光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023070301

1 064 nm 低电压薄膜铌酸锂电光调制器

徐　伟*，李志奇，郭翠娟，白晋军

（天津工业大学 电子与信息工程学院，天津 300000）

摘　要： 低半波电压电光调制器是实现大规模光电集成的关键。文章提出了一种半波电压低于 1.5 V 的薄膜铌酸锂马赫-曾德尔(Mach-Zehnder，MZ)电光调制器，选用绝缘体上单晶薄膜铌酸锂材料作为设计基础，分析了直波导、多模干涉耦合器、弯曲波导和调制臂等结构对电光调制器的影响。结果表明，当调制臂长为 3 mm 时，该薄膜铌酸锂电光调制器具有 1.05 V 的低半波电压、0.319 dB 的低损耗和 27 dB 的高消光比。同时，该调制器半波电压长度积为 0.315 V·cm，调制效率高，具有与 CMOS 技术兼容的半波电压，有利于大规模光电集成。

关键词： 铌酸锂；马赫-曾德尔电光调制器；多模干涉耦合器；低半波电压

中图分类号： TN761　**文章编号：** 1001－5868(2023)05－0679－06

Low-voltage Thin Film Lithium Niobate Electro-optic Modulator for 1 064 nm

XU Wei，LI Zhiqi，GUO Cuijuan，BAI Jinjun

（School of Electronics and Information Engineering，Tiangong University，Tianjin 300000，CHN）

Abstract： The low half-wave voltage electro-optic modulator is crucial for achieving large-scale photonic integration. This article proposes a thin film lithium niobate Mach-Zehnder electro-optic modulator with a half-wave voltage below 1.5 V. The design is based on a single crystal thin film lithium niobate material on an insulator. The influence of the straight waveguide，multimode interference coupler，bent waveguide，and modulation arm on the electro-optic modulator is analyzed. The results show that when the length of the modulation arm is 3 mm，this thin film lithium niobate electro-optic modulator has a low half-wave voltage of 1.05 V，a low loss of 0.319 dB，and a high extinction ratio of 27 dB. At the same time，the modulator has a half-wave voltage-length product of 0.315 V·cm，high modulation efficiency，and a half-wave voltage compatible with CMOS technology，which is beneficial for large-scale photonic integration.

Key words： lithium niobate；Mach-Zehnder electro-optic modulators；multimode interference couplers；low half-wave voltage

0　引言

电光调制器将信号从电域转换到光域，广泛应用于远程电信网络、光量子存储器、微波光子学、毫米波成像系统和数据中心通信[1]。所有这些应用都要求芯片级的电光调制器，即要求电光调制器具有低光损耗、小尺寸和与互补金属氧化物半导体(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor，CMOS)技术兼容的半波电压[2]。

近年来，许多材料用来实现电光调制，代表性的

收稿日期：2023－07－03.

基金项目：中国博士后科学基金面上基金项目(2019M661013)；天津市科技计划项目(20YDTPJC01090，22YDTPJC00090).

* **通信作者：**徐　伟　**E-mail：** xuwei@tiangong.edu.cn

电光材料包括铌酸锂($LiNbO_3$,LN)、硅基材料[3]、Ⅲ-Ⅳ族半导体[4]和有机聚合物材料[5]等。由硅制成的调制器具有固有的吸收损耗、消光比低等缺点,石墨烯硅基调制器虽然制备简单,可以与CMOS集成,但石墨烯的制备效率极低,厚度难以控制。Ⅲ-Ⅳ族半导体,如磷化砷铟镓(InGaAsP),经电子诱导后可使折射率发生变化,然而这类材料光损耗较大、价格昂贵。有机聚合物材料受温度影响较大,无法实现长时间工作。在这些材料中,$LiNbO_3$ 是制备电光调制器的首选材料,$LiNbO_3$ 晶体具有较强的一次电光效应,电光系数(γ_{33})可达约 32.2 pm/V,折射率高,温度稳定性好[6-7]。

传统块状 $LiNbO_3$ 电光调制器的低折射率对比度(小于 0.02)导致了其弱限制的大光学模式尺寸和弯曲半径。为了避免金属电极引起的吸收损耗,传统块状 $LiNbO_3$ 电光调制器常将金属电极放置于距离光波导较远的位置,但该措施又导致了较大的半波电压[8-10]。近年来,采用 Smart Cut 技术制备出了绝缘体上单晶薄膜铌酸锂(Thin Film Lithium Niobate,TFLN)材料,它提供了高折射率对比度(大于 0.7)和微小的光学模式尺寸[11]。由 TFLN 晶圆制备的电光调制器表现出低损耗、超带宽、低半波电压和高调制效率等优点[12-13]。Han 等[14]分析了 $LiNbO_3$ 沟道波导的单模条件、模式分布和光功率分布,优化了基于质子交换工艺制备的 X-切 $LiNbO_3$ 薄膜波导,薄膜波导厚度为 0.5 μm,由该薄膜波导制备了集成马赫-曾德尔(Mach-Zehnder,MZ)电光调制器,调制臂长度为 1 cm,半波电压为 10.2 V,半波电压长度积为 10.2 V·cm;Lin 等[15]利用飞秒激光辅助化学机械抛光工艺制备了模场对称分布的 TFLN 波导,级联型 MZ 电光调制器由三个分束器排列成垂直阵列并通过移相器桥接而成,调制臂长度为 11 mm,半波电压为 6.7 V,半波电压长度积为 7.37 V·cm;Wang 等[16]利用纳米刻蚀方法制备了低损耗的纳米级 $LiNbO_3$ 波导,在纳米尺度上有效地限制光场和微波场,极大地提高了 MZ 电光调制器性能,调制器调制臂长度为 2 mm,半波电压为 9 V,半波电压长度积为 1.8 V·cm;Desiatov 等[17]从可见光波段出发,设计了具有 6 dB/m 超低传播损耗的波导,实现了低损耗 $LiNbO_3$ 薄膜 MZ 电光调制器,调制臂长度为 2 mm,半波电压为 8 V,半波电压长度积为 1.6 V·cm;Wang 等[18]制备的集成 $LiNbO_3$ 薄膜 MZ 电光调制器可以与 CMOS 直接集成,调制臂长度为 2 cm,半波电压为 1.4 V,半波电压长度积为 2.8 V·cm。

本文提出了一种半波电压低于 1.5 V 的薄膜铌酸锂马赫-曾德尔电光调制器(Mach-Zehnder Modulator,MZM),分析了直波导、多模干涉耦合器、弯曲波导和调制臂等结构对电光调制器的影响,结合电光调制器的性能指标对上述结构进行了优化。仿真结果表明,当调制长度为 3 mm 时,该 MZM 具有 1.05 V 的低半波电压、0.319 dB 的低损耗和 27 dB 的高消光比。同时,该调制器半波电压长度积为 0.315 V·cm,调制效率高,具有与 CMOS 技术兼容的半波电压,这有利于大规模光电集成。

1 低电压薄膜铌酸锂电光调制器结构设计

1.1 整体结构及光波导模式仿真

所设计的低电压薄膜铌酸锂电光调制器由分光器、余弦弯曲波导、调制区和光合束器组成,分光器和合束器采用多模干涉耦合器(Multimode Interferometric,MMI)结构,调制区电极采用行波电极结构,调制器整体结构及截面如图 1 所示。

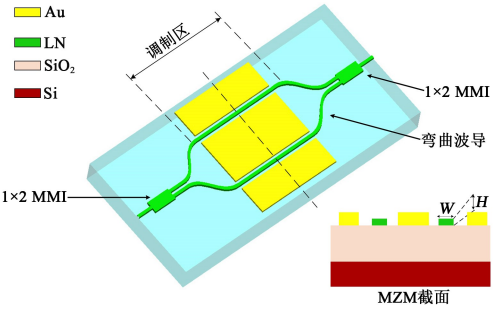


图 1 铌酸锂薄膜马赫-曾德尔电光调制器结构

该调制器的制备基于 X-切 TFLN 晶圆,LN 层厚度选用 300 nm。调制器芯层材料为 LN,包层材料为 SiO_2,衬底材料为 Si,电极材料为 Au。LN 光波导通过感应耦合离子束刻蚀得到[19],LN 波导结构厚度 H 为 0.3 μm,顶部宽度 W 为 0.5 μm。

MZM 的光波导要求单模传输,对 LN 薄膜波导截面进行模式仿真分析,设置模式分析频率为 1 064 nm 入射光频率。仿真结果表明,此时 TE 高阶模式的有效折射率虚部值远大于 1,传输损耗极大,无法稳定传输,LN 光波导中仅存在 TE_0 模式,有效折射率为 1.785 6,TE_0 模式分布如图 2 所示。观察 TE_0

模式分布图可知，此时 TE_0 模式很好地限制在薄膜波导结构中，光场较强，在薄膜波导结构外，光功率呈指数衰减。

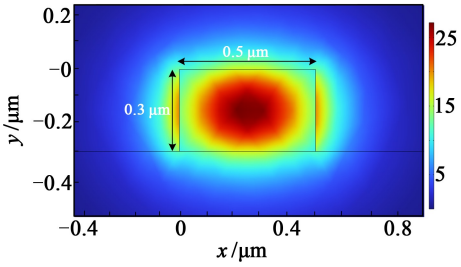


图 2　LN 光波导 TE_0 模式分布图

1.2　MZM 仿真模型建立

MZM 仿真模型结构如图 3 所示，芯层 LN 材料折射率为 2.232，包层 SiO_2 材料折射率为 1.458，芯层波导宽度为 0.5 μm。设置调制臂长度为 3 mm，芯层 LN 材料的电光系数 $\gamma_{33}=32.2$ pm/V，在调制区的两调制臂处施加驱动电压，由于芯层 LN 材料的电光效应，芯层 LN 材料的折射率会在驱动电压的作用下发生变化，引起两调制臂中光波信号相位的变化，存在相位差异的两束光波在合束器处发生干涉，进而实现对输出信号强度的调制[20]。

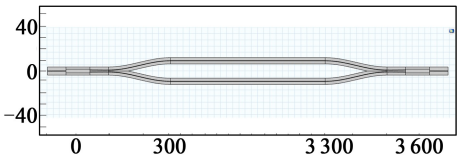


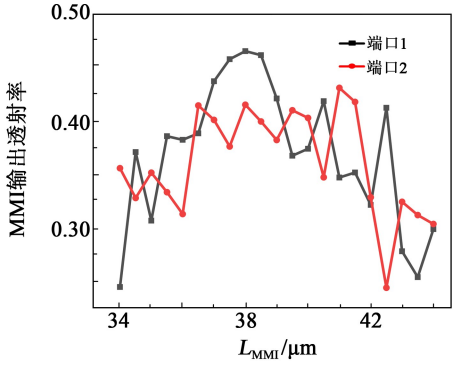
图 3　调制器整体结构（坐标单位：μm）

2　关键结构优化

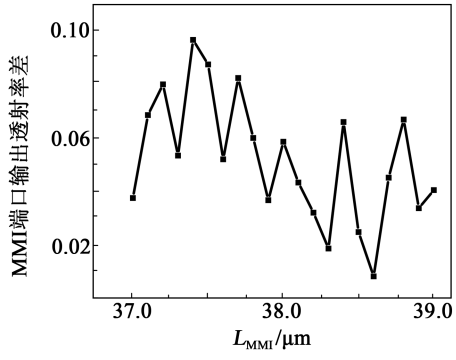
2.1　多模干涉耦合器仿真

MMI 耦合器由输入波导、多模干涉波导和输出波导构成，MMI 耦合器的工作原理是基于多模干涉的自成像效应，即输入光在多模干涉区激发出一系列传播常数不同的高阶模，这些高阶模会发生干涉并在传播方向上的特定位置成像[21]。本文设置 1×2MMI 耦合器的多模干涉区宽度（W_{MMI}）为 6 μm，根据多模干涉区 TE 基模的有效宽度[22]，计算得到产生二重像时两输出光束的位置，它们之间存在 3 μm 的分离距离。由此可见，设置 W_{MMI} 为 6 μm 可以有效避免两个输出光束之间的倏逝波耦合，保证二重像的分离并使其顺利耦合到输出波导中。

使用 COMSOL Multiphysics 仿真软件的频域分析对 1×2MMI 耦合器的结构进行优化，设置 W_{MMI} 为 6 μm，两输出波导各偏离中心 1.5 μm 和 −1.5 μm。1×2MMI 耦合器的优化目标是保证 MMI 耦合器的低损耗和对两输出光束的等比分光。对多模干涉区长度（L_{MMI}）进行参数化扫描，当 L_{MMI} 为 37～39 μm 时，输出波导均有较高的输出光强，保证了 MMI 耦合器的低损耗，但并无法确定精确的 L_{MMI} 值，如图 4(a)所示。1×2MMI 耦合器要求两输出波导实现 1∶1 分光，因此，在 37～39 μm 范围内对 L_{MMI} 进行参数化扫描，观察两输出波导的输出透射率差来确定精确的 L_{MMI} 值。当 L_{MMI} 为 38.6 μm 时，两输出波导的输出透射率差小于 y（μm）0.01，保证了 MMI 耦合器对两输出光束的等比分光，如图 4(b)所示。



(a) MMI 输出透射率随 L_{MMI} 的变化规律



(b) MMI 两端口输出透射率差随 L_{MMI} 的变化规律

图 4　多模干涉区长度 L_{MMI} 仿真结果

为了验证 W_{MMI} 值的合理性，对 W_{MMI} 进行参数化扫描，当 W_{MMI} 为 6 μm 时，两输出波导均有最大的输出光强，如图 5 所示。

MMI 耦合器的传输损耗是评价 MMI 耦合器性能的重要指标，当 MMI 耦合器的输入和输出波导采用锥形结构时，它具有更高的耦合效率和更低的传输损耗。对锥形波导宽度（W_{tapper}）进行参数化扫描，当 W_{tapper} 为 1.5 μm 时，MMI 耦合器输出透射率最高，且随着 W_{tapper} 的增加，透射率不再增加，如

图 6 所示。

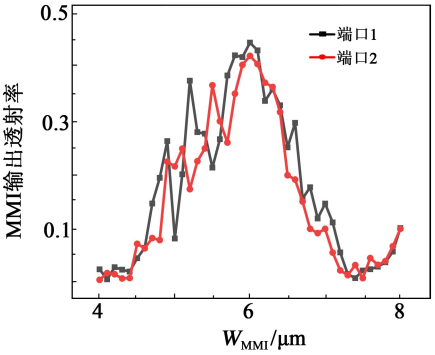


图 5 MMI 输出透射率随 W_{MMI} 的变化规律

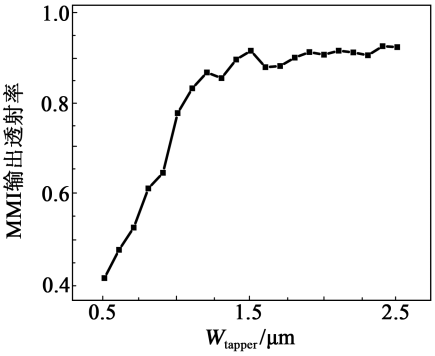


图 6 MMI 输出透射率随 W_{tapper} 的变化规律

为了获得较好的分光比和较低的传输损耗，1×2MMI 耦合器的多模干涉波导尺寸为 38.6 μm×6 μm，输入和输出波导采用锥形结构，锥形结构宽度由 1.5 μm 逐渐过渡到 0.5 μm，相比于非锥形波导，MMI 耦合器的透射率提高了 1 倍，锥形波导长度为 30 μm。该结构下 MMI 耦合器两输出波导的输出透射率差仅为 0.01，趋近于理想的 1∶1 分光，传输损耗为 −0.18 dB，MMI 耦合器分光图如图 7 所示。

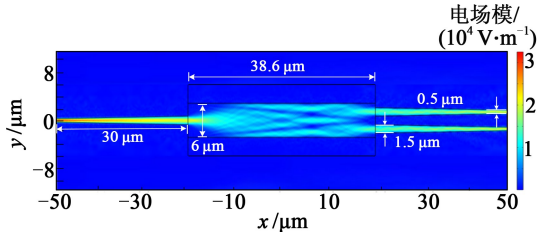


图 7 MMI 耦合器尺寸及分光图

2.2 余弦型弯曲波导仿真

常见的 S 型弯曲波导是由两个相同的圆环中心对称连接而成的，对于 1 064 nm 的入射光，S 型弯曲波导若要实现较低的传输损耗，需要约 3 mm 的弯曲半径，导致较大的尺寸，因此，选择余弦型弯曲波导从而实现更小的尺寸和更低的传输损耗，余弦型弯曲波导如图 8 所示。

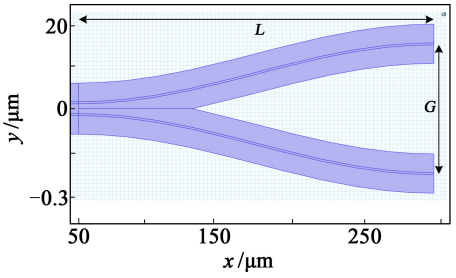
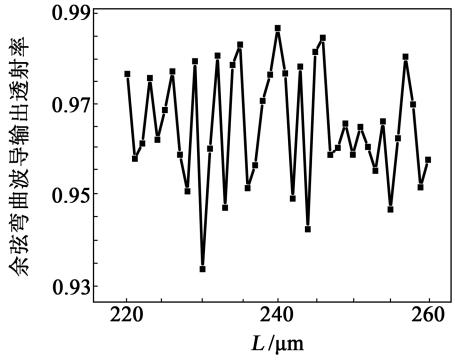


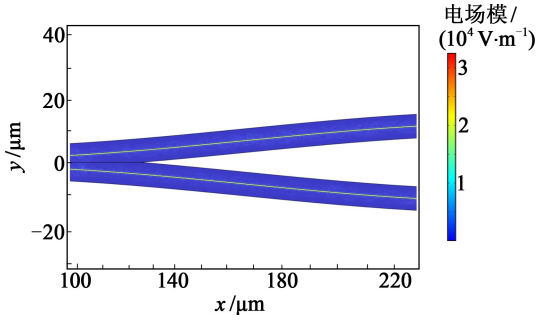
图 8 余弦型弯曲波导结构图

余弦型弯曲波导的纵向跨度为 G，横向跨度为 L，结合 MMI 耦合器的尺寸，将余弦型弯曲波导的纵向跨度 G 设置为 30 μm。参数化扫描余弦弯曲波导的横向跨度 L，得到余弦弯曲波导输出透射率随 L 的变化曲线，如图 9(a)所示，当 L 为 240 μm 时，余弦型弯曲波导的输出透射率最高。

当余弦型弯曲结构的纵向跨度 G 为 30 μm，横向跨度 L 为 240 μm 时，光场被很好地限制在弯曲波导芯层中，几乎无能量散射到波导包层，如图 9(b)所示，此时余弦型弯曲波导的输出化透射率达到 0.99，余弦弯曲波导产生的损耗最低，优于 S 型弯曲波导。



(a) 余弦弯曲波导输出透射率随横向跨度 L 的变化规律



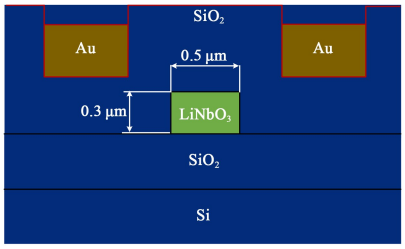
(b) 余弦弯曲波导光场图

图 9 余弦型弯曲波导仿真结果

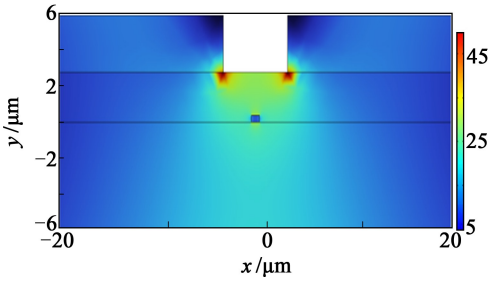
2.3 截面结构及电极电场仿真

光波信号与微波信号的波速匹配和阻抗匹配是

实现电光调制器高效调制的保证。调制器截面结构如图 10(a)所示，在调制电极与光波导之间填充二氧化硅(SiO_2)，起到缓冲层的作用。通过合理设计电极尺寸和二氧化硅缓冲层厚度降低调制微波信号的有效折射率，实现光波信号与微波信号的波速匹配，提高调制效率，调制微波信号电场分布如图 10(b)所示。



(a) 调制器截面结构



(b) 微波信号电场分布图

图 10　截面结构及电极电场分布余弦弯曲波导输出透射率

3　性能分析

施加驱动电压 V 对光波信号进行调制，观察调制器整体输出透射率随 V 的变化规律，如图 11 所示。当驱动电压 V 为 0.2 V 时，调制器的输出透射率最高。当驱动电压 V 为 1.25 V 时，在 V 的作用下，芯层 LN 材料的折射率变化影响调制臂中光波信号的相位，上下两调制臂中的两束光波反向，在合束器中发生干涉相消，调制器的输出透射率最低。半波电压值的定义为 MZM 光波透射率从最大变为最小时所施加电压的变化范围，即半波电压 V_π 为 1.05 V。该铌酸锂薄膜电光调制器的半波电压长度积为 0.315 V·cm，远低于现有的铌酸锂电光调制器，具有极高的调制效率。

电光调制器的损耗($Loss$)是输入功率与输出功率之差，较大的损耗会影响信号的‘1’电平状态，影响信号判决，使信号误码率提高。同时，由于驱动电压的有限摆幅，信号的‘0’电平同样无法达到输出功率完全为零的状态，导致信号误码率提高。因此，引入消光比(Extinction Ratio，ER)指标来衡量电光调制器的性能，消光比的定义为‘1’状态输出功率与‘0’状态输出功率的比值，高消光比可以实现对信号的准确判决，降低误码率。该铌酸锂薄膜电光调制器的损耗为−0.319 dB，消光比为 27 dB，如图 12 所示。

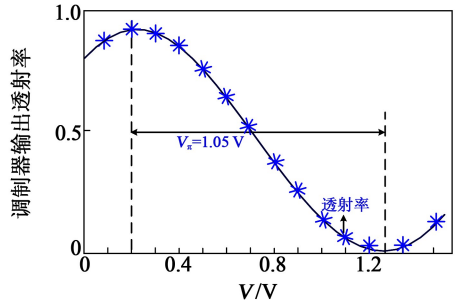


图 11　调制器输出透射率随驱动电压 U 的变化规律

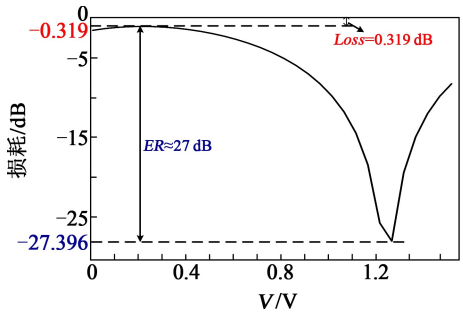


图 12　损耗随驱动电压 V 的变化规律

4　结论

仿真分析表明，1×2MMI 耦合器的多模干涉波导尺寸为 38.6 μm×6 μm，输入和输出锥形波导长度为 30 μm，锥形结构宽度由 1.5 μm 逐渐过渡到 0.5 μm，该结构下两输出波导的功率差仅为 0.01，趋近于理想的 1∶1 分光，耦合器的传输损耗为 −0.18 dB；当余弦型弯曲波导的纵向跨度 G 为 30 μm，横向跨度 L 为 240 μm 时，余弦型弯曲波导的归一化透射率达到 0.99。设置调制臂长为 3 mm，在 γ_{33}=32.2 pm/V 的仿真条件下，该薄膜 LN 电光调制器具有−0.319 dB 的低损耗、V_π=1.05 V 的低半波电压和 27 dB 的高消光比，半波电压长度积为 0.315 V·cm。

参考文献：

[1] Qi Y F, Li Y. Integrated lithium niobate photonics [J]. Nanophotonics, 2020, 9(6): 1287-1320.

[2] Sun S A, Xu M Y, He M B, et al. Folded heterogeneous silicon and lithium niobate Mach-Zehnder modulators with lowdrive voltage[J]. Micromachines, 2021, 12(7): 823.

[3] Han J H, Boeuf F, Fujikata J, et al. Efficient low-loss InGaAsP/Si hybrid MOS optical modulator [J]. Nature

Photonics, 2017, 41(11): 486-490.

[4] Phatak A, Cheng Z Z, Qin C Y, et al. Design of electro-optic modulators based on graphene-on-silicon slot waveguides[J]. Opt. Lett., 2016, 11(41): 2501-2504.

[5] Leuthold J, Freude W, Brosi J M, et al. Silicon organic hybrid technology—A platform for practical nonlinear optics [J]. Proc. of the IEEE, 2009, 97(7): 1304-1316.

[6] Janner D, Tulli D, García-Granda M, et al. Micro-structured integrated electro-optic $LiNbO_3$ modulators [J]. Laser & Photonics Review, 2009, 3(3): 301-313.

[7] Arizmendi L. Photonic applications of lithium niobate crystals [J]. Physica Status Solidi A: Appl. Research, 2004, 201(2): 253-283.

[8] Rabiei P, Steier W H. Lithium niobate ridge waveguides and modulators fabricated using smart guide [J]. Appl. Phys. Lett., 2005, 86(16): 161115.

[9] Wooten E L, Kissa K M, Yi-Yan A, et al. A review of lithium niobate modulators for fiber-optic communications systems[J]. IEEE J. of Sel. Top. in Quantum Electron., 2000, 6(1): 69-82.

[10] Macario J, Yao P, Shi S Y, et al. Full spectrum millimeter-wave modulation[J]. Opt. Express, 2012, 20(21): 23623-23629.

[11] Jagatpal N, Mercante A J, Ahmed A N R, et al. Thin film lithium niobate electro-optic modulator for 1 064 nm wavelength[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2021, 33 (5): 271-274.

[12] Mercante A, Shi S Y, Yao P S, et al. Thin film lithium niobate electro-optic modulator with terahertz operating bandwidth[J]. Opt. Express, 2018, 26(11): 14810-14816.

[13] Ren T H, Zhang M, Wang C, et al. An integrated low-voltage broadband lithium niobate phase modulator[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2019, 31(11): 889 -892.

[14] Han H P, Xiang B X, Lin T, et al. Design and optimization of proton exchanged integrated electro-optic modulators in X-cut lithium niobate thin film[J]. Crystals, 2019, 9(11): 549.

[15] Lin J T, Zhou J X, Wu R B, et al. High-precision propagation-loss measurement of single-mode optical waveguides on lithium niobate on insulator [J]. Micromachines, 2019, 10(9): 612.

[16] Wang C, Zhang M, Stern B, et al. Nanophotonic lithium niobate electro-optic modulators[J]. Opt. Express, 2018, 26 (2): 1547-1555.

[17] Desiatov B, Shams-Ansari A, Zhang M, et al. Ultra-low-loss integrated visible photonics using thin-film lithium niobate[J]. Optica, 2019, 6(3): 380-384.

[18] Wang C, Zhang M, Chen X, et al. Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltages[J]. Nature, 2018, 562(7725): 101-104.

[19] Haffner C, Heni W, Fedoryshyn Y, et al. All-plasmonic Mach-Zehnder modulator enabling optical high-speed communication at themicroscale [J]. Nature Photonics, 2015, 9(8): 525-528.

[20] Poberaj G, Hu H, Sohler W, et al. Lithium niobate on insulator (LNOI) for micro-photonic devices[J]. Laser & Photonics Reviews, 2012, 6(4): 488-503.

[21] Deng Q Z, Liu L, Li X B, et al. Arbitrary-ratio 1×2 power splitter based on asymmetric multimode interference [J]. Opt. Lett., 2014, 39(19): 5590-5593.

[22] Li M Y, Rao L, He X Y, et al. Low-loss, broadband MMI coupler based on thin film lithium niobate platform [J]. Physica Scripta, 2023, 98(3): 035506.

作者简介:

徐　伟(1984—),男,安徽省合肥市人,博士,副教授,主要研究方向为图像处理与人工智能、光纤传感器与光谱检测、电路与系统。