
PT对称性：让光信号处理更快更强

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/28006.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

PT对称性：让光信号处理更快更强。

ISSN 2662-8643(online)

CN 22-1427 / O4

ISSN 2097-1710(print)

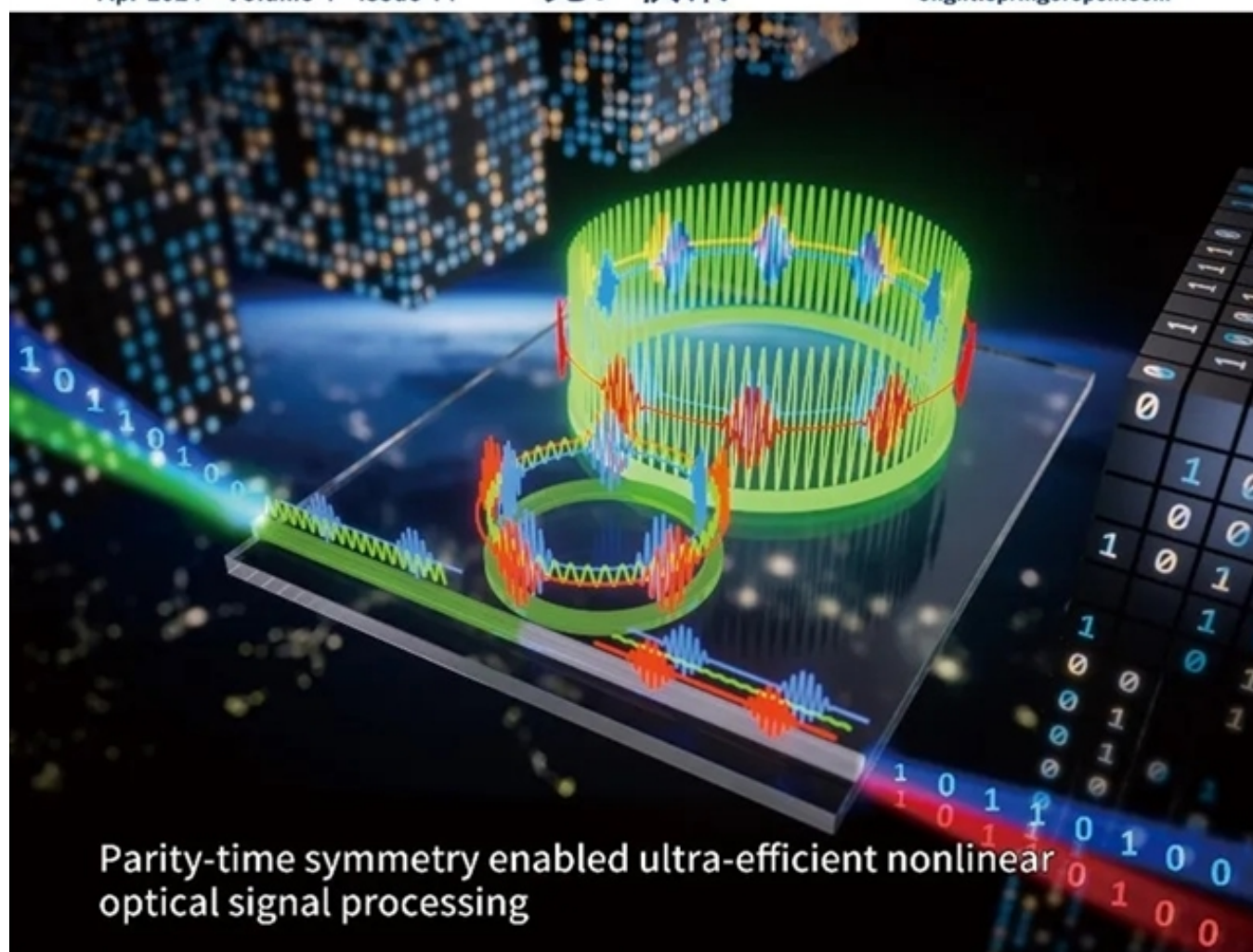
eLight



Apr 2024 · Volume 4 · Issue 14

光：快讯

elight.springeropen.com



Parity-time symmetry enabled ultra-efficient nonlinear optical signal processing

ISSN 2097-1710



中国科学院长春光机所
CIOMP

SPRINGER NATURE

导读

华中科技大学张新亮教授团队徐竞教授与丹麦科技大学蒲敏皓教授团队联合华盛顿大学圣路易斯分校杨兰教授开发了低功耗全光信号处理集成器件。该器件基于宇称-时间 (PT) 对称性对损耗的操控，同时利用PT系统中的奇异点和PT对称破缺相，突破了单个微腔在信号处理中遇到的速率和效率的制约关系，首次将高品质因子微腔应用于高速光信号处理，并将非线性转换效率在高通信速率 (40GBaud) 下提升100倍。

结合绝缘体上铝镓砷材料平台的高非线性优势，团队展示了超低功耗全光波长转换操作，验证了该器件在全光网络中的应用潜力。在仅使用1毫瓦泵浦功率的情况下，实现了38GBaud无误码波长转换，转换后信号质量无劣化（功率代价小于1dB）。超低功耗意味着该器件可以轻松地将片上激光器作为泵浦源来驱动。此外，该结构还具有小尺寸 ($<0.01\text{mm}^2$) 和大转换范围 ($>170\text{nm}$) 的优势，为全光信号处理走向实用化迈出了重要一步。该工作将PT对称性与光信号处理的结合，为解决速率和效率这对矛盾提供了新的思路，潜在应用包括光电器件设计（放大器、探测器、传感器）、光力学、量子光学、原子物理等。

近日，该成果在卓越计划高起点新刊eLight上发表，题为Parity-time symmetry enabled ultra-efficient nonlinear optical signal processing。Chanju Kim博士和博士生鲁欣达为该工作的共同第一作者，蒲敏皓教授和徐竞教授为该工作的共同通讯作者。

全光信号处理及挑战

今天，90%以上的信息都是通过光传递的，而绝大部分的信息处理仍需转换为电信号再进行处理，信息的传输速率和处理速率之间存在巨大的鸿沟（三个数量级）。全光信号处理是指直接在光域完成信息处理，从而避免光电光转换的信息处理方式。线性的光信息处理已经在光计算方面展现了强大的功能，而非线性全光信号处理则可以让光子之间产生相互作用，产生新频率的光、并生成新信息，在经典和量子光通信上都有广泛用途，如波长转换（图1）、相位共轭、信号再生、压缩光产生等。由于非线性效应具有超快响应速率，支持大带宽和并行操作，对输入信号的格式、速率、波长等具有良好的透明性，附加噪声低等优点，全光信息处理具有潜在大容量、低功耗、低延迟、低复杂度、低成本等优势。

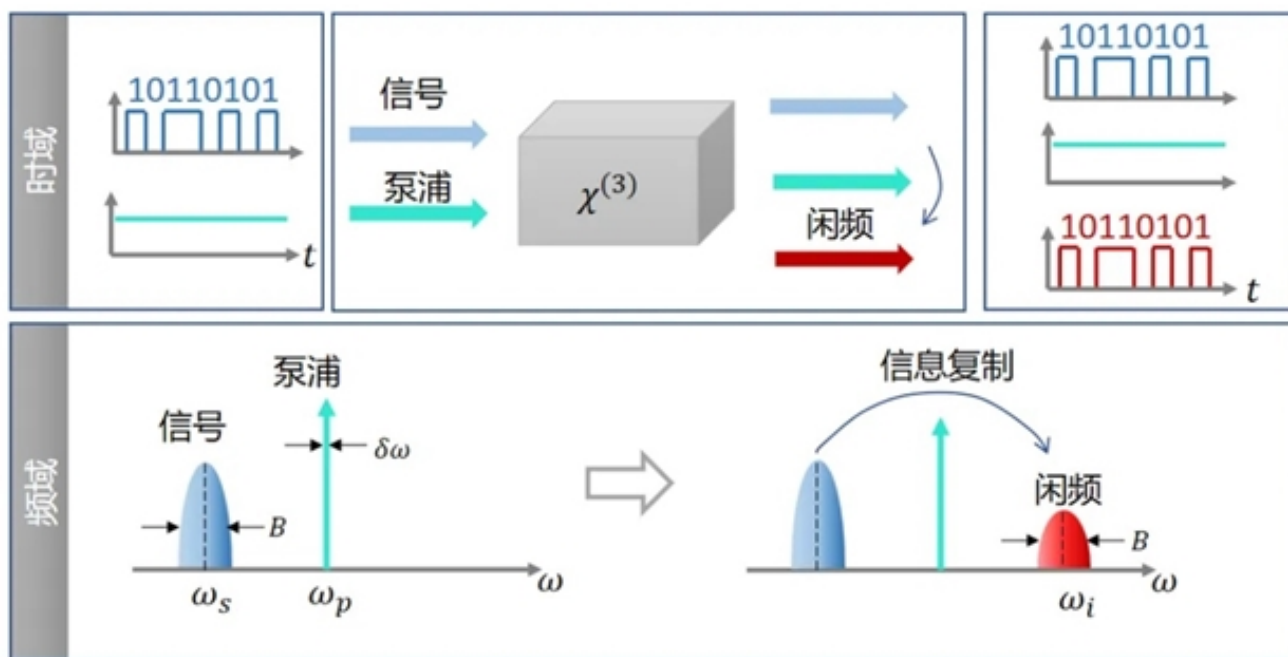


图1：典型的全光信号处理技术波长转换示意图

当入射光足够强的时候，物质会被极化，并由此产生新频率的光。然而，光子是一种玻色子，不容易产生相互作用，非线性光学效应弱，产生非线性效应需要高功率激光，这成为了困扰非线性光信号处理走向实用化的关键问题。高品质因子光学微腔可以将光限制在微腔中循环百万次以上，大大增加了光与物质的相互作用时间，可极大提升非线性效率。利用高品质因子光学微腔产生克尔光学频率梳就是一个典型的例子。然而，高品质因子光学微腔在提升非线性的同时牺牲了器件的响应速度，严重阻碍了高品质因子在全光信息处理中的应用。这是因为相互作用时间越长，微腔品质因子越高，微腔的谐振峰线宽越窄。根据傅里叶变换原理，线宽越窄可允许通过的光信号的传输速率越低。因此，微腔的非线性效率随着信号处理速率的升高而急剧下降（图2）。如何让高品质因子光学微腔同时做到高速和高效是一件十分具有挑战性的事情。

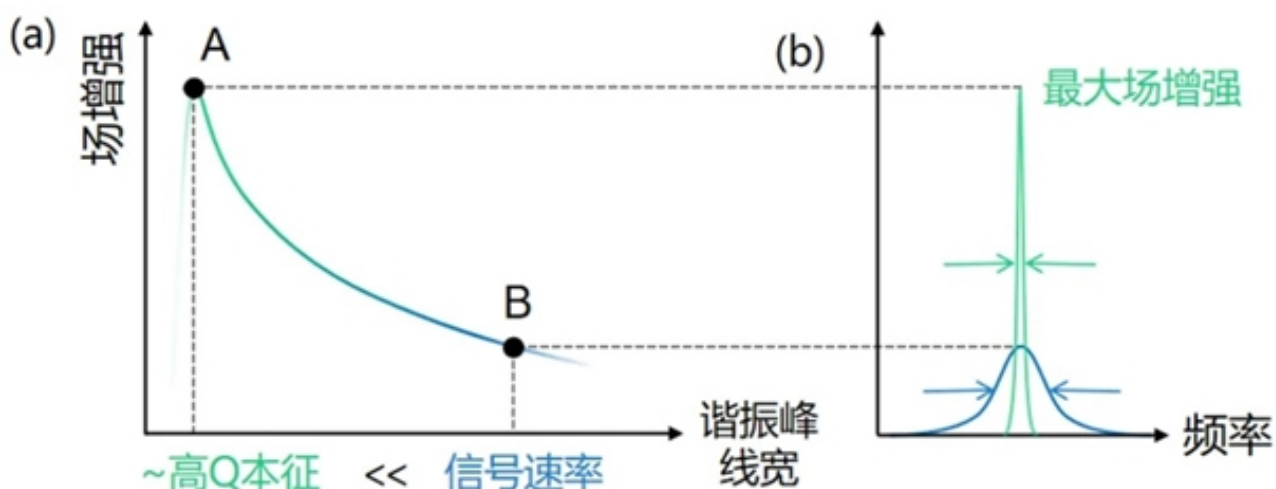


图2：微腔用于全光信号处理存在速率和效率的矛盾（a）微腔场增强随谐振峰宽度的增加而急剧

减小 (b) 图a中A和B两个特征点处的谐振峰场增强示意图，谐振峰宽度用对应颜色箭头表示，其中A点对应最大场增强（临界耦合），B点对应用于信号速率下的场增强

基于宇称时间对称性的微腔光谱调控

虽然很多情况下人们希望避免损耗，但是当把损耗加入光学微腔的时候，微腔的谐振峰线宽得以展宽，根据傅里叶变换的原理，谐振峰允许通过的信息速率就得到提升，因此损耗在信号处理中可以起到积极的作用。注意到在简并的四波混频过程中（一种常见的三阶非线性效应，被广泛用于全光信号处理），一束泵浦光和一束信号光产生一束新的光（称为闲频光）。泵浦光湮灭两个光子，产生一个信号光子和一个闲频光子，且两个泵浦光子的能量之和等于信号光子和闲频光子的能量之和。这就意味着，在使用微腔进行非线性光信号处理的过程中，泵浦光、信号光和闲频光分别使用微腔的三个不同谐振峰。通过选择性的增加信号光子和闲频光子的谐振峰宽度，同时保留泵浦光子的谐振峰的高品质因子特性（窄线宽），可以让信号光和闲频光携带高速信息，同时泵浦光获得大场增强，从而让光信号处理变得更快更强（图3a）。

借助宇称-时间对称性对损耗的操控，研究人员设计了一种特殊的耦合双环结构，利用耦合微腔系统在奇异点（EP点）和宇称时间对称性破缺这两个不同状态的物理特性，可满足光信号处理对不同光选择性增强的要求。采用一对耦合微腔（图3b），半径比为1:2，其中小环与直波导相连，实现对小环耦合损耗的调控以及输入输出。通过适当设置波导与小环的耦合系数，以及小环与大环之间的耦合系数，该结构的谐振峰呈现出宽窄交替的特征（图3c）。其中，宽峰的形成得益于EP点附近的特性，此时小环与大环的模式耦合之后形成展宽的谐振峰，保证信号和闲频光可以无畸变地携带高速信息；窄峰的形成是因为大环的谐振模式在小环中处于反谐振状态，系统可理解为处于深度对称性破缺状态，局域在大环内的模式其损耗恢复为接近本征损耗的状态，因此场增强为接近临界耦合的状态，可以被泵浦光利用，极大提升非线性效率。此时，泵浦光在大环内得到了极大场增强，同时信号光和闲频光均匀分布在大小环内，符合PT系统的模式分布特征，也保证了大环内能够有效产生四波混频效应（图3d）。图4给出了实验测得的双环耦合结构透射谱随波导耦合损耗的变化曲线，验证了PT对称性对微腔合成线宽的调控。在EP点附近（蓝色区域），耦合微腔的谐振峰呈现远大于本征线宽的特性，用于高速信号光和闲频光；在绿色区域（PT对称性破缺），耦合微腔的透射谱接近本征线宽（约两倍本征线宽），用于泵浦光。

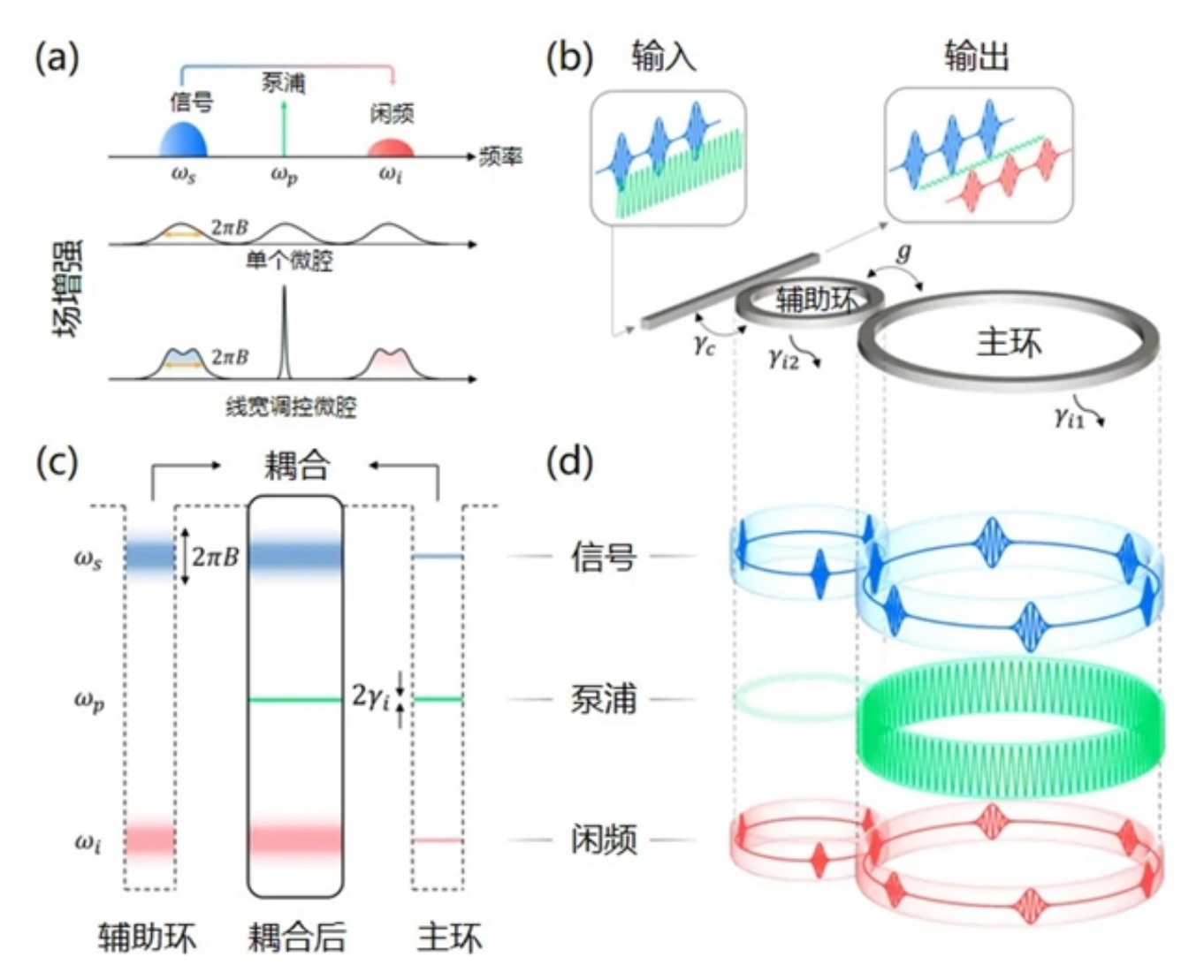


图3：基于宇称时间对称性的微腔光谱调控

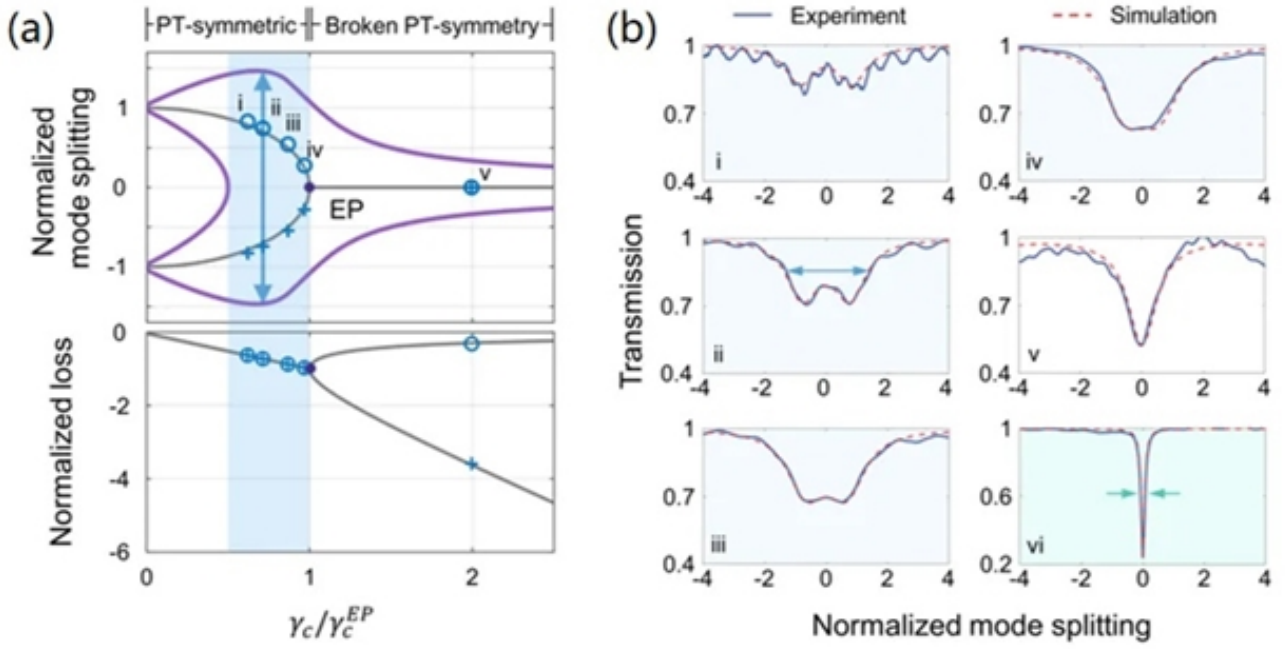


图4：实验测得的双环耦合结构的PT对称性

基于绝缘体上铝镓砷的超低功耗高速全光波长转换

近年来，绝缘体上铝镓砷（AlGaAsOI）在集成高非线性材料平台中表现突出。铝镓砷材料能够很好的兼顾双光子吸收和非线性，加上波导色散控制（如对波导横截面尺寸加以设计），可以获得超大转换带宽，该材料平台已在低功耗光频梳和光信号处理等方面取得了快速进展。

借助结构与材料的双重优势，研究人员在铝镓砷材料平台制备了该结构（图5a）。图5b给出了该器件用于光信号处理时的典型透射谱，具有明显的宽窄交替特性。其中，窄峰的消光比约10dB，处于准临界耦合状态，宽峰处于严重过耦合状态（EP点附近系统的总损耗远大于本征损耗）。通过在铝镓砷材料平台制备具有相同带宽的双环结构与单环对照结构，验证了非线性效应提升，在40GBaud速率下双环结构的非线性效率相比于单环结构提升两个数量级（100倍）（图5c）。更进一步对双环结构进行波长转换系统测试表明，该结构仅需1mW泵浦光就能实现38GBaud信号的无误码波长转换操作（图5d），意味着可以轻松将泵浦源集成到片上。进一步测试不同带宽耦合双环器件性能表明，该结构对设计带宽以内的波长转换操作没有引入明显的信号质量劣化（功率代价均小于1dB）。值得注意的是，泵浦光的极大场增强使得泵浦光的实际注入功率比信号光还弱（图5e）。而在通常情况下，泵浦光是一束高光功率激光，功率显著高于信号光。其次，泵浦光临界耦合导致输出端的泵浦光功率大为下降，这为后续泵浦光的抑制提供了便利，这一点在量子应用中尤为重要。除此之外，该结构还具有大转换带宽（>170nm）（图5f）和小尺寸（<0.01 mm²）的优势。

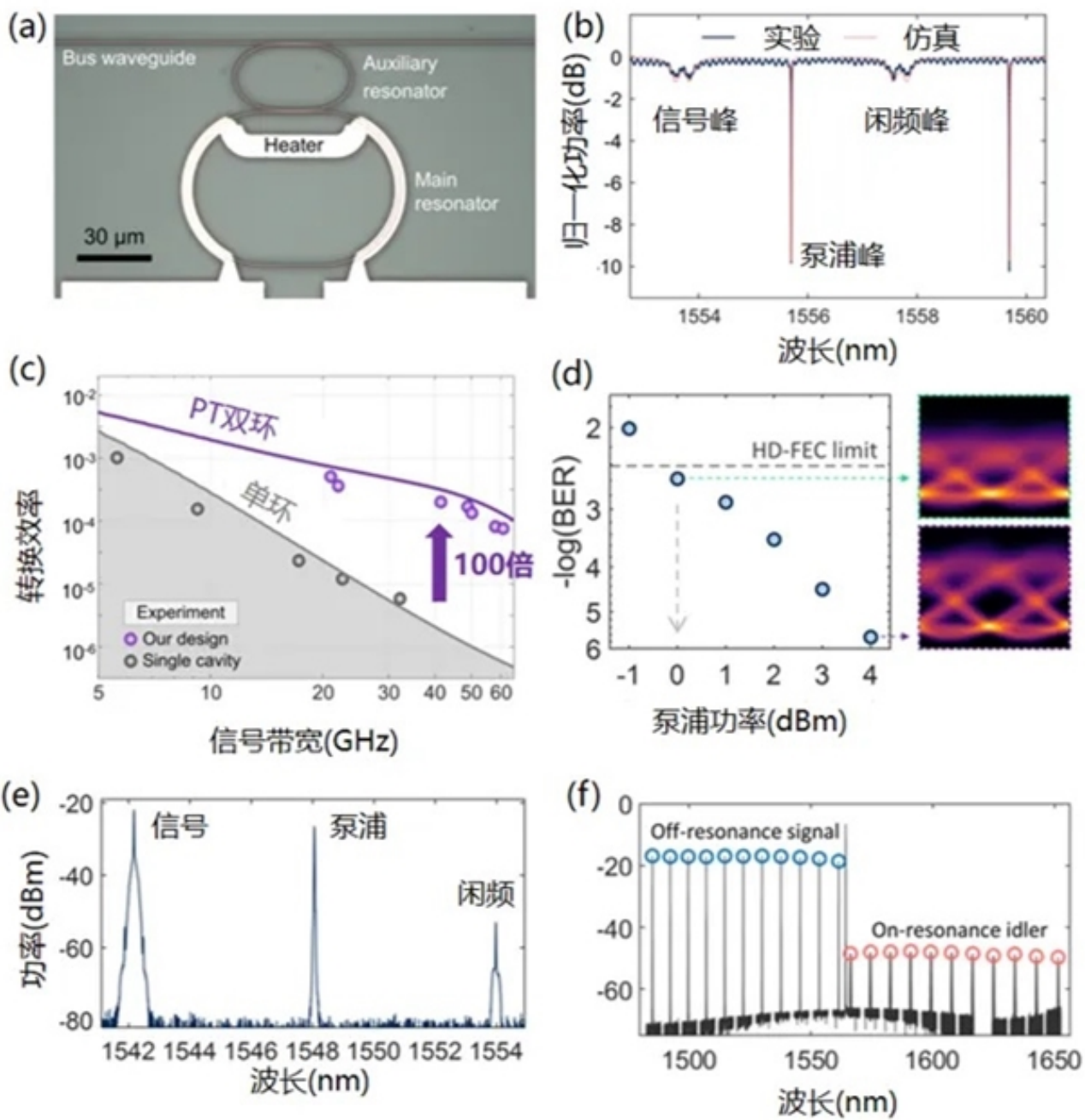


图5：超低功耗全光波长转换实验结果

展望

损耗带来了更大的带宽，在光信号处理中具有重要意义。结合PT对称性对损耗的操控以及绝缘体上铝镓砷高非线性平台，研究人员展示了具有低功耗、高速率、无劣化、小尺寸和大转换范围等诸多优点的非线性光信号处理集成器件，未来有望将泵浦源集成到片上，为全光信号处理走向实用化迈出了重要一步。由于PT对称性与光信号处理的结合为解决速率和效率这对矛盾提供了新的思路，潜在应用包括光电器件设计（放大器、探测器、传感器）、光力学、量子光学、原子物理等。（来源：中国光学微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1186/s43593-024-00062-w>

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费事宜，请与我们联系。

作者：张新亮等 来源：eLight

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发