

文章编号: 1001-3806(2013)03-0297-04

亚波长线栅太赫兹偏振分束器的研究

张蒙恩 王文涛 刘平安 李向军 刘建军 洪治*

(中国计量学院 太赫兹技术与应用研究所 杭州 310018)

摘要: 为了提高工作在太赫兹波段偏振分束器的性能,采用激光诱导与化学电镀的方法在聚酰亚胺衬底上制作了亚波长周期金属线栅太赫兹偏振分束器,并以返波振荡器作为太赫兹辐射源搭建了偏振分束特性测试系统。当入射波频率为340GHz、入射角为45°时,测得在入射波偏振在0°~180°变化过程中,该偏振分束器具有良好的偏振分束特性,透射和反射的消光比分别为27.3dB和10.5dB,插入损耗分别为0.13dB和0.32dB;用太赫兹时域光谱系统测得偏振分束器在0.2THz~1.5THz频域内透射消光比大于18dB。结果表明,测试结果与时域有限元方法模拟结果基本吻合。

关键词: 光学器件;亚波长线栅;太赫兹;偏振分束器;激光诱导化学镀

中图分类号: O436.3 文献标识码: A doi: 10.7510/jjgs.issn.1001-3806.2013.03.006

Research of sub-wavelength wire-grid terahertz polarizing beam splitters

ZHANG Meng-en, WANG Wen-tao, LIU Ping-an, LI Xiang-jun, LIU Jian-jun, HONG Zhi

(Centre for THz Research, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to improve the performance of a terahertz polarizing beam splitter, a sub-wavelength period metal wire-grid terahertz polarizing beam splitter, based on a copper grating on polyimide (PI) substrate, was fabricated by the way of laser induced and non-electrolytic plating. The good polarization characteristics in the range of 0°~180° polarization angle were verified experimentally using backward wave oscillator at the fixed frequency of 340GHz at the incident angle of 45°, the extinction ratio of 27.3dB and 10.5dB as well as the insertion losses of 0.13dB and 0.32dB were measured for the transmitted and reflected beams, respectively. The broadband transmission of TM wave of the splitter was also measured by terahertz time-domain spectroscopy, and the extinction ratio larger than 18dB was obtained in the frequency range of 0.2THz~1.5THz. The experimental results are in good agreement with the simulation results by means of the finite element method.

Key words: optical devices; sub-wavelength wire-grid; terahertz; polarizing beam splitter; laser induced and non-electrolytic plating

引言

太赫兹(terahertz, THz)波通常是指频率介于0.1THz~10THz之间的电磁辐射,在电磁波谱中位于微波和红外线之间^[1]。近年来,随着太赫兹成像、光谱及通信技术的迅速发展,研制工作在太赫兹波段的高消光比、大孔径、低衰减、宽频带偏振分束器越来越受到人们的重视。

大部分商用的无支撑金属太赫兹线栅偏振器件

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60977066)

作者简介:张蒙恩(1987-),女,硕士研究生,主要从事太赫兹波辐射源等方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: hongzhi@cjl. edu. cn

收稿日期:2012-09-10;收到修改稿日期:2012-10-15

具有消光比高、带宽可调、损耗低等优点^[2-3],但制作非常困难,而且金属线的直径最小一般为10 μm 。因此,人们开始在半导体、石英^[4-5]等衬底上蚀刻金属线栅来制作太赫兹波偏振器件。但是,这些材料在太赫兹波段的介电常数较大,会引起较大的菲涅耳界面反射损失。为降低损耗,在低介电常数聚合物材料(如聚酯薄膜、高密度聚乙烯、低损耗聚乙烯、低密度聚乙烯等)表面上蚀刻金属线栅偏振器件引起了研究学者的兴趣^[6-9]。尽管光刻技术应用广泛,但流程繁杂、制作周期长,且更换结构不够灵活。2010年,MIYAMARU等人^[10]将激光诱导化学镀技术应用于太赫兹器件制备,在聚酯薄膜上制备了太赫兹波段的开口谐振环(split ring resonator, SRR)结构。作者所在研究小组用这种方法制作了

太赫兹偏振器和滤波器,并取得了较好的结果^[11]。本文中用激光诱导化学镀铜的方法在聚酰亚胺 (polyimide, PI) 薄膜上加工了太赫兹偏振分束器,对器件进行了偏振分束特性和宽带透射特性测试,利用时域有限差分法进行了数值模拟和实验结果分析。

1 样品结构及制备

1.1 样品结构

金属线栅结构具有偏振性能的原因在于平行于线栅金属线(TE偏振)偏振光激发金属线的电子而产生电流,使得该方向的偏振光反射。而垂直于线栅金属线(TM偏振)偏振光由于该方向上有空气隙将金属线隔离而无法产生电流,此时电磁波会透射过去。图1是入射角为 45° 时的太赫兹偏振分束器示意图,偏振分束器由介电常数较小的PI薄膜作为衬底材料和周期性排列在薄膜上的金属铜线组成。偏振分束器的性能由线栅周期、线栅占空比、金属厚度等参量决定。线栅占空比定义为线栅中金属线宽与线栅周期的比值。线栅周期越小,占空比越大,金属厚度越大,偏振分束器的透射消光比越大^[4],但反射消光比只呈现微小的变化。考虑到目前加工金属的最小线宽约为 $7\mu\text{m}$,设定线栅周期为 $20\mu\text{m}$ 。

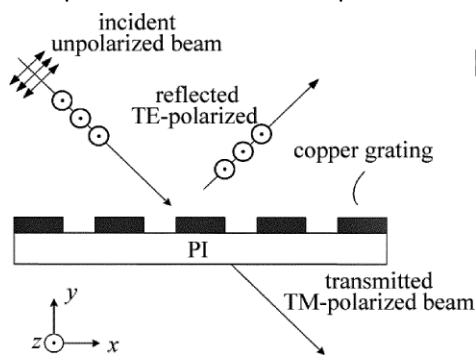


Fig. 1 Schematic diagram of the terahertz polarizing beam splitter

1.2 样品制备

样品的制备是通过激光诱导与化学镀铜的方法,首先用 351nm 氩离子激光输出对涂有硝酸银(AgNO_3)和聚乙烯吡咯烷酮(polyvinylpyrrolidone, PVP)胶体的PI薄膜进行选择曝光,将 AgNO_3 中的 Ag^+ 还原成 Ag ,然后将该PI薄膜通过化学镀铜来沉积金属铜,详细制作工艺参量见参考文献^[11]。由于这种方法的曝光过程无需掩膜,它可以灵活地刻写任意形状的图案结构。作者利用上述方法在厚度为 $50\mu\text{m}$ 的PI衬底上制备了两个线栅太

赫兹偏振分束器,线栅的周期均为 $20\mu\text{m}$ 。通过改变曝光过程激光的功率(分别为 24mW 和 20mW),制得的金属线宽有所不同,分别为 $11\mu\text{m}$ 和 $7\mu\text{m}$,即占空比分别为 0.55 和 0.35 。经Dektak150型台阶仪测量,样品的金属铜条(包括银层)厚度约为 $3.1\mu\text{m}$ 。其中,占空比为 0.55 的样品的显微镜图如图2所示,器件样品的大小为 $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ 。

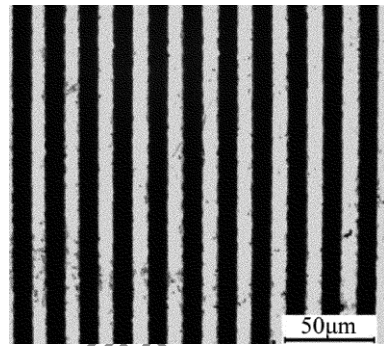


Fig. 2 Microscope image of fabricated terahertz polarizing beam splitter with fill ratio of 0.55

2 偏振分束器性能测试与分析

2.1 偏振分束性能测试

利用返波振荡器作为连续太赫兹辐射源搭建了 45° 入射时偏振分束器的透射、反射测试系统,来测试占空比为 0.55 的样品的偏振分束性能。实验时,连续太赫兹源的输出波偏振方向为水平,将频率设定为 340GHz (返波管的工作频率范围为 $220\text{GHz} \sim 370\text{GHz}$)。为提高太赫兹入射波的偏振度,在太赫兹源的输出位置插入了Micro Tech公司的金属线栅偏振器(型号为G60 \times 15-S)。透反射测量均采用焦耳热探测器加锁相放大器实现。实验中以 10° 为单位依次改变线栅与入射波的相对角度来调节入射偏振角,调节范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$,测试结果如图3所示,其中矩形和三角形分别表示不同入射偏振角时测得的透过率和反射率。由实验结果得透射消光比和反射消光比分别为 27.3dB 和 10.5dB 。图3中实线为

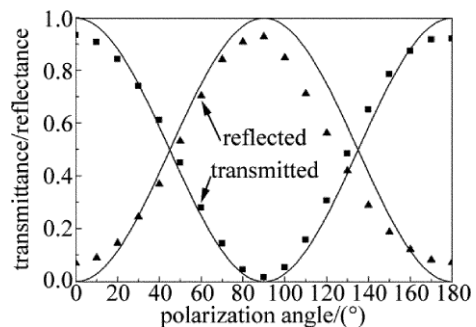


Fig. 3 Transmitted (squares) and reflected terahertz power (triangle) as a function of polarization angle

不同偏振角入射时所对应透射率和反射率的理想值 (不考虑器件插入损耗的归一化结果), 实验结果与理想曲线相比可以得到透射和反射的插入损耗分别为 0.13dB 和 0.32dB。

2.2 宽带透射特性测试

利用太赫兹时域光谱系统 (terahertz time-domain spectroscopy, THz-TDS) 进行了宽带太赫兹透射特性测试。实验中, 太赫兹波与器件表面成 45° 入射。为了减小水蒸气的影响、提高信噪比, 光路被密封在充有干燥氮气的箱子中, 相对湿度小于 1%, 测量在室温下进行。图 4a 中分别是参考信号 (无样品时的太赫兹透射信号) (虚线) 和占空比为 0.55 偏振分束器在入射波偏振角度为 0°、45° 和 90° 时的透射波时域波形 (实线)。对时域信号进行傅里叶变换就可以得到相应的频率谱, 若无样品时的参考信号谱记为 E_{ref} , 有样品时记为 E_{sam} , 则样品的透过率谱为 $T = |E_{sam}|^2 / |E_{ref}|^2$ 。图 4b 中矩形线是把图

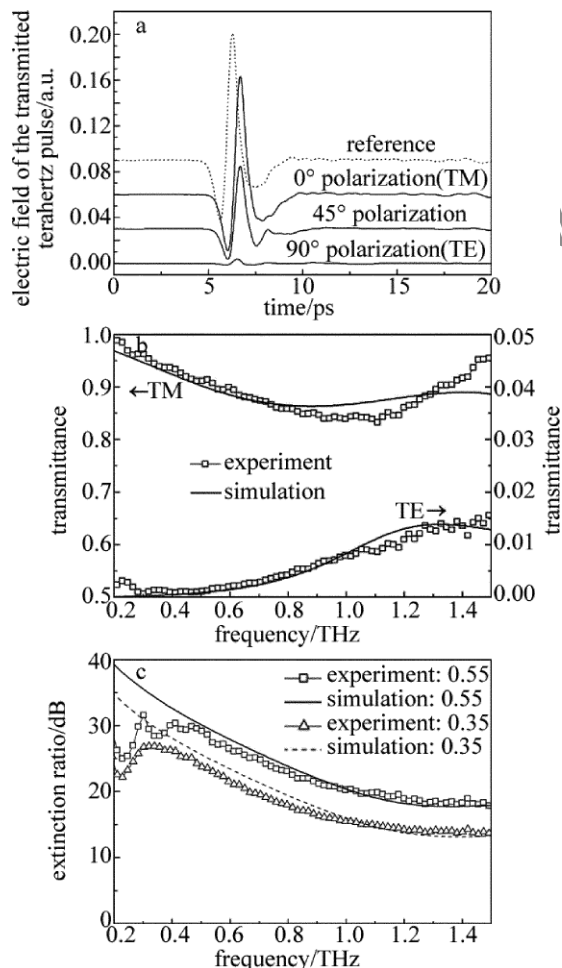


Fig. 4 Experimental results

a—time-domain b—frequency-domain c—transmission extinction ratio with fill ratio of 0.55 and 0.35

4a 中 TM 偏振、TE 偏振进行快速傅里叶变换后, 经计算得到的透过率谱, 由图 4b 可知, TM 偏振透过率在 0.2THz ~ 1.5THz 频域内大于 80%; 实线是用时域有限差分法对偏振分束器进行仿真得到的结果。仿真时, 衬底材料 PI 的介电常数设为 $2.9 + 0.2i$, 铜的电导率设为 $5.8 \times 10^7 S/m$ 。实验结果与仿真结果基本相符。图 4c 中给出了占空比为 0.55 和 0.35 两个偏振分束器的透射消光比的实验结果和仿真计算结果, 从图中可以明显看出, 线栅占空比越大, 透射消光比也越高。

2.3 结果分析

由图 4c 可知, 占空比为 0.55 的偏振分束器, TM 偏振透过率在 0.2THz ~ 1.5THz 频域内大于 80%, 透射消光比大于 18dB, 最高为 31dB, 优于参考文献 [7] 中报道的结果 (0.5THz 处 21dB, 1THz 处 16dB)。这主要是由于作者制作的器件金属厚度大于文献中的参量 (文献中用光刻法制作的偏振分束器衬底材料是高密度聚乙烯, 其金属厚度为 $2\mu m$)。而激光诱导化学镀铜方法制备的结构器件其金属厚度主要是由镀铜时间来控制的, 但最大厚度受到结构尺寸的限制。参考文献 [9] 中利用该方法在聚酯薄膜上制作的开口环金属厚度达到 $15\mu m$ 。

目前, 很少有太赫兹偏振分束器的反射消光比实验测试结果报道。作者在实验中获得的 340GHz 时反射消光比为 10.5dB, 要远小于透射消光比 27.3dB, 同样用时域有限差分法进行了仿真 (如图 5 所示)。结果表明, 反射消光比在 0.2THz ~ 1.5THz 范围内都小于 18dB, 且对线栅周期、占空比、金属厚度等参量不敏感。而采用布儒斯特角入射可以有效提高反射消光比 [7]。

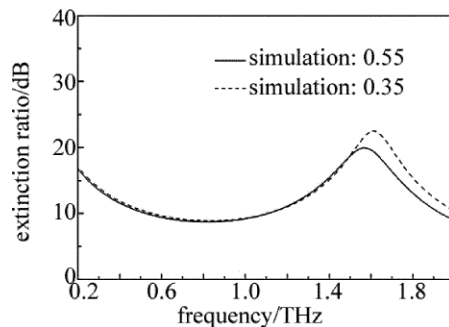


Fig. 5 Reflection extinction ratio with the fill ratio of 0.55 and 0.35

3 结论

用激光诱导化学镀铜的方法制作了太赫兹线栅偏振分束器, 并进行了性能测试和实验结果分析。

实验表明,该偏振分束器在入射偏振角 $0^\circ \sim 180^\circ$ 变化过程中具有良好的偏振分束特性。在 340GHz 处透射和反射消光比分别为 27.3dB 和 10.5dB,插入损耗分别为 0.13dB、0.32dB; 0.2THz ~ 1.5THz 范围内透射消光比大于 18dB。

参 考 文 献

- [1] XU J Zh, ZHANG X Ch. Terahertz technology and application [M]. Beijing: Peking University Press, 2007: 1-2(in Chinese).
- [2] CATRYSSSE P B, VERONIS G, SHIN H, *et al.* Guided modes supported by plasmonic films with a periodic arrangement of sub-wavelength slits [J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(3): 031101.
- [3] COSTLEY A E, HURSEY K H, NEILL G F, *et al.* Free-standing fine-wire grids: their manufacture, performance, and use at millimeter and submillimeter wavelengths [J]. Journal of the Optical Society of America, 1977, 67(7): 979-981.
- [4] YAMADA I, TAKANO K, HANGYO M, *et al.* Terahertz wire-grid polarizers with micrometer-pitch Al gratings [J]. Optics Letters, 2009, 34(3): 274-276.
- [5] LU M Zh, LI W Z, BROWN E R. Second-order bandpass terahertz filter achieved by multilayer complementary metamaterial structures [J]. Optics Letters, 2011, 36(7): 1071-1073.
- [6] Sciencetech Inc. Beam splitters [EB/OL]. [2012-09-01]. http://www.sciencetech-inc.com/zh-hant/catalog/69/beam_splitters.
- [7] BERRY C W, JARRAHI M. Broadband terahertz polarizing beam splitter on a polymer substrate [J]. Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2012, 33(2): 127-130.
- [8] TIAN D, DONG X, WEN Q, *et al.* Terahertz transmission characteristics of double wire-grid polarizer on low-loss polyethylene substrate [J]. Applied Physics, 2011, B104(1): 125-130.
- [9] UNG B S, FUMEAUX C, LIN H, *et al.* Low-cost ultra-thin broadband terahertz beam-splitter [J]. Optics Express, 2012, 20(5): 4968-4978.
- [10] MIYAMARU F, KUBODA S, TAIMA K, *et al.* Three-dimensional bulk metamaterials operating in the terahertz range [J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(8): 081105.
- [11] WANG W T, LIU J J, LI X J, *et al.* Direct fabrication of terahertz polarizer and filter by laser induced and non-electrolytic plating with copper [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1231002(in Chinese).

版权所有 © 《激光技术》编辑部