

## 光子与等离激元材料的研究进展及其在传感与通信中的应用

徐 洋

长春理工大学 吉林长春

**【摘要】**光子与等离激元材料是微纳光子学领域的核心研究内容，能够突破衍射极限，实现亚波长尺度的光操控，为下一代光通信、生物传感、量子信息等领域提供关键材料支撑。本文系统综述了光子与等离激元材料的研究进展及其在传感与通信中的应用。在材料基础方面，介绍了光子晶体、超构材料、表面等离激元、局域表面等离激元等的基本原理与分类，探讨了光子与等离激元的强耦合机制。在制备调控方面，综述了分子介导组装、纳米晶玻璃、双光子 3D 打印等制备技术，以及超快光学调控、介电常数近零工程等性能调控策略。在传感应用方面，重点分析了表面等离激元共振生物传感器、光子晶体光纤传感器、单光子源与量子传感等方向。在通信应用方面，综述了光子晶体器件、超表面光器件、等离激元波导、非线性光学信号处理等进展。研究表明，光子与等离激元材料正朝着超紧凑集成、多功能器件、智能化设计、量子应用等方向发展，深度学习辅助材料设计和新型二维材料等离激元是重要前沿方向。

**【关键词】**光子材料；等离激元材料；表面等离激元；光子晶体；生物传感；光通信

**【收稿日期】**2025 年 11 月 25 日 **【出刊日期】**2025 年 12 月 20 日 **【DOI】**10.12208/j.ijms.20250004

### Research progress on photonic and plasmon materials and their applications in sensing and communication

Yang Xu

Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin

**【Abstract】** Photonic and plasmonic materials are core research topics in micro-nano photonics, capable of breaking the diffraction limit and achieving subwavelength light manipulation, providing key material support for next-generation optical communication, biosensing, quantum information, and other fields. This paper systematically reviews the research progress of photonic and plasmonic materials and their applications in sensing and communication. In terms of material fundamentals, the basic principles and classifications of photonic crystals, metamaterials, surface plasmons, and localized surface plasmons are introduced, and the strong coupling mechanism between photons and plasmons is discussed. In terms of fabrication and regulation, preparation techniques such as molecular-mediated assembly, nanocrystal glass, and two-photon 3D printing, as well as performance regulating strategies such as ultrafast optical regulation and epsilon-near-zero engineering, are reviewed. In sensing applications, surface plasmon resonance biosensors, photonic crystal fiber sensors, single-photon sources, and quantum sensing are analyzed. In communication applications, progress in photonic crystal devices, metasurface optical devices, plasmonic waveguides, and nonlinear optical signal processing is reviewed. Research shows that photonic and plasmonic materials are moving towards ultra-compact integration, multifunctional devices, intelligent design, and quantum applications, with deep learning-assisted materials design and novel two-dimensional material plasmons being important frontier directions.

**【Keywords】** Photonic materials; Plasmonic materials; Surface plasmons; Photonic crystals; Biosensing; Optical communication

引言

光子与等离激元材料是微纳光子学领域的核心

研究内容，能够在亚波长尺度上实现对光的精确操控，为突破传统光学器件的衍射极限提供了全新途

径。随着信息技术的飞速发展,对更小尺寸、更快速度、更高集成度的光电器件需求日益迫切,光子与等离激元材料的研究因此成为学术界和产业界关注的热点<sup>[1]</sup>。

光子材料主要包括光子晶体、超构材料、拓扑光子材料等。光子晶体具有光子带隙特性,能够控制光子的传播状态;超构材料通过人工亚波长结构实现天然材料不具备的电磁特性;拓扑光子材料则利用拓扑保护边缘态实现鲁棒的光传输。这些材料为光通信、光计算、量子信息等领域提供了重要的器件基础<sup>[2]</sup>。

等离激元材料是利用表面等离激元(SPP)和局域表面等离激元(LSPR)实现亚波长光操控的一类重要材料。表面等离激元是金属表面自由电子与光场耦合形成的集体振荡,能够将光场限制在远小于波长的尺度内,产生极大的局域场增强效应。这一特性使等离激元材料在生物传感、表面增强拉曼光谱、超分辨成像、非线性光学等领域展现出独特优势。

光子与等离激元之间的耦合是微纳光子学的重要研究方向。当光子模式与等离激元模式的能量交换速率超过其耗散速率时,系统进入强耦合区域,形成新的混合态——极化激元。强耦合效应在量子信息处理、极化激元凝聚、低阈值激光等方面具有重要应用前景。可转移等离激元阵列与层状钙钛矿的强耦合研究展示了在活性二极管架构中实现可控光-物质相互作用的可能性。

在传感应用方面,基于表面等离激元共振(SPR)的生物传感器已成为无标记生物检测的黄金标准。近年来,光子晶体光纤 SPR 传感器、手性等离激元传感器、等离激元增强荧光传感器等新型器件不断涌现,检测灵敏度和特异性持续提升。理论研究已表明,基于 PMMA-金混合准 D 形光子晶体光纤的 SPR 生物传感器可用于早期癌症生物标志物检测,为疾病早期诊断提供了新工具。

在通信应用方面,光子晶体器件、超表面光器件、等离激元波导等为光通信系统的小型化和集成化提供了新方案。彩虹捕获效应能够实现不同频率光信号的空间分离,在波分复用和光缓冲领域具有重要应用。一维碳纳米结构中的非互易等离激元研究揭示了在纳米尺度实现光隔离器的可能性,为片上光通信系统提供了新思路<sup>[4]</sup>。

镧系上转换发光材料能够将近红外光转换为紫外或可见光,在生物成像、光动力疗法、太阳能电池等领域具有广泛应用。通过微腔谐振调控,可以显著增强上转换发光效率,为高性能光源和传感探针的开发提供了新途径<sup>[5]</sup>。

本文旨在对光子与等离激元材料的研究进展及其在传感与通信中的应用进行系统性综述。文章结构安排如下:第一章介绍光子与等离激元材料的基础理论;第二章综述材料的制备与调控方法;第三章分析在传感领域的应用;第四章阐述在通信领域的应用;第五章展望前沿技术与未来发展方向。

## 1 光子与等离激元材料的基础理论

### 1.1 光子材料的基本原理与分类

光子材料是通过人工微纳结构调控光子态密度和传播行为的一类功能材料,主要包括光子晶体、超构材料和拓扑光子材料等类型<sup>[6]</sup>。

光子晶体是由两种或多种具有不同介电常数的材料周期性排列形成的人工微结构。其最显著的特征是光子带隙——某些频率范围的光无法在晶体中传播。通过在光子晶体中引入缺陷,可以形成缺陷态,实现光的局域和导引。拓扑光子晶体是近年来兴起的前沿方向,其边缘态具有拓扑保护特性,能够绕过缺陷实现鲁棒的光传输。研究表明,基于拓扑光子晶体的硅光电倍增管可以有效优化探测效率,为弱光探测提供了新方案。

超构材料是通过亚波长单元结构的有序排列实现天然材料不具备的电磁响应特性。负折射率材料、光学隐身、超表面透镜等都是超构材料的重要应用方向。超构材料的概念已从三维体材料扩展到二维超表面,极大地简化了器件结构和制备工艺。超表面由亚波长厚度的平面结构组成,能够实现对光场振幅、相位、偏振的任意调控,为微型化、集成化光学器件提供了新平台。

微纳光学是光子材料研究的重要支撑领域。通过设计人工微纳结构,可以实现对光与物质相互作用的有效调控,为高性能光电器件的开发提供新思路。微纳光学的发展正在推动光学器件从分立式向集成式、从静态向动态、从被动向主动的转变。

### 1.2 等离激元材料的基本原理与分类

等离激元材料是利用金属纳米结构中自由电子与光场耦合形成集体振荡的一类材料,主要包括传播型表面等离激元(SPP)和局域表面等离激元

(LSPR) 两大类型<sup>[7]</sup>。

表面等离激元是沿金属-介质界面传播的电磁波, 其电场在垂直于界面方向呈指数衰减, 将光场限制在亚波长尺度内。SPP 的色散关系位于光锥线右侧, 需要通过棱镜耦合、光栅耦合或近场激发等方式才能被激发。SPP 的传播距离受金属欧姆损耗限制, 通常在微米到毫米量级。可重构等离子体表面等离极化激元的研究为动态调控 SPP 传播提供了新途径。

局域表面等离激元是金属纳米颗粒中自由电子的集体振荡模式, 其共振频率取决于颗粒的尺寸、形状、材料和周围介电环境。LSPR 在纳米颗粒表面产生极大的局域场增强效应, 增强因子可达  $10^6$ - $10^8$  倍, 这一特性使其在表面增强拉曼光谱、等离激元增强荧光、超分辨成像等领域具有重要应用。分子介导组装技术为制备高性能表面等离激元器件提供了自下而上的新策略。

黑磷作为一种新型二维材料, 具有层数可调带隙和高载流子迁移率, 其等离激元特性受到广泛关注。研究表明, 黑磷中的非平衡态等离激元可以通过超快近场光学技术进行调控, 为开发高速等离激元器件提供了新可能<sup>[8]</sup>。

### 1.3 光子与等离激元的耦合机制

光子与等离激元的耦合是微纳光子学的重要研究内容, 其耦合强度决定了系统的光学特性和潜在应用。

当光子模式与等离激元模式的能量交换速率超过系统的耗散速率时, 系统进入强耦合区域, 形成新的混合态——极化激元。强耦合表现为光谱中出现 Rabi 分裂, 两个新能级之间的能量差为 Rabi 分裂能。可转移等离激元阵列与层状钙钛矿的强耦合研究展示了在活性二极管架构中实现可控光-物质相互作用的可能性, 为极化激元器件的开发奠定了基础。

非互易等离激元是指等离激元在相反方向传播时具有不同色散关系或损耗特性。在一维碳纳米结构中, 通过调控电子-声子相互作用或外加磁场, 可以实现非互易等离激元传播。这一效应为在纳米尺度实现光隔离器和环形器提供了新思路, 对片上光通信系统具有重要意义。

表面等离激元与激子的相互作用是等离激元-激子耦合系统的基础。在表面增强拉曼散射和针尖

增强拉曼散射中, 等离激元与分子激子的相互作用可以显著增强拉曼信号, 实现单分子水平的检测。研究表明, 通过优化等离激元结构, 可以调控等离激元-激子相互作用的强度, 获得最佳的信号增强效果。

## 2 光子与等离激元材料的制备与调控方法

### 2.1 材料制备技术

光子与等离激元材料的制备技术是实现其功能化的关键环节, 主要包括分子介导组装、纳米晶玻璃制备、微纳加工等方法。

分子介导组装是一种自下而上的制备策略, 通过分子识别、自组装等过程, 将纳米构筑单元有序排列形成功能结构。该方法可以在溶液相中实现大面积、低成本、高精度的等离激元器件制备。研究表明, 利用 DNA 等生物分子的特异性识别能力, 可以精确控制金属纳米颗粒的间距和排列方式, 实现对等离激元光学响应的精细调控。分子介导组装技术为高性能表面等离激元器件的制备提供了新途径<sup>[9]</sup>。

等离激元纳米晶玻璃是将金属纳米颗粒均匀分散在玻璃基体中形成的一类复合材料。通过控制热处理条件, 可以调控玻璃中金属纳米颗粒的尺寸、形状和分布, 进而调控其等离激元共振特性。等离激元纳米晶玻璃具有优异的光学性能和化学稳定性, 在非线性光学、光学传感、彩色玻璃等领域具有广泛应用前景<sup>[10]</sup>。

双光子 3D 打印是一种高精度三维微纳加工技术, 能够突破传统光刻技术的分辨率极限, 制备任意三维结构的超表面和光子器件。该技术利用飞秒激光的双光子吸收效应, 在光敏树脂中实现亚百纳米分辨率的加工。研究表明, 双光子 3D 打印可以制备具有复杂相位分布的超表面光器件, 实现对光场的高效调控。该技术在微型透镜、涡旋光束发生器、全息显示等领域具有重要应用。

Ag/金刚石纳米结构是等离激元材料与发光材料的复合体系。通过在金刚石纳米颗粒表面修饰银纳米结构, 可以利用等离激元的局域场增强效应增强金刚石中 NV 色心的荧光发射。这种复合结构在量子传感、生物标记、单光子源等领域具有重要应用。

### 2.2 性能调控策略

光子与等离激元材料的性能调控是实现其功能化的核心, 主要包括超快光学调控、介电常数近零

工程、微纳结构增强等策略<sup>[11]</sup>。

超快光学调控是利用飞秒激光脉冲实现对材料光学性质的超快调制。在黑磷等离子体激元的研究中,超快近场光学技术可以在飞秒时间尺度上调控黑磷的载流子浓度和等离子体共振特性,实现对等离子体激元模式的超快开关和频率调谐。这一技术为开发超高速等离子体器件提供了可能。

介电常数近零(ENZ)材料是指介电常数实部接近零的一类材料,具有独特的光学性质,如慢光效应、场增强效应、非线性增强效应等。研究表明,在ENZ材料中,三阶非线性光学系数可以增强数个数量级,为开发高效非线性光学器件提供了新平台。通过调控材料组成和结构,可以在特定波长实现介电常数近零条件,实现对非线性光学响应的按需调控。

人工微纳结构增强光致发光是通过设计光子晶体、等离子体结构、超表面等人工微纳结构,增强发光材料的激发效率和辐射效率。研究表明,将发光材料置于等离子体热点区域,可以利用局域场增强效应显著提高发光强度;通过光子晶体调控发光体的局域态密度,可以增强其辐射速率,提高量子效率。人工微纳结构增强为实现高效光源和生物成像探针提供了新途径。

微纳结构调控二维过渡金属硫化物二次谐波的研究表明,通过设计等离子体结构或光子晶体结构,可以有效增强二维材料的非线性光学响应。过渡金属硫化物(如 $\text{MoS}_2$ 、 $\text{WS}_2$ )具有较大的二阶非线性系数,但其原子级厚度导致非线性转换效率较低。通过将二维材料与等离子体纳米结构复合,可以利用等离子体局域场增强效应提高二次谐波产生效率。

### 2.3 计算设计与模拟

计算设计与模拟在光子与等离子体材料的研究中发挥着越来越重要的作用。通过理论建模和数值模拟,可以预测材料的光学响应,优化器件结构,加速材料研发进程。

基于超构材料的光谱调控及纳米器件设计研究利用有限元方法、时域有限差分法等数值算法,模拟超表面和等离子体结构的光学响应。通过优化超表面单元的几何参数和排列方式,可以实现对光谱的精确调控,设计出高效率的滤波器件、偏振控制器、光束偏转器等。计算设计为超表面器件的实验制备提供了重要指导<sup>[12]</sup>。

深度学习赋能微纳光子学材料设计是近年来兴起的交叉研究方向。通过训练深度神经网络,可以建立材料结构参数与光学响应之间的映射关系,实现微纳光子器件的逆向设计。与传统优化算法相比,深度学习可以在更短的时间内搜索更广阔的设计空间,发现具有优异性能的新结构。研究表明,深度学习已成功应用于光子晶体、等离子体结构、超表面等材料的设计中,显著提高了设计效率。

## 3 光子与等离子体材料在传感领域的应用

### 3.1 生物医学传感

光子与等离子体材料在生物医学传感领域展现出独特的优势,尤其是在无标记生物检测和早期疾病诊断方面具有重要应用前景。

表面等离子体共振(SPR)生物传感器是等离子体传感技术中最成熟、应用最广泛的一类。SPR传感器利用金属薄膜表面SPP对介质折射率变化的高度敏感性,通过检测共振角或共振波长的变化,实现对生物分子相互作用的实时、无标记监测。基于PMMA-金混合准D形光子晶体光纤的SPR生物传感器的理论研究为早期癌症生物标志物检测提供了新方案。该传感器通过优化光子晶体光纤结构,实现了高灵敏度和宽检测范围的生物分子检测,可用于前列腺特异性抗原、甲胎蛋白等癌症标志物的早期筛查。

手性无机纳米催化剂在电化学与类酶生物传感中的应用是传感技术的前沿方向。手性是自然界的基本属性,手性纳米材料具有独特的圆二色性和对映选择性,在生物传感中可用于检测手性分子(如氨基酸、糖类、药物分子等)。研究表明,手性无机纳米催化剂结合电化学检测方法,可以实现对手性分子的高灵敏、高特异性检测,在疾病诊断、药物分析等领域具有广阔应用前景<sup>[13]</sup>。

### 3.2 环境与化学传感

光子与等离子体材料在环境监测和化学传感领域也具有重要应用,特别是在气体检测、重金属离子检测等方面展现出独特优势。

等离子体杂化钙钛矿晶体窄带光探测器的研究为新型光电探测器的开发提供了新思路。将等离子体纳米结构与钙钛矿材料复合,可以利用等离子体的局域场增强效应提高钙钛矿的光吸收和载流子收集效率,实现高灵敏、窄带的光电探测。这种探测器在气体传感、火焰监测、光谱分析等领域具有潜在

应用。研究表明,通过调控等离激元共振波长,可以实现对不同波长光的选择性探测,避免了传统探测器需要额外滤波器的缺点<sup>[14]</sup>。

Ag/金刚石纳米结构增强NV色心荧光的等离激元增强传感技术是量子传感的前沿方向。金刚石中的NV色心具有优异的光稳定性和生物相容性,是理想的荧光标记和量子传感探针。通过在金刚石纳米颗粒表面修饰银纳米结构,可以利用等离激元的局域场增强效应显著提高NV色心的荧光发射强度,实现对磁场、温度、应力等物理量的高灵敏度量子传感。这一技术在纳米尺度磁成像、生物温度传感、纳米力学探测等领域具有重要应用<sup>[15]</sup>。

### 3.3 单光子与量子传感

单光子源是量子信息处理的核心资源,光子与等离激元材料为高性能单光子源的开发提供了新平台。

新型固体材料中的单光子源研究涵盖了从材料调控到片上集成的完整链条。二维材料(如WSe<sub>2</sub>、MoS<sub>2</sub>)、金刚石NV色心、碳化硅色心、六方氮化硼色心等固体材料中的发光缺陷可作为单光子源。通过光子晶体微腔、等离激元纳米腔等微纳结构的调控,可以增强单光子的提取效率和辐射速率,实现高亮度、高纯度的单光子发射。研究表明,将单光子源与片上光子回路集成,是实现可扩展量子信息处理的关键。

镧系上转换发光是长波长光(近红外)转换为短波长光(可见或紫外)的非线性光学过程。镧系掺杂纳米晶具有窄带发射、长荧光寿命、高光稳定性等优点,是理想的上转换发光材料。通过微腔谐振调控,可以增强上转换发光效率,实现低激发功率下的高效上转换。这一技术在生物成像、超分辨显微、单光子源等领域具有重要应用。

镧系上转换紫外光产生的研究展示了通过镧系离子掺杂实现近红外光到紫外光转换的可能性。上转换紫外光产生在光动力疗法、紫外光谱、紫外光刻等领域具有独特优势。研究表明,通过优化镧系离子的组合和掺杂浓度,可以调控上转换发光的波长和效率,实现从深紫外到近紫外的可调谐输出<sup>[16]</sup>。

## 4 光子与等离激元材料在通信领域的应用

### 4.1 光通信器件

光子与等离激元材料为光通信器件的小型化和集成化提供了关键支撑,在光子晶体器件、超表面

光器件等方面取得重要进展。

基于拓扑光子晶体的硅光电倍增管探测效率优化研究展示了拓扑光子学在光通信接收端的应用潜力。硅光电倍增管是一种高增益、高灵敏度的弱光探测器,在量子通信、长距离光纤通信等领域具有重要应用。通过将拓扑光子晶体结构集成到硅光电倍增管中,可以利用拓扑边缘态的光局域效应提高光吸收效率,优化探测器的信噪比和响应速度。

超表面光器件是近年来发展迅速的平面光学元件,能够在亚波长厚度内实现对光场振幅、相位、偏振的任意调控。双光子3D打印技术为超表面光器件的制备提供了高精度、高自由度的加工手段。研究表明,利用双光子3D打印可以制备具有复杂相位分布的超表面透镜、涡旋光束发生器、全息显示元件等,这些器件在光通信系统中的光束整形、模式转换、信号调制等方面具有重要应用。

微纳光学是光通信器件发展的重要支撑领域。通过人工微纳结构的设计,可以实现对光与物质相互作用的有效调控,开发出高性能的光调制器、光开关、光滤波器等器件。微纳光学器件的小尺寸、低功耗、易于集成的特点,使其成为下一代光通信系统的关键组件。

### 4.2 等离激元通信器件

等离激元通信器件利用表面等离激元实现亚波长尺度的光信号传输和处理,在突破衍射极限、实现高密度集成方面具有独特优势<sup>[17]</sup>。

彩虹捕获效应是指不同频率的光在渐变波导结构中被捕获在不同位置的现象。这一效应在波分复用和光缓冲领域具有重要应用价值,可以实现多波长光信号的分离和存储。研究表明,通过设计具有渐变参数的等离激元波导结构,可以在亚波长尺度实现对不同频率光信号的彩虹捕获,为高密度波分复用系统提供了新方案。

等离激元波导是等离激元通信器件的基础。与介质波导相比,等离激元波导能够将光场限制在远小于波长的尺度内,实现亚波长的光信号传输。然而,金属的欧姆损耗限制了等离激元的传播距离,这是等离激元器件实际应用面临的主要挑战。研究表明,通过优化波导结构(如金属-绝缘体-金属波导、介质加载波导等),可以在传播距离和模式限制之间取得平衡<sup>[18]</sup>。

可重构等离子体表面等离极化激元的研究为动

态调控等离激元传播提供了新思路。通过外加电场、光场、温度场等方式,可以改变等离激元波导材料的介电常数,实现对等离激元模式传播特性的动态调控。可重构等离激元器件在光开关、光调制器、可调滤波器等方面具有重要应用<sup>[19]</sup>。

#### 4.3 非线性光学与信号处理

非线性光学是光通信信号处理的重要手段,光子与等离激元材料为增强非线性光学效应提供了新平台<sup>[20]</sup>。

介电常数近零(ENZ)材料的三阶非线性光学效应增强机理研究表明,在ENZ波长附近,材料的非线性折射率系数可以增强数个数量级。这一效应为开发高效的全光开关、光参量放大器等器件提供了新可能。通过设计超表面等人工结构,可以在特定波长实现等效介电常数近零条件,实现对非线性光学响应的按需调控。

等离激元纳米晶玻璃的非线性光学应用研究展示了玻璃基复合材料在非线性光学领域的潜力。由于金属纳米颗粒的局域场增强效应,等离激元纳米晶玻璃具有较大的三阶非线性系数和超快响应时间,在全光开关、光限幅器、光学逻辑门等领域具有重要应用。研究表明,通过调控玻璃中纳米颗粒的尺寸、形状和分布,可以优化其非线性光学性能<sup>[21]</sup>。

超高时空和能量分辨光电子成像研究进展为理解光子与等离激元材料的超快动力学提供了重要工具。该技术结合飞秒激光泵浦-探测和光电子显微镜,可以在飞秒时间尺度和纳米空间尺度同时分辨材料中电子和等离激元的超快演化过程,为开发超高速等离激元器件提供了实验依据。

微纳结构调控二维过渡金属硫化物二次谐波的研究展示了在原子尺度实现非线性光学频率转换的可能性。通过将二维材料与等离激元结构复合,可以利用等离激元局域场增强效应提高二次谐波产生效率,实现超薄、高效率的非线性光学器件。这一技术在光通信中的波长转换、信号再生等方面具有潜在应用。

### 5 前沿技术与未来展望

#### 5.1 量子信息与单光子源

量子信息是下一代信息技术的战略高地,光子与等离激元材料在量子光源、量子态操控、量子探测等方面具有重要应用。

单光子源是量子通信、量子计算、量子密钥分

发等量子信息处理任务的核心资源。新型固体材料中的单光子源研究致力于开发具有高亮度、高纯度、高稳定性的片上集成单光子源。通过将单光子源与光子晶体微腔或等离激元纳米腔耦合,可以增强单光子的提取效率,实现确定性单光子发射。研究表明,将单光子源与等离激元波导集成,可以实现芯片上单光子的路由和操控,为可扩展的光量子信息处理奠定了基础<sup>[22]</sup>。

镧系上转换发光在量子信息领域也有潜在应用。由于上转换发光具有抗漂白、抗闪烁等优点,上转换单光子源在量子通信中具有独特优势。通过微腔谐振调控,可以增强上转换发光效率,实现高效率的上转换单光子发射<sup>[23]</sup>。镧系上转换紫外光产生的研究则展示了利用上转换技术实现短波长单光子源的可能性,为紫外波段的量子信息处理提供了新资源。

#### 5.2 人工智能辅助材料设计

人工智能技术正在深刻改变材料科学研究范式,深度学习赋能微纳光子学材料设计是其中的代表性方向<sup>[23]</sup>。

深度学习赋能微纳光子学材料设计研究进展表明,深度神经网络可以学习大量材料结构-性能数据,建立从结构参数到光学响应的映射模型,实现对微纳光子器件的快速预测和逆向设计。与传统设计方法相比,深度学习可以在更高维度的设计空间中搜索更优解,发现具有意外优异性能的新型结构。该技术已成功应用于光子晶体、等离激元结构、超表面、超材料等微纳光子器件的设计中,显著缩短了研发周期,提高了设计效率<sup>[24]</sup>。

随着高质量数据集的积累和神经网络架构的优化,人工智能辅助材料设计将在光子与等离激元材料领域发挥越来越重要的作用。未来,结合生成对抗网络、强化学习等先进算法,有望实现微纳光子器件的全自动、智能化设计。

#### 5.3 新型材料体系

新型材料体系的开发是光子与等离激元材料领域持续发展的重要动力。

可转移等离激元阵列与层状钙钛矿的强耦合研究展示了二维材料与等离激元的协同效应。层状钙钛矿具有较大的激子结合能和可调谐的带隙,是研究强耦合效应的理想平台。通过将可转移等离激元阵列与层状钙钛矿异质集成,可以在室温下实现强

耦合,形成极化激元。这一体系为极化激元凝聚、低阈值激光、量子模拟等研究提供了新平台。

一维碳纳米结构中的非互易等离激元研究探索了碳基纳米材料的等离激元特性。碳纳米管和石墨烯纳米带等一维碳纳米结构具有独特的电子结构和等离激元特性。研究表明,通过调控载流子浓度和温度,可以实现一维碳纳米结构中等离激元的非互易传播,为在纳米尺度实现光隔离器和环形器提供了新途径。

黑磷非平衡态等离激元的超快近场光学调控研究展示了新型二维材料在高速等离激元器件中的应用潜力。黑磷具有层数可调带隙和高载流子迁移率,其等离激元特性可以通过光激发进行超快调控。这一特性为开发超高速等离激元调制器和开关提供了新可能<sup>[25]</sup>。

#### 5.4 当前挑战与发展趋势

尽管光子与等离激元材料研究取得了显著进展,但仍面临诸多挑战。

主要问题包括:一是等离激元的欧姆损耗问题,限制了其传播距离和器件效率;二是微纳器件的制备精度问题,高性能器件的制备对加工技术提出了极高要求;三是器件集成度问题,如何将不同功能的微纳光子器件高效集成在同一芯片上仍有待解决;四是材料稳定性问题,部分新型材料对环境敏感,长期稳定性不足。

未来发展趋势主要包括:一是超紧凑集成,通过等离激元和光子晶体的协同设计,实现更高集成度的片上光互连系统;二是多功能器件,通过超表面等平台实现光场多维度(振幅、相位、偏振、频率)的联合调控,开发具有多种功能的集成器件;三是智能化设计,深度学习和逆向设计将成为微纳光子器件设计的标准工具;四是量子应用,单光子源、量子传感、量子通信等量子技术将成为光子与等离激元材料的重要应用方向。

## 6 结论

本文系统综述了光子与等离激元材料的研究进展及其在传感与通信中的应用。光子材料方面,光子晶体、超构材料、拓扑光子材料等为光操控提供了新平台;等离激元材料方面,表面等离激元和局域表面等离激元实现了亚波长尺度的光场局域和增强。光子与等离激元的强耦合效应为量子态操控和极化激元器件的发展奠定了基础。

在制备与调控方法方面,分子介导组装、纳米晶玻璃、双光子 3D 打印等技术实现了高质量微纳结构的制备;超快光学调控、介电常数近零工程、微纳结构增强等策略实现了对材料光学性能的有效调控;深度学习等人工智能方法正在改变材料设计的范式。

在传感应用方面,表面等离激元共振生物传感器已广泛应用于无标记生物检测;光子晶体光纤传感器为早期癌症诊断提供了新工具;等离激元增强荧光传感器在量子传感和生物成像领域展现出潜力。

在通信应用方面,光子晶体器件和超表面光器件为光通信系统的小型化和集成化提供了关键组件;等离激元波导和彩虹捕获效应为高密度波分复用和光缓冲提供了新方案;非线性光学增强为全光信号处理开辟了新途径。

当前,光子与等离激元材料正朝着超紧凑集成、多功能器件、智能化设计、量子应用等方向发展。尽管仍面临欧姆损耗、制备精度、集成度、稳定性等挑战,但这一领域的快速发展正在为下一代传感与通信技术奠定坚实的材料基础。未来应继续加强基础研究,突破关键技术瓶颈,推动光子与等离激元材料从实验室走向实际应用。

## 参考文献

- [1] Dorey F, Ziegler D J, Moilanen J A, et al. Transferable Plasmonic Arrays Enabling Strong Coupling with Layered Perovskites in an Active Diode Architecture[J]. *Nano Letters*, 2025.
- [2] Soliman E S, Barlou M, Tsakmakidis L K, et al. Rainbow trapping for advanced wave control[J]. *Advances in Physics: X*, 2025, 10(1).
- [3] Ramola A, Shakya K A, Balal N, et al. Theoretical Investigation of Early Cancer Biomarker Sensing Using a PMMA-Gold Hybrid Quasi-D-Shaped Photonic-Crystal-Fiber-Based Surface Plasmon Resonance Biosensor[J]. *Micromachines*, 2025, 17(1): 68.
- [4] Álvaro Rodríguez Echarri, F Javier García de Abajo, Joel D Cox. Nonreciprocal plasmons in one-dimensional carbon nanostructures[J]. *Nature Communications*, 2025, 17(1): 1114.
- [5] Li L, Suo H, Wang F. Ultraviolet Light Generation through Lanthanide Upconversion[J]. *Accounts of Chemical Research*,

- 2025.
- [6] 郭超前, 张国青, 张昊童, 等. 基于拓扑光子晶体的硅光电信增管探测效率优化[J]. 物理学报, 2025, 74(22): 260-270.
- [7] 张兆萱, 邓璞, 沈杰. 分子介导组装高性能表面等离激元器件[J]. 高等学校化学学报, 2025, 46(09): 9-28.
- [8] 施宇智, 王占山. “微纳光学”专题前言[J]. 光学学报(网络版), 2025, 2(14): 4.
- [9] 刘晓婧, 刘越, 曲广媛, 等. 新型固体材料中的单光子源: 从调控到集成(特邀)[J]. 激光与光电子学进展, 2025, 62(11): 24-44.
- [10] 付饶. 黑磷非平衡态等离激元的超快近场光学调控研究[D]. 中国科学院大学(中国科学院物理研究所), 2025.
- [11] 石文娟. 介电常数近零材料的三阶非线性光学效应增强机理研究[D]. 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2025.
- [12] 杨美煜. 等离激元杂化钙钛矿晶体窄带光探测器构筑与性能研究[D]. 东北石油大学, 2025.
- [13] 高子昂. 基于超构材料的光谱调控及纳米器件设计与研究[D]. 北京邮电大学, 2025.
- [14] 曹艺. 表面增强拉曼散射和针尖增强拉曼散射中表面等离激元与激子相互作用的研究[D]. 北京科技大学, 2025.
- [15] 赵文超, 张璇, 徐倩倩, 等. 人工微纳结构增强光致发光研究进展[J]. 发光学报, 2025, 46(05): 882-895.
- [16] 叶鑫. 可重构等离子体表面等离极化激元电磁特性研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2025.
- [17] 刘闯, 孙丽超, 张庆丰. 手性无机纳米催化剂在电化学与类酶生物传感中的应用(英文)[J]. 无机化学学报, 2025, 41(01): 59-78.
- [18] 万子轩, 徐建, 肖卫强, 等. 等离激元纳米晶玻璃的研究进展以及非线性光学应用[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(08): 2517-2526.
- [19] 刘锦怡. 在探索微观世界的极限中绽放青春光彩[J]. 中国研究生, 2023, (11): 74-77.
- [20] 秦榆禄, 王睿, 刘运全. 超高时空和能量分辨光电子成像研究进展[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2023, 53(10): 21-32.
- [21] 鲍笑天, 曾鑫, 史建伟, 等. 微纳结构调控二维过渡金属硫化物二次谐波[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2023, 53(08): 94-113.
- [22] 谭心, 郭慧文, 杨桥, 等. 基于局域表面等离激元 Ag/金 金刚石纳米结构增强 NV 色心的荧光[J]. 微纳电子技术, 2023, 60(05): 698-705.
- [23] 李艾华, 高林烁, 罗雯, 等. 微腔谐振调控下镧系掺杂纳米晶的上转换发光[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2023, 62(02): 226-242.
- [24] 付朋, 蓝文泽, 郭阳, 等. 深度学习赋能微纳光子学材料设计研究进展[J]. 真空科学与技术学报, 2023, 43(04): 261-270.
- [25] 吴冕, 武霖, 陶金. 双光子 3D 打印超表面光器件研究进展[J]. 光通信研究, 2023, (06): 11-31.

**版权声明:** ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



**OPEN ACCESS**