



·自由电子激光和新型光源·

基于相对论电子束的太赫兹源*

颜立新, 刘卓轅

(清华大学 加速器实验室, 北京 100084)

摘 要: 太赫兹辐射在基础科学和产业应用中具有重要的应用前景, 但传统的电子学和光学方法难以在 1~10 THz 产生相干的高功率、窄带且连续可调的太赫兹辐射。基于相对论性超短电子束和预调制电子束序列的加速器太赫兹源将能在上述范围内产生可调的高能谱强度窄带太赫兹辐射。综述了清华大学加速器实验室近年来在基于相对论电子束的加速器太赫兹源方面的理论和实验进展, 以及与加速器太赫兹源一起发展起来的太赫兹辐射测量、束流诊断和先进加速技术。

关键词: 太赫兹辐射; 高亮度电子束; 束流纵向整形; 先进加速器技术

中图分类号: TN248.6

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.220134

Terahertz source based on relativistic electron beams

Yan Lixin, Liu Zhuoyuan

(Accelerator Laboratory, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Terahertz radiation has important prospects in fundamental science and industrial applications, but traditional electronic and optical methods can hardly generate high-power, narrow-band and continuously tunable coherent terahertz radiation at 1–10 THz. Accelerator-based terahertz sources using relativistic ultrashort electron beams or pre-modulated electron bunch trains have the possibility to generate tunable high spectral energy density narrow-band terahertz radiation in the above-mentioned range. This article reviews the recent theoretical and experimental progresses of the Tsinghua University Accelerator Laboratory in accelerator terahertz sources based on relativistic electron beams, as well as the terahertz radiation measurement, beam diagnosis and advanced acceleration technologies developed together with the accelerator terahertz sources.

Key words: terahertz radiation, high brightness electron beam, longitudinal bunch shaping, advanced acceleration technology

太赫兹 (THz) 辐射, 由于其光子能量所对应的特殊能隙范围, 在基础科学、生物医学、光谱学等研究领域具有重大的科学价值和广阔的应用前景^[1-6]。在需求最迫切的 1~10 THz 的频段, 现有的电子学器件和光学方法仍然难以产生高功率、窄带且连续可调谐的太赫兹辐射, 因而被科学界称为“THz 间隙”难题^[7-8]。结合先进的电子束纵向整形技术, 基于相对论自由电子的太赫兹源能够产生高能谱强度的窄带可调谐 THz 辐射, 并覆盖 1~10 THz 的“THz 间隙”, 将有力推动太赫兹科学的发展。

在强大的需求引导下, 相对论电子束的太赫兹源已经成为了国际国内物理研究的热点领域。国内有许多单位长期致力于相对论电子束的太赫兹源的研究。例如, 北京大学利用射频超导加速器实现了 THz 波荡器超辐射^[9], 并提出了高重频 THz 自由电子激光 (Free Electron Laser, FEL) 振荡器^[10] 和基于调制电子束的种子型 THz FEL 等设计方案^[11-12]; 中国科学技术大学在激光调制电子束产生单周期 THz 波荡器辐射开展过相关的研究^[13-15]。在用户装置方面, 中物院的国内首台超导自由电子 THz 振荡器在 2017 年成功饱和出光^[16], 并于近期准备将频率扩展至 0.1~4.2 THz^[17]; 国内在建的还有华中科技大学的 THz FEL 振荡器^[18] 及厦门大学、复旦大学、中国科学技术大学和中国科学院大连化学物理研究所共同承建的 FELiChEM 装置^[19]。可以看出, 基于相对论自由电子的太赫兹源不仅是目

* 收稿日期: 2022-04-30; 修订日期: 2022-06-27
基金项目: 国家自然科学基金项目 (11835004)
联系方式: 颜立新, yanlx@mail.tsinghua.edu.cn.

前加速器物理的研究重点,更是诸多科研领域的需求热点。清华大学加速器实验室在该方向也开展了近十年的研究,并取得了一系列成果。本文将在介绍相对论自由电子辐射原理的基础上,综述近年来清华大学在电子束纵向调制、相干太赫兹辐射及其应用上的研究成果。

1 相对论电子束太赫兹辐射原理

传统激光器中的光放大效应来源于增益介质的粒子数布居反转,其辐射波长和能级间能量差对应。在受激辐射的过程中,大量高能级的粒子跃迁到低能级,并辐射出相干光子,这使得辐射光强大幅提高,但辐射光子频率与能级间隔的严格对应关系也限制了激光器的工作波长范围,并且在某些系统中由于缺乏合适的泵浦源,粒子数布居反转很难实现。无反转激光器的出现一定程度上解决了粒子数反转的问题,但实际的无反转激光中相位灵敏的量子放大过程仍然要求有少量的原子处于激发态^[20]。自由电子系统不存在能级的束缚,因此自由电子可以辐射任意波长的光子,且不需要粒子数反转。因此,基于自由电子的激光器可以覆盖极宽的频率范围。

Dicke 在 1954 年提出原子偶极矩的相干自发辐射过程可以实现相干光输出^[21],这种协同效应也被称为超辐射。在电子加速器中,电子在偏转元件中的横向振荡运动或在慢波系统中的纵向运动对应于 Dicke 超辐射中原子的偶极矩。电子束在横向或纵向运动的同时与辐射场耦合,产生自由电子辐射。这种辐射在电子束束团长度大于辐射中心波长的情况下是非相干的。当电子束的尺寸小于辐射波长时,束团内各个电子辐射光子的路径形成相干叠加,从而产生自发或受激超辐射。超辐射过程的光放大使得基于自由电子的激光器同时也具有极高的亮度。这里首先采用经典电动力学的理论研究电子束的超辐射性质,使用正交模式展开来表示辐射场^[22]

$$\tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{r}, \omega) = \sum_{\pm q} \tilde{C}_q(z, \omega) \tilde{\mathcal{E}}_q(\mathbf{r}_\perp) e^{ik_z z} \quad (1)$$

$$\tilde{\mathbf{H}}(\mathbf{r}, \omega) = \sum_{\pm q} \tilde{C}_q(z, \omega) \tilde{\mathcal{H}}_q(\mathbf{r}_\perp) e^{ik_z z} \quad (2)$$

式中: $\tilde{\mathbf{E}}, \tilde{\mathbf{H}}$ 为电场和磁场的傅里叶变换; $\tilde{\mathcal{E}}_q, \tilde{\mathcal{H}}_q$ 为电场和磁场的正交模式。

Poynting 定理的能流守恒关系给出了正交模式展开中各个模式分量的激发方程

$$\frac{d\tilde{C}_q(z, \omega)}{dz} = -\frac{1}{4\mathcal{P}_q} \int \tilde{\mathbf{J}}(\mathbf{r}, \omega) \cdot \tilde{\mathcal{E}}_q^*(\mathbf{r}_\perp) e^{-ik_z z} d^2\mathbf{r}_\perp \quad (3)$$

$$\mathcal{P}_q = \frac{1}{2} \text{Re} \int (\tilde{\mathcal{E}}_q^* \times \tilde{\mathcal{H}}_q) \cdot \hat{\mathbf{e}}_z d^2\mathbf{r}_\perp \quad (4)$$

Parseval 定理给出了辐射场的频谱分布

$$\frac{dW}{d\omega} = \frac{2}{\pi} \sum_q \mathcal{P}_q |\tilde{C}_q(z, \omega)|^2 \quad (5)$$

考虑电子束作为激励电流,并假设电子束发射度为零,不考虑电子的散角,仅考虑电子束横向尺寸的影响

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}, t) = \sum_{j=1}^N -ev_j^0(t-t_{0j}) \delta[\mathbf{r} - \mathbf{r}_j^0(t-t_{0j})] \quad (6)$$

各个电子激励的场可分为自发辐射场和受激辐射场,如果仅考虑自发辐射场,可以看出各个电子自发的辐射场的模式分量仅与电子入射相位相关,即

$$\Delta \tilde{C}_{qj}(\omega) = \Delta \tilde{C}_q(\omega) e^{ik_z \hat{\mathbf{n}} \cdot \tilde{\mathbf{r}}_{j0}}, \tilde{\mathbf{r}}_{j0} = \mathbf{r}_j^0(t_{0j}) \quad (7)$$

$\hat{\mathbf{n}}$ 为观察方向的单位矢量,此时单模辐射频谱可以利用激发方程得到

$$\frac{dW_q}{d\omega} = \frac{2}{\pi} \mathcal{P}_q \left| \Delta \tilde{C}_q(\omega) \left| \sum_{j=1}^N e^{ik_z \hat{\mathbf{n}} \cdot \tilde{\mathbf{r}}_{j0}} \right|^2 \right. \quad (8)$$

对于 Lorentz 因子 $\gamma \gg 1$ 的高相对论准直电子束,其横向尺寸对相干辐射的影响较弱,此时辐射频谱中的相位因子主要取决于电子束的纵向分布

$$\left| \sum_{j=1}^N e^{ik_e \cdot \vec{r}_j} \right|^2 \approx N + \sum_{j \neq k}^N e^{i\omega(t_j - t_k)} \quad (9)$$

假设电子束中各电子的纵向位置分布为独立同分布, 可得

$$\sum_{j \neq k}^N e^{i\omega(t_j - t_k)} = N(N-1) \left| \int f(t) e^{i\omega t} dt \right|^2 \quad (10)$$

其中聚束因子定义为

$$b(\omega) = \left| \int f(t) e^{i\omega t} dt \right| \quad (11)$$

形状因子定义为: $F(\omega) = b^2(\omega)$, 电子束总的单模辐射频谱满足

$$\frac{dW_q}{d\omega} = \frac{2}{\pi} \mathcal{P}_q \left| \Delta \tilde{C}_q(\omega) \right|^2 [N + N(N-1)F(\omega)] \quad (12)$$

考虑纵向 rms 长度为 σ_z 的高斯分布超短电子束, 其形状因子为

$$F(\omega) = \exp(-\sigma_z^2 \omega^2 / c^2) \quad (13)$$

图 1 所示的是几种 rms 束长的高斯分布电子束的形状因子。可以看出超短电子束的形状因子在低频 THz (0.1~1 THz) 范围内接近 1, 此时相干超辐射占绝对优势。电子束越短, 形状因子频谱范围越宽, 并且 THz 辐射的强度与电子束团内电子个数的平方成正比, 远大于长束团的非相干辐射 (仅与电子个数成正比)。因此, 在基于相对论电子束的高功率相干 THz 辐射源的研究中, 如何获取高电荷量的超短电子束成为了研究的关键。但由于受空间电荷力的限制, 随着电荷量增大, 束团长度会逐渐增大, 使 THz 波段辐射的相干效应急剧减弱, 限制了 THz 辐射强度的进一步提高。

由于单束团在高电荷量下的束团长度很难压缩得更短, 于是研究者们考虑利用包含多个微束团的电子束序列来缓解这一困难, 同时还可以获得窄带的 THz 辐射。时间间隔 \sim ps 的相对论超短电子束序列因其具有 \sim THz 重复频率的周期性时间结构, 不但可以显著减轻空间电荷力对短脉冲电子束团压缩的限制, 还能使其在 THz 波段内各阶次的谐波辐射相干增强。具体来说, 考虑一个包含 M 个时间间隔 T 的电子束序列, 其形状因子为

$$F(\omega) = F_b(\omega) F_M(\omega) \quad (14)$$

其中 $F_b(\omega)$ 为单束团的形状因子, $F_M(\omega)$ 为 M 个 delta 脉冲的傅里叶变换

$$F_M(\omega) = \left| \frac{\sin(M\omega T/2)}{M \sin(\omega T/2)} \right|^2 \quad (15)$$

图 2 为 rms 长度 50 fs 的电子束序列的形状因子频谱分布, 在电子束重复频率 (1 THz) 及其各次谐波处均有显著的共振峰, 且共振峰的谱宽与微束团个数成反比。可以看出, 虽然在各次谐波频率处, 电子束序列的形状因子与其中单束团的形状因子相等, 但由于前者所包含的电子数量为后者的 M 倍, 其辐射强度将增强 M^2 倍。因此, 时间间隔 \sim ps 的相对论超短电子束团序列, 能在束团重复频率及其若干阶谐波频率处产生高能谱强度的窄带相

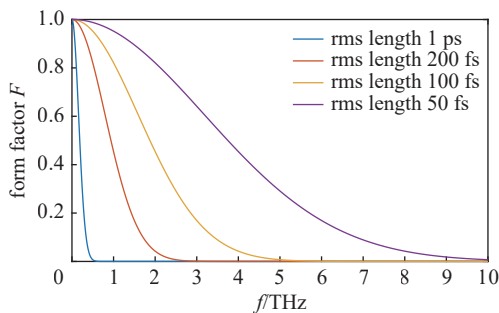


Fig. 1 Form factor of ultrashort electron beams with Gaussian distribution

图 1 高斯分布超短电子束的形状因子

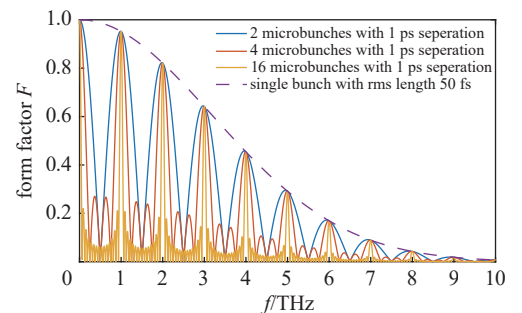


Fig. 2 Form factor of electron micro-bunch trains with 50 fs micro-bunch length

图 2 单束团 50 fs 的电子束序列形状因子

干 THz 辐射。结合加速器中先进的相空间调制技术,可以对电子束团进行高自由度的横向和纵向整形,从而扩展相干 THz 辐射的频谱范围,并可产生带有特殊光学性质的 THz 辐射。近年来,清华大学加速器实验室在超短电子束太赫兹辐射源及应用,特别是产生高峰值流强超短电子束序列方面开展了深入的研究,下面介绍其主要结果。

2 清华大学加速器实验室高亮度电子束辐射装置

清华大学依托汤姆逊散射 X 射线源 (Tsinghua Thomson scattering X-ray source, TTX) 实验装置,建立了先进太赫兹辐射源研究及应用平台。TTX 是基于汤姆逊散射原理的硬 X 射线源装置^[23],设计目标为产生 30~50 keV 的准单能 X 射线并用于相衬成像、K 吸收成像、CT 成像等领域。TTX 的装置如图 3 所示。

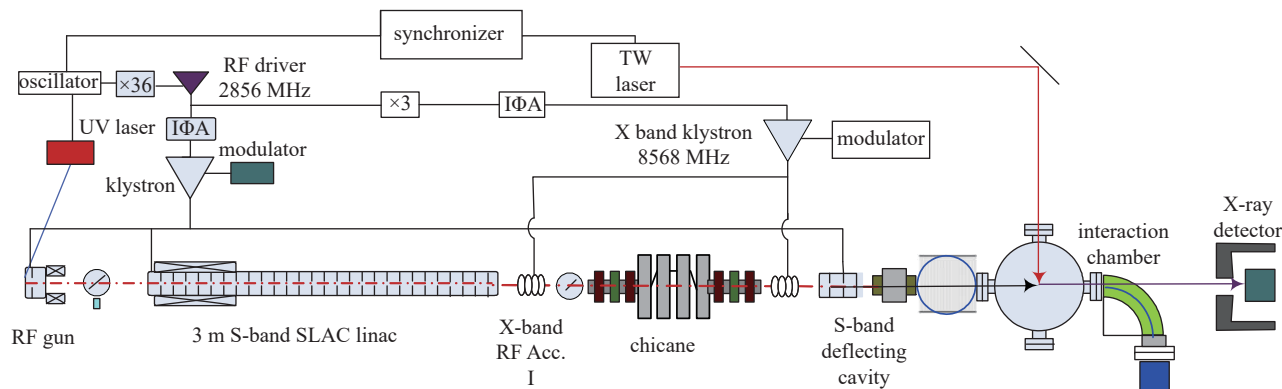


Fig. 3 Layout of TTX beamline

图 3 TTX 束线布局图^[23]

TTX 装置中,电子束从 1.6 m 的 BNL/KEK/SHI 型光阴极 S 波段电子枪出射经一个 3 m 长 SLAC 型行波加速管加速并在作用室与高能飞秒激光发生汤姆逊散射,产生 X 射线并通过钛窗出射后进行测量和应用。TTX 束线上还包含有其他的束流控制元件,包括两个四极透镜组、磁压缩器、两个 X 波段加速管、一个 S 波段偏转腔,因此可以在 TTX 束线上开展先进的束流整形和调控研究。

为了进一步开展新型太赫兹辐射原理及应用研究,清华大学加速器实验室于 2021 年新建成了一条电子束线,与 TTX 共用微波源和驱动激光系统,成为新的研究平台。在该束线中,电子束由光阴极微波电子枪产生,经过一段 1.67 m 的改进 SLAC 型 S 波段行波加速管加速,可在由磁压缩器和波荡器组成的调制段中与激光作用进行能散调制,再经过 0.5 m 长的 S 波段加速管施加能量啁啾,以及下游的磁压缩器控制色散和调整束长,最后利用偏转腔和分析磁铁进行相空间诊断。束线中还设计了用于能量啁啾线性化的褶皱结构和用于辐射的波荡器,具体的束线结构如图 4 和图 5 所示。

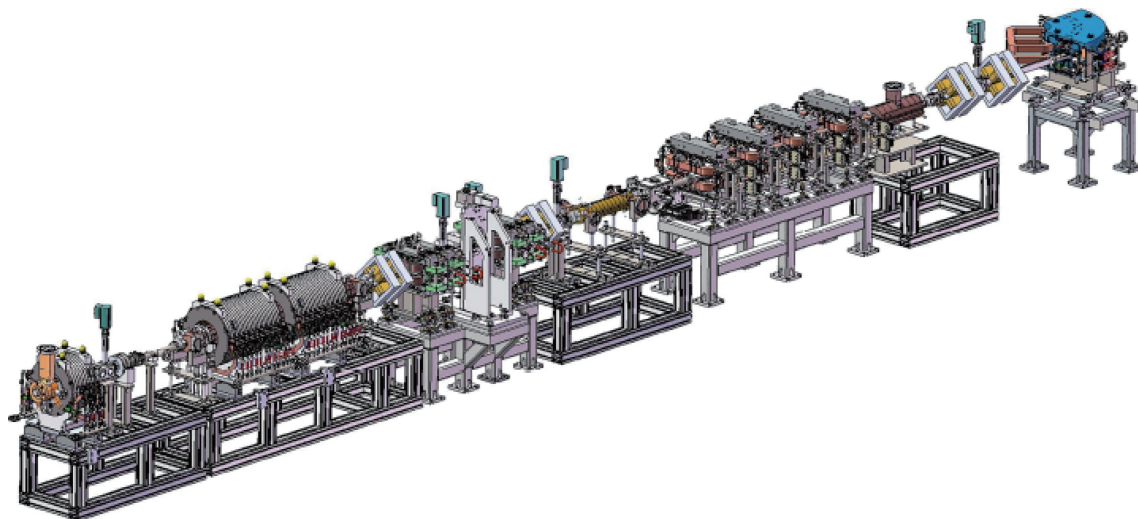


Fig. 4 Setup of THz new beamline

图 4 THz 新束线装置图

3 调制电子束太赫兹辐射研究进展

相对论电子束辐射的原理说明,辐射的相干性与束团纵向分布相关,为产生高强度的相干太赫兹辐射,需要产生超短电子束或超短电子束序列。超短电子束可以通过速度压缩、磁压缩等方法产生,但磁压缩过程中超短电子束的相干同步辐射 (Coherent Synchrotron Radiation, CSR) 效应会增大电子束投影发射度,不利于后续辐射过程。传统的速度压缩方案在临界压缩条件下的非线性使得电子束的流强无法进一步提高,而次临界压缩虽然保持了一定程度上的压缩线性,但无法将电子束压缩到最短。由此,清华大学加速器实验室提出利用射频-漂移压缩 (RF-drift compression) 获得高流强的超短电子束的方法^[24]。在该方案中,电子束先经过射频加速管的欠压缩,再通过下游的漂移节对电子束进行线性的速度压缩,最终能得到 rms 长度小于 20fs 的超短电子束,可产生超宽谱太赫兹辐射。

在电荷量较大时,可以采用密度调制的超短电子束序列来提高辐射的相干性,进而提高太赫兹辐射强度。这种电子束序列可以通过直接调制光阴极驱动激光产生。例如,使用双折射晶体 (α -BBO) 对飞秒紫外脉冲进行堆积^[25],或使用啁啾脉冲拍频^[26]、脉冲分束堆积^[27]等方法。其中,清华大学加速器实验室在紫外脉冲堆积方案上进行了研究,实验测量了 α -BBO 晶体堆积的紫外脉冲分布^[28-29],对紫外脉冲串驱动光阴极微波电子枪产生电子束序列进行了模拟^[30],并在实验上测量了基于该电子束序列的波荡器辐射^[31]。

由于在低能量下电子束的初始密度分布会在空间电荷力影响下迅速被抹平,直接调制驱动激光得到的电子束序列的形状因子很低,且后续速度压缩难以在保证微束团压缩的同时调节束团间隔。为解决该问题,本实验室提出一种深度过压缩的新方案^[32]。在深度过压缩过程中,电子束在加速管内由于减速实现相空间反转并过压缩,在下游加速段获得正能量啁啾并在漂移节内实现二次速度压缩。这种压缩模式相较于传统的速度压缩,其压缩比随入射相位的变化较为平缓,有较大的相位接收度,从而具有较大的纵向压缩比调节范围。利用该压缩方式可以产生百 pC 的电子束序列,并在 1~10 ps 范围内调节微束团间距的同时维持微束团的压缩。该方案在 TTX 束线上进行了实验演示^[33],实验结果表明,当双束团在 -120° 至 -170° 相位之间进行压缩时,两束团的能量和时间间隔可以 0~3 MeV 及 0~6 ps 之间连续调节,并且可以同时通过发射度补偿来减小束团发射度的增长。实际上,深度过压缩产生的双束团不仅可以用于驱动相干太赫兹辐射,还可以用于驱动尾场加速,双色自由电子激光等领域。

除了在后续的加速节中通过各种相空间操纵减轻空间电荷力对初始密度分布的均化作用,还可以反过来利用空间电荷力,产生高峰值流强的电子束脉冲串。UCLA 的 P. Musumeci 等人通过理论分析和实验表明^[34-35],非线性的空间电荷振荡效应可以产生太赫兹电子束序列。清华大学加速器实验室利用非线性空间电荷振荡效应,在 TTX 束线上实现了大电荷量 (~ 700 pC) 的高峰值流强太赫兹电子束序列,频率可调范围为 0.5~1.6 THz,聚束因子在 0.2 左右^[36],典型的测量结果如图 6 所示。

该实验结果相比于国际上其他实验组的太赫兹电子束序列产生结果,极大提高了束团电荷量,同时拓宽了调谐范围,保持了较高的聚束因子,具体对比如表 1 所示。

在非线性空间电荷振荡过程中,空间电荷力还可以调制电子束的能量分布。在电子束等离子体振荡半个周期后,由于空间电荷力高次谐波的作用,电子束产生了近似锯齿状的能量调制。束线的色散段将能量调制转化为密度调制,在束线末端可产生高聚束因子的电子束序列。理论分析和模拟结果表明这种方法可以在基频 (~ 4 THz) 附近产生聚束因子在 0.4 左右的密度调制,在基频附近宽频范围上 (1~6 THz) 聚束因子能够达到 0.3 以上,同时其二次谐波覆盖 5~10 THz。

对电子束的调制也可以间接地由后续的能量调制段引入,通过束线的色散节将能量调制转化为密度调制,产生太赫兹电子束序列。其中典型的方案是使用束流尾场来调制能量。基于上述原理,清华大学加速器实验室提出了基于非线性等离子体尾场的电子束序列产生方案。非线性等离子体尾场特殊的电磁场结构使得该方案能够产生极高聚束因子 (约 0.8) 的电子束序列,且能保持电子束的高品质,经波荡器可产生 10 mJ 量级的高功率可调谐窄带太赫兹辐射^[37]。在该方案的基础上,进一步提出了利用分段中空等离子体通道调制电子束能量,并产生高聚束



Fig. 5 Photo of THz new beamline

图 5 THz 新束线照片

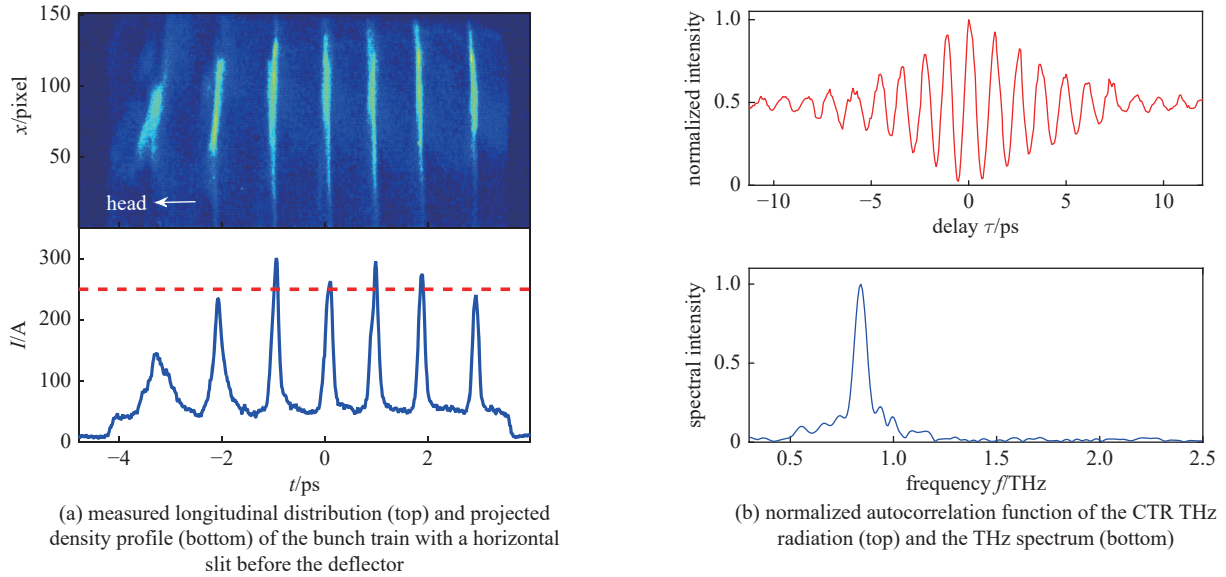


Fig. 6 Experimental result of THz electron bunch train generation by nonlinear space charge oscillation^[36]

图 6 非线性空间电荷振荡产生电子束序列结果^[36]

表 1 太赫兹电子束序列的实验结果对比

Table 1 Comparison of experimental results of THz electron micro-bunch trains

published article	affiliation	bunch charge/pC	tuning range/THz	bunching factor
PRL 101, 054801 (2008)	BNL	~50	0.70~1.40	
PRL 105, 234801 (2010)	FERMI	~15	0.37~0.86	
PRL 106, 184801 (2011)	UCLA	~22	1.00	~0.20
PRL 107, 204801 (2011)	BNL	~100	0.26~2.60	
PRL 109, 074801 (2012)	SLAC	~40	12.00~17.00	~0.02
PRL 108, 144801 (2012)	ANL	~100	0.68~0.90	
PRL 111, 134802 (2013)		~1100	0.19~0.30	~0.20
PRL122, 044801 (2019)	DESY	~1100	0.19~0.30	~0.20
PRL 116, 184801 (2016)	THU	~700	0.60~1.60	~0.20

因子 THz 脉冲串的方法,进一步放宽了对电子束聚焦的要求^[38]。数值模拟表明,在使用两段等离子体通道进行能散调制线性化后,经过色散段电子束的密度聚束因子在基频 (0.5 THz) 能够达到 0.7。该方案解决了低流强电子束提高聚束因子的问题,提高了 THz 的能量转换效率,分析表明,该方案对电子束参数具有较好的鲁棒性。图 7 展示了分段中空等离子体通道调制电子束的模拟结果。

能量调制段可以对电子束的能量在 THz 波段进行调制,也可以对电子束的切片能散进行调制。对电子束切片能散的调制可以由飞秒激光结合波荡器实现,而不需要设计特殊的尾场结构或利用外部的 THz 种子源,并且可以利用多种飞秒激光技术实现调制频率、幅度等参数的自由调节。清华大学加速器实验室和 SLAC 共同提出了基于相对论电子束切片能散双峰调制的太赫兹脉冲串产生方案^[39]。在该方案中,脉冲堆积的红外激光在波荡器内调制电子束的切片能散,后续的色散段将该切片能散调制转化为密度调制。利用 X 波段加速腔对能量调制线性化后,该方案能在 1~10 THz 产生聚束因子约为 0.4 的电子束序列,从而为覆盖“THz 间隙”提供切实可行的路径。图 8 为该方案的示意图。

4 利用调制电子束进行太赫兹辐射

具有纵向密度调制的电子束可以通过多种辐射方式,例如相干渡越辐射 (Coherent Transition Radiation, CTR)、波荡器辐射、介质尾场辐射、Smith-Purcell 辐射等方式产生相干太赫兹辐射。从激发方程 (1) 可以看出,在电子束的辐射过程中,如果辐射模式与电子束的电荷密度波的某个空间谐波具有相同的相速度,辐射模式将与电子束的电荷密度波相耦合,将电子束的能量共振地转化为 THz 辐射,这实际上是辐射过程中的动量守恒。对于介质尾场

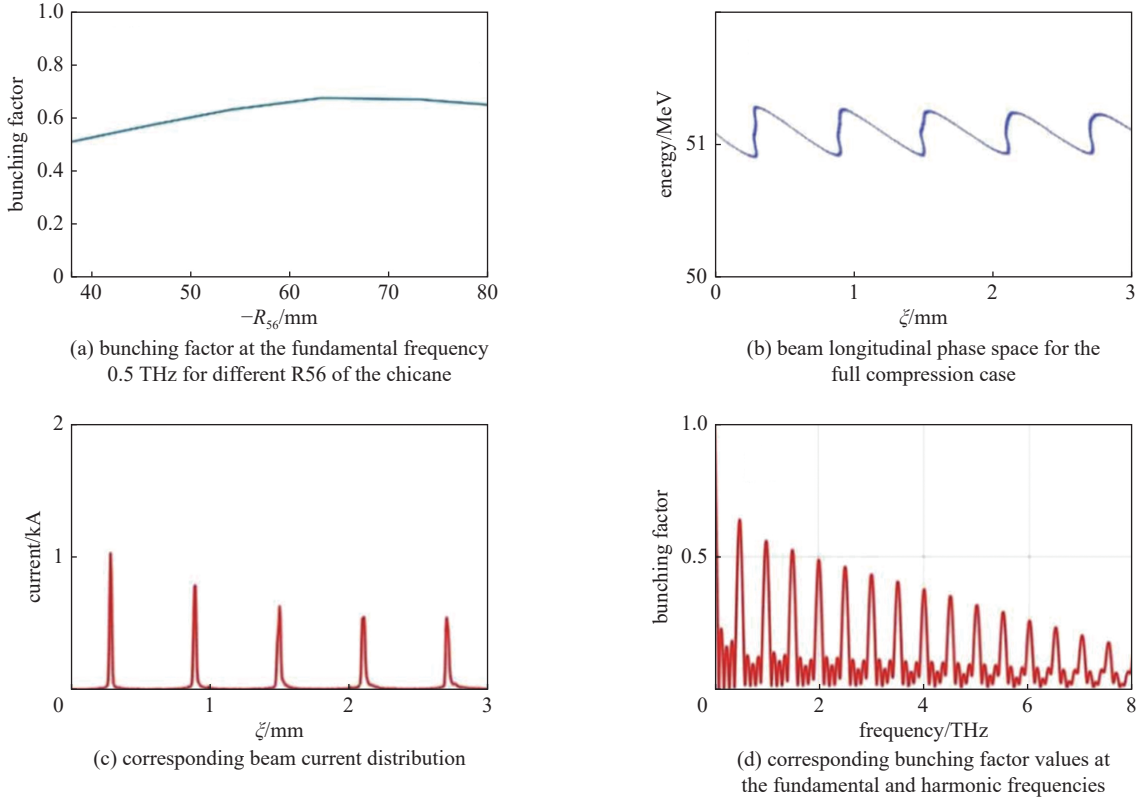

 Fig. 7 Simulation results of THz electron bunch train generation by segmented hollow plasma channels^[38]

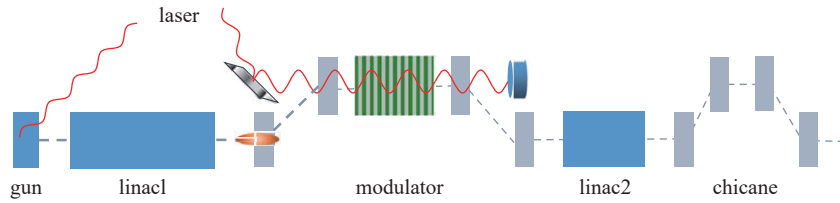
 图 7 分段中空等离子体调制产生电子束序列的模拟计算结果^[38]

 Fig. 8 Schematic layout of THz electron bunch train generation by slice energy spread modulation^[39]

 图 8 切片能散调制产生太赫兹电子束序列示意图^[39]

辐射, 界面慢波与电荷密度波耦合, 对于波荡器辐射, 电荷密度波的空间谐波与辐射场耦合, 在 Smith-Purcell 辐射中, 辐射场的 Bloch 模式与电子束相耦合^[40]。

在 CTR 和 Smith-Purcell 辐射中, 高相对论性电子束的辐射可看作虚光子在金属界面的反射。CTR 辐射中, 反射光子的频谱强度与频率近似无关。Smith-Purcell 辐射中, 虚光子在金属周期结构的反射下产生干涉, 辐射频率与观察角和辐射阶次有关, 且辐射为窄带辐射, 此时电子束纵向电荷密度波的波数为辐射模式波数与 (各阶) 周期结构的波数之和, 即

$$\frac{\omega}{v_{0z}} = k_{z0} + nk_0 = \frac{\omega}{c} \cos\theta + nk_0 \quad (16)$$

式中: k_0 为光栅周期对应的波数; θ 为观察角; v_{0z} 为电子纵向速度。清华大学加速器实验室在 TTX 束线上利用超短电子束和电子束序列分别产生了 CTR 辐射^[41]。其中, 超短电子束通过束线磁压缩器压缩产生, 电子束序列通过非线性空间电荷振荡产生。实验测量了 CTR 和 Smith-Purcell 的辐射频谱, 结果如图 9 所示。

可以看到, CTR 辐射频谱与电子束的尺寸相关且相对较宽, 而观测到的相干 Smith-Purcell 辐射的频谱相对较窄, 且其频率和带宽只与光栅周期和观测角有关而与电子束的纵向分布无关, 后者只影响 Smith-Purcell 辐射的频谱强度。因此可以利用密度调制的电子束选择性激发 Smith-Purcell 辐射的各次谐波, 在获得极窄线宽辐射的同时对辐射进行锁频^[42]。图 10 展示了实验中 0.6 mm 周期光栅被 1 ps 和 2 ps 间隔电子束序列分别激发的辐射场分量 (观察角为 90°), 结果表明不同次谐波被分别激励。

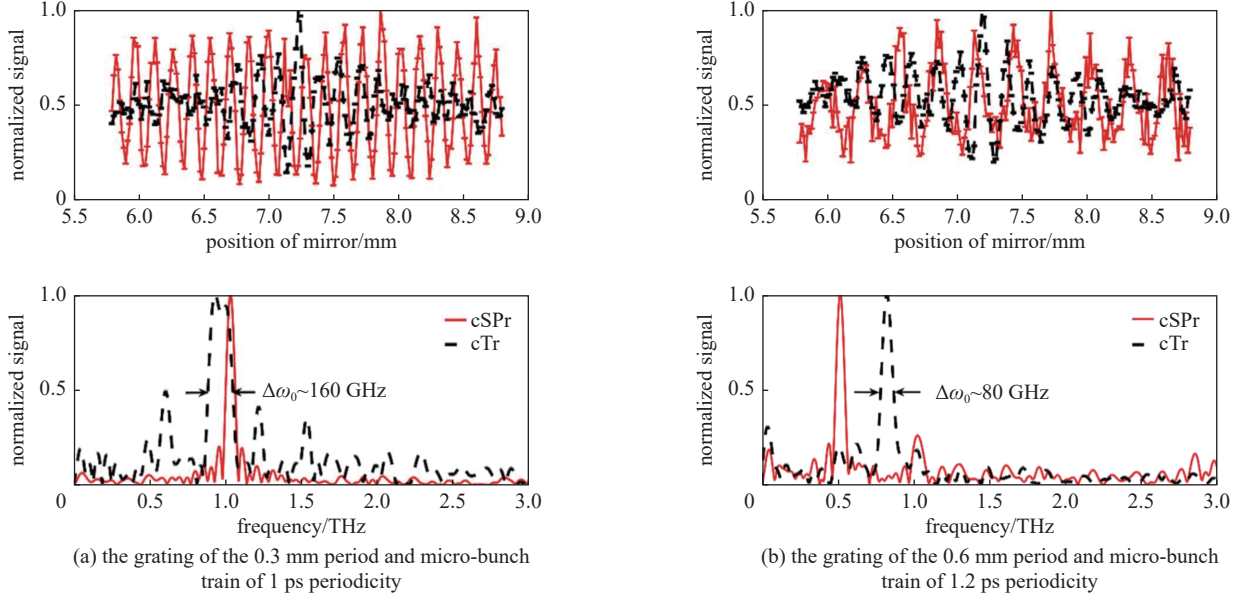


Fig. 9 Spectrums of coherent Smith-Purcell radiation and coherent transition radiation emitted by THz electron bunch train^[41]

图 9 THz 电子束团串的相干 Smith-Purcell 辐射 (cSPr) 和相干渡越辐射频谱^[41]

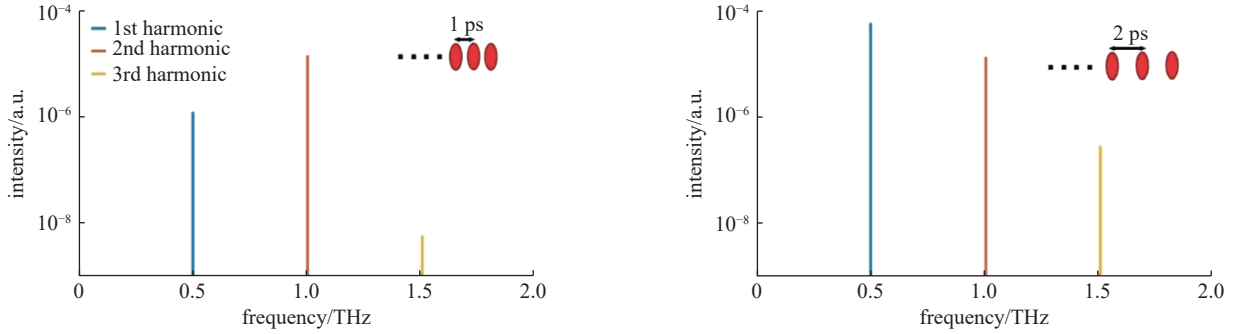


Fig. 10 Measurement results of first three harmonics of coherent Smith-Purcell radiation^[42]

图 10 相干 Smith-Purcell 辐射前三阶谐波分量测量结果^[42]

在波荡器辐射中,由于磁铁阵列的扭摆作用,相对论电子束在纵向运动的同时具有周期性的纵向速度振荡,这使得电子束纵向电荷密度波的 $-n$ 阶空间谐波与辐射模式(通常为 TEM 波)耦合,辐射模式的波数为纵向电荷密度波的波数和(各阶)波荡器周期对应的波数之差,即

$$\frac{\omega}{v_{0z}} - nk_0 = k_{z0} \leftrightarrow \lambda_L = \lambda_u \frac{1 + K^2/2}{2\gamma^2} \quad (17)$$

式中: λ_L 为辐射波长; λ_u 为波荡器周期长度; $K = 2\pi e B_0 / \lambda_u m c^2$ 为归一化波荡器强度。由于波荡器强度可以较为方便地调节,超短电子束可在波荡器内共振地产生不同频率的太赫兹辐射,从而有可能覆盖整个太赫兹间隙(1~10 THz)^[43]。

图 11 是在清华 TTX 束线上利用 220 pC 的超短电子束通过波荡器产生的太赫兹辐射频谱及能量分布^[44]。

太赫兹辐射也可以通过介质尾场高效地产生^[45]。介质波导中,慢波与电子束相互作用,将电子束的纵向动能转化为辐射场的能量。清华大学加速器实验室在 TTX 束线上利用斜切口的介质管,实现了超短电子束激发多模 THz 尾场的耦合输出^[46-47],产生了 10 μ J 量级的 THz 辐射,理论带宽可达到 1%,并利用超短电子束团或非线性空间电荷振荡产生的电子束序列,选择性激发了不同频率的 THz 尾场,实验布局及测量结果如图 12 和图 13 所示。

在介质波导中,电子束的纵向电流激发尾场辐射,因此电子与辐射光子的耦合相比于波荡器等依靠横向电流与辐射场耦合的辐射元件具有更高的辐射效率。同时,由于 THz 辐射的波长较长,在自由空间中的传播存在严重的衍射效应,而介质波导能够将 THz 局域在波导结构内,从而加强电子束与辐射尾场的相互作用,产生更高能量的 THz 辐射。在低频 THz 波段(0.1~1 THz),利用超短电子束激励介质波导能够产生 mJ 量级的辐射。但是,由于

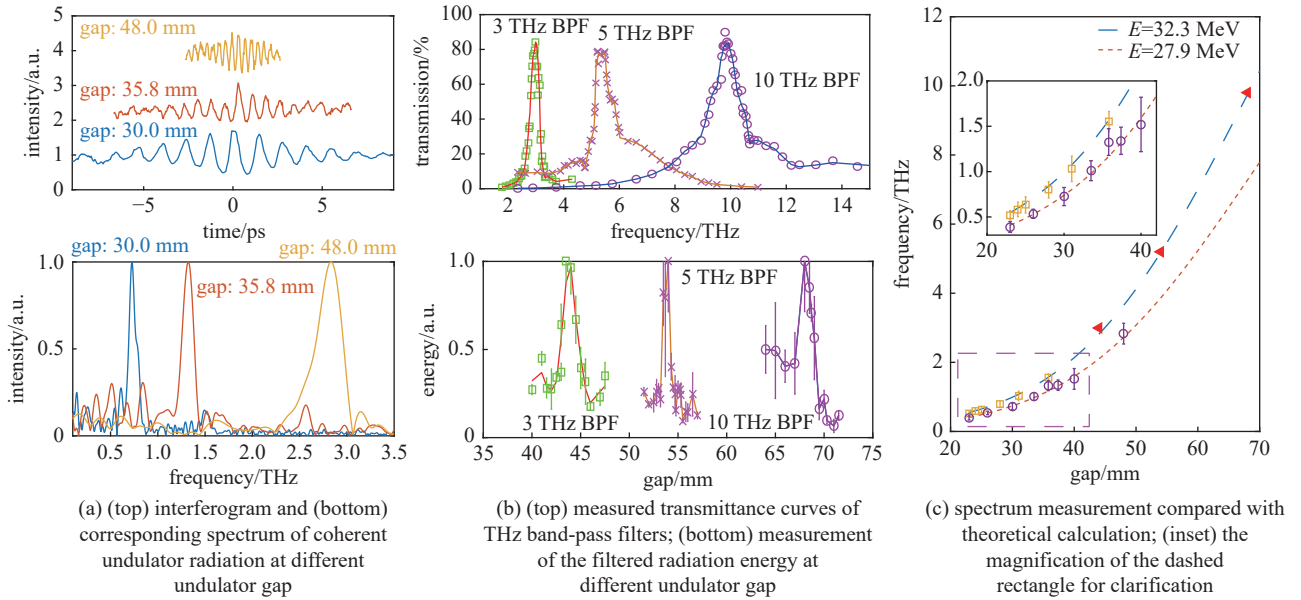


Fig. 11 Spectrum measurement of undulator radiation^[44]

图 11 波荡器辐射的频谱测量结果^[44]

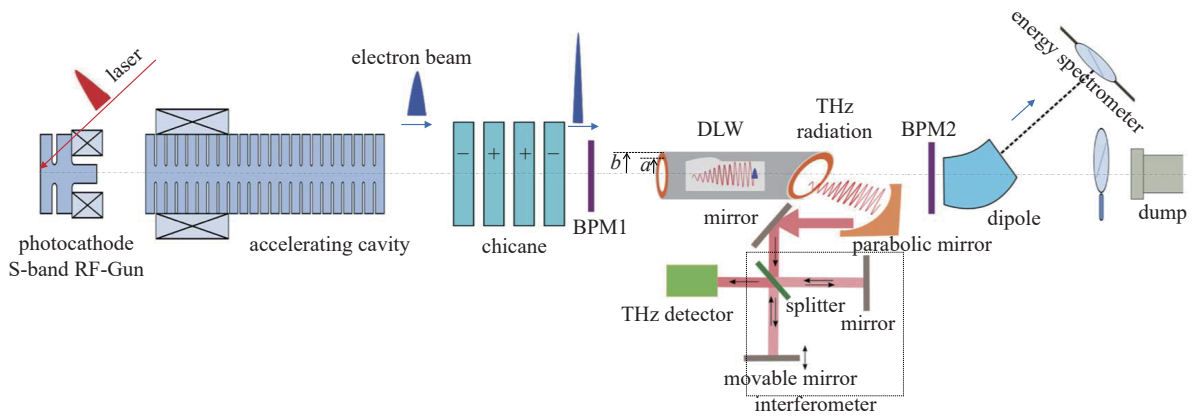


Fig. 12 Experimental setup of THz wakefield generation by electron beam^[46]

图 12 电子束激发介质管太赫兹尾场的实验装置图^[46]

波导本征频率离散性的限制,实际上产生的 THz 辐射无法实现连续可调,并且在高次谐波处 THz 辐射的能量会迅速降低。由于电子束聚焦的限制,介质波导的横向尺寸也限制了其辐射频率的提高(通常小于 1 THz)。因此,介质波导在具有较高辐射效率的同时,也受到了可调谐性和频率覆盖范围的限制。对于波荡器辐射,改变电子束的能量或波荡器的磁场强度可以容易地调节共振关系,从而能够在较大频率范围内连续调频并产生 mJ 量级的相干辐射。但是波荡器的体积远远大于介质波导,为了产生高能量的 THz 辐射通常需要较长的波荡器阵列,并且由于其产生的 THz 辐射为自由空间辐射,其辐射效率受到衍射效应和滑移效应的限制。近来,也有研究希望结合波导与波荡器,在克服波荡器的衍射和滑移效应的同时获得更高的辐射效率^[48]。

对于 Smith-Purcell 辐射和 CTR 辐射,受限于辐射场作用距离,作用强度以及衍射效应,这两种辐射方式产生的辐射能量相比于之前的两种方式都较小。其中,超短电子束激发的 CTR 辐射的能量在 μJ 量级, Smith-Purcell 辐射的能量在 100 nJ 量级。但是 CTR 辐射和 Smith-Purcell 辐射所需要的辐射元件相对简单,且对电子束的操控要求较低,因此经常作为束流诊断的手段。相比于介质波导和波荡器的窄带辐射,超短电子束激发的 CTR 和 Smith-Purcell 辐射都包含较宽的频谱区间,其中 CTR 为宽频、单周期的径向极化 THz 辐射,因而可应用在非共振强场 THz 研究领域; Smith-Purcell 辐射的频率与观测角度有关,且其线宽由光栅周期数决定,可以应用在需要连续可调谐 THz 或极窄线宽 THz 辐射的研究中,如下一代毫米波通信。另外,近期也有利用新技术拓展 CTR 和 Smith-Purcell 机制对电磁波频谱操控能力的相关研究,例如使用超表面将 CTR 和 Smith-Purcell 机制相结合^[49],利用等离子激元微腔(plasmonic cavity)将局域等离子激元共振与 Smith-Purcell 辐射相结合等^[50]。

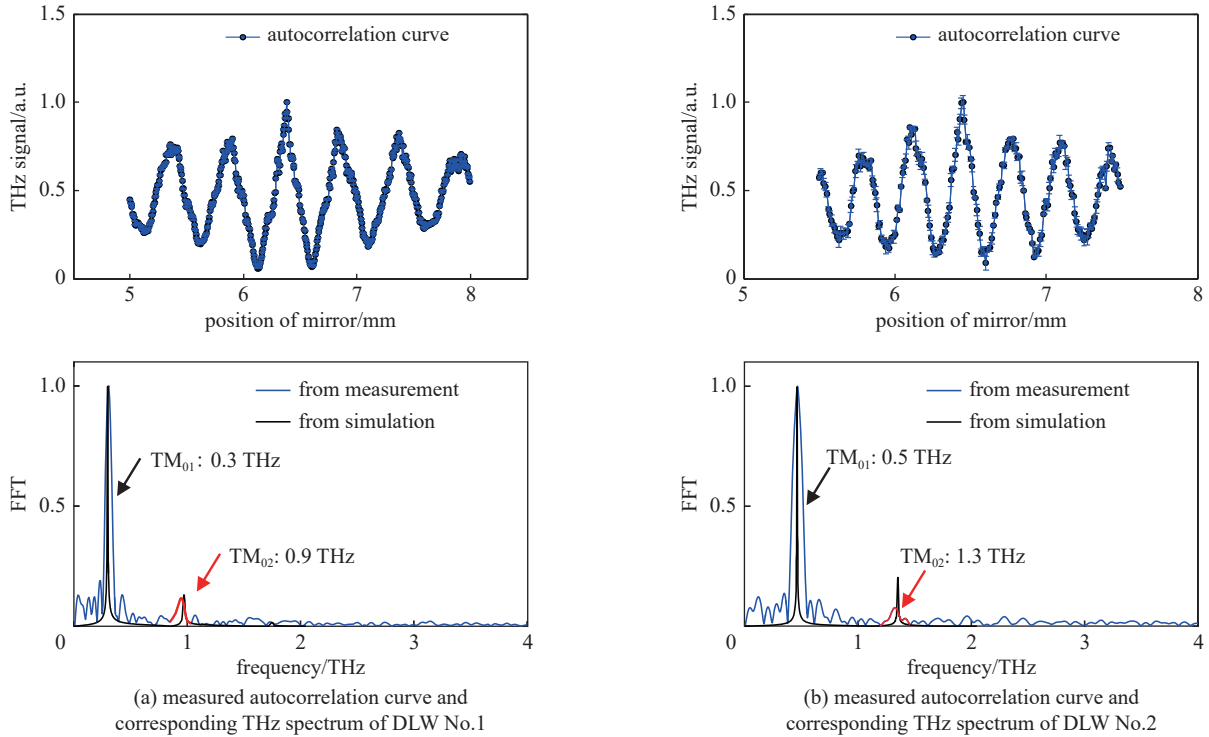


Fig. 13 TM_{01} and TM_{02} mode excited in two different dielectric tubes by an electron beam with rms length $60 \mu\text{m}$ ^[46]
 图 13 电子束束团 rms 长度为 $60 \mu\text{m}$ 时两个不同介质管内激励的 TM_{01} 和 TM_{02} 模式^[46]

5 超短电子束太赫兹辐射的测量

为了获得相对论电子束产生的太赫兹辐射的频谱、时空间分布及强度信息,需要对太赫兹辐射进行测量。常见的测量方法分为频域测量和时域测量。在频域测量中,通常利用自相关方法对 THz 的频谱进行测量,典型的自相关方法有基于 Michelson 干涉仪和 Puplett 干涉仪的方法。清华大学加速器实验室在 Puplett 干涉仪的基础上发展了一套太赫兹频谱和强度的紧凑测量方案^[51],在该方案中,入射的 THz 辐射通过 Puplett 干涉仪干涉并由 2 号探测器测量自相关信号,1 号探测器通过分光来测量 THz 辐射的强度。具体结构如图 14 所示。

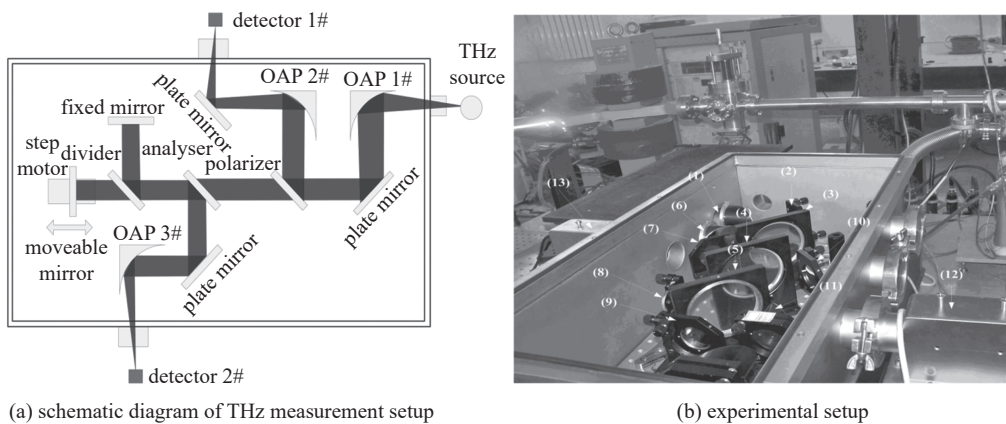


Fig. 14 THz measurement setup^[51]
 图 14 太赫兹辐射测量^[51]

也可通过电光采样的方法在时域对太赫兹辐射信号进行测量。在电光空间解码诊断方法的基础上^[52],清华大学加速器实验室演示了基于单次电光空间解码的超短电子束 CTR THz 辐射测量方案,通过单次的电光采样得到了 CTR 辐射场的一维空间分布和时间分布,并获得了完整的辐射场径向分布^[53]。在该方案中,斜入射的超短激光将 CTR 辐射在 y 轴上的场强分布转化为激光 y 方向上的相位延迟分布,并将时间分布转化为 x 轴上的相位延迟分布,通过后续的四分之一波片以及偏振分束镜对垂直偏振的激光分量进行测量,可以得到 CTR 辐射场的时空分

布,实验装置和结果如图 15 和图 16 所示。

6 超短电子束太赫兹辐射源的应用

基于紧凑电子加速结构的太赫兹源,能够提供比光子学或电子学太赫兹源更高能谱亮度或更高场强的太赫兹辐射,可大力推动先进材料、量子物理、生物医学及非线性光学等领域的研究。其中,窄带 THz 辐射可用于对材料集体运动的激发和控制。窄带 THz 可以用来控制物质中原子的运动及位移,例如,THz 可以在铁电材料中施加电场来控制铁电极化方向的翻转^[1],在拓扑材料中操控材料中拓扑序的运动^[54];在晶体材料中可以通过 THz 激发非线性晶体振动改变晶格排列^[55],驱动声子上转换^[56]。除此之外,THz 还可以用来控制束缚态电子或自由电子的运动,比如,对于分子中的束缚态电子,THz 电场可以对其产生的电偶极矩施加力矩,从而相干地控制转动自由度上的 Rabi 振荡,THz 电场也可以控制在铁磁矿中束缚态电子和原子组成的准粒子^[57],以及在半导体中控制载流子的输运^[58],THz 电场也可以用来控制一些低能级间隔的能级系统的电子跃迁。另外,THz 的磁场可以用来控制束缚态电子的自旋,产生自旋进动或自旋重定向^[59]。除了对束缚态电子的操纵以外,THz 也可以用来控制材料中的近自由电子,如控制二维电子气的朗道能级^[60]等。相比于窄带 THz 辐射,宽带 THz 辐射往往具有更高的峰值场强,因而可以用来研究强场 THz 下的非线性物理。

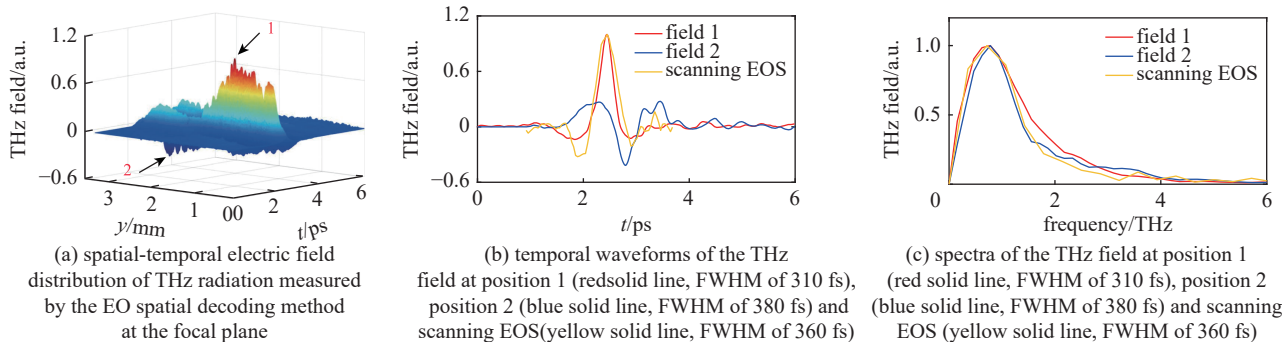


Fig. 16 Comparison of the measured spatial-temporal distribution of CTR by EO spatial decoding and scanning EOS^[53]

图 16 EO 空间解码测量得到的 CTR 辐射时空间分布及与延迟扫描 EO 采样方法的对比 (Scanning EOS)^[53]

同时,由于电子束产生的太赫兹辐射携带了电子束的时空间信息,THz 在先进电子束操纵及诊断领域也有重要应用。

清华大学加速器实验室在 TTX 束线上发展了基于超短电子束 THz 辐射的电子束纵向流强和时间分布的诊断方法,利用获得的时间信息可以实现对束流稳定性的反馈控制。纵向流强分布可通过对 CTR 辐射能量进行测量^[61],根据辐射能量对纵向长度相对变化进行监测。

在纵向时间分布诊断中,THz 辐射可用于测量电子束的绝对到达时间。电子束到达时间可以通过测量 CTR 辐射 THz 的电光效应得到^[53],如图 17 是利用单次电光空间解码得到的电子束到达时间抖动。

超短电子束太赫兹辐射,还可作为一种新的测量手段用于介质尾场加速研究,对电子束的相对达到时间(即加速相位)进行测量。其中,电子束加速相位可通过束团尾场辐射的干涉效应来测量^[62],根据双电子束团 THz 尾场辐射总能量的大小,可以判断双束团产生的尾场的相位关系,进而判断电子束的尾场加速相位,相关的测量结果如图 18 所示。

另外,利用电子束辐射的频谱分布信息,结合先进的相位恢复算法,可以在 fs 时间分辨率水平重建电子束的纵向相空间,相关的研究结果已被 LCLS^[63]和 JAI^[64]报道。这种无损的纵向相空间诊断能力将提供电子束辐射时间及频谱结构信息,推动自由电子激光泵浦及探测水平的提升,实现对激光物质相互作用过程更精细的控制。

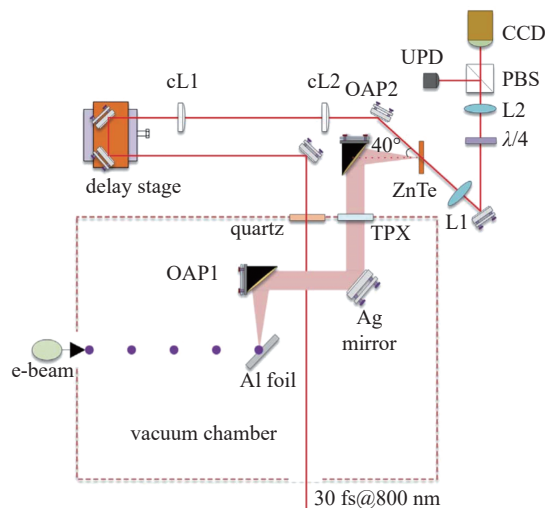


Fig. 15 Schematic of the EO spatial decoding detection^[53]

图 15 EO 空间解码测量装置示意图^[53]

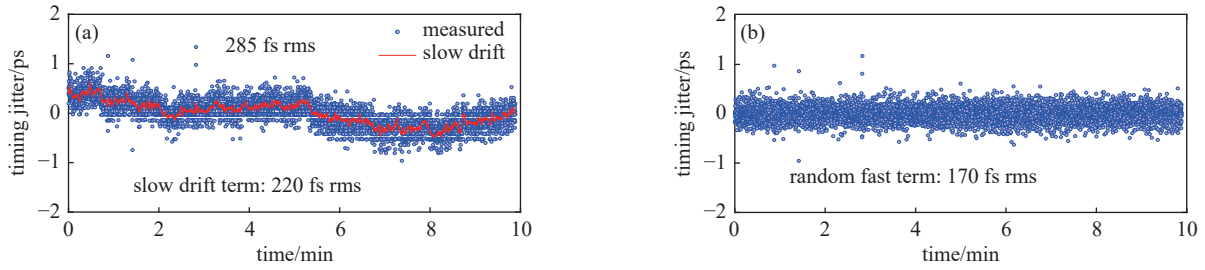


Fig. 17 The measured electron beam arrival time jitter in EO spatial decoding detection^[53]

图 17 电光空间解码测量的电子束到达时间抖动^[53]

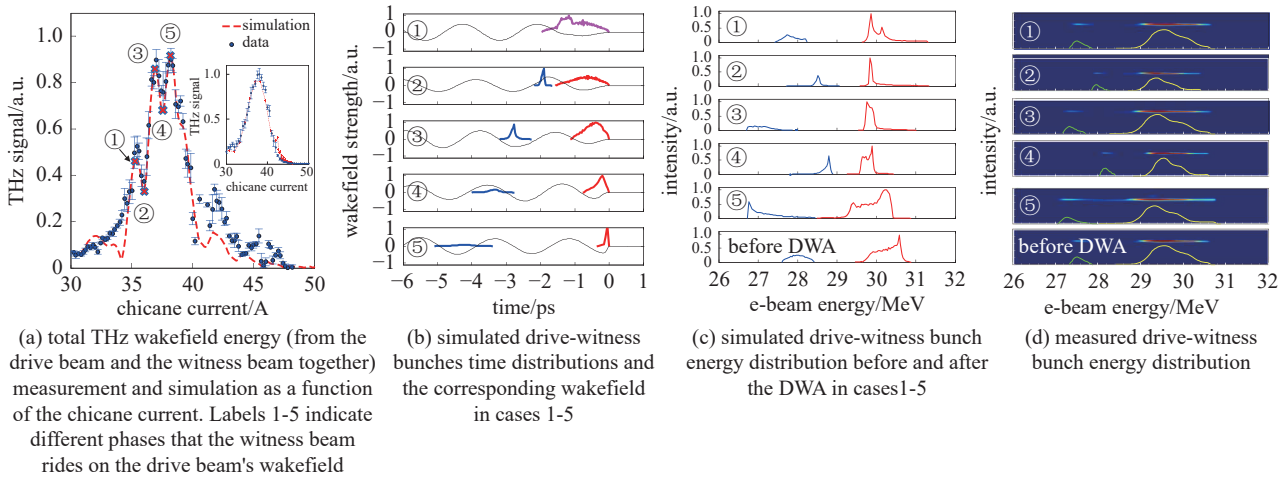


Fig. 18 Phase control with two-beam interferometry method in a terahertz dielectric wakefield accelerator^[62]

图 18 利用双电子束尾场干涉法控制太赫兹尾场加速相位^[62]

超短电子束的太赫兹辐射也可用于电子加速新原理研究。超短电子束 CTR THz 辐射与束团具有天然的时间同步关系,且具有高场强、径向极化的特点,因而适合于 THz 电子加速研究。清华大学加速器实验室利用超短电子束在金属薄膜前后表面的 CTR THz 辐射,在 TTX 束线上研究了相对论电子束的全束团太赫兹波加速和级联加速原理^[65]。

在实验中,利用大电荷量(~ 0.85 nC)的驱动束团经过金属薄膜产生相干渡越 THz 辐射,驱动太赫兹介质管加速器对后续的低电荷量(~ 1.9 pC)观测束进行加速。实验上,成功演示了利用铝膜的后向相干渡越辐射进行单级全束团太赫兹加速,并进一步利用驱动电子束团在镀钽薄膜前后表面的相干渡越辐射,成功演示了对相对论电子束的全束团级联太赫兹加速。图 19 为 THz 级联加速实验布局图。图 20 为 THz 级联加速典型实验结果。

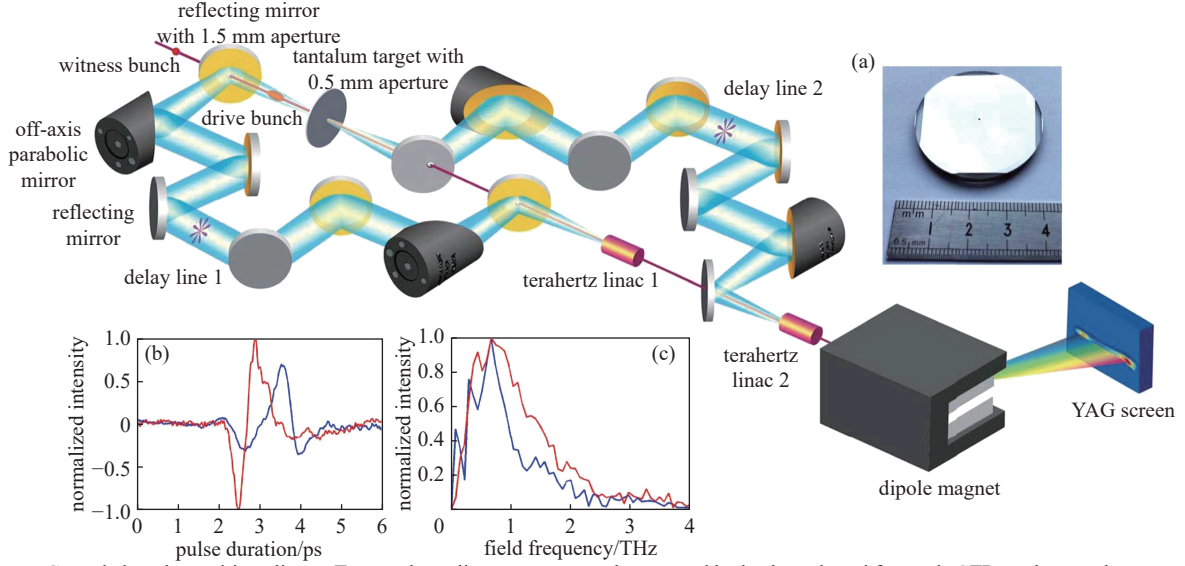
该实验工作在单级 THz 全束团加速中得到了 170keV 的能量增益,有效加速梯度为 155 MV/m;对于级联 THz 加速,其总能量达到了 204 keV。该实验的电子束能量增益均为目前世界上已报道的最高实验值。

该实验中 THz 加速带来的电子束横向发射度增长仅为 0.2%,表明该方案能够扩展到高强度太赫兹驱动源及多级级联的情况下。这一结果为全光太赫兹电子束加速及应用铺平了道路,未来有望发展基于全光太赫兹加速的超快电子衍射等应用装置。

可以预见,随着先进的电子束时空整形技术的发展以及对辐射新机制的探索,超短电子束的相干太赫兹辐射将具有更广阔的应用前景。电子束团丰富的自由度和可控性使我们能够对太赫兹的能谱、偏振、轨道角动量等特性进行自由的调控,探索更多的太赫兹物质相互作用现象。另外,X 射线自由电子激光可以产生与 X 射线探针高度同步的 THz 辐射,两者的结合可以实现超快物理化学过程的 THz-X 射线泵浦探测研究。

7 总结与展望

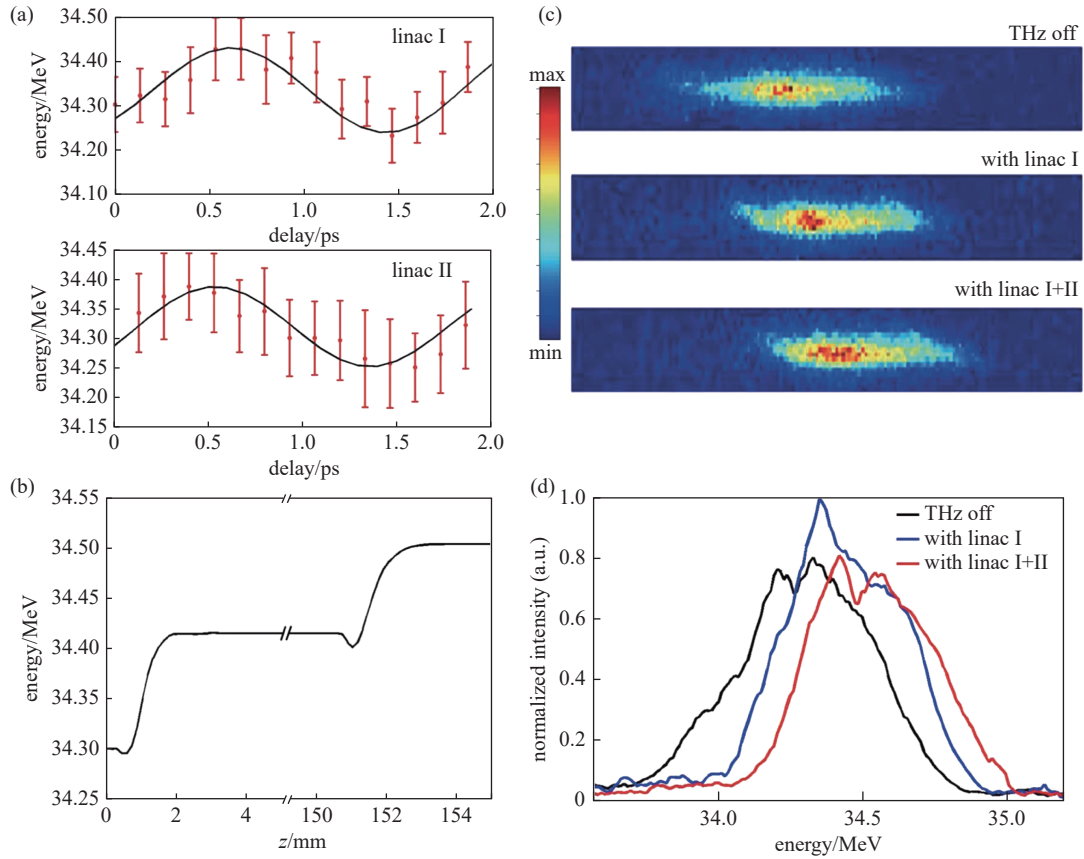
THz 科学的飞速进步离不开 THz 源的发展。当前的 THz 研究领域迫切需求一种能够覆盖 1~10 THz 的“THz 间隙”的,具备高能谱强度、高平均功率、高重频且连续可调谐的 THz 源。加速器产生的相对论性电子束能够产生高强度的 THz 辐射,其重复频率取决于电子束的重复频率,且可以通过对电子束的纵向压缩实现辐射频率



Cascaded terahertz-driven linacs. Two terahertz linacs are separately powered by backwards and forwards CTR terahertz pulses. The second stage is a copy of the first stage (as depicted in Fig. 1). The main difference is the newly designed CTR target, which enables considerable terahertz radiation in both the backwards and forwards directions. Insets: (a) the tantalum target, (b), (c) temporal and spectral profiles of the CTR terahertz pulse in the backwards (red) and forwards (blue) directions determined by electro-optical sampling measurements.

Fig. 19 Experimental setup of cascaded THz acceleration^[65]

图 19 THz 级联加速实验布局图^[65]



(a) the mean energy of the witness bunch as a function of the terahertz-electron delay when linacs I and II work individually. The red dots are measured values with error bars of one standard deviation over 100 shots, whereas the black lines are the simulation results. (b) the simulation result of the cascaded terahertz-driven acceleration. (c) snapshots of the energy spectrometer when linac I and linac II begin to operate in sequence. The colour scale refers to the grey of the figure pixels, which corresponds to the charge density. (d) normalized projected energy spectrum corresponding to (c)

Fig. 20 Experimental results of cascaded terahertz electron acceleration^[65]

图 20 THz 级联加速典型实验结果^[65]

的连续调谐,因此基于加速器的太赫兹源将能为解决“THz 间隙”难题提供一条切实可行的道路。

基于预调制电子束团串的新型加速器太赫兹源提高了电子束的纵向相干性,相比于基于超短电子束团的太赫兹源能够在更宽的频谱范围上提供高强度的 THz 辐射,是目前加速器领域的研究热点。近年来,随着电子束纵向整形技术的发展,多种基于调制电子束的加速器太赫兹源方案得到了实验验证。但是,在面对未来的潜在需求时,目前电子束的调制方案在纵向相干性上还需要开展进一步的研究,尤其是在高频 THz 波段以及大电荷量调制的情况下。电子束产生的太赫兹辐射在产生效率、传输、耦合等方面还有优化的空间,这需要加速器领域的研究者们共同努力。

参考文献:

- [1] Kampfrath T, Tanaka K, Nelson K A. Resonant and nonresonant control over matter and light by intense terahertz transients[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(9): 680-690.
- [2] Basov D N, Averitt R D, Hsieh D. Towards properties on demand in quantum materials[J]. *Nature Materials*, 2017, 16(11): 1077-1088.
- [3] Baierl S, Hohenleutner M, Kampfrath T, et al. Nonlinear spin control by terahertz-driven anisotropy fields[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(11): 715-718.
- [4] Jin Zuanming, Tkach A, Casper F, et al. Accessing the fundamentals of magnetotransport in metals with terahertz probes[J]. *Nature Physics*, 2015, 11(9): 761-766.
- [5] Fleischer S, Zhou Yan, Field R W, et al. Molecular orientation and alignment by intense single-cycle THz pulses[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107: 163603.
- [6] Lu Jian, Li Xian, Hwang H Y, et al. Coherent two-dimensional terahertz magnetic resonance spectroscopy of collective spin waves[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118: 207204.
- [7] Zhang Xicheng, Xu Jingzhou. Introduction to THz wave photonics[M]. New York: Springer, 2010.
- [8] Horiuchi N. Bright terahertz sources[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(9): 670-671.
- [9] Wen Xiaodong, Huang Senlin, Lin Lin, et al. Superradiant THz undulator radiation source based on a superconducting photo-injector[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2016, 820: 75-79.
- [10] Zhao Gang, Huang Senlin, Qin Weilun, et al. Tunable high-power terahertz free electron laser amplifier[C]//Proceedings of FEL. 2015: 305-307.
- [11] Zhao Gang, Zhao Sheng, Huang Senlin, et al. Strong electron density modulation with a low-power THz source for generating THz superradiant undulator radiation[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2019, 22: 060701.
- [12] Zhu Juanfeng, Du Chaohai, Li Fanhong, et al. Free-electron-driven multi-frequency terahertz radiation on a super-grating structure[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 181184-181190.
- [13] Liang Linbo, Liu Weihao, Jia Qika, et al. Superimposed-harmonic Smith-Purcell free-electron lasers driven by periodic electron-bunches[J]. *Physics of Plasmas*, 2019, 26: 013102.
- [14] Zhang Haoran, Wang Wenxing, Jiang Shimin, et al. Generation of frequency-chirped density modulation electron beam for producing ultrashort THz radiation pulse[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2020, 23: 020704.
- [15] Zhang Haoran, Wang Wenxing, Jiang Shimin, et al. Tuning electron bunch with a longitudinally shaped laser to generate half-cycle terahertz radiation pulse[J]. *Journal of Instrumentation*, 2021, 16: P08019.
- [16] Wu Dai, Li Ming, Yang Xinfan, et al. First lasing of the CAEP THz FEL facility driven by a superconducting accelerator[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, 1067: 032010.
- [17] Wu Dai, Zhou K, Yan L G, et al. Design of high-repetition terahertz super-radiation based on CAEP THz FEL superconducting beamline[C]//Proceedings of the 39th Free Electron Laser Conference. 2019: 73-76.
- [18] Liu Xu, Liu Kaifeng, Qin Bin, et al. Optical alignment and tuning system for the HUST THz-FEL[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2016, 837: 58-62.
- [19] Li Heting, Jia Qika, Zhang Shancai, et al. Design of FELiChem, the first infrared free-electron laser user facility in China[J]. *Chinese Physics C*, 2017, 41: 018102.
- [20] Svidzinsky A A, Yuan Luqi, Scully M O. Quantum amplification by superradiant emission of radiation[J]. *Physical Review X*, 2013, 3: 041001.
- [21] Dicke R H. Coherence in spontaneous radiation processes[J]. *Physical Review*, 1954, 93(1): 99-110.
- [22] Gover A, Iaconescu R, Friedman A, et al. Superradiant and stimulated-superradiant emission of bunched electron beams[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2019, 91: 035003.
- [23] Tang Chuanxiang, Huang Wenhui, Li Renkai, et al. Tsinghua Thomson scattering X-ray source[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2009, 608(1): S70-S74.
- [24] Wang Dan, Yan Lixin, Du Yingchao, et al. Generating ultrabroadband terahertz radiation based on the under-compression mode of velocity bunching[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84: 022704.
- [25] Yan Lixin, Du Qiang, Du Yingchao, et al. UV pulse shaping for the photocathode RF gun[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2011, 637(1): S127-S129.
- [26] Weling A S, Auston D H. Novel sources and detectors for coherent tunable narrow-band terahertz radiation in free space[J]. *Journal of the Optical Society of*

- America B*, 1996, 13(12): 2783-2792.
- [27] Siders C W, Siders J L W, Taylor A J, et al. Efficient high-energy pulse-train generation using a 2nd-pulse Michelson interferometer[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(22): 5302-5305.
- [28] Yan Lixin, Hua Jianfei, Du Yingchao, et al. UV pulse trains by α -BBO crystal stacking for the production of THz-rap-rate electron bunches[J]. *Journal of Plasma Physics*, 2012, 78(s4): 429-431.
- [29] Yan Lixin, Du Qiang, Du Yingchao, et al. Ultrashort electron bunch train production by UV laser pulse stacking[C]//Proceedings of 1st International Particle Accelerator Conference. 2010: 3210-3212.
- [30] You Yan, Yan Lixin, Du Yingchao, et al. High power THz source based on coherent radiation of picosecond relativistic electron bunch train[J]. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2011, 54(2): 197-200.
- [31] Su Xiaolu, Wang Dan, Yan Lixin, et al. Measurement of pre-bunched beam's longitudinal form factor based on radiation from a tunable-gap undulator[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89: 013304.
- [32] Wang Dan, Yan Lixin, Du Yingchao, et al. Theoretical analysis and simulation study of the deep overcompression mode of velocity bunching for a comblike electron bunch train[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2018, 21: 024403.
- [33] Wang Dan, Zhang Hongze, Tian Qili, et al. Twin-bunch compression via velocity bunching in a traveling wave accelerator[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2018, 21: 084403.
- [34] Musumeci P, Li Renkai, Marinelli A. Nonlinear longitudinal space charge oscillations in relativistic electron beams[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106: 184801.
- [35] Musumeci P, Li Renkai, Roberts K G, et al. Controlling nonlinear longitudinal space charge oscillations for high peak current bunch train generation[J]. *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams*, 2013, 16: 100701.
- [36] Zhang Zhen, Yan Lixin, Du Yingchao, et al. Tunable high-intensity electron bunch train production based on nonlinear longitudinal space charge oscillation[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116: 184801.
- [37] Feng Hanqi, Zhou Zheng, Wu Yipeng, et al. Generation of tunable 10-mJ-level terahertz pulses through nonlinear plasma wakefield modulation[J]. *Physical Review Applied*, 2021, 15: 044032.
- [38] Feng Hanqi, Yan Lixin, Wu Yipeng, et al. Near-ideal energy modulator for tunable THz pulse generation using sectioned hollow channel plasma system[J]. *Physics of Plasmas*, 2021, 28: 103101.
- [39] Zhang Zhen, Yan Lixin, Du Yingchao, et al. Generation of high-power, tunable terahertz radiation from laser interaction with a relativistic electron beam[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2017, 20: 050701.
- [40] Gover A, Sprangle P. A unified theory of magnetic bremsstrahlung, electrostatic bremsstrahlung, Compton-Raman scattering, and Cerenkov-Smith-Purcell free-electron lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1981, 17(7): 1196-1215.
- [41] Liang Yifan, Du Yingchao, Su Xiaolu, et al. Observation of coherent Smith-Purcell and transition radiation driven by single bunch and micro-bunched electron beams[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112: 053501.
- [42] Liang Yifan, Du Yingchao, Wang Dan, et al. Selective excitation and control of coherent terahertz Smith-Purcell radiation by high-intensity period-tunable train of electron micro-bunches[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113: 171104.
- [43] Su Xiaolu, Yan Lixin, Wang Dan, et al. Recent experimental results on high-peak-current electron bunch and bunch trains interacting with a THz undulator[C]//Proceedings of the 38th International Free Electron Laser Conference. 2017: 474-476.
- [44] Su Xiaolu, Wang Dan, Tian Qili, et al. Widely tunable narrow-band coherent Terahertz radiation from an undulator at THU[J]. *Journal of Instrumentation*, 2018, 13: C01020.
- [45] Antipov S, Baryshev S V, Kostin R, et al. Efficient extraction of high power THz radiation generated by an ultra-relativistic electron beam in a dielectric loaded waveguide[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109: 142901.
- [46] Wang Dan, Su Xiaolu, Du Yingchao, et al. Non-perturbing THz generation at the Tsinghua University Accelerator Laboratory 31 MeV electron beamline[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89: 093301.
- [47] Wang Dan, Su Xiaolu, Tian Qili, et al. Preliminary results on the resonant excitation of THz wakefield in a multi-mode dielectric loaded waveguide by bunch train[C]//Proceedings of IPAC. 2017: 3426-3428.
- [48] Fisher A, Park Y, Lenz M, et al. Single-pass high-efficiency terahertz free-electron laser[J]. *Nature Photonics*, 2022, 16(6): 441-447.
- [49] Yu Zijia, Zhang Liwen, Liu Weihao, et al. Coherent terahertz emission using metasurfaces to intercept a flat electron beam[J]. *Physical Review Applied*, 2022, 17: 014038.
- [50] Kaminer I, Kooi S E, Shiloh R, et al. Spectrally and spatially resolved Smith-Purcell radiation in plasmonic crystals with short-range disorder[J]. *Physical Review X*, 2017, 7: 011003.
- [51] Liu Wenxin, Huang Wenhui, Du Yingchao, et al. Terahertz coherent transition radiation based on an ultrashort electron bunching beam[J]. *Chinese Physics B*, 2011, 20: 074102.
- [52] Wang Wei, Du Yingchao, Yan Lixin, et al. Temporal profile monitor based on electro-optic spatial decoding for low-energy bunches[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2017, 20: 112801.
- [53] Tian Qili, Du Yingchao, Xu Hanxun, et al. Single-shot spatial-temporal electric field measurement of intense terahertz pulses from coherent transition

- radiation[J]. [Physical Review Accelerators and Beams](#), 2020, 23: 102802.
- [54] Li Qian, Stoica V A, Paściak M, et al. Subterahertz collective dynamics of polar vortices[J]. [Nature](#), 2021, 592(7854): 376-380.
- [55] Disa A S, Nova T F, Cavalleri A. Engineering crystal structures with light[J]. [Nature Physics](#), 2021, 17(10): 1087-1092.
- [56] Kozina M, Fechner M, Marsik P, et al. Terahertz-driven phonon upconversion in SrTiO₃[J]. [Nature Physics](#), 2019, 15(4): 387-392.
- [57] Baldini E, Belvin C A, Rodriguez-Vega M, et al. Discovery of the soft electronic modes of the trimeron order in magnetite[J]. [Nature Physics](#), 2020, 16(5): 541-545.
- [58] Schubert O, Hohenleutner M, Langer F, et al. Sub-cycle control of terahertz high-harmonic generation by dynamical Bloch oscillations[J]. [Nature Photonics](#), 2014, 8(2): 119-123.
- [59] Kurihara T, Watanabe H, Nakajima M, et al. Macroscopic magnetization control by symmetry breaking of photoinduced spin reorientation with intense terahertz magnetic near field[J]. [Physical Review Letters](#), 2018, 120: 107202.
- [60] Maag T, Bayer A, Baierl S, et al. Coherent cyclotron motion beyond Kohn's theorem[J]. [Nature Physics](#), 2016, 12(2): 119-123.
- [61] Su Xiaolu, Yan Lixin, Du Yingchao, et al. Monitoring of electron bunch length by using Terahertz coherent transition radiation[J]. [Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms](#), 2017, 402: 157-161.
- [62] Wang Dan, Su Xiaolu, Yan Lixin, et al. Phase control with two-beam interferometry method in a terahertz dielectric Wakefield accelerator[J]. [Applied Physics Letters](#), 2017, 111: 174102.
- [63] Hanuka A, Emma C, Maxwell T, et al. Accurate and confident prediction of electron beam longitudinal properties using spectral virtual diagnostics[J]. [Scientific Reports](#), 2021, 11: 2945.
- [64] Konoplev I V, Doucas G, Harrison H, et al. Single shot, nondestructive monitor for longitudinal subpicosecond bunch profile measurements with femtosecond resolution[J]. [Physical Review Accelerators and Beams](#), 2021, 24: 022801.
- [65] Xu Hanxun, Yan Lixin, Du Yingchao, et al. Cascaded high-gradient terahertz-driven acceleration of relativistic electron beams[J]. [Nature Photonics](#), 2021, 15(6): 426-430.