

细胞“点杀”：单线态氧的片上高浓度生成

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/41618.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！

细胞“点杀”：单线态氧的片上高浓度生成。 导读

近日，清华大学团队将连续体束缚态（BIC）光场调控引入光催化领域，提出了一种单线态氧（ $^1\text{O}_2$ ）的高效产生策略：利用准BIC共振，将激光能量约束在片上亚波长尺度实现强吸收，同时耦合Au-TiO₂异质结的热载流子过程，大幅提升光催化效率，使 $^1\text{O}_2$ 的局域浓度在数秒内达到摩尔级，相较于传统方法实现了6个数量级跃升，进一步展现了波长定制、空间像素级编程的细胞光毒性控制，为光动力疗法等应用提供了精准、快速、高效的肿瘤细胞杀伤工具。

该研究成果以Quasi-BIC metasurfaces enable rapid, localized singlet-oxygen generation为题发表于国际顶尖学术期刊《Light: Science Applications》。清华大学精仪系博士生龙瑞霖为论文的第一作者，清华大学精仪系柳强教授、付星教授为论文的共同通讯作者。

研究背景

单线态氧（ $^1\text{O}_2$ ）是分子氧的最低激发态，因其具有细胞毒性和极强氧化性，在光动力疗法中被用于杀灭恶性肿瘤。 $^1\text{O}_2$ 生成方法主要有分子光敏剂、无机纳米材料两类。前者虽然应用广泛，但存在产率低、易被光降解、激发波段选择性不足等问题；后者增强了抗降解稳定性，但仍具有 $^1\text{O}_2$ 产率低的瓶颈。此前，两类方法都难以在低剂量、短时间照射下实现高浓度 $^1\text{O}_2$ 生成。

创新研究

研究团队指出，高效产生单线态氧的诀窍是实现载流子数量、载流子寿命双高，然而传统的无机纳米材料方法难以兼顾两者——金属含量越少，载流子寿命越长，但是吸收越弱（载流子数量越少）。本研究创造性地将吸光能力与金属含量解耦，仅用极少量金属（厚度7nm）即实现了高效光吸收。

研究团队精巧设计了Au-TiO₂超表面（图2a）：TiO₂椭圆纳米柱阵列上覆盖7nm超薄金层，通过相邻椭圆的相对旋转引入弱对称性破缺，并优化至临界耦合状态（辐射损耗与吸收损耗匹配），从而在100nm光程内实现了高达45%的光吸收效率。如此强的吸收，源于准BIC效应将电磁能量牢牢束缚在界面。仿真表明，Au/TiO₂界面的电场增强14倍，吸收的增强抬升了电子温度，推动热载流子跨越0.8eV势垒注入TiO₂导带，并触发界面氧化还原，从而高效生成 $^1\text{O}_2$ （图2b）。

实验中，Au-TiO₂超表面在连续光激发下，数秒内产生的单线态氧局域浓度高达摩尔级，相较于传统体系（产生浓度为微摩尔级以下）提升了6个数量级。

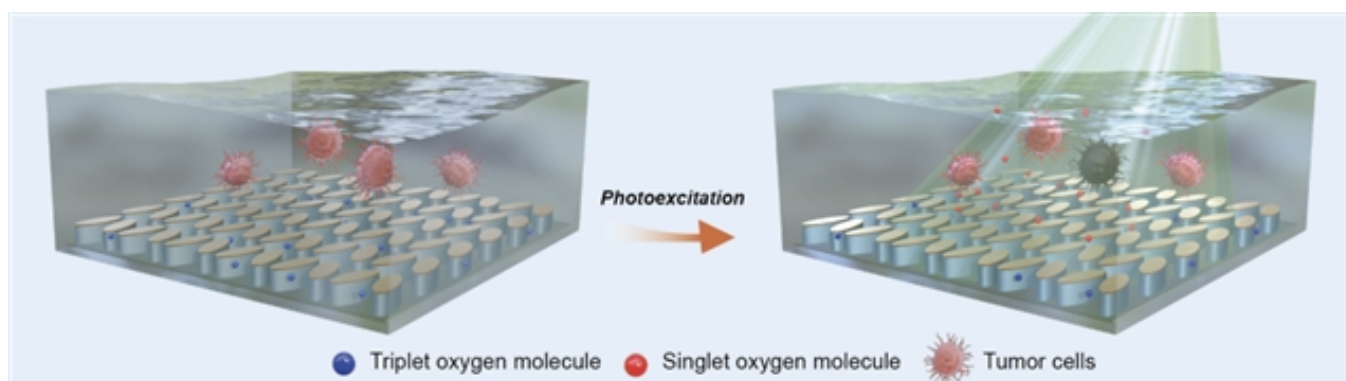


图1：片上高效生成单线态氧的概念图。

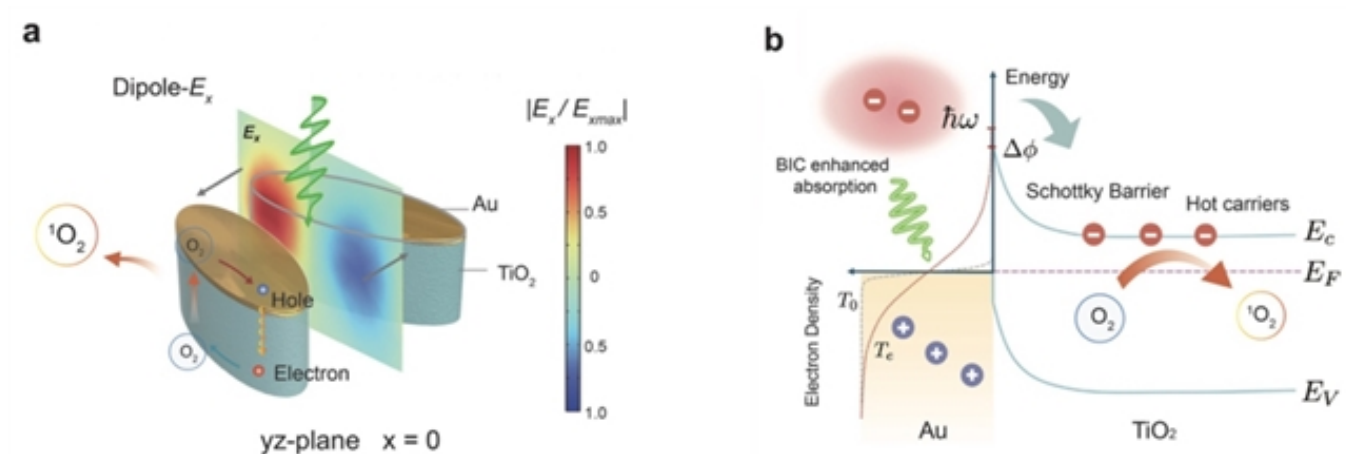


图2：器件工作机理：（a）准BIC吸收增强；（b）Au – TiO₂异质结热载流子输运。

高速率、高浓度产生单线态氧之外，新方法还具有两个突出优点：可定制激活波长、定制作用区域，精准点杀细胞。一方面，通过改变超表面的几何尺度参数，可调谐共振波长，实现定制化波段的响应；另一方面，¹O₂仅在超表面定制化图案的区域、亚波长尺度内原位产生并积累，实现微米级空间分辨率的靶向治疗。如图3所示，细胞死亡区域与定制化波长精准匹配、与超表面图案化区域高度吻合，体现出波长定制、空间像素级编程的光毒性控制。

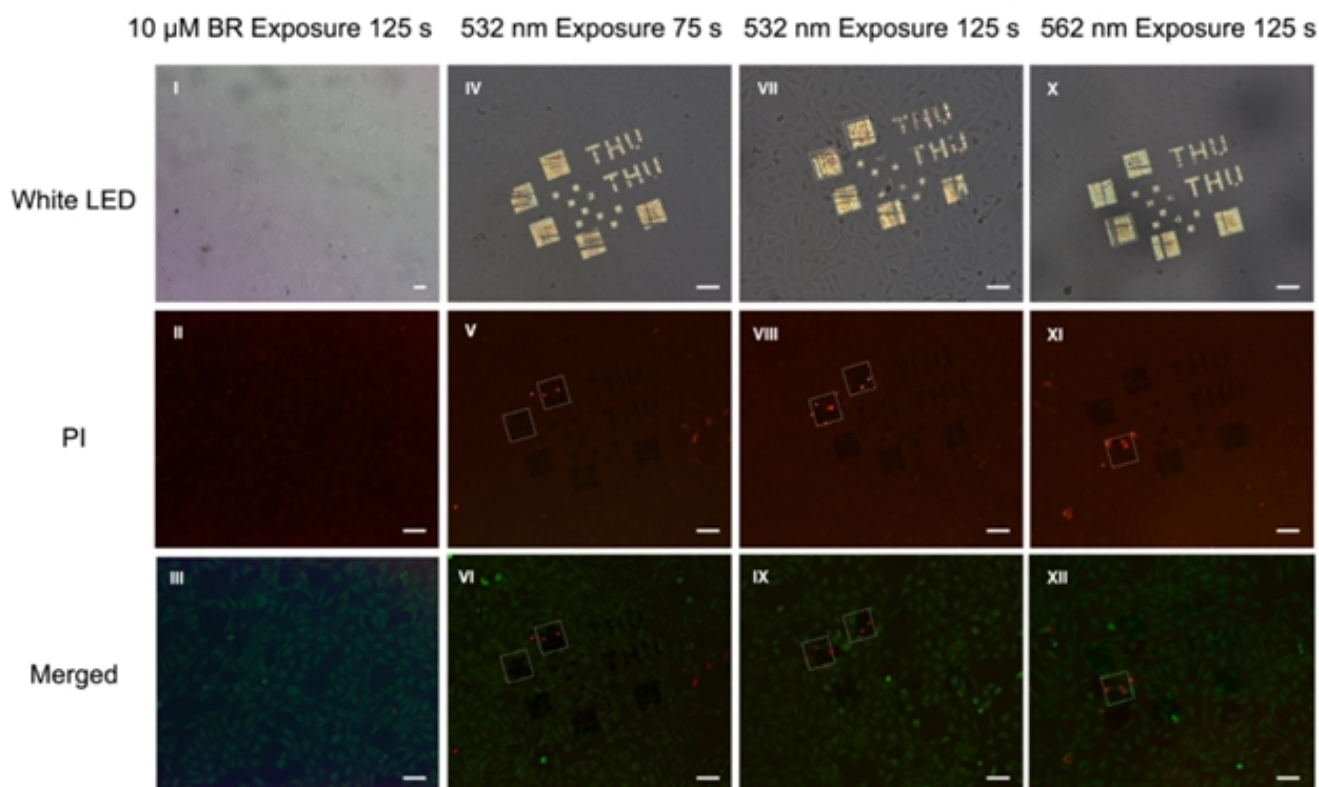


图3：波长定制、空间像素级编程的光毒性验证。

总结与展望

清华大学团队利用准BIC共振增强吸收，并与Au – TiO₂异质结的热载流子过程协同，大幅提升光催化效率，数秒内实现摩尔级局域单线态氧产生，相比传统方法提升达6个数量级。这一超薄片上平台同时具备波长可定制与像素级空间编程能力，可实现细胞光毒性的精准投送，为高效光动力治疗提供新方案；可进一步拓展至高通量筛选、选择性氧化、小分子合成等领域。结合微流控与光子器件集成潜力，该平台有望发展为可软件定义的智能微反应器和多功能纳米光子催化芯片。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-026-02267-9>

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：柳强等 来源：《光：科学与应用》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](http://iikx.com)转发