

一种带有U形波导的交叉信道单微环电光开关*

张鑫 李志全[†] 童凯

(燕山大学电气工程学院, 秦皇岛 066004)

(2013年11月14日收到; 2014年1月2日收到修改稿)

本文利用耦合模理论, 电光调制理论和传输矩阵法, 提出了一个带有U形波导的交叉信道单微环电光开关的器件模型, 并在谐振波长为1561 nm的情况下对该器件进行了仿真计算. 结果表明, 该电光开关的开关电压约为400 V, 串扰小于-30 dB, 插入损耗小于4 dB, 开关时间仅为5.4 ps, 其中微环上的上升和下降时间仅为0.32 ps. 此外, 该电光开关由单刀双掷开关控制, 通过在微环和U形波导上加载驱动电压可实现三种开关状态, 不仅可以实现光信号在两条输出信道的选择, 还可以使两条信道同时有光信号输出.

关键词: U形波导, 微环, 光开关, 时域响应

PACS: 42.60.Da, 42.79.Ta, 42.82.-m

DOI: 10.7498/aps.63.094207

1 引言

作为光通信系统中实现高速率、大容量信息传输、交换、存储与处理的重要元件, 电光开关具有开关时间短, 重复频率高, 输出脉冲窄, 同步性能好, 消光比高, 稳定性好等诸多优点, 多年来一直是国内外热门的研究课题^[1-4]. 微环谐振器结构紧凑, 集成度高, 插入损耗小, 滤波稳定等特点, 除在传统的滤波、复用、解复用等功能上有显著成果外, 在光调制、开关等功能上也有广泛的应用前景^[5-9].

目前, 利用微环谐振滤波器的滤波特性和相关材料的光电特性制成的微型电光开关已屡见报道, 其中的光电材料大多选择SOI绝缘硅材料和极化聚合物材料^[10-14]. 由于硅基材料不具有线性光电效应, SOI绝缘硅材料的光电工作机理为等离子色散效应, 其实现载流子浓度变化的电学结构主要有pin, pn和mos三种, 其中效率最高最适合用于电光开关制作的是pin型. 但当pin中输入电流过大时, i区的发热极为严重, 由此引起的剧烈的热光效应则会严重影响串扰和消光比. 此外载流子的扩散和复合的过程与具有线性光电效应的极化聚合物

材料相比在物理机理上较为缓慢, 所以目前pin型SOI材料的电光开关只能达到ns量级^[15]. 相比而言, 极化聚合物电光材料具有电光系数高、折射率易调整, 响应时间更短, 开关电压低, 成膜性好等优秀特点, 已成为制作电光开关和电光调制器的理想电光材料^[16,17]. 目前, 国内外对于微环电光开关的研究正处于起步阶段. 马春生研究组已在常规的双信道微环光开关和多信道微环阵列光开关方面取得了新的进展^[12-14], 他们通过在微环上施加不同方式的驱动电压来实现多条信道的开关功能, 为微环电光开关的研究奠定了基础.

本文在双信道单微环电光开关的基础上, 加入一段U形波导, 使新的微环光开关可以实现单刀双掷开关的三种开关状态, 不仅可以实现光路的选择, 还可以实现两个信道的同时出光. 本文依然采用电光聚合物材料作为波导芯层, 利用耦合模理论, 电光调制理论和传输矩阵法, 理论分析了带有U形波导的交叉信道单微环电光开关, 在谐振波长为1561 nm的情况下, 对器件的开关电压, 传输光谱, 插入损耗, 串扰, 时域响应等特性进行了模拟仿真, 并对仿真结果进行了分析和讨论.

* 国家自然科学基金(批准号: 61172044)和河北省自然科学基金(批准号: F2012203204)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: lzq54@ysu.edu.cn

2 结构和原理

图1给出了本文所设计的带有U形波导的电光开关的结构图和部分电光波导的横截面图. 电极加在微环上和U形波导部分, 其他信道上不加电极. 电光波导的横截面如图1(b)所示, 从上至下依次为上电极, 上缓冲层, 电光波导层, 下缓冲层和下电极. 图中 n 为截面各部分的有效折射率, α 为各部分的体衰减系数, κ 为上下电极的消光系数. 其中上电极接可调电源正极, 下电极接可调电源负

极, 通过改变加载电压实现开关功能. 电光波导的芯层为聚合物电光材料.

根据传输矩阵法和耦合模理论^[18], 对本文提出的带有U形波导的MRR电光开关建造理论模型. 输入光场的光功率为 P_a , 输出光场则为 P_b 和 P_c . 微环上有三处耦合区, 分别为耦合区1, 2和3. 令耦合区1和2的振幅耦合系数相同, 为 k_1 , 耦合区3的耦合系数为 k_2 . 则各区的振幅透射系数 t_i 可通过 $k_i^2 + t_i^2 = 1$ 求出. 建立耦合区内的传输矩阵方程:

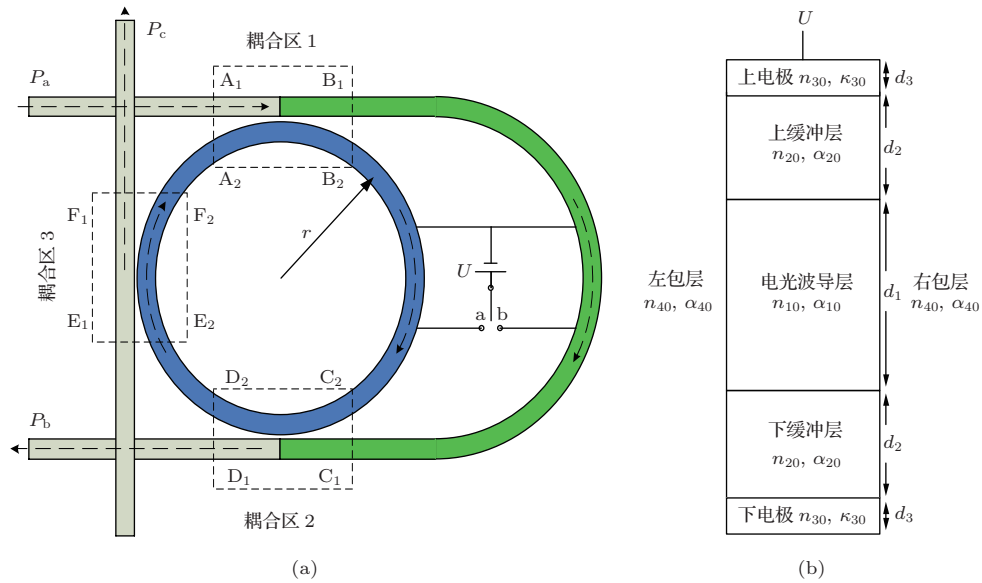


图1 (a) 电光开关结构图; (b) 电光波导横截面

耦合区1

$$\begin{bmatrix} A_2 \\ B_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1 & 1 \\ jk_1 & -jk_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix};$$

耦合区2

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ D_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1 & 1 \\ jk_1 & -jk_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_2 \\ D_2 \end{bmatrix};$$

耦合区3

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ F_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_2 & 1 \\ jk_2 & -jk_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_2 \\ F_2 \end{bmatrix}.$$

光信号在微环和U形弯曲波导上的传输系数为 $\exp(-j\phi)$. 其中 $\phi = L(\beta - j\alpha_R)$, β 为传播系数, α_R 为损耗系数, L 为传输距离.

首先计算 P_b . 若忽略直波导上的损耗, $P_a = A_1$, $P_b = D_1$. 传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ D_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1 & 1 \\ jk_1 & -jk_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 & 1 \\ jk_1 & -jk_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 & \exp(-j\phi_1) \\ (\exp(-j\phi_2)t_2)^{-1} & 0 \end{bmatrix}$$

未加电压时, 有 $\phi_1 = \phi_2 = \pi r(\beta - j\alpha_R)$. 由于U形波导的存在, 有 $C_1 = \exp(-j\phi_U)B_1$, 若U形波导的长度与微环周长相同, 则 $\phi_U = 2\pi r(\beta - j\alpha_R)$. 根据此关系, 利用传输矩阵可以很容易算出 D_1 的归一化值.

接着计算 P_c . 同样忽略直波导上的损耗 $P_c = F_1$. 传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ F_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_2 & -1 \\ jk_2 & -jk_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 & \exp(-j\phi_3) \\ (\exp(-j\phi_4)t_1)^{-1} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} t_1 & -1 \\ jk_1 & -jk_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix}.$$

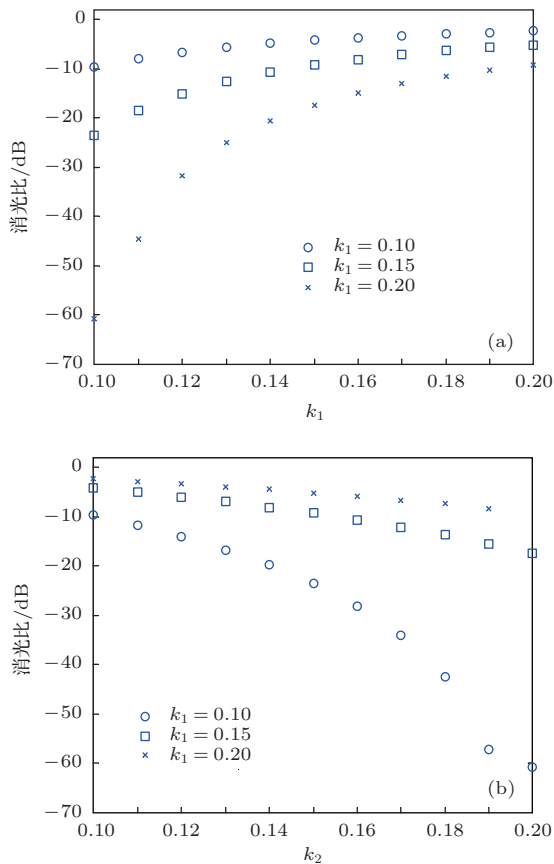


图2 (a) k_2 为定值时, k_1 与消光比的关系图; (b) k_1 为定值时, k_2 与消光比的关系图

设耦合点3到耦合点1在微环上的距离为 $1/4$ 圆周, 未加电压时, 有 $\phi_3 = 1.5\pi r(\beta - j\alpha_R)$, $\phi_4 = 0.5\pi r(\beta - j\alpha_R)$. 在上面的矩阵中, U形波导中回收的光场没有被计算在内, 需要加上. 将U形波导中的光场等效为 E_1 , $E_{1\text{eff}} = \exp(-j\phi_U) \exp(-j\phi_5)(-jk_1)(-jk_2)B_1/t_2$. 其中 ϕ_5 为耦合区2和耦合区3之间的光场相位变化. 根据此关系, 同样可以算出 F_1 的归一化值. 这样两个输

出口输出光场的数学模型就建立起来了.

对数学模型中的各项参数进行设置: 半径 $r = 15 \mu\text{m}$, 电光聚合物波导的有效折射率为 1.59, 微环和信道中的模式损耗 $\alpha_R = 0.25 \text{ dB/cm}$. 在微环的设计中, 信道与微环间的中心耦合间距不能取得太大, 否则会使耦合系数 k 过小而导致光谱带宽过小, 从而要求对器件的工作波长有很严格的控制, 但也不能取的过小而给器件的工艺制作带来很大的困难. 所以中心间距的取值一般在 $0.08\text{--}0.23 \mu\text{m}$ 之间, 此时耦合系数 k 的取值在 $0.1\text{--}0.2$ 之间^[19]. 为了寻求在此范围内比较合适的耦合系数, 进行了多次仿真实验, 不同取值的耦合系数所对应的消光比如图2所示. 为了方便计算, 根据仿真试验的结果, 耦合系数取 $k_1 = 0.1$, $k_2 = 0.2$ 时, 此时输出光谱既具有明显的消光比也有足以分辨的带宽, 是这个范围内的最优结果. 未加电压时, P_b 和 P_c 的输出光谱如图3所示. 可见由于是同一微环的耦合输出, 两处输出光谱具有相同的周期性. P_b 谐振峰的带宽十分窄, 故而侧壁十分陡峭, 很适合用作高灵敏度的光开关.

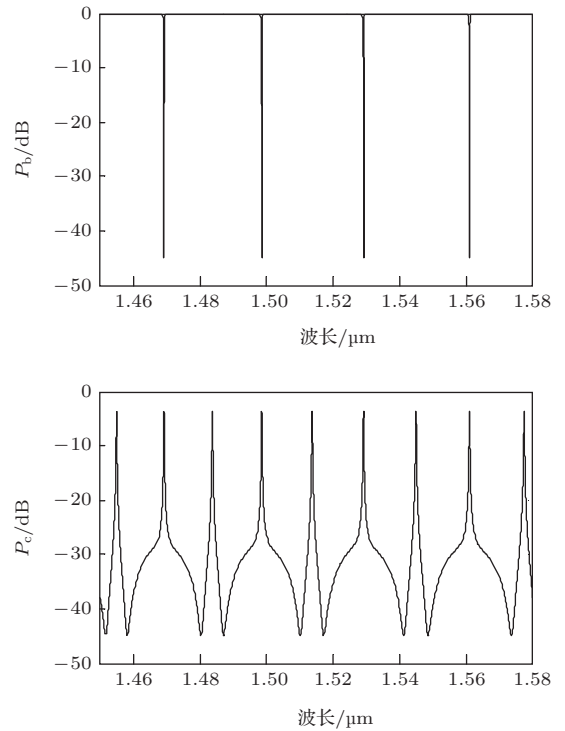


图3 两段输出信道的输出光谱

3 开关功能的仿真

如图1(a)所示, 在微环和U形波导上附加上电场, 由一个单刀双掷开关控制. 近似认为加载在

电光波导上的电场是均匀的. 由电光调制理论可以得到施加电场 U 时, 芯层电光材料的折射率变化

$$\Delta n_{10} = \frac{1}{2} n_{10}^3 r_{33} E_1 = \frac{n_{10}^3 n_{20}^3 r_{33} U}{2(2n_{10}^2 d_2 + n_{20}^2 d_1)}$$

电光波导层有效折射率 $n_{10} = 1.59$, 缓冲层折射率 $n_{20} = 1.461$, d_1, d_2 分别为电光波导的芯层厚度和缓冲层厚度, 取 $d_1 = 1.7 \mu\text{m}$, $d_2 = 2.5 \mu\text{m}$. 下电极厚度取 $d_3 = 0.2 \mu\text{m}$. 经计算此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可降到最小. 此时信道中和微环中的模式损耗系数均为 0.25 dB/cm 左右, 而当微环半径为 $15 \mu\text{m}$ 时, 弯曲损耗仅为 10^{-4} dB/cm 数量级, 故而为方便计算, 将信道和微环中的损耗系数统一定为 $\alpha_R = 0.25 \text{ dB/cm}$. 本文为方便对比, 器件中输出和输入用的直波导的模式损耗均已忽略, 在实际情况中, 根据直波导的长度将模式损耗计算进去即可. 聚合物的电光系数 $r_{33} = 68 \text{ pm/V}$. 施加电压的变化可引起波导折射率的变化, 进而影响波导的传播常数 β , 从而使整个输出光谱发生变化. 对于特定波长的光波, 其输出功率的迅速变化表现为光信号的开关功能.

图 4 显示了两处输出光功率 P_b 和 P_c 随加载电压 U 的变化曲线. 此时光波波长为 1561 nm . 图 4(a) 为电压加载在微环上的情形, 而图 4(b) 为电压加载在 U 形波导上的情形. 当单刀双掷开关开路, 即没有电压加载在任何一段电光波导上时, P_b 为 -37 dB , P_c 为 -4 dB . 定义 $P_b = -37 \text{ dB}$ 为 off 状态, 串扰为 -37 dB , $P_b = 0$ 时为 on 状态, 插入损耗被忽略了; $P_c = -4 \text{ dB}$ 为 on 状态, 插入损耗为 -4 dB , $P_c = -32 \text{ dB}$ 为 off 状态, 串扰为 -32 dB . P_b 从图 4(a) 可以看出电压上升到 30 V 左右时, P_b 已迅速攀升到 0 dB , 进入 on 状态, 而 P_c 则在电压上升到 200 V 左右时才完全进入 off 状态. 所以当电压加载在微环上时, 微环本身就可以独立

实现开关功能. 在图 4(b) 中, 在没有加载电压时 $P_b = -37 \text{ dB}$, 为 off 状态, 当加载在 U 形波导上的电压上升到 370 V 左右时光功率 P_b 才接近 0 . 同时, P_c 则完全不受电压变化的影响, 始终保持在 on 状态. 所以当电压加载在 U 形波导上时, 只有 P_b 能实现开关功能而 P_c 不行.

根据以上的仿真, 可以发现, 尽管 U 形波导单独加载电压不能实现 P_c 信道的开关功能, 但该结构本身却完美实现了单刀双掷开关的 3 种状态, 将开关电压设置为 400 V , 其工作状态如表 1 所示.

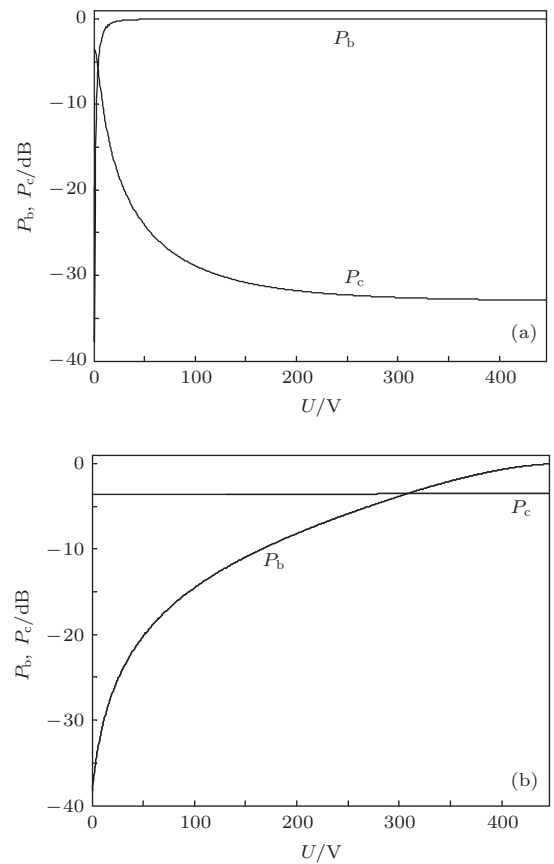


图 4 输出光功率 P_b 和 P_c 随工作电压 U 的变化曲线

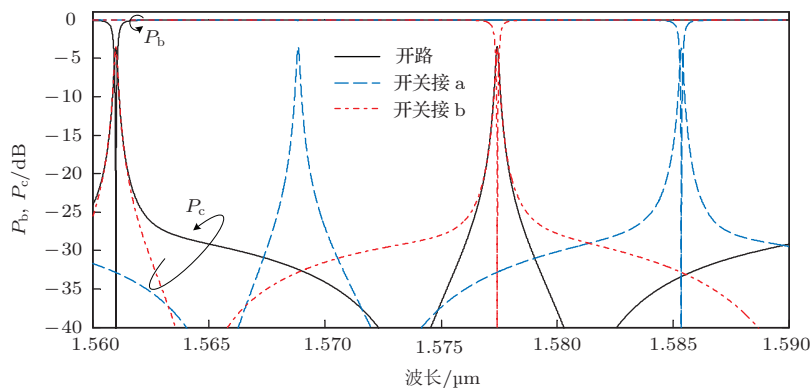


图 5 开关状态转换时 P_b 和 P_c 的输出光谱

表1 电光开关工作状态

状态	开路	开关接 a	开关接 b	串扰	插入损耗
P_b	off	on	on	-37 dB	0 dB
P_c	on	off	on	-32 dB	4 dB

在实际情况中, 直波导的损耗将不会被忽略, 故插入损耗不会为 0 dB. 由此可以看出, 本文所设计的带有 U 形波导的聚合物微环电光开关实现了良好的三种状态的开关功能.

图 5 显示了开关转换电压下三种状态时两个信道中的输出光谱 P_b 和 P_c . 对于波长 $\lambda_0 = 1561$ nm, 光谱中的开关状态与表 1 完全符合.

4 时域响应

时域响应也是衡量电光开关优劣的重要性质之一. 在单刀双掷开关切换的过程中, 微环中传输

的光和 U 形波导中传输的光将分别经历电压从 0 增大到 U 和从 U 减小到 0 的过程, 这两个过程之一所经历的时间称为开关响应时间 [19]. 在分析时域响应特性时, 当光在微环和 U 形波导中传输时, 需要对原理分析时出现的 $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4, \phi_5, \phi_U$ 进行修正.

假设光在微环上行进一周以耦合点 1 为起点, 当微环中的光在行进到微环上某一截面 S 时, 单刀双掷开关拨到了 a 点上. 此时 S 面沿光传输方向回到耦合点 1 所经过的微环区间上的传输常数由 β 将变为 β_U . 令 S 面沿光传输方向回到耦合点 1 所经过的微环区间长度为 l , 这六种相位变化的修正如下.

1) 对于 ϕ_1, ϕ_2 的修正

沿光波的传输方向, 当 S 面在耦合点 1 到耦合点 2 之间时, 即 $\pi r < l \leq 2\pi r$ 时,

$$\phi_1 = (l - \pi r)(\beta_U - j\alpha_R) + (2\pi r - l)(\beta - j\alpha_R),$$

$$\phi_2 = \pi r(\beta_U - j\alpha_R).$$

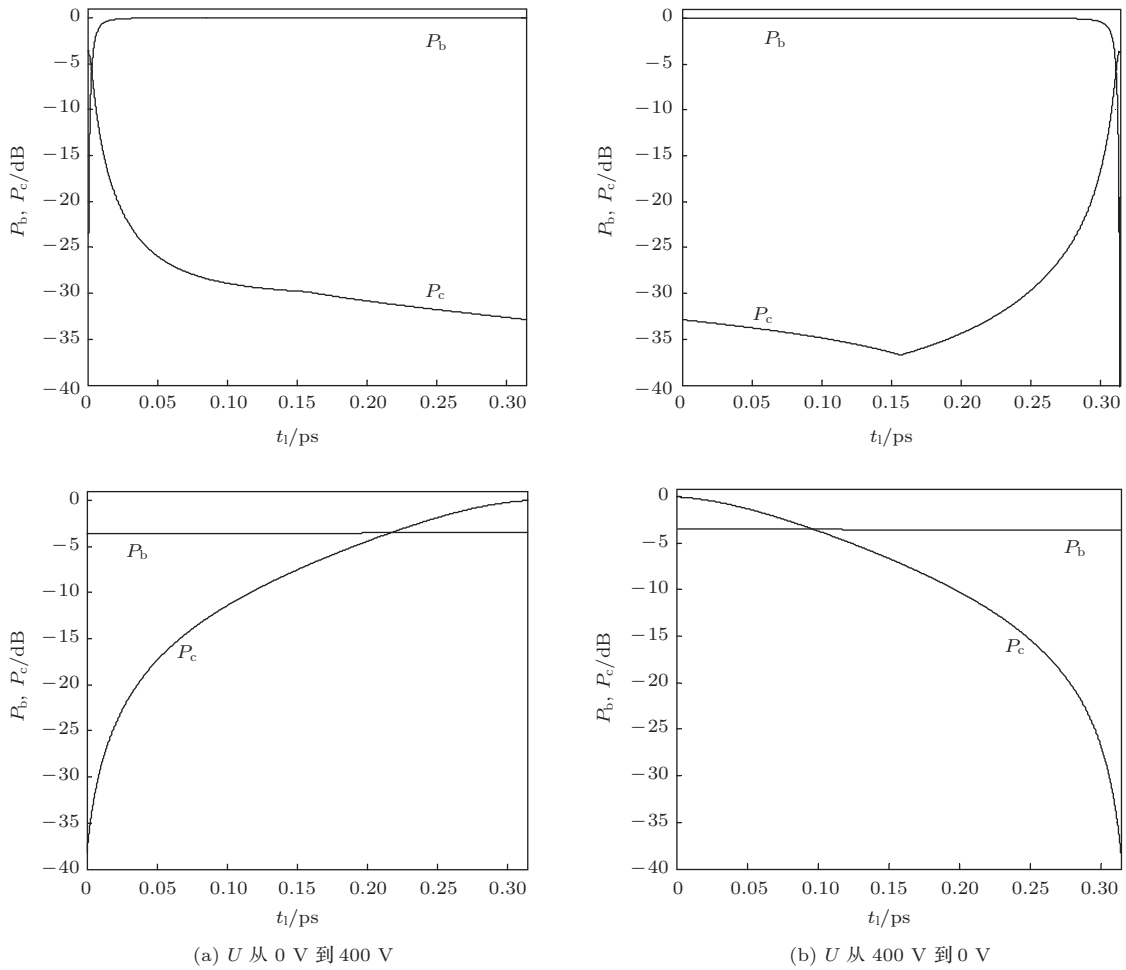


图 6 输出光功率 P_b 和 P_c 随开关响应时间 t_1 的变化曲线

当S面在耦合点2到耦合点1之间时, 即 $0 < l \leq \pi r$ 时,

$$\begin{aligned}\phi_1 &= \pi r(\beta - j\alpha_R), \\ \phi_2 &= l(\beta_U - j\alpha_R) + (\pi r - l)(\beta - j\alpha_R).\end{aligned}$$

2) 对于 ϕ_3, ϕ_4 的修正

当S面在耦合点1到耦合点3之间时, 即 $0.5\pi r < l \leq 2\pi r$ 时,

$$\begin{aligned}\phi_3 &= (l - 0.5\pi r)(\beta_U - j\alpha_R) \\ &\quad + (2\pi r - l)(\beta - j\alpha_R), \\ \phi_4 &= 0.5\pi r(\beta_U - j\alpha_R).\end{aligned}$$

当S面在耦合点3到耦合点1之间时, 即 $0 < l \leq 0.5\pi r$ 时,

$$\begin{aligned}\phi_3 &= 1.5\pi r(\beta - j\alpha_R), \\ \phi_4 &= l(\beta_U - j\alpha_R) + (0.5\pi r - l)(\beta - j\alpha_R).\end{aligned}$$

3) 对于 ϕ_5 的修正

当S面在耦合点1到耦合点2之间时, 即 $\pi r < l \leq 2\pi r$ 时,

$$\phi_5 = 0.5\pi r(\beta_U - j\alpha_R).$$

当S面在耦合点2到耦合点3之间时, 即 $0.5\pi r < l \leq \pi r$ 时,

$$\begin{aligned}\phi_5 &= (l - 0.5\pi r)(\beta_U - j\alpha_R) \\ &\quad + (\pi r - l)(\beta - j\alpha_R).\end{aligned}$$

当S面在耦合点3到耦合点1之间时, 即 $0 < l \leq 0.5\pi r$ 时,

$$\phi_5 = 0.5\pi r(\beta - j\alpha_R).$$

4) 对于 ϕ_U 的修正

对于S面在U形波导的某一处, 则有

$$\phi_U = l(\beta_U - j\alpha_R) + (2\pi r - l)(\beta - j\alpha_R),$$

上述式中传输距离 $l = v_U t_1 = \frac{\omega}{\beta_U} t_1$, 这里的 t_1 就是开关的响应时间. 将上述公式中对各处传输相位 ϕ 的修正回带入微环结构的数学模型中, 可以计算出电光开关的时域响应.

不考虑模式损耗, 两个信道中的输出光功率 P_b 和 P_c 随开关响应时间 t_1 的变化曲线如图6所示. 这里取波长为 $\lambda = 1561$ nm, 开关电压为 400 V. 图中开关响应的上升时间和下降时间很短, 均为 0.32 ps, 若输出直波导的长度为 1000 μm , 该器件的总响应时间为 5.4 ps. 经计算, 同样半径的双信道微

环开关的响应时间约为 5.53 ps, 证明本文提出的电光开关不仅保留了普通微环电光开关高速响应的特征, 还实现了三种光路输出状态的控制.

5 结 论

在谐振波长为 1561 nm 的情况下, 利用传输矩阵法和耦合模理论对本文提出的带有U形波导的三状态电光开关进行了计算与仿真, 发现该电光开关将单刀双掷开关的三种状态表现为了输出信道中光功率的三种状态, 良好地实现了开关功能. 当工作电压为 400 V 时, 开关的响应时间约为 5.4 ps, 插入损耗小于 4 dB, 串扰小于 -30 dB. 该电光开关不仅保留了普通双信道微环电光开关的优良性质, 还实现了三种状态开关功能, 并进一步缩小了响应时间.

参考文献

- [1] Dudley E F, Park W 2012 *Journal of lightwave technology* **30** 3401
- [2] Zheng C T, Liang L, Song L, Yan X, Ma C S, Zhang D M, Cui Z C 2012 *Opt. Eng.* **51** 074603
- [3] Xing J J, Li Z Y, Zhou P J, Xiao X, Yu J Z, Yu Y D 2013 *Optics Letters* **38** 3926
- [4] Fu B, Zhang D Y, Luo F, Luo Y Q 2012 *High Power Laser and Particle Beams* **24** 312 (in Chinese) [付博, 张大勇, 罗飞, 罗永全 2012 强激光与离子束 **24** 312]
- [5] Ikeda Taro 2013 *Applied Physics Letters* **102** 221113
- [6] Hiroki Ikehara, Tsuyoshi Goto, Hiroshi Kamiya, Taro Arakawa, Yasuo Kokubun 2013 *Optics Express* **21** 6377
- [7] Li C F 2012 *Physics* **41**(01) (in Chinese) [李淳飞 2012 物理 **41**(01) 0]
- [8] Sooraj Ravindra, Arnab Datta, Kmal Alameh, Yong Tak Lee 2012 *Optics Express* **20** 15610
- [9] Ren G H, Chen S W, Cao T T Acta Phys. Sin. 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 034215 (in Chinese)[任光辉, 陈少武, 曹彤彤 2012 物理学报 **61** 034215]
- [10] Chao Li, Linjie Zhou, Andrew W Poon 2007 *Optics Express* **15** 5096
- [11] Linjie Zhou, Andrew W Poon 2007 *Optics Express* **15** 9194
- [12] Yan X, Ma C S, Wang X Y, Zhang D M, Liu S Y 2008 *Acta Photonica Sinica* **37** 2374 (in Chinese)[闫欣, 马春生, 王现银, 张大明, 刘式塘 2008 光子学报 **37** 2374]
- [13] Yan X, Ma C S, Chen H Q Zheng C T, Wang X Y, Zhang D M 2009 *Acta Photonica Sinica* **38** 1914 (in Chinese)[闫欣, 马春生, 陈宏起, 郑传涛, 王现银, 张大明 2009 光子学报 **38** 1914]
- [14] Yan X, Ma C S, Chen H Q Zheng C T, Wang X Y, Zhang D M 2009 *Acta Optica Sinica* **29** 2540 (in Chinese)[闫欣, 马春生, 陈宏起, 郑传涛, 王现银, 张大明 2009 光学学报 **29** 2540]

- [15] Li X X, Yu Y D, Yu J Z 2013 *Physics* **42** 272 (in Chinese) [李晓显, 俞育德, 余金中 2013 物理 **42** 272]
- [16] Bruce Block, Shawna Liff, Mauro kobrinsky, Miriam Reshotko, Ricky Tseng, Ibrahim Ban, Peter Chang 2013 *Silicon Photonics VIII* **86290Z**
- [17] Lin X H, Ling T, Harish Subbaraman, Zhang X Y, Kwangsub Byun, Guo L J, Chen R T 2013 *Optics Letters* **38** 1597
- [18] He S L, Dai D X 2010 *Micro-Nano Photonic Integration* (Beijing Science Press) p140–146 (in Chinese) [何塞灵, 戴道铤 2010 微纳光子集成 (北京科学出版社), 2010 第 140—146 页]
- [19] Ma C S, Qin Z K, Zhang D M 2012 *The Design, Simulation of Optical waveguide devices* (Beijing: Higher Education Press) p87 (in Chinese) [马春生, 秦政坤, 张大明 2012 光波导器件设计与模拟 (北京: 高等教育出版社), 第 87 页]

A cross bus single microring electro-optical switch with U bend waveguide*

Zhang Xin Li Zhi-Quan[†] Tong Kai

(College of Electrical Engineering, YanShan University, Qinhuangdao 066004, China)

(Received 14 November 2013; revised manuscript received 2 January 2014)

Abstract

A cross bus single microring electro-optical switch model is proposed based on the theory of coupling modes, electro-optical modulation, and transfer matrix. Simulation is carried out for the 1561 nm wavelength light signal. Result shows that the switch voltage is about 400 V, the interrupt is less than -30 dB and the insertion loss is less than 4 dB. The response time is only 5.4 ps, in which the rise and fall time on the microring is only 0.32 ps. Besides, since the electro-optical switch is controlled by a single-pole double-throw switch, the three states of the latter can be realized through adding driving voltage on microring and U bend waveguide. Unlike the traditional microring switch, the above-mentioned one not only can realize the selection of light signal pathway, but also can let the two output ports have light signal sent out.

Keywords: U bend waveguide, microring, electro-optical switch, time response

PACS: 42.60.Da, 42.79.Ta, 42.82.-m

DOI: 10.7498/aps.63.094207

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61172044), and the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grant No. F2012203204).

[†] Corresponding author. E-mail: lzq54@ysu.edu.cn