

高性能硅和铌酸锂异质集成薄膜电光调制器 (特邀)

孙时豪, 蔡鑫伦

(中山大学 电子与信息工程学院 光电材料与技术国家重点实验室, 广东 广州 510006)

摘要: 硅基光子集成平台因其高集成度、CMOS 工艺兼容性等特点在光通信领域受到了广泛的关注, 而电光调制器作为光通信系统中最为重要的器件之一, 承担着将电信号加载至光信号上的关键作用, 为打破硅基调制器的性能限制, 可利用硅和铌酸锂的大面积键合技术以及铌酸锂低损耗波导刻蚀技术实现高性能硅和铌酸锂异质集成薄膜电光调制器, 目前该类调制器的性能可达半波电压 3 V, 3 dB 电光带宽超过 70 GHz, 插入损耗小于 1.8 dB, 消光比大于 40 dB。文中对比了硅和铌酸锂异质集成调制器的研究现状并介绍了该异质集成薄膜调制器的结构设计与工艺实现方法。

关键词: 光通信; 硅基光子学; 硅和铌酸锂异质集成; 薄膜电光调制器

中图分类号: O436 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20211047

High-performance thin-film electro-optical modulator based on heterogeneous silicon and lithium niobate platform (*Invited*)

Sun Shihao, Cai Xinlun

(State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, School of Electronics and Information Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Silicon photonic integration platform has attracted extensive attention in the field of optical communication due to its high integration and CMOS process compatibility. As one of the most important devices in optical communication system, electro-optic modulator plays a key role in loading electrical signals onto optical signals. To break the performance limitation of silicon-based modulator, the large-area bonding technology of silicon and lithium niobate and the low loss waveguide etching technology of lithium niobate can be used to achieve high-performance thin film electro-optic modulator based on heterogeneous silicon and lithium niobate platform. At present, this kind of modulator with the best performance exhibits a half-wave voltage of 3 V, a 3 dB electro-optical bandwidth of more than 70 GHz, an insertion loss of less than 1.8 dB, and an extinction ratio of more than 40 dB. In this paper, the research status of integrated modulator based on silicon and lithium niobate heterogeneous platform was compared and the structure design and fabrication process of the heterogeneous integrated thin-film modulator were introduced respectively.

Key words: optical communication; silicon photonics; heterogeneous silicon and lithium niobate integration; thin film electro-optical modulator

收稿日期: 2021-04-12; 修订日期: 2021-06-10

基金项目: 国家重点研发项目 (2019YFB1803900, 2019YFA0705000); 广东省珠江人才计划 (2017BT01X121); 广东省重点研发项目 (2019B121204003, 2018B030329001); 国家自然科学基金 (11690031, 11761131001)

作者简介: 孙时豪, 男, 博士, 主要从事集成光芯片以及铌酸锂电光调制芯片方面的研究。

随着 5G、虚拟现实、万物互联、大数据以及人工智能等技术的兴起,当今全球信息传输总量仍然呈现爆发式的增长,光纤通信网络因其无比巨大的通信容量承担着信息传输的主要责任。在急速增长的需求下,未来光纤通信系统必将趋于实现低功耗、低成本以及高集成度的光子芯片集成化。在众多光子集成平台中,硅基光子集成平台因其高集成度以及与大規模 CMOS 工艺的兼容性带来的低成本等优势受到了极大的重视。而作为光通信系统中电光信号转换的关键器件,硅基电光调制器在过去的十年里取得了巨大的研究进展。然而不幸的是由于硅中的电光调制主要依赖的自由载流子色散效应^[1]具有吸收性以及非线性,这些固有的特性大大限制了调制器的带宽和损耗,目前基于硅基光子学的电光调制器性能或多或少已经接近于其物理极限,而硅和铌酸锂异质集成平台为进一步提升硅上电光调制器性能提供了一个很好的解决方案。铌酸锂是一种非常优质的电光材料,其具备极低的光吸收损耗以及高效的线性电光效应,然而传统铌酸锂体调制器调制效率低、体积较大并不满足现阶段高集成度及低成本的要求,近年来,随着铌酸锂中的直接键合以及离子切割技术的大力发展,绝缘体上铌酸锂薄膜(LNOI)^[2]材料的出现以及铌酸锂亚微米波导刻蚀技术^[3]的引入大大提高了铌酸锂调制器的集成度以及各方面的性能。哈佛大学于 2018 年成功展示了半波电压小于 1.4 V,电光带宽约为 40 GHz 的高性能铌酸锂薄膜调制器^[4],这标志着相

比于硅材料,铌酸锂在实现高性能电光调制器中更具有优势。

2018 年,美国 UCSD 的 Peter O. Weigel 等人利用直接键合的方法将铌酸锂薄膜材料与 SOI 芯片相结合并演示了马赫-增德行波电极调制器^[5],尽管该器件展示了高达 106 GHz 的 3 dB 电光带宽,但由于其波导结构为硅波导及顶部铌酸锂薄膜构成,光模式只有部分位于铌酸锂区域,因此该调制器的 $V_{\pi}L$ 仅为 6.7 V·cm。2019 年,中山大学蔡鑫伦教授团队利用硅和铌酸锂 BCB 键合技术以及低损耗铌酸锂波导刻蚀技术成功实现了片上插入损耗小于 2.5 dB,消光比达到 40 dB, $V_{\pi}L$ 可达 2.22 V·cm,电光带宽超过 70 GHz 的高性能铌酸锂薄膜调制器^[6]。该方法的实现为硅上高性能电光调制器以及未来片上光通信系统开辟了一条新的解决方案与思路。

如图 1(a) 所示,这种异质集成强度调制器所采用构型为行波电极式马赫-增德结构,整体器件由三部分组成:第一部分为硅基无源输入输出光回路,主要由浅刻蚀光栅耦合器、3 dB 多模干涉耦合器和光波导构成;第二部分为高速相位调制区域,由铌酸锂直波导和行波电极构成,如图 1(b) 所示,该电极所采用结构为可以形成推挽结构的地-信号-地构型;第三部分为垂直方向上的绝热渐变耦合器(VAC),该耦合器由硅反向锥化结构和叠加在其上方的铌酸锂波导构成,可为光在两种材料的波导之间提供高效率的耦合。硅和铌酸锂异质集成调制器的工艺难点集中在

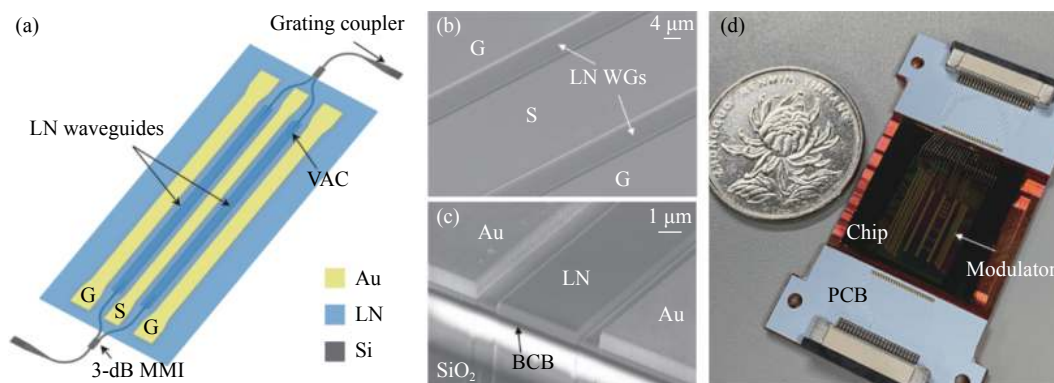


图 1 硅和铌酸锂异质集成电光调制器。(a) 马赫-增德强度调制器结构示意图;(b) 铌酸锂相位调制区域扫描电子显微镜 (SEM) 照片;(c) 铌酸锂相位调制区域横截面 SEM 图,该截面由聚焦离子束刻蚀系统刻蚀产生;(d) 芯片实物图

Fig.1 Hybrid silicon and lithium niobate electro-optical modulator. (a) Schematic of Mach-Zender intensity modulator; (b) SEM image of lithium niobate phase modulation region; (c) The cross section SEM image of the modulation region, the section is formed by the focused ion beam process; (d) Image of the whole chip

如何实现高质量键合薄膜以及低损耗铌酸锂波导,由于该异质集成结构需要首先在 SOI 上制作硅波导,而直接键合的方法对键合晶片表面的平整度以及洁净度要求较高,因此此处所采用的键合技术为以 BCB 为键合介质层的间接键合方法。在制作完成 SOI 基片以后,可在其上表面旋涂 BCB 然后将合适尺寸的商用 LNOI(晶正集团)基片贴至 SOI 基片之上并进行高温退火固化,然后通过结合机械减薄、干法刻蚀、湿法刻蚀工艺去除 LNOI 结构中的硅和氧化硅衬底以裸露铌酸锂薄膜,最后进行铌酸锂波导以及行波电极的制作,铌酸锂波导和电极的横截面可见图 1(c),整个芯片实物图可见图 1(d)。铌酸锂的波导刻蚀方法采用基于氩气等离子体的电感耦合等离子体 (ICP) 物理刻蚀方法,以 HSQ 电子胶作为刻蚀掩膜,所制作的铌酸锂波导损耗可以低至 0.15 dB/cm。

中山大学蔡鑫伦课题组通过持续性的研究对该类调制器的性能进行了进一步的提升,通过对工艺方法以及波导、电极结构的优化,成功将调制器的性能提升至半波电压 3 V,电光带宽超过 70 GHz,片上插入损耗小于 1.8 dB,并在此器件上演示了传输速率高达 128 Gbit/s 的 PAM-4 格式数据加载实验。此外,基于硅基光子学中稳定高效的热光效应制作了由薄膜加热电阻和硅波导构成的热调移相器实现调制器偏置点控制功能,该方法避免了在铌酸锂波导上施加直

流偏压带来的偏置点漂移现象,测试结果反映该调制器具备良好的工作点稳定性^[7]。该调制器多项性能处于世界领先水准,打破了高端薄膜电光调制器方面国外的技术垄断。

参考文献:

- [1] Reed G T, Mashanovich G, Gardes F Y, et al. Silicon optical modulators [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(8): 518-526.
- [2] 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.
- [3] Zhang M, Wang C, Cheng R, et al. Monolithic ultra-high-Q lithium niobate microring resonator [J]. *Optica*, 2017, 4(12): 1536-1537.
- [4] 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.
- [5] Weigel P O, Zhao J, Fang K, et al. Bonded thin film lithium niobate modulator on a silicon photonics platform exceeding 100 GHz 3 dB electrical modulation bandwidth [J]. *Optics Express*, 2018, 26(18): 23728-23739.
- [6] 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.
- [7] Sun S, He M, Xu M, et al. Bias-drift-free Mach-Zehnder modulators based on a heterogeneous silicon and lithium niobate platform [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(12): 1958-1963.