

文章编号: 0258-7025(2008)03-0410-04

# 新型衬底开槽结构的 LiNbO<sub>3</sub> 波导强度 调制器设计分析

李 密 于思源 马 晶 谭立英 王 强

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 提出了一种在 LiNbO<sub>3</sub> 衬底背面沿垂直光传播方向的开槽结构的波导调制器, 不仅可以通过开槽的方式替代通常 LiNbO<sub>3</sub> 基片和电极之间的 SiO<sub>2</sub> 缓冲层, 起到减小驱动电压和抑制直流(DC)漂移的作用, 而且由于其开槽部分和未开槽部分的截面图都比较规则, 开槽部分又符合部分电容法的应用条件, 在设计中可以避开有限元法(FEM)而采用施瓦兹-克里斯托弗耳(SC)变换进行计算。数值计算结果表明, 在电极长度为 40 mm 的 LiNbO<sub>3</sub> 衬底上, 开槽时选取开槽处的厚度为 15 μm, 开槽宽度为 38.5 mm, 调制器调制带宽可以达到 40.00 GHz, 阻抗为 63.10 Ω。说明这种结构在没有 SiO<sub>2</sub> 缓冲层的情况下同样能够实现光波和微波的速度匹配, 对于调制器的制作设计更加便利和精确。

**关键词** 光通信; 波导调制器; 保角变换; 速度匹配; 开槽结构

**中图分类号** TN 919.11 **文献标识码** A

## Research on the Design of LiNbO<sub>3</sub> Waveguide Intensity Modulator with a New Back Slot Structure

Li Mi Yu Siyuan Ma Jing Tan Liying Wang Qiang

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** A LiNbO<sub>3</sub> waveguide intensity modulator with a new back slot structure is proposed. The direction of the back slot is vertical to the beam propagation. The back slot structure can achieve low drive power and suppress the direct current (DC)-drift voltage. In addition, because both the cross section of the back slot part and the other are relatively regular, and the structure of back slot part satisfies the condition of the partial capacitances method, the Schwartz-Christoffel (SC) conform mapping can be used to design the modulator instead of the finite element method (FEM). The calculation shows that when the thickness of the back slot part is 15 μm and the width is 38.5 mm in the LiNbO<sub>3</sub> with 40 mm electrode, 40.00 GHz modulation bandwidth can be achieved and the impedance is 63.10 Ω. It is clear that this structure can also satisfy the velocity-matching condition without the buffer layer of silicon dioxide (SiO<sub>2</sub>). So this type of back slot structure is proved to be more convenient and feasible for the design of waveguide modulator.

**Key words** optical communication; waveguide modulator; mapping transform; velocity matching; back slot structure

### 1 引 言

随着 40 Gbit/s 光通信技术的发展<sup>[1,2]</sup>, 能够同时提供大带宽和低啁啾的 LiNbO<sub>3</sub> 波导外调制器将最有希望超过其他各种调制器, 成为未来光通信中的首选技术<sup>[3]</sup>。LiNbO<sub>3</sub> 波导外调制器本身具有低啁啾的特性, 但是要实现高的数据率和低的驱动功

率, 必须降低微波的等效折射率, 使微波与光波的传播速度尽量匹配, 如电极周期反转结构<sup>[4]</sup>和脊型电极结构<sup>[5,6]</sup>等, 但是为了达到最终的速度匹配, 电极与衬底之间通常都会加一层 SiO<sub>2</sub> 缓冲层。但是随着 40 Gbit/s 系统对调制器要求的进一步提高, 研究发现, 缓冲层产生的直流(DC)漂移<sup>[7~9]</sup>会增加

收稿日期: 2007-08-16; 收到修改稿日期: 2007-11-01

基金项目: 哈尔滨工业大学优秀团队支持计划资助项目。

作者简介: 李 密(1980—), 男, 四川人, 博士研究生, 主要从事卫星光通信方面的研究。E-mail: limihit2008@126.com

导师简介: 马 晶(1956—), 男, 辽宁人, 教授, 博士生导师, 主要从事卫星光通信方面的研究。E-mail: majing@hit.edu.cn

40 Gbit/s系统中的成本和功耗。为了克服缓冲层带来的问题,而又达到速度匹配,Kenji Aoki 等提出了一阶开槽结构<sup>[10]</sup>和二阶开槽结构<sup>[11]</sup>,但是由于其开槽截面的复杂性,只能用有限元法(FEM)做近似的分析。本文提出在纵向进行开槽,可以在达到同样的效果下同时又可以运用施瓦兹-克里斯托弗耳(SC)变换做精确的计算分析和设计。

## 2 开槽结构的分析

一阶开槽结构和二阶开槽结构截面图如图 1 所示,其中  $\epsilon_0$  为空气介电常数,  $\epsilon_L$  为 LiNbO<sub>3</sub> 晶体相对介电常数。通过这种结构,微波不仅可以从共面电极上泄漏出去,还可以有效地从开槽中泄漏到空气中,可以实现在没有缓冲层下达到速度匹配的目的。一般由缓冲层引起的直流漂移情况要用额外的光电二极管和监控电路进行控制,而这种结构在 40 Gbit/s 传输系统中将大大提高器件的成本和降

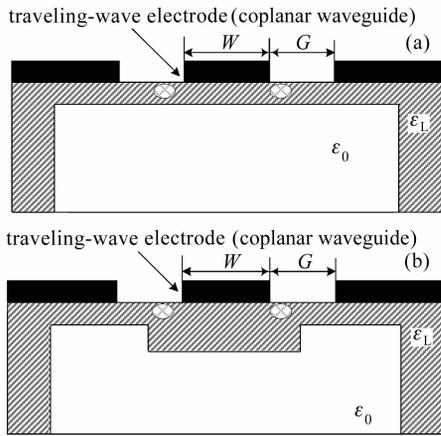


图 1 LiNbO<sub>3</sub> 衬底背面一阶(a)和二阶(b)开槽截面图  
Fig. 1 Cross section of the LiNbO<sub>3</sub> with one-step (a) and two-step (b) back-slot structure

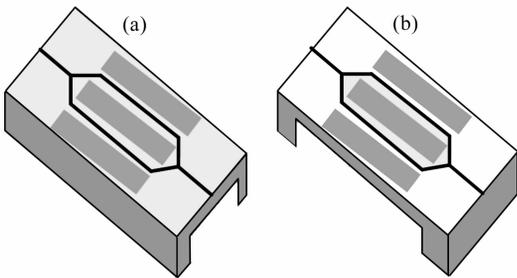


图 2 两种 LiNbO<sub>3</sub> 衬底背面一阶开槽方式的结构图  
(a) 沿光传播方向开槽; (b) 沿垂直光传播方向开槽  
Fig. 2 Two chamfer directions of the LiNbO<sub>3</sub> with one-step back-slot structure. (a) parallel to the of beam propagation; (b) vertical to the of beam propagation

低其稳定性。

该方法沿着光波传播方向在 LiNbO<sub>3</sub> 衬底上开的槽如图 2(a)所示,虽然采用施瓦兹-克里斯托弗耳进行计算时可以快捷地得到比较准确的调制器特性参数,但是如果不是在一些特定结构下进行计算,解其中的超椭圆积分方程会比较复杂。如果不是沿着光波传播方向而是在侧面进行开槽,如图 2(b)的结构,它在整个基片上的截面图将分解成两个比较典型的特殊截面。在槽的两边是以 LiNbO<sub>3</sub> 为整个衬底,而中间开槽的部分为有限厚度薄层的 LiNbO<sub>3</sub> 为整个衬底。

这种开槽的截面图如图 3 所示,对于槽两边的端面截面相当于无限衬底的情况,而开槽部分相当于有限厚度衬底的情况,这两种截面图都可以采用施瓦兹-克里斯托弗耳变换比较快捷地进行计算分析。

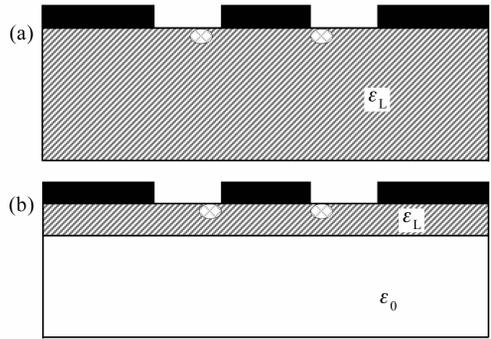


图 3 沿垂直光传播方向一阶开槽的截面图  
(a) 两端部分截面图; (b) 开槽部分截面图

Fig. 3 Cross section of the one-step back-slot structure for vertical to the of beam propagation. (a) cross section of the end; (b) cross section of the back slot

## 3 调制器电极的设计及数值计算

假设电极制作比较薄,可以将其认为是 0 厚度电极进行计算,如图 4 所示。通过施瓦兹-克里斯托弗耳变换,使(a)的共面电极结构变换成(b)的平行平板结构。

当空气填充时,下半平面单位长度电容为

$$C_{00} = 2\epsilon_0 \frac{K(k_1)}{K(k_1')}, \quad (1)$$

其中  $k_1 = b/a, k_1' = (1 - k_1^2)^{1/2}, b$  为中间电极半宽,  $a$  为中间电极半宽与电极间距之和。

空气填充时,整个平面电容是上半平面和下半平面之和

$$C_0 = 2C_{00} = 4\epsilon_0 \frac{K(k_1)}{K(k_1')}, \quad (2)$$

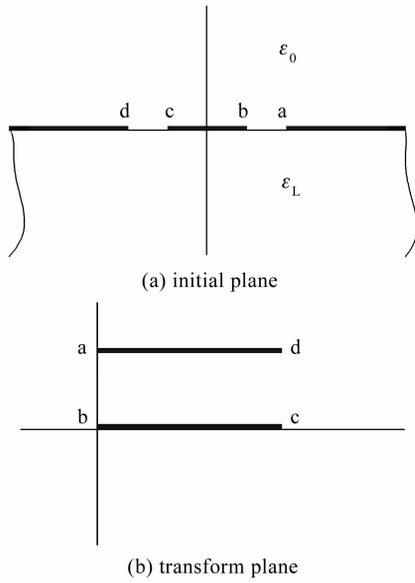


图 4 0 厚度电极在下半平面自由空间的变换

Fig. 4 Transformation of the electrode without thickness in free space of the bottom half plane

同理,对于槽两端部分的结构,和上面的区别就是下半平面是用 LiNbO<sub>3</sub> 填充的, LiNbO<sub>3</sub> 的相对介电常数变为  $\epsilon_L = (\epsilon_{11}\epsilon_{33})^{1/2}$ 。

当 LiNbO<sub>3</sub> 为衬底,以无限厚度衬底假设,下半平面单位长度电容为

$$C_L = 2\epsilon_L \frac{K(k_1)}{K(k'_1)}, \quad (3)$$

所以端面的总的单位长度电容为

$$C_{L1} = 2\epsilon_L \frac{K(k_1)}{K(k'_1)} + 2\epsilon_0 \frac{K(k_1)}{K(k'_1)}. \quad (4)$$

对于开槽部分,由于它是以有限厚度的 LiNbO<sub>3</sub> 基片为衬底,所以计算电容时,在施瓦兹-克里斯托弗耳变换过程中,先把其变换到无限下半平面,再变换到平行平板电极结构。

根据平板电容器定义计算下半平面单位长度电容为

$$C_b = 2\epsilon_L \epsilon_0 \frac{K(k_2)}{K(k'_2)}, \quad (5)$$

其中  $k_2 = \sinh\left(\frac{\pi a}{2T_b}\right) / \sinh\left(\frac{\pi b}{2T_b}\right)$ ,  $k'_2 = (1 - k_2^2)^{1/2}$ 。

假设 LiNbO<sub>3</sub> 晶体是各向同性的,  $\epsilon_L = (\epsilon_{11}\epsilon_{33})^{1/2}$  是它的等效相对介电常数,  $T_b$  为开槽处 LiNbO<sub>3</sub> 衬底的厚度。

开槽部分单位长度电容为

$$C_{L2} = 2\epsilon_L \epsilon_0 \frac{K(k_2)}{K(k'_2)} + 2\epsilon_0 \frac{K(k_2)}{K(k'_2)}. \quad (6)$$

由于沿着光传播方向的单位长度电容不再是一个固定的值,所以不能再用单位长度电容来计算各

个调制器的特性参数,必须求出整个电容来进行计算

$$C_{Lz} = C_{L1} \times l_1 + C_{L2} \times l_2, \quad (7)$$

式中  $l_2$  为开槽的长度,  $l_1$  为两端没开槽的总长度。

电极上下都是空气时的总电容为

$$C_{0z} = C_0 \times (l_1 + l_2), \quad (8)$$

特征阻抗  $Z_c$  和等效折射率  $N_{\text{eff}}$  可由所求出的电容表示为

$$Z_c = \frac{1}{c \sqrt{C_{Lz} C_{0z}}}, \quad (9)$$

$$N_{\text{eff}} = \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}} = \sqrt{\frac{C_{Lz}}{C_{0z}}}, \quad (10)$$

$$\text{调制器带宽 } \Delta f = \frac{1.4c}{\pi L(N_{\text{eff}} - N_0)}, \quad (11)$$

其中  $c$  为光速,  $\epsilon_{\text{eff}}$  为 LiNbO<sub>3</sub> 等效介电常数,  $N_0$  为

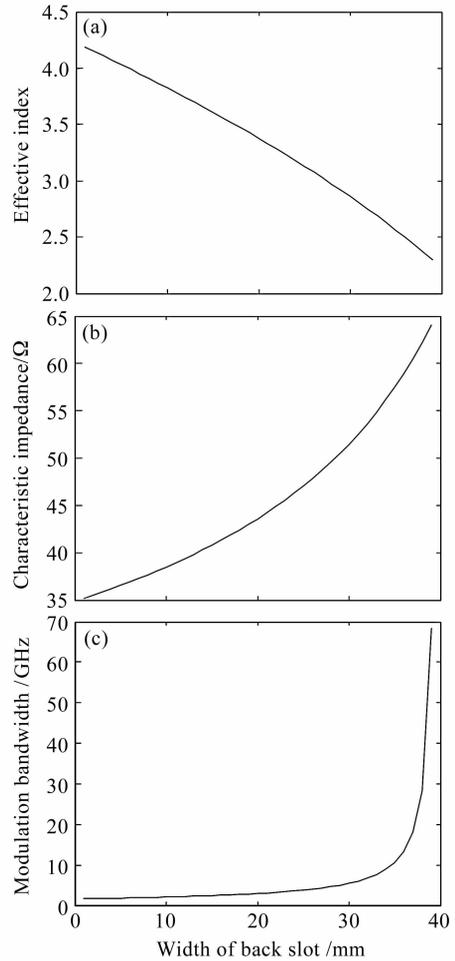


图 5 调制器参数随开槽宽度的变化。(a) 等效折射率变化; (b) 特征阻抗变化; (c) 调制带宽变化

Fig. 5 Relation between the characteristic value of modulator and width of back slot. (a) effective index; (b) characteristic impedance; (c) modulation bandwidth

对于工作波长 LiNbO<sub>3</sub> 晶体寻常光的折射率,  $L = l_1 + l_2$ 。当选取调制器中间电极宽度为 20  $\mu\text{m}$ , 电极间距为 20  $\mu\text{m}$ , 电极长度为 40 mm, 开槽后开槽处 LiNbO<sub>3</sub> 衬底的厚度为 15  $\mu\text{m}$  时, 调制器的特征阻抗、有效折射率和调制带宽随开槽宽度的变化如图 5 所示。

从图 5 的计算结果可知, 当开槽宽度为 38.5 mm 时, 阻抗为 63.10  $\Omega$ , 带宽为 40.00 GHz, 在此种情况时, 速度匹配比较理想, 达到了大调制带宽的目的。从沿着光波传播方向一阶开槽的实际器件来看, 电极间距取 30  $\mu\text{m}$ , 电极厚度为 20  $\mu\text{m}$ , 开槽部分厚度为 8.2  $\mu\text{m}$ , 当中间电极宽度为 30  $\mu\text{m}$  和 70  $\mu\text{m}$  时, 阻抗为 46  $\Omega$  和 41  $\Omega$ , 其中中间电极宽度为 70  $\mu\text{m}$  时, 调制带宽测试结果为 35 GHz<sup>[10]</sup>。可见本文设计的阻抗为 63.10  $\Omega$  是可以通过整体优化电极的间距、宽度以及厚度来使其阻抗更加接近 50  $\Omega$ , 达到最佳的速度匹配。

## 4 结 论

采用沿垂直光传播方向开槽的方式, 可以在设计中避免沿光传播方向开槽时, 波导调制器截面特性计算的复杂性, 从而采用更为快捷和准确的施瓦兹-克里斯托弗耳变换替代有限元法进行设计计算。通过施瓦兹-克里斯托弗耳变换结合部分电容法, 给出了这种开槽结构的调制器的电容计算公式, 并在电极长度为 40 mm, 中间电极宽度为 20  $\mu\text{m}$ , 电极间距为 20  $\mu\text{m}$  的 LiNbO<sub>3</sub> 衬底上, 开槽时选取开槽处的厚度为 15  $\mu\text{m}$ , 开槽宽度为 38.5 mm 时, 进行了数值计算。结果表明, 调制器的调制带宽可以达到 40.00 GHz, 阻抗为 63.10  $\Omega$ 。虽然此种开槽结构阻抗稍大于 50  $\Omega$ , 但是可通过进一步优化电极的设计来解决。该开槽结构可以在没有传统 SiO<sub>2</sub> 缓冲层的情况下, 实现光波和微波的速度匹配, 达到大带宽调制的作用, 大大减小功耗和抑制直流漂移现象, 在

新一代 40 Gbit/s 光网络中将使 LiNbO<sub>3</sub> 波导调制器更加具有竞争优势。

## 参 考 文 献

- 1 Zhang Qi, Chen Minghua, Shi Ying *et al.*. Demonstration of 1.6 Tbit/s (40 × 40 Gbit/s) wavelength division multiplexing 160 km straight line transmission experiments [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9):1230~1233  
张 琦, 陈明华, 石 颖 等. 1.6 Tbit/s(40×40 Gbit/s) 光通信传输系统[J]. 中国激光, 2006, **33**(9):1230~1233
- 2 Chen Xin, Wu Keying, Ma Xiaohong *et al.*. Signal shaping based on phase pre-modulation in fiber transmission systems [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1):72~75  
陈 新, 吴克瑛, 马晓红 等. 光纤传输系统中基于相位预调制的信号整形[J]. 中国激光, 2007, **34**(1):72~75
- 3 Yukou Mochida, Nobuhide Yamaguchi, Gworge Ishikawa. Technology-oriented review and vision of 40-Gb/s-based optical transport networks [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(12):2272~2281
- 4 Moshe Nazarathy, David W. Dolfi, Roger J. Jungerman. Spread spectrum frequency response of coded phase reversal traveling wave modulators [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1987, **5**(10):1433~1443
- 5 Osamu Mitomi, Kazuto Noguchi, Hiroshi Miyazawa. Design of ultra-broad-band LiNbO<sub>3</sub> optical modulators with ridge structure [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Technology*, 1995, **43**(9):2203~2207
- 6 Chen Fushen, Li Qicong. Integrated electrooptic M-Z modulator with ridge structure in X-cut LiNbO<sub>3</sub> [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(3):209~212  
陈福深, 李其聪. X 切 LiNbO<sub>3</sub> 脊形结构集成电光 M-Z 型调制器[J]. 中国激光, 2002, **A29**(3):209~212
- 7 Hirotohi Nagata, Yagang Li, Ian Croston *et al.*. DC drift activation energy of LiNbO<sub>3</sub> optical modulators based on thousands of hours of active accelerated aging tests [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(8):1076~1078
- 8 Hirotohi Nagata, Gilbert D. Feke, Yagang Li *et al.*. DC drift of Z-cut LiNbO<sub>3</sub> modulators [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(7):1655~1657
- 9 Hirotohi Nagata, Yagang Li, Walter R. Bosenberg *et al.*. DC drift of X-cut LiNbO<sub>3</sub> modulators [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(10):2233~2235
- 10 Kenji Aoki, Jungo Kondo, Atsuo Kondo *et al.*. High-performance optical modulator with a wide center electrode and thin x-cut LiNbO<sub>3</sub> substrate [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(12):2610~2612
- 11 Jungo Kondo, Atsuo Kondo, Kenji Aoki *et al.*. 40-Gbs X-cut LiNbO<sub>3</sub> optical modulator with two-step back-slot structure [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(12):2110~2114