
太赫兹发射谱：二维材料物理的新视角

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/29086.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！

太赫兹发射谱：二维材料物理的新视角。在过去的几十年里，太赫兹发射光谱（terahertz emission spectroscopy, TES）已成为一种高效且通用的技术，用于研究各种材料的光电特性和非线性物理过程。与此同时，由于二维材料的原子薄结构、卓越的机械和光电性能以及在柔性电子、传感和纳米电子学中的应用潜力，二维材料的研究方兴未艾。原则上，使用 TES 研究二维材料、界面和异质结构，可以有效揭示有关光子、电荷、声子和自旋之间相互作用的丰富信息，而二维材料 TES 的前沿进展也为太赫兹发射技术的增益、调制和实用化提供了新的灵感。

近期，清华大学王琛副教授、周济院士、李正操教授、鲍迪助理研究员及团队以 Emerging probing perspective of two-dimensional materials physics: terahertz emission spectroscopy 为题在 Light：Science Applications 发表综述论文，全面回顾了二维材料和异质结中太赫兹发射的非线性过程，包括光学整流、光拖曳、高阶谐波产生和自旋电荷转换等，讨论了基于太赫兹发射的典型应用，分析强调了自旋太赫兹发射器的独特优势，并且在太赫兹产生技术的未来发展及其延伸出的新兴研究、应用领域方面进行了总结与展望。

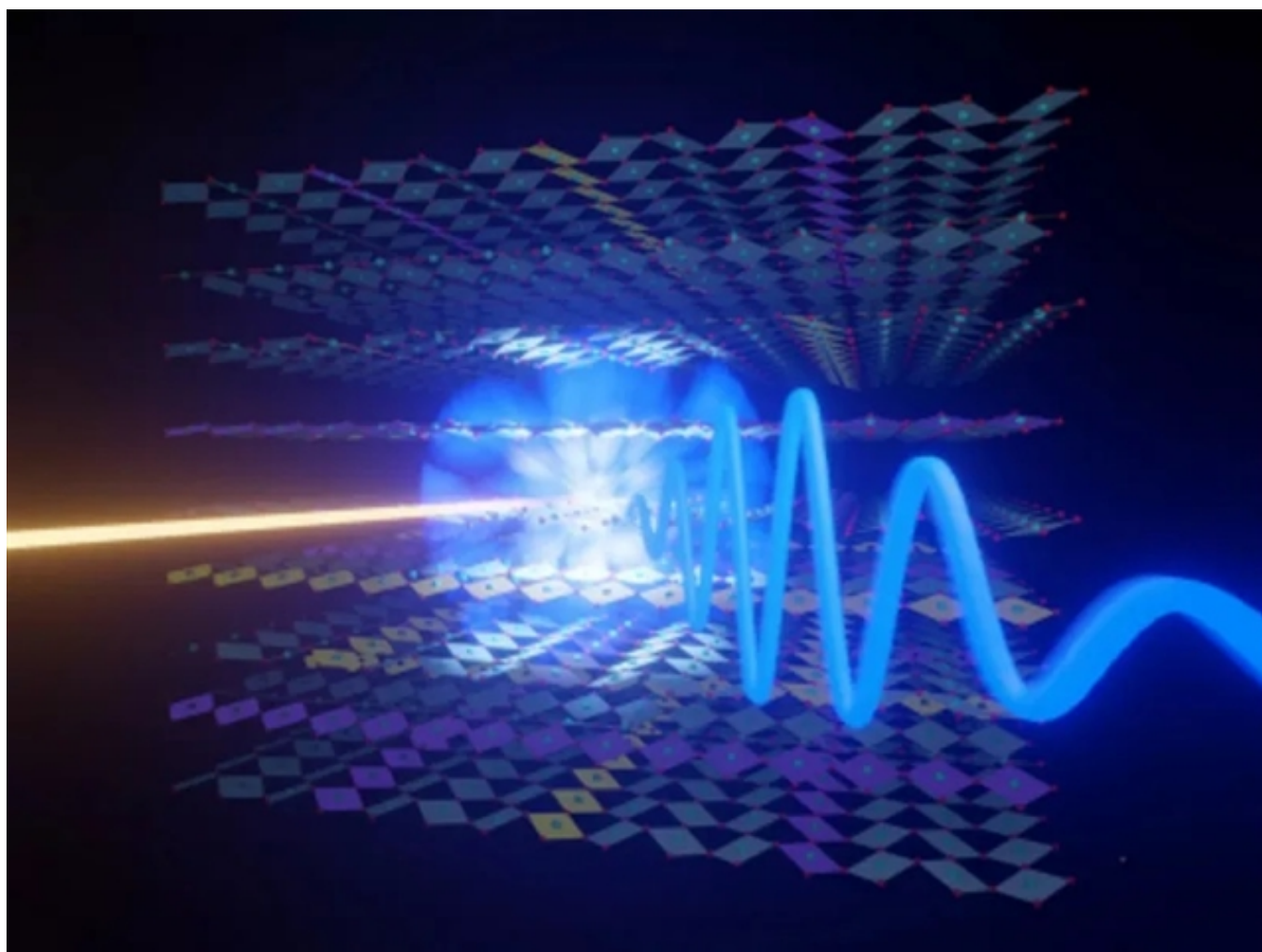


图1. (封面图) 艺术效果图：太赫兹发射光谱在研究二维材料物理中的应用。图源：Spectroscopy Europe/World

一、太赫兹谱及其探测技术概述

在电磁频谱中，0.1 THz到10 THz的频率介于微波和远红外辐射之间，在此范围内的辐射产生和探测通常具有挑战。然而，正是这一特殊的频段，为材料科学研究提供了新的视角。在材料科学领域，太赫兹光谱独特的频率范围使其非常适合用于表征材料的不同物理性质，如复介电常数、折射率、电导率，研究新兴材料中的带内电传输和低能激发等。其无接触特性消除了对电接触的需要，并最大限度地减少了材料污染或改性，具有长远的应用前景。简言之，太赫兹技术因其在生物医学成像、安全检查、无线通信、材料科学以及化学和药物检测等领域的潜在应用而显得尤为重要，是新兴材料、异质结构、光电器件等性能提升的关键基础技术。太赫兹波段的独特性能能够揭示材料内部电子结构和动态过程，促进新材料的开发，同时其高数据传输速率的潜力预示着它在未来通信技术中的关键作用。毫无疑问，随着研究的深入，太赫兹技术预计将对社会发展产生深远影响。

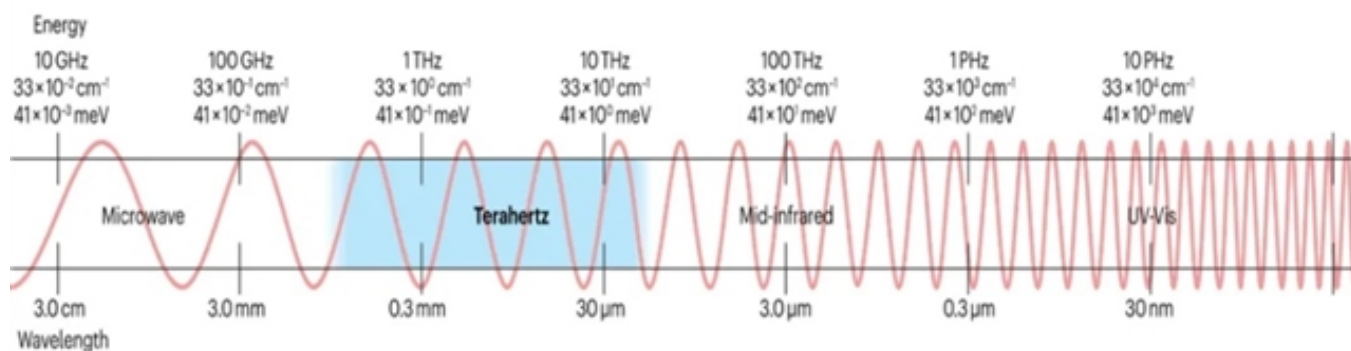


图2. 太赫兹光谱波长与能量范围示意图。图源：Nature Reviews Chemistry

基于太赫兹光谱研究二维材料的结构和光电特性的实验装置。通常包括用于生成太赫兹波的飞秒激光器和用于电光采样的检测器。在此基础上已经发展出了多种太赫兹光谱探测体系，例如：太赫兹时域光谱（THz-TDS），测量材料传输或反射的太赫兹脉冲的时间分布；太赫兹频域光谱（THz-FDS），采用连续波THz技术，提供精确的频率控制和更高的动态范围，用于需要频率扫描和更高光谱分辨率以进行锐激励探测的测量；时间分辨太赫兹光谱（TRTS）技术，通过结合光泵浦路径从而能够研究超快载流子动力学，以亚皮秒分辨率测量光学性质的变化。此外，将太赫兹光谱与扫描隧道显微镜（STM）或扫描近场光学显微镜（s-SNOM）等表征技术相结合，可以实现更全面的材料表征。

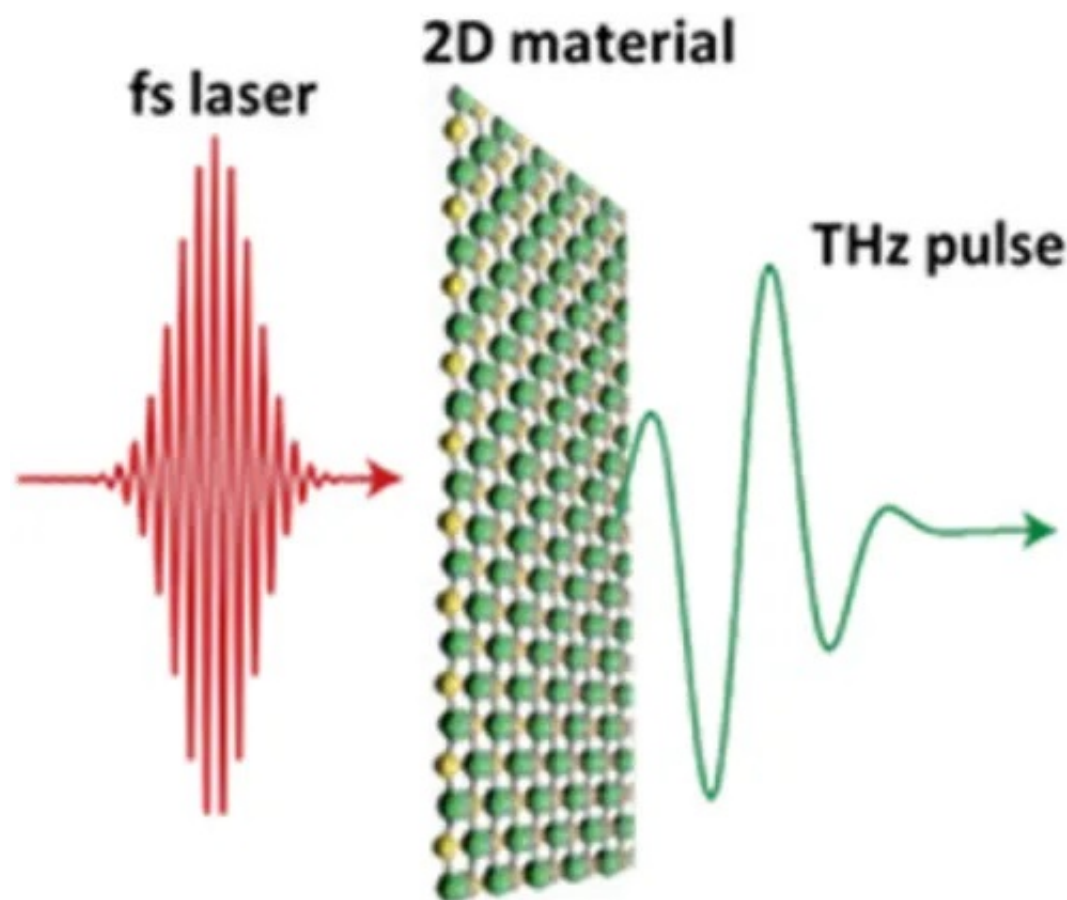


图3. 单层MoS2的太赫兹发射。图源：Nano Express

二、中心对称材料的太赫兹发射

基于二阶非线性效应的太赫兹发射通常来自非中心对称晶体中，但如果倾斜入射光的入射角，石墨烯等具有中心对称结构的材料也会产生太赫兹发射，这被归因于光拖曳效应（photon-drag effect）：在非热电子和空穴数量的不对称分布下，斜入射的飞秒光泵浦脉冲的有限面内光子动量转移到电子空穴对，导致价带和导带之间产生非垂直跃迁，进而产生非零位移电流偶极子和太赫兹发射。和水平生长的多层石墨烯相比，垂直生长石墨烯的太赫兹发射具有更高的效率。此外，Bi₂Se₃和SnSe₂等层状硒化物中的太赫兹发射展现了幅度和相位的可调制性。最近，PtSe₂作为一种具有中心对称晶体结构的二维材料实现了发射效率的突破，其THz发射的偏振依赖性为编码传输应用创造了可能。

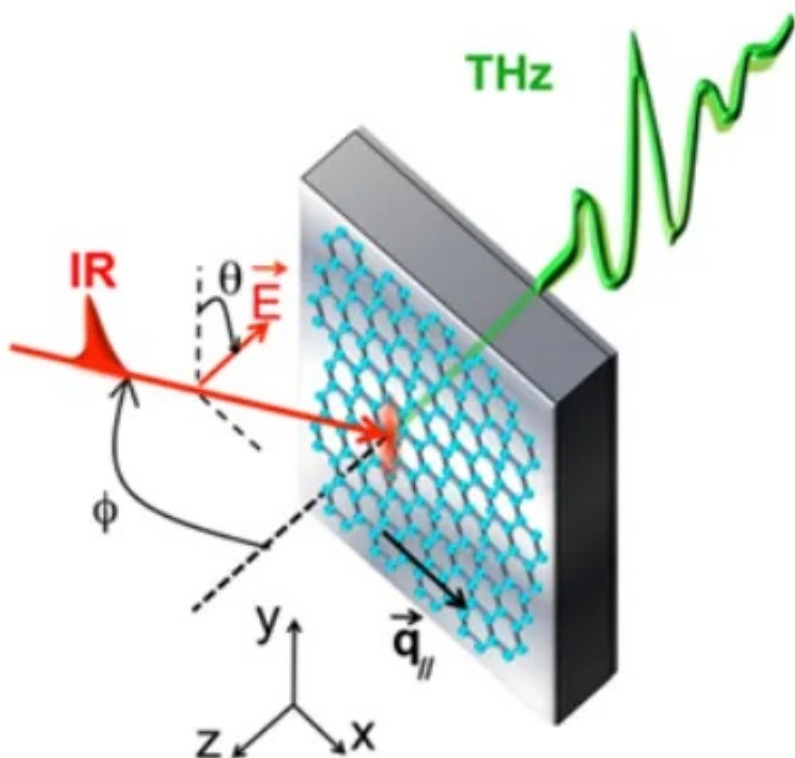


图4. 石墨烯的光子拖拽诱导太赫兹发射。图源：Nano letter

三、非中心对称二维材料与异质结构的太赫兹发射

原子层TMD材料，例如WS₂、WSe₂、MoS₂和MoSe₂表现出非中心对称晶格结构，可以在飞秒激光激发下产生太赫兹辐射。块状材料和单层材料的太赫兹发射机制可能不同。对单层非中心对称材料而言，光学整流是太赫兹发射的主要机制：在泵浦激发下，正负电荷中心的移动导致电荷密度的变化，从而导致极化密度的变化。原子的位移发生在键长水平，随着该过程在飞秒时间尺度上展开，激发的电磁波的频率落在太赫兹范围内。而在一些块状TMD材料中，表面场感生光电流或耗尽场效应占主要地位。

二维材料具有易于与传统光电材料、系统和器件集成的优点，可在太赫兹领域带来新颖的现象和应用。多种二维材料-硅基以及二维材料之间的异质结都可用于高效的太赫兹发射。例如，石墨烯/硅肖特基结（GSSJ）是栅极电压下高效的太赫兹界面发射结构；WSe₂/Si异质结与单一二维材

料相比可实现THz辐射的显著增强。hBN/WS₂，ReSe₂/MoS₂等异质结构也被用于光载流子动力学等研究。此外，钙钛矿异质结构制成的THz发射器件具有高调制效率、快速响应时间、成本效益、易于集成和稳定性。

总之，异质结构太赫兹发射的研究揭示了它们在产生和控制太赫兹辐射方面的巨大潜力。这些材料通过光学整流、界面偶极子形成、位移电流或注入电流展示了高效的太赫兹发射，并在栅极电压、调制深度和移位电流的控制下实现辐射场的调谐和增强。

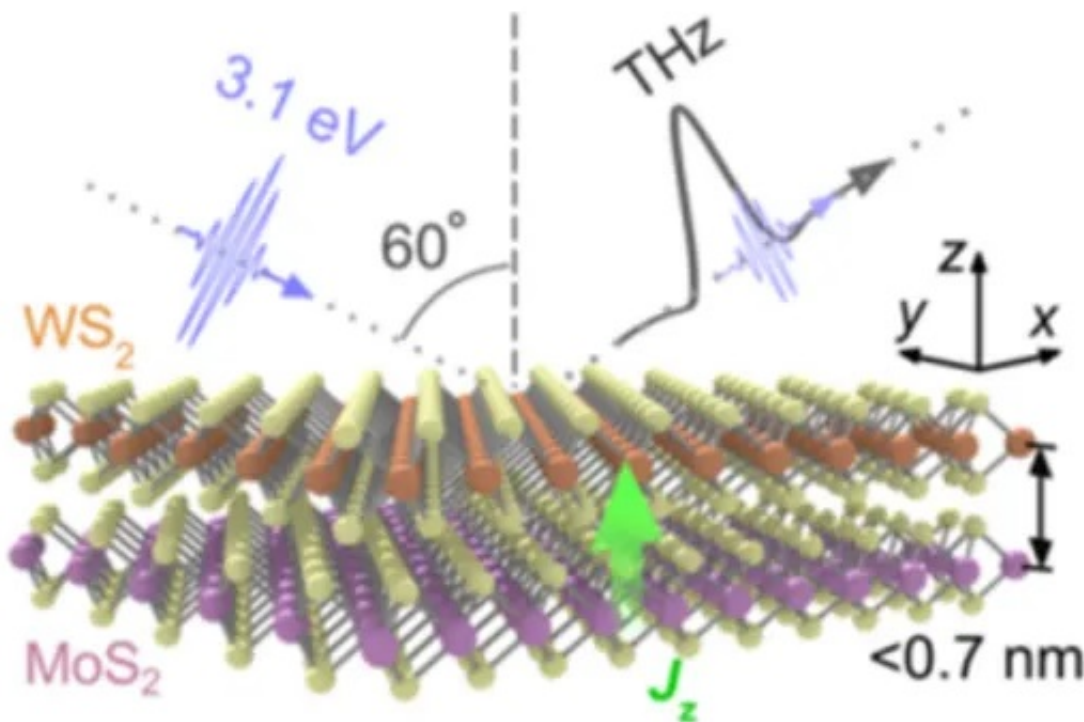


图5. 基于光学触发界面电流的WS₂/MoS₂异质结中的太赫兹发射。图源：Science Advances

四、太赫兹高次谐波生成与基于自旋-电荷转换的太赫兹发射

与光整流和光拖效应引起的典型太赫兹发射不同，太赫兹高阶谐波产生（HHG）反映了石墨烯、TMD、狄拉克半金属和拓扑绝缘体等材料中二阶以上的非线性过程。例如，当受到太赫兹入射波激发时，由于石墨烯中的自由本底狄拉克电子具有非线性带内太赫兹电导率，泵浦波被调谐吸收并产生光-物质能量转移，进而激发电流并导致倍频发射。谐波发射的能量转换效率可以通过本底载流子电调控得到提升。类似地，Cd₃As₂等其他狄拉克半金属也具有HHG。此外，作为狄拉克材料的一种，Bi₂Te₃，Bi₂Se₃等拓扑绝缘体表现出独特的HHG特性，如可调谐非整数谐波和极高的转换效率。

与需要通过非中心对称晶格结构或几何不对称光激发的机制不同，自旋-电荷转换是铁磁（FM）/非磁性（NM）异质结构中的太赫兹发射途径。本质上，这种自旋到电荷的转换过程是由于界面处自旋和电荷自由度之间的角动量转移而发生的，其中界面处的自旋轨道耦合起着至关重要的作用。

用。这一效应可在FM/NM金属，FM/TMD，FM/TI等不同组成的异质结中产生，随着组成材料的不断优化，自旋太赫兹发射器已经在激发效率和可调制性方面独具优势。

五、应用前景与技术展望

文章最后拓展了其他产生太赫兹辐射的中重要原理和结构，并重点展望了太赫兹技术在超快成像、生物传感和通讯传输领域的应用前景，并总结了TES未来的主要挑战和发展方向—高空间分辨率、宽带光谱覆盖、高信噪比、高效率和可集成性。在实现这些目标的过程中，探索包括二维材料在内的新兴材料、异质结构和集成方法也将推动太赫兹光谱系统更广泛的发展。

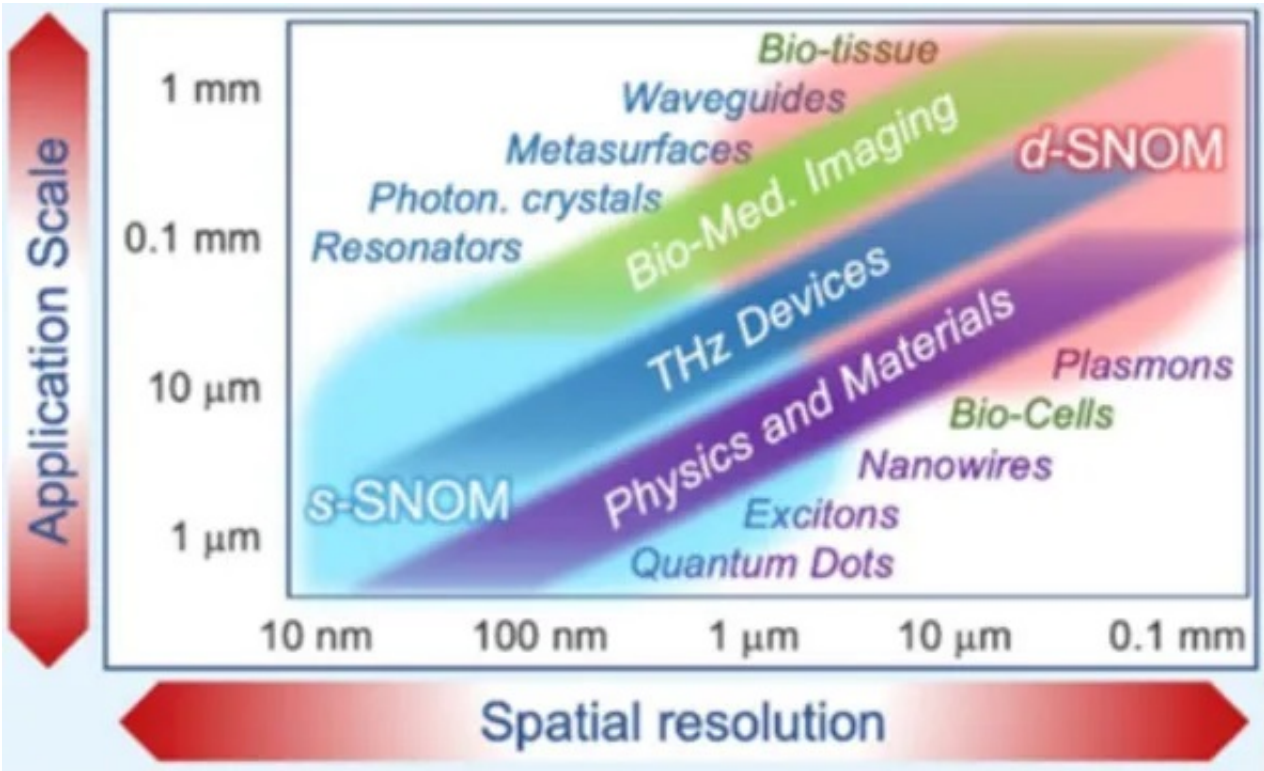


图6. 太赫兹近场成像和光谱应用和未来发展概述图。图源：Journal of Physics D: Applied Physics

综上，太赫兹发射光谱技术在探索二维材料等先进材料背后的物理现象方面，已经证明了其无可比拟的价值。通过对材料的微观结构和电子动态进行深入分析，太赫兹光谱不仅拓宽了我们对物质本质的理解，而且还为材料科学、物理学以及相关交叉学科的研究提供了新的实验工具。同时，太赫兹技术的未来发展前途可期，随着探测技术的不断进步和理论研究的深入，它将在科学研究和生产应用中起到更加重要的作用。未来，我们可以期待太赫兹技术在科学、通信、生物、医疗、安全检测等领域实现突破性的进展，进一步推动科技进步和社会发展。（来源：LightScience Applications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-024-01486-2>

作者：王琛等 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