

脊波导结构 LiNbO₃ 电光调制器研究与改进^{*}甘庆云², 高致慧¹, 万俊康²

1. 深圳大学师范学院, 深圳 518060;
2. 深圳大学工程技术学院, 深圳 518060

摘要: 采用有限元软件 Ansys, 运用有限元法, 对脊波导结构铌酸锂电光调制器进行了优化设计。通过将传统结构与脊波导的比较分析, 提出采用聚四氟乙烯部分取代缓冲层中的二氧化硅的结构, 能更好的实现微波等效折射率的降低以达到与光波折射率的匹配, 同时能保持更大的特性阻抗以实现阻抗匹配, 从而更好的提高器件性能。

关键词: LiNbO₃ 电光调制器; 有限元法; 宽带光调制

中图分类号: TN761

文献标识码: A

文章编号: 0253-2743(2005)05-0035-03

Investigation and improvement of LiNbO₃ electro-optic modulator with ridge structureGAN Qing-yun², GAO Zhi-hui¹, WAN Jun-kang²

1. Normal College, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;
2. College of Engineering and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China

Abstract: The analysis of LiNbO₃ electro-optic modulator with ridge structure is given in this paper by using the finite-element method. By compared with the conventional structure, we bring up a new structure which use polytetrafluoroethylene to take the place of the SiO₂ partially in the buffer layer, which can reduce the effective index easily and greatly increase the characteristic impedance to match the requirement, so it can enhance the capability greatly.

Key words: LiNbO₃ electro-optic modulator; finite-element method; broadband optical modulation

1 引言

随着光通信技术的发展, 光电器件越来越趋向于向宽带、低成本、小型化集成器件方向发展, 其中波导型电光调制器是必不可少的关键器件。相对于其他类型调制器而言, LiNbO₃ M-Z 型电光调制器由于其具有频带宽、稳定性好、可以获得较高的信噪比, 且光传输损耗小、电光系数高、易于和光纤兼容、制作工艺难度小等优点, 因此成为当前调制器市场的主流。

调制器的设计应考虑四个方面^[1]: 微波和光波的相位速度匹配、低微波电极损耗、低半波电压和与驱动源特性阻抗匹配。行波调制器的主要参数调制带宽直接受限于光波与微波的速度失配, 这源于 LiNbO₃ 的介电系数太高, 导致调制器的微波等效折射率远大于光波的折射率, 因此要获得较大的调制带宽, 首先要实现微波与光波的相速匹配。在对调制器不断的研究改进中, 许多优化结构被不断提出, 主要有: 埋入式电极^[2]、T 型电极^[3]、脊波导结构^[4]、LiNbO₃ 薄膜取代 LiNbO₃ 体材料^[5]等, 调制器的性能也得到很大的改善。

同时, 由于结构的改进, 早先的保角变换法、镜像法已不能准确的分析厚缓冲层结构, 一些新的分析方法也应运而生, 如线元法、有限差分法^[6]、点匹配法^[7]等, 使得 LiNbO₃ 电光调制器理论更趋成熟。相对于其他分析方法而言, 有限元分析法精度较高, 可以分析复杂结构模型, 只是前期数据处理繁琐, 计算量较大, 而采用有限元软件 Ansys 进行分析, 则避免了很多数据处理的麻烦, 不失为一种易学易行的方法。本文利用其对脊波导结构与普通结构进行了比较分析, 并对脊波导结构进行了新的改进, 得到能更好的改善调制器性能

的模型。

2 基本理论与模型分析

限制行波型电光调制器带宽的主要因素是相速匹配和电极损耗。已知其带宽长度乘积^[8]:

$$f \cdot L = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{c}{N_m - n_e} \quad (1)$$

N_m 为调制器件中微波信号传播的等效折射率, n_e 为器件中光信号传输的等效折射率 (光波长 1.55 μm 时 $n_e = 2.14$)。可见, 调制器的带宽直接取决于微波与光波的速度失配问题。因此, 在设计中应尽量减小 $N_m - n_e$, 以提高调制器带宽。

在相速匹配 ($n_e = N_m$) 的情况下, 调制器的带宽满足:

$$\alpha_0 \sqrt{f_{3dB} L} = 13.8 \text{ (dB)} \quad (2)$$

式中为 α_0 调制器的损耗系数, 可由增量电感公式导出。

在行波调制器中, 认为传输的电磁波为准 TEM 波, 根据 TEM 波传输线分布参数理论:

$$N_m = \sqrt{\frac{C}{C_0}} \quad (3)$$

式中 C , C_0 分别为调制器的单位长度电极的分布电容和空气填充时的单位电极长度的分布电容。如下图 1(a) 所示, 电极分布电容 C 可以分解为^[9]: $C = C_c + C_s$, 其中 C_c , C_s 分别表示中心电极对地电极上下表面的电容, 在空气填充时结构上下对称, $C_c = C_s$ 。

调制器特性阻抗也和分布电容有如下关系:

$$Z_c = \frac{N_m}{C \cdot c} = \frac{1}{c \sqrt{C \cdot C_0}} \quad (4)$$

式中, c 为光速。

调制器的驱动电压, 一般用最小直流半波电压表示:

$$V_{\pi} = \frac{G \cdot \lambda}{2 n^3 \gamma_{33} \cdot \Gamma \cdot L}; \quad (5)$$

收稿日期: 2005-03-08

基金项目: 深圳市科技计划项目资助。

作者简介: 甘庆云 (1978-), 男, 湖北人, 2002 年毕业于南开大学。

式中 N 为数字因子 $N = 1.5$, G 为电极间隙宽度; λ 为自由空间中的光波长; n 为 LiNbO_3 光波导的等效折射率; $\gamma_{33} = 30.8 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ 为 LiNbO_3 晶体的电光系数; Γ 为电场和光场之间重叠程度的系数, 称为电光重叠积分; L 为电极长度。

综上所述, 调制器主要特性参量都归结到求解实际电极的分布电容 C 和相应尺寸电极在空气填充时的电容 C_0 。用有限元软件 Ansys 来计算处理, 可以容易并准确的求解 C 、 C_0 的值。

从上面的分析可知, 要较好的优化调制器的各特性参量, 首先必须满足相速匹配的问题。为此, 我们考虑到采用厚的脊波导层结构, 脊波导部分采用相对介电常数较小的材料部分的取代折射率大得多的铌酸锂晶体, 以期减小微波等效折射率。但是, 鉴于目前国内加工工艺难以做到厚的二氧化硅层, 故提出采用两种材料相结合的方法, 以实现厚脊波导结构; 同时, 提出采用折射率更小的聚四氟乙烯来填充脊波导部分, 以更好的实现折射率匹配。最后设计模型如图 1 (b) 所示。图中电极材料为金属 Au, 缓冲层材料为 SiO_2 , 脊波导层材料为聚四氟乙烯, 衬底材料为 LiNbO_3 。 W_g 为两边地电极宽; G 为电极间隙; W_L 为中心电极宽; T_L 为电极厚度; T_h 为缓冲层厚度; T_b 为脊波导厚度; H 为基片厚度。

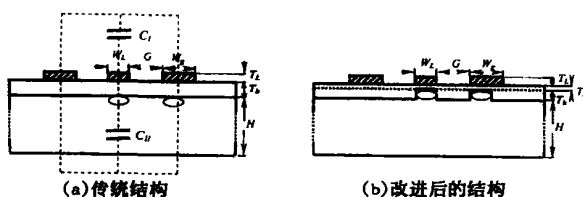


图 1 电光调制器横截面示意图

本文是在已有的分析理论和其他参考文献的基础上进行, 中心电极宽 $W_L = 10 \mu\text{m}$, LiNbO_3 衬底的厚度我们取为 $H = 200 \mu\text{m}$ ^[10]。我们采用 Ansys 计算了一下此参数对器件影响, 结果和已有理论吻合。

计算中, 取 SiO_2 的相对介电常数为 3.78, 聚四氟乙烯的相对介电常数为 2.3, Z 一切 LiNbO_3 基片的相对介电常数在垂直基片表面方向为 28, 平行基片表面方向为 43, 工作波长取为 $1.55 \mu\text{m}$, 电光重叠积分为 0.36。

3 计算分析及数据优化

下面根据目前的加工尺寸, 对本器件进行优化, 分为波导层优化和电极优化两部分来进行。

3.1 脊波导结构的分析、设计

图 2 给出了传统结构与改进结构调制器各参量与缓冲层厚度 T_h 的关系曲线。其中, 地电极宽度 $W_g = 15 \mu\text{m}$, 电极间隙 $G = 15 \mu\text{m}$, 下电极厚度 $T_L = 5 \mu\text{m}$; 改进结构中的脊波导层厚度 T_b 取为 $3 \mu\text{m}$ 。

图中空心圆为传统结构数据, 实心圆为采用脊波导结构后的数据, 可以清楚的看到, 采用脊波导结构后的微波等效折射率要明显低于传统结构的数据, 更容易实现折射率的匹配; 特征阻抗也比传统结构要大一些, 这对于保持较大的特征阻抗以实现与信号源特征阻抗 50Ω 匹配是必不可少的。

产生这种情况的原因是因为聚四氟乙烯的相对介电常数要比 LiNbO_3 的相对介电常数要小得多, 能大大减小电极之间的电容 C 值。同时, 由于小的脊波导厚度更容易制作, 因此采用这种结构有很大的优势。同时, 可以看到, 随着缓冲层厚度 T_h 的增加, N_m 逐渐减小, Z_c 逐渐增大, 说明厚的脊波导对调制器的性能有很好的改善, 更充分显示出脊波导结构在降低等效折射率上的优势。

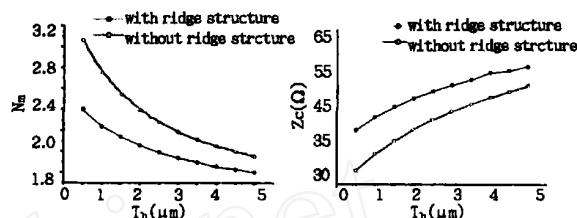


图 2 $W_g = 15 \mu\text{m}$, $T_L = 5 \mu\text{m}$, $T_b = 3 \mu\text{m}$, $G = 15 \mu\text{m}$ 时, N_m 、 Z_c 与缓冲层厚度 T_h 的关系曲线

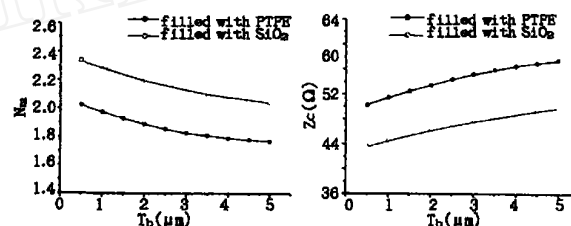


图 3 $W_g = 15 \mu\text{m}$, $T_L = 5 \mu\text{m}$, $G = 15 \mu\text{m}$, 脊波导层与缓冲层同种材料时, N_m 、 Z_c 与 T_b 的关系曲线

采用单一材料 SiO_2 (相对介电常数 3.78) 或 PTEF (相对介电常数 2.3) 对缓冲层以及脊波导层进行填充, 缓冲层厚度均为 $2 \mu\text{m}$, 脊波导层的厚度变化 (图中横坐标), 得到 N_m 、 Z_c 与 T_b 的关系如图 3 所示。两幅图中的黑色实心圆表示缓冲层、脊波导层均为 PTEF 填充时的 N_m 和 Z_c 曲线, 空心圆则为 SiO_2 填充时的数据。从图中可以看到, 采用相对介电常数较低的 PTEF 填充有利于 N_m 的进一步下降, 能更好的实现微波等效折射率的降低以达到与光波折射率的匹配, 同时能保持更大的特性阻抗。更重要的是, 制作厚的聚四氟乙烯层比同样的 SiO_2 层容易得多。因此, 采用聚四氟乙烯来作为脊波导层材料将会有不少优势, 唯一的缺点是聚四氟乙烯比较软, 实际制作中不可能将缓冲层悬空在脊波导之上, 所以在制作过程中, 仍需要一定厚度的 SiO_2 层, 因此, 鉴于目前的加工工艺和分析结构, 应在相速匹配的情况下, SiO_2 层的厚度尽量减至最小。

3.2 电极的优化

前面的分析给出了调制器特征参数 N_m 和 Z_c 和与脊波导结构的关系曲线, 可以看到, 通过对器件的结构改进, 上述设计基本上可以满足相速匹配和特征阻抗匹配的需要, 较之传统结构有很好的改善。以下的优化设计主要针对电极结构来进行, 以做进一步的完善, 同时优化调制器的半波驱动电压和微波电极损耗。

图 4 给出了在传统结构下, 不同 W_g 值下, T_L 对调制器的特性参数的影响。可以看到随着 T_L 的增大, 即厚的电极有利于 N_m 的降低, 同时 Z_c 值逐渐减小, 即厚的电极尺寸对调

制器参数有较好的影响。故应对电极厚度取较大值,根据目前的加工工艺,一般电极厚度能做到 $5\mu\text{m}$ 。另外,对于同 - T_L 下,随着 W_g 的增加, N_m 也随之增大,同时 Z_c 值逐渐减小。从速率匹配上来说,需要较小的 W_g 值,然对于特征阻抗匹配,则需要较大的 W_g 值,因此,对于 W_g 的取值,应根据实际情况来判断。

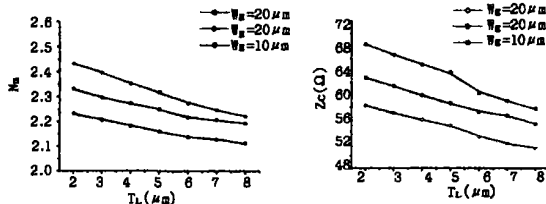


图4 $T_h=4\mu\text{m}$, $G=30\mu\text{m}$ 时,不同 W_g 下, N_m 、 Z_c 与电极厚度 T_L 的关系曲线

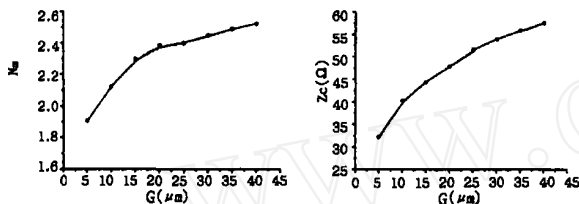


图5 $W_g=15\mu\text{m}$, $T_L=5\mu\text{m}$, $T_h=1\mu\text{m}$, $T_b=3\mu\text{m}$ 时, N_m 、 Z_c 与 G 的关系曲线

图 5 所示的曲线给出了 N_m 、 Z_c 与 G 的关系。由曲线可见, G 值对器件的性能影响相当明显,其他参数不变的情况下,当 G 增大时,调制器的微波等效折射率急剧上升,同时特征阻抗也快速增长。这是由于电极相距间的距离直接影响到周围的电场分布所致。同时,调制器的半波电压也与 G 值直接相关,对于调制器的微波损耗系数,通过增量电感公式分析,也与 G 值直接相关。所以,设计中要根据自己的需要,充分的考虑 G 值的影响。

表 1 对应不同的 G 值下,给出的优化结果

G (μm)	T_h (μm)	T_b (μm)	W_g (μm)	N_m	Z_c (Ω)	$V_{\pi L}$ (V·cm)	α_0 (dB/($\text{cm} \cdot \text{GHz}^{1/2}$))
10	0.5	4	10	2.14	41.4	7.132	0.564
15	1.0	4	12	2.14	48.5	10.70	0.445
20	1.0	5	10	2.15	55.4	14.26	0.380
25	1.5	5	12	2.13	59.4	17.83	0.328

通过对各参数的分析,可以根据自己的需要很好的优化各参数。我们最后优化列出几组结构作为参考,如表 1 所示。上表给出了几组满足折射率匹配下的优化结构,可以根据自己的需要进行设计。例如,取 $G=15\mu\text{m}$ 时,对应其他参数为 $T_h=1.0\mu\text{m}$, $T_b=4.0\mu\text{m}$, $W_g=12\mu\text{m}$,在此结构下调制器的各项性能指标分别为:微波等效折射率 $N_m=2.14$,特征阻抗为 48.5Ω ,导体损耗系数 $\alpha_0=0.445\text{dB}/(\text{cm} \cdot \text{GHz}^{1/2})$;当电极长度 $L=2.5\text{cm}$ 时,由公式(2)可得 $\Delta f_{3\text{dB}}=154\text{GHz}$,由公式(5)得到其最小半波电压 $V_{\pi}=4.28\text{V}$ 。如果需求更高的带宽,可以选择更大 G 值的情况,如取 $G=20\mu\text{m}$ 时,特征阻抗为 55.4Ω ,导体损耗系数 $\alpha_0=0.380\text{dB}/(\text{cm} \cdot \text{GHz}^{1/2})$;同样取当电极长度 $L=2.5\text{cm}$ 时,由公式(2)可得 $\Delta f_{3\text{dB}}=211\text{GHz}$,对应最小半波电压 $V_{\pi}=5.78\text{V}$,可以看到,增加 G 值可以更好的增加

调制器带宽,但是同时是以牺牲小的半波电压为代价的。最终的设计结构可以自己的需求来设定。

4 结论

本文仔细比较了脊波导结构调制器相对于普通结构调制器的优势,并提出了新改进方法,并做了仔细的分析优化,在大量的数据模拟分析的基础上,验证了采用这种新的改进结构,可以有效的降低调制器的微波等效折射率,并同时保证较大的特征阻抗,从而大大的提高了调制器的带宽。

参考文献

- [1] G. K. Gopalakrishnan, W. K. Burns, R. W. McElhannon et al. Performance and modeling of broadband LiNbO₃ wave optical intensity modulators [J]. J. Lightwave Technol., 1994, 12(10): 1807 - 1819.
- [2] H. Miyamoto, H. Ohta, K. Tabuse and Nazuto Noguchi. Ultra - broad - band and highly - stable Ti :LiNbO₃ optical modulator using electrodes buried in buffer layer [J]. Electronics Letters, 1992, 28(11): 967 - 999.
- [3] Rangaraj Madahushi, Toshiya Miyakawa. A wide - band Ti :LiNbO₃ optical modulator with a novel low - microwave attenuation CPW electrode [J]. IOOC, 1995, paper WD 1 - 3: 1157 - 1158.
- [4] K. Noguchi, H. Miyazawa and O. Mitomi. Frequency - dependent propagation characteristics of coplanar waveguide electrode on 100GHz Ti :LiNbO₃ optical modulator [J]. Electronics Letters, 1998, 34(4): 661 - 663.
- [5] I. L. Gheorma, P. Savi, R. M. Osgood, Jr. Thin layer design of X - cut LiNbO₃ modulators [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(12): 1618 - 1620.
- [6] H. E. Green. The numerical solution of some important transmission - line problems [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1965, 13(5): 676 - 692.
- [7] D. Marcuse. Electrostatic field of coplanar lines computed with the point matching method [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1989, 25(5): 939 - 947.
- [8] Chen Fushen. Theory and Technology of Integrated Electro - Optic Modulator [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1995.
- [9] Zhu Ninghua, Wu Zhengde. The Calculation of the Characteristic Parameters of Electrooptic Travelling - Wave Modulator Electrode [J]. Journal of China Institute of Communications, 1990, 11(4): 72 - 77.
- [10] Jin Xiaomin, Wu Boyu, Zhang Jun, Zhang Keqian. Acta Electronica Sinica, 1996, 5(5): 117 - 120.