引用本文:钟闯洋,宋树祥,尹怡辉,等.实现超低半波电压长度积的薄膜铌酸锂电光调制器技术研究[J].光通信技术,2026,50(5):28-33.

实现超低半波电压长度积的薄膜铌酸锂电光调制器技术研究

钟闯洋[1,2,3],宋树祥[1,2*],尹怡辉[3],陈光润[1,2,3],李翰宇[3]

(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 广西高校光电信息技术工程研究中心,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:为了降低调制器的半波电压长度积,提出了一种基于狭缝波导的薄膜铌酸锂(TFLN)电光调制器。该调制器的核心调制区采用了一种新型波导结构,通过在TFLN中集成双硅纳米线形成狭缝波导,而非传统的铌酸锂脊波导或无刻蚀波导设计。在此基础上,对狭缝波导进行刻穿处理,采用交错式T电极加下沉式双电容结构,并将钛酸钡高介电常数层嵌入TFLN波导与金属电极之间。通过有限元分析软件进行建模并仿真,本文设计的电光调制器的电光调制带宽大于60 GHz、光吸收损耗小于0.07 dB/cm,半波电压长度积仅为0.59 V·cm。

关键词:光芯片;电光调制器;薄膜铌酸锂;狭缝波导;交错电极

中图分类号:TN256　**文献标志码:**A　**文章编号:**1002-5561(2026)05-0028-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.05.005

Ultra-low half-wave voltage-length product in thin-film lithium niobate electro-optic modulators

ZHONG Chuangyang[1,2,3],SONG Shuxiang[1,2*],YIN Yihui[3],CHENG Guangrun[1,2,3],LI Hanyu[3]

(1. School of Electronics and Information Engineering, Guangxi Normal University, Guilin Guangxi, 541004 China;
2. Guangxi Colleges and Universities Engineering Research Center of Optoelectronic Information Technology,
Guangxi Normal University, Guilin Guangxi, 541004, China; 3. The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi, 541004, China)

Abstract: To reduce the half-wave voltage-length product of the modulator, a thin-film lithium niobate (TFLN) electro-optic modulator based on a slot waveguide is proposed. The core modulation region of the modulator adopts a novel waveguide structure: a slot waveguide is formed by integrating dual silicon nanowires in the TFLN, rather than using the conventional lithium niobate ridge waveguide or unetched waveguide design. On this basis, the slot waveguide is etched through, an interdigitated T-electrode with a recessed dual-capacitor structure is adopted, and a high-permittivity barium titanate layer is embedded between the TFLN waveguide and the metal electrodes. Through modeling and simulation using finite-element analysis software, the electro-optic modulator designed in this study can achieve an electro-optic modulation bandwidth greater than 60 GHz, an optical absorption loss of less than 0.07 dB/cm, and a half-wave voltage-length product of only 0.59 V·cm.

Key words: photonic chip, electro-optic modulator, thin-film lithium niobate, slotted waveguide, interdigital electrodes

0 引言

电光调制器作为光通信系统核心器件,通过外加电场调制材料折射率,从而控制光波导中光信号的传输[1]。过去几十年间,研究人员开发了多种电光材料平台,包括绝缘体上硅(SOI)[2-3]、磷酸铟(InP)[4-5],硅有机混合物[6],硅锗(SiGe)[7]以及薄膜铌酸锂(TFLN)[8-10]等。其中,TFLN凭借其巨大的线性泡克尔斯效应和低光学损耗,被视为下一代高速调制的理想平台。TFLN-马赫-曾德尔调制器(TFLN-MZM)在半波电压、工作带宽以及集成度方面较传统器件实现了显著提升。半波电压长度积是衡量调制器综合性能的重要指标,它能有效消除尺寸变量的影响,客观反映调制效率,为器件设计的优化提供重要依据。较低的半波电压长

收稿日期:2025-08-01。

基金项目:广西重点研发计划项目(桂科AB25069463)资助;广西科技计划项目(桂科AD24010060)资助;桂林市重大专项计划项目(20220101)资助。

作者简介:钟闯洋(2000—),男,硕士研究生,现就读于广西师范大学电子与信息工程学院/集成电路学院。主要研究方向为高速低耗TFLN电光调制器。

***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。



度积不仅意味着器件结构更加紧凑,还有助于实现更高的工作带宽。

近年来,TFLN调制器性能不断取得突破。2022年,中山大学蔡鑫纶团队[11]在TFLN平台上首次实现了双偏振同相-正交(IQ)调制器,其半波电压仅为1 V,3 dB电光带宽超过110 GHz,在1.04 fJ/bit的电功耗下实现了单载波1.96 Tb/s的净比特速率。2023年,该团队[12]进一步提出了双极化同相正交(DP-IQ)TFLN调制器,在保持1 V低半波电压的同时,将占位面积缩小至4×8 mm^2。2024年,华中科技大学团队[13]提出并演示了一种基于TFLN平台的集成微波光子边带选择器,该器件集成了MZM与热光可调谐平顶微环滤波器,兼具宽带射频信号的电光调制与边带选择功能,支持高达40 GHz的射频信号处理,并对无用边带实现了超过25 dB的有效抑制。

尽管上述研究在提升调制器性能方面取得了显著进展,但其半波电压长度积仍有进一步优化的空间。因此,本文提出一种基于狭缝结构的TFLN电光调制器,旨在实现超低的半波电压长度积。

1 结构设计与原理

1.1 调制区结构

本文设计的TFLN电光调制器采用了混合集成狭缝波导结构,与传统基于纯铌酸锂(LN)脊形或条形波导的调制器不同,该结构通过在Si纳米线与LN薄膜之间引入高电光系数的钛酸钡(BTO)层,形成亚波长尺度的狭缝间隙,从而将光模场强烈压缩在狭缝区域内,显著提升电场与光场的重叠因子。图1为狭缝波导TFLN调制器的俯视图。器件基于600 nm厚切TFLN平台构建,Si衬底,厚度为200 μm、SiO_2为缓冲层,厚度为4.7 μm。调制区核心由Si核层、BTO中间层与LN包层复合构成狭缝波导,上方覆盖1.7 μm厚的Au电极,图中G为电极间隔,W_{sig}为信号电极宽度,W_{slot}为狭缝间隙宽度,h_{Si}为Si纳米线厚度。

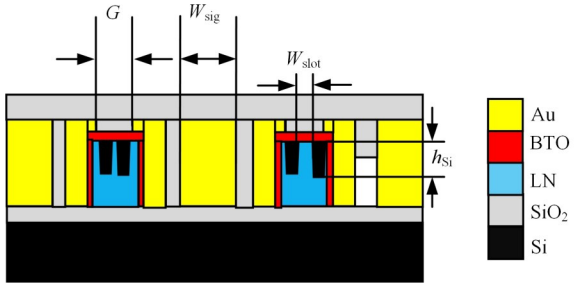


图1 狭缝波导TFLN调制器的俯视图

相较于传统结构中光场主要分布在LN体内且电场穿透深度有限,本结构利用狭缝效应使光场高度局域于高电场强度的狭缝间隙,从而在更低驱动电压下实现高效相位调制。

在本文提出的电光调制器中,光信号经耦合器进入波导,由多模干涉(MMI)功分器均分为2束,分别在Si纳米线间的狭缝中传输,最后经MMI合束干涉。输出光强随驱动电压呈周期性变化,从而将射频信号加载到光载波上,完成调制。在此过程中,外加电场通过改变LN与BTO的有效折射率实现光相位调控。电极采用推挽式结构,在间隙处形成幅值相等、方向相反的对称电场,使两调制臂产生等幅反相的相位调制。该设计可在保持相同相位调制量的前提下,将半波电压降低约50%,显著提升调制效率。

1.2 半波电压长度积的计算方法

当波导结构确定时,半波电压V_π与传输的长度L成反比,越小的半波电压长度积代表着该调制区结构的调制器能够在相同的传输长度实现小的V_π或在更小的传输长度实现相同的V_π。半波电压长度积$V_\pi L$表达式[14]为

$$V_\pi L = \frac{\lambda}{2n_e^3 \gamma_{33} \Gamma} \tag{1}$$

式中:n_e为X切铌酸锂晶体的非寻常折射率,γ_{33}为LN电光系数张量,λ为输入光波的模式波长,Γ为电光重叠因子,其表达式为

$$\Gamma = \frac{\iint_{S_{LN}} E_z(x,\ z) V^{-1} |e_z(x,\ z)|^2 \mathrm{d}x\mathrm{d}z}{\iint_{S} |e_z(x,\ z)|^2 \mathrm{d}x\mathrm{d}z} \tag{2}$$

式中:$E_z(x,z)$是LN波导部分的电场,$e_z(x,\ z)$是TE模式的光场,S_{LN}为LN部分的截面,S为整个调制区的截面,本文采用1 550 nm波长的模式光波。

$V_\pi L$越小,电光效率越高,由式(1)可知,当波导、材料和输入光波长都选定后,$V_\pi L$就只与电光重叠因子Γ呈负相关。而Γ与电极间隔G、波导中电场强度等有关。当G减小时,Γ增大,$V_\pi L$会减少,这是增大电光效率最直接的方法。然而,单纯减小G存在显著局限性,G缩小后光吸收损耗会迅速增大,从而令光电带宽减小。因此,要想在降低$V_\pi L$的同时不影响带宽,最好采用提高波导部分的电场强度$E_z(x,y)$来优化Γ的策略。

本文采用狭缝波导结构、高介电常数包层以及双电容T型电极共同作用来提高波导中电场强度,尽量做到在提高电光效率的同时不影响带宽。

1.3 波导结构的改造

为提高Γ并降低$V_\pi L$,首要策略是优化波导结构。本文采用狭缝波导,相较于传统脊形波导,其具有更强的光场束缚能力,从而显著提升Γ。狭缝波导由2条高折射率Si纳米线及其间的低折射率间隙构成,中间隙填充材料为TFLN。

根据电磁场边界条件,当介质界面处无自由电荷时,垂直于界面的电位移矢量D保持连续,而电场强度E则因介电常数差异发生突变,满足关系式$D=\varepsilon E=n^2E$[15](式中ε为材料的相对介电常数,n为折射率),由此可得狭缝区域与Si纳米线区域的电场强度关系为$E_l/E_H=n_H^2/n_l^2$,其中,l表示狭缝(材料为TFLN),H表示两侧的Si纳米线。由于Si的折射率n_H远高于LN的折射率n_l,狭缝内的电场强度E_l将远高于Si纳米线内的电场E_H,而E_H与相同G下传统脊波导的电场强度一致,因此狭缝波导中的电场强度较脊波导电场强度高。

除此之外,在波导外加高介电常数包层也能进一步增大波导内部电场,由于波导与包层交界处同样不存在电荷,电位移矢量D仍然是连续的,因此$\varepsilon_lE_l=\varepsilon_BE_B$,其中,B表示上方的包层。则可以通过提高$\varepsilon_B/\varepsilon_l$的值来提高波导内部电场$E_l$,由于波导材料已确定为LN,包层可以采用高介电常数的材料。

本文通过以高介电材料BTO包层($\varepsilon\approx18$)替代传统SiO_2包层($\varepsilon\approx3.9$),可以令LN波导内的电场强度大大提高,最终达到降低$V_\pi L$的目标。

1.4 电极结构的改造

狭缝波导的设计虽然能提高Γ,但其光群折射率过高(约为2.8)。若使用普通电极,速度匹配将难以完成。为了速度匹配,本文采用T分段交错电极(下文简称T电极)。

T电极通过分段设计减少电流在狭窄间隙处的聚集,均匀分布电流以降低欧姆损耗,最终能在提高带宽的同时还能维持小电极间隔G(3 μm)的高调制效率[16]。但是,T电极的存在相当于增加了额外电容,使得微波折射率提高,从而令光的群速度与微波相速度的匹配难以完成。一般设计采取使用石英基底或者空气基底来解决这个问题,T电极在石英基板上优化了射频折射率(约为2.2),与常规LN脊波导的光群折射率(约为2.2)精准匹配。但是,因缺乏高折射率基底,总插入损耗较大。本文使用了光群折射率较高(约为2.82)的狭缝波导,通过优化电极参数,解决了速度失配问题。有限元仿真(HFSS)结果表明,T电极的3 dB带宽可达60 GHz。

在T电极上额外增加电容可以有效地增强光电调制效率[17],实现原理为:由于电流拥挤效应的存在,当电流流经T电极的双电容部分时,电流密度会显著增大,使得电场集中,从而增大LN波导内部的电场强度,最终达到降低$V_\pi L$的目的。

普通对称T电极之间会出现间隔,因为在传输方向上导体间距不断变化,出现调制电压下先降低后提高的周期性现象,这种现象会使间隔处的调制效率低于非间隔处调制。因此,本文采用交错电极,交错电极可以在一定程度上可以减小这种影响,令电光调制曲线更加平滑。另外,本文使用HFSS软件对狭缝波导和脊波导进行仿真分析对比,结果表明,狭缝波导相较于脊波导更适合高介电常数包层,这也是本文研究的优势之一。

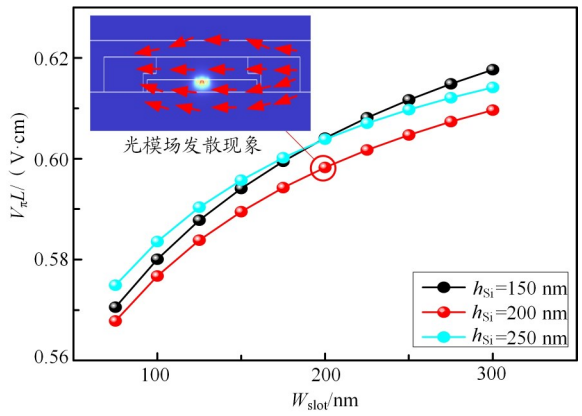
2 仿真与优化分析

2.1 $V_\pi L$的仿真优化

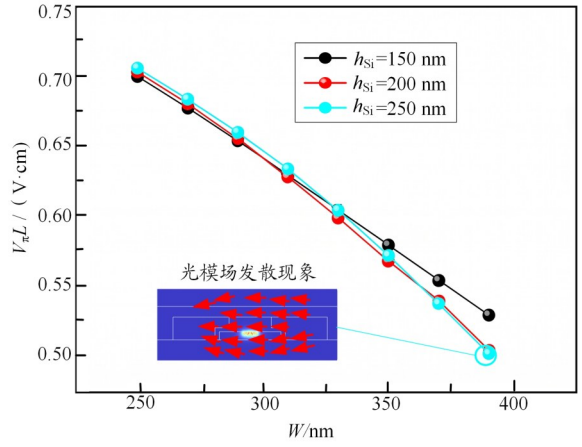
本文采用HFSS软件对调制器结构进行建模与优化分析,重点研究了$V_\pi L$这一核心性能指标。仿真结果表明,$V_\pi L$主要受Si纳米线厚度h_{Si}、顶部宽度W以及狭缝宽度W_{slot}3个关键结构参数影响。将电极间隔G固定为3 μm、电极厚度h_{au}设为1.7 μm,分析各结构参数的最优取值。

图2为不同Si纳米线厚度h_{Si}下,$V_\pi L$随狭缝宽度W_{slot}、Si纳米线顶部宽度W变化的关系图。由图2(a)可知,随着W_{slot}减小,$V_\pi L$呈单调下降趋势,$V_\pi L$最低可达0.57 V·cm(W_{slot}约为80 nm)。图2(b)表明,增大Si纳米线顶部宽度W同样能降低$V_\pi L$,$V_\pi L$最低值可达0.51 V·cm。然而,过大的W与h_{Si}会削弱光模场约束能力,导致出现明显的光模场发散现象(如图2中插图所示)。综合权衡调制效率与光场局域性,最终选定优化参数W_{slot}为200 nm,h_{Si}为200 nm,W为330 nm。该参数组合下$V_\pi L$为0.59 V·cm,同时保持了较小的光模场面积。

电极间隔G对于调制效率起着决定性作用。本文采用HFSS软件参数化分析电极间隔G对于$V_\pi L$与光吸收损耗的影响,仿真结果如图3所示。可以看出,$V_\pi L$随G增大呈线性增长趋势,而光吸收损耗在G偏小时较高,随G增大迅速下降并在G>4 μm后趋于平缓,表明G=3 μm附近存在调制效率与损耗的最佳权衡点。尽管减小G可提升Γ,但G过小会加剧金属电极对光模场的吸收效应,导致传播损耗显著增加。因此,实际设计需在调制效率与光吸收损耗之间进行权衡。鉴于本文旨在实现高电光效率调制,最终选取电极间隔为3 μm。仿真结果表明,该尺寸下的光吸收损耗仅为0.066 dB/cm,仍处于较低水平,可有效兼顾高效率与低损耗需求。



(a) $V_\pi L$随W_{slot}变化的关系图



(b) $V_\pi L$随W变化的关系图

图2 不同Si波导厚度h_{Si}下,$V_\pi L$随W_{slot}、W变化的关系图

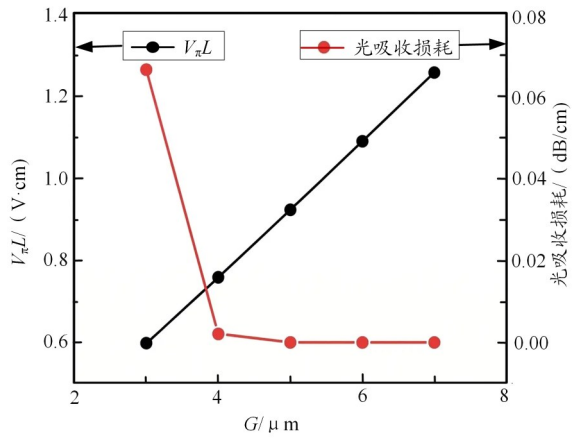


图3 $V_\pi L$随电极间隔G变化仿真图

2.2 调制器3 dB带宽的参数优化

在实现低半波电压设计的同时,需确保调制带宽满足高速通信应用需求。电极设计的首要步骤是确定信号电极宽度,本文采用HFSS软件对不同信号电极宽度W_{sig}下的特征阻抗进行参数扫描,结果如图4所示。可以看出,特征阻抗随W_{sig}增加而单调递减;当W_{sig}为55 μm时,特征阻抗最接近标准50 Ω。因此,本文确定W_{sig}为55 μm,以实现与射频源及负载的阻抗匹配,从而最大限度地减少信号反射并保障调制带宽。

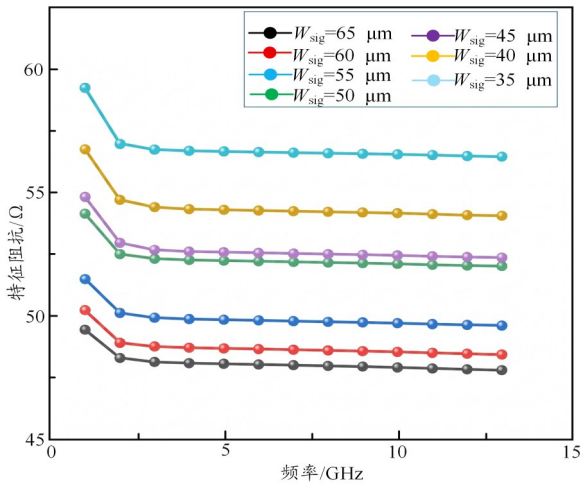


图4 W_{sig}对特征阻抗的影响图

在TFLN调制器设计中,T形电极的占空比对微波传输特性影响显著,其优化设计对实现微波相速度与光波群速度的匹配至关重要,可有效抑制速度失配引起的带宽限制。过小的占空比会增加光刻对准难度,而过大的占空比则因金属邻近效应加剧光吸收损耗。因此,必须在调制器性能、光损耗与工艺可行性之间寻求平衡,这对实现高性能电光调制至关重要。本文通过微调T形电极的几何参数实现速度匹配,利用HFSS扫描T电极各项参数并计算最优占空比[18],得到微波折射率随占空比的变化图如图5所示。可以看出,当占空比为0.56时,微波折射率约为2.82,与狭缝波导的光群折射率实现精准匹配。将优化后的结构参数代入模型进行频域仿真,得到调制器的电光响应特性曲线如图6所示。由于微波折射率与光群折射率匹配时,行波电极的6.41 dB的电学带宽(S21)即等效于调制器的3 dB电光带宽[19],由此可知,图6中3 dB电光带宽达到了60 GHz左右,显著改善了高速调制性能,而常规狭缝波导调制器仅为40 GHz左右[15]。

3 性能对比

本文将所提出的调制器与其他几种典型调制器的性能进行对比,结果如表1所示。可以看出,本文所提调制器在实现超低$V_\pi L$的同时保持60 GHz左右的带宽,综合对比各项指标,本文设计的调制器在目前典型TELN调制器中性能处于较高水平。

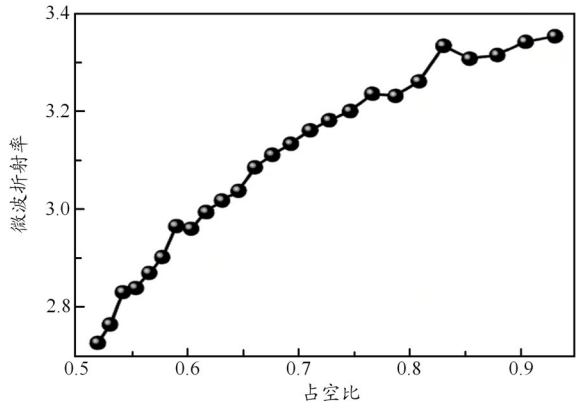


图5 微波折射率随占空比的变化图

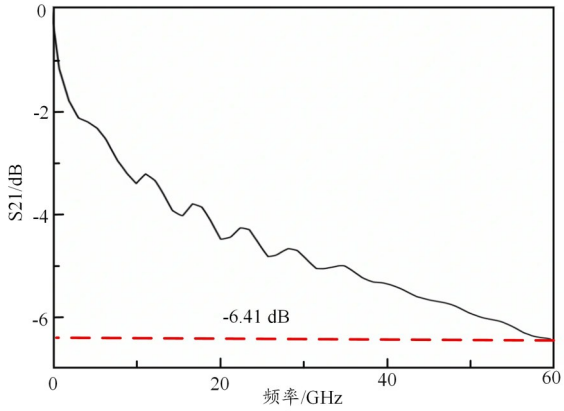


图6 调制器的电光响应特性曲线

表1 几种调制器性能对比

时间,单位	调制器类别	$V_\pi L$/(V·cm)	3 dB带宽/GHz
2018年,哈佛大学[20]	高速TELN MZM	2.2	100
2019年,中山大学[21]	SOI上的TELN MZM	2.2	70
2021年,Hyper Light公司[22]	微结构行波电极的TELN调制器	2.3	50
2022年,Forrest Valdez等人[23]	底层SI波导的TELN调制器	3.1	110
2022年,浙江大学[24]	下刻蚀的TELN调制器	2.2	67
2023年,华中科技大学[25]	折叠式TFLN调制器	1.85	65
2024年,华中科技大学[26]	TCO薄膜与金电极的复合结构的TFLN电光调制器	1.02	108
2025年,广西师范大学	本文所提调制器	0.59	60

4 结束语

本文提出一种基于狭缝波导的TFLN电光调制器,通过在TFLN波导与金属电极间引入高介电常数包层,有效突破了光损耗、调制效率与电光带宽三者间的权衡限制。结果表明,该调制器在保持光吸收损耗低于0.07 dB/cm的同时,实现了0.59 V·cm的超低半波电压长度积,调制效率较传统调制器显著提升。本文的设计为进一步降低TELN调制器的半波电压长度积、推动光芯片系统的高密度集成提供了新思路。

参考文献:

[1] Reed G T, Mashanovich G, Gardes F Y, et al. Silicon optical mod- ulators[J]. Nature Photonics, 2010, 4: 518-526 .

[2] Zhou Jianying, Wang Jian, Zhu Likai, et al. High baud rate all-silicon photonics carrier depletion modulators[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 38(2): 272-281.

[3] Xu Hao, Xiao Xi, Li Xianyao. High speed silicon Mach-Zehnder modulator based on interleaved PN junctions[J]. Optics Express, 2012, 20: 15093-15099.

[4] Ogiso Y, Ozaki J, Ueda Y. 80 GHz bandwidth and 1.5 V V_π InP-based IQ modulator [J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38: 249-255.

[5] Lange S, Wolf S, Lutz J. 100 gbd intensity modulation and direct detection with an InP-based monolithic DFB laser Mach-Zehnder modulator [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36: 97-102.

[6] Wolf S, Wickel H Z, Kieninger C. Coherent modulation up to 100 GBd 16QAM using silicon-organic hybrid (SOH) devices[J]. Optics Express, 2018, 26: 220-232.

[7] Mastronardi L, Banakar M, Khokhar A Z. High-speed Si/GeSi hetero-structure electro absorption modulator [J]. Optics Express, 2018: 26: 6663-6673.

[8] Xu Mengyue, Chen Wenjun, He Mingbo. Michelson interferometer modulator based on hybrid silicon and lithium niobate platform [J]. APL Photonics, 2019, 4 (10): 100802.

[9] Weigel P O, Zhao Jie, Fang K. Bonded thin film lithium niobate modulator on a silicon photonics platform exceeding 100 GHz 3 dB electrical modulation bandwidth [J]. Optics Express, 2018, 26: 23728-23739.

[10] Rao A, Patil A, Rabiei P. High-performance and linear thin-film lithium niobate Mach-Zehnder modulators on silicon up to 50 GHz[J]. Optics Letters, 2016, 41: 5700-5703.

[11] Xu Mengyue, Zhu Yuntao, Pittalà F, et al. Dual-polarization thin-film lithium niobate in-phase quadrature modulators for terabit-per-second transmission[J]. Optica, 2022, 9(1): 61-62.

[12] Xu Mengyue. Zlators using air-bridge structures[J]. APL Photonics, 2023, 8(6): 22-25.

[13] Ding Yuedi, Shang Chenglin, Yu Wenqi, et al. Microwave photonic

sideband selector based on thin-film lithium niobate platform[J]. Chinese Optics Letters,2024, 22(3):031304.
[14] Li Ying, Lan Tian, Yang Dengcai, 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.
[15] 李晓蔚.基于狭缝波导的薄膜铌酸锂电光调制器研究[D].无锡:江南大学,2022.
[16] 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.
[17] 李海盛.薄膜铌酸锂电光调制器的高调制效率性能关键技术研究[D].桂林:广西师范大学,2025.
[18] 姜冲.铌酸锂调制器的电极设计[D].北京:北京邮电大学,2022.
[19] 刘晔.高速薄膜铌酸锂Mach-Zehnder调制器的研究[D].武汉:华中科技大学,2021.
[20] Wang Cheng, Zhang Mian, Chen Xinan, et al. Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltages[J]. Nature,2018,562:101-104.
[21] He Mengjie, Xu Mei, Ren Yiwei, et al. High-performance hybrid silicon and lithium niobate Mach-Zehnder modulators for 100 Gbits^{-1} and beyond[J]. Nature Photonics,2019,13(5):359-364.
[22] Kharel P, Reimer C, Luke K, et al. Breaking voltag-bandwidth limits in integrated lithium niobate modulators using micro-structured electrodes [J]. Optica,2021,8(3):357-363.
[23] Chen Gengxin, Chen Kaixuan, Gan Ranfeng, et al. High performance thin-film lithium niobate modulator on a silicon substrate using periodic capacitively loaded traveling-wave electrode[J]. APL Photonics, 2022, 7(2):50-56.
[24] Chen Gengxin, Chen Kaixuan, et al. High performance thin-film lithium niobate modulator on a silicon substrate using periodic capacitively loaded traveling-wave electrode[J]. APL Photonics,2022,7(2):88-100.
[25] Li Heng, Tang Yongqian, Chen Quanan, et al. Compact thin-film lithium niobate modulators using slotted coplanar waveguide electrode suitable for high-volume fabrication[J]. Journal of Physics D: Applied Physics,2023,56(15):154001.
[26] Meng Xiangyu, Yuan Can, Cheng Xingran, et al. Thin-film lithium niobate modulators with ultra-high modulation efficiency[J]. Laser & Photonics Reviews,2024,19(1):2400809.