

---

# 首个1-20THz全频段可调的高功率窄带太赫兹光源

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/39310.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！*

## 首个1-20THz全频段可调的高功率窄带太赫兹光源。 导读

太赫兹辐射（Terahertz Radiation, THz）通常指频率在0.1 – 10 THz的电磁波，对应波长为3 mm至30  $\mu\text{m}$ ，是介于微波与红外光之间的电磁波段。由于其独特的频率特性，太赫兹辐射可有效激发物质中的多种集体模式，如声子、磁振子和激子等，因而在超导与量子材料等前沿研究中具有重要应用。然而，由于其位于光子学与电子学技术所覆盖频谱的过渡区间，高功率、窄带宽太赫兹辐射源的发展长期面临技术瓶颈。特别是需求最为迫切的1 – 10 THz频段，仍缺乏全频段可调的高功率窄带辐射的有效产生方法，这一困境被称为太赫兹间隙（Terahertz gap）难题。

超短电子束的相干辐射机制有望解决这一难题。对于束团长度远小于辐射波长的超短电子束，其中每个电子的辐射场会产生相干叠加，使得辐射功率随电子束数目平方增长。利用周期性的超短电子束脉冲串，可以实现在其调制频率上的相干辐射增强。清华大学工程物理系颜立新团队2023年在Nature Photonics上报道了基于空间电荷力调制的电子束脉冲串实验，首次成功产生了1-10THz连续可调的电子束脉冲串。

在该工作基础上，颜立新课题组联合中国科学院大连化学物理研究所和深圳先进光源研究院，在大连光源上完成了首个电子束脉冲串驱动的超辐射太赫兹自由电子激光实验。在1 – 20 THz全频段实现了百微焦量级单脉冲能量的可调窄带太赫兹辐射输出，在10 THz频点获得了接近毫焦的单脉冲能量，为解决光源的太赫兹间隙难题提供了有效途径。

这项工作以Superradiant terahertz free-electron laser driven by electron microbunch trains为题发表于《Light：Science Applications》。深圳先进光源研究院梁一凡博士和清华大学工程物理系博士生李彤为论文共同第一作者；清华大学工程物理系颜立新、唐传祥教授和中国科学院大连化学物理研究所张未卿、吴国荣研究员为共同通讯作者。

## 研究内容

作为先进加速器光源的典型代表，自由电子激光通过电子束与辐射的相互作用形成或增强周期性密度调制，并利用其相干辐射机制产生高功率的辐射。该方法在短波长（如极紫外和X射线波段）已取得巨大成功，并发展出SASE、HG HG、EEHG等多种高增益方案。然而在太赫兹波段，受限于其长波长导致的严重衍射效应，电子束与辐射的相互作用显著减弱，因此传统的高增益方案难以实现。

突破这一困境的关键在于超辐射自由电子激光机制。该机制通过预先形成的太赫兹电子束脉冲串

驱动自由电子激光，跳过传统自由电子激光中的微聚束阶段，从而实现辐射场的直接相干叠加，产生功率与电子数目平方成正比的高功率相干辐射。随着束团在波荡器中向前传输，脉冲串中的微束团与其产生的辐射场在最大减速相位上持续相互作用，能够快速提取电子束能量并大幅提高辐射效率，最终克服衍射效应的限制，实现更高的太赫兹辐射能量。

在本工作中，研究团队基于2023年发表的空间电荷力调制方案，引入X波段加速腔对RF啁啾中的非线性进行补偿，将电子束脉冲串的频率调节范围拓展到15THz，并利用其驱动超辐射自由电子激光，成功实现了1-20THz全频段连续可调的高功率窄带太赫兹辐射。

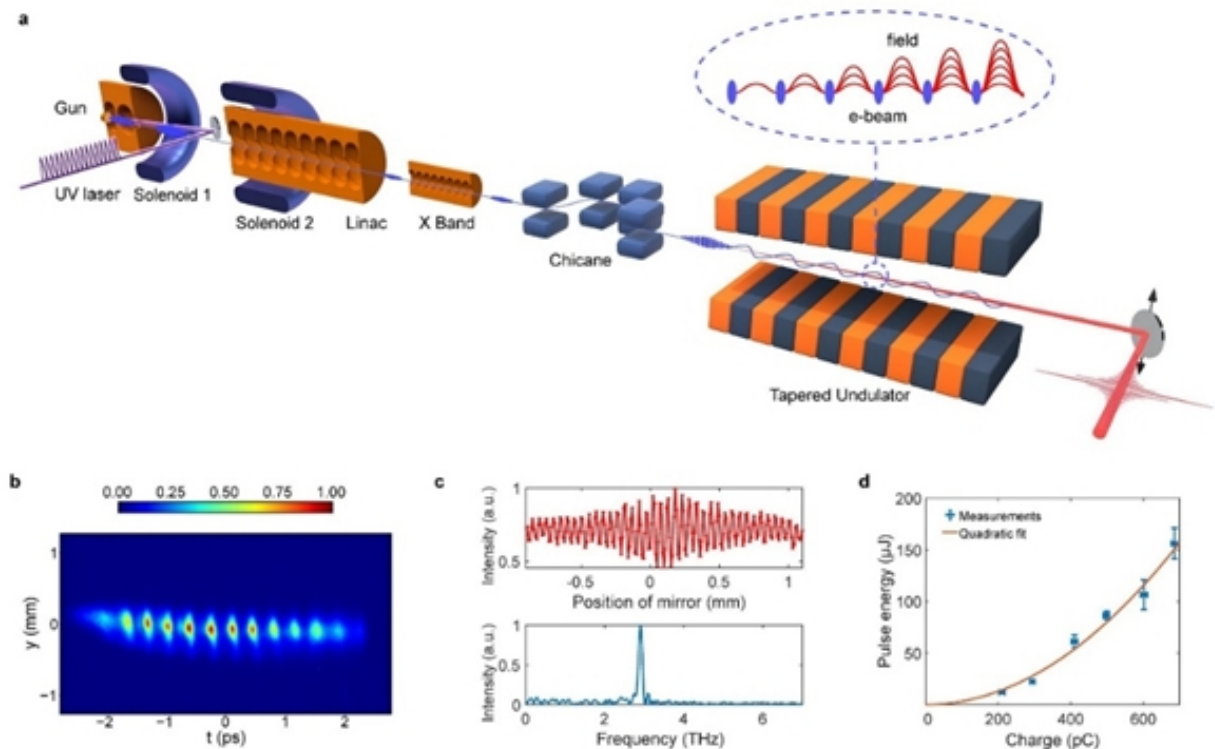


图1：超辐射太赫兹自由电子激光原理示意图。（a）实验布局图（b）电子束纵向分布

（c）辐射频谱特性（d）辐射脉冲能量随电荷量平方增长关系。

实验装置布局如图1a所示，利用脉冲堆积产生的均匀紫外激光脉冲串照射在光阴极上，产生具有初始密度调制的电子束脉冲串，随后经过空间电荷振荡过程转化为周期性能量调制，并在后续传输过程中不断加深。通过后续的加速管和X波段谐波腔，可以调整电子束的能量和能量啁啾，下游的磁压缩器将电子束的能量啁啾转化为目标频率的密度调制，并输送到波荡器中驱动超辐射自由电子激光。图1b展示了通过偏转腔测量到的电子束纵向密度调制，图1c展示了辐射的频谱特性，图1d展示了辐射脉冲能量随电荷量平方的增长关系，既验证了辐射的相干性，也表明通过提高电荷量，还可以进一步提高辐射能量。

如图2所示，实验在平面波荡器构型下实现了1-20THz全频段百微焦量级的脉冲能量，在10 THz频点单脉冲能量达到390 μJ，进一步采用渐变型波荡器后，单脉冲能量最高达到900 μJ，是迄今为止在该频段窄带太赫兹源中获得的国际上最高辐射能量纪录。

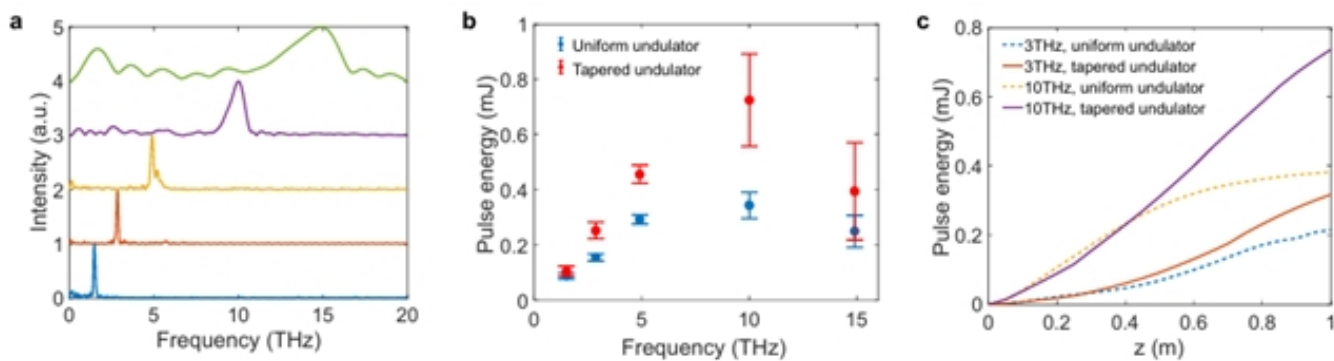


图2：辐射的主要特性及能量增长模拟结果。（a）辐射频谱特性（b）单脉冲能量测量结果

（c）辐射能量增长的模拟结果。

## 总结与展望

该工作基于空间电荷力调制电子束脉冲串驱动超辐射自由电子激光，实现了1 – 20 THz全频段连续可调、单脉冲能量最高达毫焦量级的窄带太赫兹辐射输出，发展出了一种基于加速器的全新紧凑型太赫兹光源解决方案，为解决长期困扰科学界的辐射源太赫兹间隙难题提供了有效途径。该突破将为太赫兹光子科学开辟全新的应用研究领域。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-02156-7>

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事宜，请与我们联系。

作者：颜立新等 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