

铌酸锂电光调制器的研究进展

喻千尘^{1,2}, 梁雪瑞², 马卫东²

(1. 武汉邮电科学研究院, 武汉 430074; 2. 光迅科技股份有限公司, 武汉 430074)

摘要: 随着 5G 技术的飞速发展, 高速光通信网络的建设迫在眉睫, 而铌酸锂电光调制器是高速光通信中信号调制系统的重要组成部分, 提高铌酸锂电光调制器的性能是高速信号调制技术进一步发展的基础。从铌酸锂电光调制器市场情况出发, 总结了近年来铌酸锂电光调制器在各方面可行的改进和研究, 比较了各种研究成果, 探讨了几种改进方法的优缺点, 并进行了相应的实验研究, 指出了硅基集成铌酸锂电光调制器在未来通信系统中的远大应用前景。

关键词: 铌酸锂; 电光调制器; 集成光子学; 小尺度

中图分类号: TN929.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)04-0037-03

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.04.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research progress of lithium niobate electrooptic modulator

YU Qianchen^{1,2}, LIANG Xuerui², MA Weidong²

(1. Wuhan Research Institute of Posts and Telecommunications, Wuhan 430074, China;

2. Accelink Technologies Co. Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: With the rapid development of 5G, the construction of high-speed optical communication network is extremely urgent. Lithium niobate modulator is an important part of signal modulation system in high-speed optical communication. Improving the performance of lithium niobate modulator is the basis of the further development of high-speed signal modulation technology. This paper embarks from the present situation of the application of lithium niobate electrooptic modulator, summarizes the various research institutions in recent years for lithium niobate modulator in all aspects of the improvement and research, compared the various improvement direction of the known research achievements, the advantages and disadvantages of several improving methods are discussed, and the corresponding experimental research is carried out, points out the new silicon-based integrated lithium niobate modulator is the prospect of further development.

Key words: lithium niobate; electrooptic modulator; integrated photonics; small scale

0 引言

光调制技术是现代高速通信网络构建中不可缺少的一环。通过将信号加载在光波上, 人们真正实现了可靠高速的光通信, 促进了工作生活等各个方面的发展。铌酸锂电光调制器因为其宽带可调、消光比高、技术成熟和易于工业大批量生产等优点^[1], 被广泛应用于现在的通信网络中。早在 1999 年, 就有报道称行

波电极铌酸锂电光调制器的带宽已达到 40 GHz^[2]。目前, 在商业应用上, 主要以 40G/100G 的调制器为主体, 400G 乃至更高速率的 600G 调制器正逐渐进入市场。由于高速光通信网络构建的需要, 调制器不仅在速度带宽方向不断突破, 而且在小尺寸、集成化方向研究成果也十分丰富。本文从铌酸锂电光调制器的应用情况出发, 概述近年来各个机构对铌酸锂电光调制器在各方面的改进与研究, 指出铌酸锂电光调制器可能的发展方向。

1 铌酸锂电光调制器应用现状

铌酸锂电光调制器是高速光通信网络对信号进行调制的关键器件。目前, 商用成熟的铌酸锂电光调制器结构均为传统的块状材料铌酸锂调制器。铌酸锂

收稿日期: 2019-08-23。

基金项目: 国家科技攻关计划(2018YFB2201102)资助。

作者简介: 喻千尘(1995—), 女, 汉族, 湖北黄冈人, 硕士研究生, 就读于武汉邮电科学研究院, 主要研究方向为光通信器件及硅光集成。读研期间主要学习方向为无源波导器件, 擅长计算机仿真模拟, 曾获得研究生学业奖学金等多项荣誉。



喻千尘,梁雪瑞,马卫东:铌酸锂电光调制器的研究进展

调制器从1990年进入商用领域以来,许多公司都在不断地研究与改进,其中较著名的有美国的 lumentem、日本的 NTT 与富士通等公司。

富士通公司在铌酸锂调制器的创新方面保持了多年领先地位。早于2003年2月21日就已经开始推出驱动电压低至1.8 V的40G铌酸锂调制器,截止2019年仍然是同类产品驱动电压最低的。该公司于2017年3月17日发布适合单载波600 Gb/s相干传输应用的64 Gbaud铌酸锂调制器,带宽达35 GHz,在64相偏振复用正交振幅调制(DP-64QAM)下可以支持600 Gb/s以上传输速率。

2 铌酸锂调制器的研究与改进

本文从块状材料铌酸锂、单晶薄膜铌酸锂及新型硅基混合铌酸锂几个方面分别报道了其研究进展,并作对比。

2.1 传统块状材料铌酸锂调制器的优化

目前,广泛应用的铌酸锂调制器原理可以简单归纳为利用线性电光效应实现电信号对光信号的调制,又利用加载在铌酸锂晶体上的电极产生电场改变晶体的折射率,从而改变光的相位等特征^[3]。因此,铌酸锂调制器的优化思路主要是优化调制电场和光波导的相速匹配以实现高速带宽工作。

现在市场上应用的铌酸锂调制器均为块状材料结构,在电极上的改进多采用反相电极、厚电极等形式提高调制性能,而在光波导方面的改进主要有减薄铌酸锂厚度、设计脊型铌酸锂波导结构等^[4-6]。

2.2 单晶薄膜铌酸锂调制器

传统的块状材料铌酸锂光调制器虽然具有许多优点,并在100G的应用中取得了优势,但也存在一些技术上的局限性,首当其冲的就是尺寸问题。随着端口密度的增加,通信系统对光学器件的尺寸要求是越来越小,对性能参数要求则越来越高。因此,铌酸锂薄膜开始成为研究人员的考虑对象。

单晶铌酸锂薄膜由离子注入和晶圆键合技术制造,也称为绝缘体上的铌酸锂,具有高单晶性、与衬底之间折射率对比大等优势,被广泛用于研究制造各种集成光设备^[7-10]。由于铌酸锂可以掺杂稀土离子得到激光活性材料,铌酸锂的应用前景非常广阔,可用于一系列的有源、无源光器件,例如电光调制器、可调谐滤波器、非线性(周期性极化)波长转换器、放大器和不同类型的激光器^[11-14]。

2017~2018年,哈佛大学的 C.Wang 等人在此研究

方向上陆续发布了多个成果,包括采用优化的氟离子刻蚀技术,在铌酸锂上制备了传输低至0.03 dB/cm的光波导,制作出了纳米级的铌酸锂调制器(成品带宽达到15 GHz)、低半波电压的微环谐振器和小型化马赫-曾德尔干涉仪组成的铌酸锂调制芯片等^[15,16],证明了在单晶铌酸锂薄膜方向上得到高性能的新型铌酸锂调制器的可行性。

2.3 新型硅基混合铌酸锂调制器

单晶铌酸锂薄膜器件与现有的硅光集成系统存在插损过大的问题,而硅光集成在商业应用中已取得一定的成果,人们更希望将两者方便地结合起来。因此,研究者们开始尝试将铌酸锂材料纳入硅光集成系统中,采取硅衬底、内嵌硅波导等技术探索制备完整的低损耗通信系统的方法。

2019年,《Nature》杂志发布了中山大学的最新成果——硅锂混合铌酸锂马赫-曾德尔调制器,该器件结合了内嵌硅波导和脊形结构LN波导,在铌酸锂薄膜下方采用放置锥形硅波导并将光完全耦合入脊形铌酸锂波导中的方法,得到的样品插入损耗为2.5 dB,电光带宽大于70 GHz,调制速率高达112 Gb/s^[17]。该研究表明了在硅基集成中加入电光性质优异的铌酸锂材料是完全可行的。

3 改进方式比较

经过多国研究机构的不断努力,铌酸锂调制器一步一步地向着尺寸更小、速率更高、带宽更大和驱动电压更低的方向发展。不同铌酸锂调制器的性能如表1所示。

表1 不同材料的铌酸锂电光调制器性能对比

材料类型		尺寸/mm	驱动电压/V	插入损耗/dB	带宽/GHz	单波速率/Gb/s
传统材料铌酸锂	富士通	约70	3.5	14	23	100
	微结构电极优化	—	1.2	>10	—	—
	薄片式	8	7.1	10	10	—
单晶铌酸锂薄膜		2	1.8	0.6	15	40
新型硅基混合铌酸锂		5	2.2	2.5	70	112

从表1可看出,面对未来网络发展的大速率、小尺寸的需求,新型硅基混合集成铌酸锂调制器是更好的解决方案。现有的传统块状材料铌酸锂受限于体积过大,不利于多端口的网络构建,在迈入更高速率的400G/600G需求时进入瓶颈。而单晶薄膜式铌酸锂调制器工艺复杂,且不利于接入现有的集成光学系统

中。新型硅基铌酸锂电光调制器制作工艺兼容于成熟的硅光子工艺,且可与其它集成光学器件实现片上互联,利于未来高集成度高速网络的构建,有良好的应用前景。

4 实验验证

对于这一新兴发展方向,本研究组也做了一些相应的研究实验。本文采用硅基铌酸锂薄膜脊形波导的形式制作了光栅耦合器及Y分支波导等无源器件,并进行了相应的测试。实验获得的铌酸锂薄膜波导参数为:波导宽度为500 nm,沉积包层厚度为1.5 μm ,刻蚀深度为310 nm,倾角为77°。光栅耦合器、Y分支波导细节图分别如图1、图2所示。

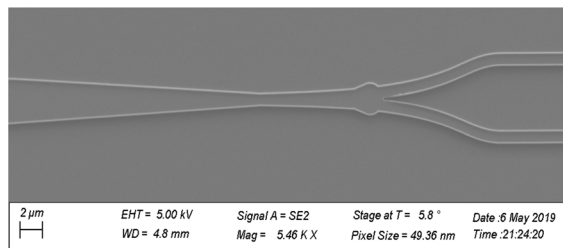


图1 光栅耦合器细节图

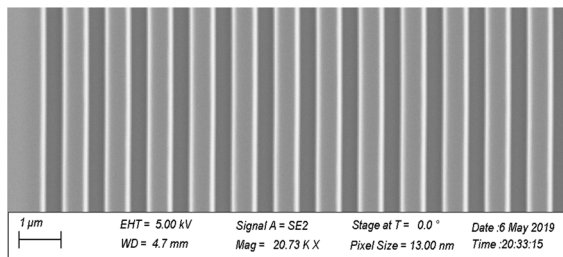


图2 Y分支波导细节图

经实验验证,硅基铌酸锂薄膜波导上制备的无源器件的传输损耗低于1 dB/cm,并有望随着设计及工艺的优化进一步减小,满足工业应用的需求。在实际应用中,硅基铌酸锂薄膜器件仍存在问题,例如在构建完整的信号网络时,由于该器件尺寸过小,边缘耦合时存在与普通单模光纤耦合模场不匹配的问题,导致整体损耗增加;工艺复杂且良品率不高。由此可见,该种技术真正投入市场应用之前仍需要大量的研究实验与改进优化。

5 结束语

电光调制器是高速光网络建设中的关键设备。铌酸锂材料以其优良的品质和低廉的价格在电光调制器的应用中发挥着重要的作用。传统铌酸锂电光调制

器产业已经成熟,可以实现高速宽带调制,但体积大、驱动电压偏高的缺点限制了它在更新、更高速和更复杂的通信网络中的应用。新型硅基铌酸锂集成调制器可以结合成熟的硅光子技术和铌酸锂材料的优良特性,实现小尺寸、高速率和低调制电压的调制目标,将在未来高速通信网络中发挥重要作用。

参考文献:

- [1] 王忠敏. 铌酸锂晶体发展简况[J]. 人工晶体学报, 2002(2): 173-175.
- [2] BURNS W K, HOWERTON M M, MOELLER R P, et al. Low drive voltage, broad-band LiNbO₃/sub 3/modulators with and without etched ridges[J]. Journal of lightwave technology, 1999, 17(12): 2551-2555.
- [3] 张瑞君. LiNbO₃ 电光调制器及其设计[J]. 光子技术, 2003(4): 76-81.
- [4] WANG Y, ZHOU S, HE D, Et al. Electro-optic beam deflection based on a lithium niobate waveguide with microstructured serrated electrodes[J]. Optics Letters, 2016, 41(20): 4739-4742.
- [5] 张金令, 代志勇, 刘永智. 高速 LiNbO₃ 电光调制器的最新研究进展[J]. 半导体光电, 2006(5): 508-512.
- [6] GHEORMA I L, SAVI P, OSGOOD R M. ThinLayer Design of X-cut LiNbO₃ Modulators[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(12): 1618-1620.
- [7] CHANG S J, TSAI C L, LIN Y B, et al. Improved electrooptic modulator with ridge structure in X-cut LiNbO₃ [J]. Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(5): 843-847.
- [8] 张德龙, 丁桂兰, 崔宇明, 等. 质子交换 LiNbO₃ 光波导[J]. 物理学进展, 2001(1): 45-65.
- [9] MERCANTE A J, YAO P, SHI S, et al. 110 GHz CMOS compatible thin film LiNbO₃ modulator on silicon [J]. Optics express, 2016, 24(14): 15590-15595.
- [10] 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.
- [11] BOES A, CORCORAN B, CHANG L, et al. Status and potential of lithium niobate on insulator (LNOI) for photonic integrated circuits[J]. Laser & Photonics Reviews, 2018, 12(4): 256-275.
- [12] 梁凤超, 李敏, 吴东岷. 低驱动、高调制 X-Cut 铌酸锂电光调制器的优化设计[J]. 光学学报, 2018, 38(7): 177-183.
- [13] 周会娟, 孟洲, 廖毅. 铌酸锂波导电光强度调制器的移频特性[J]. 中国激光, 2009, 36(4): 901-905.
- [14] MOORE J, DOUGLAS J K, FRANK I W, et al. Efficient second harmonic generation in lithium niobate on insulator [C]// 2016 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2016), June 5-10, 2016, San Jose, USA. California: Optical Society of America (OSA), 2017: 358-359.
- [15] WANG C, BUREK M J, LIN Z, et al. Integrated high quality factor lithium niobate microdisk resonators [J]. Optics express, 2014, 22(25): 30924-30933.
- [16] WANG C, ZHANG M, STERN B, et al. Nanophotonic lithium niobate electro-optic modulators[J]. Optics express, 2018, 26(2): 1547-1555.
- [17] HE M, XU M, REN Y, et al. for 100 Gbit/s and beyond [J]. Nature Photonics, 2019, 13(5): 359-364.