

一种基于薄膜铌酸锂调制器芯片的新型电光调制器

杨鹏毅, 李 韬, 姚宗影

(中国电子科技集团公司 第四十三研究所, 合肥 230088)

摘要:针对传统铌酸锂电光调制器体积大、带宽小等技术问题,提出了一种基于薄膜铌酸锂调制器芯片的新型电光调制器的设计方法,给出了薄膜铌酸锂电光调制器高频传输仿真模型,详细介绍了薄膜铌酸锂电光调制器的高频信号馈入设计、过渡薄膜基板高频阻抗匹配设计,并测试了 40 GHz 小尺寸薄膜铌酸锂电光调制器的核心指标。测试结果表明:设计的薄膜铌酸锂电光调制器插入损耗、半波电压、3 dB 带宽、产品尺寸分别为 4.1 dB、3.9 V、40 GHz、30 mm × 10 mm × 5 mm,比传统铌酸锂电光调制器性能优越。

关键词:薄膜铌酸锂; 电光调制器; 光传输; 微波光子

中图分类号: TN15 文献标志码: A 文章编号: 1002-5561(2023)01-0073-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.01.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

New electro-optic modulator based on thin film lithium niobate modulator chip

YANG Pengyi, LI Tao, YAO Zongying

(The 43th Research Institute of CETC, Hefei 230088, China)

Abstract: Aiming at the technical problems of large volume and low bandwidth of traditional lithium niobate electro-optic modulator, a new design method of electro-optic modulator based on thin film lithium niobate modulator chip is proposed. The high-frequency transmission simulation model of thin film lithium niobate electro-optic modulator is given. The design of high frequency signal feed in thin film lithium niobate electro-optic modulator and high frequency impedance matching design of transition film substrate are introduced in detail, the key specifications of 40 GHz small size thin film lithium niobate electro-optic modulator are tested. The test results show that the insertion loss, half wave voltage, 3 dB bandwidth and product size of the designed thin film lithium niobate electro-optic modulator are 4.1 dB, 3.9 V, 40 GHz and 30 mm × 10 mm × 5 mm respectively, superior to the traditional lithium niobate electro-optic modulator.

Key words: thin film lithium niobate, electro-optic modulator, optical transmission, microwave photonic

0 引言

微波光传输链路与传统的电传输链路相比,具有高频、宽带、传输损耗小、重量轻、抗电磁干扰能力强等优点,在雷达、电子对抗、军事通信领域得到了广泛应用^[1-2]。电光调制器是微波光子系统中的关键器件之一,其功能是在微波光子链路中将微波电信号转变为光信号,因此电光调制器的性能直接影响微波光传输

收稿日期: 2022-09-24。

作者简介: 杨鹏毅(1982—),男,陕西府谷人,硕士,高级工程师,中国电子科技集团公司光电子器件专家,集团公司青年科协会员,中国光学工程学会高级会员,主要研究方向为微波光子器件、光电模块、光电组件,已授权发明专利 5 项,获省部级科学技术进步奖 2 项,发明专利奖 1 项。



链路的整体性能。与其它材料制作的电光调制器相比,基于铌酸锂材料制作的电光调制器具有线性电光系数大、温度稳定性好等优点。目前,微波光子链路中使用的电光调制器大多基于体材料铌酸锂制备,体材料铌酸锂电光调制器中的波导对光学模式的限制能力较弱,导致器件的电光调制效率偏低,存在器件半波电压高、带宽受限、尺寸大等不足。与传统的体材料铌酸锂相比,薄膜铌酸锂在继承其固有线性电光效应强和本征光损耗低等优点的同时,可以大幅度缩短调制电极与波导之间的间距,从而获得较大的电光调制效率^[3-5],基于薄膜铌酸锂制作的电光调制器比传统体材料铌酸锂电光调制器具有更宽的带宽、更低的半波电压和更小的产品尺寸^[6-7]。

因此,本文设计一种基于薄膜铌酸锂调制器芯片新型电光调制器(下文简称薄膜铌酸锂电光调制器)。

1 薄膜铌酸锂调制器芯片

薄膜铌酸锂调制器芯片结构截面如图1所示。从下往上分别是520 μm 的高阻硅(Si)衬底、4.7 μm 的氧化硅(SiO_2)层、0.6 μm 的薄膜铌酸锂(TFLN)层。脊型波导宽度为1 μm ,刻蚀角度为60°。图中的G、S分别表示接地、信号线。

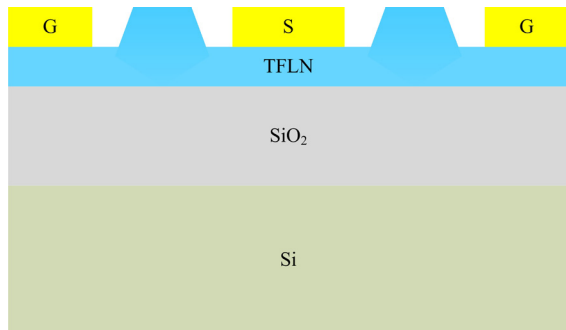


图1 薄膜铌酸锂调制器芯片结构截面图

薄膜铌酸锂调制器芯片的半波电压与光波导、包层折射率差有关。更大的折射率差能获得更小尺寸的导模,便于减小电极间距,提高电光作用强度,也有利于减小芯片尺寸。本文基于马赫-曾德尔干涉仪结构设计的薄膜铌酸锂调制器芯片整体结构如图2所示。

薄膜铌酸锂调制器芯片两端分别为光输入端口和光输出端口,采用2×2的多模干涉仪(MMI)结构,MMI内有模斑转换器(SSC)进行模场转换,以便与光纤进行低损耗光耦合。芯片上含有射频输入端、射频输出端电极,两电极之间是完成电光调制的区域。高频信号调制部分采用了行波电极,波导、电场分别沿光轴y方向、z方向传播。靠近射频输出端电极处设计有热电极,通过外部电流在芯片局部产生热量,从而改变芯片波导折射率,实现对偏置点的控制。在芯片的光输出端制作了二阶光栅,便于使用监控光电二极管(MPD)监测光功率。

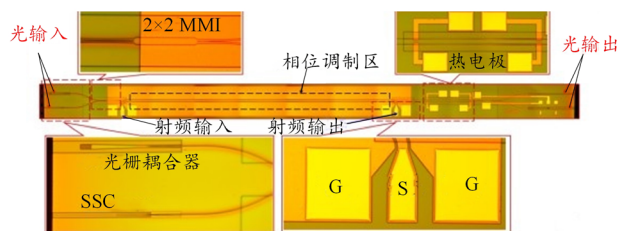


图2 薄膜铌酸锂调制器芯片结构图

本文采用思仪公司3672E矢量网络分析仪对薄膜铌酸锂调制器芯片带宽指标进行实测,测试结果如图3所示。图中S21、S11分别表示输出信号与输入信号的幅度比值、信号的输入反射系数。可以看出,薄膜铌酸锂调制器芯片的3 dB带宽优于60 GHz;S11低于-15 dB,对应驻波比优于1.5。

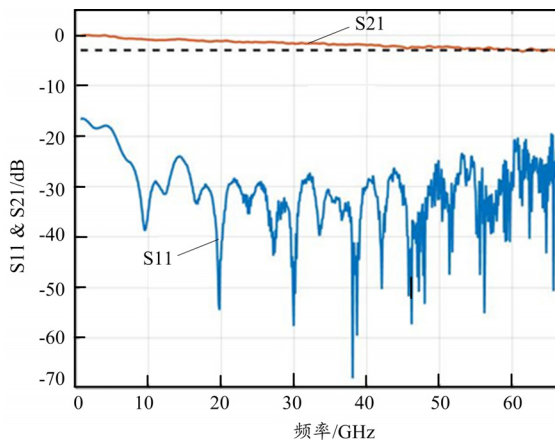


图3 薄膜铌酸锂调制器芯片带宽指标测试结果

2 薄膜铌酸锂电光调制器设计方法

2.1 总体设计

薄膜铌酸锂电光调制器设计原理框图如图4所示。设计原理如下:微波信号从微波接口输入,经匹配网络进行阻抗匹配,匹配网络(过渡薄膜基板)与薄膜铌酸锂调制器芯片键合相连,在光载波的作用下,通过薄膜铌酸锂调制器芯片实现微波信号的光调制;输入光纤与输入密封相连,实现尾纤与管壳的气密封;输入密封与输入模斑匹配相连,实现尾纤与薄膜铌酸锂调制器芯片之间的光路匹配,减小光耦合损耗;微波信号经薄膜铌酸锂调制器芯片调制后变为已调光信号输出。

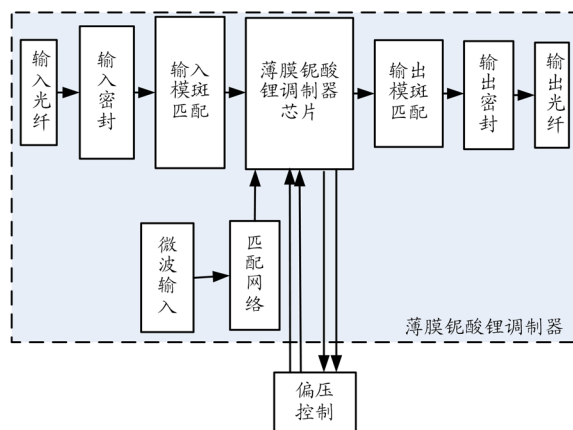


图4 薄膜铌酸锂电光调制器设计原理框图

2.2 高频传输仿真与分析

薄膜铌酸锂调制器芯片的封装不仅要考虑高频传输线阻抗匹配设计, 还需考虑高频信号馈入接头、高频基板、结构等对高频信号传输的影响。

本文使用 HFSS 软件建立 40 GHz 薄膜铌酸锂电光调制器高频传输仿真模型, 分析模型中主要环节对高频传输性能的影响并优化模型。薄膜铌酸锂电光调制器高频传输仿真模型如图 5 所示。40 GHz 的微波信号通过更小的超微型插入(SSMP)射频连接器输入, 经管壳空气腔传输。为减小射频输入端口与芯片之间金丝的长度, 采用过渡薄膜基板作为射频连接器与调制器芯片之间的过渡连接, 射频连接器的针芯焊接到过渡薄膜基板的一端, 而过渡薄膜基板的另一端与芯片的输入端通过键合相连。高频信号从输入端沿着芯片表面传输至芯片的终端, 终端设置有 $50\ \Omega$ 的对地匹配电阻。

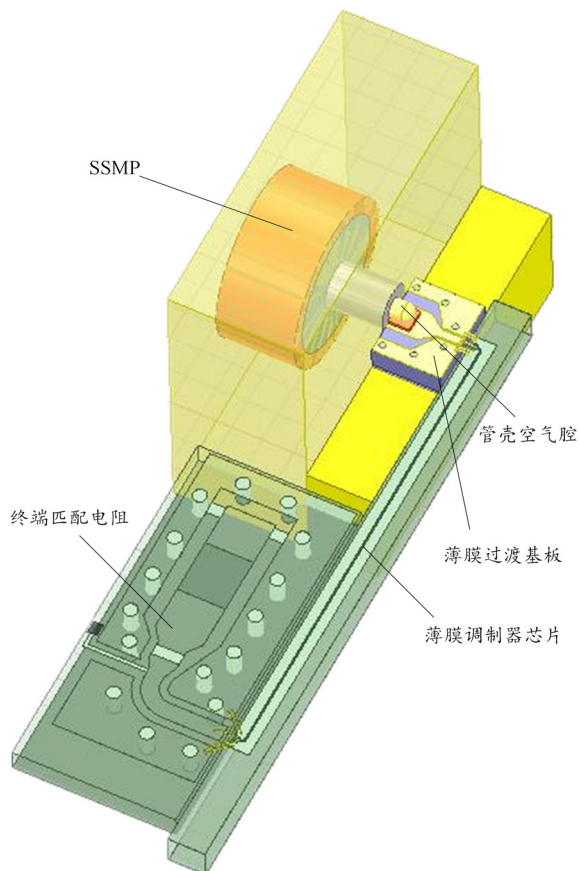


图5 40 GHz 薄膜铌酸锂电光调制器高频传输仿真模型图

根据高频传输模型中 40 GHz 的微波信号传输路径可知, 薄膜铌酸锂调制器芯片高频封装设计主要包括: 高频信号馈入设计、过渡薄膜基板高频阻抗匹配设计。

2.2.1 高频信号馈入设计

采用芯径为 0.3 mm 的 SSMP 射频接头与金属管壳装配时, 高频传输特性会受管壳结构的影响。SSMP 连接器射频输入端经管壳空气腔传输的模型如图 6 所示, 首先将射频连接器射频针头与管壳开腔, 然后与射频针头同轴做阻抗匹配仿真设计。经仿真优化, 可得 40 GHz 的 S11 约为 -30 dB, 具有良好的阻抗匹配特性。

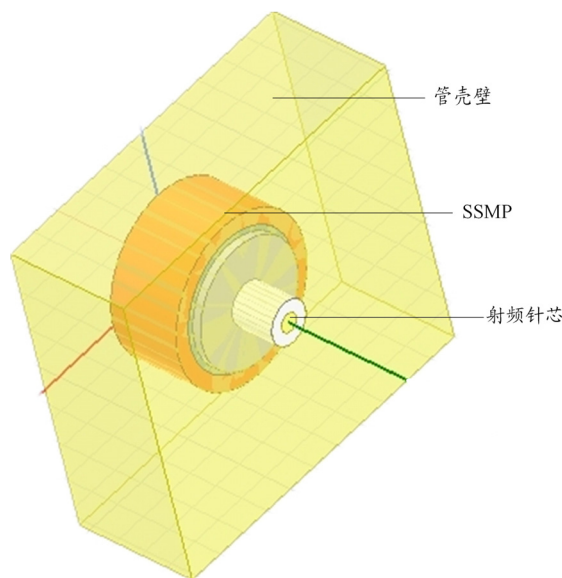


图6 高频信号馈入端管壳空气腔模型图

2.2.2 过渡薄膜基板高频阻抗匹配设计

过渡薄膜基板厚度为 0.254 mm, 高频过渡薄膜基板仿真模型如图 7 所示。微带线宽设计由宽到窄进行缓变, 宽的微带走线与射频接头连接, 用于匹配相对较粗芯径的射频接头, 实现经射频接头馈入信号的宽带传输; 细的微带走线与薄膜铌酸锂调制器芯片微米

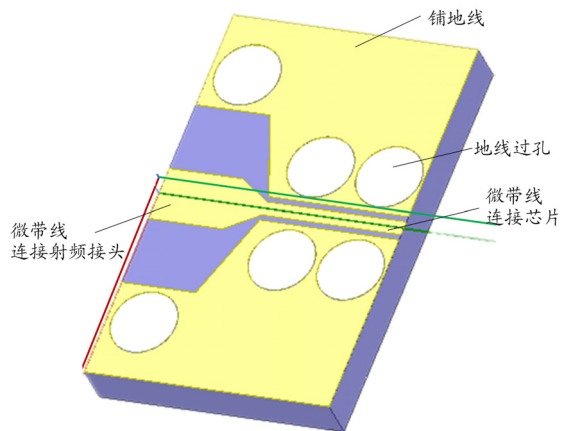


图7 高频过渡薄膜基板仿真模型图

级的焊盘连接,用于匹配芯片的微小焊盘。通过渐变微带走线设计,实现射频接头较粗的针芯与芯片微小焊盘之间的宽频带匹配连接,解决射频接头与芯片焊盘直接连接存在的阻抗不连续而导致的带宽下降问题。仿真结果表明,过渡薄膜基板 40 GHz 的 S11 约为-25 dB,具有较好的阻抗匹配特性。

将高频信号馈入端、过渡薄膜基板、调制器芯片键合后作为整体进行仿真,仿真结果表明,高频信号馈入端与过渡薄膜基板级联后,在 40 GHz 处, S11 值最低,约为-18 dB,并且整体阻抗匹配较好。

3 薄膜铌酸锂电光调制器试验

本文对薄膜铌酸锂电光调制器样品的核心指标进行了测试,测得其光插入损耗、半波电压分别为 4.1 dB、3.9 V;产品尺寸为 30 mm×10 mm×5 mm,比传统铌酸锂调制器体积小,两者实物对比如图 8 所示。

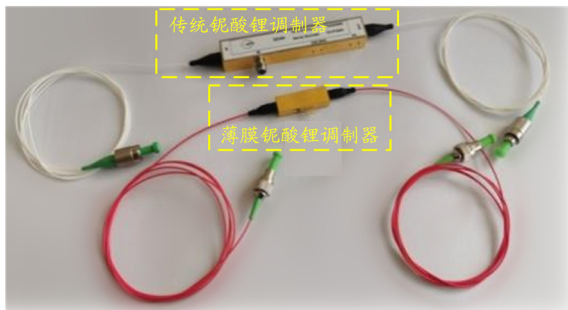


图 8 薄膜铌酸锂电光调制器与传统铌酸锂调制器实物对比图

除此之外,本文使用光矢量网络分析仪(6433F 光波元件分析仪)测试了薄膜铌酸锂电光调制器样品的 3 dB 带宽,测试结果如图 9 所示。

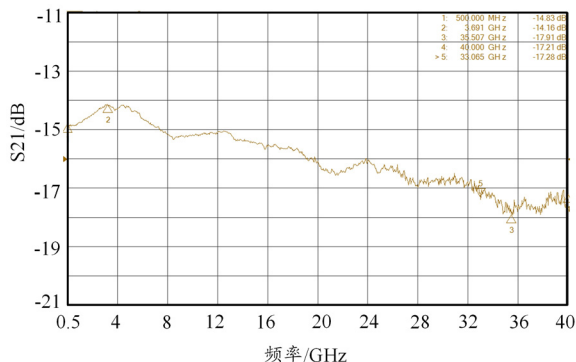


图 9 40 GHz 薄膜铌酸锂电光调制器带宽测试图

图 9 中的测试起始频率为 0.5 GHz,终止频率为 40 GHz(未做去嵌处理)。可以看出,在 0.5~40 GHz 频率范围内, S21 最大值为-14.16 dB、最小值为-17.91 dB (SSMP 接头无法直接与矢网连接测试 S21,产品与矢

网之间有射频转接头,一个射频转接头在 0.5~40 GHz 范围内的不平坦度约 0.7 dB),薄膜铌酸锂电光调制器的 3 dB 带宽约 40 GHz。

本文设计的薄膜铌酸锂电光调制器与传统铌酸锂电光调制器的指标对比如表 1 所示。可以看出,与传统的铌酸锂调制器相比,薄膜铌酸锂电光调制器不仅在半波电压、3 dB 带宽等核心技术指标方面具有优势,而且在产品尺寸方面也具有明显优势。

表 1 铌酸锂调制器指标对比

调制器名称	半波电压/V	3 dB 带宽/GHz	插入损耗/dB	尺寸/mm
传统铌酸锂电光调制器	4.5	30	4.5	65×9×9
薄膜铌酸锂电光调制器	3.9	40	4.1	30×10×5

4 结束语

本文介绍了薄膜铌酸锂调制器芯片结构及设计要点,设计了一种基于薄膜铌酸锂调制器芯片的新型电光调制器,其插入损耗、半波电压、3 dB 带宽、产品尺寸分别为 4.1 dB、3.9 V、40 GHz、30 mm×10 mm×5 mm,无论是核心光电性能指标还是产品尺寸,均达到国际同类产品水平。本文设计的薄膜铌酸锂电光调制器有望在微波光子链路、宽带光通信、量子通信等领域获得广泛应用。

参考文献:

- [1] MARPAUNG D, YAO J, CAPMANY J. Integrated microwave photonics[J]. Nature Photonics, 2019, 13: 80–90.
- [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): 101–104.
- [3] 喻千尘,梁雪瑞,马卫东. 铌酸锂电光调制器的研究进展[J]. 光通信技术, 2020, 44(4): 37–39.
- [4] LI M F, WANG L, LI XIANG, et al. Silicon intensity Mach-Zehnder modulator for single lane 100 Gb/s applications [J]. Photon Research, 2018, 6(2): 109–116.
- [5] OGISO Y, OZAKI J, UEDA Y, et al. 80 GHz bandwidth and 1.5 V VPI InP-based IQ modulator[J]. Lightwave Technology, 2020, 38(2): 249–255.
- [6] XU H, LI X, XIAO X, et al. High-speed silicon modulator with band equalization[J]. Optics Letters, 2014, 39(16): 4839–4842.
- [7] 刘海峰,郭宏杰,谭满清,等. 薄膜铌酸锂调制器的研究进展[J]. 中国光学, 2022, 15(1): 1–13.