文章编号：1007 - 4252(2024) 05 - 0005 - 267　　DOI：10.20027/j.gncq.2024.0040

基于柔性衬底 PDMS 的钛酸钡电光调制器

易潇源，朱敏敏*
(福州大学物理与信息工程学院，福州 350108)

摘要：电光调制器是光通信链路的核心组件，因此，开发低半波电压、大调制带宽、低损耗且成本低的电光调制器是当前光通信系统研究的重点任务。目前，铌酸锂是调制器系统的主要材料，但由于其电光系数较低，器件性能难以进一步提升。钛酸钡作为电光系数比铌酸锂高 30 多倍的铁电材料，在电光调制器的研究中具有重要意义。本文通过 COMSOL、Lumerical 和 HFSS 软件对钛酸钡调制器的光学和射频参数进行了系统的仿真、计算与优化，最终设计出一种半波电压长度积为 0.196 V·cm、器件长度为 1 mm、-3 dB 调制带宽超过 400 GHz 的钛酸钡电光调制器。本研究展示了该调制器在低驱动电压和高性能光通信系统中的应用潜力。

关键词：光通信；钛酸钡；电光调制器
中图分类号： TN761　　**文献标志码：** A

Barium titanate electro-optical modulator based on flexible substrate PDMS

YI Xiaoyuan，ZHU Minmin*
(College of Physics and Information Engineering，Fuzhou University，Fuzhou 350108，China)

Abstract: Electro-optical modulators are the core of optical communication links，and the pursuit of modulators with low half-wave voltages，large modulation bandwidths，low losses，and low fabrication costs remains the primary focus of modern optical communication system research. Currently，lithium niobate (LN) is the dominant material for modulator systems，but due to its low electro-optical coefficient，further improvement of device performance is challenging. Barium titanate (BTO) ，with an electro-optical coefficient more than 30 times that of LN，is a ferroelectric material of great significance for the study of electro-optical modulators. In this work，we systematically simulate，calculate，and optimize the optical and RF parameters of the BTO modulator using COMSOL，Lumerical，and HFSS software. The result is a BTO electro-optic modulator with a half-wave voltage-length product of 0.196 V·cm and a -3 dB modulation bandwidth exceeding 400 GHz at a device length of 1 mm. Overall，our study highlights the potential of the proposed modulator for low-drive-voltage，high-performance optical communication systems.

收稿日期： 2024-09-21；　**修订日期：** 2024-10-12
基金项目：福建省科技厅对外合作重点项目(No. 2022I0006) .
作者简介：易潇源(2000—) ，男，硕士研究生，主要研究方向为电光调制器(E-mail：221127112@ fzu.edu.cn) .
通信作者：朱敏敏(1980—) ，男，博士，教授，主要研究方向为半导体微纳电光器件与集成电路(E-mail：mmzhu@ fzu.edu.cn) .

Key words: Optical communication; Barium titanate; Electro-optical modulator

0 引言

随着互联网、物联网、大数据和人工智能的快速发展,信息的存储和传输成为信息时代的关键。光通信凭借其容量大、速度快、保密性高、功耗低等优点,早已取代了电信号传输。由于人们对数据传输速率和容量的不断追求,光通信产业蓬勃发展,各类新型光电器件和传输系统也在不断进步[1,2]。在光通信系统中,电光调制器是决定数据传输速率和容量的关键器件。其主要功能是将高频微波电信号转换为高速数字脉冲光信号,是光通信系统发射机的核心部件,也是制约光通信速率的瓶颈之一[3]。因此,研发高性能电光调制器是推动高速光网络通信系统发展的关键环节。同时,研究具备高稳定性、高抗干扰性、大信息量、体积小、重量轻的新型电光材料也是必须解决的瓶颈问题。根据所用材料的不同,电光调制器主要分为聚合物电光调制器、半导体电吸收调制器和铁电晶体电光调制器。近二十年来,这些调制器得到了广泛的研究和发展[4-6]。电光调制主要基于电光效应,而电光系数是影响电光调制效率的重要因素之一。铁电氧化物因其优异的光学特性,尤其是强大的电光效应,长期以来被用于光通信系统的信号处理。

钛酸钡($BaTiO_3$/BTO)铁电薄膜是最早发现的铁电材料之一。随着光通信技术的迅速发展,它因电光系数高、大双折射率、在可见光和近红外波段光损耗低且稳定性强,有望应用于大规模光电集成电路中。同时,BTO 与大直径硅片的制造相容性及其良好的化学稳定性,使其能够融入可扩展的大规模商业化硅光子平台,具备优异的性能和可靠性指标,已被广泛研究[7-11]。尽管许多铁电氧化物具有较大的线性电光(Pockels)系数,BTO 是块状晶体中 Pockels 效应最强的材料之一,其 Pockels 系数约为 1300 pm/V,是铌酸锂的 30 多倍[12]。基于这些特性,$BaTiO_3$在铁电氧化物中表现出色。BTO 薄膜电光调制器是一种利用 BTO 材料的电光效应进行光信号调制的器件。通过改变电场引起材料折射率的变化,该调制器能够调制光的相位或强度,具有调制速度快、大带宽、低损耗等优点,能够满足高速光通信系统对光调制器的需求[13-17]。本文基于仿真对 BTO 薄膜电光调制器的结构进行了深入分析和优化设计,这对该类器件的研究具有重要意义。

1 调制器结构设计与方法

该结构由 BTO 薄膜与柔性衬底聚二甲基硅氧烷(PDMS)层组合而成。具体工艺流程如下:首先,利用脉冲激光沉积(PLD)技术在钛酸锶(STO)衬底上生长一层具有水溶性的铝酸锶(SAO)薄膜,然后在其上生长一层 BTO。接着,在样品顶部附上 PDMS 作为支撑层。由于 SAO 的水溶性,将制备好的样品浸入水中,BTO 与底部的 STO 分离,留下 PDMS 和 BTO 作为新的样品。随后,利用光刻和刻蚀工艺制备波导和电极,并在最后沉积一层二氧化硅(SiO_2)。如图 1(a)和 1(b)所示,其中,BTO 的厚度为 300 nm,脊的宽度和高度分别为 1 μm 和 150 nm,电极厚度为 700 nm,电极间距为 5 μm,上盖层 SiO_2的厚度为 600 nm。Mach-Zehnder modulators(MZM)结构由两路波导和共面电极组成,BTO 波导位于 GSG 电极结构中,实现了推挽调制,即两个调制臂的调制电压或电场相反,从而在相同调制电压下实现双倍相位差,降低调制器的半波电压。表 1 列出了后续仿真中所使用材料的折射率、介电常数和电光系数。

表 1 所有材料的折射率、介电常数和电光系数

Table1 The refractive index, dielectric constant and electro-optical coefficient of all materials

材料	折射率	介电常数	电光系数(pm/V)
BTO	$n_o = 2.38$ $n_e = 2.31$ [12]	$\varepsilon_{11} = 3600$ $\varepsilon_{33} = 135$ [12]	$r_{51} = 1300$ [12]
PDMS	1.4	2.67	
SiO_2	1.45	3.8	

本文使用商业软件 COMSOL Multiphysics 对调制器的电场分布、单模条件以及光场分布进行了有限元模拟;同时,利用高频结构模拟器(HFSS)对器件的特征阻抗、微波损耗和微波折射率进行了仿真分析。在这两个模拟软件中,网格划分是仿真过程中至关重要的步骤,它直接影响数值解的精度、计算速度以及数值解的稳定收敛性。因此,仿真时需根据具体情况选择合适的网格划分策略。在 COMSOL

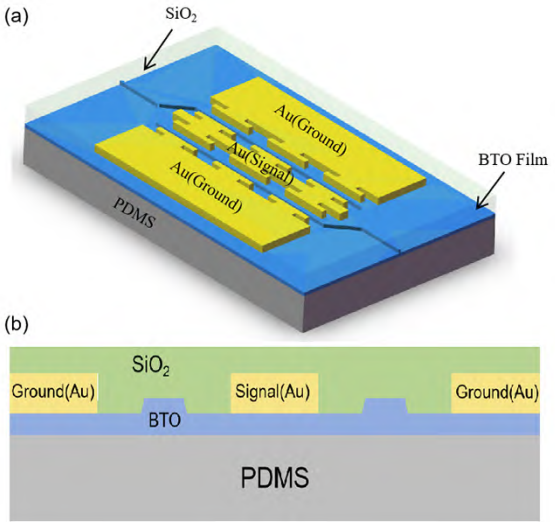

图 1　(a) BTO 的 MZM 示意图; (b) MZM 的截面示意图

Fig. 1 (a) Schematic of the MZM of the BTO; (b) Schematic of the cross section of the MZM

中,最大单元大小设置为 2 μm,最小单元大小设置为 0.003 μm。对于 HFSS,则通过逐步减小计算网格进行迭代,当迭代次数超过预设值 N,或两次迭代计算结果的差值小于 ΔS 时,认为计算结果已收敛。本文设置 N 为 20,ΔS 为 0.05,以确保获得较为准确的计算结果。

2　$BaTiO_3$ 电光调制器的仿真与分析

2.1　调制器光学参数的仿真与优化

为了评估调制区域的电光性能,我们使用 COMSOL Multiphysics 软件对调制器的调制区域进行了仿真分析。首先,在 1550 nm 波长下,模拟了横向电(TE)模式下的光场和电极的静电场分布,如图 2 所示。由图 2(a)可以看出,光很好地限制在了 BTO 脊波导中。图 2(b)显示电场与波导有明显的重叠,这表明实现对传输至调制臂的光学模式进行高效相位调制是可行的。

此外,为了制造高性能的 BTO 电光调制器,我们需要设计一种低损耗的单模 BTO 波导。首先,将脊波导的高度固定为 150 nm,此时 BTO 调制器的损耗和半波电压长度积较低,具体分析见图 5。图 3 显示了不同横向电(TE)和横向磁(TM)模式下,有效折射率与脊宽的关系。从图 3 可以看出,有效折射率随着脊宽的增加而增加。当脊宽小于 1 μm

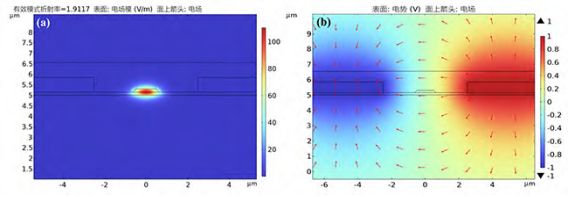

图 2　(a) 光场分布图; (b) 静电场分布图

Fig. 2 (a) Light field distribution; (b) electrostatic field distribution

时,基本只有 TE_0 和 TM_0 两种基模模式,这说明光很好地限制在波导区域内; 而当脊宽超过 1 μm 时,逐渐出现多种模式,包括 TE_1、TE_2、TM_1、TM_2,这会导致波导区域发生较大的模式泄露。因此,为了获得较高调制效率的 BTO 调制器,波导脊宽应尽可能减小,以利于单模波导的传输。结合我们的刻蚀工艺,波导宽度最终选定为 1 μm。

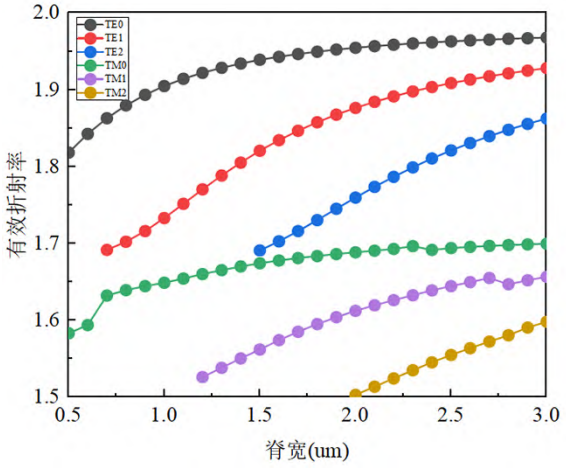

图 3　三种 TE、TM 模式的有效折射率与脊宽的关系

Fig. 3 Effective refractive index versus ridge width for three TE and TM modes

由麦克斯韦方程($D=\varepsilon E$)可知,不同材料交界处的电位移矢量 D 是连续的,而电场 E 则不连续。当波导光刻刻蚀完成后,若未沉积一层 SiO_2,上盖层为空气时,由于空气的相对介电常数为 1,而 BTO 的相对介电常数在不同方向上分别为 3600 和 135,因此,当电场从低相对介电常数的空气进入到高相对介电常数的 BTO 时,电场将会显著衰减。然而,若沉积一层相对介电常数为 3.8 的 SiO_2,上盖层则能够相对减小这种衰减。

因此可以推测,不同上盖层对波导中心的电场

强度会产生一定影响。图 4(a) 显示了在上盖层分别为空气和二氧化硅时,不同电极间距下波导中心的电场强度。由图可见,在相同刻蚀高度下,随着电极间距的增大,波导中心的电场强度显著降低,但二氧化硅上盖层能够有效提升波导中心的电场强度。图 4(b) 显示了在上盖层分别为空气和二氧化硅时,不同电极间距下器件的电光重叠积分 Γ 值。可以看出,随着电极间距的增大,器件的 Γ 值显著降低,且相比二氧化硅上盖层,空气上盖层的 Γ 值下降更为明显。根据公式 (1) ,Γ 值与半波电压长度积成反比,因此在 BTO 波导和 Au 电极制备后沉积一层二氧化硅上盖层有助于减小半波电压长度积,从而提升调制器的性能。

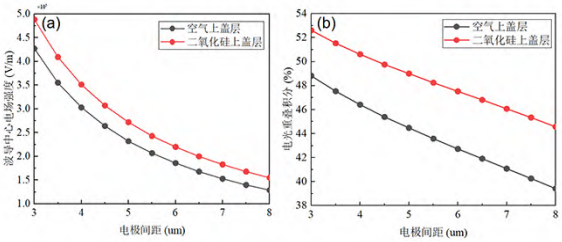

图 4 不同电极间距时(a) 波导中心的电场强度变化图; (b) 波导的电光重叠积分图

Fig. 4 Variation of (a) electric field strength at the center of the waveguide for different electrode spacings; (b) electro-optical overlap integration of the waveguide

在确定波导宽度的情况下,调制效率是影响调制器性能的重要因素之一。提高调制效率有助于缩短器件长度,而器件长度与调制带宽呈负相关关系。当器件长度减小时,半波电压增大,调制带宽随之增大。因此,在仿真过程中,需要对半波电压与调制带宽进行折衷考虑。对于调制效率的分析,需综合评估半波电压长度积 ($V_\pi \cdot L$) 和光损耗,进行综合评估。$V_\pi \cdot L$ 的表达式为[18]:

$$V_\pi L = \frac{\lambda g}{n_{\text{eff}}^3 r_{\text{eff}} \Gamma} \tag{1}$$

其中 λ 为工作波长,g 为电极间距,n_{eff} 为有效光模折射率,r_{eff} 为 BTO 电光系数,Γ 为电光重叠积分。为了使调制效率最大化,关键是要使光场与射频场之间的重叠最大化。Γ 的表达式为[19]:

$$\Gamma = \frac{g}{V} \frac{\iint E_{x,op}^2 E_{Mod} dxdz}{\iint E_{x,op}^2 dxdz} \tag{2}$$

其中 g 为电极间距,V 为在电极上施加的电压,$E_{x,op}$ 为光场,E_{Mod} 为射频场。分子部分仅选择 BTO 材料区域作为计算区域,而分母部则是选择整个仿真区域。Γ 值可以通过 COMSOL 软件进行仿真,然后利用公式(1) 计算得到仿真结构的半波电压长度积 $V_\pi \cdot L$ 值。作为推挽结构的 MZ 调制器,本文中实际计算得到的 $V_\pi \cdot L$ 值还需除以 2。在 MZ 调制器中,半波电压 V_π 和调制区的长度成反比。较小的半波电压长度积代表该调制区结构的调制器能够在相同长度下实现更小的 V_π,或在相同的 V_π 下实现更小的长度。因此,$V_\pi \cdot L$ 和光损耗是影响调制器性能的重要参数。对半波电压长度积和光损耗影响较大的因素包括电极间距和波导的刻蚀深度。

通过研究波导的刻蚀深度和电极间距与 $V_\pi \cdot L$ 和传输损耗之间的关系,可以确定最有利于 BTO 调制器调制效率的结构参数。图 5 模拟了不同结构参数下调制器的 $V_\pi \cdot L$ 和光损耗,其中纵坐标为电极间距 (从 3 μm 到 8 μm) ,横坐标为刻蚀深度 (从 50 nm 到 250 nm) 。图 5(a) 显示了半波电压长度积随电极间距和刻蚀深度的变化,结果表明,随着电极间距和刻蚀深度的增大,$V_\pi \cdot L$ 呈现增加趋势; 图 5 (b) 显示了光损耗随电极间距和刻蚀深度的变化,结果表明,光损耗随着电极间距和刻蚀深度的增大而减小。因此,在低 $V_\pi \cdot L$ 和低光损耗之间存在权衡,综合考虑后选择刻蚀深度为 150 nm 和电极间距为 5 μm。此时,设计结构的半波电压长度积为 0.196 V · cm,光损耗为 0.025 dB/cm。相较于文献[18] 文章中所设计结构仿真得到的的半波电压长度积值 0.27 V · cm 提升了 72.6%。

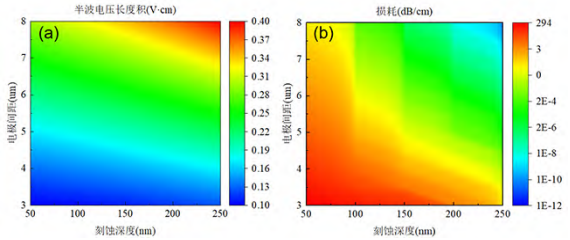

图 5 不同电极间距和刻蚀深度下(a) $V_\pi \cdot L$ 图; (b) 波导损耗图

Fig. 5 (a) $V_\pi \cdot L$ plot for different electrode spacing and etching depth; (b) waveguide loss plot

2.2 调制器射频参数的仿真与优化

带宽用于评估调制器的高频特性,定义为电光调制曲线下降到-3 dB 时的频率值。在 MZ 调制器

中,电光调制曲线通常随着频率的上升而下降,带宽越高表明调制器的高频衰减越小,适合于更高速率的信号传输。因此,本节重点设计调制器的高频电学结构,通过射频仿真优化行波电极的尺寸和结构,以实现低反射、低衰减和高光电配合度。这意味着行波电极的特征阻抗和微波传播速度需要与目标值匹配。调制器的电光响应表达式为[20]:

$$M(f)=20log_{10}\left\{\left\{\frac{2\sqrt{Z_oZ_{in}}}{Z_o+Z_{in}}e^{-\frac{\alpha L}{2}}\left[\frac{sinh^2(\frac{\alpha L}{2})+sin^2(\frac{bL}{2})}{(\frac{\alpha L}{2})+(\frac{bL}{2})}\right]^{\frac{1}{2}}\right\}\right. \tag{3}$$

该公式表明,高性能行波调制器的调制特性主要受以下三个因素的影响: (1) 传输线的特征阻抗 Z_0 应尽量与系统外接阻抗 Z_{in}(50 Ω) 匹配; (2) 射频信号的损耗 α 应尽量低; (3) 光群折射率(1.91) 与微波折射率应尽量匹配,这体现在参数 b 上。

图 6 展示了调制器采用的电极顶部结构示意图。这种分段电极结构包括传统的矩形通道电极区域 (如共面传输线设计) 和从主电极延伸出的段。这种结构以前主要用于Ⅲ-Ⅴ型调制器,以提升速度匹配并改善导体中的损耗。相比于传统的 CPW 线结构,这种分段电极结构的优势在于中间空出的节段阻止了电流在最近的间隙区域流动,同时允许电流在宽通道区域更均匀地分布。这增加了有效导体尺寸,减少了电极中的损耗,而无需增大电极之间的间隙。通过控制槽的参数,可以调节槽电极的射频参数,同时保证较高的调制效率和速度匹配。如[21]所述,需要仔细选择槽的周期,以确保布拉格截止频率远高于工作频率。在此设计中,周期 p 被设定为 45 μm。

随后,利用 HFSS 对调制器的射频特性进行仿真分析,发现分段电极的高度 h、厚度 s 和间距 t 中,只有分段电极间距 t 值的变化对射频信号的损耗 α 有明显影响。如图 7(a) 所示,为了使得调制器的微波损耗尽量低,最终选择 t = 5 μm。其中,h 被固定为 5 μm,s 被固定为 2 μm,以尽量减少对调制效率的负面影响。图 7(b) 显示了在金电极厚度为 700 nm 和电极间距为 5 μm 的情况下,传统矩形电极结构与 t = 5 μm 的分段电极结构在不同频率下的微波损耗仿真结果。结果表明,采用分段电极结构能显著降低调制器的微波损耗。

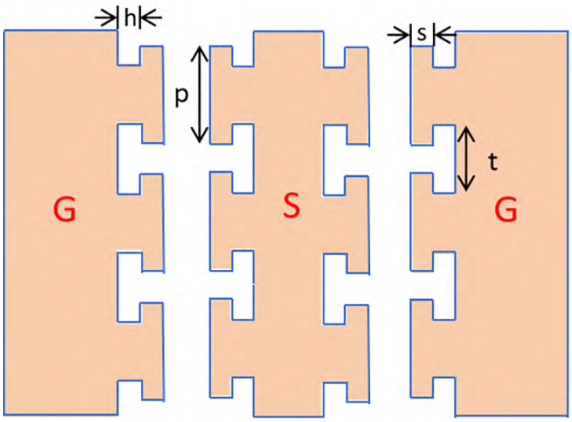

图 6　电极顶部结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of electrode top structure

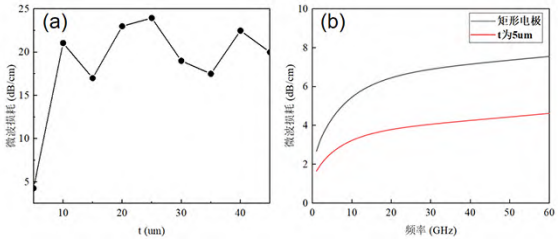

图 7　(a) 不同 t 值下的微波损耗图; (b) 不同结构下频率与微波损耗关系图

Fig. 7 (a) Plot of microwave loss at different t-values; (b) Plot of frequency versus microwave loss at different structures

此外,调制特性的三个主要影响因素与信号电极 S 的宽度、电极的厚度和上盖层 SiO_2 的厚度有关。通过改变这些参数并对其 40GHz 处的行波电极进行仿真,模拟结果显示,当信号电极宽度 S、电极厚度和上盖层 SiO_2 的厚度分别为 5 μm、0.7 μm 和 0.6 μm 时,得到的特征阻抗 Z_0 为 47.68 Ω,接近目标值 50 Ω; 微波折射率为 1.92,与光群折射率1.91 相差无几,几乎消除了速度失配; 同时,微波损耗为 4.26 dB/cm,相比传统 CPW 线电极结构的损耗值显著降低。频率与微波折射率、微波损耗以及特征阻抗的关系图如图 8 所示,其中图 8(a) 显示了微波折射率的变化范围,从 1.85 到 2.35; 图 8(b) 显示了微波损耗的变化范围,从 0 到 14 dB/cm; 图 8(c) 显示了特征阻抗的变化范围,从 46 Ω 到 57 Ω。图 8(d) 显示了电光响应与频率的关系,调制器的-3 dB 带宽超过 400 GHz。如上所述,分段电极的主要优点在于几乎可以消除速度失配,这在低半波电压调制

器设计中是主要的带宽限制因素。此外，这种电极结构的制造也不需要复杂的工艺，只需通过制备相应电极尺寸的掩模版进行光刻刻蚀工艺即可完成。

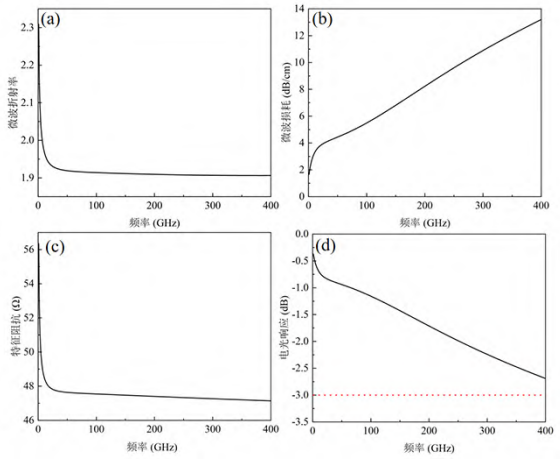

图 8 不同频率下(a)微波折射率变化图;(b)微波损耗变化图;(c)特征阻抗变化图;(d)调制器电光响应图

Fig. 8 Plot of (a) microwave refractive index variation; (b) microwave loss variation; (c) characteristic impedance variation; (d) modulator electro-optical response at different frequencies

3 结论

本文展示了一种有前景的高性能低损耗钛酸钡电光调制器结构。通过优化脊波导的宽度、刻蚀深度和电极间距，模拟仿真计算得到的半波电压长度积为 0.196 V·cm。进一步优化信号电极的宽度、高度以及上盖层二氧化硅的厚度后，在器件长度为 1 mm 时，模拟结果显示电光调制器的−3 dB 带宽超过 400 GHz，相比于同类型的钛酸钡调制器性能得到很大的提升。本文的研究对光通信技术及电光调制器的发展具有重要的借鉴意义，且可广泛应用于光通信、光存储、雷达系统等领域。

参考文献:

[1] Reed G T, Png C E J. Silicon optical modulators [J]. Materials Today, 2005, 8(1): 40-50.

[2] Wang C, Zhang M, Chen X, et al. Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltages [J]. Nature, 2018, 562(7725): 101-102.

[3] Winzer P J, Neilson D T, Chraplyvy A R. Fiber-optic transmission and networking: the previous 20 and the next 20 years [J]. Optics Express, 2018, 26(18): 24190-24239.

[4] 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, 2018, 24(1): 1-10.

[5] Haffner C, Chelladurai D, Fedoryshyn Y, et al. Low-loss plasmon-assisted electro-optic modulator [J]. Nature, 2018, 556(7702): 483-486.

[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] 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.

[8] Demkov A A, Posadas A B. Ferroelectric BaTiO3 for electro-optic modulators in Si photonics [J]. Ieee Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2024, 30(4): 1-13.

[9] Dong Z, Raju A, Posadas A B, et al. Monolithic barium titanate modulators on silicon-on-insulator substrates [J]. Acs Photonics, 2023, 10(12): 4367-4376.

[10] Han H, Wang J, Wang Z, et al. Integrated barium titanate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltage [J]. Applied Optics, 2023, 62(22): 6053-6059.

[11] Winiger J, Keller K, Moor D, et al. PLD epitaxial thin-film BaTiO3 on MgO-dielectric and electro-optic properties [J]. Advanced Materials Interfaces, 2024, 11(1): 2300665.

[12] Wen Y, Chen H, Wu Z, et al. Fabrication and photonic applications of Si-integrated LiNbO3 and BaTiO3 ferroelectric thin films [J]. Apl Materials, 2024, 12(2): 020601.

[13] Deng C Z, Zhang Y, Yang D, et al. Recent Progress on Barium Titanate-Based Ferroelectrics for Sensor Applications [J]. Advanced Sensor Research, 2024, 3(6): 2300168.

[14] Zhu M M, Zhang H Z, Du Z H, et al. Structural insight into the optical and electro-optic properties of lead zirconate titanate for high-performance photonic devices [J]. Ceramics International, 2019, 45(17): 22324-22330.

[15] Zhu M M, Zhang X R, Wei C, et al. Chemical design of barium titanate thin films for nanophotonic devices [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2024, 107(9):

6263-6274.

[16] 彭静. 钛酸钡系铁电薄膜的制备及光学和光电行为研究 [D]. 武汉: 武汉大学,2013.

[17] 罗梦希. $BaTiO_3$ 晶体薄膜波导电光特性研究 [D]. 长春: 长春理工大学,2020.

[18] Castera P, Tulli D, Gutierrez A M, et al. Influence of $BaTiO_3$ ferroelectric orientation for electro-optic modulation on silicon [J]. Optics Express, 2015, 23(12): 15332-15342.

[19] Xiong C, Pernice W H P, Ngai J H, et al. Active silicon integrated nanophotonics: ferroelectric $BaTiO_3$ devices [J]. Nano Letters, 2014, 14(3): 1419-1425.

[20] 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.

[21] Shin J, Sakamoto S R, Dagli N. Conductor loss of capacitively loaded slow wave electrodes for high-speed photonic devices [J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(1): 48-52.