

用于极紫外光刻的高功率能量回收型自由电子激光光源

周奎, 李鹏*, 吴岱, 黎明

中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900

摘要 未来极紫外光刻技术的发展亟需更高功率的光刻光源, 能量回收型自由电子激光光源可以实现千瓦量级以上的功率输出, 是一种极具潜力的高功率极紫外光刻光源。主要介绍了高功率能量回收型自由电子激光光源的工作原理、发展现状以及所面临的关键技术挑战。

关键词 激光光学; 极紫外光刻; 能量回收型直线加速器; 自由电子激光; 光阴极注入器; 超导加速器

中图分类号 TN248

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL231496

1 引言

自 20 世纪 60 年代起, 半导体行业遵循摩尔定律^[1]发展了半个多世纪。随着新工艺节点的不断推出, 单位面积集成的晶体管个数即芯片的集成度不断提升。而光刻是芯片制造过程中的关键环节, 也是决定芯片制程的核心环节。光刻分辨率则是光刻曝光系统最重要的技术指标, 分辨率越高, 芯片集成度越高。根据瑞利准则, 光刻系统的分辨率(R)为

$$R = k_1 \frac{\lambda}{NA}, \quad (1)$$

式中: λ 为光源波长; NA 为物镜的数值孔径; k_1 为光刻工艺因子。随着技术的发展, 光刻光源的波长不断缩短。极紫外(EUV)光刻技术是实现 7 nm 及以下节点高端芯片制造的关键。极紫外光刻光源的波长为 13.5 nm, 在该波长下可制作较高反射率的 Mo/Si 多层膜反射镜^[2]。目前, EUV 光刻机主要采用激光等离子体(LPP)光源, 利用二氧化碳激光器产生的激光轰击锡液滴, 产生波长为 13.5 nm 的极紫外光^[3]。LPP 光源技术成熟, 已实现商业化, 其 EUV 输出功率已达到 300 W 以上^[4]。但在 LPP 光源中, 锡碎片可能会对收集镜造成污染^[5-6]。此外, 随着 EUV 光刻机数值孔径增大到 0.55 以上和光刻胶灵敏度达到 20~30 mJ/cm², 为克服随机效应^[7-8]、进一步满足大规模量产要求, 各领域对 EUV 光源的输出功率需求越来越高: 在 3 nm 节点输出功率须达到 1.5 kW 以上, 在 2 nm 节点输出功率须达到 2.8 kW 以上^[9]。业界认为 LPP 光源未来可达到的 EUV 最高功率为 500 W 左右, 将继续将 EUV 光刻向 3 nm 以下节点推进,

LPP EUV 光源的功率提升将遭遇瓶颈^[10-12]。因此, 未来极紫外光刻技术的进一步发展亟需更大功率的光源。

自由电子激光(FEL)光源是一种由高品质相对论电子束在周期性磁场作用下产生的高功率同步辐射光源^[13], 其中心波长可通过设计实现一定范围内的连续调节, 峰值亮度和平均亮度分别比第三代同步辐射光源高 10 个量级和 3 个量级。相比于 LPP 技术, FEL 技术具有无碎片和粒子污染、无需大口径收集镜、热沉积小、平均功率高、光束质量近衍射极限等优势^[14-15], 但基于传统电子直线加速器的 FEL 光源存在束流单次使用后即丢弃导致的能量利用率极低的问题。能量回收型直线加速器(ERL)可以对高功率电子束流的能量进行有效回收利用, 兼备了储存环高平均流强、高能量利用率和直线加速器高束流品质、束流参数灵活可调的优点, 是同时实现高能量利用率、高平均流强、高亮度电子束流的主要手段。能量回收型自由电子激光(ERL FEL)光源可实现高重复频率、高平均功率、高能量利用效率的激光输出。随着 FEL 和 ERL 技术的发展, ERL FEL 光源在 13.5 nm 波长处可实现超过 10 kW 的功率输出^[16-17], 是一种极具潜力的大功率 EUV 光刻光源。

本文首先讨论了 ERL FEL 光源的工作原理, 然后介绍了 ERL FEL 光源的发展现状、基于 ERL FEL 的光刻光源方案及其面临的关键技术挑战。

2 工作原理

自由电子激光是一种基于真空中自由电子产生的

收稿日期: 2023-12-11; 修回日期: 2024-02-21; 录用日期: 2024-02-22; 网络首发日期: 2024-02-29

基金项目: 国家自然科学基金(62205319)、中物院创新发展基金创新项目(CX20210046)

通信作者: burnlife@sina.com

辐射激光,相对于传统激光,其辐射波长不依赖于受激介质,仅与电子束能量和波荡器磁场有关^[18]。自由电子激光装置主要包括电子枪、加速器、波荡器和光束线四部分,其工作原理如图 1 所示,由电子枪产生的高品

质电子束流,通过加速器增能到一定能量,然后进入波荡器的周期性磁场,产生受激辐射方式放大的相干辐射。按照不同的放大增益,主要分为低增益和高增益两种机制。

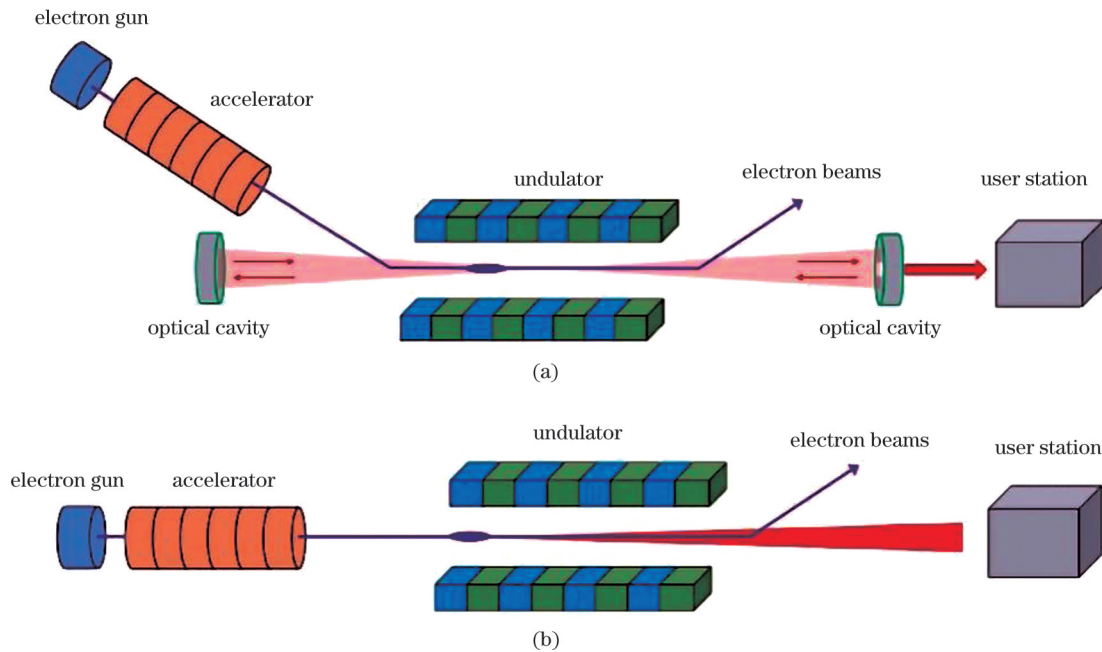


图 1 FEL 的基本原理^[19]。(a)低增益 FEL;(b)高增益 FEL

Fig. 1 Basic principle of FEL^[19]. (a) Low gain FEL; (b) high gain FEL

典型的低增益 FEL 为振荡器型 FEL,波荡器被置于光学谐振腔之间,如图 1(a)所示,电子束产生的辐射光在光学谐振腔中来回振荡,当满足一定的谐振条件时,与后续电子束团相互作用,实现受激放大并最终达到饱和输出。目前,振荡器型 FEL 主要用于太赫兹和红外波段,如成都太赫兹自由电子激光装置(CTFEL)^[20]和合肥红外自由电子激光装置(FELiChEM)^[21]。在紫外或更短的波长范围,由于缺乏合适的反射材料,振荡器型 FEL 难以工作。

为将 FEL 向更短的波长范围拓展,人们发展了利用高品质电子束通过超长波荡器进行单程高增益放大的自放大自发辐射(SASE)模式。电子束以接近光速的速度沿自发辐射方向运动时,与自发辐射持续耦合,在一定条件下电子束团产生微聚束,微聚束又反过来加强自发辐射,从而建立一个正反馈放大机制直至饱和^[22]。基于 SASE 的 FEL 没有输出波长限制,可工作于红外到 X 射线任何波段,是现今短波长高增益 FEL 装置的主流方案。

根据加速器类型的不同,FEL 装置主加速器主要分为常温加速器和超导加速器。采用常温加速器驱动的自由电子激光装置主要有 LCLS、SACLA、FERMI、SwissFEL、PAL-XFEL、SXFEL、DCLS 等。常温加速器的建设成本较低,但受限于腔壁损耗和水冷功率,

平均流强较低。而超导加速器,因其极高的品质因素和极低的腔壁损耗,可运行在高重复频率和高平均流强模式下。因此,高功率自由电子激光装置通常采用超导加速器技术路线。目前,国际上采用超导加速器驱动的自由电子激光装置主要有 FLASH、European XFEL、LCLS-II、SHINE 等。

另一方面,常规 FEL 装置主要采用直线加速器加速电子束,束流经过一次加速后即丢弃,能量利用效率极低。且受限于功率源功率、供电和运行成本及安全处置剩余束流等因素,目前,高能直线加速器的束流平均流强并不高,难以满足大功率 EUV 光刻光源对高平均功率电子束的应用需求。

能量回收型直线加速器的基本原理如图 2 所示,电子束经直线加速器加速后,通过返航束线再次返回主加速器,落在减速相位上,高能电子束的功率转换为微波加速场功率,用于加速后续新注入的电子束,达到回收利用“废束”能量的目的^[24]。由于束流能量的有效回收利用,ERL 不需要大功率微波源就能实现高平均流强电子束的加速,显著提高了能量利用率,节省了微波功率源的建造和运行成本。同时,大幅减小了废弃电子束沉积在垃圾靶上的束流功率,避免了中子活化辐射,降低了辐射污染水平。因此,基于 ERL 技术的 FEL 光源,为高功率极紫外光刻光源发展提供了一条新的技术路线。

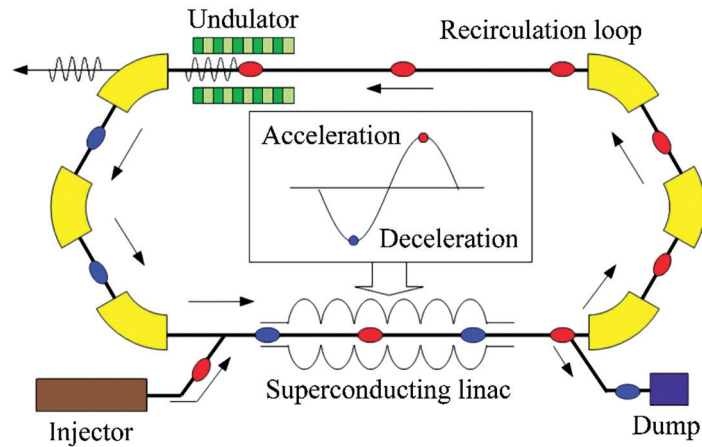


图 2 ERL FEL 光源示意图^[23]
Fig. 2 Schematic of ERL FEL light source^[23]

3 发展现状

自 Madey^[25]于 1971 年首次提出自由电子激光概念以来,世界上至少已建成 50 多台 FEL 装置,并有至少 20 台在建或计划建设的 FEL 装置。这些 FEL 装置目前已实现从太赫兹到硬 X 射线谱段的激光出光,并作为目前最高峰值亮度的先进光源推动了生命科学、信息技术、材料等多个学科的进步。FEL 有两个主要发展方向,分别为高功率和短波长。

而早在 1965 年, Tigner^[26]就第一次提出了能量回收型直线加速器的概念,但受限于当时加速器技术条件的限制,直到 1977 年,才完成首次能量回收实验^[27]。从 20 世纪 90 年代开始,美国杰弗逊实验室 (JLab) 分别

在 CEBAF、IR FEL Demo、JLab FEL 等装置上,结合射频超导技术,成功实现了电子束能量回收,并取得巨大进展^[28-29]。近十几年,ERL 技术不断被应用到不同领域,世界各国纷纷对 ERL 装置开展了研究和建设工作。其中,ERL 最主要的应用方向之一就是用于产生高功率自由电子激光。

下面简要介绍 ERL FEL 光源装置的发展现状和基于 ERL FEL 的 EUV 光刻光源方案。

3.1 ERL FEL 光源装置

国际上已建成的 ERL FEL 光源装置主要有美国的 JLab FEL、俄罗斯的 Novosibirsk FEL、英国的 ALICE、日本的 JAEA FEL 等装置,其主要参数如表 1 所示。

表 1 国际上已建成的 ERL FEL 光源装置主要参数
Table 1 Main parameters of international ERL FEL light source facilities

Parameter	JLab FEL (infrared)	JLab FEL (ultraviolet)	Novosibirsk FEL (2 nd)	Novosibirsk FEL (3 rd)	Daresbury ALICE	JAEA FEL
Energy/MeV	165	135	21.0-22.8	39-42	20.8-35.0	17
Beam current/mA	10	2.5	10	4	8.125	8
FEL wavelength/ μm	1-14	0.25-0.70	37-80	8-11	5-8	22
Maximum output power/W	>10000	>150	500	100	53	750
Repetition rate/MHz	74.85	74.85	180.4	180.4	81.25	20.8
Accelerator type	Superconducting	Superconducting	Normal-conducting	Normal-conducting	Superconducting	Superconducting
Working mode	Continuous wave	Continuous wave	Continuous wave	Continuous wave	Pulse	Pulse

如图 3 所示,美国杰弗逊实验室建设的 JLab FEL 装置采用射频超导加速器和能量回收技术,是全球第一台平均功率超过 10 kW 的 ERL FEL 装置。该装置始建于 1996 年,最早建设了一条红外和 THz 束线,并于 1999 年突破 1 kW 的设计指标^[31],2001 年装置实现红外 FEL 平均功率输出超过 2 kW@3.1 μm ^[32],2007 年经过升级后,红外 FEL 平均功率达到 14.2 kW@1.6 μm ^[33];紫外 FEL 束线始建于 2006 年,FEL 光波长覆盖 250~700 nm,2010 年 8 月在 700 nm 处达到 165 W 的输出功率^[34]。

俄罗斯西伯利亚核物理研究所 (BINP) 建设的 Novosibirsk FEL 是 FEL 家族中的特例^[35],该装置采用常温多圈能量回收技术路线,通过热阴极注入器和低频常温加速腔,达到了 10 mA 平均流强,在 THz 波段实现了最高 500 W 的平均功率输出^[36]。英国 Daresbury 实验室提出建设一台基于 ERL 的多用途 FEL 和同步辐射光源 4GLS^[37],并建设一台小型 ERL FEL 实验装置 ALICE^[38]。

日本原子能机构 (JAEA) 建设了一台用于产生红外自由电子激光的 ERL 实验装置^[39],并实现了 750 W

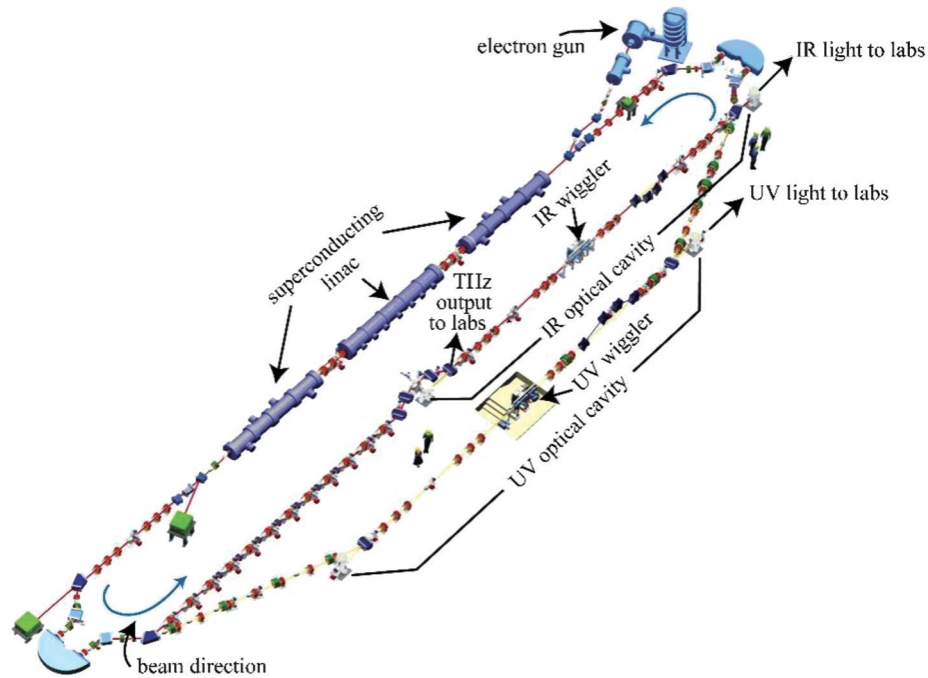


图 3 JLab FEL 装置示意图^[30]
Fig. 3 Schematic of JLab FEL facility^[30]

的激光输出^[40]。日本高能加速器研究机构(KEK)建设了一台紧凑型能量回收型直线加速器(cERL),并将其作为 EUV 光刻光源的预研装置,开展了系列的优化和实验研究^[41-43]。

在国内,中国工程物理研究院早在 2000 年左右就进行了能量回收型直线加速器的理论与模拟研究,并提出了基于 ERL 装置的 kW 级自由电子激光器设计方案^[44]。北京大学在射频超导加速器多年研究的基础上,提出了北京大学 ERL FEL 的设计方案^[45],并开展了 ERL 束流动力学设计^[46]、束流崩溃效应(BBU)^[47]分

析等研究工作。中国科学院高能物理研究所计划在北方先进光源(HEPS)二期将储存环光源升级为 ERL 光源,提出了一台小型 ERL-FEL 两用验证装置的初步设计方案^[48],并开展了束流动力学和 BBU 相关的理论研究^[49-50]。但目前,国内尚无建成的 ERL FEL 装置。

3.2 基于 ERL FEL 的 EUV 光刻光源方案

2015 年,日本 KEK 在 cERL 基础上,提出了用于极紫外光刻光源的 ERL FEL 方案^[51],如图 4 所示,并开展了一系列深入的模拟优化和关键技术研究^[52-54]。

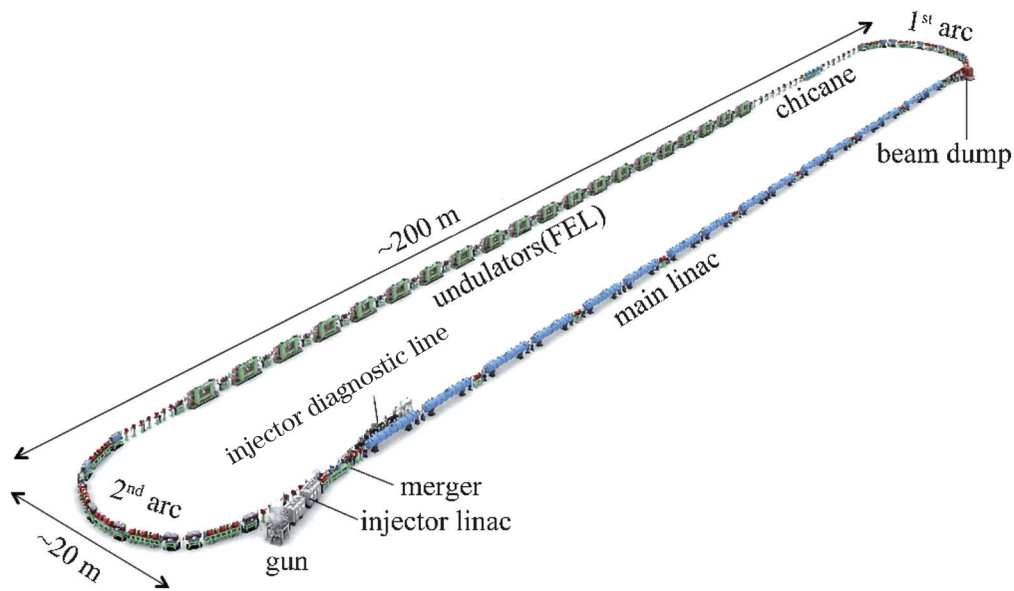


图 4 KEK 提出的基于 ERL 的 EUV FEL 光源示意图^[51]
Fig. 4 Schematic of EUV FEL light source based on ERL proposed by KEK^[51]

该装置长度约为 200 m, 宽度约为 20 m, 电子束流能量为 800 MeV, 平均流强为 10 mA, 可产生的 EUV 激光功率大于 10 kW。从 2016 年开始, KEK 每年组织召开 EUV FEL 国际研讨会, 并成立了 EUV FEL 光源产业化研究会, 共同推进 EUV FEL 光刻光源技术的发展。

此外, 俄罗斯、德国和以色列也曾经提议采用多

圈加速多圈回收的方法来缩小装置规模, 以建设一台紧凑型的 EUV FEL 光源^[55]。装置布局如图 5 所示, 设计的光源功率为 5 kW 左右, 长度仅约为 40 m。其优点在于缩小了装置规模和体积, 降低了建设成本, 缺点在于增加了系统复杂度, 降低了电子束品质和输出功率, 目前多圈加速多圈回收的技术尚未完全成熟。

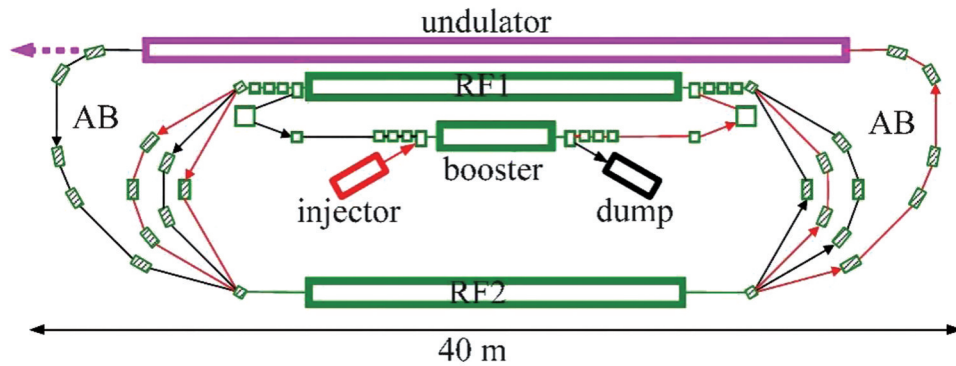


图 5 用于极紫外光刻的紧凑型 ERL FEL 光源示意图^[55]

Fig. 5 Compact ERL FEL light source for EUV lithography^[55]

中国科学院上海高等研究院提出了基于 ERL 和角色散微群聚技术的全相干 EUV 光源方案, 束流动力学模拟结果表明, 可产生平均功率约为 100 W 的 13.5 nm 极紫外相干辐射^[56]。此外, 还提出了一种基于同步辐射的可用于极紫外光刻的 kW 级辐射源方案^[57], 采用 257 nm 种子激光通过角色散引起的微聚束机制^[58]对储存环中的电子束进行调制, 可实现功率为 2.5 kW 的 13.5 nm 相干辐射。

近年来, 清华大学提出了一种新型粒子加速器光源-稳态微聚束 (SSMB) 光源方案^[59], 并与德国的研究团队联合开展了稳态微聚束的原理验证实验^[60], 该方案通过结合微聚束辐射的强相干特性和储存环内电子束的高回旋频率特性, 可提供高平均功率、窄带宽的相干辐射, 波段可覆盖从太赫兹到软 X 射线的范围, 有望为极紫外光刻提供一条新的技术路径。

4 关键技术挑战

虽然用于 EUV 光刻的 ERL FEL 光源极具发展潜力, 但仍然存在着诸多关键技术问题亟待解决。由于 FEL 输出的 EUV 光束直径和发散角都很小, 且是相干光, 不能直接用于光刻机曝光光学系统, 还需要通过光束预处理系统进行扩束、准直、消相干、均场和聚焦, 以达到 EUV 光刻对收集镜第一个中间焦点 (IF) 处光束的参数要求, 然后将 EUV 光束入射至曝光光学系统中, 将掩模图像精确成像在硅片面上。相关技术难题包括: 发展适用于 EUV 光刻的 FEL 消相干技术, 建立复相干度评价体系, 搭建适用于 EUV FEL 的高反射率聚光系统, 匹配 EUV FEL 的照明系统和投影物镜系统等。

而就光源本身而言, 同样面临着一系列技术挑战。要获得 kW 级 EUV FEL 激光输出, 装置须长时间运行在高平均流强、高束流功率状态, 光阴极注入器、超导加速器和能量回收技术等均面临更高的要求。

4.1 光阴极注入器

目前, 用于 ERL FEL 光源的连续波光阴极注入器主要有直流高压注入器、常温射频 (RF) 注入器和射频超导注入器。

直流高压注入器是高平均功率强流注入器的首选, 目前, 包括 JLab ERL FEL、Cornell ERL、Daresbury ALICE、KEK cERL 等装置均采用直流高压注入器。其主要优点是电子枪结构相对简单、真空性能好, 能达到 10^{-10} Pa 量级甚至更高, 可采用量子效率高、可产生极化电子但需要超高真空条件的砷化镓 (GaAs) 光阴极。中国工程物理研究院应用电子学研究所为太赫兹自由电子激光装置 (CTFEL) 研制的直流高压注入器^[61], 采用 GaAs 光阴极, 获得了连续 5 mA 的平均流强输出。而其主要缺点在于阴极表面的加速场强较低, 限制了电子束初始亮度, 且电子枪出口能量受直流高压的限制, 通常只有 300 多 keV。对于低能强流电子束, 空间电荷效应将引起发射度迅速增长, 因此, 需要尽快对电子枪出口的束流进行增能。目前, 直流高压注入器在 FEL 光源上的应用主要集中在红外太赫兹波段。而对于对束流品质要求更高的 EUV FEL 光源, 还需要对直流高压注入器的束线布局和束流动力学进行进一步优化设计。

常温 RF 注入器由于热效应限制, 通常采用增大

腔体尺寸的方法工作在甚高频(VHF)波段。其优点是能产生较高的加速梯度,从而获得较高的初始亮度;主要缺点是功率下由于腔壁放气难以获得很高真空,多采用对真空度要求较低的基于紫外激光驱动的碲化铯(Cs_2Te)阴极。在高平均流强运行的要求下,驱动激光系统面临极大的挑战。目前,连续波RF电子枪的平均流强还没有达到mA,距离ERL FEL光刻光源的要求还有较大差距。

射频超导注入器采用超导腔加速电子束,可以有效克服常温RF注入器的热功率和真空问题,同时具有较高的阴极表面加速梯度,可以产生高平均流强高品质电子束流。但射频超导注入器结构较为复杂,技术难度高,而且存在光阴极污染超导腔和长时间运行导致超导腔性能下降的风险。北京大学采用直流和射频超导相结合的技术路线,发展了DC-SRF注入器。其第一代DC-SRF电子枪采用3.5-cell超导腔,实现了mA量级的束流引出^[62]。最近,研发的第二代DC-SRF电子枪,采用1.5-cell超导腔和 K_2CsSb 光阴极,有望实现5~10 mA高平均流强运行^[63]。

此外,EUV光刻生产要求装置系统运行稳定性好于98%,每年非运行时间需控制在1周以内^[53]。因此,为了保证装置的长时间稳定运行,要求光阴极具有高量子效率和更长的工作寿命,并且配备可靠的光阴极快速切换系统。

4.2 超导加速器

超导加速器的核心部件为射频超导腔,超导腔的发展主要分为高梯度和高流强两个方向。目前,主流

的高梯度超导腔为谐振频率为1.3 GHz的9-cell TESLA型超导腔,通过不断改善的后处理工艺,其有效加速梯度可达到30 MV/m以上。对强流超导腔而言,随着流强的增大,束流在腔内激励的高阶模问题会越来越明显,如何对高阶模进行有效导出和衰减是强流超导腔设计需要解决的关键问题。

国际上,美国康奈尔大学、BNL、JLab和日本KEK等单位均开展过强流超导腔的设计和研发工作。国内,只有北京大学曾为美国阿贡国家实验室设计研发了一只谐振频率为1.3 GHz的5-cell强流超导腔^[64]。强流超导腔的共同特点为内径和管径大,利于高阶模的导出和衰减^[65]。

4.3 能量回收技术

国际上已建成的大功率ERL FEL光源均集中在红外太赫兹波段,多采用振荡器型自由电子激光输出。目前,尚无建成的极紫外ERL FEL光源。对于极紫外ERL光源,电子束能量和功率相对于红外太赫兹波段均高很多,高效率能量回收的技术难度和挑战更大。

国内关于ERL的研究相对落后,主要还停留在理论研究和物理设计阶段,缺乏ERL实验研究装置。中国工程物理研究院正在建设一台红外太赫兹自由电子激光装置^[66],如图6所示,该装置同时可以作为一个小型的能量回收型直线加速器实验研究平台,用于开展ERL关键物理与技术研究,为ERL技术的发展提供技术参考。该平台主要设计参数如表2所示,电子束注入能量为6~8 MeV,返航束流能量为20 MeV,束流平均流强为1~3 mA。

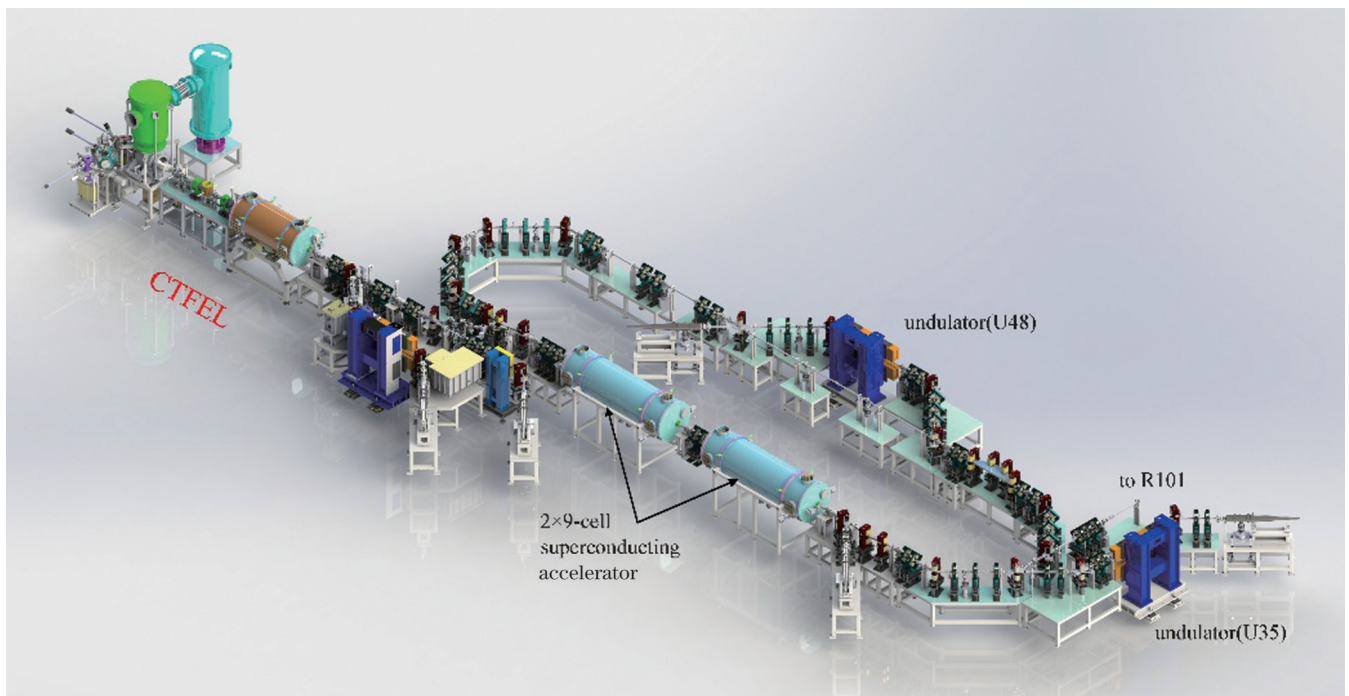


图6 中国工程物理研究院红外太赫兹自由电子激光装置示意图^[66]

Fig. 6 Schematic of infrared terahertz FEL facility of Chinese Academy of Engineering Physics^[66]

表 2 中国工程物理研究院红外太赫兹自由电子激光装置 ERL 实验平台的主要设计参数

Table 2 Main design parameters of ERL experimental platform based on infrared terahertz FEL facility of Chinese Academy of Engineering Physics

Parameter	Designed value
Injector energy /MeV	6-8
Beam energy /MeV	20
Beam current /mA	1-3
Repetition rate /MHz	27.08
Energy recovery efficiency /%	>95

5 结 论

传统 LPP 技术在 3 nm 节点以下将遇到瓶颈, 未来极紫外光刻技术的发展亟需 kW 量级的高功率光源。ERL FEL 光源可实现 kW 量级以上的功率输出, 被认为是一种极具潜力的下一代光刻光源。高功率 ERL FEL 光源装置已经在红外太赫兹波段得到了有效验证。目前, 国内外已提出了多种基于 ERL FEL 的 EUV 光刻光源方案。但同时, ERL FEL 极紫外光刻光源建设仍面临着高品质强流光阴极注入器、强流超导加速器和高效率能量回收等关键技术挑战。

参 考 文 献

- [1] Moore G. Progress in digital integrated electronics[EB/OL]. [2023-11-12]. https://www.eng.auburn.edu/~agrawvd/COURSE/E7770_Spr07/READ/Gordon_Moore_1975_Speech.pdf.
- [2] Kaiser N, Yulin S, Perske M, et al. High performance EUV multilayer optics[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7101: 71010Z.
- [3] Brandt D C, Fomenkov I V, Farrar N R, et al. CO₂/Sn LPP EUV sources for device development and HVM[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8679: 86791G.
- [4] Mizoguchi H, Tomuro H, Nishimura Y, et al. Update of >300 W high power LPP-EUV source challenge-IV for semiconductor HVM[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11854: 118540K.
- [5] Böwering N, Meier C. *In situ* transformation and cleaning of tin-droplet contamination on mirrors for extreme ultraviolet light[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2018, 36(2): 021602.
- [6] Lin N, Chen Y Y, Wei X, et al. Spectral purity systems applied for laser-produced plasma extreme ultraviolet lithography sources: a review[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2023, 11: e64.
- [7] de Bisschop P, Hendrickx E. Stochastic printing failures in EUV lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10957: 109570E.
- [8] de Bisschop P, Hendrickx E. Stochastic effects in EUV lithography [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10583: 105831K.
- [9] Nakamura N, Kato R, Sakai H, et al. High-power EUV free-electron laser for future lithography[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2023, 62(5G): SG0809.
- [10] 宗楠, 胡蔚敏, 王志敏, 等. 激光等离子体 13.5 nm 极紫外光刻光源进展[J]. 中国光学, 2020, 13(1): 28-42.
Zong N, Hu W M, Wang Z M, et al., Research progress on laser-produced plasma light source for 13.5 nm extreme ultraviolet lithography[J]. Chinese Optics, 2020, 13(1): 28-42.
- [11] Yang D K, Wang D, Huang Q S, et al. The development of laser-produced plasma EUV light source[J]. Chip, 2022, 1(3): 100019.
- [12] Fomenkov I, Brandt D, Ershov A, et al. Light sources for high-volume manufacturing EUV lithography: technology, performance, and power scaling[J]. Advanced Optical Technologies, 2017, 6(3/4): 173-186.
- [13] Kwan T, Dawson J M, Lin A T. Free electron laser[J]. The Physics of Fluids, 1977, 20(4): 581-588.
- [14] Levinson H J. Free electron lasers and the future of EUV lithography [EB/OL]. [2023-11-12]. https://conference-indico.kek.jp/event/196/contributions/3935/attachments/2695/3482/Levinson_Abstract.pdf
- [15] Goldstein M, Lee S H, Shroff Y A, et al. FEL applications in EUV lithography[C]//Proceedings of the 27th international Free Electron Laser Conference, August 21-26, 2005, Stanford, California, USA. [S.l.: s.n.], 2005: 422-425.
- [16] Pagani C, Saldin E L, Schneidmiller E A, et al. Design considerations of 10 kW-scale, extreme ultraviolet SASE FEL for lithography[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2001, 475(1/2/3): 391-396.
- [17] Nakamura N, Kato R, Sakai H, et al. EUV-FEL light source for future lithography[EB/OL]. [2023-11-12]. <https://inspirehep.net/files/b358c9c9392f1cf038ff9bb5e94f3901>.
- [18] 金光齐, 黄志戎, 瑞安·林德伯格, 等. 同步辐射与自由电子激光: 相干 X 射线产生原理[M]. 北京: 北京大学出版社, 2018.
Kim K J, Huang Z R, Lindberg R, et al. Synchrotron radiation and free-electron lasers[M]. Beijing: Peking University Press, 2018.
- [19] 李鹏, 黎明, 吴岱, 等. 我国自由电子激光技术发展策略研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 35-41.
Li P, Li M, Wu D, et al. Development strategy of free electron laser technology in China[J]. Strategic study of CAE, 2020, 22(3): 35-41.
- [20] 周奎, 李鹏, 周征, 等. 中物院太赫兹自由电子激光装置现状及升级计划[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34(10): 220091.
Zhou K, Li P, Zhou Z, et al. Status and upgrade plan of CAEP THz-FEL facility[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34(10): 220091.
- [21] 李和廷, 何志刚, 吴芳芳, 等. 合肥红外自由电子激光装置[J]. 中国激光, 2021, 48(17): 1700001.
Li H T, He Z G, Wu F F, et al. Hefei infrared free-electron laser facility[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(17): 1700001.
- [22] 赵振堂, 王东, Bucksbaum Philip H., 等. 更亮与更快: X 射线自由电子激光的前景与挑战[J]. 物理, 2015, 44(7): 456-457.
Zhao Z T, Wang D, Bucksbaum P H, et al. Brighter and faster: prospects and challenges of X-ray free electron lasers[J]. Physics, 2015, 44(7): 456-457.
- [23] Hajima R. Energy recovery linacs for light sources[J]. Reviews of Accelerator Science and Technology, 2010, 3(1): 121-146.
- [24] Merminga L, Douglas D R, Krafft G A. High-current energy-recovering electron linacs[J]. Annual Review of Nuclear and Particle Science, 2003, 53: 387-429.
- [25] Madey J M J. Stimulated emission of bremsstrahlung in a periodic magnetic field[J]. Journal of Applied Physics, 1971, 42(5): 1906-1913.
- [26] Tigner M. A possible apparatus for electron clashing-beam experiments[J]. Il Nuovo Cimento (1955-1965), 1965, 37(3): 1228-1231.
- [27] Schriber S O, Funk L W, Hodge S B, et al. Experimental measurements on a 25 MeV reflexotron[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1977, 24(3): 1061-1063.
- [28] Cardman L S, Harwood L, Jefferson T. The JLAB 12 GeV energy upgrade of CEBAF for QCD and hadronic physics[C]//2007 IEEE Particle Accelerator Conference (PAC), June 25-29, 2007, Albuquerque, NM, USA. New York: IEEE Press, 2007: 58-62.
- [29] Benson S V, Beard K, Behre C, et al. High power lasing in the IR Upgrade FEL at Jefferson Lab[R]. Newport News: Thomas Jefferson National Accelerator Facility, 2004.

- [30] Thomas A W, Williams G P. The free electron laser at Jefferson lab: the technology and the science[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(8): 1679-1682.
- [31] Douglas D. The Jefferson lab 1 kW IR FEL[EB/OL]. (2000-07-28) [2023-11-12]. <http://arxiv.org/abs/physics/0007094>.
- [32] Neil G R, Benson S V, Biallas G, et al. The Jefferson lab free electron laser program[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2002, 41(S1): 15.
- [33] Benson S, Beard K, Biallas G, et al. High power operation of the JLab IR FEL driver accelerator[C]//2007 IEEE Particle Accelerator Conference (PAC), June 25-29, 2007, Albuquerque, NM, USA. New York: IEEE Press, 2007: 79-81.
- [34] Benson S V, Douglas D, Neil G R, et al. The Jefferson lab free electron laser program[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2011, 299(1): 012014.
- [35] Shevchenko O A, Vinokurov N A, Arbutov V S, et al. The Novosibirsk free-electron laser facility[J]. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2019, 83(2): 228-231.
- [36] Gavrilov N G, Knyazev B A, Kolobanov E I, et al. Status of the Novosibirsk high-power terahertz FEL[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2007, 575(1/2): 54-57.
- [37] Poole M W, Bennett S L, Bowler M A, et al. 4GLS: a new type of fourth generation light source facility[C]//Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference, May 12-16, 2003, Portland, OR, USA. New York: IEEE Press, 2004: 189-191.
- [38] Thompson N R, Clarke J A, Craig T, et al. Status of the ALICE IR-FEL: from ERL demonstrator to user facility[EB/OL]. [2023-11-12]. <https://accelconf.web.cern.ch/FEL2015/papers/tup015.pdf>.
- [39] Hajima R, Nishimori N, Nagai R, et al. Demonstration of a high-power FEL oscillator with high extraction-efficiency[C]//PACS2001. Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference (Cat. No.01CH37268), June 18-22, 2001, Chicago, IL, USA. New York: IEEE Press, 2001: 2733-2735.
- [40] Nishimori N, Hajima R, Iijima H, et al. FEL oscillation with a high extraction efficiency at JAEA ERL FEL[EB/OL]. [2023-11-12]. https://accelconf.web.cern.ch/f06/talks/uaau03_talk.pdf.
- [41] Takai R, Obina T, Sagehashi H, et al. Design and initial commissioning of beam diagnostics for the KEK compact ERL[EB/OL]. [2023-11-12]. https://accelconf.web.cern.ch/IBIC2014/talks/mocyb2_talk.pdf.
- [42] Sakanaka S, Yamamoto Y, Kako E, et al. The first beam recirculation and beam tuning in the compact ERL at KEK[EB/OL]. [2023-11-12]. <https://accelconf.web.cern.ch/LINAC2014/papers/tupp075.pdf?n=LINAC2014/papers/tupp075.pdf>.
- [43] Honda Y, Adachi M, Eguchi S, et al. Construction and commissioning of mid-infrared self-amplified spontaneous emission free-electron laser at compact energy recovery linac[J]. The Review of Scientific Instruments, 2021, 92(11): 113101.
- [44] 肖效光. 30 MeV Linac 数值模拟与能量回收初步研究 MeV Linac 数值模拟与能量回收初步研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2003.
- Xiao X G. Preliminary study on numerical simulation and energy recovery of 30 MeV Linac[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2003.
- [45] Wang G M, Chao Y C, Liu C Y, et al. Energy recovery transport design for PKU FEL[C]//2007 IEEE Particle Accelerator Conference (PAC), June 25-29, 2007, Albuquerque, NM, USA. New York: IEEE Press, 2007: 1191-1193.
- [46] Huang S L, Liu K X, Quan S W, et al. Optics layout for the ERL test facility at Peking University[EB/OL]. [2023-11-12]. <https://accelconf.web.cern.ch/ERL2011/papers/WG2007.pdf?n=ERL2011/papers/WG2007.pdf>.
- [47] Chen S, Huang S L, Li Y M, et al. Multi-pass, multi-bunch beam breakup for 9-cell Tesla cavities in the ERL[J]. Chinese Physics C, 2013, 37(8): 087001.
- [48] Wang S H, Wang J Q, Chen S Y, et al. Design studies on the ERL-FEL test facility at IHEP, Beijing[J]. Chinese Physics C, 2012, 36(5): 469-474.
- [49] Cui X H, Jiao Y, Wang J Q, et al. BBU effect in an ERL-FEL two-purpose test facility[J]. Chinese Physics C, 2013, 37(7): 077005.
- [50] Jiao Y, Xiao O Z. Beam dynamics studies of the photo-injector in low-charge operation mode for the ERL test facility at IHEP[J]. Chinese Physics C, 2014, 38(6): 067003.
- [51] Nakamura N, Chen S, Furuya T, et al. Design work of the ERL-FEL as the high intense EUV light source[EB/OL]. [2023-11-12]. <https://jacowfs.jlab.org/conf/y15/erl15/papers/MOPCTH010/MOPCTH010.PDF>.
- [52] Nakamura N, Kato R, Miyajima T, et al. S2E simulation of an ERL-based high-power EUV-FEL source for lithography[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 874(1): 012013.
- [53] Nakamura N, Kawata H, Kako E, et al. Challenges towards industrialization of the ERL-FEL light source for EUV lithography[EB/OL]. [2023-11-12]. <https://accelconf.web.cern.ch/ipac2019/papers/thmp013.pdf>.
- [54] Kawata H, Nakamura N, Sakai H, et al. High power light source for future extreme ultraviolet lithography based on energy-recovery linac free-electron laser[J]. Journal of Micro/Nanopatterning, Materials, and Metrology, 2022, 21(2): 021210.
- [55] Socol Y, Kulipanov G N, Matveenko A N, et al. Compact 13.5-nm free-electron laser for extreme ultraviolet lithography[J]. Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams, 2011, 14(4): 040702.
- [56] Zhao Z T, Wang Z, Feng C, et al. Energy recovery linac based fully coherent light source[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 23875.
- [57] Jiang B C, Feng C, Li C L, et al. A synchrotron-based kilowatt-level radiation source for EUV lithography[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 3325.
- [58] Feng C, Zhao Z T. A storage ring based free-electron laser for generating ultrashort coherent EUV and X-ray radiation[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 4724.
- [59] 唐传祥, 邓秀杰. 稳态微聚束加速器光源[J]. 物理学报, 2022, 71(15): 152901.
- Tang C X, Deng X J. Steady-state micro-bunching accelerator light source[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(15): 152901.
- [60] Deng X J, Chao A, Feikes J, et al. Experimental demonstration of the mechanism of steady-state microbunching[J]. Nature, 2021, 590(7847): 576-579.
- [61] Wang H B, Li K, Li M, et al., A GaAs photoemission DC gun for CAEP high-average-power THz FEL[EB/OL]. [2023-11-12]. <https://paper.kek.jp/FEL2014/papers/ua03.pdf>.
- [62] Quan S W, Hao J K, Lin L, et al. Stable operation of the DC-SRF photoinjector[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2015, 798: 117-120.
- [63] Zhao S, Huang S L, Lin L, et al. Longitudinal phase space improvement of a continuous-wave photoinjector toward X-ray free-electron laser application[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2021, 1018: 165796.
- [64] Li Y M, Zhu F, Quan S W, et al. The design of a five-cell high-current superconducting cavity[J]. Chinese Physics C, 2012, 36(1): 74-79.
- [65] 黄森林, 刘克新. 基于能量回收技术的光源: ERL 光源[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34(10): 104011.
- Huang S L, Liu K X. Energy recovery linac light source[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34(10): 104011.
- [66] 周奎, 李鹏, 胥汉勋, 等. 中国工程物理研究院红外太赫兹自由电子激光装置总体设计[J]. 中国激光, 2023, 50(17): 1718001.
- Zhou K, Li P, Xu H X, et al. General design of infrared terahertz free-electron laser facility of Chinese academy of engineering physics[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(17): 1718001.

High-Power Free-Electron Laser Sources Based on Energy Recovery Linacs for Extreme Ultraviolet Lithography

Zhou Kui, Li Peng*, Wu Dai, Li Ming

Institute of Applied Electronics, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China

Abstract

Significance Extreme ultraviolet (EUV) lithography technology is critical for realizing high-end chip manufacturing at the 7 nm node and below. Currently, EUV lithography machines mainly use laser plasma (LPP) light sources. The maximum EUV power achieved by an LPP light source is approximately 500 W. For nodes smaller than 3 nm, satisfying the power requirements of LPP light sources is difficult. The development of EUV lithography in the future will require more powerful light sources.

A free-electron laser based on energy recovery linacs (ERL-FEL) can achieve a laser output with high repetition frequency, high average power, and high energy efficiency. With the development of FEL and ERL technologies, an ERL-FEL light source can achieve an output power of more than 10 kilowatts at a wavelength of 13.5 nm and is thus a promising high-power EUV lithography light source.

Progress A free-electron laser is a type of radiation laser based on free electrons in vacuum. Compared with those of traditional lasers, the radiation wavelength does not depend on the excited medium but is related only to the electron beam energy and undulator magnetic field. An energy recovery linac accelerates the electron beams in the acceleration phase. After application, the accelerated electron beams return to the main accelerator during the deceleration phase and the power of the high-energy electron beam is converted into the microwave acceleration field power to accelerate the subsequent injected electron beams, which can achieve high-efficiency energy recovery and utilization. The FEL light source based on ERL technology provides a new technical route for the development of high-power EUV lithography.

Since Madey first proposed the concept of free-electron lasers in 1971, at least 50 FEL facilities have been built worldwide, and at least 20 FEL facilities are currently under construction or planned. In 1965, Tigner first proposed the concept of energy-recovery linacs. In recent decades, ERL technology has been regularly applied in different fields, and countries worldwide have conducted research and construction work on ERL facilities. One of the most important applications of ERL is in the generation of high-power FELs.

Global ERL-FEL light sources that have been constructed mainly include the JLab FEL in the United States, Novosibirsk FEL in Russia, ALICE in the United Kingdom, and JAEA FEL and cERL in Japan. In addition, Peking University, the Institute of High Energy Physics of the Chinese Academy of Sciences, the Shanghai Institute of Applied Physics of the Chinese Academy of Sciences, and China Academy of Engineering Physics have conducted physical design and theoretical research studies on ERL-FELs. However, no ERL-FEL facilities have been fully constructed in China.

In 2015, KEK proposed an ERL-FEL plan for EUV lithography light sources based on a cERL, which can generate an EUV laser power greater than 10 kW. Russia, Germany, and Israel have proposed a compact EUV-FEL light source with an output power of approximately 5 kW. The Shanghai Advanced Research Institute of the Chinese Academy of Sciences has also proposed a fully coherent EUV light source plan based on the ERL.

Although ERL-FEL light sources for EUV lithography have significant development potential, many key technical problems must still be solved. To obtain a kilowatt-level EUV-FEL output, the facility must operate in a state of high average current and high beam power for a long period, which places higher requirements on photocathode injectors, superconducting accelerators, and energy recovery technology.

Conclusions and Prospects Traditional LPP technology encounters bottlenecks below the 3 nm node. In the future, the development of EUV lithography will require kilowatt-level high-power light sources. An ERL-FEL light source can achieve an output power above the kilowatt level and is considered to be a highly promising next-generation lithography light source. This study introduces the working principles, development status, and key technical challenges of high-power ERL-FEL light sources.

Key words laser optics; extreme ultraviolet lithography; energy-recovery linacs; free electron laser; photocathode injector; superconducting accelerator