

文章编号: 0253-2239(2007)09-1691-4

具有单一复合调制区的多模干涉效应耦合器 1×3 光开关的分析*

周海峰 江晓清 杨建义 王明华

(浙江大学信息与电子工程系, 杭州 310027)

摘要: 基于多模干涉自映像原理, 分析了一种仅含一个复合调制区的 1×3 光开关。该开关处于不同工作状态时, 调制臂上所加相位调制量之间存在倍数关系, 于是可将调制臂上的相移器组合成一个复合调制区, 通过连续改变复合调制区的折射率变化量, 因此可以将来自任一输入端的光场轮流切换到任意输出端口。以 $\text{Al}_{0.07}\text{Ga}_{0.93}\text{As}/\text{GaAs}$ 脊形波导结构为例, 采用 BEAMPROP 软件, 对该开关进行了优化和理论验证。消光比高达 30.3 dB; 相邻通道之间的串扰低于 -29.8 dB; 在 $1.31 \mu\text{m}$ 工作波长处约 50 nm 的波谱范围内, 串扰低于 -20 dB。该结构可简化传统多通道开关的调制方法, 降低外加控制方法的复杂程度。

关键词: 光通信; 光开关; 多模干涉; 区域调制; 光注入

中图分类号: TN252 文献标识码: A

Analysis on Multimode Interference Coupler-Based 1×3 Optical Switch with Mono-Compound Modulation Region

Zhou Haifeng Jiang Xiaoqing Yang Jianyi Wang Minghua

(Department of Information Science and Electronics Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: By employing the self-imaging properties of multimode interference, a 1×3 optical switch with mono-compound modulation region is presented. When at different switching states, a multiple relation exists in the acquired modulation magnitudes in the connecting arms, and therefore, the phase shifters in the arms can compose a mono-compound modulation region (MCMR). By continuously changing the refractive indices in the MCMR, light incident from any input port can be switched alternatively to arbitrary output port. Based on $\text{Al}_{0.07}\text{Ga}_{0.93}\text{As}/\text{GaAs}$ ridge structure, the proposed device was optimized and theoretically demonstrated by employing BEAMPROP software. The extinction ratio is as high as 30.3 dB. The crosstalk between adjacent channels is less than -29.8 dB. In a wide spectral range (~ 50 nm) around $1.31 \mu\text{m}$ wavelength, the crosstalk keeps lower than -20 dB. This device may greatly simplify the modulating scheme of traditionally multichannel switch and relax the complexity of external controlling.

Key words: optical communication; optical switch; multimode interference; area modulation; light injection

1 引 言

集成光网络与光互连的发展已经不再停留于点与点间的传输, 而需要在一点到多点, 多点到多点间对光路进行传送与切换。这要求开关器件^[1~3]结构紧凑, 可切换的通道数多、控制方法简单, 而且器件功能复杂多变。特别是对级联而成的光开关阵列来

说, 简化单个开关元件的调制方法和调制区的个数尤为重要。作为最简单的多通道开关, 1×3 光开关可用来建构奇数端口的网络, 如可构成 3×3 、 9×9 光开关阵列, 极大丰富了光网络的信道结构, 在国内外得到广泛研究^[4~6]。然而, 目前文献报道的集成光学 1×3 开关都需要两个或两个以上的独立调制

* 国家自然科学基金重点项目(60436020)和国家自然科学基金(60477018)资助项目。

作者简介: 周海峰(1984—), 男, 安徽宿松人, 博士研究生, 主要从事集成光学与光电子器件方面的研究。

E-mail: wuu007@sina.com.cn

导师简介: 江晓清(1959—), 男, 浙江人, 教授, 主要从事集成光学方面的研究。E-mail: iseejq@zju.edu.cn

收稿日期: 2006-12-13; 收到修改稿日期: 2007-04-04

区^[4~7],更多路数的开关需要更多的电极^[7],大大限制了开关的制作容差。

为解决上述问题,本文基于多模干涉效应,报道一种仅含一个复合调制区的 1×3 光开关的设计思路。基于多模干涉(MMI)效应的开关常借用像点附近区域调制^[8]、增加或减少多模干涉效应横向宽度来改变成像拍长^[7]、调整多模区折射率的分布、直接缩短器件长度等方法来实现调制。利用 3×3 多模干涉效应耦合器的一般成像和重叠成像原理^[9],不难发现,当光路切换至不同输出端口时,在第一节多模干涉效应末端相连的调制臂上所需的相位调制量,呈倍数关系。这一特性可用于设计仅含一个复合调制区的 1×3 光开关。通过单调改变复合调制区的折射率变化,可以让来自任意输入端的光波轮流地被切换至任一输出端口。此外,采用 $\text{Al}_{0.07}\text{Ga}_{0.93}\text{As}/\text{GaAs}$ 的脊形结构和光注入效应,基于光束传输的方法,本文对该 1×3 光开关进行了模拟和优化结果显示该器件具较大的制作容差有助于光路有选择的光交叉互连(OXC)。

2 结构与原理

多模干涉效应耦合器是在多模波导首尾连接一定数目的输入输出波导所形成的结构,可以在传输方向上实现输入光波重现。设定 n_r , W_{eff} 和 λ_0 分别用来标记多模波导的等效折射率、多模波导宽度和工作波长,多模干涉效应的两个最低阶模式间的拍长为 $L_\pi = 4n_r W_{\text{eff}}^2 / (3\lambda_0)$ 。对于 $N \times N$ 多模干涉效应情形,最短的 N 重成像长度为 $L = 3L_\pi / N$,输入波导 m 和输出波导 n 之间的传输方程可表示为

$$\varphi(m, n) = \varphi_0 - \frac{\pi}{2} (-1)^{(m+n+N)} - \frac{\pi}{4N} \times \left[(-1)^m \left(m - \frac{1}{2} \right) - (-1)^{N+n} \left(n - \frac{1}{2} \right) \right]^2, \quad (1)$$

其中 φ_0 为常相位,其值为

$$\varphi_0 = -\beta_0 \frac{3L_\pi}{N} - \frac{\pi}{4},$$

其中连接波导处的阴影区域为复合调制区。这里考虑的 3×3 多模干涉效应耦合器的结构如图 1 所示,由两个长度分别为 $L_{\text{MMI}}/3$ 和 $2L_{\text{MMI}}/3$ 的两个多模波导级联所得。输入输出波导和中间连接波导分别位于中心以及向两侧偏移 $W_{\text{MMI}}/3$ 的位置。

应用多模干涉效应成像原理和(1)式,可以推导出在 $z=L_\pi$ 处 3×3 多模干涉效应输入输出间的成

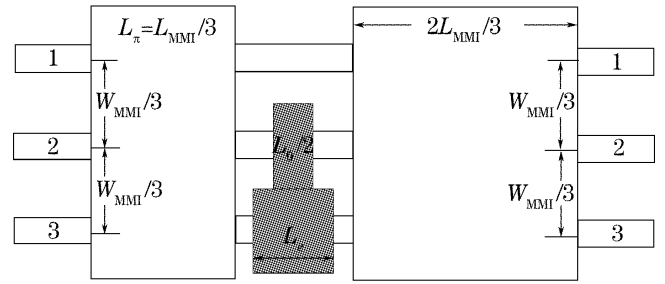


图 1 描述成像特性和调制方法的 3×3 多模干涉(MMI)效应耦合器平面图

Fig. 1 Planar schematic of 3×3 multimode interference coupler with modulation region incorporated in the multimode area, describing the imaging properties and modulation method

像关系,并用矩阵表示为:

$$\begin{bmatrix} E_1^{\text{out}} \\ E_2^{\text{out}} \\ E_3^{\text{out}} \end{bmatrix}_{z=L_\pi} = \mathbf{M}(L_\pi) \begin{bmatrix} E_1^{\text{in}} \\ E_2^{\text{in}} \\ E_3^{\text{in}} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{M}(L_\pi) = \frac{1}{\sqrt{3}} \exp \begin{bmatrix} 0 & j\pi & j4\pi/3 \\ j\pi & j4\pi/3 & j\pi \\ j4\pi/3 & j\pi & 0 \end{bmatrix},$$

传递矩阵 $\mathbf{M}(L_\pi)$ 同时描述输入输出波导间的振幅和相位关系。考虑到相位的相对性,这里忽略了常量相位。 j 是虚数单位, E_1^{out} 的下标标记端口的编号。式中因子 $1/\sqrt{3}$ 为考虑功率守恒而进行归一化的系数。很明显,在 $z=L_{\text{MMI}}=3L_\pi$ 处,成像系统相当于级联了三个 L_π 长的 3×3 基本多模干涉效应耦合器单元,于是总的传输过程可以表示为矩阵相乘:

$$\begin{bmatrix} E_1^{\text{out}} \\ E_2^{\text{out}} \\ E_3^{\text{out}} \end{bmatrix}_{z=3L_\pi} = \mathbf{M}(L_\pi) \mathbf{M}(L_\pi) \mathbf{M}_{\text{MR}} \mathbf{M}(L_\pi) \begin{bmatrix} E_1^{\text{in}} \\ E_2^{\text{in}} \\ E_3^{\text{in}} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{M}_{\text{MR}} = \exp \begin{bmatrix} \varphi_1 & 0 & 0 \\ -j & \varphi_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varphi_3 \end{bmatrix},$$

其中 \mathbf{M}_{MR} 为 $\exp[-j \cdot \text{diag}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3)]$ 的对角矩阵,它描述了调制区的折射率变化对三个连接波导处产生的相移。 \mathbf{M}_{MR} 中的一 j 表示随着传输方向相位延迟。固定 $\varphi_1=0$ 不动,即不调制第一个连接波导,仅改变 φ_2 和 φ_3 可以实现三个输出态。

以输入端“1”为例。来自端口“1”的输入光在 $z=L_{\text{MMI}}/3$ 处均匀成像,其相对相位为 $(0, \pi, 4\pi/3)$ 。如果改变像点的折射率,获得 $\mathbf{M}_{\text{MR}} = \text{diag}(0, -2\pi/3, -4\pi/3)$ 的相位调制,则产生直通态,也即 1 进 1 出,

且 $|E_1^{\text{out}}|^2 : |E_2^{\text{out}}|^2 : |E_3^{\text{out}}|^2 = 1 : 0 : 0$; 相应的, $\text{diag}(0, -4\pi/3, -2\pi/3)$ 产生 1 进 2 出的半交叉态; 很明显, 无调制产生 1 进 3 出的交叉态。而仔细观察相位关系, 根据相位的 2π 周期性, 不难发现, 半交叉态下的相位改变 $\text{diag}(0, -4\pi/3, -2\pi/3)$ 相当于 $\text{diag}(0, -4\pi/3, -8\pi/3)$, 正好是直通态情况下的两倍。这意味着, 当调制量为 $\text{diag}(0, -2\pi/3, -4\pi/3)$ 的倍数时, 光开关的开关状态将在输出端口轮换。此外,

表 1 各种相位调制下不同开关状态之间的映射关系

Table 1 Mapping relations of different switching states with various phase modulations

Refractive index change	Phase modulation	No1 excited	No2 excited	No3 excited
$\Delta N=0$	$\text{diag}(0, 0, 0)$	No3 out	No2 out	No1 out
$\Delta N=-0.00237$	$\text{diag}(0, -2\pi/3, -4\pi/3)$	No1 out	No3 out	No2 out
$\Delta N=-0.00475$	$\text{diag}(0, -4\pi/3, -8\pi/3)$	No2 out	No1 out	No3 out

热光和载流子等效效应可以在调制区产生较大折射率变化, 这一条件允许省去中间连接波导, 而对三像点直接进行调制。过大的折射率变化常常会对光场产生很强散射, 进而增加额外损耗和串扰。如果将像点延伸到如图 1 所示的中间连接波导, 利用推广的马赫-曾德尔干涉仪进行调制, 将会取得较好的开关效果。下文的模拟就采用了这种方法。

3 参量优化与结果讨论

以 $\text{Al}_{0.07}\text{Ga}_{0.93}\text{As}/\text{GaAs}$ 的脊形结构和光注入效应为例, 对基于 3×3 多模干涉效应耦合器的 1×3 光开关进行了模拟验证及其优化。结构如图 2 所示, 在 $i\text{-GaAs}(100)$ 的衬底上生长一层 $2.5 \mu\text{m}$ $\text{Al}_{0.07}\text{Ga}_{0.93}\text{As}$ 和 $1.5 \mu\text{m}$ GaAs 芯层, 脊高和脊宽分别为 $0.6 \mu\text{m}$ 和 $6 \mu\text{m}$; 在波导表面蒸铝膜后腐蚀出大小分别为 $6 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ 和 $6 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$ 的两个注入窗口, 模拟中假定激励光在这一区域产生的折射率变化恒定。由于波导中心间隔为 $10 \mu\text{m}$, 总的复合调制区尺寸为 $16 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ 。在工作波长

从端口“2”和“3”输入的情况可以同理可得, 所有调制状态下的输入输出全映射列于表 1。当调制区折射率变化纵向分布均匀, 并且调制区对中间和旁边连接波导的覆盖长度分别为如图 1 所示 $L_c/2$ 和 L_c 时, 通过逐渐改变整个调制区折射率变化量 ΔN , 可以得到 $\text{diag}(0, \Delta N \times \pi L_c/\lambda, \Delta N \times 2\pi L_c/\lambda)$ 的相位变化。其中包括 $\text{diag}(0, -2\pi/3, -4\pi/3)$ 和 $\text{diag}(0, -4\pi/3, -8\pi/3)$ 的相位改变。

为 $1.31 \mu\text{m}$ 时取包层和芯层折射率为 3.3829 和 3.4054。若用强度为 $9.8 \text{ W}/\text{mm}^2$ 的 805 nm 光束照射, 可以在 GaAs 注入方向 $1 \mu\text{m}$ 深处产生大约负的 10^{-2} 折射率变化, 这一量级足以获得模拟中假定的折射率变化^[3,10]。

利用 Rsoft 公司的 BEAMPROP 软件对该结构下的开关特性进行了模拟和优化。为获得良好的收敛性, 横向网格剖分间距均为 $0.1 \mu\text{m}$, 纵向计算步长为 $1 \mu\text{m}$, 并采取透明边界进行模拟。各连接波导 $6 \mu\text{m}$ 的脊宽可以保证单模传输且避免相邻通道间的干扰。 $30 \mu\text{m}$ 宽的多模干涉效应多模区可以在成像质量和成像长度中寻求平衡, 优化的成像长度为 $9750 \mu\text{m}$ 。采用 $7 \mu\text{m}$ 宽、 $400 \mu\text{m}$ 长的锥形波导降低反射损耗和提高耦合效率, 且提高成像的均匀性。由于实际情况下, 表面不规则的注入光能分布使得很难精确确定调制区横截面的二维折射率分布, 因此这里用等效折射率替代。在激子吸收峰处, $\text{GaAs}/\text{GaAlAs}$ 材料的折射率变化应为负值, 因而模拟过程中, 折射率变化往负方向偏离^[10]。

图 3 给出了随着折射率改变的输出强度变化。对应于表 1 中的输出态依次列出。当 $\Delta N = -0.00475$, 最大的插入损耗为 0.15 dB 。同一输出通道的消光比 $10\lg(P_{\text{max}}/P_{\text{min}})$ 可达 30.3 dB 。相邻输出波导之间的串扰 $10\lg(P_{\text{off}}/P_{\text{on}})$ 低于 -29.8 dB , 这里 P_{off} 和 P_{on} 分别指向相邻波导。保持串扰低于 -20 dB 的折射率调制区间可达 0.0005 , 显示出较大的制作容差与调制宽度。在每个有效的折射率调制位置, 输入输出端口之间一一对应, 使得输入输出波导的选择灵活便捷。此外, 根据光路可逆原理, 调制区也可以放置在 $z = 2L_{\text{MMI}}/3$ 的位置。

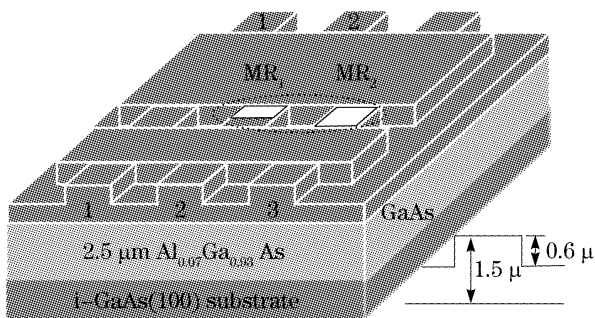


图 2 用于模拟的 1×3 开关结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the proposed 1×3 switch for simulation

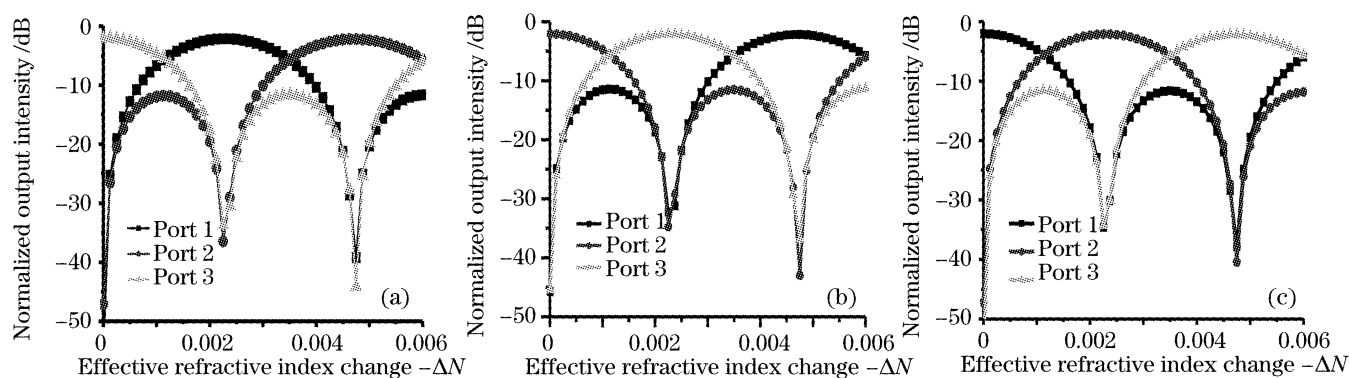


图 3 随折射率调制量变化的归一化输出强度函数

Fig. 3 Normalized output intensity against refractive index change

对偏振损耗作了初步模拟,通过旋转偏振方向,偏振损耗 $-10\lg(P_{\min}/P_{\max})$ 约为 0.65 dB。实际情况下的偏振效应会受外界调制的影响,上述仅为参考值。此外,当器件工作于最差工作点 $\Delta N = -0.00475$ 时,对器件在 $1.31 \mu\text{m}$ 工作波长附近的波谱响应作了模拟,可以得到如图 4 所示的波长依赖特性。在约 50 nm 宽的波长范围内,串扰低于 -20 dB,且无明显的性能衰减。光生载流子是电子-空穴成对产生,理论上光注入的开关速度要快于电注入。GaAs 的复合载流子寿命在十纳秒量级,通过改善几何结构和外加预偏置电压快速抽运等措施,采用光注入驱动方法,器件的开关时间有望达到纳秒量级^[11]。

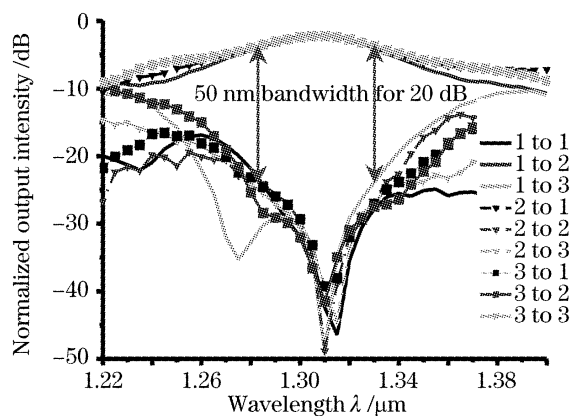


图 4 分别从三个端口输入下归一化输出的波长相应曲线

Fig. 4 Normalized output intensity versus wavelength with beam excited at No1, No2, No3 input port

4 结 论

提出了一种仅含一个复合调制区的 1×3 多模干涉效应光开关,并以 $\text{Al}_{0.07}\text{Ga}_{0.93}\text{As}/\text{GaAs}$ 脊形波导结构为例,利用 BEAMPROP 软件对该开关进行了优化。消光比高达 30.3 dB;相邻通道之间的串扰为 -29.8 dB;在 $1.31 \mu\text{m}$ 工作波导处 50 nm 的波谱范围内,所有通道间串扰低于 -20 dB。这一开

关结构可用来建构 $3^2 \times 3^2$ 的无阻塞开关矩阵。

参 考 文 献

- Jianyi Yang, Xiaoqing Jiang, Fanghui Yang *et al.*. 2×2 total-internal-reflection optical switch using thermo-optic effect of polymer[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(2): 137~140 (in Chinese)
- 杨建义,江晓清,杨方辉等. 2×2 有机聚合物的全内反射型热光开关[J]. *中国激光*, 2003, **30**(2): 137~140
- Wan Zhujun, Wu Yaming, Li Sihua. Experimental research on integrated thermo-optic switch based on multimode interference couplers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1187~1191 (in Chinese)
- 万助军,吴亚明,李四华. 基于多模干涉耦合器的集成热光开关实验研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1187~1191
- Xiaoqing Jiang, Jianyi Yang, Hengzhan Zhan *et al.*. Photon-induced total-internal-reflection all-optical switches [J]. *IEEE Photon. Technon. Lett.*, 2004, **16**(2): 443~445
- M. Yagi, S. Nagai, H. Inayoshi *et al.*. Versatile multimode interference photonic switches with partial index-modulation regions[J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(6): 533~534
- Chun-Hung Lien, Hsueh-Hui Lin, Shih-Wan Weng *et al.*. A compact photonic switch based on multimode interference with partial index-modulation regions [J]. *Microwave and Opt. Technon. Lett.*, 2002, **33**(3): 174~176
- Jia Xiaoling, Gao Fan, Zhang Feng. Design and optimization of a new type 3×3 silicon on insulator multimode interference optical switch[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9): 1208~1213 (in Chinese)
- 贾晓玲,高凡,张峰. 新型 SOI 基多模干涉波导光开关的优化设计[J]. *光学学报*, 2005, **25**(9): 1208~1213
- Pelize Zhao, Jacek Chrostowski, Wojtek J. Bock. Novel multimode coupler switch[J]. *Microwave and Opt. Technon. Lett.*, 1998, **17**(1): 1~7
- Xiaoqing Jiang, Xia Li, Haifeng Zhou *et al.*. Compact variable optical attenuator based on multimode interference coupler[J]. *IEEE Photon. Technon. Lett.*, 2005, **18**(11): 610~613
- Lucas B. Soldano, Erik C. M. Pennings. Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(4): 615~627
- Brian R. Bennett, Richard A. Soref, Jesús D. Lafaw. Carrier-induced change in refractive index of InP, GaAs, and InGaAsP [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1990, **26**(1): 113~122
- P. Likam Wa, C. B. Park, A. Miller. All-optical switching of picosecond pulse in GaAs MQW waveguides[C]. *Proc. SPIE*, 1991, **1474**: 2~7