

文章编号: 2095-4980(2024)02-0160-08

基于 CMOS 有源超材料的生物分子的自旋太赫兹传感

陈亚玄^{a,c,d}, 孔茹茹^a, 李昭颖^{a,c,d}, 孙 统^{a,c,d}, 熊 凡^{a,c,d}, 孙 芸^{a,d}, 刘永山^a,
张有光^b, 白中扬^{*b,c,d}, 温良恭^{*a,c,d}

(北京航空航天大学 a. 集成电路科学与工程学院; b. 电子信息工程学院, 北京 100191;

c. 深圳研究院, 广东 深圳 518063; d. 杭州创新研究院, 浙江 杭州 310051)

摘 要: 基于互补金属氧化物半导体(CMOS)有源超材料, 通过结合自旋太赫兹源, 对生物分子的太赫兹频段指纹谱进行传感检测。对比基于自旋太赫兹源和基于光电导天线的太赫兹时域光谱系统测量的 3 种不同生物样品的指纹谱特征峰, 验证了自旋太赫兹源测量生物样品的可行性。同时, 提出一种基于 CMOS 有源超材料的生物分子太赫兹传感方案, 仿真结果表明 CMOS 调控器件对生物样品的扫描测试表现为生物透射峰与器件谐振峰变化统一。当吸收峰位于器件的调控范围内时, 随着加电压的增大, 生物透射谱谐振频率减小, 出现红移, 最大红移量达到 40 GHz。因为不同的生物样品有不同的吸收峰, 根据不同的太赫兹指纹谱吸收峰的位置设计了 5 种对应中心频率的 CMOS 有源超材料, 为实现生物分子太赫兹传感系统的小型化和集成化提供了理论及实验基础。

关键词: 自旋太赫兹源; 指纹谱; CMOS 有源超材料; 太赫兹传感

中图分类号: TN20

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022249

Spintronic terahertz sensing of biological molecules based on CMOS controllable metamaterials

CHEN Yaxuan^{a,c,d}, KONG Ruru^a, LI Zhaoying^{a,c,d}, SUN Tong^{a,c,d}, XIONG Fan^{a,c,d}, SUN Yun^{a,d}, LIU Yongshan^a,
ZHANG Youguang^b, BAI Zhongyang^{*b,c,d}, WEN Liangcong^{*a,c,d}

(a.School of Integrated Circuit Science and Engineering; b.School of Electronic Information Engineering, Beijing 100191, China;

c.Shenzhen Innovation Institute, Shenzhen Guangdong 518063, China; d.Hangzhou Innovation Institute, Beihang University,

Hangzhou Zhejiang 310051, China)

Abstract: The sensing and detection of the biomolecule Terahertz(THz) spectrum fingerprint is performed based on Complementary Metal Oxide Semiconductor(CMOS) controllable metamaterials, using a Spintronic THz Emitter device. The spintronic THz spectrum fingerprint of three different biological samples were benchmarked with results using THz photoconductive antennas. The results show that the feasibility of measuring biological samples with spin terahertz source is verified. At the same time, a frequency based biomolecular THz sensing scheme is proposed by utilizing CMOS controllable metamaterials. Finite element models are built based on the performance test and the biosensing process of the CMOS controllable metamaterial devices. Five CMOS controllable metamaterials were designed with center frequencies related to the absorption peaks of the biomolecules under test. The simulation results show that the resonance frequency has a red shift with the increase of voltage, and the maximum red shift is up to 40 GHz. This paper provides experimental and theoretical foundations for building miniaturized and integrated biomolecular THz sensing systems.

Keywords: spin THz source; fingerprint spectra; CMOS controllable metamaterials; THz sensing

收稿日期: 2022-12-28; 修回日期: 2023-10-09

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金资助项目(2021B1515120012); 青岛市科技惠民示范专项基金资助项目(23-2-8-smjk-3-nsh)

*通信作者: 白中扬 email:baizhongyang@buaa.edu.cn; 温良恭 email:wengl@buaa.edu.cn;

太赫兹(THz)技术具有频谱宽、穿透性强、光子能量低、相干性等特点^[1]。在生物医学领域,太赫兹技术在成像和光谱方面具有广泛的应用^[2]。同时,由于诸多生物分子转动和振动能级处于太赫兹频段,具有指纹属性,因此太赫兹技术可对生物分子进行特异性传感,进而解析生物分子的结构、组成及相互作用。此外,由于太赫兹波的光子能量低,太赫兹技术被认为是一种具有特异性、低损伤、高分辨的生物分子探测技术。目前,生物分子的太赫兹传感主要基于太赫兹时域光谱系统(THz Time Domain Spectroscopy, THz-TDS)。例如,2020年,BAI Zhongyang等将不对称双裂环谐振器超材料与铁磁异质结自旋电子THz发射器集成,首次实现了单片THz发射生物传感器对HeLa细胞的检测。其表现为随着HeLa细胞和假单胞菌浓度的增加,共振频率发生红移^[3]。2020年Grigorev R O等通过太赫兹和红外光谱的方法研究正常和癌症胃组织,并获得了0.2~1 THz频率范围内的折射率^[4]。2021年王庆芳等设计了一款太赫兹超材料芯片进行生物混合物的定量检测研究,其中以7-甲基鸟嘌呤为例,这款芯片的最小检测限度可达6.30 μg ,约为压片测试法的1/500,实现了对物质的定性区分和利用芯片进行相关物质的检测^[5]。2021年,LI Dongxia等报告了一种太赫兹生物超材料传感器,实现了快速且无标记识别早期宫颈癌组织^[6]。2021年,李政隆等测试了固态 α -D-葡萄糖、 β -D-葡萄糖、D-甘露糖、D-半乳糖4种糖类和各自不同浓度的水溶液,获取了相应的太赫兹吸收光谱。结果表明:利用太赫兹时域光谱技术可以实现对同分异构体物质的区分^[7]。然而,基于THz-TDS的生物分子太赫兹传感技术在检测灵敏度和精确度方面仍存在一些难以直接克服的问题:a)在生物分子传感上,目前主流THz-TDS系统光谱分辨率不高;b)THz-TDS生物传感需要稳定适宜的外部环境条件,否则会导致特征峰湮没,灵敏度受限;c)THz-TDS生物传感系统体积较大,难以小型化,进一步地限制了其走向实际应用。因此,如何提高系统生物传感灵敏度,突破当前体系,实现THz生物传感器件小型化、集成化,成为当前THz生物传感技术亟待解决的关键问题。超材料是一种周期性排列的亚波长元件组成的人工设计的电磁材料,它通过改变单元的几何形态和方向来改变电磁特性。基于超材料的传感器可通过自身谐振增强THz波与待测物质的相互作用,进而实现检测灵敏度的提升^[8]。在医药和生物探测领域中,通常需要检测微量的样品物质,这对太赫兹波的灵敏度和准确性都提出了更高的要求。由于太赫兹超材料传感器在对物质进行测量时拥有灵敏度高、响应快等优点,从而在医学领域具有非常大的应用价值。因此太赫兹超材料生物传感器成为了国内外研究热点^[9]。

然而,当前超材料生物传感器原理主要是表面介电环境的变化,传感手段主要表现为被动的、宏观量的生物传感方式,无法对生物分子的太赫兹特征峰进行主动传感检测^[10]。因此,本文提出了一种基于CMOS工艺的有源超材料,基于栅极电压对器件的谐振频率进行调控,实现扫频功能。当生物分子的特征峰处于扫频范围时,基于调制器模型,生物样品特征峰会发生频移,最大频移量达40 GHz,从而实现对生物分子的太赫兹传感。同时,本文所采用的自旋太赫兹发射源(Spintronic Terahertz Emitter, STE)基于自旋铁磁/非铁磁异质结结构,具有宽频带、小型化的优势。本文首先通过对比自旋太赫兹源和商用光电导天线的THz-TDS生物分子特征峰检测技术,证明了自旋太赫兹源在可实现生物分子传感的同时,具有结构简单、频谱宽、成本低和易集成的优势。根据生物分子指纹谱的峰的位置设计了5种不同尺寸的超材料,即可实现对不同生物材料的传感检测。本文为后续实现生物分子太赫兹传感系统的小型化和集成化对未知生物样品太赫兹特征频谱特定峰点的动态传感提供了理论支撑。

1 测试系统及样品制备

1.1 太赫兹时域光谱系统

实验所用自旋源太赫兹时域光谱系统为北京航空航天大学合肥研究院微纳研究中心自主搭建的自旋太赫兹时域光谱系统,系统原理图如图1所示。

以实验室系统为例,首先钛宝石飞秒激光器产生飞秒激光,飞秒激光经分束镜分为90%的泵浦光和10%的探测光。其中泵浦光经过延迟线照射到太赫兹发射器,太赫兹发射器位置放置自旋太赫兹源。经过飞秒激光激发的太赫兹源辐射出太赫兹波,经过90°离轴抛物面镜的准直和聚焦,可以得到一个聚焦的太赫兹光斑,用于样品检测。此光路系统为透射式系统,透射过样品的太赫兹波再次经过离轴抛物面镜的准直后打在ZnTe探测晶体上,然后经过1/4波片和沃拉斯顿棱镜到达太赫兹波探测器。另一束探测光同样到达太赫兹探测器,由于探测光和泵浦光存在光程差,即可以完成1次时域采样,经过移动位移台进行连续采样就能得到太赫兹信号的时域波。

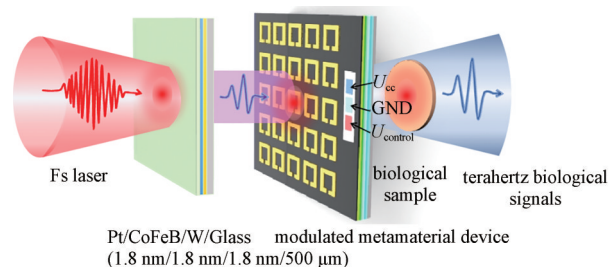


Fig.1 Schematic diagram of biological fingerprint spectrum detection
图1 生物指纹谱探测原理图

1.2 生物样品制备

对样品进行压片处理，分别对透明衬底和样品进行压片，压片条件为 20 MPa(5 min)，压片直径为 13 mm。其中压片样品有 2 种：一种是样品含量为 100% 的压片，第 2 种是样品含量为 50% 的压片。首先取一定量的样品粉末放入研钵中充分研磨，然后将研磨好的粉末倒入压片机的模具中以一定的条件进行压片，待压片完毕取出，测量压片的厚度并记录。注意：50% 的样品在研磨时所取的样品质量为 100% 压片样品的一半，另一半为环烯烃类共聚物(Copolymers of Cycloolefin, COC)衬底的质量。在制备样品含量为 50% 的压片时，为了使压片中样品分布更加均匀，要将 COC 衬底粉末和样品粉末同时放入研钵中研磨使其充分混合。准备了 3 种生物样品，分别为 4-氨基苯甲酸、 β -乳糖、L-精氨酸，并对这 3 种生物样品进行压片，具体的数据参数如表 1 所示。

表 1 压片数据参数
Table1 Parameters of tablet

serial number	sample name	undoped sample thickness/mm	50% doped sample thickness/mm
1	4-aminobenzoic acid	0.95	1.38
2	β -lactose	1.52	1.24
3	L-arginine	0.84	1.75
4	COC	1.29	—

2 实验结果与分析

2.1 实验测试

测试阶段选用了 2 种不同的太赫兹源，一种是基于 W/CoFeB/Pt 薄膜的自旋源太赫兹时域光谱系统^[11]；另一种是基于光电导天线的太赫兹时域光谱系统。

光电导天线测试系统为商用高精度太赫兹时域光谱系统。该系统采用光纤飞秒激光器作为泵浦源，设计为全光纤式系统，在高精度度长延迟方面具有突出优势，可实现 5 THz 以上光谱宽度以及小于 2 GHz 的光谱分辨能力，适合高精度的光谱测量分析。

测试系统和原理如图 2(a)所示，图 2(b)为自旋源的片上结构，图 2(c)为光电导天线的片上结构。在用基于 W(1.8 nm)/CoFeB(1.8 nm)/Pt(1.8 nm)薄膜的自旋源太赫兹时域光谱系统进行测试时，需不断调整样品台透过点的位置，使太赫兹信号能通过样品台的信号最大。在对样品进行测量时要注意用玻璃罩保护并充入氮气，来减少水分对生物样品太赫兹时域光谱的干扰。对于衬底 COC 来说，其相对于 THz 原始信号幅度保持相同，只是时域出现了~2 ps 的延迟，所以选择 COC 用于稀释样品浓度。其他 3 种样品，同一样品不同浓度的信号幅度和形状接近，但延迟不同，这是因样品厚度不同导致时域延迟的现象。通过对比自旋源太赫兹时域光谱系统和光电导天线时域光谱系统的测试结果发现，由于光电导测试系统设置采样点多于自旋源测试系统，自旋源系统的测试结果相对平滑，如图 3 所示，二者的频谱对应的位置以及变化趋势一致。

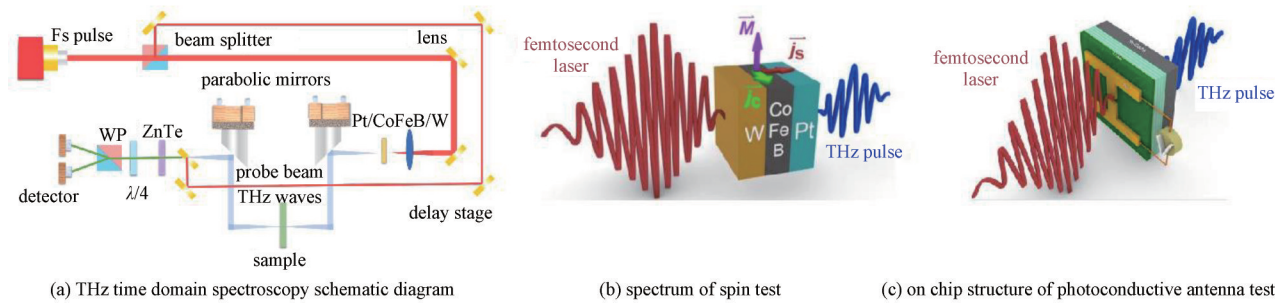


Fig.2 Schematic diagrams of terahertz time domain spectroscopy system and terahertz source
图 2 太赫兹时域光谱系统原理图及太赫兹源的原理

2.2 折射率和吸收率的计算

材料的物理或者化学性质主要是通过时域光谱或者对时域信息进行变换过后的变换域进行分析。其中最常用的就是利用傅里叶变换将时域变换为频域，再通过计算可得到吸收率、折射率等样品信息。

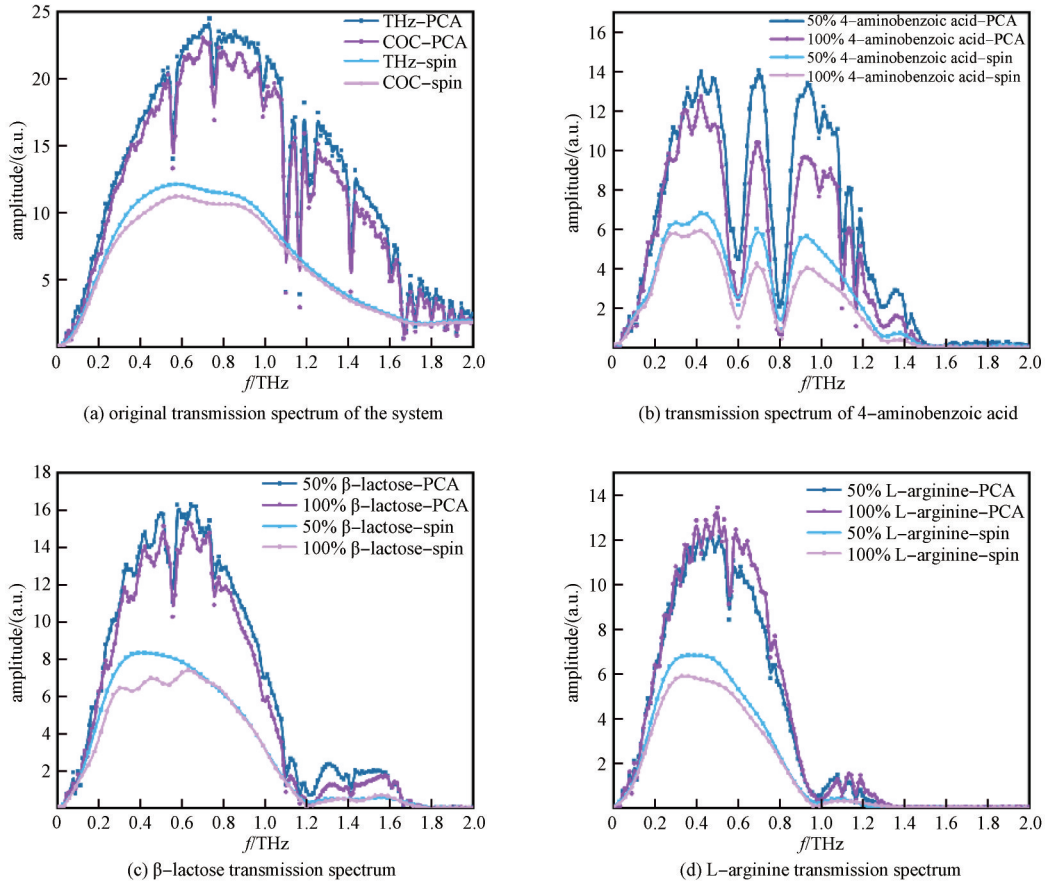


Fig.3 Terahertz spectrum
图3 太赫兹频谱

根据 DORENY T D^[12]和 DUVILLARET L^[13]等提出的计算材料光学常数的模型^[14], 实验所用的太赫兹时域光谱系统所测量出的太赫兹时域光谱包含了样品在时域和频域上的振幅和相位信息, 因而可以计算出各种被测材料在太赫兹波段的光学常数。

物质的宏观光学性质可以由负折射率来表示:

$$\tilde{n}(\omega) = n(\omega) - j\kappa(\omega) \quad (1)$$

式中: $n(\omega)$ 为实折射率; $\kappa(\omega)$ 为消光系数, 分别代表被测样品的色散特性和吸收特性。根据朗伯定律可以知道, 被测样品的消光系数和吸收系数成正比例关系, 如式(2)所示:

$$\alpha(\omega) = \frac{2\omega\kappa(\omega)}{c} \quad (2)$$

由于 THz 频域可以包含样品的诸多信息, 实验测得的信号多为时域信号, 所以首先将 THz 时域波形变换到频域从而得到频域的相位信息和振幅信息, 进一步获得材料的光学常数。将实验得到的时域信号变换到频域后得到参考信号 $E_{\text{ref}}(\omega)$ 和样品信号 $E_{\text{sample}}(\omega)$ 。因为实验室样品竖直放置, 所以只需考虑垂直入射的情况。所以样品在 THz 波段的复透射系数可以简化为:

$$H(\omega) = \frac{E_{\text{sample}}(\omega)}{E_{\text{ref}}(\omega)} = \frac{4\tilde{n}(\omega)}{[1 + \tilde{n}(\omega)]^2} \exp\left\{-j\omega\left[\frac{d\tilde{n}(\omega) - d}{c}\right]\right\} \quad (3)$$

式中: ω 为角频率; d 为样品厚度; c 为光速。

将样品的复折射率 $\tilde{n}(\omega) = n(\omega) - j\kappa(\omega)$ 代入式(3), 式(4)可表示成模和辐角的形式 $H(\omega) = \rho(\omega)\exp[-j\phi(\omega)]$ 。当样品对太赫兹波有较强的吸收时, 则有 $\frac{\kappa(\omega)}{n(\omega)} \ll 1$, 这时, 实折射率 $n(\omega)$ 、消光系数 $\kappa(\omega)$ 和吸收系数 $\alpha(\omega)$ 可以近似为:

$$n(\omega) = \frac{\phi(\omega)c}{\omega d} + 1 \quad (4)$$

$$\kappa(\omega) = \frac{c}{\omega d} \ln \left\{ \frac{4n(\omega)}{\rho(\omega)[1+n(\omega)]^2} \right\} \quad (5)$$

$$\alpha(\omega) = \frac{2\omega\kappa(\omega)}{c} = \frac{2}{d} \ln \left\{ \frac{4n(\omega)}{\rho(\omega)[1+n(\omega)]^2} \right\} \quad (6)$$

图 4 所示为 2 个系统不同浓度、不同样品时域信号经过上述计算和数据处理得到的透射谱和吸收谱。由吸收谱可以看出同一种样品不同的浓度下吸收峰仅幅度有变化，吸收峰的频率位置没有发生改变。同样，由光电导天线时域光谱系统和自旋太赫兹源时域光谱系统得出时域光谱和经过处理得到的频谱，透射谱和吸收谱，对比发现指纹谱吸收峰的位置一致，验证了自旋太赫兹源时域光谱系统用来测量生物分子指纹谱的可行性。

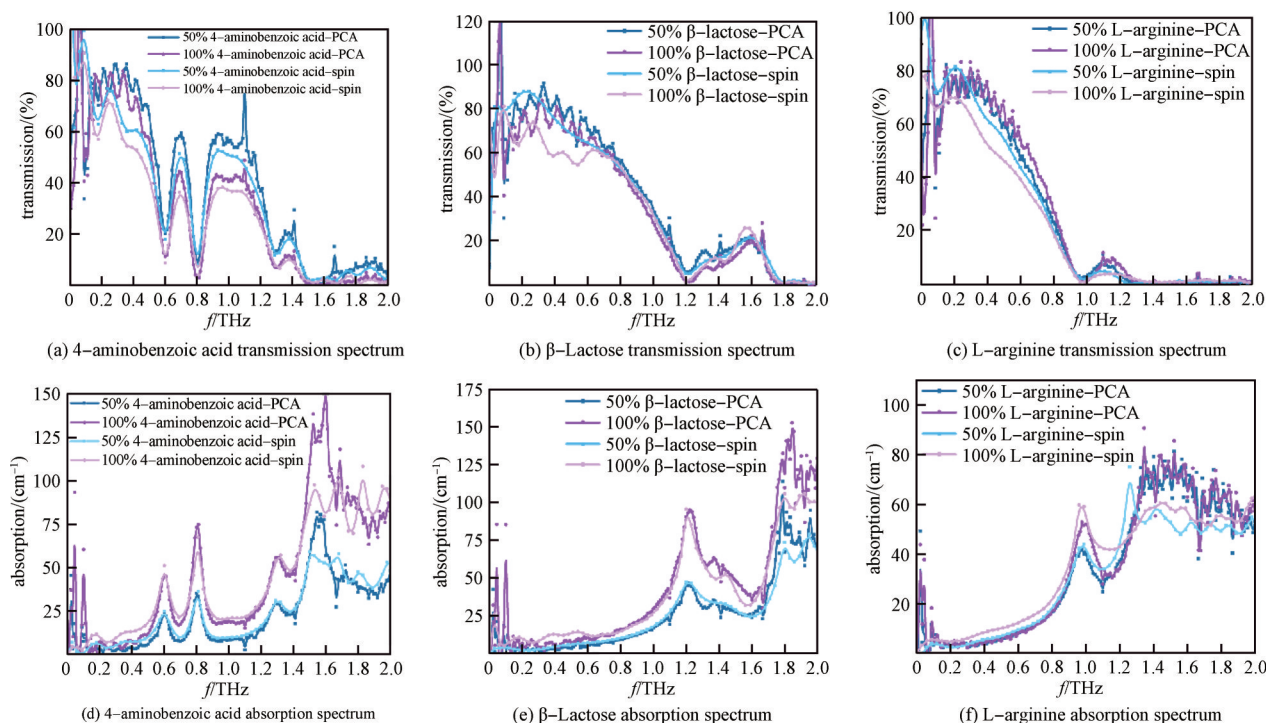


Fig.4 Transmission and absorption spectra of test samples

图 4 加入测试样品后的透射谱和吸收谱

2.3 基于 CMOS 有源超材料对生物样品的传感

基于 CMOS 有源超材料对生物样品的传感利用调制器模型的原理。发射的太赫兹波是离散信号， δ 函数可以将任意一个 N 点的离散信号分解为 N 个子信号的和，每个子信号都是一个 N 点的脉冲函数，即把信号进行脉冲分解。基于上述原理，可以把太赫兹信号分解为许多脉冲之和的形式，由强度不同的冲激函数组成。随后，对离散信号进行相同的处理就会得到响应，即太赫兹波经过超材料之后得到相应的响应。在本实验中，利用调制器模型来描述 CMOS 有源超材料对生物样品的调制作用。将 CMOS 有源超材料的数据信息作为调制信号 $x(t)$ ，将生物样品信号看作载波 $h(t)$ ，对时域上的调制信号和载波信号进行卷积运算后(时域卷积、频域相乘)分析输出频域上的已调信号，即可观察出响应的变化。

借助参考文献[15]的 CMOS 调控器件来说明仿真方案。其性能表现为当调控 CMOS 的栅极电压时，器件谐振峰所在的频点位置也随着栅极电压的改变发生偏移，主要表现为电压增强，谐振峰红移^[15]。选取了在太赫兹波段有多个明显的吸收峰的 3 种样品，之前的结果证明，在不同浓度下 3 种样品峰值频点分别为 0.6 THz、0.8 THz、1.0 THz、1.22 THz、1.3 THz。基于上述频点设计了 5 种中心频率所对应的 5 个峰值的开口谐振环(Split-Ring Resonator, SRR)，具体尺寸参数如表 2 所示，其中 g 表示开口尺寸， w 表示线宽， R 表示外边长，具体的尺寸表示如图 5(a)所示。

以 4-氨基苯甲酸为例，由于 CMOS 调控器件数据采样密度不一致，首先通过一维插值方法对 4-氨基苯甲酸在 0.6 THz 处的吸收峰数据进行了插值和平滑处理；然后基于傅里叶变换中时域卷积、频域相乘的原理进行器件调控生物样品吸收峰的仿真，其中卷积定理原理如图 5(b)所示。处理过程主要以生物样品谐振峰点为基准，对器件调控数据进行平移变换。其中包括两个过程，一个过程是当生物样品谐振峰点位于器件调控范围内时，器件

的电压调控谐振峰的变化会直接与生物样品的谐振峰点进行耦合；另一个过程是当生物样品谐振峰点位于器件调控范围之外时，器件的电压调控谐振峰的变化区间与生物样品的谐振峰点互相错过。

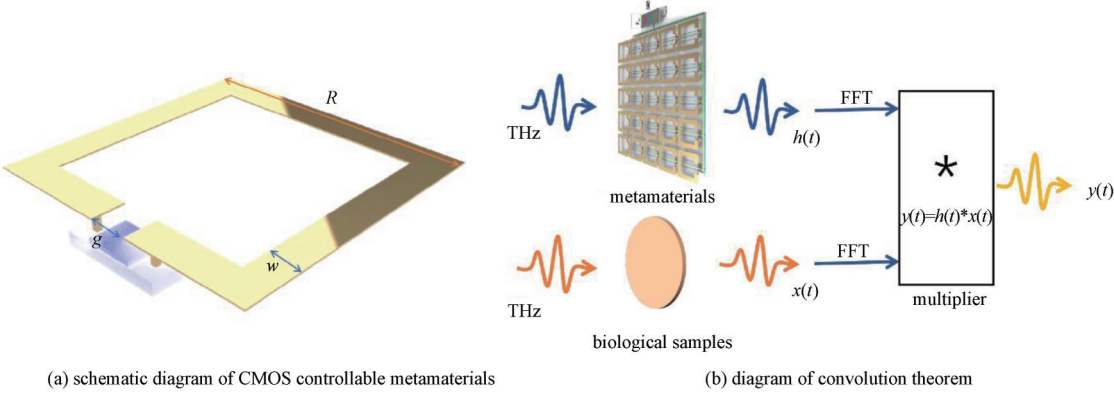


Fig.5 Schematic diagrams of metamaterials and sensing
图 5 超材料示意图及传感原理图

表 2 设计的 5 种 SRR 参数
Table2 Five SRR parameters

No.	center frequency/THz	g/mm	w/mm	R
1	0.60	5	10	53.0
2	0.80	5	10	43.0
3	1.00	5	10	37.5
4	1.22	5	10	33.0
5	1.30	5	10	32.0

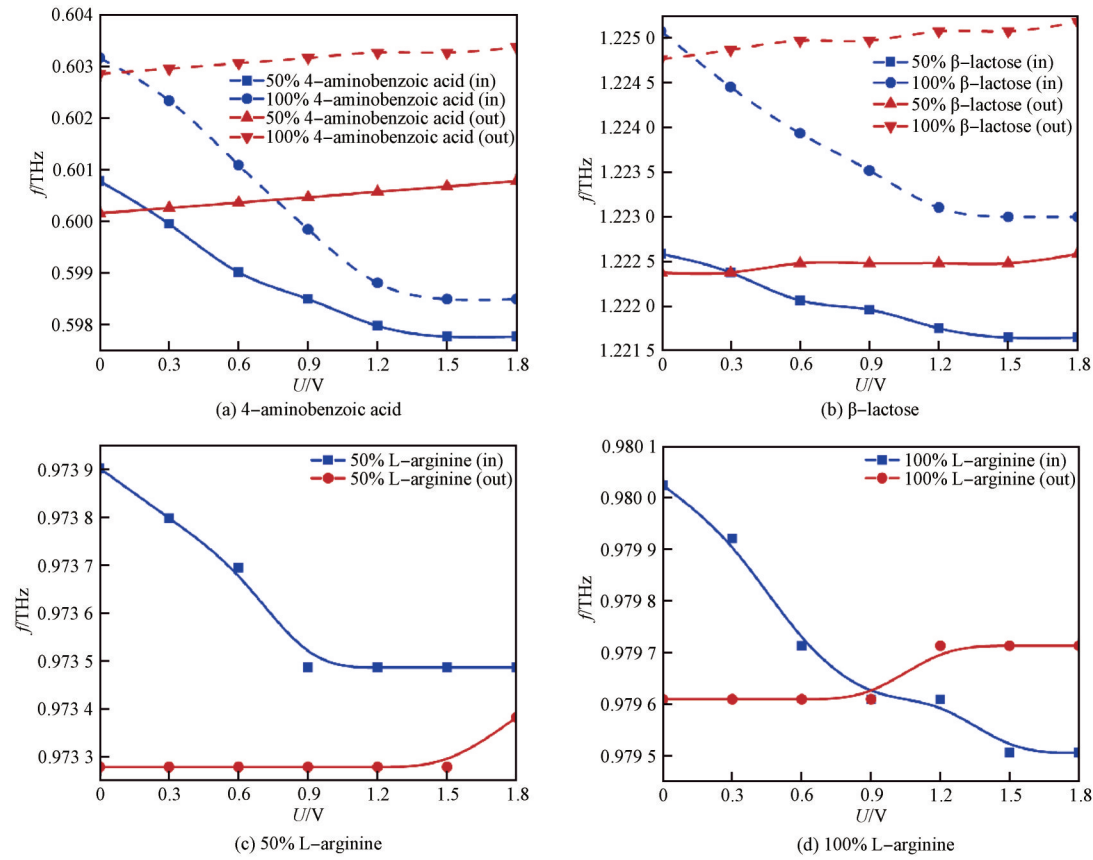


Fig.6 Frequency changes of the three biological samples at different concentrations within and outside the control range
图 6 不同浓度的 3 种生物样品位于调控范围内外的频率变化

随后对仿真结果进行处理，当 4-氨基苯甲酸 0.6 THz 处的吸收峰位于器件调控范围内和范围外的频移对比，结果如图 6(a)所示，从图 4 中 4-氨基苯甲酸的吸收谱和透射谱可以看出，对于特征峰点的位置，样品浓度只会影响幅度大小，不会影响位置变化；从 50% 和 100% 这 2 种浓度的 4-氨基苯甲酸的调控结果来看，CMOS 调控器件

对生物样品的扫描仿真表现为生物透射峰与器件谐振峰变化统一。当吸收峰位于器件的调控范围内时,随着所加电压的增大,频率减小,出现红移,100%浓度的4-氨基苯甲酸的红移量为47 GHz,50%浓度的4-氨基苯甲酸的红移量为30 GHz,当电压继续增大到1.5 V时,再增大电压,谐振点的位置不发生变化。

β -乳糖选取了1.22 THz位置处的吸收峰,由图6(b)可以看出,吸收峰位于调控范围内时,随着电压的增大,频率逐渐向低的位置移动,发生红移,100%浓度的 β -乳糖的红移量为2 GHz,50%浓度的 β -乳糖的红移量为0.98 GHz,当电压增大到1.5V时,频率不再发生变化,这种变化趋势与4-氨基苯甲酸的变化趋势相同。L-精氨酸选取了1.0 THz位置处的吸收峰,图6(c)、(d)为CMOS调控器件对L-精氨酸的调控,随着电压的增大,频率逐渐向低的位置移动,发生红移,50%浓度的L-精氨酸当电压增大到1.2 V时,频率不再发生变化,100%浓度的L-精氨酸的红移量为0.5 GHz,50%浓度的L-精氨酸的红移量为0.5 GHz。当生物样品的吸收峰位于CMOS调控范围之外时,基本没有发生频移。综上,计算结果表明CMOS调控器件对生物样品的吸收峰有明显的调控作用。

2.4 2个测试系统对生物样品的测试对比

通过获得的时域谱和频谱,以及对自主搭建的自旋源太赫兹时域光谱系统和光电导太赫兹时域光谱系统进行对比可知,光电导时域光谱系统的带宽为0.1~4 THz,自旋源的带宽为0~2 THz;从吸收谱的角度来看,以4-氨基苯甲酸为例,由自旋源太赫兹时域光谱系统和光电导太赫兹时域光谱系统数据得到的吸收谱进行对比发现,吸收峰的位置一致,均为0.6 THz、0.8 THz、1.3 THz,验证了自旋源太赫兹时域光谱系统对生物分子进行测量的可行性。从体积和结构复杂度上来说,光电导天线需要外加电极,自旋源太赫兹时域光谱系统是基于W/CoFeB/Pt薄膜,该薄膜不需要外加电极,但需要外加磁场,由泵浦光直接激发产生太赫兹波,所以相比于光电导天线,自旋薄膜更易集成和加工,且更加节省成本,但是信噪比等方面仍和光电导天线具有差距。表3对2种系统进行了对比。

表3 自旋系统与光电导系统的对比

Table3 Comparison between spin system and photoconductive system

terahertz source	bandwidth/THz	biometric peak (4-aminobenzoic acid)/THz	size	structural complexity
photoconductive antenna	0.1~4	0.6、0.8、1.3	not easy to reduce in size	requires additional electrodes
spintronic terahertz emitter	0~2	0.6、0.8、1.3	reduced size and easy integration	no bias needed

3 结论

本文对3种生物样品(4-氨基苯甲酸, β -乳糖和L-精氨酸),每种生物样品两种浓度(50%,100%)分别进行了实验测试,分别选用了2种精确度不同的太赫兹时域光谱系统进行生物样品的测试,并进行了频域幅度谱、透射谱、吸收谱的处理分析及对比;通过自旋太赫兹时域光谱系统获得的指纹谱吸收峰的位置与基于光电导天线的时域光谱系统一致,验证了自旋太赫兹时域光谱系统用来测量生物分子指纹谱的可行性。在得到生物样品的太赫兹光谱信息之后,设计了5种对应中心频点的CMOS超材料并利用MATLAB仿真CMOS有源超材料器件对生物样品特征吸收峰的扫频测试,发现了位于器件检测范围内的特征峰表现出与器件一致的变化,而对于位于器件检测范围之外的无特征峰频点的位置基本不会发生频移。这证明了CMOS有源超材料器件用于生物样品特征吸收峰扫频测试的可行性,同时基于自旋太赫兹源的可集成特性,也说明了自旋源与CMOS有源超材料器件集成,实现小型化的便携式THz生物扫频设备的巨大潜力。

致谢: 这项工作得到了北京航空航天大学青岛研究院、北京航空航天大学杭州创新研究院余杭分院、北京航空航天大学深圳研究院的支持。此外还要感谢中电科思仪科技股份有限公司、国家智能家电创新研究院在本研究中提供的帮助。

参考文献:

- [1] 刘盛纲,钟任斌. 太赫兹科学技术及其应用的新发展[J]. 电子科技大学学报, 2009,38(5):481-486. (LIU Shenggang,ZHONG Renbin. The new development of terahertz science and technology and its application[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009,38(5):481-486.) doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2009.05.001.
- [2] 张恭,王斐,刘荣. 太赫兹技术在医学领域的应用与展望[J]. 遥测遥控, 2021,42(4):36-44. (ZHANG Gong,WANG Fei,LIU Rong. Application and prospect of terahertz technology in medical field[J]. Telemetry and Telecontrol, 2021,42(4):36-44.)
- [3] BAI Zhongyang, LIU Yongshan, KONG Ruru, et al. Near-field terahertz sensing of hela cells and pseudomonas based on monolithic integrated metamaterials with a spintronic terahertz emitter[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2020, 12(32): 35895-35902. doi:10.1021/acsami.0c08543.

- [4] GRIGOREV R O, KUZIKOVA A V, DEMCHENKO P S, et al. Investigation of normal and cancer gastric tissues by terahertz and infrared spectroscopic methods[C]// The Fourth International Conference on Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection, and Applications. 2020:363–367. doi:10.1117/12.2583546.
- [5] 王庆芳, 王泽云, 韩超, 等. 基于太赫兹超材料芯片的生物混合物定量检测研究[J]. 中国激光, 2021, 48(23):181–189. (WANG Qingfang, WANG Zeyun, HAN Chao, et al. Quantitative detection of biological mixtures based on terahertz metamaterial chip[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(23):181–189.) doi:10.3788/cjl202148.2314001.
- [6] LI Dongxia, HU Fangrong, ZHANG Haipeng, et al. Identification of early-stage cervical cancer tissue using metamaterial terahertz biosensor with two resonant absorption frequencies[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2021, 27(4):8600107. doi:10.1109/JSTQE.2021.3058163.
- [7] 李政隆, 张德海. 基于太赫兹技术的葡萄糖及其同分异构体研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021, 19(1):11–17. (LI Zhenglong, ZHANG Dehai. Discrimination of glucose and its isomers based on terahertz technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021, 19(1):11–17.) doi:10.11805/TKYDA2019 522.
- [8] XU Tao, XU Ruijia, LIN Yusheng. Tunable terahertz metamaterial using electrostatically electric split-ring resonator[J]. Results in Physics, 2020(19):103638. doi:10.1016/j.rinp.2020.103638.
- [9] 杨晴, 田祺云, 李竞, 等. 自旋太赫兹源发展及其在生物医学的应用前景分析[J]. 中国材料进展, 2021, 40(12):948–962. (YANG Qing, TIAN Qiyun, LI Jing, et al. Development of high performance spintronic terahertz source and its application prospect in biomedicine[J]. Materials China, 2021, 40(12):948–962.) doi:10.7502/j.issn.1674–3962.202108029.
- [10] BROLO A G. Plasmonics for future biosensors[J]. Nature Photonics, 2012, 6(11): 709–713. doi: 10.13921/j. cnki. issn1002–5561.2021.08.007.
- [11] LIU Yongshan, BAI Zhongyang, XU Yong, et al. Generation of tailored terahertz waves from monolithic integrated metamaterials onto spintronic terahertz emitters[J]. Nanotechnology, 2021, 32(10):105201. doi:10.1088/1361–6528/abcc98.
- [12] DORNEY T D, BARANIUK R G, MITTLEMAN D M. Material parameter estimation with terahertz time-domain spectroscopy[J]. Journal of the Optical Society of America A: Optics Image Science & Vision, 2001, 18(7):1562–1571.
- [13] DUVILLARET L, GARET F, COUTAZ J L. A reliable method for extraction of material parameters in terahertz time-domain spectroscopy[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2002, 2(3):739–746. doi:10.1109/2944.571775.
- [14] DUVILLARET L, GARET F, COUTAZ J L. Highly precise determination of optical constants and sample thickness in terahertz time-domain spectroscopy[J]. Applied Optics, 1999, 38(2):409–415. doi:10.1364/ao.38.000409.
- [15] LIU Yongshan, SUN Tong, XU Yong, et al. Active tunable THz metamaterial array implemented in CMOS technology active tunable THz metamaterial array implemented in CMOS technology[J]. Journal of Physics, D: Applied Physics: A Europhysics Journal, 2021, 54(8):085107. doi:10.1088/1361–6463/abc77c.

作者简介:

陈亚玄(1999–), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹传感器件. email:yaxuanchen_ysu@163.com.

孔茹茹(1996–), 女, 硕士, 主要研究方向为用于生物传感的太赫兹超材料器件.

李昭颖(1998–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹微纳器件.

孙 统(1995–), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹微纳器件.

熊 凡(2000–), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹微纳器件.

孙 芸(1997–), 女, 在读博士研究生, 主要研究方向为自旋太赫兹发射与调控、二维自旋电子器件等.

刘永山(1996–), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为自旋太赫兹.

张有光(1963–), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为自旋电子器件.

白中扬(1994–), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹传感器件.

温良恭(1981–), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为先导微纳电子技术、6G及太赫兹器件、MEMS传感器.