

# 行波电极偏振无关干涉型光开关

李德杰

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

**摘 要** 提出并实现了一种  $X$  切  $\text{LiNbO}_3$  上的行波电极偏振无关干涉型光开关。达到的指标为: 串音小于  $-14$  dB, 偏振无关的开关电压为  $19$  V, 带宽达到  $6$  GHz 以上。进一步减小定向耦合器部分中光波导间距的分级步距, 串音可达到  $-20$  dB 以下。

**关键词** 集成光学, 光开关, 光波导。

## 1 引 言

无论全光通信网中的交叉连接还是全光交换系统中, 集成光开关都起着非常重要的作用。光开关的形式有多种, 比较成熟的有在铌酸锂晶体上制作的光开关及其阵列、半导体光放大器和光纤耦合器构成的光开关及其阵列、III-V 族化合物半导体基片上制作的光开关等。衡量一种光开关性能的主要指标有串音特性、光损耗、开关电压或开关电流以及开关速率等。已有的光开关中, 铌酸锂材料制作的光开关是综合指标比较好的一种。本文讨论的即是铌酸锂材料上的一种偏振无关的光开关。

铌酸锂光开关的开关时间可以小于  $0.1$  ns, 采用行波电极时带宽可以达到  $6$  GHz 以上。由于原理的限制, 这类开关的串音一般比较大, 很难达到  $-30$  dB 以下, 正常情况下  $-20$  dB 已经是比较好的了。从系统要求的角度看, 这是远远不够的。在由单个光开关组成开关阵时, 阵列的串音与阵列结构有关系, 如树型  $4 \times 4$  开关阵的串音几乎是单个开关串音分贝数的两倍, 单个开关的串音只要有  $-18$  dB, 开关阵的串音就可达到  $-35$  dB。这样, 对单个开关的串音要求就大大降低了, 一般的电光开关就可达到这一指标。

在实际的光通信系统中, 大量使用的是普通的单模光纤, 光在其中传播时, 偏振态是随机演化的, 一旦遇到偏振敏感的器件, 将会造成光功率的损失和信噪比的降低, 因此在实际系统中应用的光器件的偏振无关性能就显得十分重要。解决光开关偏振问题的方法有两种, 一种是在光进入器件之前先引入偏振态校正器, 另一种是光器件本身属于偏振无关型的。前一种方法需要严格的反馈控制和结构复杂的校正器, 造成系统成本上升, 并引入附加光损耗, 因此较少被采用, 后一种方法在十几年的时间内成了研究的焦点<sup>[1-9]</sup>。

在已经发表的多种电光偏阵无关光开关中, 都是采用复杂的电极结构来实现交叉态和直通态的偏振无关的开关性能, 其中有的开关需要加三个电压来达到偏振无关条件下较低的串

音<sup>[6]</sup>。但复杂的电极结构严重地限制了开关的频率特性，并且导致了开关电压过高，使得开关只能在低速下工作，这就很难满足速率日益提高的光通信网发展的要求。而且是串音越低，电极就越复杂，开关速率也就越低，这形成了一个克服不了的矛盾。针对上述情况，作者研究发展了一种铌酸锂晶体上的行波电极偏振无关光开关，它的最大特点是具有较低的开关电压和极大的工作带宽。文中给出了开关的结构，实验参数以及测量结果等，同时还对器件的串音特性进行了理论分析。理论分析表明，适当的优化器件结构，实现开关电压 10 V 以下、串音小于 -20 dB 是完全可能的。

## 2 器件结构和工作原理

本文提出的光开关是制作在 X 切铌酸锂晶体上的行波电极干涉型的，器件的原理结构

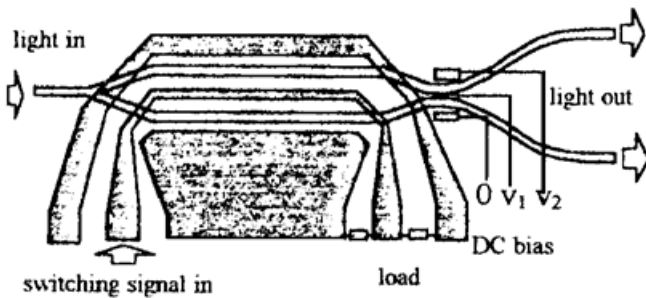


Fig. 1 1×2 optical switch with traveling wave electrodes

如图 1 所示。开关的输入端是一个波导 Y 分支，紧接着是调相区，两臂长度不同，在不加电压时光的相位差为  $\pi/2$ ，随后是一个耦合系数可调的 3 dB 定向耦合器，最后是输出波导。

如图 1 所示的结构中，光波导宽为  $7 \mu\text{m}$ ，在波长为  $1.3 \mu\text{m}$  时为单模。行波电极电镀而成，厚度大于  $3.5 \mu\text{m}$ 。中心电极宽  $20 \mu\text{m}$ ，两侧电极接地，电极间距为  $12 \mu\text{m}$ 。输出端有两个  $100 \Omega$  的电阻并联接地，提供  $50 \Omega$  的负载

电阻。实际电极传输线的阻抗小于  $50 \Omega$ ，因此负载电阻可根据计算结果进行选择。开关信号经过微波同轴接头输入到电极传输线，与光波导中传播的光波互作用来实现开关功能。

器件的工作原理可以作如下描述：当光进入单模波导后，在 Y 分支处进入两个调相区波导，分配比为 1:1。到达 3 dB 耦合器时，两臂中的光的相位差为  $\pi/2$ ，按定向耦合器的工作原理，光将从相位超前的波导中输出。水平方向的外加电场在两个调相波导中的方向相反，通过电光效应在两个波导中产生光的相位差。由于选择的是 X 切的铌酸锂晶体，光波导中的 TM 模对应的是寻常光，TE 模对应的是非寻常光，外加电场对 TM 模产生的电光效应小，大约是 TE 模的 1/3。当电极上施加的电场使得 TE 模产生  $3\pi$  的相位变化，则 TM 的相位变化为  $\pi$ 。结果两个波导中的 TE 模和 TM 模均发生反相，光就从另一个波导输出，达到了开关作用。

影响器件性能的关键是 3 dB 定向耦合器的耦合状态。本文采用的是钛扩散铌酸锂光波导，TE 模和 TM 模能同时传播。钛扩散引起的波导中的光折射率的提高对两种偏振模式并不完全相同，从而导致两种模式的光场分布有差异，两种模式在定向耦合器中的耦合状况略有不同，很难保证耦合器对两种偏振态都是 3 dB 的耦合度，将其设计成耦合系数可调的形式就是为了解决这一问题。

图 2 表示了 3 dB 定向耦合器中的电极和光波导的断面图。一个侧电极接地，在中间电极和另一个侧电极上加直流电压来调整两个光波导之间的耦合系数。由于两个光波导中的水平电场分量方向相同，外加电场使得两个光波导中的折射率同时提高或降低，耦合系数也跟着变化。理想情况下，两个电压之比为 1:2。实际器件中，由于电极和光波导制作中造成的不对称性，两个直流电压之比可能有偏离，可根据具体情况适当调整。

理论分析表明, 如果在没有外加直流偏压时 TM 模达到理想的 3 dB 耦合, 而 TE 模的耦合度只要在 0.67~ 8.45 dB 的范围内, 调整两个直流偏置电压, 就可以使得两个模式的耦合度处于 2.2~ 3.9 dB 之间。定向耦合器有这样的耦合度就可以保证光开关的串音小于 - 20 dB。

没加高速开关信号时, 两种偏振态的光基本上都从一个输出波导输出。当高频脉冲输入时, 调相波导中两种偏振态的光同时反相, 光将从另一个波导输出。

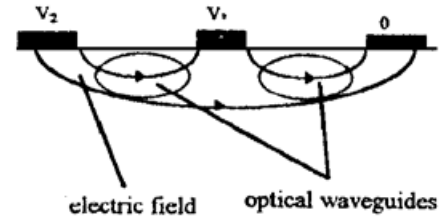


Fig. 2 DC-bias electric field distribution in the directional coupler

### 3 器件的偏振无关性能分析

本节首先研究构成光开关的各组成部分的偏振无关性能, 然后综合起来分析开关的总体性能。作为器件第一部分的 Y 分支, 完全是偏振无关的。两个波导中达到 3 dB 耦合是比较容易做到的。器件第二部分的两个调相波导设计成  $\pi/2$  的相位差, 实际制作中不可避免的会有偏差, 这种偏差对 TE 模和 TM 模是相同的。按实际经验, 该偏差最大可达  $\pi/3$ , 而且是不可控制的。解决这一问题的办法是在同一块基片上同时做多个器件, 经过通光测试选择其中合适的一个套刻电极。

影响器件性能的关键部分是 3 dB 定向耦合器。一般情况下, 两种偏振模式的耦合度差别比较大, 甚至大到一倍以上。作者经过波导结构和制作工艺的优化, 使得两种偏振模式之间的耦合度相差在 20% 以内, 通过外加偏置电压可以调整到要求的范围内。光波导之间的耦合可由下式表示:

$$\begin{bmatrix} A_1' \\ A_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \kappa L & -j \sin \kappa L \\ -j \sin \kappa L & \cos \kappa L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中  $A_1'$  和  $A_2'$  为两个波导中的输出光的复振幅,  $A_1$  和  $A_2$  为输入光复振幅,  $\kappa$  为耦合系数,  $L$  为耦合区的长度。两个输入光振幅大小相等, 相位差为  $\pi/2$ , 可表示为  $A_1 = j\sqrt{2}/2$  和  $A_2 = \sqrt{2}/2$ 。

理想情况下,  $\kappa L = 0.25\pi$ , 实际上这是极难做到的。按 (1) 式进行计算, 为达到 - 20 dB 的串音, 两种偏振模式的耦合度均应在 2.2~ 3.9 dB 的范围内, 相应的  $\kappa L$  在  $(0.25 \sim 0.032)\pi$  之间。实际上, 将两种模式的耦合度同时控制在这个范围内也是比较困难的。由于比较精确地控制一个模式的耦合度能容易的做到, 一般可将 TM 模的耦合度精确控制, 而 TE 模的耦合度通过外加直流电压来调整。根据耦合模理论, 耦合系数的变化为

$$\Delta \kappa_{TE} = cn_e^3 \iint u_{TE_1} u_{TE_2} E \gamma_{33} dx dy \quad (2)$$

和

$$\Delta \kappa_{TM} = cn_o^3 \iint u_{TM_1} u_{TM_2} E \gamma_{13} dx dy \quad (3)$$

式中,  $c$  为常数,  $n_e$  和  $n_o$  分别为铌酸锂晶体的非常光和寻常光的折射率, 在 X 切晶体中分别对应 TE 模和 TM 模。  $u_1$  为波导 1 独立存在时光场幅度的空间分布,  $u_2$  为波导 2 独立存在时光场幅度的空间分布,  $E$  为外加电场的空间分布,  $\gamma_{33}$  是对 TE 模的电光系数,  $\gamma_{13}$  是对 TM 模的电

光系数。由于两种偏振模式的光振幅的空间分布基本相同,  $n_e$  和  $n_o$  相差不大,  $\gamma_{33}$  是  $\gamma_{13}$  的 3 倍,  $\Delta\kappa_{TE}$  基本上是  $\Delta\kappa_{TM}$  的 3 倍, 精确的值是 3.09。只要把没有直流电压时 TM 模的耦合度控制在 2.38~ 3.75 dB 的范围内, 相应的  $\kappa_{TM}L$  在  $(0.25 \pm 0.025)\pi$  的范围内, TE 模的耦合度控制在 1.84~ 4.6 dB 的范围内, 相应的  $\kappa_{TE}L$  在  $(0.25 \pm 0.053)\pi$  的范围内, 外加直流电压就可将两者的耦合度同时调整到 2.2~ 3.9 dB 的范围内, 相应的  $\kappa L$  在  $(0.25 \pm 0.032)\pi$ 。满足这种条件, 光开关的串音就可小于 -20 dB。最差的情况是对 TE 模  $\kappa_{TE}L > \pi/4$ , 对 TM 模  $\kappa_{TM}L < \pi/4$ , 或反过来。这种情况下, TM 模  $\kappa_{TM}L = (0.25 + 0.025)\pi$ , TE 模  $\kappa_{TE}L = L(0.25 - 0.053)\pi$ , 外加直流电压使得  $\Delta\kappa_{TM}L = 0.007\pi$ ,  $\Delta\kappa_{TE}L = 0.021\pi$ , 则  $\kappa_{TM}L = (0.25 + 0.032)\pi$ ,  $\kappa_{TE}L = (0.25 - 0.032)\pi$ 。根据耦合模方程可知, 两种偏振态的输出光振幅相同, 串音均小于 -20 dB。当调相段电极上的信号脉冲引起耦合器两个输出光振幅反相时, 光将从另一个波导输出, 串音仍然为 -20 dB。如果两种偏振态  $\kappa L$  同时大于或小于  $0.25\pi$ , 经电场调整后  $\kappa L$  偏离  $0.25\pi$  的值将小于  $0.032\pi$ , 此时的串音也将小于 -20 dB。

#### 4 器件的制作与测量

器件制作在 X 切的铌酸锂晶体上, 为了保证 3 dB 定向耦合器的合适耦合度, 在同一基片上同时制作 20 个光波导器件, 每 4 个器件为一组, 每组器件中定向耦合器的间距不同, 按  $2.0 \mu\text{m}$  的间距分级, 经测量后选择其中的一个合适的套刻电极。

光波导由钛扩散方法制作, 钛膜用溅射和光刻拾离技术沉积, 厚度为 700 nm。在  $1050^\circ\text{C}$  下扩散 6 小时, 然后在基片上沉积一层二氧化硅缓冲层, 其厚度为 200 nm。制得的基片经端面抛光后进行通光测量, 对所有的光波导器件都分 TE 和 TM 模进行测量。测量用的光源是  $1.31 \mu\text{m}$  的半导体激光器, 输出光经偏振态校正器后进入光波导。先测量 TM 模的耦合状态, 逐个测量后, 找到其中的一个: 光只从一个输出波导中输出, 另一个波导中的串音应小于 -25 dB 以下。然后用 TE 模测量该波导器件, 一般情况下, TE 模的光也从同一输出波导输出, 另一个波导的串音小于 -10 dB。

在选中的波导器件上制作电极, 行波电极用光刻胶保护电镀的方法制备, 为保证低的微波损耗, 电极厚度一般要大于  $5 \mu\text{m}$ 。电极做好以后要在  $350^\circ\text{C}$  的温度下退火三小时, 以完全消除应力, 避免应力引起的光的传播常数和耦合系数的变化。

制备好电极的器件在和光纤耦合之前要进行开关状态的测量。一般情况下, 没加电压时的状态与制作电极之前一样。首先在 3 dB 定向耦合器的电极上按中间电极和外侧电极上的电压之比约为 1:2 加直流电压, 将 TE 模的串音调小。两个电压之比也要进行微调, 以串音小为依据。当 TE 模的串音下降时, TM 模的串音可能下降也可能加大, 调到两种偏振态的串音相同时为止, 这时的串音就是偏振无关开关状态下的最低串音。如果定向耦合器对 TE 模和 TM 模的耦合比同时大于 1 或同时小于 1, 则直流偏置电压使得两个模式的串音同时降低或者 TM 模的串音先降低后增加, 这种情况下偏振无关的串音可以达到较小的值。如果定向耦合器对 TE 模和 TM 模的耦合比一个大于 1, 一个小于 1, 则 TE 模的串音下降时, TM 模的串音增加, 对应这种情况的偏振无关的串音稍大。

由于光刻版上 3 dB 定向耦合器间距的分级采用了  $2.0 \mu\text{m}$ , 步距有些大。在制作电极之前测量时, 找不到 TM 模串音小于 -25 dB 的波导器件, 最小的串音只有 -13 dB, 同一器件 TE 模的串音为 -18 dB。实测结果还证明两种模式的耦合比分别大于和小于 1, 遇到了比较

坏的一种情况。直流偏置将两个偏振态的串音都调整到了 $-14.5$  dB, 继续加高偏置电压, TE 模的串音变得更大。 $-14.5$  dB 是偏振无关状态下交叉态的最小串音, 偏置电压就固定下来了, 下一步是在调相段电极上加电压实现开关效应。当电压加到 $6.2$  V 时, TE 模实现了开关作用, 光从另一个波导输出, 串音为 $-15$  dB。电压加到 $19$  V 时, 两个模式同时实现了开关作用, 串音为 $-14$  dB。串音略大的原因是由于波导间距分级较大, 造成交叉态串音较大, 直通态串音自然也就跟着较大。进一步的研究中可将波导间距分级变小, 例如 $0.5\ \mu\text{m}$ , 这个问题就可解决。

器件完成了封装以后用光网络分析仪进行了频率特性的测量。测量结果示于图 3 中。从图中可见 $3$  dB 光带宽大于 $6$  GHz, 由于光网络分析仪的限制, 再高的频率无法测量。在 $2$  GHz 附近有两个谐振点, 这是由于微波同轴接头装配不合适引起的, 适当的调整可以消除。

$19$  V 的开关电压显得有些过高, 这是由于调相段的波导和电极长度不够造成的。实验用的器件中, 该段长 $9$  mm。长度增加两倍, 电压也将降为 $1/2$ , 因此 $10$  V 以下的开关电压是完全可以实现的, 不过开关的带宽也会变窄一些。

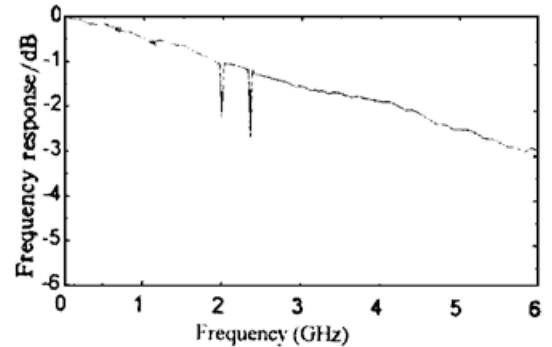


Fig. 3 Frequency response of the switch

**结 论** 本文提出并实现了一种带有行波电极的偏振无关干涉型光开关。由于较合理地设计波导和电极结构, 控制制作工艺参数, 使得两种偏振态具有相近的耦合长度, 从而实现了偏振无关的开关效应。两种开关状态下的串音分别为 $-14.5$  dB 和 $-14$  dB, 开关电压为 $19$  V, 光带宽达到了 $6$  GHz。和已经发表的各种偏振无关光开关相比较, 串音指标一般, 开关电压属于较低的一种, 而带宽数倍于已经发表的其它最好结果。这样大的带宽可以满足 $2.5$  Gbit/s 的光通信网的要求。

文中还对干涉型偏振无关光开关达到 $-20$  dB 的串音的条件进行了分析, 更加合理的设计器件结构, 加长调相段长度, 改进工艺参数, 实现 $10$  V 开关电压下 $-20$  dB 的串音是完全可能的。带宽保持在 $3$  GHz 以上, 仍能满足 $2.5$  Gbit/s 速率的光通信系统的要求。

### 参 考 文 献

- [1] R. C. Alferness, Optical directional couplers with weighted coupling. *Appl. Phys. Lett.*, 1979, **35** (3) : 260~ 262
- [2] R. C. Alferness, Polarization-independent optical directional coupler switch using weighted coupling. *Appl. Phys. Lett.*, 1979, **35**(10) : 748~ 750
- [3] J. E. Watson, M. A. Milbrodt, T. C. Rice, A polarization independent  $1 \times 16$  guided-wave optical switch integrated on lithium niobate. *J. Lightwave Technol.*, 1986, **LT-4**(11) : 1717~ 1722
- [4] M. Kondo, R. Ishikawa, Y. Ohta *et al.*, Low-drive-voltage and low-loss polarisation-independent LiNbO<sub>3</sub> optical waveguide switches. *Electron. Lett.*, 1987, **23**(21) : 1167~ 1169
- [5] H. Okayama, A. Matoba, R. Shibuya *et al.*, Polarisation-independent optical switch with cascaded optical switch matrices. *Electron. Lett.*, 1988, **24**(15) : 959~ 961
- [6] P. Granestrand, L. Thelen, B. Stolts, Polarisation independent switch and polarisation splitter employing  $\Delta\beta$  and  $\Delta\kappa$  modulation. *Electron. Lett.*, 1988, **24**(18) : 1142~ 1143

- [7] 李德杰, 彭吉虎, 吴伯瑜等, 与偏振无关的 Ti:LiNbO<sub>3</sub> 光开关及其阵列. 1989 光电子器件与集成技术年会论文集, 北京, 清华大学出版社, 1989: 210~ 213
- [8] 彭吉虎, 李德杰, 沈雷等, BOA 型偏振无关光波导开关. 1991 光电子器件与集成技术年会论文集, 北京, 清华大学出版社, 1991: 522~ 524
- [9] D. J. Li, J. H. Peng, B. Y. Wu, A polarization independent optical switch on z-cut LiNbO<sub>3</sub>. *Technical Digest of Tenth International Conference on Integrated Optics and Optical Communication*, Hongkong, Chinese University Press, 1995, 2: 112~ 113

## Polarization Independent Optical Switches with Travelling Wave Electrodes

Li Dejie

(*Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084*)

(Received 3 January 1997; revised 21 April 1997)

**Abstract** A polarization independent optical switch of interference type on  $x$ -cut LiNbO<sub>3</sub> with traveling wave electrode is proposed. The switch has a large bandwidth up to 6 GHz and a relatively small crosstalk less than -14 dB under the polarization independent switching voltage of 19 volts. Further improvement of the structure can make the crosstalk down to -20 dB.

**Key words** integrated optics, optical switch, optical waveguide.