

文章编号: 2095-4980(2014)05-653-05

纸太赫兹半波片的制作和测试

郑 阔^{a,b,c}, 何 君^{a,b,c}, 沈京玲^{a,b,c*}

(首都师范大学 a.物理系; b.北京市太赫兹波谱与成像重点实验室; c.太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京 100048)

摘 要: 采用普通的打印纸经过简单工艺制作出纸太赫兹半波片。使用太赫兹时域光谱(THz-TDS)技术, 测量了纸波片在 200 GHz~400 GHz 的折射率、吸收系数、频谱、消光比、参数 C 等光学特性随纸波片取向的变化关系, 将实验结果与理论分析相结合, 发现该纸波片是对频率为 282.5 GHz 的半波片。

关键词: 纸太赫兹半波片; 偏振; 太赫兹时域光谱技术; 折射率

中图分类号: TN015; O436.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201405.0653

Fabrication and measurements of paper terahertz half-wave plate

ZHENG Kuo^{a,b,c}, HE Jun^{a,b,c}, SHEN Jing-ling^{a,b,c*}

(a.Department of Physics; b.Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging; c.Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: A paper terahertz half-wave plate is fabricated with ordinary office paper through a simple process. Its refractive index, absorption coefficients, spectrum, extinction ratio, and parameter C are measured from 200 GHz to 400 GHz in different plate orientations by adopting Terahertz Time-Domain Spectroscopy(THz-TDS) technique. Combining the experimental results with the theoretical analysis, it is found that the performances of the proposed paper wave plate agrees well with the good characteristics of half-wave plate at 282.5 GHz.

Key words: paper terahertz half-wave plate; polarization; Terahertz Time-Domain Spectroscopy technique; refractive index

太赫兹波作为一种具有众多优点的新辐射源, 凭借其独特的特性在成像、医学诊断、环境科学、信息、国家安全及基础物理研究领域有着广阔的应用前景和应用价值^[1-6]。太赫兹波片作为偏振器件, 在太赫兹偏振技术中起着重要作用。2 个互相垂直的线偏振光在波片内的折射率不同, 传播速度也不同。透过波片后会有相对的相位延迟, 进而经过波片后光的偏振态也随之发生改变。目前商用太赫兹偏振器件价格非常昂贵, 因此制作性能优异的低成本偏振器件在该领域有迫切需求。受到 Benedikt Scherger 等人工作的启发^[7], 设计了一个半波片, 用普通的办公纸经过简单加工便可以制得。为了研究波片的性能, 用太赫兹时域光谱(THz-TDS)技术对其 s 偏振和 p 偏振的折射率和吸收系数、双折射率、频谱、消光比和参数 C 等光学参数进行了测试, 可以发现这些光学参数反映了波片较好的太赫兹光学特性。故而纸太赫兹半波片在制作和性能两方面都较为出色。

1 纸太赫兹半波片的设计和制作

纸波片的示意图如图 1 所示。相对于太赫兹波传播方向而言, d 为波片的厚度。对于期望设计的厚度 d , 根据半波片相差公式应满足:

$$d = \frac{c}{2f\Delta n} \quad (1)$$

收稿日期: 2014-07-19; 修回日期: 2014-08-19

基金项目: 国家重大仪器专项资助项目(2012YQ140005); 北京市自然科学基金资助项目(4144069); 北京市教委科技资助项目(025145306000/031)

*通信作者: 沈京玲 email:sjl-phy@cnu.edu.cn

式中: f 是波片设计的频率, c 是光速, Δn 是双折射率, 图 1 的纸波片结构的双折射率将由实验测定。下一节会根据实验数据详细地展开讨论。

为了使制作出的纸波片中纸和空气间隔对更加均匀平整, 尽量让纸波片的长度小些, 并且选用厚度大些的普通 80 克打印纸切割堆叠而制成。制作过程: 用线将纸(采用 Double A 80 g/m², 厚度是 100 μm 的 A4 办公纸)划分成等间隔。这个间隔就是之后希望设计的波片厚度 d , 本研究中采用 4.2 mm。用切纸刀沿线的垂直方向将其裁成若干 4.5 cm 和 1.5 cm 的小条, 最后沿画出的等间隔线把小条裁成一个个小片。将 1.5 cm 长的小片贴在 4.5 cm 长的小片两端, 使其充当间隔物, 然后再贴上新的 4.5 cm 的小片, 从而形成纸和空气的间隔对, 并如此周期性地堆积, 就形成如图 2 和图 3 所示的纸波片。

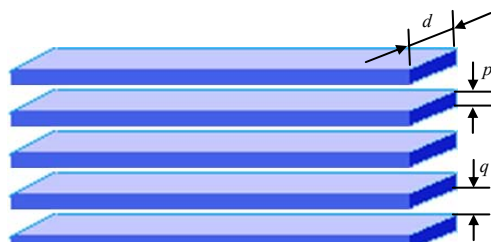


Fig.1 Schematic diagram of the paper wave plate

图 1 纸波片示意图

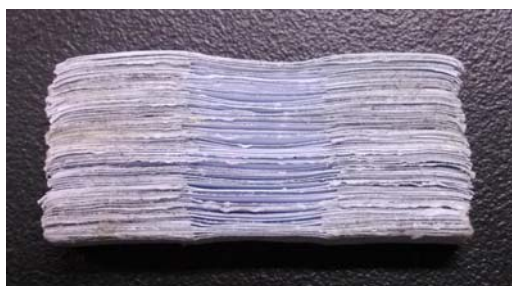


Fig.2 Front view of the paper wave plate

图 2 纸波片正面图



Fig.3 Side view of the paper wave plate

图 3 纸波片侧面图

在纸波片示意图 1 中, 纸张的厚度 $p=100 \mu\text{m}$, 空气间隔 q 略大于纸张厚度 p , 约为 $146 \mu\text{m}$, 这一不同是因为 4.5 cm 长的纸片和间隔物 1.5 cm 短的小片没有完全压在一起造成的。

2 纸太赫兹半波片的测试和分析

2.1 测试系统和测试方法

采用首都师范大学物理系北京市太赫兹波谱和成像重点实验室的小型 THz-TDS 系统对纸波片的性能进行测试。实验中, 由光导天线产生的水平偏振方向的 THz 波沿 z 方向入射纸波片, 如图 4 所示。以 z 方向为轴旋转太赫兹波片改变其取向, 从而改变入射波偏振方向与 y 轴(垂缝方向)的夹角, 入射太赫兹波的偏振方向与波片 y 轴的夹角定义为 α , α 亦为波片的取向角。透过波片的太赫兹波由 $\langle 110 \rangle$ 取向的电光探测晶体 ZnTe 进行水平方向的探测, 采集到含有波片信息的 THz 脉冲时域光谱。以 $yo z$ 面为参考入射面, 平行 x 轴和 y 轴的太赫兹波偏振分别定义成 s 偏振和 p 偏振。这样任意入射的线偏振光都可以正交分解成 s 偏振和 p 偏振, 即用这 2 种相互垂直的偏振态来表示太赫兹波的偏振态。

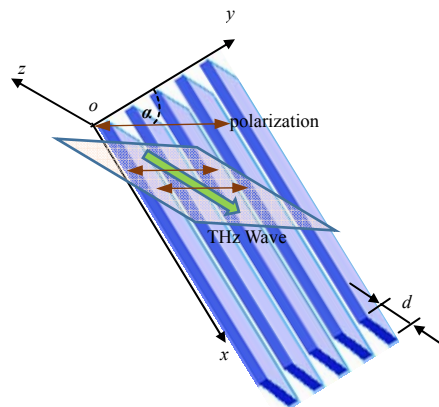


Fig.4 Performance test schematic diagram of the paper wave plate

图 4 纸波片性能测试实验示意图

2.2 纸波片的折射率和吸收系数

用 THz 波以入射偏振方向沿 x 轴方向($\alpha=90^\circ$, s 偏振)和 y 轴方向($\alpha=0^\circ$, p 偏振)照射波片, 获取太赫兹波透射谱, 根据实验数据, 对这 2 个偏振态的折射率和吸收系数进行计算和分析。其折射率和吸收系数分别如图 5、图 6 所示。可以发现 s 偏振和 p 偏振的折射率和吸收系数都随 THz 频率的增加而增大, 其中 s 偏振相对于 p 偏振有着更高的折射率和吸收系数。文中制作的纸波片之所以能够成为一个波片是因为 x 轴和 y 轴两个相互垂直方向线偏振光在波片内的折射率不同。

由图 5 看到, s 偏振和 p 偏振的折射率两者变化的幅度基本一样, 可以计算出两个相互垂直的偏振态间折射率的差值, 即纸波片的双折射率, 结果如图 7 所示。可以发现, 在 0.2 THz~0.4 THz 频率范围内波片的双折射率基本不变, 为 0.115 7 左右。这个值由空气和纸的填充情况决定, 与波片厚度 d 无关。

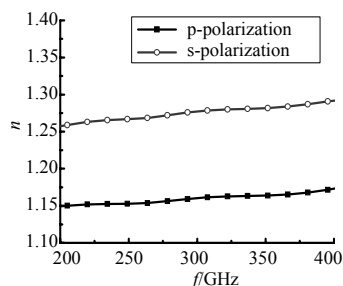


Fig.5 s-polarization and p-polarization refractive index of the paper wave plate
图 5 纸波片 s 偏振和 p 偏振的折射率

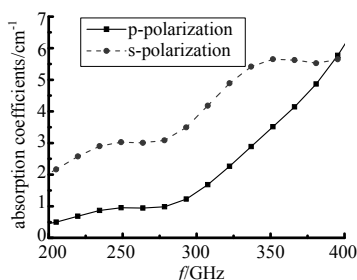


Fig.6 s-polarization and p-polarization absorption coefficients of the paper wave plate
图 6 纸波片 s 偏振和 p 偏振的吸收系数

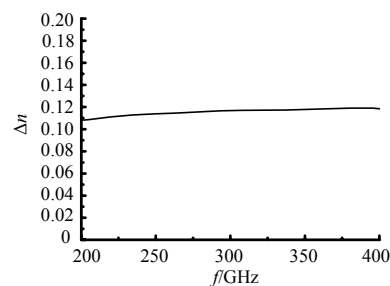


Fig.7 Birefringence of the paper wave plate
图 7 纸波片的双折射率

对于文中设计的纸波片, 根据图 7 知: 当 $f = 305.5$ GHz 时, $\Delta n = 0.11697$ 。对于一个半波片, 根据式(1), 可以推出半波片的设计频率应满足:

$$f = \frac{c}{2d\Delta n} \quad (2)$$

因为本研究工作波片的厚度 $d=4.2$ mm, 根据 $\Delta n=0.11697$, 可算出设计频率 $f=305.33$ GHz。可以发现此设计频率的值与实际照射的频率 305.5 GHz 基本相符, 可以说明这个纸波片在 305.5 GHz 处应是一个良好的半波片。

2.3 纸波片的频谱

首先不加波片对空气进行了参考测试。在同样的环境下, 通过改变 THz 波以不同照射偏振方向角度 α 从 0° 到 180° 再对纸波片进行了不同偏振方向的测试。然后对测量的时域谱进行傅里叶变换得到相应的频谱, 如图 8 所示。可以看出 THz 波以不同偏振方向照射波片探测的电场振幅在 240 GHz~330 GHz 左右都比较高, 尤其在 282.5 GHz 左右。 0° 、 90° 和 180° 左右探测的电场振幅比其他角度的都要高, 而 55° 和 130° 左右探测的电场振幅相对于其他角度的要低很多。

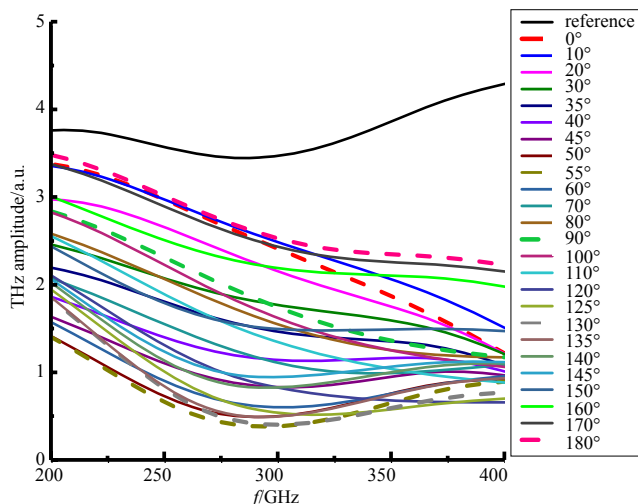


Fig.8 THz transmission spectra of the paper wave plate in different THz polarizations
图 8 THz 波以不同偏振方向照射纸波片的透射频谱

2.4 纸波片的消光比

消光比是评价波片性能的主要参数。消光比定义为检偏器相对于被测偏振器转动时的最小透射光强与最大透射光强之比^[8]。针对于本研究工作, THz 波照射波片的最大透射光强是在 $\alpha=180^\circ$ 发生的, 最小透过光强是在 $\alpha=55^\circ$ 发生的。因此可以算出纸波片的消光比, 结果如图 9 所示。可以发现纸波片对于照射频率为 200 GHz~400 GHz 太赫兹波的消光比在 -44.91 dB 至 -15 dB 之间。在频率 282.5 GHz 时, 波片的消光比最小, 为 -44.91 dB。说明纸波片在 282.5 GHz 频率时是一个良好的半波片。

若只是考虑纸波片对于入射太赫兹波偏振方向的旋转情况, 可以发现波片对于 240.01 GHz 至 330.95 GHz 频率的太赫兹波的偏振方向具有不错的旋转性能, 消光比在 -44.91 dB 至 -32.90 dB 之间。一般晶体偏振器的消光比为 10^{-4} ~ 10^{-5} 即 -40 dB~-50 dB, 说明纸波片在 240.01 GHz 至 330.95 GHz 频率内性能不错情况。

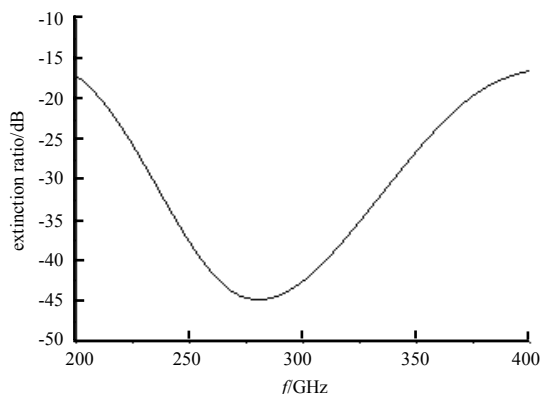


Fig.9 Extinction ratio of the paper wave plate
图 9 纸波片的消光比

2.5 纸波片对太赫兹波偏振方向的改变

为了更好地说明纸波片的性质,下面讨论波片对不同偏振角度入射线偏振太赫兹波偏振方向的改变情况。

2.5.1 参数 C 引入

通过之前诸多光学参数的测定,发现太赫兹波沿 y 轴偏振方向入射可以探测到最强的太赫兹信号,而沿其他偏振方向入射探测的太赫兹波较弱,这种差异是由于纸波片对不同偏振角度入射线偏振太赫兹波偏振方向的改变程度不同所造成的。为了更好地说明这点,引入参数 C 来描述纸波片的这种性质。参数 C 定义为:

$$C(f, \alpha) = E_{\alpha}(f) / E_y(f) \quad (3)$$

式中: $E_{\alpha}(f)$ 是不同偏振方向太赫兹波照射波片探测到太赫兹波的电场,角度 α 定义在图 4 中; $E_y(f)$ 是沿 y 轴偏振方向(p 偏振)太赫兹波照射波片探测到太赫兹波的电场。根据参数 C 的定义,计算得到太赫兹波以不同偏振方向照射波片对应的参数 C ,如图 10 所示。下面对波片的参数 C 分为频率特性和角度特性两方面进行详细分析。

2.5.2 参数 C 的频率特性

从图 10 可以看出,沿所有偏振方向照射 THz 波的参数 C 在 240 GHz~330 GHz 都比较低,尤其在 282.5 GHz 左右,这一规律与透射率、频谱、消光比的规律吻合。证明纸波片参数 C 的频率特性:针对太赫兹波产生和探测的偏振方向都是水平方向的系统,说明波片对 240 GHz~330 GHz 频率范围尤其是 282.5 GHz 的太赫兹波偏振方向有较好地旋转。282.5 GHz 为波片旋转偏振方向最佳的工作频率,与起初半波片的设计频率 305.33 GHz 相差不多。

2 个值的不同主要由三点原因造成:其一,波片是由纸和空气间隔堆积组成的,实际的制作过程中不能保证工艺十分完美,纸和空气间隔不能保证一直均匀不变,因此制作出来的波片并不是完全均匀的,这就使得 s 偏振和 p 偏振计算出来的两个方向的折射率不是在整个区域恒定不变的值,而是一个平均值,因此由理论算出的半波片设计频率与实际最佳工作频率不同;其二,可以看出当在 55°和 130°左右,角度稍有改变,参数 C 就有明显变化,实际最佳工作频率也更向设计频率 305.33 GHz 趋近。因为角度 α 的改变不是十分精细(5°),可能造成了更好照射偏振方向数据的缺失,故而更佳的工作频率也很可能是高于 282.5 GHz,与半波片设计频率 305.33 GHz 十分接近;其三,本研究工作的小型 THz-TDS 系统的频谱分辨率为 40 GHz,因此由理论算出的半波片设计频率与实际最佳工作频率二者不同,可能是由于系统的频谱分辨率所致。

2.5.3 参数 C 的角度特性

由图 10 可以看出,0°,90°和 180°左右的参数 C 比其他角度的参数 C 都要高,而 55°和 130°左右的参数 C 相对于其他角度的要低很多,这一规律与透射率和频谱的规律吻合。

为了更好地说明期望制作的纸半波片参数 C 的性质,选择在最佳工作频率 282.5 GHz 下,研究 THz 波以不同偏振方向照射下参数 C 的角度特性,结果如图 11 所示。图中由拟合的曲线明显地反映出,在 282.5 GHz 下 0°,90°和 180°的参数 C 比较高,180°的最高,53°和 131°的参数 C 比较低,大约为-22.3 dB。

282.5 GHz 频率下角度 α 从 0 到 180°的参数 C 曲线基本以 90°为轴呈现对称状态,说明用与 x 轴相同角度夹角照射波片上下部分产生的偏振效果情况一样,进而证明纸波片是单轴晶体,光轴是沿 x 轴方向或 y 轴方向中的某一个。进一步由纸波片的对称性可推断出 y 轴方向是该纸波片的光轴方向。

实验中只是旋转波片,由于实验系统的太赫兹波产生和探测的偏振方向都是水平方向,水平偏振方向入射的太赫兹波经过波片后偏振发生变化,系统所探测到的太赫兹信号会减小。对于半波片,当波片取向角 α 为 45°和 135°时,太赫兹波的偏振方向由水平方向

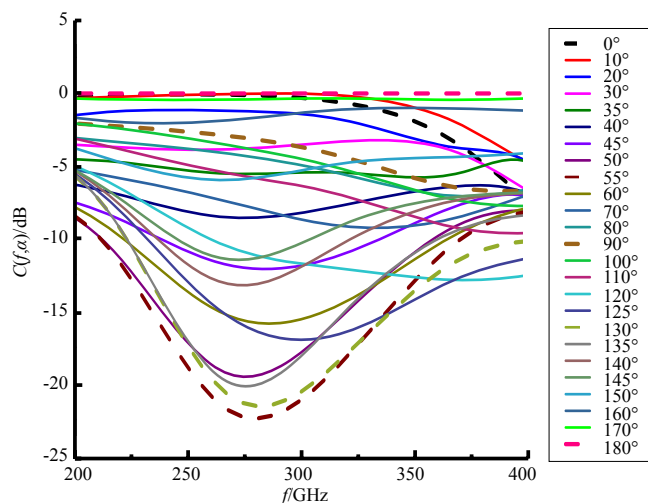


Fig.10 Parameter C of the paper wave plate in different THz polarizations
图 10 THz 波以不同偏振方向照射纸波片时的参数 C

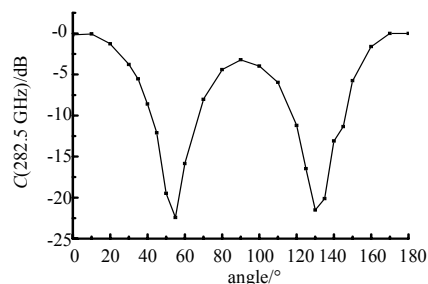


Fig.11 Parameter C of the paper wave plate at 282.5 GHz in different THz polarizations
图 11 282.5 GHz 频率的 THz 波以不同偏振方向照射纸波片的参数 C

旋转为竖直方向,系统将探测不到太赫兹信号。图 11 的实验结果表明, $\alpha=53^\circ$ 和 131° 时测量到的太赫兹信号最小,这个结果与上述理论分析基本一致。进而说明,纸波片在 282.5 GHz 频率时具有半波片的性质,是一个良好的半波片。

如上所述,对于光轴方向是 y 轴的半波片,当入射波偏振方向与光轴夹角成 45° 或 135° 时,可将其偏振方向旋转为原来的垂直方向。而实验的结果是 $\alpha=53^\circ$ 和 131° 时,纸波片可将偏振方向旋转 90° 。这一角度不同的原因是因为波片在 x 轴方向(s 偏振)的吸收系数比 y 轴方向(p 偏振)的吸收系数大(图 6)所造成的。另外,波片 2 个取向角($\alpha=53^\circ$ 和 131°)的对称轴是 91.5° ,与理论值 90° 相比,稍有差别,但在测量精确度(2°)范围内一致。

3 结论

使用 80 克打印纸经过简单方法制作出来的纸太赫兹半波片的性能不错。纸波片 s 偏振的折射率和吸收系数高于 p 偏振的折射率和吸收系数,波片的双折射率在 200 GHz~400 GHz 内基本不变,为 0.115 7 左右。无论从频谱、消光比和参数 C 的频率特性都可以反映出纸波片在 240 GHz~330 GHz 内对太赫兹波的偏振方向有着较好的旋转,并且在 282.5 GHz 处效果最佳,说明纸波片在该频率是一个良好的半波片。

参考文献:

- [1] Zimadars D, White J, Stuk G, et al. Large area terahertz imaging and non-destructive evaluation application[J]. Insight Non. Test. Condition Monitor, 2006, 48(9): 537-539.
- [2] 和挺, 沈京玲. 太赫兹技术在毒品检测中的应用研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(9): 2348-2353. (HE Ting, SHEN Jing-ling. Applications of terahertz spectroscopy in illicit drugs detection[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(9): 2348-2353.)
- [3] CAI He, WANG Dong, SHEN Jing-ling. Study on terahertz spectra of SO_2 and H_2S [J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2013, 56(4): 685-690.
- [4] McIntosh A I, YANG B, Goldup S M, et al. Terahertz spectroscopy: a powerful new tool for the chemical sciences[J]. Chemical Society Reviews, 2012, 41(6): 2072-2082.
- [5] Doradla P, Alavi K, Joseph C, et al. Detection of colon cancer by continuous-wave terahertz polarization imaging technique[J]. Journal of Biomedical Optics, 2013, 18(9): 090504-090504.
- [6] Jepsen P Uhd, David G Cooke, Martin Koch. Terahertz spectroscopy and imaging—modern techniques and applications[J]. Laser & Photonics Reviews, 2011, 5(1): 124-166.
- [7] Scherger B, Scheller M, Vieweg N, et al. Paper terahertz wave plates[J]. Optics Express, 2011, 9(25): 24884-24889.
- [8] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2006. (YU Dao-yin, TAN Heng-ying. Engineering Optics[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2006.)

作者简介:



郑 阔(1991-), 男, 北京市人, 学士, 助理工程师, 主要研究方向为太赫兹光谱和成像技术及其应用. email: zheng_luckey@163.com.

何 君(1988-), 男, 北京市人, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为太赫兹光谱和成像技术及其应用.

沈京玲(1957-), 女, 北京市人, 博士, 教授, 主要研究方向为太赫兹光谱和成像技术及其应用.