

文章编号: 0253-2239(2005)09-1208-6

新型 SOI 基 3×3 多模干涉波导光开关的优化设计

贾晓玲 高 凡 张 峰

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所离子束重点实验室, 上海 200050)

摘要: 提出了一种基于 SOI 材料的新型 3×3 多模干涉(MMI)波导光开关,在开关的多模波导中引入折射率调制区,利用硅的等离子色散效应改变多模波导局部区域的折射率,使得光场在传输过程中的相位发生变化,进而确定输出光场位置,实现开关功能。采用有限差分光束传播法(FD-BPM)方法对开关的各个状态进行了模拟和分析,并对器件的结构参量进行了优化设计,采用优化后的结构参量,开关可实现的最大消光比达到 -17.27 dB。

关键词: 集成光学; 多模干涉耦合器; 光开关; SOI; 全光网络

中图分类号: TN256 文献标识码: A

Design and Optimization of a New Type 3×3 Silicon-on-Insulator Multimode Interference Optical Switch

Jia Xiaoling Gao Fan Zhang Feng

(Ion Beam Laboratory, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology,
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050)

Abstract: In this paper, a new type 3×3 SOI multimode interference optical switch was presented. The index-modulated regions were introduced in the multimode waveguide with the plasma dispersion effect (PDF) of silicon to change the regional index of the multimode waveguide, the phase of the light field was modified to determine the position of the output light field. The various states of the switch were simulated and analyzed using the finite difference beam propagation method (FD-BPM), the structure parameters of the switch was also designed and optimized. The peak extinction ratio of the switch reaches -17.27 dB with the optimized structure parameters.

Key words: integrated optics; multimode interference coupler; optical switch; silicon-on-insulator; all optical network

1 引 言

随着密集波分复用(DWDM)技术在光通信骨干网的普及和发展,在光波密集波分复用基础上组建全光传输网是通信技术发展的必然。光开关是密集波分复用光网络中实现光交叉连接(OXC)、光分插复用(OADM)和自愈保护等功能的关键器件,在光信息处理、光计算机及仪器仪表和传感器等方面也有很大的用途^[1~5]。传统的波导型光开关主要有定向耦合器型光开关、全内反射型光开关以及多模干涉型马赫-曾德尔光开关等。定向耦合器光开关对于波导长度和对称性要求十分精确,因此对于加工精度要求很高;全内反射开关中交叉波导的交叉

角必须很小以保证光场的绝热传输,加工难度大。基于自映像效应的多模干涉(MMI)型马赫-曾德尔光开关至少需要两个多模波导,通过控制两多模波导之间的相移器可实现光场从任一输入端到任一输出端的交换,器件尺寸相对较大。另外,考虑到 SOI 材料不仅具有良好的波导性能和电学性能,而且其制作工艺成熟,同时 SOI 光波导技术具有与互补型金属氧化物半导体(CMOS)电路工艺兼容的特点。为此,本文提出一种基于 SOI 材料的新型 3×3 多模干涉(MMI)光开关,并采用有限差分光束传播法(FD-BPM)对于这种开关进行了模拟分析与优化设计。

作者简介: 贾晓玲(1973~),女,吉林省人,博士,中国科学院上海微系统与信息技术研究所微电子与固体电子学博士后研究站,主要从事基于半导体材料的集成光波导器件的研究工作。E-mail: jia_xiaoling@yahoo.com.cn

收稿日期: 2004-11-17; 收到修改稿日期: 2005-01-19

2 原理与结构

多模干涉型器件的基本工作原理是基于 Ulrich 发现的多模波导的自映像效应^[2]。其本质是输入场在多模波导中激励起多个模式,各模式间相互干涉,沿波的传播方向周期性地产生输入场的一个或多个像。多模干涉型器件的关键结构是其多模波导。设多模波导在 $z=0$ 处的输入光场为 $F(x,0)$,输入光场在多模波导中激发各阶导模,输入光场可分解为多模波导中的所有导模场:

$$F(x,0) = \sum_{v=0}^{m-1} c_v \varphi_v(x), \quad (1)$$

其中 c_v 为 v 阶模的场振幅, φ_v 为 v 阶导模的场分布函数。

在多模波导中沿光场传输的任意 z 处多模波导中的光场分布为各导模场的叠加:

$$F(x,z) = \sum_{v=0}^{m-1} c_v \varphi_v(x) \exp[j(\beta_0 - \beta_v)z] = \sum_{v=0}^{m-1} c_v \varphi_v(x) \exp\left[j \frac{v(v+2)\pi z}{3L_\pi}\right], \quad (2)$$

$$L_\pi \approx 4n_r \omega_c^2 / (3\lambda), \quad (3)$$

其中 β_v 为第 v 阶模的传播常量, n_r 为多模波导区的有效折射率, ω_c 为考虑到古格-汉斯(Goos-Hahnchen)展宽后多模波导的有效宽度。

通常选取多模波导的长度

$$L = p(3L_\pi), \quad p = 1, 2, \dots \quad (4)$$

当 p 为偶数时,在多模波导的输出端形成入射光场的直接映像, p 为奇数时,在多模波导的输出端形成入射光场的关于 $x=0$ 对称的单一镜向映像。

由(1)式、(2)式和(3)式可知,光场在多模波导中的相位分布与多模波导的折射率相关,而且光场的输出位置与光场在传输过程中产生的相对相位直接相关,因此,可通过改变多模波导中的某一区域或几个区域的折射率来调节输入光场产生的相位值,确定输出映像的位置,进而实现开关功能。

基于 SOI 新型 3×3 多模干涉波导光开关的结构如图 1 所示,多模波导的长度为 $3L_\pi$,宽度为 W_{mmi} ,其中 n_1, n_2, n_3 和 n_4 为折射率调制区,其宽度均为 $W_{\text{mmi}}/2$,分别位于多模波导的 $3L_\pi/2, 3L_\pi/2, 3L_\pi/8$ 和 $5/8(3L_\pi)$ 处。通过四个调制区的不同调制深度确定光场的输出通道。其过程如图 2 所示,虚线表示未加折射率调制时输出光场的分布,实线表示引入折射率调制后输出光场的分布。

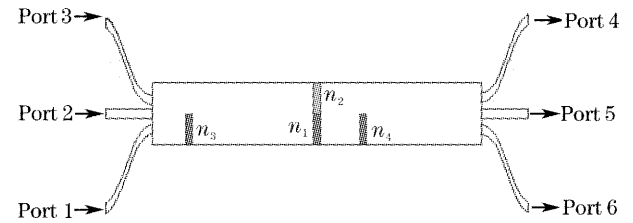


图 1 3×3 多模干涉型光开关结构示意图

Fig. 1 Structure of 3×3 MMI optical switch

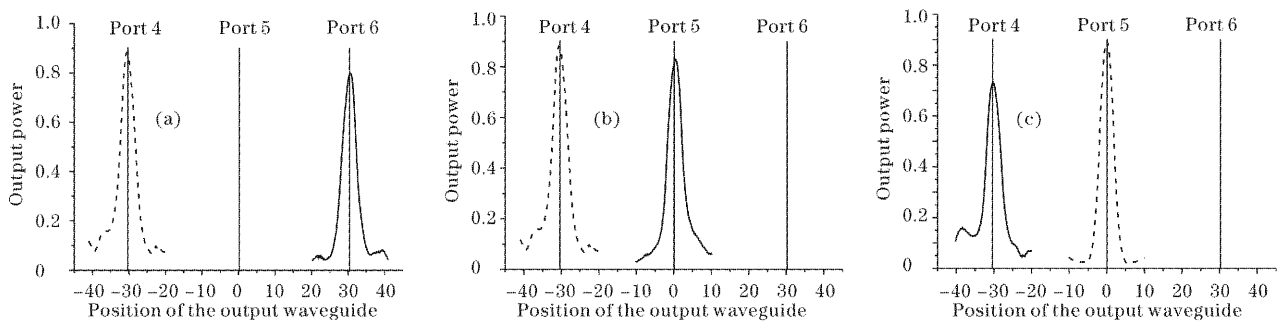


图 2 (a) 1 端输入 6 端输出, (b) 1 端输入 5 端输出, (c) 2 端输入 4 端输出时的光场分布

Fig. 2 Optical field distribution of (a) output power from 6 port when light was input from 1, (b) output power from 5 port when light was input from 1, (c) output power from 4 port when light was input from 2 port

如图 2(a) 中的虚线所示,当光场从图 1 中 1 端输入时,如果多模波导的四个折射率调制区未加任何调制,即开关的状态处于关态时,由于波导的长度为 $3L_\pi$,在波导的末端将产生入射光场关于 $x=0$ 的镜向映像,光场将在图 1 中 4 端输出,此时光开关为交叉输出。如图 2(a) 中的实线所示,当光场从 1 端输

入时,如果在多模波导的 n_1 或 n_2 区引入调制,使得光场在此处加上 π 的相移,则光场的奇偶阶模相互转化,产生光场的直接映像,光场将在 6 端输出,此时光开关为直通状态。

如图 2(b) 实线所示,当光场从 1 端输入时,如果在 n_1 或 n_2 区引入调制,使得光场在此处加上 $\pi/2$

的相移,则多模波导中的导模全转化为奇模,在 $z = \frac{5}{8}(3L_\pi)$ 处形成两个映像,若在 n_4 区对光场加上 π 的相移,则所有导模转化为偶阶模,光场将在 5 端输出。光场从 3 端输入的情况与以上过程对称。

如图 2(c) 中的虚线所示,当光场从 2 端输入时,输入光场在多模波导中只激发偶阶模,若多模波导中未加任何调制,光场产生直接映像,将在 5 端输出。如图 2(c) 中的实线表示,当光场从 2 端输入时,若要求输出端为 4 或 6,则要在调制区 n_3 和 n_2 (或 n_1) 加上相位调制,在 $z = \frac{1}{8}(3L_\pi)$ 处形成两个映像,此时相邻偶模间的相位相差为 π ,在 n_3 处加上 π 相移时,所有偶模转化为奇模,这些奇模传输到 $z = 3L_\pi/2$ 处,相邻模式间的相对相位差为 $3\pi/2$ 。若此时在 n_2 区加上 $\pi/2$ 的相移时,多模波导中的奇模分解为偶模和奇模,这些模式相互干涉的结果,在 4 输出端形成单一映像。同样若在 n_1 区加上 $\pi/2$ 的相移,则在 6 输出端形成单一映像。

图 3 给出入射光场在 1 端输入时,在 n_1 区引入折射率调制(图 3 上半部分 a 处)和未引入折射率调制(图 3 下半部分 b 处)时光场的传输过程。对比图 3 中 a、b 两处的 $L < L_{\text{mmi}}/2$ 部分可知,当 z 方向的光场传播距离 $L < L_{\text{mmi}}/2$ 时,图 3 中 a 和 b 的光场分布相同;而对于 $L > L_{\text{mmi}}/2$ 的情况,对比图 3a、b 中的 $L > L_{\text{mmi}}/2$ 部分可知,由于图 3a 中在 n_1 区引入折射率调制,使得光场在此处加上 π 的相移,光场的奇偶阶模相互转化,经过调制后的光场在不同的传输距离处产生的映像为未加调制时光场的镜向映像,因此,光场在 6 端输出。其余过程的光场传输情况与此类似,在此不再一一叙述。

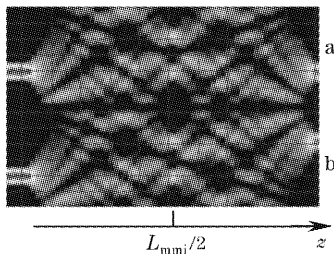


图 3 a: 在 n_1 区加入折射率调制时, b: 未加折射率调制时光场的分布

Fig. 3 a: The light field distribution with index modulation at n_1 and b: without index modulation

对于 SOI 波导光开关,由于 Si 存在中心反演对称性, Si 的直接电光效应非常弱,因此折射率的调制通常采用等离子色散效应(PDE)实现, Si 的等离

子色散效应可表示为

$$\Delta n = -\frac{q^2 \lambda^2}{8\pi^2 c^2 \epsilon_0 n_0} \left(\frac{\Delta N_e}{m_{ce}^*} + \frac{\Delta N_h}{m_{ch}^*} \right), \quad (5)$$

式中 ΔN_e 和 ΔN_h 分别为电子和空穴浓度的变化, m_{ce}^* 和 m_{ch}^* 分别为电子和空穴的有效质量, q 为电子电量, c 为光速, ϵ_0 为真空电容率, n_0 为 Si 的折射率。通常对于入射光波长在 $1.0 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 范围内的情况, (5) 式可写为

$$\Delta n/\lambda^2 = \pm [3.48 \times 10^{-18} (\Delta N_h)^{0.8} + 4.63 \times 10^{-23} (\Delta N_e)^{1.05}], \quad (6)$$

其中正号表示载流子耗尽,负号表示载流子注入。

图 4 给出折射率调制区的横向 P⁺N 结结构示意图,在任意 y 处,注入的空穴浓度为

$$\Delta N_h(y) = \Delta N_h(0)(1 - y/H), \quad (7)$$

式中 H 为脊型波导的内脊高度。在大注入条件下, $y = 0$ 处(结处)的空穴浓度为

$$\Delta N_h(0) = N_i \exp[qV_A/(2kT)], \quad (8)$$

式中 V_A 为 P⁺N 结的外加正偏压, N_i 为载流子浓度。设在 $y = h$ 处的空穴浓度为注入区的平均空穴浓度,即 $\Delta N_h = \Delta N_h(h)$, 则有

$$\Delta N_h = \Delta N_h(0)(1 - h/H), \quad (9)$$

可得到大注入时 P⁺N 结的 $J-V$ (J : P⁺N 结注入电流密度, V : P⁺N 结外加正偏压) 特性为

$$J = \frac{2qD_p N_i}{H} \exp\left(\frac{qV_A}{2kT}\right), \quad (10)$$

D_p 为空穴的扩散系数, T 为温度。

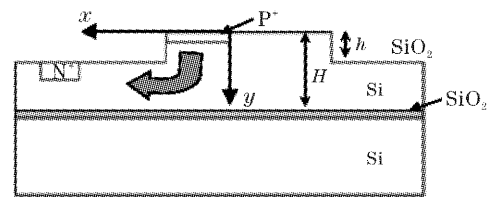


图 4 折射率调制区的横向 P⁺N 结注入结构
Fig. 4 Structure of the index modulated region

3 器件设计与优化

采用有限差分光束传播法对该器件进行了模拟和分析,波导的参量如下:入射波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, 输入输出单模波导采用脊型结构,内脊高,外脊高和宽度分别为 $5.0 \mu\text{m}$, $2.6 \mu\text{m}$ 和 $4.0 \mu\text{m}$, 设多模波导的宽度为 W_{mmi} , 长度为 L_{mmi} , 波导口 2、5 位于多模波导中心, 1, 4, 3, 6 分别位于多模波导的 $\pm 0.25W_{\text{mmi}}$ 。

3.1 多模波导的参量优化

图 5 给出了插入损耗随多模波导的长宽变化的分布曲线(开关未加任何调制时)。

观察图 5(a)可知,当多模波导的宽度为 $20 \mu\text{m}$ 时,开关的插入损耗达到最小值,当 W_{mmi} 偏离最佳值 $\pm 2 \mu\text{m}$ 时,插入损耗增加大于 7.5 dB ;由图 5(b)

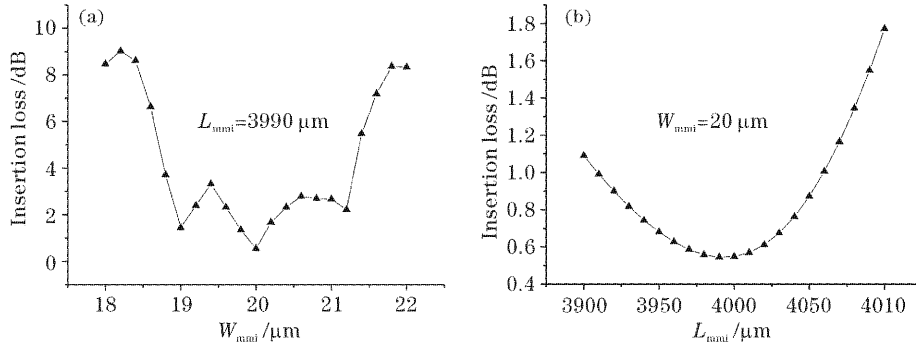


图 5 插入损耗与(a)多模波导宽度,(b)多模波导长度的关系曲线

Fig. 5 MMI width dependence (a) and MMI length dependence (b) of the insertion loss

3.2 折射率调制区域的优化

在以下的讨论中,消光比定义为一个输出通道在导通和非导通时的光功率之差,以分贝表示为

$$ER = -10 \lg \frac{P_{\text{on}}}{P_{\text{off}}}, \quad (11)$$

P_{on} 为输出通道导通时光功率, P_{off} 为非导通时的光功率。

通道串扰定义为光开关在导通和非导通状态时两输出端口之间的输出功率差值。即若 P_1 为导通端的输出功率, P_2 为非导通端的输出功率,则两通道之间的串扰 CT 为

$$CT = -10 \lg \frac{P_1}{P_2}, \quad (12)$$

图 6 给出光场在 1 端输入, n_1 (或 n_2)区引入折射率调制 $\Delta n_1/n = -1\%$ 时,6 端输出光的消光比及各通道间串扰随 n_1 区长度变化的分布曲线,由图 6(a)可知,当 n_1 区的长度在 $220 \mu\text{m}$ 附近时,消

可知,当 L_{mmi} 在 $3900 \sim 4100 \mu\text{m}$ 之间时,插入损耗均低于 1.9 dB ,可见,相对于 L_{mmi} ,开关对于 W_{mmi} 的变化更为敏感,因此,在实际器件加工中,对其宽度应精确控制,在以下的分析中,选择 $W_{\text{mmi}} = 20 \mu\text{m}$, $L_{\text{mmi}} = 3990 \mu\text{m}$ 。

光比出现谷值,达到 -17.27 dB 。图 6(b)给出输出通道 6-5 和 6-4 间串扰随 n_1 区长度变化的分布曲线,当 n_1 区长度为 $220 \mu\text{m}$ 时,通道 6-4 间的串扰达到最小值,约为 -16.02 dB ,通道 6-4 间的串扰对于 n_1 区长度变化较敏感,当 n_1 区长度变化 $\pm 50 \mu\text{m}$ 时,通道 6-4 间的串扰增大值超过 5 dB ,而通道 6-5 间的串扰对于 n_1 区长度变化不敏感。由这一分析过程可知,当 n_1 区长度在 $220 \mu\text{m}$ 附近时,在 n_1 区加上调制,达到 $\Delta n_1/n = -1\%$,光开关成功实现直通状态。

图 7 给出光场在 2 端输入时,在 n_2 区引入 $\Delta n_2/n = -0.5\%$, n_3 区引入 $\Delta n_3/n = -1\%$ 时,4 端输出光的消光比及各通道间串扰随 n_3 区长度变化的分布曲线。图 7(a)显示,当 n_3 区的长度在 $220 \mu\text{m}$ 附近时,消光比出现谷值,约为 -14.44 dB 。图 7(b)给出输出通道 4-5 和 4-6 间串扰随 n_3 区长度变化的分布曲线,当 n_3 区长度为 $220 \mu\text{m}$ 时,通道

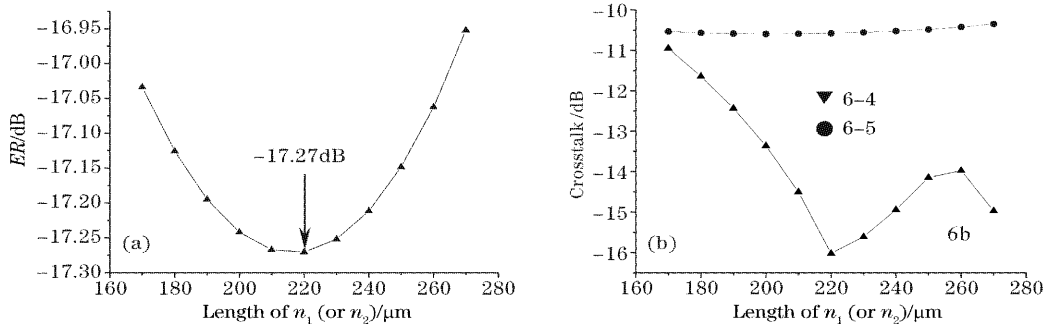


图 6 1 端输入 4 端输出时的消光比(a),串扰(b)随 n_1 (或 n_2)区长度变化的分布曲线

Fig. 6 ER (a) and CT (b) versus the length of the index modulated region n_1 (or n_2)

4-5 间的串扰达到最小值,约为 -13.2 dB,通道 4-5 间的串扰对于 n_3 区长度变化较敏感,当 n_3 区长度变化 ± 50 μm 时,通道 4-5 间的串扰增大值超过

5 dB,而通道 4-6 间的串扰对于 n_3 区长度变化不敏感。表明,通过对 n_2 和 n_3 区的调制,光开关成功实现 2 端输入,4 端输出状态。

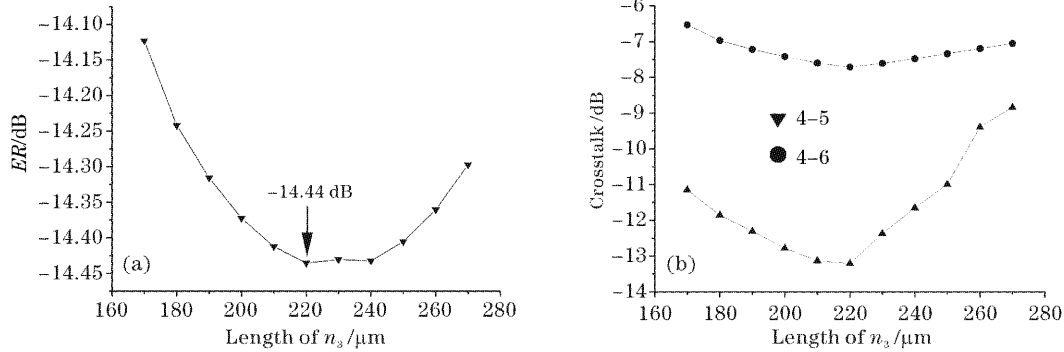


图 7 2 端输入 4 端输出时消光比(a),串扰(b)随 n_3 区长度变化的分布曲线

Fig. 7 ER (a) and crosstalks (b) versus the length of the index modulated region n_3

图 8 给出光场在 1 端输入时,在 n_2 区引入 $\Delta n_2/n = -0.5\%$, n_4 区引入 $\Delta n_4/n = -1\%$ 时,5 端输出光的消光比及各通道间串扰随 n_4 区长度变化的分布曲线。图 8(a)显示 5 端输出光的消光比谷值同样出现在 n_4 区长度在 220 μm 附近,约为 -15.07 dB。图 8(b)给出输出通道 5-4 和 5-6 间串扰随 n_4 区长度变化的分布曲线,发现两曲线的最小谷值并非出现在 n_4 区长度的同一位置,当 n_4 区长度为 190 μm 时,通

道 5-6 间串扰达到最小值,为 -14.18 dB,而当 n_4 区长度为 260 μm 时,通道 5-4 间串扰达到最小值,为 -18.48 dB,综合考虑器件的性能,决定仍然选择 n_4 区长度为 220 μm ,通道 5-6 串扰约为 -13.66 dB,通道 5-4 间串扰约为 -16.52 dB,此时,开关成功实现 1 端输入,5 端输出状态。

开关的其余状态分析过程与上述三种相似,在此不再一一叙述。

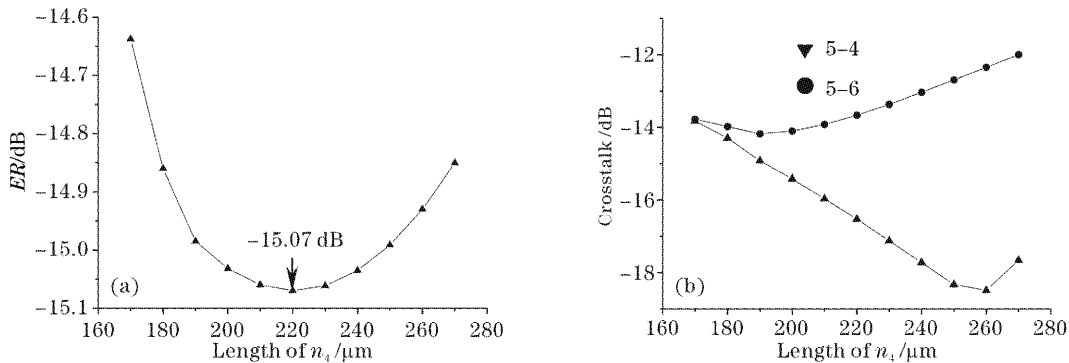


图 8 1 端输入 5 端输出时消光比(a),串扰(b)随 n_4 区长度变化的分布曲线

Fig. 8 ER (a) and crosstalks (b) versus the length of the index modulated region n_4

4 分析和讨论

由以上分析可知,这种结构的光开关同样具有多模干涉型器件所具有的大的制作容差性的特点。当然,相对于其多模波导的长度,开关对于多模波导的宽度、折射率调制区域的尺寸及在其上施加的调制量要求更为严格。以上述过程为例,当折射率调制区长度为 220 μm ,在其上施加的调制量为 $\Delta n/n = -1\%$ 时,其对光场可实现 π 的相移,偏离此最佳值将导致对光场相位调制的不足或过量,造成

指定通道的输出光功率下降,通道间串扰增大,最终导致开关的整体性能下降。因此,在器件的实际加工过程中,对其多模波导的宽度及折射率调制区域的加工精度要求更高。

5 结 论

提出了一种新型基于 SOI 材料的 3×3 多模干涉型光开关,开关仅有一个多模波导,采用有限差分光束传播法对其各个状态进行了模拟和分析,给出

了相应的光场分布,并对其结构参量进行了优化设计。结果表明,通过对于不同的折射率调制区施加不同的调制深度,开关可以成功实现任意两输入和输出通道间的开关功能;当多模波导的宽度为 $W_{\text{mmi}} = 20 \mu\text{m}$,长度 $L_{\text{mmi}} = 3990 \mu\text{m}$,折射率调制区长度为 $220 \mu\text{m}$ 时,开关的最大消光比达到了 -17.27 dB ,并且开关呈现优良的综合性能。

参 考 文 献

- 1 Okayama H, Okabe Y, Arai T *et al.*. Two-module stage optical switch network[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(4): 469~476
- 2 J. Leuthold, C. H. Joyner. Multimode interference couplers with tunable power splitting ratios[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(5): 700~706
- 3 Shuichi Nagai, Goh Morishima, Hirokazu Inayoshi *et al.*. Multimode interference photonic switches (MIPS) [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(4): 675~681
- 4 Li Jie, Huang Yonglin, Kai Guiyun *et al.*. Study of extinction ratio of Mach-Zehnder interferometer and implementation of single-channel optical switch[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(8): 916~919 (in Chinese)
李 杰,黄勇林,开桂云 等. 马赫-曾德尔干涉仪消光比和单通道光开关[J]. *光学学报*, 2003, **23**(8): 916~919
- 5 He Na, Wu Chongqing, Wei Yan *et al.*. Fused planar 3×3 single mode fiber coupler[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(3): 323~327 (in Chinese)
何 娜,吴重庆,卫 炎 等. 熔维平行排列 3×3 单模光纤耦合器的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(3): 323~327