光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022062201

基于法布里-珀罗腔的圆极化太赫兹天线设计

潘 武，张 彬*，李海珠，李永瑞
（重庆邮电大学 光电工程学院，重庆 400065）

摘 要： 为满足未来无线通信的高带宽与圆极化通信的需要，提出了一种基于法布里-珀罗腔的圆极化太赫兹天线。该天线采用准光学的波导馈电模式，对圆波导45°切槽实现天线的线-圆极化转换，采用电介质材料的部分反射面来提高天线的增益。仿真分析表明，该天线在228 GHz处获得最大增益为14.4 dBic，阻抗带宽（S_{11}＜－10 dB）为40 GHz，3 dB增益带宽和轴比带宽分别为18与27 GHz，三者重叠带宽为18 GHz。该天线具有良好的方向性、高带宽以及在整个工作频带实现圆极化等优点，在太赫兹/毫米波无线通信中有一定的参考性与实用性。

关键词： 太赫兹；天线；圆极化；法布里-珀罗腔；部分反射面
中图分类号： TN823 **文章编号：** 1001－5868(2022)06－1114－05

Design of Circularly Polarized Terahertz Antenna Based on Fabry-Perot Cavity

PAN Wu, ZHANG Bin, LI Haizhu, LI Yongrui
(College of Photoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, CHN)

Abstract: In order to meet the needs of high bandwidth and circularly polarized communication in future wireless communication, a circularly polarized terahertz antenna based on a Fabry-Perot cavity is proposed. The antenna adopted a quasi-optical waveguide feeding mode, the circular waveguide was cut at 45° to realize the linear-circular polarization conversion of the antenna, and the partial reflecting surface of the dielectric material was used to improve the gain of the antenna. The simulation analysis shows that the maximum gain of the antenna is 14.4 dBic at 228 GHz, the impedance bandwidth (S_{11}＜－10 dB) is 40 GHz, the 3 dB gain bandwidth and the axial ratio bandwidth are 18 and 27 GHz respectively, and the overlapping bandwidth of the three is 18 GHz. The antenna has the advantages of good directivity, high bandwidth and circular polarization in the entire working frequency band, and has high reference and practicability in terahertz/millimeter wave wireless communication.

Key words: terahertz; antenna; circular polarization; Fabry-Perot cavity; partial reflective surface

0 引言

近年来，移动互联网与通信网络高速发展，让本就稀少的可用无线通信频谱资源显得捉襟见肘，人们提出利用太赫兹频谱资源，发展太赫兹通信[1-2]。太赫兹波相比微波、毫米波拥有更宽的频谱资源，有望在第六代移动通信系统等未来几代无线通信系统中提供更大的带宽与数据传输速率[3-4]。太赫兹波的低频段（0.1～1 THz）存在多个大气窗口，拥有较好传输特性，成为未来无线通信载波的研究热点[5]。由于太赫兹波在大气中的传输损耗较大，迫切需要设计高增益太赫兹天线来补偿传输路径损耗，增大太赫兹波的传输距离[6]。近年来，法布里-珀罗腔（Fabry-Perot Cavity，FPC）天线因具有低剖面、高增益和易集成等特点而备受关注[7]。文献[8]采用加载3D打印技术实现了圆极化的FPC天线，该研

收稿日期：2022－06－22.
*通信作者：张 彬 E-mail：m17723617418@163.com

究采用全电介质材料实现了 FPC 天线的高增益与圆极化，但获得的圆极化带宽仅为 0.67 GHz(0.67%)。文献[9]提出一种在电介质两侧印刷不对称的亚波长结构实现圆极化 FPC 天线，获得较低雷达散射截面，但峰值增益和圆极化带宽仅为 10.2 dBic 与 0.05 GHz (0.47%)。文献[10]提出一种工作在 300 GHz 处的圆极化 FPC 天线，该天线采用在部分反射面(Partial Reflection Surface，PRS)上加工周期性的极化转换器实现圆极化，获得了 16.5 dBic 的较高增益，但圆极化带宽仅为 5.2 GHz(1.73%)。

目前，圆极化 FPC 天线在太赫兹波段的应用研究较少，且天线圆极化带宽较窄，实现工艺复杂。为满足太赫兹波段通信要求，本文提出一款采用电介质-空气腔-极化转换器结构的圆极化太赫兹 FPC 天线，仿真验证该天线具有良好的增益与带宽，且在整个工作频段实现圆极化。

1　理论分析

FPC 天线是从法布里-珀罗光学腔演变而来，将光学腔底部反射面改进为理想反射板(金属板)，信号源放置在腔体接地面中心。如图 1 所示，腔体由上下两个相互平行对称且间距为 H_c 的反射板构成，电磁波从接地面中心馈入波导进入腔内，当电磁波辐射到顶部 PRS 内表面时，由于内表面具有部分反射特性，在反射板上会产生一部分反射波反射回腔内，一部分透射波射出 PRS，相位差为 2π 整数倍的透射波在 PRS 外发生相长干涉，实现能量叠加，反射波在腔体内部反复进行部分透射与反射，获得更多的能量叠加，从而实现 FPC 天线的高增益单向辐射。

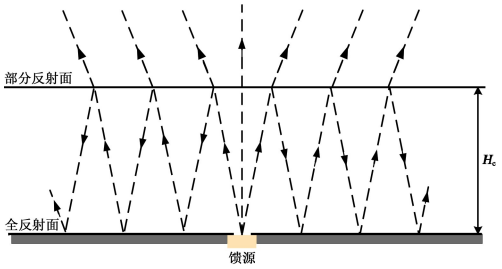


图 1　FPC 腔体示意图

谐振腔天线的主辐射方向为 PRS 的垂直方向，当腔高度与 PRS 反射相位满足天线的谐振条件(式(1))时，天线拥有最大增益。φ_{PRS} 为 PRS 的反射相位，φ_{GND} 为 π，H 为腔高度，λ 为工作频点波长。

$$\varphi_{PRS}+\varphi_{GND}-\frac{4\pi H_c}{\lambda}=2\pi N,N=0,\pm1,\pm2,\cdots \tag{1}$$

圆极化天线因其具有很强的抗干扰性与灵活性，在远距离通信与卫星通信等领域被广泛应用，实现天线圆极化的关键是在馈源引入极化转换结构。圆极化波可分解成两束幅度相等和相位差为 90°的线极化波分量。本文通过在圆形波导上切割凹槽与馈入的波导形成 45°的角度差，圆形波导中传输的 TE_{11} 模式线极化波的两个正交分量经极化转换器后产生相位偏移，形成相位差为 90°且振幅相同的两个正交线极化分量，从而形成圆极化波。

2　结构设计

本文提出的 FPC 天线结构如图 2 所示，天线由 5 层结构组成，从上到下依次为：部分反射面、金属腔、极化转换器、阻抗匹配层和 WR-4 标准波导层。PRS 层采用陶瓷材料电介质板(Rogers RT6010LM)，其他层为切割了相应结构的金属铜。

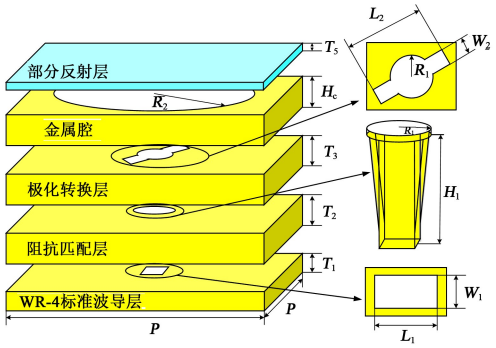


图 2　FPC 天线的结构示意图

采用 CST 2020 频域求解器对 PRS 特性进行仿真，确定 PRS 反射系数与反射相位。在 FPC 天线中，PRS 的反射率越高，增益越高，带宽越窄。本文采用牺牲增益，提高带宽的折中方案。图3为 0.22 mm

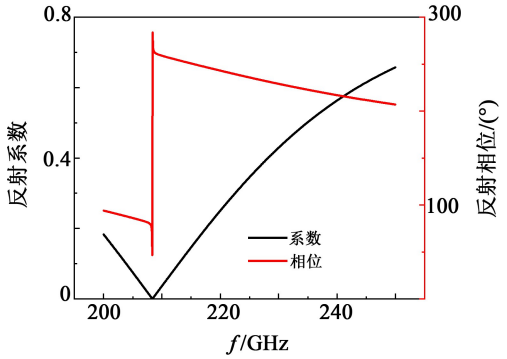


图 3　PRS 的反射系数与反射相位曲线

厚度 PRS 反射系数与反射相位，在 228 GHz 处反射相位为 230°，反射系数为 0.4。选择 N 为 2，计算得 FPC 的高度约为 1.41 mm。

提出天线的结构尺寸如表 1 所示。

表 1 天线的几何参数(单位:mm)

参数	值	参数	值
P	10.00	L_1	1.10
T_1	0.50	W_1	0.55
T_2	1.40	H_t	1.20
T_3	1.40	R_3	4.50
H_c	1.41	L_2	2.20
T_5	0.22	W_2	0.70
R_1	0.59		

3 仿真结果分析

采用 CST 2020 时域求解器对天线各组成部分及整体性能进行分析与优化，以下结果默认优化某个参数时其他参数不变。在该天线中，由于波的分量从圆波导进入切割凹槽中，形成不同的传播路径形成相位差，故切割槽结构尺寸对天线圆极化性能影响较大。图 4 为极化转换器-阻抗匹配层-馈入波导组成的馈源天线在不同高度下的轴比带宽图，随着切割槽高度不断提升，馈源天线的 3 dB 轴比带宽不断增大，在凹槽高度 $T_3=1.4$ mm 时天线在 200～245 GHz 范围内实现轴比小于 3 dB，且拥有更深的轴比深度。

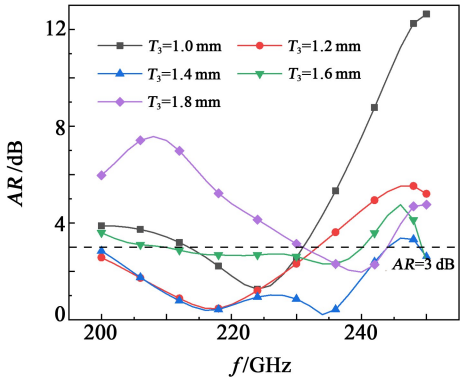


图 4 切割槽的高度对轴比的影响

图 5 为切槽宽度 W_2 从 0.4～0.8 mm 改变引起的馈源天线的轴比带宽变化曲线，天线的轴比带宽在 0.7 mm 处获得最佳值。

图 6 为切槽长度 L_2 从 0.9～1.3 mm 改变的馈源天线轴比带宽的变化情况，在 1.1 mm 处天线在工作频段内获得最佳轴比效果。

在该极化转换结构中，利用圆波导，而矩形波导与圆形波导之间的耦合会产生极大的回波损耗，故需要引入矩形波导转圆形波导的阻抗匹配结构。图 7 为有无阻抗匹配结构的天线反射系数(S_{11})曲线。无阻抗匹配结构时，天线的反射系数较大，在较宽的波段内大于－10 dB；在引入阻抗匹配结构后，在 200～250 GHz 范围内具有良好的阻抗匹配，反射系数 S_{11} 在－10 dB 以下。

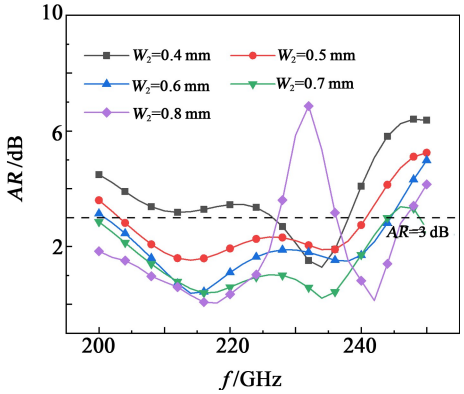


图 5 切割槽的宽度对轴比的影响

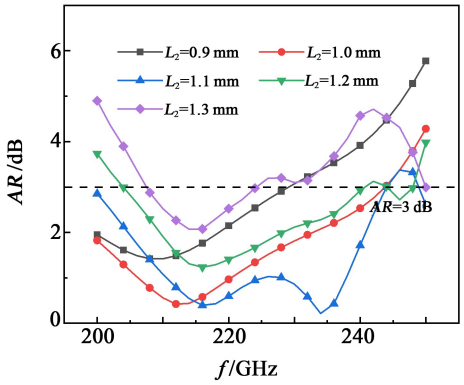


图 6 切割槽的长度对轴比的影响

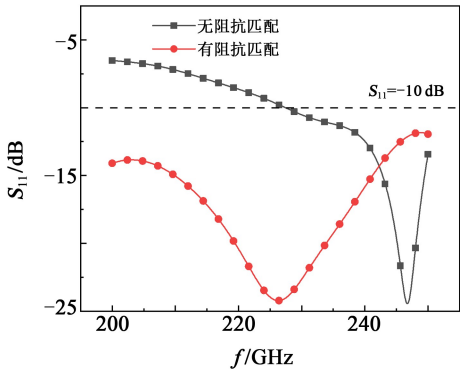


图 7 馈源天线的反射系数 S_{11}

该 FPC 天线通过在极化转换器上构建金属腔体与电介质材料 PRS 覆盖板组成的 FPC 结构来提高增益。在满足谐振条件下，电磁波在金属-空气

腔-电介质构成的腔内多次反射与透射叠加，实现天线增益的提高。从图 8 看出，天线在只有标准波导结构而无极化转换结构时，天线增益普遍小于 7 dB；在加入极化转换结构后，由极化转换器-阻抗匹配过渡结构-标准波导组合构成一个阶梯喇叭结构，显著降低电磁波反射，增大天线增益，在整个工作频段上增加接近 3 dB。通过加入 FPC 结构后，天线增益在 228 GHz 处获得最大值为 14.4 dBic，相比无 FPC 结构时提升 4.4 dB，在整个 3 dB 增益带宽范围内提高 1.6～4.4 dB，3 dB 增益带宽为 18 GHz（216～234 GHz）。

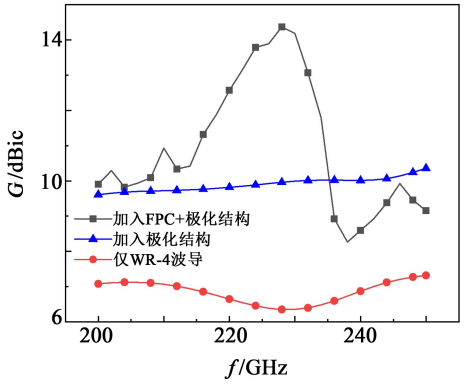


图 8　加入不同结构天线增益对比

从图 9 看出，在加入 FPC 结构之后，天线实现阻抗带宽和 3 dB 轴比带宽分别为 40 GHz（200～240 GHz）和 27 GHz（209～236 GHz），天线保持了良好的阻抗匹配与圆极化特性，相比于没有 FPC 结构时，天线的圆极化特性发生了较小的恶化。在加入 FPC 结构提升天线增益的同时保证了天线仍拥有较大的轴比带宽与阻抗带宽。

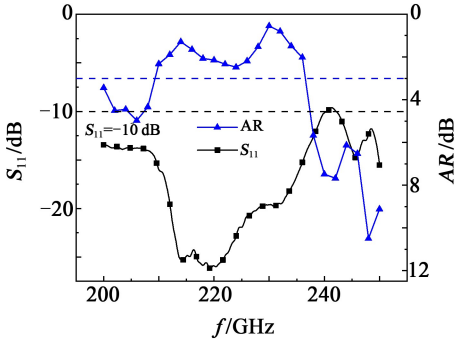
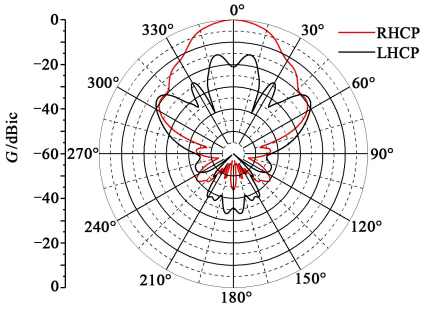
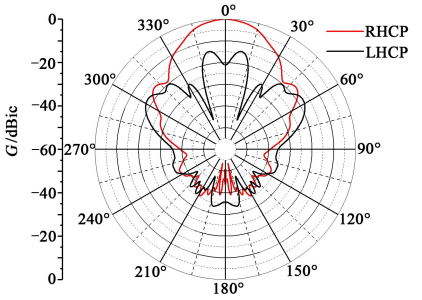


图 9　天线的轴比带宽与阻抗带宽

图 10 为天线在 *XOZ* 平面与 *YOZ* 平面的归一化极化方向图。天线沿 +*Z* 方向传播右旋圆极化（Right Hand Circularly Polarized，RHCP）波，左旋圆极化（Left Hand Circularly Polarized，LHCP）波为交叉极化场，在轴向方向，LHCP 电平相比 RHCP 电平低于 −20 dB。在 *XOZ* 与 *YOZ* 平面上，3 dB 波束宽度分别为 30.7°和 29.9°，天线拥有较低的交叉极化电平与良好的方向性。



（a）　*XOZ* 平面



（b）　*YOZ* 平面

图 10　天线归一化极化方向图

表 2 展示了本文提出的天线与部分文献提出的 FPC 天线仿真性能比较。本文提出的天线有着良好的增益及较宽的轴比带宽与圆极化带宽，有一定应用价值与前景。

表 2　圆极化 FPC 天线比较

Ref	*f*/GHz	Max Gain/dBic	Impedance BW/%	AR BW/%	3 dB BW/%
[8]	10	14.1	13.0	6.7	6.7
[9]	10.5	10.2	2.0	0.5	/
[10]	300	16.5	8.0	1.7	6.6
[11]	30	15.5	8.2	2.9	11.6
This	228	14.4	17.5	11.8	7.9

4　结束语

本文设计了一款基于法布里-珀罗腔的低剖面、高增益和高带宽的圆极化天线。通过直接在馈源部分引入交叉切槽结构形成极化转换器和矩形波导-圆形阻抗匹配结构，避免了在 PRS 上加工极化转换结构，获得了更宽的轴比带宽和阻抗带宽。通过引入 FPC 结构，提高了天线的增益，同时还拥有良好的方向性与较低的交叉极化电平。该天线结构规整、性能良好和加工难度低，在未来太赫兹/毫米波无线通信中有较高的应用与参考价值。

参考文献：

[1] Song H J, Nagatsuma T. Present and future of terahertz communications[J]. IEEE Trans. on Terahertz Science and Technology, 2011, 1(1): 256-263.

[2] Saeed A, Gurbuz O, Akkas M A. Terahertz communications at various atmospheric altitudes[J]. Physical Communication, 2020, 41: 101-113.

[3] 赵亚军，郁光辉，徐汉青. 6G移动通信网络:愿景、挑战与关键技术[J]. 中国科学：信息科学，2019，49(8)：963-987.
Zhao Yajun, Yu Guanghui, Xu Hanqing. 6G mobile communication network: vision, challenges and key technologies[J]. Science in China: Information Science, 2019, 49(8): 963-987.

[4] Chen Z, Ma X, Zhang B, et al. A survey on terahertz communications[J]. China Communications, 2019, 16(2): 1-35.

[5] Xu R, Gao S, Izquierdo B S, et al. A review of broadband low-cost and high-gain low-terahertz antennas for wireless communications applications[J]. IEEE Access, 2020, 8: 57615-57629.

[6] Balani W, Sarvagya M, Ali T, et al. Design techniques of super-wideband antenna-existing and future prospective[J]. IEEE Access, 2019, 7: 141241-141257.

[7] Goudarzi A, Honari M M, Mirzavand R. Resonant cavity antennas for 5G communication systems: A review[J]. Electronics, 2020, 9(7): 1080.

[8] Wu F, Luk K M. Circular polarization and reconfigurability of Fabry-Perot resonator antenna through metamaterial-loaded cavity[J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 2019, 67(4): 2196-2208.

[9] Ren J, Jiang W, Zhang K, et al. A high-gain circularly polarized Fabry-Perot antenna with wideband low-RCS property[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett., 2018, 17(5): 853-856.

[10] Aqlan B, Himdi M, Vettikalladi H, et al. A circularly polarized sub-terahertz antenna with low-profile and high-gain for 6G wireless communication systems[J]. IEEE Access, 2021, 9: 122607-122617.

[11] Akbari M, Gupta S, Farahani M, et al. Gain enhancement of circularly polarized dielectric resonator antenna based on FSS superstrate for MMW applications[J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 2016, 64(12): 5542-5546.

作者简介：

潘　武(1966—)，男，四川省大英县人，博士，教授，主要从事太赫兹技术、超介质材料及应用研究；

张　彬(1998—)，男，四川省泸州市人，硕士研究生，研究方向为太赫兹天线。