文章编号：2095-4980(2026)01-0050-05

基于SICL的双极化低剖面毫米波缝隙天线阵列

梁剑文，何翼景*，孙厚军

(北京理工大学 集成电路与电子学院，北京 100081)

摘　要：为实现低剖面的双极化边射，设计了一款基于基片集成同轴线(SICL)馈电的1×8双极化低剖面缝隙天线阵列。不同于传统的双极化天线阵列的双套馈电网络垂直堆叠放置，所提出的天线单元与馈电网络位于同层，能够极大降低天线的剖面。结果表明，提出的天线阵列在25.8~27.4 GHz的频带范围内实现了−10 dB的阻抗带宽和大于20 dB的高隔离度。该方法具有馈电网络简单、剖面低、制造成本低等优点，在未来的大规模双极化高增益毫米波应用中具有广阔的应用前景。

关键词：双极化；毫米波天线；模式复合；低剖面；基片集成同轴线(SICL)

中图分类号：TN821+.1　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.11805/TKYDA2024381

Dual-polarized low-profile mmWave slot antenna array using Substrate-Integrated Coaxial Line

LIANG Jianwen，HE Yijing*，SUN Houjun

(School of Integrated Circuits and Electronics，Beijing Institute of Technology，Beijing 100081，China)

Abstract：To realize low-profile dual-polarized broadside radiation, a 1×8 dual-polarized low-profile slot antenna array fed by Substrate-Integrated Coaxial Line(SICL) is proposed. Unlike conventional dual-polarized arrays in which two independent feeding networks are vertically stacked, the radiating elements and the feeding network of the proposed design are arranged in the same layer, drastically reducing the overall profile. Measured results show that the array achieves a −10 dB impedance bandwidth in 25.8~27.4 GHz and an isolation higher than 20 dB. Benefiting from its simple feeding topology, low profile, and low fabrication cost, the proposed approach is highly attractive for future large-scale, high-gain, dual-polarized millimeter-wave applications.

Keywords：dual-polarized；mmWave antenna；mode composite；low profile；Substrate Integrated Coaxial Line(SICL)

毫米波双极化高增益平面天线阵列由于其结构紧凑，抗干扰能力强，信道容量大，因此在雷达、遥感、精确制导技术、移动通信等无线系统中发挥着至关重要的作用[1−2]，但高集成度对天线剖面提出了越来越高的要求。传统的双极化缝隙天线阵列通常采用两套馈电网络垂直堆叠放置，虽有较高的隔离度，但同时也需更多结构层、更高的制造成本，设计复杂度以及空间占用增加。

基片集成同轴线(SICL)作为一种平面形式的同轴线，因其在低损耗的准横向电磁场模式(Transverse Electromagnetic Mode，TEM)传播中的屏蔽和非色散特性而备受关注[3]。研究者利用SICL实现了线极化天线阵列的单模传输馈电网络[4]和双极化的端射馈电[1]，但利用SICL实现双极化边射的研究尚未展开。

为实现低剖面的双极化边射，本文提出一种基于SICL的毫米波缝隙天线阵列。利用带有方形缝的腔体实现

收稿日期：2024-08-14；**修回日期：**2024-10-01

***通信作者：**何翼景 email:heyj@bit.edu.cn

引用格式：梁剑文,何翼景,孙厚军. 基于SICL的双极化低剖面毫米波缝隙天线阵列[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2026,24(1):50−54. DOI:10.11805/TKYDA2024381.

Citation format：LIANG Jianwen,HE Yijing,SUN Houjun. Dual-polarized low-profile mmWave slot antenna array using Substrate-Integrated Coaxial Line[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2026,24(1):50−54. DOI:10.11805/TKYDA2024381.

侧边辐射、垂直和水平极化。天线阵列的馈电网络和辐射单元位于同一层，极大降低了剖面。位于腔体内部的半波长蝶形偶极子将SICL的准TEM模式转换为腔体模式，实现了传播方向的有效转变和良好的阻抗匹配。结果表明，提出的天线阵列在25.8~27.4 GHz的频带范围内实现了–10 dB的阻抗带宽和超过20 dB的高隔离度，端口1和端口2的最大增益分别为12.3 dBi和14.6 dBi。

1　天线设计

低剖面双极化缝隙天线阵列的整体结构如图1所示，由3层介质基板、2层半固化片和3个金属层组成。金属层印刷在基板上，3层基板用半固化片压合到一起。通过引入SICL实现阵列的低剖面，SICL由两侧的通孔和中间的金属微带线组成。天线单元是一个双极化的腔体，在它的上方加载方形槽，腔体内部有一个蝶形偶极子完成TEM模式的阻抗变换。图中：SSMP(Subminiature Micro Push–On)为连接器。

为明确天线单元的工作机理，简化的模型如图2所示。半波长蝶形偶极子位于腔体内部，其中一个臂与SICL的内导体相连，另一个偶极子臂通过金属化通孔接地，这对实现传播方向的转变和阻抗匹配起着关键作用。在TEM模式下，利用偶极子激发腔内TE_{120}模式产生水平极化；而在TE_{10}模式下，腔体内产生TE_{210}模式实现垂直极化。

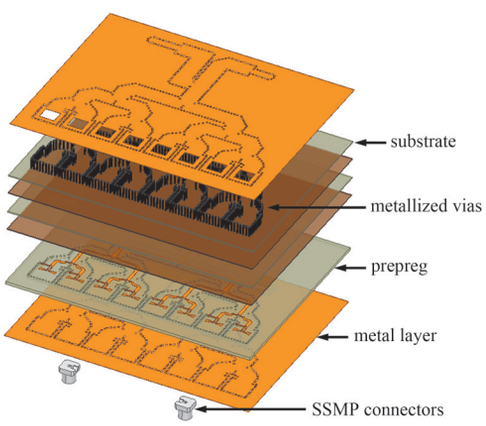


Fig.1 Configuration of the proposed antenna array
图1　双极化阵列天线结构示意图

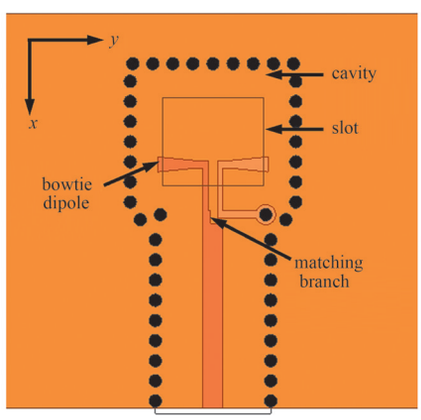
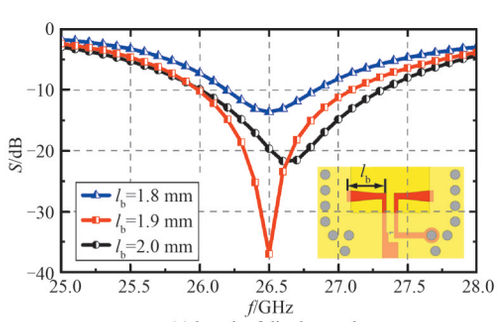
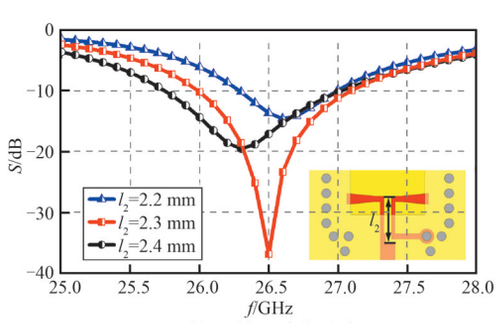


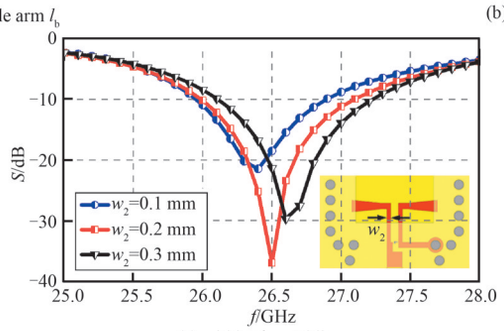
Fig.2 Structure of the dual–polarized antenna element
图2　双极化天线单元示意图



(a) length of dipole arm l_b



(b) position of dipole l_2



(c) width of metal line w_2

Fig.3 The variation of vertical polarization S parameters with dipole parameters
图3　垂直极化S参数随偶极子参数的变化

偶极子在腔体与SICL之间起着重要的模式转换作用，因此对蝶形偶极子结构参数进行分析至关重要。图3(a)为S_{11}参数随蝶形偶极子不同臂长(l_b)的变化。当臂长在1.8~2.0 mm范围内变化时，S_{11}曲线的谐振频率向低频或高频方向轻微偏移，说明臂长是调节阻抗匹配的重要参数。图3(b)为偶极子位置对S_{11}参数的影响。当偶极子位置从2.2 mm定位到2.4 mm时，谐振频率将向更低的频率移动，但相对带宽保持不变。图3(c)为偶极子金属线宽对S_{11}参数的影响，与上述发现类似，宽度主要影响谐振频率和S_{11}参数的大小，其中0.2 mm为最佳宽度。蝶形偶极子有效地充当转换器，实现平衡–不平衡的转换。上述参数主要影响S_{11}，对S_{22}的影响可忽略不计。

为提高天线的增益，设计了1×8馈电网络，如图4所示。主要由三阶功分器、双模转换器和2个端口过渡结构组成。馈电网络支持TEM和TE_{10}模式同时传输，且具有较高的端口隔离度。基片集成波导(Substrate Integrated Waveguide，SIW)作为TEM模式的外导体，其分布对TEM几乎无影响。参考典型SIW的T型结设计，在每个T型结处改变通孔位置，优化TE_{10}模式的阻抗匹配。对于TEM模式传输线，金属线的宽度可以调节阻抗，因此在每个T型结处都采用阻抗变换线。由于采用双模传输，需要一个模式转换器满足2个激励端口。通过移除几个过孔，转换器允许金属线通过，但会导致TE_{10}模式泄漏。为抵消这种影响，位于转换器附近的2个特殊通孔已向内移动，以消减由此产生的阻抗不匹配。

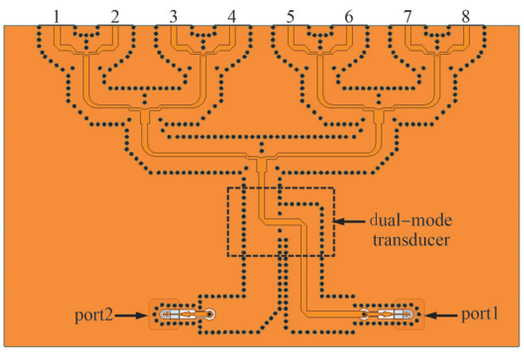


Fig.4 Feeding network structure of dual mode transmission
图4 双模传输馈电网络结构

2 仿真和测试结果

加工的天线实物如图5所示。图6给出了2个端口仿真和测试的反射系数及互耦情况。可以看出，实测结果和仿真具有良好的一致性。端口1用于垂直极化，端口2用于水平极化，反射系数小于–10 dB的覆盖范围分别为25.8~27.5 GHz和25.6~27.4 GHz。2个端口之间的隔离度大于20 dB。

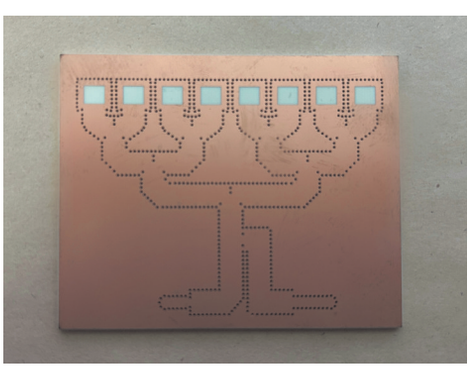


Fig.5 Fabricated antenna prototype
图5 天线实物图

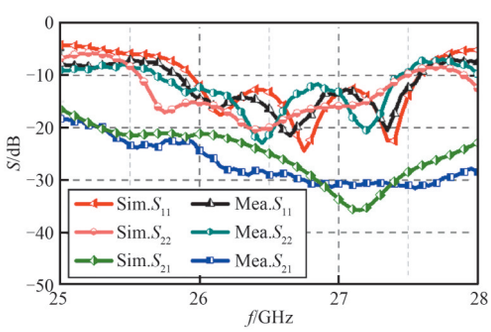


Fig.6 Simulated and measured *S*–parameters of the antenna
图6 阵列天线的*S*参数曲线

2个端口在26.5 GHz时的仿真和测试的辐射方向图如图7所示。由于天线元件沿*y*轴方向布阵，*xoz*平面的辐射方向图主瓣波束宽度比*yoz*平面更窄。图8为提出的双极化缝隙天线阵列的增益和辐射效率，端口1天线获得了14.6 dBi的峰值增益，端口2的最大增益为12.3 dBi。两种极化的最大辐射效率为63%。

表1 提出的阵列天线与其他文献天线性能对比

Table1 Comparison among the proposed design and other dual–polarized antenna arrays

Ref.	element number	polarization	f_0/GHz	layer number	profile(λ_0)	feed type	bandwidth/%	Max gain/dBi	XPD/dB	structure reuse
[5]	1×4	single	24.0	5	0.26	SISL	4.1	13.10	18.0	×
[6]	1×4	single	38.0	2	0.11	MS	7.1	10.00	20.0	×
[7]	2×4	single	10.0	2	0.10	SIW	5.0	10.80	N.A.	×
[8]	1×7	single	9.4	N.A.	N.A.	metallic waveguide	1.6	14.00	N.A.	×
[9]	1×8	single	21.7	2	0.08	SICL	7.8	19.00	20.0	×
[10]	1×12	single	79.0	N.A.	0.15	metallic waveguide	2.5	9.60	20.0	×
[11]	1×16	single	34.5	2	0.15	SIW	2.9	15.64	13.8	×
this work	1×8	dual	26.5	3	0.15	SICL	6.4	14.70	20.0	√

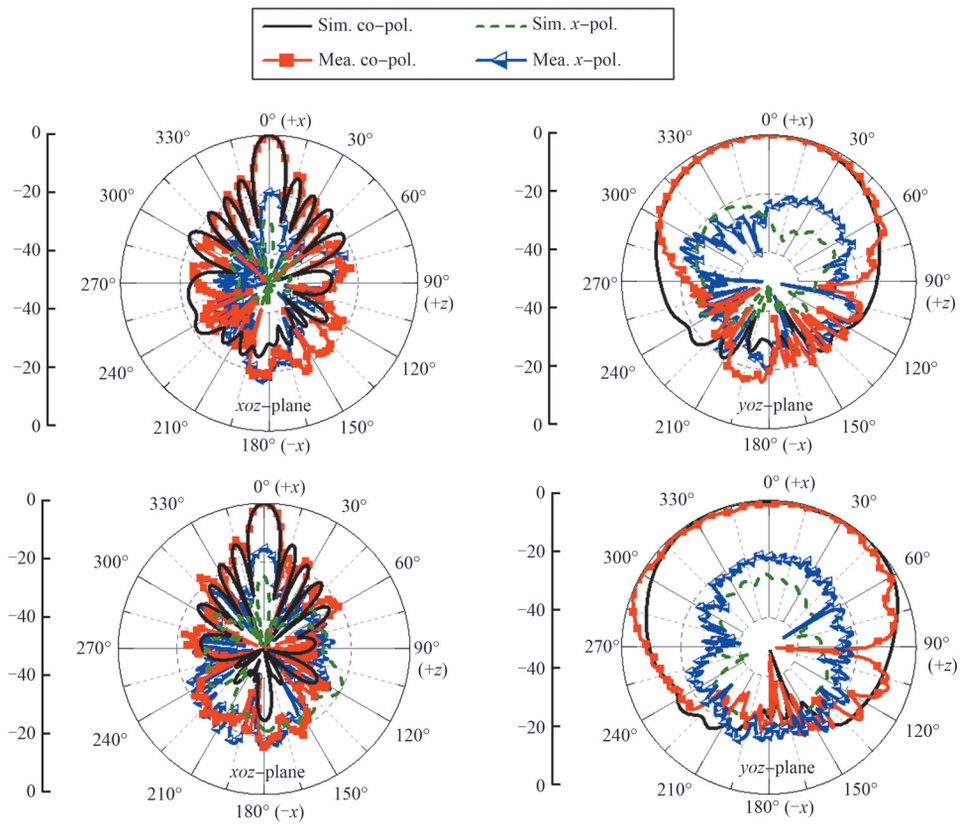


Fig.7 Measured and simulated radiation patterns at 26.5 GHz
图7 阵列天线在26.5 GHz的辐射方向图

将所提出的双极化缝隙天线阵列的性能与其他相关工作进行比较，如表1所示，其中SISL(Substrate Integrated Suspended Line，SISL)表示基板集成悬浮线；XPD(Cross-Polarization Discrimination)表示交叉极化鉴别率，N.A.表示不可用。文献[10-11]中天线阵列的剖面与本文提出的阵列大致相当，但它们只实现了单线极化和较窄的工作带宽。文献[5,11]中的增益较高，这是由于采用了更多的层数或单元数。文献[9]采用高阶模式实现了高增益，但由于馈电网络的限制，双极化设计也无法实现。本文首次利用结构复用实现了双极化缝隙天线阵列法向辐射，具有低剖面、良好的端口隔离度和交叉极化水平。

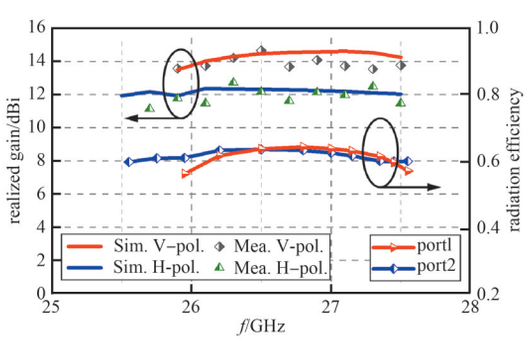


Fig.8 Gain and efficiency of the fabricated antenna array
图8 阵列天线的增益和辐射效率

3　结论

本文采用SICL设计了一款1×8双极化低剖面缝隙天线阵列。在腔体内激发TE_{210}模式和TE_{120}模式，实现了垂直和水平极化。利用蝶形偶极子实现了有效的传播方向转换和良好的阻抗匹配。仿真与测试结果表明，共同工作带宽内垂直极化和水平极化的峰值增益分别为12.3 dBi和14.6 dBi。提出的天线阵列具有馈电网络简单、剖面低的特点，为未来大规模、双极化、高增益毫米波系统的发展提供了新思路。

参考文献：

[1] SUN Kai, WANG Boning, YANG Tianming, et al. Dual-polarized millimeter-wave endfire array based on substrate integrated mode-composite transmission line[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(1): 341-352. DOI: 10.1109/TAP.2021.3098551.

[2] LIU Peiqin, LI Yue, WANG Shaodong. Millimeter-wave planar antenna array based on modified bulk silicon micromachining

technology[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020,68(11):7676-7681. DOI:10.1109/TAP.2020.2992898.

[3] YIN Jiexi, WU Qi, YU Chen, et al. Broadband endfire magnetoelectric dipole antenna array using SICL feeding network for 5G millimeter-wave applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(7): 4895-4900. DOI: 10.1109/TAP.2019.2916463.

[4] WANG Jingxue, LI Yujian, WU Fan, et al. Millimeter-wave wideband endfire magnetoelectric dipole antenna fed by substrate integrated coaxial line[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(3): 2301-2306. DOI: 1109/TAP. 2021. 3137250.

[5] LUO Tao, YANG Wanchen, QUAN Xue. A high-efficiency SISL-based slot antenna array for wireless power transmission application[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023,22(4):674-678. DOI:10.1109/LAWP.2022.3217064.

[6] SINGH A K, PAL S. Compact self-isolated extremely low ECC folded-SIW-based slot MIMO antenna for 5G application[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2024,23(1):194-198. DOI:10.1109/LAWP.2023.3321065.

[7] DING Yan, WU Ke. T-type Folded Substrate Integrated Waveguide(TFSIW) slot array antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010,58(5):1792-1795. DOI:10.1109/TAP.2010.2044349.

[8] PESARAKLOO A, SEDIGHY S H, HODJATKASHANI F. Sine-wall space-tapered linear slot array antenna with low sidelobe and second-order lobe levels[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(2): 1020-1024. DOI: 10.1109/TAP.2017.2786310.

[9] FILGUEIRAS H R D, CERQUEIRA SODRE A. A 64-element and dual-polarized SICL-based slot antenna array development applied to TDD massive MIMO[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022,21(4):750-754. DOI:10.1109/LAWP.2022.3144916.

[10] BAUER F, MENZEL W. A 79 GHz resonant laminated waveguide slotted array antenna using novel shaped slots in LTCC[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2013(12):296-299. DOI:10.1109/LAWP. 2013.2248694.

[11] KIM D Y, CHUNG W, PARK C, et al. Design of a 45°-inclined SIW resonant series slot array antenna for Ka-band[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2011(10):318-321. DOI:10.1109/LAWP.2011.2141105.

作者简介：

梁剑文(1998-)，女，硕士，工程师，主要研究方向为毫米波天线阵列、相控阵天线.email：ljw_dlmu@163.com.

何翼景(1992-)，男，博士，副研究员，主要研究方向为基站与终端天线、毫米波封装天线、超表面天线.

孙厚军(1968-)，男，博士，教授，主要研究方向为毫米波与太赫兹技术.