

## 从太赫兹波到光波驱动的综合电子加速器研究进展

曾雨珊<sup>1</sup>, 余谢秋<sup>1,2</sup>, 田野<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800;<sup>2</sup>中国科学院大学材料科学与光电子工程中心, 北京 100049

**摘要** 粒子加速器极大地推动了近代科学的发展。目前成熟的射频加速方案受限于不足 100 MV/m 的加速梯度, 面临造价高、占地面积广、建设周期长等挑战, 同时也限制了其在一些领域的应用和推广。因此, 寻求新型的电子加速技术已成为加速器领域的重要研究方向。在更高频率的太赫兹和光频段, 太赫兹波加速和电介质激光加速技术能够提供高达 GV/m 量级的加速梯度, 近年来已相继实现了对非相对论和相对论电子的加速及相空间操控(如脉宽压缩、空间聚焦等), 并演示了级联加速方案, 为实现小型化的集成加速器奠定了基础。未来, 集成加速器有望在实验室范围实现大型射频粒子加速器的功能, 并引起物理、化学、生命科学、医学等多学科领域的突破。为更好地把握集成电子加速器的发展, 梳理了从太赫兹波到光波驱动的电子加速研究进展, 介绍了相干电子源和束流控制的相关技术, 并进一步展望了新型集成加速器的研究和应用。

**关键词** 太赫兹; 电子加速; 电介质激光加速; 集成加速器

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230779

## 1 引言

电子束作为前沿科学和技术应用的核心在各个领域均发挥着重要的作用。例如: 在高能物理领域, 由大型加速器产生的高能电子束是对撞机探索微观新粒子的基础<sup>[1-2]</sup>; 在辐射源方面, 由高能电子束驱动的自由电子激光(FEL)能够产生波长范围覆盖微波到 X 射线波段的激光<sup>[3-4]</sup>; 在医学领域, 兆电子伏特的电子束目前已应用于肿瘤的放射治疗以及医疗器械的辐照灭菌等<sup>[5-7]</sup>; 此外, 在成像领域, 超短电子脉冲是超快电子衍射技术中探测原子尺度上的超快动力学过程的重要探针<sup>[8-9]</sup>。因此, 围绕高能电子束的产生及应用, 粒子加速器的发展也将带来上述领域新的发现以及技术的变革。

尽管在过去一个多世纪的时间内, 加速器领域的更迭已涌现出多种多样的加速方案, 其本质仍然是利用电磁场将能量传递给带电粒子。目前世界范围内应用最广的加速器形式, 包括直线加速器和同步加速器等, 都是基于射频波段的微波作为驱动源, 例如著名的加速装置: 欧洲核子中心的大型强子对撞机(LHC), 美国斯坦福的直线加速器(SLAC), 德国电子加速器(DESY), 上海同步辐射光源(SSRF), 等等。这些装置的特点是载荷量大, 输出稳定, 但为了避免射频击

穿, 加速器的加速梯度一般被限制在小于 100 MV/m 量级。因此, 为了将电子加速到所需的能量, 加速装置的尺寸通常需要跨越数公里的空间, 相应的造价也极其高昂, 并且需要较长的建设周期。

射频加速器的击穿电压是限制其实现高梯度加速的主要原因。为了进一步发展加速器技术, 需要开发新的方法来提高粒子加速梯度以在更小的空间和更简单的结构上实现相同的能量增益。经验公式表明, 材料可以承受的阈值电场  $E$  与电场频率  $f$  和脉冲长度  $\tau$  有关:  $E \propto f^{\frac{1}{2}} \tau^{-\frac{1}{4}}$ <sup>[10]</sup>。因此, 较高的频率和较短的脉冲持续时间是获得更高的电场强度和加速梯度的关键。

当前已提出并发展的高梯度电子加速方案包括激光等离子体尾场加速(LWFA)<sup>[11-13]</sup>、太赫兹(THz)电子加速<sup>[14-16]</sup>和电介质激光加速(DLA)<sup>[17-19]</sup>等。相较于射频场, 这些方案的电场频率更高并且脉冲长度更短。其中, LWFA 方案通过在空泡结构中为电子加速提供加速场而不需要考虑结构材料的损伤, 故而可以实现高达几十 GV/m 的加速梯度<sup>[12]</sup>。然而, LWFA 方案的实现伴随着复杂的动力学过程, 尽管目前已经报道了借助新兴的机器学习手段实现的超 24 h 的稳定电子束输出<sup>[20]</sup>, 并且验证了基于 LWFA 的自发辐射自放大(SASE)型<sup>[21]</sup>和种子型<sup>[22]</sup>自由电子激光放大输出, 其应

收稿日期: 2023-05-04; 修回日期: 2023-07-09; 录用日期: 2023-07-18; 网络首发日期: 2023-07-28

基金项目: 基础研究特区计划(JCYJ-SHFY-2021-002)、中国科学院基础前沿科学研究计划(ZDBS-LY-SLH018)、国家自然科学基金(12104471, U226720057, 62105346)、中国科学院基础研究领域青年团队计划(YSBR060)、上海市青年科技英才扬帆计划(21YF1453900)、科技部重点研发专项(2022YFA1604400)

通信作者: \*tiany@siom.ac.cn

用稳定性仍有待进一步提高。同时,受限于高功率激光器的重复频率,LWFA 方案难以获得高重复频率的束流,在实现小尺寸的电子源应用方面仍面临挑战。

本文主要关注从太赫兹波到光学波段的集成电子加速器研究进展。早在激光器刚被发明的 20 世纪 60 年代,研究人员就已提出利用光波对电子进行加速的设想<sup>[23]</sup>,此后,利用逆自由电子激光(IFEL)<sup>[24-25]</sup>、逆切伦科夫辐射<sup>[26]</sup>、逆史密斯-珀塞尔效应<sup>[27-28]</sup>等机制的加速理论也相继被提出和实验证实。但受到加速机制自身及加速结构制造精度的限制,直到近年来,作为半导体集成电路基础的微纳制造工艺日臻完善才使得微型甚至集成化的电子源建设逐渐成为可能。与传统的射频电子源结构相似,基于光波方式的完整电子源系统也包含电子源的产生、加速,以及相空间操控的模块,后者用以改善电子束的横向发射度及时间特性等。其中,从太赫兹波到光波的电磁波谱可同时用于激发初始电子源和实现高梯度的加速及相空间控制,因此有望提供全光驱动集成电子源。这种电子源与射频电磁场激励的电子源相比,不仅能够获得更小的源尺寸,还将消除加速场与电子束之间的“时间抖动”影响,是理想的集成电子源实现方案。

当前,全光集成的电子加速器研究主要包含太赫兹波和光波驱动的方案。一方面,太赫兹作为近几年新兴的电磁波段,在驱动电子加速方面历经不到十年的发展已经取得了引人瞩目的成就。自 2015 年太赫兹电子加速首次被实验验证以来<sup>[14]</sup>,通过太赫兹电子枪<sup>[29]</sup>、分段太赫兹加速与调控等多种技术手段<sup>[30-31]</sup>,相继实现了电子束的加速<sup>[15, 32]</sup>、压缩<sup>[33-34]</sup>、聚焦<sup>[30]</sup>、偏转和条纹<sup>[35-37]</sup>等多种不同的功能。现已报道 204 keV 级联加速<sup>[16]</sup>、60 pC 的电荷量<sup>[15]</sup>、米级的传输长度<sup>[32]</sup>以及 10 倍以上的电子脉冲压缩能力<sup>[35]</sup>,足以将电子束的时间分辨率提升到飞秒量级。太赫兹电子领域在太赫兹电子枪、太赫兹电子加速、级联加速、太赫兹电子操纵及诊断等各方面的飞速发展,为太赫兹加速技术在超快光学成像、生物材料等领域铺平了道路,也为集成化电子加速器打下了坚实的基础。太赫兹波相对于射频微波具有更高的工作频率和更短的脉冲长度,同时电介质材料也具备更高的承受能力,其理论击穿阈值可以达到 GV/m 量级,因此可以承受更高的加速梯度,在实现军用、实验室和医学等领域的高能电子束产出上具有广阔应用前景。

另一方面,相较于目前还处于发展初期的太赫兹光源技术,技术成熟、普及率高且商业化的高重复频率红外激光器为电子加速提供了另一种更易获取的动力选择。电介质激光加速方案借助逆史密斯-珀塞尔效应,能够在微米级结构上实现更高的加速梯度<sup>[18, 38-41]</sup>,为形成片上集成加速器带来了希望,并于近年来成为国内外研究的热点。当前,基于双光栅结构的电介质激光加速已经实验实现 850 MV/m 的加速梯度<sup>[42]</sup>,同

时利用交替相位调制,能够实现微米级结构内 77.7  $\mu\text{m}$  的相空间操纵传输<sup>[43]</sup>。尽管有如此高的加速梯度,其峰值能量增益仍远远落后于后继发展的太赫兹电子加速技术。限制这一能量增益继续增长的主要因素是基于光栅加速方案的微米级相互作用长度。此外,低速电子在加速过程中的失相问题也对目前的加工精度提出了更高要求。为追求更高的能量增益,将多个加速结构与相位调整装置级联和集成提供了一个可行的解决方案。虽然现阶段集成的电介质激光加速器仍然存在如同步、结构加工精度等困难,但随着技术的不断发展,这些问题最终将会解决,从而推动电介质激光加速和相关应用领域的高速发展。

集成加速是未来电子加速领域的一个重要分支,它的实现必将带来科技、工业、生活等诸多方面的变革。本文将围绕集成电子加速的实现方案,综述太赫兹及光波驱动的新型电子加速技术及电子相空间操控(如脉宽压缩和空间聚焦)进展,简述目前国内外实现集成电子加速器的几种方案,并对新型集成加速器作出总结和展望。

## 2 新型电子加速技术

早在半个世纪前,Lawson-Woodward 定理就指出:在没有电介质的真空环境中,电磁波不能通过线性加速为带电粒子提供净能量增益<sup>[44-45]</sup>。因此,改变电子的能量就必须破除 Lawson-Woodward 定理中一个或多个假设条件的限制。例如,当电子束附近存在导体或者其他辐射源时,电磁场不再是以光速行进的横向电磁波,其相速度将小于光速并且在传播方向上具有纵向极化的分量。此时,若电磁波的相速度与电子束运动的群速度匹配并且传播方向与电子束平行,那么电子束将有效地与周围电磁场发生能量和动量交换以获得净能量增益。本文所关注的太赫兹波驱动的电子加速以及电介质激光加速方案正是基于这一方式。本节将分别介绍基于太赫兹波驱动的电子加速以及电介质激光加速的研究进展。

### 2.1 太赫兹波驱动的电子加速

太赫兹波一般指波段位于微波和红外之间的电磁波,其频谱范围为 0.1~10 THz,对应的波长在数十微米至毫米量级。将这一频率范围应用于电子加速的主要优势在于:(1)太赫兹频率能够支持高达 GV/m 量级的加速梯度,有望极大缩短射频加速结构的长度;(2)太赫兹波较长的波长能够负载 pC 量级的电荷;(3)当前加工工艺较容易满足与其波长相对应的典型波导尺寸;(4)由于目前的太赫兹源大多由飞秒激光产生,相较于由电学手段产生的射频波,太赫兹波驱动的电子加速有利于电子源和驱动场之间的精确同步,能更好地满足电子测量和优化的需求。尽管具有这些潜在的优势,历史上,由于缺乏这一波段的有效产生方式(故这一波段被称为电磁波谱上的“太赫兹间隙”),第

一个实验实现电子能量增益的工作直到近十年才得以完成<sup>[14]</sup>。此后的时间,得益于强太赫兹辐射产生方式的进步,基于大口径冷却铌酸锂晶体倾斜波前技术<sup>[46-48]</sup>、超强激光驱动的等离子体辐射<sup>[49-51]</sup>以及表面等离子激元放大及其远场辐射机制<sup>[52]</sup>等方案的提出,实验室中的太赫兹能量已从  $\mu\text{J}$  量级提升至  $\text{mJ}$  甚至亚焦耳量级,这将极大地提升太赫兹波驱动的电子能量增益。

2015 年,美国麻省理工学院(MIT)的 Nanni 等<sup>[14]</sup>率先利用基于铌酸锂晶体产生的单周期太赫兹脉冲,实现了利用太赫兹波驱动电子加速的原理性验证实验。实验装置如图 1(a)所示,基于铌酸锂晶体倾斜波前技术产生的中心频率 0.45 THz 的单周期太赫兹辐射携带 10  $\mu\text{J}$  能量,经分段波片将线偏振转换为径向偏振后,聚焦至内衬介质的波导管内。电子在波导管内将感受到径向偏振太赫兹辐射经聚焦后产生的轴向电场分量作用。与此同时,电介质能够降低太赫

兹辐射在波导管内的相速度以延长加速场的作用距离。该方案最终在 3 mm 的相互作用长度上对 60 keV 的电子束实现了 7 keV 的能量增益,有效的加速梯度为 2.5 MV/m,并自此拉开了太赫兹波驱动电子加速的序幕。

上述实验方案中,电子感受到的加速场来自太赫兹辐射在波导管端口的反射,太赫兹辐射在波导管内的传输损耗及色散都极大地限制了电子能量增益的进一步提高。因此,目前主要的太赫兹电子加速方式,除了替换为太赫兹波与电子同向注入的方式外,还将引入更强的太赫兹源、延长相位匹配距离作为增强加速效果的两个关键手段。其中,更高能量的太赫兹辐射得益于超强太赫兹源技术的进展,包括基于超大口径铌酸锂晶体倾斜波前技术的突破等<sup>[47]</sup>。目前,我国已经实现单脉冲能量 13.9 mJ、能量转化效率 1.2%、峰值场强 750 MV/m 的超强固态太赫兹辐射源<sup>[48]</sup>,以及基于

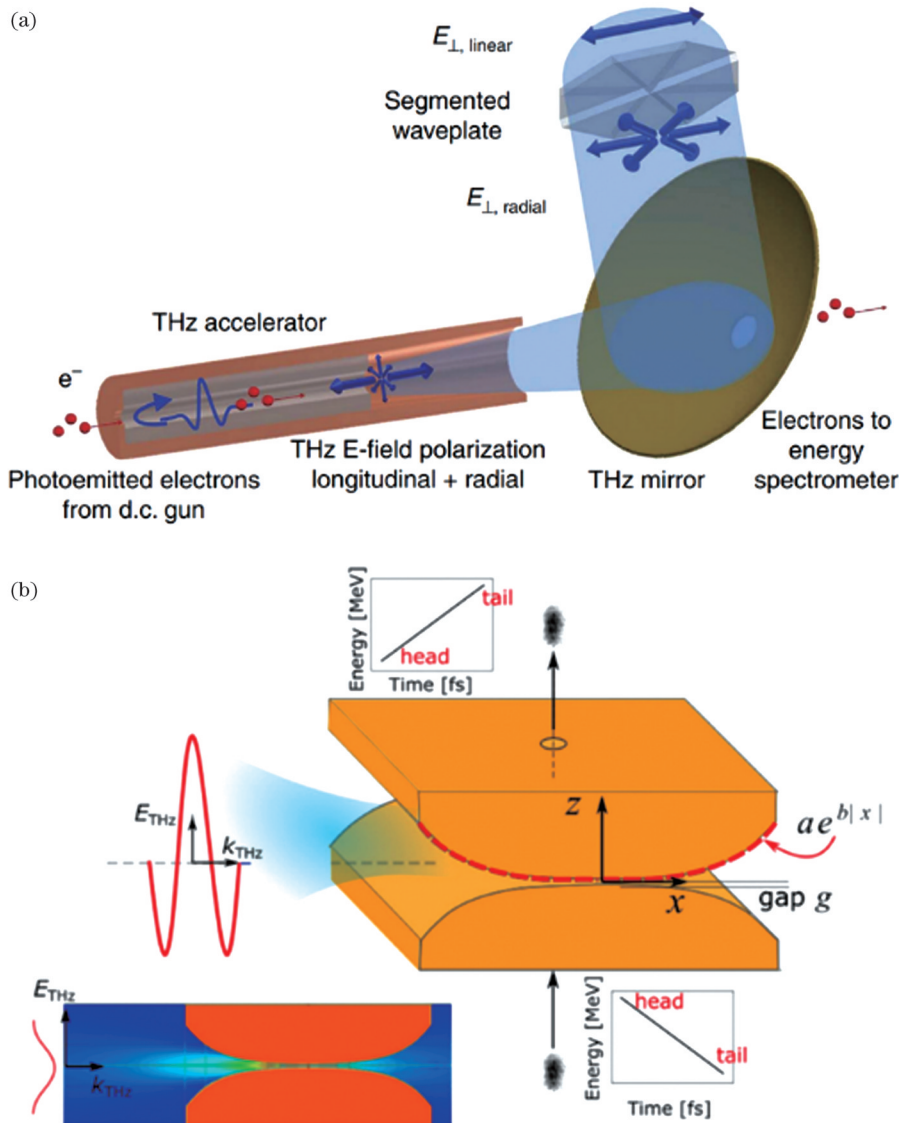


图 1 圆柱形波导及锥形平行板波导太赫兹电子加速。(a)圆柱形波导<sup>[14]</sup>; (b)锥形平行板波导<sup>[53]</sup>

Fig. 1 Terahertz electron acceleration using cylindrical waveguide and tapered parallel-plate waveguide. (a) Cylindrical waveguide<sup>[14]</sup>; (b) tapered parallel-plate waveguide<sup>[53]</sup>

激光与固体等离子体产生的  $202 \pm 100$  mJ 的极端太赫兹辐射<sup>[54]</sup>。太赫兹能量的提高意味着波导管内加速梯度的提升。对于相对论能量的电子束,电子能量的增益并不会显著改变电子的运动速度,因此在合适的注入相位下,预期电子也将获得更大的能量增益。2021 年,清华大学黄文会课题组 Xu 等<sup>[16]</sup>将加速器中 30.4 MeV 电子束与薄膜铝靶撞击,利用相干渡越辐射产生的 132  $\mu$ J 单周期太赫兹脉冲用于第二束电子束的加速,实现了单级 170 keV 的能量增益,相互作用长度 2 mm,平均加速梯度为 85 MV/m。随后,通过分别收集前向和后向的太赫兹能量以实现两级级联,最终第二束电子获得 204 keV 的加速增益。而对于低能的非相对论电子,借助高加速梯度也能完成初始能量的注入,减弱电子从光阴极发射阶段库仑作用的影响。例如,2019 年,Nanni 所在课题组的 Othman 等<sup>[53]</sup>将能量仅 0.9  $\mu$ J 的单周期太赫兹脉冲注入锥形平行板波导结构[图 1(b)],利用平行板间的场增强效应也实现了 30 MV/m 的峰值加速电场。这种波导设计虽然牺牲了太赫兹辐射与电子间的相互作用距离,但却为全光驱动的集成电子加速器提供了新的电子源设计思路<sup>[29]</sup>。

提高太赫兹波驱动的电子加速增益的另一关键途径是延长相位匹配的作用距离,也就是在作用过程中使电子始终处于电磁场的加速相位。如前所述,这一条件对相对论电子较易满足,然而对于较低能量的非相对论电子,由于电子速度在高加速梯度场的作用下快速变化,即使在很短的作用距离内,电子速度也可能与太赫兹波的相速度失配,电子从加速相位滑移至减速相位,造成加速过程中的失相。失相作为加速器中存在的普遍问题,在较短的驱动波长下更为显著。在太赫兹波段,人们提出了各种方法来解决这一问题,例如 2016 年,Fallahi 等<sup>[55]</sup>提出通过插入不同厚度的介质实现作用过程中相位匹配的方案,其设计如图 2(a)所示。在此基础上,2018 年,张东方(Zhang)等<sup>[30]</sup>进一步提出采用横向注入单周期太赫兹脉冲的分段式太赫兹电子加速器和操控器(STEAM)方案,并在实验中验证了这一方案的可行性。STEAM 结构与 Fallahi 最早提出的设计相似,由数层平行平板波导和介质构成。其中,平板波导将作用区域分隔为几段,每段中插入介质的长度不同,进而保证两侧馈入的太赫兹脉冲在每段中均能与电子束同步。因此,控制两束太赫兹脉冲的延时,STEAM 就能实现电场模式(即结构中只存在电场而磁场抵消)和磁场模式(结构中电场抵消而磁场叠加)的自由切换,并可对 STEAM 的功能进行选择。其中,电场模式下的同步对非相对论的电子加速尤其重要,这是因为单周期太赫兹脉冲较高的加速电场往往将导致电子速度的剧烈变化并引发失相。利用 STEAM 的电场模式,张东方(Zhang)等<sup>[30,33]</sup>在两路 6  $\mu$ J 的单周期太赫兹脉冲驱动下将 55 keV 的注入电

子束能量提升约 30 keV,并在 2019 年利用两路 15  $\mu$ J 的脉冲将这一增益进一步提升到了 70 keV。此外,采用级联波导管的方式,依赖太赫兹波和低能电子在真空中的速度差,重复回收和利用从前一级波导管中发射损失的太赫兹能量,也证明了太赫兹波与电子间能量转移的提升<sup>[31]</sup>。在相对论电子能量(4~9 MeV)下,采用太赫兹波驱动的逆自由电子激光(IFEL)方案在几十厘米的距离上实现了与单周期太赫兹脉冲的相位匹配传输<sup>[56]</sup>。原则上,在波导管内也能够通过微调介质性质达到对相速度的局部调整,然而渐变的介质厚度对加工精度的要求极高<sup>[32,57]</sup>,在实践中实现十分困难。针对这一问题,2022 年,张东方(Zhang)等<sup>[58]</sup>基于波导管设计了引入真空沟道的移相器结构,通过改变真空的占比调制太赫兹脉冲的相速度从而增长相位匹配的作用距离。该结构的加工相比于渐变介质更容易实现。

除了相位匹配以外,增加作用长度还可以通过增长太赫兹脉冲的长度方式实现。将单周期脉冲替换为多周期脉冲是增加相互作用距离最直接的方式。与单周期脉冲相比,多周期太赫兹脉冲还具有更窄的频谱宽度和更小的群速度色散,有利于维持太赫兹脉冲在波导中传输的波形,同时还能将脉冲能量更好地集中于与相速度匹配的频率上,避免色散引起的失相。目前,多周期太赫兹脉冲的产生方式包括啁啾脉冲拍频、周期极化晶体中的准相位匹配等。2020 年,英国 Jamison 课题组 Hibberd 等<sup>[15]</sup>将铌酸锂中产生的单周期太赫兹脉冲通过啁啾脉冲拍频转换为脉冲长度 7 ps (周期数 < 5)、能量 2  $\mu$ J 的多周期太赫兹脉冲。将该脉冲与 35 MeV 的相对论电子束作用,最终在 4.3 mm 的作用长度产生了全束(60 pC)8.8 keV 的能量增益,加速梯度为 2 MV/m。2021 年,上海交通大学的向导课题组 Tang 等<sup>[59]</sup>利用周期极化铌酸锂(PPLN)将太赫兹脉冲周期数延长至约 20 周期,将作用长度进一步增大至 6.7 mm。该实验基于 100 nJ 的太赫兹脉冲使 3 MeV 的电子束经两级加速后获得 > 30 keV 的净能量增益,如图 2(b)所示。因此,尽管多周期实验中太赫兹辐射能量一般远弱于单周期情形,但作用距离的增长无疑展现了其对于提高增益所具有的巨大潜力。但对于日后集成加速器发展需要面临的 MeV 至 GeV 量级能量增益挑战,多周期太赫兹源的建设仍然是亟待突破的关卡。未来对于多周期强太赫兹源的需求可能激发新型非线性材料和新辐射方案的研究突破,以获取更高脉冲能量和更窄线宽的多周期太赫兹脉冲。

以上方案针对的都是自由空间产生的太赫兹辐射。因此,在实验中为尽可能提高波导内的太赫兹加速梯度,需要太赫兹源足够强以弥补光路中散射、反射,以及模式转换的能量损耗。考虑到介质/金属表面的光学近场,如表面等离极化激元(SPP)具有

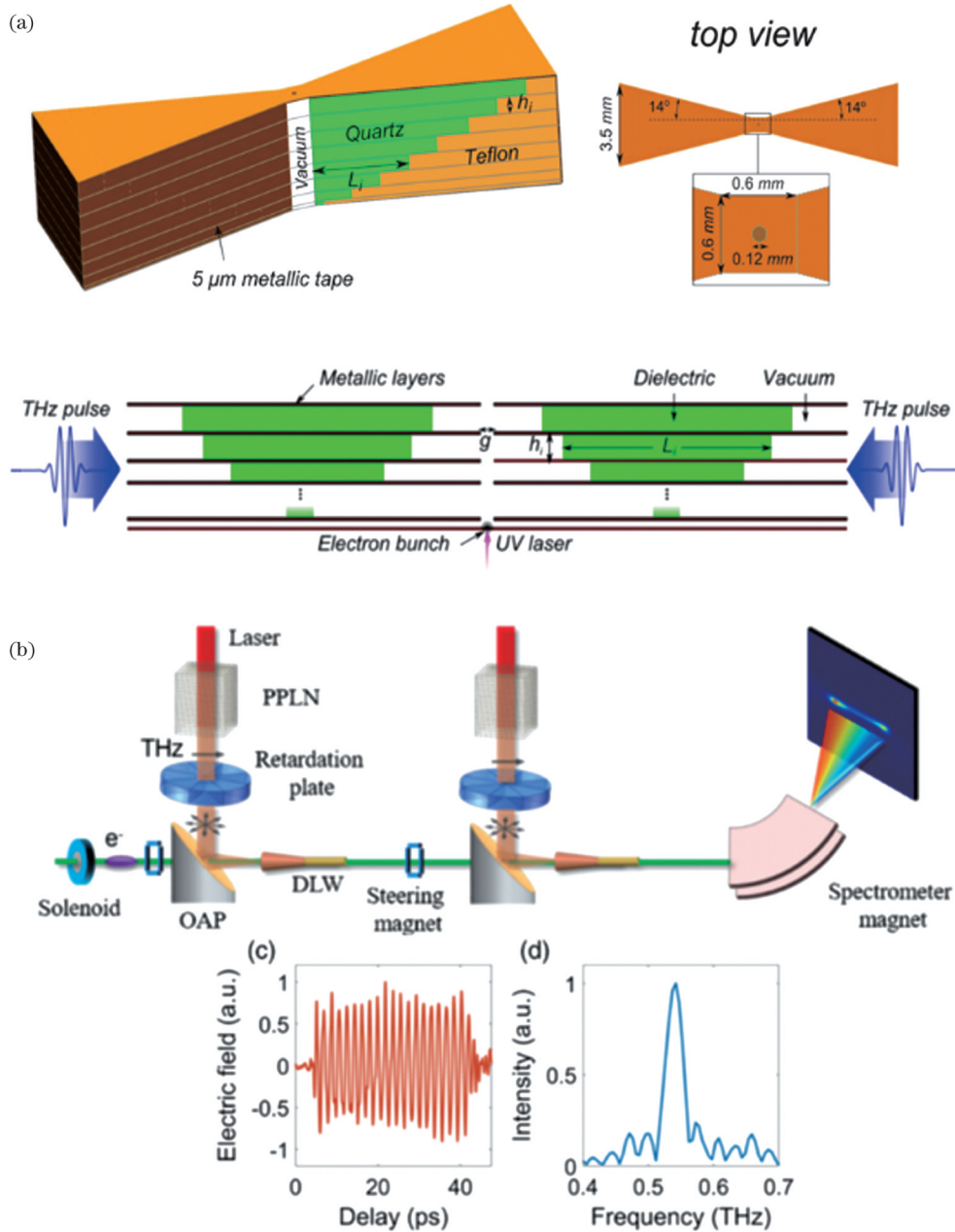


图 2 分段式及多周期太赫兹电子加速。(a)分段式<sup>[55]</sup>;(b)多周期<sup>[59]</sup>  
 Fig. 2 Segmented and multi-period terahertz electron acceleration. (a) Segmented<sup>[55]</sup>; (b) multi-period<sup>[59]</sup>

近场束缚的空间特性, 强大太赫兹 SPP 的产生将为集成的太赫兹波驱动的电子加速器开辟全新思路。2017 年, 本课题组 Tian 等<sup>[60]</sup>提出并验证了一种新的表面等离激元放大及其辐射的太赫兹源产生机制。该源的频率由光电子螺旋波荡器机制决定<sup>[60]</sup>, 而强度增益则来自电子对太赫兹表面波的放大机制<sup>[52]</sup>。在 700 mJ 飞秒激光的泵浦下, 激光脉冲驱动金属丝产生的远场太赫兹辐射能够实现超 3 mJ 的辐射能量[图 3(a)]<sup>[61]</sup>以及高重复频率泵浦条件下的稳定输出[图 3(b)]<sup>[62]</sup>。与此同时, 该源的低损耗和低群速度色散优点以及固有的径向极化和亚毫米波导尺寸使其能够低损耗地传输和耦合太赫兹脉冲, 具有应用于电子加速的天然优势。借助这些优势, 最近, 本

课题组 Yu 等<sup>[63]</sup>将该太赫兹 SPP 应用于电子加速实验, 实现了最高 1.1 MeV 的电子能量增益及 210 MV/m 的平均加速梯度, 成功将太赫兹波驱动的电子加速带入到 MeV 量级, 并将为全光学集成化电子加速器研究开辟崭新途径。

### 2.2 电介质激光加速

不同于太赫兹源对太赫兹电子加速发展的限制, 早在 2001 年 Lin<sup>[64]</sup>就提出了基于电介质的高梯度光学加速器方案。该物理过程的本质为逆史密斯-珀塞尔效应, 电子在周期结构(光栅)的表面运动时受激吸收入射至光栅表面的光子和发射光子从而发生能量的交换。相较于上文介绍的太赫兹波加速, 光波能够提供比太赫兹波更高的频率, 因此也能够实现更高的加速

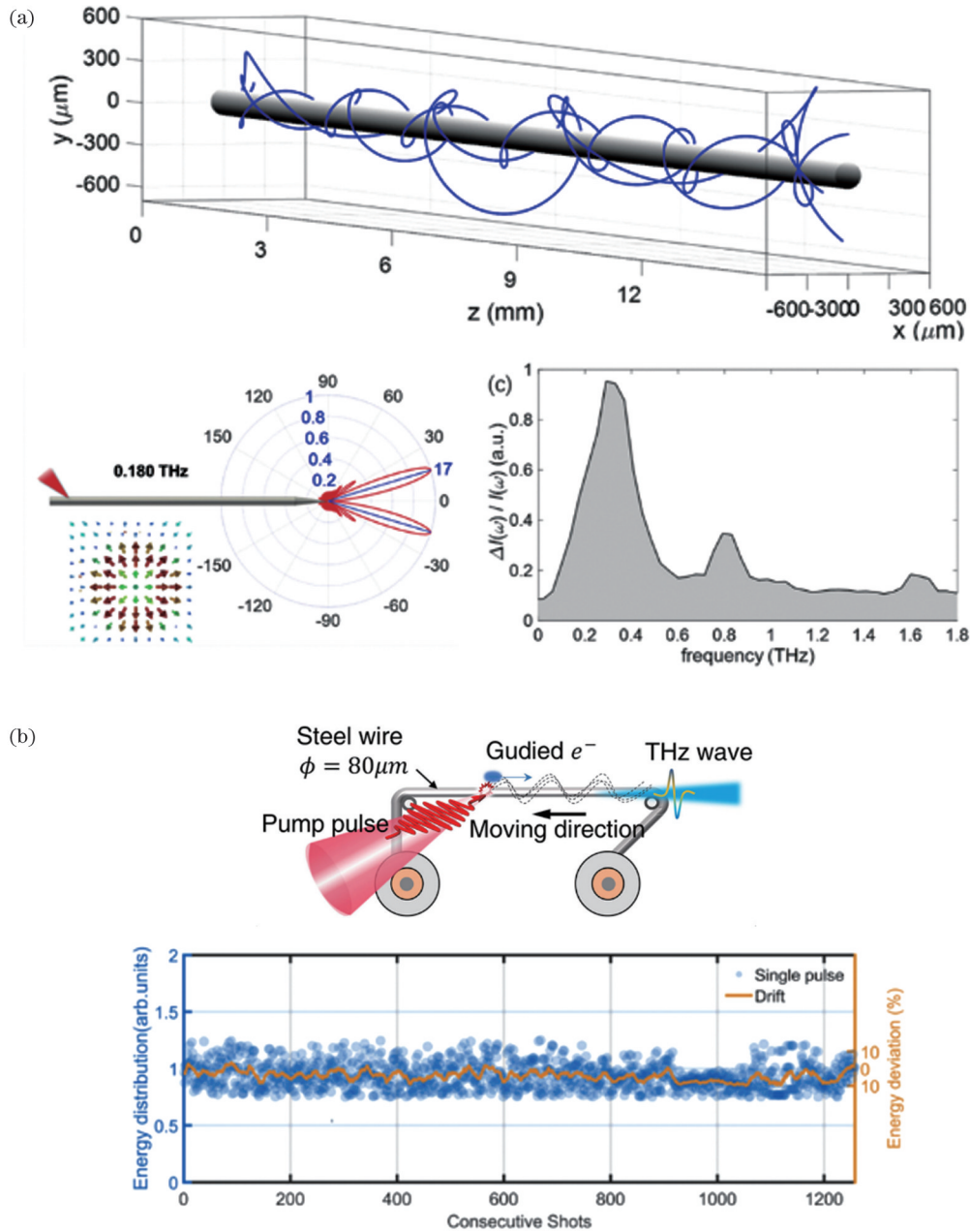


图 3 基于丝波导的毫焦级太赫兹辐射产生及高重复频率太赫兹源示意图。(a)毫焦级太赫兹辐射产生<sup>[61]</sup>;(b)高重复频率泵浦条件下的稳定太赫兹源<sup>[62]</sup>

Fig. 3 Schematic diagrams of millijoule level terahertz generation and high repetition rate terahertz radiation source based on wire waveguide. (a) Millijoule level terahertz generation<sup>[61]</sup>; (b) high repetition rate terahertz radiation source<sup>[62]</sup>

梯度和更小的加速器尺寸。尤其在最近十年,得益于半导体制造工艺的飞速发展,在电介质激光加速中至关重要的光栅结构设计也得到飞速的进步,更灵活的光栅结构和设计方案都已变为可能,为加速梯度向 GV/m 量级的迈进以及集成的加速结构设计提供了坚实基础。与此同时,借助目前先进光刻技术的粒子加速器将更方便地实现批量制造以及片上集成,在降低成本的同时允许多功能部件的高精度耦合,使 DLA 向实现片上集成的加速器更近了一步。具体来说,在电介质激光加速方案中,加速结构一般包括基于电介质光子晶体的光子带隙结构<sup>[39]</sup>和用于重置相位的光栅结

构等<sup>[42,65]</sup>。光子带隙结构可以通过来自周围电介质元件的许多局部反射来实现模式限制和电子束的相位同步。由于其对波导内电场的强限制,光子带隙结构是构建电介质激光加速器系统的理想材料,但同时三维光子带隙结构设计复杂且构造困难,基于这一结构的加速设计目前仍处于理论阶段<sup>[39]</sup>。相较之下,光栅结构构成了许多重置光场相位的单元,其纵向结构参数可以改变每个周期的激光波前的相对相位滑移以确保沿光栅表面运动的电子能够始终处于理想的加速相位。并且光栅的设计与制造相对简单,因此,在当前高度普及的高功率固态激光器和商业化光纤激光器的推

动下,基于红外激光和纳米级粒子加速器的光栅电介质激光加速器得到了快速发展,并于 2013 年首次被实验证实<sup>[17]</sup>。

2013 年,德国埃尔朗根-纽伦堡大学的 Hommelhoff 课题组 Breuer 等<sup>[17]</sup>在熔融石英光栅上展开实验,利用激光聚焦在透射光栅上的三次谐波加速扫描电子显微镜 (SEM) 中的 27.9 keV 连续电子束,如图 4(a) 所示。通过筛选和测量加速后的电子能谱,该实验确认实现了 25 MV/m 的加速梯度,并验证了单光栅对非相对论电子加速的可行性。在这一开创性的工作中,利用不

同的空间谐波与电子的相速度匹配能够克服光栅周期的制造困难,是该工作实验验证电介质激光加速的关键之一。此后,为了提高光场的耦合效率及加速场,2015 年 Leedle 等<sup>[66]</sup>将熔融石英光栅替换为反射式的硅光栅,如图 4(b) 所示。硅对比熔融石英能够实现与光场更高的耦合效率,同时其掺磷的导电性还可以防止由于电荷积累导致的电子束偏转,有利于电子束靠近光栅表面以获得更高的加速梯度。基于这一设计,Leedle 等将 76 MHz, 907 nm 的强激光脉冲聚焦于周期为 490 nm 的反射式硅光栅上,利用光栅表面的一

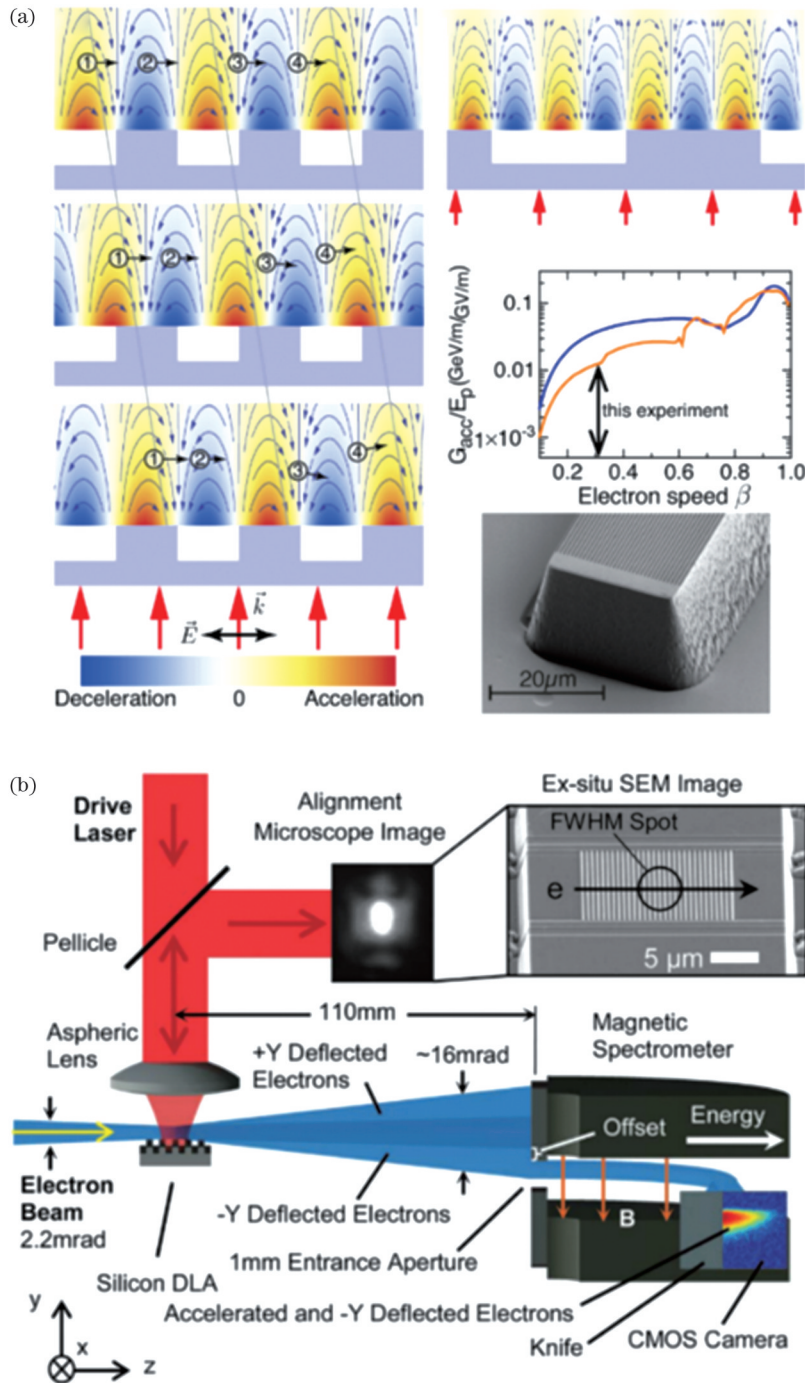


图 4 透射式及反射式单光栅电子加速。(a)透射式<sup>[17]</sup>;(b)反射式<sup>[66]</sup>

Fig. 4 Transmissive and reflective single grating electron acceleration. (a) Transmissive<sup>[17]</sup>; (b) reflective<sup>[66]</sup>

阶空间谐波与 SEM 热阴极的 96.3 keV 的电子束作用,获得了 1.22 keV 的能量增益和 218 MV/m 的加速梯度。随着制造和晶体生长技术的进步,近年来更多的材料也被用于光栅的设计,包括拥有超过传统石英及硅材料损伤阈值的氧化镓<sup>[67]</sup>、金刚石<sup>[68]</sup>,甚至金属结构的场增强效应等<sup>[69]</sup>,更加丰富了 DLA 光栅材料的选择。

然而,上述单光栅的开放式结构存在一个明显的弊病:不支持光速的纵向本征模式。因此,该结构无法应用于相对论电子的情况。与此同时,单光栅的加速场随着与光栅表面的距离呈指数衰减,导致电子束的加速效果也与到光栅表面的距离紧密关联,进而导致电子束的横向加速梯度不均匀。利用双光栅结构则可以规避这些问题。2013 年,美国斯坦福大学 Byer 研究团队 Peralta 等<sup>[18]</sup>利用钛宝石激光器的 800 nm 的脉冲激光激发光栅周期与激光波长相等的熔融石英双光栅,在光栅内部激发了与 60 MeV 的相对论电子相速度匹配的第一空间谐波。实验中由于电子束的长度约为 1 ps,而激光周期为 2.67 as,因此电子束将对激光场的所有相位进行采样,其作用结果表现为初始电子能谱的展宽(而非单调的向高/低能转移)。通过将调制后的能谱与模拟和分析预测值进行比较,最终确认实现了超过 250 MV/m 的加速梯度。2016 年,该团队 Wootton 等<sup>[70]</sup>进一步将入射激光脉冲的持续时间从 1.24 ps 缩短至 90 fs,实现了 690 MV/m 的加速梯度,如图 5(a)所示。为了实现更高的能量增益,提高入射场强度是有效的方法之一。2018 年,Cesar 等<sup>[42]</sup>将入射场强度提高至 9 GV/m,虽然在熔融石英双光栅中激发了 1.8 GV/m 的加速模式,但由于电介质结构的非线性光学特性的直接影响,激光场与电子的相位同步性被破坏,最终获得 850 MV/m 的平均加速梯度。这也是目前 DLA 发展中所实现的最高加速

梯度。

上述方案中,电子能量增益或加速梯度的提高都是通过改变光栅的材料或结合方式实现的。除此以外,在实现集成加速器的道路上也有更多的光栅设计及加速方案被提出,以更好地分配激光能量或者实现更高的耦合效率。其中包括 Cesar 等<sup>[71]</sup>2018 年提出的利用倾斜激光波前延长作用距离的方式,他们在 0.5 mm 的作用距离上实现了 315 keV 的能量增益及 560 MV/m 的平均加速梯度。此外,在光栅设计方面,近年来还发展了一种采用周期双排柱型排布的光栅结构,如图 5(b)所示<sup>[72]</sup>。这种结构相比较早的锯齿光栅能够更灵活地调整圆柱的尺寸,从而支持从亚相对论到相对论相速度的加速模式。这一灵活的加速结构于 2015 年由 Byer 课题组 Leedle 等<sup>[72]</sup>首次提出并进行了实验验证。通过改变硅基圆柱的参数,使第一排圆柱的出射波与入射波相干相消或相干相长,从而能够实现双排圆柱间的倏逝模式和均匀加速场 cosh 模式的切换。基于这两种模式的加速梯度均能达到 370 MV/m 以上。2019 年,Yousefi 等<sup>[73]</sup>对周期双排柱型光栅做了进一步改进,通过在光栅的一侧添加分布式布拉格反射器以模拟双面激光辐照的效果,不仅增强了光栅内的纵向电场,还能够减少偏转横向效应并增强束流的稳定性。由于双柱架构本质上是一个单片的平台,因此非常适合与波导和光纤激光系统进行大规模集成。除了上述从结构出发的正向设计外,2020 年,Sapra 等<sup>[19]</sup>还提出借助智能算法,从预期能量交换逆向求解器件构成的逆向设计思路,将开拓集成加速器的全新布局。随着对不同介质激光加速器的设计和研究的不断深入,电介质激光加速方案将变得更加高效和紧凑,以满足未来集成加速器的要求。

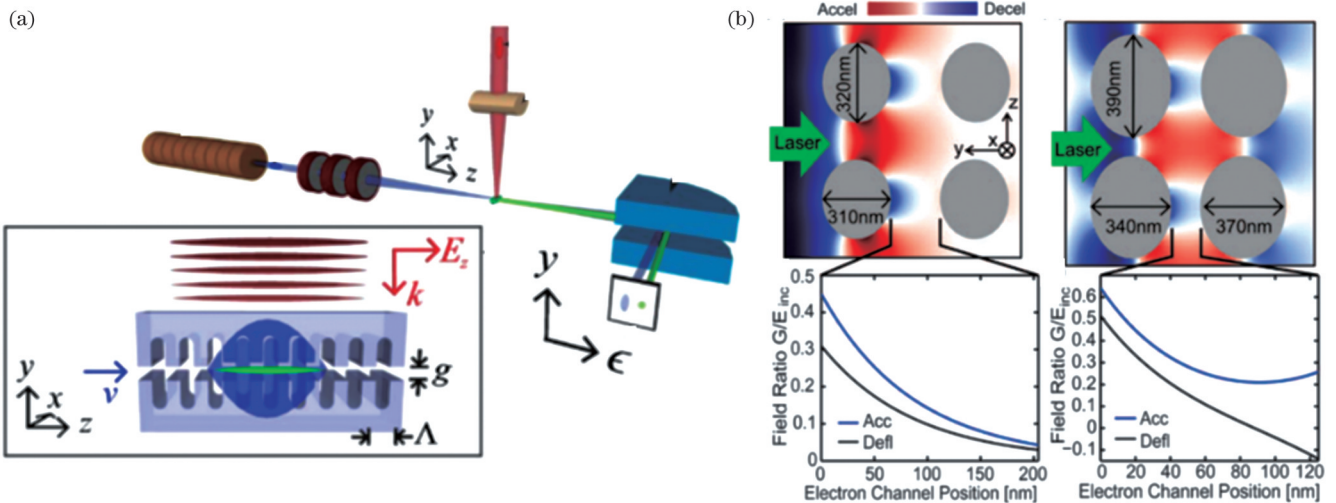


图 5 双光栅及双柱形光栅电子加速。(a)双光栅<sup>[70]</sup>;(b)双柱形光栅<sup>[72]</sup>

Fig. 5 Dual-grating and dual-pillar-grating electron acceleration. (a) Dual-grating<sup>[70]</sup>; (b) dual-pillar-grating<sup>[72]</sup>



与基于太赫兹波的方案类似,电介质激光加速也可以通过级联以及相位匹配的方式获得更高的净能量增益。相应的方案于 2018 年由 Hommelhoff 课题组 McNeur 等<sup>[74]</sup>提出。如图 6(a)所示,两束红外飞秒激光脉冲具有可调的相对延迟,分别聚焦于光栅表面电子的不同路径位置,可以实现比单级 DLA 更高的能量增益。该实验中,单级加速实现了 750 eV 的加速增益,而级联的情况几乎将这一数值翻倍,得到 1.3 keV 的加速增益。理论上可以无限增加级联的加速级数,

但随着电子束能量的增加,电子同样也面临失相的问题。这一问题在电介质激光加速中可以通过啁啾光栅方案解决。啁啾光栅中,光栅齿间的距离 $\lambda_p$ 与纵坐标 $z$ 线性相关: $\lambda_p = \lambda_{p0} + az$ ,其中, $\lambda_{p0}$ 是起始位置的光栅齿间距,而 $a$ 是线性啁啾参数。由于电子的归一化速度 $\beta$ 满足 $\beta = \lambda_p / (n\lambda)$ (其中, $n\lambda$ 表示入射激光波长的整数倍),因此,相匹配的电子束速度可以随着 $\lambda_p$ 的增加而增加。当加入啁啾后,相对于加入啁啾前的 0.76 keV,啁啾光栅可以产生 2.6 keV 的增益,能够显著提升较低

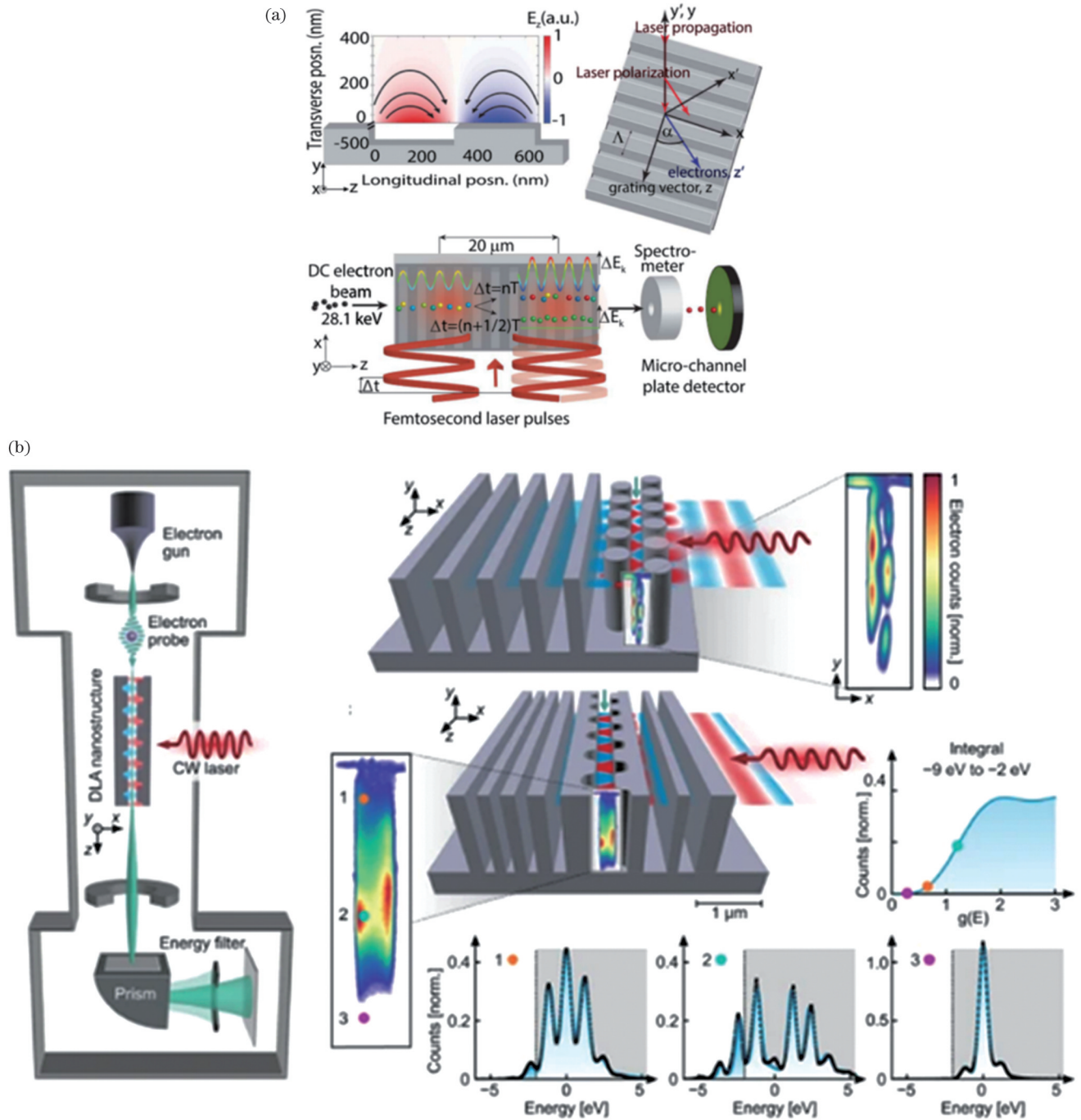


图 6 级联光栅电子加速及光栅内电场分布诊断。(a)级联光栅电子加速<sup>[74]</sup>;(b)电场分布诊断<sup>[75]</sup>

Fig. 6 Cascaded grating electron acceleration and diagnosis of electric field distribution inside grating. (a) Cascaded grating electron acceleration<sup>[74]</sup>; (b) diagnosis of electric field distribution<sup>[75]</sup>

能量电子作用下的相位匹配距离和能量增益。

迄今为止,电介质激光加速已实现 850 MV/m 的加速梯度<sup>[42]</sup>。而电子能量增益的进一步突破除了提高激光强度外,还需要对光栅内电场分布进行诊断以精确控制电子的运动轨迹。Barwick 等<sup>[76-78]</sup>借助改造的透射电子显微镜和光子诱导近场电子显微技术(PINEM),对目前最先进的周期双排柱型光栅及逆向设计双光栅中的电场分布进行了成像,如图 6(b)所示<sup>[75]</sup>,并以亚纳米波长分辨率展示了它们的光谱响应。在该实验中,反向设计光栅结构表现出与其设计一致、沿水平方向对称(cosh)的场分布,但双柱结构则显示了表现出强烈反对称(sinh)的场分布,该反对称的场分布来自结构直径的加工误差。未来,随着纳米加工工艺的进步,可能消除加工误差带来的影响,实现对加速结构的大规模流水线化生产,并实现对加速结构的高精度对准。进一步地,当耦合、加速、聚焦、诊断等结构具有相似的几何形状时,甚至可以将这些结构集成在一起,从而实现加速器的集成。此外,电介质激光加速所需的激光源容易获得,例如微焦级的商用激光器亦能满足电介质激光加速的需求,其超高的重复频率使电介质激光加速方案能够实现高亮度,从而可以满足更广泛的应用场景的要求。这些都将推进集成电介质加速器的实现。

近几年,关于 DLA 的研究中,量子效应也引起了越来越多的关注,它体现为作用后的电子能谱以光子的能量间隔发生劈裂<sup>[79]</sup>,并且在最近的金属光栅结构中产生高达上千个光子的能量交换<sup>[69]</sup>。在对这一现象的理论描述中,电子不再以经典的点粒子描述,而是具有有限大小的波包,DLA 过程对电子波函数进行调制,其相空间向能量坐标的投影即为实验观测的电子能谱。因此,这种调制的电子也可用于读取和写入其他量子系统中的量子信息。在此方面,一个典型的例子是通过电子揭示光场的量子统计属性:2021 年,Dahan 等<sup>[80]</sup>借助逆向设计的光栅结构,通过改变光纤放大器的输出光场量子统计性质,将光场的统计性质“印刻”于电子的能谱,从而从作用后的电子能谱重构了光场的量子统计性质。由于篇幅限制,关于电子与光学近场相互作用中量子属性的更多内容请参考 PINEM 的相关理论<sup>[81]</sup>,本文不再展开。

### 3 电子束相空间调控

完整的集成电子加速器建造不仅需要调控电子能量,还需要对电子的相空间进行调制,包括用于聚焦、压缩、偏转以及传输等的不同功能模块,以确保输出高品质的电子束。这些不同功能的模块一般具有和加速器相似的结构,通过控制电子束在电磁波的相位或基于结构实现不同功能模式的切换。

#### 3.1 脉宽压缩

由电子束能散带来的啁啾展宽将导致电子束在

运动过程中的失相,因此,压缩电子束的脉宽/能散在加速器及超快电子衍射等应用中都是不可或缺的步骤。目前除了射频加速器中的脉宽压缩方案,太赫兹波由于其波长能够满足更高的电子载荷以及更易实现电子源和驱动场之间的精确同步,在压缩电子脉宽方面逐渐受到更多关注。太赫兹波实现电子压缩的方式与射频腔中类似,通过在合适的相位上注入电子束使高能电子被减速、低能电子被加速(即啁啾反转),啁啾反转之后,在后续的运动过程中,电子束的束尾会追赶束头以实现压缩的效果。在此方面,自第一个基于弱太赫兹能量(40 nJ)的电子束压缩实验被证实以来,2016—2020 年的 5 年间,基于太赫兹波的电子脉宽压缩已经在非相对论能量到相对论能量,以及从皮秒量级到百飞秒量级的电子束上被实现,相应的压缩后的电子脉宽均 $<100$  fs<sup>[30,33-35,82]</sup>。其功能结构也涵盖了上文所述的圆形介质波导管<sup>[82]</sup>、STEAM [图 7(a)]<sup>[33]</sup>、平行平板波导结构[图 7(b)]<sup>[34]</sup>,以及最早的基于场增强效应的平面结构等。其中,针对电子束研究超快动力学中常用的 3 MeV 相对论电子束,2019 年,上海交通大学向导团队 Zhao 等<sup>[82]</sup>利用铌酸锂晶体产生的 1.5  $\mu$ J 的太赫兹脉冲将 3 MeV 的相对论电子束脉宽从 130 fs 压缩到 28 fs;2020 年,美国斯坦福大学 Nanni 团队 Snively 等<sup>[34]</sup>基于平行平板波导结构将 2.5 MeV 电子束的定时抖动从 76 fs 降低到 31 fs。这些成果均为追求具有亚飞秒分辨率的电子束超快科学提供了可能。此外,稳定的定时抖动也将助力级联加速方案中同步相位的精确调节和未来全光集成加速器的构建。

#### 3.2 空间聚焦和横向偏转

根据 Panofsky-Wenzel 定理<sup>[83]</sup>,当加速结构中的轴向电场在横截面内以及轴向上存在不均匀分布时,垂直于电子束方向的横向场及磁场将使电子束在横向方向发生偏转,造成后续的结构对准困难和电子电量的损失。为解决这一问题,2018 年,Byer 团队 McNeur 等<sup>[74]</sup>基于单光栅的介质结构提出了抛物线型光栅的聚焦方案。其结构如图 8(a)所示,横向偏转力由刻线呈抛物线型的光栅提供,方向与光栅刻线方向垂直,因而能够维持电子在通过其表面时的横向尺寸。与传统聚焦元件相比,这种电介质激光加速器元件非常小且易于集成。除聚焦电子束以外,横向场还有一个重要的应用,即测量超短电子束的脉宽(电子条纹相机)。它的原理是当超短电子束被注入到光场的特定相位时,由于电子束具有一定的时间宽度,电子在光场所感受到的横向作用并不相同,因此将在远场形成特定长度的横向条纹,条纹长度反映了电子的宽度信息。此外,光波更高的电场强度也赋予了光场条纹相机更高的偏转速度。例如,2021 年本课题组 Zhou 等<sup>[84]</sup>利用飞秒激光脉冲与等离子体镜作用的锁相机制中实现了对阿秒电子脉冲的度量,其瞬时偏转速度可达

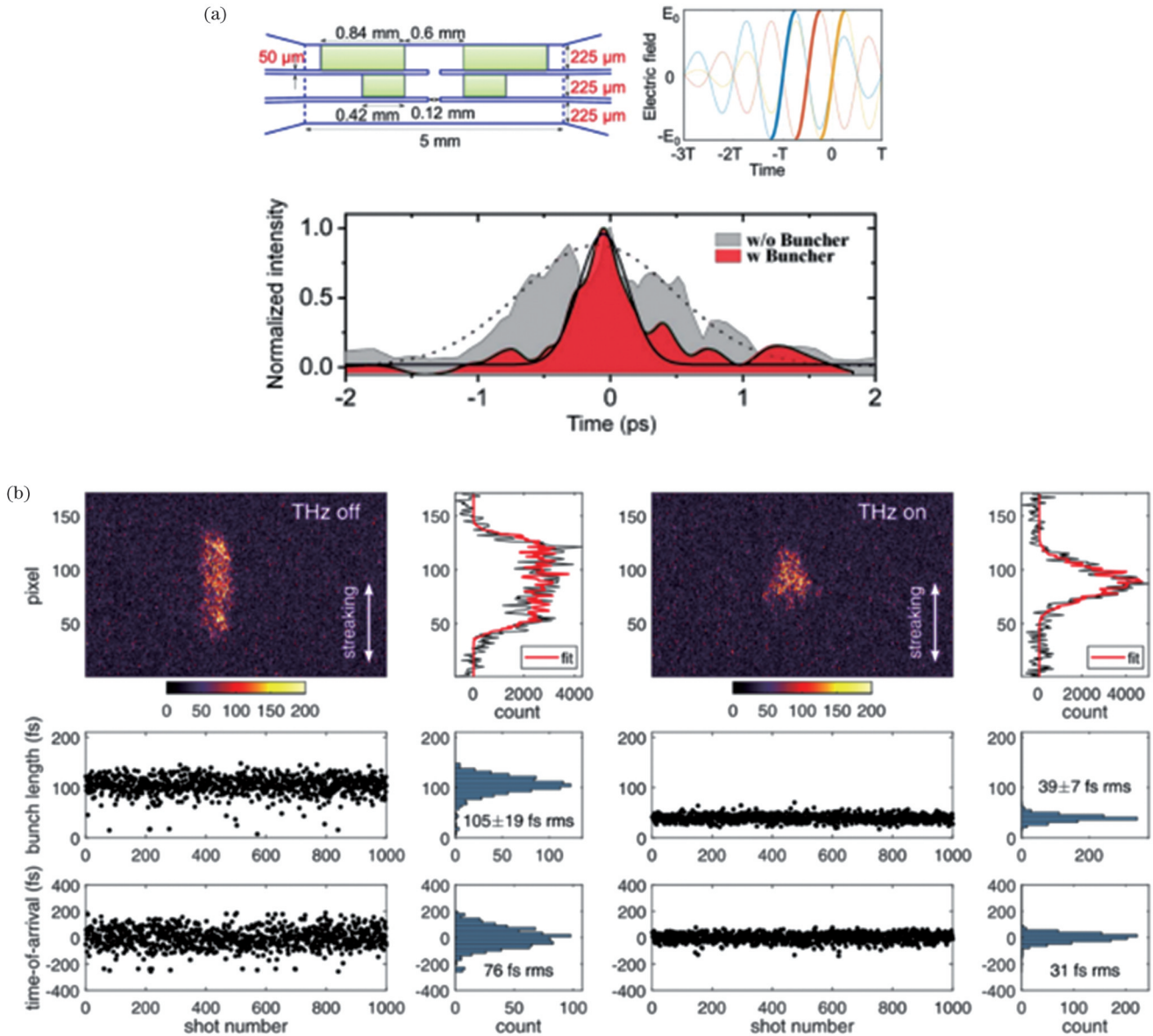


图 7 采用不同功能结构利用太赫兹波实现电子束压缩。(a)STEAM<sup>[33]</sup>; (b)平行平板波导<sup>[34]</sup>

Fig. 7 Electron beam compression by terahertz waves using different functional structures. (a) STEAM<sup>[33]</sup>; (b) parallel-plate waveguide<sup>[34]</sup>

60 μrad/as, 为未来“全光阿秒电子示波器”的实现提供了实验依据。基于光栅结构的电子条纹相机与聚焦相似, 如图 8(b)所示, 光栅刻线方向与电子的运动方向成一定角度<sup>[85]</sup>。因此, 电子感受到与光栅法线方向相垂直的横向调制, 其大小依赖于两路激光的延时, 电子在不同延时下的偏转大小也不同。这种变化反映了场强随延时的变化, 同时也能快速反映电子的时域信息, 在材料科学、光电子学等领域有广泛的应用。

与光波类似, 基于太赫兹波的电场调制也能实现空间聚焦及条纹相机<sup>[30, 35]</sup>。例如, 利用 STEAM 电场模式的角向磁场分量, 张东方(Zhang)等<sup>[30]</sup>在实验中基于  $2 \times 6 \mu\text{J}$  的耦合太赫兹能量得到了大于 2 kT/m 的峰值聚焦梯度。而在磁场模式下, 基于太赫波磁场的条纹相机也已实现  $>140 \mu\text{rad/fs}$  的偏转速度, 并将此前

Kealhofer 等<sup>[35]</sup>基于平面场增强的  $8 \mu\text{rad/fs}$  结果提高了近 20 倍。基于这些结果, 太赫兹电子条纹相机技术能够快速获取太赫兹波的时间和频率特征等信息, 也极大地丰富了超快电子科学的重要研究手段。此外, 以上方案都是基于线性偏振的电磁波, 其度量电子的时间精度还受限于电子束的脉宽及定时抖动。考虑到椭圆偏振的光波或太赫兹波能够在更长的时间范围内记录电子的横向偏移, 2019 年, 上海交通大学向导团队 Zhao 等<sup>[86]</sup>利用如图 8(c)所示的椭圆偏振太赫兹波实现了太赫兹示波器方案。与线性偏振相比, 该实验中采用的椭圆偏振太赫兹脉冲能够在波导管中以螺旋轨迹对不同时刻的电子束进行空间编码, 从而以更大的测量动态范围映射电子的时域分布和定时抖动, 为需要长时间采集数据的实验提供了保障。

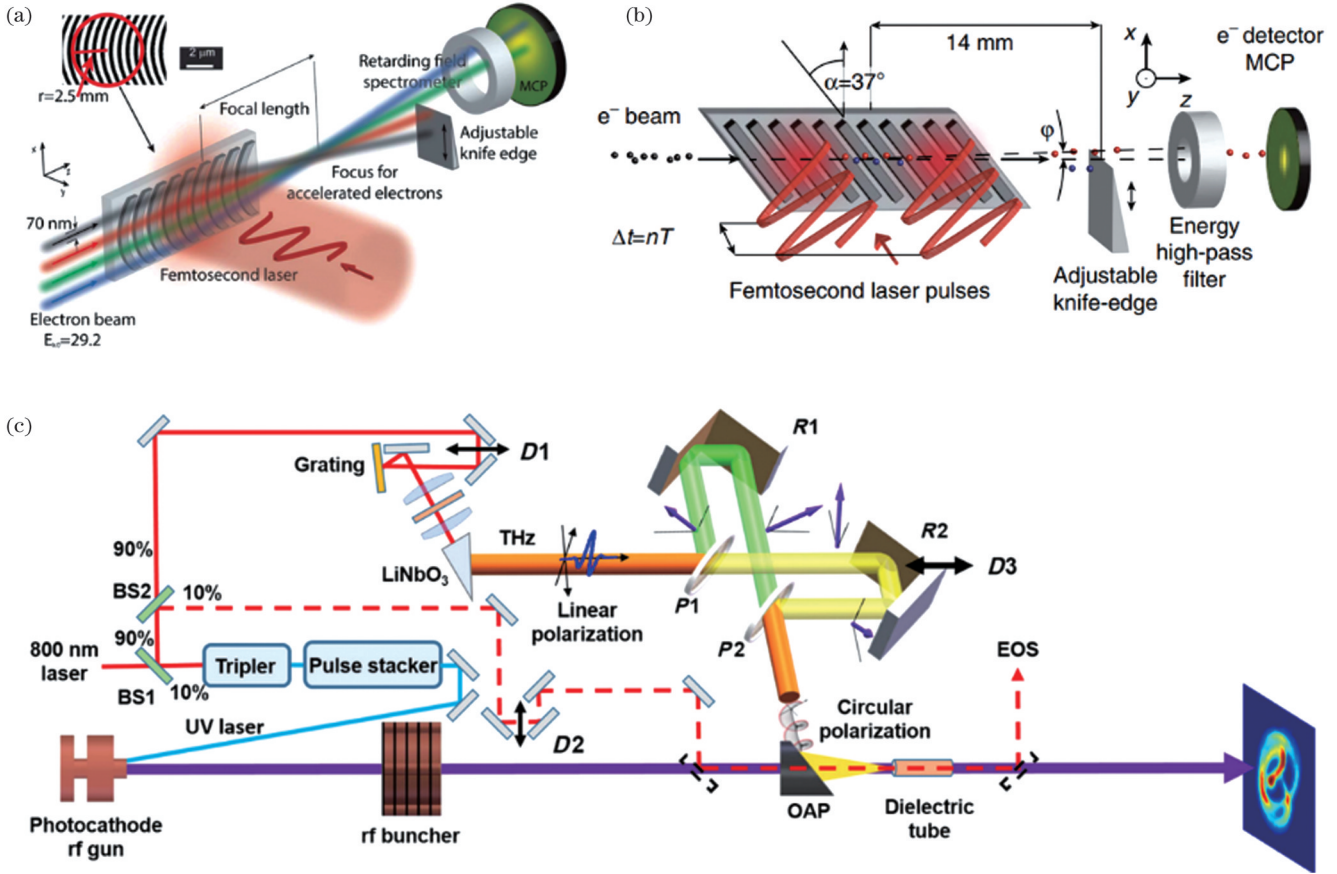


图 8 电子束空间聚焦与横向偏转。(a)抛物线型光栅聚焦<sup>[74]</sup>;(b)基于光栅结构的电子条纹相机<sup>[85]</sup>;(c)利用椭圆偏振太赫兹脉冲实现的太赫兹示波器<sup>[86]</sup>

Fig. 8 Spatial focusing and lateral deflection of electron beams. (a) Focusing by parabolic grating<sup>[74]</sup>; (b) streaking based on grating structure<sup>[85]</sup>; (c) terahertz oscilloscope using elliptically polarized terahertz pulses<sup>[86]</sup>

### 3.3 长距离相空间调制

Earnshaw 定理表明<sup>[87]</sup>, 电子束在一个方向上的聚焦必然导致在另一个方向上的散焦。因此, 实现电子束团的长距离稳定传输不能只依靠某一个维度上的聚焦作用。这可以通过交替相位聚焦方案[即 FODO: 在一个传播方向上具有聚焦(F)-传播(O)-散焦(D)-传播(O)元素, 在另一个传播方向上具有散焦-传播-聚焦-传播元素的晶格]实现。该方案的核心是约束电子束的横向尺寸, 进而使其能在任意长度的介电纳米结构中传输和加速。双排柱型加速结构中, 脉冲激光同时从结构两侧入射, 并在其内部产生相位相差  $\pi/2$  的横向和纵向力。进一步, 在周期性结构中引入非周期的间隙以改变同步相位, 从而导致作用于传播电子的近场模式的光学相位跳变<sup>[88]</sup>。该结构中, 当电子处于 F 相时, 电子脉冲横向散焦但纵向聚焦, 而在 D 相时电子束横向聚焦但纵向散焦, 从而实现交替相位聚焦。该方案于 2021 年得到实验验证, 其中, 近场模式的光学相位跳变是借助气隙实现的<sup>[43]</sup>。基于这一设计, 在 77.7  $\mu\text{m}$  长的硅基纳米结构上的 225 nm 电子通道中实现了复杂的电子相空间控制, 并且理论上可以实现任意长度的低损耗电子束传输。

## 4 集成加速器研究及应用

迄今为止, 尽管从太赫兹波到光波驱动的加速及相空间调控方案都还处于初步的发展阶段, 但人们已经开始构想集成加速器并将其应用在产生高能射线、超快动力学、医学等领域的蓝图。目前, 国内外已提出几种小型化/集成的加速方案, 并在过去的十几年间取得了一系列成就。其中最主要的三个方案有德国电子同步辐射加速器中心 (DESY) 的 AXIS (attosecond X-ray science: imaging & spectroscopy)<sup>[89]</sup>, 清华大学的全光太赫兹加速器<sup>[90]</sup> 和国际合作项目“芯片加速器国际计划”(ACHIP)<sup>[91]</sup>。

AXIS 在 2018 年由德国 DESY 的 Kärtner 研究团队 Matlis 等<sup>[89]</sup> 率先提出。其核心是基于全光的太赫兹加速器获得高能电子, 并通过反康普顿辐射的光学波荡器机制产生阿秒 X 射线光源。该方案设计如图 9 所示。其中, 电子源基于超紧凑的太赫兹电子枪实现[图 9(a)], 以提供电子从静止到 0.8 keV 的初始能量<sup>[29]</sup>。随后电子分别经过 STEAM 加速和波导管中的多周期太赫兹作用, 最终获得 20 MeV 的能量。此后, 该电子束与来自放大器的 1 J 的红外激光脉冲作用, 以光学波荡器的方式产生 5 keV

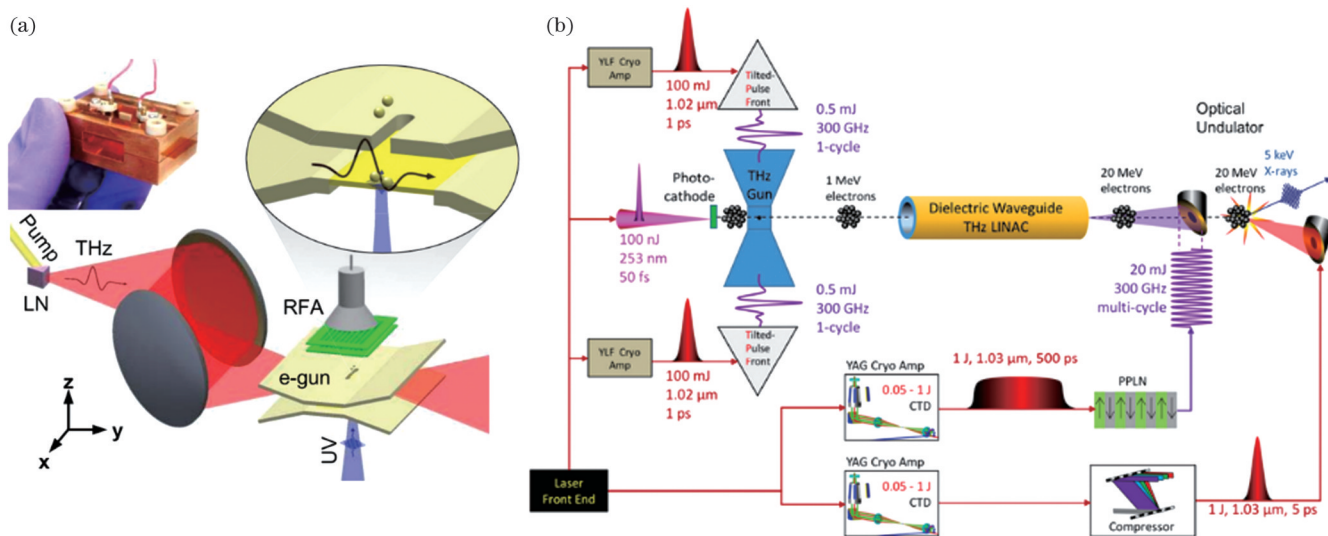


图 9 AXSIS 方案<sup>[29,89]</sup>。(a)电子源示意图;(b)加速器整体设计方案

Fig. 9 AXSIS scheme<sup>[29,89]</sup>. (a) Schematic of electron source; (b) overall scheme design of accelerator

的 X 射线以用于阿秒 X 射线成像和光谱科学。相比于传统的射频加速器方案,该方案将大大减小加速器的尺寸,并且全光的特性也将减小各组件间的定时抖动。

2021 年,清华大学也提出了关于全光太赫兹加速器的方案<sup>[90]</sup>。如图 10 所示,其设想与 AXSIS 在电子

的产生和加速端相似:初始静止的电子先由横向注入单周期太赫兹辐射的方案加速至 50 keV,经时域压缩后,由波导管内的多周期太赫兹辐射加速至 3 MeV。加速之后让电子束通过螺线管聚焦并再次进行太赫兹压缩以优化电子束品质。最后将电子束聚焦后可用于超快电子衍射等研究。

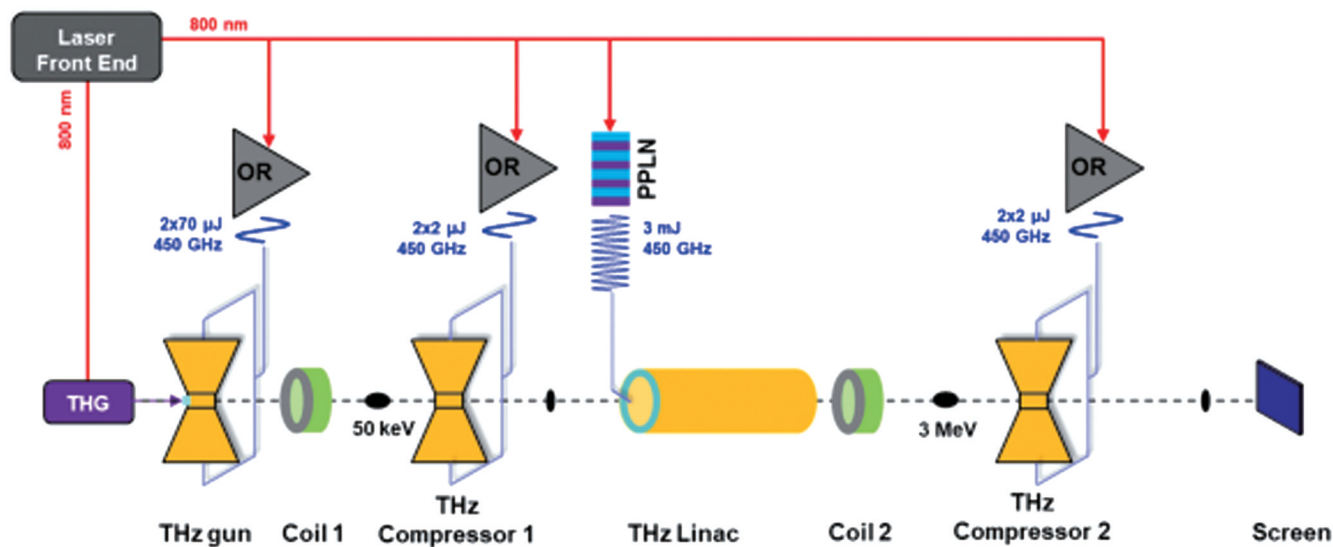


图 10 清华全光太赫兹加速器<sup>[90]</sup>

Fig. 10 All-optical terahertz accelerator configuration proposed by Tsinghua University<sup>[90]</sup>

ACHIP 是由多个国家和实验室共同努力的国际合作项目,它旨在证明激光驱动的加速器可以集成到芯片上,以实现全芯片的粒子加速器<sup>[91]</sup>。在其设计概念中,来自电子枪的电子束经过压缩和一级加速之后进入电介质激光加速装置,由于最大几十 GV/m 的加速梯度,使得可以通过合理分配激光能量并改变加速结构来将电子快速地从低能加速到接近光速。整套装置甚至能集成到鞋盒大小。加速后的电子可以通过波荡器等装置来产生 X 射线等光源用于癌症治疗,或者

作为桌面小型化的粒子加速器用作研究物理、生物、化学等方面的工具。

这些方案都具有各自的特点和优势。例如,AXSIS 技术具有更高的成像分辨率和能量分辨率,能够探测电子的运动,适用于物质科学、能源科学等领域;全光太赫兹加速器使用太赫兹激光和光阴极途径实现电子束加速,能够以较低的成本和更加灵活的方式产生高质量的电子束,适用于 X 射线自由电子激光、生物医学成像和材料科学等领域;而 ACHIP 项目则是

一个全球性计划,旨在探索芯片加速器在实际应用中的潜力,其体积更小、能耗更低,减少电磁辐射的危害,适用于医学、安检、高能物理等领域。未来,这些小型化/集成的加速方案将继续完善和开发,以期获得更高的加速能力和更广泛的应用场景。

## 5 总结与展望

本文回顾了从太赫兹波到光波驱动的综合加速器的相关研究进展。通过回顾太赫兹电子加速和电介质激光加速发展历程,系统梳理了构成完整加速器束线所需的加速和对电子束相空间调控的组成部分,并在最后介绍了目前国内外关于集成加速器的方案构想。虽然目前关于非相对论和相对论加速、级联加速、相空间控制、加速器材料及结构设计等都有了很大的突破,但是还不足以支撑一个成熟应用化的紧凑型加速器的实现。一方面,泵浦源的功率有待进一步提高。目前实验室已实现毫焦甚至亚焦耳量级的太赫兹辐射,如果将这一系列在超强太赫兹脉冲上取得的突破应用于加速器研究,可以期望电子束能量增益获得 MeV 甚至 GeV 量级的提升。另一方面,未来的全光太赫兹加速器以及电介质的片上集成加速器需要连续变化的介质结构或者其他复杂的结构设计,这对目前的加工技术也提出了更高的要求。可以期盼的是,随着光源技术的发展以及加工技术的成熟,未来集成加速器的出现不仅将使对小型化的电子源的追求照进现实,还将引起安全扫描、医疗治疗、先进光源、超快科学、高能物理等领域的变革。

## 参 考 文 献

- [1] Anderle D P, Bertone V, Cao X, et al. Electron-ion collider in China[J]. *Frontiers of Physics*, 2021, 16(6): 64701.
- [2] Dutta B, Ghosh S, Gurrola A, et al. Probing an MeV-scale scalar boson in association with a TeV-scale top-quark partner at the LHC [J]. *Journal of High Energy Physics*, 2023, 2023(3): 164.
- [3] Bostedt C, Boutet S, Fritz D M, et al. Linac Coherent Light Source: the first five years[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2016, 88(1): 015007.
- [4] Decking W, Abeghyan S, Abramian P, et al. A MHz-repetition-rate hard X-ray free-electron laser driven by a superconducting linear accelerator[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(6): 391-397.
- [5] Beck J A. Process variation in electron beam sterilization[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2012, 81(8): 1236-1240.
- [6] Veronesi U, Orecchia R, Maisonneuve P, et al. Intraoperative radiotherapy versus external radiotherapy for early breast cancer (ELIOT): a randomised controlled equivalence trial[J]. *The Lancet Oncology*, 2013, 14(13): 1269-1277.
- [7] Spitz D R, Buettner G R, Petronek M S, et al. An integrated physico-chemical approach for explaining the differential impact of FLASH versus conventional dose rate irradiation on cancer and normal tissue responses[J]. *Radiotherapy and Oncology*, 2019, 139: 23-27.
- [8] Yang J, Zhu X L, Wolf T J A, et al. Imaging CF3I conical intersection and photodissociation dynamics with ultrafast electron diffraction[J]. *Science*, 2018, 361(6397): 64-67.
- [9] Horstmann J G, Böckmann H, Wit B, et al. Coherent control of a surface structural phase transition[J]. *Nature*, 2020, 583(7815): 232-236.
- [10] Kilpatrick W D. Criterion for vacuum sparking designed to include both RF and DC[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1957, 28(10): 824-826.
- [11] Malka V, Faure J, Gauduel Y A, et al. Principles and applications of compact laser-plasma accelerators[J]. *Nature Physics*, 2008, 4(6): 447-453.
- [12] Leemans W P, Gonsalves A J, Mao H S, et al. Multi-GeV electron beams from capillary-discharge-guided subpetawatt laser pulses in the self-trapping regime[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(24): 245002.
- [13] Guénot D, Gustas D, Vernier A, et al. Relativistic electron beams driven by kHz single-cycle light pulses[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(5): 293-296.
- [14] Nanni E A, Huang W R, Hong K H, et al. Terahertz-driven linear electron acceleration[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8486.
- [15] Hibberd M T, Healy A L, Lake D S, et al. Acceleration of relativistic beams using laser-generated terahertz pulses[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(12): 755-759.
- [16] Xu H X, Yan L X, Du Y C, et al. Cascaded high-gradient terahertz-driven acceleration of relativistic electron beams[J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(6): 426-430.
- [17] Breuer J, Hommelhoff P. Laser-based acceleration of nonrelativistic electrons at a dielectric structure[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(13): 134803.
- [18] Peralta E A, Soong K, England R J, et al. Demonstration of electron acceleration in a laser-driven dielectric microstructure[J]. *Nature*, 2013, 503(7474): 91-94.
- [19] Sapra N V, Yang K Y, Verduynde D, et al. On-chip integrated laser-driven particle accelerator[J]. *Science*, 2020, 367(6473): 79-83.
- [20] Maier A R, Delbos N M, Eichner T, et al. Decoding sources of energy variability in a laser-plasma accelerator[J]. *Physical Review X*, 2020, 10(3): 031039.
- [21] Wang W T, Feng K, Ke L T, et al. Free-electron lasing at 27 nanometres based on a laser wakefield accelerator[J]. *Nature*, 2021, 595(7868): 516-520.
- [22] Labat M, Cabadağ J C, Ghaith A, et al. Seeded free-electron laser driven by a compact laser plasma accelerator[J]. *Nature Photonics*, 2023, 17(2): 150-156.
- [23] Shimoda K. Proposal for an electron accelerator using an optical maser[J]. *Applied Optics*, 1962, 1(1): 33-35.
- [24] Palmer R B. Interaction of relativistic particles and free electromagnetic waves in the presence of a static helical magnet[J]. *Journal of Applied Physics*, 1972, 43(7): 3014-3023.
- [25] van Steenbergen A, Gallardo J, Sandweiss J, et al. Observation of energy gain at the BNL inverse free-electron-laser accelerator[J]. *Physical Review Letters*, 1996, 77(13): 2690-2693.
- [26] Piestrup M A, Rothbart G B, Fleming R N, et al. Momentum modulation of a free electron beam with a laser[J]. *Journal of Applied Physics*, 1975, 46(1): 132-137.
- [27] Takeda Y, Matsui I. Laser linac with grating[J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 1968, 62(3): 306-310.
- [28] Mizuno K, Pae J, Nozokido T, et al. Experimental evidence of the inverse Smith-Purcell effect[J]. *Nature*, 1987, 328(6125): 45-47.
- [29] Huang W R, Fallahi A, Wu X J, et al. Terahertz-driven, all-optical electron gun[J]. *Optica*, 2016, 3(11): 1209-1212.
- [30] Zhang D F, Fallahi A, Hemmer M, et al. Segmented terahertz electron accelerator and manipulator (STEAM) [J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(6): 336-342.
- [31] Zhang D F, Fakhari M, Cankaya H, et al. Cascaded multicycle terahertz-driven ultrafast electron acceleration and manipulation[J]. *Physical Review X*, 2020, 10: 011067.
- [32] Curry E, Fabbri S, Maxson J, et al. Meter-scale terahertz-driven acceleration of a relativistic beam[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120(9): 094801.
- [33] Zhang D F, Fallahi A, Hemmer M, et al. Femtosecond phase

- control in high-field terahertz-driven ultrafast electron sources[J]. *Optica*, 2019, 6(7): 872-877.
- [34] Snively E C, Othman M A K, Kozina M, et al. Femtosecond compression dynamics and timing jitter suppression in a THz-driven electron bunch compressor[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 124(5): 054801.
- [35] Kealhofer C, Schneider W, Ehberger D, et al. All-optical control and metrology of electron pulses[J]. *Science*, 2016, 352(6284): 429-433.
- [36] Zhao L R, Wang Z, Lu C, et al. Terahertz streaking of few-femtosecond relativistic electron beams[J]. *Physical Review X*, 2018, 8(2): 021061.
- [37] Li R K, Hoffmann M C, Nanni E A, et al. Terahertz-based subfemtosecond metrology of relativistic electron beams[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2019, 22(1): 012803.
- [38] Breuer J, Graf R, Apolonski A, et al. Dielectric laser acceleration of nonrelativistic electrons at a single fused silica grating structure: experimental part[J]. *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, 2014, 17(2): 021301.
- [39] Wu Z R, England R J, Ng C K, et al. Coupling power into accelerating mode of a three-dimensional silicon woodpile photonic band-gap waveguide[J]. *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, 2014, 17(8): 081301.
- [40] Black D S, Zhao Z X, Leedle K J, et al. Operating modes of dual-grating dielectric laser accelerators[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2020, 23(11): 114001.
- [41] Hirano T, Urbanek K E, Ceballos A C, et al. A compact electron source for the dielectric laser accelerator[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116(16): 161106.
- [42] Cesar D, Custodio S, Maxson J, et al. High-field nonlinear optical response and phase control in a dielectric laser accelerator[J]. *Communications Physics*, 2018, 1: 46.
- [43] Shiloh R, Illmer J, Chlouba T, et al. Electron phase-space control in photonic chip-based particle acceleration[J]. *Nature*, 2021, 597(7877): 498-502.
- [44] Joshi C. The Los Alamos Laser Acceleration of Particles Workshop and beginning of the advanced accelerator concepts field [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2012, 1507(1): 61-66.
- [45] England R J, Noble R J, Bane K, et al. Dielectric laser accelerators [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2014, 86(4): 1337-1389.
- [46] Hebling J, Almasi G, Kozma I, et al. Velocity matching by pulse front tilting for large area THz-pulse generation[J]. *Optics Express*, 2002, 10(21): 1161-1166.
- [47] Zhang B L, Ma Z Z, Ma J L, et al. 1.4-mJ high energy terahertz radiation from lithium niobates[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 15(3): 2000295.
- [48] Wu X J, Kong D Y, Hao S B, et al. Generation of 13.9-mJ terahertz radiation from lithium niobate materials[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(23): 2208947.
- [49] Zhang L L, Wang W M, Wu T, et al. Strong terahertz radiation from a liquid-water line[J]. *Physical Review Applied*, 2019, 12(1): 014005.
- [50] Fülöp J A, Tzortzakis S, Kampfrath T. Laser-driven strong-field terahertz sources[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(3): 1900681.
- [51] Koulouklidis A D, Gollner C, Shumakova V, et al. Observation of extremely efficient terahertz generation from mid-infrared two-color laser filaments[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 292.
- [52] Zhang D D, Zeng Y S, Bai Y F, et al. Coherent surface plasmon polariton amplification via free-electron pumping[J]. *Nature*, 2022, 611(7934): 55-60.
- [53] Othman M A K, Hoffmann M C, Kozina M E, et al. Parallel-plate waveguides for terahertz-driven MeV electron bunch compression[J]. *Optics Express*, 2019, 27(17): 23791-23800.
- [54] Liao G Q, Liu H, Scott G G, et al. Towards terawatt-scale spectrally tunable terahertz pulses via relativistic laser-foil interactions[J]. *Physical Review X*, 2020, 10(3): 031062.
- [55] Fallahi A, Fakhari M, Yahaghi A, et al. Short electron bunch generation using single-cycle ultrafast electron guns[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2016, 19(8): 081302.
- [56] Curry E, Fabbri S, Musumeci P, et al. THz-driven zero-slippage IFEL scheme for phase space manipulation[J]. *New Journal of Physics*, 2016, 18(11): 113045.
- [57] Lemery F, Floettmann K, Piot P, et al. Synchronous acceleration with tapered dielectric-lined waveguides[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2018, 21(5): 051302.
- [58] Zhang D F, Zeng Y S, Fakhari M, et al. Long range terahertz driven electron acceleration using phase shifters[J]. *Applied Physics Reviews*, 2022, 9(3): 031407.
- [59] Tang H, Zhao L R, Zhu P F, et al. Stable and scalable multistage terahertz-driven particle accelerator[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 127(7): 074801.
- [60] Tian Y, Liu J S, Bai Y F, et al. Femtosecond-laser-driven wire-guided helical undulator for intense terahertz radiation[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(4): 242-246.
- [61] Zeng Y S, Zhou C L, Song L W, et al. Guiding and emission of millijoule single-cycle THz pulse from laser-driven wire-like targets [J]. *Optics Express*, 2020, 28(10): 15258-15267.
- [62] Zhang D D, Bai Y F, Zeng Y S, et al. Towards high-repetition-rate intense terahertz source with metal wire-based plasma[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(1): 5910605.
- [63] Yu X Q, Zeng Y S, Song L W, et al. Megaelectronvolt electron acceleration driven by terahertz surface waves[J]. *Nature Photonics*, 2023. DOI:10.1038/s41566-023-01251-8.
- [64] Lin X E. Photonic band gap fiber accelerator[J]. *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, 2001, 4(5): 051301.
- [65] Wei Y, Ibison M, Xia G, et al. Dual-grating dielectric accelerators driven by a pulse-front-tilted laser[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(29): 8201-8206.
- [66] Leedle K, Pease F, Byer R L, et al. Laser acceleration and deflection of 96.3 keV electrons with a silicon dielectric structure [J]. *Optica*, 2015, 2(2): 158-161.
- [67] Deng H, Leedle K J, Miao Y, et al. Gallium oxide for high-power optical applications[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(7): 1901522.
- [68] Chlouba T, Shiloh R, Forsberg P, et al. Diamond-based dielectric laser acceleration[J]. *Optics Express*, 2021, 30(1): 505-510.
- [69] Li J Q, Zheng D G, Huang S Y, et al. Efficiently accelerated free electrons by metallic laser accelerator[EB/OL]. [2023-02-03]. <https://www.researchsquare.com/article/rs-2290524/v1>.
- [70] Wootton K P, Wu Z R, Cowan B M, et al. Demonstration of acceleration of relativistic electrons at a dielectric microstructure using femtosecond laser pulses[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(12): 2696-2699.
- [71] Cesar D, Maxson J, Shen X, et al. Enhanced energy gain in a dielectric laser accelerator using a tilted pulse front laser[J]. *Optics Express*, 2018, 26(22): 29216-29224.
- [72] Leedle K J, Ceballos A, Deng H Y, et al. Dielectric laser acceleration of sub-100 keV electrons with silicon dual pillar grating structures[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(18): 4344-4347.
- [73] Yousefi P, Schönenberger N, McNeur J, et al. Dielectric laser electron acceleration in a dual pillar grating with a distributed Bragg reflector[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(6): 1520-1523.
- [74] McNeur J, Kozák M, Schönenberger N, et al. Elements of a dielectric laser accelerator[J]. *Optica*, 2018, 5(6): 687-690.
- [75] Fishman T, Haeusler U, Dahan R, et al. Imaging the field inside nanophotonic accelerators[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 3687.
- [76] Barwick B, Flannigan D J, Zewail A H. Photon-induced near-field electron microscopy[J]. *Nature*, 2009, 462(7275): 902-906.
- [77] de Abajo F J G, Asenjo-García A, Kociak M. Multiphoton absorption and emission by interaction of swift electrons with evanescent light fields[J]. *Nano Letters*, 2010, 10(5): 1859-1863.
- [78] Park S T, Lin M, Zewail A H. Photon-induced near-field electron

- microscopy (PINEM): theoretical and experimental[J]. *New Journal of Physics*, 2010, 12(12): 123028.
- [79] Adiv Y, Wang K P, Dahan R, et al. Quantum nature of dielectric laser accelerators[J]. *Physical Review X*, 2021, 11(4): 041042.
- [80] Dahan R, Gorlach A, Haeusler U, et al. Imprinting the quantum statistics of photons on free electrons[J]. *Science*, 2021, 373(6561): eabj7128.
- [81] Reinhardt O, Kammer I. Theory of shaping electron wavepackets with light[J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(10): 2859-2870.
- [82] Zhao L R, Tang H, Lu C, et al. Femtosecond relativistic electron beam with reduced timing jitter from THz driven beam compression [J]. *Physical Review Letters*, 2020, 124(5): 054802.
- [83] Panofsky W K H, Wenzel W A. Some considerations concerning the transverse deflection of charged particles in radio-frequency fields[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1956, 27(11): 967.
- [84] Zhou C L, Bai Y F, Song L W, et al. Direct mapping of attosecond electron dynamics[J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(3): 216-221.
- [85] Kozák M, McNeur J, Leedle K J, et al. Optical gating and streaking of free electrons with sub-optical cycle precision[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 14342.
- [86] Zhao L R, Wang Z, Tang H, et al. Terahertz oscilloscope for recording time information of ultrashort electron beams[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122(14): 144801.
- [87] Aspden H. Earnshaw's theorem[J]. *Nature*, 1986, 319(6048): 8.
- [88] Niedermayer U, Egenolf T, Boine-Frankenheim O, et al. Alternating-phase focusing for dielectric-laser acceleration[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(21): 214801.
- [89] Matlis N H, Ahr F, Calendron A L, et al. Acceleration of electrons in THz driven structures for AXISIS[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2018, 909: 27-32.
- [90] Xu H, Li R, Yan L, et al. A 3 MeV all optical terahertz-driven electron source at Tsinghua University [EB/OL]. [2023-02-03]. <https://accelconf.web.cern.ch/ipac2021/papers/tuxb01.pdf>.
- [91] Stanford University. ACHIP: Accelerator on a Chip International Program[EB/OL]. [2023-02-03]. <https://achip.stanford.edu/>.

## Research Advances in Integrated Electron Accelerators Driven by Spectrum Band from Terahertz to Optical Waves

Zeng Yushan<sup>1</sup>, Yu Xieqiu<sup>1,2</sup>, Tian Ye<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

### Abstract

**Significance** Particle accelerators are scientific facilities that utilize electromagnetic waves to accelerate charged particles to speeds close to that of light. Over the last century, accelerator development has contributed significantly to the advancement of science, particularly for the investigation of microscopic constituents that comprise macroscopic matter, and broader application communities such as the construction of advanced light sources, material science, and medical therapy. Conventionally, radio frequency (RF) is employed to power mature accelerators. However, this acceleration scheme is constrained by an acceleration gradient of 100 MV/m and encounters challenges such as high price, significant footprint, and a lengthy construction time, all of which impede its promotion for wider scientific and technological applications. As a result, the search for new electron acceleration technologies has intensified in the pursuit of advanced accelerators.

To reduce accelerator size, increasing operation frequency provides an effective path for enhancing accelerator performance and availability. In such cases, energy transfer from electromagnetic waves to electrons can occur over shorter distances, resulting in larger accelerating gradients and a smaller device footprint. In particular, contrary to the long wavelength associated with RF, electron acceleration driven by terahertz (THz) waves and lasers on a dielectric grating can generate acceleration gradients up to GV/m in these higher frequency bands. Recent progress utilizing terahertz and optical waves has already demonstrated non-relativistic and relativistic electron acceleration and phase space manipulation. Moreover, the combination of a light-wave-driven electron source with a novel accelerator enables realization of an all-optical electron source, which unlocks new directions for small-scale and even integrated accelerator development.

**Progress** Research on optical-field-driven electron acceleration originates from the laser invention in the last century. However, owing to electron beam distortion by scattering in the air, dielectric laser acceleration takes advantage of phase-matching between the electron and laser on a grating surface, which has only emerged over the past two decades, and was experimentally demonstrated by Byer *et al.* and Hommelhoff *et al.* in 2013. Subsequently, advancement toward the concept of an integrated accelerator has been proposed and extensively studied worldwide. Currently, two primary directions have emerged that utilize the distinct electromagnetic spectral bands of THz and laser waves. In dielectric laser acceleration, the average acceleration gradient witnessed rapid growth from 25 MV/cm (for sub-relativistic electrons) and 300 MV/m (for relativistic electrons) to near GV/m by careful design of the accelerator materials and structures (Figs. 3 and 5). In general, the established designs rely on single- and double-sided grating, with the leading arrangement exploring flexible dual pillar rows and inverse-design structures. This could facilitate access to the required integrated electron accelerator.



Although increasing the operation frequency can significantly reduce accelerator size, the laser's short wavelength also poses significant challenges for synchronization, stability, and acceleration of a substantial amount of charge. Therefore, THz radiation emerges as a suitable operating band for compact accelerators that alleviate these stringent requirements and the accelerator structure processing precision. Nanni *et al.* reported the first experimental demonstration of THz-driven acceleration in 2015. Meanwhile, developments in electron energy gain (Fig. 1) and phase space manipulations (Fig. 5) have emerged by increasing THz wave energy and optimizing accelerator structures, which also increases interaction distance. To further improve THz-driven electron acceleration, however, additional energy must be made available, necessitating the development of new THz wave generation and transmission techniques. The recently unraveled amplification of THz surface plasmons via free electron pumping (Fig. 2) provides a novel method for accelerating electrons, enabling energy gain in the order of MeV.

**Conclusions and Prospects** This review examines research progress on electron acceleration driven by THz to optical bands in the electromagnetic spectrum, including related advances of coherent electron sources and beam control, and investigates the emerging novel concept of integrated electron accelerators. Despite significant progress in both the acceleration/manipulation of non-relativistic and relativistic electrons, current advances remain insufficient to enable the development of a compact accelerator for mature applications. It is anticipated that higher accelerator pump power availability will lead to breakthroughs in terms of energy gain reaching MeV or even GeV scales. Recent progress in the generation of millijoule or even subjoule scale THz radiation has already illuminated such prospects in THz-driven acceleration research. The intense surface wave, in particular, allows access to an integrated electron source device, which eliminates the necessity for bulky optics for free-space THz wave generation, transport, and mode conversion. Future processing precision refinement, on the other hand, would enable more precise control of tip-generated electrons and their phase-matching with optical waves. This is particularly critical for dielectric laser acceleration, which is dependent on electron generation and steering. In the future, integrated accelerators are anticipated as a viable alternative to large-scale RF particle accelerators in university laboratories. This will potentially trigger significant research development in physics, chemistry, medicine, and other disciplines.

**Key words** terahertz; electron acceleration; dielectric laser acceleration; integrated accelerator