, Wang Xibin, *et al.*. Low power consumption polymer thermo-optic switch with Mach-Zehnder interferometer [J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(4): 610–613.
王微, 孙小强, 王希斌, 等. 低功耗聚合物 Mach-Zehnder 热光开关[J]. 光子学报, 2010, 39(4): 610–613.
- Liang Kun, Chen Wang, Wu Boyu, *et al.*. Polymer thermo-optic digital optical switches[J]. Chinese J Semiconductors, 2006, 27(4): 747–750.
梁琨, 陈旺, 吴伯瑜, 等. 聚合物绝热分叉型数字热光开关[J]. 半导体学报, 2006, 27(4): 747–750.
- N Xie, K Utaka. Compact and low power operation thermo-optic MMI-based polymer photonic switch[C]. Opto-Electronics and Communications Conference, 2008.
- Yang Di, Yu Jinzhong, Chen Shaowu. An improvement on 2×2 silicon-on-insulator Mach-Zehnder thermo-optical switch [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(5): 931–934.

- 杨笛, 余金中, 陈少武. 一种改进的 2×2 SOI Mach-Zehnder 热光开关[J]. 光子学报, 2008, 37(5): 931–934.
- Wang Hui, Zhang Feng, Liu Tianji, *et al.*. Embedded waveguide thermo-optic switch based on novel organic-inorganic hybrid material[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(9): 1303–1306.
王辉, 张峰, 刘天际, 等. 有机/无机复合功能材料倒脊型波导热光开关[J]. 光子学报, 2011, 40(9): 1303–1306.
- Chen Changming, Sun Xiaoqiang, Wang Fei, *et al.*. Electro-optic modulator based on novel organic-inorganic hybrid nonlinear optical materials[J]. IEEE J Quantum Electron, 2012, 48(1): 61–66.
- Zhang Feng, Li Xiaodong, Tan Zhenyu, *et al.*. Strip-loaded waveguide electro-optic modulator based on bonded organic-inorganic hybrid material[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(4): 569–572.
张峰, 李晓东, 谭振宇, 等. 键合型有机/无机杂化材料加载条形波光电光调制器[J]. 光子学报, 2011, 40(4): 569–572.
- Wang Zhi, Zhang Limei, Chen Yingchuan, *et al.*. Two mode interference for nano SOI waveguides [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0705003.
王智, 张丽梅, 陈颖川, 等. 硅基纳米波导的双模干涉[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0705003.
- Zhang Ying, Chen Jiamei, Li Gang, *et al.*. Location method of distributed fiber-optic perimeter system based on Mach-Zehnder interferometer[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0605005.
张颖, 陈佳妹, 李刚, 等. 马赫-曾德尔分布式光纤周界防范系统定位算法研究[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0605005.
- Sun Xiaoqiang, Gao Weinan, Sun Jie, *et al.*. Polymer 2×2 directional coupler electro-optic switches [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(12): 3084–3087.
孙小强, 高伟男, 孙杰, 等. 聚合物 2×2 定向耦合型电光开关[J]. 光子学报, 2009, 38(12): 3084–3087.
- Zhang Kun, Yue Yuanbin, Li Tong, *et al.*. Application of ICP etching in fabrication of polymer optical waveguide[J]. Chinese Optics, 2012, 5(1): 64–70.
张琨, 岳远斌, 李彤, 等. 感应耦合等离子体刻蚀在聚合物光波导制作中的应用[J]. 中国光学, 2012, 5(1): 64–70.
- Chen Changming, Yi Yunji, Wang Fei, *et al.*. Ultra-long compact optical polymeric array waveguide true-time-delay line devices[J]. IEEE J Quantum Electron, 2010, 46(5): 754–761.
- Ren Meizhen, Xu Tuanwei, Zhang Faxiang, *et al.*. Statistical properties of Rayleigh backscattered light in single-mode fibers caused by a highly coherent laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0105001.
任梅珍, 徐团伟, 张发祥, 等. 单模光纤中高相干光源的瑞利散射光的统计特性[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0105001.
- Ouyang Deqin, Ruan Shuangchen, Guo Chunyu, *et al.*. Research on all-fiber coupling between a diode laser and single-mode fibers [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(12): 1205004.
欧阳德钦, 阮双琛, 郭春雨, 等. 半导体激光器与单模光纤的全光纤耦合技术研究[J]. 中国激光, 2011, 38(12): 1205004.

栏目编辑: 韩峰