

聚合物微环谐振器电光开关阵列的优化与模拟

闫 欣 马春生* 陈宏起 郑传涛 王现银 张大明

(集成光电子学国家重点联合实验室, 吉林大学电子科学与工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要 利用耦合模理论、电光调制理论和微环谐振理论, 提出了一个聚合物微环谐振器电光开关阵列的模型。该器件由 $N-1$ 个微环和 N 条平行信道构成, 在微环上施加不同方式的驱动电压, 可以实现 N 条信道的开关功能。以 7 微环 8 信道结构为例, 在 1550 nm 谐振波长下对该器件进行了优化和模拟。结果表明, 微环波导芯的截面尺寸为 $1.7 \mu\text{m} \times 1.7 \mu\text{m}$, 波导芯与电极间的缓冲层厚度为 $2.5 \mu\text{m}$, 电极厚度为 $0.2 \mu\text{m}$, 微环半径为 $13.76 \mu\text{m}$, 微环与信道间的耦合间距为 $0.14 \mu\text{m}$, 输出光谱的 3 dB 带宽约为 0.05 nm , 开关电压约为 8.1 V 左右, 插入损耗约为 $0.23 \sim 4.6 \text{ dB}$, 串扰小于 -20 dB 。

关键词 光通信; 微环阵列; 电光开关; 开关电压

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092909.2540

Optimization and Simulation of an Electro-Optic Polymer Microring Resonator Switch Array

Yan Xin Ma Chunsheng Chen Hongqi Zheng Chuantao Wang Xianyin Zhang Daming

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

Abstract In terms of the coupled-mode theory, microring resonance theory and electro-optic modulation theory, a structural model is proposed for designing an electro-optic polymer microring resonator switch array. This device consists of $N-1$ microrings and N parallel channels. By applying operation voltages in different manners on the microrings, the switching functions can be realized in the N channels. Taking 7 microrings and 8 channels as an example, the optimization and simulation are performed under the resonant wavelength of 1550 nm. The results are as follows: the core size of the microring is $1.7 \mu\text{m} \times 1.7 \mu\text{m}$, the buffer layer thickness between the core and the electrode is $2.5 \mu\text{m}$, the electrode thickness is $0.2 \mu\text{m}$, the microring radius is $13.76 \mu\text{m}$, the coupling gap between the microring and the channel is $0.14 \mu\text{m}$, the 3 dB bandwidth of the output spectrum is about 0.05 nm , the switching voltage is about 8.1 V , the insertion loss is about $0.23 \sim 4.6 \text{ dB}$, and the crosstalk is less than -20 dB .

Key words optical communications; microring resonator array; electro-optic switch; switching voltage

1 引 言

电光开关^[1,2]具有响应速度快、插入损耗低、消光比高、寿命长等优点,是光通信系统中高速率、大容量的信息传输、存储、交换与处理的重要元件。聚合物材料^[3,4]具有电光系数高、折射率易调整、成膜性能

好、加工工艺简单等优点,因此用电光聚合物材料制备电光开关已成为高速光开关的发展方向。近年来,微环谐振器的开关功能已引起国内外研究者的高度重视和极大兴趣。利用微环的谐振和滤波特性和材料的电光特性,可以设计制作出尺寸小、开关电压低、

收稿日期: 2009-01-07; 收到修改稿日期: 2009-03-19

基金项目: 国家 973 计划(2006CB302803)、国家自然科学基金(60706011)、教育部博士点新教师基金(20070183087)和吉林省科技发展计划青年科研基金(20080125)资助课题。

作者简介: 闫 欣(1978—),女,博士,讲师,主要从事导波光学和光电子学等方面的研究。

E-mail: xinyan2006@yahoo.com.cn

* 通信联系人。E-mail: mcsheng@163.com

开关时间短、开关速度快的微环电光开关^[5]。

本文利用耦合模理论、电光调制理论和微环谐振理论,提出了一个聚合物微环谐振器电光开关阵列的模型。该器件由 $N-1$ 个微环和 N 条平行信道构成,在微环上施加不同方式的驱动电压,可以实现 N 条信道的开关功能。以 7 微环 8 信道结构为例,在谐振波长为 1550 nm 的情况下,对微环和信道的波导芯尺寸、波导芯与电极间的缓冲层厚度、电极厚度、微环半径、微环与信道间耦合间距等参量进行了优化,并对器件的开关电压、传输光谱、插入损耗、串扰等进行了模拟,并对模拟结果进行了分析与讨论。

2 基本结构与工作原理

图 1 给出了聚合物微环谐振器电光开关阵列的结构简图和微环波导的横截面图,它是由 $N-1$ 个微环和 N 条平行信道构成。电极只加在微环上,信

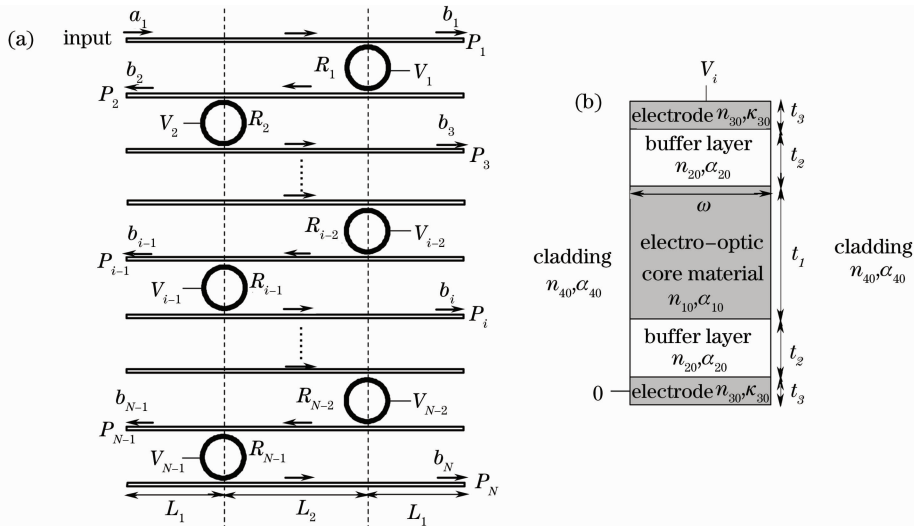


图 1 微环谐振器电光开关阵列的结构模型。(a)结构图;(b)横截面图

Fig. 1 Structural model of an electro-optic microring resonator switch array. (a) diagram of structure; (b) cross section

不施加电压时,这一结构为微环谐振器阵列;施加电压时,则为微环谐振器电光开关阵列。该微环谐振器阵列的滤波原理是:不加电压时,由最上信道左端口输入的不同波长的信号光在临近耦合点处不断地耦合进入微环 R_1 中,然后以相同的方式依次耦合进入微环 R_2, R_3, \dots, R_{N-1} 中,最后由微环 R_{N-1} 耦合进入最下信道并从其相应端口输出。在此传输过程中,只有一个特定波长的信号光满足微环谐振条件,并在微环中发生谐振,其光功率将全部由最下信道相应端口输出,输出光功率以该谐振波长信号光为最大,而其他信道相应端口中的输出光功率以谐振波长信号光为最小,从而实现了谐振波长的滤波功能。

道上不加电极。每个微环波导的结构依次为:上电极/上缓冲层/波导芯/下缓冲层/下电极/衬底,其中波导芯为聚合物电光材料。令所有微环的半径相等各为 R ;所有信道的长度相等各为 $2L_1 + L_2$,其中 L_1 为信道端口到耦合点间的距离, L_2 为同一信道上两个耦合点间的距离。令微环与信道间的耦合间距为 d ;微环的芯宽度为 w ,芯厚度为 t_1 ,折射率为 n_{10} ,体振幅衰减系数为 α_{10} ;上下限缓冲层的厚度相等各为 t_2 ,折射率为 n_{20} ,体振幅衰减系数为 α_{20} ;上下电极厚度相等各为 t_3 ,折射率为 n_{30} ,体消光系数为 κ_{30} ;芯两侧包层的折射率为 n_{40} ,体振幅衰减系数为 α_{40} 。令第 1 条信道输入端口的输入光振幅为 a_1 ,第 i 条信道输出端口的输出光振幅为 b_i 。为了使在不加电压时信道和微环具有相同的传播常数,二者的芯宽度有所差别,这是由微环的弯曲而造成的。除此之外,信道波导与微环波导的其他参数皆相同。

微环谐振器电光开关阵列的工作原理是:选择具有谐振波长的信号光由最上信道左端口输入,由上面微环谐振器阵列的滤波原理可知,当外加电压为零时,最下信道相应端口的输出光功率最大,而其他信道相应端口的输出光功率最小。当在某一微环的电极上施加电压时,此微环芯层聚合物电光材料的折射率要发生变化,使此微环中模的传播常数发生变化,与信道产生了相位失配,从而导致此微环和信道中传输信号的光功率发生变化。当外加电压等于开关转换电压时,该微环上面的一条信道相应端口的输出光功率变为最大,而其他信道相应端口的输出光功率变为最小,从而实现了开关功能。依次

在 N 个微环上施加驱动电压,可以实现 N 条信道的开关功能。

3 理论分析

令芯层材料的电光系数为 γ_{33} ,首先给出工作电压与折射率变化的关系式。如图 1(b)所示,令 E_1 , E_2 分别为加在微环芯层和缓冲层上的电场,施加电压与电场之间的关系为 $V = E_1 t_1 + 2E_2 t_2$ 。由介质层分界面处电位移的连续条件 $n_{10}^2 E_1 = n_{20}^2 E_2$ 及电光调制理论,可以得到由电压 V 引起的芯层电光材料的折射率变化 Δn_{10} 为

$$\Delta n_{10} = \frac{1}{2} n_{10}^3 \gamma_{33} E_1 = \frac{n_{10}^3 \gamma_{33} V}{2 \left(t_1 + \frac{2t_2 n_{10}^2}{n_{20}^2} \right)}, \quad (1)$$

即芯层电光材料的折射率由 n_{10} 变到 $n_{10} + \Delta n_{10}$,而其他介质层为非电光材料,其折射率 n_{20} , n_{30} , n_{40} 不随施加电压的变化而变化。

令微环与信道间的振幅耦合比率和振幅透射比率分别为 κ , t , 满足 $\kappa^2 + t^2 = 1$ 。由微环谐振器阵列振幅之间的关系可推导出由最上信道左端口至各信道输出端口的光强传递函数为

$$|B_i|^2 = \left| \frac{b_i}{a_1} \right|^2 = |uv^{i-1} \exp[-j(2\psi_1 + i\psi_2)]|^2, \quad (i = 1, 2, \dots, N-1) \quad (2)$$

$$|B_N|^2 = \left| \frac{b_N}{a_1} \right|^2 = |v^{N-1} \exp[-j(2\psi_1 + N\psi_2)]|^2, \quad (3)$$

式中

$$u = \frac{t[1 - \exp(-j2\varphi)]}{1 - t^2 \exp(-j2\varphi)}, \quad (4)$$

$$v = -\frac{\kappa^2 \exp(-j\varphi)}{1 - t^2 \exp(-j2\varphi)}, \quad (5)$$

$$\psi_1 = L_1 (\beta_L - j\alpha_L), \quad (6)$$

$$\psi_2 = L_2 (\beta_L - j\alpha_L), \quad (7)$$

$$\varphi = \pi R (\beta_R - j\alpha_R), \quad (8)$$

其中, $\beta_L = \beta_0$ 为信道的模传播常数, $\beta_R = \beta_0$ 为不加电压时微环的模传播常数, $\beta_R = \beta_V$ 为施加电压时微环的模传播常数, α_L 为信道的模损耗系数, α_R 为微环的模损耗系数。相应的各信道的输出功率定义为

$$P_i = 10 \lg(|B_i|^2). \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (9)$$

4 结果及讨论

以 7 微环 8 信道结构为例,首先对图 1 所示的聚合物微环谐振器电光开关阵列进行了参数优化,相关参数取为:谐振波长 $\lambda_0 = 1550$ nm, 聚合物芯层

$n_{10} = 1.59$, $\alpha_{10} = 0.25$ dB/cm, $\gamma_{33} = 68$ pm/V^[6]; 聚合物缓冲层 $n_{20} = 1.461$, $\alpha_{10} = 0.25$ dB/cm^[7]; 采用金作为金属电极, $n_{30} = 0.19$, $\kappa_{30} = 6.1$ ^[8]; 左右包层为空气, $n_{40} = 1$, $\alpha_{40} = 0$; 信道端口到耦合点间的距离 $L_1 = 1000$ μm , 同一信道上两个耦合点间的距离 $L_2 = 50$ μm 。取微环半径 $R = 13.76$ μm , 此时弯曲损耗很小,为 10^{-4} dB/cm 量级,因此模式损耗主要来自电极和聚合物材料的吸收。

取微环的芯宽度 w 与芯厚度 t_1 相等,可以确定出 E_{y0}^* 单模传输条件为 $1.33 < w = t_1 < 2.05$ μm , 选取 $w = t_1 = 1.7$ μm 。由于在器件的实际工艺中,电极厚度 t_2 不可能制作得太厚,因此其最小厚度需要确定。芯层和电极间的上下缓冲层厚度 t_3 对器件的开关电压和电极引起的损耗有很大的影响。减小 t_3 可以有效地减小开关电压,但同时电极引起的损耗将变大。因此为了尽可能地减小器件的开关电压和电极引起的损耗,缓冲层厚度 t_3 也要适当选择。计算表明,当 $t_2 \geq 2.5$ μm 及 $t_3 \geq 0.2$ μm 时,模式的传输将达到一个稳态,而由电极引起的模式损耗也已降低到最小。这意味着在这种情况下,电极可以被视为半无限厚。因此选取 $t_2 = 2.5$ μm 及 $t_3 = 0.2$ μm , 此时信道中的模损耗系数 $\alpha_L = 0.256$ dB/cm, 微环中的模损耗系数 $\alpha_R = 0.29$ dB/cm。同时,上述的参数优化值保证了波导中 E_{y0}^* 主模的单模传输。

微环的弯曲要影响到模的传播常数,为了使在不加电压时信道和微环具有相同的传播常数,二者的芯宽度应有所差别。利用文献^[9]给出的弯曲波导的分析方法可以确定出,当微环半径 $R = 13.76$ μm 时,若取微环的芯宽度和芯厚度相等为 1.7 μm 、信道的芯宽度和芯厚度分别为 2.03 μm 和 1.7 μm , 此时不加电压时信道和微环具有相同的传播常数。由耦合模理论和微环谐振理论可知,若不考虑材料的传输损耗、微环的弯曲损耗等其他形式的损耗,此时谐振波长下的耦合效率可达 100%, 耦合损耗为零,称为理想耦合。若考虑其他形式的损耗,耦合效率小于 100%, 但对于谐振波长,耦合效率还将保持最大。

微环与信道间的耦合间距 d 对器件的开关电压和输出光谱的带宽也有很大的影响。增大 d 可以有效地减小开关电压,但同时输出光谱的带宽也会减小。工艺误差的存在和环境温度的变化将引起器件的光谱漂移。输出光谱的带宽过小,需要对器件的工作波长进行严格的控制,进而要求更高的工艺精度

和对环境温度进行严格的恒温控制。因此为了尽可能地减小器件的开关电压,并使输出光谱具有适当的带宽,耦合间距 d 也需要适当选择。当选取 $d = 0.14 \mu\text{m}$ 时,器件的开关电压可以减小到 8.1 V ,输出光谱的 3 dB 带宽约为 0.05 nm 。

选取上述的参数优化值,在不同的施加电压的方式下,图 2 和图 3 分别显示了各信道的输出功率和输出光谱,在图 2 中取工作波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$,在图 3 中取工作电压 $V = 8.1 \text{ V}$ 。在谐振波长及某一施加电压方式下,输出功率最大的信道称为“ON”态,其输出功率[由(9)式给出]的绝对值定义为插入损耗;其他信道称为“OFF”态,其输出功率[由(9)式给出]定义为串扰。具体解释如下:

在图 2(a)和图 3(a)中,只在第 1 个微环 R_1 上施加电压,即 $V_2 = V_3 = V_4 = V_5 = V_6 = V_7 = 0$,图 2(a)中取 $V_1 \geq 0$,图 3(a)中取 $V_1 = 8.1 \text{ V}$ 。由图 2(a)可以看出,当驱动电压 V_1 增大时,第 1 条信道的输出功率 P_1 很快地增大。由图 3(a)可以看出,当取 $V_1 = 8.1 \text{ V}$ 时,在工作波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 处, P_1 已变为最大,其插入损耗约为 0.23 dB (图中的虚线与 P_1 曲线的交点),而其他信道的输出功率变得很小,其串扰皆小于 -20 dB (图中的虚线与 $P_{i \neq 1}$ 曲线的交点)。这说明在此种施加电压方式下,第 1 条信

道实现了开关功能。

在图 2(b)和图 3(b)中,只在第 2 个微环 R_2 上施加电压,即 $V_1 = V_3 = V_4 = V_5 = V_6 = V_7 = 0$,图 2(b)中取 $V_2 \geq 0$,图 3(b)中取 $V_2 = 8.1 \text{ V}$ 。由图 2(b)可以看出,当驱动电压 V_2 增大时,第 2 条信道的输出功率 P_2 很快地增大。由图 3(b)可以看出,当取 $V_2 = 8.1 \text{ V}$ 时,在工作波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 处, P_2 已变为最大,其插入损耗约为 0.88 dB (图中的虚线与 P_2 曲线的交点),而其他信道的输出功率变得很小,其串扰皆小于 -20 dB (图中的虚线与 $P_{i \neq 2}$ 曲线的交点)。这说明在此种施加电压方式下,第 2 条信道实现了开关功能。

在图 2(c)和图 3(c)中,只在第 3 个微环 R_3 上施加电压,即 $V_1 = V_2 = V_4 = V_5 = V_6 = V_7 = 0$,图 2(c)中取 $V_3 \geq 0$,图 3(c)中取 $V_3 = 8.1 \text{ V}$ 。由图 2(c)可以看出,当驱动电压 V_3 增大时,第 3 条信道的输出功率 P_3 很快地增大。由图 3(c)可以看出,当取 $V_3 = 8.1 \text{ V}$ 时,在工作波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 处, P_3 已变为最大,其插入损耗约为 1.51 dB (图中的虚线与 P_3 曲线的交点),而其他信道的输出功率变得很小,其串扰皆小于 -20 dB (图中的虚线与 $P_{i \neq 3}$ 曲线的交点)。这说明在此种施加电压方式下,第 3 条信道实现了开关功能。

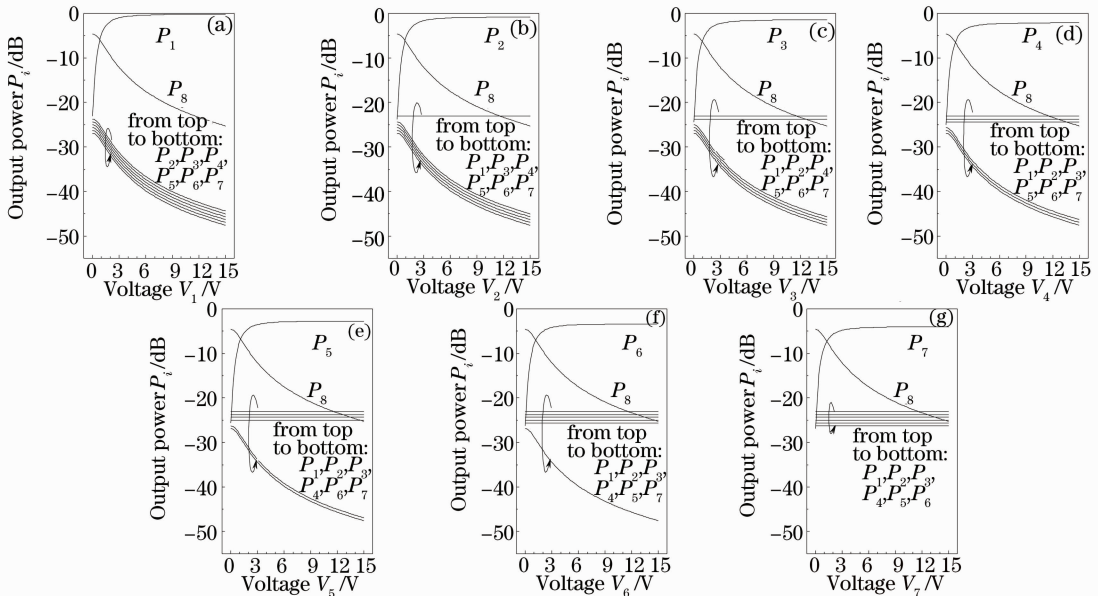


图 2 各信道的输出功率 P_i 随工作电压 V_i 的变化

Fig. 2 Output power P_i versus operation voltage V_i for each channel

在图 2(d)和图 3(d)中,只在第 4 个微环 R_4 上施加电压,即 $V_1 = V_2 = V_3 = V_5 = V_6 = V_7 = 0$,图 2(d)中取 $V_4 \geq 0$,图 3(d)中取 $V_4 = 8.1 \text{ V}$ 。由图 2(d)可以看出,当驱动电压 V_4 增大时,第 4 条信道

的输出功率 P_4 很快地增大。由图 3(d)可以看出,当取 $V_4 = 8.1 \text{ V}$ 时,在工作波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 处, P_4 已变为最大,其插入损耗约为 2.16 dB (图中的虚线与 P_4 曲线的交点),而其他信道的输出功率变得很

小,其串扰皆小于 -20 dB(图中的虚线与 $P_{i \neq 4}$ 曲线的交点)。这说明在此种施加电压方式下,第4条信道实现了开关功能。

在图2(e)和图3(e)中,只在第5个微环 R_5 上施加电压,即 $V_1 = V_2 = V_3 = V_4 = V_6 = V_7 = 0$,图2(e)中取 $V_5 \geq 0$,图3(e)中取 $V_5 = 8.1$ V。由图2(e)可以看出,当驱动电压 V_5 增大时,第5条信道

的输出功率 P_5 很快地增大。由图3(e)可以看出,当取 $V_5 = 8.1$ V时,在工作波长 $\lambda = 1550$ nm处, P_5 已变为最大,其插入损耗约为 2.80 dB(图中的虚线与 P_5 曲线的交点),而其他信道的输出功率变得很小,其串扰皆小于 -20 dB(图中的虚线与 $P_{i \neq 5}$ 曲线的交点)。这说明在此种施加电压方式下,第5条信道实现了开关功能。

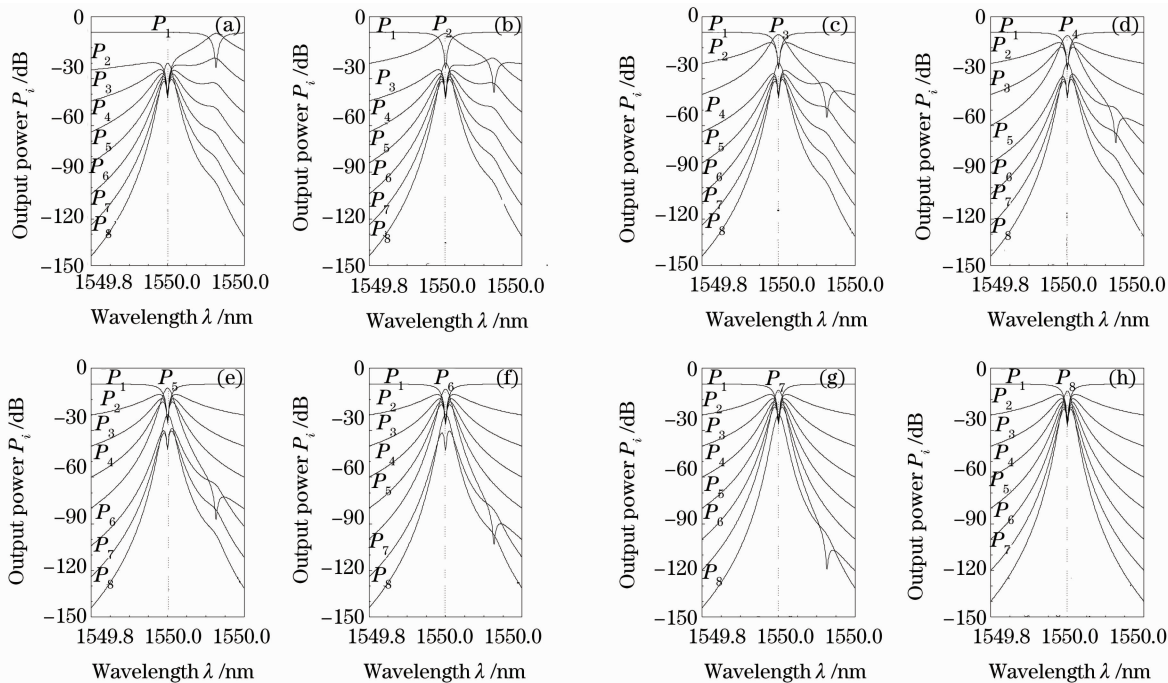


图3 各信道的输出功率 P_i 随传输波长 λ 的变化(输出光谱)

Fig. 3 Output power P_i versus propagation wavelength λ for each channel (output spectrum)

在图2(f)和图3(f)中,只在第6个微环 R_6 上施加电压,即 $V_1 = V_2 = V_3 = V_4 = V_5 = V_7 = 0$,图2(f)中取 $V_6 \geq 0$,图3(f)中取 $V_6 = 8.1$ V。由图2(f)可以看出,当驱动电压 V_6 增大时,第6条信道的输出功率 P_6 很快地增大。由图3(f)可以看出,当取 $V_6 = 8.1$ V时,在工作波长 $\lambda = 1550$ nm处, P_6 已变为最大,其插入损耗约为 3.44 dB(图中的虚线与 P_6 曲线的交点),而其他信道的输出功率变得很小,其串扰皆小于 -20 dB(图中的虚线与 $P_{i \neq 6}$ 曲线的交点)。这说明在此种施加电压方式下,第6条信道实现了开关功能。

在图2(g)和图3(g)中,只在第7个微环 R_7 上施加电压,即 $V_1 = V_2 = V_3 = V_4 = V_5 = V_6 = 0$,图2(g)中取 $V_7 \geq 0$,图3(g)中取 $V_7 = 8.1$ V。由图2(g)可以看出,当驱动电压 V_7 增大时,第7条信道的输出功率 P_7 很快地增大。由图3(g)可以看出,当取 $V_7 = 8.1$ V时,在工作波长 $\lambda = 1550$ nm处, P_7 已变为最大,其插入损耗约为 4.08 dB(图中的虚线

与 P_7 曲线的交点),而其他信道的输出功率变得很小,其串扰皆小于 -20 dB(图中的虚线与 $P_{i \neq 7}$ 曲线的交点)。这说明在此种施加电压方式下,第7条信道实现了开关功能。

在图3(h)中,所有微环上都不加电压,即 $V_1 = V_2 = V_3 = V_4 = V_5 = V_6 = V_7 = 0$ 。可以看出,在工作波长 $\lambda = 1550$ nm处, P_8 已变为最大,其插入损耗约为 4.60 dB(图中的虚线与 P_8 曲线的交点),而其他信道的输出功率变得很小,其串扰皆小于 -20 dB(图中的虚线与 $P_{i \neq 8}$ 曲线的交点)。这说明在此种施加电压方式下,第8条信道实现了开关功能。

本文还对该器件的开关时间作了分析和讨论。由于篇幅所限,这里只给出模拟结果。该器件的开关时间约为 5.5 ps,比以往我们所设计的聚合物马赫-曾德尔干涉仪(MZI)型和方向耦合型电光开关^[10]的开关电压(分别约为 18.1 ps和 32.8 ps)小很多。因此可以看出,与其他结构的电光开关相比,微环型电光开关具有更快的开关响应特性。

5 结 论

在谐振波长 1550 nm 的情况下,应用本文给出的光强传递函数对聚合物微环谐振器电光开关阵列进行了特性分析和参数优化。微环波导芯尺寸和缓冲层厚度要适当地选择,既要使所施加的工作电压尽量地小,同时又不能使模式损耗过大。当取波导芯厚度与宽度均为 1.7 μm 、缓冲层厚度为 2.5 μm 时,信道和微环的模损耗系数分别约为 0.256 dB/cm, 0.29 dB/cm。微环与信道间的耦合间距也要适当地选择,既要使器件的工作电压尽量地小,同时又不能使输出光谱的 3 dB 带宽过小。当取微环与信道间的耦合间距为 0.14 μm 、工作电压为 8.1 V 时,输出光谱的 3 dB 带宽约为 0.05 nm,插入损耗约为 0.23~4.6 dB,串扰小于 -20 dB。模拟结果表明,在不同的施加电压方式下,本文所设计的聚合物微环谐振器电光开关阵列的 8 条信道均实现了良好的开关功能。

本文设计的电光关阵列的优点是结构简单,可以实现多信道的开关功能;缺点是各信道的插入损耗不均衡,随着信道数的增大而增大。再者,在工艺制作中由于工艺误差等因素,实际制作的器件性能还会有所下降。因此应选择传输损耗小的电光聚合物材料作为波导材料,提高器件制备的工艺精度,特别是采用蒸汽回熔技术平滑波导的侧壁,能够把器件的插入损耗减少 5~7 dB,串扰减少 2.5 dB^[11]。在插入损耗和串扰允许的情况下,本文给出的方法适用于具有更多信道的这类器件的优化设计和分析模拟。

参 考 文 献

- 1 Q. Wang, J. P. Yao. A high speed 2×2 electro-optic switch using a polarization modulator[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(25): 16500~16505
- 2 Liu Feng, Ye Qing, Qu Ronghui *et al.*. Polarization independent lanthanum-doped lead zirconium titanate electro-optical switch based on fiber Loop mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 107~110
刘峰,叶青,瞿荣辉等. 基于光纤环形镜的偏振无关的掺镧锆钛酸铅电光开关[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 107~110
- 3 Y. Q. Tu, Q. Zhang, H. Agren. Electric field poled polymeric nonlinear optical systems; molecular dynamics simulations of poly (methyl methacrylate) doped with disperse red chromophores[J]. *J. Phys. Chem. B*, 2007, **111**(14): 3591~3598
- 4 Y. Enami, D. Mathine, C. T. Deroose *et al.*. Hybrid cross-linkable polymer/sel-gel waveguide modulators with 0.65 V half wave voltage at 1550 nm[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(9): 093505
- 5 Y. Tanushi, S. Yokoyama. Design and simulation of ring resonator optical switches using electro-optic materials[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2006, **45**(4B): 3493~3497
- 6 G. Y. Xu, Z. F. Liu, J. Ma *et al.*. Organic electro-optic modulator using transparent conducting oxides as electrodes[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(19): 7380~7385
- 7 C. Pitois, C. Vukmirovic, A. Hult. Low-loss passive optical waveguides based on photosensitive poly (pentafluorostyrene-co-glycidyl methacrylate) [J]. *Macromolecules*, 1999, **32**(9): 2903~2909
- 8 W. G. Driscoll, W. Vaughan. *Handbook of Optics* [M]. New York: McGraw-Hill, 1978, 7
- 9 A. Melloni, F. Carniel, R. Costa *et al.*. Determination of bend mode characteristics in dielectric waveguides[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(4): 571~577
- 10 Zheng Chuantao, Ma Chunsheng, Yan Xin *et al.*. Analysis of high-frequency response characteristics of polymer directional coupler electro-optic switches[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1631~1637
郑传涛,马春生,闫欣等. 聚合物定向耦合电光开关的高频响应特性分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1631~1637
- 11 Zhang Haiming, Ma Chunsheng, Qin Zhengkun *et al.*. Steam-redissolution technique for reduction of polymer/Si arrayed waveguide grating loss[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 690~694
张海明,马春生,秦政坤等. 减少聚合物阵列波导光栅损耗的蒸汽回溶技术[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 690~694