
片上非局域超构表面：克服空间复用中效率损失

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/39314.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！

片上非局域超构表面：克服空间复用中效率损失。 导读

近日，武汉大学李仲阳教授团队在片上超构表面光场操控方向取得重要进展。研究团队提出了一种与光波导集成的片上非局域超构表面，通过引入对称性破缺的连续域准束缚态（q-BIC）模式，实现导波光的波长选择性提取和颜色路由功能。具体而言，通过精确控制双纳米原子对的几何不对称性和缩放因子，可以对提取光的振幅和波长进行调制，从而获得具有可调强度的窄带光谱提取。作为概念验证，研究团队将不同参数的双原子阵列沿波导方向水平级联，能够在不同空间位置选择性地将从不同波长光路由到自由空间中，构建多个片上复用的颜色路由器。相比于传统依赖空间复用的自由空间方案，该片上架构在级联复用几乎不产生额外的能量利用效率损失，为片上超构表面突破光谱控制与路由效率瓶颈提供了全新策略。相关研究成果以On-Chip Nonlocal Metasurface for Color Router: Conquering Efficiency-Loss from Spatial-Multiplexing为题发表于《Light: Science Applications》。武汉大学博士后时阳阳为该工作第一作者，李仲阳教授为通讯作者。

研究背景

为推动片上光子器件的小型化与集成化，将超构表面与光波导深度融合，作为操控面内光场的紧凑平台，已成为近年来的重要发展方向。现有片上超构表面虽可对外耦合光的振幅、相位与偏振实现精细调控，但在光谱维度仍存在明显不足，难以实现定制化的波长选择性提取。通常情况下，导波在受纳米结构扰动后，多呈现宽带且选择性较弱的耦出行为，使得波分复用、颜色路由等关键应用受限。此外，传统自由空间超构表面或多层薄膜虽然能够通过空间复用实现颜色滤波和波长控制，但其固有缺陷在于：非目标波长光通常在阵列结构中会被反射或吸收，导致入射光能量利用下降。如何在保持片上系统紧凑性的同时，实现高效、窄带、可控的导波光波选择性提取，并避免自由空间复用架构不可避免的能量损失，成为该领域亟须突破的核心难题。

研究亮点

针对现有片上超构表面缺乏对波长的选择性提取手段的瓶颈，研究团队提出了一种基于q-BIC原理设计的片上非局域超构表面，该结构由双原子阵列构成，位于光波导上方（图1a-b），可以支持连续体中对称保护的束缚态。通过施加面内扰动，使平行的双原子产生对称倾斜，打破其反演对称性，从而将波导内的束缚波转化为准束缚波泄露到自由空间中（图1c-e），实现窄带提取。

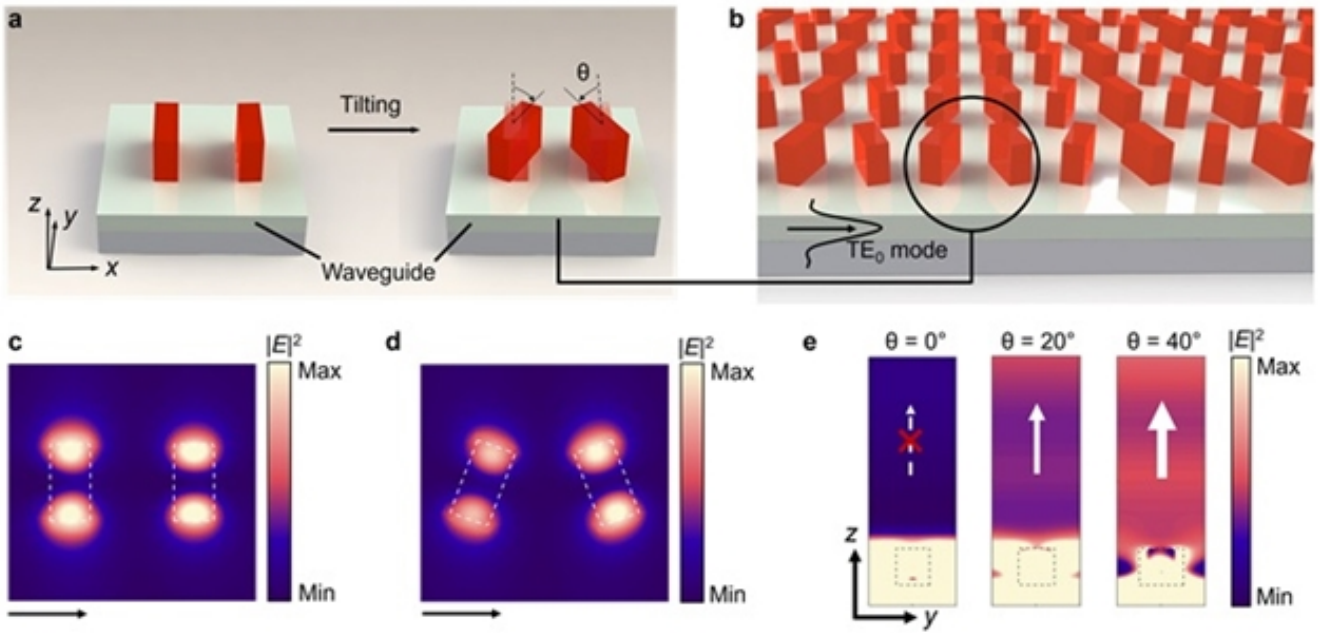


图1：片上非局域超构表面的结构设计和仿真分析。(a)片上双原子结构单元的三维示意图，该像素由两个平行纳米块和两个倾斜纳米砖组成，分别对应于从BIC模式到q-BIC模式的转换；(b)片上非局域超构表面阵列的示意图；(c-d)TE₀模式导波从x方向入射时，倾斜角 $\theta = 0^\circ$ 和 $\theta = 20^\circ$ 两种情况下xy平面内的模拟电场强度(E₂)分布；(e)倾斜角 $\theta = 0^\circ$ 、 $\theta = 20^\circ$ 和 $\theta = 40^\circ$ 时，yz平面内的电场强度分布(E₂)

与以往宽带提取的片上结构相比，该片上非局域超构表面能够实现带宽约20 nm的窄带输出，并可在同时调节频率与振幅方面提供更高维度的设计自由度（图2a）。具体而言，如图2b所示，提取光的强度由不对称参数 α 控制，不对称（倾斜角）性越强，提取到片外的光强越强；而在固定倾斜角度时，通过调整几何尺寸即可调节提取峰值的中心波长，即尺寸逐渐增大，中心波长逐渐红移。

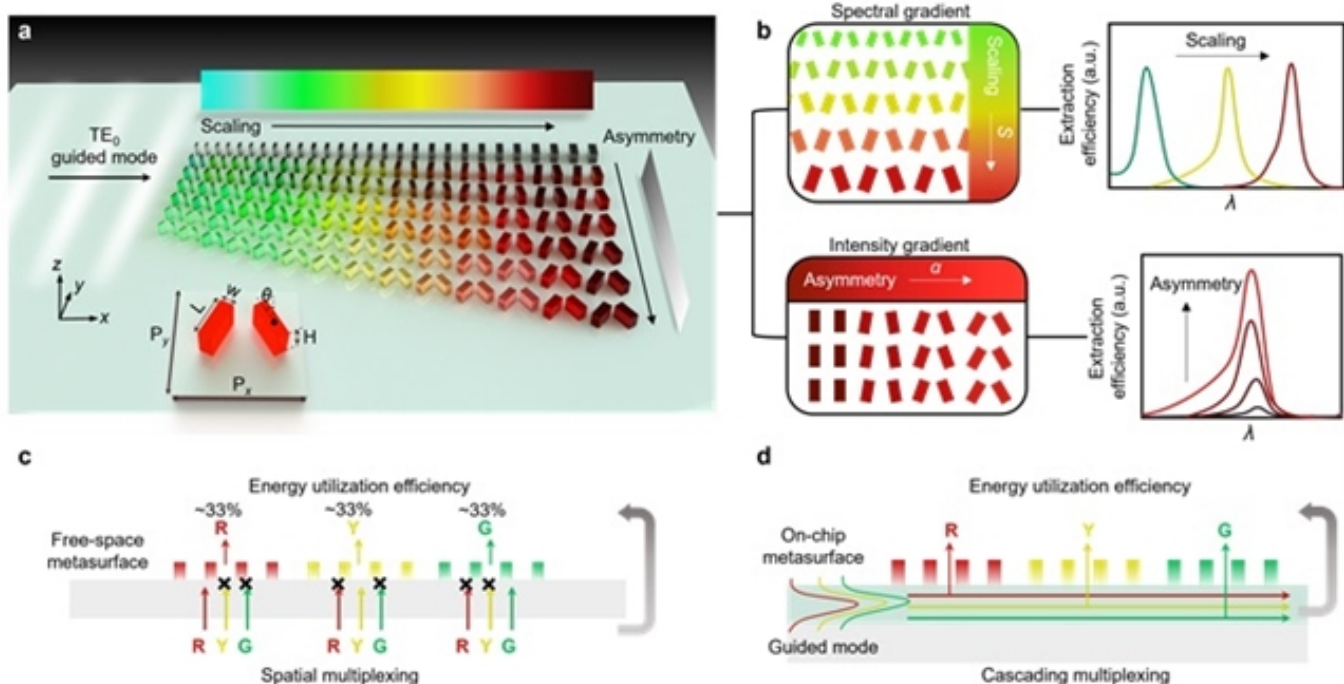


图2：基于q-BIC原理设计的片上颜色路由超构表面的示意图。(a)片上q-BIC辅助设计的超构表面集成在波导上，用于提取和路由导波光；(b)通过分别调整双原子的缩放因子 S 和不对称因子 α ，控制提取导波的光谱选择性和强度；(c-d)传统自由空间中的空间复用型和所提出片上级联复用型颜色路由器的对比示意

值得强调的是，片上超构表面天然适宜通过水平级联的方式实现多波长通道复用。与传统的空间复用型路由器相比，片上级联式结构可显著克服能量利用效率的损失。这是由于自由空间中滤波通常会导导致非目标通带光波经过阵列时，会被吸收或反射而产生入射光能量的浪费，例如在三通道波长入射下理论能量利用效率上限仅为1/3（图2c）。相反，对于片上级联策略，导波光被结构阵列从各自位置选择性地提取，而未被提取的光则沿波导继续传播至后续的光学器件再次利用（图2d），其能量利用效率理论可接近1。这好比将导波比作管道中的水流，这种设计就像沿着水管布置多个支流：每个支流只取出自己需要的部分，其余水流继续输送，不会造成额外浪费。

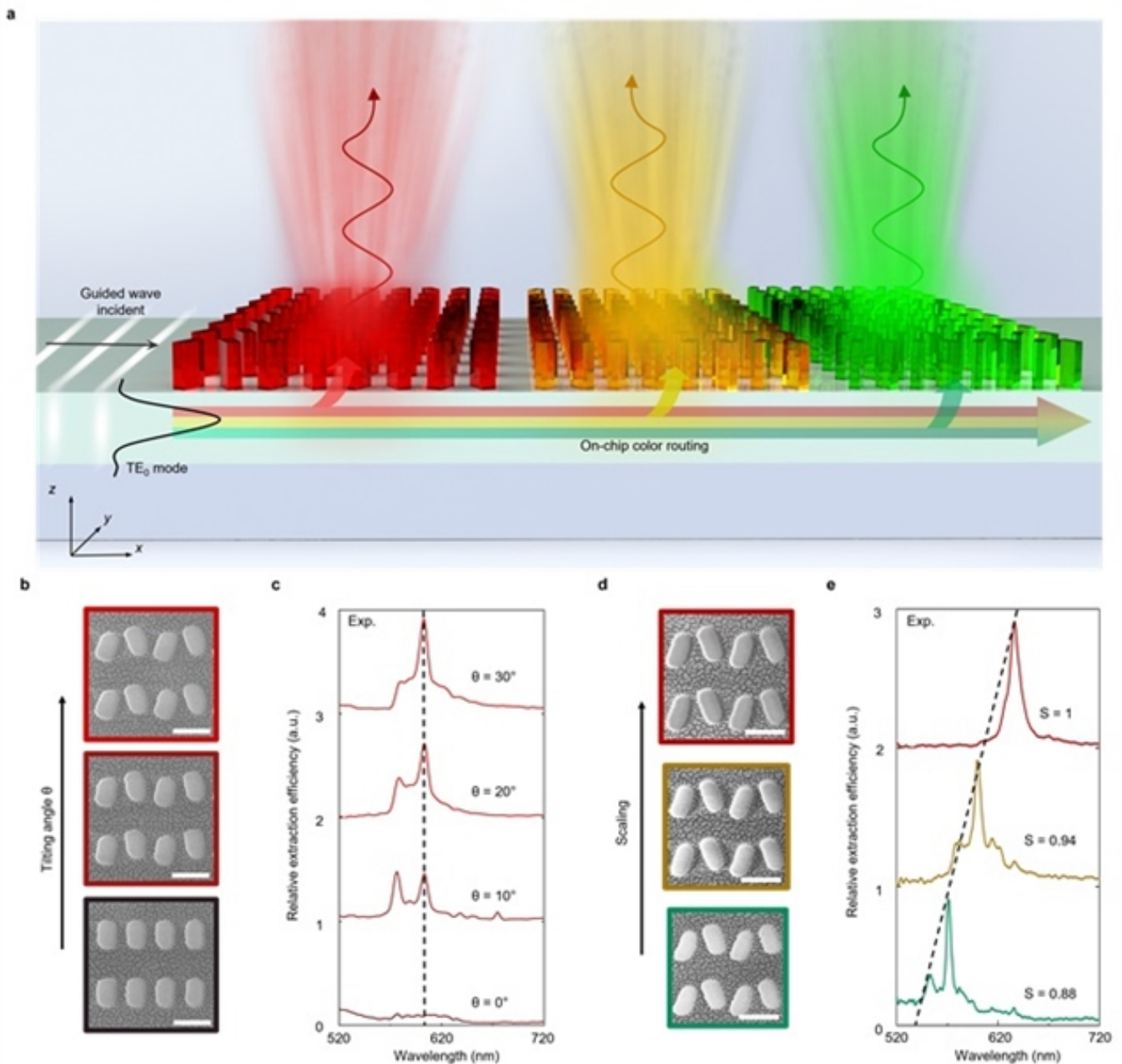


图3：片上非局域超构表面实现窄带提取和强度调谐的实验表征。(a)水平级联不同的双原子阵列实现颜色路由的概念示意图；(b)倾斜角 θ 从 0° 到 20° 变化时，所制备的片上超构表面样品的扫描电镜图像。比例尺：250 nm；(c)倾斜角 θ 从 0° 到 30° 变化时，不同双原子阵列的实验提取光谱；(d)缩放因子 S 增大时，所制备样品的扫描电镜图像。比例尺：250 nm；(e)倾斜角 θ 固定为 25° 时，不同缩放因子 S （从0.88变化到1）下的双原子阵列的实验提取光谱

研究团队进一步将颜色和强度信息编码到具有不同几何参数的双原子结构中，实现多种片上颜色路由功能（图3a）。在此基础上，制备了多组不同参数的片上样品进行实验表征。实验结果表明，通过调整不对称角度，可实现耦出光强度的连续可调（图3b-c）。另一方面，在固定倾斜角度下，通过改变几何尺寸，可实现具有波长选择性的窄带输出（图3d-e）。

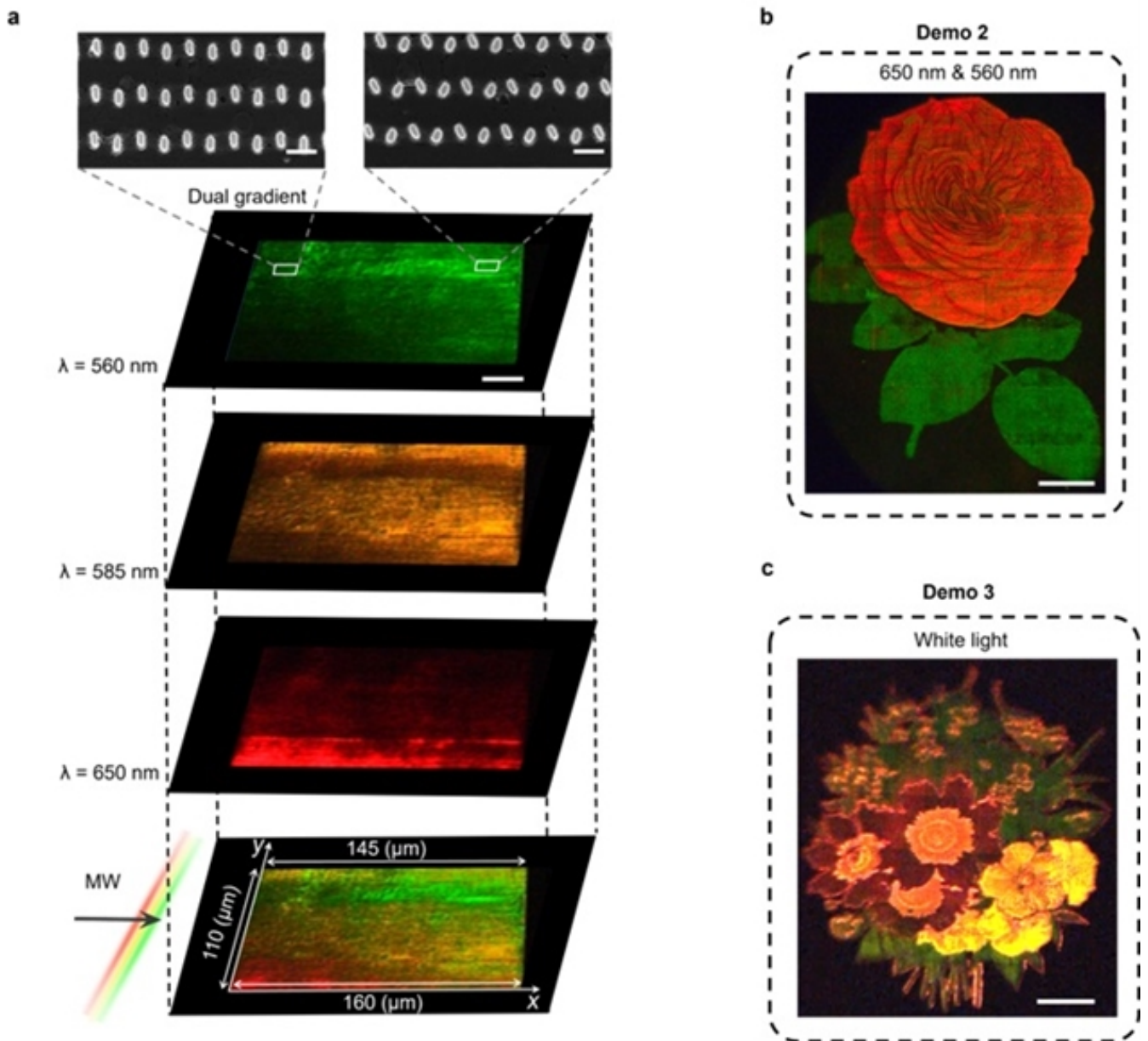


图4：片上多色灰度图像显示的实验演示。(a)不同波长入射下拍摄的片上双梯度超构表面的光学图像。顶部：所制备样品的扫描电镜图像。比例尺：250 nm；(b)双色灰度图像红花绿叶的实验表征。比例尺：50 μm ；(c)白光入射下多色灰度图像花叶的实验表征。比例尺：50 μm

为进一步验证该结构在波长选择性提取与颜色路由方面的能力，研究团队将其应用拓展至片上微图像显示的演示中。首先，制备了一种片上双梯度超构表面，验证了该双梯度超构表面在单波长（560 nm、585 nm和650 nm）和多波长光入射下的光学性能，结果表明其具备良好的光谱选择性与连续强度调节能力（图4a）。基于这一参数空间，团队进一步演示了两幅微尺度灰度图像：一幅是由650 nm与560 nm双波长同时入射所形成的红花绿叶图案（图4b）；另一幅是在白光照射下生成的多色灰度图像花与叶（图4c），展示了该方案在多波长路由与彩色图案重构方面的潜力。

总结与展望

本研究提出并实验验证了一种集成在波导上的片上非局域超构表面平台。通过对双原子单元的不对称性和缩放因子的精细设计，实现了对外耦合光波的提取强度和波长的同时操控。作为概念验证，研究团队进一步构建了多路颜色路由演示，展示了在片上传播框架下，通过空间映射与级联不同几何参数的像素单元，可实现高效的多色光路由输出。相比传统自由空间方案，基于q-BIC设计的片上级联结构在能量利用效率方面具有显著改善。同时，依托全电介质结构与片上传播机制，该平台还能有效抑制零级背景，提高成像清晰度和显示质量，为在紧凑系统中集成多功能片上光学模块提供了全新方案。总体而言，该片上非局域超构表面平台凭借其在小型化集成化方面的优势，在下一代可穿戴显示设备、波分复用和集成光子信息路由等先进应用方面具有巨大的潜力。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-02146-9>

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：李仲阳等 来源：《光：科学与应用》

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

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