
极窄频谱线宽自由电子辐射源

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/33361.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！

极窄频谱线宽自由电子辐射源。

ISSN 2662-8643(online)

CN 22-1427 / O4

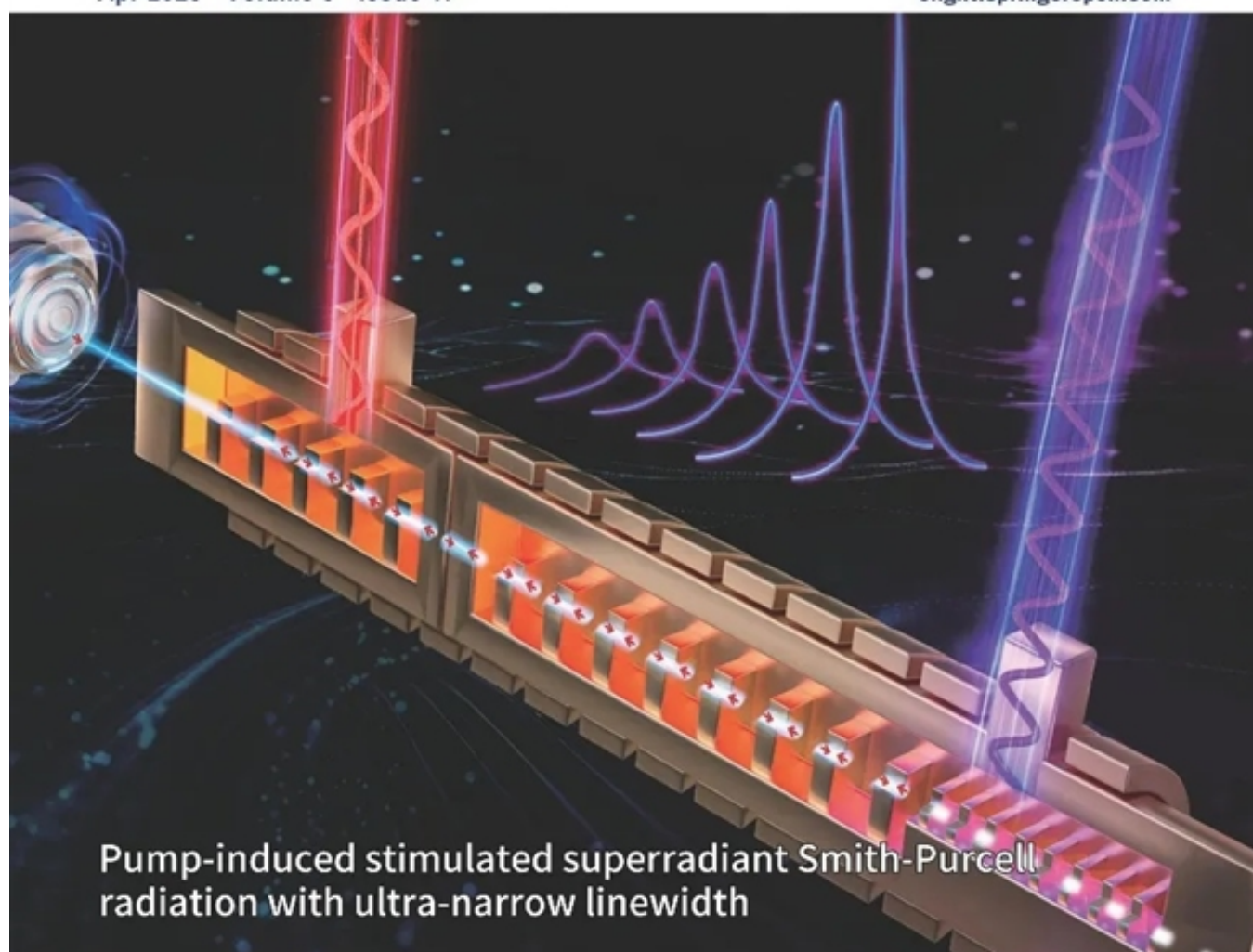
ISSN 2097-1710(print)

eLight



Apr 2025 · Volume 5 · Issue 17

elicht.springeropen.com



Pump-induced stimulated superradiant Smith-Purcell radiation with ultra-narrow linewidth

ISSN 2097-1710



Light | Publishing Group

SPRINGER NATURE

近日，清华大学电子工程系黄翊东团队刘仿课题组与中国电子科技集团第十二研究所冯进军研究员团队合作，提出并实现了泵浦诱导的受激史密斯-帕塞尔超辐射（Pump-induced Superradiant Smith-Purcell radiation, PIS-SPR），成功将自由电子辐射线宽压窄至0.3kHz，并实现了一种小型化自由电子太赫兹辐射源。该工作为实现自由电子辐射线宽的大幅压缩及小型化器件中史密斯-帕塞尔的高次谐波产生提供了新途径，并为研究自由电子束团与微纳结构的相互作用搭建了重要平台。

这项成果以Pump-induced stimulated superradiant Smith-Purcell radiation with ultra-narrow linewidth为题发表在eLight（两期卓越计划入选期刊）。清华大学电子工程系林月钗博士、李津宇博士和刘仿教授为该工作共同第一作者；刘仿教授、黄翊东教授为共同通讯作者。

研究背景

基于原子的受激辐射原理，激光器可以产生强相干性、极窄频谱线宽的激光，在材料加工、高速通信、高灵敏度传感等领域发挥着重要作用。自由电子可以产生电磁辐射，并与电磁辐射相互作用，进而产生自由电子的受激辐射，例如受激史密斯-珀塞尔辐射、同步辐射等。然而，受限于自由电子动能的波动、库仑排斥效应以及有限的电子束团数量等因素，自由电子受激辐射无法实现极窄的频谱线宽。

史密斯-帕塞尔超辐射（Superradiant Smith-Purcell Radiation, S-SPR）是指周期群聚电子团飞过光栅表面所产生的相干辐射，被认为是产生自由电子激光的一种方式。虽然理论研究表明，S-SPR的辐射频谱线宽与电子团的数量成反比，通过足够多数量的电子团可以产生极窄频谱线宽的自由电子相干辐射。但在已有报道中，受限于电子团数量不足、电子能量波动和库仑排斥恶化电子团等因素的影响，实验观测到S-SPR的频谱线宽为几十kHz至GHz量级。此外，S-SPR的实现仍是基于大型电子加速器或电子显微镜装置，无法在小型化器件中实现S-SPR。

自由电子辐射新机制

清华大学和中国电子科技集团第十二研究所研究团队提出了泵浦诱导的受激S-SPR（PIS-SPR）新机制，并实现基于PIS-SPR的超窄频谱线宽小型化自由电子太赫兹辐射源。

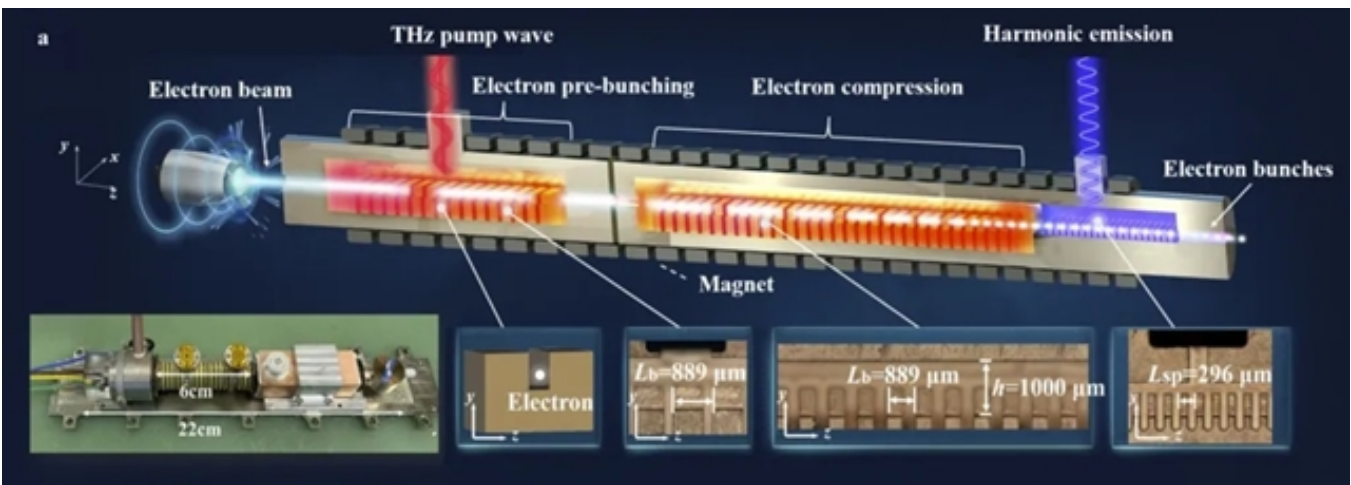


图1：基于泵浦诱导的受激史密斯-帕塞尔超辐射（PIS-SPR）器件示意图和照片

利用低功率、低频率泵浦波对直流电子束进行预群聚；预群聚电子与光栅和F-P腔共同作用产生受激S-SPR，泵浦波频率的电磁波功率被放大至百瓦以上，同时压缩电子形成高度群聚的周期电子团；最后利用小周期光栅提取电子团周围的高阶倍频分量，产生高频率、窄线宽相干THz辐射。PIS-SPR效应克服了电子团数量有限、电子能量波动和库伦排斥恶化电子团等因素的影响，因而可以获得超窄频谱线宽的自由电子辐射。

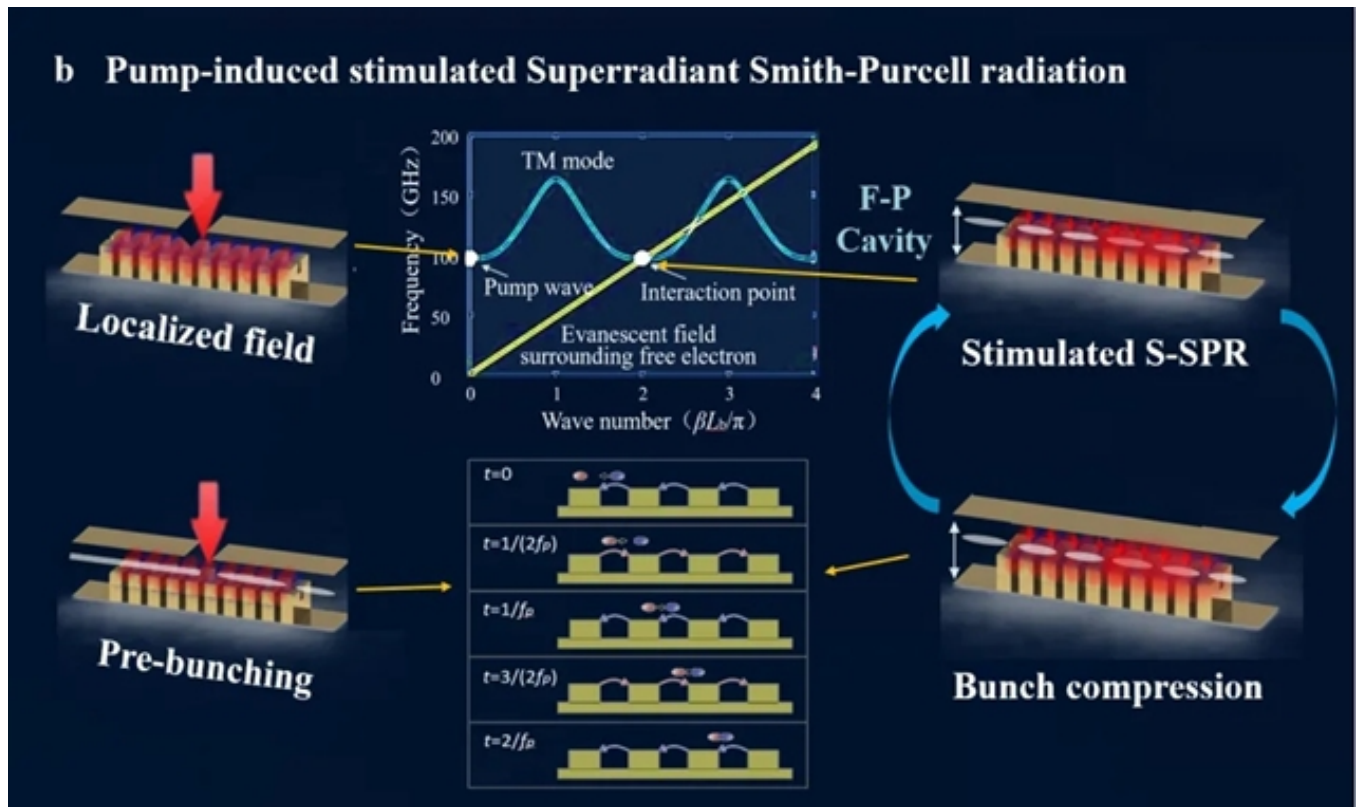


图2：泵浦诱导的受激史密斯-帕塞尔超辐射原理示意图

极窄线宽、小型化辐射器件

实验制备出小型化PIS-SPR相干THz辐射器件，器件包含电子预群聚、电子压缩、相干辐射三个部分。实验中观察到了三倍频 $\sim 0.3\text{THz}$ 的相干辐射输出，且最大输出功率为46 mW，辐射线宽可在0.3kHz $\sim$ 900kHz范围内连续调谐，最窄频谱线宽值相比已有实验报道压缩了2~6个数量级，同时器件尺寸仅为22 cm $\times$ 7 cm $\times$ 6.5 cm、重1.68kg，比大型电子加速器、其它SPR辐射器件体积缩小1~4个数量级。

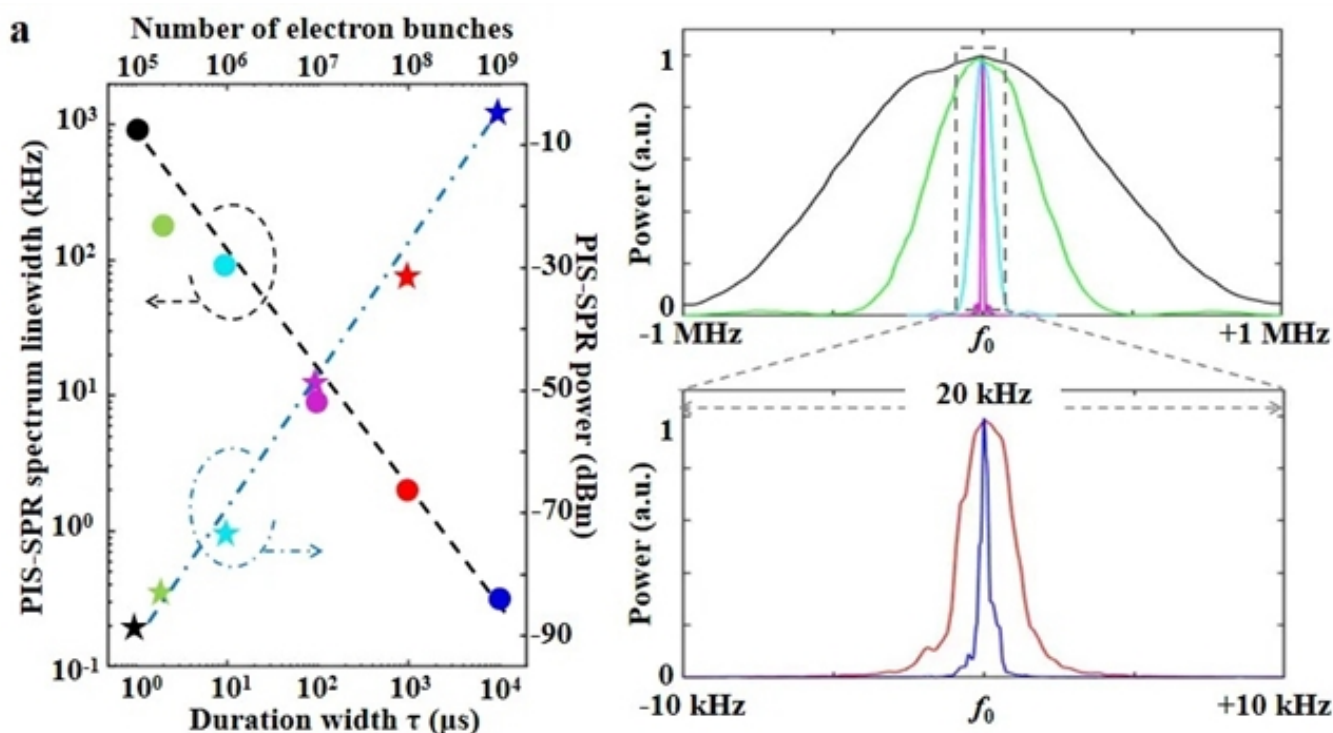


图3：受激史密斯-帕塞尔超辐射的线宽和功率随电子团数变化的测试结果

应用与展望

该工作不仅为实现不同频段、小型化、极窄线宽自由电子辐射源提供了新的机制，有望大大拓展自由电子辐射源在不同领域的应用前景，同时提供了产生频率锁定、数量可调的周期自由电子团的新方法，为深入研究周期电子团与微纳结构的相互作用提供了平台。此外，提出的受激增强效应可以极大增强场强，为实现更高的电子加速梯度和加速器的小型化、集成化提供可能。（来源：中国光学微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1186/s43593-025-00083-z>

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：黄翊东等 来源：eLight

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