

---

# 高透明纳米复合柔性微波天线

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/29107.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！*

高透明纳米复合柔性微波天线。

ISSN 2831-4093 (online)

ISSN 2689-9620 (print)

# Light | Advanced Manufacturing

2024 • Volume 5 • Issue 2

光：先进制造



Ultra-thin silver-based nano-composite enables the future of transparent antennas and wireless communications

**PAGE 249**

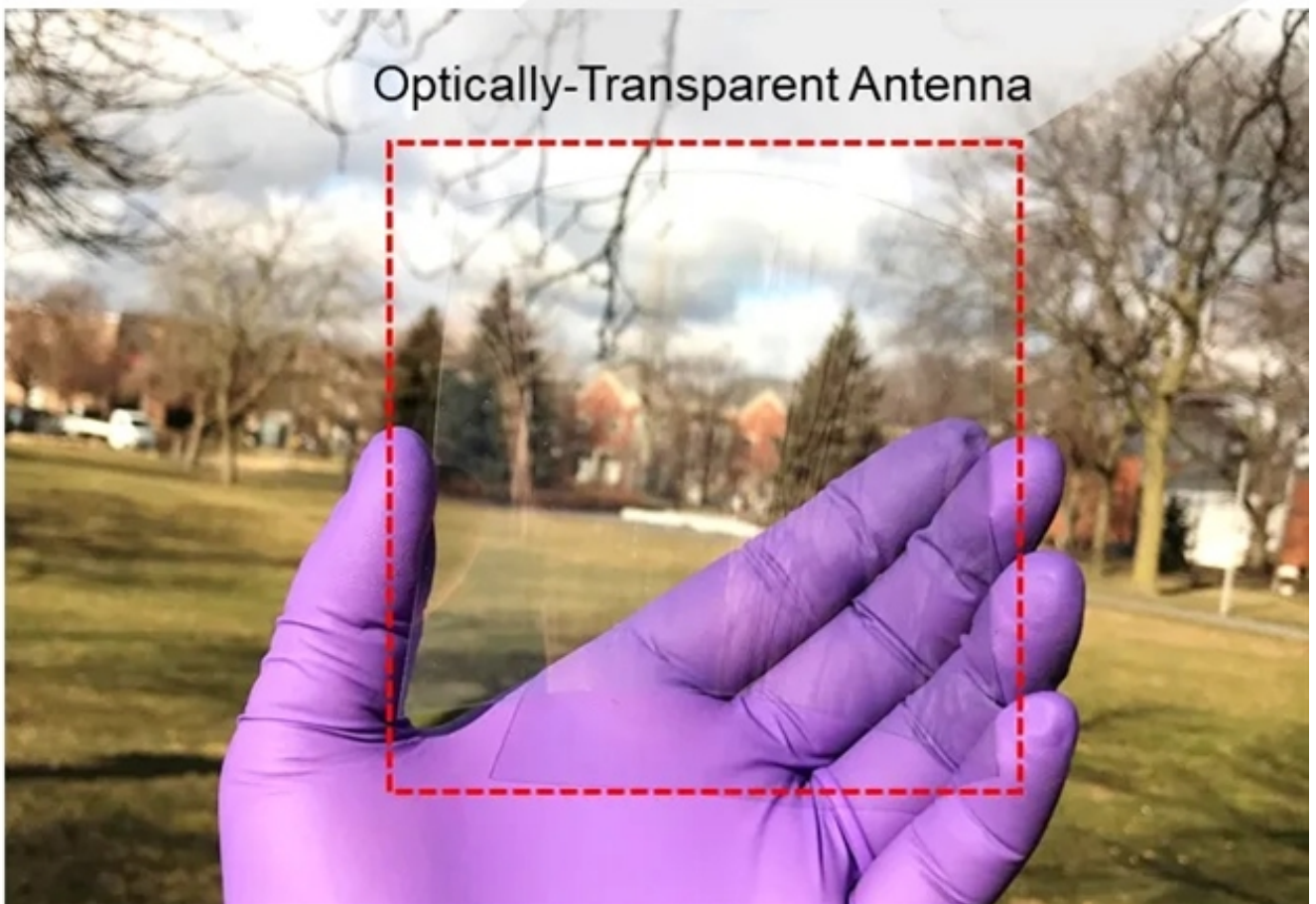
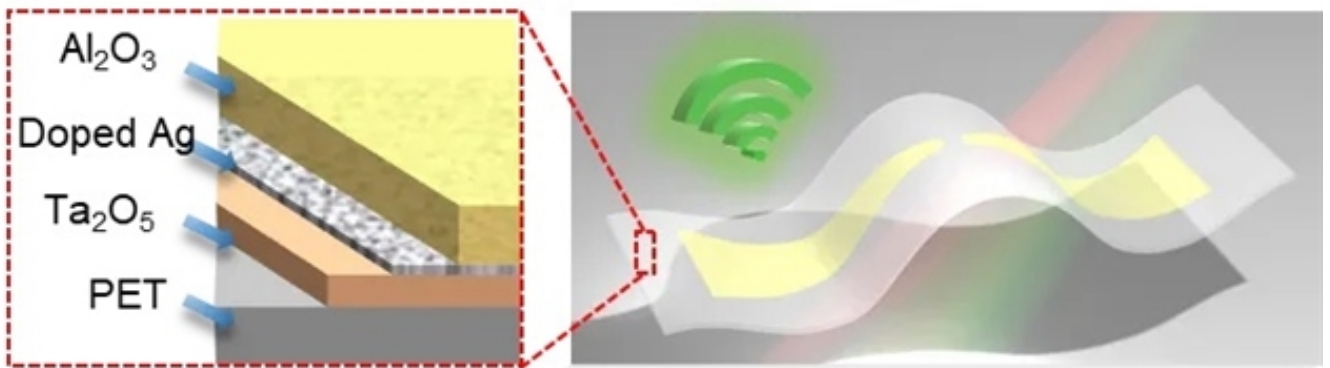


近日，华中科技大学张诚教授团队，伊利诺伊大学芝加哥分校Pai-Yen

---

Chen教授团队和密歇根大学L. Jay Guo教授团队联合提出了一种基于超薄介电-金属-介电纳米复合结构的柔性高性能光学透明天线 ( optically transparent antenna, OTA )。该复合结构实现了可见光波段 ( 400-800 nm ) 平均相对透光率达98.94%，方块电阻低至 $12.5 \ \Omega/\text{sq}$ ，有效解决了传统导电材料难以兼具高电导率与高透光性的难题。同时，研究团队展示了该复合导电材料在射频天线领域的应用，设计实现了四种代表性天线：全向偶极天线、单向八木-宇田天线、低剖面贴片天线和法布里-珀罗腔体天线。这些天线具有良好的柔性与可弯曲性，可承受超过 $70^\circ$ 的弯曲角度，同时具有优异的天线辐射性能，增益高达13.6 dBi，辐射效率高达84.5%。该研究有助于推动光学透明天线在第五代通讯、智慧城市、物联网等新兴领域的广泛应用。

该成果在期刊Light: Advanced Manufacturing上发表，题为 Functional Plastic Films: Nano-engineered Composite based Flexible Microwave Antennas with Near-unity Relative Visible Transmittance。文章被选作期刊2024年第2期的封面文章。华中科技大学张诚教授为本文的第一作者兼通讯作者，伊利诺伊大学芝加哥分校Pai-Yen Chen教授和密歇根大学L. Jay Guo教授为文章的共同通讯作者。



随着智慧城市、车载通信、第五代（5G）网络和物联网（IoT）的快速发展，亟需新的硬件技术以提高空间、电力和通信带宽的利用效率。一个经济有效的解决方案是通过在车辆、建筑物窗户、太阳能电池板和通信设施中部署光学透明的微波天线，来嵌入额外的数据接入点和信号探测器。光学透明天线（OTA）具有与传统微波天线相同的功能，能有效地收集、处理和传输微波信号，同时在可见光和近红外波段透明，便于与太阳能电池、显示器和光电探测器等器件和系统集成。为了适应实际应用，OTA需具备良好的柔性、透光率与天线性能，以满足柔性和透明表面，如皮肤、衣物、光纤和车窗的应用需求。

早期OTA使用透明导电氧化物，如铟锡氧化物（ITO）和掺氟氧化锡（FTO），这些材料具有高光学透明度和低电阻率。然而，这些氧化物脆性大，弯曲时容易开裂，不适合柔性设备。因此，近年来国内外团队研究了许多其他透明导电材料，包括导电聚合物、碳基材料和金属网格等。其

中，导电聚合物OTA可以通过丝网印刷或喷墨印刷制造在柔性基材上，但其导电性较低，效率不及传统天线，并且颜色和环境稳定性难以满足应用需求。碳基材料如石墨烯具有良好的机械柔性和光学透明性，但其较大的电阻限制了微波天线应用。金属网格则通过精细控制表面开口区域比例提供低电阻，但通常牺牲光学透过率，且需要复杂的图案化工艺，影响天线美观。相比之下，薄金属膜在柔性OTA应用中显示出巨大潜力，其具有低电阻和较好的光学透过率，可通过多种物理气相沉积（PVD）方法制备。然而，薄金属膜OTA在可见光波段透明度和微波波段工作性能之间存在相互的制约：减少金属膜厚度可以提高可见光透明度，但会不可避免地影响其导电性，牺牲器件的微波性能。

### 光学透明天线设计与表征

针对上述问题，研究团队通过介质-金属-介质（dielectric-metal-dielectric, DMD）纳米复合结构，有效克服了传统导电材料难以兼具光学透过率和天线辐射性能的难题。使用超薄（7 nm）、表面光滑且高导电性（方块电阻约 $12.5 \Omega/\text{sq}$ ）的铜掺杂银膜（Cu-doped Ag）作为中心金属层，保证了天线的高光学透过率和低电阻。此外，选用合适材料和厚度的两层介质薄膜（ $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ）作为上下表面的减反层，可以进一步提高天线的中性颜色外观和光学透过率，使其在可见光波段（400-800 nm）的平均相对透过率达到98.29%。

值得注意的是，DMD中间的金属层会在很大程度上影响器件的工作性能。为了更好地兼顾天线的可见光波段透光性和微波波段工作效率，该金属层需要在保证良好成膜质量和导电性的同时尽可能的薄。然而，制备高质量的超薄厚度（ $<10 \text{ nm}$ ）金属薄膜是一项具有挑战性的工作。研究团队基于前期的研究工作，选用金属掺杂的方式，成功制备超薄的高质量银膜。通过在银沉积的过程中，掺杂适当比例的第二种金属（本工作中选用铜），可以有效抑制银原子自身的Volmer-Weber三维生长模式，促进超薄（7 nm）、超平整（表面粗糙度 $<1 \text{ nm}$ ）和低光学损耗的高质量银膜生长。

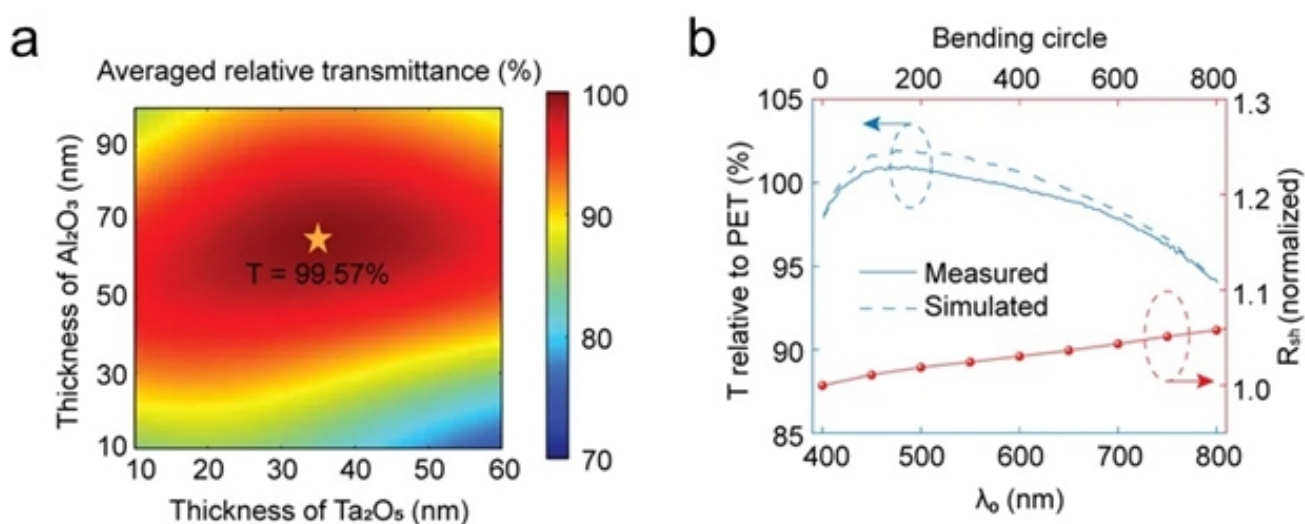


图1：导电纳米复合材料的透过率与抗弯折特性示意图

研究团队利用该透明柔性纳米复合材料，研发了工作在第四代长期演进（4G-LTE，1.7 GHz和1.9 GHz）、蓝牙（2.4 GHz）和Wi-Fi（2.4 GHz和5.9 GHz）频段的多种代表性OTA，包括半波偶极天线（全向天线），八木和贴片天线（单向天线），以及基于法布里-

珀罗结构的超构表面。其中，半波偶极天线通过调节臂长实现了2.0 GHz、2.5 GHz和4.2 GHz的工作频率。测量的反射频谱与模拟结果一致，带宽分别为 $0.82 \pm 0.02$  GHz、 $0.77 \pm 0.04$  GHz和 $0.91 \pm 0.04$  GHz，回波损耗超过10 dB。天线增益与银墨、铜浆制成的偶极天线相似，优于已报道的透明偶极天线。短波通信和广播的八木天线的中心频率为2.5 GHz，反射频谱带宽为 $0.87 \pm 0.05$  GHz，最大增益为 $2.9 \pm 0.32$  dBi。与全向偶极天线相比，八木天线在工作频段内具有更高的方向性和增益。

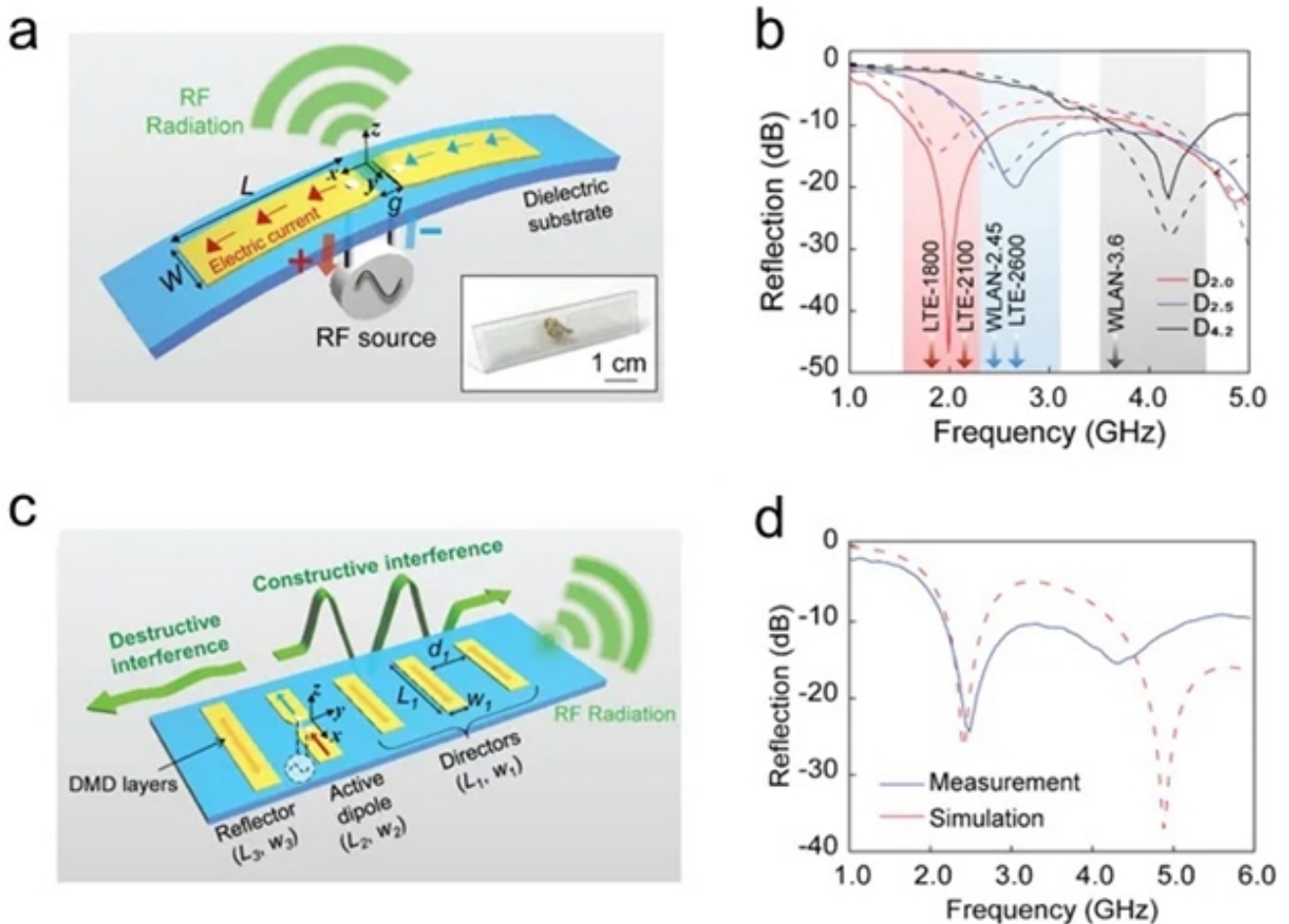


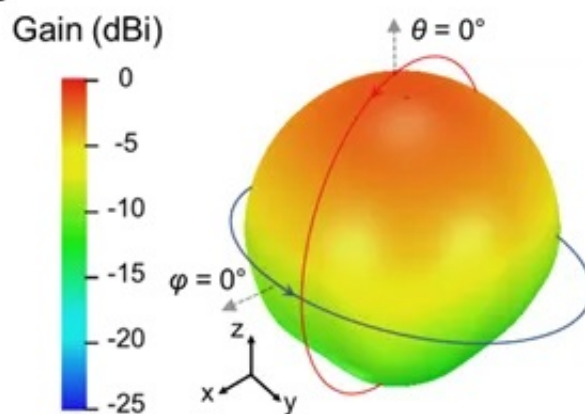
图2：半波偶极天线和八木天线器件示意图及反射频谱

研究团队展示了一组透明的微带贴片天线，其工作在C波段（4-8 GHz）和X波段（8-12 GHz），涵盖WLAN-5.8和卫星通信频率。微带贴片天线类似于带有磁性壁的开放腔，边缘的电场相当于同相振荡的磁流，从而产生正向辐射。同样通过改变天线尺寸实现了5.8 GHz、6.5 GHz和8.2 GHz的工作频率。测量的共振频率与计算结果一致。其辐射图表明其在C波段和X波段工作性能良好。尽管效率较传统金属制成的天线略有下降，但OTA具有传统天线无法实现的透明性和高柔性。最后，研究团队实现了一种高方向性的法布里-珀罗(FP)腔体天线，其工作在8.2 GHz，关键部分是由纳米复合材料制成的透明射频超构表面构成。FP腔体天线和贴片天线的反射谱相似。FP天线实现的增益高达 $13.6 \pm 0.33$  dBi，中心频率处的隔离度达 $22 \pm 0.64$  dB，显著高于贴片天线的 $6.5 \pm 0.24$  dBi。这种高增益有利于各种长距离短波通信和传感应用。

a



b



c



d

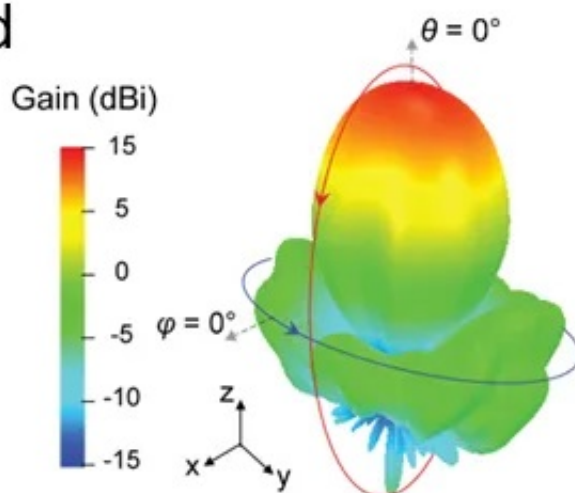


图3：贴片天线与法布里-珀罗腔体天线的实物照片及辐射方向图

## 总结与展望

该研究开发了由Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/Cu-doped Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜组成的高透明柔性导电纳米复合结构，其在可见光范围内的相对平均透过率达98.29%，方块电阻低至12.5  $\Omega/\text{sq}$ 。研究展示了该导电复合结构在射频天线领域的广阔应用，设计实现了全向（偶极子）和单向（八木和贴片）天线，工作频率覆盖S、C和X频段（1.5-12 GHz）。此外，实现了一种光学透明的超构表面作为微波法布里-珀罗天线的辐射面，增益高达13.6 dBi。该透明柔性纳米复合结构为构建紧凑多功能的智能系统提供了可行方案，有望广泛应用于可穿戴无线电子设备、物联网、智能城市、车载通信和下一代无线通信基础设施。（来源：先进制造微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.37188/lam.2024.036>

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等事宜，请与我们联系。

---

作者：张诚等 来源：《光：先进制造》

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](http://www.iikx.com)转发