

文章编号:1005-4642(2022)11-0001-12



人工光子微结构中非厄米量子现象的实验研究

刘艳红^{a,b}, 孙 凯^a

(山西大同大学 a. 微结构电磁功能材料山西省重点实验室;
b. 物理与电子科学学院, 山西 大同 037009)

摘 要:真实世界中的开放体系大都是非厄米体系,研究非厄米体系在基础研究和前沿应用等方面都具有重要的价值. 人工光子微结构为探索非厄米量子现象提供了研究平台. 介绍了宇称-时间对称系统和奇异点的基本理论,概述了基于光子晶体、超材料、表面等离子激元等人工光子微结构系统中非厄米量子效应实验研究的最新进展,并展示了其相关的应用前景.

关键词:非厄米量子效应;光子晶体;超材料;表面等离子激元

中图分类号:O413.1

文献标识码:B

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2022.11.001

近年来,人工光子微结构材料的波动物理效应在基础理论、前沿科学、应用等领域引起了广泛关注. 人工光子微结构材料主要包括:光子晶体、超材料和表面等离子激元等. 光子晶体具有人工周期性结构,通过对光波的周期性调控,使其具有类似半导体能带结构的光子能带. 与光子晶体不同,超材料和表面等离子激元是利用金属或金属-介电微结构来调控光子的行为,其特征是微结构单元的尺度远小于调控光子的波长. 基于人工光子微结构对光子的调控,研究人员利用人工光子微结构平台来研究量子现象. 人工光子微结构中的量子现象主要涉及波动行为所导致的量子相干特性,即利用不同人工光子微结构对光子的调控作用进行模拟和演示,从而来研究微观物理系统中的量子现象. 本文主要介绍了在人工光子微结构中,特别是光子晶体、超材料和表面等离子激元中,非厄米量子现象在实验研究方面的进展及意义.

1 理论基础

传统量子力学中的最基本要求是所有力学量均可被观测,即系统的哈密顿量由厄米算符描述,

其导致 2 个关键的结果:1)能量本征值必须是实数,保证能量的确定性(可测量)和体系概率守恒;2)本征态形成标准正交完备基,使得本征能量和本征态对外界扰动的响应有界. 物理学中的许多系统都是开放系统,这些系统可以通过与环境的相互作用获得或失去能量,从而产生复数能量本征值. 对于不遵守能量守恒定律的开放系统,其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. 奇异点是非厄米系统中的特殊点,系统参量空间中的 2 个或更多个特征值及其对应的特征向量会发生简并,产生奇异点. 在数学上,复参量空间形成自交黎曼曲面,其交点即为奇异点.

对于开放系统,因与外界环境的耦合作用,其势场 $V(x)$ 不再是实数,而是复数函数,从而导致非厄米哈密顿量. 近年来,研究人员对非厄米哈密顿量描述的开放量子系统产生了浓厚兴趣,因为其打破了关键结果 1)和 2). 相比之下,开放系统与具有复特征值和非正交的非厄米哈密顿量有关. 最早的开放量子系统为考虑了辐射衰减的核反应系统,研究人员用有效非厄米哈密顿量对其进行分析,结果表明存在非零概率流到核的外部.

收稿日期:2022-08-11;**修改日期:**2022-10-08

基金项目:山西省重点研发(高新领域)项目资助(No. 201903D121071);中央引导地方科技发展资金项目资助(No. YDZJSX2021C032);山西大同大学教学改革创新重点项目资助(No. XJG2018113);山西省教育科学“十四五”规划课题(No. GH-220550)

作者简介:刘艳红(1979—),女,山西吕梁人,山西大同大学物理与电子科学学院副教授,博士,研究方向为凝聚态物理. E-mail:lyh030114@163.com

耗散和放大来实现损耗和增益,随着量子调控技术的进步,研究人员在越来越多的物理系统(如开放量子系统、光学系统、声学系统等)中实现了非厄米系统. 研究者在经典的光学系统中进行了大量研究和探索,尤其是耦合微腔^[8-10]、光纤回路^[11]、波导^[12]、光子晶体^[13]等. 例如,PT 对称系统可以使用 2 个耦合的微环形谐振单元实现,其中增益是通过 1 个主动谐振单元,而另 1 个谐振单元本质上是有损耗的^[14]. 电磁非厄米系统的特征是:具有真实本征值的 PT 对称相和具有共轭对本征值的 PT 破缺相之间的对称在奇异点处被打破,即在奇异点处,2 个或 2 个以上的本征函数简并成 1 个,这些本征函数在非共轭的内积下变成自正交.

由于傍轴波动方程和薛定谔方程相似,例如一维自由粒子的薛定谔方程为

$$i\hbar\left(\frac{\partial\Psi}{\partial t}\right)=\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}, \quad (3)$$

其中, $\hbar$ 为约化普朗克常量, ψ 为波函数, m 为单粒子质量. 一维自由空间傍轴光波的波动方程为

$$i\left(\frac{\partial\varphi}{\partial\zeta}\right)=\frac{1}{2}\frac{\partial^2\varphi}{\partial s^2}, \quad (4)$$

其中, $s=\frac{x}{x_0}$, $\zeta=\frac{z}{kx_0^2}$, k 表示波数,将其代入式(4),可得:

$$2ik\left(\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right)=\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2}. \quad (5)$$

电磁场的场方程可以表示为^[15]

$$i\frac{\partial E}{\partial z}=-\frac{1}{2k_0}\frac{\partial^2 E}{\partial x^2}+k_0n(x)E, \quad (6)$$

其中, E 为电场强度的横向分量, k_0 为真空中波数, $n(x)=n_R(x)+in_I(x)$ 表示非厄米电磁系统中的复折射率. 折射率实部 n_R 表示色散,虚部 n_I 表示能量的增益或损耗,则等效电磁哈密顿量为

$$H=-\frac{1}{2k_0}\frac{\partial^2}{\partial x^2}+k_0n(x), \quad (7)$$

其中,电磁势场为 $V(x)=k_0n(x)$. 类比量子理论,当电磁势场满足 $n(x)=n^*(x)$ 时,可以实现电磁 PT 对称系统,即电磁势场的实部必须为偶函数 $n_R(x)=n_R(-x)$,虚部为奇函数 $n_I(x)=-n_I(-x)$,增益和损耗平衡^[16]. 另外,具有增益和损耗谐振单元的二能级耦合电磁系统可以由标准耦合模方程导出,其哈密顿量表示为

$$H=\begin{pmatrix} \omega_1+ig & \kappa \\ \kappa & \omega_2-ig \end{pmatrix}, \quad (8)$$

其中, $\omega_{1,2}$ 为谐振频率, κ 为耦合系数, g 为其中 1 个谐振单元的增益, γ 表示另 1 个谐振单元的损耗. 当增益和损耗平衡($g=\gamma$)时,在 $\omega_1=\omega_2=\omega_0$ 频率处,系统具有 PT 对称性,其哈密顿量的本征值为

$$\omega_{\pm}=\omega_0\pm\sqrt{\kappa^2-\gamma^2}. \quad (9)$$

当 $\gamma<\kappa$ 时,哈密顿量本征值是纯实数,相关的本征态满足 PT 对称性,即,由于虚部的消失,每个谐振器的能量保持不变. 当 $\gamma>\kappa$ 时,本征值成为具有非零虚部的共轭对,导致在增益谐振单元中电磁能量被强烈放大,在损耗谐振单元中呈指数衰减. 特别地,在奇异点($\gamma=\kappa$)处,本征值将简并为 1 个值,即 $\omega_{\pm}=\omega_0$,对应非厄米本征态.

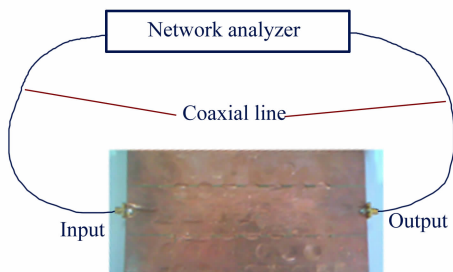
1.3 人工光子微结构材料中量子现象实验研究

人工光子微结构是人工电磁材料,由周期性的亚波长单元组成,可以实现天然材料无法获得的电和磁响应,主要包括:光子晶体、超材料和表面等离子体激元等. 其人工能带和亚波长结构导致任意介电常量、磁导率实现了光调控效应,引起了研究人员的兴趣,例如光子晶体的能带和缺陷模,超材料的负折射、突破衍射极限成像和隐身,基于表面等离子体激元的纳米光路,等等,是目前光物理、凝聚态物理、材料物理等多学科交叉的前沿领域.

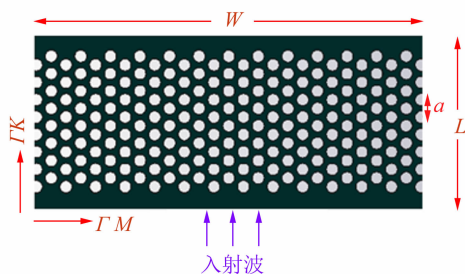
微观粒子或微观系统的量子特性表现在由薛定谔方程所描述的波动行为,如量子相干特性,而人工光子微结构中的波动行为可以产生类似的量子相干特性,即利用不同的人工光子微结构对光子的特殊调控作用进行模拟和演示,从而研究原子、分子凝聚态及物质波等学科领域中的量子相干特性^[17].

近年来,作者课题组借助人工光子微结构平台实验研究了法诺共振、石墨烯狄拉克量子现象、电磁感应透明等量子现象. 例如基于接地共面波导(其优点是可以产生方向性好和窄的波束)设计出测量微波类石墨烯光子晶体板传输谱的实验平台,并利用微波实验验证了沿固定方向入射的对称性电磁波的场分布具有相同的对称性,导致有些能带不能被激发,并且分析了狄拉克点处电磁波的“赝扩散”行为^[18],如图 2 所示. 利用矩形波导作为实验研究平台(实验装置图见图 3),研究了光子石墨烯布里渊区边角点狄拉克点处的光子输运,通过简易的微波实验验证了先前的理论预

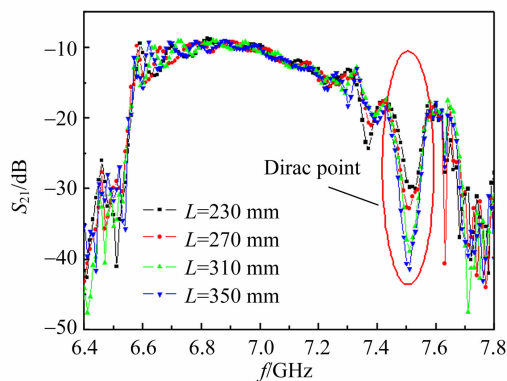
言,即布里渊区边角 K 点处狄拉克频率附近处光子的流动是介于通带和禁带之间的“赝扩散”态^[19-20]。



(a) 透射谱微波实验测量平台



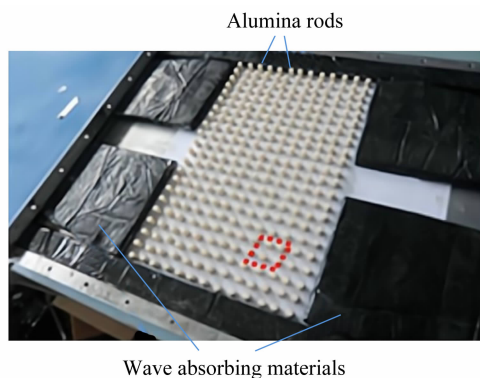
(b) 类石墨烯平板光子晶体结构模型图



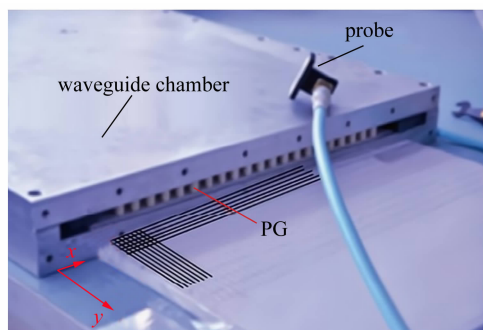
(c) 不同长度的类石墨烯平板光子晶体的透射谱

图 2 人工光子微结构实验^[18]

研究人员利用光子晶体、超材料、集成光波导等经典物理系统对非厄米效应进行了模拟研究,发现了拓扑能量转移、单方向光传播、反激光等现象,目前这些现象已经在调制器、成像器件和开关等光子器件设计中广泛应用。作者课题组基于二阶 PT 对称系统的电磁特性,设计出用于煤炭开采中鉴别煤矸石成分占比监测的螺旋无源无线传感系统^[21],如图 4 所示。



(a) 波导内部样品结构图



(b) 波导出射端探头探测场分布示意图

图 3 矩形波导实验平台

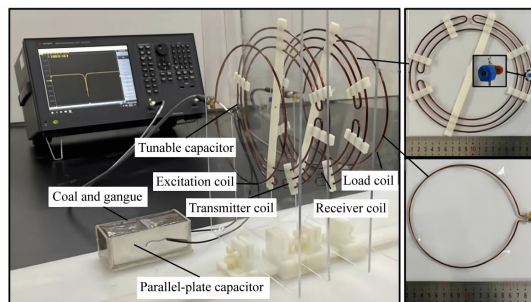


图 4 基于 PT 对称系统的煤矸石混合监测螺旋无源无线传感系统实验装置^[21]

将输入的能量源作为入射端谐振单元的增益,将导出的能量作为出射端谐振单元的损耗,即将原本开放的系统等效为封闭系统,并用哈密顿量对其进行描述;再基于哈密顿量和耦合模理论,探究在奇异点附近谐振子能量的非单调变化趋势,即单一的增加系统内在损耗时,系统场强出现非单调的变化,且通过不断增加样品中的损耗,可以观察到谐振频率的灵敏变化。当混合样品中煤矸石含量为 0 时,通过调整线圈之间的距离,可以确定该二阶系统的奇异点位置;然后将不同比例

的煤矸石混合样品按顺序放置,得到不同微扰动强度下的反射光谱,如图 5 所示. 随着扰动增加,反射光谱逐渐向左偏移,并在右侧出现了 1 个明显的共振峰. 利用以上物理特性设计出高灵敏传感器,当工作频率在奇异点处时,改变煤矸石成分占比即改变了 PT 对称系统的损耗,导致系统的共振频率会发生敏锐变化,从而实现高灵敏传感.

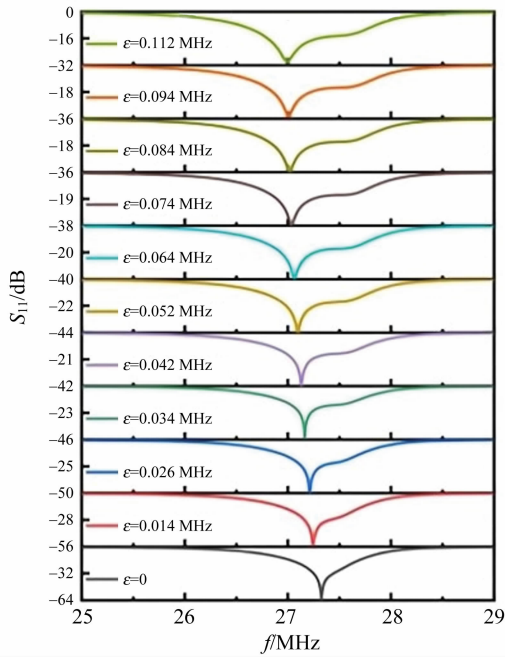


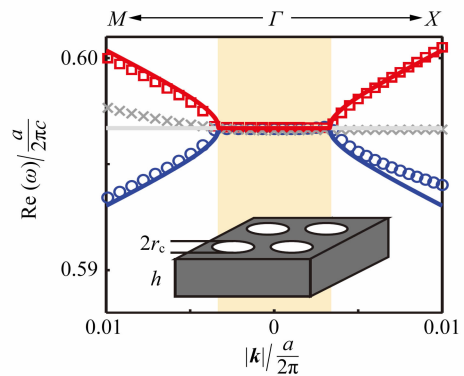
图 5 具有不同扰动强度的二阶 PT 系统的反射光谱^[21]

2 非厄米光子晶体

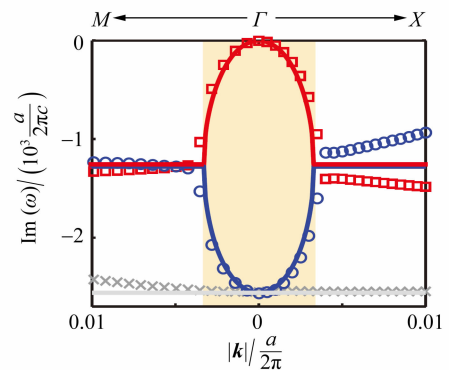
近年来,复杂光子晶体从理论和实验上为探索非厄米性质提供了新的机会. 能带理论是求解光子晶体物理特性的理论基础,非厄米物理问题要求将能带理论推广至非厄米体系. 由损耗或增益材料构成的光子晶体系统是具有非厄米哈密顿量特征的开放量子系统,当增益和损耗强度逐渐增加到一定阈值时,可观测到系统的本征值由实数到虚数的相变;当材料增益/损耗达到一定值时,PT 对称系统的能带开始闭合;随着增益/损耗的进一步增加,能带闭合范围增大,且闭合部分的本征值成为共轭对^[22]. 光子晶体 PT 对称结构由合理分布的增益和损耗机制组成,损耗可以通过开放边界或金属涂层产生,而增益可以通过光或电泵浦产生. 在奇异点处,从 PT 对称相的实数本征值突变到 PT 破缺相的共轭对本征值,且

在奇异点处,本征函数发生简并. 奇异点处的性质导致晶体具有拓扑特征^[23]、损耗诱导透明^[24]等性质.

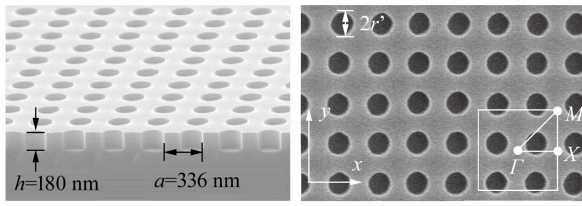
2015 年, B. Zhen 等^[25]设计出的特殊二维光子晶体板(在氮化硅平板中引入了圆形气孔的方形晶格)为研究奇异点对光和物质相互作用的影响提供了光学实验平台,如图 6 所示. 由于光子晶体板对于电磁波是开放边界(类比于开放量子系统),通过耦合周围介质中的平面波而产生辐射损耗,对应非厄米哈密顿量中的损耗,即哈密顿量需添加虚部 $-i\gamma_a$, 因此哈密顿量的本征值变为复数形式,而且 2 个本征值矢量在奇异点处简并[见图 6(a)和 6(b)],即为非厄米特性. 在氮化硅基底板上刻蚀出大面积周期孔[见图 6(c)],并设计了测量装置[见图 6(d)],通过实验验证了非厄米性,并研究了此非厄米性对光子晶体板的能带结构和态密度的影响. 测量装置中用到的光源是超连续激光,选择了 s 偏振光或 p 偏振光的偏振光器,样品被安装在 2 个垂直的电动旋转台上,一方面将光子晶体固定在光轴方向,另一方面可以提供确定的入射角度.



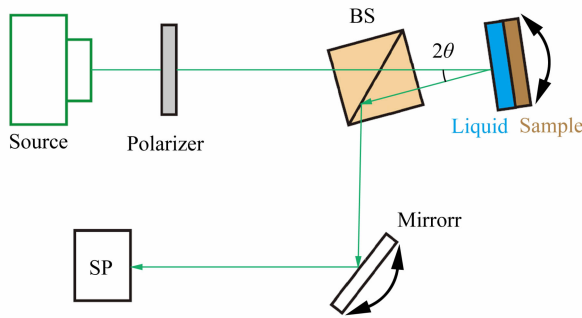
(a) 哈密顿量本征值实部



(b) 哈密顿量本征值虚部



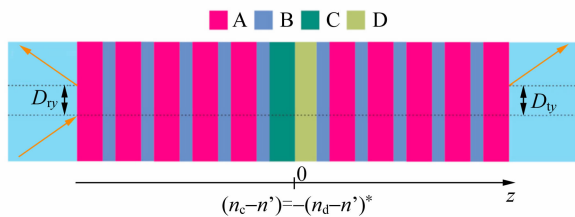
(c) 光子晶体样品图像



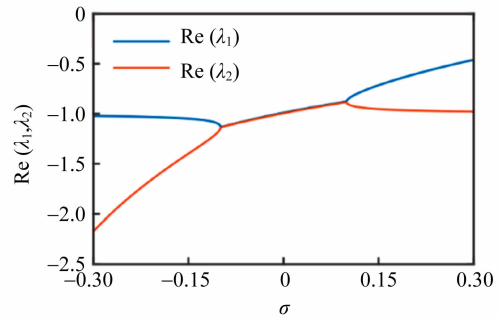
(d) 测量装置的示意图

图 6 二维光子晶体板实验^[25]

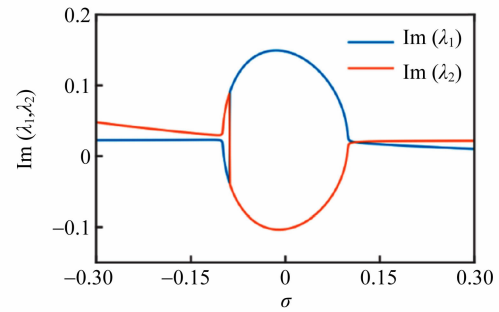
2020 年, F. M. Liu 等^[26]构造了由 2 个布拉格光栅和 1 个缺陷组成的非厄米光子晶体结构, 如图 7 所示. 2 种不同介质 A 和 B(分别为氟化镁和硫化锌), 交替排列形成 2 个布拉格光栅, 中间嵌入增益介质 C 和损耗介质 D(分别由掺杂高和低杂质得到). 样品结构中的增益缺陷是通过掺杂 Ge/Cr 或非线性双波混合实现, 损耗缺陷是通过声学调制器实现. 设计的光子晶体结构为 $(AB)^N CD (BA)^N$, 其中 N 为布拉格光栅的周期数. 包含增益和损失的缺陷相对于中心不对称. 通过调节缺陷的增益和损耗系数实现 PT 对称奇异点, 且发现反射系数和透射系数的复相位会随奇异点周围参量的变化而发生显著变化, 在奇异点处存在 $\pm\pi$ 的相位跳变. 在奇异点周围诱导了反射和透射光束巨大的古斯汉斯位移, 为高灵敏度传感器的开发提供了参考.



(a) 一维非厄米光子晶体示意图



(b) 哈密顿量本征值实部在奇异点周围随增益和损耗系数的变化



(c) 哈密顿量本征值虚部在奇异点周围随增益和损耗系数的变化

图 7 非厄米光子晶体结构及实验结果^[26]

2022 年, X. X. Wang 等^[27]构造了二维非厄米光子晶体, 利用 PT 对称结构的拓扑性实现了高品质因子微腔. 由于拓扑光子系统与环境的能量交换不可避免, 从而阻碍了拓扑光子学的发展, 非厄米增益-损耗 PT 对称系统不仅避开了损耗的影响还提供了拓扑性. 目前在实验上已经观察到了一维非厄米光子晶体的拓扑边缘态及拓扑光转向和漏斗等现象. 由于在非厄米系统中拓展边界拓扑效应存在困难, 所以对于二维非厄米光子晶体的性质(如拓扑相变、狄拉克点的性质构造、非厄米模型等)研究还需进一步深入. 文献^[27]中设计出二维三角晶格, 其中一部分有增益, 另一部分有损耗, 以满足 PT 对称, 如图 8 所示, 图中红色单元表示增益, $k_r > 0$; 蓝色单元表示损耗, $k_r < 0$. 基于紧束缚近似理论, 得到了蜂窝晶格的哈密顿量, 其中每个格点都是由增益或损耗介质组成. 此结构为研究 PT 对称系统的拓扑性质提供了更多自由度, 例如增益、损耗系数和单元结构之间的耦合强度的灵活调节. 通过研究发现 2 个

非厄米诱导界面边缘态从 PT 对称相到 PT 破缺相之间存在相变. 进一步设计了封闭的增益-损耗边界,构造了非厄米拓扑腔,内部的增益光子晶体可以作为高阶拓扑绝缘子,外部的损耗光子晶体可以作为有耗环境,此结构存在边态和角态.

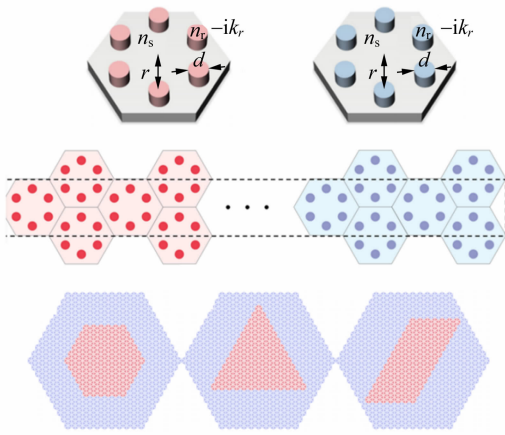


图 8 二维蜂窝光子晶体结构及原理图^[27]

3 非厄米超材料

超材料是具有周期性亚波长结构单元的人工电磁材料,可以实现天然材料所没有的非寻常电磁响应. 基于超材料的电磁操控方式主要分为 2 类:一类是通过超材料参量的实部(无增益和损耗),属于厄米性范围;另一类是通过超材料参量的虚部(有增益和损耗),属于非厄米性范围. 超

材料可以精确控制影响谐振单元(人工原子)性能的结构参量,使用标准的光学反射或透射测量方法进行探测,为探究奇异点和时间反演对称系统的物理机制提供了简易平台. 单纯地研究具有时间反演对称性的超材料系统限制了探究奇异点周围的全参量空间,而改变超材料的结构参量可以方便研究奇异点周围的参量空间,即通过使用超材料设计不同人工原子之间耦合的灵活性为 PT 对称系统研究提供了自由度.

最常见的超材料设计方法是依赖人为实现需要的本构参量,介电常量和磁导率均可正、可负、可为零. 通常情况下微结构中要用到金属材料,所以会不可避免产生损耗. 而基于 PT 对称和非厄米物理学的方法可以在设计超材料时引入损耗,实现损耗与增益的平衡. 因此,PT 对称推翻了对传统关于超材料的增益和损耗之间的关系,传统系统需要避免损耗,一般采取使用增益介质来补偿的方法. 相反,非厄米超材料是利用材料损耗(和增益)将新功能引入各种光子器件,使其在通信、计算、生化和环境传感以及医疗保健方面被广泛应用.

2020 年, S. H. Dong 等^[28] 通过交错平衡损耗和无损区域构建了非厄米超表面,如图 9 所示,其中人工原子由夹在金属片和金属 H 形环层之间的介电层组成,结构单元由三元原子组成,通过在金属背板上添加狭缝,将损耗引入三元原子以填充损耗区域,实现了反射系统的泄漏损耗.

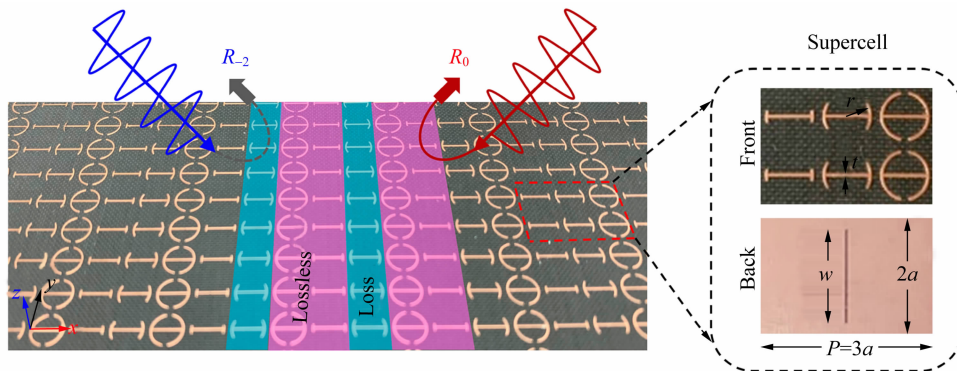
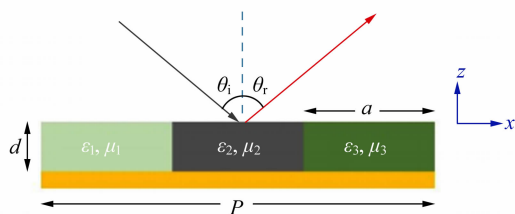


图 9 非厄米超表面实验样品图(包括损耗和无损区域)^[28]

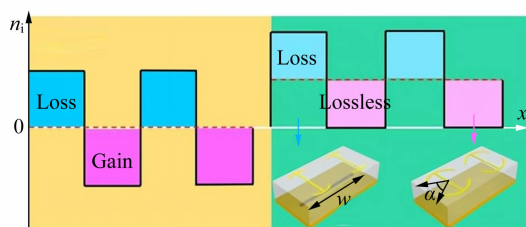
此结构中可以通过改变狭缝宽度调节反射振幅,也可以通过改变 H 型金属张开角度调节局部反射相位. 首先利用等效介质理论设计出均匀的

反射型超表面,其电磁本构参量用 ϵ 和 μ 表示,设计出对电磁波产生不同反射响应的亚波长单元,其中元原子由夹在金属片和金属开角为 α 的 H

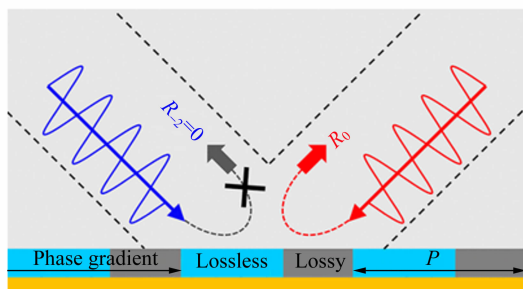
形环层之间的介电层组成. 然后, 通过改变 α , 可以任意调节局部反射相位, 如图 10(a) 所示, 非厄米超表面单元结构由 3 个亚单元组成, 其中单元 2 有损耗.



(a) 非厄米超表面单元结构图



(b) 传统非厄米系统和非厄米超表面



(c) 左右双端口系统

图 10 非厄米超表面实验^[28]

通过改变金属背板刻痕的宽度调节反射振幅, 即设计反射型损耗, 这样交错损耗和无损区域构建成非厄米超表面, 如图 10(b) 所示, 左边为由损失和增益平衡的区域组成的传统非厄米系统, 右边为由反射型超表面构成的非厄米表面. 最后构成左右双端口系统, 左端口为反反射端, 右端口为反射端, 如图 10(c) 所示, 双端口系统的散射矩阵可以表示为

$$\begin{pmatrix} \psi_+^R \\ \psi_-^L \end{pmatrix} = S \begin{pmatrix} \psi_+^L \\ \psi_-^R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{-1}^L & r_0^R \\ r_{-2}^L & r_{-1}^R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_+^L \\ \psi_-^R \end{pmatrix}, \quad (10)$$

其中, ψ_+^L 和 ψ_-^R 分别为左右端口的入射波, ψ_-^L 和 ψ_+^R 分别为左右端口的出射波, r_{-2}^L 和 r_0^R 分别为左

右端口入射波的反反射系数, r_{-1}^L 和 r_{-1}^R 分别为左右端口入射波的反射系数. 散射矩阵的本征值为 $E_{\pm} = r_{-1} \pm \sqrt{r_0 r_{-2}}$, 因此当反射振幅 $r_{-2}^L = 0$ 时, 2 个本征值简并, 出现奇异点.

通过微波实验对电磁场散射响应进行了表征. 在实验中, 使用喇叭天线作为入射源, 距离样品 1 m (指定入射角度); 接收喇叭天线距离样品 3 m, 可以在样品周围自由移动以接收散射信号. 入射喇叭和接收机都连接到向量网络分析仪, 可以同时接收信号的振幅和相位信息, 通过分析场的角分布, 在一定的入射角和频带范围内可以实现不对称散射效应. 通过利用损耗的自由度来实现从负入射角的高效反反射 (效率达到 90%) 和从正入射角的完全抑制的反反射 (效率约为 4%), 这种极端的角度不对称性很难在传统的无损超表面或元表面上实现. 结合经典的相位梯度方法与调制损耗的非厄米超表面, 实验验证了不对称散射抑制, 为设计非对称光学系统提供了新视角, 并进一步启发了对更复杂 EP 或更高阶 EP 解决方案的探索.

2021 年, Z. P. Li 等^[29] 设计了通用的非厄米超表面, 观察到拓扑鲁棒奇异点和相位奇点. 该超表面的结构单元包含 2 个具有共振重叠但散射率和辐射效率不同的正交定向开口谐振环, 开口环的几何结构和阵列结构如图 11 所示.

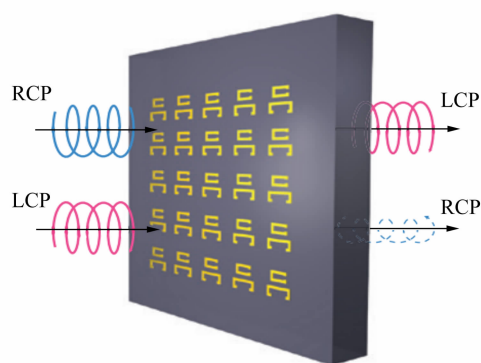
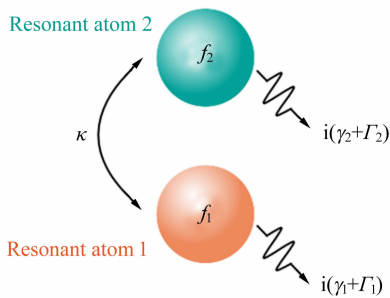


图 11 非厄米超表面结构示意图^[29]

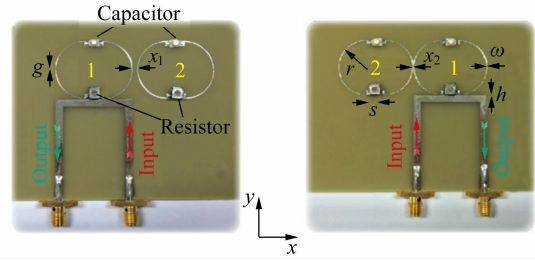
开口谐振环的几何结构和材料决定了谐振器的谐振频率、衰减速率和有效偶极矩的辐射耦合强度. 通过叠加入射场和由于振荡偶极子产生的向前辐射场, 可以得到透射场. 由于传输矩阵是非厄米矩阵, 该结构可以观察到传输的本征值和本征态中的非厄米现象. 改变入射光的频率和开

口谐振之间的耦合可以研究奇异点周围的参量空间,改变入射辐射频率和入射角也可以观测到奇异点.通过观察圆偏振光在包络和非对称传输下的水平交叉现象和特征态的转换,验证了奇异点的存在.非厄米超表面结构是由具有各向异性辐射损耗的单元结构构成,因此可以通过工作频率及单元结构参量的变化来调控超表面的本征态,并通过分析超表面的传输性研究奇异点处的物理特性,包括表面拓扑性、奇异点周围本征态交换以及圆极化辐射波的非对称传输.基于此结构,进一步发现在只改变入射角的情况下,仍然能观察到奇异点,该方法为观察奇异点动态环绕相关的物理学现象提供了新途径.

2022 年,祝可嘉等^[30]基于 1 对开口谐振环共振场耦合构成非厄米系统,充分利用超构材料谐振子结构参量易调节的特点,构造了耦合系数符号可灵活调控的非厄米系统,如图 12(a)所示.然后在微带线平台上构建了基于开口谐振环(由底部金属衬底、中间电介质层以及上表面具有特定图案的金属结构组成的三明治结构)的耦合系数符号可调的非厄米系统,并用于实验观测奇异点的手性态翻转现象.图 12(b)和 12(c)分别为开口谐振环相对转角为磁耦合($\theta=180^\circ$)和电耦合($\theta=0^\circ$)时构造的非厄米系统实验样品.由于开口谐振环具有高品质因子的磁谐振,因此常被用来构造等效磁导率小于零的磁单负超构材料.若设计 1 对相互耦合的开口谐振环,则环内部的电流在开口处会积累电荷,这就导致金属环的部分以及开口空隙位置可以分别等效为电感及电容,则开口谐振环间的耦合就会包含电耦合及磁耦合 2 部分,通过调节开口谐振环的相对转角就可以灵活调节电耦合和磁耦合权重,实现耦合系数符号的调节.



(a) 二阶非厄米系统



(b) 试验样品 ($\theta=180^\circ$) (c) 试验样品 ($\theta=0^\circ$)

图 12 非厄米系统实验原理及样品图^[30]

磁耦合相互作用时,2 个环内的电流反向,所以开口谐振环实现的是负耦合;电耦合相互作用时,2 个环内的电流同向,所以开口谐振环实现的是正耦合.实验中在开口谐振环中加载可调电阻元件用来调节共振原子的本征损耗,通过改变开口谐振环间的距离调节正耦合和负耦合的强度,构造出非厄米系统.实验中使信号从矢量网络分析仪的输入端输出,并通过同轴电缆由 $50\ \Omega$ 阻抗的 SMA 接头连接微带波导的上下导体(接头的内芯接触上表面金属,接头的接地端连接微带线的底层金属),从而把探测信号输入系统.在具有不同耦合系数符号的非厄米系统中,随着振荡相位的变化,系统的本征态发生演化,但是始终保持固定的相位差,因此奇异点的手性态发生翻转.当调节系统的非厄米参量使得系统模式从劈裂演化到合并的奇异点时,就可以用来观察耦合系数符号变化时奇异点对应手性态的影响.

4 非厄米人工表面等离子激元

表面等离子激元是光与金属表面的自由电子相互作用而引起的电磁波模式,局域在金属和介质交界面附近,其主要性质是表面传输特性和近场增强特性.由于表面等离子激元被认为是量子信息的理想载体,近年来,许多厄米与非厄米系统中都研究了单个表面等离子激元在一维波导中的传输特性.目前大多数研究主要集中在光学波导或金属纳米线中,单个等离子激元与量子点相互作用的非厄米系统中某个方向的传输特性,非厄米量子点等离子体波导耦合系统中的表面等离子激元的传输特性,以及石墨烯非厄米表面等离子激元中的传输特性.

2020 年,J. Ding 等^[31]构建了石墨烯等离子体波导系统,该系统由 2 个谐振器耦合到石墨烯

等离子体带状波导组成,如图 13 所示. 通过在石墨烯等离子体波导系统中施加外部电压得到非厄米系统,进一步研究其单向无反射性. 通过调节 3 种石墨烯翼形谐振器之间的距离,使其产生相互之间的远场耦合,调节外部电压实现费米能级产生石墨烯表面电导率的动态调节,实现等离子体奇异点系统. 进一步验证了此结构中存在 2 个奇异点,且都能发生无反射现象.

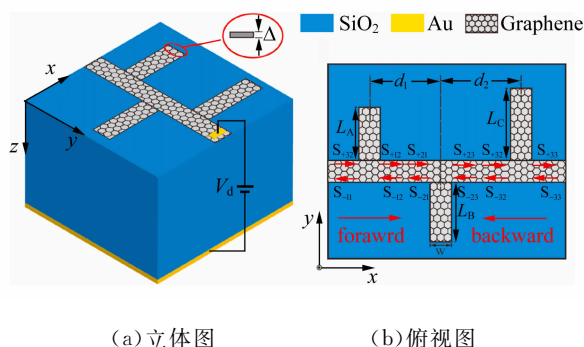


图 13 石墨烯等离子体带状波导示意图^[31]

2020 年, H. Yang 等^[32]提出了由 2 个 Λ 型三能级量子点耦合到 1 个等离子体波导组成的非厄米量子系统,利用经典驱动场在奇异点处实现了主动控制的双波段单向无反射,如图 14 所示. 通过调节 2 个量子点之间的相移、损耗和量子点波导耦合强度,验证了外部经典驱动场可以主动操纵双波段的单向反射率. 由于 2 个量子点辐射损耗的存在,该系统为非厄米系统. 通过调节经典驱动场,深入分析了 2 个量子点之间的相移、耗散及量子点波导耦合强度对双波段单向无反射的影响.

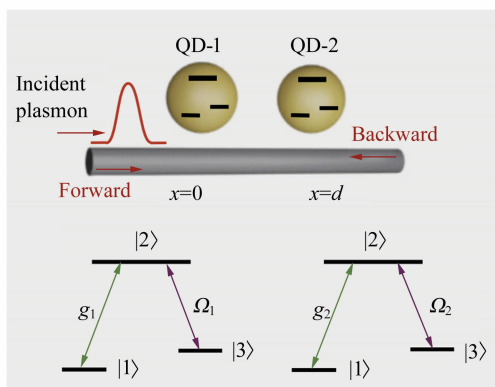
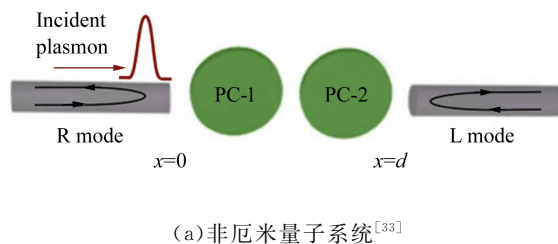
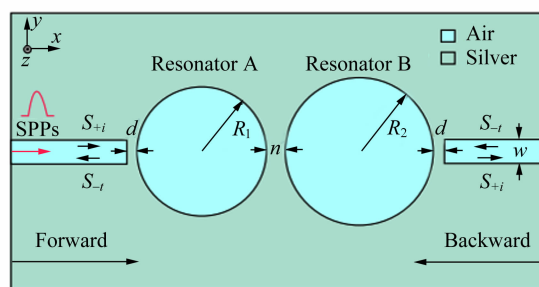


图 14 等离子体波导耦合 2 个 Λ 型三能级量子点结构示意图^[32]

2021 年, H. Yang 等^[33]提出了由 1 个等离子体波导和 2 个耦合等离子体腔组成的非厄米量子系统,如图 15(a)所示,其中由于 2 个等离子体腔存在辐射损耗,从而构成非厄米系统. 通过适当调节 2 个等离子体腔之间的耦合强度损耗率比和等离子体腔-波导耦合强度比,可以在奇异点处获得双波段单向反射率,实现了双带单向无反射. 2019 年, F. Zhao 等^[34]利用等离子体波导系统,研究了基于近场耦合的高阶等离子体谐振器在奇异点处的双带单向无耦合现象和近完美吸收. 该系统由 2 个高阶等离子体谐振器与金属-绝缘体-金属等离子体谐振波导组成,如图 15(b)所示,由于 2 个谐振器存在辐射损耗,故构成的是非厄米系统. 通过适当调节 2 个谐振器之间的耦合强度,在奇异点处实现了正向和反向高品质因子的吸收,品质因子达到谐振器本征模的 2 倍.



(a) 非厄米量子系统^[33]



(b) 等离子体波导系统^[34]

图 15 由 1 个等离子体波导和 2 个耦合等离子体腔组成非厄米结构示意图

5 结束语

人工光子微结构中非厄米量子现象的研究,是基于经典电磁波系统和微观量子系统具有共同的波动物理规律开展. 量子理论预言的凝聚态、原子系统所蕴含的许多量子效应,也得以在人工光子微结构系统中展现. 本文介绍了基于光子人工微结构特殊光调控效应实现的非厄米量子现

象,即基于光子晶体、超材料、表面等离子激元系统进行厄米量子效应研究. 人工光子微结构中有关非厄米量子现象的研究,一方面形象地模拟了微观系统的量子行为,将量子体系中理论预言但难以实验观测的现象在相对经典的光子平台中实现,从而可以更加深入地研究非厄米量子现象;另一方面,非厄米体系中的成熟概念可以指导新型光子器件的设计与开发,带来新的技术突破. 相关研究不仅可以揭示许多未验证的物理问题,还可以为新型量子调控器件的研发提供科学基础.

参考文献:

- [1] Bender C M, Boettcher S. Real spectra in non-Hermitian Hamiltonians having PT symmetry [J]. *Physical Review Letters*, 1998,80(24):5243-5246.
- [2] 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.
- [3] Bender C M. Making sense of non-Hermitian Hamiltonians [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2007,70(6):947-1018.
- [4] Shankar R. *Principles of quantum mechanics* [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2012.
- [5] Mostafazadeh A. Pseudo-Hermiticity versus PT symmetry: The necessary condition for the reality of the spectrum of a non-Hermitian Hamiltonian [J]. *Journal of Mathematical Physics*, 2002,43(1):205-214.
- [6] Bender C M, Brody D C, Jones H F. Complex extension of quantum mechanics [J]. *Physical Review Letters*, 2002,89:270401.
- [7] Martino D C, Francesco D L, Richard A S, et al. Non-Hermitian sensing in photonics and electronics: A review [J]. *Sensors*, 2022,22(11):3977.
- [8] Bo P, Zdemir A K, Liertzer M, et al. Chiral modes and directional lasing at exceptional points [C]// *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016,113(25):201603318.
- [9] Shin Y, Kwak H, Moon S, et al. Observation of an exceptional point in a two-dimensional ultrasonic cavity of concentric circular shells [J]. *Scientific Reports*, 2016,6:38826.
- [10] Peng B, Ozdemir S K, Lei F C, et al. Parity-time-symmetric whispering gallery microcavities [J]. *Nature Physics*, 2014,10(5):394-398.
- [11] Regensburger A, Bersch C, Miri M A, et al. Parity-time synthetic photonic lattices [J]. *Nature*, 2012,488(7410):167-171.
- [12] Zhang X, Wang Y, Wong Z J, et al. Single-mode laser by parity-time symmetry breaking [J]. *Science*, 2014,346(6212):972-975.
- [13] Xu H, Mason D, Jiang L Y, et al. Topological energy transfer in an optomechanical system with exceptional points [J]. *Nature*, 2016(537):7618, 80-83.
- [14] Peng B, Zdemir A K, Lei F, et al. Parity-time-symmetric whispering-gallery microcavities [J]. *Nature Physics*, 2014,10(5):394-398.
- [15] Longhi S. Quantum-optical analogies using photonic structures [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2009,3:243-261.
- [16] Klaiman S, Gunther U, Moiseyev N. Visualization of branch points in PT-symmetric waveguides [J]. *Physical Review Letters*, 2008,8:080402.
- [17] Longhi S. Quantum-optical analogies using photonic structures [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2009,3(3):243-261.
- [18] Liu Y H, He L, Shi Y H. Microwave propagation in the graphene-like photonic crystal slab [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2012,29(4):621-624.
- [19] Wang X, Jiang H T, Li Y, et al. Transport properties of disordered photonic crystals around a Dirac-like point [J]. *Optics Express*, 2015,23(4):5126-5133.
- [20] Deng F S, Sun Y, Wang X. Observation of valley-dependent beams in photonic graphene [J]. *Optics Express*, 2014,22(19):23605-23613.
- [21] Xi H Y, Dong Y, Zhang L, et al. Wireless sensing for monitoring of coal gangue mixing based on PT symmetry [J]. *IEEE Access*, 2022,10:66401-66408.
- [22] 胡渝民,宋飞,汪忠. 广义布里渊区与非厄米能带理论[J]. *物理学报*, 2021,70(23):230307.
- [23] Ding K, Ma G, Xiao M, et al. Emergence, coalescence, and topological properties of multiple exceptional points and their experimental realization [J]. *Physical Review X*, 2016,6(2):021007.
- [24] Guo A, Salamo G J, Duchesne D, et al. Observation of PT-symmetry breaking in complex optical potentials [J]. *Physical Review Letters*, 2009,103:093902.
- [25] Zhen B, Hsu C W, Igarashi Y, et al. Spawning

- rings of exceptional points out of Dirac cones [J]. Nature, 2015, 525(7569):354-8.
- [26] Liu F M, Zhao D, Cao H, et al. Exceptional points in non-hermitian photonic crystals incorporated with a defect [J]. Applied Sciences, 2020, 10(3):823.
- [27] Wang X X, Li Y D, Hu X Y, et al. Non-Hermitian high-quality-factor topological photonic crystal cavity [J]. Physical Review A, 2022, 105:023531.
- [28] Dong S H, Hu G W, Wang Q, et al. Loss-assisted metasurface at an exceptional point [J]. ACS Photonics, 2020, 7(12):3321-3327.
- [29] Li Z P, Cao G T, Li C H, et al. Non-Hermitian electromagnetic metasurfaces at exceptional points (invited review) [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2021, 171:1-20.
- [30] 祝可嘉, 郭志伟, 陈鸿. 实验观测非厄米系统奇异点的手性翻转现象[J]. 物理学报, 2022, 71(13):131101.
- [31] Ding J, Wang Y K. Dual frequency tunable unidirectional reflectionless propagation in non-Hermitian graphene plasmonic waveguide system [J]. Optical Materials, 2020, 110:110515.
- [32] Yang H, Qiu D X, Zou X Y, et al. Active controlled dual-band unidirectional reflectionlessness by classical driving field in non-Hermitian quantum system [J]. Quantum Science and Technology, 2020, 5(4):045018.
- [33] Yang H, Zhao F, Yu L X, et al. A plasmonic waveguide end-coupled to two plasmonic cavities in a non-Hermitian quantum system for dual-band unidirectional reflectionlessness [J]. Communications in Theoretical Physics, 2021, 73(3):035102.
- [34] Zhao F, Dai T Y, Zhang C, et al. Dual-band unidirectional reflectionlessness at exceptional points in a plasmonic waveguide system based on near-field coupling between two resonators [J]. Nanotechnology, 2019, 30:045205.

Experimental study of non-Hermitian quantum phenomena in artificial photonic microstructure

LIU Yan-hong^{a,b}, SUN Kai^a

(a. Shanxi Provincial Key Laboratory of Microstructure Electromagnetic Functional Materials;

b. School of Physics and Electronic Science, Shanxi Datong University, Datong 037009, China)

Abstract: Since most of the open systems in real world are non-Hermitian systems, it is of great value to study non-Hermitian systems in many aspects the as fundamental research and frontier applications. The artificial photonic microstructure can provide a research platform for exploring such non-Hermitian phenomena. In this article, the basic theory of parity-time symmetric systems and singularities was introduced. The recent progresses in the experimental study of non-Hermitian quantum effects in artificial photonic microstructures based on photonic crystals, metamaterials and surface plasmon polaritons were demonstrated, as well as related application prospect of artificial photonic microstructures.

Key words: non-Hermitian quantum effects; photonic crystals; metamaterials; surface plasmon polaritons

[责任编辑:任德香]