

文章编号: 1001-3806(2017)03-0396-06

太赫兹波段硅片组偏振器的设计及其应用

李健, 李萍, 周南, 闫骥, 龚侃

(天津大学 精密测试技术与仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 为了克服目前应用于太赫兹波段的偏振器件成本较高、加工难度较大、易产生法布里-珀罗效应回声等缺点, 利用平行堆叠硅片的布儒斯特效应, 设计了一种新型的适用于太赫兹波段的硅片组偏振器件。根据不同油品中手性化合物浓度不同对太赫兹波的旋光性不同的原理, 用该偏振器对97#汽油、柴油及其混合油样品的旋光性进行测量, 实现了混油检测。结果表明, 设计的偏振器消光比高于1059、透过率高于99%、适用频段为0THz~3THz; 利用硅片组偏振器对97#汽油、柴油以及两种按不同体积分数混合的油品进行旋光性的测量, 实现了对油品的定性和定量检测。该偏振器件的设计满足太赫兹波段的偏振需求。

关键词: 光学设计; 太赫兹; 偏振; 混油检测

中图分类号: TN202

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs. issn. 1001-3806. 2017. 03. 018

Design and application of silicon wafer polarizer in terahertz frequency region

LI Jian, LI Ping, ZHOU Nan, YAN Ji, GONG Kan

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: To overcome the shortcomings of polarizers currently used in terahertz frequency region, which are expensive to produce, difficult to be processed, and easy to generate Fabry-Perot echo effect, a new terahertz polarizer was presented by means of Brewster effect of a stack of silicon wafers. According to the principle that the different oil with different compounds and different concentration has the different optical activity of terahertz wave, by using the polarizer, the optical activity of 97# gasoline, diesel oil and the mixed oil samples were measured to be identified. The results show that, the extinction ratio of the designed polarizer is higher than 1059 and transmittance is higher than 99% and the polarizer can be used in 0THz~3THz frequency region. By using the silicon wafer polarizer, the optical activity of 97# gasoline, diesel oil and their mixture is measured. And the qualitative and quantitative detection of oil is realized. The design of polarizer meets the requirement of polarizer in terahertz frequency region.

Key words: optical design; terahertz; polarization; mixed oil detection

引言

太赫兹因其诸多方面优点, 在医学、通信、食品安全、军事等领域已经获得了广泛的应用^[1-4]。由于太赫兹单周期脉冲的固有带宽较宽, 目前对于太赫兹的研究多停留在对太赫兹波的直接操作应用, 而对于太赫兹偏振处理及偏振光的应用还较少^[5]。

目前应用于太赫兹波段的偏振片主要有液晶偏振片和金属线栅型偏振片。其中, 液晶偏振片能取得较

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61374219); 天津市应用基础与前沿技术研究计划(重点项目)资助项目(14JCZDJC32300); 教育部博士点基金资助项目(20130032130001)

作者简介: 李健(1973-), 男, 博士, 教授, 现主要从事检测技术及仪器的研究。

E-mail: tjujipe@tju.edu.cn

收稿日期: 2016-04-12; 收到修改稿日期: 2016-05-06

好偏振效果的范围为0.2THz~1THz, 且消光系数很高, 但其缺点是液晶层和衬底很难压紧封装^[6]。线栅型偏振片目前已经有了较为广泛的应用, 并且已经商业化生产^[7]。但高质量的线栅偏振片制作工艺困难, 其结构易引起光波损耗, 尤其在更高频率的太赫兹波段; 且线栅偏振片的制作成本非常昂贵, 在使用中也极易受到损坏, 进一步增加了其使用成本。此外, 多数设计良好的偏振器件都会在表面产生Fabry-Perot效应回声, 从而影响太赫兹脉冲波形和时域的成像^[8]。而在太赫兹波段, 平行板波导的布儒斯特效应具有克服以上器件不足的潜力^[9]。AWASTHI等人采用极薄硅片堆叠的方式制作出太赫兹频段的偏振器, 入射角变化范围达到16°, 消光比在 $5.322 \times 10^2 \sim 8.457 \times 10^6$ 之间, 但其采用11层极薄硅片堆叠制成立方体形的偏振器件, 入射角度为64°~80°, 导致偏振器加工较为困难, 且适用的频段很窄, 仅为0.10THz~0.15THz^[10]。

在混油检测方面,目前有密度测定、超声波测定、电容检测等方法,但存在测量精度不高、相近油品难以区分、安全性差等缺点。与之相比,光学测定方法灵敏度高、实验安全性好,太赫兹技术的飞速发展为混油检测提供了新的方法。以往使用太赫兹进行油品检测大多对吸收系数、折射率等指标进行测定,本文中对旋光度这一新的指标进行了初步测定。旋光度是用于测量样品物质浓度、含量等的重要指标,被广泛应用于药检、食品、化工、石油等工业生产方面,因此对油品旋光性的测量具有一定的实用意义。本文中采用硅片堆叠组成平行板结构,利用光线以布儒斯特角入射时产生全偏振现象(即布儒斯特效应)的原理设计而成太赫兹波段的偏振器件^[11],制作工艺简单、成本低于线栅的1/10,从原理上避免了Fabry-Perot效应,且克服了相似原理的偏振器件适用频带窄的缺点。利用设计的偏振器测量偏振器不同旋转角度下太赫兹p偏振光透射油品后的时域峰值,做出时域脉冲峰值随偏振器旋转角度变化的曲线,并对曲线进行正弦拟合,获得不同油品正弦曲线的相位偏移,根据相位偏移的变化规律对油品进行定性、定量检测,该检测方法在以往研究中鲜见报道。

1 硅片组偏振器的设计

本文中设计的太赫兹波偏振器件拟采用堆叠玻片在布儒斯特角的全偏振原理设计,为实现良好的偏振效果,玻片的类型、玻片数量以及几何结构的设计将成为研究的重点。

1.1 偏振器设计理论

由于光以布儒斯特角入射玻片时产生全偏振现象,将若干玻片叠合,透射光中s波随反射次数增加而减少,可得到偏振程度很高的p波透射光^[12]。

光波以入射角 θ_1 入射到空气与玻片的分界面上时,对于入射光波的两个相互垂直的分量s波和p波,其反射波和透射波的振幅关系可由菲涅耳公式表示^[12]。 $t_{12}(\theta_1, \theta_2)$, $r_{12}(\theta_1, \theta_2)$ 分别表示菲涅耳透射系数和菲涅耳反射系数,其中 θ_2 为折射角,则由光透射

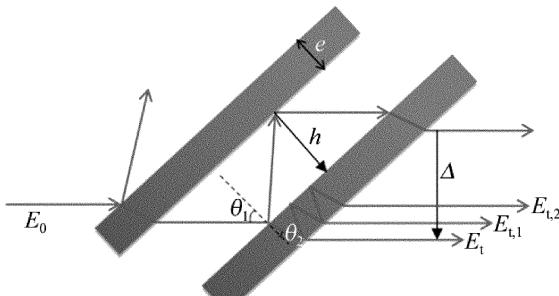


Fig. 1 Schematic diagram of light transmission parallel plates

平行玻片时的光路图(如图1所示)可知,对于初始信号为 E_0 的太赫兹p光、s光,经过单片玻片透射后信号为 E_t ,则透射信号 E_t 和初始信号 E_0 的关系为:

$$E_t = E_0 t_{12}(\theta_1, \theta_2) t_{21}(\theta_2, \theta_1) \quad (1)$$

在玻片内经过 $2m$ 次反射后透射信号为第 m 个反射回波 $E_{t,m}$,其与初始信号 E_0 满足关系:

$$E_{t,m} = E_0 t_{12}(\theta_1, \theta_2) r_{12}^{2m}(\theta_1, \theta_2) t_{21}(\theta_2, \theta_1) \quad (2)$$

消光比是评判偏振片的重要标准,当光波以布儒斯特角入射玻片时,玻片的消光比 R_{ext} 可定义为:

$$R_{ext} = 10 \lg \frac{E_{t,p}}{E_{t,s}} = 10 \lg \frac{t_{12,p}(\theta_1, \theta_2) t_{21,p}(\theta_2, \theta_1)}{t_{12,s}(\theta_1, \theta_2) t_{21,s}(\theta_2, \theta_1)} \quad (3)$$

式中,下标p和s分别表示太赫兹波p偏振分量和s偏振分量相对应的物理量。

因单玻片的消光比较低,可将多片硅片堆叠起来,以加强消光比。光波透射 k 片平行玻片的消光比为:

$$R_{ext,k} = 10 \lg \left[\frac{t_{12,p}(\theta_1, \theta_2) t_{21,p}(\theta_2, \theta_1)}{t_{12,s}(\theta_1, \theta_2) t_{21,s}(\theta_2, \theta_1)} \right]^k = kR_{ext} \quad (4)$$

由(4)式可知,为使堆叠玻片振幅消光比达到20dB即强度消光比达到40dB(消光比大于 10^4),玻片数量 k 与玻片折射率呈负相关。常用太赫兹波段材料有高密度聚乙烯、聚四氟乙烯、硅片等。高密度聚乙烯、聚四氟乙烯等材料折射率均在1.5左右^[13],代入(4)式可知,达到目标消光比所需的片数超过20片,不仅会使偏振器件非常庞大,而且对太赫兹波也有较强的吸收和损耗。高阻硅的折射率在太赫兹频段基本恒定为3.41^[14],计算可知达到所需消光比仅需4片硅片。电阻率为 $10\text{k}\Omega$ 的硅片对太赫兹的最大吸收系数为 0.01cm^{-1} ^[15-16],采用厚度为 $500\mu\text{m}$ 、电阻率大于 $10\text{k}\Omega$ 的工业标准硅片,对太赫兹波的吸收几乎为零,对偏振器的消光比没有影响。因此,本文中设计的偏振器件采用4片电阻率大于 $10\text{k}\Omega$ 的堆叠硅片。

此外,由图1中的光路几何关系计算可得,光线直接透射一片玻片后产生的时延为:

$$\Delta t = \frac{e}{c \cos \theta_2} [n - \cos(\theta_1 - \theta_2)] \quad (5)$$

式中, e 为玻片厚度(如图1所示), c 为光在真空中的传播速度。

相邻的两个反射回波之间的时延为:

$$\Delta t' = \frac{2e}{c} \left(\frac{n}{\cos \theta_2} - \tan \theta_2 \sin \theta_1 \right) \quad (6)$$

光因两片玻片间反射引起的偏移量 Δ (如图1所示)为:

$$\Delta = e \frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\cos \theta_2} \quad (7)$$

经计算,当两片硅片间距为 4mm 时,相距最近的两玻片间反射引起的偏移量 $\Delta = 7.69\text{mm}$,即使有少量光经反射产生回波,其大部分能量也在出射通光孔径之外,进一步减少了杂波的影响。

1.2 偏振器的整体结构设计

经上述理论分析,硅片组偏振器设计如图 2 所示。先将 4 片硅片固定在方形框架上,使方形框架平行堆叠固定,并保证两硅片间距离为 4mm。之后将硅片组固定于底座的楔形支架上,该楔形平面与平行面间夹角为 16° 从而确保太赫兹波以布儒斯特角 $\theta_B = 74^\circ$ 入射,其中楔形支架以光轴为中心轴可进行 360° 旋转。

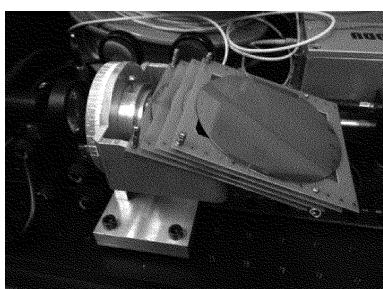


Fig. 2 Device diagram of silicon wafer polarizer

2 硅片组偏振器的测试实验及其在混油检测中的应用

2.1 实验系统

实验中采用 MenloSystems 公司太赫兹时域光谱 (terahertz time domain spectroscopy, THz-TDS) 系统 Tera K15,其光学装置部分如图 3 所示。T-Light 飞秒光纤激光器发射飞秒脉冲,光路中的分束棱镜将此脉冲分为两束:其中一束为激发脉冲,用来产生 THz 辐射;另一束为探测脉冲,用来探测 THz 脉冲波形。图中 Tx 为发射探头, Rx 为接收探头。光路部分采用 4 倍焦距两镜组结构,两透镜之间为平行光路,P 为硅片组偏振器(单片硅片实验中为硅片)。检测油品时,将盛有样品油的比色皿固定于 S 所示的位置,进行偏振透射检测。

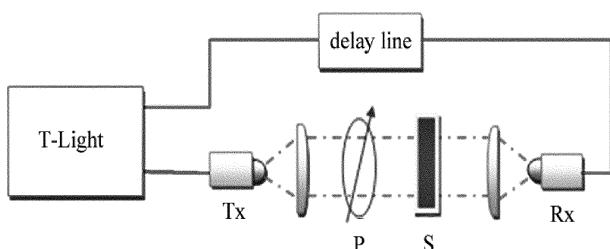


Fig. 3 Schematic diagram of experimental system

2.2 样品准备

混油检测实验中选用壳牌 97#汽油、柴油及其混合油品作为待测样品,其中混合油品中汽油所占体积分数分别为 0.25, 0.50 和 0.75。为了克服系统的不稳定性,每组测量都要对参考信号和样品信号进行测量。将样品盛于内壁厚度 10mm 的比色皿中,透过盛有油品比色皿的太赫兹波信号作为样品信号,透过相同型号和材质的空比色皿的太赫兹波信号作为参考信号。

因为汽油室温下易挥发,装有样品的比色皿上配置了相应的盖子。

2.3 实验及结果分析

2.3.1 单片硅片实验 实验中采用工业标准的圆形硅片,直径 $D = 100\text{mm}$,厚度 $e = 500\mu\text{m} \pm 15\mu\text{m}$,硅片折射率 $n = 3.41$,因此布儒斯特角 $\theta_B = 73.6^\circ$ 。

(1) 当太赫兹波垂直入射时,即入射角 $\theta_1 = 0^\circ$,太赫兹波的时域信号如图 4a 所示。其中原始信号峰值 $E_0 = 4.50$,直接透射后信号测量值为 $E_t = 3.27$,时延 $\Delta t = 3.6\text{ps}$;第 1 个反射回波信号测量值为 $E_{t,1} = 0.92$,时延 $\Delta t' = 14.8\text{ps}$ 。由(1)式、(2)式、(5)式、(6)式的计算所得理论值分别为 $E_t = 3.15$, $\Delta t = 4\text{ps}$; $E_{t,1} = 0.945$,时延 $\Delta t' = 15.4\text{ps}$ 。由数据可知,实验结果与理论计算值吻合较好。

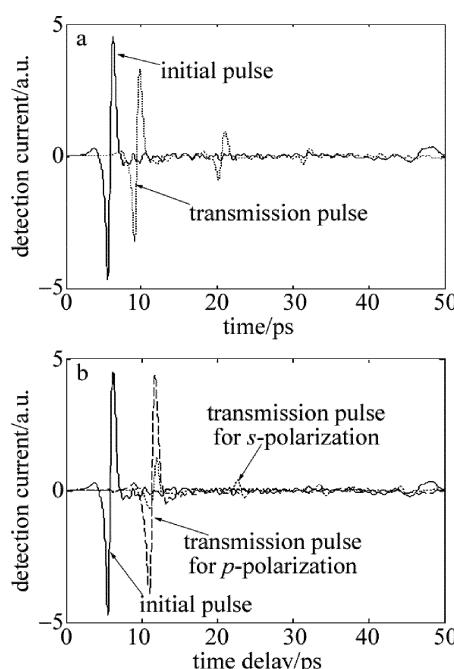


Fig. 4 Terahertz time domain waveforms of transmission signal
a—terahertz time domain waveforms of p -polarization component of transmitting through silicon wafer vertically b—terahertz time domain waveforms of p - and s -polarization components of transmitting through silicon wafer with incidence angle of 74°

(2) 当太赫兹波以布儒斯特角 $\theta_B = 74^\circ$ 入射时, p 偏振光和 s 偏振光的探测信号实验结果如图 4b 所示。其中原始信号峰值 $E_0 = 4.5$, 经过玻片后 p 偏振光信号为 $E_{t,p} = 4.4$, s 偏振光信号为 $E_{t,s} = 1.23$ 。由信号透射率与(1)式的理论计算结果为 $E_0 = 4.5$, $E_{t,s} = 1.35$, 这与实际测量值较为吻合。

2.3.2 多硅片堆叠实验 假设太赫兹 TDS 系统发射的为理想线偏振 THz 波, 使其透射理想线偏振片, 将该偏振片绕光轴旋转 α 角, 则相互垂直偏振放置的探测器 $R_{//}$ 和 R_{\perp} 两个接收方向上探测到两个相互垂直的透射分量 $E_{//}$ 和 E_{\perp} , 如图 5 所示。

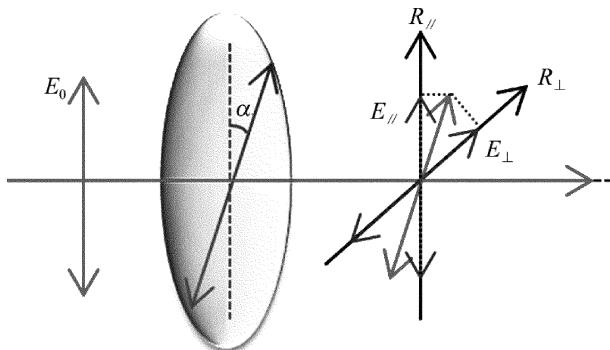


Fig. 5 Schematic diagram of linearly polarized THz wave of transmitting through perfect polarizer

根据图中几何关系可得:

$$\begin{cases} E_{//} = E_0 \cos \alpha \cos \alpha = \frac{E_0}{2} [1 + \cos(2\alpha)] \\ E_{\perp} = E_0 \cos \alpha \sin \alpha = \frac{E_0}{2} \sin(2\alpha) \end{cases} \quad (8)$$

将硅片组偏振器件固定于太赫兹系统光路中, 使太赫兹波以布儒斯特角入射, 将楔形支架以光轴为中心轴进行旋转, 每转 5° 进行一次脉冲接收扫描, 得到透射脉冲波形, 将初始位置设为 0° , 共旋转 180° , 得到 37 组数据。

当太赫兹波入射角度为布儒斯特角时, p 光时域信号如图 6a 所示。由图可看出, 初始信号经过偏振器件后有一定的时间延迟, 但透射率非常高, 可达到 99% 以上。图 6b 为仪器初始信号的频域图; 图 6c 为太赫兹波透射偏振器后的频域图。由图可知, 仪器的有效频段和太赫兹波透射偏振器后的有效频段均为 $0\text{THz} \sim 3\text{THz}$, 因此本文中设计的偏振器在 $0\text{THz} \sim 3\text{THz}$ 范围内均能取得较好的偏振效果。

由(8)式可知, 太赫兹波透射理想偏振器后的 p 光、 s 光时域波形的峰值随偏振器旋转角度的变化为周期为 π 的正弦曲线, 且有 $\pi/2$ 的相位差, 其幅值归一化后的曲线如图 7(无量纲)所示。其中实线分别表示 p 光、 s 光经过理想偏振器后时域脉冲幅值的理论计算值 T_p , T_s 随偏振器旋转角度的变化曲线; 点表示 p

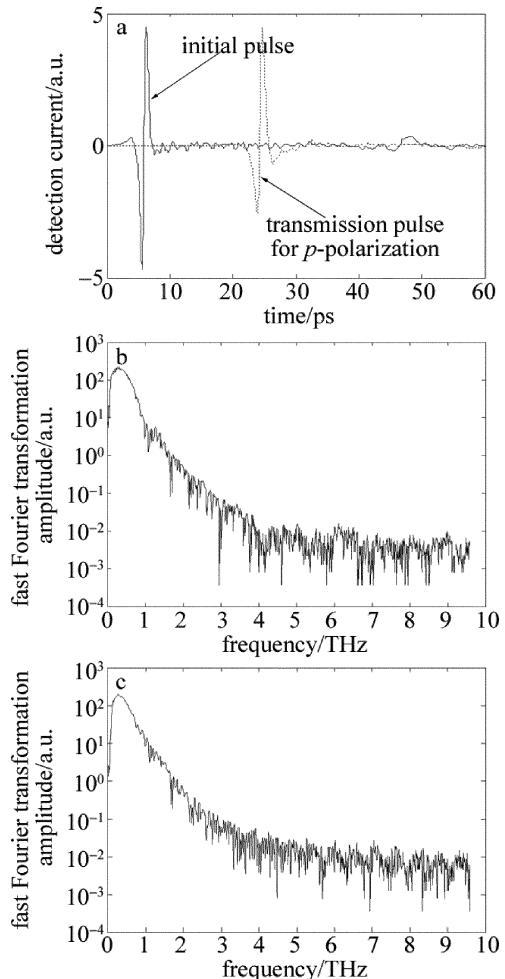


Fig. 6 Terahertz time domain waveforms and frequency domain waveforms of p -polarization component of transmitting through 4 silicon wafers with incidence angle of 74°

a—time domain waveforms of initial signal and transmission signal
b—frequency domain waveform of initial signal c—frequency domain waveform of transmission signal

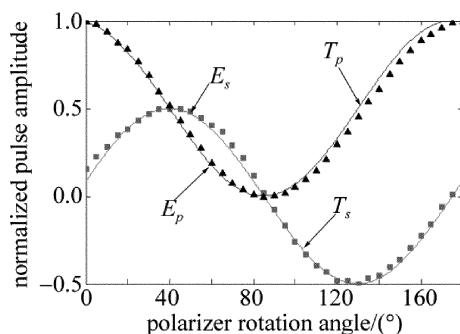


Fig. 7 Relationship between time domain pulse amplitude and polarizer rotation angle

光、 s 光经过设计的硅片组偏振器后时域脉冲幅值的实验结果 E_p , E_s 随偏振器旋转角度的变化曲线。由该图可看出, 硅片组偏振器件的偏振效果与理想偏振器的理论偏振效果一致。将图中实验数据代入(4)式可计算得知, 设计的偏振器件消光比大于 1059。

2.3.3 硅片组偏振器在混油检测中的应用 线偏振

光透射含有旋光性化合物的液体或溶液时,会引起旋光现象,使偏振光的振动方向旋转一定的角度 θ :

$$\theta = \beta C d \quad (9)$$

式中, β 为旋光率,与被测物质的性质和入射光波长有关; C 为旋光物质浓度; d 为光通过液体或溶液的长度。当波长和长度一定时,旋光角度 θ 和浓度成正比。汽油和柴油中旋光物质浓度不同,对偏振太赫兹波的旋光角度不同,当两种油品以一定比例不同体积分数混合时,混合油品中旋光物质的浓度相应发生变化,因此旋光角随混合油品比例变化呈规律变化。

将样品池放置于光路中,如图 1 实验装置图所示的位置,使太赫兹 p 偏振波透射样品。旋转偏振器,每旋转 5° 进行一次脉冲扫描获得时域波形,并记录该旋转角度下的时域脉冲幅值,做出透射样品的脉冲幅值随偏振器旋转角度变化的曲线。按照此步骤对参考信号以及各种样品信号进行测量和处理,之后对数据进一步正弦拟合,获得不同样品的透射脉冲幅值随偏振器旋转角度变化的正弦曲线,准确读出其相位 φ 。图 8 为柴油、97#汽油的实测结果和正弦拟合结果的幅值归一化图线(无量纲),其中圆点和小三角形为实际测量值,实线和虚线为拟合后的正弦曲线。将待测油品的相位测量值 φ_s 与空比色皿测得的参考相位 φ_r 作差即获得样品的相位偏移量 $\Delta\varphi = \varphi_s - \varphi_r$ 。该相位偏移即反映了不同样品的旋光度的变化。对样品进行脉冲扫描时采用快速扫描模式,其有效使用频段为 0THz ~ 1THz。

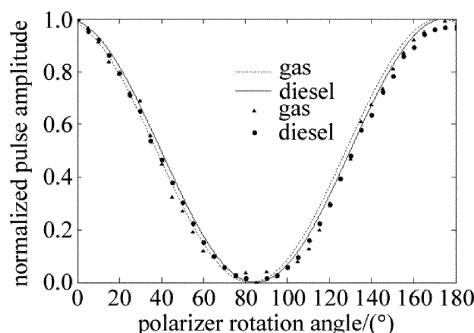


Fig. 8 The measurement results and the fitting sine curves of diesel and 97# gasoline

每次测量所得的正弦曲线是由 37 组数据拟合而成,因此减少了由于仪器不稳定及环境变化引起的误差。测量结果的幅值归一化图线如图 9a 所示(无量纲)。将图中部分 1 放大如图 9b 所示(无量纲)。可清晰看出相位的偏移规律,即汽油含量越高,偏移量也越大。每种样品正弦曲线的绝对相位可由拟合参数准确读出,从而可得到每种样品的相移。图 9c 显示了不同样品的相移变化趋势,图中横坐标表示汽油在混油样品中的含量体积分数。

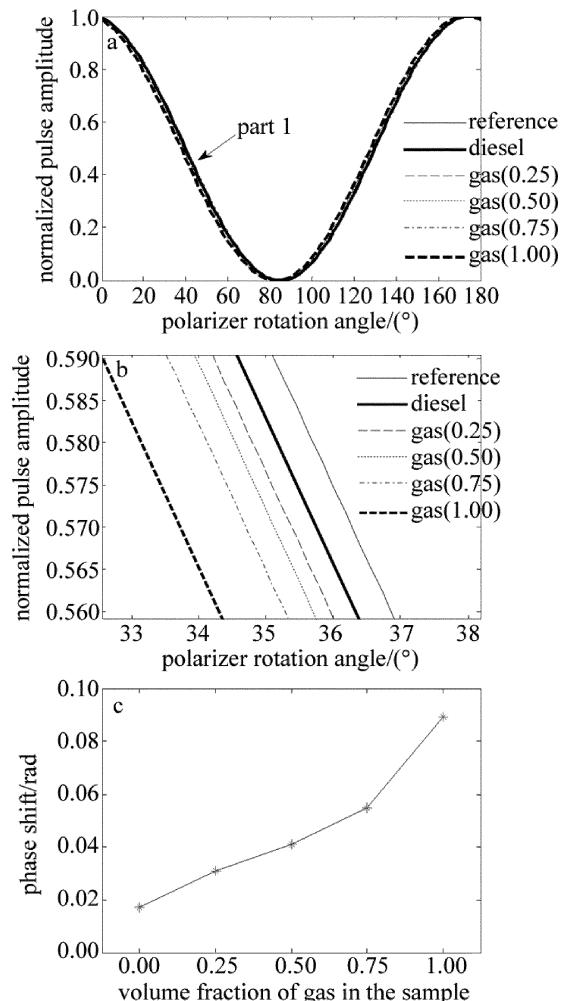


Fig. 9 Experimental measurement results of various samples
a—time domain pulse amplitude of sample signals and reference signal versus polarizer rotation angle b—zoom out of part 1 c—trend of phase shift of various samples

由图 9 可看出,柴油引起的相位偏移较小,汽油引起的偏移较大,随着汽油含量的增加,混油样品引起的相移逐渐增大。因此,可以通过测量相移定性及一定程度定量检测油品的种类。

表 1 中给出了 3 次测量数据及其标准差,由以下数据可知,该测量具有较强的可重复性和稳定性。

Table 1 Standard deviations of three groups of phase shift in the experiment

name of sample	phase shift			
	group 1	group 2	group 3	standard deviation
diesel	0.017	0.018	0.015	0.002
gas(0.25)	0.031	0.031	0.030	0.001
gas(0.50)	0.041	0.042	0.039	0.002
gas(0.75)	0.055	0.055	0.047	0.005
gas(1.00)	0.089	0.089	0.091	0.001

3 结 论

利用太赫兹波透射平行堆叠硅片时产生的布儒斯特效应,设计了一种新型的透射式太赫兹波段偏振器

件,取得了良好的偏振效果。该偏振器消光比至少可达1059,实验透射率大于99%,实际测量值与理想偏振器的理论值吻合。在0THz~3THz的较宽太赫兹频率范围内均能取得较好的偏振效果。通过拟合太赫兹p偏振光透射油品后的脉冲时域幅值随偏振器旋转角度的变化曲线,获得不同混油样品的正弦曲线及其相位偏移,根据相位偏移的变化规律定性、定量检测油品。本文中提供了一种利用太赫兹偏振特性识别和检测油品的新方法,为油品识别、太赫兹的研究和应用提供了新的思路。

参 考 文 献

- [1] OSTROVSKIY N V, NIKITUK C M, KIRICHUK V F, *et al*. Application of the terahertz waves in therapy of burn wounds [C]// The Joint International Conference on Infrared and Millimeter Waves and International Conference on Terahertz Electronics, 2005. New, York, USA: IEEE, 2005:301-302.
- [2] TUOVINEN J. Method for testing reflector antennas at THz frequencies [J]. IEEE Antennas & Propagation Magazine, 1994, 35(6):7-13.
- [3] MARKELZ A G, ROITBERG A, HEILWEIL E J. Pulsed terahertz spectroscopy of DNA, bovine serum albumin and collagen between 0.1 and 2.0THz [J]. Chemical Physics Letters, 2000, 320(1/2):42-48.
- [4] COOPER K B, DENGLER R J, LLOMBART N, *et al*. THz imaging radar for standoff personnel screening [J]. IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology, 2011, 1(1):169-182.
- [5] MITTELMAN D. Sensing with terahertz radiation [M]. Springer, Germany: Berlin Heidelberg, 2003:301-340.
- [6] HSIEH C F, LAI Y C, PAN R P, *et al*. Polarizing terahertz waves with nematic liquid crystals [J]. Optics Letters, 2008, 33(11):1174-1176.
- [7] 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.
- [8] JEAN-BAPTISTE M, MARTIN-PIERRE S, JEAN-LOUIS M, *et al*. Ionic contrast terahertz near-field imaging of axonal water fluxes [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2006, 103(13):4808-4812.
- [9] MENDIS R, MITTELMAN D M. A 2-D artificial dielectric with for the terahertz region [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2010, 58(7):1993-1998.
- [10] AWASTHI S K, SRIVASTAVA A, MALAVIYA U, *et al*. Wide-angle, broadband plate polarizer in terahertz frequency region [J]. Solid State Communications, 2008, 146(11/12):506-509.
- [11] ANTOINE W, GUILHEM G. Brewster's angle silicon wafer terahertz linear polarizer [J]. Optics Express, 2011, 19(15):14099-14107.
- [12] YU D Y, TAN H Y. Engineering optics [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2006:271-277 (in Chinese).
- [13] FEDULOVA E V, NAZAROV M M, ANGELUTS A A, *et al*. Studying of dielectric properties of polymers in the terahertz frequency range [J]. Proceedings of the SPIE, 2011, 8337:83370I.
- [14] GRISCHKOWSKY D, KEIDING S, VAN EXTER M, *et al*. Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors [J]. Journal of the Optical Society of America, 1990, B7(10):2006-2015.
- [15] DAI J, ZHANG J, ZHANG W, *et al*. Terahertz time-domain spectroscopy characterization of the far-infrared absorption and index of refraction of high-resistivity, float-zone silicon [J]. Journal of the Optical Society of America, 2004, B21(8):1379-1386.
- [16] VAN EXTER M, GRISCHKOWSKY D. Optical and electronic properties of doped silicon from 0.1 to 2THz [J]. Applied Physics Letters, 1990, 56(17):1694-1696.