

产生特异光散射的超构材料

(北京大学 朱星 编译自 Yongmin Liu, *Physics*, February 11, 2019)

光的散射是一种普通的光学现象，与反射、折射和吸收现象类似。小分子在大气中更有效地散射太阳光谱中短波部分，因此使得天空在晴朗天气时显出蓝色。较大的蒸汽水滴可以散射整个可见光谱中的光线，因而使得云彩呈现白色。一般而言，散射光的强度和散射方向取决于其波长和散射介质的性质，如尺寸、形状和折射率。研究人员最近制备出特殊的结构使其能够以独特的方式散射光线。已经有人提出减弱散射，并且实现了“光学斗篷”的设想，还能够增强某些方向产生的散射。浙江大学的陈红胜和新加坡南洋理工大学的张柏乐设计了一种亚波长结构，具有很强的散射光的能力，他们首次用实验方法演示了特异光散射现象(super-scattering effect)。

从微观角度，光散射过程是入射光波与物体中电子相互作用，导致产生辐射的偶极矩振荡。散射强度可以用散射截面测量，其定义是散射能量与入射波强度之比。对于亚波长的散射体，即散射体尺度远

小于波长，已经严格证明三维或二维的最大散射截面分别是 $3\lambda^3/2\pi$ 和 $2\lambda/\pi$ 。这种单通道极限是假设辐射仅仅来自于电偶极子转移造成的发射。实践证明，这个极限可以用于几乎所有的亚波长散射体。然而，2010年一篇重要的理论文章发表后，研究人员提出运用引入其他模式来突破这个极限，即高阶电偶矩的振动，如四级矩、六级矩等，每一种的谐振频率相同。如果这些模式能够起到多通道的作用，同时对散射过程起到增强作用，那么亚波长散射体的散射截面可能明显的增大。这篇2010年的论文是基于多层纳米杆所产生的多重光学等离激元模式(等离激元模式是电子在材料表面的集体振荡)。然而，这个概念的实验验证遇到两个问题：由于金属在光学频段中有限的电导率，从而导致散射功率的损耗，并且使纳米结构加工更加复杂。

陈红胜和张柏乐的团队在微波波段的两个频率上展示了特异散射。他们设计了一种直径为35.96 nm的柱形特异散射体，由三个同心的超

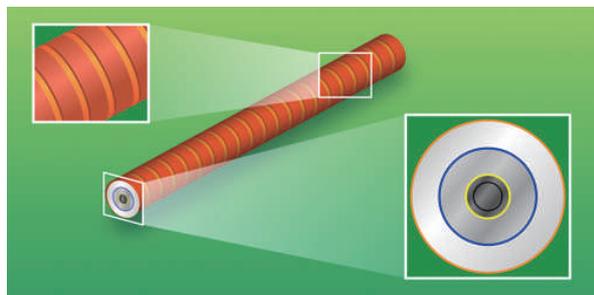
构表面圆桶组成，之间用介电材料相互隔离。每个超构表面是由周期性的铜条构成，其周期和厚度均远小于波长(见图)。根据有效介质理论，超构表面的作用相当于一种介电常数极大

的超薄层，这个薄层将表面波限制在微波波段。这种表面波是横波(TE)。调整铜条的周期和宽度来优化超构表面的形状，超构表面支持多重表面简并的TE模，即所有这些模的谐振频率相同。他们设计的散射体的偶极模式和四级模式工作频率为2.2 GHz和3.73 GHz。进一步，这种散射体的表面电导使得损耗功率进一步下降。

对散射波的系统测量表明，在样品附近近场和远场区域都存在特异散射效应。这些测量可以得到在近场中局域场分布，以及散射截面和散射的取向。在2.2 GHz和3.73 GHz测量的散射截面值超过单通道极限的4倍。除了散射截面增大以外，散射体的辐射是有取向的，绝大部分的散射强度沿着向前方向。

作者展示了通过特殊设计散射体的谐振模式，可以有效地增强亚波长尺度的光与物质相互作用。从基础研究方面，进一步研究将特异散射效应用于随机介质中波的传播，将是个有吸引力的课题。包含很多随机分布散射体的介质将呈现出有趣的现象，如安德森局域化，相干背散射，以及记忆效应。在新现象的应用方面，特异散射体制成的天线具有高效率 and 优秀的方向性，可能在无线通讯、数据传输和遥感中得到应用。

更多内容详见：*Phys. Rev. Lett.*, 2019, 122: 063901。



用介电材料隔离的三层同轴超构表面所组成的柱状体具有特异的散射能力