

高调制效率的薄膜铌酸锂电光调制器设计

李海盛^{1,2},宋树祥^{1,2*},尹怡辉³,谢仕锋³,杨万里³,李跃³,杨佳宇³,熊斌^{1,2}

(1.广西师范大学电子与信息工程学院,广西桂林541004;

2.广西师范大学集成电路学院,广西桂林541004;3.中国电子科技集团公司第三十四研究所,广西桂林541004)

摘要:为突破薄膜铌酸锂(TFLN)电光调制器中效率、损耗与带宽的相互制约,设计了一种高调制效率的TFLN电光调制器,通过将SiO₂保护层和BaTiO₃高介电包层嵌入波导与电极之间,结合精确设计的双电容结构,在增强电场的同时抑制光损耗。仿真结果表明:该结构下的电光调制带宽大于60 GHz,光损耗小于0.2 dB/cm且半波电压长度积为1.42 V·cm。

关键词:光芯片;电光调制器;薄膜铌酸锂;高调制效率;有限元分析

中图分类号:TN256 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)06-0008-07

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.06.002

Design of thin-film lithium niobate electro-optic modulator with high modulation efficiency

LI Haisheng^{1,2}, SONG Shuxiang^{1,2*}, YIN Yihui³,XIE Shifeng³, YANG Wanli³, LI Yue³, YANG Jiayu³, XIONG Bin^{1,2}

(1. School of Electronic and Information Engineering, Guangxi Normal University, Guilin Guangxi 541004, China; 2. College of Integrated Circuits, Guangxi Normal University, Guilin Guangxi 541004, China; 3. The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: To overcome the trade-off among efficiency, loss, and bandwidth in thin-film lithium niobate (TFLN) electro-optic modulators, a high-efficiency TFLN modulator is designed. By embedding a SiO₂ protective layer and a BaTiO₃ high-dielectric cladding between the waveguide and electrodes, along with a precisely designed dual-capacitance structure, the electric field is enhanced while optical loss is suppressed. Simulation results demonstrate that the electro-optic modulation bandwidth of this structure exceeds 60 GHz, with an optical loss of less than 0.2 dB/cm and a half-wave voltage-length product of 1.42 V·cm.

Key words: optical chip, electro-optical modulator, thin film lithium niobate, high modulation efficiency, finite element analysis

0 引言

电光调制器是现代光通信系统和微波光子系统的核心部件^[1-2],能够将高速电信号转换为光信号。近年来,随着卫星数据链、量子信息处理和第五代移动通信(5G)技术等领域的快速发展,对高电光调制带宽、低功耗和低成本电光调制器的需求日益迫切^[3-4]。目前,传统块状铌酸锂(LN)、硅和三五族化合物等材

料广泛应用于商用调制器的制造^[5-7],但这些调制器存在调制效率低、电光带宽受限(约60 GHz)等问题。薄膜铌酸锂(TFLN)的制备成功以及纳米制造技术的突破,为调制器实现高带宽、低功耗和低成本提供了新的可能^[8-11]。与传统调制器相比,TFLN 马赫-曾德尔(MZM)调制器在半波电压、调制带宽和芯片面积等方面均表现出更优的性能。电压长度积是衡量电光调制器性能的关键指标,较低的电压长度积意味着器件尺寸更小,同时可在一定半波电压下实现更高的调制带宽。因此,当前MZM的研究重点集中在如何进一步降低半波电压长度积,以优化调制器性能。

2018年,哈佛大学的研究团队^[12]制作了可以与互补金属氧化物半导体(CMOS)兼容的MZM,其半波电压长度积为2.2 V·cm。2019年,中山大学团队^[15]提出一种硅光子与TFLN混合集成的方法,半波电压长度

收稿日期:2024-07-04。

作者简介:李海盛(2000—),男,硕士研究生,就读于广西师范大学电子与信息工程学院/集成电路学院新一代电子信息专业(含量子技术)专业。主要研究方向为高速低功耗薄膜铌酸锂电光调制器设计与调制器高速封装。

***通信作者:**宋树祥(1970—),男,教授,中国电子学会会员。主要从事模拟集成电路、智能检测系统的研究工作。



积达到 $2.7 \text{ V} \cdot \text{cm}$ 。2021年, 美国 Hyper Light 公司^[13]提出一种电容负载式行波电极结构的调制器, 半波电压长度积达到 $2.6 \text{ V} \cdot \text{cm}$, 带宽大于 100 GHz 。同年, 清华大学研究团队^[14]采用 $\text{LN}+\text{SiO}_2$ 混合波导方式, 在 TFLN 上覆盖一个硅包层, 有效减少了光吸收损耗, 半波电压长度积达到 $1.7 \text{ V} \cdot \text{cm}$ 。2023年, 暨南大学研究团队^[16]使用一种倾斜电极的设计和狭缝波导将半波电压降低至 1.48 V 。尽管上述文献显著提高了激光通信系统的调制效率, 但这也导致了光吸收损耗的增加。特别是在设计 TFLN 电光调制器时, 调制效率及带宽往往受限于金属层引入的吸收损耗。由于这些损耗直接影响到信号的质量和传输距离, 因此在设计阶段需要在电光调制效率与光吸收损耗之间进行优化折中。为此, 本文设计一种高调制效率的 TFLN 电光调制器。

1 原理与设计

1.1 整体结构

本文设计的 TFLN 电光调制器的整体结构、截面图和俯视图如图 1 所示。调制器分为光学部分和电学部分。光学部分由 2 个多模干涉仪 (MMI) 和 1 个 MZI 组成。电学部分由 1 个电容负载式行波电极 (CL-TWE) 组成。射频信号是使用一种推挽的形式传输, 中间电极传输射频信号, 旁边的 2 个电极接入公共地。所设计的电光调制器使用周期性负载的 T 电极结构, 拓宽电光带宽。截面则是使用下沉结构的双电容电极和 BaTiO_3 高介电常数材料增强电场。

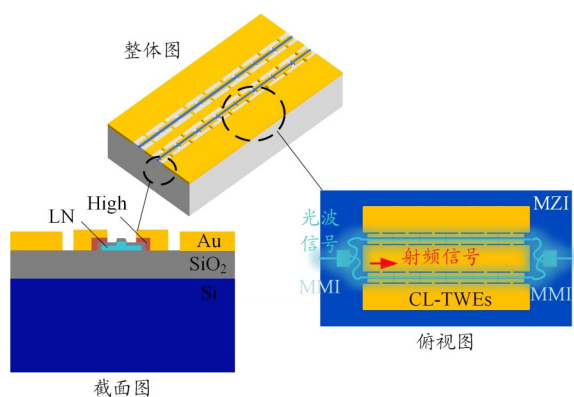


图 1 TFLN 电光调制器的整体图、截面图和俯视图

光波信号首先通过 MMI 分成 2 束光强相等的子光束, 这 2 束光分别沿 LN 脊波导传输并经过电极间的调制区。由于 LN 的有效折射率会随外加电场变化, 当施加射频电压时, 上下电极间隙产生的电场大小相等但方向相反, 使得 2 束光在传输过程中积累大小相等、

符号相反的相位差。最后, 2 束光通过第二个 MMI 合束并发生干涉, 输出光强随调制电压呈周期性变化, 从而将射频信号加载到光载波上实现电光调制。

1.2 关键设计要素分析

根据电磁场理论, x 切 (x -cut) 的 TFLN 的折射率变化可以由式 (1)^[17] 表示。

$$\Delta n = \frac{1}{2} \frac{n_e^3 \gamma_{33}}{n_{\text{eff}}} \frac{V}{G_{\text{gap}}} \Gamma_{\text{om}} \quad (1)$$

其中, V 为调制电压, G_{gap} 为电极间隔宽度, n_e 为 LN 的非寻常折射率, γ_{33} 为电光系数, n_{eff} 为有效折射率, Γ_{om} 是电场和光场的归一化重叠因子, Γ_{om} 表示为

$$\Gamma_{\text{om}} = \frac{\int_{S_{\text{LN}}} \frac{E_z(x, y)}{V} |e_z(x, y)|^2 dx dz}{\int_S |e_z(x, y)|^2 dx dz} \quad (2)$$

其中, $E_z(x, y)$ 是电极沿着 LN 的 z 轴电场, $e_z(x, y)$ 是横向电场 (TE) 模式的光场, S_{LN} 是 LN 部分的截面, S 是整个调制区截面。

根据式 (1) 可以推导出光场的相位改变值为

$$\Delta \phi = \frac{n_e^3 \gamma_{33} V L \Gamma_{\text{om}}}{\lambda} \quad (3)$$

其中, L 为调制长度, λ 为光波波长。

当光场的相位变化为 π 时, 施加的电压为半波电压, 该参数是衡量调制器驱动能耗的关键指标。通常半波电压与长度正相关, 所以一般使用一个半波电压长度积来衡量整个调制器的调制效率, 推挽式调制器的半波电压长度积^[18] 可以表示为

$$V_{\pi} L = \frac{1}{2} \frac{\lambda}{n_e^3 \gamma_{33} \Gamma_{\text{om}}} \quad (4)$$

由式 (4) 可知, 电光调制器的调制效率主要由 2 个关键参数决定: 波导的有效折射率和光电重叠因子。波导的有效折射率由脊波导的几何尺寸 (包括脊宽和高度) 决定; 光电重叠因子则与电极间隔、电极位置等参数相关。当脊波导结构、材料及输入光波长确定后, 半波电压长度积 (衡量调制效率的重要指标) 仅与重叠因子呈负相关——即重叠因子越大, 半波电压长度积越小, 调制效率越高。重叠因子虽可通过调整电极参数优化, 但电极间隔的变化会同时影响损耗特性: 增大电极间隔可降低半波电压长度积 (提升效率), 但间隔过小会导致光吸收损耗急剧增加。因此, 在电光调制器的设计中, 需在效率提升与损耗控制之间进行权衡。

1.2.1 波导与下沉电极设计

基于电磁学理论分析可知, 电极中心位置具有最

大电场强度。为此, 本文提出下沉电极设计, 将脊波导精确置于电极中心位置以增强电场。TFLN 电光调制器电极下沉深度与光吸收损耗、半波电压长度积的关系如图 2 所示。可以看出, 随着电极下沉深度的增加, 半波电压长度积显著降低; 光吸收损耗随下沉深度增加而上升(从 0.02 dB/cm 增至 0.25 dB/cm)。当电极下沉深度为 0.3 μm 时, 由于电极与 LN 接触面积最小, 既实现了最大平均电场强度, 又将光吸收损耗降至最低, 此时系统达到最优平衡。该设计通过选择性刻蚀非功能区域, 有效消除了非调制区的额外损耗。

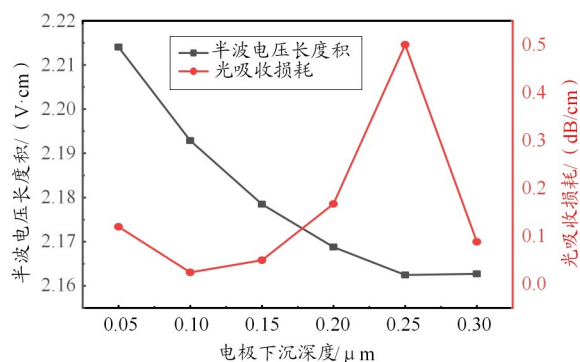


图2 TFLN 调制器电极下沉深度与光吸收损耗、半波电压长度积的关系

本文采用倾斜电极, 以有效增强光电调制效率。倾斜电极的实现原理有 2 个: 一是通过电极倾斜排布, 在避免电极过于接近下波导的前提下, 有效增强脊波导区域的电场强度, 从而在抑制光吸收损耗的同时提升调制效率; 二是电极特定的倾斜角度会产生电场集中效应, 使 LN 材料内部形成更强的局域电场分布, 显著提高电光相互作用强度。虽然倾斜电极提高电光效率效果明显, 但是在工艺上实现较困难。为此, 本文设计一种上下双电容负载电极结构。通过使上电极延伸并靠近脊波导来增加脊部分的电场强度, 而下电极与 LN 之间保持一定的间隔以减少光吸收损耗。此外, 延伸部分能够产生尖端放电效应, 从而增强电场强度。

1.2.2 高介质包层设计

根据电磁场理论, 在 2 个不同介质中, 电场法向分量的边界条件为 $D_{1n} - D_{2n} = \rho_s$, 根据物质方程 $D = \epsilon E$ 可得

$$\epsilon_1 E_{1n} - \epsilon_2 E_{2n} = \rho_s \quad (5)$$

其中, E 是电场强度, D 是电位移矢量。 D_{1n} 是 1 介质中的电位移矢量, 相对介电常数。当两介质材料都是理想介质时, $\rho_s = 0$, 将式(5)简化得到

$$\epsilon_1 E_{1n} = \epsilon_2 E_{2n} \quad (6)$$

为了减少损耗对于波导影响, 调制器的电极与脊波导之间加入了 SiO_2 保护层。此时 LN 内部电场 $E_{\text{LN}} = \frac{\epsilon_{\text{SiO}_2}}{\epsilon_{\text{LN}}} E_{\text{SiO}_2}$ 为 SiO_2 的内部电场, ϵ_{LN} 和 ϵ_{SiO_2} 分别为 LN 和 SiO_2 的相对介电常数。由此可知, 虽然损耗下降但是电场强度大小也会随之减少。为解决加入 SiO_2 后电场强度下降的问题, 本文在电极之间引入了高介电常数材料, 以增强电场。根据上述分析介质的边界条件, 可以推导出引入高介电常数包层后 LN 内部电场^[19-20]表达式为

$$E_{\text{LN}} = \frac{\epsilon_{\text{H}} \epsilon_{\text{SiO}_2}}{\epsilon_{\text{LN}}} E_{\text{SiO}_2} \quad (7)$$

其中, ϵ_{H} 是高介电常数包层的相对介电常数。

由式(7)可知, 若要增大 LN 内部的电场, 在材料选择上应倾向于具有较高介电常数的材料, 例如 BaTiO_3 、 Al_2O_3 等。本文对不同材料进行仿真分析, 以计算这些材料作为包层时对电场强度增强效果的影响, 结果如图 3 所示。可以看出, 随着包层材料介电常数的增加, LN 内部平均电场也随之增强。当相对介电常数超过 40 F/m 后, 电场强度的增强幅度开始变小, 出现了一个拐点。这意味着进一步提高介电常数对于电场增强的效果有限。然而, 使用高介电常数材料也会不可避免地引入损耗, 从而影响系统的频率响应。综合考虑电场增强效果及材料损耗等因素, 本文选择 BaTiO_3 做为增强电场的材料。

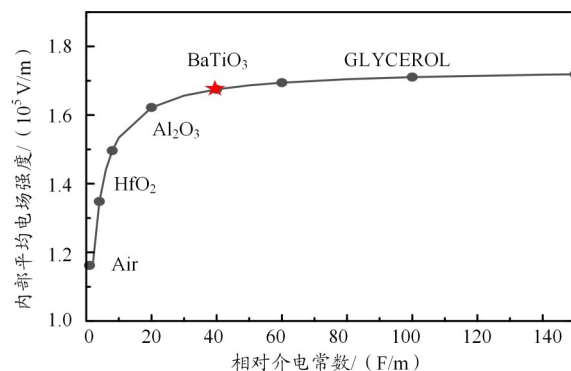


图3 不同材料包层对于 TFLN 内部平均电场的影响

1.3 电光带宽优化

制约调制器带宽的条件有 3 个: 一是阻抗匹配; 二是微波损耗, 整个调制器的微波损耗主要来自于行波电极和衬底的吸收; 三是光群速度与微波信号相速度的匹配, 速度匹配是设计一个高速调制器的重要考量因素, 具体影响因素如下:

1) 使用低介电常数衬底和TFLN会显著降低电极周围介质的折射率, 使得微波折射率降至2.01左右。

2) 对于传统共面波导(CPW)电极, 调制效率与调制带宽之间的权衡是限制目前TFLN调制器高速性能的主要因素。在调制器电极设计上, 首先选择电极间隙宽度以达到可接受的金属吸收损耗最小值, 该宽度通常为 $5\sim 8\ \mu\text{m}$ 。其次, 将特征阻抗应设置为等于源阻抗 $50\ \Omega$, 以减少反射损失。

在满足上述2个前提条件的情况下, 行波电极的微波折射率是固定不变的; 任何试图调整该参数的做法都会破坏阻抗匹配并降低调制效率。正是这种不匹配特性, 使得传统CPW结构难以实现较大的电光带宽。为解决这一问题, 可采用电容负载结构进行优化。本文提出了一种周期性加载的T形电极结构: 通过精确优化T形电极的几何参数, 能够在维持高调制效率和良好阻抗匹配的同时, 实现光波与微波的相位速度匹配。该结构的核心机理在于: 每个T形电极单元可等效为一个电容元件, 会对传输信号产生部分反射; 而周期性排列的设计使得前一个电容单元的反射信号能够被后一个电容单元抵消。这种自补偿效应显著降低了微波传输损耗, 从而提升整体性能。

根据微波传输线理论, 可以将电光传输函数^[21-23]表示为

$$H(\omega) = 20 \lg \left[\frac{2\sqrt{Z_0 Z_{in}}}{Z_0 + Z_{in}} e^{-\frac{\alpha L}{2}} \sqrt{\frac{\sin^2 h^2\left(\frac{\alpha L}{2}\right) + \sin^2\left(\frac{bL}{2}\right)}{\left(\frac{\alpha L}{2}\right)^2 + \left(\frac{bL}{2}\right)^2}} \right] \quad (8)$$

其中, α 为传输线损耗, L 为调制器的总长度, Z_{in} 为输入阻抗(一般为 $50\ \Omega$), Z_0 为传输线特征阻抗, b 为光波与微波的偏离值表达式; $b = \frac{2\pi f}{c}(n_m - n_g)$ 为速度匹配项, c 为光速, f 为频率, n_m 为微波折射率, n_g 为光群折射率。

式(8)通过统一的数学模型, 综合表征了阻抗匹配、速度匹配和传输损耗对电光调制效率的耦合影响。

T电极的传输线等效电路如图4所示, 其与传统CPW结构的关键区别在于引入了并联电容。图中, R_p 、 L_p 、 G 分别代表等效寄生参数。该电容结构可以起到调整特征阻抗和微波速度的作用。在电极设计中采用金作为导电材料时, 其优异的导电特性允许将传输线近似为无损传输线进行优化设计。特征阻抗和微波速度表达式如下:

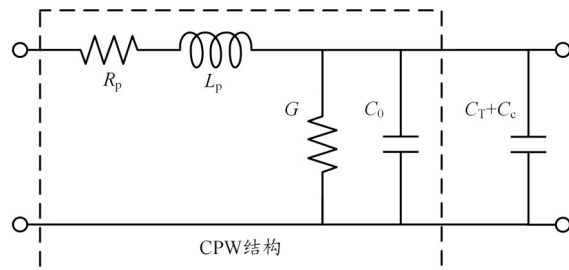


图4 TFLN电光调制器T电极传输线等效电路

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0 + C_T}} \quad (9)$$

$$n_m = c \sqrt{L_0(C_0 + C_T)} \quad (10)$$

其中, L_0 、 C_0 分别为单位长度电感和电容, C_T 为电容负载式电极的单位寄生电容。

2 仿真与优化

2.1 波导部分

通过有限元仿真分析发现, 脊波导的几何尺寸对调制效率具有显著影响。仿真研究表明, 随着脊波导高度 H 的减小, 脊波导侧面对波导模式的限制作用减弱, 导致光场模斑尺寸扩大, 从而使有效折射率上升。

脊波导宽度 W_j 对器件性能的影响规律如图5所示。可以看出, 随着 W_j 的增大, 光场模式面积和有效折射率均呈现上升趋势。根据式(4)的理论分析可知, 有效折射率的增大会直接降低电光调制效率。从光波导理论角度, W_j 过宽会激发更多传输模式, 进一步制约性能提升。因此, 单纯减小脊宽度无法实现最优调制效率。综合上述分析可得: 当 $W_j=1.5\ \mu\text{m}$, 且 $H=0.3\ \mu\text{m}$ 时, 该调制器的脊波导结构可获得最大的调制效率。

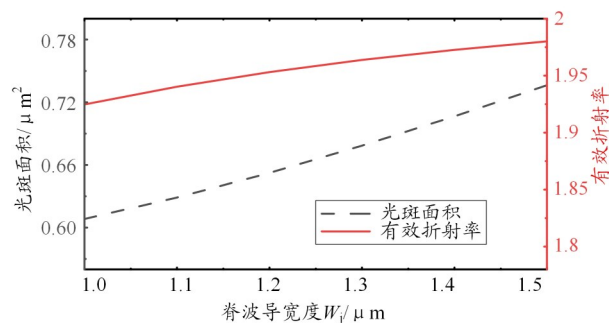


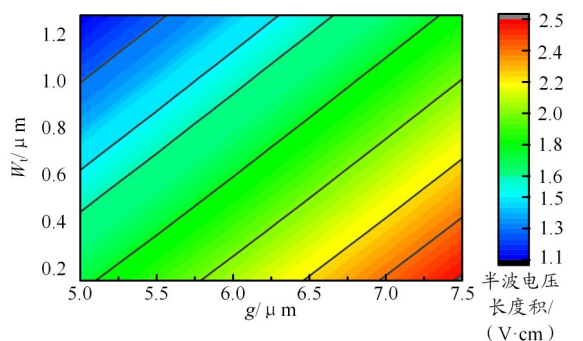
图5 光斑面积和有效折射率与脊波导宽度关系

2.2 电光效率部分

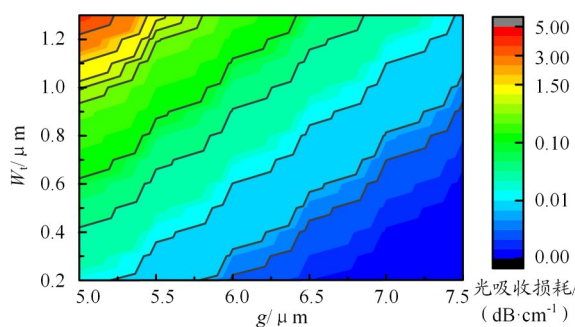
金属之间的间隔对于调制效率具有决定性影响。在没有保护层的传统调制器中, 为减少光吸收损耗并

确保调制器正常工作, 电极间距通常设置在 $5\ \mu\text{m}$ 左右, 此时光吸收损耗为 $0.1\ \text{dB/cm}$, 半波电压长度积为 $2.2\ \text{V}\cdot\text{cm}$ 。然而, 当加入保护层后, 金属之间间隔对光吸收损耗的影响显著减小。

本文采用有限元分析方法系统探究了金属间隔对电光效率的影响, 重点针对所设计的上下双电容负载电极结构中 2 个关键几何参数——上电极宽度 W_t 和下电极间隔宽度 g 开展数值仿真与优化, 这 2 个参数被证实为影响器件半波电压长度积和光损耗的主导因素。半波电压长度积和光吸收损耗的等高线填充图如图 6 所示。可以看出, 当上电极宽度 W_t 为 $0.9\ \mu\text{m}$ 、下电极间隔宽度 g 为 $5.5\ \mu\text{m}$ 时, 系统达到最佳平衡, 此时半波电压长度积为 $1.42\ \text{V}\cdot\text{cm}$, 光吸收损耗控制在 $0.2\ \text{dB/cm}$ 。



(a) 半波电压长度积



(b) 光损耗

图 6 半波电压长度积和光吸收损耗的等高线填充图

本文对比了设计的双电容电极结构与传统 CPW 结构的性能差异, 结果如图 7 所示。可以看出, 在相同的电极间隔条件下, 所设计的结构其半波电压长度积相较于传统结构更小, 显示出更高的电光调制效率。

2.3 电光带宽部分

基于已优化的电极间隔参数, 本文进一步通过有限元仿真对中心电极宽度进行系统分析。扫描中心

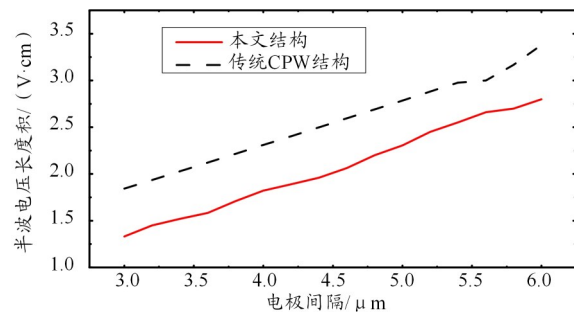
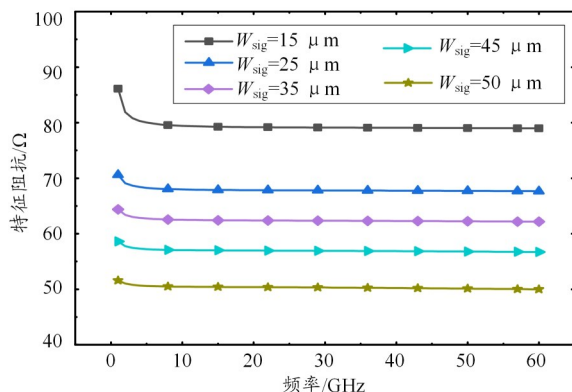


图 7 2 种结构随着金属间隔变化的半波电压长度积对比

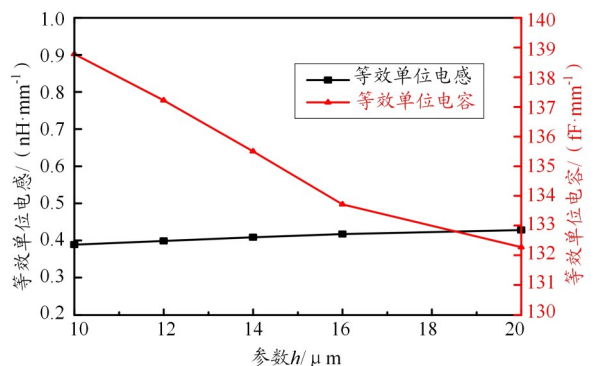
电极宽度 W_{sig} 从 $15\sim 50\ \mu\text{m}$ 的变化范围, 得出输出特征阻抗和微波折射率的结果如图 8(a) 所示。可以看出, 随着中心电极宽度的增加, 特征阻抗逐渐减少, 当 $W_{\text{sig}}=50\ \mu\text{m}$ 时, 特征阻抗匹配达到了 $50\ \Omega$ 。此时, 微波速度接近 2.28。因此, 本文将中心电极宽度确定为 $50\ \mu\text{m}$ 后, 继续分析并优化 T 电极参数。

在 T 电极设计结构中, 参数 h 主要影响增加的负载电容值, 参数 t 和 s 则主要影响微波反射系数和微波损耗。首先, 通过扫描 h 参数来控制等效电容和电感, 将 h 从 $10\ \mu\text{m}$ 变化到 $20\ \mu\text{m}$, 并计算其寄生电容和寄生电感, 结果如图 8(b) 所示。可以看出, 电容负载式电极等效单位电感基本没有变化, 而电容会发生较大改变。通过计算, 本文确定 h 参数取 $12\ \mu\text{m}$ 。然后, 对参数 t 和 s 进行了扫描以优化整个系统的反射系数和微波损耗, 结果如图 8(c) 和图 8(d) 所示。可以看出, 随着参数 t 的增大, 微波损耗增大、反射系数增大; 随着参数 s 的增大微波损耗增大、反射系数增大。

在优化 T 电极参数的过程中, 本文重点针对系统稳定性和带宽性能进行了精准调控。通过参数化扫描分析, 最终确定最优参数组合为: 参数 t 为 $5\ \mu\text{m}$ 、参数 s 为 $2\ \mu\text{m}$ 时, 微波损耗为 $4\ \text{dB/cm}$, 反射系数达到了 $-15\ \text{dB}$ 。



(a) 特征阻抗随着频率变化曲线



(b) 等效电路的寄生电感电容大小

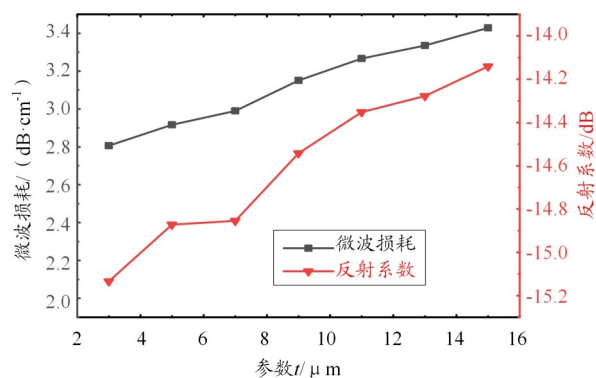
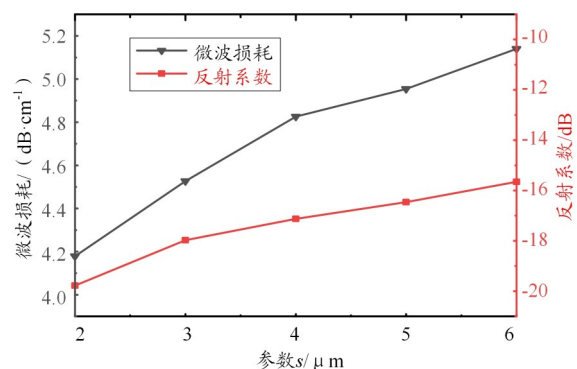
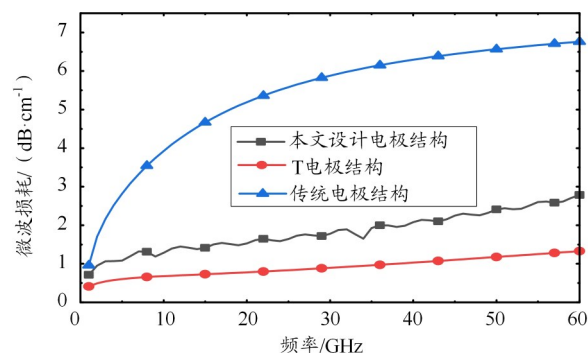
(c) 分析参数 t 得到的微波损耗和反射系数(d) 分析参数 s 得到的微波损耗和反射系数

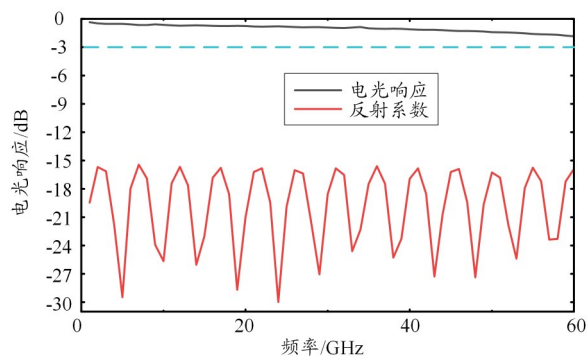
图8 调制器电学性能与各个结构参数关系

本文通过引入 BaTiO_3 高介电常数包层,系统分析其对调制器带宽性能的影响。基于优化后的电极参数,本文对调制器进行了全波电磁仿真与光电联合建模。将特征阻抗、微波折射率、微波损耗等关键参数代入式(8),得到的电光响应特性如图9所示。从图9(a)可知,当 BaTiO_3 材料靠近电极时,由于其具有更强的电场存储能力,会导致电极周围电场分布的变化,从而影响微波在电极中的传播速度和特性。将加入 BaTiO_3 后的微波损耗与传统T电极结构进行对比后可知,虽然微波损耗略有增加,但增幅不大。此外,相

李海盛,宋树祥,尹怡辉,等:高调制效率的薄膜铌酸锂光电调制器设计较于CPW结构,使用 BaTiO_3 包层的结构显示出更低的损耗。从图9(b)可以看出,在60 GHz工作频率下,系统响应仅下降1.8 dB,显著优于传统结构的4.5 dB衰减;反射系数在1~60 GHz的频率范围均小于-15 dB。基于这些结果可以预测,整个器件的-3 dB电光带宽将远超60 GHz。



(a) 行波电极、电容负载式行波电极和本文设计的微波损耗对比



(b) 设计结构的电光系数和反射系数

图9 调制器电学性能与频率关系

2.4 TFLN电光调制器性能比较

TFLN电光调制器的最新研究成果对比情况如表1所示。本文通过创新的双电容电极结构和 $\text{BaTiO}_3/\text{SiO}_2$ 复合包层设计,在保持0.2 dB/cm超低光损耗的同时,实现了 $1.42 \text{ V}\cdot\text{cm}$ 的半波电压长度积和超过60 GHz的电光带宽。相较于文献[18-20]通过牺牲光损耗($>1 \text{ dB/cm}$)换取低半波电压长度($1.29\sim 1.41 \text{ V}\cdot\text{cm}$)的方案,本文设计在保证器件集成性的基础上显著提升了综合性能;与同类低损耗($0.1\sim 0.5 \text{ dB/cm}$)器件相比,所设计的调制效率较文献[9,12-15]提升30%~45%,同时维持了优异的带宽特性。这一突破性进展源于电极-包层协同优化策略,有效解决了传统调制器中效率、带宽与损耗相互制约的难题,为高性能集成光子芯片的发展提供了新路径。

表1 TFLN光电调制器的性能对比

文献	半波电压长度 积/(V·cm)	电光带宽/ GHz	光损耗/ (dB·cm ⁻¹)	反射系数/ dB
[9]	2.6	56	1.5	<-15
[12]	2.2	100	0.1	
[13]	2.3	>100	<0.1	<-15
[14]	1.7	67	0.1	<-18
[15]	2.55	>70	0.5	
[18]	1.29	>40	9.6	<-15
[19]	1.41	>40	1.25	<-20
[20]	1.36	132	1	<-20
[23]	1.75	40	0.7	<-10
本文	1.42	>60	0.2	<-13

3 结束语

本文提出了一种基于下沉式双电容电极与复合介质集成的高效TFLN电光调制器。该设计通过在波导与电极间引入SiO₂保护层和BaTiO₃高介电包层,有效突破了效率、损耗与带宽之间的制约关系。实验结果表明,该器件在保持0.2 dB/cm超低损耗的同时,实现了1.42 V·cm的半波电压长度积和超过60 GHz的带宽,显著优于传统方案。未来可进一步探索异质集成等新方法,以持续优化性能并降低成本。

参考文献:

- [1] 郑伟,殷杰,田庄,等. 国际空间站宇航光纤通信器件发展综述[J]. 光通信技术, 2024, 48(1): 51-59.
- [2] ZHANG M, WANG C, KHAREL P, et al. Integrated lithium niobate electro-optic modulators: when performance meets scalability[J]. Optica, 2021, 8(5): 652-667.
- [3] QI Y, LI Y. Integrated lithium niobate photonics[J]. Nanophotonics, 2020, 9(6): 1287-1320.
- [4] SINATAKAS G, CHRISTOPOULOS T, TSILIPAKOS O, et al. Electro-optic modulation in integrated photonics[J]. Journal of Applied Physics, 2021, 130(1): 010901-1-010901-35.
- [5] 杨鹏毅,李韬,姚宗影,等. 一种基于薄膜铌酸锂调制器芯片的新型电光调制器[J]. 光通信技术, 2023, 47(1): 73-76.
- [6] LUO J, JEN A K Y. Highly efficient organic electrooptic materials and their hybrid systems for advanced photonic devices[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(6): 42-53.
- [7] AUGUSTIN L M, SANTOS R, DEN HAAN E, et al. InP-based generic foundry platform for photonic integrated circuits[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, 24(1): 1-10.
- [8] JANNER D, TULLI D, GARCÍA-GRANDA M, et al. Micro-structured

integrated electro-optic LiNbO₃ modulators[J]. Laser & Photonics Reviews, 2009, 3(3): 301-313.

- [9] SUN S, XU M, HE M, et al. Folded heterogeneous silicon and lithium niobate Mach-Zehnder modulators with low drive voltage[J]. Micromachines, 2021, 12(7): 823-830.
- [10] HUANG X, LIU Y, LI Z, et al. High-performance and compact integrated photonics platform based on silicon rich nitride-lithium niobate on insulator[J]. APL Photonics, 2021, 6(11): 116102-1-116102-8.
- [11] CAI J, GUO C, LU C, et al. Design optimization of silicon and lithium niobate hybrid integrated traveling-wave Mach-Zehnder modulator[J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13(4): 1-6.
- [12] CHENG W, MIAN Z, CHEN X, et al. Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltages[J]. Nature, 2018, 562(7725): 101-104.
- [13] KHAREL P, REIMER C, LUKE K, et al. Breaking voltage-bandwidth limits in integrated lithium niobate modulators using micro-structured electrodes[J]. Optica, 2021, 8(3): 357-363.
- [14] 刘学成,熊兵,孙长征,等. Wideband thin-film lithium niobate modulator with low half-wave-voltage length product[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(6): 85-90.
- [15] HE M, XU M, REN Y, et al. High-performance hybrid silicon and lithium niobate Mach-Zehnder modulators for 100 Gbit·s⁻¹ and beyond[J]. Nature Photonics, 2019, 13(5): 359-364.
- [16] CHEN X, LI H, ZHANG K, et al. Thin-film lithium niobate modulators with angled electrodes for improved modulation efficiency[C]//IEEE. Proceedings of 2023 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC). Shanghai: IEEE, 2023: 1-5.
- [17] HUANG X, LIU Y, TU D, et al. Linearity-enhanced dual-parallel Mach-Zehnder modulators based on a thin-film lithium niobate platform[J]. Photonics, 2022, 9(3): 197-1-197-9.
- [18] LI Y, LAN T, YANG D, et al. High-performance Mach-Zehnder modulator based on thin-film lithium niobate with low voltage-length product[J]. ACS Omega, 2023, 8(10): 9644-9651.
- [19] CHEN N, LOU K, YU Y, et al. High-efficiency electro-optic modulator on thin-film lithium niobate with high-permittivity cladding[J]. Laser & Photonics Reviews, 2023, 17(11): 2200927-1-2200927-8.
- [20] ALAM A S, AITCHISON J S. Optimization of a broadband lithium niobate-barium titanate hybrid modulator with low half-wave-voltage-length product[J]. IEEE Photonics Journal, 2023, 15(6): 1-7.
- [21] HUANG X, LIU Y, LI Z, et al. Advanced electrode design for low-voltage high-speed thin-film lithium niobate modulators[J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13(2): 1-9.
- [22] LIU X, XIONG B, SUN C, et al. Sub-terahertz bandwidth capacitively-loaded thin-film lithium niobate electro-optic modulators based on an undercut structure[J]. Optics Express, 2021, 29(25): 41798-41807.
- [23] LIU Y, LI H, LIU J, et al. Low V_π thin-film lithium niobate modulator fabricated with photolithography[J]. Optics Express, 2021, 29(5): 6320-6329.