微波光子技术及应用专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022011704

全封装的薄膜铌酸锂电光调制器

尚成林[1]，陶诗琪[2]，孙昊骋[2]，潘　安[1]，曾　成[1*]，夏金松[1]

（1. 华中科技大学 武汉光电国家研究中心，武汉 430074；2. 上海安湃芯研科技有限公司，上海 201803）

摘　要： 高速电光调制器是宽带光通信网络和微波光子系统中的关键元器件之一。相对于体材料铌酸锂而言，薄膜铌酸锂材料由于其较强的光场限制能力，在构建小尺寸、宽带、低半波电压的高性能电光调制芯片上有独特的优势。文章基于薄膜铌酸锂材料研制了一种 3 dB 带宽不低于 50 GHz 的电光调制芯片，并采用光纤与波导水平端面耦合的光学封装方案和基于 1.85 mm 同轴接头的射频封装方案，实现了全封装的薄膜铌酸锂电光调制器。测量结果表明，封装后器件的光学插入损耗小于等于 5 dB，3 dB 带宽大于等于 40 GHz，射频半波电压小于等于 3 V@1 GHz。

关键词： 微波光子学；薄膜铌酸锂；电光调制器

中图分类号： TN15　**文章编号：** 1001－5868(2022)01－0095－05

Fully Packaged Thin Film Lithium Niobate Electro-Optic Modulator

SHANG Chenglin[1], TAO Shiqi[2], SUN Haocheng[2], PAN An[1], ZENG Cheng[1], XIA Jinsong[1]

（1. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, CHN; 2. Shanghai ANPI Technology Co. Ltd., Shanghai 201803, CHN）

Abstract: High-speed electro-optic modulator is one of the key components in broadband optical communication networks and microwave photonic systems. Compared with the legacy lithium niobate, the thin-film lithium niobate material has unique advantages in constructing high-performance electro-optic modulation chips with small size, broadband and low half-wave voltage due to its strong optical field confinement ability. In this paper, an electro-optical modulation chip with a 3 dB bandwidth not less than 50 GHz was developed based on thin-film lithium niobate materials, and a fully packaged thin-film niobate electro-optic modulators was realized by using an optical packaging scheme of horizontal edge coupling between optical fiber and waveguide and a radio frequency packaging scheme based on 1.85 mm coaxial connectors. Measurement results indicate that the optical insertion loss of the packaged device is less than or equal to 5 dB, the 3 dB bandwidth is greater than or equal to 40 GHz, and the RF half-wave voltage is less than or equal to 3 V@1 GHz.

Key words: microwave photonics; thin-film lithium niobate; electro-optic modulators

0　引言

电光调制器是将射频电信号转变为光信号的核心器件，在光纤通信、微波光子学、量子通信、光学传感等领域有着广泛的应用[1-2]。近年来，由于微波光子系统对低链路损耗和低噪声系数的迫切需求，电光调制器必须在工作带宽、半波电压、尺寸、光插入损耗等指标上达到越来越高的标准。铌酸锂材料一直是制作高性能电光调制器的首选材料，其优势在于透明窗口宽、线性电光系数大、温度稳定性好等。目前微波光子链路中使用的电光调制器均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弱，导致器件的光电调制效率偏低，因此目前商用的体材料铌酸锂电光调制器

收稿日期：2022－01－17.

* 通信作者：曾　成　E-mail：zengchengwuli@hust.edu.cn

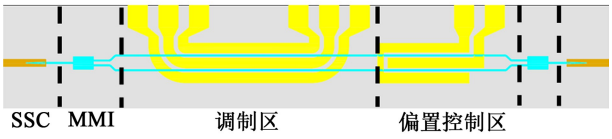
存在器件尺寸大、半波电压高、带宽受限等缺点。为了提升电光调制器的调制效率和工作带宽，研究人员在硅基材料和 InP 基材料上实现了小尺寸、可集成的电光调制器。受硅材料中载流子移动速率的限制，目前已报道全硅调制器的带宽大多为 40～50 GHz，调制效率为 1.5～2.0 V·cm，器件损耗约 10 dB/cm[3-5]。已报道的 InP 基电光调制器中工作带宽最高为 80 GHz，半波电压 V_π=1.5 V，插入损耗为 8.5 dB[6]。由于 Si 和 InP 材料缺乏本征的二阶非线性效应，导致其在电光调制的同时也存在非线性失真、光学损耗大、对温度波动敏感等缺点[7]。

近年来，济南晶正、上海微系统所等单位采用 Smart Cut 技术制备出绝缘体上铌酸锂单晶薄膜(Thin Film Lithium Niobate，TFLN)材料[8-9]。该材料在继承体铌酸锂优异的光电特性的基础上，获得了较强的光场限制能力。基于 TFLN 材料构建的光波导截面尺寸在亚波长量级，较强的光学模式限制能力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。2018 年，哈佛大学研制出基于 TFLN 材料的电光强度调制芯片，其带宽达 100 GHz[10]，尺寸仅约传统体材料铌酸锂电光调制芯片的 1/10。2019 年，中山大学研究团队报道了采用 Si-LN 混合集成的调制芯片，调制效率为 2.2 V·cm，消光比为 40 dB，电光带宽为 70 GHz[11]。2021 年，美国 HyperLight 公司通过在调制芯片上采取分段式的微结构电极，实现了 50 GHz 下 1.6 V 的超低半波电压[12]。上述研究表明，TFLN 材料在构建高性能、小尺寸的调制芯片方面拥有独特的优势。TFLN 调制芯片在走向实用化的道路上还需要配套的光电耦合封装技术来提升器件的稳定性和可靠性，然而目前国内外尚没有关于 TFLN 调制芯片耦合封装方案的报道。

本文基于薄膜铌酸锂材料研制了一种 3 dB 带宽不低于 50 GHz 的电光强度调制芯片，并提出了 TFLN 电光调制器的小型化封装方案。封装后的 TFLN 电光调制器的光学插入损耗小于等于 5 dB，3 dB 带宽大于等于 40 GHz，射频半波电压小于等于 3 V@1 GHz，器件尺寸仅约 30 mm×20 mm×5 mm。

1 薄膜铌酸锂高速电光调制器芯片研制

本文研制的 TFLN 调制芯片基于 500 nm 厚的 *X* 切 TFLN 构建，由调制区、偏置控制区、光分/合束器(MMI)和端面耦合器(SSC)组成，示意图如图 1(a)所示。采取电子束曝光生成图形、感应耦合离子束刻蚀铌酸锂、电子束蒸发制备金属膜的方法制作 TFLN 调制芯片，调制区长度为 9 mm，实物图如图 1(b)所示。



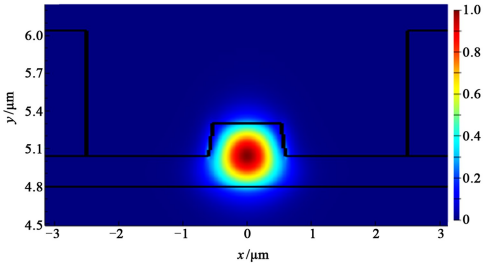
(a) 宽带 TFLN 调制芯片结构示意图



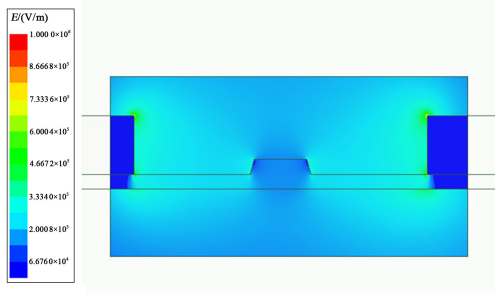
(b) TFLN 调制芯片实物图

图 1 TFLN 芯片结构示意图及实物图

调制区为调制芯片的核心部分，由光波导及共面波导电极组成，可分为两个相移区。光波导部分，通过仿真选取刻蚀深度为 260 nm、上脊宽为 900 nm 的单模波导，波导侧壁倾角为 70°，波导上方覆盖氧化硅包层。波导的 TE0 模式分布如图 2(a)所示，仿真结果表明 TE0 模的有效折射率约为 1.86。在不显著增加波导光学损耗的前提下，调制电极之间的间距应尽可能缩小以获得最高的调制效率。通过仿真，本文确定的电极间距为 5 μm，并获得外加电压为 1 V时波导附近的电场分布图(如图



(a) TFLN 波导中 TE0 光场模式分布图



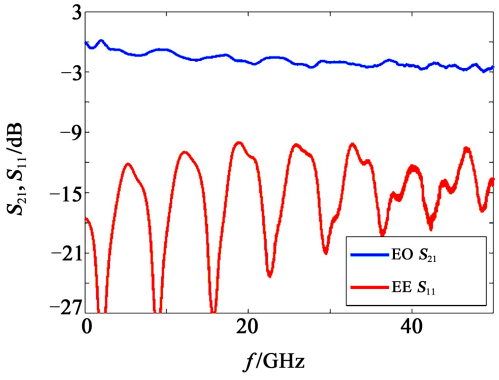
(b) 调制电场分布图(电极上外加电压为 1 V)

图 2 TFLN 相移区波导内光场模式分布及波导附近调制电场分布

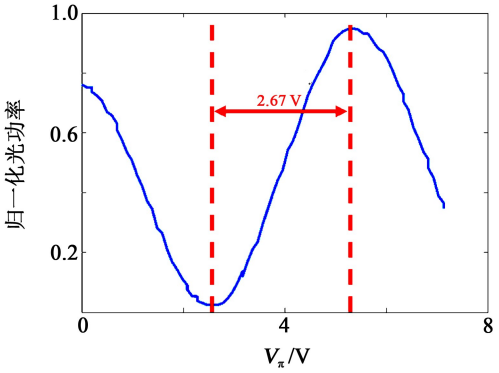
2(b)所示)，据此算出 MZM 强度调制器的理论 $V_\pi L=2.43\ \mathrm{V\cdot cm}$。电极间距确定后，采取有限元仿真获得信号电极宽度为 40 μm，电极间距为 5 μm，电极厚度为 1 μm，氧化硅包层厚度为 2 μm，对应阻抗约为 35 Ω，微波有效折射率约为 2.3。

偏置控制区与相移区的设计基本相同。光分/合束器采取多模干涉耦合器(Multi-Mode Interferometer，MMI)结构，基于单模波导对 C 波段进行设计。此外，片上集成的水平端面耦合器采用了基于双层倒锥形尖端结构的模斑变换器(Spot Size Converter，SSC)，并针对 C 波段进行优化，输出模斑直径约 3.5 μm[13]。

对制备出的调制芯片，本文利用 67 GHz GSG 探针搭建测试系统，使用矢量网络分析仪对芯片的 S 参数进行测试，芯片终端负载选择 33 Ω 电阻。芯片的 S 参数实测结果如图 3(a)所示，其 3 dB 带宽约为 50 GHz，同时电反射在 50 GHz 内小于−10 dB。需注意到测试时未解嵌探针，若去掉探针的影响，芯片的本征带宽应大于 50 GHz。针对半波电压测试，本文利用信号发生器产生 1 kHz 三角波对芯片扫描，得到测试结果如图 3(b)所示，半波电压约 2.67 V，对应的 $V_\pi L$ 约 2.4 V·cm。



(a)　TFLN 调制芯片的实测电光响应 S 参数



(b)　TFLN 调制芯片的半波电压

图 3　TFLN 调制芯片实测带宽及半波电压

2　全封装的薄膜铌酸锂电光调制器研制

调制器芯片的整体封装方案由调制器芯片、管壳与插针、射频(Ratio Frequency，RF)接头、陶瓷板、光纤阵列(Fiber Array，FA)等部分组成，如图 4 所示，整体器件尺寸约 30 mm×20 mm×5 mm。该封装方案可分为光学与电学两部分，接下来将分别进行说明。

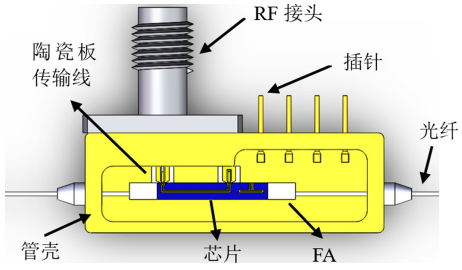


图 4　TFLN 调制器封装结构示意图

2.1　光学封装

在光学封装中，光纤通过 FA 与芯片直接连接。考虑到芯片 SSC 的输出光斑约为 3.5 μm，为了尽可能实现模场匹配，选用 1 550 nm 波段的高数值孔径的单模光纤 UHNA7，并针对这种光纤设计与之匹配的光纤阵列。设计的 FA 通过 V 型槽和盖板将光纤固定，V 型槽和盖板的材料均为肖特-高硼玻璃。光纤阵列的尺寸为 3 mm×1.5 mm×1.5 mm。

本文利用一套自动耦合系统，将 FA 与芯片用紫外固化胶进行固定。同时该方案在−45°～75°范围内进行的热循环测试中，对于 TE 光的最大耦合效率衰减小至 0.01 dB，表现出对环境温度的不敏感性[13]。光纤接头(FC/UPC)到接头的插入损耗小于等于 5 dB。

2.2　电学封装

在电学封装中，包含 RF 连接部分和直流(Direct Current，DC)连接部分，其中 DC 使用管壳上的 DC 插针进行连接。在 RF 部分中，本文采用 1.85 mm 同轴连接器作为 RF 输入，并用 RF 插针延长信号线到管壳内部。注意到 RF 插针直径与芯片电极尺寸差距较大，所以利用陶瓷板传输线进行过渡。陶瓷板传输线选取制作有金属共面波导电极的氧化铝陶瓷板，厚度约为 254 μm，靠近芯片区域的信号电极宽度为 110 μm，电极间距为 60 μm，在保证阻抗约为 50 Ω 的同时和芯片电极的 PAD 区域尺寸尽可能一致，模型如图 5 所示，并将 RF 插针与

陶瓷板传输线的连接处电极间距进行适当加宽以提高此处阻抗，获得更好的阻抗匹配效果，仿真结果如图 6 所示。最终采取电极间距为 200 μm，此时在 50 GHz 内 S_{21} 小于 0.6 dB，S_{11} 小于−13 dB。

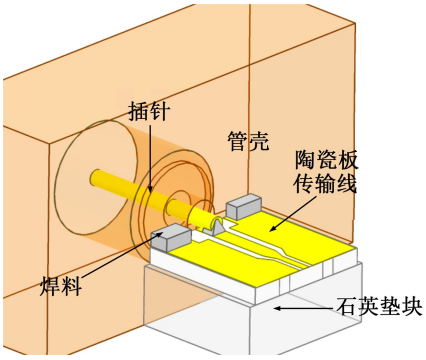


图 5 调制器射频输入部分的结构示意图

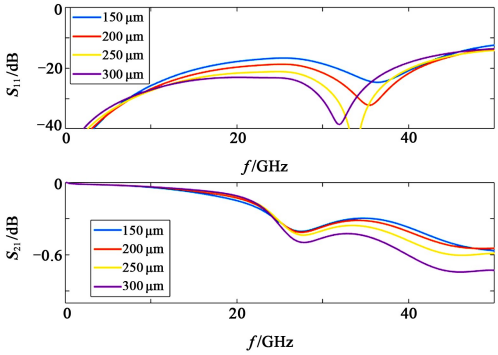


图 6 不同电极间距时射频输入部分的性能曲线

为了评估封装后器件的性能，仿真 RF 信号从 50 Ω 端口输入，经插针、陶瓷板、芯片，最后在 33 Ω 端口终止，S 参数仿真结果如图 7 所示。从图中可以看到，在较高频段 S_{11} 反射较大，导致 S_{21} 出现抖动，这主要来源于阻抗失配。另外，在较低频率出现谐振，这是由于接地较差和金属电极与管壳间形成谐振导致。需指出的是，仿真中未包含 RF 接头，最终器件性能将比仿真性能有部分劣化。

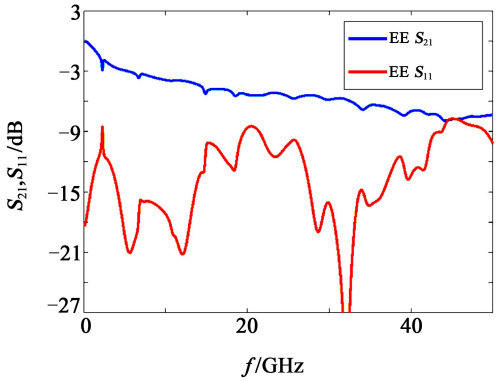


图 7 全封装 TFLN 调制器的微波 S 参数仿真结果

2.3 器件测试

基于上述讨论，制作出全封装的 TFLN 强度调制器，器件实物图如图 8 所示。

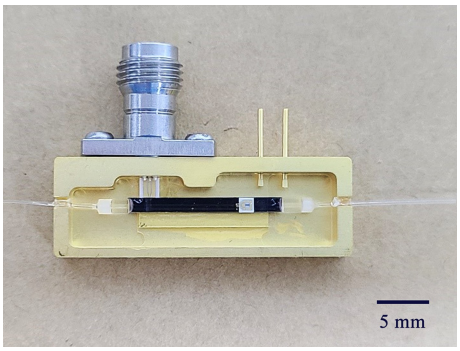
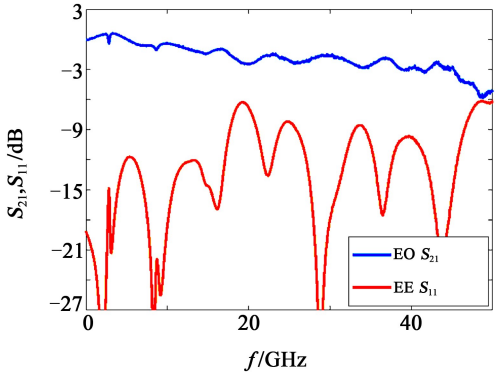
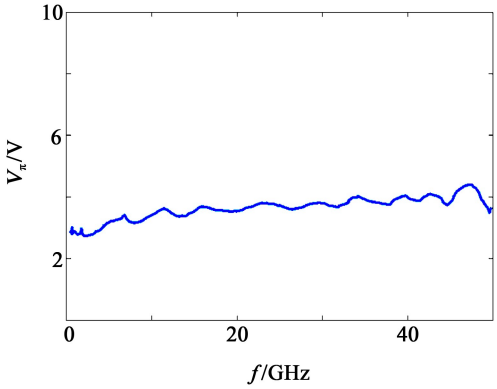


图 8 全封装的 TFLN 电光调制器实物图

使用矢量网络分析仪测试器件的 S 参数，解嵌去除调制器外其余链路部分后，得到测试结果如图 9(a)所示。从测试结果上看，封装后的调制器电光带宽大于等于 40 GHz，但 S_{21} 曲线上出现谐振与抖动且 S_{11} 较大，与仿真结果类似但有所劣化，主要由 RF 接头的影响及插针的制作精度不足导致。后续可通过进一步对芯片进行优化，如提高阻抗、改善接



(a) 封装后 TFLN 电光调制器的电光响应 S 曲线



(b) 不同频段下调制器的半波电压

图 9 全封装的 TFLN 电光调制器电光响应 S 曲线及半波电压测试结果

地等方式，使 S_{11} 进一步减小，改善 S_{21} 的抖动与谐振。RF 半波电压测试系统利用信号发生器及光谱仪搭建，测试结果如图 9(b)所示。测试结果表明，1 GHz 时 RF 半波电压小于等于 3 V，在 40 GHz 内小于等于 4 V，且半波电压曲线显示出与 S_{21} 曲线的良好相关性。

3　结论

本文基于薄膜铌酸锂材料研制出带宽大于等于 50 GHz 的调制器芯片，并针对该芯片提出了光学封装和射频封装的技术方案，制备出全封装的薄膜铌酸锂电光调制器。在包含 1.85 mm 同轴连接器的条件下，器件尺寸(不含光纤)仅为 30 mm×20 mm×5 mm。测量结果显示，封装后器件的 3 dB 工作带宽大于等于 40 GHz，1 GHz 时 RF 半波电压小于等于 3 V，光学插入损耗小于等于 5 dB。进一步地，通过优化片上集成模斑转换器的结构设计、优化行波电极的阻抗匹配，全封装的薄膜铌酸锂电光调制器的光电性能未来还将进一步得到提升。该器件有望在微波光子链路、宽带光通信、光计算等领域获得广泛的应用。

参考文献：

[1] 王　振，廖　柯，瞿鹏飞. 异质集成微波光子器件发展现状[J]. 半导体光电，2018，39(3)：305-311.
Wang Zhen，Liao Ke，Qu Pengfei. Development status of heterogeneous integrated microwave photonics devices[J]. Semiconductor Optoelectronics，2018，39(3)：305－311.

[2] Zhang M，Wang C，Kharel P，et al. Integrated lithium niobate electro-optic modulators：When performance meets scalability[J]. Optica，2021，8(5)：652-667.

[3] Xu H，Xiao X，Li X，et al. High speed silicon Mach-Zehnder modulator based on interleaved PN junctions[J]. Opt. Express，2012，20(14)：15093-15099.

[4] Xu H，Li X，Xiao X，et al. High-speed silicon modulator with band equalization[J]. Opt. Lett.，2014，39(16)：4839-4842.

[5] Li Miaofeng，Wang Lei，Li Xiang，et al. Silicon intensity Mach-Zehnder modulator for single lane 100 Gb/s applications[J]. Photon. Research，2018，6(2)：109-116.

[6] Ogiso Y，Ozaki J，Ueda Y，et al. 80 GHz bandwidth and 1.5 V VPI InP-based IQ modulator[J]. J. Lightwave Technol.，2020，38(2)：249-255.

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

[8] Hui H，Li G，Ricken R，et al. Towards nonlinear photonic wires in lithium niobate[J]. Proc. of SPIE，2010，7604：842674.

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

[10] 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.

[11] 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.

[12] Kharel P，Reimer C，Luke K，et al. Breaking voltage-bandwidth limits in integrated lithium niobate modulators using micro-structured electrodes[J]. Optica，2021，8(3)：357-363.

[13] Hu Changran，Pan An，Li Ting'an，et al. High-efficient coupler for thin-film lithium niobate waveguide devices[J]. Opt. Express，2021，29(4)：5397-5406.

作者简介：

尚成林(1994－)，男，河南省人，硕士，工程师，研究方向为薄膜铌酸锂调制器及半导体工艺；

曾　成(1989－)，男，河南省信阳市人，博士，讲师，主要从事薄膜铌酸锂光子器件、硅基光子器件、宽带光子器件封装等方面的研究。