

# Nature Nanotechnology: 非厄米和奇异点光子学的新发展

原创 九乡河 两江科技评论 2023-07-01 17:30 发表于江苏

收录于合集

#最新文章

566个



诺派激光  
NPI LASERS

266nm - 12 $\mu$ m

**全波段超快激光器领导品牌**

sales@npilasers.com

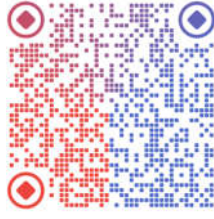
欢迎课题组投递中文宣传稿，投稿方式见文末

撰稿|由课题组供稿

## 导读。

2023年6月29日，华中科技大学武汉光电国家研究中心、光学与电子信息学院的陈林-王健教授课题组与美国纽约城市大学先进科学研究中心Andrea Alù教授课题组和新加坡国立大学电子和计算机工程系仇成伟教授课题组共同合作，回顾了微纳非厄米光子学系统与奇异点的最新进展，并对该研究方向提供了开放性的展望，其他参与撰写的还有斯坦福大学范汕洄教授。相关综述以“Exceptional points and non-Hermitian photonics at the nanoscale”为题发表于《Nature Nanotechnology》期刊上。

论文链接：



## 摘要

非厄米系统中产生的奇异点（EP）导致了各种有趣的波现象，并在各种物理平台上引起了广泛的研究兴趣。在这篇综述中，我们回顾了各种纳米级系统中与奇异点研究有关的最新进展，并概述了与奇异点相关的理论，包括高阶奇异点、体费米弧和Weyl奇异环。我们探究与奇异点相关的新兴技术，特别是关注噪声对奇异点附近传感的影响、提高基于奇异点的非对称传输的效率、非线性奇异点系统中的光隔离以及在拓扑光子学中引入奇异点的光操控方法。我们还讨论了奇异点在实际应用中的局限性，并提出了一些针对性对策，这有望解决先进纳米光子器件在设计和使用中存在的问题。

### BOX1: PT对称、奇异点和反PT对称

对于哈密顿量  $H(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t)$ ，其中  $\mathbf{r}$ 、 $\mathbf{p}$  和  $t$  分别为位置坐标、动量和时间， $P$  算符的作用效果是使得空间空间反演： $\mathbf{r} \rightarrow -\mathbf{r}$  和  $\mathbf{p} \rightarrow -\mathbf{p}$ 。 $T$  算符则会导致时间反演： $\mathbf{p} \rightarrow -\mathbf{p}$  和  $t \rightarrow -t$ 。如果  $H$  是 PT 对称哈密顿量，则  $[H, PT] = HPT - PTH = 0$ 。PT 对称非厄米哈密顿量最简单的例子可以被设想为两个耦合实体，它们以平衡的形式与周围环境交换能量。系统本征态  $|\psi\rangle = [a_1, a_2]^T$  的演化遵循薛定谔型方程  $i\partial/\partial t|\psi\rangle = H|\psi\rangle$ ， $H$  可写为

$$H = \begin{bmatrix} \omega_1 - i\gamma_1 & \kappa \\ \kappa & \omega_2 - i\gamma_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中， $\omega_{1,2}$ ， $\gamma_{1,2}$  分别是两个实体的固有谐振频率和增益/损耗率， $\kappa$  是耦合强度。 $P$  算符的作用导致两个耦合实体的位置交换，而  $T$  算符的作用是将有增益的系统变成有损失的系统（反之亦然）。如果 PT 算子同时作用，我们有

$$PTH(PT)^{-1} = \begin{bmatrix} \omega_2 + i\gamma_2 & \kappa \\ \kappa & \omega_1 + i\gamma_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

哈密顿量  $H$  的 PT 对称充分条件是  $\omega_1 = \omega_2 \equiv \omega_0$  和  $\gamma_1 = -\gamma_2 \equiv \gamma$ ，它描述了两个具有相同谐振频率的耦合谐振腔，其中一个谐振腔的损耗率等于另一个的增益率式 (1) 中哈密顿量的特征值为

$$E = \omega_{ave} - i\gamma_{ave} \pm \sqrt{(\omega_{diff} - i\gamma_{diff})^2 + \kappa^2} \quad (3)$$

其中  $\omega_{ave} = (\omega_1 + \omega_2)/2$ 、 $\gamma_{ave} = (\gamma_1 + \gamma_2)/2$ 、 $\omega_{diff} = (\omega_1 - \omega_2)/2$  和  $\gamma_{diff} = (\gamma_1 - \gamma_2)/2$ 。

当系统是 PT 对称时，特征值为  $E = \omega_0 \pm \sqrt{\kappa^2 - \gamma^2}$ ，当  $\kappa > \gamma$  (PT 对称相) 时特征值为实数，当  $\kappa < \gamma$  (PT 破缺相) 时特征值为复数。在 PT 对称相中，特征值的实部不同，而特征值的虚部是简并的。相反，在 PT 破缺相，特征值的实部是简并的，而特征值的虚部是分裂的。两个特征值在 PT 相变处  $\kappa = \gamma$  时简并，对应于一个奇异点，并且只有一个特征向量  $[1, i]^T$ 。该特征向量是手性的，因为它不是时间反转不变的。

在反 PT 对称系统中也观察到奇异点。反 PT 对称性，以  $HPT + PTH = 0$  为特征，可以在两个具有纯虚耦合强度的耦合实体中进行研究。从数学的角度来看，PT 对称哈密顿量与常数单位虚数“ $i$ ”相乘可以得到反 PT 对称哈密顿量，

$$H_{anti-PT} = \begin{bmatrix} \omega_0 - i\gamma & i\kappa \\ i\kappa & -\omega_0 - i\gamma \end{bmatrix} \quad (4)$$

特征值是  $E = -i\gamma \pm \sqrt{\omega_0^2 - \kappa^2}$ 。如果我们忽略系统中的固有损耗  $-i\gamma$ ，则当  $\omega_0 > \kappa$

(反 PT 破缺相) 时特征值是实数，当  $\omega_0 < \kappa$  (反 PT 对称相) 时特征值是复数。

反 PT 破缺相处，特征值的实部分裂，而虚部简并。相反，反对 PT 对称处，特征值的实部是简并的，而虚部则分裂。两个特征值在 PT 相变处  $\omega_0 = \kappa$  简并，对应于奇异点。

## 研究亮点

非厄米物理学的最新进展为广泛的基础研究和工程应用提供了大量机遇。在厄米系统中，总能量是守恒的，系统的哈密顿量具有实数域特征能量谱。相反，在非厄米系统中，能量与环境进行交换，相应的哈密顿量一般具有复数域特征能量谱。值得注意的是，服从宇称-时间（PT）对称性的非厄米系统（见BOX1），即在同时应用空间对称性操作（反转）和时间反转操作时保持不变的系统，尽管是开放系统，仍能支持实数域特征谱。同时，PT对称哈密顿量的频谱不一定在实数域是实数，随着参数的变化，它可以自发地变为复数，从对称相转到破缺相。对称相和破缺相之间的转换出现在所谓的奇异点（EP），其特点是特征值和对应特征态同时简并（见BOX1），会导致一系列不寻常的现象。在奇异点，系统的特征空间的维度低于系统本身。这与常见的能谱简并不同，如厄米系统的实简并点（DPs），它只有特征值是简并的，而特征态却不简并。虽然这些概念最初是在量子力学的背景下提出的，但薛定谔方程和亥姆霍兹方程遵循类似的二阶偏微分形式，因此光学平台已经被广泛地用来实现PT对称系统和探索奇异点物理学性质。例如，观察到在自发的对称性破缺转变中出现了光学透明度增强的奇特现象。通过在耦合光波导中实现复数折射率分布，观察到在自发的对称性破缺相变中出现了光学透明度增加的奇特现象和得到在PT对称相和PT破缺相的本征态（图1a）。

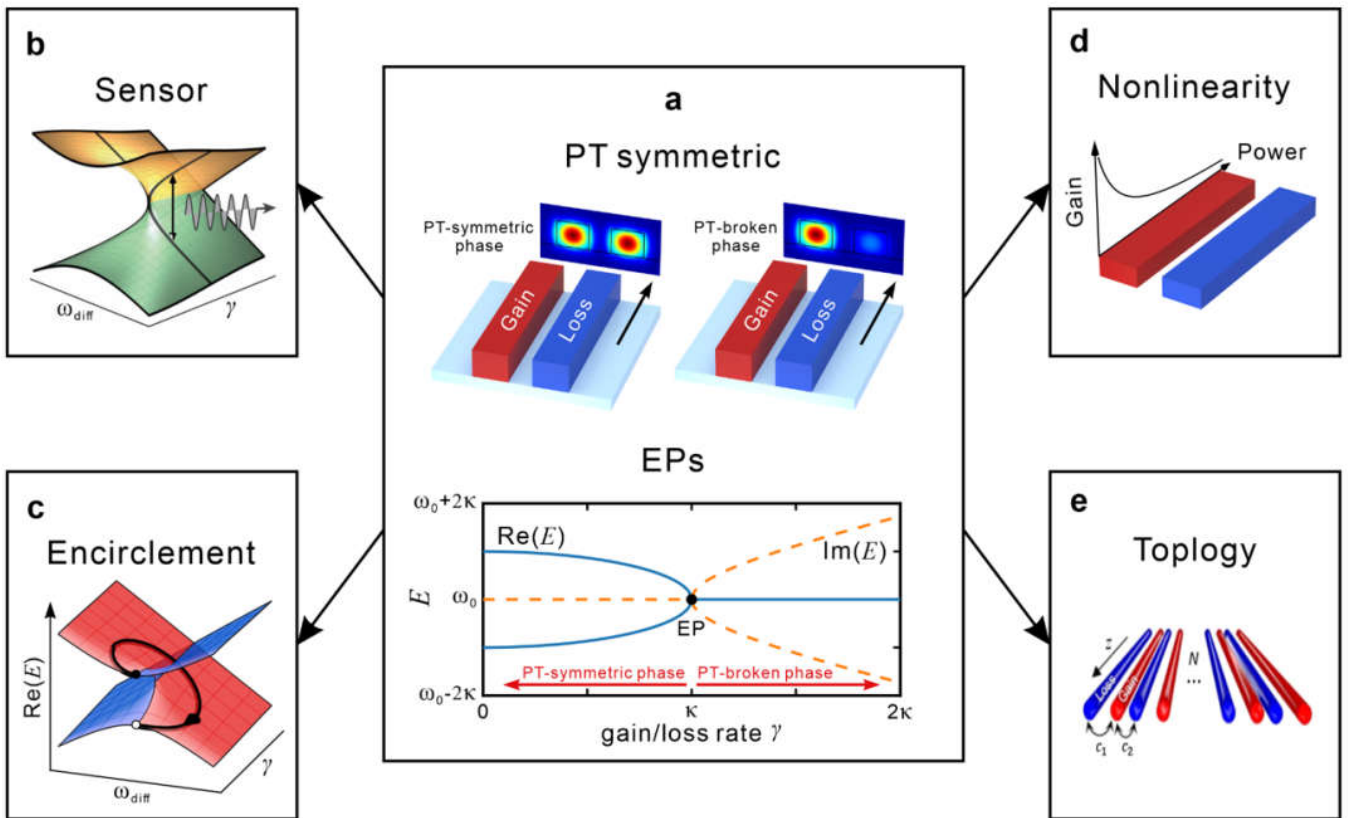


图1| 奇异点及其应用。a，耦合光学系统中的PT对称性。b，工作在奇异点附近的传感器。c，环绕奇异点实现非对称传输。d，奇异点非线性光学中的应用。e，奇异点在拓扑光子学中的应用。

在这篇综述中，我们讨论了在各种纳米级平台上关于奇异点的最新发现，以及在纳米光子学方面的应用。在第一节中，我们回顾了与奇异点相关的最新理论进展，包括新型纳米光子系统中的奇异点，高阶奇异点和体费米弧。在第二节中，我们回顾了奇异点传感的最新进展，以及噪声对整体灵敏度的影响，然后尝试讨论如何去解决这些问题（图1b）。在第三节中，我们重点介绍了基于环绕奇异点进行非对称

传输的最新研究进展，包括提高传输效率、缩减器件尺寸、传输多种模式，在锁模激光器中的应用（图1c）。在第四节中，我们回顾了在新颖纳米光子系统中基于非线性和奇异点的结合以实现非互易传输，以及利用非线性效应在非厄米系统中实现各种奇异光学现象的最新进展（图1d）。在最后一节中，我们回顾了奇异点在拓扑光子学中的应用（图1e），并总结了奇异点在纳米光子学实际应用中的机遇、挑战和前景。我们注意到，几年前已经发表了几篇类似主题的综述文章，但它们并没有涵盖奇异点相关的新兴技术的最新进展。

## 非厄米系统中的奇异点

奇异点已经在许多物理学领域中得到了广泛的研究，包括光学，声学 and 量子力学等，本综述主要关注纳米尺度的光学中的情景。在PT对称系统中出现的奇异点已经在耦合的微谐振腔系统中被广泛研究。例如，两个硅谐振腔与光纤耦合，通过在奇异点调控手性来调节透明度和吸收。通过调整一个谐振腔使得其在奇异点处工作，透明或吸收的发生取决于特征态的手性。通过非线性布里渊散射诱导的透明或吸收，非厄米系统可以在单个光学微腔的两个共振频率中引入增益和损耗来构建。在反PT对称系统中也可以观察到奇异点（见BOX1），它们已经在光谱维度上得到了实验证明。与具有实值耦合强度的PT对称系统相比，反PT对称系统的特点是具有纯虚值耦合。通过从左右两侧驱动两个相同频率的激光器，构建了一个旋转的有损谐振腔，以实现反PT对称性及其自发破坏（图2a）。与厄米对应物相比，反PT破缺相在光学隔离和纳米颗粒传感方面表现出显著的优势。由于等离子体激元和振动模式的耦合，在静电门控石墨烯纳米带阵列中也实现了非厄米系统（图2b）。传统的非厄米系统通常由定制的纳米结构器件构建，具有受控的光学增益和损耗，但需要精确的制造和调谐。最近的一项研究表明，可以使用现成的单模光纤来实现反PT对称相变和奇异点。通过受激布里渊散射调节两个传播信号的强度和耦合，可以精确控制相互作用的非厄米参数。在实量子系统中也发现了奇异点，使用染料微腔装置来制备与储层耦合的开放光子玻色-爱因斯坦凝聚体。非厄米相变的特征是凝聚态二阶相干性的双指数衰减，这是由于量子气体中奇异点的出现而发生的（图2c）。

非厄米系统和奇异点研究的另一个前沿是高阶奇异点领域，高阶奇异点由两个以上的特征值和特征态简并形成。高阶奇异点附近的能谱变化比二阶奇异点处的能谱变化更剧烈。最近，通过设计一对耦合波导中两种混合模式和横向模式之间的相互作用，证明了三阶奇异点。高阶奇异点的对称性和拓扑特性可以利用带状和复数耦合的PT对称光子Lieb晶格进行研究。在这种几何结构中，可以通过具有非对称复数耦合系数的定制耦合来引入PT对称性。此外，可能会发生朗道-齐纳布洛赫振荡，它表现出一些有趣的特征，例如不对称非对称能量分布、伪厄米传播和三阶奇异点的二次发射（图2d）。光学微腔通过增加腔数并提供不平衡的增益损耗曲线，成为研究高阶奇异点的良好平台。利用高阶奇异点与白光微腔形成之间的基本联系，提出了一种平顶滤光片。使用交织算子技术合成的超对称阵列也可以实现高阶奇异点。通过施加额外的虚磁场，耦合谐振腔或波导的超对称阵列在增益-损耗梯度分布下的所有能级在各向同性的高阶奇异点处合并。

迄今为止研究的大多数奇异点都是各向同性的，即无论在参数空间中从哪个方向接近它们，它们都表现出相同的奇异行为。各向异性二阶奇异点由两个具有相同手性的普通二阶奇异点合并而成，当从参数空间中的不同方向接近时，它表现出不同的奇异行为。混合二阶奇异点可以通过合并两个具有相反手性的

普通二阶奇异点来建立。这两个奇异点是通过引入适当的增益和损耗从平坦带中出现的III型狄拉克点建立的。与普通二阶奇异点相比，这种混合奇异点具有不同的几何相位。在混合PT对称和反PT对称系统中操纵奇异点会产生独特的拓扑特征，从而实现法诺线形和洛伦兹线形之间反射和透射光谱的可调性。成对奇异点的拓扑特性实现了具有非平凡Berry相的独特能带结构。光子晶体板开放系统中的辐射损耗导致非厄米体费米弧，在其周围可以实现远场辐射偏振中的半整数拓扑电荷（图2e）。这种拓扑特性提供了一种易于实现的，在较宽的频率范围内产生半整数矢量涡旋光束的方法，并且可以用于设计具有奇异发射轮廓的周期性光子晶体激光器。最近在高阶拓扑半金属中发现了一种新的简并能带结构，即Weyl奇异环。具有高阶Weyl奇异环的半金属支持表面和角费米弧态，它们分别由Weyl奇异环在表面和角上的投影所界定。

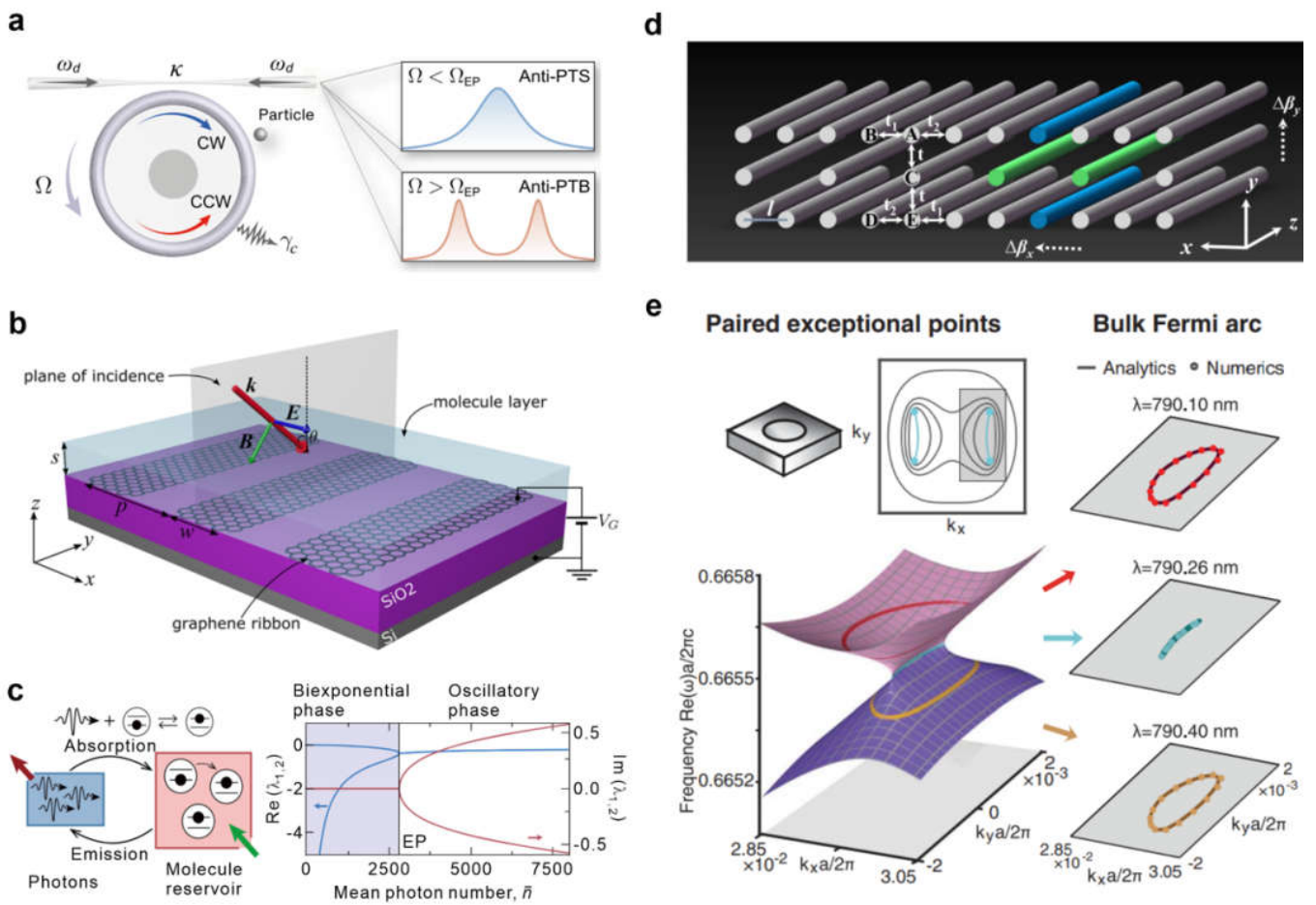


图2| 纳米光子系统中的PT对称性和奇异点。a，环形微谐振腔中的奇异点。这里的反PT对称性是通过角速度 $\Omega$ 的机械旋转引起的相反频移以及散射引起的耗散耦合 $\kappa$ 实现的。b，石墨烯等离子振动模式耦合系统中的奇异点。通过改变光的入射角和石墨烯费米能级可以获得奇异点。c，光子气体微腔中的奇异点。通过用激光泵浦染料分子来补偿损失，光子和电子激发的染料分子之间的激发交换，光子气体耦合到该储层。d，耦合光波导阵列中的三阶奇异点。垂直于带的折射率梯度被用作外场。在这样的系统中，可以在存在折射率梯度的情况下实现非零三阶奇异点。e，由单个狄拉克点分裂的成对奇异点产生的体费米弧。

## 奇异点传感器

纳米光子系统长期以来被认为是各种传感应用最有前途的平台之一。由于能够为多种情况提供小型化甚至片上解决方案，此类系统被认为是下一代传感的杰出候选者，特别是在生物化学、医疗诊断，甚至是快速发展的物联网。一般来说，纳米光子传感器预计具有高灵敏度，即对输入参数的微小变化产生较大的响应。在单粒子检测、温度传感和气体传感等场景中，灵敏度通常被视为关键品质因数。为了进一步提高灵敏度，研究人员转向研究在奇异点处或附近运行的系统。数学推导表明，当 $n$ 阶奇异点受到强度微扰时，特征频率的分裂通常与微扰 $1/n$ 次方成正比。同时，传统传感器通常在另一种简并性附近工作，例如DP，它只能提供微扰强度和频率分裂之间的线性关系。这表明，与DP传感器相比，基于奇异点的传感器可以对小微扰提供更大的响应。在本节中，我们将首先回顾奇异点在传感中的应用原理，以及纳米光子领域的一些最新发现。尽管计算结果很有希望，但我们还将讨论这些传感器的实际问题和局限性。

基于奇异点传感的理论和应用示例，研究人员首先从理论上提出了在传感领域采用奇异点机制的想法。正如上文中提到的，哈密顿量的特征值和特征向量在奇异点处都会简并，这是非厄米系统的一个明显特征。对于二阶简并系统，整个哈密顿量的特征值分裂的速率与微扰的平方根有关。为了可视化奇异点传感器的优越性能，分裂增强因子可以定义为基于奇异点的频率分裂与DP频率分裂的比值，即相对于微扰是线性情况的倍数。该比值与微扰的平方根成反比，微扰趋于0时，其接近无穷大。这种关系最初是在使用回音壁模式（WGM）微腔检测纳米粒子的背景下提出的。这种空腔在没有任何微扰的情况下支持两种相反的传播模式，通常分别标记为顺时针（CW）和逆时针（CCW）。可以通过在腔体边界引入不均匀性来实现非对称散射，在这种情况下为瑞利散射体。可以定制散射体，使得从一种模式到另一种模式的反向散射不为零，但在另一个方向上不存在，因此，系统表现出奇异点，其中本征模式仅表现出单向传播。接近WGM腔附近的目标粒子会微扰该系统，导致共振频率分裂，其依赖于微扰强度平方根，这可以通过频谱分析来检测。

使用硅制成的WGM微环形线圈对这一概念进行了实验证明，如图3a所示。频率分裂与微扰的平方根依赖性在图3b中斜率的对数图中得到了证明，这与DP情况下获得的线性斜率不同。从那时起，制备了多种类型的传感器，包括用于单个或几个纳米颗粒检测、温度监测（图3c）、折射率传感和陀螺仪（图3d）。根据理论建议，还开发了许多高阶奇异点传感器，以进一步提升本征频率的分裂速率。例如，基于环形谐振腔和波导提出了具有四次根响应的四阶奇异点，如图3e和3f所示。最近，64阶奇异点也在时分复用光子谐振腔网络的背景下通过实验实现了。同时，还提出了奇异点传感器来帮助物体辨别，甚至测量一些物理常数，例如重力常数。

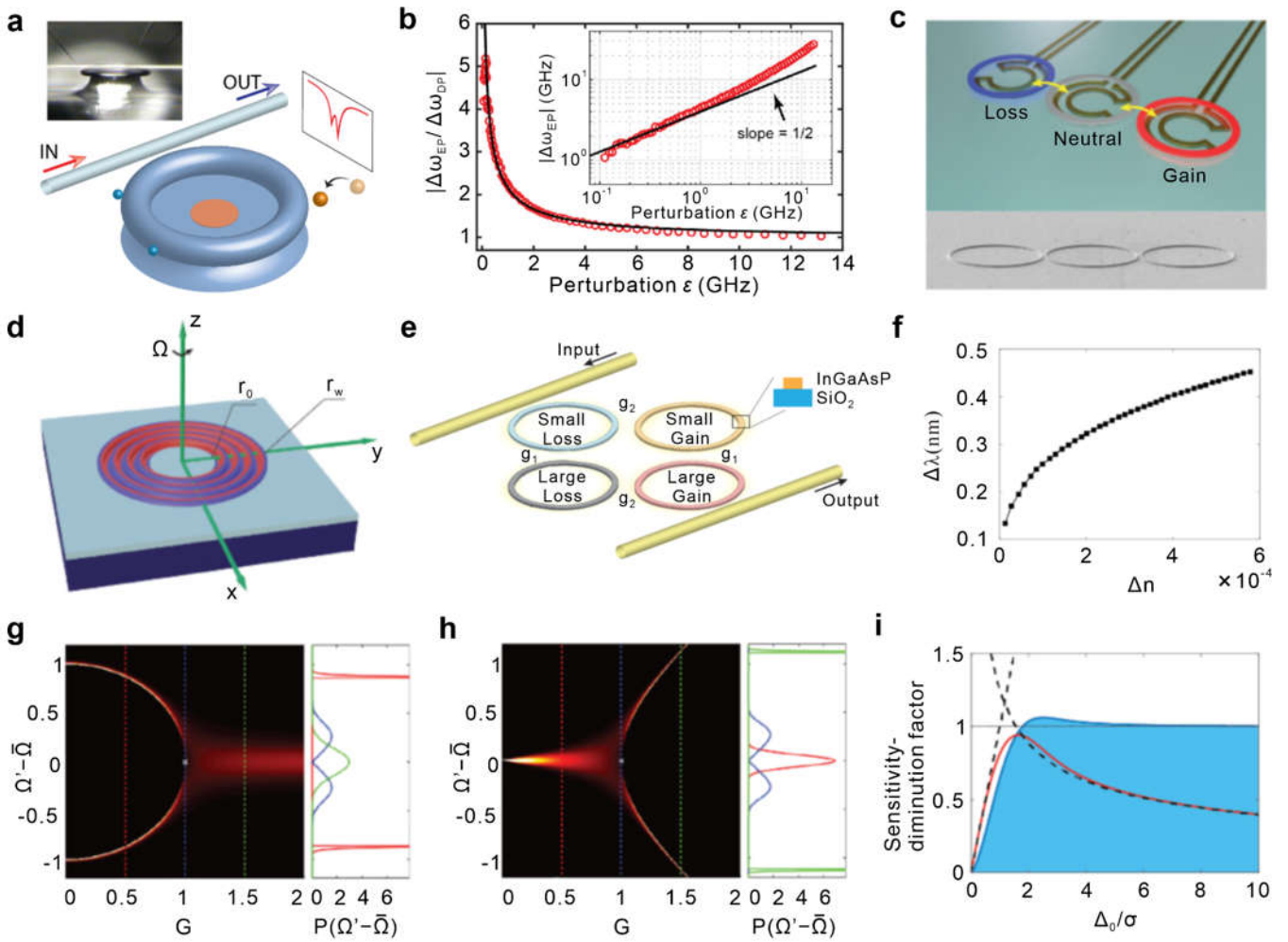


图3| 几种奇异点传感器的原理图以及由制备偏差引起的性能下降。**a**，参考文献60中基于回音壁模式谐振腔的用于纳米颗粒传感的奇异点传感器。首先将两个纳米尖端放置在腔体附近，以将系统调整至奇异点状态。当第三个粒子结合到空腔表面时，共振频率相应地分裂。**b**，频率分裂与微扰强度的实验测量。**c**，参考文献65中PT对称传感器的示意图和SEM图像。**d**，参考文献69中基于PT对称圆形布拉格激光器的纳米光子陀螺仪，即使在PT破缺区，旋转也会调制激光器的阈值增益。**e**，参考文献73中提出的由环形谐振腔和波导制成的四阶奇异点传感器。**f**，频率分裂与折射率变化的关系。当对其中一个谐振腔施加微扰（例如包层折射率的变化）时，频率分裂近似遵循四次方根响应。**g,h**，纳米级制造缺陷将影响频率分裂的可区分性，特别是在奇异点附近，如参考文献77中不同增益/阻尼的特征频率实部（**g**）和虚部（**h**）部分的分布所示。**i**，灵敏度降低因子图（实心曲线）。失谐参数  $\Delta_0$  的方差为  $\sigma^2$  在传感场景下，可以用  $\Delta_0/\sigma$  代替  $\Delta_0$  其中  $\Delta_0$  是要检测的信号。当时灵敏度严重降低，只有当  $\Delta_0/\sigma \gg 1$  时恢复。

### 奇异点传感的局限性

实际的奇异点系统无疑会受到各种干扰，导致偏离理想的探测性能。在所有非理想情况中，制备缺陷、稳定性以及量子噪声等基本考虑因素是最常见的。我们将简要讨论噪声和稳定性问题的根源，并讨论它们对奇异点传感器性能的影响。



制备缺陷：纳米光子奇异点传感器通常由两个或多个光学谐振腔组成。如前所述，实现奇异点的基本条件之一是让谐振腔支持简并频率状态。然而，在实际的实验条件下，谐振频率很可能不会恰好位于奇异点。图3g和3h显示了由失谐高斯分布引起的严重模糊效应。由此产生的灵敏度降低因子绘制在图3i中。幸运的是，通过引入奇异面的概念，可以从参数空间中消除波动。它最先是在使用耦合到波导的微环谐振腔的纳米颗粒传感背景下从理论上提出的。只有对CW和CCW模式具有明显影响的微扰（例如模式之间的损耗和附加耦合）才会导致奇异点的分频行为。

稳定性：热噪声（约翰逊-奈奎斯特噪声）和所需的额外器件产生的噪声是时间噪声的来源，最多可以降低到相对较低的水平。然而，在主动PT对称系统中，它们仍然是严重的问题，因为它们可能会导致系统不稳定。尽管可以通过向传感器添加均匀阻尼来消除这种不稳定性，但它会显著加宽线宽，从而降低分辨率性能。

热噪声和量子噪声：任何具有增益或损耗的系统从根本上都存在着热噪声和量子噪声。热噪声以及最终的量子噪声是否从根本上限制了奇异点传感器可实现的精度是一个持续了很久的争论。噪声通过现场测量进入，基于现场测量重建分频（因为它不是直接测量的）。虽然频率分裂随微扰非线性变化，但在无源传感器中，场本身的变化与DP和奇异点传感器的微扰成比例。在从测量场获得非线性频率分裂时，噪声沿着奇异点传播并在奇异点附近增加，从而使灵敏度增益为零。在具有增益的系统中，场可能在奇异点附近表现出强烈的非线性行为，但由于奇异点处的非正交模式，输出噪声也会升高，导致非线性响应通过增加的模式线宽得到精确补偿。这些限制适用于线性状态下的无源和有源系统。然而，研究表明，进入非线性状态时，灵敏度仍然可以提高。数值模拟验证了饱和增益可以作为负反馈并抑制来自相位和强度方面的过量噪声。

## 环绕奇异点系统

能谱面在非厄米系统的参数空间中形成了自相交黎曼面。这种黎曼面拓扑结构是厄米系统无法实现的，并且激发了越来越多的研究兴趣。最初，研究人员构建了一条绝热演化路径，以实现系统状态在不同能带之间的转换。对于二能级系统，以绝热方式包围一个奇异点（或称为准静态方法），注入本征态将在一个循环后转换为另一种本征态，但在两个循环后返回到自身，并积累大小为 $\pi$ 的Berry相位。然而，绝热定理在非厄米系统的动态演化下不再适用。动态环绕奇异点因其手性响应而特别令人感兴趣，其中最终输出状态仅取决于环绕方向，而与输入状态无关（图4a），这对于新型光学器件和技术至关重要。

基于环绕奇异点策略的手性响应面临的长期挑战来自于低传输效率和低空间利用率。研究人员发现，通过环绕移动的奇异点，以较小的绕环路径绝热地改变参数，可以显著减小非对称模式转换器的尺寸。为了提高非对称传输效率，有研究人员提出一种环绕方法，该方法利用参数边界上的快速哈密顿量变化，称为哈密顿跳跃。传输效率原则上提高到接近1。当哈密顿量参数接近无穷大时，哈密顿跳跃受益于本征态的收敛，因此可以实现相应奇异点相关的手性动力学，而不会因在这些状态之间转换而经历路径相关损失。通过将哈密顿跳变辅助环映射到标准绝缘体上硅平台上适当设计的耦合波导上，从理论上预测和实验证明了手性模式切换（图4b）。

最近，研究人员证明，沿系统哈密顿量参数空间边界的快速参数演化可以放松对绝热性的严格要求。沿哈密顿参数空间边界的绝热参数演化显示出较小的本征态演化速率，其中两个本征态之一的能量耗散率极低。沿哈密顿参数空间边界快速包围奇异点使得非对称模式转换器具有紧凑的尺寸和接近一的传输效率（图4c）。在耦合波导系统中，反PT对称系统的优点是仅在一个波导中产生光能，这更有利于光学集成应用。通过进一步建立横电模式和横磁模式之间的耦合，实现了非对称偏振转换器件。此外，还特意设计了基于奇异点环绕的多模系统，以扩大通信容量。三模波导系统中的动态环绕奇异点可以从每一侧提供两种不同的输出模式。最近，研究表明，在多态非厄米系统中动态包围任意数量的奇异点，最终输出态为损耗最低黎曼面上的态（图4d）。

经过多年的研究，人们认识到基于奇异点环绕的非对称传输的关键因素是非绝热效应和本征态之间的损耗差异导致本征态翻转。非绝热效应表明，由于不完美的绝热演化，初始本征态稍微耦合到其他本征态。在厄米系统中，触发的本征态占据输出能量的一小部分。然而，在非厄米系统中，如果初始本征态遭受较高损耗，而触发本征态遭受较低损耗，则它们的能量部分将在输出中反转，即本征态翻转。与奇异点包围策略相反，在没有包围奇异点的情况下也可以实现非对称响应，通过施加足够长的演化时间来增加初始本征态和触发本征态之间的损失差的累积，从而确保本征态翻转（图4e）。通过实验提出了一种准共路径单环排列，以直接观察缓慢变化的非厄米系统的环绕路径不包围奇异点的场演化和手性态转换。与上述基于哈密顿量动态演化的策略不同，明智地布置多个光学元件提供了一种实现空间光非对称传输的方法。

环绕奇异点的一个有前景的应用是塑造激光系统的光发射特性。通过设计激光模式以环绕非厄米奇异点，同时刻意避免非绝热跳跃，可以获得激光腔两个相对的双正交态（图4f）。多模串扰得到高度抑制，每一侧的激光模式都锁定为单一模式，保证了高质量的激光束。不可逆光学放大和手性模式切换都可以在无源的光动力学中环绕奇异点来实现。奇异点附近的动力学可以通过辐射压力耦合的斯托克斯过程由可调谐蓝色失谐泵浦场进行选择 and 操纵，从而形成拓扑放大器。

虽然大多数奇异点环绕研究都涉及线性系统，但增益的存在通常与非线性相关，特别是奇异点环绕和增益饱和的相互作用。此外，波矢空间中环绕的奇异点与拓扑能带理论中非厄米光子带的编织直接相关。

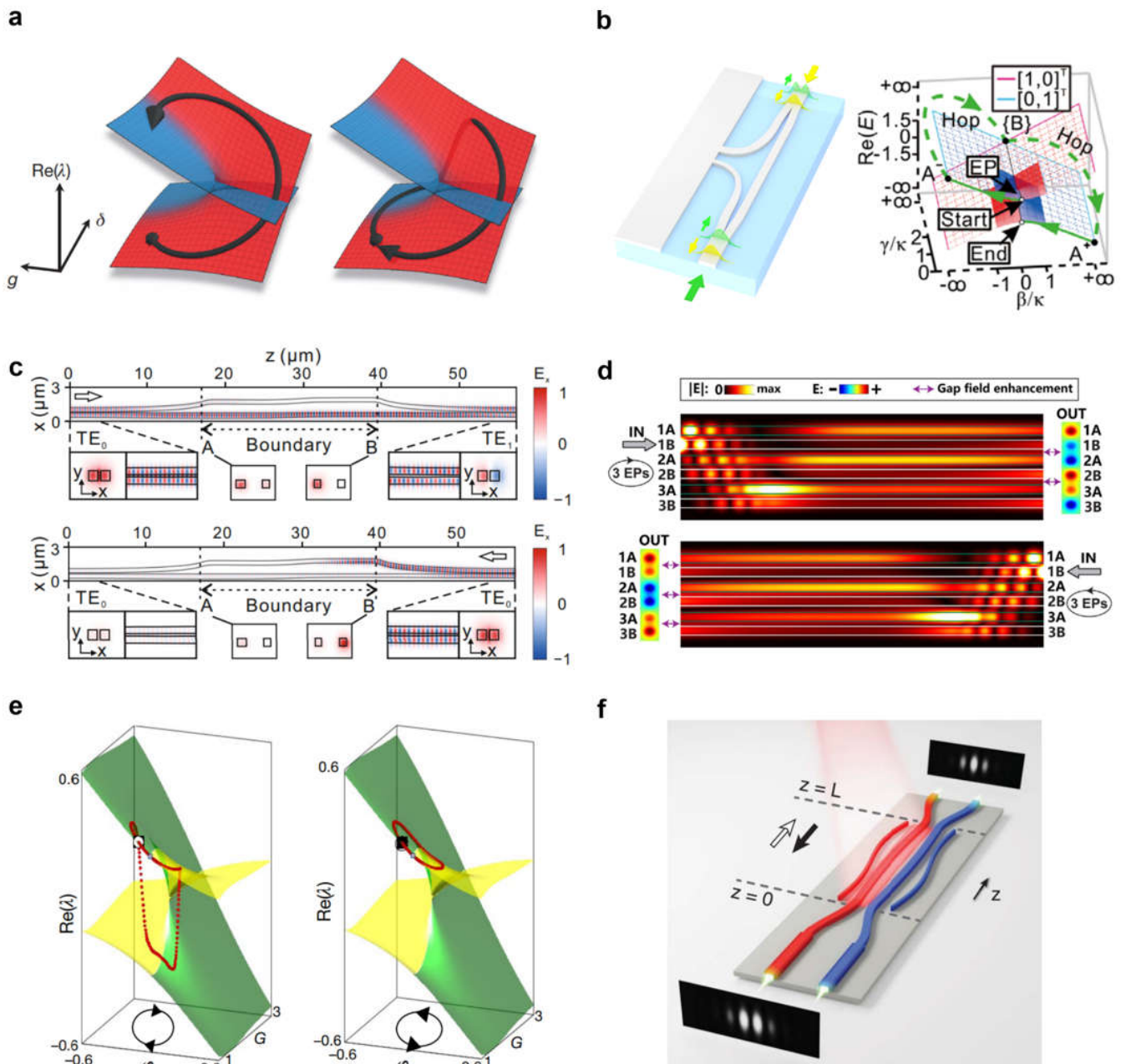


图4 | 环绕奇异点及其应用。a, 黎曼面上环绕奇异点的演化轨迹。b, 用于高效手性模式转换的耦合波导以及环绕奇异点的哈密顿跳跃辅助环路的相关动态轨迹。c, 耦合波导中的光场演化与奇异点的快速环绕。d, 通过包围多个奇异点的多态系统中的光场演化。e, 不包含奇异点的环路中的手性转换。f, 片上环绕奇异点锁模激光器。

## 非线性在非厄米系统中的应用

非线性是光学中广泛存在的一种现象，它来源于大功率泵浦光，可以作为一个实时可调参数来改变系统的动力学。这种实时控制方法用于动态非厄米系统、平衡制造误差和有趣的导波调控。此外，研究表明，引入非线性响应可以破坏电磁互易性，实现非对称传输和光隔离。非线性可以通过增益饱和引入，从而提供稳定的输出光。一般来说，PT对称要求系统由两个增益和损耗平衡的波导组成，其中增益引入一个波导。具有增益的材料通常表现出增益饱和效应，当注入光的强度增加超过一定阈值时，增益系

数降低。利用增益饱和效应可以灵活调节非线性强度。引入非线性的另一种方法是利用源于四波混频过程的克尔效应，其强度取决于泵浦光的功率。克尔非线性可以达到类似于增益和损耗的效果，这有助于无增益PT对称性的实现。

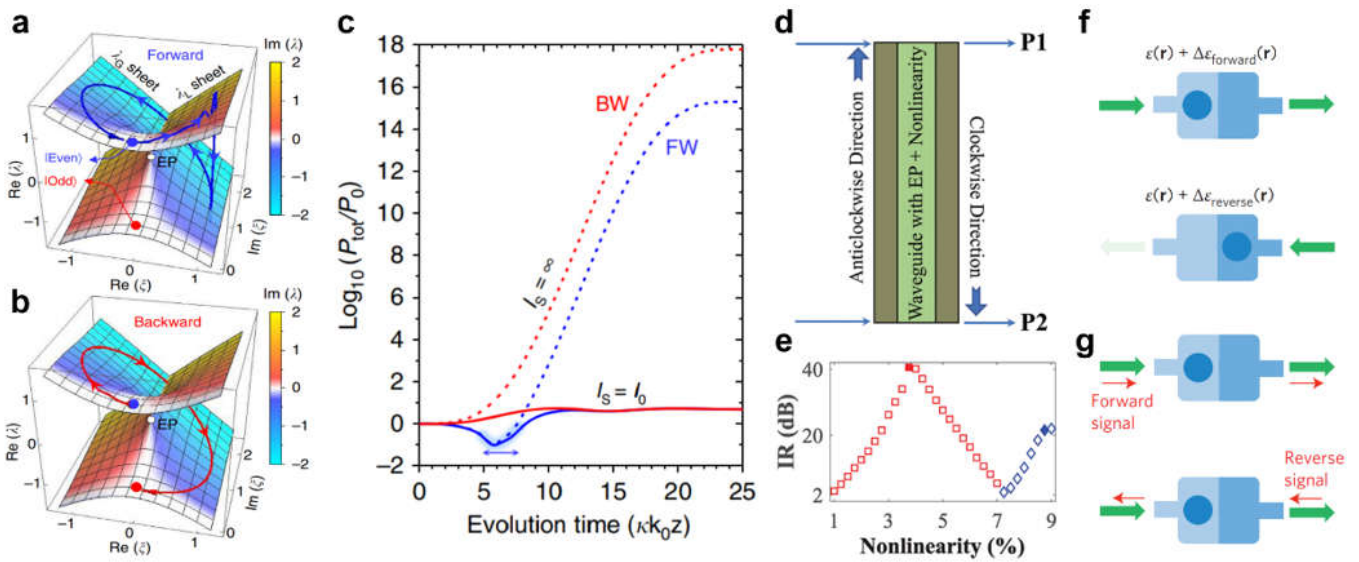
通过增益饱和和非线性和非厄米性的结合，可以产生高效率的非互易性。以双波导系统为例。两个波导之间的耦合将导致两种耦合模式，即偶模和奇模。对于正向传输，偶模在环绕奇异点后恢复到自身（图5a），而对于反向传输，偶模在环绕奇异点后最终变成奇模（图5b），这意味着它们在两个方向上具有不同的功率比。然而，互易性要求模态传递（例如从偶向偶）在两个方向上保持相同。因此，正向和反向总传输功率应该是不同的（图5c中用虚线表示）。然而，当引入非线性增益饱和介质时，正向和反向传输的功率相同（图5c中用实线表示），因此互易性被打破。该方法得到的非互易效率只与非厄米系统中的非对称传输有关，而与波长无关。因此，在较宽的光谱范围内可以实现非互易性。

在非互易性相关的应用中，能够实现功能切换的器件也引起了人们的注意。单向通道的切换可以通过调节饱和强度来控制非互易效应的强度来实现。该方案还在非厄米波导中引入了可饱和非线性（图5d）。这种可饱和非线性表现出比克尔非线性更稳定的输出。隔离比作为非线性函数描述的非互易传输如图5e所示。模式隔离状态的切换可以通过调整非线性量来实现。

由于可饱和非线性，前两种情况下的光隔离器允许正向传输和反向传输的信号具有不同的传输系数。重要的是，这些无源非线性器件受到所谓的动态往复性的约束：当这些器件一次仅从一个端口激励时，可以观察到明显的非互易行为，但它们的非线性响应通常阻止它们在两个端口同时激励下用作隔离器，因为叠加原理不再有效。例如，当一个大振幅波沿正向或反向发射到器件中时，它会产生介电常数分布的变化（用颜色表示），这种变化取决于激励方向，从而可能导致非互易（图5f）。然而，当一个大振幅的激励使系统偏置时，任何前向或后向的小振幅信号都只能引起折射率的微小变化（图5g）。因此，当一个强波束沿着，例如，正向传输时，任何额外的小信号或噪声将沿着两个方向往复传输。由于这种动态互易性，这些器件不能隔离反向传输的噪声，从而限制了基于克尔非线性的非线性隔离器的可行性。

奇异点对微小扰动的高灵敏度有助于其在传感器和激光器中的应用。然而，不可避免的制造误差会引起电位的谱移，从而降低实际应用中的灵敏度。这种有害的谱失谐可以通过克尔非线性来补偿。通过控制注入光功率，可以利用折射率的非线性分量将光学模式对准目标波长。与热调谐相比，克尔非线性具有速度快的优点。

PT对称激光器激光表现出单模激光行为，能够增强了激光功率。然而，研究人员指出：在以往的研究中，单模激光是通过线性模型来分析的，由于其增益饱和的非线性性质，该模型并不是严格精确的。为了解决这个问题，他们通过在传统的线性和非厄米模型中添加具有饱和增益的非线性相互作用来研究这种激光作用。PT对称激光器可分为两类：一种情况下，系统被锁定在PT对称相空间中，其中一种模式达到了激光阈值，而另一种模式没有；在另一种情况下，系统被拉到其奇异点，其中一种模式达到激光阈值，而另一种模式略低于该阈值。这两种情况都会导致激光，但随着泵浦功率的变化，激光模式在两个腔内的场分布和行为不同。这一发现有助于阐明具有非线性的非厄米系统中单模操作的鲁棒性。



**图5 |非线性诱发的非互易波传输。** **a,b**, 耦合波导中正向 **(a)** 和反向传播 **(b)** 的非绝热轨迹。 **c**、线性（虚线）和非线性（实线）情况下的正向和反向输出功率。 **d**、非线性光隔离器原理图。 **e**、前向波（红色）和后向波（蓝色）作为非线性的隔离比。这里的非线性强度定义为，其中为可饱和非线性，是所能达到的最大范围。随着非线性强度的增加，当非线性强度为3.75%时，其正向传播（红色方形标记）的隔离比达到最大值（40.27 dB），当非线性强度为7%时，隔离比降至2 dB。后向隔离强度也存在最大隔离率和最小隔离率，分别在非线性强度为7%和9%时达到。 **f**、在非线性情况下，正反向波的介电常数分布不同。 **g**、存在大振幅前向信号时附加小振幅波的动态互易分析原理图。

## 拓扑光子学中的PT对称与奇异点

近年来，一些在拓扑光子学方面具有里程碑意义的发现表明：被拓扑保护的边界模式不受后向散射传播的影响，并且对制造缺陷具有鲁棒性。这些研究成果为实现具有抗误差能力的光传输、光信号的处理和路由、光通信和光计算提供了全新的设计思路。与此同时，学者们发现：有策略地将非厄米性和奇异点引入这些拓扑光子结构中，可以解锁奇异性质和高级功能。一个典型的例子是，有效地控制点位本位增益和损耗可以提供一个新的自由度，可以主动控制系统的拓扑相变以及PT相变。相比于厄米系统，非厄米系统往往拥有更加复杂的本征谱。因此，非厄米系统表现出在厄米系统中不存在的非平凡特征值拓扑。例如，对于周期系统，非厄米系统的光子能带结构表现为点隙拓扑。在更基础的层面上，非厄米性提供了全新的设计原则来扩展自由度，建立拓扑光子学中的广义体边对应，并展现出各种新的物理性质和现象，如狄拉克锥体产生的奇异环，非厄米趋肤效应和奇异单模激光。通过在支持Weyl点的三维光子晶体中加入非厄米微扰（图6a），发生拓扑跃迁，其中原始Weyl点扩展为Weyl奇异环（图6b和6c）。特别有趣的是，Weyl奇异环的Berry荷数仍然是实数，量子化的，并且等于原始Weyl点的荷数，但是Weyl奇异环是Berry通量的非点源，不能被解释为Berry曲率的磁单极子。

另一个令人感兴趣的话题是基于非厄米拓扑光子学技术的应用探索。毫无疑问，其中一个有前途的方向是利用拓扑态的鲁棒性来构建拓扑激光器，包括基于拓扑边界态的量子级联激光器，体带边缘激光，以及光子狄拉克锥的垂直表面发射激光器。这些激光器都对制备缺陷具有鲁棒性。然而，这些拓扑绝缘体

激光器的可重构性仍然被限制在一个较低的水平。因为一旦这些器件被制造出来，它们的光学性质就很难被调谐。为了提高拓扑激光器的可重构性，在二维光子拓扑微环阵列中引入了非厄米性，在增益损耗结处实现了任意可重构的拓扑导光（图6d）。连续增加奇异点上的增益损失比，会造成由非厄米因素诱发的拓扑相变，出现携带两个不同的伪自旋拓扑的手性边缘态（图6e）。这种非厄米因素操控的光传输方案不仅受益于对缺陷具有拓扑鲁棒性的固有优点，而且可以通过空间光调制在系统范围内实现路径的光传输（图6f）。因此，非厄米性和拓扑之间的协同作用提供了扩展基本拓扑概念的潜力，并为设计实际的拓扑光子应用提供了新颖的解决方案。

此外，拓扑超构表面作为操纵光的光子系统的一个重要分支，也为实现拓扑光以及研究非厄米和拓扑光子学提供了重要的平台。特别是拓扑超构表面的开放性为针对拓扑和非厄米性质的远场探测提供了可能。类似地，在某些参数体系中调整增益-损失相互作用也可以将非厄米性引入拓扑超构表面，从而为自由空间中的光操控系统提供全新的范式。最近，利用非厄米矩阵在平面手性超构表面上靠近其奇异点的拓扑特征，在特定的反射偏振通道上设计了一个拓扑保护的 $2\pi$ 相位。通过将拓扑奇异相位（图6g）与传统的Pancharatnam-Berry相位（图6h）相结合，能够解耦左旋和右旋圆偏振光，并展示了两个不同的独立控制全息投影（图6i）。因此，通过环绕非厄米矩阵的奇异点来调控光相位是一种有效的光操控手段。

前面提到的大多数演示都集中在线性非厄米拓扑光子系统上。近年来，非线性非厄米系统由于涉及非线性材料而受到越来越多的关注。非线性和非厄米拓扑光子学之间的密切相互作用可能导致以前未知的有趣现象，例如光的强相关态。例如，局部非线性被证明能够调制拓扑缺陷波导中的损耗，进而控制全局的PT对称性和拓扑性质（图6j至6l）。因此，与奇异点相关的非厄米物理学嫁接拓扑光子学不仅可以扩展当前拓扑光子学的理论框架，探索未知的有趣现象，而且可以为光子学的实际应用提供更多的发展方向。

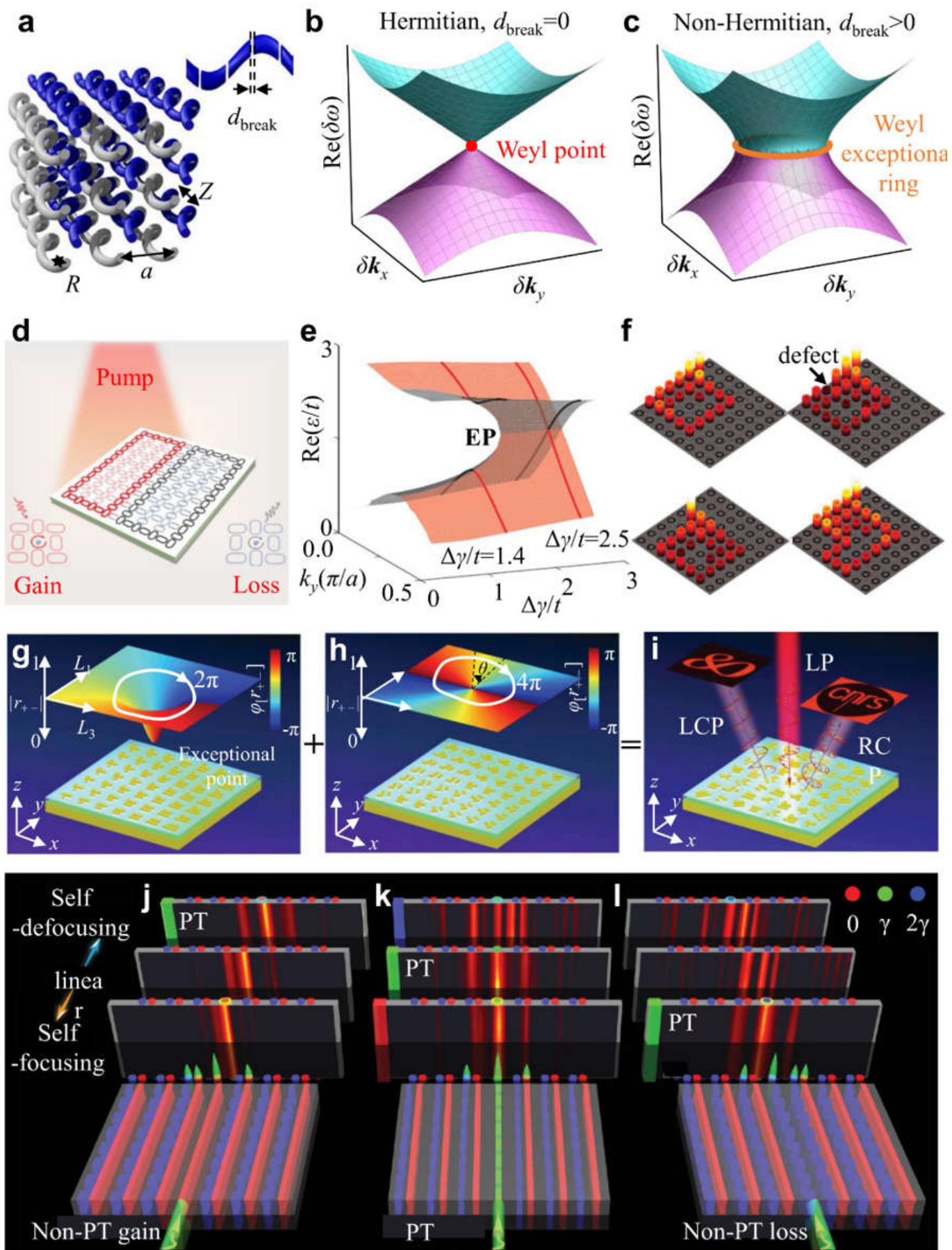


图6|非厄米物理在拓扑光子学和超构表面中的应用。**a-c**，三维Weyl光子晶体，以及支持原始Weyl点和Weyl奇异环的能带结构。**d-f**，非厄米因素控制的可重构拓扑光调控。增益区是通过外部光泵浦实现的，而损耗区是

由于本征材料损耗（无光泵浦）造成的。**g-i**，具有奇异点的拓扑超构表面光相位控制工程。**j-1**，非厄米拓扑光子晶格中PT对称性和拓扑态的单通道非线性调控。

## 总结与展望

从耦合腔/波导和光子晶体到超构表面，广泛的光学平台可被用于验证非厄米光子学现象。奇异点的独特特性与特征谱的简并性、自交黎曼曲面、以及非厄米系统中的PT对称性的结合，在纳米光子学中开辟了广泛的应用前景，包括：奇异点传感器、非对称传输、非互易导波和拓扑光子学。在这些场景中，PT对称和奇异点可以通过对耦合和损耗/增益的灵活控制来实现。与上述应用相关的有趣的光学现象可以通过利用奇异点附近的异常能谱来实现。

尽管关于电位传感器在噪声存在下是否真的具有实用价值的讨论仍在进行，但实验已经证明了它独特的灵敏度，在这篇综述中，我们讨论了噪声对非互易和非线性系统的限制。即使不需要信号放大，非互易和非线性器件也可以克服这些不良因素带来的影响。同时，输出指标不一定是奇异点传感器的分频，特别是在不需要定量检测的情况下。在这种情况下，单色波的传输强度或损耗率足以被传感器读出，从而解除了对复杂电路或频谱分析仪的依赖。与传统传感器相比，输出强度的非线性变化也有利于提高动态范围。此外，实验还表明，当偏离奇异点时，光的衰减速率会降低。这种明显的变化将清楚地表明环境参数发生了扰动。

片上模式转换/多路复用和激光可以在很大程度上受益于奇异点环绕，但仍然受到限制。首先，虽然一个方向上的传输效率随着哈密顿跳变和沿哈密顿边界的快速环绕而提高到接近1，但由于当前的奇异点环绕思路依赖于纯损耗系统，相反方向上的传输效率接近于0。双向传输效率的最终解决方案可能依赖于在奇异点环绕中加入增益材料，但是这对器件制造提出了进一步的挑战。其次，目前的方案在很大程度上允许一对基模的非对称转换，这限制了系统的复用能力。通过探索具有奇异点环绕特性的新型光学结构，可以实现复杂光场模式（如多模式、高阶模式、偏振态和具有特殊轨道角动量的模式）的非对称转换，从而进一步提高多路复用能力。通过支持两种正交偏振模式的L形硅波导，实现非对称偏振锁定转换已经迈出了实质性的一步。第三，环绕奇异点的激光器为锁模激光的实现提供了一种有吸引力的方法，在片上光源中具有广阔的应用前景。目前的环奇异点的激光模式仅限于双耦合波导锁定低阶模式。该技术可以受益于支持单模输出的多个波导阵列，这有望显著提高激光功率。此外，还可以进一步引入上述复杂场模式的非对称转换策略，以丰富功能。

通过利用长距离积累的强非线性，具有非线性的非厄米系统已经在片上波导系统中实现。近年来，由光子晶体板支撑的高Q值共振因其强模式局域化和强场幅而成为光学和光子学领域的研究热点。随着几何不对称性非对称引起的辐射损失的增加，这些共振变成非厄米共振，具有奇异带结构，如奇异点、费米弧和奇异环。将非厄米光学与平面结构中的非线性效应相结合，可以为深化对手性、非互易性和拓扑光学等基本概念的理解铺平道路，并将其应用于传感和非对称传输，甚至促进纳米级光通信的研究。此外，许多有趣的理论模型和现象，如饱和增益诱导的非对称传输、光隔离和无损非厄米系统有望在纳米光学中实现。



毫无疑问，理解和利用线性和非线性拓扑光子学中与非厄米性相关的非厄米性可以为基础研究和未来应用提供许多机遇。最重要的课题之一是建立一个通用的理论框架，涵盖非厄米性，拓扑，非线性，甚至其他先进的概念，如光子学中的低对称性。这将有助于定性甚至定量地描述它们的相互作用，从而精确和灵活地调节和利用各种复杂的相互作用与不同的机制。作为这一方向的一个有希望的步骤，非线性、非厄米和拓扑晶格系统中的拓扑激光器已经基于从一个点开始的淬火动力学进行了研究。另一个感兴趣的主题是广泛探索与非厄米性相关的非厄米性与各种其他概念和对称性之间协同作用的新机制。这不仅有利于支持奇异点的非厄米系统的光子概念的发展，而且有利于建立具有鲁棒性、高灵敏度、任意可重构性、动态可调性和远程可控性的光子学应用。

免责声明：本文旨在传递更多科研资讯及分享，所有其他媒、网来源均注明出处，如涉及版权问题，请作者第一时间后台联系，我们将协调进行处理，所有来稿文责自负，两江仅作分享平台。转载请注明出处，如原创内容转载需授权，请联系下方微信号。



长按关注二维码

## 两江科技评论编辑部

投稿邮箱：

[gscg@imeta-center.com](mailto:gscg@imeta-center.com)

投稿及转载微信：18305163023



九乡河

喜欢作者

收录于合集 #最新文章 566

上一篇 · 实验观测宇称时间对称量子系统中的拓扑暗边界态

阅读 1818

分享 收藏

3

3

写下你的留言