
基于全介电准BIC超表面的光流控

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/24992.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！

基于全介电准BIC超表面的光流控。最近，来自美国范德比尔特大学的科研人员提出了利用准BIC驱动的全介电超表面实现亚波长到200 nm粒子的自组装效果以及高达毫米级的粒子传输，并验证了粒子聚集相对于激光波长及功率的动力学现象。开辟了利用非等离激元纳米光子来操纵微流体动力学的新领域。此外，光流体和高q全介电纳米结构的协同效应在高灵敏度生物传感应用中具有巨大潜力。

研究背景

在标准的细胞流动分析以及芯片实验设备当中，控制流体的长程运输是微流系统的重要要求。之前在微流体中广泛采用的主要有压力驱动控制技术和注射泵，但是微流体的系统以及庞大的控制系统之间的尺度相差非常大，所以开发集成微米尺度的控制技术逐渐引起了研究者的兴趣。在集成控制中，实现颗粒或者流体运动较为有效的方案是使用光来控制流体的流动，即光流控。该方案可以通过光束加热液体产生的浮力驱动环形对流并用来传送或者聚集颗粒，但是该方案的控制灵活度较为有限。所以研究者开始探索另一种方案：使用光照射引起的局部热梯度实现流体操纵。

当金属纳米结构在其等离激元共振下被光照射时，可以将能量限制在亚波长范围内。但是在该过程中，金属增强的光吸收导致的固有损失会在多种应用中受到限制，例如Q值受限，热效应导致的粒子捕获稳定性减弱。但是，最近科学家将这种增强的光吸收转化为了纳米热源，从而激发了热等离激元的研究，并在光热癌症治疗与靶向药物输送等方面有了一定的应用。在光流控方面，也有金属纳米结构用来控制对流驱动的研究。但是，金属纳米结构表面不受控制的高温可能对表面接触的颗粒产生一定的污染。

介电纳米结构由于消除了等离激元纳米结构的固有损失而得到了快速发展，前期许多工作利用低光吸收避免流体中的热泳效应，从而增加了光学捕获的稳定性。最近，全介质热纳米光子学领域也逐渐发展，可以通过精准调谐电介质中的光学损耗来控制亚波长光学加热，并且已经有相关的研究证明了温度梯度驱动的光流动可以通过介电纳米颗粒实现。

BIC由冯诺依曼和尤金维格纳在量子力学中提出，可以在介电超表面中实现高Q以及场增强。该方案已经在激光、生物传感等多个领域中有重要的应用，但是在之前的设计中，材料的固有损耗会成为一个比较重要的问题。

在本研究中，作者首次使用了准BIC共振实现的全介电超表面实验证明了光流体传输和粒子聚集的协同效应。作者讨论了如何利用准BIC系统实现微流体的流动，发现在共振条件下的流速是非

共振条件下的三倍，并可以通过波长的调谐控制流速。作者的工作为通过亚波长的热诱导微流体动力学开辟了一个新的领域。

创新研究

作者的系统如图1(b)所示，激光光斑遵循高斯分布，通过扩束器缩小5倍后，直径约为300微米，激光功率经过掺铒光纤放大器放大，可以获得数百毫瓦的输出。超表面由在玻璃基板上以Z字形排列的椭圆硅纳米天线组成，如图1(a)。当准BIC谐振时，激光束穿过腔室高度后投射，且激光加热引起浮力驱动的自然对流，将粒子输送到背照射基底的中心。另外，由于正热泳的作用，颗粒会在轴向上被限制在衬底的附近。当准BIC共振被激发的时候，尖端到尖端的间隙中局域场会被高度增强，在相邻的水介质中引起强烈的光吸收。然后，这些热点作为局部热源，诱导强烈的温度梯度，用于纳米尺度上操纵微流体。除了引起更快驱动流的总体温度升高之外，由于大的横向温度梯度，这些热点还会引起强烈的热渗流，所以颗粒的聚集速度更快。

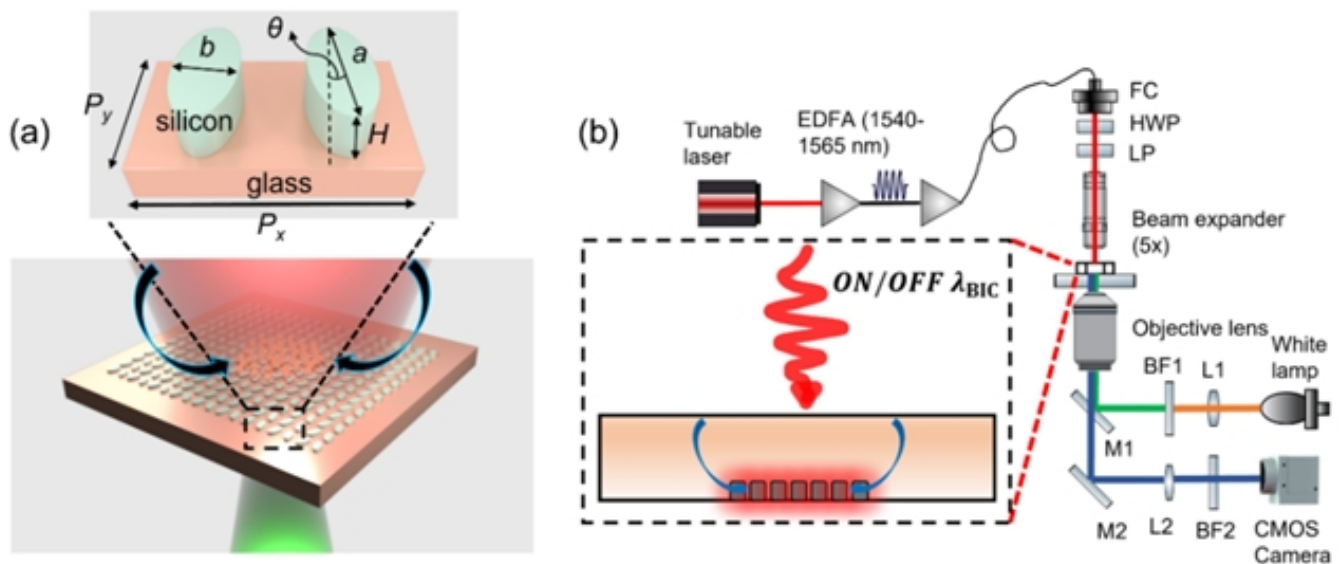


图1. 工作原理和实验设备图

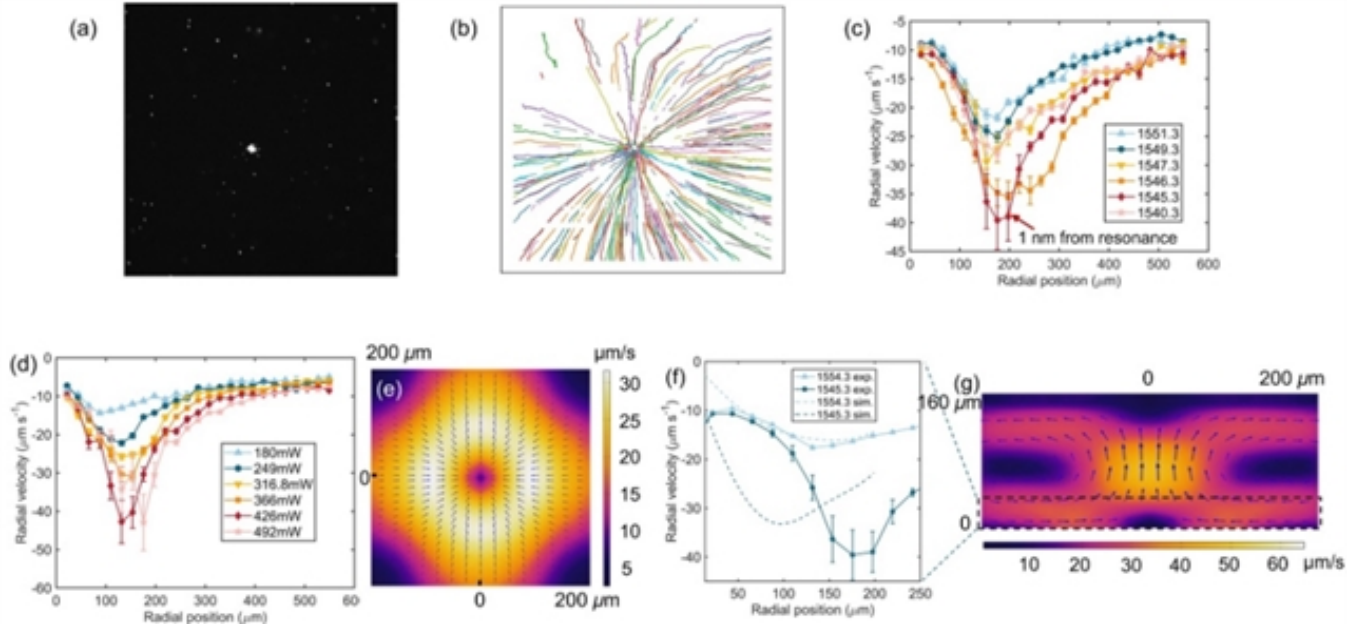


图2. 粒子传输的实验以及仿真结果图

作者使用500nm荧光团标记的PS颗粒作为示踪剂观察微流体的流动，图2(a)表示了照射超表面的时候粒子的聚集效果，图2(b)展示了粒子运动的轨迹。可以看到，颗粒向激光光斑中心快速传输，并聚集在靠近衬底的地方。轨迹图的中心表示停滞区，即聚集的粒子簇。图2(c)和2(d)表示实验中测量出来的角平均径向速度。随着输入波长逐渐接近共振波长(1544.3nm)的时候，流体的径向速度逐渐增加。从图中可以看出，由于BIC共振的高Q特性，可以将波长调谐控制在7nm之间，从而精准的控制流速。为了理解该实验现象中的物理机制，作者还通过有限元仿真软件COMSOL对流场进行了数值求解，并计算了在不同平面中的速度分布，如图2(e)和2(f)。仿真结果与实验结果基本保持一致。

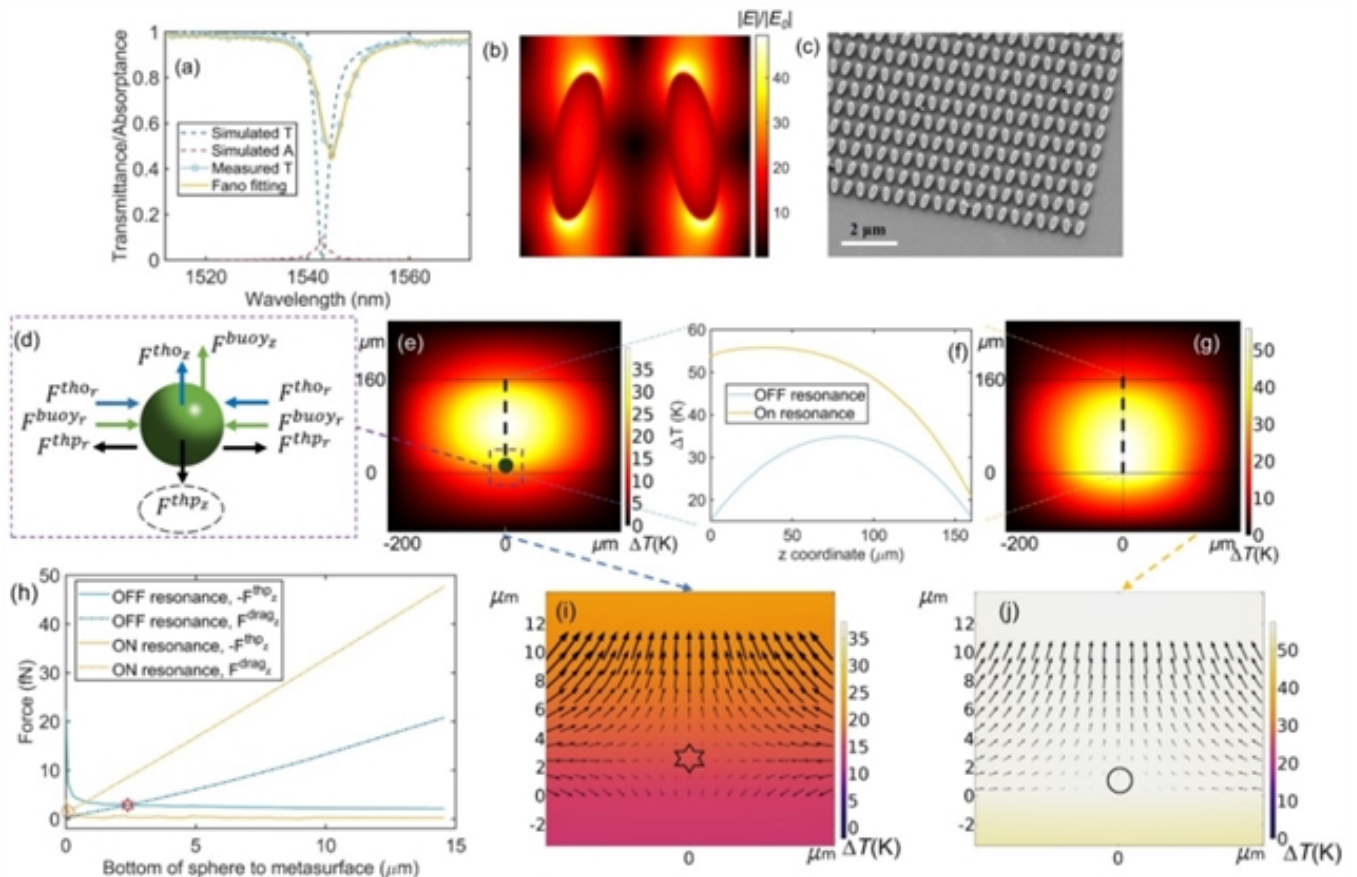


图3 超表面的光学特性和热学模拟

为了阐述上述分子动力学，我们首先分析了超表面在共振开启和关闭的时候的光学表征。图3(a)为超表面模拟以及测试中的光谱图。图3(b)为一个晶胞内的电场分布，(c)为SEM图片。作者强调，与全介质对应物相比，等离激元纳米结构通常具有更小的体积和更严格的场限制。更强的流动需要等离激元纳米结构阵列利用空间分布加热效应。另一方面，准 BIC 超表面空间分布加热与高 Q 谐振相结合，以实现温度分布的精确控制 (见图3e-g)和改变入射波长的光流体流动。

作者通过实验研究了系统中粒子动力学。当输入波长接近共振 (1545.3nm)和非共振(1551.3nm)时，比较了粒子聚集随照射时间的演变，如图4a和4b所示。可以发现，对于近共振情况，粒子以更快的方式集中，聚集颗粒的时间仅为非共振条件下的三分之二。这与上述流速测量结果一致。此外，粒子在近共振条件下堆积得更紧密，如图4a和4b的最后一帧所示。但是接近共振条件并不一定能改善颗粒聚集，不同输入波长下的粒子团如图4c所示。

综上，作者介绍并演示了全介电系统中温度和流体运动的亚波长控制。由于准 BIC 模式的高Q 和电磁场增强，提出了通过将激光波长调谐到几纳米内来精确控制流体速度。此外，还展示了长程和快速的粒子传输和聚集。观察到共振时聚集的稳定性，并将其归因于被共振准 BIC 纳米天线元件的强加热效应改变的温度场。并可以通过稍微抑制准 BIC 模式来改善。共振产生的环状粒子聚集也为在低温区域捕获和分离粒子提供了潜在的可能性。

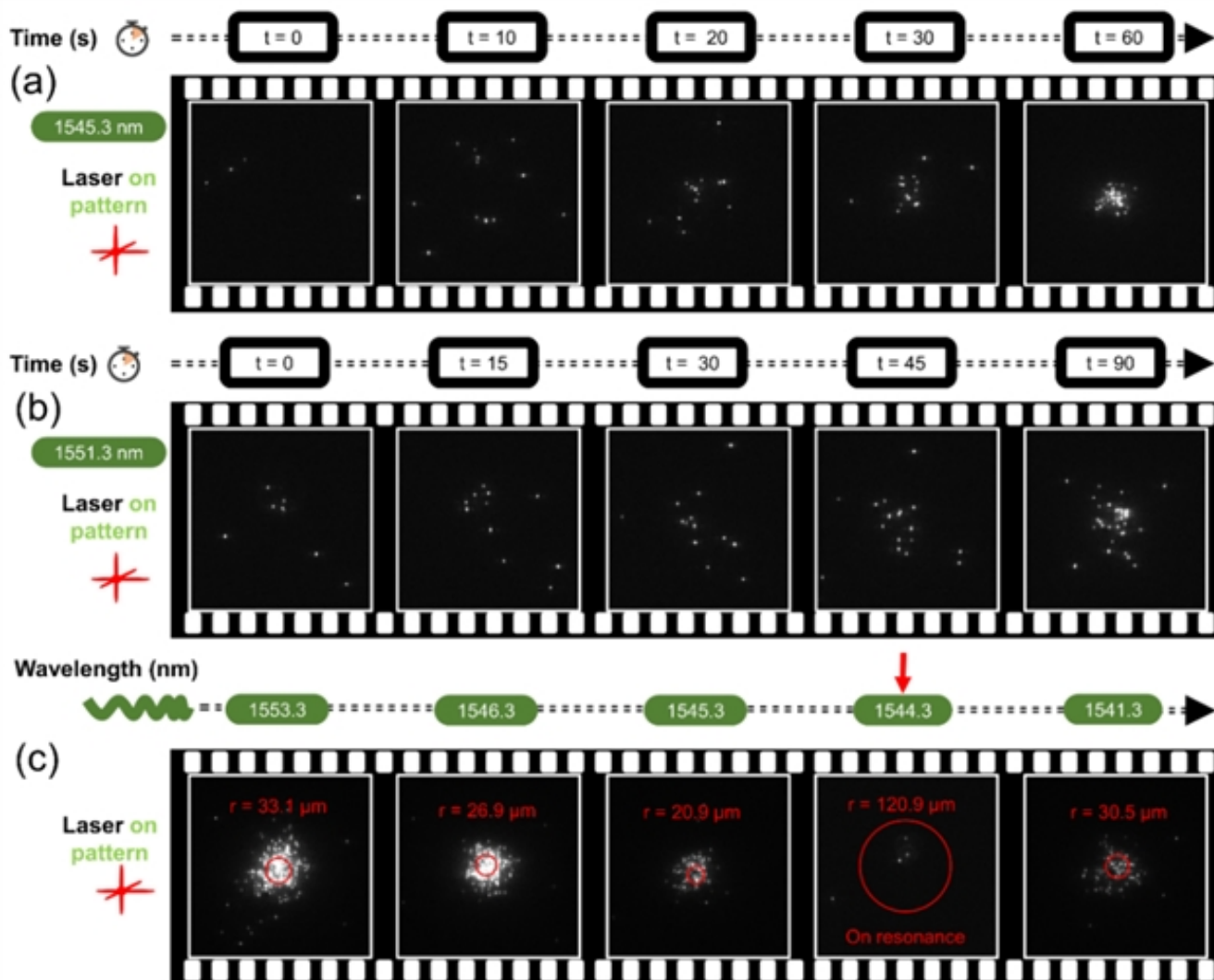


图4. 粒子聚集的实验效果图

该文章发表在国际顶尖学术期刊《Light: Science Applications》上，题目为Optofluidic transport and assembly of nanoparticles using an all-dielectric quasi-BIC metasurface。Sen Yang为该论文的第一作者，Justus C. Ndukaife为该论文的通讯作者。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://www.nature.com/articles/s41377-023-01212-4>

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：Justus C. Ndukaife 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