

激光与光电子学进展

超表面奇异点太赫兹传感(特邀)

樊元成^{1*}, 杨振宁¹, 徐子艺¹, 张宏¹, 孙康瑶¹, 叶哲浩¹, 张富利¹, 娄菁²¹西北工业大学物理科学与技术学院, 陕西 西安 710072;²军事科学院国防科技创新研究院, 北京 100071

摘要 奇异点是非厄米系统中的奇点,由两个或多个特征值及其相应的特征向量同时简并产生。超表面是在亚波长尺度上构建的二维人工电磁材料,其结构和性能的人工可设计性为研究非厄米现象提供了新的途径。本文首先介绍了非厄米系统和奇异点的基本理论并概述了奇异点的最新研究进展,之后介绍了超表面奇异点太赫兹传感的研究进展,最后总结了奇异点传感仍然存在的问题,并展望其发展趋势。

关键词 超表面; 奇异点; 太赫兹; 传感

中图分类号 O436 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/LOP232706

Terahertz Sensing with Exceptional Points in Metasurfaces (Invited)

Fan Yuancheng^{1*}, Yang Zhenning¹, Xu Ziyi¹, Zhang Hong¹, Sun Kangyao¹, Ye Zhehao¹, Zhang Fuli¹, Lou Jing²¹School of Physical Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China;²National Innovation Institute of Defense Technology, Beijing 100071, China

Abstract Exceptional points are singularities in non-Hermitian systems, generated when two or more eigenvalues and their corresponding eigenvectors merge simultaneously. Metasurfaces are two-dimensional artificial electromagnetic materials constructed at subwavelength scales, which provide a versatile platform for studying this non-Hermitian phenomenon by introducing dissipation and amplification within their unit cells. This paper provides an overview of the latest research progress in exceptional points sensing. It begins by introducing the basic theory of non-Hermitian systems and exceptional points, then focuses on the research achievements in exceptional points sensing on metasurfaces in terahertz band. Lastest, we summarize the disadvantages of exceptional points sensing, and its future development trends are also discussed.

Key words metasurfaces; exceptional points; terahertz; sensing

1 引言

超表面是由亚波长人工微结构组成的二维超材料,通过合理设计人工微结构的尺寸与排列方式,可以对电磁波幅值、相位和极化等状态进行有效调控并实现特定功能^[1-6]。超表面因具有厚度薄、能量损耗低、易于加工和集成等优点而受到科研人员的广泛关注,其在电磁感应透明(EIT)^[7-8]、隐形斗篷^[9]、超构透镜^[10-11]等方面具有巨大的应用潜力。近年来,研究人员提出可

以将损耗这一不利因素转变为超表面设计中的一个新自由度,而当研究不遵守能量守恒定律的开放系统时,哈密顿量被假定为非厄米形式,通常定义该系统为非厄米系统。奇异点(EP)就是非厄米系统中的特殊点。奇异点的概念最早可以追溯到量子力学中的非厄米哈密顿量的研究^[12-13]。1947年,Erwin Schrödinger在研究量子力学中的非厄米哈密顿量时,提出了非厄米系统中的本征值和本征态的概念。1998年,Bender等^[14]详细研究了非厄米系统中的宇称-时间对称性(PT),发现

收稿日期: 2023-11-04; 修回日期: 2023-11-25; 录用日期: 2023-12-05; 网络首发日期: 2023-12-11

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFB3811400, 2022YFB3806000)、国家自然科学基金(12074314)、陕西省青年科技新星(2023KJXX-148)、航空科学基金(20230018053007)、中央高校科研专项资助项目

通信作者: *phyfan@nwpu.edu.cn

当系统的哈密顿量满足宇称-时间对称性时,其能谱可以是实数,并且系统的波函数是正交归一的。1999年,Bender等^[15]进一步探讨了非厄米系统中的PT对称性,介绍了PT对称性的数学定义和物理意义,并讨论了其在量子力学中的应用。2007年,Bender等^[12]提出了EP点的概念。EP点是非厄米系统中的特殊点,当系统的参数穿过EP点时,系统的能谱和波函数发生剧烈变化。近年来,随着非厄米系统和宇称-时间对称性的研究逐渐被重视,EP点也得到了广泛的关注,并在声学^[16-18]、光学和光子学^[19-21]等领域得到了重要应用。

EP点传感是利用EP点的特殊性质来实现传感器的功能。EP点传感的基本原理是通过改变系统的参数或环境条件,使系统接近或远离EP点,从而导致系统的本征值和本征态发生变化,实现对特定物理量的测量。在生物传感领域,太赫兹波段能量与生物分子的转动或振动能量匹配^[22-23],可以实现生物分子的共振激发与探测,获得其他技术难以测量的生物信息。基于太赫兹波段的独特性质,许多研究人员关注太赫兹波段EP点灵敏传感的研究,并希望将其应用于生物医学领域^[24]。

本文首先介绍了PT对称系统和EP点的基本原理,其次介绍了EP点在光学波段、微波波段和太赫兹波段的主要应用场景,并着重从无源和有源两个方面介绍了基于太赫兹超表面的EP点传感的最新研究进展,最后总结了EP点传感所面临的挑战并展望了其发展趋势。

2 基本原理

2.1 PT对称系统

在量子力学中, \mathbf{P} 是宇称算符(或空间反演算符),通过空间的反演来定义。在连续的空间坐标下,宇称反演 \mathbf{P} 表示从 x 到 $-x$ 的空间坐标镜像。 \mathbf{T} 是时间反演算符,表示反演时间的流向,这种时间反演是通过 t 到 $-t$ 变换来实现。通常用哈密顿量 \hat{H} 来描述系统的总能量, \hat{H} 包含系统的所有性质。PT对称性指系统的哈密顿量经过一次宇称变换(parity)和时间反演变换(time reversal)后形式不变,即

$$[\hat{\mathbf{P}}\hat{\mathbf{T}}, \hat{H}] = \hat{\mathbf{P}}\hat{\mathbf{T}}\hat{H} - \hat{H}\hat{\mathbf{P}}\hat{\mathbf{T}} = 0, \quad (1)$$

式中: $\hat{\mathbf{P}}、\hat{\mathbf{T}}$ 满足 $\hat{\mathbf{P}}^2=1, \hat{\mathbf{P}}=\hat{\mathbf{P}}^+, \hat{\mathbf{T}}^2=1, \hat{\mathbf{T}}=\hat{\mathbf{T}}^+, [\hat{\mathbf{P}}, \hat{\mathbf{T}}]=0$ 。例如

$$\hat{H} = \begin{pmatrix} re^{i\theta} & s \\ s & re^{-i\theta} \end{pmatrix}, \hat{\mathbf{P}} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \hat{\mathbf{T}} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x^* \\ y^* \end{pmatrix}. \quad (2)$$

经过简单的代数运算,可以得到 $[\hat{\mathbf{P}}\hat{\mathbf{T}}, \hat{H}]=0$,即该哈密顿量是PT对称的,又可以得到它的两个本征值为 $E_{\pm} = r\cos\theta \pm \sqrt{s^2 - r^2\sin^2\theta}$,也就是说:当 $s^2 < r^2\sin^2\theta$ 时,能量本征值是一对共轭复数,此时为PT对称破缺区域;当 $s^2 > r^2\sin^2\theta$ 时,本征值为实数,此时为PT对称区域。

2.2 奇异点

在量子力学中,通过计算哈密顿量是否满足 $\hat{H} = \hat{H}^{\dagger}$ (\dagger 为转置共轭算符)以及哈密顿量是否为实数来判断哈密顿量是否为厄米的。当一个哈密顿量同时满足这两个条件时,则称这个哈密顿量为厄米的。非厄米系统是量子力学中一个特殊的系统,其哈密顿量不满足厄米关系,即它的本征值可以是复数且本征态之间可以不是正交的。

在非厄米系统中,哈密顿量不满足厄米共轭关系,则系统的本征值可以是复数,而且本征值和本征态之间可以发生相互交叉。奇异点是非厄米系统中的一个特殊点,它是系统哈密顿量的本征值和本征态发生相互交叉的交叉点^[12-13],指系统哈密顿量的两个本征值相等的情况,即 $E_1 = E_2$ 。如式(1)中,在 $s^2 = r^2\sin^2\theta$ 时发生PT对称破缺和PT对称状态之间的相变,所以此点即为EP点,此时两个本征值发生简并,相应的本征态不再是正交态。在EP点附近,系统的本征态会发生剧烈变化,使得非厄米系统具有了一些特殊的性质和行为。EP点附近灵敏度会显著增强,可应用于探测器件^[25]、传感器件^[26]的研究。根据这些奇特的性质,还产生了单向无反射^[27-28]、拓扑手性^[29-30]、超灵敏传感^[31]、激光模式选择^[32-33]和相位操控^[34-37]等重要应用。

2.3 双耦合系统

双耦合系统示意图如图1^[38]所示,根据耦合模理论,由两个耦合谐振单元组成的二能级系统的哈密顿量为

$$\hat{H} = \begin{pmatrix} \omega_1 - i\gamma_1 & k \\ k & \omega_2 - i\gamma_2 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

式中: $\omega_{1,2}$ 是耦合谐振单元的共振频率; $r_{1,2}$ 是增益或损耗系数; k 是耦合谐振单元之间的耦合强度。该哈密顿量的两个本征值

$$\omega_{\pm} = \omega_{\text{ave}} - i\gamma_{\text{ave}} \pm \sqrt{k^2 + (\omega_{\text{diff}} + i\gamma_{\text{diff}})^2}, \quad (4)$$

式中: $\omega_{\text{ave}} = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}; \gamma_{\text{ave}} = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2}; \omega_{\text{diff}} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{2}; \gamma_{\text{diff}} = \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{2}$ 。

当 $k^2 + (\omega_{\text{diff}} + i\gamma_{\text{diff}})^2 = 0$ 时,两本征值相同,即 $\omega_+ = \omega_- = \omega_{\text{ave}} - i\gamma_{\text{ave}}$,它们对应的本征态也相同。

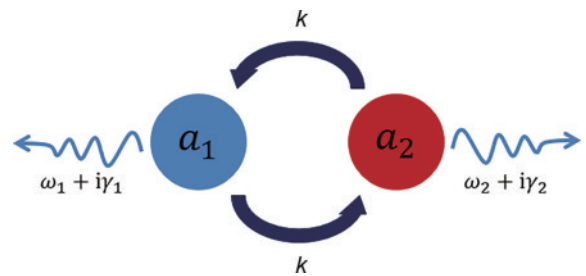


图1 双耦合系统示意图^[38]

Fig. 1 Schematic of coupled-mode system^[38]

3 不同波段中 EP 点的应用

近年来,由于 EP 点独特的物理性质,其在光学波段、微波波段和太赫兹波段等不同波段中都有重要应用。

在光学波段,研究者们相继利用 EP 点实现了耗散诱导透明,单模激光以及高灵敏度传感等功能。2009 年,美国阿肯色大学 Guo 等^[39]在增益-耗散耦合光波导的 PT 对称系统中,发现了耗散诱导透明现象。在经过 EP 点前,系统透射率随着耗散增加而降低,而在经过 EP 点后,系统透射率随着耗散增加而提高,这为光的激发和传输提供了新的途径;2014 年,美国加利福尼亚大学张翔和中佛罗里达大学 Khajavikhan 等

相继通过实验实现了利用非厄米系统 EP 点处本征模式的简并和基于 PT 对称结构的单模激光,即增益-耗散耦合光腔构成的 PT 对称系统^[32-33],如图 2(a)所示,可以产生固定频率的单模激光。2017 年,美国中佛罗里达大学 Khajavikhan 和密歇根理工 El-Ganainy 等利用高阶 EP 点进一步提高了光学传感灵敏度^[40]。如图 2(b)所示,通过并列耦合耗散腔、中性腔以及增益腔实现三阶 EP 点,并发现本征频率分裂在三阶 EP 点附近正比于微扰的立方根,从而实现更高灵敏度的光学传感。相较于低阶 EP 点传感,利用更高阶的 EP 点进行传感在原则上可以进一步放大扰动影响,获得更高的灵敏度。一般可以通过构建多组元结构的多能级系统来实现高阶 EP 点。

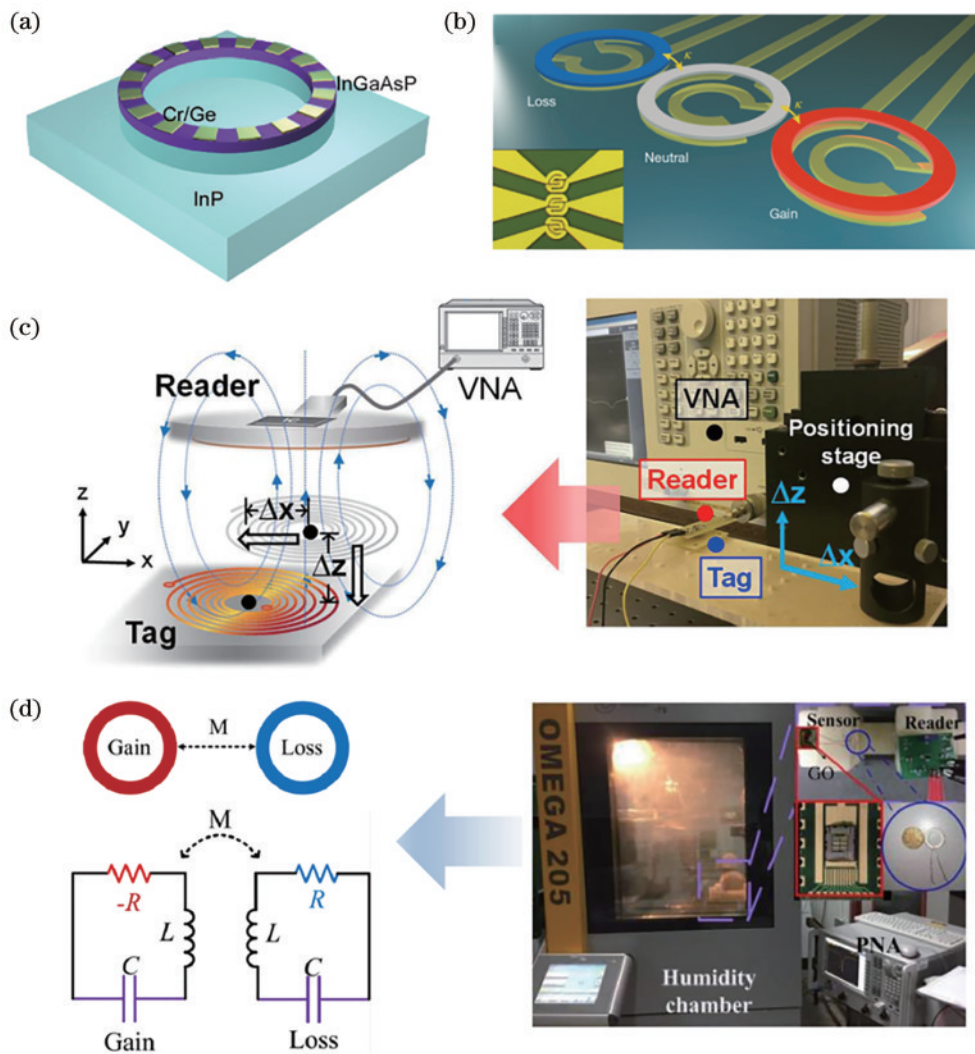


图 2 EP 点在光学和微波波段的应用。(a)PT 微环激光器^[32-33]; (b)具有 PT 对称性质的三微环结构,两侧的微腔具有相等的增益和损耗^[40]; (c)PT 对称的高灵敏度位移传感器^[41]; (d)PT 对称的 LC 无线传感系统^[42]

Fig. 2 Applications of EP points in the optical and microwave regimes. (a) PT micro-ring lasers^[32-33]; (b) three micro-ring structures with PT symmetry, where the two side cavities have equal gain and loss^[40]; (c) PT symmetric high-sensitivity displacement sensors^[41]; (d) PT symmetric LC wireless sensing systems^[42]

在微波波段,EP 点在高灵敏度传感等方面具有重要应用。2019 年,Hajizadegan 等^[41]提出了一种满足

PT 对称的高灵敏度位移传感器,如图 2(c)所示。与使用无源线圈读取器的传统遥测解决方案相比,基于

主动遥测的 PT 对称系统可以提供更高的灵敏度和光谱分辨率。在 EP 点附近, 目标物体的微小位移, 也会导致共振频率的显著偏移, 因此在反射光谱中可以很容易观察到。2021 年, 东南大学周彬彬^[42]提出了基于 PT 对称的 LC 无线传感系统, 如图 2(d) 所示。利用在 EP 点处频率分裂与微扰平方根成正比特性, 实现了高灵敏度 LC 无源无线传感。

太赫兹波段介于光学波段和微波波段之间, 由于太赫兹波的固有特性, 其具有独特的应用场景^[43-45]。太赫兹波具有良好的分辨率^[46]、穿透性和安全性, 且众多极性分子内和分子间的相互作用能量在太赫兹波段, 此外, 太赫兹波对大多数非极性介电材料和液体有极强的穿透能力的同时具有较低的光子能力, 这些特性使太赫兹波在生物传感等方面具有重要应用价值^[47-48]。2022 年, 杜晓辉团队^[49]提出并通过实验证明了一种基于光控太赫兹超快超表面的免校准传感器, 用于实现高精度生物传感检测。同年该团队还设计了

一种具有超快切换传感功能的光控太赫兹超表面, 该传感器可以在不同频率的洛伦兹共振模式和电磁诱导透明(EIT)模式下工作, 使传感的生物物质信息更加丰富^[50]。理论上, 基于 EP 点的太赫兹生物传感器比传统太赫兹生物传感器的灵敏度要高出一个数量级。而超表面为研究 EP 点提供了良好的平台, 可以通过灵活设计单元结构调控其电磁特性。在太赫兹波段, 研究基于超表面的 EP 点传感具有重要意义。

4 太赫兹 EP 点传感国内外发展现状

4.1 太赫兹无源超表面 EP 点传感

由于缺乏高质量的太赫兹源和探测器, 太赫兹传感器的灵敏度远远达不到检测少量样品(如单层生物分子)所需的水平, 因此对超高灵敏度的太赫兹生物传感器的出现提出了迫切的要求。Jin 等^[51]利用双层超表面构造了一个服从被动 PT 对称且具有 EP 点的双谐振腔耦合系统, 如图 3(a)、(b) 所示。通过将耦合谐

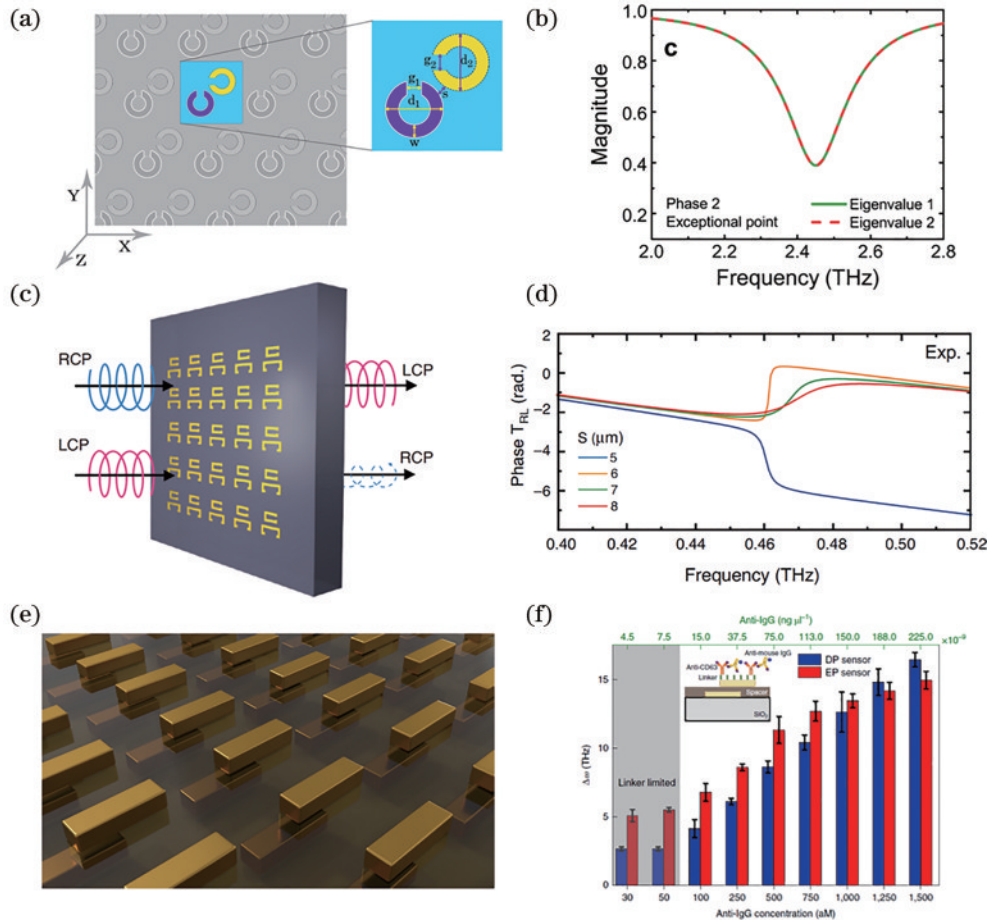


图 3 太赫兹无源超表面 EP 点传感。(a) 在硅衬底上由钛(紫色)和金(黄色)组成的双层超表面^[51]; (b) 两个特征值简并, 对应 EP 点^[51]; (c) 开口谐振环超表面^[52]; (d) 圆偏振波在 EP 点处的相位突变^[52]; (e) 由两层横向错位金条组成的超表面^[53]; (f) DP 和 EP 传感器在不同浓度 anti-immunoglobulin G 下测量到的共振频率分裂^[53]

Fig. 3 Passive terahertz metasurface EP points sensing. (a) Bilayer metasurface composed of titanium (purple) and gold (yellow) on a silicon substrate^[51]; (b) two degenerate eigenvalues corresponding to the EP points^[51]; (c) aperture resonator ring metasurface^[52]; (d) phase discontinuity of circularly polarized wave at the EP points^[52]; (e) plasmonic metasurface composed of two layers of laterally displaced gold bars^[53]; (f) resonance splitting measured by DP and EP sensors at different concentrations of anti-immunoglobulin G^[53]

振腔设计成激励方向正交,在极化空间中提取本征频率,可以分辨出比共振线宽更小的本征频率分裂,从而获得超高太赫兹灵敏度,灵敏度可以达到 $800 \text{ GHz} \cdot \text{RIU}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 。

2020年, Park等^[52]设计了一个由正交取向的开口谐振环(SRRs)组成的非厄米超表面,如图3(c)所示。观察不同入射波频率下开口谐振环之间的耦合,可看到由EP点引起的水平交叉行为、本征态的交换、圆偏振波的不对称传输以及交叉极化转换中的相位突变,如图3(d)所示,其中圆偏振波的相位突变这种特殊性质可以用于灵敏生物传感。

最新研究表明二阶非厄米简并可以提供一种提高谐振光学结构对外部扰动的灵敏度(频移)的方法。对于系统里的极小微扰量,频率分裂量要远大于基于线性关系的传统传感器的频率分裂量。2020年, Park

等^[53]利用这一特性设计了一种超表面,如图3(e)、(f)所示。所设计的超表面由上下两层在横向上错位的金条阵列组成,并证明EP点能增强超表面对抗免疫球蛋白G(IgG)的感应。且在EP点处工作的超表面的共振频率分裂与微扰的平方根成正比,其折射率灵敏度可达 $4821 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$ 。

超低浓度的生物分子含量检测在医学方面有着重要作用。2022年,中国科学院物理研究所的胡乐勇^[54]设计了一种基于共振EP点的“ π ”型等离子激元超表面,如图4(a)、(b)所示,实现了超低浓度的胚胎干细胞痕量检测。所设计的超表面包含两种谐振模式,通过调节两个谐振的相互作用,成功在太赫兹波段实现了共振EP点。该超表面可以准确地分辨两种细胞的差异,并能精确的检测出混合物中1%的残余胚胎干细胞,呈现超灵敏的生物传感特性。

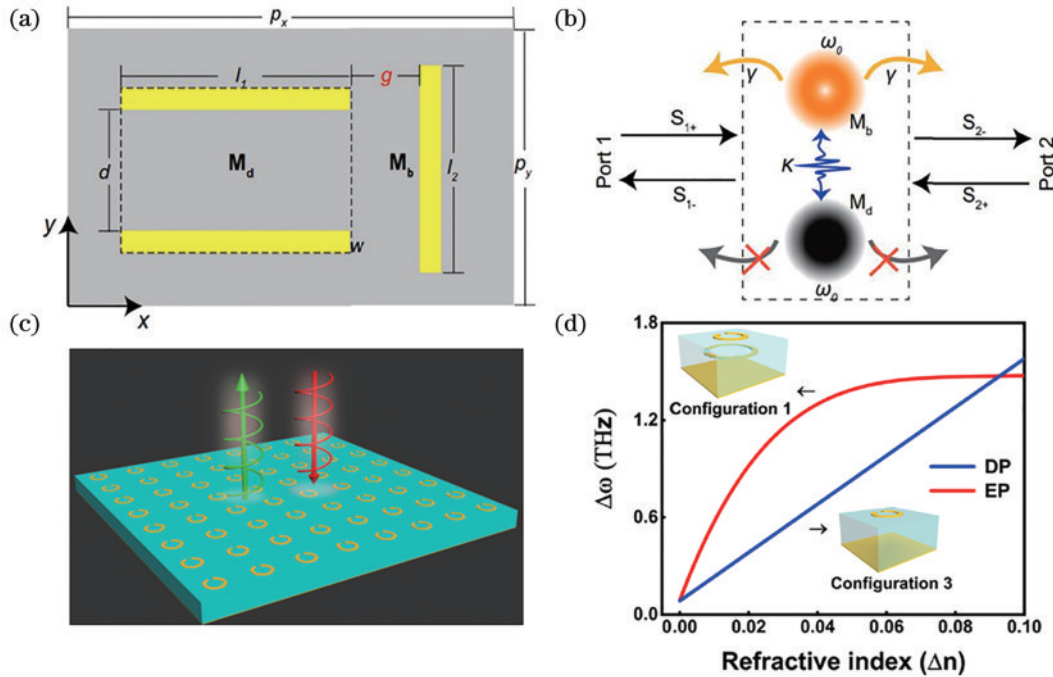


图4 太赫兹无源超表面EP点传感。(a)(b)“ π ”型等离子激元超表面结构图和原理图^[54]; (c)多层开口谐振环超表面^[55]; (d)红线表示共振频率分裂正比于微扰的平方根^[55]
 Fig. 4 Passive terahertz metasurface EP points sensing. (a) (b) Schematic and diagram of a “ π ”-shaped plasmonic metasurface structure^[54]; (c) multilayer aperture resonator ring metasurface^[55]; (d) red line represents resonance frequency splitting proportional to the square root of the perturbation^[55]

此外,太赫兹超表面上的EP点也可以应用于折射率传感。2023年,浙江工业大学的Gao等^[55]提出了一种多层开口谐振环非厄米超表面,如图4(c)、(d)所示。与厄米系统相比,非厄米系统中基于EP点的传感大大增强。本征值在EP点附近的分裂,即共振频率分裂正比于微扰的平方根 $\Delta\omega_{\text{EP}} \propto \sqrt{\epsilon}$ 。并将超表面应用于增强折射率传感,实现了高精度的折射率传感。

太赫兹无源超表面中EP点传感通常应用于折射率传感和生物等领域。通过改变超表面的阵列参数或单元参数,其频率、耦合和损耗随之调整,从而可以观

察太赫兹超表面EP点的全参数空间。在EP点周围会出现本征态剧烈变化,如本征频率分裂,使系统对特定波长的电磁波的吸收增强或发生散射,进而增强信号响应并实现灵敏传感,传感的灵敏度受到本征频率分裂的影响。无源超表面EP点传感器依靠入射电磁波的辐射进行工作,具有极低的功耗,器件寿命长。此外,其相较于传统传感器件更加灵敏。

4.2 太赫兹有源超表面EP点传感

有源超表面是一种具有主动调控功能的二维结构,通过集成电子器件或相变材料等可以实现对电磁

波状态的灵活调控。EP 点的位置可以通过调控有源超表面上的电子器件或相变材料进行调整,从而实现特定频率的灵敏传感。传统的固定结构的超表面限制了太赫兹波前调制的功能。超表面被制造出来后会以预先设定的方式调控太赫兹波,可调性的缺乏限制了无源超表面的检测功能。此外,在未来的应用中,无源超表面难以满足高智能和自我调节系统的先进要求。而可调谐超表面通过在外部激励下调节材料性质来实现动态操纵,克服了无源超表面不可变的缺点,极大地丰富了基于超表面的太赫兹器件的实用性。

EP 点表现出许多新的物理性质,由此衍生出新的物理意义,如超灵敏的扰动检测。借助 EP 点的这一

特殊性质, Li 等^[56]提出了一种具有两个正交开口环谐振器(SRR)的双层超表面,如图 5(a)、(b)所示,并通过调控集成在间隙中的二氧化钒(VO_2)贴片电导率,引入了本征极化态的相变。在 EP 点处,两个本征偏振态合并。温度的轻微扰动会导致相位的显著变化,从而实现温度和折射率传感器的高灵敏度传感。类似地,图 5(c)、(d)为 Li 等^[57]提出的一种金属-石墨烯杂化非厄米超表面,其单元由两个具有相同尺寸的正交 SRRs 组成,但只有一个 SRR 在间隙处含有石墨烯贴片。损耗差和两个 SRR 之间的耦合之间的平衡产生了 EP 点。在 EP 点前后,交叉极化转换系数会发生相位突变,从而实现灵敏传感。

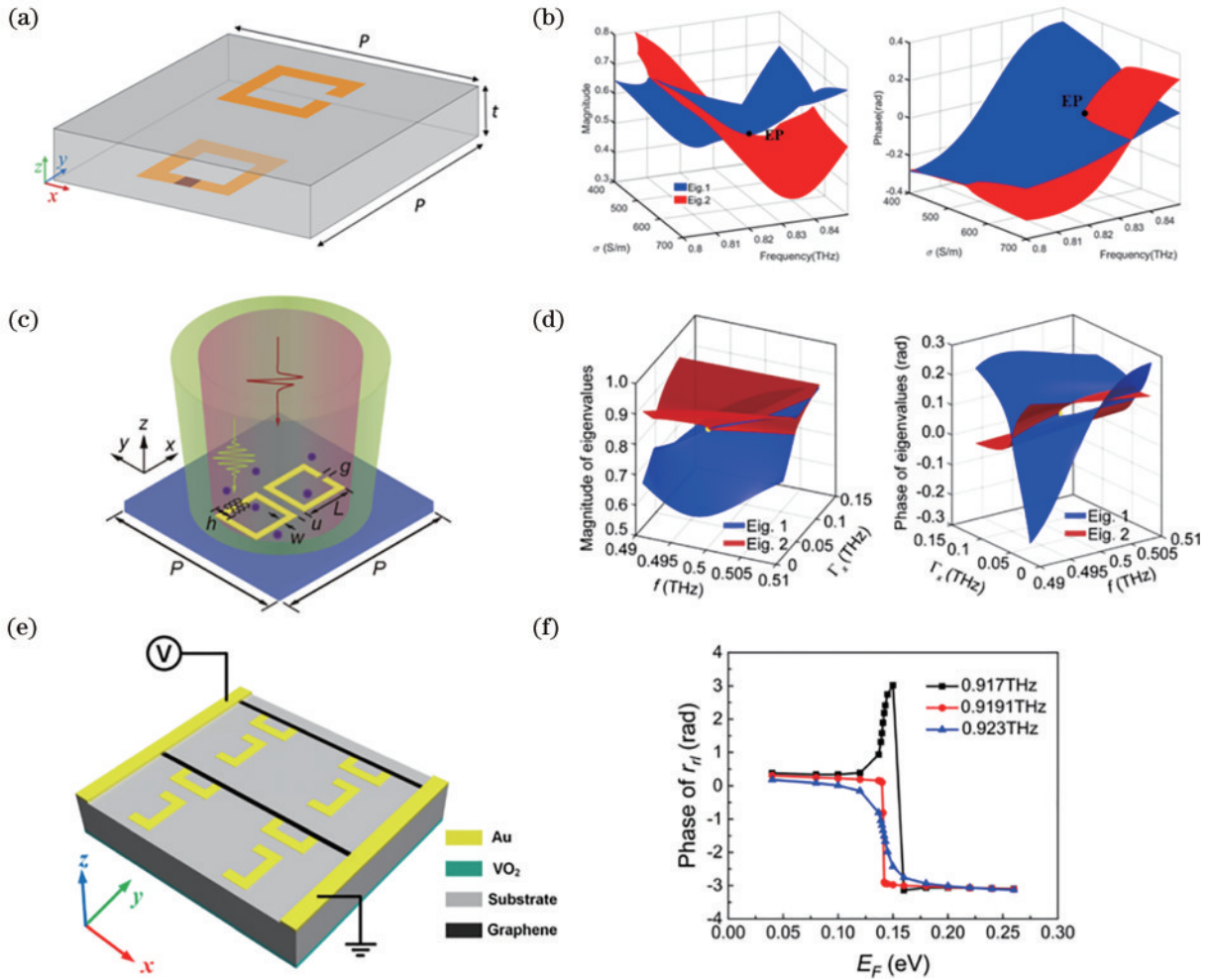


图 5 太赫兹有源超表面 EP 点传感。(a)由两个正交排列的 SRRs (黄色)组成的超表面单元^[56];(b) (ω, σ) 参数空间中特征值的幅值和相位的理论计算曲面^[56];(c)由两个正交排列的 SRRs 组成的超表面单元,其中一个 SRR 在间隙嵌入方形石墨烯贴片^[57];(d) (ω, Γ_g) 参数空间中特征值的幅值和相位^[57];(e)石墨烯-金属杂化超表面结构示意图^[58];(f)不同频率下,相位和能级 EF 的函数关系^[58]

Fig. 5 Active terahertz metasurface EP points sensing. (a) Metasurface unit composed of two orthogonally arranged SRRs (yellow)^[56]; (b) theoretical calculation surface of the magnitude and phase of eigenvalues in the (ω, σ) parameter space^[56]; (c) metasurface unit composed of two orthogonally arranged SRRs, with one SRR embedded with a square graphene patch in the gap^[57]; (d) calculation surface of the magnitude and phase of eigenvalues in the (ω, Γ_g) parameter space^[57]; (e) schematic of a graphene-metal hybrid metasurface structure^[58]; (f) relationship between phase and energy level EF at different frequencies^[58]

2023年, Li 等^[58]设计了一种太赫兹金属-石墨烯超表面,如图 5(e)、(f)所示。在反射极化通道中,仅仅 1 meV

的变化就会导致石墨烯费米能级(E_F)从 1.41 eV 变为 1.42 eV,导致右旋圆偏振态到左旋圆偏振态(r_n)的相

位变化,基于这一特性,该超表面可以用作高灵敏度的传感器。为了进一步说明 EP 点附近的相变特性,图 5(f)中绘制了三个不同 THz 频率下 r_{ri} 随 E_F 的相位曲线,在 0.14 eV 和 0.145 eV 之间 r_{ri} 变化剧烈,从而产生接近 180° 的相位差。传感过程结束后,还可以通过调节施加在石墨烯条上的电压使系统恢复到 EP 点,从而大大提高了使用效率。该结构在环境监测、气体传感方面具有良好的应用前景。

在石墨烯和其他二维系统的近场和远场光谱中,经常观察到等离子体激元和振动模式的耦合,但先前耦合强度与模态损失之间的关系以及 EP 点物理性质尚未得到讨论。Park 等^[59]将非厄米框架应用于石墨烯的分子层模型系统,如图 6(a)、(b)所示,证明了强耦合和弱耦合之间的过渡点与非厄米物理中的 EP 点一致,通过改变光的入射角和石墨烯的费米能级,可以简易地确定 EP 点的位置。当系统调谐到 EP 点附近

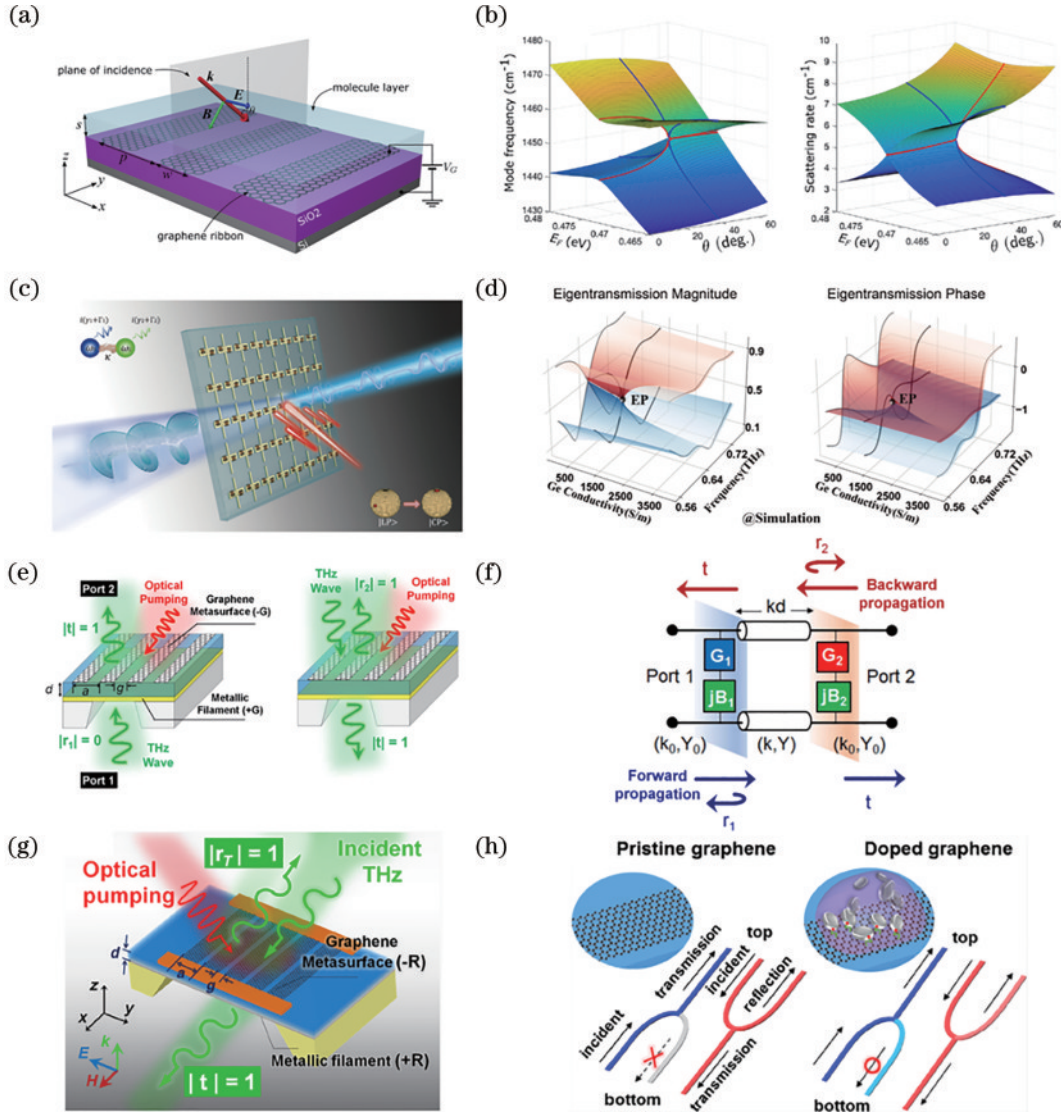


图 6 太赫兹有源超表面 EP 点传感。(a) 结构示意图^[59]; (b) 吸收光谱中的模式频率作为 E_f 和 θ 的函数显示为自相交的黎曼曲面^[59]; (c) 光学激发下 Ge 杂化非厄米超表面的应用图^[60]; (d) 左图为本征传输幅值, 右图为频率和 Ge 电导率所覆盖参数空间中的相位^[60]; (e) 实现双向和单向的无反射透明示意图^[61]; (f) 双端口传输线网络模型^[61]; (g) 由石墨烯超表面和金属片组成的 PT 对称太赫兹系统的原理图^[62]; (h) 在化学掺杂之前(左)和之后(右), 石墨烯 PT 对称传感器的底部(蓝色)和顶部(红色)入射的太赫兹波的透射和反射示意图^[62]

Fig. 6 Active terahertz metasurface EP points sensing. (a) Schematic diagram of the structure^[59]; (b) mode frequencies in the absorption spectrum displayed as a Riemann surface self-intersecting as a function of E_f and θ ^[59]; (c) application diagram of Ge hybrid non-Hermitian metasurface under optical excitation^[60]; (d) left is simulated eigenmode transmission amplitude, right is phase in the parameter space covered by frequency and Ge conductivity^[60]; (e) schematic of achieving mutual and unidirectional transparent without reflection^[61]; (f) dual-port transmission line network model^[61]; (g) schematic of a PT-symmetric terahertz system composed of tunable graphene metasurface and metal plate^[62]; (h) transmitted and reflected schematic of terahertz waves incident from the bottom (blue) and top (red) of the graphene-based PT-symmetric sensor before (left) and after (right) chemical doping^[62]

时,在吸收光谱中可以观测到分子层厚度的微小扰动。

超快开关作为传感器的一部分,由于 EP 点的高灵敏度同样得到了发展。He 等^[60]利用手性透射 EP 点的物理特性,设计了一种 Ge 杂化非厄米超表面,如图 6(c)、(d)所示,将 EP 点物理学与有源超表面融合在一起,可实现相应的偏振操纵功能。该结构用于超快太赫兹调制来揭示了 EP 点的瞬态演化,实现了瞬态扰动下的超快极化开关。

与传统基于超表面谐振器的无源传感器相比,由于 EP 点的存在导致光的单向零反射,具有 PT 对称性的超表面传感器可能具有更高的灵敏度,能显著地调制散射响应或共振偏移。如图 6(e)、(f)所示,Sakhdari 等^[61]利用 EP 点,研究了满足 PT 对称性的有源超表面及其传感应用,用石墨烯超表面实现了能同时提供太赫兹光学增益和生物化学传感功能的传感器,该系统为增益-损耗对构成的 PT 对称系统。

在太赫兹波段,EP 点除了能够对太赫兹波进行异常调控,在高灵敏气体,化学和生物分子探测中也有极大应用潜力。如图 6(g)、(h)所示,Chen 等^[62]设计的系统使用光泵浦的有源石墨烯超表面与电阻金属丝配对,实现了太赫兹波的单向无反射传播。通过调整石墨烯超表面的几何形状,增益、损耗和无功功率可以在 EP 点附近完美平衡。通过增益损耗平衡 PT 对称系统的尖锐光谱奇异性 and 石墨烯的化学敏感电导,证明了低水平的化学、生物分子掺杂也可以显著调节基于石墨烯的 PT 对称传感器的散射特性。

以上结构通过改变 VO_2 的电导率或石墨烯结构的费米能级等方式可以对超表面进行有效的实时控制,进而实现超表面的动态可调,特别是石墨烯因其可调谐特性适用于太赫兹超表面,成为十年来生物检测领域的研究热点。超表面的可调特性使系统接近 EP 点变得更加简便和高效,可以实现灵敏传感并适应复杂的环境。

5 结束语

综上所述,EP 点是存在于具有非厄米哈密顿量的系统中的特殊点,系统在此点对外界扰动十分灵敏,超表面是研究非厄米系统中 EP 点的重要工具之一。太赫兹波段由于其优越的分辨率、穿透性和安全性而在生物传感领域具有巨大潜力。以超表面为工具研究 EP 点为太赫兹生物传感提供了新的研究思路与方法。

在传感方面,EP 点还存在一些问题和挑战:由于对微小扰动十分灵敏,系统同时保持稳定较为困难;EP 点传感器还可能会受到长期使用和环境变化的影响,导致性能下降或者失效;在复杂的环境中,如高温、高压、腐蚀性液体等条件下,无法保持稳定传感效果。但相信,未来的 EP 点传感器将具备更高的灵敏度和更多的选择性,尺寸将进一步缩小并实现便携化,稳定性和寿命将得到提高。同时智能化和无线化的发展将

使传感器更加智能和便捷。这些发展将推动 EP 点传感在太赫兹生物传感领域的应用和研究进一步深入,为我们提供更准确、可靠和智能化的传感方案。

参 考 文 献

- [1] Kildishev A V, Boltasseva A, Shalaev V M. Planar photonics with metasurfaces[J]. *Science*, 2013, 339(6125): 1232009.
- [2] Meinzer N, Barnes W L, Hooper I R. Plasmonic meta-atoms and metasurfaces[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8: 889-898.
- [3] Yu N F, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces[J]. *Nature Materials*, 2014, 13: 139-150.
- [4] Zhao J, Yang X, Dai J Y, et al. Programmable time-domain digital-coding metasurface for non-linear harmonic manipulation and new wireless communication systems [J]. *National Science Review*, 2019, 6(2): 231-238.
- [5] Shaltout A M, Shalaev V M, Brongersma M L. Spatiotemporal light control with active metasurfaces[J]. *Science*, 2019, 364(6441): eaat3100.
- [6] 邓俊鸿, 李贵新. 非线性光学超构表面[J]. *物理学报*, 2017, 66(14): 147803.
Deng J H, Li G X. Nonlinear photonic metasurfaces[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(14): 147803.
- [7] Yang Y M, Kravchenko I I, Briggs D P, et al. All-dielectric metasurface analogue of electromagnetically induced transparency[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 5753.
- [8] Yang R S, Zhang F L, Li Z C, et al. Controllable electromagnetically induced transparency in an electrically tunable terahertz hybrid metasurface[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 163: 109380.
- [9] Ni X J, Wong Z J, Mrejen M, et al. An ultrathin invisibility skin cloak for visible light[J]. *Science*, 2015, 349(6254): 1310-1314.
- [10] Aieta F, Kats M A, Genevet P, et al. Multiwavelength achromatic metasurfaces by dispersive phase compensation [J]. *Science*, 2015, 347(6228): 1342-1345.
- [11] 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.
- [12] Bender C M. Making sense of non-Hermitian Hamiltonians[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2007, 70(6): 947-1018.
- [13] Ashida Y, Gong Z P, Ueda M. Non-Hermitian physics [J]. *Advances in Physics*, 2020, 69(3): 249-435.
- [14] Bender C M, Boettcher S. Real spectra in non-Hermitian Hamiltonians having PT symmetry[J]. *Physical Review Letters*, 1998, 80(24): 5243-5246.
- [15] Bender C M, Boettcher S, Meisinger P N. PT-symmetric quantum mechanics[J]. *Journal of Mathematical Physics*, 1999, 40(5): 2201-2229.
- [16] Zhang J, Peng B, Özdemir Ş K, et al. A phonon laser operating at an exceptional point[J]. *Nature Photonics*, 2018, 12: 479-484.

- [17] Wang X, Fang X S, Mao D X, et al. Extremely asymmetrical acoustic metasurface mirror at the exceptional point[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(21): 214302.
- [18] Shi C Z, Dubois M, Chen Y, et al. Accessing the exceptional points of parity-time symmetric acoustics[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 11110.
- [19] Miri M A, Alù A. Exceptional points in optics and photonics[J]. *Science*, 2019, 363(6422): eaar7709.
- [20] Özdemir Ş K, Rotter S, Nori F, et al. Parity-time symmetry and exceptional points in photonics[J]. *Nature Materials*, 2019, 18: 783-798.
- [21] Ma H B, Li D D, Wu N X, et al. Nonlinear all-optical modulator based on non-Hermitian PT symmetry[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(4): 980-988.
- [22] Zhao H, Tan Y, Zhang L L, et al. Ultrafast hydrogen bond dynamics of liquid water revealed by terahertz-induced transient birefringence[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 136.
- [23] Kindt J T, Schmuttenmaer C A. Far-infrared dielectric properties of polar liquids probed by femtosecond terahertz pulse spectroscopy[J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1996, 100(24): 10373-10379.
- [24] Vafapour Z, Keshavarz A, Ghahraloud H. The potential of terahertz sensing for cancer diagnosis[J]. *Heliyon*, 2020, 6(12): e05623.
- [25] Zhang N, Gu Z Y, Liu S, et al. Far-field single nanoparticle detection and sizing[J]. *Optica*, 2017, 4(9): 1151-1156.
- [26] Laha A, Dey S, Gandhi H K, et al. Exceptional point and toward mode-selective optical isolation[J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(4): 967-974.
- [27] Lin Z, Ramezani H, Eichelkraut T, et al. Unidirectional invisibility induced by PT-symmetric periodic structures [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(21): 213901.
- [28] Longhi S, Feng L. Unidirectional lasing in semiconductor microring lasers at an exceptional point [Invited] [J]. *Photonics Research*, 2017, 5(6): B1-B6.
- [29] Xu H, Mason D, Jiang L Y, et al. Topological energy transfer in an optomechanical system with exceptional points[J]. *Nature*, 2016, 537: 80-83.
- [30] Li J Y, Fu J, Liao Q, et al. Exceptional points in chiral metasurface based on graphene strip arrays[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2019, 36(9): 2492-2498.
- [31] 齐慧欣, 王晓晓, 胡小永, 等. 超表面中的奇异点[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(9): 20201029.
- Qi H X, Wang X X, Hu X Y, et al. Exceptional points in metasurface[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(9): 20201029.
- [32] Feng L, Wong Z J, Ma R M, et al. Single-mode laser by parity-time symmetry breaking[J]. *Science*, 2014, 346(6212): 972-975.
- [33] Hodaei H, Miri M A, Heinrich M, et al. Parity-time-symmetric microring lasers[J]. *Science*, 2014, 346(6212): 975-978.
- [34] Leung H M, Gao W S, Zhang R R, et al. Exceptional point-based plasmonic metasurfaces for vortex beam generation[J]. *Optics Express*, 2020, 28(1): 503-510.
- [35] Kang M, Zhu W R, Rukhlenko I D. Experimental observation of the topological structure of exceptional points in an ultrathin hybridized metamaterial[J]. *Physical Review A*, 2017, 96(6): 063823.
- [36] Song Q H, Odeh M, Zúniga-Pérez J, et al. Plasmonic topological metasurface by encircling an exceptional point [J]. *Science*, 2021, 373(6559): 1133-1137.
- [37] Kolkowski R, Kovaivos S, Koenderink A F. Pseudochirality at exceptional rings of optical metasurfaces [J]. *Physical Review Research*, 2021, 3(2): 023185.
- [38] Haus H A, Huang W. Coupled-mode theory[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1991, 79(10): 1505-1518.
- [39] Guo A, Salamo G J, Duchesne D, et al. Observation of PT-symmetry breaking in complex optical potentials[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 103(9): 093902.
- [40] Hodaei H, Hassan A U, Wittek S, et al. Enhanced sensitivity at higher-order exceptional points[J]. *Nature*, 2017, 548: 187-191.
- [41] Hajizadegan M, Sakhdari M, Liao S L, et al. High-sensitivity wireless displacement sensing enabled by PT-symmetric telemetry[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(5): 3445-3449.
- [42] 周彬彬. 基于 PT 对称的 LC 无源无线传感方法研究 [D]. 南京: 东南大学, 2021.
- Zhou B B. Research on LC passive wireless sensing method based on PT symmetry[D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [43] Fan Y C, Shen N H, Zhang F L, et al. Photoexcited graphene metasurfaces: significantly enhanced and tunable magnetic resonances[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(4): 1612-1618.
- [44] Yang R S, Fan Y C, Zhu W, et al. Terahertz silicon metagratings: high-efficiency dispersive beam manipulation above diffraction cone[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(7): 2200975.
- [45] Yang R S, Lou J, Zhang F L, et al. Active control of terahertz toroidal excitations in a hybrid metasurface with an electrically biased silicon layer[J]. *Advanced Photonics Research*, 2021, 2(12): 2100103.
- [46] Chen H T, Kersting R, Cho G C. Terahertz imaging with nanometer resolution[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 83(15): 3009-3011.
- [47] 裘燕青, 王钢棋, 郎婷婷. 基于双开口环结构的太赫兹超材料生物传感器[J]. *光学学报*, 2023, 43(4): 0428002.
- Qiu Y Q, Wang G Q, Lang T T. Terahertz metamaterial biosensor based on double split-ring structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(4): 0428002.
- [48] Cui Z J, Wang Y, Shi Y Q, et al. Significant sensing performance of an all-silicon terahertz metasurface chip for *Bacillus thuringiensis* Cry1Ac protein[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(3): 740-746.
- [49] Lou J, Jiao Y N, Yang R S, et al. Calibration-free, high-precision, and robust terahertz ultrafast metasurfaces for monitoring gastric cancers[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*,

- 2022, 119(43): e2209218119.
- [50] Jiao Y N, Lou J, Ma Z F, et al. Photoactive terahertz metasurfaces for ultrafast switchable sensing of colorectal cells[J]. *Materials Horizons*, 2022, 9(12): 2984-2992.
- [51] Jin B B, Tan W, Zhang C H, et al. High-performance terahertz sensing at exceptional points in a bilayer structure[J]. *Advanced Theory and Simulations*, 2018, 1(9): 1800070.
- [52] Park S H, Lee S G, Baek S, et al. Observation of an exceptional point in a non-Hermitian metasurface[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(5): 1031-1039.
- [53] Park J H, Ndao A, Cai W, et al. Symmetry-breaking-induced plasmonic exceptional points and nanoscale sensing[J]. *Nature Physics*, 2020, 16: 462-468.
- [54] 胡乐勇. 基于超表面的太赫兹器件及其生物传感应用研究[D]. 北京: 中国科学院物理研究所, 2022.
Hu L Y. Terahertz devices based on metasurface and their applications in biosensors[D]. Beijing: Institute of Physics Chinese Academy of Sciences, 2022.
- [55] Gao F, Liu H, Zhou J, et al. The exceptional point of PT-symmetry metasurface: Topological phase studies and highly sensitive refractive index sensing applications [J]. *Journal of Applied Physics*, 2023, 134(9): 093104.
- [56] Li Y C, Deng Z W, Qin C H, et al. Bifunctional sensing based on an exceptional point with bilayer metasurfaces [J]. *Optics Express*, 2023, 31(1): 492-501.
- [57] Li S X, Zhang X Q, Xu Q, et al. Exceptional point in a metal-graphene hybrid metasurface with tunable asymmetric loss[J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 20083-20094.
- [58] Li Z K, Yang W K, Wang K, et al. Parity-time symmetry transition and exceptional points in terahertz metal-graphene hybrid metasurface with switchable transmission and reflection characteristics[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics: PCCP*, 2023, 25(8): 6510-6518.
- [59] Park S H, Xia S X, Oh S H, et al. Accessing the exceptional points in a graphene plasmon-vibrational mode coupled system[J]. *ACS Photonics*, 2021, 8(11): 3241-3248.
- [60] He W B, Hu Y Z, Ren Z H, et al. Transient loss-induced non-Hermitian degeneracies for ultrafast terahertz metadevices[J]. *Advanced Science*, 2023, 10(36): 2304972.
- [61] Sakhdari M, Farhat M, Chen P Y. PT-symmetric metasurfaces: wave manipulation and sensing using singular points[J]. *New Journal of Physics*, 2017, 19(6): 065002.
- [62] Chen P Y, Jung J. P T symmetry and singularity-enhanced sensing based on photoexcited graphene metasurfaces[J]. *Physical Review Applied*, 2016, 5(6): 064018.