
基于时空相位调制超表面实现非互易光传播的新方法

作者：writer 来源：爱科学

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/7935.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！

基于时空相位调制超表面实现非互易光传播的新方法。

近日，美国宾夕法尼亚州立大学电子工程系的Xingjie Ni教授的研究团队发表了题为Nonreciprocal Metasurface with Space-Time Phase Modulation的文章，提出在具有时空相位调制的超薄超表面上实现非互易光传播的新方法。研究人员在实验上通过附加超快时间相位调制证实了该动态超表面设计。他们结合两个相干波的外差干涉产生的多太赫兹时变调制，将动态相变引入超表面。这种方法为制造紧凑、可集成的非互易光学元件提供了一种潜在的思路。该研究成果于12月发表在《Light: Science Applications》期刊上。

研究背景

光的传播是互易的，即光在一个方向上的传播轨迹与相反方向上的传播轨迹相同。在需要非对称光流的光学系统中，打破互易性是很重要的。打破互易性可以使光只在一个方向传播。支持这种单向光流的光学元件，例如隔离器和循环器，是现代激光和通信系统中不可缺少的构件。然而，目前光学非互易性几乎完全是通过磁光材料实现的，磁光材料与现代微型化光子系统是不相容的。基于磁光效应的非互易性光学元件的设备体积庞大，难以集成。在许多光学应用中，实现无磁的非互易光传输是非常必要的。此外，亚波长相互作用长度和大于THz带宽的超快调制频率的非互易性是一个技术难题，迄今为止还未实现。

创新研究

本文首次提出用一种新型光学超表面在光学频率上实现自由空间中光的非互易传播。这是一个具有可控超快时变特性的光学超表面，它能够在没有大体积磁铁的情况下，打破光学互易性。该新型超表面由银色反光板和在近红外波长约860nm处有大非线性克尔系数的块状硅纳米天线组成。研究人员利用频率间隔较近的两条激光线之间的外差干涉，实现了约2.8THz大的时间调制频率的超快时空相位调制。这种动态调制技术在空间和时间调制频率方面表现出极大的灵活性。研究人员在实验中实现在150nm亚波长相互作用长度下，约5.77THz宽带内光的完全不对称反射。此外，文中提出利用由超表面几何提供的单向动量传递，可以通过设计一个不希望的输出状态位于禁止区域，即非传播区域，自由地控制选择性光子转换。这种方法在控制光的动量和能量空间方面表现出良好的灵活性。它将为探索由时变材料特性产生的有趣物理现象提供一个新的平台，并将为可伸缩、可集成、无磁互易器件的发展开辟一个新的范式。

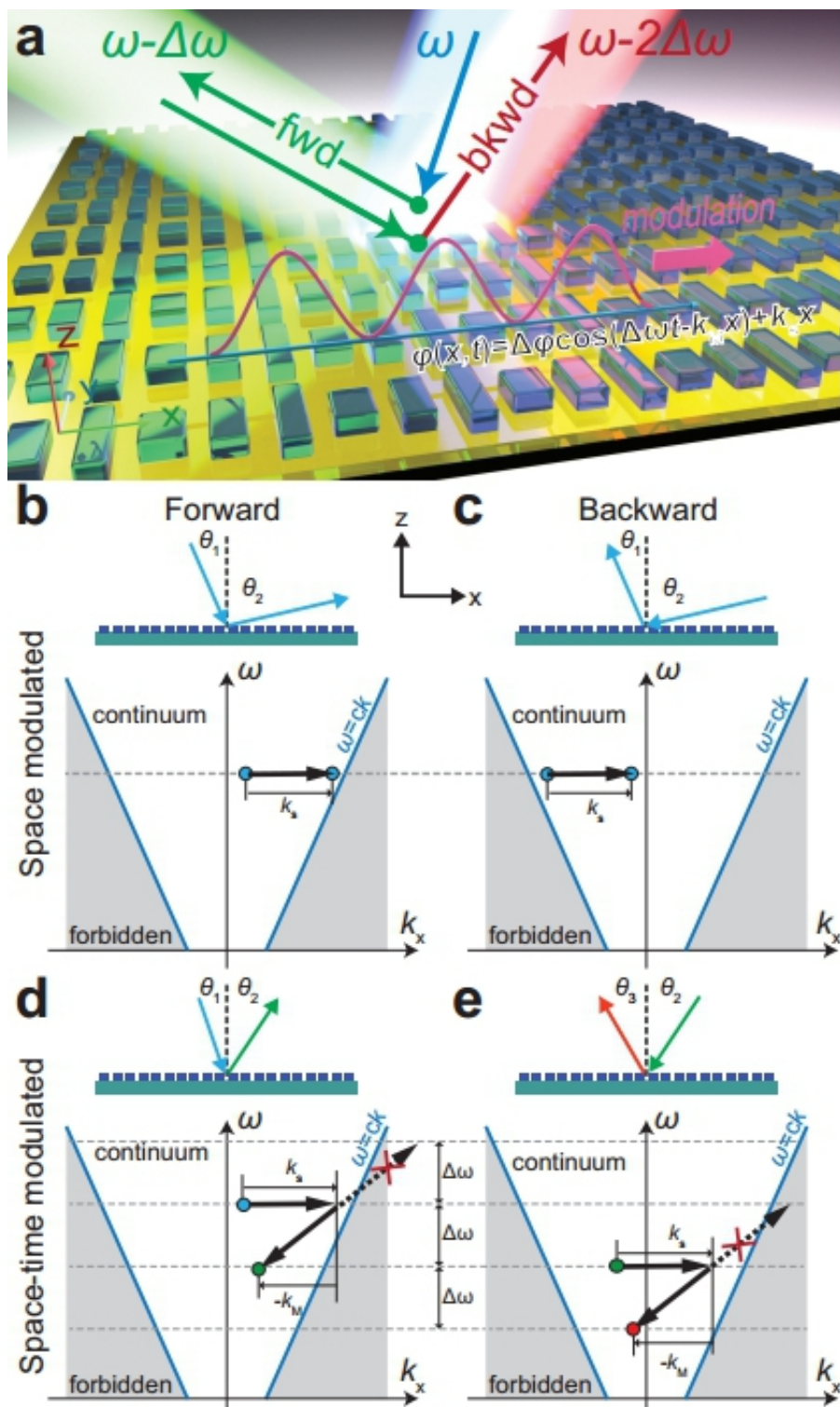


图1 非互易时空相位调制超表面的工作原理。

(a)由谐振介质纳米天线组成的时空相位调制超表面反射模式下的示意图。在设计沿x方向相位梯度上叠加一个正弦移动相位调制。频率为 ω 的光打到超表面上由于动态相位调制转化为频率为 $\omega - \Delta\omega$ 的反射光，而后向传播的光束频率由 $\omega - \Delta\omega$ 变为 $\omega - 2\Delta\omega$ ，产生非互易效果。对比普通空间调制超表面(b)(c)和时空相位调制超表面(d)(e)。普通空间调制超表面仅支持对称的正向(b)和反向(c)反射，如图所示。无频率转换。这个过程使互易的，前后两束光的轨迹相同。时空相位调制超表面支持非对称

的正向(b)和反向(c)反射。它不仅在沿x方向提供了额外的动量，也转换了效率。无论正向还是反向，向上的跃迁是禁止的，由于产生的波矢过大，在自由空间得不到支持，从而导致能量和动量空间中的单向光子跃迁。因此，光束的运动轨迹不同，表现出非互易效应。为空间相位调制引入的线性动量，为时间相位调制引入的附加线性动量。

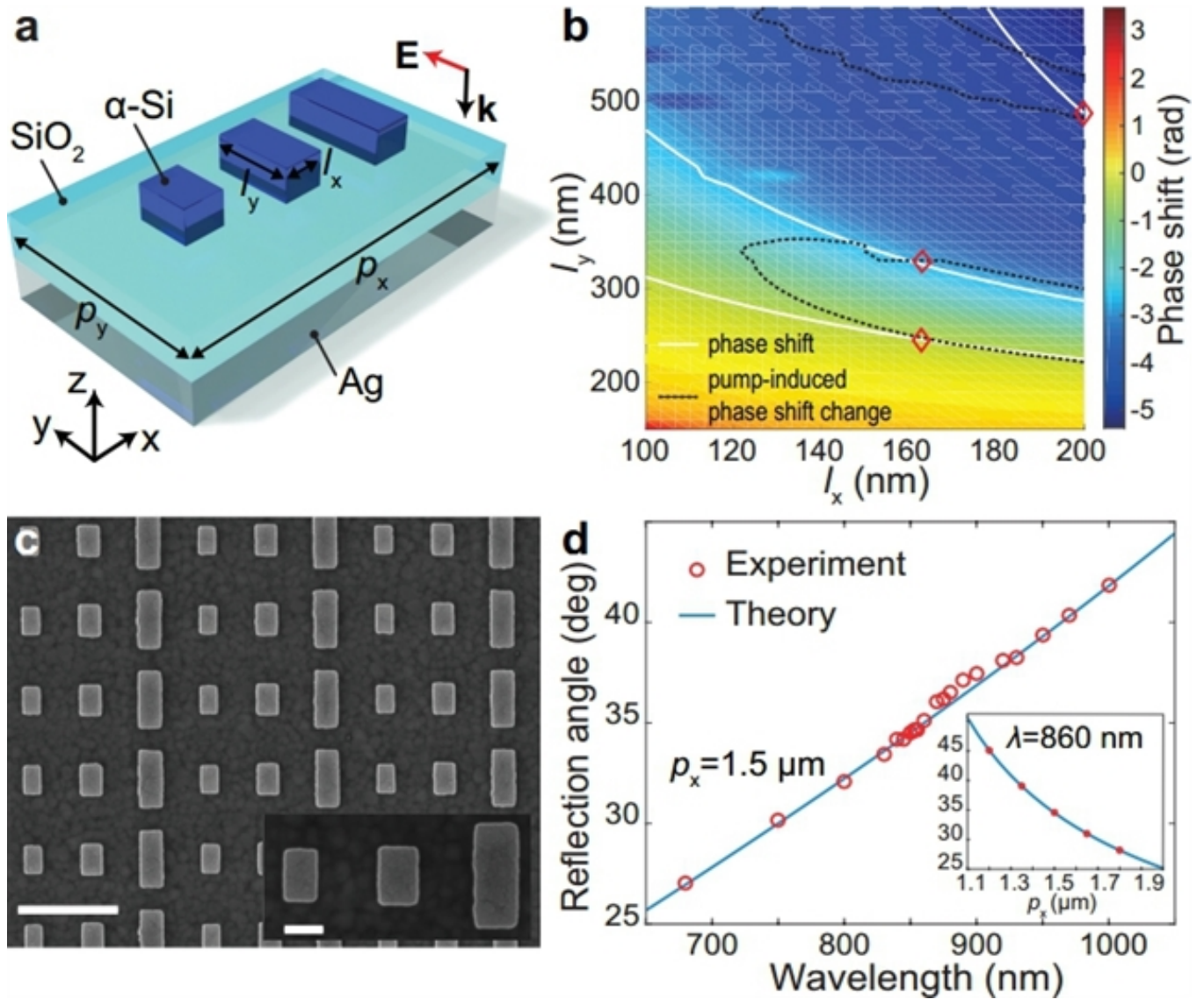


图2 超表面设计和表征。

(a)超表面单个单元的3D示意图，由三个非单晶硅纳米棒天线组成。银磨板，二氧化硅间隔层，和非单晶硅厚度分别是200nm,50nm,150nm。(b)计算单个纳米天线不同参数和对应的相移。当泵浦光以15GW/cm²的强度照射时，它被等高线覆盖，显示0.32弧度的泵浦相移变化(黑色虚线)。白线是表示在静态条件下等间距相移的等值线。红色空心棱形标记的三种不同结构的纳米天线以 $2\pi/3$ 的间隔覆盖 2π 静态相移用于组成超表面。(c)加工完成的非单晶硅超表面的FESEM图像。主图和插图的比例尺分别是1 μ m和200nm。(d) $p_x=1.5 \mu$ m，波长由680nm到1000nm的光正入射到超表面上得到测量(红圈)和计算(蓝线)的异常反射角。插图展示了 $\lambda=860$ nm异常反射角随1.2 μ m到1.8 μ m的变化。实验结果与理论基本一致。

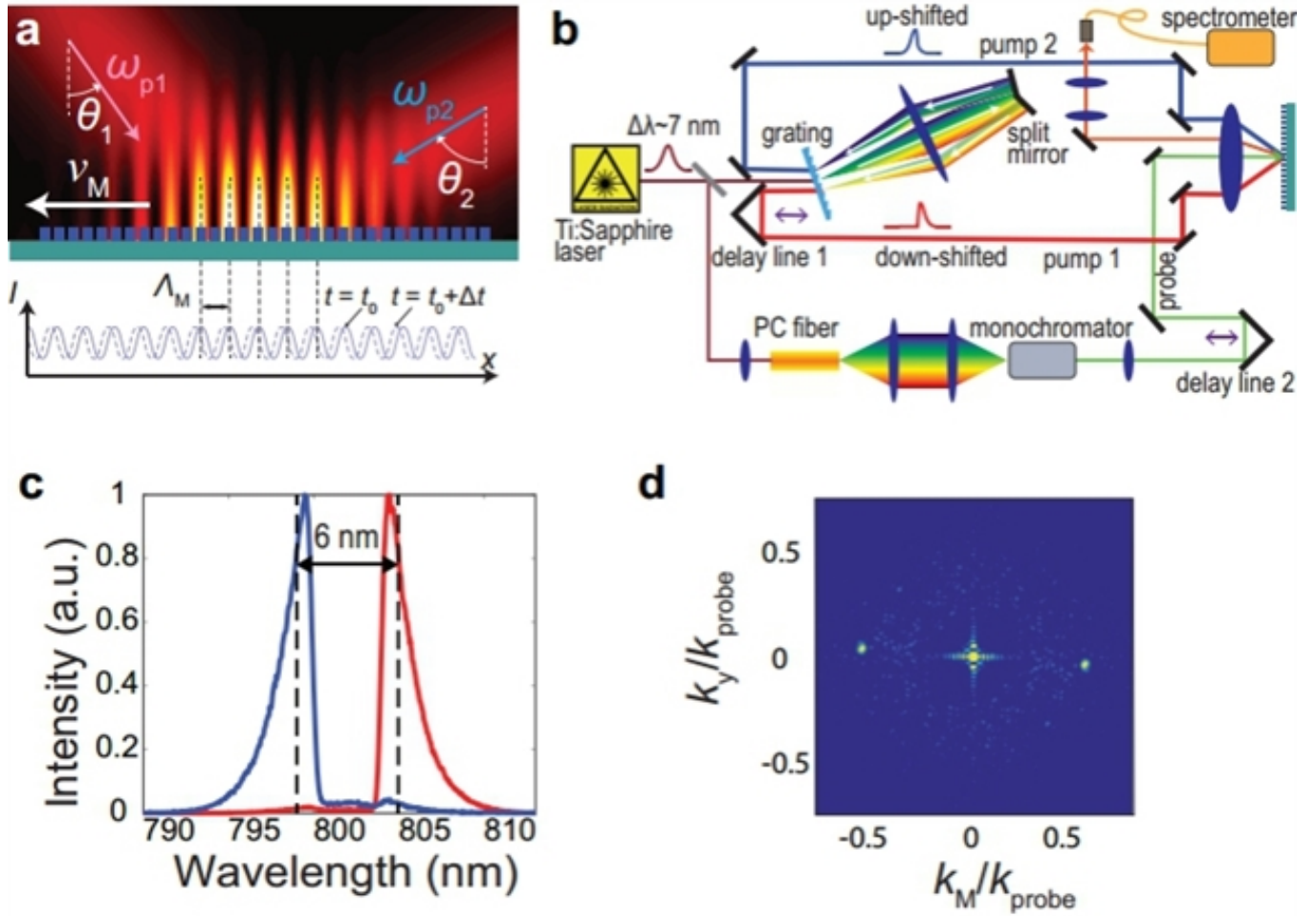


图3 可控时空相位调制实验。

(a)图示两个频率间隔很近分别为 ω_{p1} 和 ω_{p2} 的泵浦光束分别以入射角 θ_1 和 θ_2 撞击超表面。它们在超表面上产生周期为 λ_M ，速度为 v_M 的干涉条纹。由于移动干涉条纹，超表面上的纳米天线在相移中存在时变性。(b)实验装置示意图。将800nm的钛宝石飞秒脉冲激光器的输出分成两束：一束直接通过传输光栅产生频移泵浦光；另一个被发送到光子晶体光纤(PCF)，以产生波长可调的探测光束。采用两条延迟线实现三束光之间的时间同步。非球面透镜将泵浦和探测光束聚焦到超表面上。反射的信号由D形反射镜接收并由光谱仪检测。通过监测在非球面透镜的傅里叶平面上采集到的光谱，我们绘制了反射信号的频率和动量。(c)两束泵浦光的光谱显示波长差为6 nm(对应于 ω of 2.8 THz)。(d)二维傅里叶变换的干涉图样两泵束，说明和相同，是波长为860nm的探测光在自由空间中的波矢。

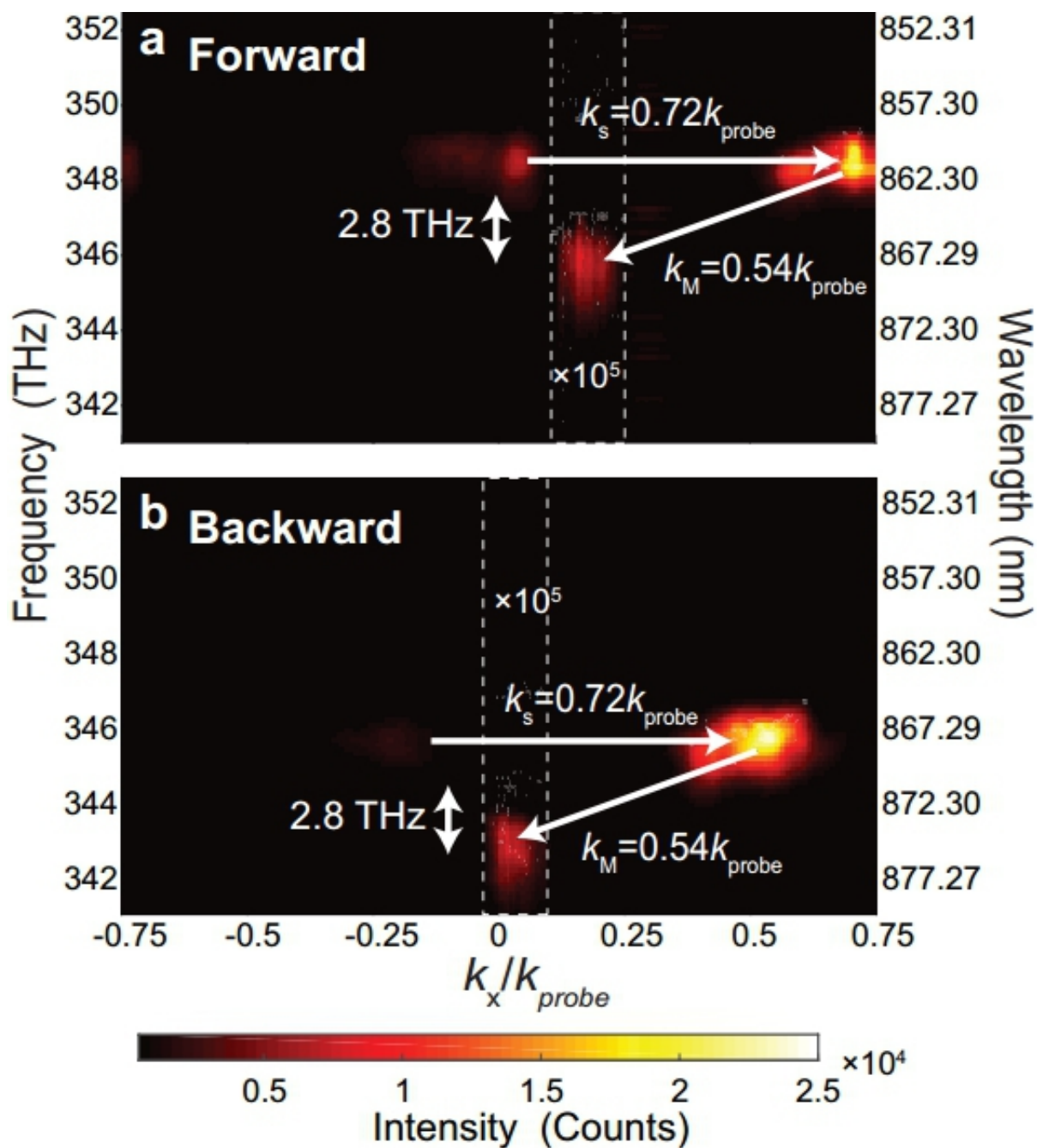


图4 时空相位调制超表面非互易光反射的实验研究。

(a)在动态调制下，正入射到超表面上的探测光束（ $k_x = 0.18k_{probe}$ ）的能量-动量图，在 $f = 345.8$ THz and $k_x = 0.18k_{probe}$ 存在下转换信号。(b)在向后的情况下，与前一个信号频率相同($f = 345.8$ THz)但方向相反($k_x = -0.18k_{probe}$)的探测波束被发送到超表面。能量-动量图显示了在 $f = 342.0$ THz下移的信号出口在法线方向($k_x = 0$)。在这两种情况下，转换后的信号都被放大了倍，以便更好地显示(放大的区域被白色方框包围)。这些结果与图1d和图e所示的理论预测完全吻合。在感兴趣区域(所有可能存在光子跃迁)，使用更精密地扫描步长和更长地光谱仪积分时间确保转换信号的检测。在可能存在上边带或高动量边带的区域，即使放大也没有检测到信号。因此，这里只放大了发生一阶转换的区域。

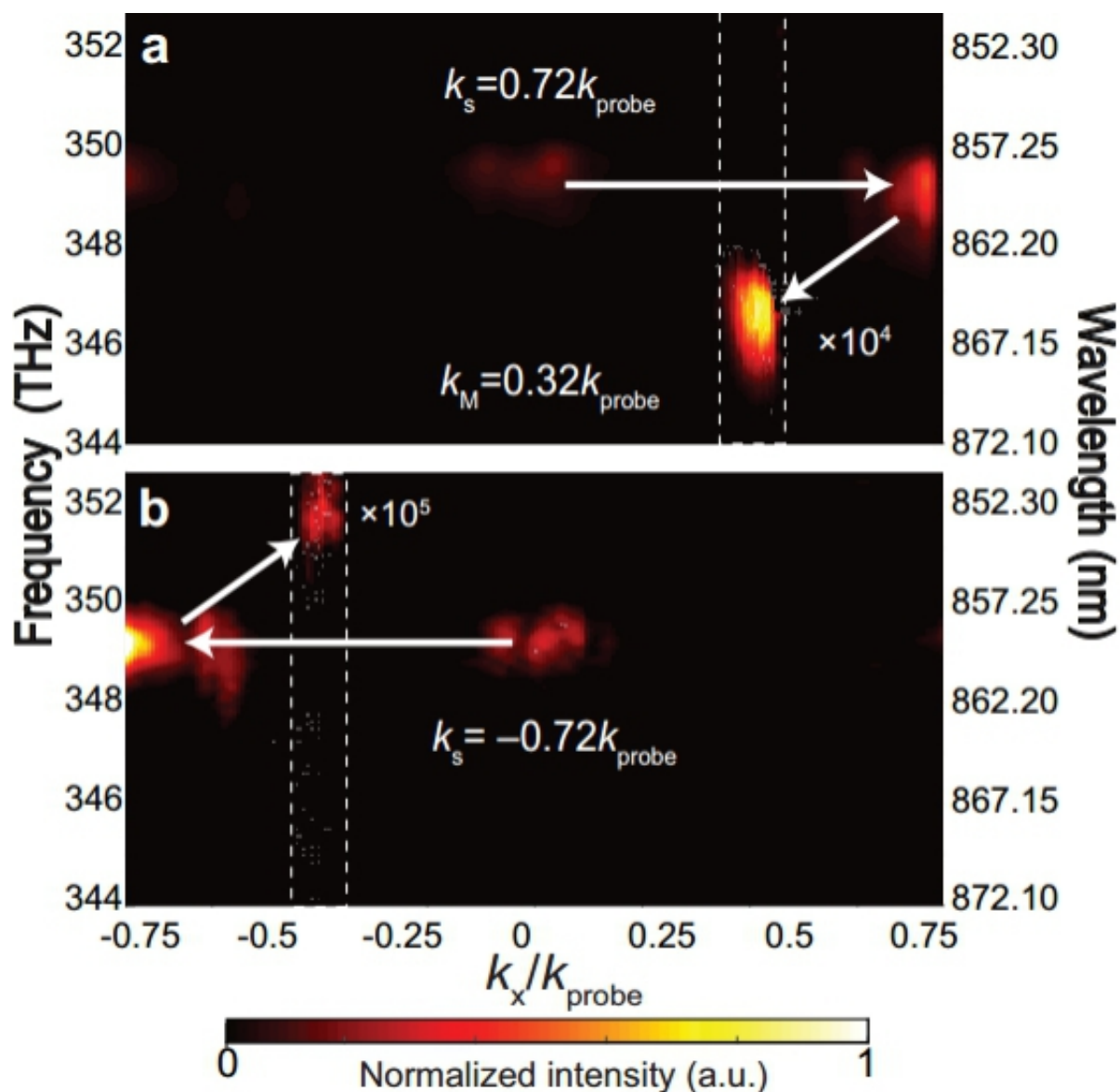


图5 光子跃迁的方向选择性实验。

(a)只有 $k_M = 0.32k_{\text{probe}}$ 和 $f = 2.8$ THz调制的超表面($k_s = 0.72k_{\text{probe}}$)才会发生向下的光子转换。转换后的信号被放大了倍，以便更好地显示。(b)相反，在具有 $k_s = -0.72k_{\text{probe}}$ 的超表面上进行相同的时间相位调制时，只会发生向上的光子转换。转换后的信号被放大了倍，以便更好地显示(放大的区域被白色方框包围)。

(来源：科学网 叶欣)

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-019-0225-z>

作者：Xingjie Ni 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