

铌酸锂衬底超导非对称共面波导 传输线设计与制备*

霍劲羽¹⁾²⁾ 李凌云^{1)2)†} 原蒲升¹⁾ 余慧勤¹⁾ 汪书娜¹⁾

1) (中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海市超导集成电路技术重点实验室, 上海 200050)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2025年11月25日收到; 2026年1月27日收到修改稿)

面向跨温区光电互联的低温电光调制器应用, 设计并制备了一种高性能、可扩展的弯曲结构超导非对称共面波导传输线. 传输线采用非对称共面波导结构, 将中心电场强度提升了约90%; 圆环弯曲结构实现了有限芯片面积内传输线长度有效拓展; 集成介质桥结构显著改善了弯曲区域阻抗不连续的问题. 同时设计了一种基于SU-8光刻胶的介质桥制备工艺流程, 利用微纳加工技术在铌酸锂衬底上实现集成介质桥结构的超导传输线制备, 并使用低温探针台对其低温下的高频传输特性进行测试. 结果表明, 所制备的弯曲传输线在4.2 K低温环境下展现出59 GHz的3 dB带宽, 证明该结构能够有效满足长超导行波电极的制备需求.

关键词: 非对称共面波导, 介质桥, 微纳加工, 电光调制

DOI: 10.7498/aps.75.20251601

CSTR: 32037.14.aps.75.20251601

1 引言

20世纪90年代以来, 超导集成电路飞速发展, 基于超导量子比特的量子系统^[1,2], 快速单磁通量子电路^[3]等成为未来信息处理系统中很有前景的技术. 由于超导电路通常工作在低温环境中, 面临着多通道高速低幅值数据的跨温区传输问题^[4,5], 数据的跨温区传输主要有同轴电缆^[6]和光纤^[7]两种方案, 相比之下光纤的尺寸小约两个数量级, 热负荷低约两个数量级, 带宽高约3个数量级, 且不受串扰和电磁干扰的影响^[8], 因此采用光链路进行跨温区数据传输能够更高效地实现多通道高速数据传输.

低温电光调制器是构建跨温区光电互联系统的关键器件, 主要负责在低温环境下实现电信号至光信号的高效转换. 在超导电路的应用中, 该类器

件需同时满足高调制带宽与低驱动电压的严苛要求^[9]. 铌酸锂电光调制器因其材料本身具备优异的电光系数, 结合铌酸锂平台在集成工艺方面的持续进步^[10,11], 已成为实现高性能调制的理想方案之一. 铌酸锂虽然在低温条件下电光系数会出现一定程度的下降^[12], 但仍能维持稳定工作, 且有研究表明其低温下表现出优异的调制性能^[13], 满足低温系统的应用需求. 为追求更低功耗而发展的超导电光调制器, 能实现低半波电压, 但因其弯曲电极结构引入的阻抗不连续性, 导致电极3 dB带宽远低于10 GHz, 从而严重限制了器件的电光响应及其在跨温区互联系统中的应用^[13].

半波电压作为评价电光调制器驱动效率的核心指标, 与电极间隙宽度成正比, 而与外加电场强度及光场-电场相互作用长度成反比. 传统金属电极由于存在显著的欧姆损耗, 导致半波电压与调制带宽之间形成相互制约的关系^[14]: 即通过增大相

* 国家重点研发计划 (批准号: 2025YFA1212602) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lilingyun@mail.sim.ac.cn

相互作用长度以降低半波电压的同时, 往往会因损耗上升而严重限制带宽. 相比之下, 超导电极凭借其低温下的零电阻特性, 能够显著降低欧姆损耗, 使得通过延长相互作用长度, 持续降低半波电压变得可行^[15], 且对带宽影响小. 在器件设计中, 为在有限尺寸衬底上实现较长的相互作用长度, 通常需要引入弯曲结构. 针对弯曲结构会引起的传输线阻抗失配问题, 可采用跨线介质桥等匹配结构予以补偿, 从而有效抑制信号反射与寄生模激发, 保障器件在高速工作时的信号完整性^[16-18].

本文针对铌酸锂电光调制器的低温应用, 设计了一种基于介质桥结构的超导非对称共面波导弯曲传输线. 使用非对称结构将电场能量集中于窄间隙侧, 凭借超导金属的低欧姆损耗, 设计长距离传输线增大有效调制长度, 旨在实现更高的电光调制效率和更低的半波电压, 集成介质桥结构优化弯曲传输线的阻抗连续性, 实现高速数据传输. 利用微纳加工在铌酸锂衬底上成功制备了超导传输线, 并在 4.2 K 液氮制冷低温探针台中对传输线的高频传输特性进行实验测试, 结果表明该结构的传输线能够实现高速数据传输.

2 非对称共面波导传输线设计与仿真

共面波导 (coplanar waveguide, CPW) 结构一般是由衬底基板、接地线和中心导体构成, 如图 1 所示, 图中 W 为中心导体宽度, S_1 和 S_2 分别为中心导体到两侧接地线之间的间隙宽度, W_g 为接地线宽度, t 为金属层厚度, h 为衬底基板厚度. 本文通过设计不相等的间隙宽度 ($S_1 \neq S_2$), 构成了一种非对称共面波导结构 (asymmetric coplanar waveguide, ACPW).

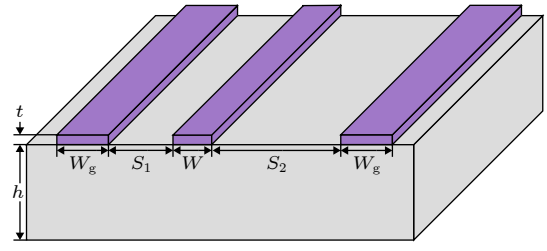


图 1 非对称共面波导结构示意图

Fig. 1. Schematic diagram of the asymmetric coplanar waveguide structure.

本文所设计的 ACPW 以厚度为 $h = 500 \mu\text{m}$ 的铌酸锂作为衬底材料, 采用厚度为 $t = 275 \text{ nm}$ 的金属铌作为超导体. 对于各向同性介质上的 ACPW, 已有研究在准 TEM 假设下, 基于保角变换方法建立了解析模型, 可用于计算其特性阻抗和传播损耗^[19]. 然而, 该类解析方法依赖于介质介电常数为标量的前提条件, 而铌酸锂是一种强各向异性晶体, 其介电常数表现为张量形式, 从而破坏了保角变换方法的适用条件, 导致难以获得 ACPW 结构特性阻抗的解析表达式. 因此, 本文采用电磁仿真方法对 ACPW 传输线进行建模, 其中金属铌采用理想导体模型, 铌酸锂衬底选用室温下的介电常数张量, 其值随温度变化较小^[20], 因此对特性阻抗影响较小, 最后对中心导体宽度、电极间隙及接地导体宽度等关键参数进行系统优化, 实现了 50Ω 特性阻抗下的优化设计.

为对比电场分布情况, 设计了等特性阻抗及等电极间隙的 CPW 传输线作为对照, 其与 ACPW 的电场分布情况如图 2 所示. ACPW 的电场显著集中于窄间隙侧, 而 CPW 的电场分布相对较为均匀. 铌酸锂电光调制器中常用光波导的宽度为 $1-4 \mu\text{m}$, 本文选取间隙中心 $2 \mu\text{m} \times 600 \text{ nm}$ 区域内

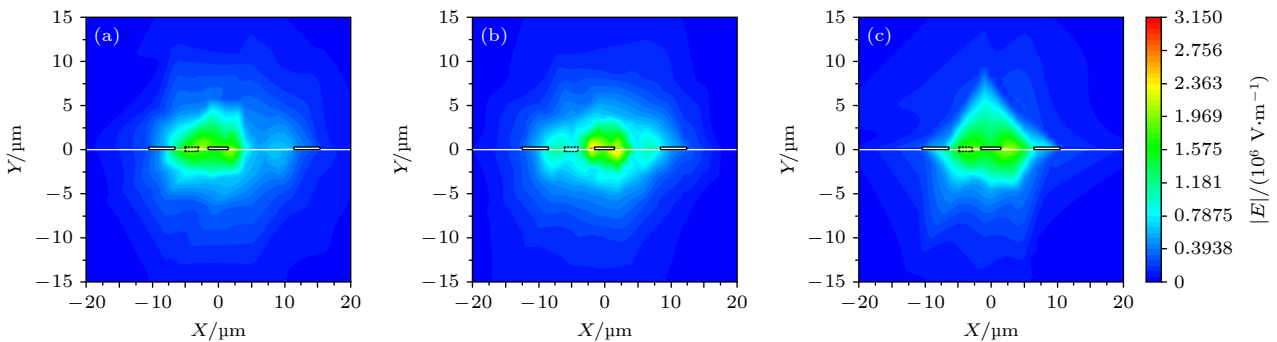


图 2 电场强度分布图 (a) ACPW; (b) 等阻抗 CPW; (c) 等间隙 CPW

Fig. 2. Distribution of the electric field intensity: (a) ACPW; (b) impedance-equalized CPW; (c) gap-equalized CPW.

平均电场强度作为等效电光调制电场. 3种传输线的结构参数及对应的平均电场强度见表1. 结果表明, 在相同特性阻抗下, ACPW 在中心区域的电场强度相较 CPW 提升约 90%, 而等间隙下, CPW 传输线的特性阻抗偏小, 相比 ACPW 的中心区域电场强度仍小约 5%. 表明 ACPW 结构在 50 Ω 特性阻抗前提下, 能够有效增强一侧电场强度, 从而有利于电光调制效率的提升.

为在有限芯片尺寸内实现长距离信号传输, 需要使用弯曲结构的传输线. 然而, 理想的 CPW 结构要求严格的连续性和对称性^[21], 中心导体两侧的接地线应该维持在等电位状态, 而弯曲结构的引入和 ACPW 的非对称结构会破坏这一条件, 导致接地线电位不一致与阻抗不连续, 进而引起信号反射和模式失真. 为维持接地等电位并保证传输连续性, 本文采用跨线结构对两侧接地线进行电气连接. 针对超导铌材料对工艺温度的敏感性, 本文提出并采用了一种基于 SU-8 光刻胶^[22] 的介质桥结构实现跨线连接. 该方案在避免高温工艺导致铌薄膜氧化^[23] 的同时, 兼顾了结构稳定性, 工艺兼容性 & 后续键合测试需求.

如图3所示的弯曲型 ACPW 传输线, 其中紫色、金色与浅蓝色区域分别表示金属铌薄膜、钛金薄膜和 SU-8 介质层, 灰色虚线框标示出集成波导的窄间隙侧中心区域. 传输线由键合测试区、直线传输线、两个弯曲连接线和四组介质桥构成, 其中

键合测试区包含 200 μm 长 CPW 端口和 400 μm 长 ACPW 转 CPW 等阻抗变换线, 传输主体为 3 组间距 100 μm、长度 2000 μm 的平行 ACPW 传输线, 通过圆环结构实现弯曲互连, 并分别在弯曲结构前后关键位置放置介质桥. 介质桥结构参数如方框 B 所示, 设计梯形区域增大钛金薄膜和底层铌薄膜的接触面积实现有效电气连接, 将介质区域与底层铌薄膜部分重叠形成平滑形貌过渡, 有效抑制因台阶高度差突变导致的金属断裂风险. 方框 C 为弯曲连接线具体参数, 由一组同心圆环及其连接线构成, 通过信号线跨越波导后交换两端间隙宽度, 确保了窄间隙侧电场方向的一致性.

3 非对称共面波导传输线制备与测试分析

3.1 基于介质桥的非对称共面波导传输线制备

传输线的制备选用矩形铌酸锂材料, 长边对应 [100] 晶向, 分别设计了直流测试线、有/无接地介质桥的直线型和弯曲型传输线.

图4(a)所示为完整工艺流程: 首先, 在衬底上通过磁控溅射沉积 275 nm 铌超导薄膜, 通过光刻与反应离子刻蚀工艺将铌薄膜图形化为共面波导传输线结构. 接着, 在刻蚀后的结构上旋涂并图形化一层 SU-8 光刻胶作为介质层, 该工艺采用 95 °C

表 1 ACPW 和 CPW 参数值

Table 1. Parameters for the ACPW and conventional CPW.

	$W/\mu\text{m}$	$W_g/\mu\text{m}$	$S_1/\mu\text{m}$	$S_2/\mu\text{m}$	特性阻抗/ Ω	电场强度/ $(\text{V}\cdot\text{m}^{-1})$
ACPW	3	4	5	10	50	1.861×10^6
等阻抗CPW	3	4	7	7	50	9.770×10^5
等间隙CPW	3	4	5	5	45	1.769×10^6

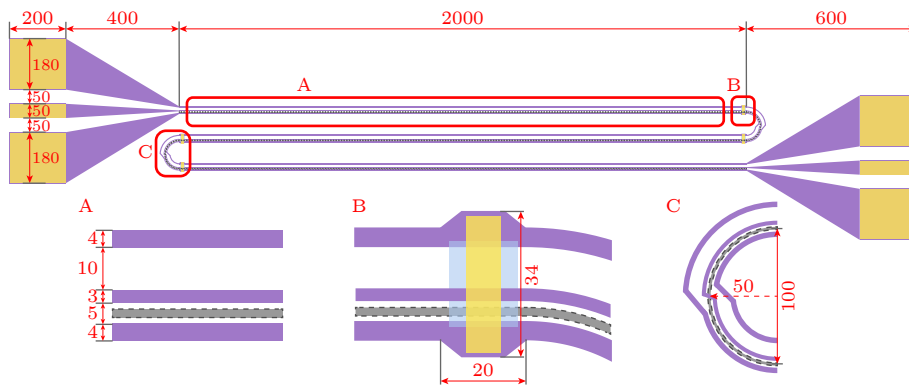


图 3 弯曲传输线的设计图及其尺寸图 (单位均为微米)

Fig. 3. Design and dimensional layout of the bent transmission line (unit in μm).

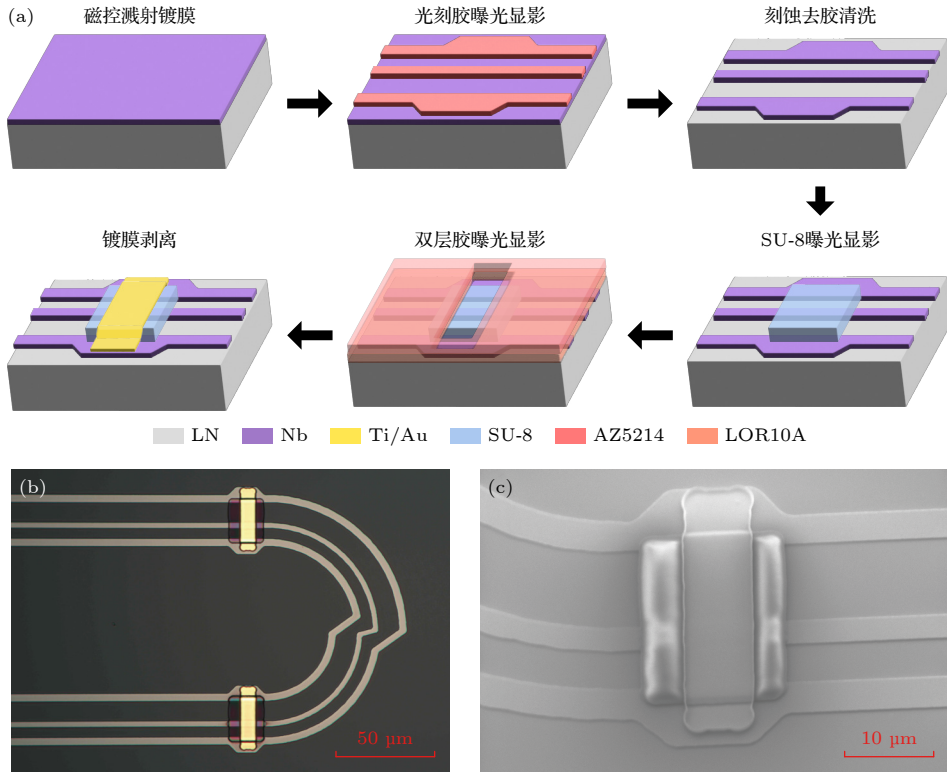


图 4 (a) 传输线制备工艺流程图; (b) 介质桥光学显微镜图像; (c) 介质桥扫描电子显微镜图像

Fig. 4. (a) Process flow of the transmission line; (b) optical microscope image of the dielectric bridge; (c) scanning electron microscope image of the dielectric bridge.

的低温烘烤进行固化,能够有效限制铌薄膜表面的过度氧化. 固化后经等离子体处理使其表面轮廓圆滑,得到厚度约为 800 nm 的介质层. 最后,采用磁控溅射沉积 10 nm/150 nm 钛金薄膜,在溅射金属前使用等离子处理去除铌薄膜表面的自然氧化层^[24]以确保良好的欧姆接触,最终通过剥离工艺形成互连的介质桥结构. 图 4(b), (c) 分别为传输线的光学显微镜和扫描电子显微镜图像,图中可见钛金连接线形貌连续,完整覆盖于侧壁之上.

为评估传输线的超导性能,对尺寸为 $2000\ \mu\text{m} \times 3\ \mu\text{m}$ 超导直流测试线进行性能表征. 结果如图 5 所示,测试线的超导转变温度为 7.8 K,且转变宽度仅为 0.03 K,表现出良好的超导特性,表明该工艺流程适用于铌超导传输线的制备.

3.2 对称共面波导传输线测试

传输线的低温电学测试在低温探针台中进行,测试使用间距为 $100\ \mu\text{m}$ 的接地-信号-接地探针. 测试流程如下:将器件、校准件安装于样品台,密封系统并抽真空后降温,待样品台温度稳定至 4.2 K 后,进行电学测量.

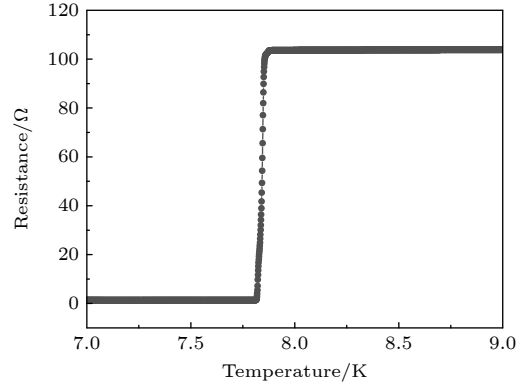


图 5 测试线直流电阻随温度的变化
Fig. 5. DC resistance versus temperature for the test line.

利用电流源和电压表测试直流性能,线路总电阻从室温下 $1.8\ \text{k}\Omega$ 降低至低温下约 $2\ \Omega$,表明传输线为超导态. 使用矢量网络分析仪进行高频测试,校准之后,对器件上不同结构传输线进行传输性能测试,图 6(a), (b) 分别为使用探针对带有接地介质桥的直线型和弯曲线传输线测试图.

图 7 所示为直线型传输线 S 参数测试结果. 两种直线型传输线示意图如图 7(a) 所示,分别为无介质桥和带有 4 组接地介质桥的直线型传输线,两

者直线 ACPW 传输线长度均为 $2000\ \mu\text{m}$, 键合测试区和介质桥结构尺寸与上述弯曲传输线一致. 测试结果如图 7(b) 所示, 对比有/无介质桥的直线型传输线 S 参数结果, 两者在宽频带内的回波损耗和插入损耗高度重合, 且 3 dB 带宽均为 66 GHz, 表明引入一定数量的介质桥未破坏传输线的连续性, 对传输性能未产生显著影响.

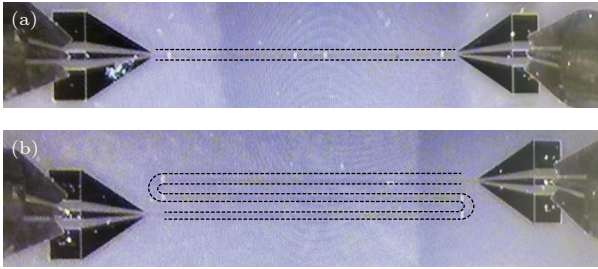


图 6 (a) 直线型传输线测试图; (b) 弯曲型传输线测试图
Fig. 6. Illustration of the probe connections to the straight (a) and bent (b) transmission lines.

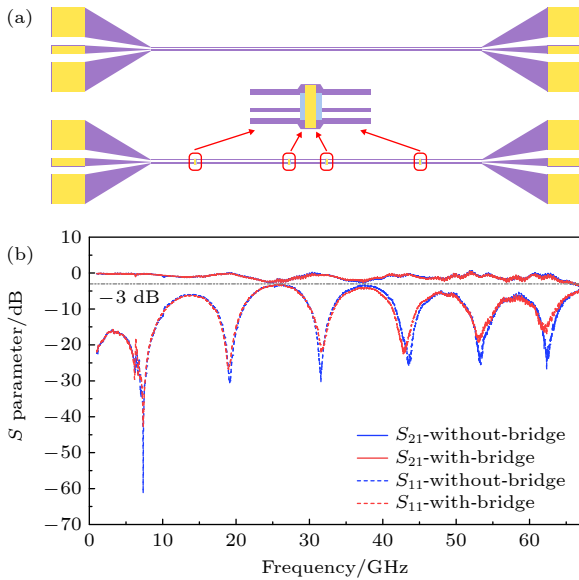


图 7 (a) 直线型传输线示意图; (b) 直线型传输线低温下 S 参数测试结果
Fig. 7. (a) Schematic and (b) measured S -parameters of the straight transmission line at cryogenic temperature.

图 8 为弯曲型传输线 S 参数测试结果. 两种弯曲型传输线结构示意图如图 8(a) 所示, 分别为无介质桥和带有 4 组接地介质桥的弯曲型传输线. 图 8(b) 对比了有/无介质桥的弯曲型传输线 S 参数测试结果. 可以看出, 无介质桥的弯曲型传输线在 8.77 GHz 和 23.86 GHz 处存在显著的谐振峰. 这是由于弯曲结构带来的阻抗不连续在特定频率

处激发了寄生谐振, 且随着弯曲结构数量增加, 谐振峰会随之增加, 导致传输线性能严重恶化. 相比之下带有 4 个接地介质桥的弯曲型传输线显著改善了因阻抗不连续引起的寄生谐振效应, 其 3 dB 带宽可达 59 GHz.

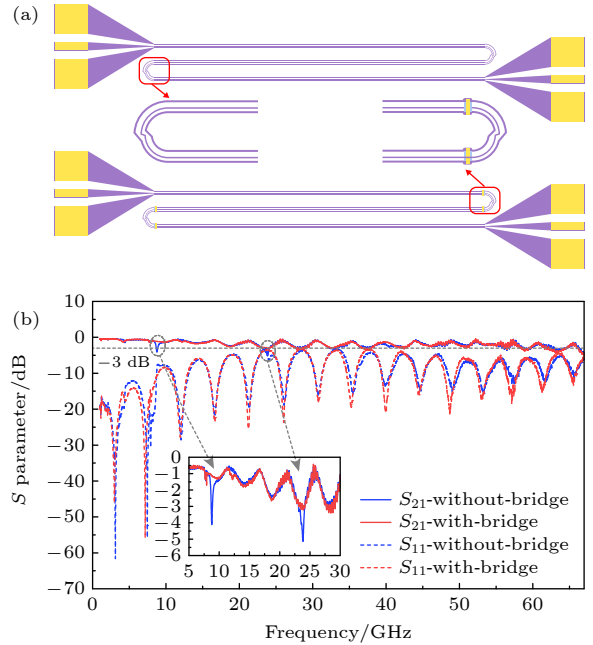


图 8 (a) 弯曲型传输线示意图; (b) 弯曲型传输线低温下 S 参数测试结果
Fig. 8. (a) Schematic and (b) measured S -parameters of the bent transmission line at cryogenic temperature.

4 结 论

本文针对跨温区光电互联的低温光电调制器应用, 设计并制备了一种高性能的长距离超导非对称共面波导传输线. 使用两侧间隙不相等的非对称共面波导结构, 将间隙中心区域电场提高约 90%, 使用弯曲结构在有限面积内增大传输线长度, 设计介质桥结构优化弯曲传输线上的阻抗连续性提高其高频传输性能. 设计了一种基于 SU-8 光刻胶的介质桥制备方法, 兼顾了超导铌材料的工艺约束与器件测试需求, 为低温光电调制器中的超导传输线设计提供了一种可靠且可集成的实现方案, 并可应用于超导微波电路中其他无源器件的设计和制备中.

测试结果表明, 所制备的有/无介质桥的两种 $2000\ \mu\text{m}$ 长直线型传输线表现出一致的 66 GHz 的 3 dB 带宽, 而 $6000\ \mu\text{m}$ 长集成介质桥结构的弯曲型

传输线将 3 dB 带宽从 9 GHz 提升至 59 GHz, 说明介质桥的引入在不带来额外损耗前提下显著改善了弯曲结构的传输性能. 尽管弯曲型传输线相比直线型传输线长度增大了 3 倍以上, 其插入损耗仅小幅增大, 表明所制备的超导传输线本身具有极低的微波本征损耗. 相比已有报道中用于电光调制器的弯曲结构在长距离传输条件下易引入寄生谐振, 从而将 3 dB 带宽限制在 10 GHz 以下的情况^[13], 本文所采用的基于介质桥结构的跨线方案有效抑制了弯曲结构引入的电气不连续性和寄生谐振, 使传输线在更长传播路径下仍保持高带宽特性, 适用于电光调制器的高速长距离调制需求.

参考文献

- [1] Huang H L, Wu D C, Fan D J, Zhu X B 2020 *Sci. China Inf. Sci.* **63** 180501
- [2] Zhao S P, Liu Y X, Zheng D N 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 228501 (in Chinese) [赵士平, 刘玉玺, 郑东宁 2018 物理学报 **67** 228501]
- [3] Soloviev I I, Klenov N V, Bakurskiy S V, Kupriyanov M Y, Gudkov A L, Sidorenko A S 2017 *Beilstein J. Nanotechnol.* **8** 2689
- [4] Pintus P, Soltani M, Moody G 2024 *Nat. Photon.* **18** 306
- [5] Yuan P S, Yu H Q, Wang S N, Wang Y L, Li L Y, You L X 2020 *Low. Temp. Phys. Lett.* **42** 117 (in Chinese) [原蒲升, 余慧勤, 汪书娜, 王永良, 李凌云, 尤立星 2020 低温物理学报 **42** 117]
- [6] Krinner S, Storz S, Kurpiers P, Magnard P, Heinsoo J, Keller R, Lütolf J, Eichler C, Wallraff A 2019 *EPJ Quantum Technol.* **6** 2
- [7] Lecocq F, Quinlan F, Cicak K, Aumentado J, Diddams S A, Teufel J D 2021 *Nature* **591** 575
- [8] De Cea M, Wollman E E, Atabaki A H, Gray D J, Shaw M D, Ram R J 2020 *Sci. Rep.* **10** 9470
- [9] Gupta D, Sarwana S, Kirichenko D, Dotsenko V, Lehmann A E, Filippov T V, Wong W T, Chang S W, Ravindran P, Bardin J 2019 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **29** 1
- [10] Zhu D, Shao L B, Yu M J, Cheng R, Desiatov B, Xin C J, Hu Y W, Holzgrafe J, Ghosh S, Shams-Ansari A, Puma E, Sinclair N, Reimer C, Zhang M, Lončar M 2021 *Adv. Opt. Photon.* **13** 242
- [11] Xiong X, Cao Q T, Xiao Y F 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 234201 (in Chinese) [熊霄, 曹启韬, 肖云峰 2023 物理学报 **72** 234201]
- [12] Herzog C, Poberaj G, Günter P 2008 *Opt. Commun.* **281** 793
- [13] Shen M H, Xie J C, Xu Y T, Wang S H, Cheng R S, Fu W, Zhou Y Y, Tang H X 2024 *Nat. Photon.* **18** 371
- [14] Zhang M, Wang C, Kharel P, Zhu D, Lončar M 2021 *Optica* **8** 652
- [15] Yoshida K, Kanda Y, Kohjiro S 1999 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **7** 1201
- [16] Hirota T, Tarusawa Y, Ogawa H 1987 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **35** 576
- [17] Ponchak G E, Papapolymerou J, Tentzeris M M 2005 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **53** 713
- [18] Tao H R, Zhang C, Du L, Yang X X, Guo L L, Chen Y, Zhang H F, Jia Z L, Kong W C, Duan P, Guo G P 2024 *Appl. Phys. Lett.* **125** 034001
- [19] Duyar M, Akan V, Yazgan E, Bayrak M 2007 *Microw. Opt. Technol. Lett.* **49** 2082
- [20] Zorzetti S, Wang C Q, Gonin I, Kazakov S, Khabiboulline T, Romanenko A, Yakovlev V P, Grassellino A 2023 *Phys. Rev. B* **107** L220302
- [21] Riazat M, Majidi-Ahy R, Feng I J 1990 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **38** 245
- [22] Zhou Y, Fang W H, Liu T, Jia C P, Zhao J L 2022 *J. Funct. Mater. Devices* **28** 458 (in Chinese) [周扬, 方维翰, 刘婷, 贾春平, 赵建龙 2022 功能材料与器件学报 **28** 458]
- [23] Mitoraj-Królikowska M, Drożdż E 2022 *Materials* **15** 1640
- [24] Grünhaupt L, Lüpke U V, Gusenkova D, Skacel S T, Maleeva N, Schlör S, Bilmes A, Rotzinger H, Ustinov A V, Weides M, Pop I M 2017 *Appl. Phys. Lett.* **111** 072601

Design and fabrication of superconducting asymmetric coplanar waveguide transmission lines on lithium niobate substrate*

HUO Jingyu¹⁾²⁾ LI Lingyun^{1)2)†} YUAN Pusheng¹⁾
 YU Huiqin¹⁾ WANG Shuna¹⁾

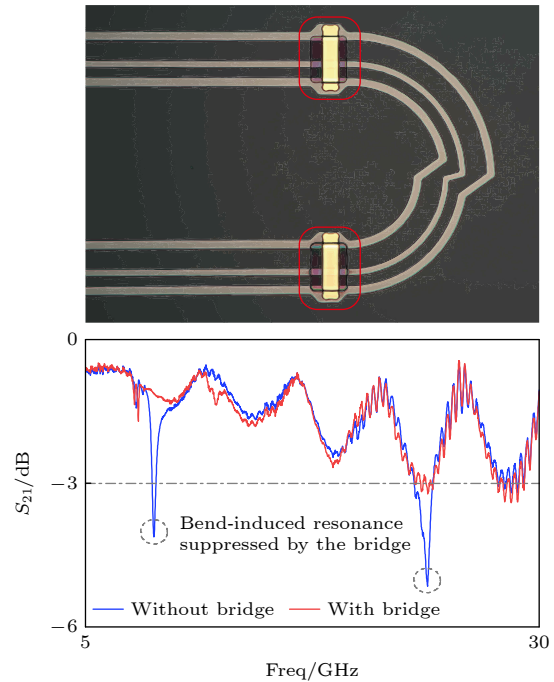
1) (*Shanghai Key Laboratory of Superconductor Integrated Circuit Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Science, Shanghai 200050, China*)

2) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 25 November 2025; revised manuscript received 27 January 2026)

Abstract

Cryogenic electro-optic modulators have promising applications in cryogenic optical interconnects for superconducting computing systems. Because of lithium niobate's high Pockels coefficient, lithium niobate Mach-Zehnder modulators can achieve low half-wave voltage and high-speed data transmission when combined with superconducting traveling-wave electrodes. In this paper, a high-performance and scalable bent superconducting traveling-wave electrode is designed and fabricated using an asymmetric coplanar waveguide (ACPW) transmission line. By introducing unequal ground gaps on the two sides of the signal line, the proposed ACPW structure concentrates the electric field toward the narrower-gap side, yielding an approximately 90% enhancement in central electric field intensity compared with conventional symmetric designs, which is expected to improve modulation efficiency. Within a limited chip area, a circular bent transmission-line geometry is implemented. SU-8 photoresist dielectric bridges are employed to suppress discontinuities and parasitic mode conversion in the bent regions, significantly enhancing high-frequency signal integrity. The high-frequency performance of the fabricated ACPW is characterized at cryogenic temperatures using a cryogenic probe station. Measurement results demonstrate that the dielectric bridges effectively suppress parasitic resonances induced by impedance discontinuities in the bent regions, improving the 3 dB electrical bandwidth from 9 GHz to 59 GHz at 4.2 K. The dielectric-bridge fabrication process demonstrated in this work is applicable to other superconducting device platforms.



Keywords: asymmetric coplanar waveguide, dielectric bridge, micro-nanofabrication, electro-optic modulation

DOI: 10.7498/aps.75.20251601

CSTR: 32037.14.aps.75.20251601

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2025YFA1212602).

† Corresponding author. E-mail: lilingyun@mail.sim.ac.cn

铌酸锂衬底超导非对称共面波导传输线设计与制备

霍劲羽 李凌云 原蒲升 余慧勤 汪书娜

Design and fabrication of superconducting asymmetric coplanar waveguide transmission lines on lithium niobate substrate

HUO Jingyu LI Lingyun YUAN Pusheng YU Huiqin WANG Shuna

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 090802 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251601

CSTR: 32037.14.aps.75.20251601

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251601>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

谐振型电光相位调制及光电探测功能器件的研发及应用

Resonant electro-optic phase modulator and photodetector for stabilizing laser frequency and quantum optics

物理学报. 2023, 72(14): 148502 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230485>

基于铌酸锂波导的中红外纯态量子光源

Mid-infrared pure-state quantum light source based on lithium niobate waveguides

物理学报. 2026, 75(4): 148502 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251398>

基于薄膜铌酸锂的模式色散相位匹配单光子源

Mode-dispersion phase matching single photon source based on thin-film lithium niobate

物理学报. 2023, 72(15): 154204 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230743>

仿生辐射制冷的研究进展

Research progress of bio-inspired radiative cooling

物理学报. 2022, 71(2): 024401 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211854>

周期调制四通道光学波导的宇称-时间对称特性调控和动力学研究

Parity-time symmetry characterization and dynamics of periodically modulated four-channel optical waveguides

物理学报. 2024, 73(16): 164201 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240690>

一种电光可调的铌酸锂/钠基表面等离子体定向耦合器

Electro-optic tunable directional coupler based on a LiNbO_3/Na surface plasmonic waveguide

物理学报. 2022, 71(5): 054205 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211217>