

---

# 有源非局域超表面的超快二向色性与双折射特性

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/30937.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！

有源非局域超表面的超快二向色性与双折射特性。 导读

光的偏振是一个关键的物理特性,大多数光与物质的相互作用是和偏振相关的。如果能在亚皮秒尺度上实现对光偏振的快速调制,将为光通信、量子计算、生物检测,化学等领域带来革命性变革。

为克服传统电光调制对速率的限制,全光偏振调制的方案得到广泛研究。实现全光偏振调制结构需要较好的灵活性、高紧凑性和高调制效率。这里全光偏振调制指的是在光上对其偏振状态进行调制,而不需要额外引入光电转换,从而提高调制速度。超表面以亚波长的尺寸为周期,以准二维形式排列纳米共振结构,通过光学共振实现高水平的场增强效果,从而达到更高的调制效率和更快的调制速率。此外纳米共振结构的设计也为偏振控制提供了更高的自由度。超表面的出现为全光偏振调制提供了途径,且在实现光子芯片集成方面有巨大潜力。

近十年来,通过高折射率半导体材料构造超表面实现全光调制的方案被广泛研究,超表面的高品质因子谐振有助于实现更高的场增强效果。与等离子材料相比,半导体材料具有更低的吸收损耗,此外,对于直接带隙半导体材料可以高效的产生光生载流子,从而产生各种光学非线性现象,有助于实现超快、高效的全光偏振调制。

近日,意大利米兰理工大学G. Della Valle团队利用超快泵浦探测光谱,在半导体超表面结构上实现了二向色性和双折射的调制效果。这种调制是通过全介质有源超表面产生的高品质因子非局域共振和半导体光生载流子中的三阶光学非线性结合而获得的。在二向色性实验中观察到了470%的微分反射,70  $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 的控制光速通量,在双折射实验中,元件之间的瞬态相移可达2  $\pi$ ,控制光束通量为180  $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 。同时G. Della Valle团队通过自由载流子动力学建模和电磁波仿真计算,解释了其背后的物理现象,确定带填充与结构的共振响应的协同作用是超表面可以产生出色的调制性能的原因。

该成果发表在《Light: Science Applications》上,题为Giant Ultrafast Dichroism and Birefringence with Active Nonlocal Metasurfaces,是Light米兰理工专刊邀请文章,G. Crotti为论文第一作者,G. Della Valle为论文通讯作者。

创新研究

1. 超快二向色性与双折射超表面结构与泵浦探测装置

作者团队提出使用AlGaAs纳米线构造超表面结构，并在700~800 nm的波长范围内测量了其在TE和TM偏振状态下的反射光谱图。超表面的各向异性会严重影响其光学响应，从而导致强烈的双折射行为。对于TM偏振，在750 nm的带隙下方(即758 nm处)发现了一个明显的共振峰。相反，TE反射率在略长一点的波长(约770 nm)处呈现出一个窄的非对称峰值，这可以被识别为准BIC状态。这些特性符合对光偏振的高效切换和合成的需求。同时作者使用偏振分辨超快泵浦探测光谱来表征瞬态二向色性和双折射特性。

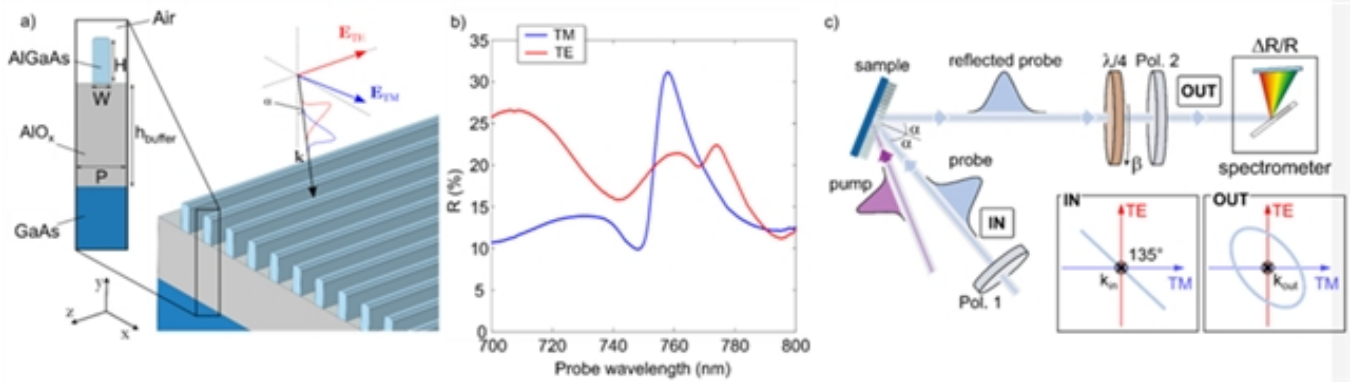


图1 (a) 静态反射测量和二色性实验的样品示意图；(b) 用TE偏振（红色）或TM偏振（蓝色）光照射时，超表面的静态反射图；(c) 偏振分辨泵测装置原理示意图。

## 2. 超快二向色性探测及物理机制

作者使用偏振分辨超快泵浦探测光谱探测的  $\Delta R/R$  来表征超表面样品的二向色性。图2a, c表明，光泵浦对样品的二向色性响应有显著的增强作用。其中光谱图也揭示了各向异性调制效果：一方面，在TM偏振情况下，在750 nm左右的窄波段观察到一个较大的信号( $\Delta R/R$ 高达470%，如图2g)；另一方面，TE反射率也会受到调制，但最大  $\Delta R/R$  仅为~70%，且具有复杂的宽带特征，在748 nm处(即TM反射率调制达到峰值)，此时的值约为-10%。这表明在750 nm波长处存在巨大的超快瞬态二色性。这些特点在时延曲线和光谱图中，更加明显。图2e显示了TM(实线)和TE(虚线)偏振在选定波长下的  $\Delta R/R$  时间动态图，结果表明调制峰值不是瞬时的，而是在相对于泵浦脉冲延迟2 ps到达。为了解释这些结果，作者采用了多步半经典建模方法，简要地描述光学非线性的物理过程。该模型的结果汇总在图2的底部，并与顶部中的相应测量结果进行比较，除了在TE的情况下  $\Delta R/R$  值略低，其他情况与实验结果一致。

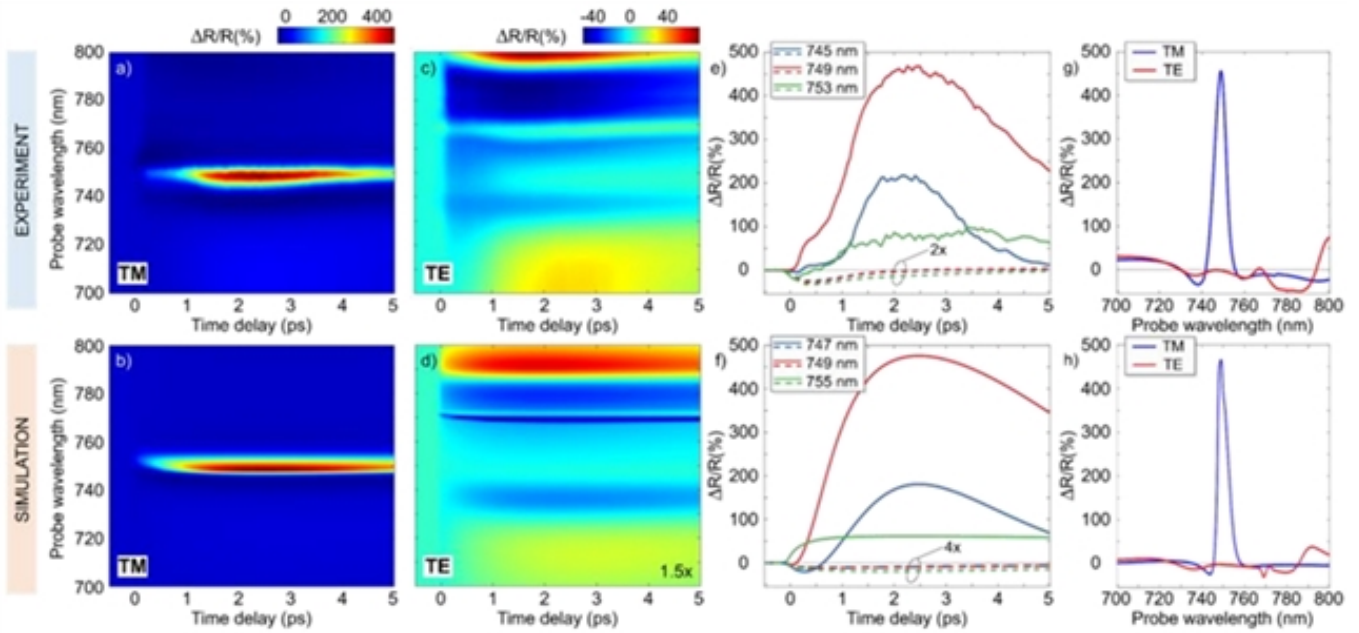


图2 (a-b) 实验(a)和模拟(b) TM差分反射率随时间延迟和探针波长的变化；(c-d) 实验(c)和模拟(d) TE差分反射率随时间延迟和探针波长的变化；(e-f) 不同探测波长下实验(e)和模拟(f) R/R的时间动态响应；(g-h). 实验(g)和模拟(h)在2 ps泵探头延迟下的 R/R谱。

此外，作者还使用该物理模型解释了TM偏振状态下较大 R/R信号的来源。图3a展示了静态下和泵浦后0.85 ps, 2 ps的TM反射光谱图。其结果表明 R/R信号在静态共振后经历了极速的蓝移，在0.85 ps后，其 R/R谱线中的峰值波长比静态反射率中的峰值波长蓝移~10 nm，与图1b的现象一致；此外，2ps后其峰值发生重塑，反射率明显增加。在图3b中，物理模型预测了 R/R信号的时间过程，与实验现象基本一致。为了揭示自由载流子和晶格温度对光学非线性的影响，作者还研究了泵浦-探测信号峰(即在泵浦2ps后)对介电常数变化的贡献，结果如图3c所示。因此其物理机制可以解释为带填充情况主导了瞬态光学响应的最相关特征。图3d显示了在静态，850 fs和2ps下，介电常数的虚部变化情况。正如实验中观察到的那样，介电常数的虚部在波长750 nm时有一个负号，这与损耗通道的降低现象是一致的。在738-750 nm的光谱窗口内(如图3d中深蓝色曲线所示)，在第一个ps内出现了介电常数的负值，并且随着延迟时间的增加而变宽(较浅的轨迹)：这清楚地表明了该区域光学增益的开始。换句话说，通过光激发产生的光生载流子注入引起了载流子的粒子数反转。当探测光到达时，就会发生受激辐射。因此，反射效率的有效增加可归因于这一现象以及在此光谱范围内存在的高质量因子TM共振的结合。

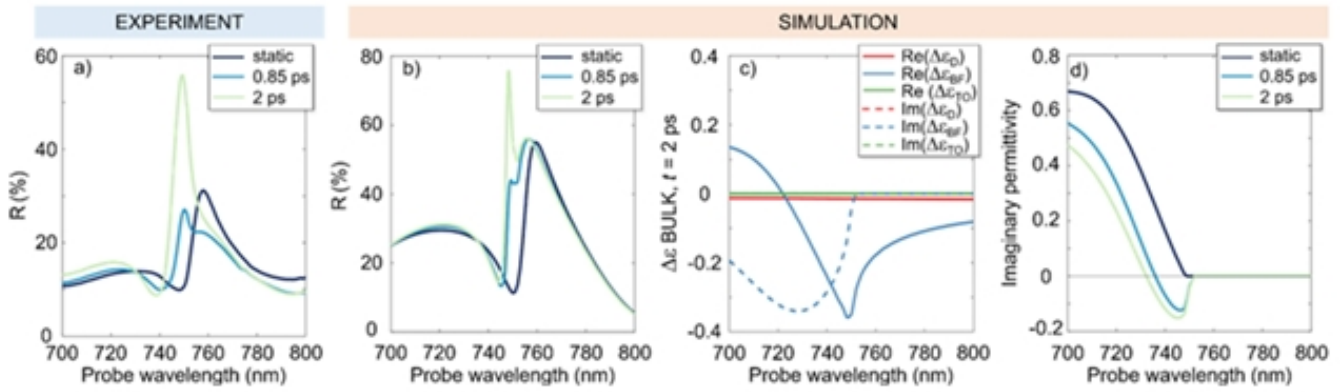


图3 (a) 展示了静态下和泵浦后0.85 ps, 2 ps的TM反射光谱图；(b) 图a的模拟仿真结果；(c) 当延迟2ps时，泵浦-探针信号峰对超表面介电常数变化的贡献；(d) 静态下和泵到达后，超表面介电常数虚部的变化。

### 3. 超快双折射特性探测及原理

在740 ~ 750 nm波长范围内，双折射也显示出了显著的特征，尽管起源和时间演化情况更为复杂，但是这些特征是由相同的物理机制引起的。具体来说，图4a比较了静态（ $\phi$ ，蓝色曲线）和非平衡态（ $\phi'$ ，红色曲线）响应在2 ps时的情况，而图4c则显示了变化量  $\Delta\phi = \phi' - \phi/2$  意味着，在泵浦之后，该超表面在TM和TE分量之间引入了额外的  $\pi/2$  相位差。也就是说，如果在静态条件下反射光束是线偏振，在摄动情况下，检测到的偏振是圆偏振状态的。这与在749 nm处发生的情况非常相似，如图4e所示。模拟仿真结果 (图4b、4d和4f) 与实验结果也吻合良好，但预测在742 nm处的相位下降更剧烈，这也标志着在该处TM偏振偏移的下降位置。

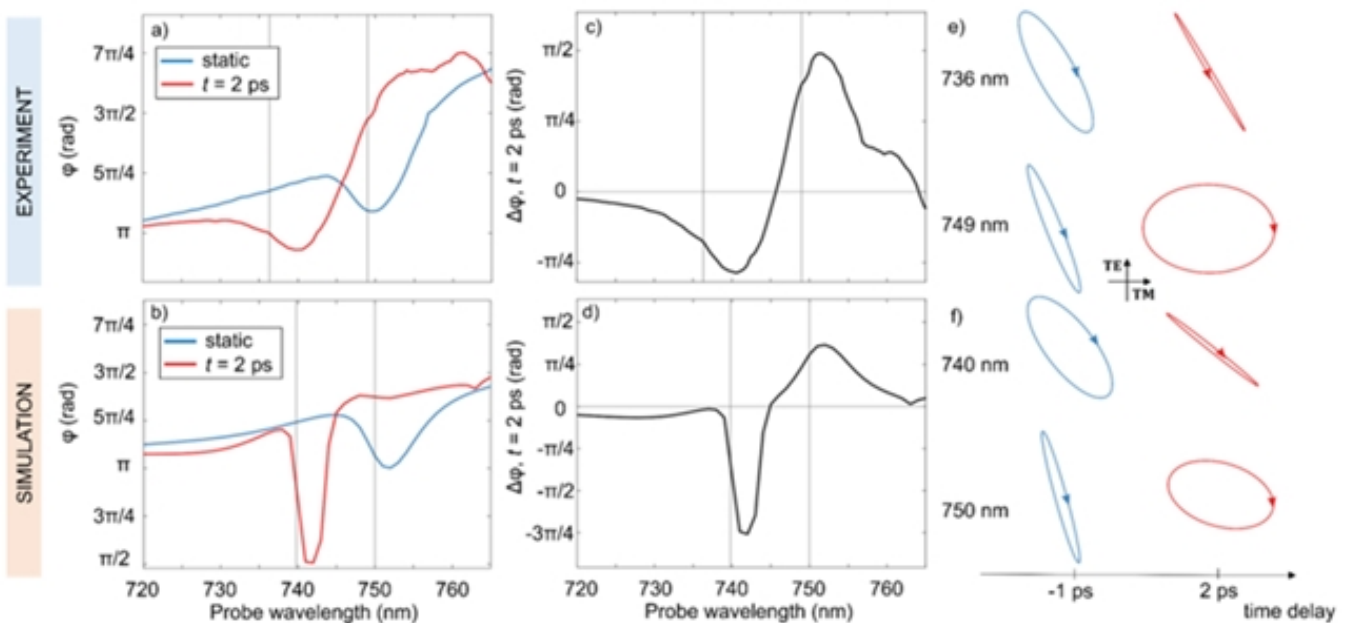


图4 (a-b) 图中显示了静态条件下的  $\phi$  (蓝色曲线) 和泵到达后 2 ps 的  $\phi'$  (红色曲线) 的实验数据和模拟结果；(c-d) 实验(c)和模拟(d)瞬态相变  $\Delta\phi = \phi' - \phi/2$ ；(e-f) 在静态 (-1

---

ps) 和扰动 (2 ps) 条件下, 从测量 (e) 和模拟 (f) 中获取的在选定波长下的反射波的偏振椭圆图。

## 总结与展望

G. Della Valle团队提出了一种全介电超表面, 能够非常有效地调制二向色性和双折射现象。正如物理模型所预测, 这些性能是通过调谐半导体带隙附近的扩展态共振来实现的, 这允许充分利用光生自由载流子带来的带填充效应。在泵浦吸收后, 在半导体带隙的蓝色边缘 (能量较高的一侧) 打开了一个狭窄的增益窗口, 有助于增强实现实验中的二向色性。同时, 超表面的双折射调制也产生于上述的物理机制。两个偏振分量之间的瞬态相变可以归因于光响应的自由载流子引起的蓝移。最后, 对我们的模型进行扩展, 不仅包括瞬态放大效应, 还包括超材料中的超快光产生, 这将为设计更广泛的有源元器件提供新的机会。(来源: LightScienceApplications微信公众号)

相关论文信息: <https://doi.org/10.1038/s41377-024-01545-8>

作者: G. Della Valle 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