

射频超导技术与 ERL 技术新进展

郝建奎¹⁾ 赵夔

(核物理与核技术国家重点实验室, 北京大学重离子物理研究所 北京 100871)

摘要 射频超导谐振腔可以工作在连续波或长宏脉冲模式. 射频超导技术已发展为加速各种带电粒子束的重要手段. 射频超导技术发展的前期受材料性能、腔的处理以及加工安装水平等的限制. 经过几十年的不断改进, 射频超导技术获得了重大突破. 射频超导腔应用到超导加速器上并成功运行, 积累了腔的质量控制工艺和工业化制备的大量经验. 近期国际上面对未来大科学装置项目, 在射频超导技术方面进行了大量的研发工作, 主要包括提高超导腔加速梯度的新腔型研究和采用新型材料(大晶粒铌材)超导腔的研究. 能量回收直线加速器(ERL)技术是近年来获得发展的重要加速器技术. ERL具有高效、节能、稳定性好、低辐射水平等优势, 被越来越多地应用到先进光源和自由电子激光装置中.

关键词 射频超导 能量回收直线加速器 加速梯度

1 射频超导与 ERL 的优势

射频超导谐振腔最大的优越之处在于它可以工作在连续波(CW)模式或长宏脉冲模式下, 提供高的加速梯度^[1]. 超导腔的表面电阻比铜腔的小5个量级, 其品质因数 Q_0 一般大于 10^9 , 采用高纯材料制成的射频超导腔, 由于其剩余电阻很小, 在2K以下超低环境中 Q_0 能够超过 10^{10} . 即使计入液氮制冷系统消耗的功率, 同样规模的超导腔的总功耗也只有铜腔的几分之一. RF加速结构会影响束的品质, 如能散度、发射度、束晕、最大流强等等. 要得到好的束流品质, 对加速器提出了非常高的要求. 超导腔高的加速梯度能减少腔的数目, 缩短了CW加速器的长度. 由于超导腔壁损耗极小, 腔形易优化, 超导腔束孔大, 减弱了束腔相互作用.

由于射频超导的优异性能, 超导加速器越来越广泛地成为大科学工程的加速结构, 为加速器技术在新前沿领域的发展提供了支撑点. 超导加速器技术成熟, 走向大规模工业化制造. 全世界用于电子加速器的超导腔总长度已超过了1000m, 加速电压超过5GV. 目前最大的超导加速器CEBAF, LEP-II运行多年, 状态良好. 从低 β 至高 β , 已建造了并正在建造一批基于超导加速器的前沿科学装置, 包括采用射频超导技术的对撞机, 采用射频超导技术提升光源性能的储存环, 强流质子直线加速器, 自由电子激光装置等等. 采用的射频超导腔有纯铌超导腔、铜铌溅射/复合超导

腔等.

2004年全世界科学家达成共识, 将在全球建立一台TeV能量的国际直线对撞机(ILC), 由于超导腔的巨大优势, 该装置将采用射频超导加速结构.

超导加速器在FEL领域取得了里程碑的成果. 推动了FEL的发展. 2004年7月30日, 美国JLab获得10kW高平均功率FEL输出^[2]. 德国DESY的TTF/FLASH自由电子激光向短波长FEL迈进, 目前已经实现了波长13nm的自由电子激光输出^[3].

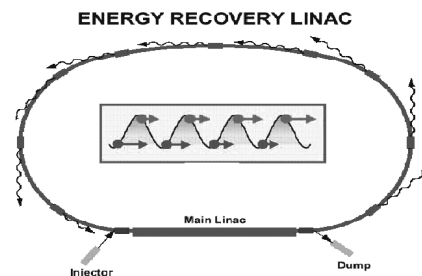


图1 ERL原理图

未来光源要求高品质电子束具有低的电子束发射度、高亮度、高相干性和超短时间结构. 光阴极电子枪加上超导直线加速器可以提供高品质电子束. 而高光子通量需要高流强电子束, 仅仅是使用直线加速器需要非常大的电力资源. 能量回收直线加速器(ERL)技术解决了上述问题. 图1是ERL的原理图, 与波荡器作用产生自由电子激光输出后, 电子束返航注入主

2008-01-07 收稿

1) E-mail: jkhao@pku.edu.cn

加速器, 在减速相位把电子束的动能转换为微波能量, 用于加速新的电子束. ERL 可使自由电子激光的能量转换效率有几倍到几十倍的提高, 并使辐射防护和微波功率源的投资大幅度地降低. 因此, 采用 ERL 技术, 不仅可以大幅降低高频系统的造价和主耦合器的功率负担, 提高效益/投资比, 还具有高效、节能、稳定性好、低辐射水平的特点. 由于 ERL 技术的优势, 采用 ERL 技术已成为新光源发展的一个趋势.

2 射频超导最新进展

目前射频超导领域研究的前沿热点仍然是如何提高加速腔的加速梯度, 同时对新型超导材料的研究逐渐展开. 下面将对此进行简介.

2.1 提高射频超导腔加速梯度的研究

射频超导谐振腔的发展主线是提高超导腔的加速梯度. 自 20 世纪 70 年代起, 超导加速器研制的关键是改进超导腔的性能, 经过几十年的努力, 先后解决了提高超导腔性能的一系列问题.

通过腔形的优化, 消除了二次电子发射效应 (Multipacting), 通过提高铌材热导, 克服热崩溃, 进一步提高加速梯度.

超导腔表面处理是保证超导腔性能的关键技术. 超导腔表面处理技术主要包括化学抛光 (BCP)、电抛光 (EP)、高压水冲洗 (HPR)、超净安装、高功率锻炼 (HPP) 等, 近年干式处理方法得到了发展. 通过这些表面处理, 去除了超导腔表面的杂质和小颗粒, 提高场致发射的阈值, 使得超导腔的加速梯度和 Q 值有很大提高, 1999 年已经超过了 25 MV/m. 到 2003 年, 多只 9-cell 超导腔的加速梯度已经达到 35 MV/m 以上^[4], 最高达到了 40 MV/m.

由于超导腔表面清洗技术的不断提高, 场致发射的影响已经能够克服, 目前限制超导腔梯度进一步提高的主要因素是超导材料的临界磁场. 为此各实验室对此进行了研究, 优化设计新的腔型, 减小峰值磁场和加速梯度的比值 H_{pk}/E_{acc} , 来提高超导腔的加速梯度. 新的腔型主要有两种: 低损耗 (low loss, LL) 型和重入 (reentrant, RE) 型. 表 1 给出了 TTF 超导腔、RE 超导腔和 LL 超导腔的参数对比. RE 和 LL 腔型的 H_{pk}/E_{acc} 均比 TTF 腔型的低, 因而最高加速梯度可以比 TTF 腔型提高 10% 左右. 而两种腔型的 $(R/Q)*G$ 均比 TTF 腔型的高, 有助于减小射频功率损耗. 康奈尔大学、Jlab、KEK 通过单 cell 超导腔对新的腔型进行了性能研究. 2004 年, 康奈尔大学的 1.3 GHz 单 cell RE 超导腔加速梯度达到 46 MV/m^[5]. 2006 年, KEK 研制的 1.3 GHz LL 和 RE 超导腔, 加速梯度分别达到了 47.3 MV/m 和 52.3 MV/m, 如图 2 所示. 2007 年, 康

奈尔大学采用残余电阻比 (RRR) 600 的高纯铌研制的 1.3 GHz RE 超导腔, 加速梯度达到了 59 MV/m, 如图 3 所示, 为目前的世界记录. 采用新腔型的多 cell 超导腔效果还不很理想, 日本 KEK 为 ILC 研制的 LL 型 9-cell 超导腔, 平均加速梯度在 22 MV/m 左右, 要达到 51 MV/m 的设计目标, 还需进一步的改进和研究.

表 1 TTF, RE 和 LL 腔型参数对比

腔型	TTF	RE	LL
$B_{pk}/E_{acc}/(mT/(MV/m))$	4.15	3.78	3.61
$(R/Q)*G/\Omega^2$	30840	33762	37970
E_{pk}/E_{acc}	1.98	2.4	2.36
耦合 kcc/(%)	1.9	2.38	1.52
束孔直径/mm	70	70	60

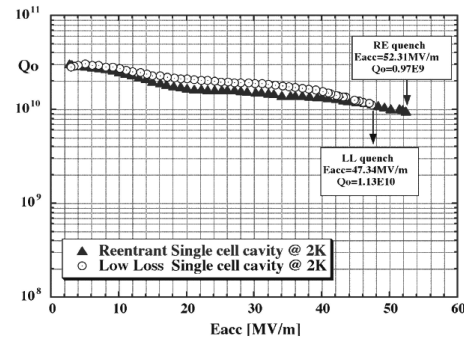


图 2 KEK 研制的 RE 和 LL 超导腔测试结果

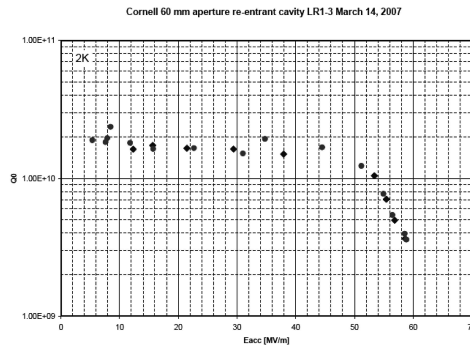


图 3 康奈尔研制的 RE 超导腔测试结果

2.2 大晶粒铌材超导腔性能研究

在努力提高超导腔加速梯度的同时, 人们对超导材料的改进在不断进行. 近两年, 各国射频超导专家对采用大晶粒铌材的超导腔进行了性能研究, 取得了一定进展.

用于制备射频超导腔的大晶粒铌材高纯铌板由几个大的晶粒组成, 每个晶粒都是一个单晶. 同时铌材的晶界少, 而晶界是杂质和缺陷较为集中之处, 因此大晶粒铌材可以减少杂质和缺陷, 有助于提高超导腔的性能. 与普通铌材相比, 大晶粒铌材的冶炼过程得到简化, 只需通过电子束熔炼, 就可以从铌锭上切出大晶粒铌板, 检测合格后即可用于超导腔的研制.

Jlab, DESY, KEK, 北京大学等对大晶粒超导腔进行了性能研究. 图 4 是 Jlab 采用巴西 CBMM、德国

海拉斯、我国宁夏东方钨业的大晶粒铌材研制的超导腔测量结果, 超导腔经过化学抛光和热处理, 其临界磁场都在 140—160mT. 德国 DESY 研制了 3 只大晶粒 9-cell TESLA 超导腔, 其中两只在经过化学抛光和热处理后, 加速梯度达到 27MV/m 以上^[6]. 北京大学采用宁夏铌材研制成功 1.3GHz 单 cell TESLA 型超导腔, 与 Jlab 联合进行了性能测试, 经过化学抛光、1250°C 高温热处理和 120°C 低温热处理后, 临界磁场达到 185mT, 最高场时 Q_0 在 10^{10} 以上, 对应的加速梯度达到 43.5MV/m, 如图 5 所示, 已经非常接近 TESLA 腔型的极限.

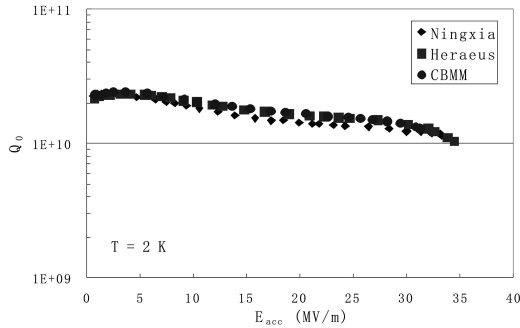


图 4 Jlab 采用不同大晶粒铌材超导腔测试结果

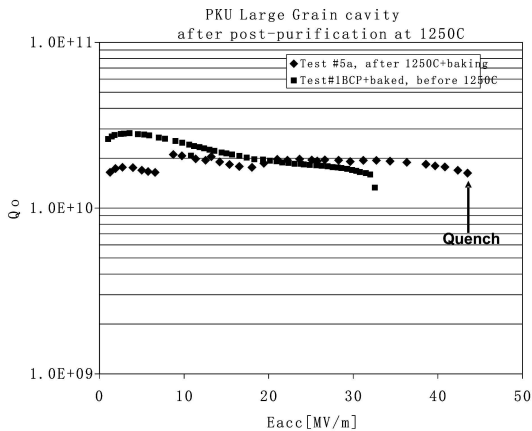


图 5 北京大学研制的 1.3GHz 大晶粒超导腔测试结果

上述大晶粒超导腔的表面处理均只采用了化学抛光, 没有进行昂贵复杂的电抛光. 实验结果表明, 采用大晶粒铌材的超导腔, 有可能省去电抛光过程, 这可以大大降低后处理的难度. 正是由于前述诸多优势, 大晶粒铌材超导腔在基于超导加速器的大科学装置上有广阔的应用前景. 目前对大晶粒铌材超导腔的研究, 尤其是多 cell 超导腔性能的研究刚刚起步, 还需进一步的探索.

3 ERL 最新进展

ERL 原理早在 1965 年由康奈尔大学的 M.Tigner 提出, 但直到近年才真正应用到高性能光源和自由电

子激光上. 2003 年美国 CEBAF 实现 GeV 电子束能量回收实验. 2004 年, 美国 JLab 采用能量回收技术和超导电子加速器提供的高平均功率的电子束, 如图 6 所示, 在红外自由电子激光波段获得 10kW 输出, 回收效率 99% 以上, 预计目标是实现 1MW 输出. 同期, 采用能量回收技术实现高功率激光输出的单位还有日本 JAEA 和俄罗斯的 BINP. 这些实验装置的成功运行充分证明了能量回收技术原理的可行性及其优越性. 目前, 世界上建议中的先进光源如: 康奈尔大学与 JLab 共同提出的 ERL 光源、美国 BNL 实验室的 PERL、美国 LBNL 实验室的 LUX-LBL、英国的 4GLS、日本的 KEK, JAEA、德国的 ERLSYN、俄罗斯的 MARS 等, 都将采用超导加速器和能量回收技术. 2005 年, 国际知名的光源专家联合对德国在建的欧洲 X 射线自由电子激光 (XFEL) 装置提出了采用能量回收技术的改进方案^[7].

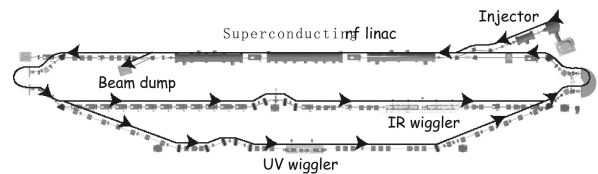


图 6 Jlab ERL-FEL 装置

下面给出最具代表性的 Jlab, JAEA 和 BINP 的 ERL 最新进展. 表 2 给出了这三个实验室的红外自由电子激光及 THz 的电子束参数. Jlab 的电子束能量已达到 160MeV, 平均电流达到 9.1mA. 2006 年 10 月, Jlab 实现了在波长 1.6 μm 的 14.2kW 的连续波输出. 下一步将对光腔进行改进, 目标是实现 100kW—1MW 的输出. JAEA 的电子束能量为 17MeV, 自由电子激光波长为 22 μm , 与 2004 年相比, 目前束团重复频率已经加倍达到 20.8MHz, 注入器 RF 功率源由 8kW 提高到了 50kW, 返回 ARC 段的能量接受度由 7% 提高到了 15%. BINP 的电子能量为 12MeV, 最大平均电流达到了 20mA, 其计划值为 150mA, 它的特点是电流稳定阈值高, 纵向接受度高, 允许大能散运行, 轨迹长度和纵向色散要求宽松.

表 2 Jlab, JAEA 和 BINP 的 ERL 参数比较

参数	Jlab	JAEA	BINP
能量/MeV	160	17	12
FEL 波长/ μm	1.6	22	120—230
束团电荷/pC	270	400	1500
平均电流/mA	9.1	10	20
rms 束团长度/ps	0.15	12	70
rms 发射度/(mm-mrad)	7	40	30
最大重复频率/MHz	74.85	20.8	22.5

4 小结

射频超导越来越广泛地应用到粒子加速器中, 经过近三十年的发展, 射频超导加速腔的研究取得了很大进展, 加速梯度不断提高, 对新腔型和新材料的研

究同时展开, 采用大晶粒铌材的超导腔研究是目前的研究热点.

ERL 具有高效、节能、环保、高亮度等优点, 在高平均功率 FEL 等领域有重要应用, 已经越来越多地应用到基于射频超导加速器的先进光源和自由电子激光装置中.

参考文献(References)

- 1 Padamsee H, Knobloch J, Hays T. RF Superconductivity for Accelerators. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1998
- 2 Bensen S, Douglas D, Shinn M et al. High Power Lasing in the IR Upgrade FEL at Jefferson Lab, In: Proc. of FEL2004. 2004, 229
- 3 Rossbach J. Results from the VUV-FEL. In: Proc. of EPAC06. 2006, 34
- 4 Lilje L, Kako E, Kostin D et al. Nucl. Instrum. Methods A, 2004, **524**: 1—12
- 5 GENG R L, Padamsee H, Seaman A et al. Testing the First 1300 MHz Reentrant Cavity, SRF Reports of Cornell University. Ithaca: Cornell University, 2004, SRF041108-05
- 6 Singer W, Brinkmann A, Iversen J et al. Large Grain Superconducting RF Cavities at DESY. In: Proc. of LINAC 2006, Knoxville, Tennessee USA, p327
- 7 Sekutowicz J, Bogacz S A, Douglas D et al. Phys. Rev. ST Accel & Beams, 2005, **8**: 010701

Recent Progress on RF Superconductivity and ERL

HAO Jian-Kui¹⁾ ZHAO Kui

(State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Institute of Heavy Ion Physics,
Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract RF superconducting cavities can work in CW mode or long pulse mode. RF superconducting technology is widely used in particle accelerators. The development of RF superconductivity is limited by the material, surface treatment and installation. SRF technology is improved greatly after dozens of years' researches. Lots of techniques and experiences have been accumulated by running superconducting accelerators. In recent years, researches and developments have been carried out for future large scientific project. New cavity shape and superconducting cavities made of large grain niobium are the hot frontiers in SRF field. Energy Recovery Linacs have been developed in recent years. ERLs has many advantages such as high efficiency, energy saving, good stability, low radiation level, etc. ERLs are more and more used in advanced light sources and free electron laser facilities.

Key words RF superconductivity, ERL, accelerating gradient