



·自由电子激光和新型光源·

## 基于能量回收技术的光源——ERL 光源\*

黄森林<sup>1,2</sup>, 刘克新<sup>1,2</sup>

(1. 北京大学 物理学院 重离子物理研究所, 北京 100871; 2. 核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871)

**摘 要:** 能量回收技术将使用后的电子束进行能量回收, 用于加速后续束团, 可大大减少加速器消耗的射频功率和有害辐射。基于能量回收技术的光源除节能环保外, 还具有束团短、发射度低的特点, 可有效提高光源的峰值亮度和相干性, 是一种很有潜力的未来先进光源。介绍能量回收直线加速器技术的基本原理、相关关键物理问题和技术以及能量回收直线加速器发展现状, 最后简要介绍几个国际上提出的典型能量回收直线加速器光源方案。

**关键词:** 能量回收; 束流崩溃效应; 强流注入器; 强流超导腔; 能量回收直线加速器光源

中图分类号: TL53

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220076

## Energy recovery linac light source

Huang Senlin<sup>1,2</sup>, Liu Kexin<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Heavy Ion Physics, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China;

2. State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Energy recovery linacs recapture the energy of the used electron beam into the electromagnetic field in RF cavities for subsequent acceleration, which can greatly reduce both the RF power supply required for high current acceleration and harmful radiation from the dumped beam. In addition to a high energy efficiency and reduced radiation from the dump, energy recovery linac light sources have the advantage of providing short-bunch, low-emittance electron beams for emitting high-brightness, highly coherent photons. These characteristics make them a very promising candidate for future advanced light source. This paper presents an introduction to energy recovery linacs, with the emphasis on basic principles and the most important physics and technical problems, as well as the activities in developing energy recovery linac facilities around the world. A brief introduction to some representative schemes of energy recovery linac light source is presented in the end.

**Key words:** energy recovery, beam break-up, high-current injector, high-current SRF cavity, energy recovery linac light source

能量回收直线加速器(energy recovery linac, ERL)让利用过但能量损失较小的电子束团以减速相位返回直线加速器, 将其能量交还给射频腔中的电磁场以加速后续电子束团。ERL 的优点主要体现在: (1) 节能, 运行所需的 RF 功率基本上和束流功率无关, 平均流强不受 RF 功率源限制; (2) 环保, 经能量回收后的电子束能量一般在 10 MeV 以下, 低于产生中子的阈值, 不仅大大减小了垃圾靶(dump)的辐射功率, 也可避免垃圾靶的中子活化; (3) 和储存环相比, 可产生短脉冲的高亮度电子束。

1965 年, M. Tigner 首次提出能量回收概念<sup>[1]</sup>。当时 Tigner 提出了两种可能的能量回收方案, 第一种方案是由同一个功率源驱动两台完全相同的直线加速器, 两路束流最后分别以减速相位注入另一台加速器以实现能量回收, 第二种方案是加速后的束流经返航束线传输, 以合适的相位回到同一台直线加速器并把能量交还给加速场, 后续 ERL 的技术路线主要沿用第二种方案。

1977 年, 加拿大 Chalk River 实验室在其 Reflexotron 装置<sup>[2]</sup>上第一次实现了能量回收。该装置采用常温射频加速器, 电子束被加速后, 通过两组 180°偏转磁铁改变传输方向返回同一加速结构, 通过改变电子束传输距离, 使电

\* 收稿日期: 2022-03-19; 修订日期: 2022-06-19  
联系方式: 黄森林, huangsl@pku.edu.cn.

子束再次通过加速器时处于加速或减速相位,加速时即为多圈加速,减速时即实现了能量回收。处于加速和减速相位时出口电子束的能量分别为 25 MeV 和 5 MeV(能量回收)。

1985 年,麻省理工学院 Bates 直线加速器中心(现为 Bates 研究与工程中心)在其同步再循环系统(Isochronous Recirculation System)上也实现了能量回收并研究了相关技术问题<sup>[3]</sup>。通过改变电子束团传输路径的长度,使返回的电子束所处相位相对加速时改变 180°,将电子束能量从 400 MeV 减少到 23 MeV。

从 1990 年开始,美国 Jefferson 实验室(JLab)开始发展 ERL 技术并取得了重大进展。1998 年,基于射频超导(SRF)和 ERL 技术的红外 FEL 试验装置(IR FEL Demo)成功运行<sup>[4]</sup>,电子束平均流强 5 mA,经能量回收后,电子束能量从 48 MeV 减小到注入时的 10 MeV,所需射频功率比没有能量回收时减小了 8 成。1999 年,该装置成功出光,输出波长为 3.1  $\mu\text{m}$  红外 FEL 的平均功率达到 1.72 kW<sup>[5]</sup>。2003 年,升级后的红外 FEL 装置(IR-upgrade FEL)在 1.6  $\mu\text{m}$  波长实现 14.2 kW 的平均功率输出<sup>[6]</sup>。

此后,ERL 的优势得到普遍认同并广受关注,国际上多个实验室开始建造 ERL 实验装置并提出了多种基于 ERL 技术的大型光源和对撞机方案。本文将首先讨论 ERL 基本原理和关键技术,之后介绍几个典型的 ERL 实验装置和基于 ERL 技术的光源方案。

## 1 ERL 基本原理

### 1.1 ERL 的结构

如图 1 所示,ERL 光源一般由以下几个部分组成:注入器、并束段(merger)、直线加速器、返航束线、出光装置及垃圾靶等。

注入器一般由连续波光阴极电子枪和发射度补偿系统构成,要求能够产生平均流强 10 mA 到上百 mA 的电子束,束团重复频率在几十 MHz 直至 1.3 GHz。注入器是 ERL 最为重要的关键技术之一。

并束段的作用是让来自注入器的低能电子束进入 ERL 环路,与返航束流的轨道重合,因此主要是偏转磁铁的组合。偏转磁铁的色散作用会导致横向和纵向相空间的耦合,进而使横向发射度增加。为消除由于色散引起的发射度增长,一般要求并束段为消色散结构。ERL 实验装置采用的典型消色散并束结构如图 2 所示,其中图 2(a)为 JLab 采用的由三块偏转磁铁组成的对称消色散结构<sup>[8]</sup>,图 2(a)为日本原子能研究所(JAERI,现为 JAEA)采用的由四块偏转磁铁和四极透镜组组成的反对称消色散结构(dogleg 结构)<sup>[9]</sup>。图中红线代表返航束线,蓝线代表注入束线。

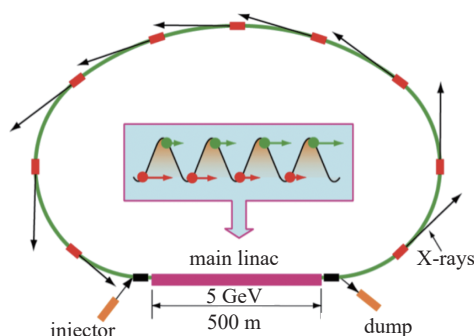


Fig. 1 A sketch of energy recovery linac light source<sup>[7]</sup>

图 1 能量回收光源装置示意图<sup>[7]</sup>

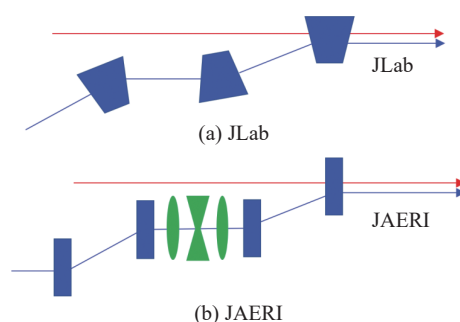


Fig. 2 Typical mergers for energy recovery linac test facility

图 2 能量回收直线加速器实验装置的典型并束结构

ERL 中直线加速器具有双重作用,既加速电子束团,又是能量回收的载体。和速调管类似,当电子束团以减速相位通过加速腔时,将会在加速腔内激励起电磁场,因此后续束团感受的电场是微波(射频)功率源建立的电场和束团激励电场的叠加。能量回收时,当被加速的束团和减速束团之间的时间间隔远小于加速结构的建场时间常数  $\tau_L$  时,减速束团所激励的电磁场将补充被加速束团所带走的射频功率,因此微波功率源所提供的功率足够建场即可,与空载时所需功率基本相当而与束流的电流强度无关。由于射频超导加速器的腔壁损耗远小于常温腔,适合于在连续波(CW)模式下工作<sup>[10]</sup>,因此 ERL 一般采用射频超导加速器,可以在更大程度上节省射频功率。

功率倍增因子  $\kappa$  常被用来描述 ERL 的效率<sup>[11]</sup>,其定义为束流功率  $P_{\text{beam}}$  与加速器(包括注入器)所需射频功率  $P_{\text{RF}}$  之比,即  $\kappa \equiv P_{\text{beam}}/P_{\text{RF}}$ 。 $\kappa$  越大,射频功率的利用效率越高。设能量为  $E_{\text{inj}}$ 、平均流强为  $I_0$  的电子束注入到 ERL 环路中,经加速后能量增加到  $E_t$ ,则倍增因子可以表示为

$$\kappa = \frac{P_{\text{beam}}}{P_{\text{RF}}} \approx \frac{I_b E_f / e}{I_b E_{\text{inj}} / e + P_{\text{RF, linac}}} \quad (1)$$

其中  $P_{\text{RF, linac}}$  是为维持加速器中的电磁场, 补充腔壁热损耗、被加速束流带走的功率与减速束流返回的功率差等所需要的射频功率。由此也可以看出, 采用射频超导加速器可有效提高功率倍增因子。此外, ERL 装置运行在高平均流强和高束流能量时  $\kappa$  更大, 其节能优势更为显著。

返航束线指将直线加速器输出的束流传输至出光(辐射)装置, 之后再产生辐射后的电子束以减速相位传输到并束段的这部分束流输运线, 根据不同设计由偏转磁铁(二极磁铁)、四极磁铁、六极磁铁以及束控束测装置构成, 其中六极铁主要用于调节二阶传输矩阵元  $T_{566}$ 。对小型 ERL 实验装置, 一般设计为跑道形, 直线加速器和出光装置分别位于两直线段上, 直线段之间由两个  $180^\circ$  偏转的弧形(arc)段连接, 弧形段也应是消色散结构。大型 ERL 光源的返航束线则因具体要求和实际条件而异, 有各种设计方案。

出光装置一般为扭摆器、波荡器等, 与同步辐射光源中的插件件或自由电子激光(FEL)的波荡器没有本质上的区别。在完成能量回收过程后, 电子束被减速至注入能量后打到垃圾靶上。由于能量很低, ERL 对垃圾靶的要求大大降低。

## 1.2 ERL 束流传输

ERL 的束流需要同时满足出光要求和能量回收, 因此对传输提出了较高的要求, 这主要表现在以下几个方面。

首先是要能够使高能和低能束流都能注入直线加速器并保持一定的相位差, 这一要求可通过优化设计的并束段和束控技术来实现。

其次是要使高平均流强电子束流无损失地传输并在各个阶段实现其相应功能。以 ERL 实验装置为例, 束流的纵向相空间特性一般为: 注入段电子束具有较低能散, 束团较长; 由于要对电子束团长度进行压缩, 直线加速器的加速相位一般偏离峰值, 因此经过加速器后电子束团具有时间-能量啁啾, 能散会有所增加; 在经过第一个弧形段后对束团进行压缩, 使束团长度最短以满足辐射出光要求; 经过波荡器出光后电子束能散增大, 因此第二个弧形段和直线加速器应压缩能散, 使束团再次变长, 以保证从加速器出口到垃圾靶束流无损失地传输。为使注入束团相位  $\phi_0$  和返航注入相位  $\phi_{\text{re}}$  相差  $180^\circ$ (原则上), ERL 束线对传输参数的要求为:  $R_{56}^{\text{e}} + R_{56} = 0$  和  $T_{566}^{\text{e}} + T_{566} = 0$ , 其中不带 re 的量为从加速器出口到波荡器入口的纵向传输矩阵元, 带 re 的量为从波荡器出口返回到加速器入口的矩阵元。

为满足发光和无损失传输的要求, 还需调节束线的横向聚焦等元件参数以实现束流的横向匹配。由于经过辐射过程后电子束的发射度不可避免地有所增长, 因此在注入段、并束段和 ERL 传输束线中都应尽量抑制发射度的增长。在注入段导致发射度增长的主要因素为空间电荷效应, 即由于横向空间电荷力不均匀造成横向发射度增长, 这种发射度增长可以通过在注入器出口的螺线管透镜和一段合适的漂移距离得到补偿。

相干同步辐射(coherent synchrotron radiation, CSR)效应是在偏转轨道上使束流发射度增长的一种重要机制。和尾场效应相反, CSR 效应是由束团尾部电子发出的同步辐射对束团头部电子的作用产生的, 辐射沿直线传输因此能够追上被偏转的头部电子, 这种作用将导致束团中不同位置处电子能量的不同变化, 从而使其能散增加, 而在色散区的能散增加又会导致束流横向发射度的增长。

CSR 引起的横向发射度增长可以通过束流光学设计予以消除。在 ERL 技术的发展过程中, 研究人员提出了各种消除 CSR 发射度增长的方法, 例如, 日本高能加速器研究机构(KEK)的研究人员提出了一种在消色散单元中匹配束流包络和 CSR 所致色散的补偿方法<sup>[12]</sup>, 即通过设计使 CSR 引发的束团切片相图位移方向和相椭圆的长轴方向一致, 从而尽量减小投影发射度的增长(见图 3)。

## 1.3 束流崩溃效应(BBU)

由于束-腔相互作用, 电子束团会在加速腔内激励起高阶模式的电磁场, 其强度与束团在加速腔中的横向位置偏移正相关。另一方面, 加速腔中的高阶模式电磁场(特别是偶极模)作用于后续束团, 可使束团获得横向动量, 偏离理想轨道。在高重复频率运行模式下, 前一束团激励的高阶模场在束团间隔时间内得不到充分衰减, 对后续的束团产生较大影响, 各束团激发的高阶模场因此会在加速腔内逐渐累积, 使束流的品质不断变差, 甚至引起束

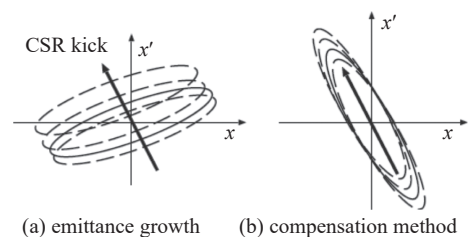


Fig. 3 Schematics of CSR induced emittance growth and compensation method<sup>[12]</sup>

图 3 CSR 引起的发射度增长及补偿方法示意图<sup>[12]</sup>

流崩溃效应(BBU)<sup>[13]</sup>,如图4所示。对ERL,特别是规模不是很大的ERL实验装置,束团第一次激励的高阶模场不仅对后续束团有影响,当其自身返航再次进入加速腔时也可能受到干扰。此外,纵向高阶模场也会通过改变束流能量从而干扰束团序列的方式造成束流损失,但一般情况下小于横向高阶模场所造成的影响。

通常用阈值电流 $I_{th}$ 表示ERL中因BBU效应的限制所能达到的最大束流强度,在此束流强度之上,高阶模场对束团的横向偏移作用使束团无法通过加速器。单个高阶模的横向BBU阈值电流的近似理论公式为<sup>[14-15]</sup>

$$I_{th} = - \frac{2pc}{e \left( \frac{\omega}{c} \right) \left( \frac{R}{Q} \right) Q m_{12}^* \sin(\omega T_r)} \quad (2)$$

$$m_{12}^* = m_{12} \cos^2 \alpha + (m_{14} + m_{32}) \sin \alpha \cos \alpha + m_{34} \sin^2 \alpha \quad (3)$$

式中: $p$ 为电子动量; $R/Q$ , $Q$ 和 $\omega$ 分别为加速腔中该高阶模的分路阻抗、品质因数和圆频率; $T_r$ 为束团返航时间间隔; $\omega T_r$ 即为返航相位; $m_{12}^*$ 则为和返航束线束流传输矩阵有关的参数; $\alpha$ 为高阶模式极化角。

国际上采用粒子追踪或矩阵计算方法发展了多个BBU效应模拟程序,比较典型的有TDBBU<sup>[16]</sup>,ERLBBU<sup>[14]</sup>和BI<sup>[17]</sup>等。JLab的红外FEL升级装置上采用这四个程序分别计算了阈值电流,其结果与实验测量值相比偏差在10%以内<sup>[18]</sup>。

从式(1)可知抑制BBU效应、提高ERL装置阈值电流的主要途径:(1)阈值电流正比于束流动量,这表明低能束流更容易引发束流崩溃效应,因此应将具有比较危险高阶模的加速腔用于高能加速段;(2)阈值电流与高阶模分路阻抗成反比,因此通过优化超导腔腔型设计降低有害高阶模的 $Q$ 值可以有效提高阈值电流;(3)优化束线的束流光学设计,尽量减小 $m_{12}^*$ ,常见的方法有通过螺线管透镜或者斜四极磁铁(skew quadrupole magnets)实现 $x$ 和 $y$ 平面的耦合,从而使 $m_{12} = m_{34} = 0$ <sup>[14]</sup>。

由于目前小型ERL实验装置的设计流强大多在10 mA以内,因此不易出现BBU效应,大型ERL光源则可通过优化设计使阈值电流达到100 mA以上。

## 2 ERL 关键技术

ERL和储存环不同,注入束团经过一次加速、出光和能量回收过程后即被垃圾靶收集,因此注入束流强度即为ERL运行束流强度。为实现ERL光源性能指标和有效实现能量回收,需要高达100 mA的平均流强、小于0.3 mm·mrad的归一化发射度和0.1 ps量级的束团长度,这对于光阴极电子枪是一个很大的挑战。另一方面,为抑制BBU效应,需要对ERL的强流超导腔进行优化设计。

### 2.1 强流注入器

国际上为ERL技术而发展的高平均流强电子枪主要有直流高压(DC)光阴极电子枪、常温射频(RF)光阴极电子枪、射频超导(SRF)光阴极电子枪和直流-超导(DC-SRF)光阴极电子枪。

DC电子枪利用阴极与阳极之间的静电场加速电子。因其没有表面射频损耗,因此不像RF电子枪那样需要复杂的水冷系统,也不像SRF电子枪那样需要低温恒温器,电子枪本身的结构设计较为简单。此外,由于没有射频加热造成表面放气,DC电子枪更易获得超高真空,因此可以采用量子效率高且能产生极化电子的GaAs光阴极。DC电子枪的主要问题是光阴极表面电场较低,电子枪出口束流能量也受直流高压的限制,一般不大于500 keV。因此由其产生的电子束需要尽快增能,这就增加了注入器整体设计的难度。

国际上多个实验室发展了DC电子枪技术,比较典型的有JLab, Cornell大学和JAEA等,国内中国工程物理研究院和中科院高能物理研究所等单位也研发了DC电子枪。JLab和JAEA的DC电子枪均用于ERL实验装置,其中JLab的DC电子枪的流强可达到10 mA以上<sup>[19]</sup>。Cornell大学的DC电子枪研发则是在ERL光源目标的直接驱动下进行的。2017年,Cornell大学DC电子枪创造了光阴极电子枪的最高束流流强记录<sup>[20]</sup>,其直流高压运行在390 kV,采用520 nm激光驱动K<sub>2</sub>CsSb阴极,束团重复频率为1.3 GHz,平均流强达到了65 mA。此外,该电子枪在100 pC

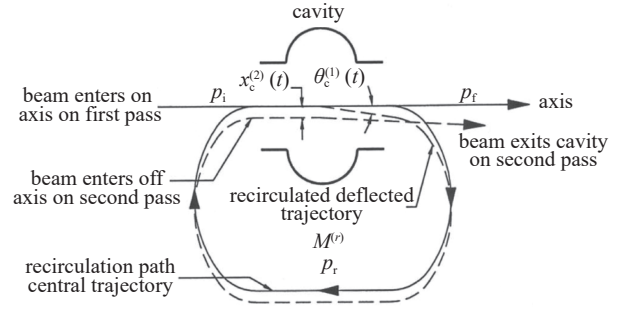


Fig. 4 Schematic diagram of BBU effect<sup>[13]</sup>

图4 BBU效应示意图<sup>[13]</sup>

束团电荷量下的归一化均方根发射度可达到  $0.3 \text{ mm}\cdot\text{mrad}^{[21]}$ 。

连续波 RF 电子枪主要工作在甚高频(VHF)波段,采用常温射频腔加速电子,可具有最高的光阴极表面电场,有利于减小束流发射度。但由于常温射频腔在连续波模式下腔耗很大,因此需要设计复杂的冷却结构。此外,RF 电子枪因腔壁放气导致真空度难以满足 GaAs 或  $\text{K}_2\text{CsSb}$  阴极的要求,多采用由紫外(266 nm 左右)激光驱动的碲化铯( $\text{Cs}_2\text{Te}$ )阴极,实现高平均流强运行对光阴极驱动激光系统也是一个极大的挑战。

国际上研发连续波 RF 电子枪的实验室主要有美国 Lawrence Berkley 国家实验室(LBNL)、德国电子同步加速器研究所(DESY)等,国内中科院上海应用物理研究所/高等研究院与清华大学也正在合作开展 VHF 电子枪的研发<sup>[22]</sup>。LBNL 实验室的 VHF 电子枪 APEX 为这类电子枪的典型代表<sup>[23]</sup>,其工作频率为 186 MHz,束团重复频率可达到 1 MHz,最高平均流强可达到  $300 \mu\text{A}$ ,在  $20 \text{ pC}$  束团电荷量下 95% 束团发射度仅为  $0.2 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ 。从目前实现的指标看,连续波 RF 电子枪的平均流强还没有达到 mA 量级,距离 ERL 光源的要求还有很大差距,但可用于连续波 X 射线自由电子激光,SLAC 国家加速器实验室的 LCLS-II 和中科院上海高研院的 X 射线自由电子激光装置(SHINE)均将 VHF 电子枪作为首选。

SRF 电子枪采用射频超导腔加速电子,大大降低了腔壁上的功率损耗,可以在 CW 模式下运行,光阴极表面电场也比较高,可以达到 mA 级平均流强。超导腔运行在低温环境,可以为光阴极提供高真空。SRF 电子枪的主要问题是光阴极和超导腔的交叉污染以及射频场泄漏等问题,长时间运行后会使得超导腔性能下降,此外,非超导的半导体光阴极产生的焦耳热也应及时导出,以免影响超导腔。

国际上多个实验室开展了 SRF 电子枪的研发,比较典型的有德国德累斯顿-罗森道夫亥姆霍兹研究中心(HZDR)、柏林亥姆霍兹中心(HZB)、DESY、美国布鲁克海文国家实验室(BNL)和日本 KEK。最近,BNL 的  $1/4$  波长谐振腔(QWR)型 SRF 电子枪获得了 nC 量级电荷量的束团<sup>[24]</sup>,在电荷量为  $0.5 \text{ nC}$  时束流发射度为  $0.32 \mu\text{m}$ ,但束团较长(100 ps 级)且重复频率还不够高。该电子枪的超导腔频率为 113 MHz,工作低温为 4 K。

北京大学采用 DC-SRF 技术路线发展射频超导电子枪。DC-SRF 电子枪由类似于皮尔斯电极的 DC 部分和带有半腔结构的超导腔组合而成,其间由一节细短束管连接。该电子枪将光阴极从超导腔中移出,有效地解决了半导体阴极与超导腔的兼容问题,同时短孔道也对暗电流有较强的抑制作用。虽然光阴极表面场仍然受到直流高压的限制,但引出电子经过很短距离后就进入超导腔加速,空间电荷效应引起的发射度增长依然可控。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<sup>[25]</sup>,最近采用 1.5-cell 超导腔的第二代 DC-SRF 电子枪<sup>[26]</sup>研制成功并完成了测试运行,通过驱动激光整形、注入器结构优化、发射度补偿等多种途径结合的方式有效降低了引出电子束的归一化发射度。测试运行阶段最大束团电荷量达到  $250 \text{ pC}$ ,在束团电荷量为  $20 \text{ pC}$ 、重复频率为 1 MHz 的运行模式下归一化发射度达到  $0.5 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ 。第二代 DC-SRF 电子枪采用  $\text{K}_2\text{CsSb}$  光阴极,由绿光频段的激光(波长 519 nm)驱动,有望实现  $5\sim 10 \text{ mA}$  平均流强的运行。

## 2.2 强流超导腔

不同于同步辐射光源装置所采用的单 cell 强流超导加速腔,ERL 的超导腔需选用多 cell 结构,以减小超导直线加速器的建造和运行成本。同时,为有效地导出高阶模场,ERL 超导腔的 cell 数目又不宜过多,一般为 5 个或 7 个,也有个别实验室发展了 9-cell 强流超导腔。

应用于 ERL 的强流超导腔应考虑以下几个方面的要求:(1) 高阶模应有较强的衰减,即高阶模的品质因数应比较小;(2) 基模(加速模式)具有较低的  $E_{\text{pk}}/E_{\text{acc}}$  和  $B_{\text{pk}}/B_{\text{acc}}$  以及较高的  $R/Q$  和几何因子( $G$ );(3) 不应有陷于腔中的所谓 trapped 模式;(4) 超导腔的机械性能要好,即洛伦兹失谐因子较低,真空状态下腔表面应力较小。

Cornell 大学在发展其 100 mA, 1.3 GHz 强流超导腔的过程中提出了一组经验公式<sup>[27]</sup>,共振频率 2 倍频谐波附近 ( $2N \times 1.3 \text{ GHz}$ ) 的单极模应满足

$$\frac{R}{Q} Q_e < 2500 \Omega \quad (4)$$

偶极模应满足

$$\frac{R}{Q} \frac{Q_e}{f} < 1.4 \times 10^5 \frac{\Omega}{\text{cm}^2 \cdot \text{GHz}} \quad (5)$$

四极模应满足

$$\frac{R Q_c}{Q f} < 4 \times 10^6 \frac{\Omega}{\text{cm}^4 \cdot \text{GHz}} \quad (6)$$

国际上美国 Cornell 大学、BNL、JLab 和日本 KEK 等研究机构都设计研发了各种强流超导腔, 国内北京大学也曾为美国 Argonne 国家实验室(ANL)设计研发了一只 1.3 GHz 5-cell 超导腔<sup>[28]</sup>。这类超导腔的共同特点为具有较大的内径和较粗的束管, 以利于高阶模的导出。

### 3 ERL 实验装置

在国际上开展 ERL 实验研究的单位中, 美国 JLab 无疑是最为成功的一个, 该实验室在不同装置上实现了电子束能量回收并开展了大量基础性的研究工作。基于 ERL 的红外 FEL 试验装置(IR FEL Demo)于 1998 年成功运行, 注入能量为 10 MeV, 经主加速器后电子束能量增大到 48 MeV, 平均流强达到 5 mA, 到 2001 年该装置输出的连续波红外 FEL 的平均功率达到了 2 kW。

IR FEL Demo 运行成功后, JLab 对其进行了升级(图 5)<sup>[29]</sup>, 主加速器部分增加两个超导加速模组(cryomodule), 使束流能量增加到 145 MeV, 注入束流的平均流强可以达到 10 mA。由于 BBU 效应限制, 升级后的装置(IR-upgrade FEL)运行在能量回收状态时的流强为 7.5 mA, 束流功率约 1.1 MW。该装置输出的 6 μm 连续波 FEL 平均功率达到 10 kW, 1.6 μm FEL 的平均功率更是达到了 14.2 kW<sup>[30]</sup>。利用 IR-upgrade FEL 产生的高平均功率激光, JLab 开展了应用研究。但令人遗憾的是, 由于各种原因, 该装置于 2012 年以后基本上停止了日常运行, 仅有少量机时开展一些实验研究<sup>[31]</sup>。

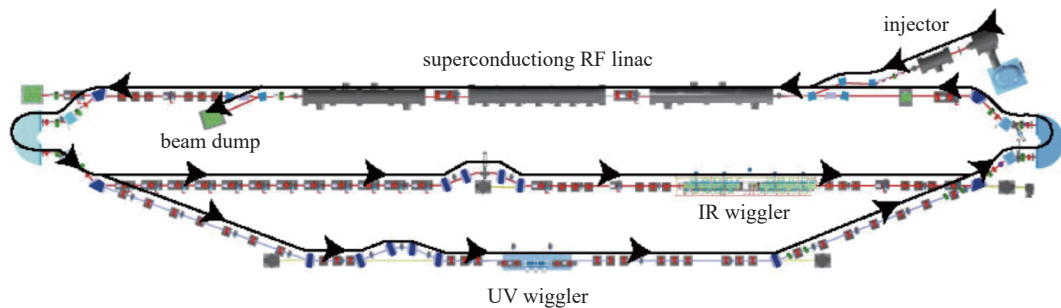


Fig. 5 Schematic layout of JLab ERL facility<sup>[29]</sup>

图 5 JLab ERL 装置示意图<sup>[29]</sup>

2003 年, JLab 还在其连续电子束加速器装置(CEBAF)上实现了国际上唯一的高能束流 ERL 验证实验<sup>[32]</sup>。实验中电子束注入能量为 56 MeV, 在主加速器中被加速到 1056 MeV 并成功回收, 流强为 80 μA。CEBAF 的注入能量后来又降至 20 MeV, 使返航能量与注入能量之比达到约 50:1, 这是所有验证装置所达到的最大能量比。

除 JLab 外, 较早开展 ERL 验证实验研究的还有日本 JAERI 的 ERL-FEL<sup>[33]</sup> 等装置。ERL-FEL 注入能量为 2.5 MeV, 经主加速器加速后能量达到 17 MeV。受制冷系统功率的限制, 该装置运行在宏脉冲模式下, 脉冲长度为 1 ms, 重复频率为 10 Hz, 宏脉冲内平均流强为 5 mA。

近期国际上正在运行的 ERL 实验装置有俄罗斯 Budker 核物理研究所(BINP)的 Novosibirsk ERL、日本 KEK 的 cERL、德国 Darmstadt 技术大学的 S-DALINAC ERL 和美国 Cornell 大学的 CBETA。其中, Novosibirsk ERL 采用常温射频加速器, 其它三个均采用射频超导加速器。cERL 注入器采用 DC 电子枪, 注入能量设计值为 5 MeV, 经 1.3 GHz 主加速器加速后电子束能量为 35 MeV。经调试, cERL 于 2015 年实现了 1 mA 平均流强的连续波运行和能量回收<sup>[34]</sup>。2016 后, cERL 相关研究由大型光源驱动变为工业应用驱动, 并向更高平均流强的方向努力<sup>[35]</sup>。CBETA 是由 BNL 和 Cornell 大学最近合作建设的一台 4 圈加速的 ERL 实验装置, 经 4 圈加速后电子束能量可达 150 MeV, 其束流调试已初步成功<sup>[36]</sup>。S-DALINAC ERL 是在 3.0 GHz 超导直线加速器 S-DALINAC 的基础上升级而成, 近期也已成功实现电子束流的能量回收<sup>[37]</sup>。Novosibirsk ERL 作为国际上唯一一台非超导 ERL, 也是第一台多圈 ERL, 采用 300 kV DC 电子枪和 180 MHz 常温 RF 加速器, 经 4 圈加速后电子束能量为 11 MeV, 平均流强可达数十 mA。Novosibirsk ERL 作为用户装置已经运行超过 17 年, 可产生平均功率达 0.5 kW、峰值功率达 1 kW 的 THz 辐射<sup>[38]</sup>。

正在建造的 ERL 实验装置主要有德国 HZB 的 bERLinPro, Mainz 大学的 MESA 和位于法国 Orsay 的 PERLE。其中 PERLE 规模较大, 注入器能量为 7 MeV, 两台 80 MeV 801 MHz 超导直线加速器相对放置, 经 3 圈加速后电子束最高能量可达 500 MeV, 设计平均流强为 20 mA, 束团电荷量 500 pC<sup>[39]</sup>。

国内北京大学<sup>[40-42]</sup>、中科院高能物理研究所<sup>[43]</sup>、上海应用物理研究所<sup>[44]</sup>、中国工程物理研究院<sup>[45]</sup>等单位也开展了 ERL 实验装置的设计及相关研究工作,目前尚无建成的 ERL 装置。

#### 4 ERL 光源方案

ERL 装置中,电子束团单次通过返航输运线(多圈加速需要不同的返航束线),其时间结构可以很方便地加以调控。返航输运线中束团长度可以压缩到 100 fs 量级,束流品质也不似储存环那样受到辐射平衡的限制,而主要由注入束流决定,其水平( $x$ )方向发射度相比第三代同步辐射光源可减小两个量级。总体而言,ERL 光源的谱亮度(spectral brightness)可以提高 2-3 个量级,相干因子(coherent fraction)和相干通量(coherent flux)因子也可有大幅度提高。

在 ERL 技术的发展过程中,国际上曾提出了多个大型 ERL 光源方案,这里简要介绍两个比较有代表性的方案,即美国 Cornell 大学提出的 Cornell ERL 光源和英国 Daresbury 实验室提出的第四代光源(4GLS)。

Cornell ERL 光源方案提出较早<sup>[46]</sup>,也经历了较长时间的发展,其最终确定的设计能量为 5 GeV,可在四种模式下工作<sup>[47]</sup>。其中,在高通量模式下,电子束平均流强为 100 mA,束团电荷量为 77 pC,重复频率为 1.3 GHz,横向发射度( $\epsilon_x/\epsilon_y$ )为 30 pm·rad, RMS 长度为 2 ps,光子通量可达  $10^{16}$  以上,相干因子为 6.6%,谱亮度为  $8.9 \times 10^{22}$  光子·s<sup>-1</sup>·mm<sup>-2</sup>·mrad<sup>-2</sup>·(0.1%bw)<sup>-1</sup>。在高相干模式下,横向发射度( $\epsilon_x/\epsilon_y$ )为 8 pm·rad,相干因子提高到 24%,相应的束团电荷量减小到 19 pC,平均流强减小到 25 mA,光子通量也减小一个量级,但相干通量仅小幅降低,为  $4.8 \times 10^{14}$  光子·s<sup>-1</sup>·(0.1%bw)<sup>-1</sup>。另两种模式为低电荷量高重频和高电荷量低重频的短脉冲模式,束团长度均为 100 ps,电荷量分别为 77 pC 和 1 nC,重复频率分别为 1.3 GHz 和 0.1 MHz。

4GLS 的设计方案是一个综合型中等规模光源,包括 IR-FEL, XUV-FEL 和同步辐射<sup>[48]</sup>。该方案有两台注入器,一台高平均流强注入器为 600 MeV 超导主加速器注入束流,另一台脉冲时间结构可调的注入器专为一个 50 MeV 超导加速器提供束流以产生红外 FEL。4GLS 的返航束线有两条,一条包含多个插入件以产生同步辐射,另一条则包含较长波荡器以产生 XUV SASE FEL。4GLS 高平均流强设计指标也为 100 mA,束团电荷量 77 pC,长度 0.1~1 ps。由于能量较低,横向归一化发射度的设计值降低到 2.0 mm·mrad。

近年来,直线加速器 X 射线 FEL 的建设和应用取得了长足的进展,针对前沿研究对 X 射线 FEL 性能的更高要求,研究人员正在不断探索新的 FEL 方案。采用振荡器结构的 X 射线 FEL——X 射线 FEL 振荡器(XFELO)能产生高度稳定且具有高平均亮度及超高谱纯度的 X 射线束,可提供与高增益 X 射线 FEL 互补的独特科学研究手段<sup>[49]</sup>。一项深入的研究工作表明,利用 ERL 可能产生的低峰值流强、超低发射度电子束团,有望实现硬 X 射线 FEL 振荡器<sup>[50]</sup>。

此外,基于 ERL 的极紫外(EUV)光源近年来也是研究人员的关注点。中科院上海高研院最近提出了基于 ERL 和角色散微群聚技术的全相干 EUV 光源方案<sup>[51]</sup>,模拟研究表明该方案有望产生平均亮度(谱亮度)超过  $10^{25}$  光子·s<sup>-1</sup>·mm<sup>-2</sup>·mrad<sup>-2</sup>·(0.1%bw)<sup>-1</sup>、平均功率约 100 W 的 13.5 nm 相干辐射。

#### 5 结 论

ERL 技术因其节能环保和短脉冲束团的特色而受到了国际上加速器领域的广泛关注,ERL 原理已经在众多实验装置或小型光源中得以验证,相关物理问题得到深入研究,强流注入器和强流超导腔等关键技术也有了长足发展,提出了多个基于 ERL 技术的大型光源方案。虽然目前国际上尚无大型 ERL 光源开始建造,但 ERL 光源仍不失为一种很有潜力的未来先进光源。

#### 参考文献:

- [1] Tigner M. A possible apparatus for electron clashing-beam experiments[J]. *Il Nuovo Cimento* (1955-1965), 1965, 37(3): 1228-1231.
- [2] 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.
- [3] Flanz J B, Sargent C P. Operation of an isochronous beam recirculation system[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1985, 241(2/3): 325-333.
- [4] Benson S, Biallas G, Bohn C, et al. First lasing of the Jefferson Lab IR Demo FEL[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1999, 429(1/3): 27-32.
- [5] Neil G R, Bohn C L, Benson S V, et al. Sustained kilowatt lasing in a free-electron laser with same-cell energy recovery[J]. *Physical Review Letters*, 2000,

- 84(4): 662-665.
- [6] Behre C, Benson S, Biallas G, et al. First lasing of the IR upgrade FEL at Jefferson lab[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2004, 528(1/2): 19-22.
- [7] Bilderback D H, Elleaume P, Weckert E. Review of third and next generation synchrotron light sources[J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2005, 38(9): S773-S797.
- [8] Douglas D, Technical Note 96-050, Jefferson Laboratory (1996).
- [9] Shizuma T, Hajima R, Minehara E J, et al. Injector design for the JAERI-FEL energy-recovery transport[C]//Proceedings of the 7th European Particle Accelerator Conference. 2000: 1074-1076.
- [10] 刘克新, 郝建奎, 全胜文, 等. 射频超导技术[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 104014. (Liu Kexin, Hao Jiankui, Quan Shengwen, et al. Superconducting radio-frequency technology[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 104014)
- [11] 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.
- [12] Hajima R. Emittance compensation in a return arc of an energy-recovery linac[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2004, 528(1/2): 335-339.
- [13] Sereno N S R. Experimental studies of multipass beam breakup and energy recovery using the CEBAF injector LINAC[D]. Urbana: University of Illinois, 1994.
- [14] Pozdeyev E. Regenerative multipass beam breakup in two dimensions[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2005, 8: 054401.
- [15] Padamsee H, Knobloch J, Hays T. RF Superconductivity for accelerators[M]. New York: John Wiley & Sons, 1998.
- [16] Yunn B C. Expressions for the threshold current of multipass beam breakup in recirculating linacs from single cavity models[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2005, 8: 104401.
- [17] Bazarov I V, Hoffstaetter G H. Multi-pass beam-breakup: theory and calculation[C]//Proceedings of EPAC 2004. 2004: 2197-2199.
- [18] Tennant C D. Studies of energy recovery linacs at Jefferson laboratory: 1 GeV demonstration of energy recovery at CEBAF and studies of the multibunch, multipass beam breakup instability in the 10 kW FEL upgrade driver[D]. College of William & Mary - Arts & Sciences, 2006.
- [19] Adderley P A, Clark J, Grames J, et al. Load-locked dc high voltage GaAs photogun with an inverted-geometry ceramic insulator[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2010, 13: 010101.
- [20] Dunham B, Barley J, Bartnik A, et al. Record high-average current from a high-brightness photoinjector[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102: 034105.
- [21] Gulliford C, Bartnik A, Bazarov I, et al. Demonstration of cathode emittance dominated high bunch charge beams in a DC gun-based photoinjector[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106: 094101.
- [22] Zheng Lianmin, Li Zizheng, Du Yingchao, et al. Design of a 217 MHz VHF gun at Tsinghua University[C]//Proceedings of the 10th International Particle Accelerator Conference. 2019: 2050-2053.
- [23] Sannibale F, Filippetto D, Qian H, et al. High-brightness beam tests of the very high frequency gun at the Advanced Photo-injector EXperiment test facility at the Lawrence Berkeley National Laboratory[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2019, 90: 033304.
- [24] Petrushina I, Litvinenko V N, Jing Y, et al. High-brightness continuous-wave electron beams from superconducting radio-frequency photoemission gun[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 124: 244801.
- [25] Quan Shengwen, Hao Jiankui, Lin Lin, 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.
- [26] Zhao Sheng, Huang Senlin, Lin Lin, 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.
- [27] Liepe M. Conceptual layout of the cavity string of the Cornell ERL main linac cryomodule[C]//Proceedings of the 11th Workshop on RF Superconductivity. 2003: 115-119.
- [28] Li Yongming, Zhu Feng, Quan Shengwen, et al. The design of a five-cell high-current superconducting cavity[J]. *Chinese Physics C*, 2012, 36(1): 74-79.
- [29] Douglas D, Benson S V, Krafft G A, et al. Driver accelerator design for the 10kW upgrade for the JLAB IR FEL[C]//Proc of LINAC. 2001: 867-870.
- [30] Merminga L, Laboratory J. Energy recovery linacs[C]//Proceedings of 2007 IEEE Particle Accelerator Conference. 2007: 22-26.
- [31] Tennant C, Benson S, Boyce J, et al. LERF – New life for the Jefferson laboratory FEL[C]//Proceedings of the 59th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linacs. 2017: 45-48.
- [32] Merminga L, Beard K, Cardman L, et al. ELIC: an electron-light ion collider based at CEBAF[C]//Proceedings of EPAC 2002. 2002: 203-205.
- [33] Nishimori N, Hajima R, Iijima H, et al. FEL oscillation with a high extraction efficiency at JAEA ERL FEL[C]//Proceedings of the 28th International Free Electron Laser Conference. 2006: 265-272.
- [34] Sakanaka S, Adachi M, Adachi S, et al. Recent progress and operational status of the compact ERL at KEK[C]//Proceedings of the 6th International Particle Accelerator Conference. 2015: 1359-1362.
- [35] Morikawa Y, Haga K, Hagiwara M, et al. New industrial application beamline for the cERL in KEK[C]//Proceedings of the 10th International Particle Accelerator Conference. 2019: 3475-3477.
- [36] Gulliford C, Banerjee N, Bartnik A, et al. CBETA beam commissioning results[C]//Proceedings of the 10th International Particle Accelerator Conference.



- 2019: 748-750.
- [37] Arnold M, Birkhan J, Pforr J, et al. First operation of the superconducting Darmstadt linear electron accelerator as an energy recovery linac[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2020, 23: 020101.
- [38] Vinokurov N A. Status of Novosibirsk ERL[C]//Proceedings of the 63th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linacs. 2019: 5-7.
- [39] Kaabi W, Chaikovska I, Stocchi A, et al. PERLE: a high power energy recovery facility[C]//Proceedings of the 10th International Particle Accelerator Conference. 2019: 1396-1399.
- [40] Wang Guimei, Chao Y C, Liu Chuyu, et al. Energy recovery transport design for PKU FEL[C]//Proceedings of 2007 IEEE Particle Accelerator Conference. 2007: 1191-1193.
- [41] Huang S L, Liu K X, Quan S W, et al. Optics layout for the ERL test facility at Peking University[C]//Proceedings of ERL 2011. 2011: 49-51.
- [42] Chen Si, Huang Senlin, Li Yongming, et al. Multi-pass, multi-bunch beam breakup for 9-cell Tesla cavities in the ERL[J]. *Chinese Physics C*, 2013, 37: 087001.
- [43] Cui Xiaohao, Wang Jiuqing, Wang Shuhong, et al. Lattice design and beam dynamics of ERL-TF in IHEP, Beijing[C]//Proceedings of ERL 2011. 2011: 127-129.
- [44] Dai Jinhua, Deng Haixiao, Dai Zhimin. Design of Shanghai high power THz-FEL source[C]//Proceedings of FEL 2011. 2011: 271-273.
- [45] Li P, Wu D, Li M, et al. First lasing at the CAEP THz FEL facility[C]//Proceedings of 39th Free Electron Laser Conference. 2019: 11-14.
- [46] Gruner S M, Bilderback D, Bazarov I, et al. Energy recovery linacs as synchrotron radiation sources (invited)[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2002, 73(2): 1402-1406.
- [47] Bilderback D H, Brock J D, Dale D S, et al. Energy recovery linac (ERL) coherent hard X-ray sources[J]. *New Journal of Physics*, 2010, 12: 035011.
- [48] Flavell W R, Quinn F M, Clarke J A, et al. 4GLS – the UK’s fourth generation light source[C]//Proceedings of SPIE 5917, Fourth Generation X-Ray Sources and Optics III. 2005: 59170C.
- [49] 金光齐, 黄志戎, 瑞安·林德伯格. 同步辐射与自由电子激光——相干X射线产生原理[M]. 黄森林, 刘克新, 译. 北京: 北京大学出版社, 2018. (Kim K J, Huang Zhirong, Lindberg R. Synchrotron radiation and free-electron lasers: principles of coherent X-ray generation[M]. Huang Senlin, Liu Kexin, trans. Beijing: Peking University Press, 2018)
- [50] Kim K J, Shvyd’ko Y, Reiche S. A proposal for an X-ray free-electron laser oscillator with an energy-recovery linac[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100: 244802.
- [51] Zhao Z T, Wang Z, Feng C, et al. Energy recovery linac based fully coherent light source[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 23875.