

X 射线自由电子激光*

赵振堂[†] 冯超

(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201204)

2018-07-21 收到

[†] email: zhaozhtang@sinap.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20180801

X-ray free electron lasers

ZHAO Zhen-Tang[†] FENG Chao

(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China)

摘要 X 射线自由电子激光是一种基于电子直线加速器的大型科学研究装置, 可以产生超高亮度、超短脉冲、波长可调的相干 X 射线辐射, 在物理、化学、材料、生命科学等诸多领域都有非常广泛和极为重要的应用。文章介绍了 X 射线自由电子激光的基本原理、运行模式、发展历程、国内外 X 射线自由电子激光大科学装置的发展态势以及近年来我国 X 射线自由电子激光装置的现状。

关键词 X 射线, 自由电子激光, 振荡器, 自放大自发辐射, 种子型

Abstract X-ray free electron lasers (FELs) are large-scale scientific facilities that hold great promise for the generation of coherent short-wavelength radiation with ultra-high brightness and ultra-short pulse duration. They enable unprecedented exploration of physics, chemistry, material science, biology, and so forth, with spatial and temporal resolution down to the atomic and molecular level. This article gives an overview of the basic principle, historical development, current operation modes, and state-of-the-art of X-ray FEL facilities throughout the world, as well as the rapid development in recent years of X-ray FELs in China.

Keywords X-ray, free electron laser, oscillator, self-amplified spontaneous emission, seeding technique

1 X 射线光源与自由电子激光

光源是推动人类文明发展的利器, 光源的每一次进步都极大地增强了人们认识和改变未知世界的能力并有力地推动了科学和技术的发展。X 射线光源是人们观测物体内部结构、在分子与原子尺度上探测与认识物质内部微观构造与动态过程的不可替代的尖端装备。17 世纪初人类发明了望远镜和显微镜, 利用电磁波中的可见光部分(波

长 400—760 nm), 使认知的触角延伸到了极广的宇宙和极小的微观世界, 为人类认识物质世界及其起源和演化打开了大门。19 世纪末人类发现了 X 射线、发明了 X 光机, 从此认知世界的视野扩展至肉眼无法看到的物质内部和原子分子等微观世界, X 射线的诊断和应用以及治疗技术也得到了持续不断的发展。但是, 那时 X 射线光源的亮度和相干性还十分有限, 这在很大程度上成为了限制其在科学研究上实现更广泛应用的瓶颈, 这种情况一直到 20 世纪中叶同步辐射的发现和同步辐射 X 光源的应用才发生彻底改变。在此过程中, 20 世纪 60 年代人类发明了激光, 一种前所未

* 国家重点研发计划(批准号: 2016YFA0401900)、国家自然科学基金(批准号: 11475250; 11605277)资助项目

有的高亮度、全相干的光源。半个多世纪以来，激光广泛应用在人类社会的各个方面，并且在科学前沿研究上发挥了巨大的促进作用，大大提高了实验观测的时间和空间分辨率。然而，由于受到放大介质的限制，常规激光却很难向短波长的真空紫外和X射线的波段推进。21世纪初，基于电子直线加速器的X射线自由电子激光在美国SLAC实验室研制成功^[1]，开辟了X射线光源及其应用的全新时代^[2]。

早在19世纪末，经典电磁理论就预言相对论电子在改变运动方向时会沿切线方向辐射电磁波。1947年，人们在美国GE公司的一台70 MeV同步加速器上观察到了这种电磁辐射，也因此称作同步辐射。随着高能加速器的发展，人们意识到利用高能量相对论电子束可以产生高亮度的X射线，由此翻开了同步辐射光源发展的历史篇章。基于储存环加速器的同步辐射光源利用电子运动方向发生变化而产生连续谱的韧致辐射，其特点是光谱覆盖范围广、亮度高、光的准直性好、光脉冲具有精确的时间结构。几十年来，同步辐射光源已经历了三代的发展，目前以扭摆器和波荡器等插入件为主要发光设备的第三代同步辐射光源已成为物理、化学、材料、医学、生命科学等众多科学领域中基础研究和应用研究的一种最为先进和不可或缺的研究手段。同时，为了满足更高的应用需求，同步辐射光源正在向相干性更好、脉冲长度更短、亮度更高的衍射极限储存环光源即第四代光源发展。

自由电子激光(free-electron laser, 简称FEL)作为新一代相干光源的可行技术路线，其原理是采用加速器产生的高品质电子束与NS极交替排列的磁铁阵列——波荡器相互作用来产生具备激光品质的高功率相干辐射，其波长由电子束的能

量和波荡器的磁场强度与周期长度决定，其输出功率由电子束的能量、切片能散和切片发射度以及波荡器的磁场决定，输出的辐射既可覆盖第三代同步辐射光源广阔的光谱范围，同时又具备常规激光的相干性和超高亮度与飞秒级(1飞秒等于 10^{-15} 秒)超短脉冲的特质，并具有按照需求确定时间结构的优异特性。与典型的第三代同步辐射光源相比，X射线自由电子激光的峰值亮度高9个量级，光脉冲短3个量级，相干性提高3个量级以上。这些特点突破了现有常规激光和同步辐射光源的许多禁区，使得自由电子激光自诞生之日起就备受人们的青睐和广泛重视。

自由电子激光是一种使用相对论电子束通过周期性变化的磁场以受激辐射方式放大电磁波的新型强相干光源。自由电子激光装置通常由加速器、波荡器和光束线站三部分组成。绝大多数自由电子激光都是由电子直线加速器驱动的，其典型结构如图1所示。用于自由电子激光的直线加速器一般由电子枪和主加速器组成，电子枪提供品质优异的电子束，主加速器将此电子束加速至波长所要求的能量并保持其束流性能不退化，之后电子束被注入到磁铁极性交替变换的波荡器中，电子因做扭摆运动而在其前进方向上自发地发射电磁辐射，辐射场与电子束相互作用，满足共振关系时，电子的动能将被不断地传递给辐射光，从而使辐射场强不断增大。按照放大增益，可将自由电子激光分为低增益和高增益两种放大机制的自由电子激光：低增益自由电子激光的放大器部分由波荡器和光学谐振腔组成；高增益自由电子激光的放大器仅由波荡器或外加常规种子激光系统组成。

相对于传统激光器，FEL主要有以下三方面的优点：(1)功率高。传统激光器由于受到工作介质损伤阈值、散热、非线性效应等的限制，难以输出非常高的平均功率，而FEL的工作环境为真空，不存在热效应积累的问题，其输出功率由电子束的功率所决定，理论上不存在绝对的上限。(2)光谱覆盖



图1 自由电子激光基本构成

范围广且连续可调。传统激光器只能输出特定频率的激光，只有较少的几种激光器，如准分子和二氧化碳激光器可以有较窄的调节范围。由FEL的原理可知，其输出波长在理论上不受限制，通过调节电子束和波荡器参数可以实现从太赫兹到X射线的任意波段的输出，且通过改变电子束能量或波荡器间隙等参数，一台FEL也可以在一定范围内连续调节输出激光的波长。(3)光束质量好。FEL可输出光谱窄、相干性好的光束，而且其光脉冲的时间结构也很优异，输出脉冲长度可在皮秒到阿秒量级进行选择，脉冲的时间结构也可根据应用需要做出相应调节。

FEL的上述突出优点使得其在固体表面物理、半导体物理、凝聚态物理、光谱学、非线性光学、生物学、化学、医学、材料科学、能源、通信、国防科学等诸多方面有十分重要的应用。FEL是探索微观世界的理想探针，能为多个学科开辟全新的研究领域，而FEL装置的建设也能推动相关高新技术和设备的发展。正如诺贝尔物理学奖获得者杨振宁先生所说：“自由电子激光对于21世纪的科学与工业的影响是无法估计的。”

2 自由电子激光基本原理

与常规激光不同，自由电子激光以真空中的相对论电子束为工作介质，由自由电子产生的电磁场辐射的相干叠加和放大而产生。相对论电子束在经过一对由N极和S极构成的偏转磁铁时，将沿其圆周运动轨道的切线方向发射出波长在一定范围内连续分布的同步辐射。自由电子激光的核心器件为波荡器，它是由一系列N极和S极交替排列的磁铁阵列所构成，如图2所示。电子束经过波荡器时，将扭摆前进，通过合理选择电子束和波荡器的参数，电子束在经过每一对磁铁所发出的同步辐射将会在电子束的前进方向和固定的波长上相干叠加，即产生较强的相干辐射，此相干辐射又会在波荡器中与电子束本身相互作用，在电子束中产生尺度在辐射波长量级的微结

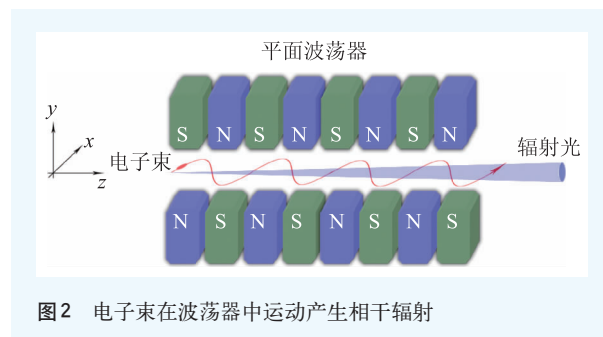


图2 电子束在波荡器中运动产生相干辐射

构，从而进一步增强相干辐射直至达到饱和。这种强相干辐射就是自由电子激光，其波长与电子束能量和波荡器参数有如下关系：

$$\lambda_{\text{FEL}} = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K_u^2}{2} \right),$$

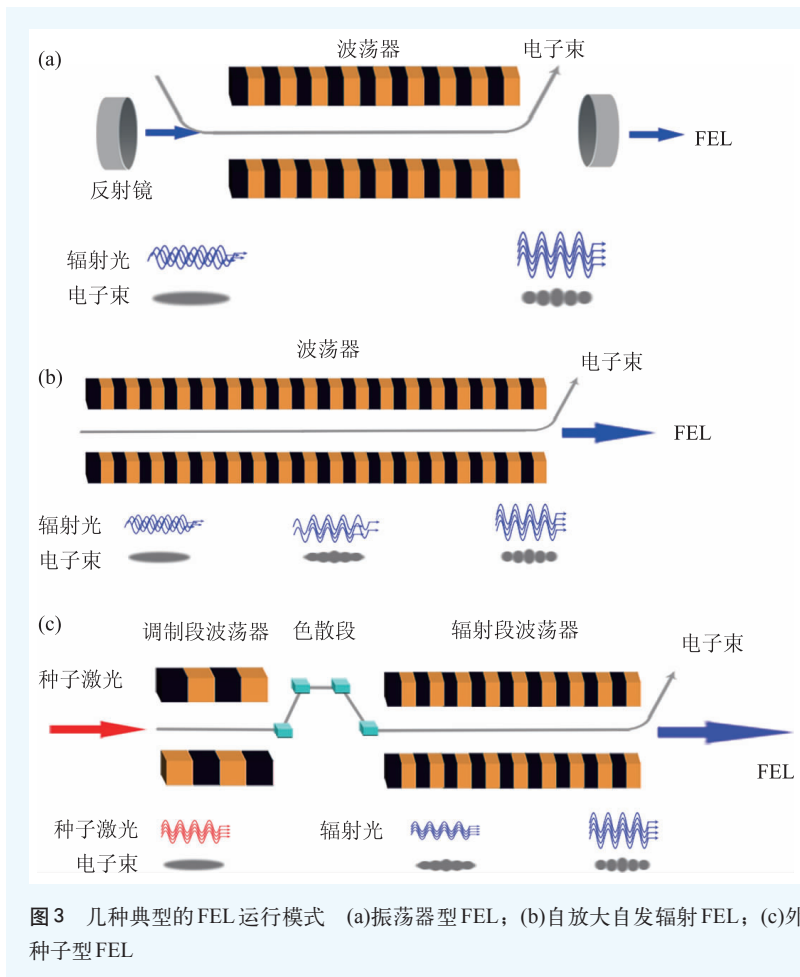
$$K_u = 0.934 B_u \lambda_u.$$

其中 λ_{FEL} 为自由电子激光谐振波长， λ_u 为波荡器磁场周期， γ 为相对论电子的共振能量， K_u 为波荡器参数，由波荡器峰值场强 B_u (单位为T)和波荡器周期(单位为cm)所决定。

按照运行模式，自由电子激光主要可分为振荡器型、自放大自发辐射(self-amplified spontaneous emission, 简称SASE)^[3,4]和外种子型三种，如图3所示，其中振荡器型为低增益FEL，而SASE和种子型都为单次通过放大的高增益FEL。

2.1 振荡器型FEL

在低增益自由电子激光中，电子束与辐射光场之间的能量交换小，光场每次通过波荡器时只能获得较小的能量增益。通常低增益FEL中电子束峰值流强较低，波荡器也较短。典型的低增益FEL为振荡器型FEL，如图3(a)所示，其波荡器被放置于光学谐振腔之中，依靠光学谐振腔使返回的辐射光场与电子束相互作用，光场经多次放大到足够的强度后使电子束产生群聚，进而产生受激辐射并最终达到饱和输出。目前振荡器型FEL多用于THz和远红外波段，在真空紫外及更短的波长范围，由于缺乏合适的反射材料，振荡器型FEL难以工作。近些年来，随着加速器技术和晶体反射材料的发展，在硬X射线波段实现振



荡器型FEL(XFEL)成为了可能^[5,6],未来XFEL将有可能为用户提供横向纵向全相干、稳定的X射线自由电子激光。

2.2 自放大自发辐射FEL

为将FEL向短波长拓展,人们发展了电子束单次通过波荡器进行增益放大的高增益机制,其中最为简单有效的就是SASE,如图3(b)所示。SASE作为现今高增益FEL装置的主流方案,其优点是输出波长连续可调、结构相对简单,只需要将电子束通过一个较长的波荡器就可以输出高功率的FEL。但其缺点也十分明显:由于SASE初始阶段是靠电子束的噪声起振,导致其辐射的中心波长和脉冲能量的抖动都较大,在随后的指数增益过程中,初始噪声被不断放大。虽然由于

滑移效应的影响,SASE所产生的辐射是部分相干的(一个合作长度内),光谱带宽也会随之明显减小,但饱和处FEL的纵向相干性仍然不能让人满意。

改善SASE纵向相干性的一个有效手段是采用自种子运行机制^[7,8],其原理是将SASE的波荡器分为两段,中间用一个X射线单色器隔开,电子束在通过第一段波荡器时产生足够强的SASE光,但FEL还远未达到饱和,此辐射脉冲经过单色器后变成全相干的X射线辐射,之后被送入到后面的第二段波荡器中作为种子激光被同一个电子束继续放大直至达到饱和输出。X射线自种子运行模式首先在LCLS得到了实验的验证^[9,10],实验结果表明,通过采用自种子,SASE的带宽可以减小一到两个量级,大大提高了FEL的光谱亮度,但同时自种子FEL也存在着脉冲能量抖动

大等问题。

2.3 外种子型FEL

彻底改善高增益FEL全相干性能的有效途径是引入常规激光作为种子激光与电子束相互作用,我们将这一类FEL运行机制统称作外种子型。其特点是输出辐射继承了种子激光的特性,即具有很好的相干性及稳定性。最简单的外种子型运行机制是外种子直接驱动型(direct-seeding)FEL,其原理是将常规激光与电子束同时注入波荡器,当满足共振关系时,种子激光将与电子束相互作用并被不断放大直至饱和输出。

外种子直接驱动型FEL结构简单,输出辐射品质好,但波长受到种子激光波长的限制。若要得到输出波长在200 nm以下的辐射,只能采用高

次谐波产生(high-harmonic generation, 简称HHG)作为初始的种子光^[11-13], 但HHG技术目前尚不成熟, 所以direct seeding型FEL并未得到很大的发展。在随后的研究中人们发现当电子束中包含微聚束时, 它的群聚因子将自然地含有高次谐波分量, 若采用种子激光与电子束在波荡器中的相互作用来形成电子束群聚, 之后再连接一个共振在种子激光高次谐波上的波荡器来放大高次谐波辐射, 则可以有效地将辐射波长向短波长方向推进, 人们将这一运行机制称为谐波放大器^[14]。之后基于这一运行机制又提出了高增益高次谐波产生的种子型FEL原理(high-gain harmonic generation, 简称HGHG), 如图3(c)所示^[15, 16]。HGHG机制的提出大大拓展了外种子驱动型FEL光谱的覆盖范围, 是向短波长推进的有效手段, 但由于受到电子束能散的限制, 单级HGHG的谐波转换次数一般为10次左右, 较适合于产生真空紫外波段的FEL。为将HGHG进一步向X射线波段推进, 人们又提出了级联HGHG^[17, 18]和回声谐波产生(echo-enabled harmonic generation, 简称EEHG)运行机制^[19, 20], 并进行了实验验证^[21-25]。然而, 在产生超高次谐波时这些运行模式仍面临着电子束品质退化或初始噪声放大的问题, 对于这些问题, 都需要进行进一步的理论和实验研究。目前国际上多个FEL装置都先后开展了回声型FEL的实验研究工作^[26, 27], 并于近期成功实现了软X射线波段回声型FEL的出光和放大。

3 自由电子激光发展历史与现状

利用电子束产生相干电磁辐射与常规激光技术诞生在同一时期。1960年, 美国科学家R. Philips将扭摆磁铁与微波管结合, 用低能电子束产生了毫米波段的激光。1971年, 美国科学家J. Madey首次提出FEL的概念, 并用量子力学理论推导出了Madey定理^[28], 随后美国科学家W. Colson等人用经典电动力学的方法对FEL进行了完整的理论描述。1976年, J. Madey等人在斯坦福大学完成了首次FEL放大实验, 实现了波长10.6 μm 的

CO_2 激光的放大^[29]。1977年D. Deacon等人首次实现了基于光学谐振腔的振荡模式的FEL, 研制成功了世界上第一台红外FEL^[30]。至此带有光学谐振腔的低增益FEL理论得到充分的实验验证, FEL的研究和应用也随之蓬勃发展起来。然而, 低增益FEL进一步向短波长推进时却遇到了许多困难, 首先当时的电子束品质较差, 难以单程获得足够的增益, 其次从真空紫外开始的短波长波段缺乏相应的种子光源和合适的光学谐振腔反射材料, 这从根本上制约了振荡器型FEL的波长覆盖范围。

为突破这一瓶颈, 科学家们又提出和发展了高增益FEL理论, 开辟了产生短波长自由电子激光的新途径, 直接促使了X射线FEL的出现。1980年, A. Kondradenko和E. Saldin等人提出了单次放大的FEL理论^[3]。1984年, C. Pellegrini与R. Bonifacio等人提出了自放大自发辐射的概念(SASE)^[4]。电子束通过在波荡器中与自发辐射场作用产生微聚束, 进而使起源于噪声的自发辐射在后续的长波荡器中得到指数放大直至饱和。

80年代以来, 加速器技术上, 特别是低发射度注入器和束流操控等, 取得了长足进步, 高亮度光阴极微波电子枪的发展和完善使得基于电子直线加速器的高增益FEL成为可能^[31]。1996年, SASE模式首次在美国UCLA得到实验验证^[32], 高增益理论首次被实验证实。在此基础上, 人们开始考虑将FEL向更短波长和全相干推进, 多台试验装置先后完成了更短波长的高增益自由电子激光的饱和出光。1999年, 美国APS的LEUTL装置实现了可见光波段的SASE出光^[33], 2001年, 德国DESY的TTF FEL在真空深紫外波段实现了 $\sim 100\text{ nm}$ 的SASE的饱和出光并完成第一个用户实验^[34, 35]。SASE型自由电子激光具有极好的空间相干性, 但由其自身原理决定的时间相干性、波长和强度稳定性尚不够理想, 为克服这一缺陷美国科学家L. Yu于1990年提出了HGHG原理^[15], 并随后在布鲁克海文国家实验室的DUV FEL装置上实现了紫外波段的HGHG型自由电子激光的饱和放大^[36]。

本世纪初开始高增益自由电子激光进入了用户装置投入运行的新阶段, 2006年TTF升级为用户装置FLASH并实现了13 nm SASE出光^[37], 两年后FLASH实现6.5 nm SASE出光^[38]并取得了一批前沿研究成果。2009年4月, 美国SLAC的直线加速器相干光源LCLS首次实现了0.15 nm SASE出光^[1], 并于2009年9月开始用户实验, 这标志着人类进入了硬X射线FEL时代。2011年6月, 日本的SACLA成功实现了0.06 nm SASE出光^[39], 成为世界上波长最短的硬X射线激光。2013年, 意大利FERMI-FEL的两级级联HGHG

出光, 获得了4 nm的全相干自由电子激光, 这是世界上首个种子型X射线FEL^[21]。2016年至2017年, 韩国PAL-FEL^[40]、瑞士SwissFEL^[41]和世界上首个基于超导的硬X射线FEL装置European XFEL相继实现出光^[42], 并迅速开始用户实验。在此基础上, 基于连续波超导直线加速器的美国LCLS-II^[43]和中国X射线自由电子激光项目——SHINE^[44]分别于2015年和2018年开工建设。图4给出了目前国际上运行的、在建的和计划建造的X射线FEL装置, 可见这些装置主要集中在北美、欧洲和东亚, 表1给出了这些装置的主要参数, 图5给出了这些装置的鸟瞰图, 可以看到自由电子激光通常与第三代同步辐射放置于同一园区, 从而构成光子科学研究中心。

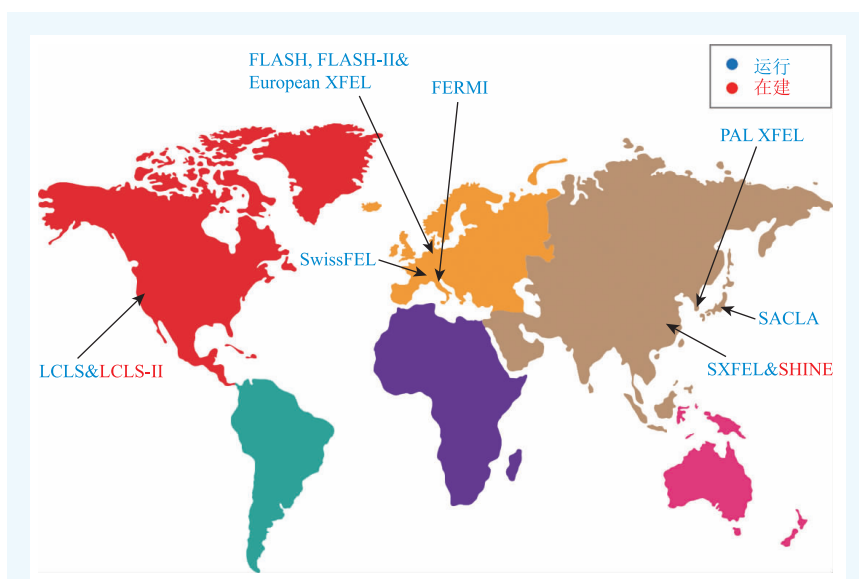


图4 国际上的X射线FEL装置分布

4 X射线自由电子激光的新发展

当今高增益FEL主要朝全相干、超短脉冲、极化控制、以及其他满足用户特定需求的灵活运行模式等方向发展。每一个发展方向同时又对应着一个新的应用领域拓展。

(1)全相干。SASE已经具有很好的横向相干性, 但纵向相干性较差, 表现为在时间和光谱分布上存在毛刺结构。目前改善X射线FEL纵向相干性的技术路线主要包括自种子运行机制、外种子运行机制以及X射线FEL振荡器等。

(2)超短脉冲。X射线FEL超短强脉冲可以单独使用, 也可以与台式激光器或第三代同步辐射光的光脉冲组成新一代的时间分辨“泵浦—探测”实

表1 国际上X射线FEL装置的主要参数

装置名称	加速器类型	电子束能量/GeV	光子能量范围/keV
LCLS	常温、S波段	14.3	1—15
LCLS-II	超导、L波段	4	0.2—5
FLASH	超导、L波段	1.25	0.014—0.3
Eu XFEL	超导、L波段	17.5	8.4—30
SACLA	常温、C波段	8	0.44—20
FERMI	常温、S波段	1.5	0.0124—0.3
PAL XFEL	常温、S波段	10	0.124—12.4
SwissFEL	常温、C波段	5.8	0.177—12.4
SXFEL	常温、C波段	1.5	0.1—0.6
SHINE	超导、L波段	8	0.4—25

验工具。在这些实验中，X射线FEL光脉冲能有效地用作原子、分子和纳米物质状态演变时瞬态过程中冻结画面照像术的频闪闪光，并将使动力学和瞬态过程的研究进入到亚皮秒至阿秒区的时间精度。未来X射线FEL的重要发展方向之一是如何进一步缩短FEL的脉冲长度至亚飞秒和阿秒量级，同时进一步提高超短脉冲的辐射功率。目前国际上产生超短FEL脉冲的主要方案包括基于增强型SASE^[45]、锁模^[46]、发射度破坏技术^[47]和啁啾脉冲放大技术^[48]等。

(3)极化控制。X射线FEL的偏振特性可以用EPU波荡器来实现调节。然而，短波长FEL中，只有意大利的FERMI采用全部EPU波荡器，目前已经向用户提供波长100—4 nm范围、脉冲能量10 μJ左右、偏振性可控的FEL脉冲，并且在原子光电离的二色效应、反铁磁材料的相干成像等方面取得了一系列的研究成果。对于其他已运行、包括在建和计划建造的短波长FEL，如何在平面型波荡器的基础上，控制FEL偏振特性，是近年来的一个重要课题。

(4)灵活运行模式。在泵浦—探测实验中，若两束激光波长相同，则可以对物质的某一特定的激发态进行激发和测量。然而，在更多的情况下，需要研究包含多个激发态的动力学系统，这时候我们需要泵浦和探测光的光子能量有所区别，且可以相互独立地调谐。双色/多色FEL是近年来在高增益FEL领域迅速发展起来的一种前沿技术，其原理是采用一些新型的FEL运行机制，使得同一团电子束在波荡器中可以连续发射出两个具有不同光子能量的超短辐射脉冲，且两个脉冲的时间延迟和中心波长都可以连续、独立地调谐^[49, 50]。由于两束脉冲由同一团电子束

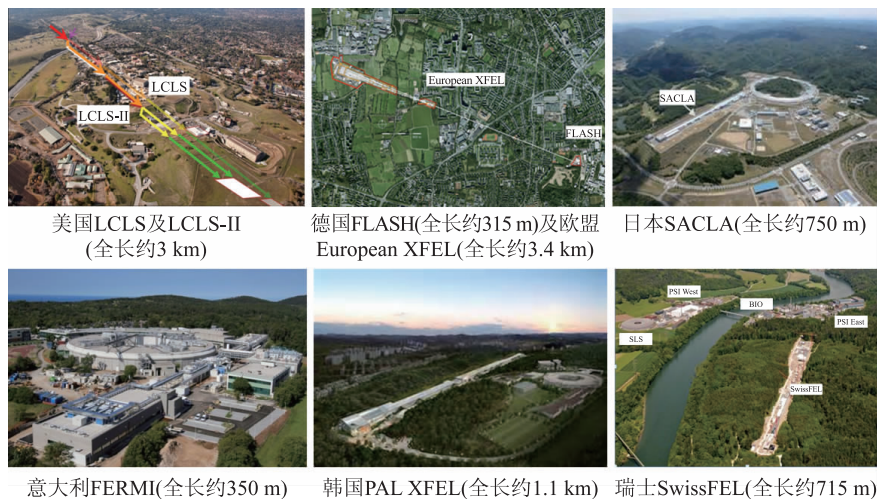


图5 国际上的X射线FEL装置及规模

发出，因而它们之间不存在相对的时间抖动，相对时间间隔调节的精度可达阿秒量级。这种新型双色运行模式的出现大大拓展了FEL的应用范围，使得采用FEL研究一些原子内层电子能级的超快基本化学反应与超快相变过程成为了可能。

5 中国X射线自由电子激光的发展现状

我国的自由电子激光研究工作起步于20世纪80年代，中国科学院上海光学精密机械研究所(简称上海光机所)和中国科学技术大学等单位率先在国内开展了自由电子激光实验工作，1985年上海光机所率先实现了拉曼型FEL的出光。在国家“863”等项目支持下，中国科学院高能物理研究所成功研制了北京FEL装置(BFEL)，于1993年在亚洲率先实现了红外饱和出光，性能达到当时国际先进水平。1994年，中国工程物理研究院曙光一号自由电子激光装置SG-1利用感应型加速器实现了8 mm FEL放大器出光，峰值功率140 MW。中国工程物理研究院的振荡器型FEL也于2005年在远红外波段实现了出光。此外，中国科学技术大学利用合肥同步辐射储存环，还进行了光学速调管和谐波超辐射FEL机制的相关研究。

我国高增益自由电子激光于1990年代末开始

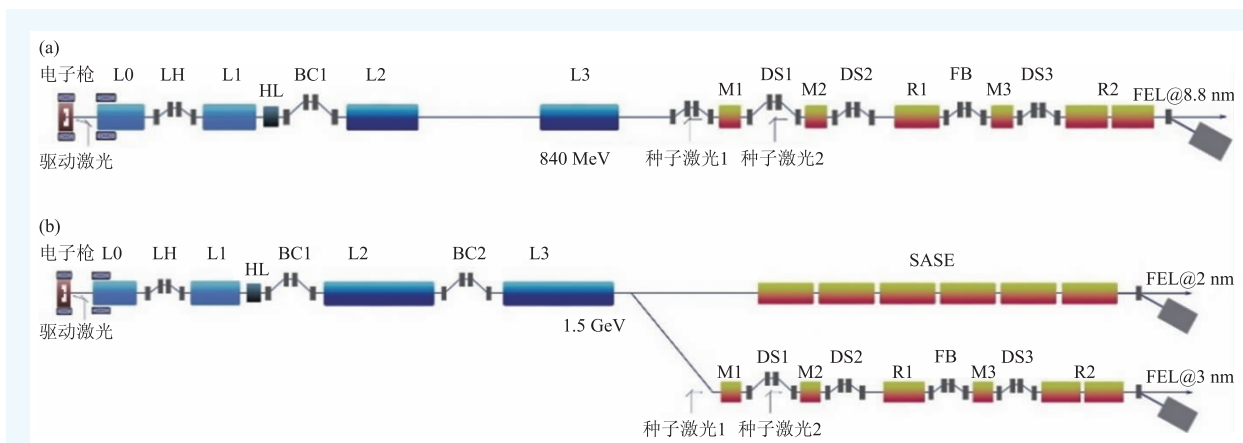


图6 SXFEL基本布局：试验装置(a)和用户装置(b)



图7 SXFEL建筑鸟瞰图(左)与试验装置注入器、主加速器和FEL放大器(右)

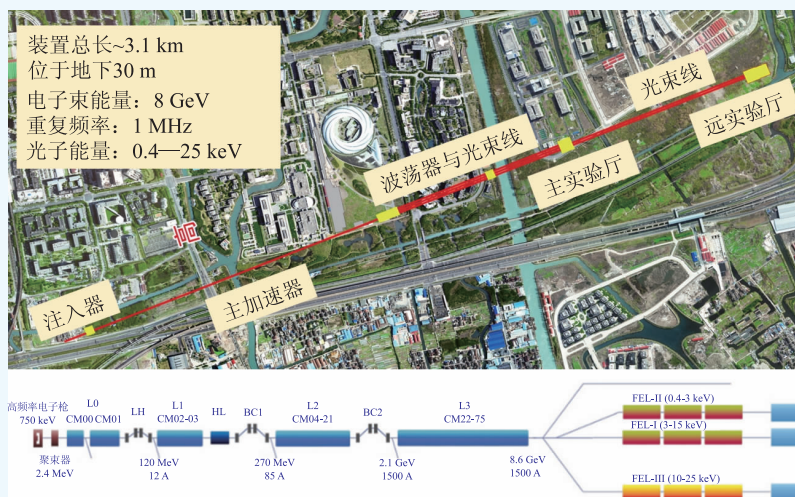


图8 上海高重复频率X射线FEL装置

发展，在中国科学院、科技部和国家基金委的支持下，2009年上海应用物理研究所建成了我国首个高增益自由电子激光综合研究平台——上海深紫外自由电子激光(SDUV-FEL)^[51]，并于2010年12月中旬在HGHG模式下成功达到饱和，使得我国成为继美国之后世界上第二个实现HGHG-FEL放大和饱和的国家。2011年4月，SDUV-FEL成

功实现了世界上首个EEHG的出光放大^[24]，还在世界上首次成功实现了两级级联HGHG的相干辐射输出^[52]。在新原理探索方面，上海应用物理研究所自由电子激光团队还提出了级联EEHG^[53-55]以及相位汇聚高次谐波产生运行机制PEHG等新型FEL工作模式^[56-58]。之后，基于HGHG模式的中国科学院大连化学物理研究所的大连相干光源于2013年动工、2016年建成出光，2017年开始进行用户实验^[59]。

中国的软X射线自由电子激光装置(SXFEL)^[60]经历了长时间的酝酿和论证，SXFEL试验装置和用户装置分别于2014年12月和2016年11月开工建设，其基本布局如图6，7所示。SXFEL

试验装置由主加速器提供840 MeV的电子束，通过两级分别由调制段与辐射段构成波荡器系统，运行在种子型HGHG级联和EEHG-HGHG级联工作模式，目标是最终产生种子激光的30次谐波辐射，得到中心波长为8.8 nm的全相干软X射线FEL脉冲。SXFEL用户装置将进一步升级电子束能量至1.5 GeV，并增加一条SASE波荡器线和5

个实验站,最终将为用户提供一个高水平的“水窗”波段高亮度FEL实验平台。SXFEL试验装置于2017年完成主要设备安装并实现了第一级2至6次谐波的HGHG出光放大,2018年开展了高次谐波EEHG的调试实验^[61],获得了30次谐波的相干辐射信号并实现了11次谐波(~24 nm)的出光放大。目前,SXFEL用户装置的建设已全面展开,将于2018年底开始设备安装,预计在2019年底开始用户实验。

作为国家重大科技基础设施建设“十三五”规划优先项目,上海高重复频率硬X射线FEL装置(SHINE)已于2018年4月开工建设,其基本布局如图8所示。SHINE包含一台能够提供8 GeV高品质电子束的连续波超导直线加速器,驱动产生的X光脉冲最高重复频率可达1 MHz。SHINE首期将建设三条波荡器线,其中包括一条软X射线波荡器线,一条硬X射线波荡器线和一条超硬X射线波荡器线,覆盖0.4—25 keV的光子能量范围。SHINE的建成将极大地促进我国光子科学的发展,使我国光子科学的相关研究步入

世界前列。

6 总结与展望

X射线FEL以其超高的亮度、超短的脉冲和极好的相干性等同步辐射光源所不具备的突出优势,在物理、化学、生物、材料等前沿领域有非常重要的应用前景。自美国LCLS开启X射线自由电子激光的时代以来,XFEL已经进入了快速发展的历史阶段,一系列物理、化学、生物、材料科学领域的前沿研究成果不断涌现,已带来了诸多革命性的影响。XFEL的发展已经从原理验证、方法学探索阶段走向前沿科学突破的快速发展阶段,有望在解决国家战略需求的能源、环境、健康与新材料发现等前沿领域发挥不可替代的重要作用,成为实现科学突破与技术创新的研究利器。

致谢 感谢陈建辉博士阅读此文并给出许多宝贵意见。

参考文献

- [1] Emma P, Akre R, Arthur J *et al.* Nature Photonics, 2010, 4: 641
- [2] Bostedt C, Boutet S, Fritz D M *et al.* Reviews of Modern Physics, 2016, 88(1): 015007
- [3] Kondratenko A, Saldin E. Part. Accel., 1980, 10: 207
- [4] Bonifacio R, Pellegrini C *et al.* Opt. Commun., 1984, 50: 373
- [5] Shvyd'ko Y V, Stoupin S *et al.* Nature Physics, 2010, 6: 196
- [6] Kim K J, Shvyd'ko Y V, Reiche S. Phys. Rev. Lett., 2008, 100: 244802
- [7] Feldhaus J, Saldin E L. Optical communications, 1997, 140: 341
- [8] Geloni G, Kocharyan V, Saldin E. J. Mod. Opt. 2011, 58: 1391
- [9] Ratner D *et al.* Phys. Rev. Lett., 2015, 114: 054801
- [10] Amann J *et al.* Nat. Photonics, 2012, 6: 693
- [11] Lambert G *et al.* Nature Phys., 2008, 4: 296
- [12] Togashi T *et al.* Proceedings of the 2010 FEL Conference, Malmö, Sweden, 2010. 13
- [13] Ackermann S *et al.* Proceedings of IPAC2011, San Sebastián, Spain, 2011. 924-927
- [14] Bonifacio R *et al.* Nucl. Instrum. Methods A, 1990, 296: 787
- [15] Yu L H. Phys. Rev. A, 1991, 44: 5178
- [16] Yu L H *et al.* Science, 2000, 289: 932
- [17] Yu L H, Ben-Zvi I. Nucl. Instr. and Meth. A, 1997, 393: 96
- [18] Wu J H, Yu L H. Nucl. Instr. and Meth. A, 2001, 475: 104
- [19] Stupakov G. Phys. Rev. Lett., 2009, 102: 074801
- [20] Xiang D, Stupakov G. Phys. Rev. ST Accel. Beams, 2009, 12: 030702
- [21] Allaria E *et al.* Nature Photonics, 2013, 7: 913
- [22] Xiang D, Colby E, Dunning M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2010, 105(11): 114801
- [23] Xiang D, Colby E, Dunning M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2012, 108(2): 024802
- [24] Zhao Z, Wang D, Chen J *et al.* Nature Photonics, 2012, 6(6): 360
- [25] Hemsing E, Dunning M, Garcia B *et al.* Nature Photonics, 2016, 10(8): 512
- [26] Ribič P R, Roussel E *et al.* Photonics, 2017, 4(1): 19
- [27] Feng C, Huang D, Deng H *et al.* Sci. Bull., 2016, 61: 1202
- [28] Madey J M J. J. App. Phys., 1971, 42: 1906
- [29] Ellias L R *et al.* Phys. Rev. Lett., 1976, 36: 717
- [30] Deacon D A G *et al.* Phys. Rev. Lett., 1977, 38: 892

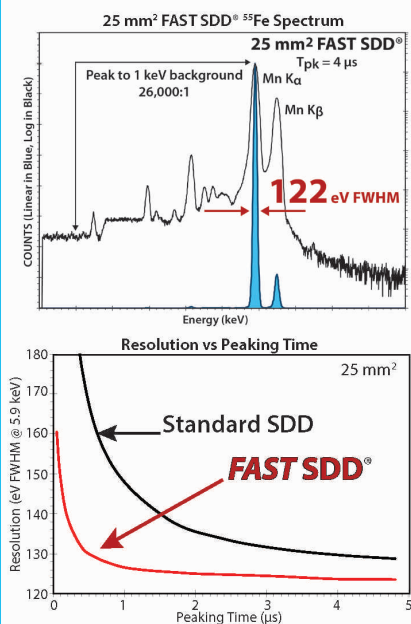
Ultra High Performance Silicon Drift Detector

FAST SDD®

Count Rate = >1,000,000 CPS

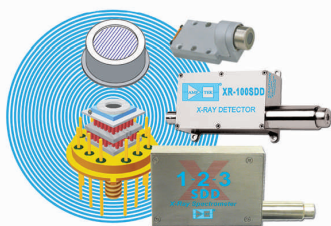
The True State-of-the-Art

- New in-house manufacturing
- Lower noise
- Lower leakage current
- Better charge collection

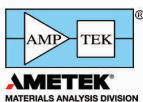


Options:

- 25 mm² active area collimated to 17 mm²
- 70 mm² collimated to 50 mm²
- Windows: Be (0.5 mil) 12.5 μm, or C Series (Si₃N₄)
- TO-8 package fits all Amptek configurations



Please see our web site for complete specifications and vacuum applications



AMPTEK Inc.
sales@amptek.com
www.amptek.com

- [31] Russell S J. Nucl. Instr. and Meth. A, 2003, 507:304
- [32] Hogan M J *et al.* Phys. Rev. Lett., 1998, 81:4867
- [33] Milton S *et al.* Phys. Rev. Lett., 2000, 85:988
- [34] Andruszkow J *et al.* Phys. Rev. Lett., 2000, 85(18):3825
- [35] Wabnitz H *et al.* Nature, 2002, 420:482
- [36] Yu L H, DiMauro L, Doyuran A *et al.* Phys. Rev. Lett., 2003, 91(7):074801
- [37] Ackermann W A, Asova G, Ayvazyan V *et al.* Nature Photonics, 2007, 1:336
- [38] Schreiber S, Faatz B, Honkavaara K. Proc. EPAC., 2008:133
- [39] Ishikawa T *et al.* Nature Photonics, 2012, 6:540
- [40] Kang H S *et al.* Nature Photonics, 2017, 11:708
- [41] Milne C J, Schietinger T, Aiba M *et al.* Applied Sciences, 2017, 7(7):720
- [42] Weise H, Decking W. Commissioning and first lasing of the European XFEL. 38th Int. Free Electron Laser Conf. (FEL'17), Santa Fe, NM, USA, August 20-25, 2017. JACOW, Geneva, Switzerland, 2018. 9-13
- [43] Raubenheimer T. The LCLS-II, a new FEL facility at SLAC. Proc. of 36th Int. Free-Electron Laser Conf., Basel. 2014
- [44] Zhu Z *et al.* SCLF: An 8-GeV CW SCRF linac-based X-ray FEL facility in Shanghai. Proceedings of the FEL2017, Santa Fe, NM, USA, 2017. 20-25
- [45] Zholents A A. Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams, 2005, 8(4):040701
- [46] Thompson N R, McNeil B W J. Phys. Rev. Lett., 2008, 100(20):203901
- [47] Emma P, Bane K, Cornacchia M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2004, 92:074801
- [48] Yu L H, Johnson E, Li D *et al.* Phys. Rev. E, 1994, 49(5):4480
- [49] Lutman A A *et al.* Phys. Rev. Lett., 2013, 110(13):134801
- [50] Allaria E *et al.* Nat. Commun., 2013, 4:2476
- [51] Zhao Z T *et al.* Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2004, 393:96
- [52] Liu B, Li W B, Chen J H *et al.* Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams, 2013, 16(2):020704
- [53] Feng C, Zhao Z T. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(3):221
- [54] Zhao Z, Feng C, Chen J *et al.* Science Bulletin, 2016, 61(9):720
- [55] Zhao Z T, Feng C, Zhang K Q. Nuclear Science and Techniques, 2017, 28(8):117
- [56] Deng H, Feng C. Phys. Rev. Lett., 2013, 111(8):084801
- [57] Feng C, Deng H, Wang D *et al.* New Journal of Physics, 2014, 16(4):043021
- [58] Feng C *et al.* Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams, 2014, 17(7):070701
- [59] Wang H L, Yu Y, Chang Y *et al.* The Journal of Chemical Physics, 2018, 148:124301
- [60] Zhao Z T, Wang D. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2016, 63(2):930
- [61] Zhao Z, Wang D, Gu Q *et al.* Applied Sciences, 2017, 7(6):607