

1.3 μm 钛扩散铌酸锂无间距方向耦合器

郑 能 陆荣鑫 蔡伯荣
(成都电讯工程学院)

曹泽煌
(重庆光机所)

提要: 研制成功工作波长为 1.3 μm 的钛扩散铌酸锂无间距方向耦合器, 其 ON/OFF 比大于 17 dB, 开关电压小于 23 V, 器件电极电容 6 pF, 理论带宽大于 1 GHz。

关键词: 钛, 铌酸锂, 方向耦合器

Zero-gap directional couplers with Ti: LiNbO₃ waveguides at 1.3 μm

Zheng Neng, Lu Rongxin, Cai Borong
(Chengdu Institute of Radio Engineering, Chengdu)

Cao Zehuang
(Chongqing Opto-Electronics Research Institute, Chongqing)

Abstract: A Zero-gap directional coupler with Ti: LiNbO₃ waveguides at $\lambda=1.3 \mu\text{m}$. has been fabricated. An ON/OFF ratio of 17 dB, switch voltage of 23 V and capacitance of 6 pF were measured and the theoretical band-width is greater than 1 GHz.

Key words: titanium, lithium niobate, directional coupler

一、引 言

集成光开关的出现, 使光纤通讯和信息处理等向更高速和更小型化发展。目前集成光学强度开关和调制器主要有方向耦合器^[1]、干涉仪型调制器^[2]、对称 X 型开关调制器^[3]、非对称 X 型开关调制器^[4]和无间距方向耦合器^[5]等。我们这里研制的是曲线型对称无间距方向耦合器(如图 1(c)), 它是方向耦合器(图 1(a))的变形。在高速率运行下, 方向耦合器必须使用单段的行波电极^[6], 这就要求波导作用区长度为耦合长度的整数倍, 否则开关比(ON/OFF)就会下降, 这条件对现有工艺来说是相当苛刻的。随后出现的 $2\Delta n$ X 型开关(如图 1(b))解决了这个问题, 但在制作波导时它需要两次光刻, 这就可能造成两交叉波导不对称从而导致 ON/OFF 比下降^[7], 而且它的作用区($2\Delta n$ 区)长度不能灵活变动。无间距方向耦合器(如图 1(c), (d))除了能象 $2\Delta n$ X 型开关那样克服方向耦合器所存在的耦合长度问题外, 它的作用区($2w$ 区)长度还可任意调节, 且只需一次光刻。

二、原理和器件参数的设计

如图 1(c) 示的无间距方向耦合器, 在其波导中的光场分布可用对称模和反对称模的方法去模拟。通常, 每一个输入的第 i 阶模在作用区 ($2w$ 区) 内可激励起第 $2i$ 和第 $2i+1$ 阶模, 输出光功率 P_{\pm} 与 P_{\pm} 和 P_{in} 之关系可表示为^[4]

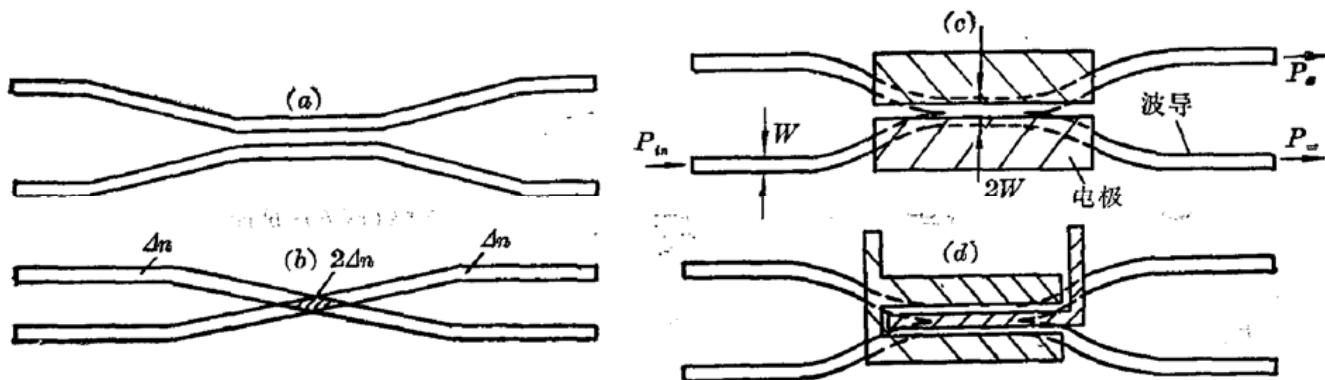


图 1 四种光开关

(a) 方向耦合器 (b) $2\Delta nX$ 型光开关 (c) X 切或 Y 切无间距方向耦合器; (d) Z 切无间距方向耦合器

$$P_{+} = \sum_{i=0}^N P_{in}^{(i)} \cos^2(\overline{\Delta\beta}^{(i)} \cdot L + \Psi^{(i)}) \quad (1a)$$

$$P_{-} = \sum_{i=0}^N P_{in}^{(i)} \sin^2(\overline{\Delta\beta}^{(i)} \cdot L + \Psi^{(i)}) \quad (1b)$$

式中 $P_{in}^{(i)}$ 是输入的第 i 阶模功率, $\overline{\Delta\beta}^{(i)}$ 是由第 i 阶模在作用区激励的第 $2i$ 阶模和第 $2i+1$ 阶模的平均传播常数差, $\Psi^{(i)}$ 是所对应的相对相位、 L 是作用区长度、如果输入为单模(基模), 则(1)式可写为

$$P_{+}/P_{in} = \cos^2(\overline{\Delta\beta} \cdot L) \quad (2a)$$

$$P_{-}/P_{in} = \sin^2(\overline{\Delta\beta} \cdot L) \quad (2b)$$

无间距方向耦合器的传输特性也可用光束传输法(BPM)进行计算。设光场向 z 方向传播, 由 BPM, 在 $z = \Delta z$ 处的横向电场分量 $\epsilon(x, y, \Delta z)$ 可以用在 $z = 0$ 处的横向电场分量 $\epsilon(x, y, 0)$ 来表示:

$$\epsilon(x, y, \Delta z) = \exp\left\{-i\Delta z \left[\frac{\Delta_1^2}{(\nabla_1^2 + K^2)^{1/2} + K} + \chi(x, y, 0) \right]\right\} \cdot \epsilon(x, y, 0) \quad (3)$$

$$\chi(x, y, z) = K[n(x, y, z)/n_0 - 1] \quad (4)$$

式中 n_0 是均匀介质折射率(通常为衬底折射率), $n(x, y, z)$ 是波导的折射率分布, $\nabla_1^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$, K 是在 n_0 中的传播常数。用步距 Δz (很小) 一步一步对(3)式用计算机向前计算就可得任意 z 处的光场分布。

由(2)式 ON/OFF 比可达无限大。实际上 ON/OFF 比受下列四个因素限制: 1, 对称模和反对称模在作用区的传输损耗差; 2, 波导尺寸的不对称, 3, 外扩散波导的出现; 4, 电极的未对准。我们用光束传输法(BPM)对无间距方向耦合器由于电极未对准而引起 ON/OFF

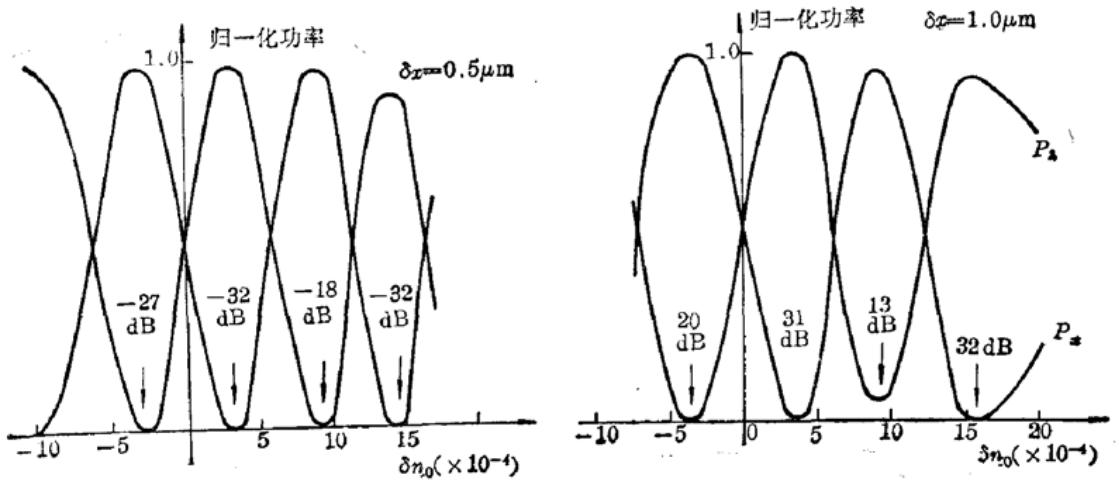


图2 用BPM计算的在电极未对准下对无间距方向耦合器ON/OFF比的影响比下降进行了计算^[8],结果见图2。要使ON/OFF比在30dB以上,电极对准误差应小于0.5 μm。图2中的 δn_0 是由于电场引起的折射率变化,它和在电极上所加电压 U 成正比。 δx 是电极中心轴线平行偏离波导中心轴线的距离。

为了减小器件的尺寸和分叉处的过渡损耗,我们对目前比较流行的四种用于过渡两平行波导的曲线用BPM进行了对其损耗的计算。这四种曲线是1, $x(z) = h/l \cdot z$; 2, $x(z) = \frac{h}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi}{l} z \right)$; 3, 用两段圆弧连线的曲线,其半径: $R = \pm \left(\frac{l^2}{4h} + \frac{h}{4} \right)$; 4, $x(z) = \frac{h}{l} z - \frac{h}{2\pi} \sin \left(\frac{2\pi}{l} \cdot z \right)$ 。

式中 h 为连结两平行波导时弯曲波导的总高度, l 是其总长度。计算结果表明:在 h/l 小于1/40时,曲线4有较小的损耗,而当 h/l 大于1/40时,曲线2有较小的损耗。[8]的计算还表明:在同样的 h/l 下用曲线4过渡的无间距方向耦合器的开关电压比用斜线(曲线1)的要低。这是因为用曲线过渡的器件其有效的电场和光场的作用区比斜线过渡的长,当然,这时电极应长于作用区。

关于电极结构,有图1(c)中的 x 切向或 y 切向铌酸锂晶体的电极和图1(d)中的 z 切铌酸锂晶体的电极。Jiri. Ctyroky的计算^[8]指出:在相同的作用长度下,图1(c)的开关电压比图1(d)的低,且图1(c)的电极结构更适应于高速运行。

我们设计的器件如图1(e)所示,工作波长 $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$,作用区($2w$ 区)长度为3 mm,波导宽度 $w = 6 \mu\text{m}$,两波导最大分离距离为 $20 \mu\text{m}$,根据[7],这足以使两分离的波导不发生耦合。曲线波导的线型用曲线4, $h/l = 1/200$ 。电极间距为 $3 \mu\text{m}$,其长度大于作用区长度,以增加有效作用长度,从而降低开关电压。

三、器件的制作工艺和测试结果

用 x 切 LiNbO_3 作为器件衬底。掩模板用电子束曝光制造,其曲线步距为 $0.35 \mu\text{m}$ 。用电子束蒸发60 nm的钛膜。在光刻中用抬离法做出,波导图形,在铌酸锂粉中扩散8小时,扩

散温度 1050°C。在这样的工艺条件下, 实验观察到在 $\lambda=1.3\ \mu\text{m}$ 下, 在 $w=6\ \mu\text{m}$ 时为单模在 $w=12\ \mu\text{m}$ (即在作用区) 时为双模。端面抛光后, 再套刻上铝电极, 其厚度为 200~300 nm。

测试装置如图 3, 用 1 kHz 的方波信号发生器驱动 1.3 μm 的半导体激光器, 半导体激光器与器件精密抛光好的端面直接耦合进波导, 器件由直流稳压电源驱动。由波导输出的光斑由显微镜成像后用红外变像管观察或由光电二极管接收至选频放大器测量。

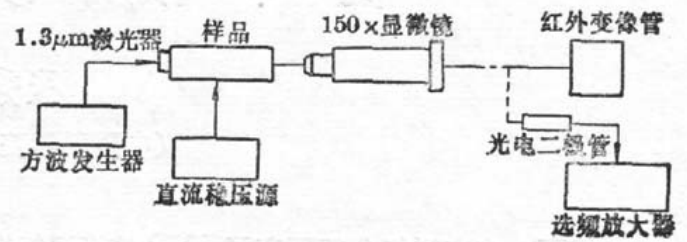


图 3 测试装置

图 4 是从红外变像管后拍摄到的照片。图 5 是两个输出波导中的光强和驱动电压之关系。从图 5 中可得两输出波导中的最大光强和最小光强之比即 ON/OFF 都大于 17 dB, 开关电压为 23 V, 测得电极电容为 6 pf。如和 50 Ω 的驱动源匹配则带宽为 1 GHz。

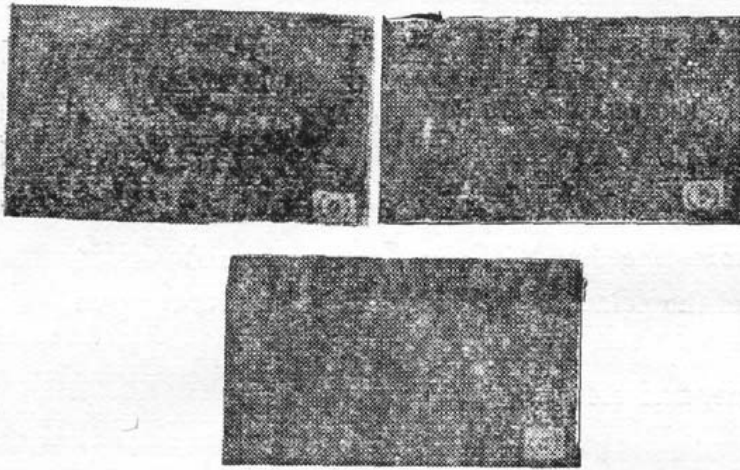


图 4 输出光斑照片

(a) $V=-6\ \text{V}$; (b) $V=-18\ \text{V}$; (c) $V=+4\ \text{V}$

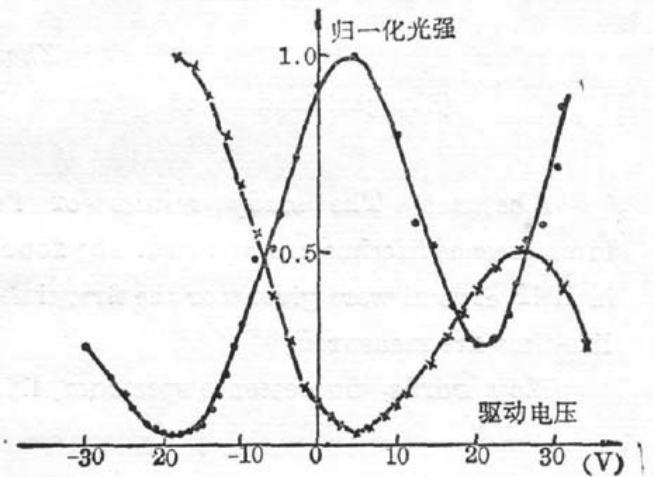


图 5 两个输出波导的光强和驱动电压的关系

感谢上海冶金所计算机辅助设计室制版组在制版方面给与的帮助和电子部四十四所蒲天春在工艺方面给与的帮助。

参 考 文 献

- 1 R. C. Alferness *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **35**(10), 748(1979)
- 2 黄章勇 *et al.*, *电子学报*, (4), 114(1986)
- 3 A. Neyer *et al.*, *Electr. Lett.*, **9**, 553(1983)
- 4 A. Neyer *et al.*, *IEEE J. Lightwave Technology*, **LT-3**(3), 635(1985)
- 5 R. A. Forber, *Conf. on Laser and Electron Optics*, 1985, 288
- 6 K. Kubota *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-16**, 754(1980)
- 7 R. A. Forber *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-22**, 911(1986)
- 8 Jiri. Ctyroky *et al.*, *J. Opt. Commun.*, **7**(4), 136(1986)