

# 高效集成电光调制器和开关的电极 与光波导的优化设计\*

陈福深

(电子科技大学光纤传输与通信国家重点实验室, 成都 610054)

**摘 要** 集成电光调制与开关的效率取决于光波导中电光重叠因子  $\Gamma$  的大小, 直接影响此因子的有电极宽度、电极间距、光模场尺寸、以及电极与光波导的相对位置等参量。本文利用集成电光调制器电极电场的分布规律, 研究了各种结构中影响电光重叠因子的诸参量之间的关系; 根据实际工艺条件, 应用系统优化方法尽可能对各种参量进行优化计算, 得到了实现高效调制和开关的全部参量的优化设计结果。

**关键词** 优化设计, 光波导, 电极, 集成电光调制。

## 1 引 言

钛扩散铌酸锂集成电光波导调制器中, 相位调制是基本的调制, 以此为基础可实现光强调制、光偏振和开关状态的控制。由于电光相位调制是利用晶体的电光效应, 通过外加电场改变晶体的折射率, 从而达到对光波实施调制的目的。所以, 调制效率与光波电场和外加电场之间的相互作用密切相关。因此必须优化选择电极宽度、电极间距、光波导尺寸、电极与波导的相对位置等等。

文献[1]对集成电光调制的各种结构的电极进行了详尽的电磁场静态分析和计算, 得到了电极电场  $x$  和  $y$  分量的分布规律。文献[2]提出了电极优化设计的概念, 就对称双电极(半无限宽)的定向耦合器和相位调制的优化设计进行了研究。文献[3]应用最小光模场尺寸的实验结果, 针对对称双电极和对称三电极(共面波导)结构, 得到了最大值重叠积分因子  $\Gamma$ 。但是, 上述文献的优化设计研究, 还未包括电极结构的全部情况, 同时他们的优化设计研究对各种参量均采取孤立分析的方法。

本文的特点在于对各种  $\text{Ti}:\text{LiNbO}_3$  集成电光调制的电极结构进行全面分析, 这些结构有对称共面双电极、对称三电极(共面波导)和非对称共面双电极。同时在每种结构中, 还就光调制中利用不同的外加电场分量  $E_x$  和  $E_y$  分别进行研究, 所以总共有六种情况出现。此外, 本文的分析方法是把各种能够优化的参量进行系统优化, 而不是孤立地处理各个参量。当然, 那些因实际制作技术限制的参量不能进入优化系统, 只好除外。

\* 电子科学研究所预研基金资助项目。

收稿日期: 1995年1月11日

## 2 理论分析

图 1、图 2、图 3 包括了集成电光调制的全部结构，三个图中的(a)结构利用外加场的水平分量，相应的光波基模为 TE 模；(b)结构利用外加场垂直分量，相应的光波基模是 TM 模。采用保角变换法<sup>[1]</sup>，可得到其电极电场各分量的表达式。图 1 所示的对称共面双电极结构的

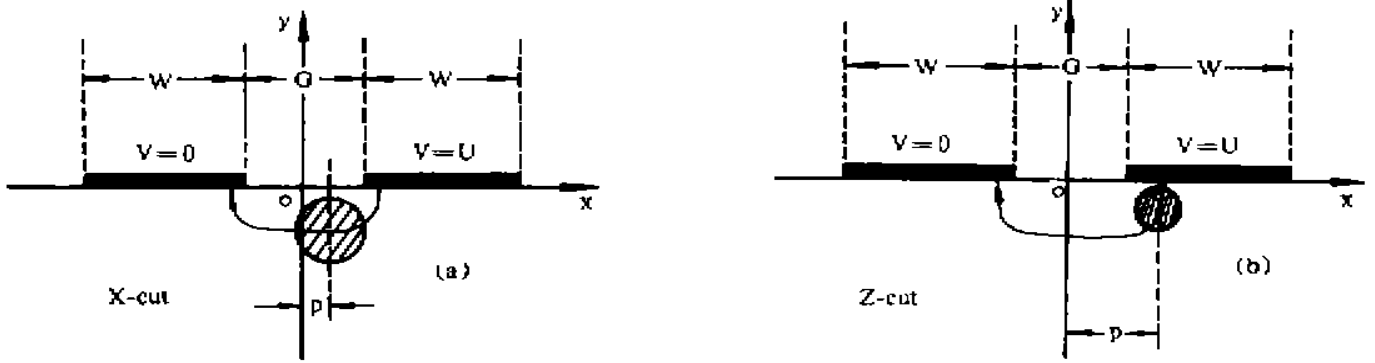


Fig. 1 Schematic of the symmetric coplanar two electrodes

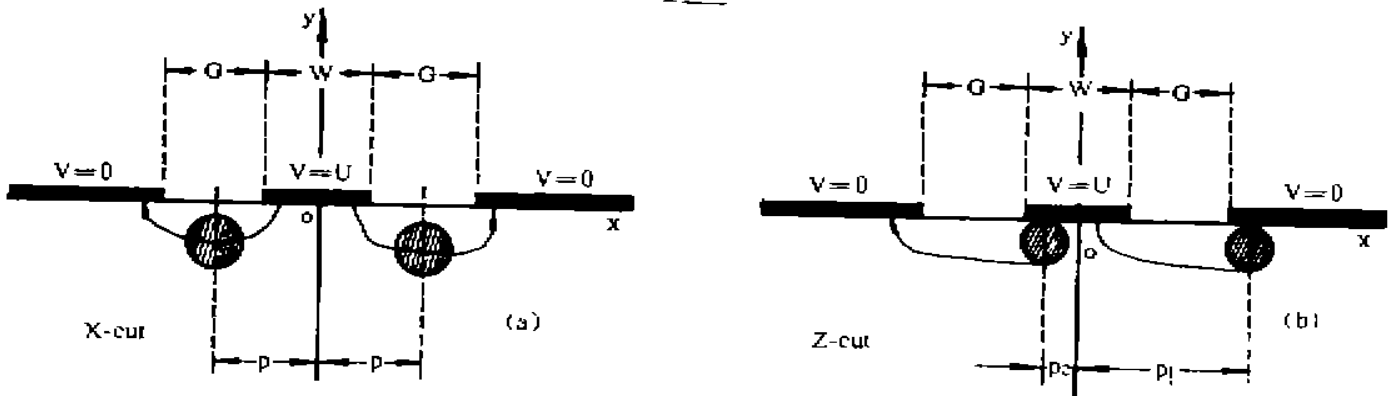


Fig. 2 Schematic of the symmetric coplanar three electrodes

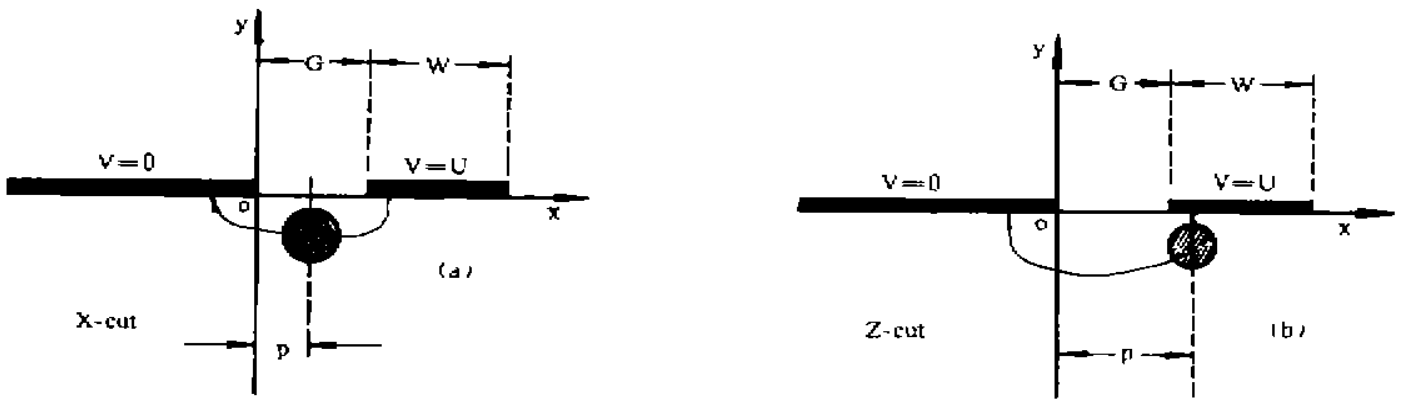


Fig. 3 Schematic of the asymmetric coplanar two electrodes

场分量是：

$$E_x = -\frac{U}{2K} \operatorname{Re} \frac{dw}{dz}, \quad E_y = \sqrt{\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y}} \frac{U}{2K} \operatorname{Im} \frac{dw}{dz}, \quad \frac{dw}{dz} = \frac{h}{\sqrt{(h^2 - k^2z^2)(h^2 - \tau^2)}} \quad (1)$$

式中  $k = G/(G + 2W)$ ,  $h = G/2$ ,  $K$  为完全椭圆积分。

图 2 所示为对称三电极结构(共面波导)，应把两边的电极部分当作半无限宽。各场分量是：

$$E_z = -\frac{U}{K'} \operatorname{Im} \frac{dw}{dz}, \quad E_y = -\sqrt{\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y}} \frac{U}{K'} \operatorname{Re} \frac{dw}{dz}, \quad \frac{dw}{dz} = \frac{h}{\sqrt{(h^2 - k^2 z^2)(h^2 - z^2)}}. \quad (2)$$

式中,  $k = W/(W + 2G)$ ,  $h = W/2$ ,  $K' = K(k')$ ,  $k'^2 = 1 - k^2$ .

图 3 所示的非对称共面双电极结构, 图中的左半电极应看成是半无限宽, 它们的场分量表达式是:

$$E_z = \frac{U}{K} \operatorname{Re} \frac{dw}{dz}, \quad E_y = \sqrt{\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y}} \frac{U}{K} \operatorname{Im} \frac{dw}{dz},$$

$$\frac{dw}{dz} = \frac{1}{2\sqrt{G}} \frac{1}{\sqrt{z(1-z/G)(1-k^2z/G)}}. \quad (3)$$

式中  $k = (1 + W/G)^{-1/2}$ . 注意, 上述所有的表达式当使用 Z 切  $\text{LiNbO}_3$  时,  $\epsilon_x = 43$ ,  $\epsilon_y = 28$ ; 当使用 X 切  $\text{LiNbO}_3$  时,  $\epsilon_x = 28$ ,  $\epsilon_y = 43$ . 显然, 各图中的(a)是 X 切晶体, (b)是 Z 切晶体.

图 1 所示结构当  $W \rightarrow \infty$ , 即双电极均变成半无限宽时, 场分量变成

$$E_z = \frac{U}{\pi} \operatorname{Im} \frac{dw}{dz}, \quad E_y = \sqrt{\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y}} \frac{U}{\pi} \operatorname{Re} \frac{dw}{dz}, \quad \frac{dw}{dz} = \frac{1}{\sqrt{z^2 - h^2}}. \quad (4)$$

在外加电压  $\Gamma$  的作用下, 波导折射率的变化为

$$\Delta n_e = -\frac{n_o^2}{2} r_{33} \frac{\Gamma}{G} \Gamma_{\parallel(\perp)} \quad (5)$$

其中  $\Gamma_{\parallel(\perp)} = \frac{G}{\Gamma} \iint E_{\parallel(\perp)} |E'|^2 dx dy$ ,  $r_{33}$  为  $\text{LiNbO}_3$  的电光张量系数,  $E_{\parallel(\perp)}$  表示外加电场的水平、垂直分量,  $E'$  是归一化的光基模电场在截面上的分布,  $\Gamma$  即为电光重叠因子, 它表明晶体电光相互作用的程度. 根据(5)式, 要想使  $\Delta n_e$  一定时外加电压  $\Gamma$  最小, 则要求  $\Gamma_{\parallel(\perp)}$  最大. 为此, 定义  $S_{\parallel(\perp)} = \Gamma_{\parallel(\perp)}/G$  为归一化的重叠因子和  $\bar{E}_{\parallel(\perp)} = E_{\parallel(\perp)}/\Gamma$  为  $\Gamma = 1$  时的外加场分量, 则有

$$S_{\parallel(\perp)} = \iint \bar{E}_{\parallel(\perp)} |E'|^2 dx dy. \quad (6)$$

光波基模的  $x$  方向近似为高斯函数,  $y$  方向近似为厄密特-高斯函数<sup>[2]</sup>, 于是有

$$|E'|^2 = \frac{4y^2}{\omega_x \omega_y^3 \pi} \exp \left[ -\left( \frac{x-p}{w_x} \right)^2 \right] \exp \left[ -\left( \frac{y}{w_y} \right)^2 \right] \quad (7)$$

式中,  $p$  表示光波导中心偏离  $y$  轴的位置坐标.

### 3 优化参数的分析

由于(7)式中的  $|E'|^2$  与  $w_x$ ,  $w_y$  和  $p$  有关, (6)式中的  $\bar{E}_{\parallel(\perp)}$  与  $G$  和  $W$  有关, 因此(6)式表示的归一化重叠因子  $S_{\parallel(\perp)}$  就与  $w_x$ ,  $w_y$ ,  $p$ ,  $G$  和  $W$  有关, 这样  $S_{\parallel(\perp)}$  包含了五个待优化的参量. 从理论上讲  $S_{\parallel(\perp)} = f(w_x, w_y, p, G, W)$ , 实质上是确定此函数在五个自变量情况下取极大值的问题, 极大值的获得也就是优化设计的结果. 但是, 函数  $f(w_x, w_y, \dots)$  绝非解析函数, 只能运用计算机数值计算求极值.

对上述五个参量应分别根据实验制作工艺条件加以考虑. 要实现高效  $\text{Ti:LiNbO}_3$  的调制和开关作用, 首先使光基模场尺寸减至最小, 这是因为在传输光功率不变的情况下, 最小的光模场尺寸处于外加电场最大值分布周围处能获得最大的电光重叠因子. 当然这个尺寸不能

无限度小, 太小会导致基模截止。实验研究<sup>[4]</sup>表明,  $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ , 当光波沿  $x$  方向强度降至最大值的  $1/e$  时, 宽度为  $3.9 \mu\text{m}$ , 沿  $y$  方向强度降至最大值的  $1/e$  时, 深度为  $2.8 \mu\text{m}$ , 此结果为目前所能得到的最小尺寸(实验室条件)。由(7)式可知,  $2w_x = 3.9$ ,  $1.376 w_y = 2.8$ , 所以有  $w_x \approx w_y \approx 2 \mu\text{m}$ 。

$w_x$  和  $w_y$  确定之后, 待优化参量剩下  $G$ 、 $W$ 、 $p$ 。随着电极间距  $G$  的减小, 外加电场强度增大。为防止优化计算过程出现  $G \rightarrow 0$  且实际制作工艺无法实现的情形, 将  $G$  作为参变量, 即把  $G$  固定在一些合适的数值上, 只对  $W$  和  $p$  进行优化。同时因为电极间距直接影响行波调制器的电极特征阻抗,  $G$  作为参变量对于设计者选择不同的  $G$  值, 以达到所需的阻抗值带来方便。

此外, 在一些情况下  $W$  增大将对优化设计产生正面影响, 这是因为  $W$  增大导致所利用的场分量加大, 所以应先将  $W \rightarrow \infty$  以避免优化计算过程中出现  $W \rightarrow \infty$  的发散现象。但在另一些情况下, 不存在  $W$  增大产生正面效应的问题, 这时优化过程将集中在  $W$  和  $p$  两个参量上。至于  $W$  是否应趋于无穷大将在设计结果中说明。

根据钛扩散铌酸锂的性质, 实现最小光模场尺寸时, 必须保证尽可能大的折射率差  $\Delta n_x$ , 否则光波不可能有良好的导模条件, 反过来又使  $w_x$  和  $w_y$  的值增大, 为此可求得沿  $x$  和  $y$  方向上的扩散深度  $dx$  和  $dy$ 、以及最大折射率差  $\Delta n_x$ <sup>[5, 6]</sup>:

$$\begin{aligned} dx &= 2 \sqrt{D_{ox} \exp(-T_{ox}/T)t}, & dy &= 2 \sqrt{D_{oy} \exp(-T_{oy}/T)t}, \\ \Delta n_x &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \operatorname{erf} \left( \frac{w_{y1}}{2dx} \right) \frac{b\tau}{dy}. \end{aligned} \quad (8)$$

式中,  $\tau$  为钛条厚度,  $D_{ox}$ 、 $D_{oy}$  分别为  $x$ 、 $y$  方向上的扩散率,  $T_{ox}$ 、 $T_{oy}$  分别为  $x$ 、 $y$  方向上的特征温度,  $b = 0.552 + 0.065/\lambda^2$  ( $\mu\text{m}$ ), 对于 Z 切  $\text{Ti}:\text{LiNbO}_3$  波导<sup>[7~9]</sup>, 有  $D_{ox} = 7.37 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$ ,  $T_{ox} = 1.72 \times 10^4 \text{K}$ ,  $D_{oy} = 3.78 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$ ,  $T_{oy} = 3.42 \times 10^4 \text{K}$ , 把以上数值以及  $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ ,  $\tau = 80 \text{nm}$ ,  $w_{y1} = 4 \mu\text{m}$ ,  $T = 1025 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t = 6 \text{h}^{[1]}$  代入(8)式, 则得

$$dx = 3.38 \mu\text{m}, \quad dy = 3.39 \mu\text{m}, \quad \Delta n_x = 9.4 \times 10^{-4} \quad (9)$$

这样, 满足上述扩散条件下就能实现 Z 切铌酸锂光波导在  $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$  时的最小光模场尺寸:  $w_x = w_y = 2 \mu\text{m}$ 。

## 4 优化计算结果

优化计算结果如表 1~3 所示, 每个表分别对应利用某外加场分量的每种电极结构, 在给定电极间距  $G$ , 可从表中获得一系列的优化设计参量的数值, 如  $W$ 、 $p$ , 以及归一化的重叠因子  $S$ , 之所以给出  $S$ , 是为了便于设计时选取较大的  $S$  值参考。此外, 图 3(a) 结构的  $W \rightarrow \infty$  应为优化值, 但此情形与图 1(a) 的优化结果相同, 因研究非对称双电极结构, 所以把  $W$  选作参变量。图 2(a), 以及图 2(b) 的右边光波导所需的  $W \rightarrow \infty$  也是优化结果, 但三电极结构的中心电极宽度不可能是无限大, 故选取常用的一组  $W$  值, 以供设计之需要。由于三电极结构需要两路光波导工作, 如图 2 所示, 通常都要求两光波导的调制处于推挽状态, 所以优化计算时要使两个光波导的电光重叠因子尽量相等。

Table 1. Parameters of optimal design for the structure shown in Fig. 1 (a) and Fig. 1 (b) respectively

$G$ ( $\mu\text{m}$ )	$p$ ( $\mu\text{m}$ )	$W$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_{\parallel}$	$G$ ( $\mu\text{m}$ )	$p$ ( $\mu\text{m}$ )	$W$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_{\perp}$
2	0.0	$\infty$	0.1140	2	3.4	4.8	0.0894
3	0.0	$\infty$	0.1078	3	3.7	4.8	0.0871
4	0.0	$\infty$	0.1001	4	4.0	4.2	0.0845
5	0.0	$\infty$	0.0920	5	4.5	4.2	0.0819
6	0.0	$\infty$	0.0839	6	4.8	4.0	0.0795
7	0.0	$\infty$	0.0765	7	5.3	4.0	0.0773
8	0.0	$\infty$	0.0697	8	5.8	4.0	0.0752
9	1.6	$\infty$	0.0642	9	6.3	3.8	0.0734
10	2.4	$\infty$	0.0597	10	6.8	3.8	0.0717

Table 2(a). Parameters of optimal design for the structure shown in Fig. 2 (a)

$G$ ( $\mu\text{m}$ )	$W/G = 1$		$W/G = 1.33$		$W/G = 2$		$W/G = 4$		$W/G = 6$		$W/G = 8$		$W/G = 10$	
	$P$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_{\parallel}$	$P$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_{\parallel}$	$P$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_{\parallel}$	$P$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_{\parallel}$	$P$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_{\parallel}$	$P$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_{\parallel}$	$P$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_{\parallel}$
2	2.6	0.0756	2.7	0.0838	3.2	0.0945	5.0	0.1067	7.0	0.1103	9.0	0.117	11.0	0.1125
4	4.0	0.0871	4.5	0.0909	5.8	0.0948	9.8	0.0983	14.0	0.0992	18.0	0.0995	22.0	0.0997
6	5.2	0.0790	6.2	0.807	8.2	0.0822	14.6	0.0834	20.6	0.0837	26.8	0.0838	32.8	0.0838
8	6.0	0.0701	7.3	0.0706	10.2	0.0709	18.4	0.0706	26.6	0.0704	34.6	0.0702	42.8	0.0701
10	7.0	0.0634	8.6	0.0634	12.0	0.0629	22.2	0.0618	32.2	0.0613	42.4	0.0609	52.4	0.0607
12	7.8	0.0584	9.8	0.0579	14.0	0.0571	26.0	0.0556	38.2	0.0549	50.2	0.0545	62.2	0.0543
14	8.8	0.0544	11.1	0.0537	16.0	0.0526	30.0	0.0509	44.0	0.0502	58.0	0.0498	72.0	0.0495
16	9.8	0.0512	12.4	0.0503	17.8	0.0491	34.0	0.0473	50.0	0.0462	66.0	0.0461	82.0	0.0458
18	10.8	0.0485	13.8	0.0475	19.8	0.0462	38.0	0.0443	56.0	0.0435	74.0	0.0431	92.0	0.0428
20	11.8	0.0461	15.1	0.0451	21.8	0.0437	42.0	0.0418	62.0	0.0410	82.0	0.0406	102.0	0.0403

Table 2(b). Parameters of optimal design for the structure shown in Fig. 2(b)

$G$ ( $\mu\text{m}$ )	$W/G = 1$				$W/G = 1.33$				$W/G = 2$				$W/G = 4$			
	$P_1$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_{1\perp}$	$P_2$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_{2\perp}$	$P_1$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_{1\perp}$	$P_2$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_{2\perp}$	$P_1$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_{1\perp}$	$P_2$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_{2\perp}$	$P_1$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_{1\perp}$	$P_2$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_{2\perp}$
2	5.8	0.0257	2.9	0.0260	5.9	0.0293	3.0	0.0303	6.6	0.0354	3.4	0.0354	8.4	0.0471	4.8	0.0452
4	8.0	0.0360	4.1	0.0344	8.7	0.0395	4.5	0.0402	9.8	0.0449	5.4	0.0464	13.8	0.0536	8.8	0.0532
6	10.6	0.0382	5.3	0.0370	11.6	0.0412	6.0	0.0403	13.6	0.0455	7.5	0.0463	19.6	0.0522	12.8	0.0529
8	13.6	0.0376	6.3	0.0376	14.9	0.0403	7.3	0.0398	17.6	0.0440	9.5	0.0442	25.6	0.0495	16.8	0.0495
10	16.6	0.0363	7.3	0.0358	18.3	0.0387	8.5	0.0390	21.6	0.0419	11.5	0.0413	31.6	0.0467	20.8	0.0460
12	19.6	0.0349	8.2	0.0349	21.6	0.0370	9.9	0.0365	25.6	0.0399	13.4	0.0399	37.6	0.0441	24.7	0.0442
14	22.6	0.0334	9.1	0.0340	24.9	0.0354	11.1	0.0365	29.6	0.0380	15.4	0.0374	43.6	0.0419	28.7	0.0415
16	25.6	0.0321	10.1	0.0321	28.2	0.0339	12.4	0.0334	33.6	0.0364	17.3	0.0365	49.6	0.0399	32.6	0.0403
18	28.6	0.0309	11.1	0.0304	31.6	0.0326	13.7	0.0328	37.6	0.0349	19.3	0.0346	55.6	0.0382	36.6	0.0382
20	31.6	0.0297	12.0	0.0299	34.9	0.0314	15.0	0.0312	41.6	0.0335	21.2	0.0340	61.6	0.0367	40.6	0.0365

$G$ ( $\mu\text{m}$ )	$W/G = 6$				$W/G = 8$				$W/G = 10$			
	$p_1$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_{1\perp}$	$p_2$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_{2\perp}$	$p_1$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_{1\perp}$	$p_2$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_{2\perp}$	$p_1$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_{1\perp}$	$p_2$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_{2\perp}$
2	10.2	0.0538	6.4	0.0530	12.2	0.0580	8.1	0.0589	14.2	0.0609	9.9	0.0622
4	17.8	0.0579	12.4	0.0586	21.8	0.0604	16.2	0.0602	25.8	0.0621	20.0	0.0626
6	25.6	0.0554	18.5	0.0549	31.6	0.0573	24.2	0.0578	37.6	0.0585	30.1	0.0580
8	33.6	0.0520	24.4	0.0526	41.6	0.0535	32.2	0.0536	49.6	0.0545	40.0	0.0550
10	41.6	0.0489	30.4	0.0489	51.6	0.0501	40.2	0.0498	61.0	0.0509	50.0	0.0511
12	49.6	0.0461	36.4	0.0456	61.6	0.0472	48.1	0.0475	73.6	0.0479	60.0	0.0477
14	57.6	0.0436	42.3	0.0439	71.6	0.0446	56.1	0.0447	86.6	0.0453	69.9	0.0457
16	65.6	0.0415	48.3	0.0415	81.6	0.0424	64.1	0.0423	97.6	0.0430	79.9	0.0432
18	73.6	0.0397	54.3	0.0394	91.6	0.0405	72.1	0.0402	109.0	0.0411	89.9	0.0411
20	81.6	0.0380	60.2	0.0384	101.6	0.0388	80.0	0.0391	121.6	0.0399	99.9	0.0392

Table 3. Parameters of optimal design for the structure shown in Fig. 3 (a) and Fig. 3 (b) respectively

$G$ ( $\mu\text{m}$ )	$p$ ( $\mu\text{m}$ )	$W = 10 G$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_{\perp}$	$G$ ( $\mu\text{m}$ )	$p$ ( $\mu\text{m}$ )	$W$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_{\perp}$
2	1.0	20	0.1133	2	4.2	4.2	0.1205
3	1.6	30	0.1074	3	4.8	3.6	0.1184
4	2.0	40	0.0999	4	5.8	3.6	0.1152
5	2.6	50	0.0919	5	6.6	3.4	0.1122
6	3.2	60	0.0839	6	7.6	3.2	0.1093
7	3.8	70	0.0765	7	8.6	3.2	0.1066
8	5.0	80	0.0699	8	9.6	3.2	0.1042
9	6.4	90	0.0646	9	10.6	3.2	0.1021
10	7.6	100	0.0603	10	11.6	3.2	0.1002

## 5 结 论

通过上述对各种电极结构的  $\text{Ti}:\text{LiNbO}_3$  电光波导调制器电极与波导优化设计的研究, 发现有下列规律:

1) 在各种结构中, 无论是利用  $E_x$  或  $E_y$ , 随着电极间距  $G$  的增大, 一般说来, 重叠积分因子均要减小, 减小速度缓慢, 说明  $G$  的增大对调制效率影响较弱, 这又给行波调制的阻抗设计增加了宽容性。

2) 对于三电极和对称双电极结构, 同一结构如利用外加场水平分量, 其电光重叠因子略大于利用垂直分量的情况; 但是, 非对称双电极结构则反之。

3) 由于表 1~3 的设计数据中, 电极间距从最小  $2 \mu\text{m}$  开始选取, 以后按每  $1 \mu\text{m}$  或  $2 \mu\text{m}$  增加设计数据直至  $10 \mu\text{m}$  或  $20 \mu\text{m}$  为止, 这对于实际器件的设计提供了一系列的可操作性的参量数据。

4) 本文关于优化设计电极与光波导的结果, 原则上也适用于高效光开关以及其它一些类似的集成光波导器件。

## 参 考 文 献

- [1] O. G. Ramer, Integrated optic electrooptic modulator electrode analysis. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1982, QE-18(3): 386~392
- [2] D. Marcuse, Optimal electrode design for integrated optics modulators. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1982, QE-18(3): 393~398
- [3] C. M. Kim, R. V. Ramaswamy, Overlap integral factors in integrated optic modulators and switches. *J. Lightwave Technol.*, 1989, 7(7): 1063~1070
- [4] P. G. Suchoski, R. V. Ramaswamy, Minimum-mode-size low-loss Ti:LiNbO<sub>3</sub> channel waveguides for efficient modulator operation. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1987, QE-23(10): 1673~1679
- [5] L. D. Hutcheson, *Integrated Optical Circuits and Components*, Marcel Dekker, INC., New York and Basel, 1987: 172~222
- [6] T. Tamir, (Ed.) *Guided-Wave Optoelectronics*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York, 1988: 146~150
- [7] S. K. Korotky, W. J. Minford, L. L. Buhl, Mode size and method for estimating the propagation constant of single mode Ti:LiNbO<sub>3</sub> strip waveguides. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1982, QE-18(10): 1796~1801
- [8] M. Fukuma, J. Noda, Optical properties of titanium-diffused LiNbO<sub>3</sub> strip waveguides and their coupling-to-a-fiber characteristics. *Appl. Opt.*, 1980, 19(4): 591~597
- [9] H. Naitoh, M. Nunoshita, T. Nakayama, Mode control of Ti-diffused LiNbO<sub>3</sub> slab optical waveguide. *Appl. Opt.*, 1977, 16(9): 2546~2549

## Optimal Electrode and Waveguide Design for High Efficiency Integrated Optic Modulators and Switches

Chen Fushen

(National Key Optic Fiber Laboratory, University of Electronic Science & Technology, Chengdu 610054)

(Received 11 January 1995)

**Abstract** Efficiency of an integrated optic modulator/switch depends on the overlap integral between the applied electric field and the optical mode. In this work, the field distribution of electrodes is analysed to determine the maximum overlap integral affected by the parameters of electrode width, interelectrode gap and optical mode size etc. The results of the optimal electrode and waveguide design for Ti:LiNbO<sub>3</sub> modulators/switches are presented by utilizing a systematic optimization of all the necessary parameters according to the available technology.

**Key words** optimal design, optical waveguide, electrode, integrated electro-optic modulation.