

种子型高增益自由电子激光研究进展

赵振堂 王东

(中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800)

摘要 高增益自由电子激光作为第四代光源的代表,其理论研究和实验装置建设都进入了一个蓬勃发展的新阶段,在这一阶段中,短波长、全相干和超短脉冲已成为自由电子激光发展的主要方向。为推进这一发展趋势,人们相继提出了多种种子型的高增益自由电子激光运行模式,并对这些模式进行了实验验证。主要针对种子型高增益自由电子激光的最新理论与实验研究的进展进行了总结和综述。

关键词 X射线光学; 高增益自由电子激光; 种子激光; 短波长; 全相干; 超短脉冲

中图分类号 O572.21⁺¹ **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.080001

Seeded High-Gain Free-Electron Lasers

Zhao Zhentang Wang Dong

(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract High-gain free-electron lasers (FELs) have been a great success as the fourth generation light sources. In the last decade, tremendous progress has been made in both theoretical understandings and successful constructions and operations of large-scale FEL facilities all over the world. To generate fully coherent, ultrafast X-rays with high brightness, various novel seeded FEL schemes have been proposed and experimentally demonstrated in recent years. This paper gives an overview of recent advances and prospects for future developments in the seeded high-gain FELs.

Key words X-ray optics; high-gain free electron laser; seed laser; short wavelength; fully coherent; ultra-fast

OCIS codes 340.7215; 340.7480; 350.4990

1 引言

自由电子激光(FEL)诞生至今已有近半个世纪的历史。1971年美国科学家 Madey^[1]首次提出了“自由电子激光”概念,随后该概念在实验上得到了验证^[2],从此自由电子激光以其高功率、高亮度、相干性好、输出波长连续可调等优点受到了世人的瞩目,成为在分子和原子尺度上研究微观物质结构和动态的理想探针。20世纪80年代自由电子激光经历了第一个发展高潮,但后期由于普通激光器的迅猛发展和低增益自由电子激光本身的种种限制,相关发展一度落入低谷,许多实验室陆续停止了自由电子激光项目研发工作。但随后高增益理论的提出^[3-4]和成功证实又开辟了自由电子激光发展的新纪元,多种高增益自由电子激光实现方案及相关理论被相继提出,其主要目标是向普通激光器难以实现的短波长方向发展。

1985年,高增益理论首先在美国的劳伦斯·利费莫尔国家实验室(LLNL)的ELF装置上得到证明,频率为34.6 GHz的微波被指数放大到饱和^[5]。1997年,自放大自发辐射(SASE)模式首先在美国加州大学洛杉矶分校(UCLA)得到实验验证^[6],人们开始考虑将FEL推向更短波长的可能性。2000年,美国阿贡国家实验室(ANL)的LEUTL的FEL装置实现了390 nm的SASE饱和出光^[7]。2001年,德国电子同步加速器研究所(DESY)的TTF FEL(FLASH装置的第一阶段)实现了100 nm左右SASE的饱和功率输出并开始第一个用户实验^[8]。2006年4月,FLASH实现了13 nm SASE出光^[9],两年后,FLASH实现6.5 nm SASE出光^[10]。2009年4月,美国斯坦福直线加速器中心(SLAC)的LCLS装置首次实现了0.15 nm SASE出光^[11],并于同年

收稿日期: 2013-07-22; **收到修改稿日期**: 2013-07-28; **网络出版日期**: 2013-08-02

基金项目: 国家973计划(2011CB808300)、国家自然科学基金重点项目(10935011)

作者简介: 赵振堂(1961—),博士,研究员,主要从事加速器物理与加速器射频技术、自由电子激光和同步辐射光源加速器装置等方面的研究。E-mail: zhaozt@sinap.ac.cn

9月开始了用户实验,这标志着硬 X 射线 FEL 时代的到来。2010 年 10 月,FLASH 装置在能量提升的条件下,实现了 4.1 nm 水窗波段的软 X 射线 FEL 出光^[12]。2011 年 6 月,日本 SPring-8(Super Photon Ring 8 GeV)的 SACLA 装置成功实现了 0.06 nm SASE 出光^[13],成为世界上波长最短的硬 X 射线激光。为改进 SASE 的性能,美国科学家 Yu 等开辟了一条新型的高增益 FEL 技术路线,提出了基于种子激光的高增益高次谐波放大(HGHG)方案并在 21 世纪之初完成了实验证实^[14-15]。比较 SASE 与 HGHG 两种模式,两者各有其原理决定的优缺点:SASE 实现相对简单但输出激光纵向相干性差,激光功率涨落大,短波长 SASE 所需波荡器过长;HGHG 具有极好的全相干特性但输出激光波长必须为种子激光的高次谐波,输出波长不能连续可调,单级 HGHG 难以向 X 射线波段发展。随着自由电子激光的不断发展,人们开始追求全相干、短波长和超短脉冲辐射,近些年来新的种子型高增益模式层出不穷并接连为实验所验证,虽然其侧重点各有不同,但都展示出了强大的生命力。本文的重点就是对这些新的高增益自由电子激光模式做简要的介绍,并给出国际上所完成的多个原理验证性实验的实验结果和近期种子型自由电子激光装置的发展计划。

2 种子型高增益自由电子激光

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辐射的新型强相干光源,可分为低增益和高增益两种类型。通常的高增益 FEL 由高亮度电子枪、射频直线加速器和波荡器系统三部分组成,如图 1 所示。电子枪和直线加速器提供品质优异的高能电子束,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,为使电子的动能不断地传递给光辐射,从而使辐射场强不断增大,对于平面型波荡器,辐射光波长 λ_s 、电子束相对论能量 γ 、波荡器周期长度 λ_u 和波荡器无量纲矢量势 a_u 之间需满足如下共振关系:

$$\lambda_s = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2 n} (1 + a_u^2), \quad (1)$$

式中 n 为谐波次数。从量子物理学角度来看,FEL 的产生就是电子对电磁波的受激康普顿散射的结果。

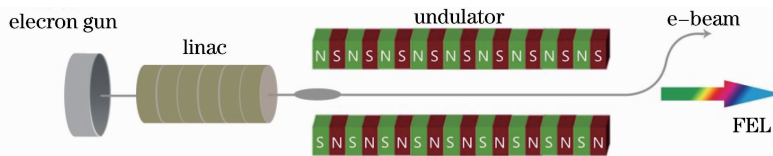


图 1 高增益自由电子激光基本构成

Fig. 1 Schematic layout of high-gain FEL

自由电子激光物理的核心在于其运行机制,而 FEL 的发展史从某种意义上也可以归结为运行机制的演化史。FEL 的运行机制大体可分为低增益和高增益两种,主要以辐射是否对电子束的空间分布产生明显影响,或者是否存在 FEL 功率的指数增益为标准进行区分。低增益 FEL 以带有反射镜的光学谐振腔 FEL 为代表,主要应用在太赫兹(THz)、红外和可见光波段,它的基本工作原理是通过光学谐振腔将电子束产生的自发辐射进行多次反射、不断放大,最后达到饱和输出。高增益 FEL 利用高品质的电子束单次通过一个足够长的波荡器实现了光场的指数增益放大,并最终实现高功率 FEL 的饱和输出,是向短波长方向发展的有效途径。但是高增益 FEL 对电子束品质的要求非常高,现在所有的高增益理论都是建立在先进的加速器技术基础之上的。高增益 FEL 按其是否需要引入外加的种子激光又可分为两类:自放大自发辐射型和种子激光驱动型,每一类中又衍生出了多种运行机制。种子型高增益自由电子激光是在图 1 所示基本结构的基础上引入一个相干性好的激光作为种子激光,使其在波荡器中与电子束相互作用,种子激光的波长同样必须满足共振关系,这样的相互作用可对种子激光直接放大,也可通过调制使电子束产生微群聚并同时种子激光的相位信息传递给电子束,进而使电子束通过辐射波荡器产生相干辐射。种子型自由电子激光的辐射光继承了种子激光的特性,因而具备很好的纵向相干性及稳定性。如前所述,在种子型自由电子激光中,有一类运行模式是对种子激光进行直接放大,这类运行模式主要包括外种子激光直接驱动运行模式和自种子运行模式^[16]。

另一类种子型自由电子激光是通过光波长尺度上的电子束相空间操控来产生高次谐波的群聚,进而产生短波长的辐射脉冲。为实现这一目的,通常需要引入种子激光、调制段和色散段,其中调制段为一个共振

在种子激光波长上的短波荡器,电子束与种子激光在这个波荡器中相互作用进行能量交换,其结果是在电子束相空间中引入了正弦型的能量调制,在调制段后加入一个色散段将能量调制转化为密度调制,当电子束穿越短周期辐射波荡器且其密度调制中含有的高次谐波分量正好满足共振关系(1)式时,就可以产生短波长辐射。这里我们可以把种子激光的作用看做是引入了单频的信号,而色散段的作用则是对这些单频信号进行非线性变换以产生高次谐波的分量。密度调制高次谐波分量的大小可以用群聚因子来描述,一般来讲高次谐波群聚因子的大小受到电子束初始能散和能量调制深度的限制。对于谐波放大型自由电子激光中最为经典的 HGHG 运行模式,为产生足够大的 n 次谐波群聚因子,通常需要引入其值为初始能散 n 倍的附加能散^[17],而过大的能散会显著影响辐射的品质,所以单级 HGHG 的谐波转换次数一般在 10 次左右。由于种子激光的波长难以达到 200 nm 以下,单级 HGHG 是很难用于产生 X 射线波段的辐射的,并且辐射光的波长也不能进行大范围的自由调谐。为进一步将种子型自由电子激光的辐射波长向 X 射线波段推进,人们又提出了多种新的运行模式。

发展种子型自由电子激光的主要目的在于改善输出辐射的纵向相干性和功率稳定性,克服电子束自身噪声对辐射的影响。为实现这一目的,要求种子激光的功率必须远高于由电子束噪声所产生的自发辐射信号的功率。对于一个短波长的自由电子激光装置,其噪声信号功率一般可以写为^[18]

$$P_n \approx \rho^2 \gamma m c^3 / 2\lambda_s, \quad (2)$$

式中 ρ 为自由电子激光的皮尔斯常数^[19], m 为电子质量, c 为真空环境下的光速。以上海软 X 射线自由电子激光装置为例^[20], P_n 约为 40 W。对于高增益 FEL, 仅有 1/9 的初始信号对指数增益有贡献,另外考虑到 FEL 模式匹配的损失,种子激光的功率要达到约 1 kW 才能与电子束的噪声信号处于同一量级,为使信噪比足够高,种子激光的功率应比噪声功率强至少 1~2 个量级。对于常规激光,这个功率要求很容易达到,然而对于一些新型的短波长种子激光光源,这个要求有可能成为技术的瓶颈。

3 种子型高增益自由电子激光主要运行模式

3.1 外种子直接放大模式

最简单的外种子型运行机制是外种子直接放大型自由电子激光,结构如图 2 所示,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和输出。可以看到,这种运行模式的优点是结构简单,易于实现。但缺点也十分明显,就是辐射光波长受到种子激光波长的限制,由于在短波长范围内缺少相应的常规激光作为种子激光,外种子直接驱动型自由电子激光难以产生深紫外到 X 射线波段的辐射。为解决这一问题,人们提出了采用高次谐波放大(HHG)作为种子激光的方案^[21],并对其进行了实验研究。在此种方案中,先将一个很强的常规激光照射到惰性气体上,这样可以产生几十到上百次的谐波,从而为 FEL 提供波长足够短的种子激光。应该注意到,此种模式要求种子激光具有足够高的功率(约兆瓦量级),而 HHG 的高次谐波转换效率很低,所以对常规

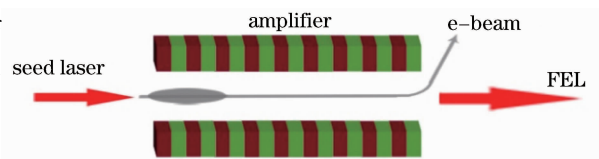


图 2 外种子直接放大型自由电子激光

Fig. 2 Schematic layout of direct-seeding FEL

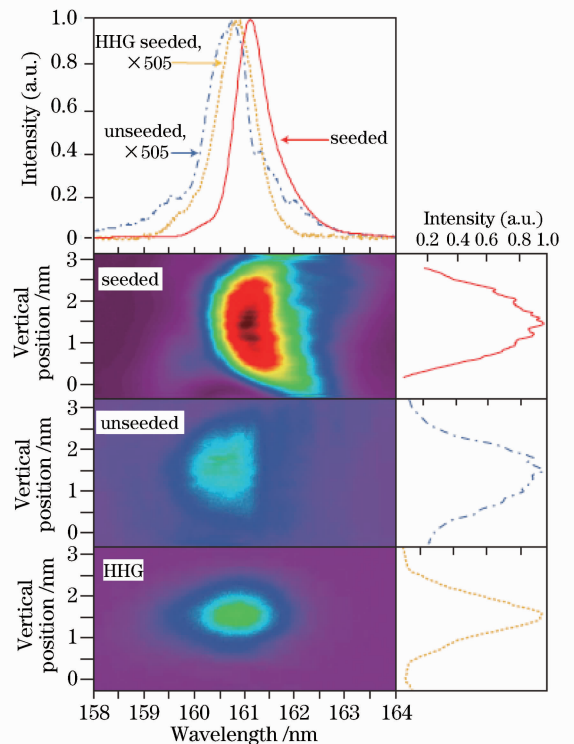


图 3 日本 SCSS 装置首次实现 HHG 直接驱动型 FEL 实验结果

Fig. 3 Experimental demonstration of the HHG direct-seeding FEL at SCSS

激光功率的要求非常高,能否提高超高次谐波的转换效率,是此种模式成败的关键。HHG 直接放大型的 FEL 运行模式最早于 2008 年在日本的 SCSS-TA 装置上得到了实验验证^[22],在实验中波长为 160nm 左右的 HHG 输出被波荡器直接放大到饱和,图 3 给出了实验测得的结果,实验中同时观测到了波荡器的 3 次和 5 次谐波辐射信号。2010 年,SCSS 装置又在 61.5 nm 处实现了 HHG 直接放大型的 FEL,HHG 的信号被 FEL 放大了几十倍^[23]。2012 年,德国的 sFLASH 装置获得了目前为止波长最短的 HHG 直接放大型 FEL,38 nm 的 HHG 信号被 FEL 直接放大^[24]。

3.2 自种子 SASE-FEL

SASE 作为当今高增益自由电子激光的主流方案,其优点是结构相对简单、辐射波长连续可调等,但是它的缺点也十分明显:由于 SASE 初始阶段是靠噪声起振,辐射的光谱和强度起伏都较大,在随后的指数增益过程中,初始噪声被不断放大,虽然光谱带宽明显减小,但饱和处的激光纵向相干性仍然不能让人满意。为解决这一问题,Feldhaus 等^[16]最早提出了自种子 SASE-FEL 结构[图 4(a)],这种装置将波荡器分为两段,中间加上单色器,对辐射光进行选频。第一段波荡器较短,其末端处的 SASE 辐射远未达到饱和,将这个辐射脉冲经过一个光栅进行分光,并用一个狭缝进行单色化处理,然后将此单色光作为种子激光放入第二段波荡器中与电子束相互作用,在第二段波荡器中单色光被不断放大,最终得到相干性好的饱和输出脉冲。自种子 SASE-FEL 预计可得到 $\Delta\lambda/\lambda=5\times 10^{-5}$ 的光谱带宽,但应该注意到此种装置较为复杂,由于单色器的加入对辐射光进行了延迟,为保证在第二段波荡器中辐射光与电子束的相互作用,需要采用一个延迟段将电子束同样进行延迟。在硬 X 射线波段,由于电子能量很高,延迟段的设计和实现难度很大。为解决这一问题,Geloni 等^[25]于 2011 年提出了采用钻石晶体代替单色器来对硬 X 射线进行辐射光选频的新方案[图 4(b)],这样第一个波荡器的辐射光通过单晶的前向布拉格散射,时间延迟较前面的方法减小了约 3 个量级,大大降低了硬 X 射线自种子 SASE 的实现难度。此种方案已于 2012 年在 LCLS 上得到了实验验证^[26],实验结果如图 5 所示,可以看到,硬 X 射线波段(光子能量 8.3 keV) SASE 辐射带宽被减小至原先的 1/40 左右,大大

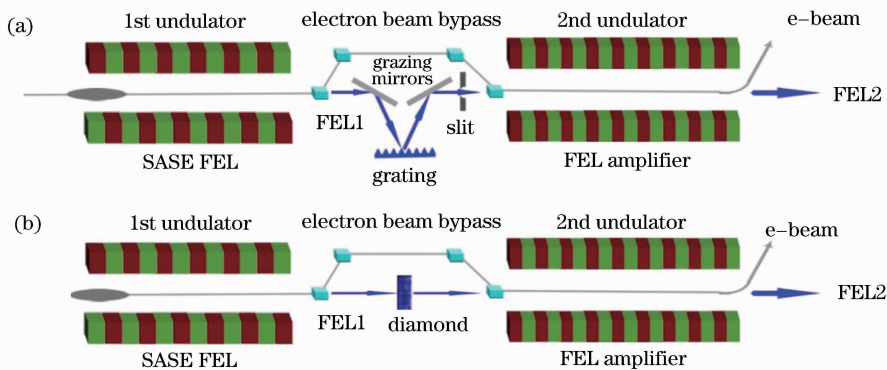


图 4 自种子 SASE-FEL 结构

Fig. 4 Schematic layout of self-seeding FEL schemes

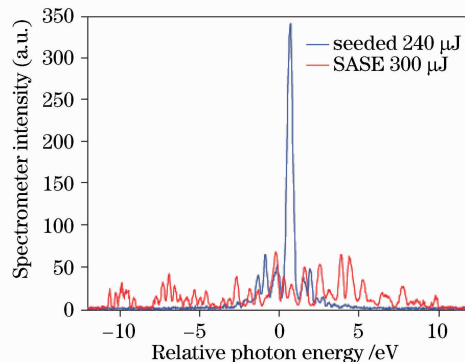


图 5 美国 SLAC 在 LCLS 上首次实现自种子 SASE-FEL 的实验结果(中心光子能量 8.3 keV)

Fig. 5 Experimental demonstration of the self-seeding FEL at LCLS (photo energy of 8.3 keV)

提高了辐射的纵向相干性,同时实验也证明了自种子 SASE 的辐射脉冲能量的抖动较大,这主要是由电子束中心能量的抖动导致的。目前,LCLS 正在设计和建设紧凑型的软 X 射线自种子 SASE-FEL 运行模式,计划在 2014 年开始试验^[27]。

3.3 高增益高次谐波放大

外种子直接驱动型 FEL 的输出波长受到种子激光波长的限制。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[图 6(a)]^[28]。之后美国布鲁克海文国家实验室(BNL)的 Yu 对这一运行机制进行了革新,并提出了 HGHG 运行机制[图 6(b)]。HG HG 的创新主要包含以下几个方面:缩短了第一个波荡器的长度,将其作为调制段;加入一个色散段以增强电子束群聚的效果;增加第二个波荡器的长度,将其作为辐射段使电子束产生 FEL 并进行指数放大直至饱和。如图 7 所示,其中 p 为电子束归一化相对动量。HG HG 实现的具体物理过程为:首先在调制段中采用常规激光对电子束进行能量调制[图 7(a)],随后在色散段中能量调制被转换为密度调制,电子束在种子激光波长的尺度上形成微聚束[图 7(b)],聚束好的电子束在种子激光的高次谐波上包含分量,这样将辐射段的共振波长调节在高次谐波的波长上即可产生相干的辐射。HG HG 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。HG HG 的原理最早在 BNL 的加速器试验装置 ATF 上得到实验验证^[15]。Yu 等^[16]采用波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 的二氧化碳激光器作为种子激光,用 HG HG 产生了峰值功率为 32 MW 的二次谐波辐射,辐射亮度是自发强辐射的 2×10^7 倍,实验结果与理论预测符合得非常好。HG HG 实验的成功极大地推动了谐波型 FEL 的发展,随后他们又在紫外区域实现了 266 nm 的 HG HG-FEL^[29-30],实验结果如图 8(a)所示。对实验结果的分析表明,HG HG 的光谱相干性已接近傅里叶转换极限,其亮度也高于 SASE。我国于 2010 年在 SDUV-FEL 装置上实现了 347 nm HG HG-FEL 饱和输出^[31],实验测得的光谱如图 8(b)所示。2012 年,意大利又在其 FERMI 装置上实现了极紫外波段的 HG HG-FEL 运行^[32],种子

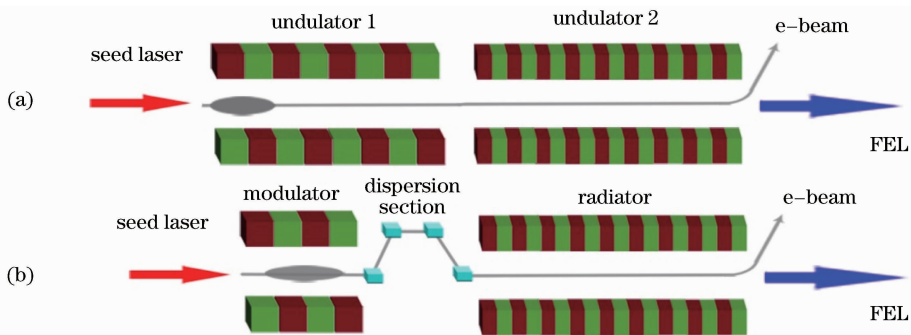


图 6 (a)谐波放大器 FEL 和(b)HG HG-FEL

Fig. 6 Schematic layout of (a) harmonic generation scheme and (b) HG HG-FEL

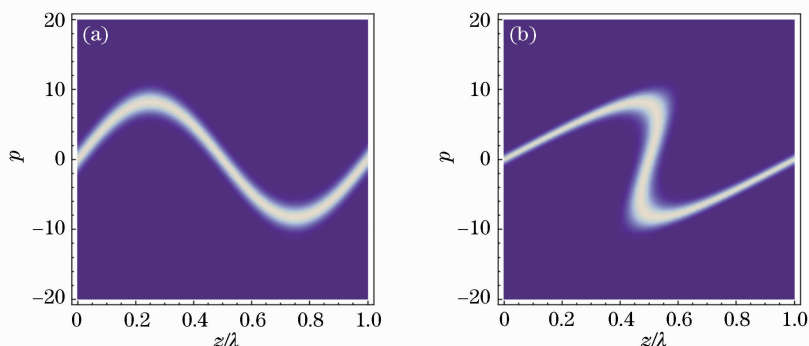


图 7 HG HG 电子束像空间演化。(a)经过调制段;(b)经过色散段

Fig. 7 Longitudinal phase space evolution of HG HG. (a) After energy modulation; (b) after density modulation

激光波长为 260 nm, 试验中在种子激光的 4 次谐波(65 nm)到 13 次谐波(20 nm)处都得到了几十微焦的强辐射能量, 并在种子激光的 15 次谐波(17 nm)处观测到了辐射信号, 图 8(c) 给出了实验中测得的 8 次谐波的辐射光谱和种子激光的比较。

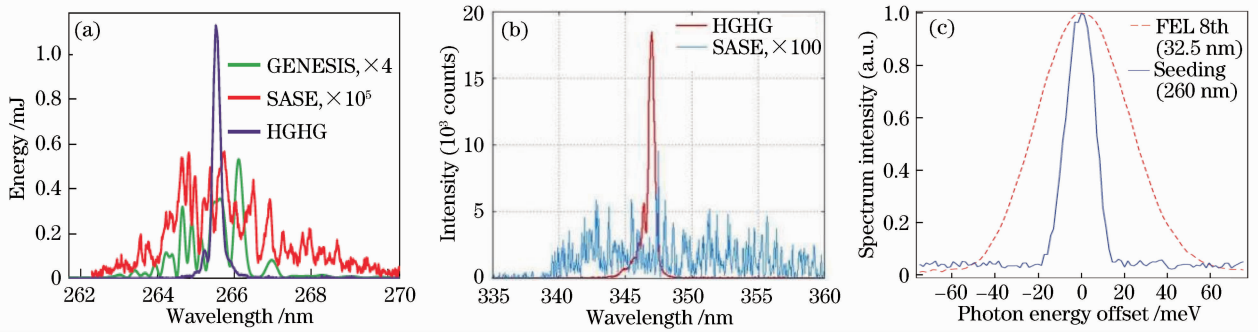


图 8 HGHG 实验结果。(a)BNL 在 DUV-FEL 上首次实现深紫外 HGHG 的实验结果;(b)上海 SDUV-FEL 实现 HGHG 饱和实验的实验结果;(c)意大利在 Fermi 上实现 HGHG 出光的实验结果

Fig. 8 Experimental demonstrations of HGHG (a) operation in the deep ultraviolet region at DUV-FEL of BNL, (b) at SDUV-FEL of SINAP and (c) at FERMI of Elettra

前面已经提到, 由于 HGHG 的群聚因子一般仅出现在种子激光的高次谐波上, 这导致了其输出波长难以连续调谐。为增加 HGHG 的光谱覆盖范围, 一个简单的方案是采用波长可以连续调谐的种子激光。2012 年, SDUV-FEL 采用光学参量放大器(OPA)调谐种子的波长率先实现了 HGHG 输出波长的连续调谐^[33]。图 9(a)~(c) 给出了实验测得的光谱结果, 可见通过调节种子激光波长和波荡器的共振的条件, 通过切换不同的谐波次数, HGHG 的输出波长可以在 290~790 nm 之间连续调谐。在 FERMI 装置上也实现了极紫外波段的波长大范围调谐^[34], 通过在 228~262 nm 之间调节种子激光的波长, HGHG 的输出波长可以在 30~60 nm 之间连续调谐, 图 9(d) 给出了实验测得的光谱数据。

HGGG-FEL 将常规激光的相干性、稳定性和 FEL 的短波长运行能力有效地结合在了一起, 提供了一种极具吸引力的产生短波长 FEL 的方案。在 HGHG 中, 辐射脉冲的特性良好地继承了种子激光的特性, 因

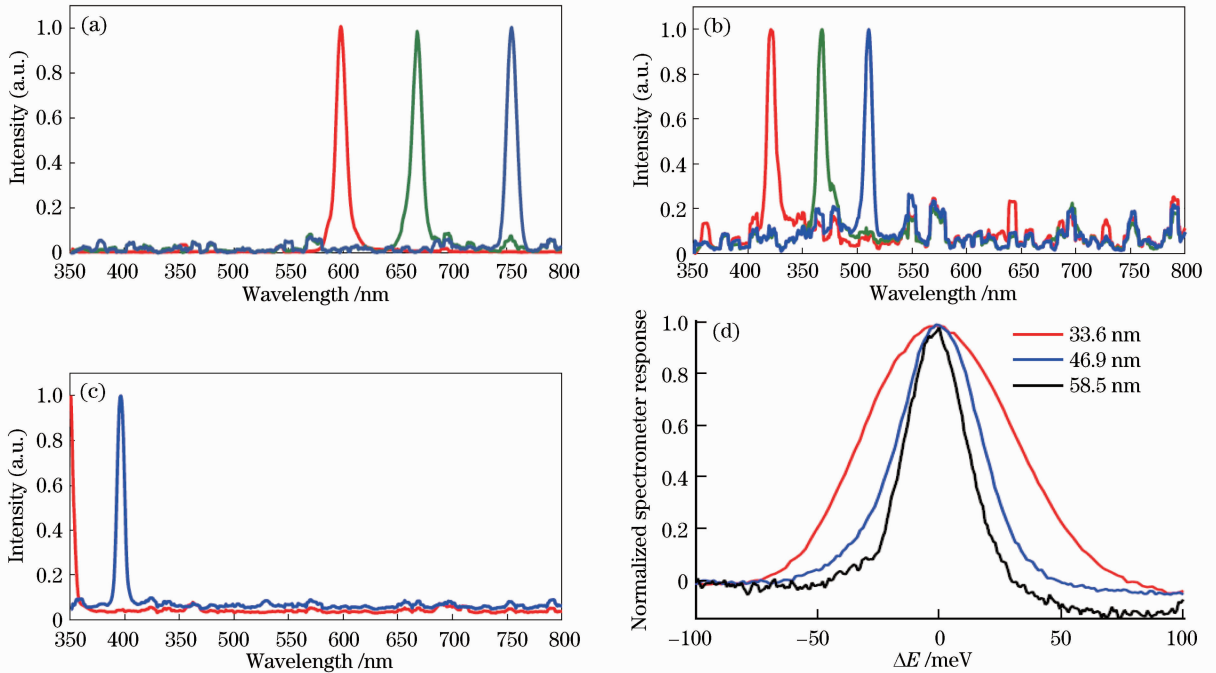


图 9 HGHG 输出波长连续调谐实验。(a)~(c) SDUV-FEL 的实验结果;(d) FERMI 的实验结果

Fig. 9 Experimental demonstrations of widely-tunable HGHG at (a)~(c) SDUV-FEL of SINAP and (b) FERMI at Elettra

而具有稳定度高、时间相干、中心波长和脉冲周期可控等 SASE-FEL 所缺乏的突出优点。然而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,较适合于产生真空深紫外波段的 FEL,更短波长的产生需要对电子束引入非常大的附加能散,从而导致 FEL 饱和功率大大降低。如何提高谐波转换的效率一直都是谐波转换型 FEL 研究中一个热点和前沿的问题。

3.4 级联 HGHG 模式

前面已经提到, HGHG 方案需要一个常规激光作为种子激光对电子束进行能量调制,而其辐射波长是在种子激光的高次谐波上,一般单级 HGHG 放大谐波次数有限,而在短波长范围内又缺少常规的激光光源,所以单级 HGHG 不能得到 X 射线波段的辐射。为使 HGHG 向 X 射线波段发展, Yu 等^[35-36]提出了级联 HGHG 方案,图 10 为级联 HGHG 的示意图,这种方案的基本思路为:使用多个 HGHG 级联,第一级用常规激光作为种子激光,后面每级用上一级产生的辐射作为种子激光,这样辐射波长便可不断缩短。由于在 HGHG 的调制段中,激光与电子束的相互作用会导致电子束的能散增加,使电子束品质变差,从而使得下一级辐射的饱和能量降低,甚至没有指数增益的过程。为了解决这一问题,需要采用新鲜束团技术^[35],其基本思想是:选取种子激光的脉冲长度远短于电子束的长度,每级只调制电子束团中的一部分,即每级只利用束团中的一小段,到新的一级中,调整电子束和调制激光的同步关系,使得电子束看上去总是“新鲜”的。相比 SASE,级联 HGHG 的辐射单色性将更好。目前级联 HGHG 的原理已在上海的 SDUV-FEL 装置上和 FERMI 装置上得到了初步的验证^[26,37-38]。图 11 给出了级联 HGHG 的主要实验结果,其中图 11(a)给出的是 SDUV-FEL 上进行的两级 HGHG 原理性验证实验的实验结果,实验中所用种子激光波长为 1200 nm,两级 HGHG 的谐波转换次数均为 2,最后得到了第二级 HGHG 的辐射信号,辐射中心波长约为 300 nm。FERMI 两级 HGHG 级联实验的总谐波转换次数达到了 24 次^[37],其中第一级 HGHG 的谐波转换次数为 6 次,第二级 HGHG 的谐波转换次数为 4 次,最终得到了 10.8 nm 的强相干辐射,实验结果如图 11(b)所示^[38]。SDUV-FEL 和 FERMI 上的级联 HGHG 实验初步证明了新鲜束团技术的可行性,验证了级联 HGHG 输出辐射具有较好的相干性。级联 HGHG 非常适合用于软 X 射线自由电子激光装置,通过多级 HGHG 级联,甚至有可能得到硬 X 射线的全相干辐射。然而同时应该指出的是,级联 HGHG 装置较为复杂,新鲜束团技术对激光和电子束的同步要求很高,而且级联 HGHG 的原理上还存在一些需要进一步验证的问题,例如 Saldin 等^[39]曾指出:HG HG 的级数越多,噪声就越强,输入和输出的信噪比将以谐波次数的平

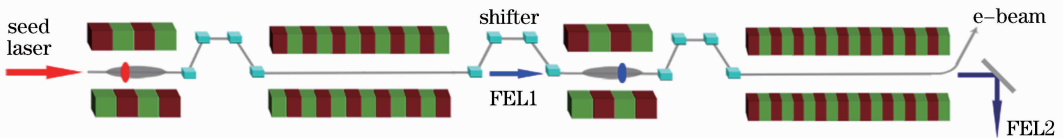


图 10 级联 HG HG 结构

Fig. 10 Schematic layout of cascaded HG HG

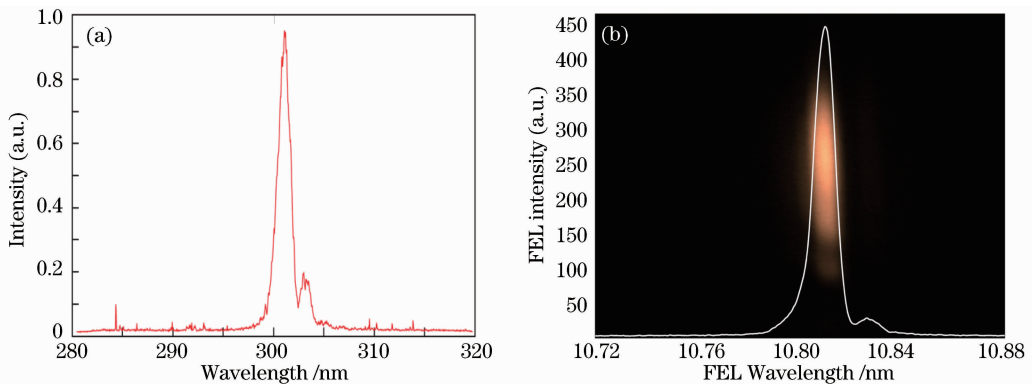


图 11 级联 HG HG 主要实验结果。(a)SDUV-FEL 的实验结果;(b)FERMI 的实验结果

Fig. 11 Experimental demonstrations of cascaded HG HG with fresh bunch technique at (a) SDUV-FEL of SINAP and (b) FERMI at Elettra

方为倍数增长。另外最近的一些研究表明^[40-42],种子激光存在的相位噪声也会被谐波转换过程放大,从而影响辐射的性能。由此可见由于噪声的限制,级联 HGHG 的最终输出辐射的相干性将受到较大的影响。另外,级联 HGHG 中所使用的电子束连续通过了多个波荡器,虽然采用新鲜束团技术每次只对电子束的一小部分进行调制,但电子束的其余部分仍会像 SASE 一样进行辐射,这是否会使电子束的品质严重变坏,经过多级以后,电子束的品质还能否满足短波长辐射的要求,这些问题也有待进一步的实验研究进行验证。

3.5 回声型谐波放大模式

回声型谐波放大(EEHG)是由 SLAC 的 Stupakov 等^[43-44]于 2009 年提出的新运行模式,它是利用电子束的回声效应获得超高次谐波辐射。EEHG 的装置结构如图 12 所示,它由两个调制段、两个色散段和一个辐射段组成,第二个调制段和色散段与 HGHG 类似,而第一个色散段的磁场强度非常之高,能将第一级调制段调制好的电子束在相空间中拉成许多平窄的“能带”结构,此种结构的电子束经过后面的能量和密度调制后,能够在更短的时间尺度上形成群聚,经过合理调整种子激光强度和色散段相关参数后,理论上可获得几十次至上百次谐波的高强度相干辐射,所以 EEHG 很适合用于产生全相干的软 X 射线 FEL。如果能够进一步结合前面的 HHG 技术,则通过一级 EEHG 就有可能获得硬 X 射线的相干辐射输出。图 13 给出了 EEHG 的电子束调制过程的相空间演化图,由于 EEHG 的电子束相空间结构十分精细,而 EEHG 第一级色散段的强度很高,所以能否维持 EEHG 好的相空间结构是运行此种模式的关键所在。EEHG 原理一经提出就受到了国际各大自由电子激光实验室的广泛重视,其原理解验证也成为了热点问题。目前,EEHG 的原理已在较低次谐波的条件在 SDUV-FEL 和美国 SLAC 国家加速器实验室的 NLCTA 装置上得到了实验验证^[31,45-46],分别得到了种子激光的 2,3,4 及 7 次谐波的辐射信号,其中 SDUV-FEL 在国际上率先实现了 3 次谐波 EEHG 的出光放大。图 14 给出了 NLCTA 和 SDUV-FEL 上 EEHG 实验的测量结果,其中 NLCTA 验证了 EEHG 相比 HGHG 的高谐波转换效率,在 HGHG 没有谐波辐射的条件下得到了 EEHG 的 7 次谐波的辐射信号^[46]。SDUV-FEL 在不同的实验条件下同时得到了 HGHG 和 EEHG 的辐射增益曲线及相应的光谱,EEHG 与 HGHG 的辐射相干信号都得到了指数放大,但二者的光谱中心波长略有不同,同时实验验证了 EEHG 在某些实验条件下的光谱相干性要优于 HGHG^[47]。目前,人们正在积极开展更高次谐波的 EEHG 实验。

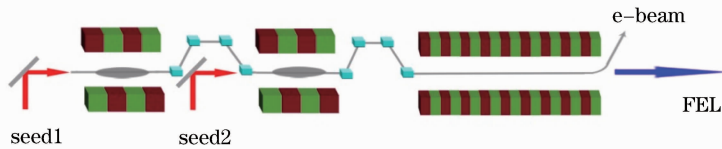


图 12 EEHG 装置结构

Fig. 12 Schematic layout of EEHG

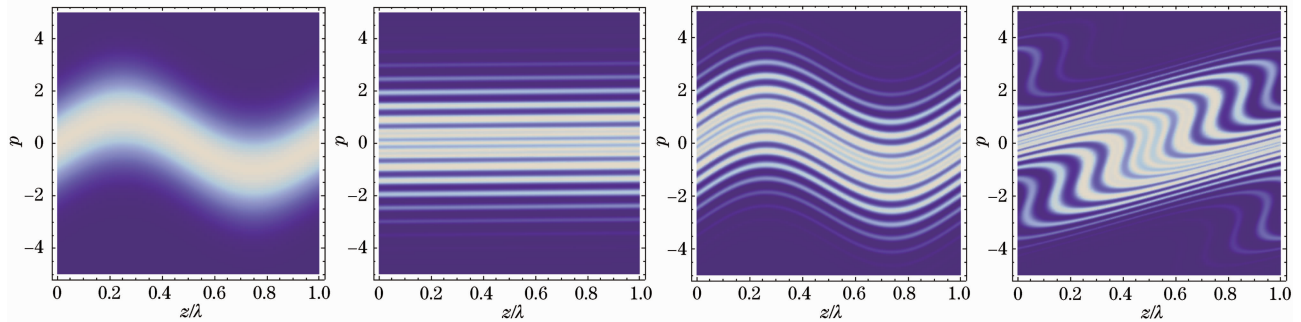


图 13 EEHG 电子束像空间演化。(a)经过第一个调制段;(b)经过第一个色散段;(c)经过第二个调制段;(d)经过第二个色散段

Fig. 13 Longitudinal phase space evolution of EEHG. (a) After the first modulator; (b) after the first dispersion section; (c) after the second modulator; (d) after the second dispersion section

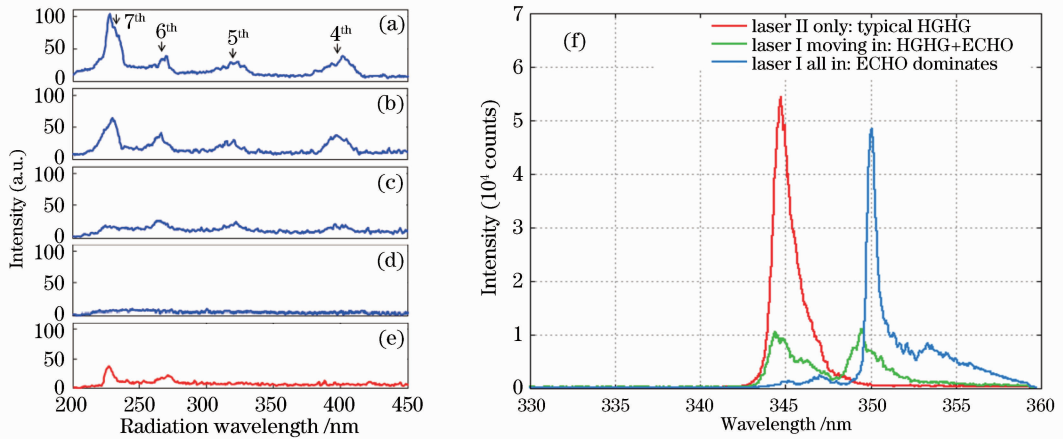


图 14 EEHG 原理性验证实验的相关结果。(a)~(e)SLAC 的 NLCTA 上测得的 EEHG 光谱及 (f)SINAP 的 SDUV-FEL 上测得的光谱

Fig. 14 Experimental demonstrations of EEHG at (a)~(e) NLCTA at SLAC and (f) SDUV-FEL of SINAP

4 未来种子型高增益 FEL 装置计划

鉴于外种子型 FEL 的一些突出和独特优势,人们正不断地突破其相关的关键核心技术,发展更新的 FEL 运行模式和高性能的 FEL 装置。目前国际上多个高增益 FEL 装置都计划采用种子型 FEL 的运行模式,本节对这些装置进行一些简单的介绍。

4.1 大连相干光源

大连极紫外自由电子激光装置(DCLS)^[48]是我国首个极紫外波段全相干自由电子激光用户装置,计划采用 HGHG 模式产生超高亮度、全相干且具有超快时间特性的可调极紫外光源,装置将建在中国科学院大连化学物理研究所长兴岛园区。DCLS 由一台能提供 300 MeV 能量高亮度电子束的直线加速器和波荡器系统组成,如图 15 所示。利用上文提到的 OPA 技术,HGGH 种子激光的波长可以在 240~360 nm 之间连续调谐,对应的输出 FEL 辐射波长可以在 50~150 nm 之间连续调谐,输出辐射脉冲能量将超过 100 μ J。DCLS 将先进相干光源的发展与原子、分子和自由基的高灵敏度探测方法发展紧密结合起来,并将先进相干光源装置的研制和与能源相关的基础物理化学研究装置的研制紧密结合起来,希望在较短的时间内使该综合实验研究装置成为世界上独特的基础物理化学实验研究平台,将大大地提升我国在相关基础科学领域的实验研究水平。

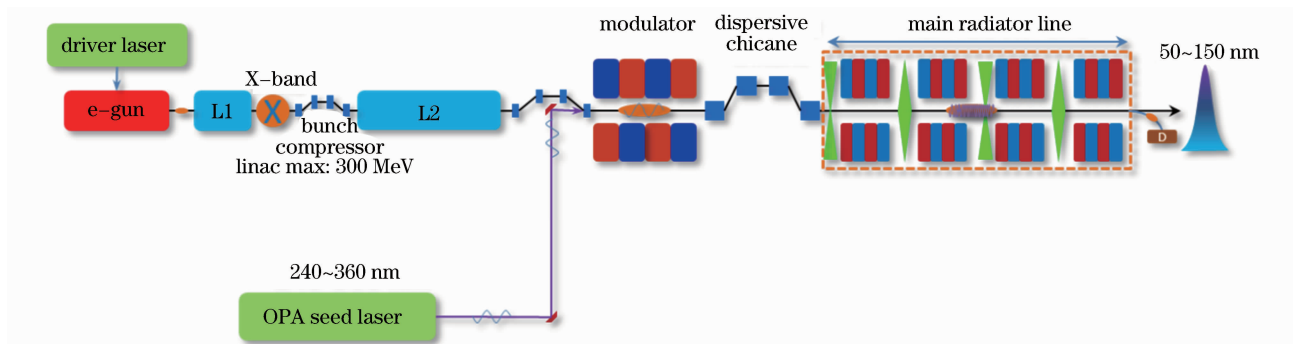


图 15 大连极紫外自由电子激光装置示意图

Fig. 15 Schematic layout of DCLS at DICP

4.2 上海软 X 射线自由电子激光试验装置

作为我国硬 X 射线 FEL 用户装置的前期预研工程,上海软 X 射线自由电子激光试验装置(SXFEL)^[20]将在上海张江高科技园区的上海光源园区内进行建设。图 16 为其示意图。SXFEL 主要用于探索外种子型 X 射线自由电子激光的新原理和技术路线,同时用于 X 射线自由电子激光的相关关键技术的研究。SXFEL

的基本设计方案为两级级联 HGHG, 种子激光波长为 265 nm, 最终辐射波长为种子激光的 30 次谐波, 约为 8.8 nm, 处于软 X 射线波段。SXFEL 将当前国际先进的加速器技术、激光技术以及不断涌现的 FEL 新原理与新技术结合在一起, 将成为具有国际竞争力的综合性实验平台。在加速器技术研究方面, SXFEL 将集成高梯度的 C 波段加速器技术, 为紧凑型硬 X 射线自由电子激光发展奠定坚实基础; 在 FEL 新原理研究方面, SXFEL 除进行级联 HGHG 实验外, 还计划展开 EEHG-HGGG 级联、EEHG 级联等新原理的验证性实验。另外 SXFEL 还将结合先进的激光技术开展 HHG 作为种子、飞秒级的高精度电子束与激光束同步技术等关键技术研究。

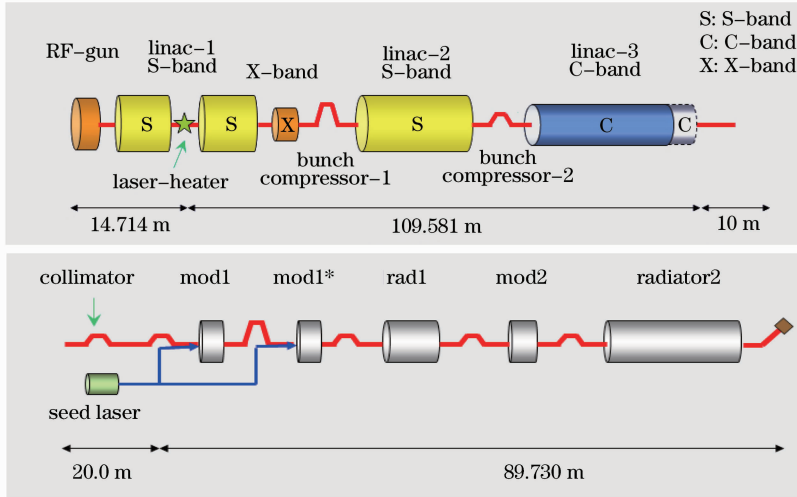


图 16 上海软 X 射线自由电子激光直线加速器和波荡器系统示意图

Fig. 16 Schematic layout of SXFEL at SINAP

4.3 NGLS

NGLS(Next Generation Light Source)是美国劳伦兹伯克利国家实验室(LBNL)计划建设的一台基于超导直线加速器的高增益 FEL 用户装置(图 17)^[49]。其目标是基于先进的超导加速器技术和新的 FEL 运行模式以产生高重复频率、品质优异的 FEL 脉冲供多个用户同时使用。NGLS 的显著优点是高重复频率、高平均亮度、高时间和能量分辨率、可调谐与可控偏振。目前 NGLS 的设计方案计划采用高频光阴极电子枪和连续波超导射频直线加速器产生束团重复频率为 1 MHz 的高平均功率电子束, 之后这些电子束团将被等时性地分开并被分别注入多个独立的波荡器线中以产生高亮度的 FEL, 每个波荡器产生 FEL 脉冲的重复频率都将比现有 FEL 装置高三个量级以上。根据不同的用户需求, NGLS 计划在不同的波荡器线中采用不同的运行模式以产生脉冲能量、中心波长、极化度或脉冲长度都可以自由控制的超短脉冲辐射。除了 SASE 运行模式外, 为产生高亮度全相干的短波长 FEL 和中心波长可控的双色 FEL, NGLS 计划采用 HGHG 和 EEHG 的运行模式。

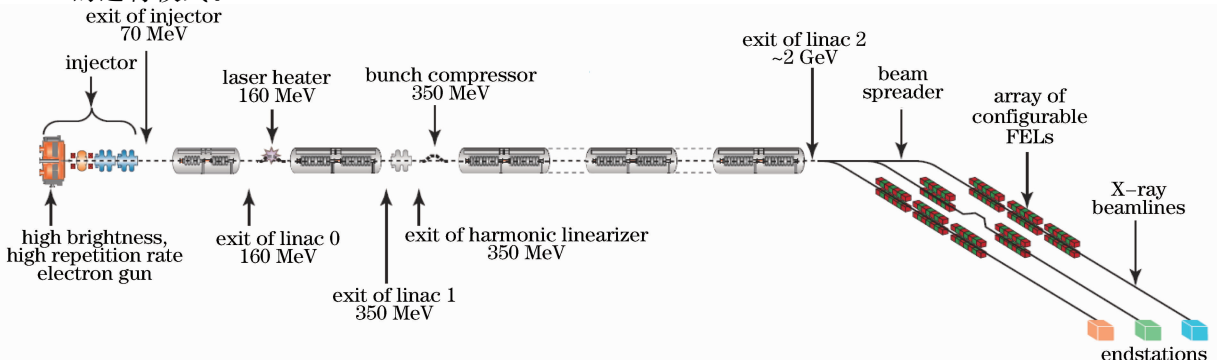


图 17 美国 LBNL 的 NGLS 装置示意图

Fig. 17 Schematic layout of NGLS at LBNL

4.4 sFLASH

除了上面提到的一些即将建设的新的种子型高增益 FEL 装置,人们也计划对现有的一些大型 FEL 装置进行改造以实现种子型 FEL 运行模式。德国 DESY 的 FLASH 自由电子激光装置设计运行于 SASE 模式下,通过升级和改造并引入外部的种子激光,sFLASH 已经可以进行外种子型 FEL 相关的实验^[50]。如图 18 所示,sFLASH 主要是在 FLASH 的基础上加入了一级外种子型 FEL 的波荡器系统,并引入了一个波长为 800 nm 的常规激光。通过对此常规激光进行不同的处理就得到了不同波长的种子激光:在 HHG 直接驱动实验中,800 nm 的激光被注入到惰性气体中通过 HHG 过程产生了 38 nm 的种子激光;在未来的 HGHG 和 EEHG 实验中此种子激光将通过 β -BBO 晶体进行三倍频以得到波长为 266 nm 的种子激光。目前人们已经在 sFLASH 上在 38 nm 左右实现了 HHG 直接驱动型 FEL,接下来 sFLASH 计划进行 HGHG 的实验研究和 20 次谐波 EEHG 的原理验证性实验。与常规 EEHG 方案不同,sFLASH 计划采用 α -BBO 晶体来对 266 nm 的种子激光进行分光和时间上的延迟以得到 EEHG 所需要的两束激光,这将一定程度上简化 EEHG 的装置构造并降低实现的难度^[51]。

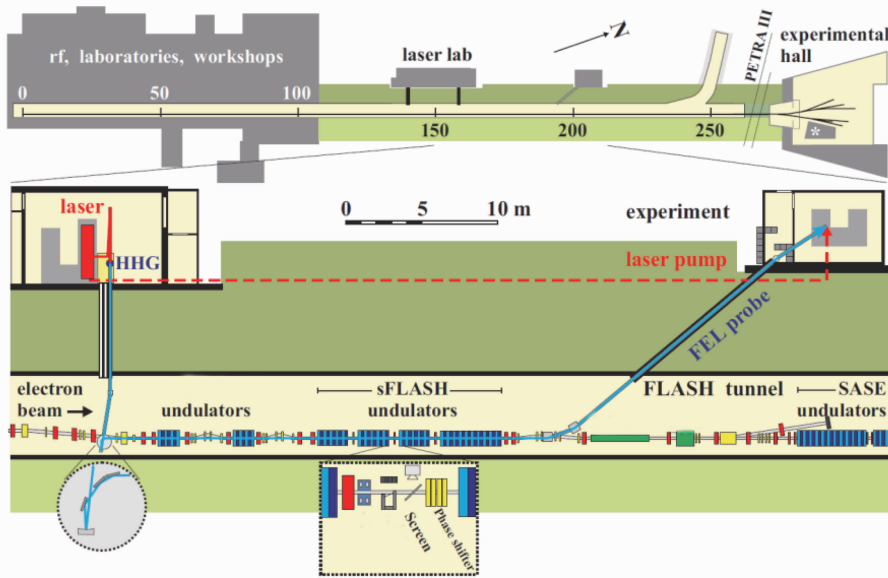


图 18 德国 DESY 的 sFLASH 装置示意图

Fig. 18 Schematic layout of sFLASH at DESY

5 结束语

高功率、短波长、全相干、短脉冲的自由电子激光将为生命科学、材料科学、信息科学、环境科学和非线性科学等科学前沿的基础研究和高新尖端技术的开发研究带来全新的视野和不可估量的革命性的前景。自由电子激光装置规模庞大、技术复杂、投资大,因此研究各种新型的高增益自由电子激光运行模式并对各种模式进行比较和选择无疑是具有重大意义的。目前 SASE 依然是硬 X 射线 FEL 的主要运行机制,国际上多个在建的硬 X 射线自由电子激光装置(包括欧洲 XFEL,瑞士 SwissFEL 和韩国 PAL-FEL)均采用 SASE 模式^[52-54]。通过采用自种子运行模式,SASE 的相干性还可以得到很大程度的改进,且原理上不受波长的限制,预计自种子 SASE 运行机制在不久的将来还会被多个 X 射线自由电子激光装置所广泛采用。然而,自种子 SASE 尚不能满足用户对全相干自由电子激光的需求,输出能量的稳定性也有待进一步提高,发展外种子自由电子激光具有广阔的前景。目前的外种子自由电子激光运行模式各有自身的特点和优势,总体看来,在实现短波长自由电子激光的各种新模式中,EEHG 的优势较大,而级联 HGHG 实现的可行性较高,进一步还需要对这两种模式进行更加仔细的理论实验研究,深入探讨初始噪声在谐波转换过程中的放大效应对最终辐射品质的影响,从而为 X 射线自由电子激光装置的建设开辟新的技术路线和提供更为优化的方案。这里还需要指出的是,基于本文中提到的这些运行模式还可以衍生出一些能够产生飞秒到阿秒量级的

超短脉冲辐射的新运行模式^[55-58],这也是未来高增益自由电子激光装置的一个重要发展方向。

参 考 文 献

- 1 J Madey/ Stimulated emission of Bremsstrahlung in a periodic magnetic field[J]. J Appl Phys, 1971, 42(5): 1906-1913.
- 2 D A G Deacon, L R Elias, J M J Madey, *et al.*. First operation of a free-electron laser[J]. Phys Rev Lett, 1997, 38(16): 892-894.
- 3 A M Kondratenko, E L Saldin. Generation of coherent radiation by a relativistic electron beam in an undulator[J]. Part Accel, 1980, 10: 207-216.
- 4 R Bonifacio, C Pellegrini, L Narducci. Collective instabilities and high-gain regime in a free electron laser[J]. Opt Commun, 1984, 50(6): 373-378.
- 5 T J Orzechowski, B Anderson, W M Fawley, *et al.*. Microwave radiation from a high-gain free electron laser amplifier[J]. Phys Rev Lett, 1985, 54(9): 889-892.
- 6 M Hogan, C. Pellegrini, J. Rosenzweig, *et al.*. Measurement of high gain and intensity fluctuations in a self-amplified, spontaneous-emission free-electron laser[J]. Phys Rev Lett, 1998, 80(2): 289-292.
- 7 Milton S V, Gluskin E, Arnold N D, *et al.*. Exponential gain and saturation of a self-amplified spontaneous emission free-electron laser[J]. Science, 2001, 292(5524): 2037-2041.
- 8 V Ayzvayan, N Baboi, I Bohnet, *et al.*. A new powerful source for coherent VUV radiation; demonstration of exponential growth and saturation at the TTF free-electron laser[J]. Eur Phys J D, 2002, 20(1): 149-156.
- 9 W Ackermann, G Asova, V Ayzvayan, *et al.*. Operation of a free-electron laser from the extreme ultraviolet to the water window[J]. Nature Photonics, 2007, 1(6): 336-342.
- 10 S Schreiber, B Faatz, K Honkavaara. Operation of FLASH at 6.5 nm wavelength[C]. Proceedings of the 2008 European Particle Accelerator Conference, 2008. 133-135.
- 11 P Emma, R Akre, J Arthur, *et al.*. First lasing and operation of ångström-wavelength free-electron laser[J]. Nature Photonics, 2010, 4(9): 641-647.
- 12 S Schreiber. First Lasing in the Water Window with 4.1 nm at FLASH[C]. Proceedings of FEL2011, 2011. 164-165.
- 13 T Ishikawa, H Aoyagi, T Asaka, *et al.*. A compact X-ray free-electron laser emitting in the sub-ångström region[J]. Nature Photonics, 2012, 6(8): 540-544.
- 14 L H Yu. Generation of intense UV radiation by subharmonically seeded single-pass free-electron lasers[J]. Phys Rev A, 1991, 44(8): 5178-5193.
- 15 L H Yu, M Babzien, I Ben-Zvi, *et al.*. High-gain harmonic-generation free-electron laser[J]. Science, 2000, 289(5481): 932-934.
- 16 J Feldhaus, E L Saldin, J R Schneider, *et al.*. Possible application of X-ray optical elements for reducing the spectral bandwidth of an X-ray SASE FEL[J]. Opt Commun, 1997, 140(4-6): 341-352.
- 17 L H Yu, J Wu. Theory of high gain harmonic generation; an analytical estimate[J]. Nucl Instrum Methods Phys Res, 2002, 483(1-2): 493-498.
- 18 S Reiche. Overview of seeding methods for FELs[C]. Proceedings of IPAC 2013, 2013. 2063-2067.
- 19 R Bonifacio, C Pellegrini, L M Narducci. Collective instability of a free electron laser including space charge and harmonics [J]. Opt Commun, 1985, 53(3): 197-202.
- 20 Z T Zhao, S Chen, L H Yu, *et al.*. Shanghai soft X-ray free electron laser test facility[C]. Proceedings of IPAC2011, 2011. 3011-3013.
- 21 G Lambert, B Carré, M E Couprie, *et al.*. Seeding high gain harmonic generation with laser harmonics produced in gases [C]. Proceedings of FEL2004, 2004. 155-158.
- 22 G Lambert, T Hara, D Garzella, *et al.*. Injection of harmonics generated in gas in a free-electron laser providing intense and coherent extreme-ultraviolet light[J]. Nature Phys, 2008, 4(4): 296-300.
- 23 T Togashi, K Fukami, S Matsubara, *et al.*. First observation of the 61.5 nm seeded FEL at the SCSS test accelerator[C]. Proceedings of the 2010 FEL Conference, 2010. 13.
- 24 S Ackermann, A Azima, J Bodewadt, *et al.*. sFLASH: present status and commissioning results[C]. Proceedings of IPAC2011, 2011. 924-927.
- 25 Geloni G, Kocharyan V, Saldin E. A novel self-seeding scheme for hard X-ray FELs[J]. J Mod Opt, 2011, 58(16): 1391-1403.
- 26 J Amann, W Berg, V Blank, *et al.*. Demonstration of self-seeding in a hard-X-ray free-electron laser [J]. Nature Photonics, 2012, 6(10): 693-698.
- 27 Y Feng, J B Hastings, J Krzywinski, *et al.*. Proceedings of FEL2010, 2010. 270-273.
- 28 R Bonifacio, L De Salvo Souza, P Pierini. Generation of XUV light by resonant frequency tripling in a two-wiggler FEL amplifier[J]. Nucl Instrum Methods Phys Res A, 1990, 296(1-3): 787-790.
- 29 L H Yu, L DiMauro, A Doyuran, *et al.*. First ultraviolet high-gain harmonic-generation free-electron laser[J]. Phys Rev

- Lett, 2003, 91(7): 074801.
- 30 A Doyuran, Louis DiMauro, William Graves, *et al.*. Experimental study of a high-gain harmonic-generation free-electron laser in the ultraviolet[J]. Phys Rev ST Accel Beams, 2004, 7(7): 050701.
- 31 Z T Zhao. Seeding experiments at the SDUV-FEL[C]. Proceedings of FEL2011, WEOBI2 (invited talk), 2011.
- 32 E Allaria, R Appio, L Badano, *et al.*. Highly coherent and stable pulses from the FERMI seeded free-electron laser in the extreme ultraviolet[J]. Nature Photonics, 2012, 6(10): 699–704.
- 33 B Liu, W B Li, J H Chen, *et al.*. Demonstration of a widely-tunable and fully-coherent high-gain harmonic-generation free-electron laser[J]. Phys Rev ST Accel Beams, 2013, 16(2): 020704.
- 34 E Allaria, A Battistoni, F Bencivenga, *et al.*. Tunability experiments at the FERMI@Elettra free-electron laser[J]. New J Phys, 2012, 14(11): 113009.
- 35 Li Hua Yu, I Ben-Zvi. High-gain harmonic generation of soft X-rays with the “fresh bunch” technique[J]. Nucl Instrum Methods Phys Res A, 1997, 393(1-3): 96–99.
- 36 Juhao Wu, Li Hua Yu. Coherent hard X-ray production by cascading stages of high gain harmonic generation[J]. Nucl Instrum Methods Phys Res A, 2001, 475:104–111.
- 37 S Di Mitri, E Allaria, D Castronovo, *et al.*. Double Stage Seeded FEL with Fresh Bunch Injection Technique at FERMI@Elettra[C]. Proceedings of IPAC 2013, 2013. TUPEA011.
- 38 L Giannessi. FERMI demonstrates first seeded free electron laser working in double-stage cascaded configuration[J]. Synchrotron Radiation News, 2013, 26(1): 48.
- 39 E L Saldin, E A Schneidmiller, M V Yurkov. Study of a noise degradation of amplification process in a multistage HGHG FEL[J]. Opt Commun, 2002, 202(1-3): 169–187.
- 40 G Geloni, V Kocharyan, E Saldin. Analytical Studies of Constraints on the Performance for EEHG FEL Seed Lasers[OL]. arXiv:1111.1615v1[physics. acc-ph], <http://arXiv.org/abs/111.1615>.
- 41 D Ratner, A Fry, G Stupakov, *et al.*. Laser phase errors in seeded free electron lasers[J]. Phys Rev ST Accel Beams, 2012, 15(3): 030702.
- 42 C Feng, H X Deng, G L Wang, *et al.*. Slippage effect on energy modulation in seeded free-electron lasers with frequency chirped seed laser pulses[J]. Phys Rev ST Accel Beams, 2013, 16(6): 060705.
- 43 G Stupakov. Using the beam-echo effect for generation of short-wavelength radiation[J]. Phys Rev Lett, 2009, 102(7): 074801.
- 44 D Xiang, G Stupakov. Echo-enabled harmonic generation free electron laser[J]. Phys Rev ST Accel Beams, 2009, 12(3): 030702.
- 45 D Xiang, E Colby, M Dunning, *et al.*. Demonstration of the echo-enabled harmonic generation technique for short-wavelength seeded free electron lasers[J]. Phys Rev Lett, 2010, 105(11): 114801.
- 46 D Xiang, E Colby, M Dunning, *et al.*. Evidence of high harmonics from echo-enabled harmonic generation for seeding X-ray free electron lasers[J]. Phys Rev Lett, 2012, 108(2): 024802.
- 47 Z T Zhao, D Wang, J H Chen, *et al.*. First lasing of an echo-enabled harmonic generation free-electron laser[J]. Nature Photonics, 2012, 6(6): 360–363.
- 48 T Zhang, D Wang, Z T Zhao, *et al.*. Design of a wavelength continuously tunable ultraviolet coherent light source[C]. Proceedings of IPAC2012, 2012. 1727–1728.
- 49 J N Corlett, B Austin, K M Baptiste, *et al.*. A next generation light source facility at LBNL[C]. Proceedings of PAC2011, 2011. 775–777.
- 50 A Azima, J Bödewadt, F. Curbis, *et al.*. Status of sFLASH, the seeding experiment at FLASH[C]. Proceedings of IPAC2010, 2010. 2161–2163.
- 51 Kirsten Hacker, Robert Molo, Shaukat Khan, *et al.*. Progress towards HGHG and EEHG seeding at FLASH[C]. Proceedings of FEL2012, 2012. 257–260.
- 52 M Altarelli, R Brinkmann, M Chergui, *et al.*. The European X-Ray Free-Electron Laser Technical Design Report[R]. DESY, 2007.
- 53 R Ganter, R Abela, H H Braun, *et al.*. SwissFEL Conceptual Design Report[R]. PSI, PSI Bericht Nr. 10–04, 2010.
- 54 H S Kang, S H Nam. X-ray free electron laser project of Pohang accelerator laboratory[C]. Proceedings of FEL2010, 2010. 155–158.
- 55 A A Zholents, W M Fawley. Proposal for intense attosecond radiation from an X-ray free-electron laser[J]. Phys Rev Lett, 2004, 92(22): 224801.
- 56 D Xiang, Z Huang, G Stupakov. Generation of intense attosecond X-ray pulses using ultraviolet laser induced microbunching in electron beams[J]. Phys Rev ST Accel Beams, 2009, 12(6): 060701.
- 57 Deng Haixiao, Dai Zhimin. Ultra-high order harmonic generation via a free electron laser mechanism[J]. Chin Phys C, 2010, 34(8): 1140–1147.
- 58 C Feng, J H Chen, Z T Zhao. Generating stable attosecond X-ray pulse trains with a mode-locked seeded free-electron laser[J]. Phys Rev ST Accel Beams 2012, 15(8): 080703.