

文章编号: 0258-7025(2001)09-0817-04

波导光电器件的微波有效折射率——器件微波折射率

闻震利 金国良 孙毅 白玉强 宋媛
(上海交通大学应用物理系 上海 200240)

摘要 以波导光电调制器芯片结构为例,利用点匹配法计算调制器芯片的电场分布,从而计算调制器电极的微波有效折射率,由此提出了器件折射率的概念。进一步证明了当光电信号互相匹配时调制带宽可达 100 GHz。
关键词 点匹配法,波导光电调制器,器件微波折射率,位相 3 dB 带宽
中图分类号 TN 929.1 **文献标识码** A

Microwave Effective Refractive Index of Wave-guide Electrooptic Modulators ——Microwave Refractive Index of Device

WEN Zhen-li JIN Guo-liang SUN Yi BAI Yu-qiang SONG Yuan
(Department of Applied Physics, Jiaotong University, Shanghai 200240)

Abstract By using the point-match method, the microwave effective refractive index is calculated. The concept of microwave refractive index of device is proposed. Using this theory, 100 GHz modulation bandwidth can be achieved when optical and electric signals match each other.
Key words point-match method (PMM), wave-guide electrooptic modulator, microwave refractive index of device, 3 dB bandwidth of phase

1 引言

当今,信息通信对通信网络的带宽与处理速度要求越来越高,相应的光子通信逐步代替了电子通信,并且对光子器件的性能要求也越来越高。另外光子器件并不像微电子器件那样——以相对比较统一的半导体材料为衬底,光子器件的衬底材料多种多样,制作光波导用得比较多的有:LiNbO₃, Si 等半导体材料^[1],高分子有机材料^[2],以及正在研究的光子晶体,它们都有各自的优缺点。在诸多光子器件中,不少是以 LiNbO₃ 为衬底材料,这是因为它有很多优点:低损耗;高的电光、声光系数;稳定性好、寿命长;易成波导等。在微波与光波折射率的匹配方面,一直认为光波折射率与微波折射率不能很好地匹配而限制了它的高速光子器件的潜能,这是基于 LiNbO₃ 的微波折射率与光波折射率不匹配的原理^[3]。本文提出器件微波折射率的概念,证明完全

可以通过合理设计器件的结构来改变微波的有效折射率,使之与光波折射率匹配,从而构成高速电光相互作用器件。

2 电光调制器中的微波有效折射率——器件折射率

点匹配法最早由 D. Marcuse 提出^[4],但他仅考虑了缓冲层厚度,没有考虑电极厚度。继他之后,又

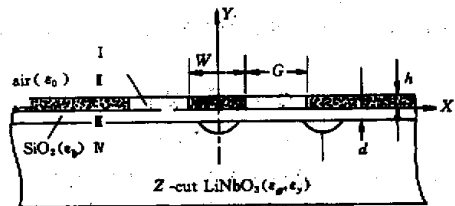


图1 电光调制器横截面结构

Fig. 1 Cross-section structure of electro-optic modulator

有人提出了考虑电极厚度的点匹配法^[5],考虑如图1所示波导电光调制器电极结构。

利用文献[5]中的方法,计算如图1所示Z切割的波导电光调制器电极的电场分布(见图2)。

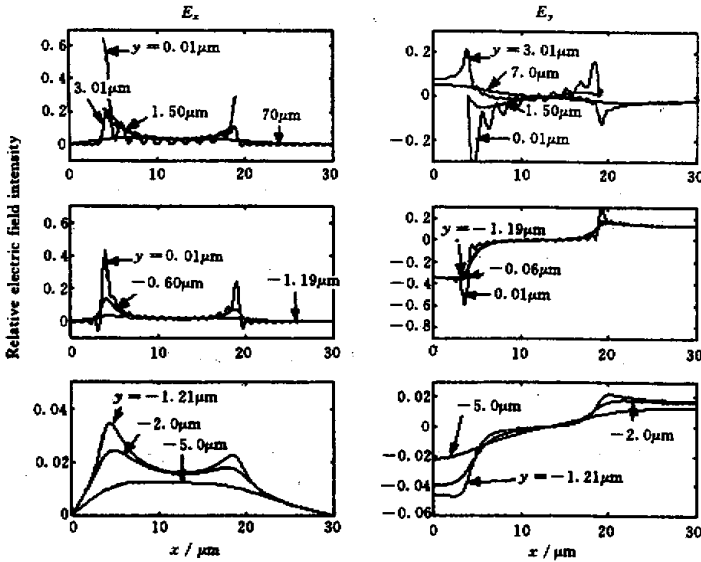


图2 电光调制器的电场相对分布

Fig.2 Electric field distribution of electro-optic modulator

调制器电极的特征阻抗 Z_c 以及在电极上传输的射频信号的微波有效折射率 n_{eff} 是电光器件设计中两个重要的参数。恰当地设计特征阻抗,可以使负载与信号源达到良好的匹配。而微波有效折射率与波导中的光波有效折射率的差别反映出电信号与光信号的速度匹配程度,它对调制器的调制带宽和调制制度都有很大的影响。

求解出电极的电势表达式后,就可以计算单位长度电极的电容。计算公式如下:

$$C = \frac{|Q|}{|\Delta V|} \quad (1)$$

这里, Q 为一个电极上的电荷,它可以通过下式计算

$$Q = \oint \vec{D} \cdot \vec{n} ds \quad (2)$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{e} \cdot \vec{E} \quad (3)$$

式(2)中的积分路径为 X-Y 平面内绕一个电极的封闭曲线。 \vec{n} 为指向积分路径外侧的单位矢量, \vec{D} 和 \vec{E} 分别为电场的电感应强度和电场强度, \vec{e} 则由式(3)给出的图1所示结构的介电常数。电容可以用

于计算电极的微波有效折射率。定义 C_0 为真空中单位长度电极的电容,它可以通过将 \vec{e} 定义为单位矩阵,再利用式(1)和(2)计算得到。这样,可以定义有效介电常数为

$$\epsilon_{eff} = \frac{C}{C_0} \quad (4)$$

有效折射率为 $n_{eff} = \sqrt{\frac{C}{C_0}}$ (5)

可以利用有效介电常数计算在行波电极上传播的电磁波的传播常数 β

$$\beta = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_{eff}} \quad (6)$$

其中, ω 为电磁波的角频率, c 为真空中的光速。

利用式(6),电极的特征阻抗可以用下式计算

$$Z_c = \frac{\beta}{\omega C} = \frac{\sqrt{\epsilon_{eff}}}{c C_0} = \frac{1}{c C_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}} = \frac{1}{c \sqrt{C \cdot C_0}} \quad (7)$$

图3是利用上述原理计算得到的曲线,微波在本文所讨论的电光调制器结构中的有效折射率随电极厚度(h)的减小,缓冲层厚度(d)的减小而变大。

为了增大调制器的带宽(行波电极),要求微波的有效折射率与波导中的光波的有效折射率相一致。Ti扩散LiNbO₃波导的有效折射率为2.15,这样,凡是实线与虚线的交点(如图中点1,2)都满足两折射率一致的条件。在这些交点上微波的有效折射率都为2.15,所以可以在这些交点上“任意”选择满足一定关系的缓冲层厚度与电极厚度。当然还要考虑其他因素,如阻抗匹配要接近50Ω,可按(7)式选择电极与缓冲层的厚度;还有工艺上增加电极的厚度并不是很容易,因此电极的厚度不是任意的;为了增大调制器的电光调制度,要求电场与光场的交叠积分尽量大,所以SiO₂缓冲层厚度不能太厚,但为了避免电极对导波的吸收,缓冲层又要足够厚,这样缓冲层厚度也不是任意的。如果综合考虑所有的这些因素,就能设计出比较合理的电光调制器结构,当然实验也是很重要的,只有用理论计算并用实验修正才能得到较好的数据。

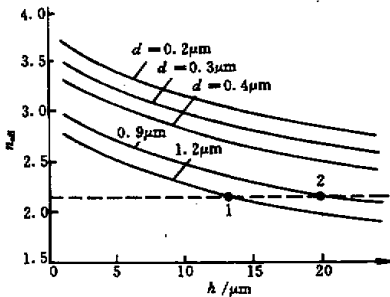


图3 微波有效折射率随电极厚度(h)及缓冲层厚度(d)的变化

Fig.3 Changes of microwave effective refractive index with electrode thickness (h) and buffer layer thickness (d)

由以上讨论可以看出微波在调制器中的有效折射率(或称器件微波折射率),是随缓冲层厚度与电极厚度的变化而变化的,还有其他次要因素如调制器外壳的结构。由此我们提出器件微波折射率的概念,器件微波折射率是器件结构的函数,并不是衬底材料的函数。它区别于材料的微波折射率,也就是说考虑微波在器件中传播的折射率时应全面考虑整个器件,这就是器件微波折射率。所以认为以LiNbO₃为衬底的器件不能达到与微波的很好的速度匹配是不确切的,因为完全可以通过设计器件的结构参数来改变微波的器件折射率从而使两者达到

很好的匹配,因此LiNbO₃电光调制器仍为高速器件中的佼佼者。

3 光电信号相互匹配时的调制器带宽

将电极结构考虑为微带传输线,在 z 位置处(以负载处为原点,方向与射频信号传播方向相反),电场在波导截面上产生电光作用,根据Pockel效应,产生的有效折射率变化量为^[6]

$$\Delta n[U(z)] = \pm \frac{1}{2} n^3 \gamma_{ij} \frac{|U(z)|}{G} \Gamma' \quad (8)$$

式中, G 为中间电极与地电极之间的距离, n 为波导有效折射率($n = 2.15$), Γ' 为电场和光场的交叉积分,利用文献[7]可得光场分布, γ_{ij} 为电光作用系数,在这里为 γ_{33} , $U(z)$ 为 z 位置处微带传输线的电压。当微波频率变化时,考虑微波在电极中的趋肤效应可知,电极的等效厚度相应发生变化,由此也就引起器件微波折射率 n_m 的变化。在(8)式中,由于 $U(z)$ 和 Γ' 的值都与器件微波折射率 n_m 直接相关,所以该式就反映了器件微波有效折射率与波导有效折射率的失配对调制特性的影响。也就是通过 dx 长度,光场产生的位相变化为

$$d\varphi = K \Delta n[U(z)] dx = \frac{\pi}{\lambda} n^3 \gamma_{33} \frac{\Gamma'}{G} U(z) dx \quad (9)$$

对(9)式积分,就得到当电极长度为 L 时,产生的位相差

$$\varphi = \int_0^L \frac{\pi}{\lambda} n^3 \gamma_{33} \frac{\Gamma'}{G} U(z) dx \quad (10)$$

当器件微波折射率与波导折射率相等时,射频信号

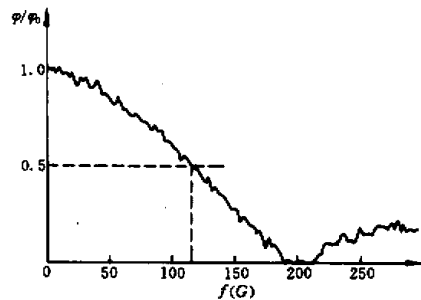


图4 当器件微波折射率与波导有效折射率匹配时调制器的3dB带宽

Fig.4 3dB bandwidth of electrooptic modulator with microwave refractive index of device matching wave-guide effective refractive index

与光信号速度匹配,但由前文的分析,此时电极的阻抗易与标准的负载电阻匹配,这就导致了电光调制器的 3 dB 带宽不能达到无穷大,若使 $n_{\text{eff}} = 2.15$,可取缓冲层厚度 $d = 0.9 \mu\text{m}$,电极厚度 $h = 20 \mu\text{m}$,则计算出的 3 dB 带宽如图 4 所示。

图 4 中, φ_0 为微波频率 $f = 0$ 时的相移, φ/φ_0 表示微波频率对固定长度电光调制器芯片相移的影响程度。由图 4 可知,若器件微波折射率与波导折射率较好地匹配,电光波导调制器的 3 dB 带宽可以达到 100 GHz 以上。

4 结 论

本文利用点匹配法计算了电光调制器的微波有效折射率,提出了器件微波折射率的概念,它区别于材料微波有效折射率。指出了电光调制器的器件折射率与器件结构的定量关系,以及在实际制作中应考虑的其他一些问题,对器件实际制作有一定的参考价值。完全可以通过合理设计器件的结构来改变微波的有效折射率,使之与波导折射率匹配,这说明 LiNbO_3 作为高速电光器件衬底材料的较强的生命力。并通过将电极作为微带线,考虑趋肤效应,证明了当器件微波折射率与波导折射率较好匹配时位相调制带宽可达 100 GHz。近年来日本已经有将调制

带宽提高到 150 GHz^[8] 的报道,这正是本文观点的有力证明。

参 考 文 献

- 1 Y. P. Li, C. H. Henry. Silica-based optical integrated circuits. *IEE Proc-Optoelectron.*, 1996, 143(5):263-280
- 2 Rainer Reuter, Hilmar Franke, Claudius Feger. Evaluating polyimides as lightguide materials. *Appl. Opt.*, 1988, 27(21):4565-4571
- 3 Chen Fuchen. The Theory and Technology of Integrated Electric-optical Modulation. First edition. Beijing: Defense Industry Press, 1995. 110-113 (in Chinese)
- 4 D. Marcuse. Electrostatic field of coplanar lines computed with point matching method. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, 25(5):939-947
- 5 Ninghua Zhu, Wei Qiu, Edwin Yue Bun Pun. Analysis of velocity-matched Ti:LiNbO₃ optical intensity modulators with an extended point-matching method. *Optical and Quantum Electronics*, 1996, 28(2):137-146
- 6 R. C. Alferness. Waveguide electrooptic modulators. *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.*, 1982, 30(8):1121-1137
- 7 N. H. Zhu, Y. K. Lin, Z. D. Wu *et al.* Analytical expression of the guided mode field distribution: analysis and comparison. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, 28(6):1424-1428
- 8 K. Noguchi, K. Kawano. Proposal for Ti:LiNbO₃ optical modulator with modulation bandwidth of more than 150 GHz. *Electron. Lett.*, 1992, 28(18):1759-1761