

太赫兹亚波长人工结构传感应用*

田震^{1,†} 谷建强¹ 韩家广¹ J. F. O' Hara² 张伟力^{1,2}

(1 天津大学太赫兹研究中心 天津大学精密仪器与光电子工程学院 天津 300072)

(2 俄克拉荷马州立大学电子与计算机工程系 美国俄克拉荷马州静水城 74078)

2013-10-29收到

† email: tianzhen@tju.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20131202

Sensing applications of terahertz subwavelength artificial structures

TIAN Zhen^{1,†} GU Jian-Qiang¹ HAN Jia-Guang¹ J. F. O' Hara²

ZHANG Wei-Li^{1,2}

(1 Center for Terahertz Waves, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(2 School of Electrical and Computer Engineering, Oklahoma State University, Oklahoma State Stillwater 74078, USA)

摘要 近年来,太赫兹科学技术在快速发展,它在毒品、爆炸物、有毒危险品等安全检查及反恐怖方面展现出独特的应用前景。常用的自由空间太赫兹时域光谱技术,尽管具有很多优越性和良好的应用前景,但影响其性能提高和进一步推广应用的一些实际问题仍然存在,如对光斑尺寸和样品体积、质量要求等。近年来,随着亚波长人工结构(包括超材料和表面等离子激元器件)的出现,为该问题的解决提供了新的契机。文章综述了作者在太赫兹亚波长人工结构器件传感应用所开展的一系列研究工作,其中包括薄膜材料传感、不同标号汽油传感以及同位素传感等,显著地提高了被测物质的探测灵敏度,同时降低了对被测物质的体积、质量要求,实现了高灵敏、微量物质传感,为太赫兹安全检查及反恐怖应用提供了技术借鉴。此外,文章还介绍了太赫兹亚波长人工结构传感器件未来的发展前景和面临的挑战。

关键词 太赫兹,亚波长,人工结构,传感

Abstract Recently, terahertz science and technology has developed rapidly, showing potential applications in security and anti-terrorism involving drugs, explosives, hazardous articles, and so on. Among all the techniques, free space terahertz time domain spectroscopy exhibits excellent potential, but certain critical problems need to be solved, such as terahertz spot size and sample volume. Fortunately, the appearance of subwavelength artificial structures including metamaterials and surface plasmon devices offer new possibilities. This paper reviews our research work on terahertz subwavelength artificial structures for sensing applications, including thin film, gasoline and isotope sensing. It is shown that our devices have excellent sensitivity. Finally, we discuss the prospects and challenges of this technique.

Keywords terahertz, subwavelength, artificial structures, sensing

* 国家自然科学基金(批准号: 61138001, 61028011, 61007034, 61107085, 61107053)、国家重大科学仪器设备开发专项(批准号: 2011YQ150021)资助项目

1 引言

太赫兹(terahertz, 简称 THz)是指频率在 0.1—10THz (1 THz=10¹² Hz, 或波长为 30 μm—3 mm)范围内的电磁波。它在长波段与毫米波有重叠,而在短波段,它与红外线有重叠。THz波在频域上处于宏观经典理论向微观量子理论的过渡区,处于电子学向光子学的过渡领域;THz波的光子能量很低,不会对物质产生破坏作用;频谱极宽,覆盖了各种包括凝聚态物质和生物大分子在内的转动和集体振动频率。因此,THz科学技术有很重要的学术研究价值,在国民经济和国防建设领域有着极其重要的应用前景。太赫兹已经在许多研究领域有了重要的应用^[1-4]:太赫兹光谱可用于检测爆炸物和生物毒剂等;太赫兹成像可用于安全检查、医学检测等等。图1展示了太赫兹波的广泛应用。

在众多的太赫兹技术中,太赫兹时域光谱技术(THz time-domain spectroscopy, 简称 THz—TDS)是当前太赫兹科学技术发展最为成熟、应用最为广泛的领域^[5],但对于目前常用的自由空间的THz—TDS技术而言,尽管具有很多优越性和良好的应用前景,但仍然存在着一些影响其性能提高和进一步推广应用的实际问题。例如,由于最小光斑直径较大(~2 mm),整个光斑需要覆盖被测样品才能得到较强的光谱响应,所以对探测样品的大小有一定要求,而样品的厚度受限于TDS的相位响应,所以样品的厚度不能过薄,也就是说,受限于三个维度上的尺寸,太赫兹时域光谱技术无法实现微量样品探测^[6]。最关键的问题是,现有THz—TDS系统复杂,体积大,价格昂贵。尽管自由空间的THz—TDS技术已开始走出实验室,但却是以牺牲一定的系统性能指标为代价。

但近几年出现的亚波长人工结构为太赫兹时域光谱技术测量微量样品提供了新的解决方案。本文综述了我们在太赫兹亚波长人工结构器件传感应用方面所开展的一系列研究工作,其中包括薄膜材料传感、不同标号汽油传感以及同位素传感等,显著地提高了被测物质的探测灵敏度,同时降低了对被测物质的体积和质量要求,实现了高灵敏、微量物质传感,为太赫兹安全检查及反恐应用提供了技术借鉴。最后,我们介绍了太赫兹亚波长人工结构传感器件未来的发展前景和面临的挑战。

2 亚波长人工结构

这里提到的亚波长结构主要包括超材料(metamaterials)和表面等离子体(surface plasmon, 缩写为SP)结构。

超材料是指一些具有天然材料所不具备的超常物理性质的人工复合结构或复合材料。这种材料在设计时通常是在亚波长尺度上构造出具有一定几何形状的微结构,并将这些微结构有序地组合起来。这些结构单元的尺寸一般处于亚波长的

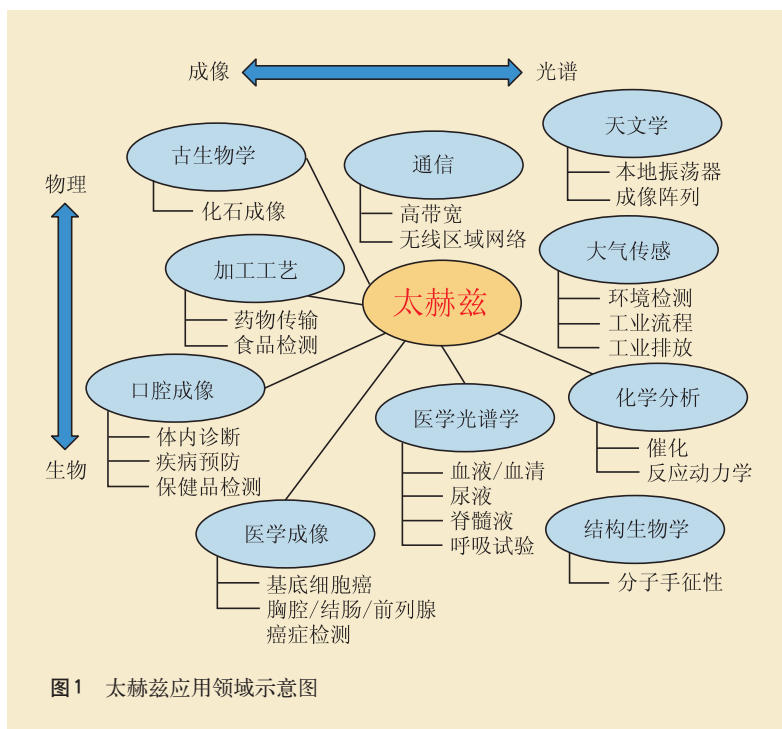


图1 太赫兹应用领域示意图

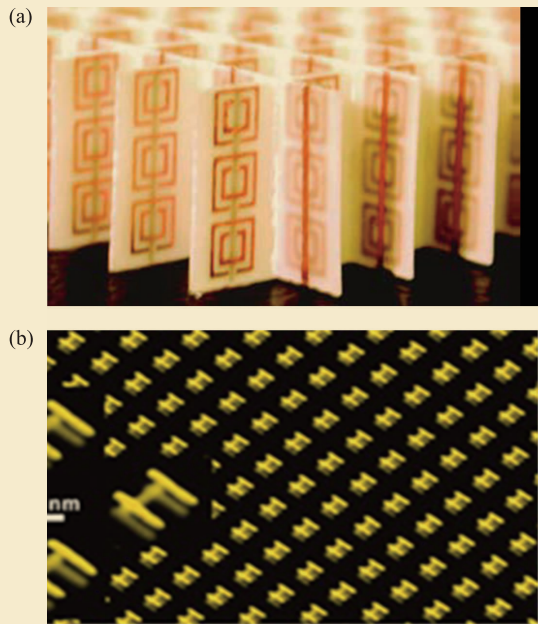


图2 两种不同构型的超材料 (a)缺口谐振环结构;(b)切割线结构

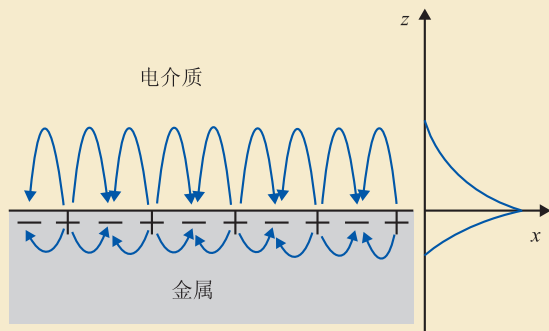


图3 表面等离子体示意图

范围,从宏观上看,它可以扮演普通光学介质中单个原子或原子团的角色,对相应波长的入射光波进行调制。如果合适地设计结构单元的几何构型,就能够按照人们的意愿,得到拥有特定光学性质的材料(见图2)。目前超材料研究已经在负折射率、电磁隐身、超透镜、吸波体、非线性光学等领域取得了多项重要进展^[7-10]。

表面等离子体结构是基于表面等离子体实现的。图3为表面等离子体示意图。当电磁波借助于金属/电介质界面的电子或电子团的集体振荡,并沿着平行金属/介质界面方向传播时,形成表面等离子体极化激元(surface plasmon polaritons, 缩写为

SPP)。通过电磁波和导体中电子的相互作用,SPP将电磁场局域在亚波长量级,从而实现了在亚波长量级电磁波操纵的可能。更通俗地讲,有关表面等离子体结构方面的知识体系已形成了一门学科,它是利用麦克斯韦方程组,将一些材料的性质和电磁波边界条件结合起来而产生的一门学科^[11]。这里面并没有新颖的理论和概念,但是它和现代材料科学以及相关工艺水平相结合,却得到了令人十分惊奇的研究成果,以致于人们已经可以在只有波长百分之一的尺度上操纵电磁波。是什么促使了这一学科如此迅猛发展并描绘出如此绚烂的画卷呢? Exeter大学的Bill Barnes教授认为,以下四个方面的因素促使了这一切的实现。第一,各种现代加工工艺的长足进步,尤其是纳米尺度器件加工能力的实现;第二,众多高灵敏度光学测试手段的进步,其波谱覆盖微波、THz、红外波段、可见光波段直至紫外波段;第三,计算机技术的快速发展已经可以使我们在个人笔记本电脑上运行强大的数值仿真软件,从而用数值结果去解释并扩展表面等离子体光学的范畴;最为关键的是第四点,表面等离子体光学巨大的应用潜力强力地推动其发展,目前SPP在波导传输、光局域增强传输和表面传感等许多领域已经取得了重要的应用^[12-14]。

3 实验方法

3.1 太赫兹时域光谱技术

超快THz脉冲的产生和探测分别采用宽带光导开关发射器和接收器。由钛宝石自锁模激光器产生的波长为800 nm、脉冲宽度为25 fs的超短激光脉冲作为激励源。飞秒光脉冲经过分束和衰减后,形成两束平均功率均为10 mW的具有特定时间延迟的光脉冲,其中一束触发GaAs光导发射器,产生太赫兹脉冲,经过硅透镜和抛物面镜系统,进行准直和聚焦。当THz脉冲在系统中传输到光导接收器时,另一束飞秒光脉冲同步触发接收器,通过信号转换放大,将THz脉冲转换为

电信号输出。通过使用 $8f$ (f 为焦距) 的光学共焦系统, 可将 THz 光束尺寸压缩到 3.5 mm, 以便测量较小尺寸的样品。图 4 是基于光电导天线的 $8f$ 共焦 THz 时域光谱测量系统的示意图。图 5(a), (b) 分别是测量的 THz 时域脉冲信号和所对应的傅里叶变换频谱信号。宽带太赫兹时域频谱系统的有效带宽为 0.1—4.5 THz (对应波长为 3 mm—67 μm), 振幅信噪比高达 1.5×10^4 : 1^[5, 15]。

在利用图 4 所示的测量系统进行透射测量时, 测试样品置于抛物面镜 M2 和 M3 之间, 即 THz 光束的束腰上。THz 波正入射穿过被测样品, 电场方向是平行于桌面的 P (平行) 偏振。被测样品的基底信号作为参考信号。通过样品和基底的电场信号分别在时域上记录下来, 然后利用傅里叶变换转为频域上的电场振幅谱 $E_s(\omega)$ 和 $E_r(\omega)$ 。由于被测样品厚度有限, 在时域上记录到的 THz 脉冲是一个多重反射的脉冲叠加。但是如果主脉冲和第一个内反射脉冲之间能够清晰地分开, 我们就可以利用主脉冲 THz 信号来分析数据。为了进一步增加测试的信噪比, 应使每次得到的时域曲线是多次扫描的平均值。被测样品的振幅透过率定义为 $|t(\omega)| = |E_s(\omega)/E_r(\omega)|$, 所对应的相位变化可通过以下关系式得到: $\phi(\omega) = \arg[t(\omega)]$ 。

3.2 样品制备

我们制备(或购置)了一系列传感样品, 包括激光打孔以及利用传统光刻和真空热蒸镀工艺加工亚波长人工结构。在传统光刻工艺中, 首先用甩胶机将助粘剂镀到基底上, 然后将光刻胶甩到助粘剂上。之后, 在烤箱中预烘烤。然后利用紫外光和接触式掩膜进行曝光, 紧接着仍在烤箱中烘烤, 之后进行显影。此时, 基底上已经存在一层有结构的光胶层。在经过最后一道烘烤工序后进行蒸镀工艺。在真空环境以及一定的蒸镀速率下,

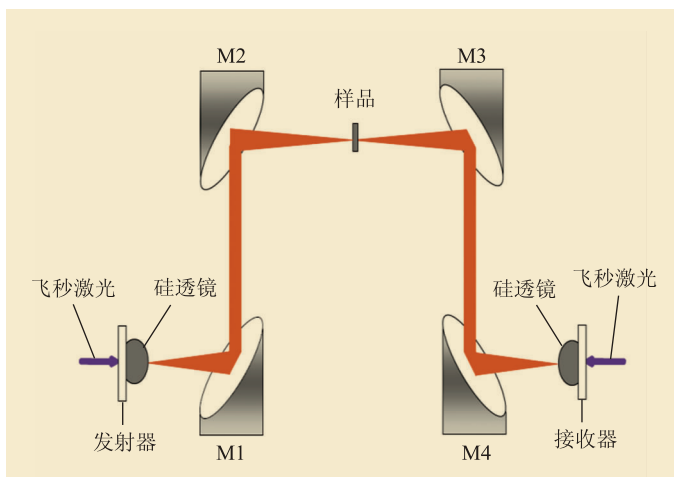


图 4 基于光电导天线的 $8f$ 共焦 THz 时域频谱测量系统

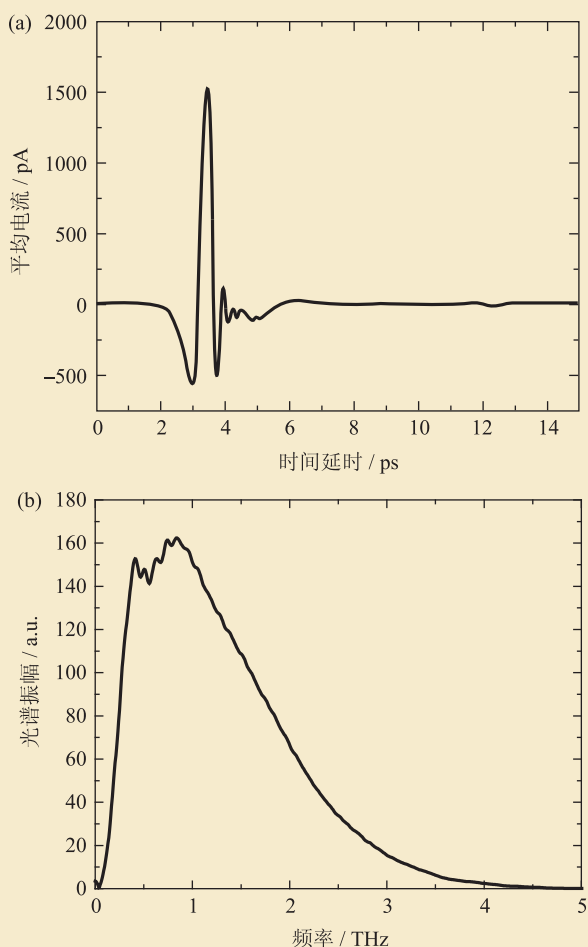


图 5 (a) 基于光电导天线的 $8f$ 共焦系统 THz 时域脉冲信号; (b) 所对应的傅里叶变换振幅频谱信号

一定厚度的铝膜被蒸镀到了基底上。最后经过剥离过程, 完整的亚波长人工结构就呈现在面

前。相关工艺流程如图6所示。

4 亚波长人工结构传感应用

4.1 超材料传感

太赫兹超材料能够感知周围折射率的微小变化,并以谐振频率移动的形式表现出来,对比直接的折射率或吸收测量,频移更直观并且受环境变化影响小,适合现场实际应用^[16]。我们使用经典超材料人工结构(即缺口谐振环结构),在实验上实现了对薄膜材料的传感以及对不同标号汽油的传感。下面分别进行介绍。

4.1.1 薄膜材料传感

我们首先利用缺口谐振环结构进行了最简单的传感应用,即实现不同厚度薄膜材料的传感。在缺口谐振环超材料中,最基本的谐振是LC谐振,该谐振是由缺口谐振环的等效电容电感引起的,它不但由自身几何参数所决定,而且也受周围环境介电函数的影响,这是超材料能够利用LC谐振实现传感的基础。

我们在缺口谐振环样品上涂覆不同厚度的光刻胶^[17],利用THz—TDS测试这些样品的透射特性,实验结果见图7。从结果中我们可以看到,随着光刻胶厚度的增加,样品的LC谐振频率出现了红移,直到光刻胶厚度超出缺口谐振环的谐振电场范围,以致谐振电场不能与光刻胶继续相互作用。因此,基底材料对超材料的传感能力也

有很大影响,更小的介电常数以及更薄的基底能增强超材料的传感能力。

4.1.2 不同标号汽油传感

成品油在管道输送时,混油界面是造成油品损耗的重要原因之一,不仅减少了油品的数量,而且也降低了油品的质量,造成巨大的经济损失。而太赫兹技术和超材料相结合,使其有潜力应用于混油界面的在线快速监测。

由薄膜材料传感可知,基底材料对探测灵敏度有较大影响。为了减少基底的影响,提高探测灵敏度,我们利用传统光刻手段制备了另一种超材料样品:在22 μm 厚的Mylar基底上蒸镀200 nm厚的缺口谐振铝环,周期是60 μm 。而且我们还设计了油路循环系统,以模拟石油管道输送的情况,并在其中插入该超材料,通过太赫兹时域光谱系统,测试谐振频率的变化。

我们将超材料样品插入汽油油路中,当不同标号的汽油流过时,我们观察到了样品的LC谐振频率移动了6 GHz(如图8所示),从而实现了利用超材料谐振频率移动来区分不同标号汽油^[18]。这项研究有希望应用于石油管道输送中的混油界面监测。

4.2 表面等离子体结构传感

超材料的谐振频率受周围电介质的影响,表面等离子体结构的谐振频率也同样受周围电介质的影响。我们采用自立式不锈钢亚波长孔阵列进

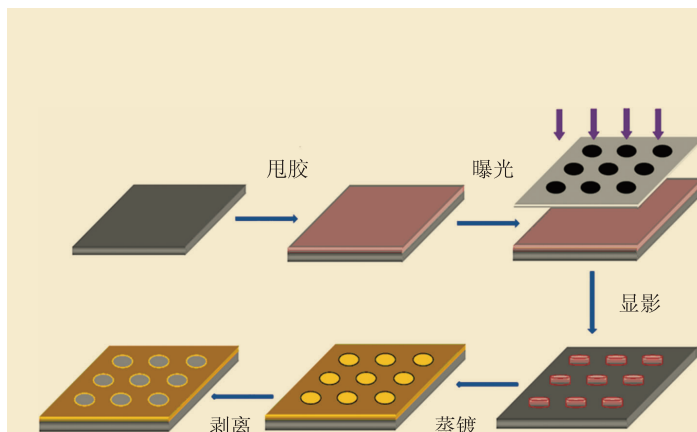


图6 光刻工艺流程图

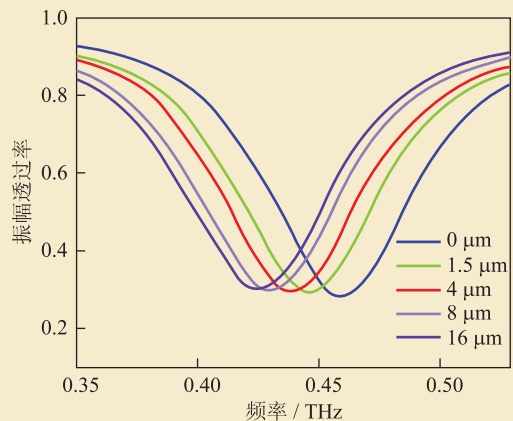


图7 不同厚度的光刻胶所对应的频移

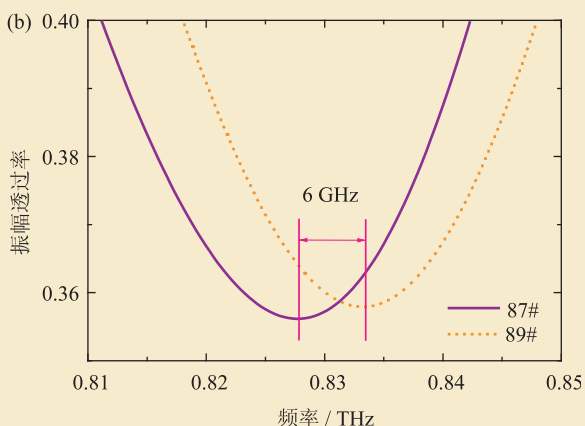
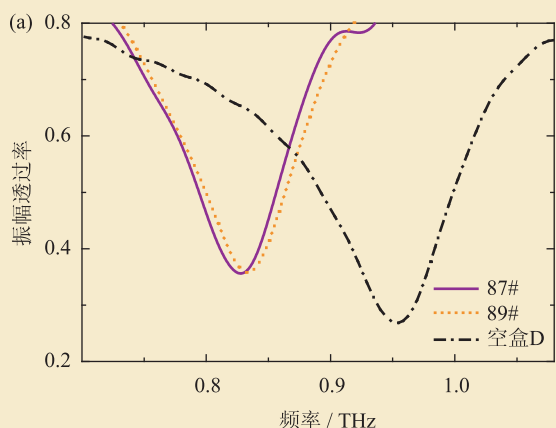


图8 不同标号汽油插入超材料样品后的频移

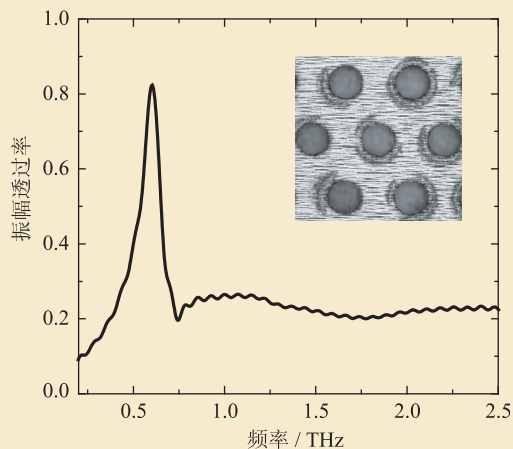


图9 金属孔阵列的振幅透射曲线

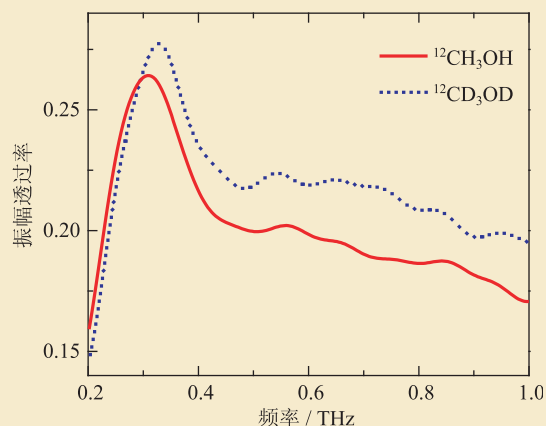


图10 金属孔阵列浸入 $^{12}\text{CH}_3\text{OH}$ 和 $^{12}\text{CD}_3\text{OD}$ 溶液后的振幅透射曲线

行传感，如图9所示，该不锈钢孔阵列厚度为 $18\ \mu\text{m}$ ，孔径为 $250\ \mu\text{m}$ ，周期为 $500\ \mu\text{m}$ ，周期呈六角形分布^[18]。

当光入射到金属孔阵列表面时，如果波矢条件匹配，SP将会在金属—电介质表面谐振激发。SP的波矢 k_{sp} 有以下色散关系：

$$k_{\text{sp}} = \frac{\omega}{c} \left(\frac{\varepsilon_{\text{d}} \varepsilon_{\text{m}}}{\varepsilon_{\text{d}} + \varepsilon_{\text{m}}} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

其中 ε_{m} 和 ε_{d} 分别是金属和电介质的介电常数。据此公式，我们可以预测不同阶的SP的谐振频率。对我们的结构来说，周围电介质是空气，所以 $\varepsilon_{\text{d}} = 1$ ，我们测得的振幅透射曲线如图9所示。计算的基模SP谐振峰位于 $0.69\ \text{THz}$ ，高于我们的测量值 $0.60\ \text{THz}$ ，这是由于SP透射和通

过孔直接透过的THz之间的法诺(Fano)耦合作用导致的。

4.2.1 表面等离子体结构用于甲醇同位素传感^[19]

首先，我们将表面等离子体结构应用于甲醇同位素传感。将金属孔阵列浸入甲醇溶液中，并保持在样品盒的中间位置。图10显示了金属孔阵列浸入 $^{12}\text{CH}_3\text{OH}$ 和 $^{12}\text{CD}_3\text{OD}$ 溶液后的振幅透射曲线。由于 $^{12}\text{CH}_3\text{OH}$ 中的H全部被D取代，我们可以观察到SP谐振峰的位置从 $0.31\ \text{THz}$ 频移到了 $0.33\ \text{THz}$ ，而且 $^{12}\text{CD}_3\text{OD}$ 有更大的振幅透射强度。

图11给出了金属孔阵列分别浸入 $^{13}\text{CH}_3\text{OH}$ 和 $^{13}\text{CD}_3\text{OD}$ 溶液的透射曲线。透射谱曲线和图10给出的透射谱曲线极为相似。同样，由于H完全被

D取代, 谐振频率从0.31 THz频移到0.33 THz, 透射振幅也有一定程度的增强。谐振频率和透射振幅的变化都和折射率的减小直接相关。

在以上两幅图中, 我们比较了金属孔阵列浸入 $^{12}\text{CH}_3\text{OH}$ 和 $^{12}\text{CD}_3\text{OD}$ 溶液的透射曲线, 同样比较了 $^{13}\text{CH}_3\text{OH}$ 和 $^{13}\text{CD}_3\text{OD}$ 的透射曲线。在这两种情况下, 同位素H/D的替代引起了折射率较大的变化, 从而使我们能够用金属孔阵列去分辨它们。然而, 同位素 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 的替代在折射率上没有显著的变化, 它们通过金属孔阵列的透射谱曲线极为相似, 用金属孔阵列的方法很难分辨它们。这表明甲醇和其同位素的THz差异响应主要是由氢原子所引起的, 而我们所用结构的分辨率不能有效分辨同位素 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 的替代所带来的变化。

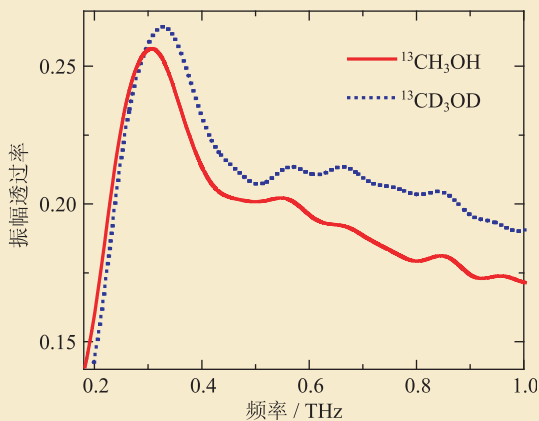


图11 金属孔阵列浸入 $^{13}\text{CH}_3\text{OH}$ 和 $^{13}\text{CD}_3\text{OD}$ 溶液后的振幅透射曲线

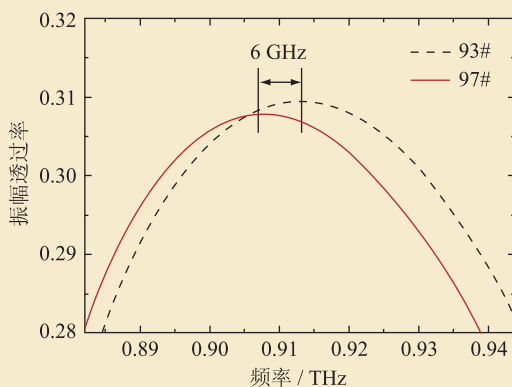


图12 金属孔阵列浸入不同标号汽油后的振幅透射曲线

4.2.2 表面等离子体结构用于不同标号汽油传感

上述金属孔阵列同样可以用于不同标号汽油传感^[20]。实验过程与超材料汽油传感相似, 实验结果如图12所示。与超材料传感结果不同的是, SP是利用谐振峰分辨不同标号汽油, 而超材料是利用LC谐振谷分辨不同标号汽油。这是由于在SP结构中, 谐振频率处的电磁波以表面波形式存在, 通过孔阵列后能够实现透射增强。

5 展望

从以上结果中我们可以看到, 将太赫兹时域光谱技术和亚波长人工结构器件相结合, 能够对多种材料进行传感(包括薄膜材料传感、不同标号汽油传感以及同位素传感等), 能显著提高被测物质的探测灵敏度, 同时与太赫兹时域光谱技术相比, 降低了对被测物质的体积和质量要求, 为太赫兹光谱及安全检查和反恐等应用提供了技术借鉴。但是, 目前该技术还有很大的改进空间, 如和芯片上(on-chip)太赫兹系统相结合, 实现真正的集成化测试^[6]; 另外, 目前该技术只能实现定量传感, 而定性检测是太赫兹技术的优势, 未来趋势是利用人工结构传感结合物质特征谱实现定性定量传感。可喜的是, 定性定量传感已经在红外波段取得突破^[21, 22], 相信未来该技术在太赫兹波段将会有更加广泛的应用。

参考文献

- [1] Ferguson B, Zhang X C. *Nature Mater.*, 2002, 1:26
- [2] Schmuttenmaer C A. *Chem. Rev.*, 2004, 104:1759
- [3] Hangyo M *et al.* *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2006, 12:1661
- [4] Tonouchi M. *Nature Photo.*, 2007, 1:77
- [5] Grischkowsky D, Keiding S, van Exter M *et al.* *J. Opt. Soc. Am. B*, 1990, 7:2006
- [6] Cunningham J, Byrne M B, Wood C D *et al.* *Electronics Letters*, 2010, 46:S34
- [7] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. *Science*, 2001, 292(5514):77
- [8] Schurig D, Mock J J, Justice B J *et al.* *Science*, 2006, 314

- (5801):977
- [9] Pendry J B. Phys. Rev. Lett., 2000, 85(18):3966
- [10] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J *et al.* Phys. Rev. Lett., 2008, 100:207402
- [11] Maier S A. Plasmonics: Fundamentals and Applications. Springer, 2007
- [12] Maier S A, Atwater H A. J. Appl. Phys., 2005, 98:011101
- [13] Ebbesen T W, Lezec H J, Ghaemi H F *et al.* Nature, 1998, 391:667
- [14] Brolo A G, Gordon R, Leathem B *et al.* Langmuir, 2004, 20(12):4813
- [15] Azad A K, Dai J M, Zhang W. Opt. Lett., 2006, 31(5):634
- [16] Driscoll T, Andreev G O, Basov D N *et al.* Appl. Phys. Lett., 2007, 91:062511
- [17] O'Hara J F, Singh R, Brener I *et al.* Optics Express, 2008, 16:1786
- [18] Li J, Tian Z, Chen Y *et al.* Appl. Opt., 2012, 51:3285
- [19] Tian Z, Han J, Lu X *et al.* Chemical Physics Letters, 2009, 475:132
- [20] Liu G L, He M X, Tian Z *et al.* Appl. Opt., 2013, 52:5695
- [21] Neubrech F, Pucci A, Cornelius T W *et al.* Phys. Rev. Lett., 2008, 101:157403
- [22] Cubukcu E, Zhang S, Park Y S *et al.* Appl. Phys. Lett., 2009, 95:043113

与约瑟夫森效应相对应的量子相干热效应

1962年, 约瑟夫森(Brian Josephson)在就读研究生期间, 做出了一项惊人的理论发现: 如果在两段超导材料之间存在仅仅一个超薄的绝缘层, 超导电子Cooper对将可能无阻隧穿地流过这个绝缘层间隙, 无须在两段超导体之间施加任何电压。这类绝缘层间隙被称为约瑟夫森结。超流电流的大小取决于两边超导体中Cooper对波函数的位相差。总之, 在大块超导体中, 如果在不同的区域之间存在位相差, 将引起超流; 反过来, 强迫超流流过极薄的绝缘势垒, 将引起位相差。

当超导体形成一个封闭的回路时, 设想超流环一周, 总的位相累计变化将是 2π 的整数倍。位相每增加 2π , 与环形超流相应的磁通将增加一个量子化的数值, 此值称为磁通量子 $\Phi_0 = 2.07 \times 10^{-15}$ wb。这个磁通量子化的性质与上述约瑟夫森效应的结合, 导致了超导直流量子相干器件(superconducting direct-current quantum interference device, 缩写为d.c.-SQUID)的出现。该器件包含两个约瑟夫森结, 类似于断成两部分的手镯再拼合在一起, 我们暂且标记它们为红、蓝两段超导体。从红到蓝, 流过器件双结的最大电流受到穿透回路的磁通(Φ)的调制。设 I_0 是在磁通 $\Phi=0$ 的条件下流过d.c.-SQUID器件的零偏压条件下的最大电流,

则在 $\Phi = \pm\Phi_0$ 时, 无阻地流过器件双结的最大电流仍是 I_0 ; 而在 $\Phi = \pm 0.5\Phi_0$ 时, 无阻地流过器件双结的最大电流则下降到0。

约瑟夫森做出新发现后不久, 就有理论工作者预言: 存在与约瑟夫森效应相对应的热效应。不过, 40年来, 由于缺乏验证实验, 上述预言几乎被遗忘。最近, Giazotto 和 Martínez-Pérez 在 Nature 周刊上撰文, 报道了他们在验证热约瑟夫森效应的实验中取得的成功。研究者证明, 通过d.c.-SQUID器件的总热流量 Q 受到外加磁通的调制。假定在 $\Phi = \pm 0.5\Phi_0$ 时, 总热流量 Q 的最大值是 Q_0 , 并随着磁通偏离 $\pm 0.5\Phi_0$, 器件允许的总热流量 Q 将下降, 而当 $\Phi = 0$ 或 $\pm\Phi_0$ 时, 器件允许的总热流量 Q 将下降到最小值, 大约只有 $0.1 Q_0$ 。

1800年代发现的热电效应, 反映的是材料中温差和电压之间的关系。现在的问题更加复杂, 因为它还涉及外加磁场。Giazotto 和 Martínez-Pérez的发现将在微型热控制器件开发中发挥作用, 例如研究和开发芯片尺度的热引擎或制冷机。另一个很有前景的应用是, 作为射电天文望远镜像素的超导转变光子探测器。在探测器接收到一个光子之后, 通过调谐外磁场, 增大像素器件通向外部冷源的热导, 迅速转移掉一个光子的能量, 这将有助于下一个光子的准确探测, 大大提高探测效率。

(戴 闻 编译自 Nature, 2012, 492: 358, 401)