

文章编号: 2095-4980(2018)03-0388-05

一种太赫兹波段宽带反射型极化变换器

张盟, 袁雪琪, 王学田, 高洪民, 庞珂

(北京理工大学 信息与电子学院, 北京 100081)

摘要: 提出了一种由表层矩形金属周期图案、聚酰亚胺薄膜基底和金属反射面组成的新型反射型极化变换器。为了降低极化变换器对基底厚度的敏感度, 增大工作带宽, 该设计采用将传统反射型极化变换器表层金属线栅开口截断和增大金属线栅宽度的方法, 引进了表层金属图案对两正交极化方向电磁场的等效电容电感效应, 进行相位调制。仿真结果表明中心频率为500 GHz时, 工作带宽可达到140 GHz, 插入损耗小于0.5 dB, 并且在一定基底厚度条件下误差在一定范围内, 整体性能几乎无变化。仿真表明该极化变换器有效增大了工作带宽, 并降低了对基底厚度敏感度。提出了薄膜光刻工艺来对设计的极化变换器进行加工制作。

关键词: 太赫兹(Terahertz); 反射型; 极化变换器; 薄膜光刻工艺

中图分类号: TN61

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201803.0388

A broadband Terahertz reflective polarization converter

ZHANG Meng, YUAN Xueqi, WANG Xuetian, GAO Hongmin, PANG Ke

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

Abstract: A reflective polarization converter constructed by a layer of rectangle metal pattern, an ultrathin polyimide substrate, and a layer of metal reflector are introduced. To lower the sensitivity to the thickness of the substrate and increase the working bandwidth, the method of broadening and truncating the metallic wire grid of traditional polarization converter is proposed, which introduces the equivalent capacity and the equivalent inductance of two orthogonal linearly polarized incident electromagnetic waves, so the phases are modulated separately. The simulation result suggests that at 500 GHz, the working bandwidth is about 140 GHz, the insert loss is less than 0.5 dB; and while the thickness error of the polyimide substrate is within a due range, the performance of the polarization converter would keep stable. The designed converter efficiently lowers the sensitivity to the thickness of the substrate and increases the working bandwidth, besides, a flexible thin-film photoetching method is proposed for the process of the polarization converter.

Keywords: Terahertz; reflective type; polarization converter; flexible thin-film photoetching method

太赫兹(Terahertz, THz)波是指频率在 0.1~10 THz 范围内的电磁波, 是连接宏观电子学与微观光子学的桥梁。太赫兹技术广泛应用于各行各业的重要检测和探测, 例如生物医学成像、公共安全检测、材料无损检测、全球环境监测、药品成分分析、国防军事探测和信息通信技术等^[1]。极化变换器作为一种重要器件, 在微波系统中具有重要应用^[2-3]。随着工作频率的升高, 尤其是在毫米波和太赫兹频段, 传统的加工工艺精确度和传统基底材料在该频段的高介电损耗, 提高了高性能极化变换器的设计与制作难度。作为准光学收发隔离网络中的关键器件^[4], 极化变换器的作用是实现特定角度入射的线极化波与圆极化波的相互转换, 对保证发射与接收信号的隔离以及控制接收信号的信噪比具有关键作用。极化变换器主要分为透射型极化变换器^[5]与反射型极化变换器^[6]。其中透射型极化变换器频带相对较宽, 对其在系统中的摆放精确度要求相对不高, 但是当工作在较高频段时, 其传输损耗较大; 而反射型极化变换器传输损耗较小, 但是由于其工作原理以及层间耦合等原因, 基底厚度以及工作性能对波长较为敏感, 工作带宽较窄, 约为 4%~8%^[7-8]。为了解决传统反射型极化变换器的上述问题, 本文设计了一种工作在 500 GHz 频段附近的新型宽带反射型极化变换器。

1 反射型极化变换器原理

1.1 传统反射型极化变换器原理

传统极化变换器表层见图 1 的金属线栅结构，其原理特性已得到广泛研究。令入射线极化波的电场方向与金属线栅方向呈 45°，则其电场 E 可分解为 2 个正交极化分量，分别为电场方向平行于金属线栅的分量 E_{\parallel} 和电场方向垂直于金属线栅极化分量 E_{\perp} 。金属线栅最主要的特点是对极化分量 E_{\perp} 具有透射作用，对于极化分量 E_{\parallel} 具有反射作用。金属线栅结构对于不同极化方向电磁波的传输效果主要与占空比、周期、基底材料和厚度有关^[9]。

极化变换器将以一定角度入射的线极化波转换为圆极化波，也可将圆极化波逆向转换为线极化波。以前者为例，见图 2，入射线极化波的传播方向与极化变换器表面法向量呈 45°。线极化波电场方向相对于金属线栅方向呈 45°，见图 1，于是线极化波的电场可分解为 2 个正交分量 E_{\parallel} 和 E_{\perp} ，其中 E_{\parallel} 的电场方向平行于金属线栅方向， E_{\perp} 的电场方向垂直于金属线栅方向，二者等幅同相。根据上述金属线栅的特点， E_{\parallel} 在金属线栅处反射，而 E_{\perp} 在金属线栅处直接透射穿过，通过金属线栅的垂直分量 E_{\perp} 经过聚酰亚胺基底，被背面的金属层反射，由此产生的路程差 $\alpha = \sqrt{2}d$ 造成 E_{\perp} 相对于 E_{\parallel} 有 90° 的相位滞后，根据叠加原理，2 个正交分量 E_{\parallel} 和 E_{\perp} 合成圆极化波。同理，圆极化波在经过极化变换器后，重新生成相对于原线极化波正交方向上的线极化波。

反射型极化变换器为使得入射波的 2 个正交分量相位差达到 90°，需使得二者具有 $(2n-1)\lambda/4$ 的路程差，经推导，在无介质基底情况下，金属线栅与金属层的间距 d 需要满足如下关系：

$$d = \frac{(2n-1)\lambda}{4\sqrt{2}}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \tag{1}$$

在有介质基底的条件下间距 d 需要满足如下关系：

$$d = \frac{(2n-1)\lambda}{4\sqrt{2}(2\sqrt{\epsilon_r}-1)}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \tag{2}$$

传统反射型极化变换器工作的中心频率为 500 GHz，在无介质基底条件下，其波长为 $\lambda=600.0 \mu\text{m}$ ，根据式(1)可得，基底厚为 $d=106.0 \mu\text{m}$ 。在存在介质基底的情况下，以聚酰亚胺为例，该材料在 500 GHz 附近的介电常数为 $\epsilon_r \approx 3$ ，根据式(2)计算可得，基底厚度为 $d=43.0 \mu\text{m}$ ，所以对于传统反射型极化变换器，基底厚度限制于 $(2n-1)\lambda/4$ 的路程差，导致器件较厚，而且加工组装难度极大。

1.2 500 GHz 新型反射型极化变换器原理

从以上推导可知，入射极化波的垂直分量 E_{\perp} 与平行分量 E_{\parallel} 需产生 90° 相位差，传统反射型极化变换器主要通过调节金属线栅的周期、宽度以及基底厚度来实现，所以传统反射型极化变换器对频率敏感度高，其工作频带相对较窄，并且器件厚度限制于 $(2n-1)\lambda/4$ 的路程差条件，导致器件较厚。为了解决上述问题，本文在此基础上进行了改进。新型反射型极化变换器将传统的线型金属线栅分割成间距极小的金属周期单元阵列，既保留了原金属线栅的基本功能，又将原金属线栅分割成的金属单元宽度加宽，引入了加宽的金属单元对正交分量与产生的额外等效电感及金属单元间间隙产生的等效电容。

新型极化变换器的金属周期阵列，对于入射波的垂直分量与平行分量产生的等效电容电感见图 3。入射线极化波的垂直分量在金属周期阵列处透射，平行分量在金属周期阵列处反射，由上述可知，新型反射型极化变换器的表面结构利用对 2 个正交分量产生的等效电容电感来对二者相位进行调制，可有效降低极化变换器对波长的敏感度，从而拓宽工作频带，与此同时减小基底的厚度。

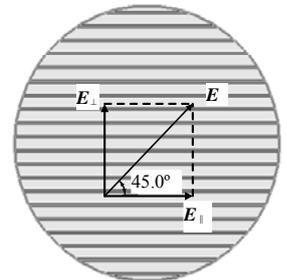


Fig.1 Metal line structure and polarization direction of the linearly polarized incident wave
图 1 金属线栅结构及入射线极化波电场方向

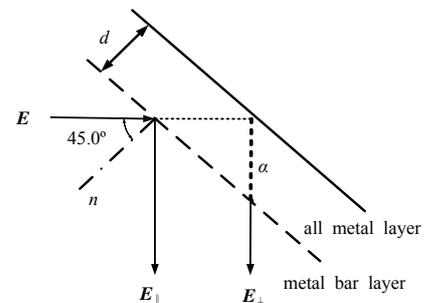
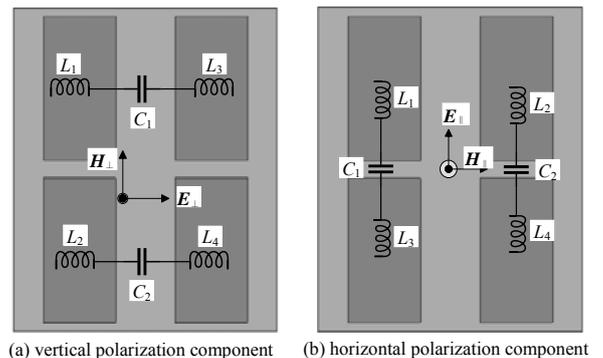


Fig.2 Principle of polarization converter
图 2 极化变换器原理



(a) vertical polarization component (b) horizontal polarization component
Fig.3 Equivalent capacitance and induction the polarization converter has on the two components
图 3 极化变换器对于两正交分量的等效电容电感

新型反射型极化变换器的整体结构见图 4(a): 表层为单层等效无限大亚毫米金属周期结构, 底层为单层金属贴面, 中间填充的介质基底为厚度 34.42 μm 的聚酰亚胺, 厚度约为中心频率波长的 0.057 2 倍, 该基底在该频段介电常数 $\epsilon_r \approx 3$, 介电损耗正切值约为 0.1^[10]。图 4(b) 为该新型反射型极化变换器的周期单元结构, 其各项参数为: $a=234.0 \mu\text{m}, b=195.0 \mu\text{m}, c=107.1 \mu\text{m}, d=209.5 \mu\text{m}$ 。

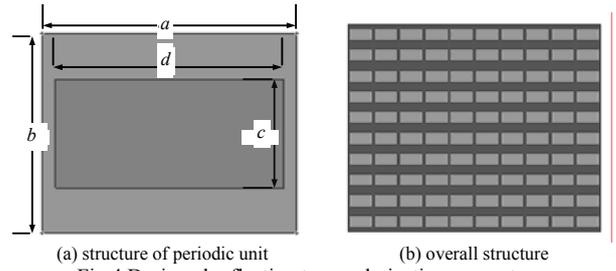


Fig.4 Designed reflection type polarization converter
图 4 新型反射型极化变换器

2 仿真结果及工艺分析

2.1 仿真结果

由于实际制作的极化变换器尺寸远大于工作波长, 若根据极化变换器的全部结构进行建模分析则仿真过程计算量过大, 对计算机要求较高。因此本设计中直接利用 Ansoft HFSS 的 Floquet 端口理论对极化变换器的一个周期单元进行电磁仿真分析。仿真中的介质基底材料设置为聚酰亚胺, 这种材料在工作频段内介电常数约为 3, 介电损耗角正切值为 0.1。得到其传输损耗和相位差仿真结果见图 5。

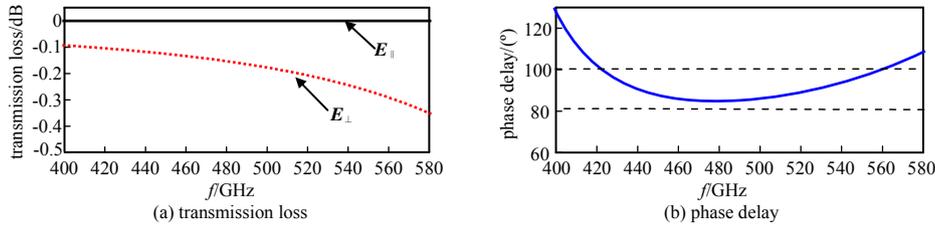


Fig.5 Transmission loss and phase delay of the two polarization components
图 5 两正交极化方向电磁波经过新型反射型极化变换器的传输损耗和相位差

根据仿真结果, 利用式(3)和式(4)可求得极化变换器的轴比(Axial Ratio, AR), 其中 $\Delta\phi$ 为 2 个正交极化分量相位差, 计算结果见图 6。

$$AR = \frac{|E_{\parallel}|^2 + |E_{\perp}|^2 + \sqrt{a}}{|E_{\parallel}|^2 + |E_{\perp}|^2 - \sqrt{a}} \quad (3)$$

$$a = |E_{\parallel}|^4 + |E_{\perp}|^4 + 2|E_{\parallel}|^2|E_{\perp}|^2 \cos(2\Delta\phi) \quad (4)$$

通过仿真结果可知新型反射型极化变换器在 420~560 GHz 频段内圆极化轴比小于 3 dB, 且两正交极化方向电磁波经过极化变换器的传输损耗小于 0.5 dB。

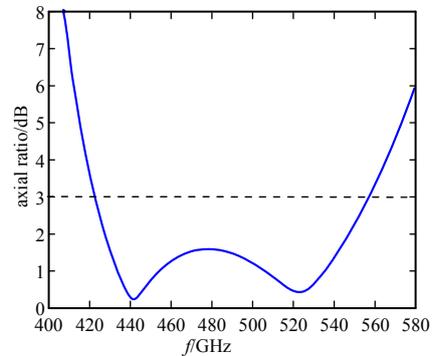


Fig.6 Axial ratio of the reflection type polarization converter
图 6 反射型极化变换器轴比特性

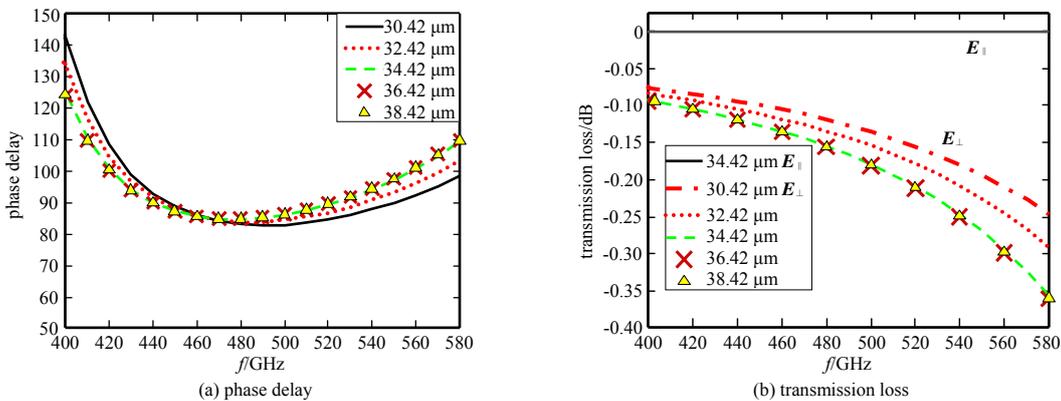


Fig.7 Influence of transmission loss and phase delay caused by substrate thickness change
图 7 基底厚度变化对两正交极化方向电磁波的传输损耗和相位差的影响

2.2 误差分析

由于设计的反射型极化变换器利用薄膜光刻技术进行加工,其工艺精确度在 $1\ \mu\text{m}$ 左右,在误差分析中,矩形贴片的大小对该极化变换器的性能影响不大。通过误差分析可知,新型反射型极化变换器的工作性能对于聚酰亚胺基底厚度较为敏感,见图 7。

2.3 薄膜光刻工艺

光刻技术利用光刻胶曝光后产生的化学反应的特点进行掩膜版的图案转移,是一种对基于基底上复杂图案进行精细加工的技术,本文设计的新型反射型极化变换器,周期图案所需加工精确度为微米级。基于根据实验室以前对柔性薄膜器件的加工经验,本文选择正性光刻胶薄膜光刻技术,在聚酰亚胺薄膜基底上进行 $500\ \text{GHz}$ 新型极化变换器的加工。光刻掩膜版是光刻过程中的关键工具,其图形精确度直接影响最终成品精确度。掩膜版制备工艺发展迅速,包括 X 射线光刻技术、全息光刻技术等。金属层转移方法多种多样,主要方法包括金属电镀法、金属蒸镀法、湿法刻蚀等。

在进行光刻前,为实现光刻胶与基底的紧密粘接,首先需要进行底膜表面处理,清除灰尘等颗粒污染物。目前的处理方法很多,可采用高压氮气吹除、旋转刷清洗、离子水清洗等。在进行底膜处理后,光刻工艺流程见图 8,按 6 个步骤完成: a) 在硬质硅片上蒸镀一层金属层,厚度大于该波段的金属趋肤深度 2 倍即可; b) 在金属层上方镀一层 $34\ \mu\text{m}$ 厚的聚酰亚胺薄膜; c) 涂光刻胶; d) 曝光显影; e) 金属膜蒸镀; f) 将光刻胶剥离得到极化变换器成品。因为加工成的新型反射型极化变换器在硬质硅上,所以器件平整度有保证,利用聚酰亚胺薄膜做基底可实现厚度的精细调整,易于设计。

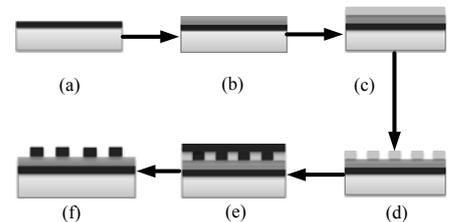


Fig.8 Process procedure of polarization converter
图 8 极化变换器加工流程

3 结论

本文设计并加工了一种工作在太赫兹波段的新型反射型极化变换器,根据传统反射型极化变换器的工作原理进行重新设计改进,大大提高了工作带宽,有效减小了介质基底的厚度。利用薄膜光刻工艺进行制作可提高器件的加工精确度^[11-12]。采用聚酰亚胺薄膜作为介质基底是因为其本身机械性能较好,在加工过程中可对其厚度较精确地控制,而且在太赫兹波段该材料对电磁波的介电损耗较小。最后,以 $500\ \text{GHz}$ 为应用背景设计的新型宽带反射型极化变换器其设计及加工方案在更高的频段同样适用。

参考文献:

- [1] 张宝武,邓玉强,徐纪华,等. 太赫兹计量研究进展[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017,15(4):553-557. (ZHANG Baowu, DENG Yuqiang, XU Jihua, et al. Progress in terahertz metrology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(4):553-557.)
- [2] 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.
- [3] 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):044501-1-044501-7.
- [4] MCMILLAN R W, TRUSSELL C W J, BOHLANDER R A, et al. An experimental 225 GHz pulsed coherent radar[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 1991,39(3):555-562.
- [5] LERNER D. A wave polarization converter for circular polarization[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1965,13(1):3-7.
- [6] CHENG Y Z, WITHAYACHUMNANKUL W, UPADHYAY A, et al. Ultra broadband reflective polarization converter for terahertz waves[J]. Applied Physics Letters, 2014,105(18):181111-1-181111-4.
- [7] COOPER K B, LOMBART N, CHATTOPADHYAY G, et al. A grating-based circular polarization duplexer for submillimeter-wave transceivers[J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2012,22(3):108-110.
- [8] 王学田,陈劫尘,房丽丽. 220 GHz 收发隔离网络设计[J]. 电波科学学报, 2009,24(z):49-51. (WANG Xuetian, CHEN Jiechen, FANG Lili. Design of a 220 GHz transceiver isolation network[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2009,24(z):49-51.)
- [9] MIDDENDORF J R, CETNAR J S, OWSLEY J, et al. High fill-factor substrate-based wire-grid polarizer with high extinction

- ratios[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology, 2014,4(3):376–382.
- [10] CONG L, CAO W, ZHANG X, et al. A perfect metamaterial polarization rotator[J]. Applied Physics Letters, 2013,103(17): 171107-1–171107-5.
- [11] MAO H, XIA L, RAO X, et al. A terahertz polarizer based on multilayer metal grating filled in polyimide film[J]. IEEE Photonics Journal, 2016,8(1):1–6.
- [12] TAO H, STRIKWERDA A C, FAN K, et al. Terahertz metamaterials on free-standing highly-flexible polyimide substrates[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2008,41(23):2004–2008.

作者简介:



张 盟(1993–), 男, 辽宁省朝阳市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹传输器件、石墨烯可调器件和太赫兹成像系统等. email:zmziqiangbuxi@163.com.

袁雪琪(1991–), 女, 河北省秦皇岛市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹超材料应用、石墨烯可调器件和太赫兹成像系统等.

王学田(1961–), 男, 江苏省扬州市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为天线理论、CART(紧缩场天线)、EMC(电磁兼容)、毫米波器件及成像系统等.

高洪民(1969–), 男, 河北省唐山市人, 副教授, 主要研究方向为电磁兼容、智能电子系统、高功率射频源设计和 MMIC 等.

庞 柯(1993–), 女, 成都市人, 硕士, 主要研究方向为太赫兹传输器件和太赫兹成像系统等.

第十五届全国超导薄膜和超导电子器件学术研讨会

为进一步推动我国超导薄膜和超导电子器件及相关领域的研究和学术交流,中国电子学会超导电子学分会定于2018年10月15日至18日在江西省井冈山市召开“第十五届全国超导薄膜和超导电子器件学术研讨会”。本届研讨会拟就当今国际超导电子学研究前沿领域进行深入讨论和交流。会议有关事项通知如下:

一、会议主题

- 1、超导薄膜及其他材料;
- 2、超导传感器探测器及其应用;
- 3、超导无源器件及其应用;
- 4、新型超导量子器件与电路;
- 5、超导电子学关联技术与应用。

二、时间与地点

会议日期: 2018年10月15~18日 15日报到注册

会议地点: 江西省井冈山市(具体地点另行通知)

三、主办单位: 江西省科学技术协会和中国电子学会超导电子学分会

承办单位: 华东交通大学和西安交通大学

四、重要日期及安排

2018年6月15日 会议第二轮通知及网站开放注册

2018年8月15日 注册和论文摘要投稿截止

2018年9月15日 会议议程确定, 投稿论文截止

五、联系方式

刘海文 教授 联系电话: 13870666060, Email: hwliu1975@mail.xjtu.edu.cn

官雪辉 教授 联系电话: 13970871029, Email: guan@ecjtu.edu.cn

刘少敏 分会秘书 联系电话: 15256532526, Email: cetc16_htsc@163.com

任宝平 博士 联系电话: 15870672023, Email: rbp2008@126.com