

人工微结构太赫兹传感器的研究进展

梁丽^{1,2,3}, 文龙³, 蒋春萍¹, 陈沁³

(1. 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究院 中国科学院纳米器件与应用重点实验室,
江苏 苏州 215123;

2. 中国科学技术大学 纳米技术与纳米仿生学院, 安徽 合肥 230026;

3. 暨南大学 纳米光子学研究院 广东省光纤传感与通信技术重点实验室, 广东 广州 511443)

摘要: 近年来, 太赫兹技术得到迅速发展, 在通信、反恐、检测和医药等领域展现了广泛的应用潜力。尤其是许多生物分子和材料在太赫兹波段存在特征的吸收光谱, 而且太赫兹波能量低损伤小等特点, 使得太赫兹生化传感器越来越受到关注。然而, 由于太赫兹波的波长较长与生物分子等的尺寸差别非常大, 导致相互作用比较弱, 从而限制了太赫兹传感器的性能。通过微纳电磁结构对光场空间分布和频率分布的调控, 增强太赫兹波传感器的灵敏度是当前的研究热点。文中将重点介绍各种微纳结构太赫兹传感技术的原理和研究现状, 并通过梳理其发展趋势和当前的性能制约因素, 讨论此方向将来的发展方向和应用前景。

关键词: 太赫兹; 传感器; 人工微结构; 超材料

中图分类号: TN29 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0203001

Research progress of terahertz sensor based on artificial microstructure

Liang Li^{1,2,3}, Wen Long³, Jiang Chunping¹, Chen Qin³

(1. Key Lab of Nanodevices and Applications, Suzhou Institute of Nano-tech and Nano-bionics,
Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China;

2. School of Nano Technology and Nano Bionics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications, Institute of Nanophotonics,
Jinan University, Guangzhou 511443, China)

Abstract: Recently, terahertz (THz) technology has developed rapidly, showing promising potential in the fields of communication, anti-terrorism, monitoring and biomedicine, etc. In particular, terahertz biosensor has attracted extensive attentions in biotechnology, because many biological molecules and materials have their finger prints in the THz absorption spectra, and the damage by the low power terahertz wave is low. However, the THz wave-matter interaction is relatively weak because of the mismatch between the

收稿日期: 2018-09-05; 修订日期: 2018-10-03

基金项目: 国家自然科学基金(61574158, 11774383, 11604367); 英国皇家学会牛顿高级学者项目(NA140301);

中国科学院国际人才计划项目(2017DT0009); 中国科学院科创计划项目

作者简介: 梁丽(1991-), 女, 博士生, 主要从事微纳光电子器件方面的研究。Email: lliang2017@sinano.ac.cn

导师简介: 陈沁(1979-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事微纳光电子器件研究, 包括硅基集成的光探测器、光调制器、光传感器等方面。Email: chenqin2018@jnu.edu.cn

long wavelength of THz wave and the size of biomolecules, which limits the performance of terahertz sensors. Current research interest is manipulating the spatial and spectral distributions of the electromagnetic fields based on the microstructures to enhance the sensitivity of the sensors. In this review, we are going to introduce the working mechanisms of various microstructure THz sensors and the recent progress, and then discuss their advantages and disadvantages, finally we conclude the major issues to be resolved and predict the future developing trend and potential applications.

Key words: terahertz; sensor; microstructure; metamaterial

0 引言

太赫兹波是频率在 0.1~10 THz, 对应波长 30 μm ~3 mm 的电磁波, 作为电磁波谱中的“太赫兹空白”, 其相关技术研究是当前重要的交叉前沿领域^[1-2]。作为介于红外到微波的频段, 太赫兹波具有很多优势, 比如能量低、传透性好、大带宽等。尤其是很多生物大分子的旋转、平移和转换频率在太赫兹频段, 具有特征的“指纹效应”, 因此促进了太赫兹传感检测这一新兴技术的发展^[3-5]。例如利用太赫兹光谱分析技术可以容易的分辨出海洛因和非毒白色粉末。目前大多数太赫兹波物质检测与分析都基于太赫兹时域光谱系统(THz-time domain spectroscopy, THz-TDS), 通过对在时域中测到的含样品信息的太赫兹脉冲信号进行傅里叶变换得到物质的透射或反射光谱^[6-7]。由于这种技术是基于物质的吸收特性, 因此需要一定量的样本才能获得可分辨的信号。尤其对于薄膜材料检测而言, 其厚度的检测限基本在数百纳米到数微米^[8], 因此对于微量样品的高灵敏检测难以满足需求。如何增强太赫兹波与被测物的相互作用, 从而提高传感灵敏度, 是推进太赫兹传感器实际应用的关键。

人工微结构可以改变电磁波传输过程中的电磁参数空间分布, 从而有效操控电磁波的传输与局域^[9-10]。人们已经利用微纳结构实现了异常透射^[11]、电磁感应透明^[12]、全吸收^[13]、偏振转换^[14-15]、突变相位^[16-17]等新颖的电磁效应。这些效应对人工微结构的材料和结构参数都非常敏感。因此, 通过构建人工微结构, 将其作为传感检测的平台, 并结合强度、相位、偏振等检测手段, 有望增强被测物对太赫兹波传输特性的影响, 从而大幅提高传感的灵敏度。在这篇

综述中, 笔者将聚焦光学折射率传感机制, 介绍基于表面等离子体(SP)、超材料、光子晶体、波导等各种微结构的太赫兹传感原理, 并介绍相关研究的进展和现状, 通过对比各种技术的特点和现有性能, 讨论太赫兹传感技术未来发展的趋势。

1 光学折射率传感机制和主要性能参数

相比于电学和化学传感器, 光学传感器具有灵敏度高、抗电磁干扰、电学和化学稳定等优点, 因此在生命科学、食品安全、化学监测和环境监测等领域有重要的应用。广义的光学传感器是对被测物光学参数的感知, 因此太赫兹传感器就是对被测物在太赫兹波段的电磁参数的感知。通过探测和分析光波的强度^[18]、相位^[19]和偏振^[20]等相关信息的变化来辨识被测物或监测生物化学反应过程。折射率是最为典型的光学参数, 其中折射率的实部影响光波相位, 虚部影响光波强度, 而其各向异性分布决定着偏振和手性等。通常, 光学折射率传感器都会基于各种光学效应引入共振机制, 来增强光波与被测物的相互作用。如图 1 所示, f_0 为共振频率, 它与结构参数和外界环境非常相关, 因此微弱的折射率扰动 Δn 将带来共振频率的移动 Δf 。同时, 对于一个固定的频率, 比如 f_0 , 这种折射率扰动还带来了光强的变化 ΔI 。通过光谱分析系统检测出这些变化, 就能获得被测物的信息。然而光谱分析系统在微弱信号探测和光谱分辨率方面都有其硬件限制, 比如当前的 THz-TDS 系统的频率分辨率在 5 GHz 左右, 因此需要优化设计微结构来实现更大的 Δf 和 ΔI 的变化。这里需要定义一个灵敏度 S 来定量的衡量不同器件的性能优劣。对于采用强度传感的方法来说, 灵敏度 S_I 是光谱强度变化 ΔI 与折射率变化 Δn 的比值, 即: $S_I = \Delta I /$

Δn ; 而对于采用光谱移动来传感的方法, 灵敏度 S_f 是共振频率变化 Δf 与折射率变化 Δn 的比值, 即: $S_f = \Delta f / \Delta n$ 。 Δn 的单位是 RIU(Refractive Index Unit), 因此 S_f 和 S_f' 就表示每个单位折射率变化产生了多少的强度或频率的变化。然而由于传感器的灵敏度 S_f 和所在的工作波段有关, 因此使用归一化的灵敏度 S_f' 来排除工作波段的影响, 定义为: $S_f' = S_f / f_0$ 。除了灵敏度以外, 品质因子 Q (quality factor), 也是表征传感器性能的另一个重要参数, 可以用来体现光学共振的性质。 Q 越大, 说明共振体系的损耗越小, 共振峰越窄, 即半高宽 FWHM(Full Width at Half Maximum) 越小。品质因子可通过中心频率和半高宽的比值获得, $Q = f_0 / \text{FWHM}$ 。从图中可以看到, 图中实线和虚线分别代表被测物折射率为 n 和 $n + \Delta n$ 时的光谱; 蓝色线和红色线分别代表两个不同的传感器。图中 Δf 和 ΔI 分别表示被测物折射率变化为 Δn 时, 光谱峰位和光谱强度的变化。红线代表的光谱在被测物变化前后的频率移动和蓝线代表的光谱相同, 即传感灵敏度 S_f 相等。然而, 由于红线光谱的 FWHM 比蓝线光谱的大, 因此在实际测量中蓝线光谱的变化更容易被分辨出来, 即体现了更好的传感性能。一般定义品质因数 FOM(Figure of Merit) = S_f' / FWHM 来定量评估, 即同时保证高灵敏度和高品质因子的传感器性能就最佳。

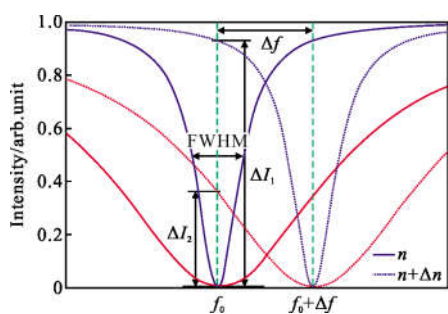


图 1 光学折射率传感典型光谱与性能参数

Fig.1 Typical spectra and performance parameters in optical refractive index sensing

2 不同类型太赫兹传感器基本原理及现状

如上述, 光学折射率传感器的性能需要高灵敏度和高品质因子, 因此人工微结构太赫兹传感器的发展也是遵循着这个原则, 其微结构的优化分为两

个主要目标, 即提高灵敏度和提高品质因子。前者需要太赫兹波的共振模式的局域场分布与被测物在空间上能够更大程度的重叠, 增加传感区域从而增强相互作用; 后者需要共振模式具有更低的损耗。总的来说, 人工微结构太赫兹传感器的基本原理包括: (1) 仿表面等离子体共振 (Spoof Surface Plasmon Resonance, Spoof SPR)^[21-24]; (2) 超材料或超表面^[4,25-26]; (3) 光子晶体^[27-28]; (4) 波导结构^[29-30]等。下面将分别介绍其工作原理和技术特点, 以及目前的研究进展。

2.1 基于 Spoof SPR 的太赫兹传感器

表面等离子体共振 (SPR) 是近年来微纳光学领域的研究热点, 是光学生物传感技术的典型代表, 展现了极高的灵敏度, 并被成功的产业化^[31-33]。如图 2(a), 表面等离子体波指的是金属中的自由电子在外界光场的作用下发生集体的振荡, 而产生的沿着金属和介质界面传播的表面波, 其场分布在界面处最大, 并向界面两侧衰减^[34]。如图 2(b)和(c)所示的色散关系和电磁场分布, 它具有比同频电磁波更短的波长, 因此更加局域的场分布。这种局域使得电磁波传输对金属表面非常敏感, 因而可以用于传感检测^[35-36]。可见光频段的 SPR 传感器已经有大量的研究, 结合差分相位的方法目前最高传感灵敏度达到 2.8×10^{-9} RIU^[37]。然而, 金属材料的等离子体频率一般都在紫外波段, 在太赫兹波段的介电常数绝对值非常大, 其趋肤深度非常小, 电磁波基本不存在于金属内部, 可被视为理想导体。因此, 这种情况下虽然原则上依然能传播表面等离子体波, 但其场分布的界面局域特性减弱, 难以实现高灵敏的折射率传感。这一点与 SPR 色散曲线在低频段和光线 (Light Line) 几乎重合是吻合的。2004 年, 英国帝国理工大学的 Pendry 教授提出了在金属表面形成周期狭缝和孔阵列来实现 Spoof SPR 的方法 (图 2(d))^[38], 并在次年得到实验验证^[39]。这些亚波长的周期孔阵显著的增强了太赫兹波在金属中的渗透, 并获得太赫兹波在界面的亚波长局域 (图 2(f)), 其色散关系如图 2(e)与可见光波段平面金属膜的 SP 波色散非常类似。而且, 这个亚波长结构层的等效等离子体频率仅与金属表面结构的几何参数有关, 因此可以通过调控结构参数在任意频段实现类似可见光波段的 SPR 特性, 大大提高了低频段的传感灵敏度。

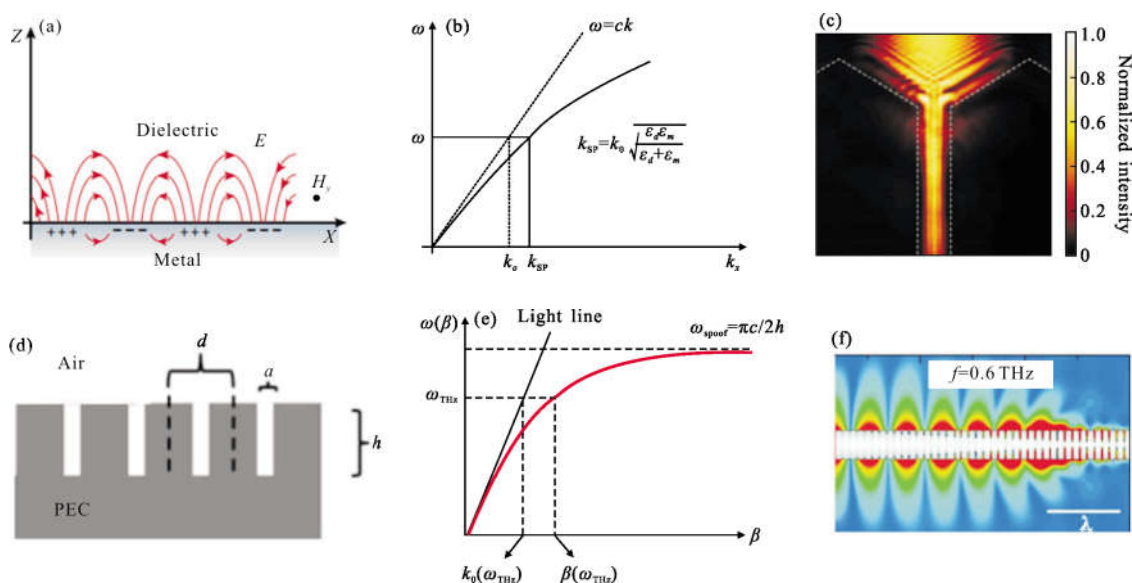


图 2 (a) 金属-介质界面的表面等离子体波示意图^[34]; (b) 表面等离子体波的色散关系^[34]; (c) 条纹金属结构光子扫描隧道成像图^[34]; (d) 周期性理想导体金属凹槽结构示意图^[24]; (e) 太赫兹仿表面等离子共振的色散关系^[40]; (f) 仿表面等离子共振的空间电场分布^[21]

Fig.2 (a) Schematic of SPPs at the interface between a metal and a dielectric material^[34]; (b) the SP dispersion curve^[34]; (c) the photon scanning tunnelling microscopy image of metallic strips demonstrates the bonded SPPs at the surface of the metal^[34]; (d) periodically corrugated PEC surface supporting Spoof SPR^[24]; (e) the dispersion curve of Spoof SPR^[40]; (f) efield distribution of Spoof SPR^[21]

激发 Spoof SPR 最直接和常见的方法与可见光频段用棱镜耦合的方式激发 SPP 类似，通过棱镜折射率和入射角度的调节，可以实现波矢的匹配^[41]。如图 3(a)所示, Maior 等人在金属凹槽阵列结构上构建 Otto 棱镜耦合实现了太赫兹波段 Spoof SPR 的激发^[42]。其场分布局域在凹槽表面很小的区域, 尤其是凹槽两侧金属壁的顶角处(图 3(b))。波矢匹配的情况下, 入射太赫兹波的能量会转移到 Spoof SPR, 对应反射光谱中的一个低谷。可以看到, 间隙大小对最低反射率有很大影响, 从耦合模理论来理解, 间隙大小影响辐射损耗, 可调控关键耦合条件^[43]。由于 Spoof SPR 电磁特性与表面环境密切相关, 因此可以用来检测棱镜与凹槽间隙中的被测物。如图 3(c)所示, 不同气体和液体被测物产生了不同的反射光谱, 即实现了传感检测。通过拟合评估, 此器件的传感灵敏度达到 0.49 THz/RIU, 假设频率分辨率为 10 GHz 时, 其折射率检测限为 0.02 RIU。其中氮气, 石油和蜡的吸收系数比较小, 因此获得窄带即高 Q 的共振吸收, 而甘油和水由于对太赫兹波的吸收较高, 导致共振吸收峰展宽。因此检测不同样品时器件 FOM 有

不同, 氮气最高 49, 而甘油最低仅为 7。此外, 因为共振频率处相位发生突变, 通过分析相位差谱的平移, 也可以实现传感。而 THz-TDS 的一个特点就是同时能够获得相位信息, 因此作者也分析了相位传感的特性, 研究发现相位传感的品质因子比幅度传感高 4 倍, 因此相位传感将显著提高器件品质因数。

棱镜耦合需要较复杂的光路对准, 实用操作不太便利。如图 3(d)所示, 在金属薄片上刻蚀出周期性微孔阵列, 也能在入射太赫兹波照射下激发出表面场局域的 Spoof SPR, 并在太赫兹波段形成一个透射峰^[44]。这种共振类似可见光波段的异常透射现象^[45-46], 其传输特性与孔阵列的材料结构参数相关, 因此孔内介质折射率的变化将引起透射光谱的改变。将这种简单结构放在不同辛烷值的汽油中, 并利用 THz-TDS 进行光谱分析, 就可以实现不同辛烷值汽油的辨识。由于汽油的吸收系数很小, 因此不同辛烷值汽油的差异主要体现在折射率实部, 光谱中共振峰的位置发生移动, 但强度几乎没有变化。从图 3(e)可见, 93 号和 97 号汽油对应的共振峰在 0.91 THz 附近发生了大约 6 GHz 的频移, 相当于 2 THz/RIU

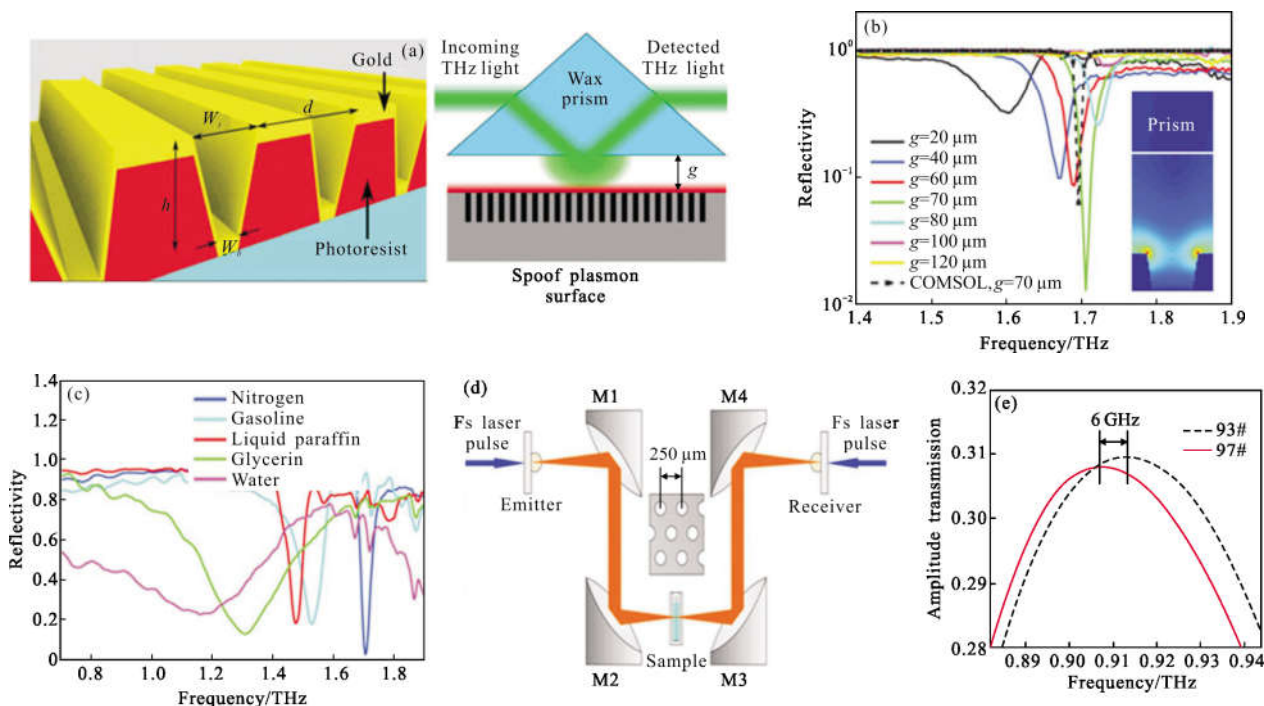


图 3 (a) 左侧为支持 Spoof SPR 的金属光栅结构示意图,其中红色部分为光刻胶,黄色部分为金,右侧为使用 Otto 棱镜耦合激发 Spoof SPR 的示意图^[42]; (b) 棱镜与 Spoof SPR 之间的距离变化导致的反射光谱的变化^[42]; (c) 当棱镜与 Spoof SPR 的距离保持为 70 μm 时,不同被测物的反射光谱^[42]; (d) 太赫兹纳米孔阵列传感器示意图及测试光路^[44]; (e) 93 和 97 号汽油的实测透射光谱^[44]

Fig.3 (a) Left: Schematic of metal gratings supporting Spoof SPR, where the red and yellow regions represent photoresist and gold, Right: Schematic of the Otto Prism setup^[42]; (b) measured reflection spectra for different coupling gaps^[42]; (c) measured reflection spectra of different analytes at $g=70\ \mu\text{m}$ ^[42]; (d) schematic of the metal hole array THz sensor and the THz-TDS^[44]; (e) measured transmission spectra of 93# and 97# gasoline samples^[44]

的传感灵敏度,相比于前述棱镜耦合的方法,是非常高的水平。不过,由于周期结构的引入导致电磁场更多的进入到金属内,因此类似可见光波段的 SPR,其 Q 值很小仅为 6。而且,由于频率移动量接近系统的分辨率,误差较大,分辨难度还是较大,综合器件的品质因数 FOM 为 13。Maier 课题组在之后的研究中,采用散射边缘耦合机制与短时傅里叶变换方式相结合来替代之前棱镜耦合的方式来激发 Spoof SPR,并且实验获得了一系列待测物质的色散关系,其中待测物折射率最小为空气 $n=1$,最大为甘油 $n\approx 1.85$,从而说明 Spoof SPR 可以实现宽波带的太赫兹传感^[47]。

2.2 基于超材料的太赫兹传感器

超材料一般是指基于人工周期微结构且具有特殊电磁特性的结构^[48-49],其微结构的特征尺寸远小于对应的波长,因此可应用等效介质模型,构建出超出自然材料所具电磁特性的人工材料,比如负折射^[50],光频磁共振^[51],超高介电常数^[52]等。对于仅有一层

微结构即二维平面周期结构的情况,也称之为超表面^[53-56]。超材料电磁器件由于可以从广义的“结构分子”层面去构筑,因此具有对电磁波各种矢量参数极高自由度的调控能力,对于传感器研发而言,获得了很大的设计空间。在超材料结构太赫兹传感方面,典型结构代表包括:(1) 开口谐振环 SRR (Split Ring Resonator)^[57-59], (2) 超材料吸收器 MA (Metamaterial Absorber)^[60-61]。

2.2.1 基于 SRR 结构的太赫兹传感器

开口谐振环 SRR 是最为典型的一类超材料结构,其结构如图 4(a)所示。由于太赫兹频率接近微波,其构成材料多半为金属,因此开口处可视为一个电容,而环可以看作为电感。从等效电路模型角度看,这个结构就构成了 LC 振荡电路,共振频率为^[57]:

$$\omega_{LC}=(LC)^{-1/2}=\frac{1}{\sqrt{L}\sqrt{\epsilon_0\int^V\epsilon(v)E(v)dv}} \quad (1)$$

SRR 结构参数决定了共振频率,通过合适选择

可以在太赫兹波段任意频率实现共振, 对应结构透射谱中的低谷。开口环周围环境的变化势必引起等效电容和电感的变化, 因此也将改变共振频率, 通过检测这个变化就可实现传感。

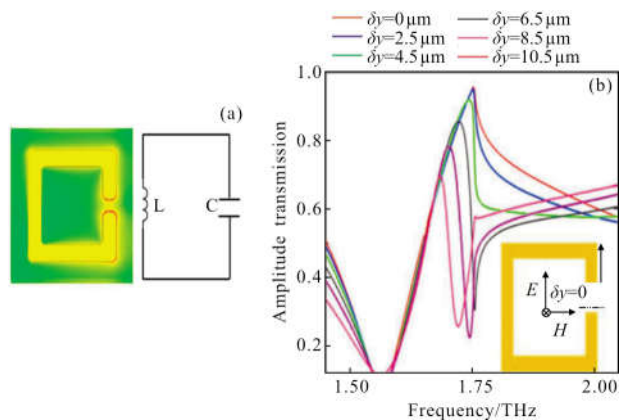


图 4 (a)开口谐振环结构的电场分布^[57]及等效电路图;(b)SRR 开口的不对称性对透射光谱的影响^[62]

Fig.4 (a) Electric field distribution^[57] and the equivalent circuit of split ring resonator; (b) transmission spectra of asymmetrical SRR with different shift of the opening gap^[62]

Xu 等利用开口谐振环构建超材料实验探测链霉菌亲和琼脂糖(SA)^[63]。实验中分别在硅基底和石英基底上制作 SRR 构建超材料, 将 50 μl 的 SA 与生物素与十八硫醇(ODT)和生物素混合制成待测样品。采用石英基底的超材料会产生两个共振, 在高频共振 $\sim 2 \text{ THz}$, 有样品会使得结构共振峰产生 6.76 GHz 的移动, 且 Q 值小于 10, 因此说明 SRR 超材料可以用于物质的检测, 但是检测的灵敏度有限, 传感性能有待提升。针对这个问题, 研究者提出了非对称结构 SRR。如图 4(b)所示, Singh 等系统地研究了非对称的开口谐振环结构开口位置和入射光偏振的影响。这种非对称结构的 SRR 会产生三种共振机制, 分别是 LC 共振、偶极子共振和四偶极子共振, 同时发现随着开口距离 SRR 中心越远, 将会产生高 Q 的四偶极子共振峰。并且对共振处的表面电流分布做了模拟, SRR 不对称导致这种四偶极子共振时电流分布会非常微弱地散射电磁场, 并且极大地减少了耦合到自由空间的能量, 从而导致辐射损耗的巨大减少, 最终产生非常尖锐的共振峰。从图 4(b)中可以看到, 四偶极子共振的共振峰在 1.75 附近, 当光水平偏振入射时, 可以产生高达 95 的 Q 因子。因此这种将场很好局域的四偶极子模式将会对太赫兹的生物传感

提供了新的手段。

除了以上提及的单开口的 SRR 结构外, 还有一些结构更加复杂的 SRR 结构用于传感。如图 5(a)所示, Debus 和 Bolivar 设计了双开口不对称的 SRR, 对于完美导体材料, 计算的 Q 因子高达 40, 同时场会局域在双开口环周围。计算表明将介电常数为 3.2, 厚度为 10 nm 的物质沉积在结构表面, 会导致位于 867 GHz 处的共振峰发生 5 GHz 的移动, 即 $S = 6.3 \text{ GHz/RIU}$ ^[64]。Singh 分析了双开口不对称 SRR 结构中 Fano 共振和四偶极子共振的太赫兹传感特性, 如图 5(b)所示, 四偶极子共振 Q 值高达 65, 而 Fano 共振的 Q 因子也达到 28, 远高于之前的结构产生的共振峰。在待测物的厚度保持在 16 μm 时, Fano 共振可以实现最大 49.3 GHz/RIU 的灵敏度, 而四偶极子可以实现 33 GHz/RIU 的灵敏度, 但是 FOM 依然小于 10^[65]。Bettiol 等采用回字形嵌套的双 SRR 结构, 并在其表面涂覆介电常数为 2.7 的光刻胶, 采用 THz-TDS 测量了光谱特征, 如图 5(c)所示, 其中一层光刻胶的厚度约 8 μm , 两层约为 12 μm , 三层约为 16 μm 。可以实现共振峰 640 GHz 实现了近 120 GHz 的峰位移动, 传感灵敏度最高达到 180 GHz/RIU, Q 值小于 5^[58]。随后, Bettiol 等又研究 SRR 的横纵比和衬底的厚度来调节 SRR 的 LC 谐振和灵敏度, 研究结果表明当在薄衬底上采用较低的 SRR 的结构对外界折射率改变会更加的敏感, 在传感领域展现出更大的潜能^[66]。Omenetto 设计了如图 5(d)所示的四开口 SRR 结构, 不同偏振下电磁场局域在不同方向的开口处。在纯硅衬底和附有氮化硅薄膜的硅衬底上分别制备了这种传感器, 对于不同的蛋白质薄层, 采用附有氮化硅薄膜的硅衬底的传感器表现出更高的灵敏度^[67]。这可能来源于氮化硅更低的折射率, 因此光场更多的扩展到 SRR 表面区域。此外, Singh 课题组利用超薄、低折射率、柔性的聚酰亚胺作为衬底材料, 在表面做双开口不对称的金属 SRR 结构, 可以实现结构两侧传感, 同时材料可以任意弯曲, 从而可以实际应用于可穿戴的太赫兹传感器中(图 5(e))。该传感器的性能和衬底的厚度有关, 当衬底的厚度在 5 μm 时, 可以实现归一化的灵敏度为 0.06 RIU⁻¹, Q 因子为 4.8, FOM 为 0.3。究其原因, SRR 发生等离子共振时, 能量将会有一部分消散在衬底部分, 因此减小衬底的厚度, 器件的性能得到提高, 这同时也是

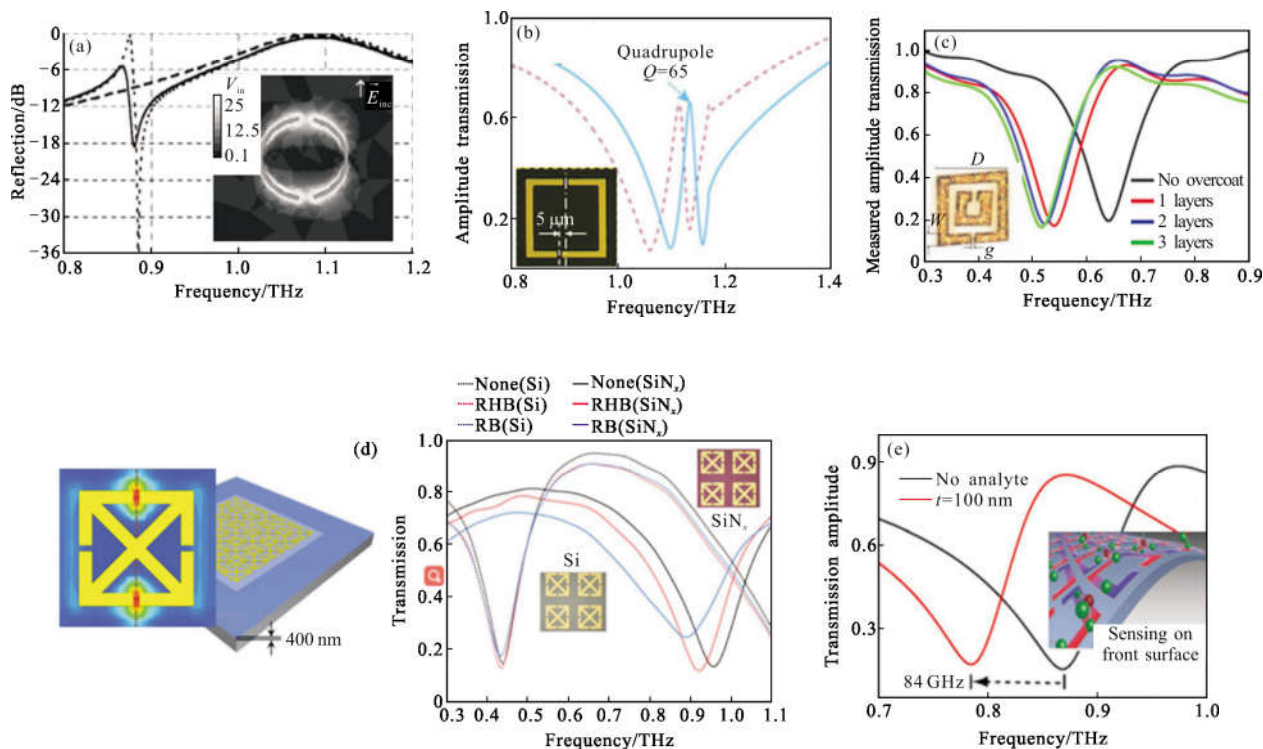


图 5 (a)对称/不对称结构 SRR 传感器的反射光谱,其中实线为不对称金属材料 SRR,虚线为对称结构金属材料 SRR,点线为采用完美导体材料的不对称 SRR。插图:双开口不对称金属材料 SRR 在共振频率的电场分布^[64];(b)非对称双开口 SRR 结构有无待测物时四偶极子共振产生的透射光谱^[65];(c)嵌套 SRR 太赫兹传感器涂覆不同厚度光刻胶的实验透射光谱及结构示意图^[58];(d)硅衬底和附有氮化硅薄膜的硅衬底上的四开口 SRR 传感器针对不同蛋白质薄膜样品的透射光谱,左:四开口 SRR 示意图及其共振频率电场分布图^[67];(e)柔性 SRR 传感器及其传感特性

Fig.5 (a) Reflection spectra of asymmetric dual-opening gold SRR (solid line), symmetric dual-opening gold SRR (dashed line), asymmetric dual-opening PEC SRR (dot line). The E-field in asymmetric dual-opening gold SRR shows a strong concentration in the gap^[64]; (b) the transmission spectra of the quadrupole resonance in the asymmetric dual-opening SRR with and without the analyte^[65]. (c) experimental transmission spectrum for the cascaded SRR coated with photoresist ($\epsilon=2.7$) of different thicknesses. Inset: the schematic diagram of the cascaded SRR^[58]; (d) transmission spectra for different analytes of four-opening SRR on both silicon substrate and SiN_x coated silicon substrate. Left: schematics of the four-opening SRR and the resonant field distribution^[67]; (e) flexible SRR sensor and its thin film sensing performance^[68]

该文献中采用正面传感的灵敏度远高于背面传感的原因。

2.2.2 基于三维变形 SRR 结构太赫兹传感器

以上 SRR 传感器都是基于平面内的开口环结构,共振模场局域在开口间,并且一部分模场在衬底内部,限制了电磁场与被测物的相互作用。三维 SRR 结构的传感器相继被提出^[69]。如图 6(a)所示,与前述平面型的 SRR 结构相比,电磁场扩展到三维空间,可以增大与待测物质的相互接触面积,从而提高传感的灵敏度。计算得到的表面电流分布如图 6(b)所

示^[70],可以看到在开口处能量的密度最大同时采用金属孔支撑垂直 SRR 结构,会使得更少的能量消散在基底上,这样会大幅提高有效能量与待测物质的相互作用,进而提高灵敏度。Cheng 等设计了由四个 U 型 SRR 构成的超材料传感器,如图 6(c)所示,计算得到传感灵敏度达到 1 445 nm/RIU, Q 因子达到 41.2, FOM 达到 28.8^[71]。Yan 等设计了双开口垂直面型的超材料太赫兹传感器,如图 6(e)所示,计算得到灵敏度为 788 GHz/RIU, Q 因子约为 20, FOM 约为 10^[72]。

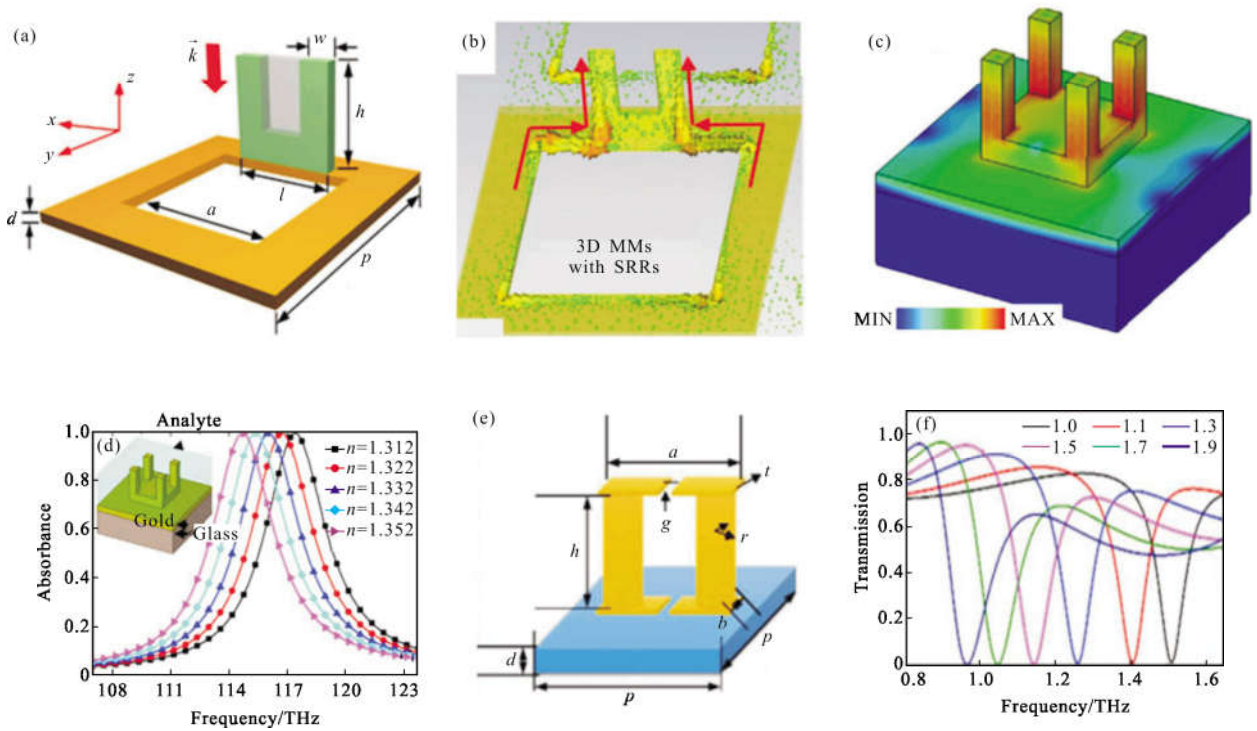


图 6 (a)和(b)三维 SRR 超材料单元结构示意图及其共振频率时单元结构的表面电流分布^[70]; (c)组合 U 型环的三维超材料结构示意图及其共振频率处的功率损耗密度^[71]; (d), (c)结构仿真的传感特性; (e)和(f)基于双开口垂直 SRR 的超材料单元结构示意图及其仿真的传感特性^[72]

Fig.6 (a) Schematic of the unit cell of a 3D SRR metamaterial; (b) on resonance surface current distribution in (a)^[70]; (c) schematic of the unit cell of a 3D SRR metamaterial with combined U-rings and the power loss density distribution^[71]; (d) simulated absorption spectra of the structure in (c) with different analyte indexes; (e) schematic of the unit cell of a 3D metamaterial with dual-opening vertical SRR and (f) the calculated transmission spectra versus the analyte indexes^[72]

2.2.3 基于超材料吸收器的太赫兹传感器

超材料吸收器是另一类典型的超材料结构,通常由金属-介质-金属(Metal-dielectric-metal, MDM)三层结构构成^[73],如图 7(a)所示。其中底层金属膜厚度超过穿透深度,因此入射太赫兹波没有透射,而顶层金属为周期性微结构,介质层的厚度一般都远小于波长。这个结构中上下两层金属非常靠近,通过耦合形成了所谓的磁共振模式。其典型特征就是共振频率处,上下层金属表面电流反向,从而构成了一个垂直截面中的电流回路,因此支持磁共振。从能流图中可以看到(图 7(d)),入射能量垂直向下传输,并通

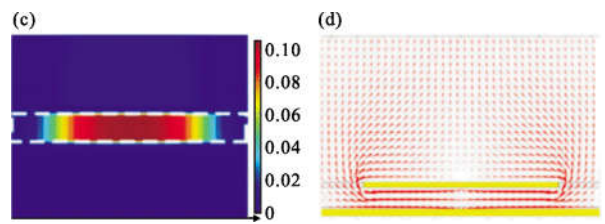
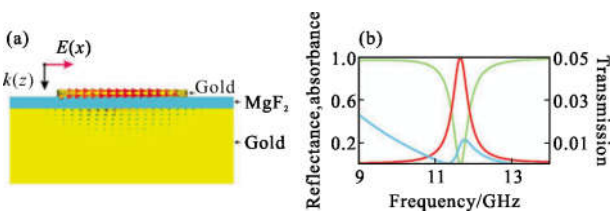


图 7 (a)超材料吸收器结构示意图及其共振频率时表面电流分布^[74]; (b)超材料吸收器的反射、吸收和透射图,蓝线表示透射,红色表示吸收,绿色表示反射^[75]; (c)共振频率处磁场分布仿真结果^[61]; (d)共振频率处能流分布仿真结果^[61]

Fig.7 (a) Schematic of metamaterial perfect absorber (MPA) and the on resonance surface current distribution^[74]; (b) reflection (green line), absorption (red line) and transmission (blue line) spectra of MPA^[75]; (c) resonant magnetic field distributions of MPA^[61]; (d) calculated power flux of MPA at resonance^[61]



过顶层金属狭缝进入到介质层中,并形成横向传输^[61]。通过优化设计,这种耦合导致的磁共振可以实现极强的电磁场局域(图 7(c))^[61],并获得共振频率处的零反射和零透射,即完全吸收(图 7(b))^[73]。

基于完美吸收的超材料的传感器研究广泛,通常将待测物质与表层金属接触来传感,如图 8(a)所示^[75]。Giessen 最早设计了红外波段的超材料吸收器,顶层金属采用圆形微盘,实验测量的空气和水作为被测物时的吸收光谱如图 8(b)所示,灵敏度达到 400 nm/RIU, FOM 达到 87^[74]。Cattoni 等同样设计了红外波段的超材料吸收器,顶层金属采用方形光栅,采用二阶模式进行传感,从而实验获得了 405 nm/RIU

的灵敏度和约 21 的 FOM^[75]。同样在太赫兹领域也可以将超材料吸收器应用于传感领域。图 8(c)中 Singh 等采用顶层十字形金属微结构的设计获得的 $Q=11.6$ 和 $FOM=2.5$ ^[76]。然而,从图 7(c)所示共振磁场分布可以看到,能量集中在介质层,若将待测物放置在介质层将极大地促进光与物质的相互作用,进而提高传感性能。因此笔者课题组提出了如图 8(e)所示的器件结构^[61],将微流通道与 MDM 的超材料结构进行一体化集成,其中衬底是在硅材料上生长一层薄膜,盖层采用在石英衬底上制作十字型的金属微结构,金属膜和金属微结构相对并且其间就是微流通道。从图 8(f)可以看到,吸收的效率高于

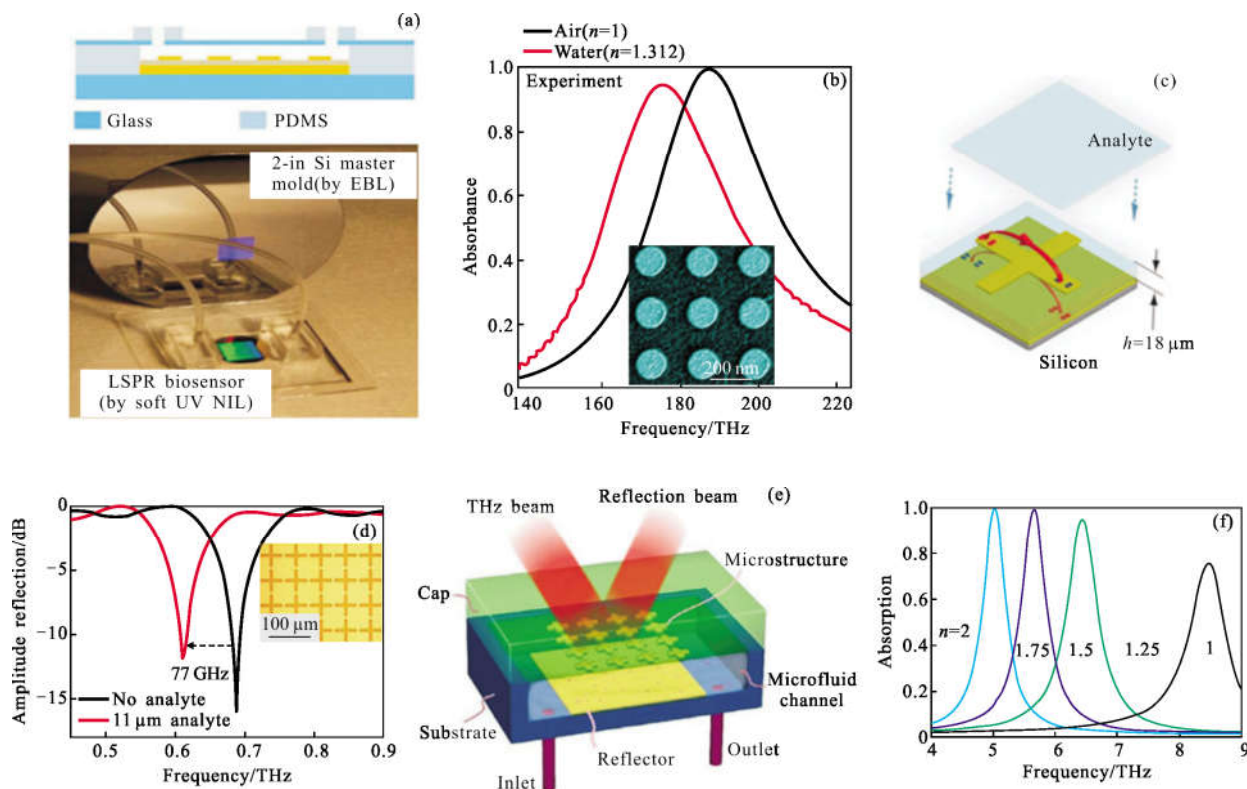


图 8 (a) 表面集成微流通道的超材料吸收器结构的太赫兹传感器示意图和实物照片^[75]; (b) 红外超材料吸收器在不同被测物情况下的吸收谱测试结果, 插图: 样品的 SEM 示意图^[74]; (c) 表面集成微流通道的十字形结构的太赫兹超材料吸收器单元示意图^[76]; (d) 超材料结构表面涂覆 11 μm 的光刻胶和不涂覆时的反射光谱图; (e) 微流通道集成于器件内部的一体化集成超材料吸收器太赫兹传感器示意图^[61]; (f) 计算不同折射率液体对应的仿真吸收光谱^[61]

Fig.8 (a) Schematic and photograph of the metamaterial absorber sensor with integrated microfluidic channel on the surface^[75]; (b) Measured absorption spectra of the infrared metamaterial absorber sensor. Inset: the SEM image of the sample^[74]; (c) Schematic of the unit cell of the cross metamaterial absorber sensor with integrated microfluidic channel on the surface^[76]; (d) Measured reflection spectra of the device with and without 11 μm photoresist on the surface^[76]; (e) schematic of the metamaterial absorber integrated microfluidic (MAIM) sensor with integrated microfluidic channel inside the device^[61]; (f) Calculated absorption spectra with different refractive index of liquid channel^[61]

70%,而在折射率大于 1.75 时已接近完美吸收。器件的灵敏度达到 3.5 THz/RIU,远高于参考文献[74–76]的传感灵敏度,这得益于大幅提高的电磁场与被测物的空间重叠。但是,这种金属超材料结构的损耗都较高, Q 因子仅为 10,导致 FOM 也小于 10。

2.2.4 基于多共振峰超材料的太赫兹传感器

通过单元结构设计,可以在超材料中实现多个共振峰,从而获得较大频率范围的传感。如图 9(a)所示,Wang 等在硅衬底上制备 SRR 超材料结构,在 1.75 THz 和 0.51 THz 各存在一个共振模式,灵敏度为 60 GHz/RIU, Q 值不到 7,FOM 不足 1^[77]。O'Hara 采用嵌套 SRR 结构构建超材料传感器,如图 9(b)所示,也支持两个共振模式,灵敏度大概为 60 GHz/RIU, Q 值小于 10^[78]。Zhai 等采用十字金属的 MDM 吸收器结构进行太赫兹传感实验,如图 9(c)所示,在 1~

3 THz 内产生两个共振峰,高阶模的传感灵敏度远远高于基模,高阶模的传感灵敏度(1.48 THz/RIU)和 Q 值 (48) 均为基模的 7 倍左右,FOM 高达 24.6^[79]。Wang 等则采用不对称十字金属 MDM 吸收器结构,如图 9(d)所示,在 0.8~3.3 THz 范围内形成三个吸收峰,前两个峰是由不对称的金属十字产生的基模共振或者局域的电磁响应产生的,而第三个峰是由相邻结构之间的共振产生。第三个吸收峰随着周围环境折射率变化较为显著,理论可以实现 1.6 THz/RIU 的传感灵敏度和 14.55 的 FOM^[80]。Yahiaoui 等采用薄层的柔性聚合物作为 MDM 结构的中间层,制作了柔性、超薄的太赫兹超材料吸收器,如图 9(e)所示,在 0.15~0.85 THz 范围内也获得三个共振吸收峰,分别获得 54、119、139 GHz/RIU 的传感灵敏度^[80]。该结构具有良好的机械灵活性和传感稳定性,在集成

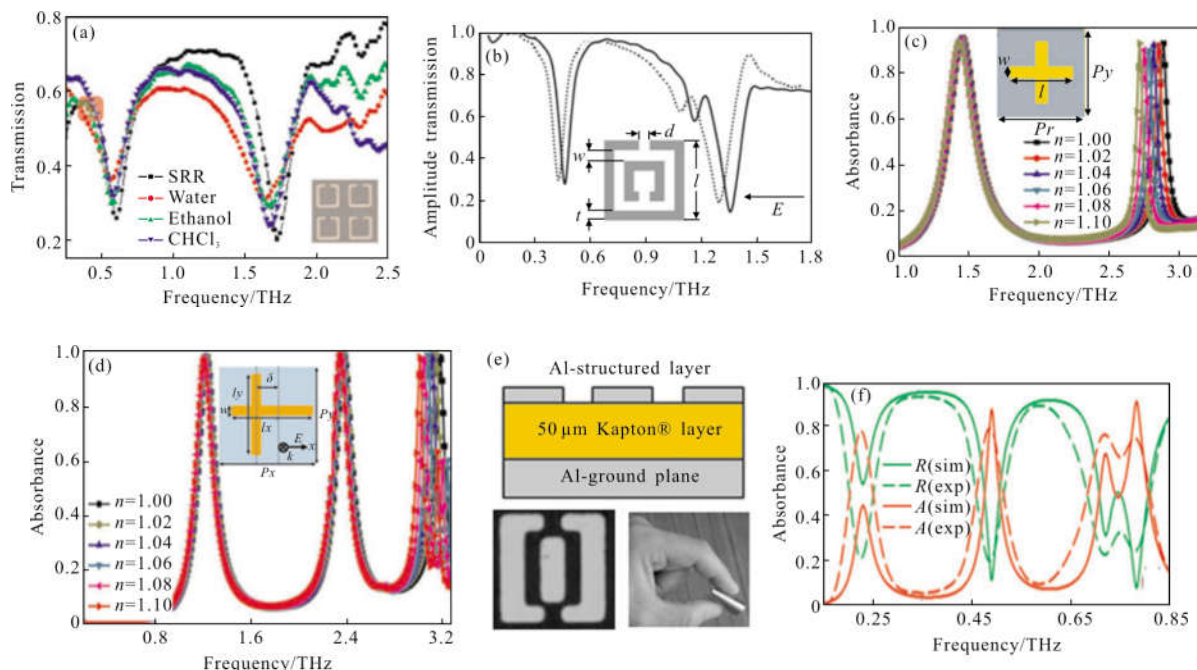


图 9 多共振峰的超材料传感器

Fig.9 Multi-resonance metamaterial sensors

于芯片的太赫兹传感器方面有潜在的应用前景。

2.3 基于光子晶体结构的太赫兹传感器

光子晶体(Photonic Crystal, PC)是另一种常见的微纳光子结构,其典型特征是具有类似电子禁带的光子禁带,因此可以形成良好的光场局域,被广泛用于光学传感^[81]。光子晶体通常由不同折射率的材料周期性排列而形成,这类似与原子晶格,由于布拉格

散射形成了特有的能带结构,这是物理机制上光子晶体与超材料的区别。从物理结构上看,光子晶体的周期与波长相比拟,而超材料结构的周期远小于波长。通过人为破坏光子晶体的周期性,即插入缺陷结构,就可以形成光场局域的谐振腔,其共振频率取决于腔模的等效光程。因此,通过将被测物引入到缺陷态场分布所在的地方,其折射率的变化将影响光程,

从而改变腔共振的频率,实现传感。

如图 10(a)所示, Benz 等基于 PC 谐振腔量子级联激光器构建了一种工作在 THz 波段的气体传感器,当气体充入到 PC 的柱子之间时会影响光子晶体腔的谐振,从而改变发光光谱。如图 10(b)所示,最大实现激光的中心频移 1.5 GHz, 归一化灵敏度为 0.025/RIU, 在激发频率 2.5 THz 处可以实现高达 2.5×10^7 的 Q 因子, 折射率探测达到 1.6×10^{-5} RIU^[26]。Chang 基于柱阵列结构的光子晶体制作了太赫兹波段的微流传感器,如图 10(c)所示,相比于平面硅衬底,光子晶体结构支持一个谐振,当被测液体在柱子阵列间隙中流过时,就形成了共振峰的频移。文中实验测量了丙酮、乙醇和石油在 1 THz 附近的透射光谱,共振峰半高宽约 0.2 THz, Q 因子不足 10, 得到的光谱的峰位移动 0.02 THz^[82]。这种光子晶体结构与

太赫兹波入射方向垂直,因此太赫兹波与被测物的作用长度有限。Hanham 等展示了一个片内光子晶体传感器,光在光子晶体平面内波导中传输,大大增强了传感灵敏度,获得纳升级流体样品检测的能力。如图 10(d)所示, Q 超过 1000, 然而光子晶体腔的传感区域太小,峰位移动仅在 MHz 级别,归一化灵敏度在 1.5×10^{-4} RIU⁻¹[83]。Fujita 等制作了平面波导集成的光子晶体腔太赫兹传感系统,其中采用光子晶体微腔作为谐振器,同样采用 PC 的一部分作为传感区域,光在结构平面内入射,并将共振隧穿二极管(RTD)作为信号产生器和探测器,如图 10(e)所示。此太赫兹传感器在共振频率 318 GHz 处 Q 超过 10000 (图 10(f)),但在聚酯胶带传感实验中展现的归一化灵敏度仅为 0.002/RIU,综合得到的 FOM 小于 20^[27]。

可见,太赫兹光子晶体腔传感器可以实现非常

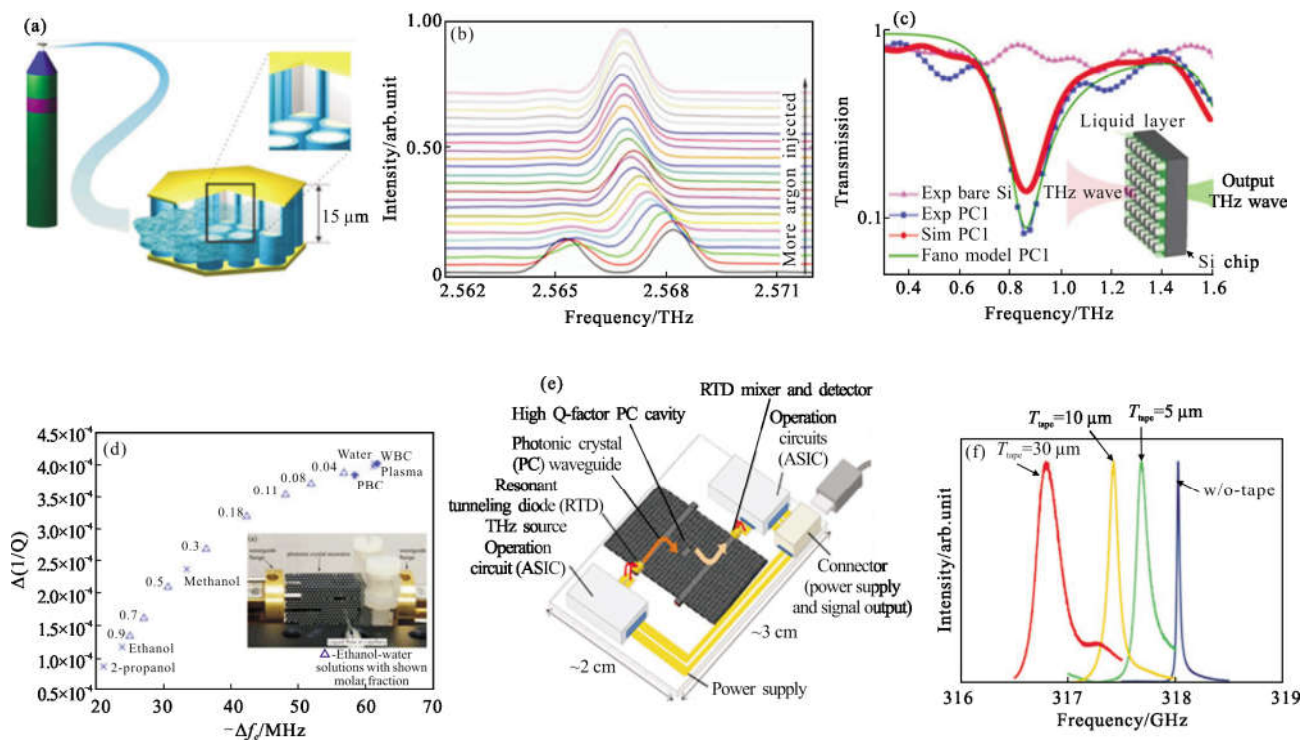


图 10 (a)和(b)基于光子晶体量子级联激光器的传感器示意图及其气体传感光谱图^[26]; (c)垂直入射型光子晶体传感器及计算和测试的透射光谱^[82]; (d)片上光子晶体腔传感器的共振峰频移和品质因子的倒数的变化关系^[83]; (e)和(f)基于光子晶体腔和共振隧穿二极管的太赫兹传感模块示意图及其对不同宽度聚酯胶带进行检测的光谱图^[27]

Fig.10 (a) Schematic of the THz sensor based on PC quantum cascaded laser^[26]; (b) gas sensing with the device in (a); (c) Calculated and measured transmission spectra of a PC sensor working in the normal incidence^[82]; (d) change of resonance peak versus $1/Q$ in an in-plane PC cavity THz sensor^[83]; (e) schematic of a waveguide integrated in plane PC sensor, where the THz signal is detected by the integrated RTD; (f) experimental spectra of the device in (e) for various tape thicknesses^[27]

高的 Q 值, 电磁场强局域在光子晶体腔内, 然而由于传感区域相对整个结构来说太小, 导致与被测物作用不足, 灵敏度非常低。

2.4 基于波导谐振腔结构的太赫兹传感器

集成光学波导传感技术也是传感领域的一个重要分支。波导传感器主要利用的是波导的倏逝波进行传感。波导支持不同的传导模式, 与波导的有效介质折射率有关。当波导周围的物质的折射率发生变化时, 将会导致波导有效介质折射率的变化, 传导模式发生变化, 导致共振峰位的移动, 因而可以用来对物质的折射率进行检测。

如图 11(a)所示, Mittleman 等制备了包括两个共振腔的平行板太赫兹波导传感器, 两个共振腔分别实现 $1.21 \times 10^6 \text{ nm/RIU}$ and $6.77 \times 10^5 \text{ nm/RIU}$ 的传感灵敏度, Q 值分别为 26 和 145, FOM 分别为 23 和 $85^{[29]}$ 。

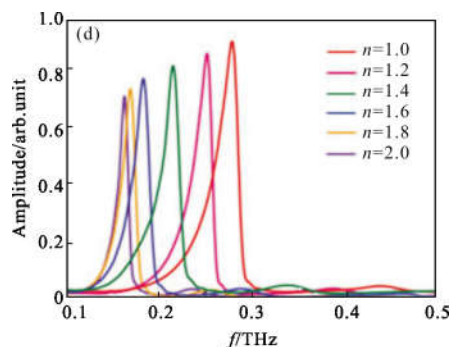
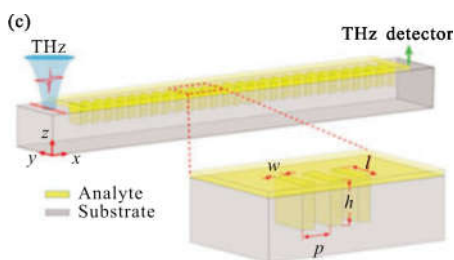
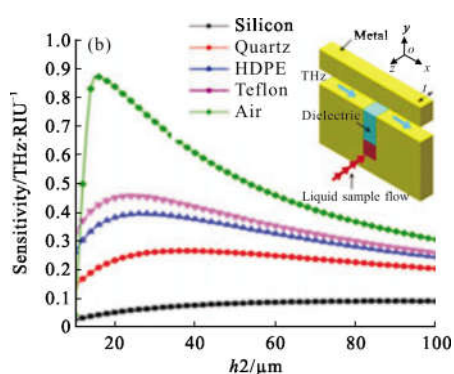
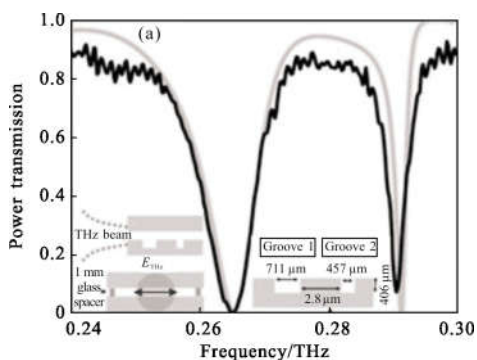


图 11 (a)带有两个凹槽的平行板波导传感器及不含待测物质时的理论(灰线)和实验(黑线)光谱^[29]; (b)设计传感器灵敏度与生物样品容量的高度变化的关系, 插图: 三维 MDM 太赫兹波导传感器的示意图; (c) 太赫兹表面等离子体光波导传感器示意图, 被测物在一维周期性阵列的金属凹槽中^[30]; (d)不同折射率被测物填入图(c)所示结构中对应的计算透射光谱^[30]

Fig.11 (a) Power transmission spectra for the empty parallel-plate waveguides (PPWG) sensor, experimental (black curve) and from mode-matching theory (gray curve). Inset of the PPWG sensor and experimental setup^[29]; (b) the relationship of sensitivity of the proposed structure and the height of biomaterial sample layer. Inset: 3D schematic of a THz MDM waveguide; (c) schematic of THz plasmonic waveguide sensor, where the analyte is in the 1D periodic metal grooves^[30]; (d) simulated transmission spectra of the device in fig. (c) for analytes with different refractive indices^[30]

Li 等设计了一种基于 MDM 波导结构的太赫兹传感器, 在底层的金属中有两个隔断, 分别作为电介质和待测流体通道, 传感灵敏度达到 0.457 THz/RIU , Q 仅为 2(图 11(b))^[84]。Islam 等报道了平面型的表面等离子体波导太赫兹传感器^[30], 如图 11(c)所示, 波导结构由以为周期性的亚波长尺度的矩形凹槽构成, 并将不同折射率的聚酰亚胺物质填充在凹槽中进行传感, 发现随着待测物量的增加, 器件的灵敏度和品质因数也随之增加。随后设计了 V 型槽的波导结构与矩形槽的波导结构进行传感灵敏度和品质因数的对比, 发现 V 型槽波导的性能更好, 灵敏度达到 0.13 THz/RIU , 品质因数高达 16.75。综上, 太赫兹光波导传感器的灵敏度在 GHz 的级别, 优化的 Q 值可超过 100, 器件 FOM 较高。

2.5 其他基于微纳结构的太赫兹传感器

除了以上的各种微结构,新材料如石墨烯也被引入太赫兹传感器的研制中,比如,利用石墨烯在太赫兹波段的表面等离子体共振效应。如图 12(a)所示,Zeng 等利用亚波长的石墨烯微盘和金属微环构成一个结构单元制作了太赫兹传感器,实现 1.9 THz/RIU 的传感灵敏度和 6.6 的 FOM,而且传感的波段可以通过实时调节石墨烯的费米能级来实现(图 12(b))^[85]。Liu 等提出由两种基于不同半径的石墨烯环周期性排列而形成的太赫兹传感器结构,如图 12(c)所示。值得注意的是由两个相邻环的弱相互作用产生了类 EIT 现象,即电偶极子共振诱导明模,理论传感灵敏

度达到 830 GHz/RIU,品质因数达到 17^[26]。此外,He 等在石墨烯材料的表面制作凹槽制作了超材料的太赫兹传感器,如图 12(d)所示,其中深紫色为石墨烯材料,一个结构单元中包含有两个线状狭缝和一个 SRR 狭缝。该结构同样可以产生类 EIT 效应,从而可以实现 177.7 GHz/RIU 的传感灵敏度和高达 59.3 的 FOM^[86]。今年,Fan 等在金属表面制作方形介质柱阵列并涂覆石墨烯层制成了太赫兹传感器,如图 12(e)所示,从而可以实现多个等离子体共振模式的激发和多频段的完美吸收。三个峰进行传感,模拟得到当待测物质厚度 10 μm 时,产生的灵敏度分别达到 1.402、1.687、1.643 THz/RIU^[87]。

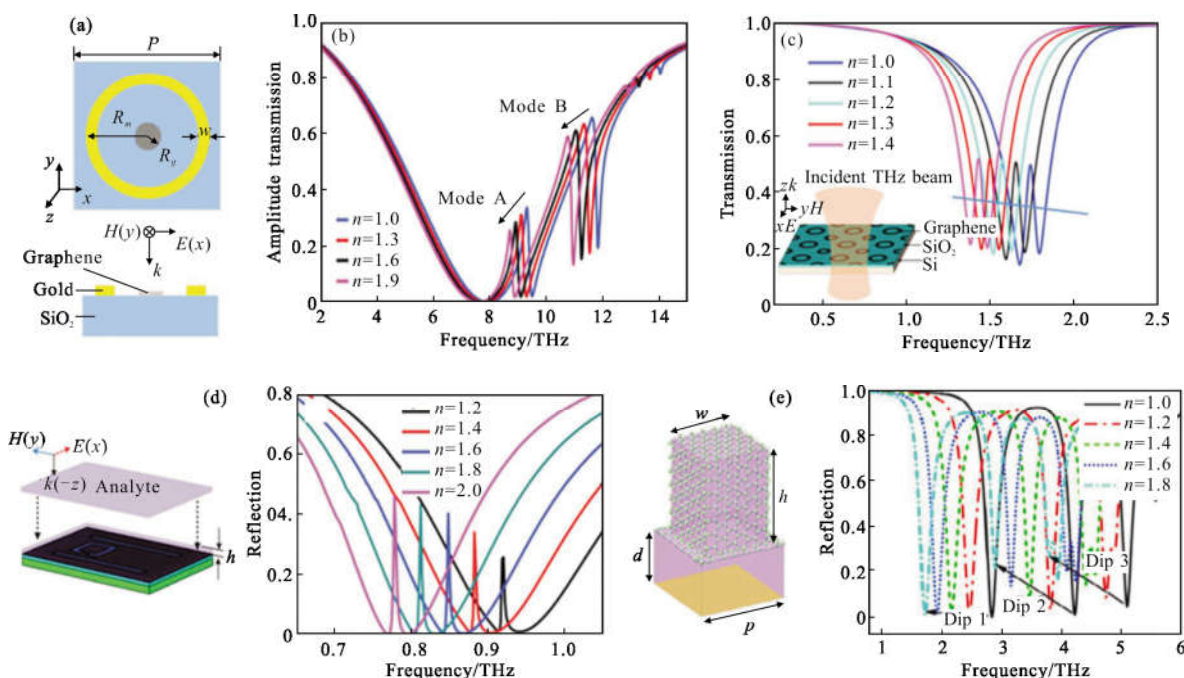


图 12 (a)石墨烯与金属环复合单元结构的太赫兹超材料传感器示意图^[85];(b)是图(a)结构针对不同折射率的表面被测物计算得到的透射光谱^[85];(c)石墨烯纳米环太赫兹超材料传感器的透射光谱^[26];(d)互补石墨烯超材料结构单元传感示意图包含两个线状狭缝和一个 SRR 狭缝,模拟 11 μm 厚的待测物折射率变化的反射光谱^[86];(e)在金基底上将石墨烯涂覆在方形介质阵列所构成的超材料示意图,及模拟待测物质折射率由 1.0 到 1.8 变化、待测物质厚度为 10 μm 时反射光谱

Fig.12 (a) Schematic of the unit cell of graphene disk/metal ring THz metamaterial sensor^[85]; (b) simulated transmission spectra of the device in (a) with different analytes^[85]; (c) transmission spectra of graphene nanoring metamaterial with refractive index n ranging from 1.0 to 1.4^[26]; (d) unit cell schematic of complementary graphene metamaterial composed of two wire-slot and one SRR-slot. Reflection spectrum for different refractive indexes with 11 μm thick analyte layers^[86]; (e) Schematic view of the graphene metamaterial that comprised of square dielectric pillar arrays covered by graphene monolayer and the bottom is gold. Calculated reflection spectra with the analyte refractive indices varying from 1.0 to 1.8, and the analyte thickness fixed as 10 μm

2.6 基于生物特异性的太赫兹传感器

以上提及的传感器大多通过分析不同物质的光谱移动来确定物质的种类,不同物质折射率的实部

的变化影响共振条件,产生峰位的移动。这种方式具有普适性,同样可以应用于可见光与红外波段。然而,在太赫兹波段,很多物质有丰富的光谱信息,比

如糖类、氨基酸、水和肽链等具有特征吸收特性,而 DNA、蛋白质和 RNA 虽然在太赫兹波段没有特征吸收,但是它们的振动能级处于太赫兹波段,THz 谱对它们的构象变化十分敏感^[88],因此可以利用物质本身在太赫兹波段的信息同时结合微纳结构这样可以更加准确地实现特定物质的探测与传感。比如 Nagel 等利用功能化的平板谐振器做传感,先在传感器表面固定探针分子,通过对太赫兹时域信号的分析,从而可以检测特定的序列的 DNA 分子^[6]。Bui 等利用超薄的超材料来分辨牛血清蛋白,该超材料采用的是在蓝宝石衬底上做台状的超材料,结构单元是台状的 Ag-Si-Ag,可以增强薄层物质在太赫兹的吸收信号。该结构的工作波段在 3~7 THz,试验中通过研究牛血清蛋白、罗丹明 6 G 以及 DTTCI 的透射光谱,从而发现该结构只能显著增强牛血清蛋白的太赫兹信号,从而可以用于该类蛋白质的精准检测^[89]。然而该类型的的太赫兹传感器也是依赖于微结构与太赫兹光的相互作用,因此设计合适的结构十分重要。

3 总结与展望

太赫兹技术由于其高分辨、低损伤和生物分子光谱指纹等特性,在生命科学中具有重要的潜在应用。传统依赖材料吸收特性的太赫兹光谱检测技术传感灵敏度较低,主要受限于太赫兹波的长波长,需要大量的被测物来进行检测。随着微纳光子技术的发展,各种新颖的光子效应可以实现空间光场的调控、光谱的剪裁,以及高品质因子的谐振,这些都有助于增强太赫兹波与被测物的相互作用,从而提高太赫兹传感器的性能。从文中总结的当前进展看,微结构太赫兹传感器主要包括 Spoof SPR 传感器,超材料结构传感器,光子晶体微腔和波导传感器等。通过对比发现:基于 Spoof SPR 的太赫兹传感器由于电磁场在金属微结构表面的强局域,其归一化传感灵敏度可以达到 1RIU^{-1} ,FOM 最高可达 50,具有较高的传感特性,然而由于 Spoof SPR 与可见光波段的 SPR 类似,需要光栅或棱镜耦合等波矢匹配技术来激发,因此使用起来的光路较为复杂。超材料结构传感器具有最大的设计自由度,可以通过优化单元结构、周期,以及不同基本单元结构的组合对透射和反射光谱的共振峰位置、峰宽、共振峰数目等等进行

任意的调控,适用性比较好。最基本的平面单 SRR 结构的超材料传感器的归一化灵敏度在 0.1RIU^{-1} 量级, Q 因子小于 10,传感性能一般。复杂 SRR 结构可以利用 Fano 共振或高阶共振如四偶极子等来提高 Q ,然而目前报道的 FOM 依然不足 10。三维 SRR 结构,即开口环不在同一平面内,而是垂直于周期结构平面,因此环开口处的强局域电磁场会在三维空间扩展,显著增加与周围被测物的接触,从而提高传感灵敏度。其归一化灵敏度为 1RIU^{-1} , Q 因子约 20 左右,FOM 达到 10。超材料传感器的另一种类型是 MDM 结构的超材料吸收器,可以获得较高的归一化传感灵敏度, 0.6RIU^{-1} ,但半高宽较大, Q 因子 10 左右,导致 FOM 不足 10。基于 PC 谐振的传感器,可以获得超高的 Q 值,达到 10 000,但是小的传感区域导致灵敏度较低,最终的 FOM 不超过 20。波导结构种类较多,归一化灵敏度可以达到 1RIU^{-1} 的级别, Q 因子可以达到 100,FOM 可以接近 100,是有可能进一步提高太赫兹传感器性能的方式。除了这些在传统金属介质材料中的微结构,石墨烯的微结构支持表面等离子体共振,也具有较高的传感特性。为了提高太赫兹传感器性能,可以看到需要同时提高传感灵敏度和品质因子,表面等离子体共振和超材料结构都难以支持高 Q 的共振模式,光子晶体微腔能支持超高 Q 的谐振,然而传感灵敏度很有限。如果将高 Q 共振和强电磁场与被测物空间重叠同时实现,将是未来微结构太赫兹传感器的发展方向。我们近期提出了基于光栅狭缝波导的太赫兹传感器,由于狭缝波导的强电磁场局域,光栅波导的低损特性,和狭缝波导与微流通道的一体化集成,这类太赫兹传感器理论计算得到的 FOM 超过 600,大大高于已有报道。

综上,太赫兹传感技术发展非常迅速,通过各种人工微结构电磁调控技术的发展,和对新材料新物理方向的拓展,有望大幅提高当前太赫兹传感性能。此外,实现太赫兹传感器的动态可调,被测物质信息的快速提取,便携式和稳定性等是太赫兹传感技术实用面临的问题。

参考文献:

- [1] Siegel P H. Terahertz technology [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, 50(3): 910-928.
- [2] Yao Jianquan. Introduction of THz-wave and its applications

- [J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2010, 22(6): 703–707. (in Chinese)
- [3] Menikh A. Terahertz-biosensing Technology: Progress, Limitations, and Future Outlook[M]. Berlin: Springer, 2010: 283–295.
- [4] Chen T, Li S, Sun H. Metamaterials application in sensing [J]. *Sensors (Basel)*, 2012, 12(3): 2742–2765.
- [5] Yan Xin, Zhang Xingfang, Liang Lanju, et al. Research progress in the application of biosensors by using metamaterial in terahertz wave[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(9): 2365–2372. (in Chinese)
- [6] Nagel M, Richter F, Haring-Bolivar P, et al. A functionalized THz sensor for marker-free DNA analysis[J]. *Physics in Medicine & Biology*, 2003, 48(22): 3625.
- [7] Al-Douseri F M, Chen Y, Zhang X C. THz wave sensing for petroleum industrial applications[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2006, 27(4): 481–503.
- [8] O'Hara J F, Withayachumnankul W, Al-Naib I. A review on thin-film sensing with terahertz waves [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2012, 33 (3): 245–291.
- [9] Luther J M, Jain P K, Ewers T, et al. Localized surface plasmon resonances arising from free carriers in doped quantum dots[J]. *Nature Materials*, 2011, 10(5): 361.
- [10] Kim J B, Lee J H, Moon C K, et al. Highly enhanced light extraction from surface plasmonic loss minimized organic light-emitting diodes [J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(26): 3571–3577.
- [11] Ghaemi H F, Thio T, Grupp D E, et al. Surface plasmons enhance optical transmission through subwavelength holes[J]. *Physical Review B*, 1998, 58(11): 6779.
- [12] Pitchappa P, Manjappa M, Ho C P, et al. Active control of electromagnetically induced transparency analog in terahertz MEMS metamaterial [J]. *Advanced Optical Materials*, 2016, 4(4): 541–547.
- [13] Qu Y, Li Q, Gong H, et al. Spatially and spectrally resolved narrowband optical absorber based on 2D grating nanostructures on metallic films [J]. *Advanced Optical Materials*, 2016, 4(3): 480–486.
- [14] Nicholls L H, Rodríguez-Fortuno F J, Nasir M E, et al. Ultrafast synthesis and switching of light polarization in nonlinear anisotropic metamaterials [J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(10): 628.
- [15] Park J, Kang J H, Kim S J, et al. Dynamic reflection phase and polarization control in metasurfaces [J]. *Nano Letters*, 2016, 17(1): 407–413.
- [16] Huang Y W, Lee H W H, Sokhoyan R, et al. Gate-tunable conducting oxide metasurfaces [J]. *Nano Letters*, 2016, 16 (9): 5319–5325.
- [17] Sherrott M C, Hon P W C, Fountaine K T, et al. Experimental demonstration of >230 phase modulation in gate-tunable graphene-gold reconfigurable mid-infrared metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(5): 3027–3034.
- [18] Lee D E, Lee Y J, Shin E, et al. Mach-zehnder interferometer refractive index sensor based on a plasmonic channel waveguide[J]. *Sensors*, 2017, 17(11): 2584.
- [19] Chu C S, Lin K Z, Tang Y H. A new optical sensor for sensing oxygen based on phase shift detection [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 223: 606–612.
- [20] York T, Powell S B, Gao S, et al. Bioinspired polarization imaging sensors: from circuits and optics to signal processing algorithms and biomedical applications [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2014, 102(10): 1450–1469.
- [21] Maier S A, Andrews S R, Martin-Moreno L, et al. Terahertz surface plasmon-polariton propagation and focusing on periodically corrugated metal wires [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(17): 176805.
- [22] Joy S R, Erementschouk M, Mazumder P. Spoof surface plasmon resonant tunneling mode with high quality and Purcell factors[J]. *Physical Review B*, 2017, 95(7): 075435.
- [23] Garcia-Vidal F J, Martin-Moreno L, Pendry J B. Surfaces with holes in them: new plasmonic metamaterials[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2005, 7(2): S97.
- [24] Kats M A, Woolf D, Blanchard R, et al. Spoof plasmon analogue of metal-insulator-metal waveguides [J]. *Optics Express*, 2011, 19(16): 14860–14870.
- [25] Drexler C, Shishkanova T V, Lange C, et al. Terahertz splitting metamaterials as transducers for chemical sensors based on conducting polymers: a feasibility study with sensing of acidic and basic gases using polyaniline chemosensitive layer [J]. *Microchimica Acta*, 2014, 181(15–16): 1857–1862.
- [26] Liu C, Liu P, Yang C, et al. Terahertz metamaterial based on dual-band graphene ring resonator for modulating and sensing applications [J]. *Journal of Optics*, 2017, 19(11): 115102.
- [27] Okamoto K, Tsuruda K, Diebold S, et al. Terahertz sensor using photonic crystal cavity and resonant tunneling diodes [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2017, 38(9): 1085–1097.
- [28] Benz A, Deutsch C, Brandstetter M, et al. Terahertz active photonic crystals for condensed gas sensing [J]. *Sensors*, 2011, 11(6): 6003–6014.
- [29] Astley V, Reichel K S, Jones J, et al. Terahertz multichannel

- microfluidic sensor based on parallel-plate waveguide resonant cavities[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(23): 231108.
- [30] Islam M, Chowdhury D R, Ahmad A, et al. Terahertz plasmonic waveguide based thin film sensor [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(23): 5215–5221.
- [31] Rich R L, Myszka D G. Advances in surface plasmon resonance biosensor analysis [J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2000, 11(1): 54–61.
- [32] Haes A J, Van Duyne R P. A nanoscale optical biosensor: sensitivity and selectivity of an approach based on the localized surface plasmon resonance spectroscopy of triangular silver nanoparticles [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2002, 124(35): 10596–10604.
- [33] Limaj O, Etezadi D, Wittenberg N J, et al. Infrared plasmonic biosensor for real-time and label-free monitoring of lipid membranes[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(2): 1502–1508.
- [34] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, 424: 824.
- [35] Im H, Shao H, Park Y I, et al. Label-free detection and molecular profiling of exosomes with a nano-plasmonic sensor[J]. *Nature Biotechnology*, 2014, 32(5): 490.
- [36] Baaske M D, Foreman M R, Vollmer F. Single-molecule nucleic acid interactions monitored on a label-free microcavity biosensor platform[J]. *Nat Nanotechnol*, 2014, 9(11): 933–942.
- [37] Li Y C, Chang Y F, Su L C, et al. Differential-phase surface plasmon resonance biosensor [J]. *Analytical Chemistry*, 2008, 80(14): 5590–5595.
- [38] Pendry J B, Martin-Moreno L, Garcia-Vidal F J. Mimicking surface plasmons with structured surfaces [J]. *Science*, 2004, 305(5685): 847–855.
- [39] Hibbins A P, Evans B R, Sambles J R. Experimental verification of designer surface plasmons [J]. *Science*, 2005, 308(5722): 670–672.
- [40] Yu N, Wang Q J, Kats M A, et al. Designer spoof surface plasmon structures collimate terahertz laser beams[J]. *Nature Materials*, 2010, 9(9): 730–735.
- [41] Brongersma M L, Kik P G. Surface Plasmon Nanophotonics [M]. Berlin: Springer, 2007.
- [42] Ng B, Wu J, Hanham S M, et al. Spoof plasmon surfaces: a novel platform for THz sensing [J]. *Advanced Optical Materials*, 2013, 1(8): 543–548.
- [43] Huang W P. Coupled-mode theory for optical waveguides: an overview[J]. *JOSA A*, 1994, 11(3): 963–983.
- [44] Liu G, He M, Tian Z, et al. Terahertz surface plasmon sensor for distinguishing gasolines [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(23): 5695–5700.
- [45] Chen Q, Cumming D R S. High transmission and low color cross-talk plasmonic color filters using triangular-lattice hole arrays in aluminum films [J]. *Optics Express*, 2010, 18(13): 14056–14062.
- [46] Schröter U, Heitmann D. Surface-plasmon-enhanced transmission through metallic gratings[J]. *Physical Review B*, 1998, 58(23): 15419–15421.
- [47] Ng B, Hanham S M, Wu J, et al. Broadband terahertz sensing on spoof plasmon surfaces[J]. *ACS Photonics*, 2014, 1(10): 1059–1067.
- [48] Sihvola A. Metamaterials in electromagnetics [J]. *Metamaterials*, 2007, 1(1): 2–11.
- [49] Hao J, Yuan Y, Ran L, et al. Manipulating electromagnetic wave polarizations by anisotropic metamaterials [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(6): 063908.
- [50] Smith D R, Pendry J B, Wiltshire M C K. Metamaterials and negative refractive index [J]. *Science*, 2004, 305(5685): 788–792.
- [51] Linden S, Enkrich C, Wegener M, et al. Magnetic response of metamaterials at 100 terahertz [J]. *Science*, 2004, 306(5700): 1351–1353.
- [52] Zhang F, Zhao Q, Kang L, et al. Experimental verification of isotropic and polarization properties of high permittivity-based metamaterial [J]. *Physical Review B*, 2009, 80(19): 195119.
- [53] Cong L, Manjappa M, Xu N, et al. Fano resonances in terahertz metasurfaces: a figure of merit optimization [J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(11): 1537–1543.
- [54] Khorasaninejad M, Chen W T, Devlin R C, et al. Metalenses at visible wavelengths: diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging [J]. *Science*, 2016, 352(6290): 1190–1194.
- [55] Zheng G, Mühlenbernd H, Kenney M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency [J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(4): 308.
- [56] Pors A, Nielsen M G, Eriksen R L, et al. Broadband focusing flat mirrors based on plasmonic gradient metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2013, 13(2): 829–834.
- [57] Driscoll T, Andreev G O, Basov D N, et al. Tuned permeability in terahertz split-ring resonators for devices and sensors[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(6): 062511.
- [58] Chiam S Y, Singh R, Gu J, et al. Increased frequency shifts in high aspect ratio terahertz split ring resonators[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(6): 064102.
- [59] Cubukcu E, Zhang S, Park Y S, et al. Split ring resonator sensors for infrared detection of single molecular monolayers [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(4): 043113.
- [60] Wang B X, Wang G Z, Sang T. Simple design of novel

- triple-band terahertz metamaterial absorber for sensing application[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, 49(16): 165307.
- [61] Hu X, Xu G, Wen L, et al. Metamaterial absorber integrated microfluidic terahertz sensors [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, 10(6): 962–969.
- [62] Singh R, Al-Naib I A I, Koch M, et al. Asymmetric planar terahertz metamaterials [J]. *Optics Express*, 2010, 18(12): 13044–13050.
- [63] Wu X, Quan B, Pan X, et al. Alkanethiol-functionalized terahertz metamaterial as label-free, highly-sensitive and specific biosensor [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2013, 42: 626–631.
- [64] Debus C, Bolivar P H. Frequency selective surfaces for high sensitivity terahertz sensing [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(18): 184102.
- [65] Singh R, Cao W, Al-Naib I, et al. Ultrasensitive terahertz sensing with high-Q Fano resonances in metasurfaces [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(17): 171101.
- [66] Chiam S Y, Singh R, Zhang W, et al. Controlling metamaterial resonances via dielectric and aspect ratio effects [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(19): 191906.
- [67] Tao H, Strikwerda A C, Liu M, et al. Performance enhancement of terahertz metamaterials on ultrathin substrates for sensing applications[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(26): 261909.
- [68] Srivastava Y K, Cong L, Singh R. Dual-surface flexible THz Fano metasensor[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(20): 201101.
- [69] Wu P C, Sun G, Chen W T, et al. Vertical split-ring resonator based nanoplasmonic sensor [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(3): 033105.
- [70] Liu Z, Liu Z, Li J, et al. 3D conductive coupling for efficient generation of prominent Fano resonances in metamaterials[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 27817.
- [71] Cheng Y, Mao X S, Wu C, et al. Infrared non-planar plasmonic perfect absorber for enhanced sensitive refractive index sensing[J]. *Optical Materials*, 2016, 53: 195–200.
- [72] Wang W, Yan F, Tan S, et al. Ultrasensitive terahertz metamaterial sensor based on vertical split ring resonators[J]. *Photonics Research*, 2017, 5(6): 571–577.
- [73] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402.
- [74] Liu N, Mesch M, Weiss T, et al. Infrared perfect absorber and its application as plasmonic sensor [J]. *Nano Letters*, 2010, 10(7): 2342–2348.
- [75] Cattoni A, Ghenuche P, Haghiri-Gosnet A M, et al. $\lambda/1000$ plasmonic nanocavities for biosensing fabricated by soft UV nanoimprint lithography [J]. *Nano Letters*, 2011, 11(9): 3557–3563.
- [76] Cong L, Tan S, Yahiaoui R, et al. Experimental demonstration of ultrasensitive sensing with terahertz metamaterial absorbers: a comparison with the metasurfaces [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(3): 031107.
- [77] Sun Y, Xia X, Feng H, et al. Modulated terahertz responses of split ring resonators by nanometer thick liquid layers[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(22): 221101.
- [78] O'Hara J F, Singh R, Brener I, et al. Thin-film sensing with planar terahertz metamaterials: sensitivity and limitations[J]. *Optics Express*, 2008, 16(3): 1786–1795.
- [79] Wang B X, Zhai X, Wang G Z, et al. A novel dual-band terahertz metamaterial absorber for a sensor application [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(1): 014504.
- [80] Yahiaoui R, Tan S, Cong L, et al. Multispectral terahertz sensing with highly flexible ultrathin metamaterial absorber [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 118(8): 083103.
- [81] Yang D, Tian H, Ji Y. High-Q and high-sensitivity width-modulated photonic crystal single nanobeam air-mode cavity for refractive index sensing[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(1): 1–5.
- [82] Fan F, Gu W H, Wang X H, et al. Real-time quantitative terahertz microfluidic sensing based on photonic crystal pillar array[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(12): 121113.
- [83] Hanham S M, Watts C, Otter W J, et al. Dielectric measurements of nanoliter liquids with a photonic crystal resonator at terahertz frequencies[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(3): 032903.
- [84] Li X, Song J, Zhang J X J. Design of terahertz metal-dielectric-metal waveguide with microfluidic sensing stub[J]. *Optics Communications*, 2016, 361: 130–137.
- [85] Zhang Y, Li T, Zeng B, et al. A graphene based tunable terahertz sensor with double Fano resonances [J]. *Nanoscale*, 2015, 7(29): 12682–12688.
- [86] He X, Zhang Q, Lu G, et al. Tunable ultrasensitive terahertz sensor based on complementary graphene metamaterials [J]. *Rsc Advances*, 2016, 6(57): 52212–52218.
- [87] Chen X, Fan W, Song C. Multiple plasmonic resonance excitations on graphene metamaterials for ultrasensitive terahertz sensing[J]. *Carbon*, 2018, 133: 416–422.
- [88] 李向军. 基于太赫兹时域谱技术的有机分子溶液检测与分析研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [89] Bui T S, Dao T D, Dang L H, et al. Metamaterial-enhanced vibrational absorption spectroscopy for the detection of protein molecules[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 32123.