
Light

大面积金属集成光栅电极实现接近100%的红外透射

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/42681.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！

Light 大面积金属集成光栅电极实现接近100%的红外透射。 导读

在红外光电子器件领域，高透射率与高导电性的透明导电电极（transparent conductive electrodes, TCEs）对于激光器、光探测器和激光雷达等系统至关重要。然而，在中远红外波段实现兼具高光学透明度与低电阻的电极仍然极具挑战性。近日，来自波兰的联合研究团队提出了一种金属集成单片高对比度光栅电极（metal-integrated monolithic high-contrast grating, metalMHCG），在保持约 $2.8 \Omega/\text{sq}$ 的低电阻的情况下，在 $7 \mu\text{m}$ 波长处实现了94%的透射率，相对于GaAs-空气界面的菲涅耳极限达到135%的相对透射率。该工作突破了传统透明导电电极在红外波段导电性与透光性难以兼顾的瓶颈，为高功率红外光电子器件提供了一种全新的电极设计方案。相关研究成果以Large-area Metal-integrated Grating Electrode Achieving Near 100% Infrared Transmission，为题发表于《Light: Science Applications》。

研究背景

透明导电电极的设计需要在光学透明性和电学导电性之间取得平衡。为了实现良好的导电性能，材料通常需要具有较高的自由载流子浓度，但这也会增强材料对电磁波的吸收和反射，从而降低其透射率。因此，高导电性与高透射率之间的矛盾成为透明电极研究中的核心问题。

在可见光和近红外波段，氧化铟锡（ITO）等透明导电氧化物已被广泛应用于显示器、光电探测器和太阳能电池等器件中。然而，当工作波段扩展到中远红外区域时，传统透明导电材料的性能会明显下降。这主要是因为导电材料中自由电子的等离子体共振频率通常位于红外波段附近，导致光与自由电子之间的相互作用增强，从而引起显著的吸收与反射损耗。

此外，在许多红外光电子器件中，透明电极通常需要沉积在高折射率半导体衬底（例如GaAs）表面。当光从半导体进入空气时，界面反射会进一步降低整体透射效率。因此，在实际器件结构中，即使电极材料本身具有较高透射率，整体透射仍然很难超过由菲涅耳公式所决定的理论极限。这些因素共同限制了透明导电电极在中远红外器件中的应用和性能提升。

创新研究

针对上述问题，研究团队提出了一种基于结构光子学设计的透明电极方案，即金属集成单片高对比度光栅结构（metalMHCG）。该结构在GaAs衬底表面构建一维周期光栅，并在相邻半导体条

纹之间的沟槽底部嵌入金属条纹，从而形成一种亚波长尺度的复合光栅结构（如图1）。在该结构中，金属条纹主要承担电流传输功能，而光的传播则主要由半导体光栅结构调控，从而实现了光学透射与电学导电性的有效解耦。这种设计显著降低了金属对红外光的吸收，同时保持了良好的电导率，使透明电极能够同时实现高透射率和低电阻。

图1：metalMHCG结构示意图及其光学特性。a) metalMHCG结构的概念示意图：在GaAs晶圆表面构建一维光栅结构，并在相邻半导体条纹之间的沟槽底部嵌入金条纹；b) metalMHCG结构的放大示意图，展示其横截面结构，并给出光栅几何参数及坐标系定义；c)、d) 在法向入射条件下，分别针对TE偏振和TM偏振光计算得到的metalMHCG透射率（T）分布图，横轴为波长，纵轴为半导体光栅高度（H），其中参数取 $L=1.4\ \mu\text{m}$ 、 $F=0.74$ 、 $H_m=50\text{nm}$ 。图中的白色虚线标示波长 $7\ \mu\text{m}$ ；e)、f) 在光从衬底侧法向入射时，metalMHCG横截面yz平面内的光强分布（ $E E$ ），分别对应TE和TM偏振情况。

数值模拟结果表明，该结构在不同偏振条件下能够形成类似Fabry – P é rot腔的共振效应。当光栅高度满足特定条件时，两个正交偏振（TE和TM）的透射峰可以在同一波长附近同时出现，从而实现对非偏振光的高效透射。通过优化光栅周期、填充因子和结构高度等关键参数，研究人员成功在约 $7\ \mu\text{m}$ 波长处实现了接近完全透射的传输带（如图2）。

图2：a) 在非偏振光法向入射条件下计算得到的 metalMHCG 透射率分布图，横轴为波长，纵轴为半导体光栅条纹高度，结构参数为 $L=1.4\ \mu\text{m}$ 、 $F=0.74$ 、 $H_m=50\text{nm}$ 。图中的白色虚线表示 $H=2.79\ \mu\text{m}$ ，黑色圆点表示在 $7\ \mu\text{m}$ 波长处获得的透射率全局最大值；b) 沿 a) 图中白色虚线位置计算得到的透射光谱，其中蓝色曲线表示TE偏振光，黑色曲线表示TM偏振光，红色曲线表示非偏振光；c) 在透射峰值附近的光谱局部放大图。b) 和 c) 图中的Fresnel limit表示光通过GaAs – 空气平面界面时的理论透射极限。

实验测量结果与理论计算高度一致。光谱测试表明，在中远红外波段中，该结构存在多个高透射带，其中第三个透射带在 $7.1\ \mu\text{m}$ 附近达到最大透射率约94%。与GaAs – 空气界面的菲涅耳极限相比，该结构的相对透射率达到135%，显著超过此前报道的透明电极性能（如图3）。同时，该结构保持约 $2.8\ \Omega/\text{sq}$ 的片电阻，并可在超过 $1\ \text{cm}^2$ 的GaAs晶圆表面实现均匀制备，显示出良好的大面积制造能力和工艺可行性。

图3：a) metalMHCG在TE偏振（蓝色）、TM偏振（黑色）以及非偏振光（红色）情况下的实验透射光谱；b) 第三透射带中透射峰附近的实验光谱放大图。图中的Fresnel limit表示光通过GaAs – 空气平面界面时的理论透射极限；c) 在 $4.8 - 5.0\ \mu\text{m}$ 波长范围（第四透射带）获取的红外图像。图中背景为加热至 $80\ ^\circ\text{C}$ 的二维码图案，其上方放置了来自同一GaAs晶圆的两个样品：一个为在GaAs衬底上制备的金属MHCG结构（metalMHCG），另一个为裸GaAs衬底（GaAs）。

总结与展望

该研究提出的metalMHCG透明导电电极通过结构化光栅设计成功突破了传统透明导电材料在中远红外波段的性能限制，在实现极低电阻的同时获得接近100%的光学透射率。与现有透明导电材料相比，该结构在透射率和导电性两个关键指标上均表现出明显优势，并显著超越了传统材料

体系中普遍存在的性能权衡关系。

由于该结构可以与III – V半导体工艺兼容，并能够通过成熟的光刻技术实现晶圆级制造，该技术在未来红外光电子器件中具有广阔的应用前景。随着进一步的结构优化和工艺发展，metalMHC G结构有望成为下一代高功率红外光电子器件的重要核心组件，为中远红外光电子技术的发展提供新的解决思路和技术路径。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-026-02270-0>

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：Tomasz Czystanowski 来源：《光：科学与应用》

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