

Si₂N₂O 基体铌酸锂调制器有限元法研究*

李九生

(浙江大学信息学院光及电磁波研究中心, 杭州 310027)

摘 要 提出一种新型基于 Si₂N₂O 基体的 LiNbO₃ 行波调制器, 利用有限元方法对该调制器进行数值分析并获得调制器的优化结构尺寸. 该新型调制器带宽达到 120 GHz, 半波电压为 3.5 V, 特性阻抗为 50.2 Ω. 结果表明该调制器具有大的调制带宽和良好的阻抗匹配, 在未来光通信中具有很好的应用前景.

关键词 有限元法; 调制器; 铌酸锂; Si₂N₂O

中图分类号 TN761 **文献标识码** A

0 引言

随着通信的迅速发展, 单波长信道传送速率由 2.5 Gb/s 达到 10 Gb/s, 甚至 40 Gb/s, 波分复用信道数由几个达到几十个, 乃至几百个. 超高速、超大容量将成为下一代光网络的基本特征. 铌酸锂调制器因克服了啁啾影响, 在 10 Gb/s 以上的长距离光通信系统中将得到广泛应用^[1~3]. 因为 LiNbO₃ 的微波等效折射率和光波折射率两者相差很大, 造成微波与光波的速度不匹配, 所以传统 LiNbO₃ 调制器调制速率受到影响, 而且不能良好的实现阻抗匹配, 限制了调制器的带宽. 为了获得大的调制带宽, 人们提出了许多改进的结构^[4~11], 但是依然无法同时获得速度匹配和阻抗匹配.

1 调制器性能分析

为了解决铌酸锂调制器面临的难题, 本文提出了一种基于 Si₂N₂O 基体的 LiNbO₃ 行波调制器, 该调制器的结构如图 1. 调制器采用 M-Z 干涉计结构, CPW 行波电极, 氮氧化硅衬底. 通过质子交换退火获得的 LiNbO₃ 波导, 采用化学气相沉积方法 (CVD) 使氮氧化硅生长在铌酸锂基底上. 该调制器的缓冲层厚度为 d , 电极厚度为 t , 中间电极宽度为 W , 电极间距 g , Si₂N₂O 基体厚度为 H_1 , LiNbO₃ 厚度为 H_2 , 脊高为 H_3 . 利用有限元法对该新型调制器性能进行分析, 并与国外研究的波导调制器^[14] 进行对比, 结果表明该新型具有大的调制带宽和良好的阻抗匹配.

LiNbO₃ 行波调制器的带宽长度积表示为^[15]

$$\Delta f \cdot L = 2c/\pi(N_m - N_0) \quad (1)$$

式中 N_m 为微波等效折射率, N_0 为光波折射率. $N_m -$

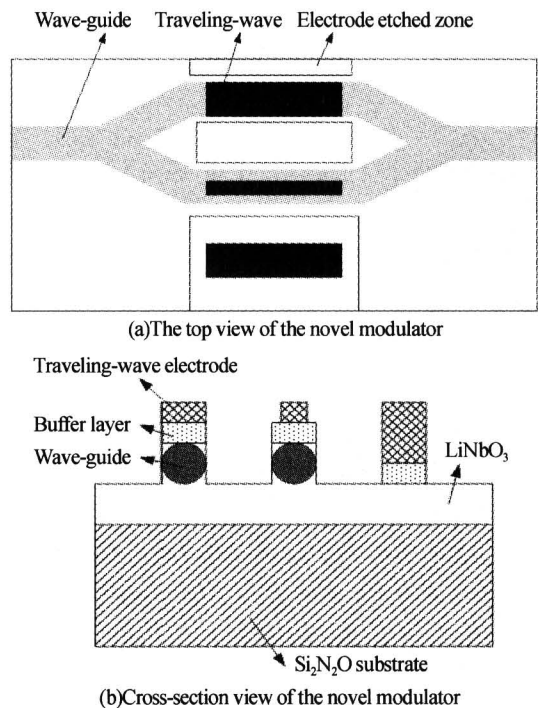


图 1 Si₂N₂O 基体调制器结构

Fig. 1 The structure of the novel modulator based on Si₂N₂O

N_0 越小, Δf 越大. 对于微波等效折射率 N_m 的计算可以利用电容法表示为

$$N_m = (C/C_0)^{1/2} \quad (2)$$

式中 C 为填充介质时单位电极长度的分布电容, C_0 为自由空间单位电极长度的分布电容.

行波调制器的特性阻抗可计算为

$$Z = 1/c \sqrt{C_0 C} \quad (3)$$

半波电压 V_π 是调制器的一个重要指标参量. 降低 V_π 不仅可以降低输入功率, 而且由于低电压的微波电路也易于实现, 从而也降低了整个调制器的制作难度, 半波电压计算

$$V_\pi = g\lambda/2n_e^3 \gamma_{33} \Gamma L \quad (4)$$

式中 g 为两电极间距, λ 为调制器波长, γ_{33} 为电光系数 (30.8×10^{-12} m/V), n_e 为非寻常光折射率, Γ 为

*国家自然科学基金(60577023)、中国博士后基金和光电信息科学技术教育部重点实验室开放课题基金资助
Tel: 0571-88206516 Email: jshli@126.com
收稿日期: 2004-10-26

电光重叠积分因子, L 为电极长度.

2 调制器有限元法分析及优化

对该电光调制器性能的分析最后集中在电极单位长度电容计算, 本文采用有限元方法对该调制器的性能指标进行分析. 用有限元法求解电容的方法很多如电荷量法或能量法. 本文采用能量法求解

$$W = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \epsilon \cdot E d\Omega = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \epsilon |\nabla \varphi|^2 d\Omega \quad (5)$$

式中 W 为电场储能, D 为电位移矢量, ϵ 为介质的介电常量.

$$C = 2W/U^2 \quad (6)$$

式中 U 为导体间电势差.

电位函数 $\varphi(x, y)$ 由拉普拉斯方程决定

$$\left(\epsilon_x \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \epsilon_y \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \varphi(x, y) = 0 \quad (7)$$

ϵ_x 和 ϵ_y 分别为平行和垂直于 Z 切 LiNbO_3 的介电常量.

假设无穷远处有虚拟边界包围调制器, 虚拟边界上无自由电荷, 得到待求边值问题为

$$\begin{cases} \epsilon(x, y) \nabla^2 \varphi(x, y) = 0 \\ \varphi(x, y) |_{(x, y) \in \Gamma_1} = U \\ \varphi(x, y) |_{(x, y) \in \Gamma} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中 Γ_1 为加电势的电极所构成的集合, Γ 为虚拟边界所构成的集合.

通过有限元方法可以得到 $\Delta\varphi$, 行波调制器的电势等位线如图 2. 充分考虑不同缓冲层厚度, 电极厚度, 中间电极宽度, 电极间距, 以及 $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ 基体厚度, 利用有限元法对调制器的微波等效折射率和电极特性阻抗进行分析计算.

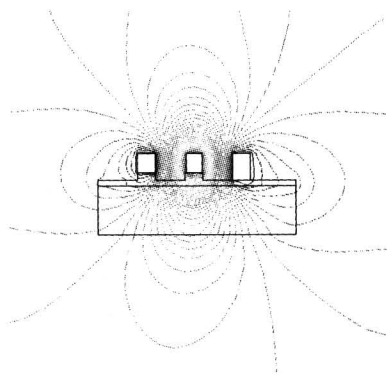


图 2 调制器电势等位线图

Fig. 2 Electric field contour of the novel modulator

当电极宽度 $W = 4 \sim 8 \mu\text{m}$, 电极间距 $g = 10 \sim 20 \mu\text{m}$, 得到该调制器微波等效折射率 N_m 和电极特

性阻抗 Z 如图 3. 微波等效折射率随电极间距和电极宽度增大而减小; 特性阻抗随着电极间距增大而增大, 随着电极宽度的增大而减小. 当基体厚度 $H_1 = 0 \sim 25 \mu\text{m}$, 电极间距 $g = 10 \sim 20 \mu\text{m}$, 计算得到如图 4. 微波等效折射率随着基体厚度增加而增大, 特性阻抗随着基体厚度增加而减小.

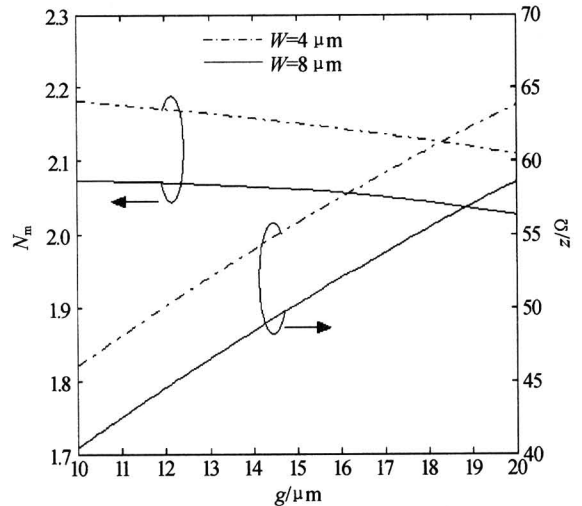


图 3 $N_m, Z-g$ 曲线

Fig. 3 N_m and Z as W varies for different g

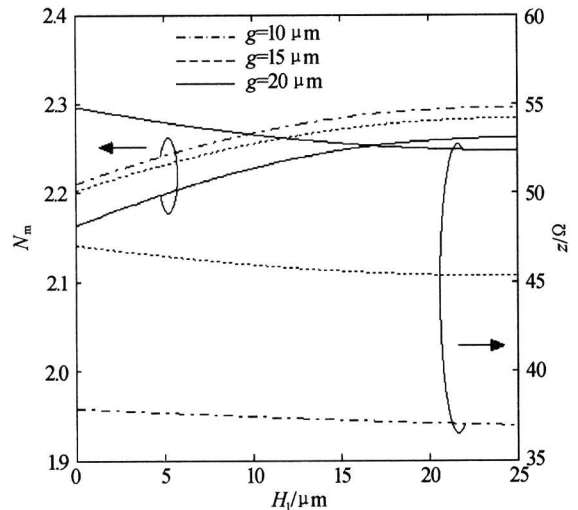


图 4 $N_m, Z-g, H_1$ 曲线

Fig. 4 N_m and Z as g varies for different H_1

改变电极厚度 $t = 5 \sim 10 \mu\text{m}$, 缓冲层厚度 $d = 0 \sim 1 \mu\text{m}$, 结果如图 5. 微波等效折射率随着电极厚度和缓冲层厚度增加而减小; 特性阻抗随着电极厚度的增加而减小, 随着缓冲层厚度的增加而增大. 当 LiNbO_3 厚度 $H_2 = 3 \sim 5 \mu\text{m}$, 脊高 $H_3 = 3.5 \sim 5 \mu\text{m}$ 变化, 数值计算的结果如图 6. 表明微波等效折射率随着 LiNbO_3 厚度增加而增大, 随脊高增大而减小; 特性阻抗变化趋势与微波等效折射率变化趋势相反.

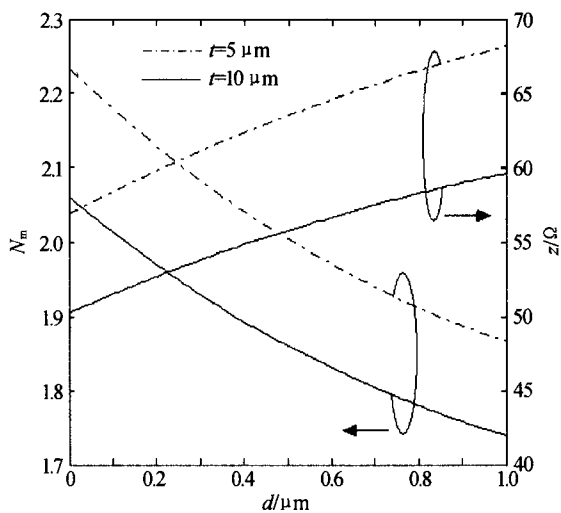


图 5 $N_m, Z-t, d$ 曲线

Fig. 5 N_m and Z as t varies for different d

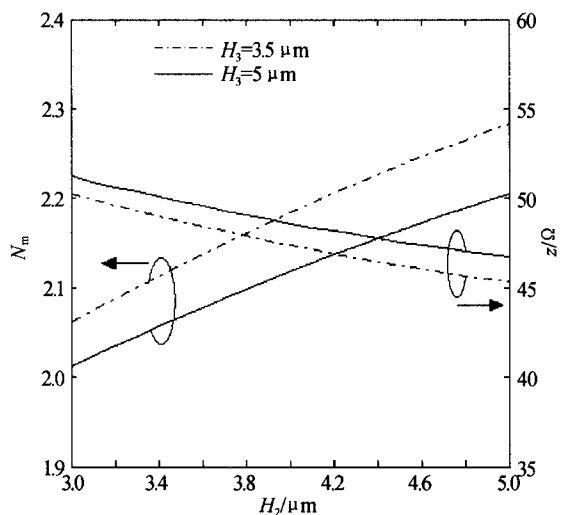


图 6 $N_m, Z-H_2, H_3$ 曲线

Fig. 6 N_m and Z as H_3 varies for different H_2

通过对图 3~图 6 进行综合分析,当 Si₂N₂O 基体厚度为 $H_1=25 \mu\text{m}$, LiNbO₃ 厚度为 $H_2=5 \mu\text{m}$, 得到优化的 Si₂N₂O 基体 LiNbO₃ 调制器结构尺寸参量,如表 1. 采用与文献[10]的调制长度 $L=2.0 \text{ cm}$, 则该调制器性能指标如表 2.

表 1 调制器结构尺寸参量

$t/\mu\text{m}$	$d/\mu\text{m}$	$g/\mu\text{m}$	$W/\mu\text{m}$	$H_3/\mu\text{m}$
10	0	15	8	3.5

表 2 调制器性能参量

N_m	Z/Ω	V_π/V	$\Delta f/\text{GHz}$
2.06	50.2	3.5	122.4

4 结论

本文提出了基于 Si₂N₂O 基体的 LiNbO₃ 行波调制器,利用有限元方法对其进行了数值分析,获得了该新型调制器最佳的结构尺寸. 与传统的 Ti : LiNbO₃ 调制器相比,该行波调制器具有带宽大,半

波电压低和阻抗匹配等优点,适用于未来高速宽带光纤通信系统中.

参考文献

- Nogachi K, Kawano K. Proposal for Ti : LiNbO₃ optical modulator with modulation bandwidth of more than 150 GHz. *Electronics Letters*, 1992, **28**(19): 1759~1761
- Noguchi K, Miyazawa H, Mitomi O. 75 GHz broadband Ti : LiNbO₃ optical modulator with ridge structure. *Electronics Letters*, 1989, **30**(12): 949~950
- Kataoka T, Miyamoto Y, Hagimoto K, et al. 20 Gb/s long distance transmission using a 270 photon/bit optical preamplifier receiver. *Electronics Letters*, 1994, **30**(9): 715~716
- Yoshida K, Kanda Y, Kohjiro S. A traveling-wave-type LiNbO₃ optical modulator with superconducting electrodes. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, **47**(7): 1201~1205
- Miyamoto H, Ohta H, Tabuse K, et al. A broadband traveling-wave Ti : LiNbO₃ optical phase modulator. *Japanses Journal of Applied Physics*, 1991, **30**(3): 383~385
- Dolfi D W, Ranganath T R. 50 GHz velocity-matched broad wavelength LiNbO₃ modulator with multimode active section. *Electronics Letters*, 1992, **28**(13): 1197~1198
- Miyamoto H, Ohta H, Tabuse K, et al. Evaluation of LiNbO₃ intensity modulator using electrodes buried in buffer layer. *Electronics Letters*, 1992, **28**(11): 976~977
- Mitomi O, Noguchi K, Miyazawa H. Design of ultra-broad-band LiNbO₃ optical modulators with ridge structure. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1995, **43**(9): 2203~2207
- Haga H, Izutsu M, Sueta T. LiNbO₃ traveling-wave light modulator/switch with an etched groove. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1986, **22**(6): 902~906
- Noguchi K, Mitomi O, Kawano K, et al. High efficient 40 GHz bandwidth Ti : LiNbO₃ optical modulator employing ridge structure speed. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1993, **5**(1): 52~54
- 严清峰, 余金中. 一种新型 SOI Mach-zehnder 干涉型电光调制器的设计. *光子学报*, 2003, **32**(5): 555~558
Yan Q F, Yu J Z. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(5): 555~558
- 傅思镜, 童洲森, 刘叶新, 等. 超高速行波电吸收调制器的 K 值设计. *光子学报*, 2004, **33**(7): 806~809
Fu S J, Tong Z S, Liu Y X, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7): 806~809
- 陈哲, 廖延彪. 热极化保偏光纤构成的全光纤电光强度调制器. *光子学报*, 2004, **33**(6): 663~665
Chen Z, Liao Y B. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6):

- 663~665
- 14 Kawano K, Jumonji H, Kitoh T. Millimeter-wave Ti :
LiNbO₃ optical modulators. *Journal of Lightwave
Technology*, 1998, **16**(4): 615~619
- 15 Alferness R C. Waveguide electro-optic modulators.
*IEEE Transaction on Microwave Theory and
Techniques*, 1982, **30**(8): 1121~1137

Research on Lithium Nobate Modulator Based on Si₂N₂O Substrate by Finite Element Method

Li Jiusheng

*Centre for Optical and Electromagnetic Research, State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation,
Zhejiang University, Hangzhou 310027*

Received date: 2004-05-19

Abstract A novel LiNbO₃ modulator based on Si₂N₂O substrate is proposed. Using the finite element method, the proposed modulator has been analyzed. The optimum structure parameters of the novel modulator are obtained. The modulator operates with a 3 dB optical bandwidth of 120 GHz, a half-wave driving voltage of 3.5 V, and characteristic impedance of 50.32Ω. The results show that broad bandwidth and low half-wave voltage can be achieved simultaneously. It is a promising candidate for future ultra-high-speed optical fiber transmission system.

Keywords Finite element method; Modulator; Lithium noibate; Si₂N₂O



Li Jiusheng received the Ph. D. degree in communication and information engineering at the Tianjin University, in 2004. After that, he joined the Joint Laboratory of Optical Communication of Royal Institute of Technology (Sweden) and Zhejiang University as a postdoctor and continued his research. His current research interests are the areas of optical devices and photonic crystal devices for optical communication systems.