

太赫兹加速——开启紧凑加速器的新途径*

胥汉勋^{1,2} 田其立^{1,2} 李任恺^{1,2,†} 黄文会^{1,2,††}

(1 粒子技术与辐射成像教育部重点实验室 北京 100084)

(2 清华大学工程物理系 北京 100084)

2021-09-01 收到

† email: lirk@tsinghua.edu.cn

†† email: huangwh@tsinghua.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20220702

THz-driven acceleration——A new way to start compact accelerator

XU Han-Xun^{1,2} TIAN Qi-Li^{1,2} LI Ren-Kai^{1,2,†} HUANG Wen-Hui^{1,2,††}

(1 Key Laboratory of Particle and Radiation Imaging, Ministry of Education, Beijing 100084, China)

(2 Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

摘要 太赫兹电子加速技术是近年来先进加速原理的研究热点和前沿之一,有望为未来高品质加速器的小型化提供新思路。自2015年E. A. Nanni成功完成了太赫兹加速的原理性验证实验后,太赫兹电子枪、太赫兹电子加速、太赫兹束流操控及诊断技术取得了巨大的突破,国内外多家单位都深入开展了太赫兹加速的物理与技术研究,并规划建设基于太赫兹加速技术的紧凑型加速器装置。文章将简述太赫兹电子加速的物理原理、关键技术、研究现状以及其所推动的相关应用研究。

关键词 太赫兹电子加速, 太赫兹电子枪, 太赫兹束流诊断及操控, 太赫兹源

Abstract Terahertz (THz)-driven electron acceleration is now an emerging direction for developing compact high-brightness particle accelerators. Following the experimental demonstration of THz acceleration by Nanni *et al* in 2015, great progress has been made in the development of THz-driven electron guns, THz-driven acceleration, and THz-based beam manipulation and diagnostics. Research activities related to the physics and technology of THz acceleration are being actively pursued worldwide. Several compact accelerators based on this unique technology have been proposed and are now under construction. This review will focus on the development of THz-driven electron acceleration over the past decades as well as its technical challenges and related applications.

Keywords THz-driven electron acceleration, THz-driven electron guns, THz-based beam manipulation and diagnostics, THz sources

1 引言

在过去的近百年里,粒子加速器一直是科学发现的关键引擎。它为研究人员提供了极其强大的微观探针——高能带电粒子,用于开展从物质

的起源到原子运动时间尺度上的反应动力学研究;同时粒子加速器也是工业应用和生命健康的重要工具,广泛应用于新能源、安全检测、癌症治疗、新材料研发等领域。目前传统加速器设施中常用射频(RF)功率馈入常温或超导结构,在结构中激励起具有纵向加速电场的电磁场模式,通

* 科学挑战计划(批准号: TZ2018005)资助项目

过控制加速结构中电磁场的相速度来实现电磁场与带电粒子的同步相互作用,将能量传递给经过的带电粒子,使其加速到高的能量,例如欧洲核子中心的大型粒子对撞机(LHC)、美国斯坦福国家实验室的三公里直线加速器(SLAC)、我国的北京正负电子对撞机(BEPC II)、上海同步辐射光源(SSRF)、兰州重离子加速器(HIRFL)、东莞的中国散裂种子源(CSNS)、合肥光源(HLS)等等以及正在建设中的一系列加速器大科学装置。

随着加速器应用领域的扩展和对束流能量等性能要求的不断提高,对加速器的易用程度、装置规模、投资造价、建设周期等提出了挑战。原则上,向加速结构中馈入更多射频功率会产生更高的加速电场,在实现相同能量增益的情况下,加速器将占用更小的空间。然而,因为场强与输入功率的平方根成正比,这需要研制和使用大型和昂贵的射频功率源;同时,受限于加速结构中的射频击穿效应和场发射效应,加速电场的大幅度提高存在困难。研究人员正在不断通过改进材料和新颖的结构设计来减弱这些限制因素的影响,同时为克服其瓶颈限制,也催生了一系列新加速原理的提出和探索。

射频击穿效应是由于加速结构内部金属边界处的局部场强过强,形成等离子体放电,造成局部打火,使得加速结构内的耦合功率骤降,装置无法正常工作,严重时可能会损伤结构表面,击穿发生时的反射射频脉冲还可能对射频功率源产生很大的冲击。根据实验数据拟合得到的射频击穿的阈值电场与入射的射频场频率 f 和脉冲宽度 τ 有如下关系^[1]:

$$E_s \propto \tau^{-1/4} f^{1/2},$$

可以预计,采用更高的工作频率以及更短的脉冲宽度可以提高射频击穿的阈值场强,进而可以在结构中实现更高的加速梯度。

基于这样的认识,以及随着激光技术和束流操控技术的提高,科学家探索出了激光加速^[2]、太赫兹加速^[3]、等离子体尾场加速^[4]等先进的加速原理。激光加速利用激光的电场加速粒子,结构非常紧凑,尺寸可以做到芯片大小。但由于激光波长非常短,相应的加速结构的加工精度要求很

高,加速电场与被加速粒子的同步要求在亚飞秒量级,结构加工和相位同步都具有极大的挑战性。此外,激光电场的周期很短,可加速粒子的数目非常有限,即使在远红外波段,可承载的电荷量也只能在飞库量级。等离子体尾场加速已经在实验上实现了几十GV/m的超高加速梯度,目前研究的重要内容之一是提高束流的品质和稳定性并开拓应用,同时,获得高重复频率的束流还受限于高功率激光器的重复频率。太赫兹电磁波介于微波和光波之间,采用太赫兹电磁场加速带电粒子可以同时具有微波加速和激光加速的某些优点。首先,太赫兹电磁场的波长和脉冲长度足够短,射频击穿的阈值场强达到了GV/m的量级,因此,太赫兹加速有望实现GV/m的高加速器梯度;其次,太赫兹电磁场的波长在毫米量级,其加速结构的典型尺寸也在相同量级,可以用传统的加工方式进行加工,精度控制水平高;此外,如果太赫兹源采用光学方法产生,加速器的粒子源基于光电效应(光阴极),那么二者可以由同源的激光系统驱动,具有先天的时间同步特性,束流稳定性好。尽管具有这些潜在的优势,历史上,由于太赫兹波段的辐射源可用的峰值和平均功率有限,太赫兹加速在相当长的一段时间内发展缓慢。近几十年来,在太赫兹光谱学、成像和等离子体科学方面令人兴奋的应用推动下,太赫兹源的性能得到了快速提高:倾斜脉冲前沿、啁啾和延迟等技术,以及大面积有机晶体等新型非线性材料大大提高了基于激光脉冲的太赫兹源的太赫兹产生效率,并拓宽了可实现的光谱范围;基于电子束驱动太赫兹结构通过准光模式转换器提取高功率电磁波的太赫兹源,具有灵活性和易于光谱控制的特点。基于以上发展,太赫兹加速有加速梯度高、束流稳定性好、结构加工简便、装置紧凑、经济性好等优势,成为紧凑型加速器极具潜力的方案之一。

2015年美国麻省理工大学(MIT)的E. A. Nanni课题组在实验上验证了太赫兹加速的可能性^[2],其后MIT,德国电子同步辐射加速器研究所(DESY),美国加利福尼亚大学(UCLA),英国的紧凑型直线加速器装置(CLARA),清华大学以及

上海交通大学等国内外多家单位纷纷就太赫兹加速的各个环节开展了理论和实验研究，并先后成功验证了太赫兹电子枪，太赫兹低能/高能电子加速，太赫兹束流诊断和控制等关键技术。随着太赫兹源技术的发展，毫焦量级的单周期太赫兹源以及亚毫焦量级的多周期太赫兹源先后实现，DESY，佩奇大学以及清华大学先后提出了基于全光太赫兹加速技术的太赫兹电子源方案。这些关键技术的验证极大地推动了太赫兹加速技术的发展，也为太赫兹加速技术在超快光学、先进光源、生物以及材料科学等领域的推广提供新的契机。下面将对太赫兹电子枪、太赫兹加速、太赫兹束流操控与诊断、太赫兹加速器束线以及太赫兹源等5个方面的发展作分别介绍。

2 太赫兹电子枪

在过去的近一个世纪里，粒子加速器在利用高能对撞机、X射线光源和电子衍射仪等先进装置和仪器开展基础研究方面取得了突破性进展，发挥了重大作用。具有keV—MeV能量、fs脉冲长度结构、低发射度、低能散的高品质电子束，是凝聚态物理、材料、化学、生物等领域超快过程研究的重要探针，也是逆康普顿散射X/γ射线源和短波长自由电子激光等装置的驱动源。电子束由电子枪产生，影响其性能的重要因素是阴极表面的电场大小。电子枪的核心挑战是尽可能快地将电子从静止状态加速到高能，以避免空间电荷效应造成的品质退化，该效应与电子能量的平方或引出场的平方成反比。电子枪的加速场越强，束流的流强上限越大，电子越快被加速到更高能量，受到空间电荷效应的影响就越小，从而获得并保持更高的亮度。因此电子枪设计追求高的阴极电场，需要解

决的难题主要在于将太赫兹波与非相对论电子进行很好的相位匹配。受场发射和电场击穿的限制，目前直流高压电子枪的阴极电场约为10 MV/m，微波电子枪阴极面电场约为100 MV/m，因此，太赫兹电子枪的发展有迫切需求和巨大空间。根据驱动电子枪的太赫兹脉冲的时间结构，太赫兹电子枪的研究分为两个方向：单周期太赫兹脉冲驱动和多周期太赫兹脉冲驱动。

由美国MIT、德国DESY和汉堡大学组成的研究组很早开始研究并持续产出太赫兹电子枪相关的成果。2015年，他们采用双平板平行波导的电子枪结构，其中一块波导平板两端渐变张开作为太赫兹波的耦合器，另一块平板作为光阴极。Yb:KYW激光器(1030 nm)分为两路，一路通过光整流的方法产生单周期太赫兹，在电子枪中产生强加速电场；另一路倍频产生515 nm的绿光照射光阴极，通过双光子效应产生光电子，被结构内的太赫兹场加速，如图1(a)所示^[5]。2016年该研究组继续对电子枪结构和性能进行优化设计，将两块波导平板都进行了尺寸渐变以提高耦合效

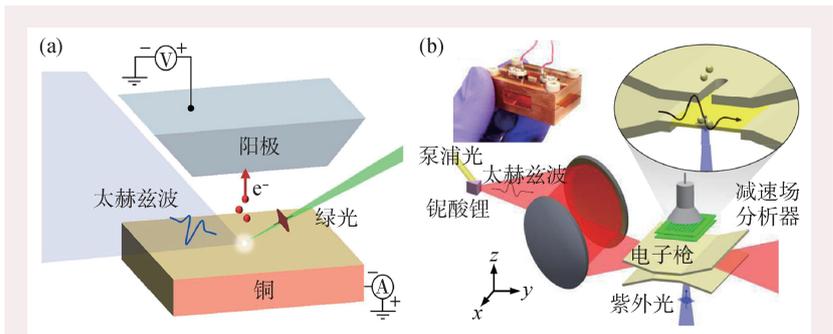


图1 双平板平行波导结构的太赫兹电子枪示意图^[5, 6] (a) 单边渐变耦合的太赫兹电子枪；(b) 双边渐变耦合的太赫兹电子枪

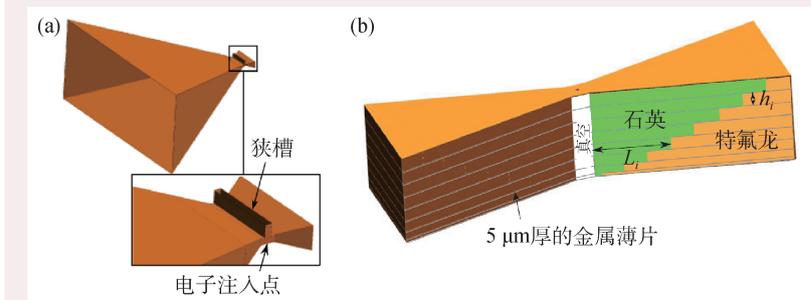


图2 渐变矩形波导结构的太赫兹电子枪示意图^[7] (a) 带短路面的单馈太赫兹电子枪；(b) 多介质层加载的双馈太赫兹电子枪

率，同时驱动激光采用背入射的方式垂直照射光阴极，如图1(b)所示，优化后的结构能够产生约350 MV/m的峰值电场，将光电子从静止加速到0.8 keV^[6]。

该研究组通过模拟继续对电子枪结构和性能进行优化设计，采用尺寸渐变的矩形波导作为电子枪的主体结构，在间隙内对电场和磁场进行聚焦(图2(a))，同时在波导的另一端添加短路面使得反射波与入射波相干叠加，进一步提高了间隙内的加速电场。通过在波导内添加长度和厚度不同的介质层对太赫兹波的波前进行适当的时间延迟，使得产生的光电子在通过每层的加速间隙时都处于加速相位，能够极大地提高太赫兹波的利用率。此外，采用双馈的方式从电子枪的两端耦合两束电场方向相同、传播方向相反的太赫兹波，能够在加速间隙内实现电场相加，磁场相消的叠加效果，进一步提高了电子枪的加速效率，如图2(b)所示^[7]。

该研究组来自DESY和汉堡大学的成员，也将传统射频加速结构的设计思路拓展到了太赫兹波段，设计了多周期太赫兹脉冲驱动的3.5腔的太赫兹电子枪，如图3所示，可以看到鼻锥、门扭

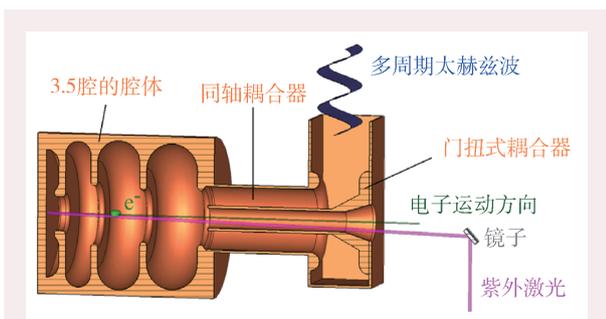


图3 腔链结构的太赫兹电子枪示意图^[8]

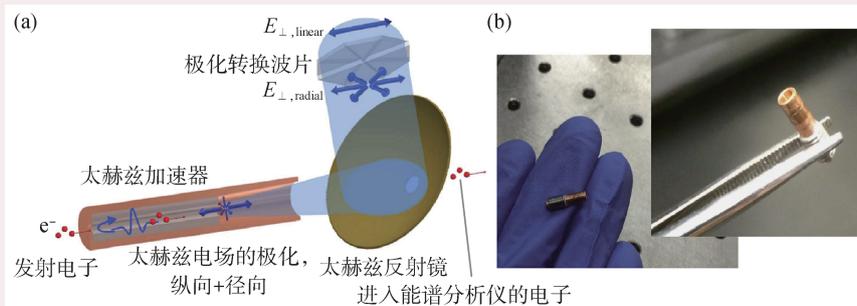


图4 (a) 太赫兹电子加速的原理性验证实验示意图；(b) 两张图是太赫兹介质管加速器的实物图^[3]

式耦合器等典型的射频结构特征。该研究工作也设计了两级多单元的后加速结构，有望将电子枪产生的电子束加速到1 MeV^[8]。SLAC设计并制造了一支太赫兹场致发射电子枪，并于2020年报道了其结构和冷测结果。该电子枪为典型的2腔谐振腔链结构，在首腔的阴极面上放置了场致发射针尖阵列，用一个110 GHz的回旋管从腔链另一端馈入太赫兹功率，并在腔链内建立起 π 模太赫兹场，用于加速针尖阵列所发射出来的电子束^[9]。

3 太赫兹电子加速

如前所述，处于微波和光波之间的太赫兹脉冲兼顾了两者的部分优势。一方面，波长与激光相比足够长，可以用传统的加工技术制造加速结构，提供准确的场型和同步控制，并容纳足够大的电荷量。例如，对于0.3 THz的太赫兹脉冲，波长为1 mm，1°相位精度对应于9.3 fs的定时抖动，这相对容易实现。另一方面，相对于微波，频率足够高，加速结构表面电场的击穿阈值增加到GV/m范围。此外，基于光学产生技术，由kHz重复频率的皮秒激光器可以产生kHz短太赫兹脉冲(约1 ps)，这可以显著降低脉冲加热对加速结构的影响，同时也有利于加速器的高重复频率工作。

E. A. Nanni等在2015年成功开展了太赫兹加速的原理性验证实验^[3]。实验中基于光整理的线偏振太赫兹脉冲首先被分段波片转换为径向偏振的脉冲，通过离轴抛物面镜聚焦后被馈入介质管加载的金属圆形波导。波导的一端为渐变耦合器，另一端为带小孔(用于电子束注入)的短路面。

太赫兹脉冲从下游耦合到波导内，传输到短路面后反射，与小孔注入的电子束同向传输，通过优化介质尺寸可以实现太赫兹脉冲与被加速电子束的同步，如图4所示。实验利用中心频率为0.45 THz、能量为10 μ J的太赫兹脉冲加速25 fC、初始能量为60 keV的电子束团，在3 mm

的作用长度上实现了7 keV的能量增益，有效加速梯度为2.5 MV/m。尽管该实验获得的能量增益不大，但实现了太赫兹加速的原理验证，并具有可扩展性。

UCLA的E. Curry等在2018年采用逆自由电子激光机制，开展了太赫兹脉冲加速和操控电子束的研究^[10]。为此，将电子束与太赫兹脉冲在磁波荡器内同向传输，太赫兹场与波荡器的周期磁场形成了与电子束同步的有质场。通过调整波荡器内的弯曲平行板波导的间距或波荡器磁场，可以实现电子束与太赫兹

脉冲的长距离同步。通过改变相对相位，也展示了使用基于激光的太赫兹源进行相对论电子束的束长压缩和到达时间测量。该研究为太赫兹脉冲与相对论电子束相互作用中的结构色散、失相、走离(walk-off)提供了解决方案。

上述几种加速结构中，太赫兹脉冲是纵向馈入的，与被加速电子束同轴运动，也可以设计横向馈入的结构来与电子束相互作用。2018年DESY研究组研制出分段式太赫兹电子加速和操控结构(segmented terahertz electron accelerator and manipulator, STEAM)，它由纵向多个介质层加载的双平板平行波导组成，如图5所示，金属片分隔介质层，太赫兹脉冲由横向两侧的喇叭型天线馈入。结合动力学来设计介质层的厚度和长度，使太赫兹脉冲与电子束同步。调控两侧馈入的太赫兹脉冲的相位，STEAM结构可以工作在：(1)电场增强、磁场抵消的电场模式，实现对电子束的纵向加速/减速，或者纵向展宽/压缩；(2)磁场增强、电场抵消的磁场模式，实现横向聚焦，或者提供与时间相关的横向偏转，从而提供电子束的纵向分布信息条纹模式。这些功能模式可以通过光路延迟快速切换^[11]。2019年，STEAM结构的多功能特性得到了展示。DESY研究组利用两个STEAM结构开展了太赫兹加速实验，实验首先利用第一级STEAM结构对直流高压电子枪产生的电子束进行束长压缩，再利用第二级STEAM

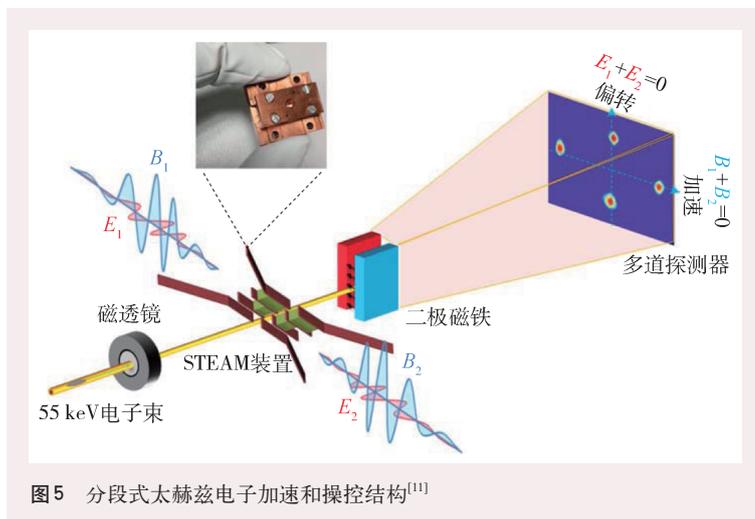


图5 分段式太赫兹电子加速和操控结构^[11]

实现了约70 keV的能量增益^[12]，这标志着太赫兹加速从原理验证走向了束流参数的多维度调控。2020年英国Cockcroft的研究组在CLARA加速器实验装置上，利用介质加载的矩形波导开展了太赫兹波对相对论电子束的能量调制和加速实验研究。实验中利用多周期太赫兹波在介质加载的矩形波导中产生LSM11模式，对35 MeV的电子束进行能谱调制和加速，对6 ps电子束的调制深度达到了90%，将2 ps的短电子束加速了10 keV，加速梯度为2 MV/m^[13]。

由于目前由激光到太赫兹的转化效率还不高(约1%)，单个加速结构中太赫兹脉冲与电子束的作用长度有限，因此单段太赫兹加速的绝对能量增益还不高。为了得到高能量电子束，需要探索太赫兹的级联加速。2020年，DESY研究组利用两根介质加载圆波导首次演示了低能电子束的级联太赫兹加速。实验利用周期性极化铌酸锂(PPLN)产生线偏振多周期太赫兹波，在第一根介质管加速器中对电子束进行第一次加速，再利用两个太赫兹透镜收集从第一个介质管中辐射出来的太赫兹波，并耦合到第二根介质管中对电子束进行二次加速。实验中观测到了束团加速、纵向压缩和横向聚焦的效果，级联实验得到了1.6 keV的能量增益^[14]。2020年，清华大学利用束流驱动的太赫兹源驱动介质管加速器对相对论电子束进行加速实验研究，首次实现了太赫兹加速器对相对论电子束的级联加速方案。研究团队利用传统

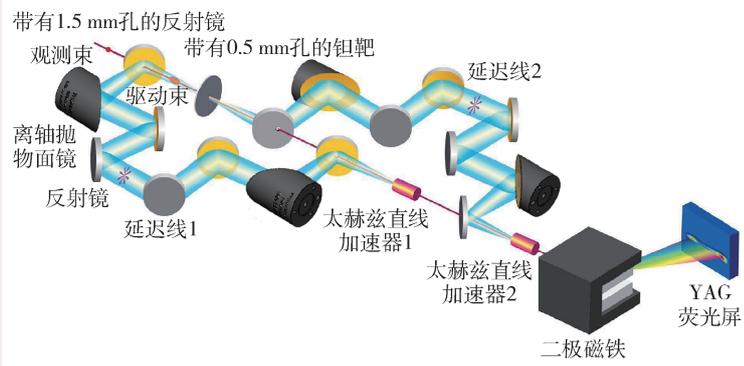


图6 基于束流产生的太赫兹源的级联太赫兹实验示意图^[15]

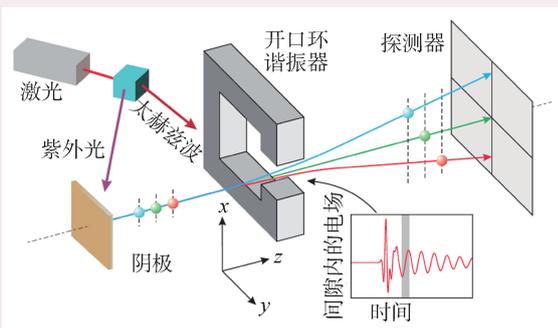


图7 太赫兹束流的纵向分布示意图^[17]

加速器产生两个电子束，前面的电子束打在金属靶上产生前向和后向的相干渡越辐射。利用光路收集前向和后向的太赫兹波分别耦合到两根太赫兹介质管加速器中建立加速场，对后续进入介质管的第二个电子束进行加速，如图6所示。该方案利用同源的驱动激光在加速器束线上同时产生强太赫兹波和超短的相对论电子束，并保证了二者天然的时间同步特性，使得强太赫兹电场能够稳定地对相对论电子束进行同步加速。两级加速的能量增益达到了204 keV，单级加速的有效梯度达到了155 MV/m，该加速梯度和能量增益是当前太赫兹加速领域的最高实验记录值。单级加速和级联加速实验中都实现了清晰的全束团加速效果，为太赫兹加速走向应用奠定了基础^[15]。随后，上海交通大学实现了光学太赫兹源对相对论电子束高效率的级联加速。实验采用两束基于周期性铌酸锂阵列产生的多周期太赫兹脉冲，在两根介质管加速器中对3 MeV的电子束进行级联加速，实现了1.5 keV/nJ¹²的高加速效率和几乎

100%的电子束俘获效率，并观测到了30 keV的两级总能量增益^[16]。这标志着级联太赫兹加速从原理验证走向了束流参数精细调控。

4 太赫兹束流操控与诊断

太赫兹电磁波的典型周期在皮秒量级，其过零点的近线性区在百飞秒量级。近年来强太赫兹源的发展，使太赫兹波在超短电子束的操纵和诊断方面展现了极大的潜力。其基本原理如图7所示^[17]，通过结构设计和激励方式选择，可以在束线上产生与电子束运动方向平行或垂直的高梯度电场，特别是在正负梯度反转(过零点)的区间，电场线性变化。使电子束中心在时间零点通过太赫兹结构，如果电场方向与电子运动方向平行，将在束团内产生一个线性的能量啁啾，与后续

的色散元件配合，可以实现束团的纵向压缩或拉伸(依赖于梯度的正负)；如果电场方向与电子运动方向垂直，束团将感受到随纵向位置变化的横向偏转力，经过合适的漂移传输，垂直于电子运动方向的束流分布将包含纵向束团的分布信息，反演探测器获得的束流的密度分布，就可以得到束团的纵向分布(THz streaking)。当入射电子束的到达时间抖动超过太赫兹半周期时，一维的太赫兹偏转有可能产生图像的重叠，无法准确判断到达时间和标定偏转强度，可以采用圆极化的太赫兹波对电子束施加一个跟随太赫兹波偏振方向的偏转力来解决这一难题^[18]。由于较短的周期和较强的场，目前基于太赫兹的束流操控和诊断可以获得约10 fs的束团长度和飞秒量级甚至更好的分辨率。

德国慕尼黑大学的研究组在2016年最先开展了用太赫兹波压缩和测量电子束长度的实验，如图8所示，他们用多周期太赫兹脉冲45°照射一个蝴蝶型的金属狭缝，产生纵向的加速电场，该结构可以增强太赫兹的电场。电子束中心通过太赫兹波负斜率的过零相位，电子束的头部被减速，

尾部被加速，经过漂移后，束团的尾部电子追上头部电子，使得束长被压缩。为了研究束团压缩情况，采用另外一束太赫兹波以 90° 照射另外的蝴蝶型狭缝，产生横向的偏转电场，电子束经过狭缝时，不同纵向位置的电子感受到不同的偏转力从而在下游的观测屏上发生不同程度的位置偏移，经过标定后，即可根据探测器上电子束的分布信息反演出电子束的纵向分布信息，同时还可以根据探测器上电子束中心的偏移信息反演出电子束的到达时间信息^[19]。

2018年，SLAC、上海交通大学和DESY先后采用狭缝结构^[20]、矩形波导结构^[21]和STEAM结构^[11]开展了相关的电子束长度测量实验，实现了对百飞秒电子束的束长压缩、束团长度和到达时间抖动的测量。随后，SLAC进一步改进了他们的测量元件，采用双馈的指数渐变双平板平行波导开展电子束的压缩和束长测量实验^[22]。该双平板平行波导的波阻抗沿太赫兹传播方向呈指数渐变，进而能实现更好的耦合效率和更宽的耦合带宽。双馈的形式使得间隙内电场相加而磁场相消，提高了太赫兹波对电子束的调制效率。上海交通大学在2019年采用一束圆偏振的太赫兹波在介质管内建立HEM₁₁模式的电磁场，对注入的电子束施加随着太赫兹波偏振方向变化的横向偏转力，将电子束的纵向信息映射到观测屏上电子束的角分布信息中，根据探测器上电子束的角分布成功地反演出了待测电子束的束长和到达时间^[18]。

太赫兹波不仅可以用于测量电子束的到达时间抖动，还可以抑制这一抖动，进而提高电子束到达时间的稳定性，这对于许多动态实验具有重要的意义。当太赫兹元件工作在 0° 相位时，提早到达的电子束感受到减速电场而被减速，使得它到达作用点的时间变长。相应的，晚到达的电子束感受到加速电场而被加速，使得它到达作用点的时间变短。经过一段合适的漂移段后，电子束在指定作用点的到达时间抖动将会被极大地抑制。2020年SLAC和上海

交通大学分别用渐变双平板平行波导^[23]和介质管^[24]实现了上述构想，在压缩电子束长的同时，极大地抑制了电子束的到达时间抖动。压缩电子束长和控制电子束到达时间抖动能够显著提高超快电子束衍射的质量，2021年DESY和SLAC先后采用介质管^[25]和双平板平行波导^[26]作为电子衍射的辅助元件，对电子束进行束长压缩和抖动控制，提高了电子衍射的成像质量，使得太赫兹电子操纵和诊断技术得到了很好的推广。

5 太赫兹源

太赫兹电子加速和操控的关键技术之一是高性能的太赫兹源，基于真空电子学、光学技术、相对论电子束等的太赫兹源性能的不断改进，推动着包括电子加速和操控在内的太赫兹应用科学的发展。得益于超快激光技术及先进晶体材料生长技术的发展，当前用于电子束加速和操控的太赫兹源主要集中在光学产生方法。激光驱动产生的太赫兹辐射具有结构相对紧凑、辐射能量高、频率可调谐等优点，常见的辐射方法包括光电导天线^[27]、光整流^[28]、太赫兹参量振荡^[29]、光学差频^[30]和激光等离子体技术^[31]等。其中，光整流技术目前已广泛应用于产生单周期及多周期太赫兹辐射，其高峰值的电磁场和可调的辐射频率非常适合电子束的加速和操控。

光整流是激光在晶体中的一种非线性光学效应，超短激光脉冲入射至非线性晶体中，由于二阶非线性效应，激光脉冲包络内的频率成分之间会产生差频效应，从而产生太赫兹波段的辐射。

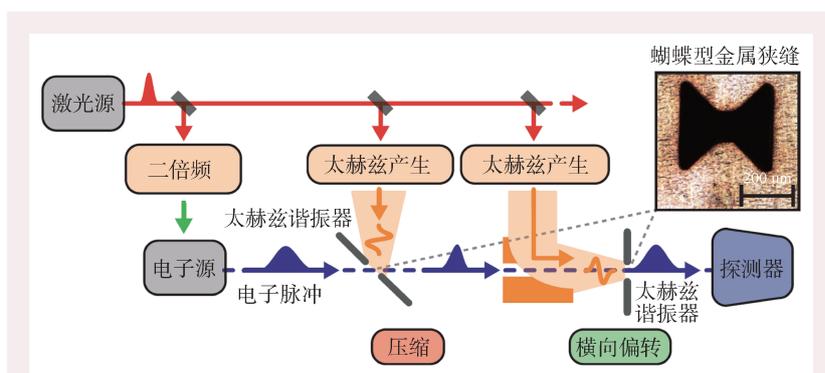


图8 太赫兹束流压缩与偏转测量的实验示意图^[19]

光整流中常用的非线性晶体可分为三类：半导体晶体、有机晶体和铁电晶体。半导体晶体是最先用于产生太赫兹辐射的晶体之一，如磷化镓(GaP)和碲化锌(ZnTe)等。有机晶体如二乙胺基三氟化硫(DAST)等，具有非常大的有效非线性系数和很高的太赫兹转换效率，近年来在光整流强场太赫兹产生研究中颇受重视，但有机晶体的损伤阈值较低，大尺寸晶体生长困难，是进一步发展亟待解决的问题。铁电晶体如铌酸锂、钛酸锂等具有有效二阶非线性系数高、晶体体积大、光学损伤阈值高、对800 nm和1 μm波长激光的高透射率等优点，在强场THz脉冲的产生中具有非常好的应用前景。早期的研究中，由于晶体中激光与THz很难实现相位匹配，限制了THz转换效率的提升。2002年Hebling等人利用波前倾斜技术(TPF)实现了非共线相位匹配，使THz转换效率得到了极大的提高^[32]。2013年，Huang等人用1.03 μm的红外光泵浦掺杂Mg离子的铌酸锂晶体，通过优化激光脉宽，在150 K的温度下获得了3.8%的转换效率^[33]。基于啁啾脉冲放大技术的钛蓝宝石激光器可提供焦耳量级的泵浦激光能量，结合铌酸锂晶体的高损伤阈值特点，使产生毫焦量级的光整流太赫兹源成为可能。2020年中国科学院物理研究所通过增加铌酸锂晶体尺寸

和采用低温冷却条件，泵浦激光能量提高至214 mJ，产生了1.4 mJ的单周期太赫兹脉冲^[34]。

基于周期性极化非线性晶体的差频效应是目前产生多周期太赫兹辐射的一种常用方法。通过设计非线性晶体中的周期极化方向，使激光与THz波在晶体中实现准相位匹配，THz辐射频率由极化周期决定^[35]。目前应用最为广泛的非线性晶体是周期性极化的铌酸锂(PPLN)。2018年，德国DESY实验室通过降低啁啾脉冲拍频中固有三阶色散的影响，并在大晶体尺寸、高激光能量泵浦的条件下，获得了THz脉冲能量分别为0.4 mJ和0.2 mJ的两个多脉冲THz波，转换效率为0.24%，中心频率为0.36 THz^[36]。

6 全光太赫兹加速装置的设想

近十年以来，基于太赫兹的电子枪、低能/高能电子加速、级联加速、束流诊断和操控等关键技术先后得到验证，太赫兹源的功率水平得到了极大的提高，建设实际可用的太赫兹加速装置成为了可能。国内外实验室充分发挥太赫兹加速的高加速梯度、紧凑结构以及良好的时间同步等特性，开展了桌面型的全光太赫兹加速器应用装置的设计研究。

德国的DESY在2018年提出了利用全光太赫兹加速器产生阿秒X射线的阿秒X射线成像和光谱科学(Attosecond X-ray Science; Imaging & Spectroscopy, AXSIS)方案^[37]。方案围绕高品质红外激光展开：一路激光四倍频到紫外波段后驱动光阴极产生光电子；另外两路激光经过光整流分别产生单脉冲和多脉冲，驱动太赫兹电子枪和介质管加速结构，将电子束加速到20 MeV；第四路激光作为光学波荡

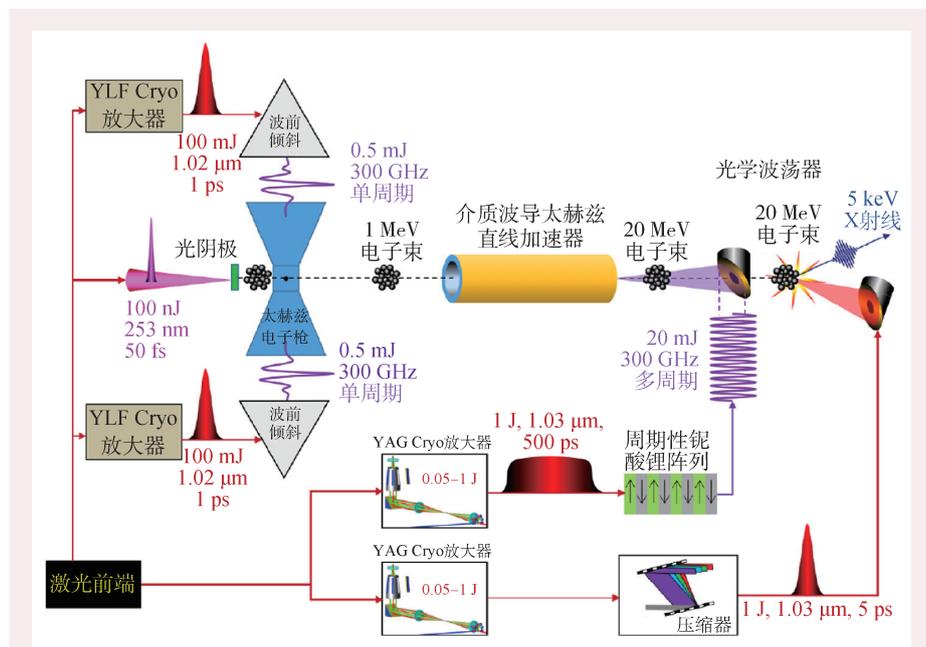


图9 AXSIS方案的概念设计图^[37]

器, 大大提升其等效波荡器常数, 使数十兆电子伏特的电子束就能辐射出X射线, 如图9所示。由于太赫兹加速器的高梯度使得前端的加速器装置尺寸大大减小, 以及光学波荡器的采用, 整个装置可以集成到桌面的尺度。同时, 紫外激光、太赫兹波、光学波荡器都是同源的, 彼此之间具有非常好的时间同步特性, 预期辐射出来的X射线具有高的品质和稳定性。

匈牙利佩奇大学的研究组2021年提出了非常有特点的全光太赫兹束线构想^[38], 整个束线处于真空中, 没有具体化的加速结构, 而是通过两组两束反对称传输的太赫兹波实现电场增强磁场相消, 在电子束轴线上建立起强加速电场。电子束的产生是通过强激光电离气体产生等离子体, 其中的电子被太赫兹波俘获并得到初级加速, 然后再送到下一级主加速

结构(与前级相似)中进一步加速。两级加速之间、主加速器和电子束应用点之间通过螺线管和太赫兹压缩器进行束流匹配, 如图10所示。经过优化, 该方案模拟实现了在147 mm的太赫兹加速器束线上得到了8 fC、200 fs、346 keV的电子束, 束团能散为2%。

清华大学在2021年提出了面向超快电子衍射的全光太赫兹加速器的构想^[39]。该装置将同源的激光分为5路: 第一路激光经过压缩和三倍频后产生超短的紫外激光(约10 fs, 均方根脉宽), 照射太赫兹电子枪阴极产生光电子; 第二路激光通过光整流产生两束反向传输的单周期太赫兹波, 在双馈太赫兹电子枪中将电子由静止加速到50 keV; 第三路能量较弱的激光通过光整流产生单周期太赫兹波后耦合到太赫兹束流压缩器中, 在0相位对电子束进行压缩, 以提高电子束在后续主加速器中的加速效率。从电子枪发射出来的

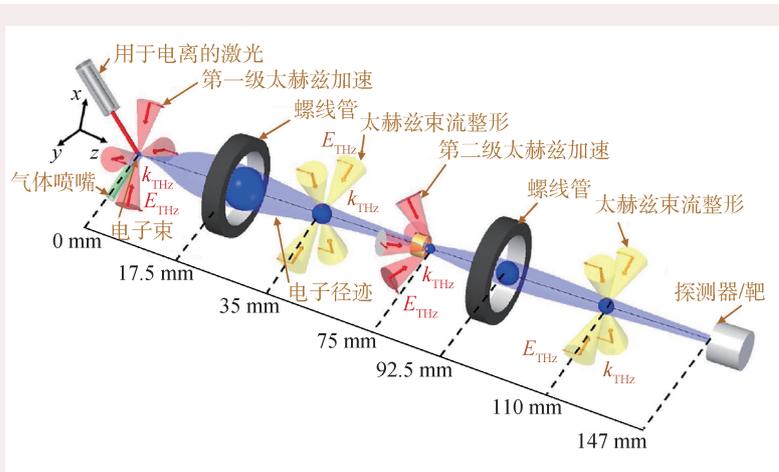


图10 佩奇大学提出的全光太赫兹电子源方案设计图^[38]

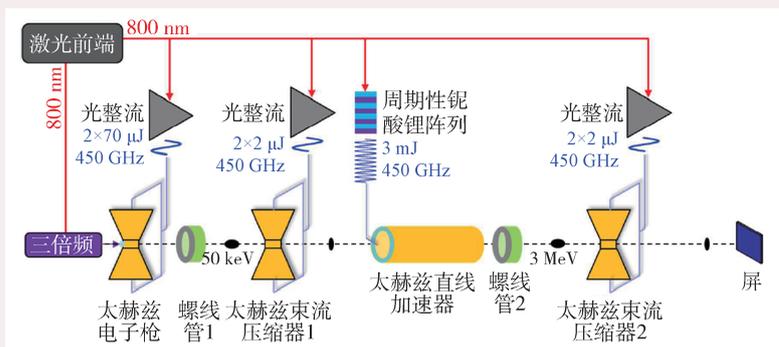


图11 清华大学3 MeV紧凑型全光太赫兹电子源的概念设计图^[39]

电子束经过螺线管聚焦和压缩器压缩后进入渐变介质管中, 介质管由第四路激光经过PPLN阵列产生的多周期太赫兹波驱动, 将电子束加速到3 MeV。电子在加速过程中飞行速度会随着能量的增加而增加, 故而需要调控介质管的介质层厚度, 使介质管中太赫兹波的相速度始终与电子的飞行速度同步。最后再利用第二组螺线管和太赫兹压缩器将电子束聚焦到作用点处进行电子衍射实验, 如图11所示。模拟结果表明, 该太赫兹加速器有望实现10 fC、10 fs的超短电子束, 同时该装置电子束和所有太赫兹波由同一激光前端产生, 时间同步特性非常好, 具有开展精密泵浦探测实验的潜力。

7 展望

太赫兹波介于微波和红外波段之间, 将其用于粒子加速, 在加速梯度、装置紧凑型、加速结

构制造难度、支持的电荷量、束团抖动控制等方面,必然是基于微波和红外激光加速方案的折中之选,因而成为高性能桌面加速器的重要潜力方案。近年来,围绕着太赫兹加速器的各个关键技术,包括电子枪、非相对论电子加速、相对论电子加速、级联加速、束团相空间操控等,都取得了重要的进展,尽管这些实验在电荷量、束流质量、能量增益和能散方面还有提高的空间和潜力,但已经为开发实用、紧凑的太赫兹束流加速和操控设备奠定了基础。随着高品质太赫兹源功率水

平不断提升以及太赫兹加速结构的不断优化设计,太赫兹加速正渐渐地从原理验证走向了束流参数精细调控,各项性能指标不断突破新的高度。可以预见,太赫兹加速和操控装置将以更高的加速梯度、可控的加工难度、足够的电荷量,成为未来紧凑型加速器和先进射线源的组件或用于提高现有加速器的性能,使得太赫兹加速技术为超快科学、先进光源、生命科学以及材料科学等领域的发展带来全新的机遇。

参考文献

- [1] Wang J W, Loew G. RF Breakdown Studies in Copper Electron Linac Structures. In: Proc. 1989 IEEE Particle Accelerator Conf. on Accelerator Science and Technology, IEEE, 1989, 1137
- [2] Peralta E A, Soong K, England R J *et al.* Nature, 2013, 503: 91
- [3] Nanni E A, Huang W R, Hong K H *et al.* Nat. Commun., 2015, 6: 8486
- [4] Tajima T, Dawson J M. Phys. Rev. Lett., 1979, 43: 267
- [5] Huang W, Nanni E, Ravi K *et al.* Sci. Rep., 2015, 5: 14899
- [6] Huang W, Fallahi A, Wu X *et al.* Optica, 2016, 3: 1209
- [7] Fallahi A, Fakhari M, Yahaghi A *et al.* Phys. Rev. Accel. Beams, 2016, 19: 081302
- [8] Fakhari M, Fallahi A, Kärtner F X. Phys. Rev. Accel. Beams, 2017, 20: 041302
- [9] Lewis S M, Merrick J, Othman M A K *et al.* A THz-Driven Field Emission Electron Gun. 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). IEEE, 2020
- [10] Curry E, Fabbri S, Maxson J *et al.* Phys. Rev. Lett., 2018, 120: 094801
- [11] Zhang D, Fallahi A, Hemmer M *et al.* Nat. Photonics, 2018, 12: 336
- [12] Zhang D, Fallahi A, Hemmer M *et al.* Optica, 2019, 6: 872
- [13] Hibberd M T, Healy A L, Lake D S *et al.* Nat. Photonics, 2020, 14: 755
- [14] Zhang D, Fakhari M, Cankaya H *et al.* Phys. Rev. X, 2020, 10: 011067
- [15] Xu H, Yan L, Du Y, *et al.* Nat. Photonics, 2021, 15: 426
- [16] Tang H, Zhao L, Zhu P *et al.* Phys. Rev. Lett., 2021, 127: 074801
- [17] Fabiańska J, Kassier G, Feurer T *et al.* Sci. Rep., 2014, 4: 5645
- [18] Zhao L, Wang Z, Tang H *et al.* Phys. Rev. Lett., 2019, 122: 144801
- [19] Kealhofer C, Schneider W, Ehberger D *et al.* Science, 2016, 352 (6284): 429
- [20] Li R K, Hoffmann M C, Nanni E A *et al.* Phys. Rev. Accel. Beams, 2019, 22: 012803
- [21] Zhao L, Wang Z, Lu C *et al.* Phys. Rev. X, 2018, 8: 021061
- [22] Othman M A K, Hoffmann M C, Kozina M E *et al.* Opt. Express, 2019, 27: 23791
- [23] Snively E C, Othman M A K, Kozina M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2020, 124: 054801.
- [24] Zhao L, Tang H, Lu C *et al.* Phys. Rev. Lett., 2018, 124: 054802
- [25] Zhang D, Kroh T, Ritzkowski F *et al.* Ultrafast Science, 2021, 2021: 9848526
- [26] Othman M A K, Snively E C, Gabriel A E *et al.* 2021, arXiv: 2104.05691
- [27] Burford N M, El-Shenawee M O. Optical Engineering, 2017, 56 (1): 010901
- [28] Stepanov A G, Hebling J, Kuhl J. Appl. Phys. Lett., 2003, 83: 3000
- [29] Zhao G, Yang Y, Huang Y *et al.* Appl. Phys. Lett., 2020, 116: 131107
- [30] Majkić A, Zgonik M, Petelin A *et al.* Appl. Phys. Lett., 2014, 105: 141115
- [31] Babushkin I, Kuehn W, Köhler C *et al.* Phys. Rev. Lett., 2010, 105: 053903
- [32] Hebling J, Almasi G, Kozma I Z *et al.* Opt. Express, 2002, 10: 1161
- [33] Huang S W, Granados E, Huang W R *et al.* Opt. Lett., 2013, 38: 796
- [34] Zhang B, Ma Z, Ma J *et al.* Laser & Photonics Reviews, 2021, 15 (3): 2000295
- [35] Lee Y S, Meade T, Perlin V *et al.* Appl. Phys. Lett., 2000, 76: 2505
- [36] Jolly S W, Matlis N H, Ahr F *et al.* Nat. Commun., 2019, 10: 2591
- [37] Matlis N H, Ahr F, Calendron A L *et al.* Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2018, 909: 27
- [38] Turnár S, Hebling J, Fülöp J A *et al.* Appl. Phys. B, 2021, 127: 38
- [39] Xu H, Li R, Yan L *et al.* A 3 MeV all Optical Terahertz-driven Electron Source at Tsinghua University. The 12th International Particle Accelerator Conference (IPAC'21). 2021