

基于曲折线型介质超材料的宽带太赫兹四分之一波片

葛栋森, 许全, 魏明贵, 张学迁, 韩家广

(天津大学精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术科学教育部重点实验室
天津大学太赫兹波研究中心, 天津 300072)

摘要: 采用基于高阻硅的曲折线型(meander-line)介质超材料,设计了一种宽带的太赫兹四分之一波片,可以在较宽的频率范围内将入射的线偏振太赫兹波转换为圆偏振太赫兹波出射。三维全波模拟显示,通过恰当地设计超材料微结构的几何尺寸,可以调节微结构的双折射特性,进而改变沿微结构两个正交方向偏振的太赫兹波的透射振幅和相位,使之振幅相近(约 0.55),相位相差 90°。实验上,通过离子束刻蚀硅的方法按照设计加工了一个样品,并利用太赫兹时域频谱系统进行了表征。实验结果和模拟结果吻合得很好,实现了带宽在 1.07~1.41 THz 范围内有效的四分之一波片,对应的归一化椭圆率高达 0.99,证实了该设计的有效性。此外,还通过改变微结构的几何参数,进一步在模拟上设计了两个在其他太赫兹波段工作的四分之一波片,证明了该微结构的可调谐特性。

关键词: 太赫兹; 介质超材料; 曲折线型微结构; 四分之一波片

中图分类号: O433 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0921002

Broadband terahertz quarter wave plate based on meander-line dielectric metamaterials

Ge Dongsen, Xu Quan, Wei Mingui, Zhang Xueqian, Han Jianguang

(Center for Terahertz Waves, Key Laboratory of Optoelectronics Information and Technology(Ministry of Education), School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In this work, a broadband terahertz quarter wave plate was designed using high-resistance silicon based on meander-line dielectric metamaterials, which could convert the terahertz linear-polarization incidence to circular-polarization output. The 3D full-wave simulation shows that the birefringence property of the structure can be freely adjusted by properly designing the geometric parameters, which allows to engineer the transmission amplitudes of two orthogonal terahertz linear polarizations to be close to each other (about 0.55), while the phase difference to be 90°. Based on the design, a terahertz quarter wave plate was fabricated using ion-beam etching method, and then experimentally characterized using terahertz time-domain spectroscopy system. The experimental results agree well with the simulations, which indicates that a broadband terahertz quarter wave plate that functions at 1.07–1.41 THz with a high normalized ellipticity over 0.99 was realized, demonstrating the

收稿日期: 2017-01-05; 修订日期: 2017-02-11

作者简介: 葛栋森(1990-),男,硕士生,主要从事太赫兹偏振器件方面的研究。Email:gedonsen@163.com

通讯作者: 张学迁(1988-),男,讲师,主要从事太赫兹人工电磁微结构方面的研究。Email:alearn1988@tju.edu.cn

validity of our designing scheme very well. Besides, by changing the geometrical parameters of the structure, two different broadband terahertz quarter wave plates that function at other frequency ranges were further designed, which confirms the tunability of the proposed structure.

Key words: terahertz; dielectric metamaterials; meander-line structure; quarter wave plate

0 引言

太赫兹技术的发展为许多重大的应用前沿提供了新的思路和方法,比如无损探测^[1]、国防安全^[2]、通信^[3]等等。太赫兹技术的发展不仅需要高质量的太赫兹发射器和探测器^[4],还需要各种高性能的太赫兹功能器件。但是常规的光学和微波波段的功能器件,由于材料和技术的限制,很难用相同方法满足太赫兹波段相应功能器件的要求。超材料,是一种由人工的亚波长微结构阵列组成的新型材料,与自然界材料相比,其对电磁波的操控更加高效和自由,且可实现许多自然界材料所不具有的性质。超材料的出现在一定程度上解决了太赫兹波段存在的技术难题,大量基于超材料的太赫兹功能器件,如开关^[5]、调制器^[6]、滤波器^[7]、传感器^[8]和多偶极子振荡器^[9]等被接连地提出和验证。

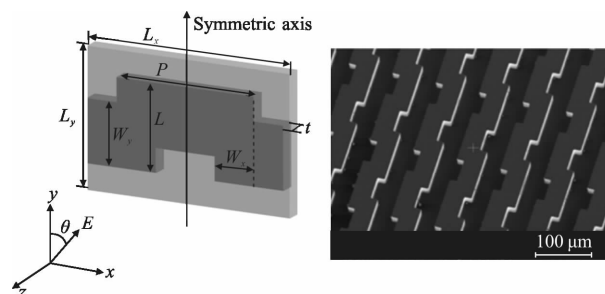
特别地,超材料的方法为实现对太赫兹波的偏振控制开辟了一条新途径,如太赫兹偏光器^[10]、偏振旋转器^[11-12]及波片^[13]等。其中,波片是一种常用的电磁波偏振控制器件,其原理是利用材料的双折射特性来控制两个正交偏振分量的振幅和相位差。目前,已报道的太赫兹双折射材料除上述超材料外,还有石英晶体^[14]、液晶^[15]、堆叠的普通办公室用纸^[16]和堆叠的聚合物^[17]等。但是基于这些材料的波片器件一般工作波长单一,在一定程度上限制了它们的实际应用。虽然超材料太赫兹波片可以做到宽带效果,但通常超材料的组成材料为金属,受金属本身欧姆损耗影响,效率的进一步提升会受到限制。此外,基于金属超材料的宽带太赫兹波片往往需要多层的微结构,因此加工过程也随之变得复杂。

文中设计并实验验证了一种基于介质高阻硅超材料的曲折线型宽带太赫兹四分之一波片。高阻硅在太赫兹波段损耗近乎为零,所以有望进一步提高波片的效率。此外,该波片制作简单,只需在高阻硅

基片上通过离子束刻蚀工艺刻蚀出相应厚度的微结构阵列即可。该介质超材料的偏振控制方法克服了金属超材料偏振控制器的缺点,对于研制实用化的太赫兹波段功能器件具有很重要的意义。

1 模拟仿真

图 1(a)所示是所设计的曲折线型四分之一波片的单元结构示意图,微结构和基底材料都为高阻硅,其介电常数为 11.9。从微结构的对称性角度看,该



(a) 单元结构示意图 (b) 样品的电镜图
(a) Schematic of the unit cell (b) SEM image of the sample

图 1 结构示意图

Fig.1 Structure diagram

微结构在 x 和 y 方向上具有明显的双折射特性。通过改变微结构的几何参数,就可以调节 x 和 y 偏振的太赫兹波的透射振幅和相位。实际上,改变曲折线微结构的横向(xy 面内的)尺寸,相当于改变了其在 x 和 y 两个方向的有效折射率,改变厚度 t 相当于改变了 x 和 y 偏振的太赫兹波光程。为了得到该微结构的具体太赫兹偏振响应,文中采用了三维全波模拟方法进行了仿真。在模拟中,设置 x 或 y 偏振的太赫兹波沿 z 负轴方向入射到微结构表面,边界条件设置为周期性,通过时域求解方式便可计算出不同微结构参数下的 x 和 y 偏振太赫兹波的透射谱线, $\tilde{t}_x(\omega)$ 和 $\tilde{t}_y(\omega)$ 。通过大量模拟和优化,得到了一组可以实现宽带四分之一波片功能的参数:厚度 $t=$

72 μm , 线宽 $W_x=30 \mu\text{m}$, $W_y=28 \mu\text{m}$, 高度 $L=50 \mu\text{m}$, 周期 $L_x=150 \mu\text{m}$, $L_y=90 \mu\text{m}$, 长度 $P=L_x/2+W_x=105 \mu\text{m}$, 使得其在一定频带范围内满足四分之一波片的两个条件:

$$|\tilde{t}_x(\omega)|=|\tilde{t}_y(\omega)| \quad (1)$$

$$\varphi_{\text{diff}}=\arg[\tilde{t}_x(\omega)]-\arg[\tilde{t}_y(\omega)]=\pi/2 \quad (2)$$

图 2 (a)~(c) 是对应的模拟结果。可以看到, 在 1.13~1.43 THz 频率范围内, x 和 y 偏振的归一化(参考选为没有结构时的空气透射谱)透射系数振幅曲线 $|\tilde{t}_x(\omega)|$, $|\tilde{t}_y(\omega)|$ 变化趋势相似, 值最小为 0.55, 且整体相差不大, 见图 2(a)。同时, 两分量的相位差变化在 $85^\circ\sim 95^\circ$ 之间, 变化趋势类似于开口向下的抛物线, 见图 2(b)。由以上结果可知, 该微结构在 1.13~1.43 THz 频率范围内具有四分之一波片的功能, 中心频率 f_0 为 1.28 THz。

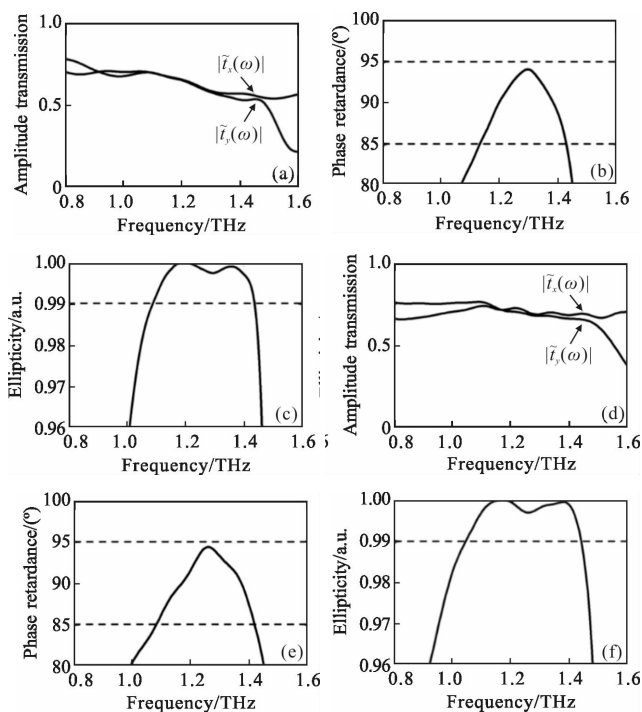


图 2 模拟(a)和实验(d)的 x 和 y 偏振的透射系数振幅谱; 模拟(b)和实验(e)的 x 和 y 偏振透射系数相位差谱; (c)和(f)根据模拟结果和实验结果分别计算得到的归一化椭圆率

Fig.2 Simulated (a) and measured (d) amplitude transmission spectra for x and y polarizations; Simulated (b) and measured (e) phase retardance between x and y polarizations; (c) and (f) the corresponding calculated normalized ellipticities by using the simulated and measured results

为了印证该微结构四分之一波片的宽带特性, 这里定量分析了一个与 y 轴成 $\theta=45^\circ$ (见图 1(a)) 夹角的线偏振太赫兹波经过该波片后出射的太赫兹波的偏振状态。这个偏振态可以通过引入斯托克斯参数^[18]来进行定量分析:

$$s_0=|\tilde{t}_y|^2+|\tilde{t}_x|^2 \quad (3)$$

$$s_1=|\tilde{t}_y|^2-|\tilde{t}_x|^2 \quad (4)$$

$$s_2=2|\tilde{t}_y||\tilde{t}_x|\cos(\varphi_{\text{diff}}) \quad (5)$$

$$s_3=2|\tilde{t}_y||\tilde{t}_x|\sin(\varphi_{\text{diff}}) \quad (6)$$

利用这些参数, 可以计算出射的太赫兹波偏振态的归一化椭圆率 $\chi=s_3/s_0$; $\chi=1$, 表示一个完美的左旋圆偏振态; $\chi=-1$, 表示一个完美的右旋圆偏振态。图 2(c) 为计算得到的归一化椭圆率 χ 随频率的变化曲线, 可以看到, 在 1.13~1.41 THz 频率范围内, $\chi>0.99$, 表示在此频率范围内出射太赫兹波是近乎完美的左旋圆偏振态。可想而知, 当入射一个 $\theta=-45^\circ$ 的线偏振太赫兹波时, 出射的太赫兹波在该频率范围内将变成右旋偏振态。

2 实验结果与讨论

图 1(b) 所示, 是按照模拟中设计的几何参数, 结合光刻和离子束刻蚀工艺加工出的样品在电子显微镜下的局部照片(样品的总尺寸为 $1 \text{ cm}\times 1 \text{ cm}$), 可以清楚地看到, 样品的结构清晰、线条分明且棱角尖锐、边缘光滑, 几何参数也与设计相吻合。接下来, 采用基于光电导天线的太赫兹时域光谱测量系统 (THz-TDs) 研究了该样品的性质。

测量所使用的实验装置如图 3 所示。实验过程中, 样品放在第一块线偏振片 P1 (起偏, 透射太赫兹波偏振沿 x' 轴) 之后; 旋转样品, 使其对称轴 (y 轴) 与 y' 轴夹角 45° , 来实现模拟中 $\theta=45^\circ$ 线偏振太赫兹入射的情况, 该线偏振可分解为两个正交且等量的偏振分量分别透过样品, 即 x 和 y 偏振分量; 放入第二个线偏振片 P2 (检偏), 通过旋转它的角度, 来分别使 x 和 y 偏振的太赫兹波分量通过; 第三个线偏振片 P3 的作用是将 x 和 y 偏振的太赫兹波同等程度地投影至 x' 方向, 以采用相同的接收器接收, 测量得到 x 和 y 偏振的太赫兹透射谱。在整个过程中, 实验系统一直置于一个充满干燥空气的环境中, 以尽量

降低水分对太赫兹波的吸收影响。利用上述实验方法,可以得到:

$$|\tilde{t}_x(\omega)| = |\vec{E}_x^s(\omega) / \vec{E}_x^r(\omega)| \quad (7)$$

$$|\tilde{t}_y(\omega)| = |\vec{E}_y^s(\omega) / \vec{E}_y^r(\omega)| \quad (8)$$

式中: $E(\omega)$ 代表测量得到的太赫兹电场强度;上标 s 和 r 分别代表样品和参考(干燥空气)。图 2(d)~(f)是实验测量得到的两正交分量的透射系数振幅、相位差和归一化椭圆率谱线,可见在 1.07~1.41 THz 频率范围内: 两分量的透射系数振幅变化比较相似且数值相差不大,小于 0.05;相位差在 $85^\circ \sim 95^\circ$ 之间;出射偏振态的归一化椭圆率 $\chi > 0.99$ 。实验结果与模拟结果吻合地很好,变化趋势也基本一致,验证了文中设计的有效性,实现了宽带太赫兹四分之一波片。

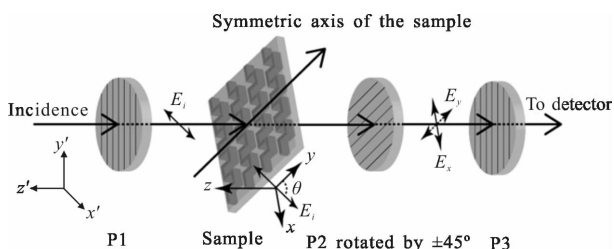


图 3 偏振测量装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of the experimental setup

3 进一步拓展

除上面介绍的四分之一波片(S1)外,通过改变微结构的几何参数,该曲折线型微结构还可在其他太赫兹频率范围内实现宽带四分之一波片功能。这里还设计了另外两种四分之一波片(S2 和 S3),其具体参数如表 1 所示,里面还包含其对应的中心频率 f_0 和有效工作频率范围 Δf 。

表 1 工作在不同太赫兹频率范围的四分之一波片参数

Tab.1 Parameters of the quarter wave plates that work at different terahertz frequency range

	$t/\mu\text{m}$	$L/\mu\text{m}$	$L_x/\mu\text{m}$	$L_y/\mu\text{m}$	$W_x/\mu\text{m}$	$W_y/\mu\text{m}$	f_0/THz	$\Delta f/\mu\text{m}$
S1	72	50	150	90	30	28	1.24	1.07~1.41
S2	90	56	150	90	37	38	1	0.9~1.1
S3	128	68	150	90	25	46	0.8	0.7~0.9

图 4 所示为 S2 和 S3 的相应模拟结果,可以看

到 S2 在 0.7~0.9 THz 频率范围内,S3 在 0.9~1.1 THz 频率范围内,满足四分之一波片的工作条件,对应的输出波的归一化椭圆率大于 0.99。证明了该种微结构可通过设计实现工作频率的频移,拓展了应用频率范围。文中设计的这三个四分之一波片理论上共可覆盖 0.7~1.41 THz 范围。

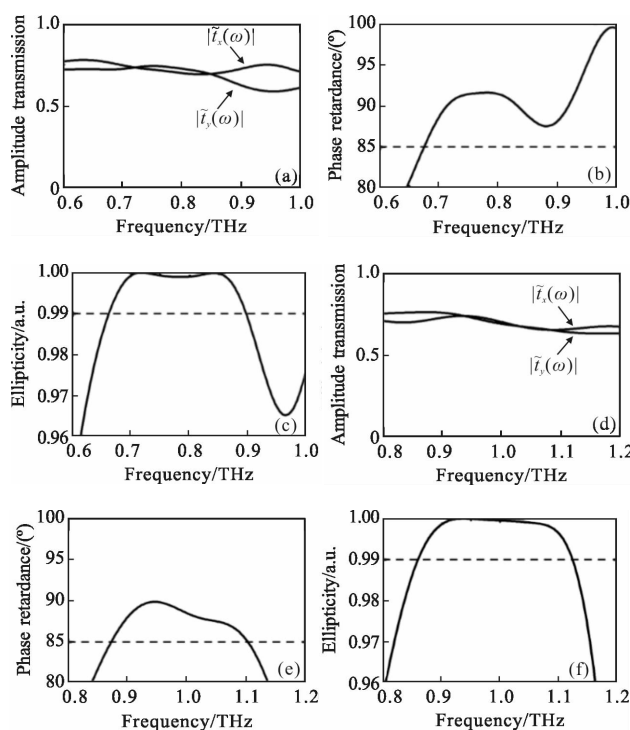


图 4 (a)~(c) 分别为模拟得到的 S2 对应的 x 和 y 偏振的透射系数振幅、相位差,以及计算得到的归一化椭圆率;

(d)~(f) 分别为模拟得到的 S3 对应的 x 和 y 偏振的透射系数振幅、相位差,以及计算得到的归一化椭圆率

Fig.4 Simulated amplitude transmission spectra (a), phase retardance (b) of the x and y polarizations, and calculated normalized ellipticity (c) of S2; Simulated amplitude transmission spectra (d), phase retardance (e) of the x and y polarizations, and calculated normalized ellipticity (f) of S3

4 结论

文中采用基于介质高阻硅的曲折线型超材料微结构,通过改变其几何参数,人为地设计其双折射特性,使两个正交偏振分量的太赫兹透射系数在较宽的频率范围内相位相差 $\pi/2$,振幅相近,从实验上实现了一种宽带四分之一波片,其有效工作带宽为 1.07~1.41 THz。通过改变微结构参数,可以在不同太

赫兹频率段实现四分之一波片功能。相比于基于金属超材料的波片,该介质超材料波片不受欧姆损耗限制,有望将效率进一步提升。除了高阻硅外,其他在太赫兹波段损耗低的高折射率介质,如锗、砷化镓等,也可通过微结构的方式实现对太赫兹偏振的操控。文中提出的全介质超材料微结构为制作太赫兹波段的偏振控制器件提供了一个新的思路。

参考文献:

- [1] Stoik C D, Bohn M J, Blackshire J L. Nondestructive evaluation of aircraft composites using transmissive terahertz time domain spectroscopy [J]. *Opt Express*, 2008, 16(21): 17039–17051.
- [2] Federici J F, Schulkin B, Huang F, et al. THz imaging and sensing for security applications-explosives, weapons and drugs [J]. *Semiconductor Sci Technol*, 2005, 20 (7): S266–S280.
- [3] Piesiewicz R, Kleine-Ostmann T, Krumbholz N, et al. Short-range ultra-broadband terahertz communications: concepts and perspectives [J]. *IEEE Antennas Propag Mag*, 2007, 49 (6): 24–39.
- [4] Lee Y S. Principles of Terahertz Science and Technology [M]. New York: Springer, 2009.
- [5] Su X, Ouyang C, Xu N, et al. Broadband terahertz transparency in a switchable metasurface[J]. *IEEE Photonics J*, 2015, 7(1): 5900108.
- [6] Chen H T, Padilla W J, Cich M J, et al. A metamaterial solid-state terahertz phase modulator [J]. *Nature Photon*, 2009, 3(3): 148–151.
- [7] Zhu Z, Zhang X, Gu J, et al. A metamaterial-based terahertz low-pass filter with low insertion loss and sharp rejection [J]. *IEEE Trans THz Sci Technol*, 2013, 3(6): 832–837.
- [8] O'Hara J F, Singh R, Brener I, et al. Thin-film sensing with planar terahertz metamaterials: sensitivity and limitations[J]. *Opt Express*, 2008, 16(3): 1786–1795.
- [9] Chen L, Wei Y, Zang X, et al. Excitation of dark multipolar plasmonic resonances at terahertz frequencies [J]. *Sci Rep*, 2016, 6: 22027.
- [10] Cong L, Cao W, Tian Z, et al. Manipulating polarization states of terahertz radiation using metamaterials [J]. *New J Phys*, 2012, 14(11): 115013–115023.
- [11] Cong L, Cao W, Zhang X, et al. A perfect metamaterial polarization rotator [J]. *Appl Phys Lett*, 2013, 103 (17): 171107.
- [12] Cheng Y, Withayachumnankul W, Upadhyay A, et al. Ultrabroadband reflective polarization convertor for terahertz waves [J]. *Appl Phys Lett*, 2014, 105(18): 181111.
- [13] Cong L, Xu N, Gu J, et al. Highly flexible broadband terahertz metamaterial quarter-wave plate[J]. *Laser Photonics Rev*, 2014, 8(4): 626–632.
- [14] Kaveev A, Kropotov G, Tsyphishka D, et al. Tunable wavelength terahertz polarization converter based on quartz waveplates[J]. *Appl Opt*, 2014, 53(24): 5410–5415.
- [15] Lin X, Wu J, Hu W, et al. Self-polarizing terahertz liquid crystal phase shifter[J]. *AIP Adv*, 2011, 1(3): 232–234.
- [16] Scherger B, Scheller M, Vieweg N, et al. Paper terahertz wave plates[J]. *Opt Express*, 2011, 19(25): 24884–24889.
- [17] Scheller M, Jördens C, Koch M. Terahertz form birefringence [J]. *Opt Express*, 2010, 18(10): 10137–10142.
- [18] Goldstein D, Goldstein D H. Polarized Light[M]. New York: Marcel Dekker Inc, 2003.