

doi: 10.3788/gzxb20144304.0423002

一种基于聚合物材料的延迟线阵列与热光开关集成器件的设计

李然, 王雷, 陈曦, 陈长鸣, 衣云骥, 段宁, 徐帅, 刘楠, 孙雨, 王菲, 张大明

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

摘 要:设计了一种基于聚合物材料的延迟线阵列与热光开关的集成器件. 利用 Rsoft 软件设计并模拟了多模干涉热光开关的性能, 可实现输出光场强度随电极加热温度变化. 设计了螺旋结构的延迟线阵列, 利用 BPM 软件对螺旋结构波导进行数值模拟, 综合考虑器件尺寸和损耗参量设计出螺旋结构的弯曲半径. 将延迟线阵列结构与热光开关进行集成, 能够实现热光控制的聚合物延迟线阵列, 该器件可实现的最大延迟时间为 399.4 ps, 延迟间隔为 9.2 ps. 以 SiO_2 为下包层, SU-8 紫外固化光刻胶为波导芯层, 聚甲基丙烯酸甲酯为上包层, 采用旋涂、光刻、湿法腐蚀等工艺制备了 1×4 延迟线阵列与 MMI 热光开关的集成器件, 测试得到了延迟线阵列的近红外输出光斑, 插入损耗为 15~19 dB.

关键词:相控阵天线; 延迟线阵列; 热光开关; 聚合物; 集成器件; 热光效应; 螺旋结构

中图分类号: TN256

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)04-0423002-5

Design of an Integrated Device of Delay Line Array and Thermal Optical Switch Based on Polymeric Materials

LI Ran, WANG Lei, CHEN Xi, CHEN Chang-ming, YI Yun-ji, DUAN Ning, XU Shuai,
LIU Nan, SUN Yu, WANG Fei, ZHANG Da-ming

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Engineering Laboratory on Polymeric Waveguide Components of Optics Communications of Jilin Province, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012)

Abstract: An integrated device was designed which was composed of thermo-optic switch and delay line array. Rsoft software was used to optimize the parameters of digital multi-mode interference thermo-optic switch, and the varied output signal intensity can be achieved with changing the temperature of an electrode. Then a delay line with a helical structure was designed. Spiral waveguide structure was simulated by BPM software. Considering the size of the device and the loss parameter, a reasonable bend radius of the spiral structure was designed. The integrated delay line array structure with the thermo-optic switch has a maximum delay time of 399.4 ps and the corresponding delay interval is 9.2 ps. The device has three layers, which are fabricated by using SiO_2 as lower cladding layer, SU-8 photoresist as core layer and polymethylmethacrylate as upper cladding layer. By spin coating, lithography and wet etching, an integrated device with 1×4 MMI thermo-optic switch and delay line array was fabricated, and near-infrared field patterns of the delay line array was tested with insertion loss of 15~19 dB.

Key words: Phased array antenna; Delay line array; Thermo-optic switch; Polymer; Integrated devices; Thermo-optic effect; Spiral structure

OCIS Codes: 230.7380; 130.3120; 160.5470

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61177027、61077041、61107019)、吉林省科技发展规划(No. 20110315)、吉林省青年科研基金(No. 20100174)、集成光电子学国家重点联合实验室自主课题(No. IOSKL2012ZZ06)和吉林大学大学生创新创业训练计划(No. 2012A51136)资助

第一作者:李然(1987—),男,硕士研究生,主要研究方向为聚合物延迟线光波导器件. Email: johnson0219@126.com

导师(通讯作者):王菲(1978—),女,副教授、硕士生导师,主要研究方向为聚合物平面光波导器件. Email: wang_fei@jlu.edu.cn

收稿日期:2013-07-15; **录用日期:**2013-10-22

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

在未来的宽带宽相控阵天线系统(Phase Array Antennas, PAA)中,光纤和光波导对于射频信号的传播和控制将起到非常重要的作用^[1].与军事通信天线相比,相控阵天线提升了性能并减小了重量和功耗.不仅如此,射频信号和微波信号在光纤和光波导中的传输损耗低,抗电磁干扰并且减小了系统尺寸^[2-5].相控阵雷达的两类不同工作信号,瞬时大带宽信号与跳频或扫频信号都要求极宽的工作频带.同时,不论是雷达还是电子对抗系统,都要求宽角扫描.而传统相控阵雷达由于孔径效应和孔径渡越时间的限制,很难在大扫描角下实现大瞬时宽带^[6-8].而光纤和光波导可以在大扫描角下实现大瞬时带宽,在提高雷达的分辨率、识别能力、解决多目标成像等方面具有巨大的优势.

与光纤延迟线相比,光波导延迟线可以通过光刻的方法使PAA系统精确到亚皮秒.此外,光波导延迟线可以与光开关集成构成平面光波回路(Planar Lightwave Circuit, PLC)^[9-11].

由于该技术比光纤、微机电系统或者声光延迟系统的占空比小,所以具有很大的潜力^[12-14].2000年Suning Tang等制备出超低损耗聚合物光波导(0.02 dB/cm @1 064 nm),研制出10 m长聚合物光波导延迟线,其延时范围在50 ns,时间分辨率0.1 ps,器件最大插入损耗6.8 dB^[15].2004~2005年,美国Omega Optics公司和德克萨斯大学Austin分校光电子研发中心共同提出一种基于热光效应开关的聚合物光实时延迟线(Optical True Time Delay, OTTD)方案,他们研制的器件最大延时为199.2 ps,插入损耗小于10 dB^[16].2010年,Aydin Yeniay等报道了一种基于全氟化聚合物基质的4bit光实时延时线,这种全氟聚合物光波导在整个光通信O/C/L带的传输损耗均小于0.06 dB/cm,器件结构是将无热的16通道阵列波导光栅与延迟线集成在一个波长选择的循环回路中,16通道的延迟线器件可实现最大延时600 ps,时延间隔40 ps^[17].2012年Hansuek Lee等在硅衬底上制备出超低损耗的光延迟线,其光衰减率为0.08 dB/m^[18].2013年上海交通大学王涛等设计出硅基微环谐振腔中可调光延迟线,延迟时间为29 ps^[19].

本文设计了一种基于聚合物材料的1×4延迟线阵列,与Aydin Yeniay等制备的聚合物光延迟线相比,本文在设计中增加了与热光开关的集成,可以通过电压调节光从不同的信道输出.在集成器件设计中,选择SiO₂作为下包层,SU-8紫外固化光刻胶为波导芯层,聚甲基丙烯酸甲酯(Polymethylmethacrylate, PMMA)为包层进行理论模拟.设计出热光控制的1×4聚合物

延迟线阵列器件.由于在延迟线中集成多模干涉结构热光开关,当对热光开关的调制臂上施加电压时,可对2×2热光开关的输出光强度进行调节,从而控制延迟线的输出光强度,实现热光控制的延迟线阵列.

1 热光开关的设计与模拟

热光开关采用多模干涉(Multimode Interference, MMI)耦合器结构,图1为热光开关的结构示意图.它包括输入波导,Y分支波导,多模干涉波导,调制波导和波导上的电极加热器.Y分支波导是一个3 dB对称结构,即当一束光从输入端输入波导时,光场能量将平均分配到两个调制臂^[20-23].为降低Y分支处波导的耦合损耗,设计中采用正弦输出的Y分支波导结构.

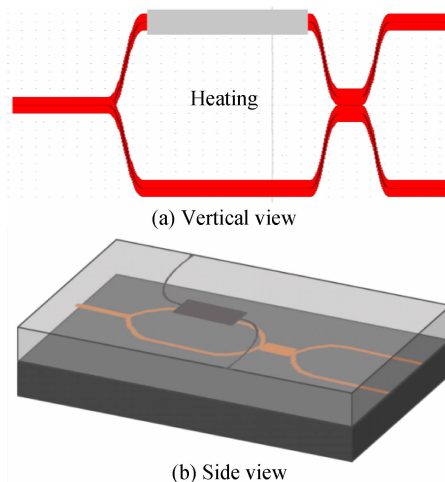


图1 热光开关结构

Fig. 1 Structure profile of the thermo-optical switch

热光效应是由于材料温度变化而导致材料的折射率发生变化的效应.材料的热光系数可以用 dn/dT 描述,其中 n 是温度为 T 时材料的折射率.本文设计的这种MMI热光开关的工作原理是:一束输入光经过Y分支波导后被分成强度相等的两束光,分别在两个波导中传输.光波导是由热光材料制成的,其折射率将随温度发生变化.当电极上有电流流过时,产生热量,使得电极下面材料的折射率发生变化,致使两个分支波导的有效折射率不同,从而使两束光信号到达多模干涉区时产生了相位差,这两束光信号在多模干涉区发生干涉后将在两个输出端得到强度不同的光信号.利用Rsoft软件设计并模拟了MMI热光开关的光场传输特性,确定MMI干涉区的长度为1 655 μm ,宽度为8 μm .图2(a)是2×2 MMI热光开关未加热时光场分布图.图2(b)和图2(c)分别为利用Rsoft软件模拟的在不同温度下光信号从通道1和通道2输出时的光场分布.从图中可以看出,当外加电压达到某一值时,通道1输出达到最大值(最小值),通道2达到最小值(最大值).图3为两输出波导光场强度随材料折射率变化

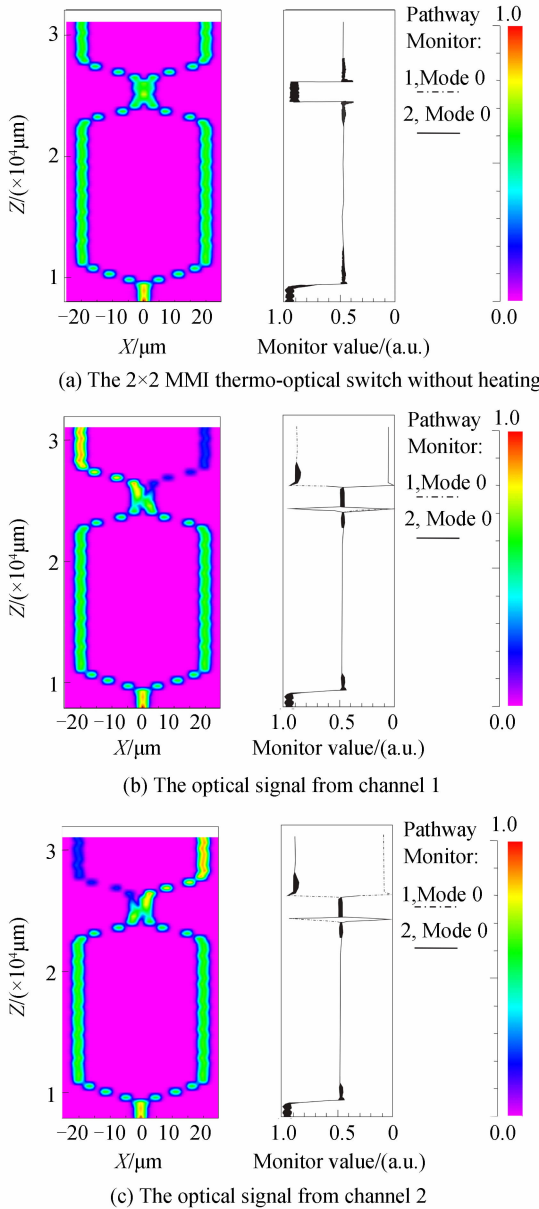
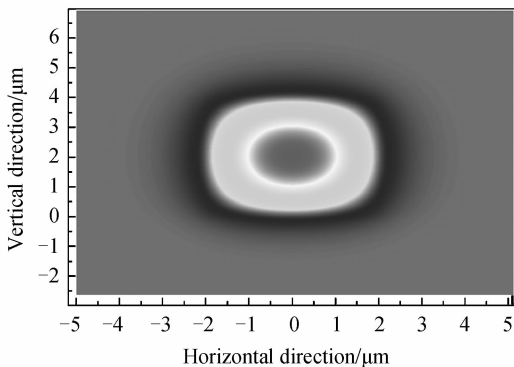


图2 2×2 MMI热光开关光场分布

Fig. 2 Optical field simulation of the 2×2 MMI thermo-optical switch



(a) Optical field distribution of the waveguide cross-section

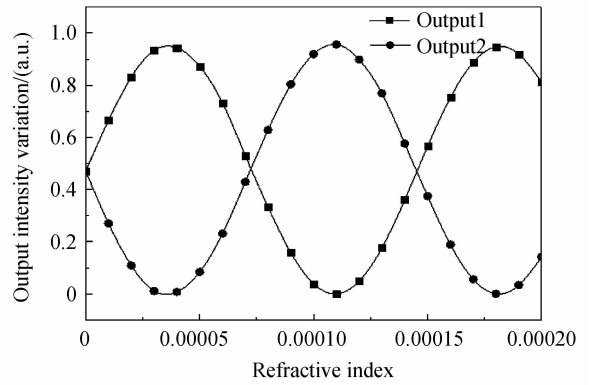


图3 输出光强随折射率变化关系曲线

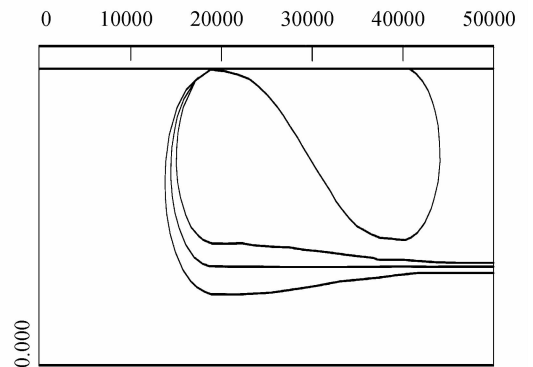
Fig. 3 Output intensity variation with the refractive index 曲线,可以看出,当材料折射率的变化为 3×10^{-5} 时,通道 1 的输出强度达到最大值,通道 2 的输出强度达到最小值.

2 延迟线阵列结构设计及制备

光波导延迟线的延迟时间表示为

$$T = n \cdot l / c \quad (1)$$

式中, n 是波导芯层的折射率, c 为光在真空中的传播速率, l 为光波导总长度. 由式(1),为实现大的延迟时间需要增加波导长度,同时需要设计尽量小的器件结构以利于集成. 为满足上述要求,本文设计了一种螺旋型波导延迟线阵列结构,由直波导,半圆形波导和正弦弯曲波导构成,波导截面尺寸为 $4 \times 4 \mu\text{m}^2$,图 4(a)为利用 Rsoft 软件模拟的波导截面的光场分布图,图 4(b)为延迟线结构示意图. 为降低耦合损耗,在延迟线结构中采用正弦弯曲波导连接直波导和半圆形波导,这种波导结构同时可以避免基模和高阶模式之间产生耦合^[16]. 该结构中包含四个信道,总长度分别为: $l_1 = 50\ 000 \mu\text{m}$, $l_2 = 126\ 599 \mu\text{m}$, $l_3 = 128\ 357 \mu\text{m}$, $l_4 = 130\ 132 \mu\text{m}$. 利用式(1)可以算出,该延迟线结构可以实现的最大延迟时间为 399.4 ps,延迟间隔 9.2 ps. 图 4(c)为利用 Optic-BPM 软件模拟的弯曲波导的 3-D 光



(b) Schematic of the spiral delay line array waveguide

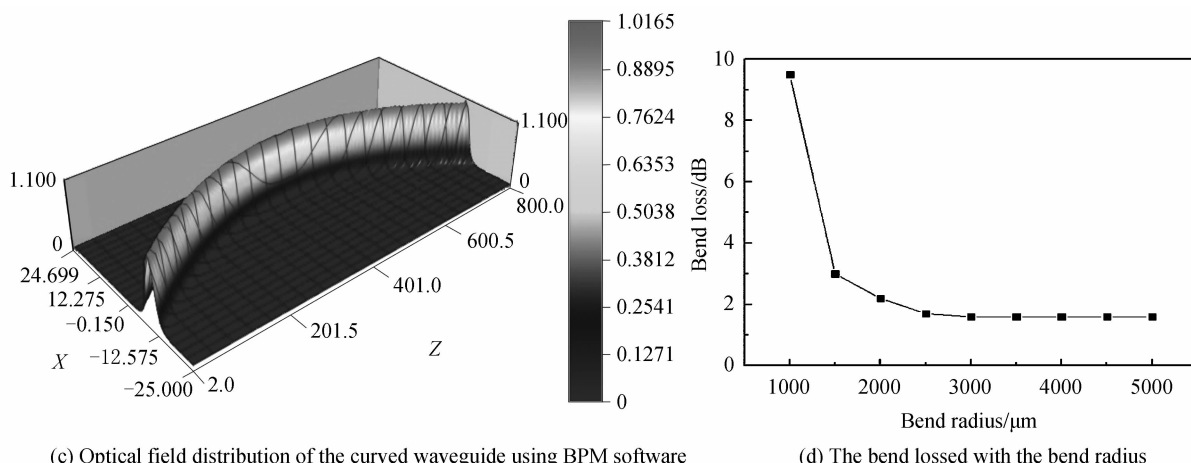


图4 延迟线阵列特性
Fig. 4 Properties of OTTD

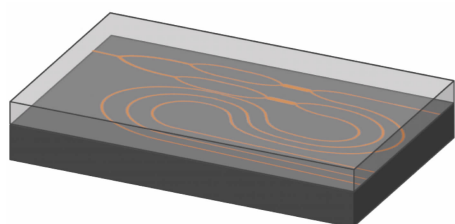


图5 延迟线阵列与热光开关集成器件结构示意图
Fig. 5 Structure diagram of the integrated device

场分布图.图4(d)为利用BPM软件模拟圆心角为 10° 的不同曲率半径下弯曲波导的损耗值,其中,波导截面尺寸为 $4 \times 4 \mu\text{m}^2$.从图中可以看出,弯曲半径大于 $3000 \mu\text{m}$ 时波导的弯曲损耗已基本不变,考虑到器件尺寸,最终选定曲率半径为 $4000 \mu\text{m}$.图5为延迟线阵列与MMI结构热光开关集成器件的结构示意图,该集成结构可实现延迟线阵列的选择输出.

以 SiO_2 为下包层,SU-8紫外固化光刻胶为波导芯层,PMMA为上包层,制备了 1×4 延迟线阵列与MMI热光开关的集成器件,图6(a)为器件的制备工艺流程图.首先在表面长有 SiO_2 层的硅衬底上旋涂SU-8光刻胶,然后进行光刻、显影、旋涂PMMA上包层,完成对延迟线波导的制备;之后在波导上表面进行蒸镀铝膜、光刻、显影等工艺步骤,完成波导表面加热电极的制备.图6(b)为采用图6(a)工艺步骤制备的器件的实物照片.利用光波导耦合测试系统^[24]对制备完成的延迟线阵列进行光传输性能测试,图6(c)为测试得到的延迟线阵列的近红外输出光斑,测得器件插入损耗为 $15 \sim 19 \text{ dB}$.根据波导的长度和材料在中心波长 1550 nm 的折射率,利用式(1)可计算出该器件的最大延迟时间为 399.4 ps ,时延间隔 9.2 ps .

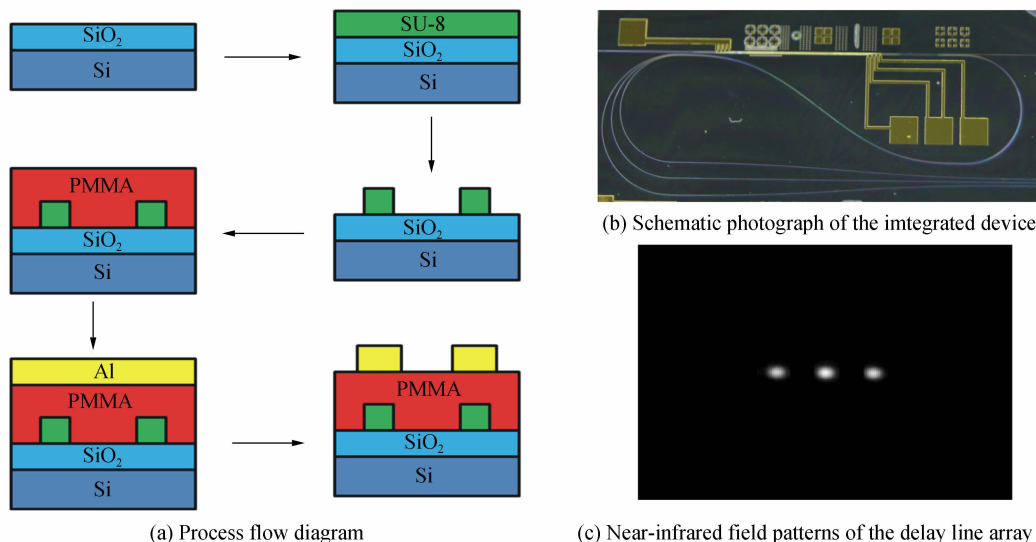


图6 工艺流程及输出光斑
Fig. 6 Process flow diagram and patterns

3 结论

设计并制备了一种基于聚合物材料的 1×4 延迟线阵列与 MMI 热光开关的集成器件. 利用 Rsoft 软件设计并模拟了 MMI 热光开关的性能, 可实现输出光场强度随电极加热温度变化. 设计了螺旋结构的 1×4 延迟线阵列, 利用 BPM 软件对螺旋结构波导进行数值模拟, 综合考虑器件尺寸和损耗参量设计出螺旋结构的延迟线阵列器件, 可实现最大延迟时间 399.4 ps, 时延间隔 9.2 ps. 以 SiO_2 为下包层, SU-8 紫外固化光刻胶为波导芯层, PMMA 为上包层, 采用旋涂、光刻、湿法腐蚀等工艺制备了 1×4 延迟线阵列与 MMI 热光开关的集成器件, 测试得到了延迟线阵列的近红外输出光斑, 插入损耗为 15~19dB. 将该延迟线阵列结构与热光开关进行集成, 能够实现热光控制的 1×4 聚合物延迟线阵列.

参考文献

- [1] HOWLEY B, WANG Xiao-long, CHEN M, *et al.* Reconfigurable delay time polymer planar lightwave circuit for an X-band phased-array antenna demonstration[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, **25**(3): 883-890.
- [2] CHEN Yi-hong, WU K, ZHAO F, *et al.* Reconfigurable true-time delay for wideband phased-array antennas[C]. SPIE, 2004, **5363**: 125-130.
- [3] RIZA N A, ARAIN M A, KHAN S A. Hybrid analog-digital variable fiber-optic delay line [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, **22**(2): 619.
- [4] MADAMOPOULOS N, RIZA N A. Demonstration of an all-digital 7-bit 33-channel photonic delay line for phased-array radars[J]. *Applied Optics*, 2000, **39**(23): 4168-4181.
- [5] WAMKY C M, MITAL R, ANDERSON B L. Demonstration of a quartic cell, a free-space true-time-delay device based on the white cell[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, **24**(10): 3849-3855.
- [6] HE Zi-shu, JIN Lin, HAN Yun-jie, *et al.* Development and implementation techniques of optically controlled phased array radar[J]. *Dianzi Xuebao (Acta Electronica Sinica)*, 2005, **33**(12): 2191-2195.
- [7] YANG Ying, DONG Yi, LIU Da-wei, *et al.* A 7-bit photonic true-time-delay system based on an 8 times 8 MOEMS optical switch[J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, **7**(2): 118-120.
- [8] CAPMANY J, NOVAK D. Microwave photonics combines two worlds[J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**(6): 319-330.
- [9] LI R L Q, TANG Hua-jun, CAO Guo-hua, *et al.* Optically heterodyned 25-GHz true-time-delay lines on thick LD-3 polymer-based planar waveguides[J]. *Applied Optics*, 1997, **36**(18): 4269-4272.
- [10] ACKERMAN E, WANUGA S, KASEMSET D, *et al.* Integrated 6-bit photonic true-time-delay unit for lightweight 3-6 GHz radar beamformer [C]. *Microwave Symposium Digest*, 1992., IEEE MTT-S International. IEEE, 1992: 681-684.
- [11] WANG Xiao-long, HOWLEY B, CHEN M Y, *et al.* Phase error corrected 4-bit true time delay module using a cascaded 2×2 polymer waveguide switch array[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(3): 379-383.
- [12] RIZA N A. Acousto-optically switched optical delay lines[J]. *Optics Communications*, 1998, **145**(1-6): 15-20.
- [13] RIZA N A, SUMRIDDETCHKAJORN S. Fault-tolerant polarization-insensitive photonic delay line architectures using two-dimensional digital micromirrordevices [J]. *Optics Communications*, 1999, **160**(4): 311-320.
- [14] KAMAN V, ZHENG Xue-zhen, HELKEY R J, *et al.* A 32-element 8-bit photonic true-time-delay system based on a 288×288 3-D MEMS optical switch [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, **15**(6): 849-851.
- [15] TANG Su-ning, LI Bu-lang, JIANG Nian-hua, *et al.* Ultra-low-loss polymeric waveguide circuits for optical true-time delays in wideband phased-array antennas [J]. *Optical Engineering*, 2000, **39**(3): 643-651.
- [16] MA H, JEN A K Y, DALTON L R. Polymer-based optical waveguides: materials, processing, and devices [J]. *Advanced Materials*, 2002, **14**(19): 1339-1365.
- [17] YENIAY A, GAO Ren-feng. True time delay photonic circuit based on perfluoropolymer waveguides [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, **22**(21): 1565-1567.
- [18] LEE H, CHEN Tong, LI Jiang, *et al.* Ultra-low-loss optical delay line on a silicon chip [J]. *Nature Communications*, 2012, **3**: 867.
- [19] WANG Tao. Research on optical control and modulation in silicon microring resonator [D]. Shanghai Jiao Tong University, 2013
王涛. 硅基微环谐振腔中的光调控研究[D]. 上海交通大学, 2013.
- [20] WANG W, SUN X, WANG X, *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.
- [21] BURNS W, MILTON A. Mode conversion in planar-dielectric separating waveguides [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1975, **11**(1): 32-39.
- [22] CHEN Tao, LIANG Zhong-cheng, XU Ning, *et al.* Novel space optical switch device of optofluidic[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(5): 797-801.
陈陶, 梁忠诚, 徐宁, 等. 新颖的微流控电调谐空间光开关[J]. *光子学报*, 2010, **39**(5): 797-810.
- [23] LIU Fu-min, HUANG Tao, LI Rui-long, *et al.* Effects of external stress applied to PM fiber-pigtail on extinction ratio of a Y-branch multi-functional integrated optical device[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(11): 1636-1640.
刘福民, 黄韬, 李瑞龙, 等. 外应力对 Y 波导器件尾纤消光比的影响[J]. *光子学报*, 2011, **40**(11): 1636-1640.
- [24] CHEN Chang-ming, YI Yun-ji, WANG Fei, *et al.* Ultra-long compact optical polymeric array waveguide true-time-delay line devices [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2010, **46**(5): 754-761.