电压驱动的超薄碳纳米管太赫兹透镜：从6G通信到生物医学

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/41367.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！

电压驱动的超薄碳纳米管太赫兹透镜：从6G通信到生物医学。 导读

太赫兹波在6G通信、生物医学和成像等领域前景广阔，但可用光学元件匮乏且大多为静态固定参数，动态调控能力的缺失已成为制约该领域发展的核心瓶颈。

近日，莫斯科高等研究中心的Arina V. Radivon、Maria G. Burdanova等人在 Light: Advanced Manufacturing 上发表题为Gate-tunable fresnel zone plate based on single-walled carbon nanotubes for terahertz applications的文章，实现了可电调的单壁碳纳米管太赫兹菲涅耳波带片，通过离子液体电化学栅控实现焦点强度的动态调节。这一突破有望推动太赫兹技术从实验室走向实际应用——在医学领域可精确调控辐射剂量以安全研究活体组织，在通信领域可优化信号强度以支撑更快速的数据传输。

一、器件设计与电化学门控机制

本研究的核心创新在于将离子液体电化学门控技术与菲涅耳波带片结构深度融合。研究团队设计了直径28.6 mm、包含5个同心环的菲涅耳波带片，以仅40 nm厚的单壁碳纳米管薄膜作为不透明区域阻挡太赫兹波。该薄膜被封装在两片石英基底之间，中间填充离子液体，构成完整的电化学门控单元。施加±2 V偏置电压时，离子液体在碳纳米管表面形成双电层，通过静电掺杂改变费米能级位置，使薄膜的有效折射率产生近两倍变化，为聚焦强度的动态调节提供了物理基础。

在制备工艺上，团队采用气溶胶化学气相沉积法生长碳纳米管，通过激光刻蚀不锈钢模板结合干法转印实现图案化，全程无需洁净室光刻，具有显著的成本优势和规模化生产潜力，为该类器件的实用化奠定了工艺基础。

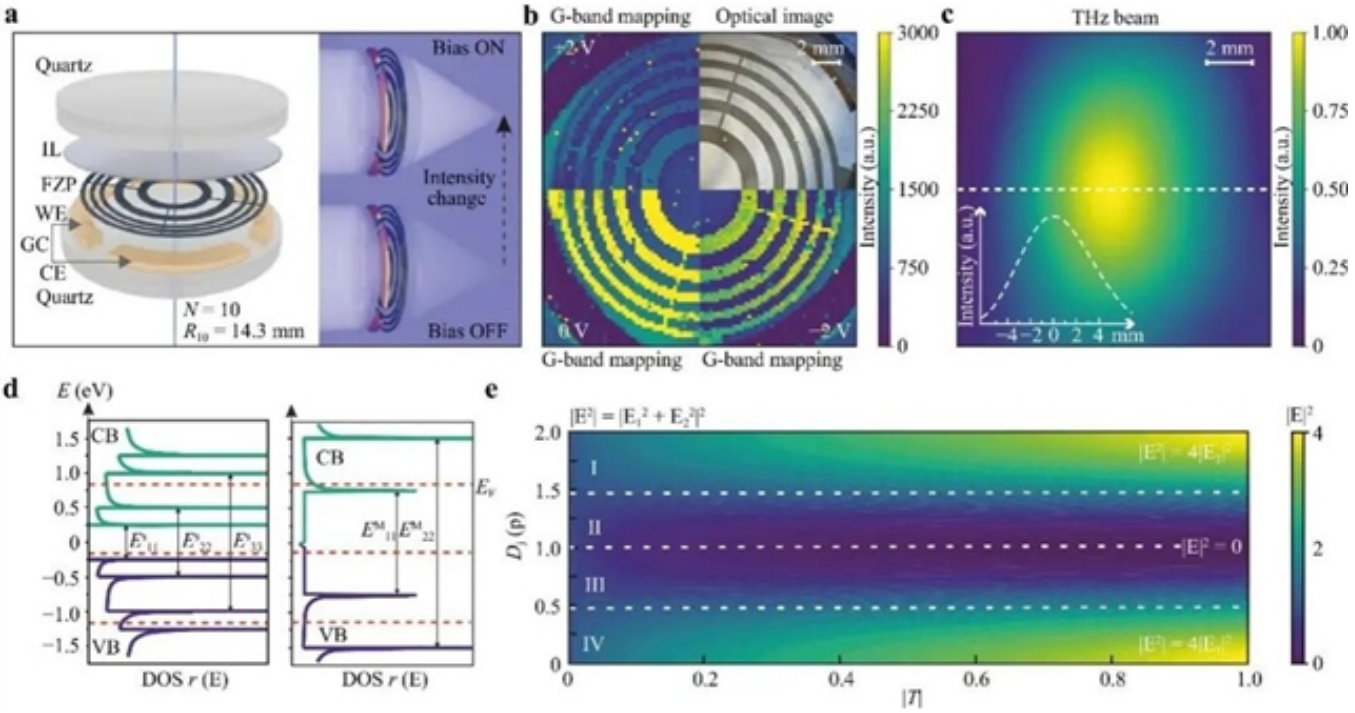


图1：太赫兹菲涅耳波带片结构与特性

二、电压调控下的光谱响应与电磁屏蔽性能

研究团队通过太赫兹时域光谱系统对门控下的碳纳米管薄膜进行了光谱分析。实验显示，薄膜折射率随电压变化呈现明显的滞后环特征，与循环伏安测试行为一致。由于薄膜在空气中已存在本征p型掺杂（费米能级偏移约0.1 eV），折射率最小值出现在+0.5至+1 V区间而非0 V。无论正向或负向偏压，费米能级偏离中性点均会增加自由载流子密度，增强太赫兹吸收。

在电磁屏蔽性能方面，薄膜在1 THz下的屏蔽效能随电压可在2至8 dB之间调控。在－2 V偏置下，绝对屏蔽效能达到约10? dB · cm ^{2} · g? ^{1}，较石墨烯-聚合物复合材料高出约三个数量级，充分体现了单壁碳纳米管在轻质高效电磁屏蔽方面的优势。

爱科学
iikx.com

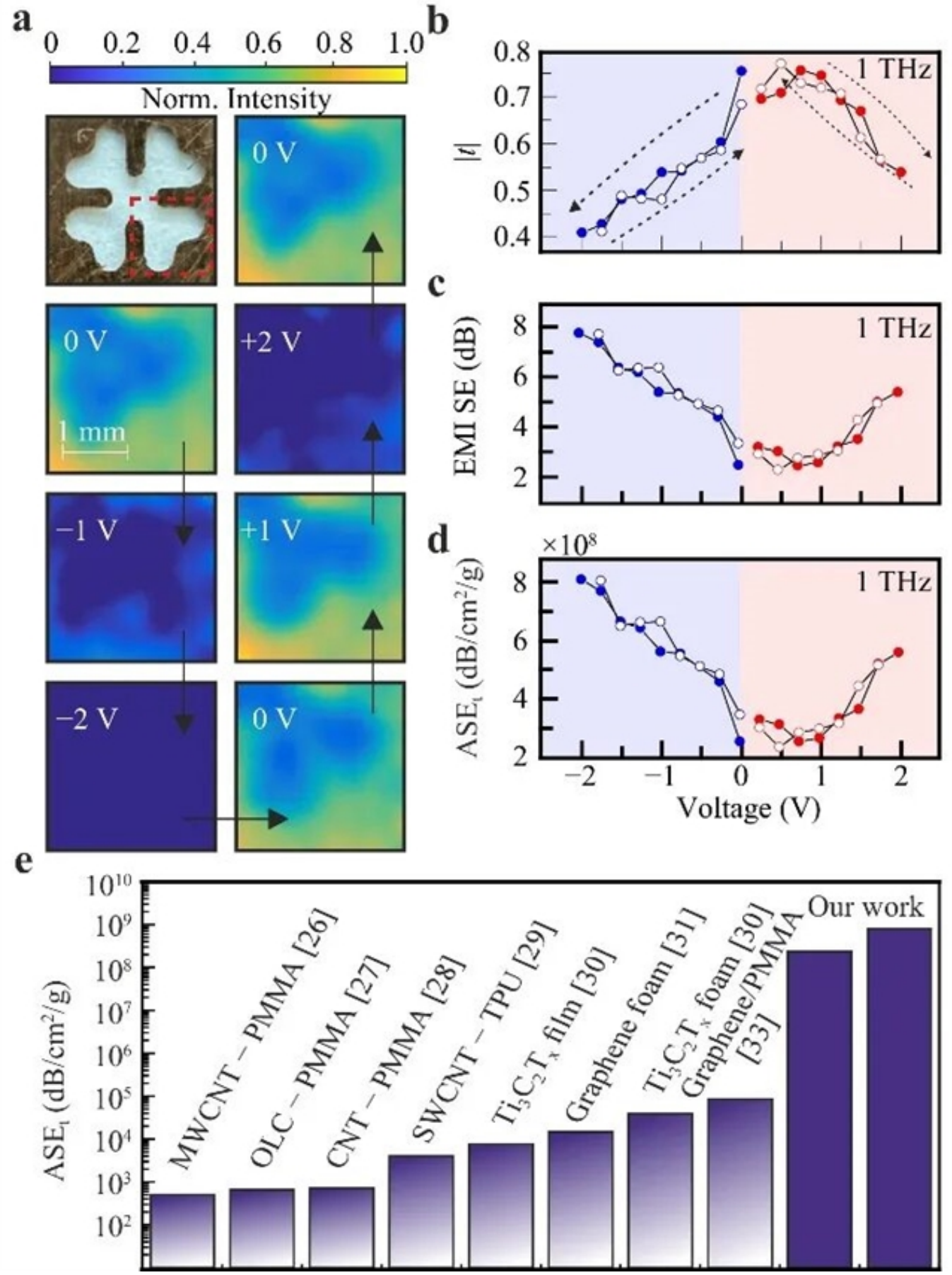

a
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
Norm. Intensity
0 V
0 V
+2 V
1 mm
−1 V
+1 V
−2 V
0 V
b
|t|
1 THz
c
EMI SE (dB)
1 THz
d
ASE$_t$ (dB/cm^2/g)
×10^8
1 THz
Voltage (V)
e
ASE$_t$ (dB/cm^2/g)
MWCNT – PMMA [26]
OLC – PMMA [27]
CNT – PMMA [28]
SWCNT – TPU [29]
Ti$_3$C$_2$T$_x$ film [30]
Graphene foam [31]
Ti$_3$C$_2$T$_x$ foam [30]
Graphene/PMMA [33]
Our work

图2：碳纳米薄膜的THz光学特性

三、聚焦性能与动态强度调控

在327 GHz工作频率下，该器件焦距为2 cm，实验焦点位置与模拟高度吻合，横向分辨率达到1.14倍波长的衍射极限水平。同一透镜在更高频率下同样适用：1 THz时焦距延伸至6.2 cm，2 THz时为13 cm，3 THz时为19.5 cm。

在电压调控实验中，门极电压从－2 V变化至+2 V时，焦点强度呈现－20%至+15%的连续可调范围，而焦点位置与光斑尺寸基本不变，表明器件能在维持光学稳定性的同时实现能量的精确调控。

器件的上升与下降响应时间均为3.6 s（调制频率约0.28 Hz），响应较慢的原因在于离子液体中离子传输受限的双电层形成过程，但器件在连续电压循环中表现出良好的稳定性。

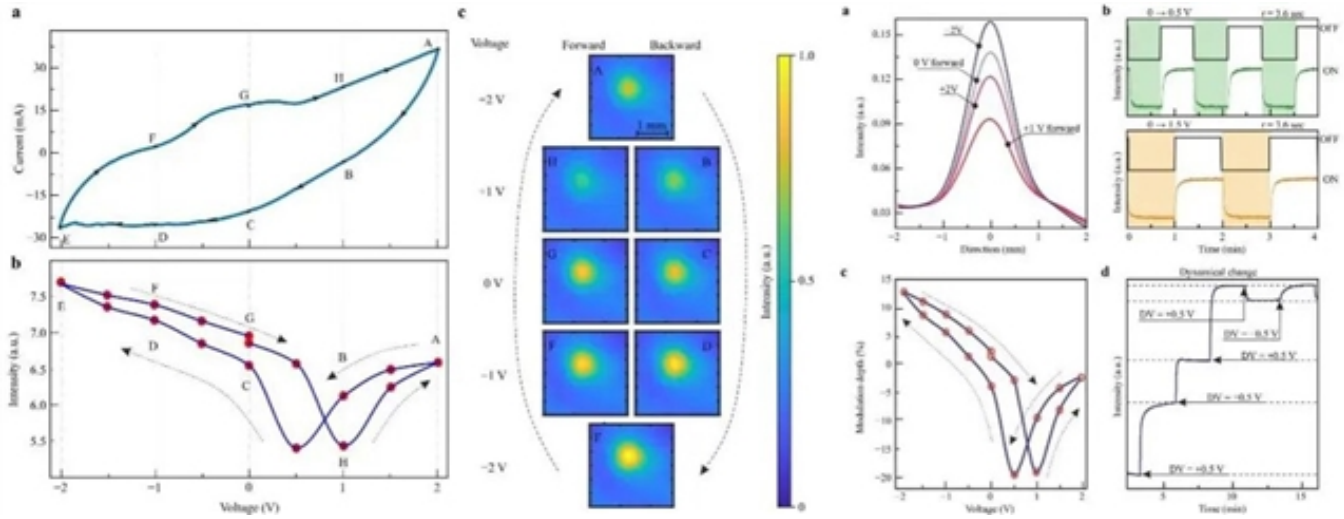


图3：电化学菲涅尔波带片的聚焦性能与门控特性

四、总结与展望

本研究首次将电化学门控技术与单壁碳纳米管菲涅耳波带片成功集成，实现了兼具衍射极限聚焦与±2 V低压驱动下－20%至+15%强度调制的超薄太赫兹透镜。尽管当前响应速度受限于离子传输过程，但通过引入固态门控策略、优化离子液体材料或增加薄膜厚度，有望显著提升调制速度与深度。

论文还示意了一种应用方案：将可调波带片与光子晶体波导及电化学稳定器串联构成双调制架构，通过两组独立电压协同控制太赫兹辐射的空间分布与强度。未来，若进一步引入局部门控电极，还可实现多焦点切换和波前调控等高级功能，推动太赫兹技术在计算成像、动态全息、生物精准辐照等领域的应用。总体而言，这种动态可调的太赫兹透镜有望突破该领域从实验室走向实用化的关键瓶颈——在医学中实现安全可控的活体组织辐照，在6G通信中实现自适应信号优化。（来源：先进制造微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.37188/lam.2026.004

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，请与我们接洽。
作者：Arina V. Radivon 来源：《光：先进制造》

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转发