

---

# 石墨烯可调电容超材料实现太赫兹波段100%幅度调制深度

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/36371.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！*

石墨烯可调电容超材料实现太赫兹波段100%幅度调制深度。 导读

近日，英国剑桥大学Wladislaw Michailow教授研究团队利用石墨烯基可调电容超材料，在太赫兹（THz）波段实现了100%振幅调制深度，创下该领域性能纪录。通过将石墨烯设计为纳米级可调电容而非传统电阻，结合背面激发反射技术，该调制器在1.68 THz和2.15 THz频点分别实现45.7 dB与40.1 dB的调制深度（相当于强度调制超过四个数量级），同时支持30 MHz的高重配速度。这一成果解决了传统太赫兹调制器因石墨烯有限导电性和电阻性阻尼导致的调制深度不足难题，为太赫兹通信、实时成像及光波计算提供了兼具高深度与高速的全固态电控器件解决方案。

该成果以Achieving 100% amplitude modulation depth in the terahertz range with graphene-based tuneable capacitance metamaterials为题发表在国际顶尖光学期刊《Light：Science Applications》。

## 研究背景

随着6G通信、实时成像和光学模拟计算等技术的快速发展，太赫兹（THz）波段的高效调制器需求日益迫切。调幅深度（即信号最大与最小强度的比值）是衡量调制器性能的核心指标之一，但传统方法在太赫兹波段面临两大难题：一是现有超材料调制器多依赖石墨烯作为可变电阻，但石墨烯的固有有限电导率限制了其完全关断能力，导致调幅深度难以突破10 dB，且石墨烯在狄拉克点的有限导电性进一步制约性能。二是高速调制（>10 MHz）常需牺牲深度，而离子液体门控等深度优化方案速度仅达千赫兹级别，无法满足实际应用需求。

太赫兹波段的幅度调制是高速通信与成像系统的核心需求，但现有技术面临多重挑战：传统电子调制器受限于高频损耗，光子调制器则依赖体积庞大的锁模激光器或低速离子凝胶。超材料虽可通过石墨烯实现电调谐，但其电阻性阻尼机制导致调制深度受限（通常<10 dB），且石墨烯在狄拉克点的有限导电性进一步制约性能。此外，现有方案难以兼顾高调制深度（>40 dB）与MHz级速度，严重阻碍了太赫兹技术的实用化。

剑桥团队提出两项革新性设计：纳米级可调电容超材料与背面激发反射架构。前者将石墨烯作为电容元件，通过空气间隙设计动态调控超材料谐振频率；后者利用基底侧入射的反射干涉效应，实现零反射点，从而突破调制深度极限。两项技术协同作用，团队成功研发出室温下调幅深度超99%（45.7 dB）、调制速度达30 MHz的固态太赫兹调制器，为超宽带高速高保真太赫兹系统提供了全新解决方案。

## 研究亮点

### 1、纳米级可调电容设计

传统超材料调制器通过石墨烯电阻性阻尼调节共振，导致效率受限。本研究将石墨烯设计为从金属电容板延伸的纳米级可调电容（图1），通过改变其导电状态，调控电容值并偏移谐振频率。当石墨烯导电性趋近零（绝缘态）或无穷大（导体态）时，电容值在空气间隙与金属间隙间切换，这种电容调谐机制可在更宽频段内实现高效调制，且避免电阻阻尼的固有损耗。

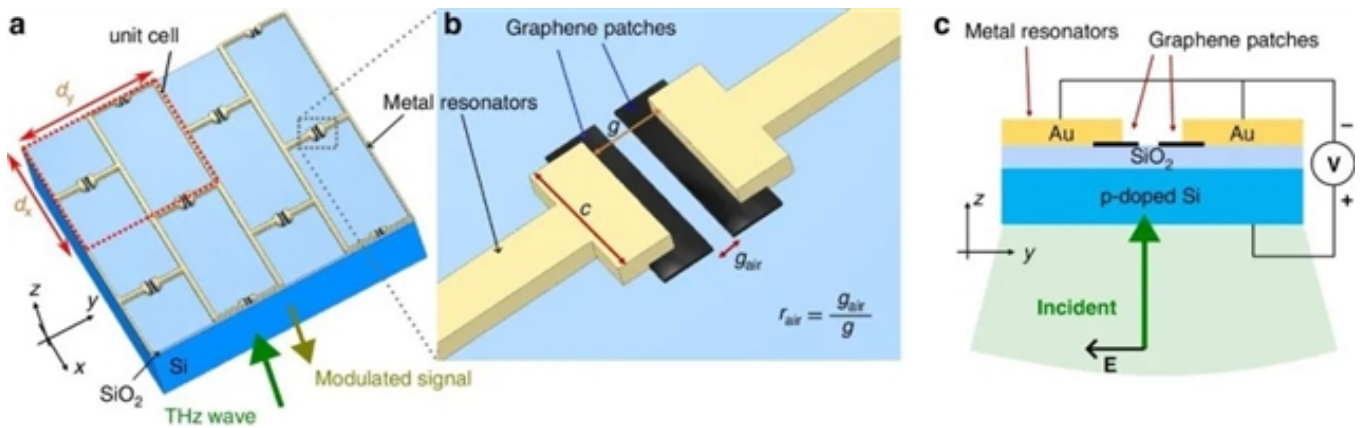


图1. 可调电容超材料结构示意图

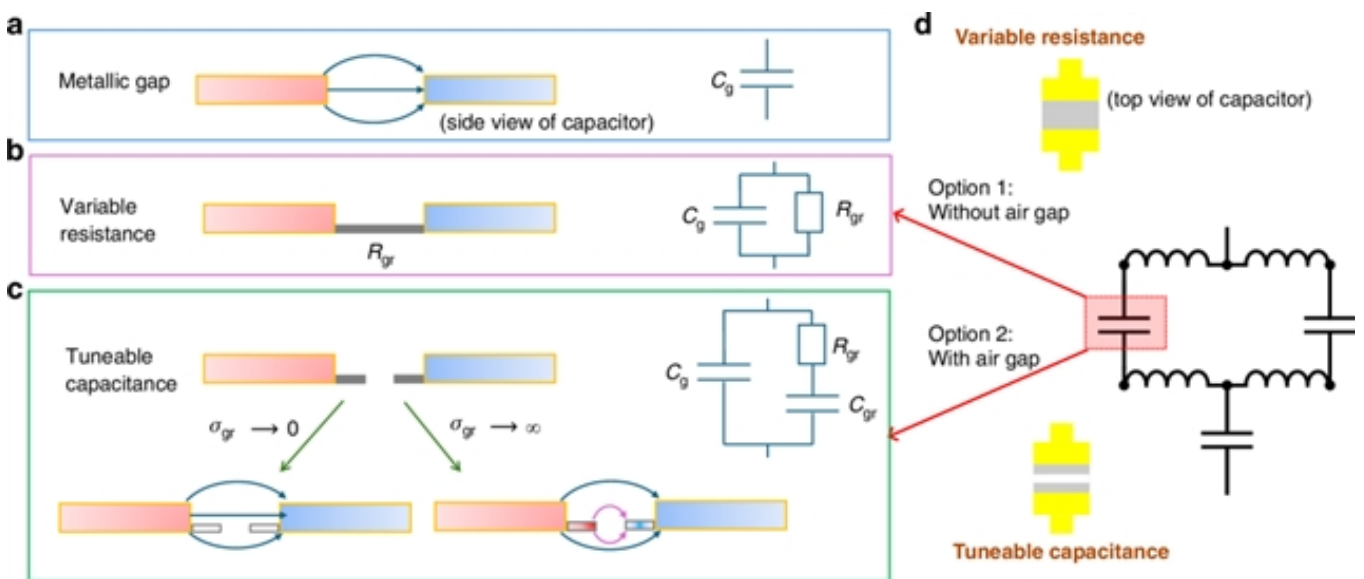


图2. 可调电容超材料天线阵列等效电路图

### 2、背面激发反射技术

通过从基底侧入射太赫兹波，利用基底-空气界面的菲涅尔反射与超材料反射波的相消干涉，使最小反射振幅A<sub>Min</sub>降为零。结合可调电容的谐振频率偏移，系统在特定导电状态下实现100%振幅调制深度，远超传统正面入射方案。

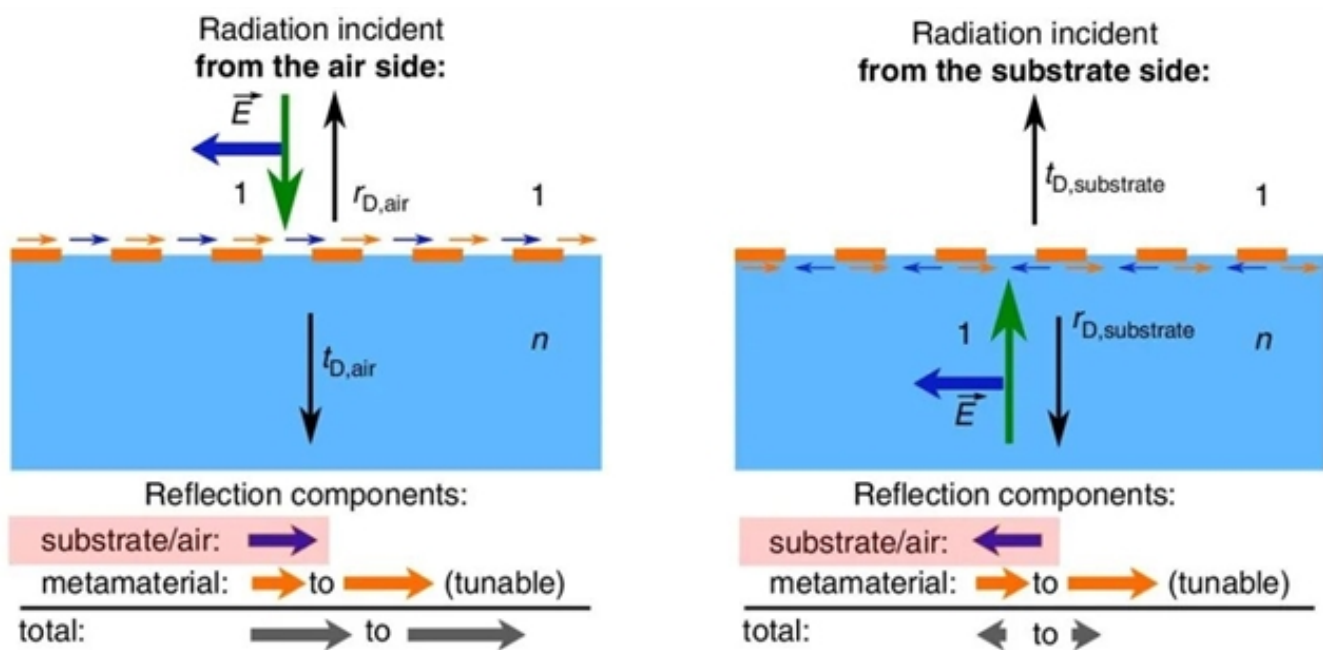


图3. 背面激发反射原理

### 3、高调制深度与多频段操作

实验测得调制器在1.68 THz和2.15 THz频点的调制深度分别达45.7 dB与40.1 dB，且通过调整空气间隙比例，可灵活扩展工作频段。此外，器件在30 MHz驱动频率下仍保持高效调制，速度较离子凝胶方案提升三个数量级。

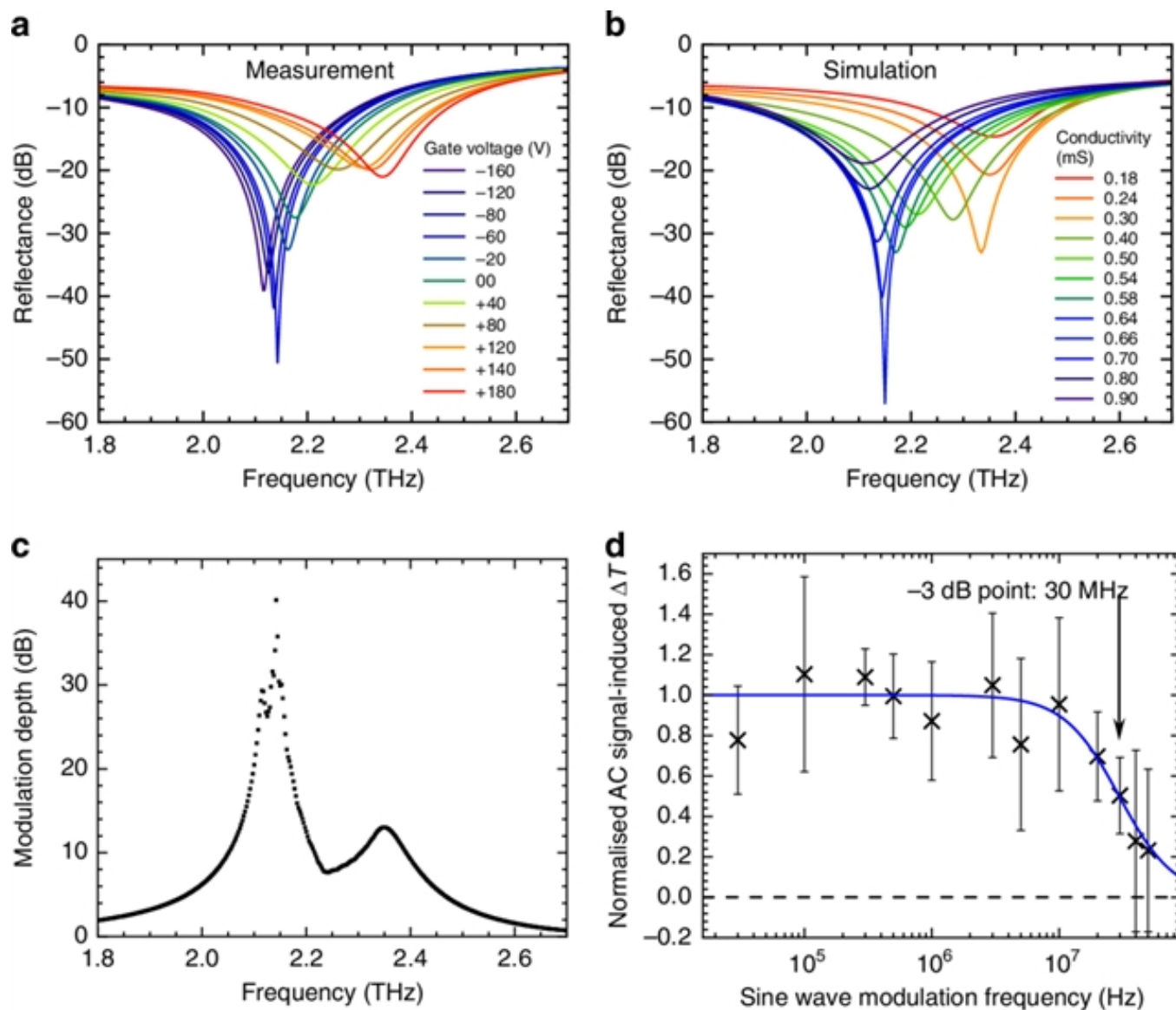


图4. 调制深度实验结果与仿真结果对比

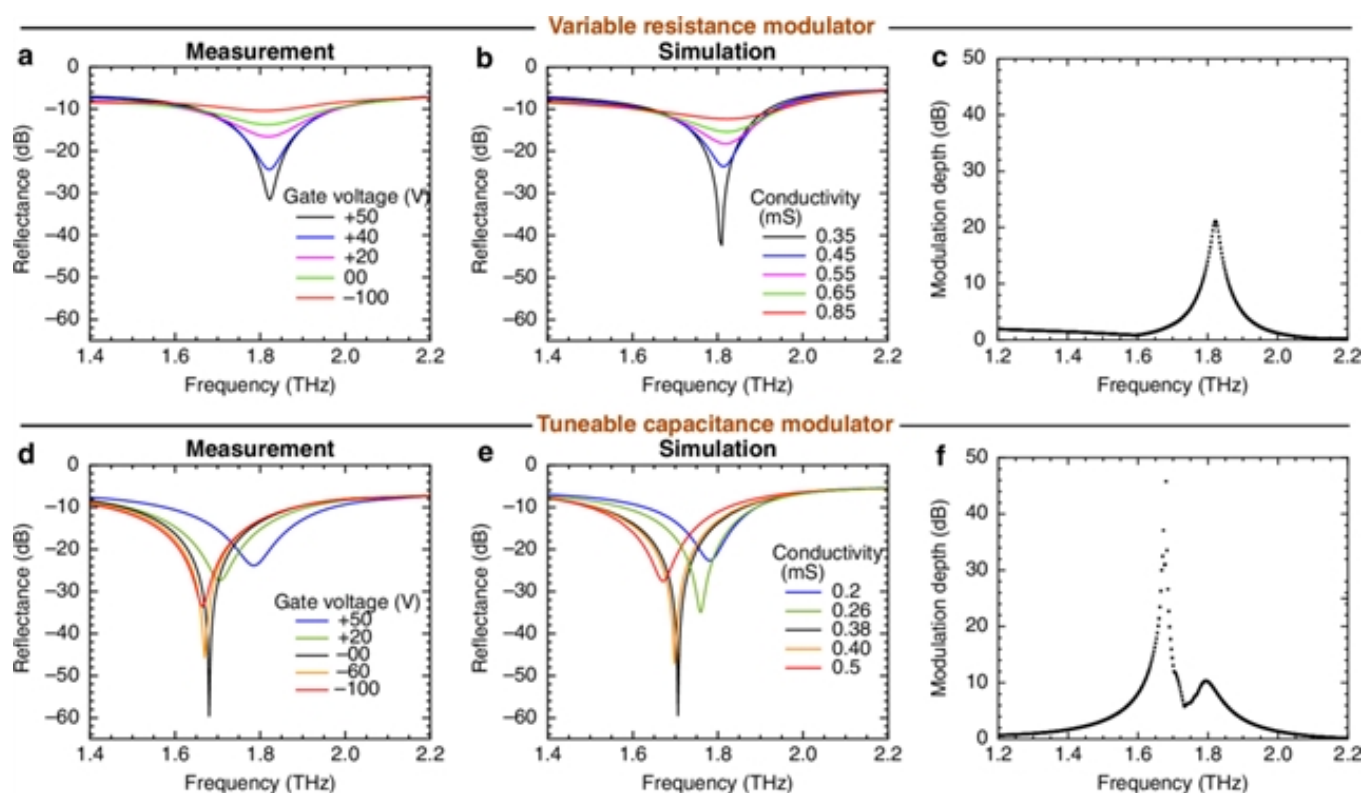


图5. 可变电阻与可调电容方案的实验结果对比

## 总结与展望

此项研究不仅验证了石墨烯可调电容超材料在太赫兹调制中的颠覆性潜力，更通过高集成度架构解决了传统方案深度-速度不可兼得的困局。未来，通过缩小器件尺寸（目标 $140\ \mu\text{m} \times 140\ \mu\text{m}$ ）与优化介电层厚度，调制速度有望突破GHz级，工作电压亦可进一步降低至10 V以下。该技术有望推动太赫兹量子级联激光器（QCL）功率调控、自由电子激光脉冲整形及高分辨率雷达成像等应用，并为6G通信中的超宽带信号处理提供核心器件。（来源：LightScienceApplications 微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-01945-4>

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等事宜，请与我们联系。

作者：Wladislaw Michailow 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](http://iikx.com)转发