

# 面向 6G 毫米波通信的超宽带超材料圆偏振器设计与研究

侯佳,周秀杰,李艳芬,袁雪琪

(中国电信股份有限公司研究院,北京 102209)

**摘要:**介绍了一种 6G 毫米波超宽带谐振超材料圆偏振器。该偏振器为单层结构,基底采用  $10\ \mu\text{m}$  超薄聚酰亚胺薄膜,有效降低了偏振器的剖面厚度,并且在一定程度上降低了基底的损耗。圆极化偏振器采用低  $Q$  的设计镜像对称 T 形金属表面,金属厚度为  $0.6\ \mu\text{m}$ ,小于该频段的金属趋肤深度,在一定程度上降低了金属超表面结构的金属性,低金属性以及低  $Q$  的超表面设计有效提高了该超材料圆偏振器的工作带宽。谐振器采用双谐振型超材料设计方法,对正交等幅同相位正交极化波进行相位调制,从而达到  $90^\circ$  相位差形成圆极化波,在中心频率为 140 GHz 时,3 dB 轴向比可以达到 54 GHz 的带宽,中心带宽可达到 39%,插入损耗小于 5 dB。

**关键词:** 6G;毫米波;超宽带;圆极化

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.223393

中文引用格式: 侯佳,周秀杰,李艳芬,等. 面向 6G 毫米波通信的超宽带超材料圆偏振器设计与研究[J]. 电子技术应用, 2022, 48(10): 5-8.

英文引用格式: Hou Jia, Zhou Xiujie, Li Yanfen, et al. Design and research of 6G millimeter wave UWB resonant metamaterial circular polarizer[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(10): 5-8.

## Design and research of 6G millimeter wave UWB resonant metamaterial circular polarizer

Hou Jia, Zhou Xiujie, Li Yanfen, Yuan Xueqi

(Research Institute of China Telecom., Ltd., Beijing 102209, China)

**Abstract:** A 6G millimeter wave ultra-wideband resonant metamaterial circular polarizer is presented in this paper. The polarizer is a single-layer structure with  $10\ \mu\text{m}$  ultra-thin polyimide film as the substrate, which effectively reduces the profile thickness of the polarizer and reduces the substrate loss to a certain extent. The circular polarization polarizer uses a low- $Q$  design to mirror the symmetrical T-shaped metal surface, and the metal thickness is  $0.6\ \mu\text{m}$ , which is less than the skin depth of the metal in this frequency band. To some extent, the gold properties of the metal metasurface structure are reduced. The low-gold properties and low- $Q$  metasurface design effectively improve the operating bandwidth of the metasurface. The resonator adopts a double resonant metamaterial design method to modulate the phase of orthogonal polarization wave with the same amplitude and phase, so as to achieve a  $90^\circ$  phase difference to form a circularly polarized wave. When the center frequency is 140 GHz, the 3 dB axial ratio can reach the bandwidth of 54 GHz, the center bandwidth can reach 39%, and the insertion loss is less than 5 dB.

**Key words:** 6G; millimeter wave; UWB; circular-polarization

### 0 引言

偏振器等控制电磁波偏振态方法在 6G 毫米波通信系统和太赫兹通信与成像以及光学系统中广泛使用<sup>[1]</sup>。根据工作模式,圆偏振器可分为透射型<sup>[2]</sup>和反射型<sup>[3]</sup>两种类型。与透射型相比,反射型对放置角度要求严格,对衬底厚度的灵敏度高,传统的线栅反射型偏振变换器可以实现 4%~8% 的带宽,插入损耗低。线性双折射晶体是一种透射型偏振器<sup>[4]</sup>,在正交偏振分量之间产生相位延迟,具有体积大、带宽窄、插入损耗大、积分困难等缺点。超材料偏振器可以克服这些限制<sup>[5]</sup>。多种超材料设计协议具有结构紧凑、集成灵活等优点,并可采用石墨

烯、 $\text{VO}_2$ 、GaAs 等可调方案,通过电压控制、温度控制、激光辐射<sup>[6]</sup>实现人工极化状态调优。但它也存在加工要求高、插入损耗大等缺陷。三维手性超材料利用光子二色效应<sup>[7]</sup>可实现线-圆极化或共极化到交叉极化,能提供足够高质量的圆极化转化率,但是存在加工工艺复杂等缺点。文献[8]给出了另一种基于平面线性双折射谐振超材料的偏振器设计,与三维手性超材料原理相同,此种超材料通过谐振型拟合电路引入交叉极化方向上的光子二色性,对入射波进行相位调制,从而实现线-圆极化的转换,但是由于谐振材料的特点,存在插入损耗高、带宽窄等缺点。

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所

上述的超材料极化变换器难以克服由于其谐振电路高  $Q$  特性或手性超材料带特性等造成的带宽窄的问题。本文基于双折射谐振超材料设计原理,采用低  $Q$  的谐振表面设计,并通过降低超表面的金属性实现了超宽带的极化变换器设计,设计了一种中心带宽 39%、插入损耗小于 5 dB 的 6G 毫米波线性双折射谐振超宽带圆偏振器。

## 1 设计及原理分析

### 1.1 圆极化偏振器设计

本文设计的超材料采用  $10\ \mu\text{m}$  聚酰胺薄膜作为基底,有效降低了器件的剖面厚度,并且有效降低了超材料的插入损耗。单晶格的设计和具体参数如图 1 所示。本文通过降低器件的  $Q$  值进行带宽的扩展,并保证工作带宽内的性能稳定性,仿真结果验证了理论的正确性。

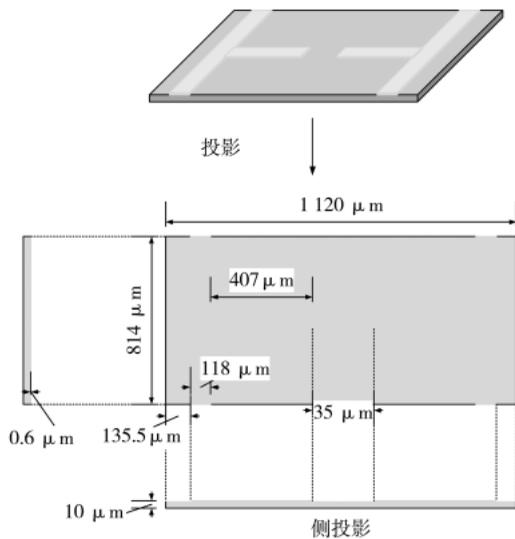


图 1 超材料设计

引入的圆偏振器可以在正交偏振入射波的作用下由各向异性谐振腔诱导相位调制,实现线-圆转换。在两个共振频率之间的中频处,两个正交波之间会产生  $90^\circ$  的相位差,如图 2 所示,线偏振入射波的透射方向与偏振器表面正交,电场  $\vec{E}_1$  与金属线栅呈  $45^\circ$ ,它可以分解为  $x$  和  $y$  偏振分量  $\vec{E}_x$  和  $\vec{E}_y$ ,这两个分量的幅值和相位相同,通过所设计的超材料圆偏振器的相位和振幅调制,使透射波达到圆极化。

### 1.2 圆极化偏振器工作原理

圆偏振波的轴向比是分析偏振器性能的有效方法之一。假设入射电磁波的方向垂直于器件表面,电场  $\vec{E}_1$  与金属线栅呈  $45^\circ$ ,可分解为  $x$  和  $y$  极化分量  $\vec{E}_x$  和  $\vec{E}_y$ ,这两个分量的幅值和相位相同。入射波可表示为:

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_x + \vec{E}_y \quad (1)$$

两个谐振结构对两个正交分量进行不同的相位和振

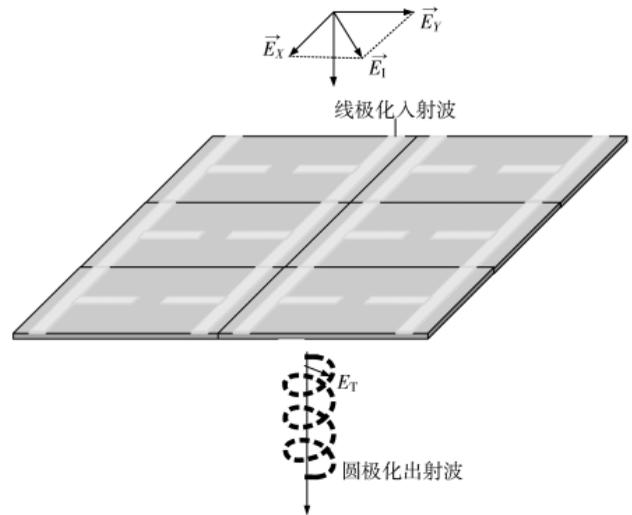


图 2 工作原理

幅调制,透射系数分别为  $T_x$  和  $T_y$ ,则透射波可表示为:

$$\vec{E}_T = T_x \vec{E}_x + T_y \vec{E}_y \quad (2)$$

透射波的偏振状态可表示为:

(1) 当  $|T_x| = |T_y|$  并且  $\arg(T_x) - \arg(T_y) = (1/2 + n)\pi$  时,出射波为圆极化;

(2) 当  $|T_x| = |T_y|$  并且  $\arg(T_x) - \arg(T_y) = (2n + 1)\pi$  时,出射波为  $\vec{E}_1$  的交叉极化波;

(3) 当  $|T_x| \neq |T_y|$  或者  $\arg(T_x) - \arg(T_y) \neq (1/2 + n)\pi$  或者二者兼具时,出射波为椭圆极化波。

参照式(2),归一化振幅差为:

$$\Delta T = |T_x| - |T_y| \quad (3)$$

传输相位差  $\Delta\varphi$  可以表示为:

$$\Delta\varphi = \arg(T_x) - \arg(T_y) \quad (4)$$

圆极化轴比可以表示为:

$$AR = \left( \frac{|T_x|^2 + |T_y|^2 + \sqrt{a}}{|T_x|^2 + |T_y|^2 - \sqrt{a}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$a = |T_x|^4 + |T_y|^4 + 2|T_x|^2|T_y|^2 \cos(2\Delta\varphi) \quad (6)$$

本文引入另一种方法来分析,由式(7)~式(10)表示的极化的性能如斯托克斯参数,以应用此参数来评估线性到圆极化的转换程度。

$$S_0 = |T_x|^2 + |T_y|^2 \quad (7)$$

$$S_1 = |T_x|^2 - |T_y|^2 \quad (8)$$

$$S_3 = 2|T_x||T_y|\cos(\Delta\varphi) \quad (9)$$

$$S_4 = 2|T_x||T_y|\sin(\Delta\varphi) \quad (10)$$

归一化的轴向方位角可以表示为:

$$\alpha = 0.5 \arctan(S_2/S_0) \quad (11)$$

从图 3 可以看出,轴向方位角  $\alpha$  表示椭圆偏振长轴的轴向偏置角。当发现方位角接近等于 0 时,表示椭圆偏振长轴的轴向偏置角接近 0,可保证极好的偏振对准性能。

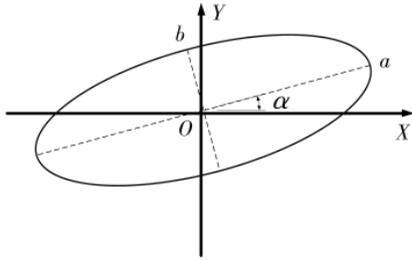


图3 椭圆极化率

## 2 仿真及分析

仿真结果如图4~图7所示。

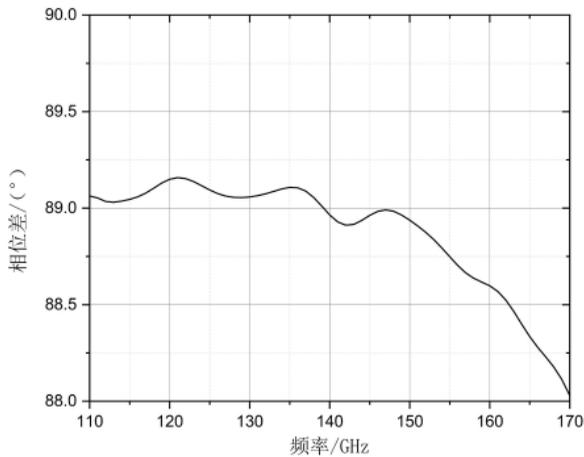


图4 相位差

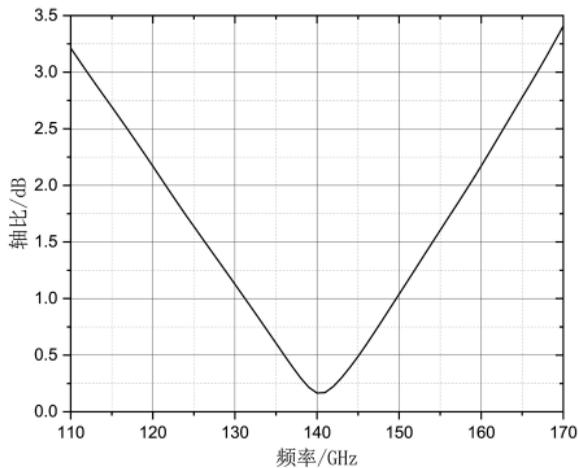


图5 圆极化轴比

图4为相位差,由式(4)计算,112 GHz~166 GHz之间的相位延迟小于 $90^\circ \pm 2^\circ$ ,说明所设计的圆偏振器具有良好的相位调制性能。

图5为引入的圆偏振器的轴比,轴比由式(5)~式(6)计算得到,在112 GHz~166 GHz轴比小于3 dB,在工作中心频率140 GHz时,轴比可达0.2 dB,显示出良好的圆偏振调制性能。

图6为轴向方位角,方位角由式(11)计算,112 GHz~

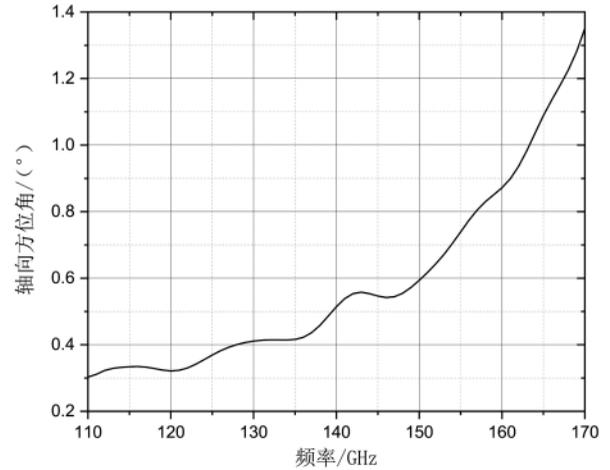


图6 轴向方位角

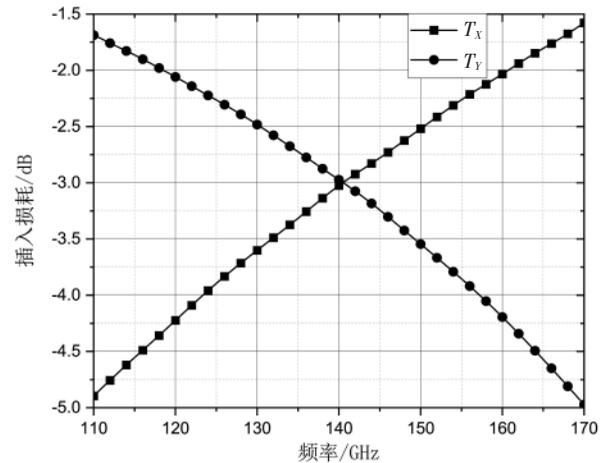


图7 插入损耗

166 GHz之间的方位角小于 $1^\circ$ ,说明透射波的轴向偏置角小到可以忽略。在某些通信或成像系统中,在某些情况下,发射-接收波的极化状态应为线性-圆-线性,因此在将接收波调制为正交极化波的同时,极化对准接收天线的极化方向会影响接收机的性能。设计的偏光器成功地解决了这一问题。

图7为偏振器的插入损耗,由式(2)计算,工作频率下插片损耗小于5 dB。线性双折射谐振超材料偏振器的一个典型缺陷是插入损耗大,但其工作原理是由超材料构造的低 $Q$ 谐振电路调制相位延迟,这就解释了为什么在其中心工作频率工作时不可避免地会出现3 dB的插入损耗。从图7可以看出,设计的器件在140 GHz时成功地将插入损耗压缩到近3 dB,这与采用 $10 \mu\text{m}$ 超薄聚酰亚胺基板和超材料的设计成功地降低了谐振功率有关。

## 3 结论

本文设计了6G毫米波超宽带谐振超材料圆偏振器。该偏光片为单层结构,基片采用 $10 \mu\text{m}$ 超薄聚酰亚胺薄膜。它可以调制两个正交偏振波的相位,低 $Q$ 设计

有效地将带宽提高到 39%。仿真结果表明,在 140 GHz 工作时,3 dB 轴向比可以达到 54 GHz 的带宽,插入损耗小于 5 dB。在后续的设计中,将采用多层堆叠的方式进一步增加带宽,并且尝试增加匹配层以减小插入损耗。

## 参考文献

- [1] LI W, XIA S, HE B, et al. A reconfigurable polarization converter using active metasurface and its application in horn antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2016, 64(12): 5281-5290.
- [2] LI Y, ZHANG J, QU S, et al. Achieving wide-band linear-to-circular polarization conversion using ultra-thin bi-layered metasurfaces[J]. Journal of Applied Physics, 2015, 117(4): 44501.
- [3] NGUYEN T, NGUYEN T, NGUYEN T, et al. Simple design of a wideband and wide-angle reflective linear polarization converter based on crescent-shaped metamaterial for Ku-band applications[J]. Optics Communications, 2021, 486(6138): 126773.
- [4] CHEN Z, GONG Y, DONG H, et al. Terahertz achromatic quarter wave plate: design, fabrication, and characterization[J]. Optics Communications, 2013, 311(2): 1-5.
- [5] LI J, WANG G, YUE Z, et al. Dynamic phase assembled

terahertz meta-lens for reversible conversion between linear polarization and arbitrary circular polarization[J]. 光电子进展(英文), 2022, 5(1): 24-34.

- [6] TANG B, REN Y. Tunable and switchable multi-functional terahertz metamaterials based on a hybrid vanadium dioxide-graphene integrated configuration[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2022(14): 8408-8414.
- [7] YE L, CHEN X, ZHU C, et al. Switchable broadband terahertz spatial modulators based on patterned graphene and vanadium dioxide[J]. Optics Express, 2020, 28(23): 33948.
- [8] Ma Xiaoliang, Huang Cheng, Pu Mingbo, et al. Multi-band circular polarizer using planar spiral metamaterial structure[J]. Optics Express, 2012, 20(14): 16050-16058.

(收稿日期: 2022-09-21)

## 作者简介:

侯佳(1996-),女,硕士,工程师,主要研究方向:5G 无线通信。

周秀杰(1988-),女,硕士,工程师,主要研究方向:5G 通信系统及关键技术、核心网。

李艳芬(1983-),女,硕士,主要研究方向:V2X、5G、天线。



扫码下载电子文档

(上接第 4 页)

- [5] 李枢,杜世勇,唐川.一种二次监视雷达接收机灵敏度的自动测量方法[J].电子世界,2021(3):63-64.
- [6] 王帅,张杰,张彦峰.射频接收机中自动增益控制电路建模与设计[J].无线电通信技术,2019,45(4):419-424.
- [7] 丁萍,方南军,胡善祥.S 波段宽带 16 通道射频接收模块设计[J].火控雷达技术,2021,50(2):93-97.
- [8] 马韬.一种应用于大功率导引头的小型化接收前端[J].无线电工程,2020,50(6):519-522.
- [9] 卿晨.一种小型化大动态范围的接收机信道设计与测试[J].电子技术应用,2021,47(1):16-20.
- [10] 周伟中,王晶晶,吴治霖.宽带射频接收通道的设计与实现[J].通信技术,2021,54(2):492-497.
- [11] 唐晓,丁肇宇,吴志鹏,等.微波功率放大器三阶交调特

性与实验测量[J].电视技术,2019(2):92-97.

- [12] 魏黎宇,陈泽宗,赵晨,等.S 波段船载测波雷达接收机设计及实现[J].科学技术与工程,2021,21(17):7174-7179.
- [13] 王晓光.一种高动态双模抗干扰接收机设计方法[J].无线电工程,2019,49(3):219-223.
- [14] 庞子鸿.基于射频收发机的通信系统的研究与设计[J].电子测试,2019(11):98-99.
- [15] 曲韩宾,高思鑫,张晓朋,等.一种高线性无源双平衡混频器[J].半导体技术,2019(6):421-425,432.

(收稿日期: 2022-05-25)

## 作者简介:

张宇晖(1985-),男,硕士,工程师,主要研究方向:航空电子技术。



扫码下载电子文档

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所