



直流-射频超导光阴极电子枪

黄森林^{1,2*}, 刘克新^{1,2}, 赵夔^{1,2}, 陈佳洱^{1,2}

1. 北京大学核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871;

2. 北京大学物理学院重离子物理研究所, 北京 100871

* 联系人, E-mail: huangsl@pku.edu.cn

2022-10-28 收稿, 2022-11-24 修回, 2022-11-28 接受, 2022-11-29 网络版发表

国家重点研发计划(2016YFA0401904, 2017YFA0701000)资助

摘要 直流-射频超导(direct current-superconducting radio frequency, DC-SRF)光阴极电子枪是由北京大学射频超导加速器实验室提出并发展的一种连续波电子源, 可产生MHz及以上重复频率、皮秒至亚皮秒脉冲、MeV能量的电子束. 作为一类重要的超导型光阴极电子枪, DC-SRF将具有高量子效率的半导体光阴极与射频超导加速腔分离, 成功地解决了二者之间的兼容问题, 并具有结构紧凑、暗电流低等优点. DC-SRF光阴极电子枪的研发经历了样机、DC-SRF-I及DC-SRF-II三个阶段, 其中, DC-SRF-I于2014年实现稳定载束运行, 并开展了系列应用实验; DC-SRF-II于2021年建成, 2022年实现100 pC束团电荷量、1 MHz重复频率的连续波模式运行, 暗电流小于1 pA, 归一化发射度达到亚mm-mrad级, 综合性能指标处于领先地位. 本文总结DC-SRF电子枪的研究工作, 主要内容包括DC-SRF-I电子枪、DC-SRF-II电子枪、光阴极与驱动激光等.

关键词 连续波电子源, 光阴极电子枪, 高重复频率电子束, 直流-射频超导电子枪, 半导体光阴极, 光阴极驱动激光

高亮度电子源是先进电子直线加速器装置最为关键的部件, 是装置性能的首要决定因素. 光阴极电子枪是最重要的高亮度电子源, 其技术进步极大地推动了电子加速器的发展与新应用, 如自由电子激光(free-electron laser, FEL)^[1~3]、能量回收直线加速器(energy recovery linac, ERL)^[4]、康普顿散射源^[5~8]、超快电子衍射^[9~11]等. 其中, 基于ERL技术的高平均功率FEL^[12,13]和作为最新一代加速器光源的硬X射线FEL^[14~16]是最具挑战性的高亮度电子束应用, 其成功均得益于光阴极电子枪的持续研发和性能提升. 另一方面, 先进光源应用等取得的成就激励着人们设计和建造性能更加卓越的电子加速器, 从而对光阴极电子枪提出了更高的要求. 随着高重复短波长FEL等装置^[17,18]建设的推进, 电子枪可长期在连续波(continuous-wave, CW)模式稳定运行, 提供高重复、高亮度束流的光阴极电子枪已

成为相关领域的研发重点.

使用具有高量子效率(quantum efficiency, QE)的半导体光阴极的射频超导(superconducting radio frequency, SRF)电子枪被认为是获得高亮度CW电子束的理想途径^[19]. 国际上多家研究机构长期致力于相关研发^[20~30], 但工作多受制于半导体光阴极和超导腔的兼容问题. 为解决这一问题, 北京大学射频超导加速器实验室于2001年提出直流-射频超导(direct current-superconducting radio frequency, DC-SRF)光阴极电子枪(也称“DC-SC光阴极注入器”或“DC-SRF光阴极注入器”)的概念^[31]. 如图1(a)所示, DC-SRF光阴极电子枪结合直流(direct current, DC)高压电极和1.3 GHz SRF加速腔, 二者由一段短束管连接. 由于DC高压电极的引入, 光阴极被移出了SRF加速腔, 这不仅避免了半导体光阴极对SRF加速腔性能的影响, 还有助于降低电子枪运

引用格式: 黄森林, 刘克新, 赵夔, 等. 直流-射频超导光阴极电子枪. 科学通报, 2023, 68: 1036-1046

Huang S L, Liu K X, Zhao K, et al. DC-SRF photocathode gun (in Chinese). Chin Sci Bull, 2023, 68: 1036-1046, doi: 10.1360/TB-2022-1091

行时的暗电流。DC-SRF电子枪中电子增能主要由SRF加速腔实现, DC电极电压设计值为几十至100 kV, 远低于DC高压电子枪, 因此, 在获得数MeV增能的同时大幅降低了对高压的要求。除此之外, 由于DC结构处于低温区, 具有高真空度, DC-SRF电子枪可以使用对真空度要求较高的双碱(bi-alkali)光阴极。此类光阴极在绿光频段具有较高的量子效率, 可由绿光频段的激光驱动, 从而大幅降低光阴极驱动激光的要求, 这对电子枪的高重频、高平均流强运行极为有利。

DC-SRF光阴极电子枪的研发迄今经历了样机、DC-SRF-I(第一代DC-SRF电子枪)、DC-SRF-II(第二代DC-SRF电子枪)三个阶段, 如图2所示。DC-SRF样机于2004年建成^[32], 其DC电压设计值为70 kV(实际运行值30~40 kV), 加速腔采用1.5-cell结构, 其中1-cell部分的几何形状与TESLA型超导腔的端部单元相同。由于缺少液氦循环系统, 实验中临时购买液氦, 由杜瓦直接注入液氦槽。受液氦供应量不足等限制, 样机工作温度在

4.2~4.4 K, 且实验时间较为有限。尽管如此, 样机仍实现了多次宏脉冲模式载束运行, 获得了270 μ A的最大宏脉冲平均流强和1.1 MeV的最大增能^[33], 成功地验证了DC-SRF概念的可行性。随后, DC-SRF光阴极电子枪进入实用装置研发阶段, 第一代DC-SRF电子枪于2014年投入运行^[34], 是国际上首台能够长时间稳定运行、采用半导体光阴极的超导电子枪。第二代DC-SRF电子枪于2021年建成, 随后实现CW模式运行, 暗电流小于1 pA, 100 pC束团电荷量时归一化发射度达到亚mm-rad级, 性能指标处于领先地位。

1 第一代DC-SRF电子枪

第一代DC-SRF电子枪针对红外FEL、ERL及太赫兹(THz)辐射等研究设计^[35], 其DC电极和加速腔半腔的几何形状均进行了优化, DC电压设计值为90 kV, 对应的光阴极表面电场提高至5 MV/m^[34], 有利于降低电子束的发射度。为获得足够的增能, DC-SRF-I采用3.5-

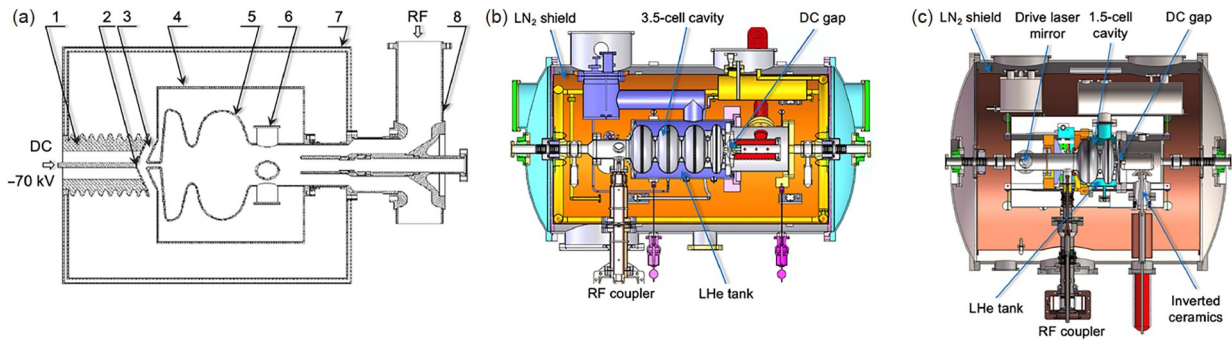


图1 DC-SRF光阴极电子枪结构示意图。(a) DC-SRF样机, 1~8分别为绝缘陶瓷、光阴极、DC间隙、液氮槽、1.5-cell SRF加速腔、高阶模耦合器、液氮屏以及同轴型RF功率耦合器; (b) DC-SRF-I; (c) DC-SRF-II

Figure 1 Schematic of the DC-SRF photocathode guns. (a) DC-SRF prototype, where 1~8 denote insulation ceramics, photocathode, DC structure, liquid helium (LHe) tank, 1.5-cell SRF cavity, high-order mode coupler, liquid nitrogen (LN₂) shield, and coaxial RF coupler, respectively; (b) DC-SRF-I; (c) DC-SRF-II



图2 DC-SRF电子枪与束线照片。(a) DC-SRF样机; (b) DC-SRF-I; (c) DC-SRF-II

Figure 2 Photos of the DC-SRF photocathode guns and the beam lines. (a) DC-SRF prototype; (b) DC-SRF-I; (c) DC-SRF-II

cell加速腔. 其中, 中间及尾部单元几何形状分别与TE-SLA型超导腔的相应单元相同, 首部半腔则为特殊设计, β 值为0.63, 锥形壁角度为 10.5° , 与90 keV电子束的加速及聚焦相匹配. 该加速腔峰值电场与加速梯度的比值 $E_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$ 为2.12, 峰值磁场与加速梯度的比值 $B_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$ 为 $4.95 \text{ mT}/(\text{MV m}^{-1})$, 几何分路阻抗 R/Q 为 417Ω , 加速梯度 E_{acc} 设计值为 13 MV/m . 对DC结构与加速腔间的束管也进行了优化, 其内径为 12 mm , 长度为 17 mm , 兼顾了对发射度增长和加速腔内射频(radio frequency, RF)场泄漏的抑制.

DC-SRF-I的整体结构如图1(b)所示, 超导腔浸泡于 2 K 液氮中, 液氮槽与恒温器外筒之间有一层液氮(77 K)冷屏, DC结构的阴极通过三段陶瓷(图1(b)中红色部分)与外部高压电源连接. 与样机相比, 除前述物理设计上的调整及优化外, DC-SRF-I在技术上也进行了重要的调整, 采用容性耦合功率耦合器^[36], 改进了恒温器的液氮管路、液氮冷屏、液氮槽悬挂结构等设计, 增加了超导腔调谐机构. 3.5-cell加速腔采用宁夏东方铝业公司(OTIC)的大晶粒铌材制造, 于国内加工及初处理后, 在美国杰斐逊实验室(JLab)进行了 800°C 热处理、 $30 \mu\text{m}$ 缓冲化学抛光(buffered chemical polishing, BCP)及垂直测试, 加速梯度达到 23.5 MV/m , 无载品质因数 Q_0 大于 1.2×10^{10} , 优于同期其他非标准腔型^[37]. DC结构的阳极与3.5-cell加速腔焊接为一体, 采用细晶铌材, 可避免焊缝对DC电场分布的影响, 阴极采用不锈钢, 可独立进行表面抛光及清洗.

2011年, DC-SRF-I建成. 与此同时, 北京大学射频超导加速器实验室的 2 K 低温系统投入运行^[38], DC-SRF电子枪运行所需的其他配套系统, 包括在线 Cs_2Te 光阴极制备与传输室、激光系统、 20 kW 固态功率源、数字低电平(low-level radio frequency, LLRF)控制系统、束流实验线等, 也陆续就绪, 为电子枪实验提供了基本保障. DC-SRF-I组装完成后, 首先进行了SRF性能测试, CW模式最高加速梯度为 14.5 MV/m , 脉冲模式(频率为 10 Hz 、占空比为 10%)加速梯度为 17.5 MV/m , 二者分别对应 30.7 与 37.1 MV/m 的峰值电场. 经过一系列的调试和关键部件改进及运行条件优化后, DC-SRF-I于2014年实现稳定载束运行, 单缝扫描法测得 25 pC 时的归一化均方根(root-mean-square, RMS)发射度为 1.5 mm-mrad . 由于DC-SRF-I的功率耦合器内外导体间无法加偏压抑制二次电子发射, 因此在较高功率下窗体损坏的危险系数很高. 为保障运行的安全, DC-

SRF-I加速腔的RF功率馈入被限制在脉冲模式, 脉冲长度为 7 ms , 重复频率为 10 Hz , 加速腔的梯度也被限制在 9 MV/m 以内.

基于DC-SRF-I的准连续(quasi-CW)束流, 北京大学射频超导加速器实验室先后开展了波荡器超辐射、超快电子衍射等实验研究. 其中, 由DC-SRF-I电子枪、螺线管透镜和10周期波荡器组成的紧凑装置产生了中心频率在 $0.24\text{--}0.42 \text{ THz}$ 可调、带宽(半高宽, full width at half maximum, FWHM)约为 15% 的高重频太赫兹辐射^[39]. 在国际上首次开展的MHz重频、MeV能量的超快电子衍射实验则实现了 10 ms 级的衍射图样采样^[40], 充分体现了超导电子枪的优势. 上述实验中, DC-SRF-I电子枪均偏离峰值加速相位运行, 从而实现电子束团的速度压缩. 模拟计算表明, 电子束团的RMS长度可被压缩至百fs量级.

2015年, 北京大学射频超导加速器实验室建成 $2 \times 9\text{-cell}$ 超导直线加速器, 随后实现了DC-SRF-I电子枪与超导直线加速器的联合运行. 电子枪与直线加速器均运行在准连续模式, 电子束的宏脉冲长度为 $1\text{--}7 \text{ ms}$, 重复频率为 $5\text{--}10 \text{ Hz}$, 能量为 $10\text{--}20 \text{ MeV}$, 宏脉冲内平均流强最大值约为 1 mA . 这一束流也被用于太赫兹波荡器超辐射研究, 获得了中心频率在 $0.8\text{--}1.3 \text{ THz}$ 可调、宏脉冲内平均功率大于 1 W 的太赫兹辐射输出.

2016年, 第二代DC-SRF电子枪的研发启动, DC-SRF-I停止运行. 在DC-SRF-I载束运行的近两年时间内, 超导腔性能未见退化, 这表明DC-SRF电子枪成功地避免了半导体光阴极对SRF加速腔性能的影响. DC-SRF-I载束运行期间曾多次测量暗电流, 均在 1 nA 以下. 需要指出的是, 受DC结构高压放电的限制, DC-SRF-I的DC电压运行值一直在 50 kV 以内, 离设计指标有一定差距. DC-SRF-I的运行参数见表1. 其中, 2020年DC-SRF-I在停机4年后短暂恢复运行, 受场致发射(停机期间加速腔几次暴露于大气)的限制, 加速腔梯度限定在 7 MV/m ; 此次实验采用了新的光阴极驱动激光系统, 脉冲重复频率可设定在 1 或 10 MHz .

2 第二代DC-SRF电子枪

DC-SRF-I的设计和制造工艺限制了其性能的提升. 在低发射度、CW运行及高平均流强等目标的驱动下, 北京大学射频超导加速器实验室于2016年启动了第二代DC-SRF电子枪的研发, 并于2017年完成物理方案设计. DC-SRF-II降低归一化发射度的主要措施包括:

表 1 DC-SRF-I电子枪运行的主要参数

Table 1 Operation parameters of the DC-SRF-I gun

参数	2014~2016年运行	2020年运行
DC电压(kV)	45	50
SRF加速腔梯度 E_{acc} (MV/m)	9	7
驱动激光纵向分布	近高斯分布	近高斯分布
驱动激光横向分布	近高斯分布	近高斯分布
驱动激光脉冲RMS宽度(ps)	5~6	1.5
驱动激光RMS半径(mm)	1	1
DC暗电流(nA)	< 1(总和)	0.13
RF暗电流(nA)		1.6
电子束能量(MeV)	3.4	2.7
束团电荷量(pC)	10~40	40~80
束团重复频率(MHz)	0.8125~81.25	1, 10
宏脉冲长度(ms)	1~7	1~10
宏脉冲重复频率(Hz)	5~10	5~10
宏脉冲平均流强(mA)	0.5~1	0.8(最大值)

将DC电压提升至100 kV; 采用 K_2CsSb 光阴极; 对光阴极驱动激光的时间及空间分布进行整形; 优化发射度补偿等.

在提升DC电压方面, 对阴阳极几何形状和间距进行了优化, 在将电极最高表面电场限制在10 MV/m的同时, 使光阴极表面处纵向电场达到6 MV/m. 与DC-SRF-I电子枪13 MV/m的电极最高表面电场以及5 MV/m的光阴极表面电场设计值相比, DC-SRF-II电子枪具有更高的光阴极表面电场和更低的电极峰值表面电场, 前者有利于获得低发射度电子束, 后者有利于降低DC结构100 kV运行时高压放电的风险.

DC-SRF-II电子枪采用的 K_2CsSb 光阴极热发射度系数为0.56 mm-mrad/mm, 低于DC-SRF样机及DC-SRF-I采用的 Cs_2Te 光阴极(0.847 mm-mrad/mm), 结合驱动激光整形及发射度补偿技术, 可显著降低电子束的发射度. 不仅如此, K_2CsSb 光阴极工作在绿光波段, 对驱动激光放大、倍频、整形的要求均得以降低.

相较于RF电子枪, DC-SRF-II电子枪的光阴极表面电场较低, 需采用脉冲时间较长的驱动激光, 以降低电子束进入加速腔前所受到的空间电荷力的影响. 考虑到加速腔RF场对电子束团切片的聚焦作用随其到达时间而变化, 为降低RF电场所导致的发射度增长, DC-SRF-II电子枪采用具有更短长度的1.5-cell加速腔. 这也可降低电子枪出口的能量, 进而降低高平均流强运行对耦合器馈入功率的要求. 同时, 由于DC-SRF-I的

3.5-cell加速腔已经过充分优化, 制造工艺也很成熟, DC-SRF-II沿用了其首部半腔和尾部单元的设计.

此外, 缩短电子束进入加速腔前的漂浮距离也有助于降低空间电荷力导致的发射度增长. DC-SRF-II适当放宽了加速腔RF场泄漏的限值, 将DC结构与加速腔间的束管缩短至11 mm(内径保持不变, 仍为12 mm). 对SRF加速腔的仿真表明, 上述改变导致的RF场泄漏可以接受.

DC-SRF-II电子枪的物理方案充分考虑了可及的技术条件, 如DC电压设定为100 kV, SRF加速腔梯度限定在13~14 MV/m, 驱动激光横向分布为 1σ 高斯截断, 纵向为平顶分布, 长度约为20 ps. 模拟研究表明, 在上述条件下, 当束团电荷量为100 pC时, 电子束的最优归一化发射度将达到0.33 mm-mrad, 可满足CW X射线FEL对于电子枪的要求^[41].

DC-SRF-II电子枪的整体结构如图1(c)所示. 与DC-SRF-I相比, 除前述物理设计上的调整及优化外, DC-SRF-II还吸收了北京大学射频超导加速器实验室在 2×4 -cell超导加速器^[42]、 2×9 -cell超导加速器^[43]等研发方面的成果和经验, 实现了技术上的全面升级^[44]. DC-SRF-II的高压绝缘冷端采用锥形反向陶瓷, 并由其支撑316L不锈钢阴极柱体, 不仅结构更加紧凑, 也便于阴极的拆装和调节. DC结构技术设计上的另一改变是采用可拆卸的阳极(材料为工业纯钛), 这样阴、阳电极均为独立组件, 可单独进行

表面抛光及清洗,有助于高压的提升. DC-SRF-II采用TTF3型功率耦合器,并对散热进行了专门设计^[45].微波测试表明,其CW运行功率已达20 kW以上,10%占空比宏脉冲运行功率超过70 kW,可满足平均流强10 mA的CW运行需要.此外,DC-SRF-II恒温器的两相管道、液氮冷屏、磁屏蔽等也有重要改进,恒温器中还增加了光阴极驱动激光反射镜,降低了激光传输系统设计的难度.

DC-SRF-II的1.5-cell加速腔采用宁夏东方超导科技有限公司的大晶粒铌材制造,在国内加工及处理,高压水清洗及垂直测试在北京大学射频超导加速器实验室进行.垂直测试表明,该加速腔的最高加速梯度达到25 MV/m,20 MV/m时的无载品质因数 Q_0 也达到了 1.1×10^{10} .

2021年初,DC-SRF-II电子枪组装完成,其束流测试线也于2021年4月建成,第一阶段束流实验随即启动.2021年5月,DC-SRF-II载束运行获得成功,并进行了系列测试,最大束团电荷量达到250 pC,在束团电荷量为22 pC、重复频率为1 MHz的运行模式下,电子束归一化发射度为0.52 mm-mrad.此次实验实现了DC-SRF电子枪的CW模式运行,在重复频率为1 MHz时,电子束平均流强达88 μ A.运行测试中的RF及束流信号如图3(a)所示.

第一阶段束流实验持续近3个月,其间陆续发现一些问题.由于超导腔组装期间受到污染,场致发射较为严重,加速腔的运行梯度为9 MV/m.同时,受恒温器内高压馈入结构放电的限制,DC电压的运行值为45 kV.此外,驱动激光放大系统故障、加速腔内光阴极量子

效率大幅下降等问题也对束流实验造成了一定程度的影响.第一阶段束流实验结束后,针对上述问题进行了系统研究,改进了高压输入结构、驱动激光系统、束流测量及控制系统,更换了导向磁铁电源,并拆解电子枪,重新对SRF加速腔进行了高压水清洗.2022年初,DC-SRF-II重新组装完成,3月开始的第二阶段束流实验实现了DC-SRF-II电子枪的长时间稳定运行,DC电压(100 kV)、加速腔梯度(13 MV/m)等均达到设计指标,在13 MV/m加速梯度、CW功率馈入及100 kV高压条件下的暗电流小于1 pA;20、100、260 pC束团电荷量时,归一化发射度达到了较高水平,分别为0.5、0.85和1.25 mm-mrad(通过单缝扫描法^[46]测得的相图如图4所示),而且重复性良好;100 pC、1 MHz重复频率的CW恒流运行也得以实现,电流监测结果如图3(b)、(c)所示.

DC-SRF-II两个阶段载束运行主要参数对比如表2所示.由于激光系统参数和部分束线、束测元件的限制,第二阶段实验中的电子束发射度等尚未优化至最佳状态.第三阶段的束流实验正在准备中,目前已完成束线、束测、控制系统的改造,新研制的驱动激光系统也正在调试中.

3 光阴极与驱动激光

作为DC-SRF电子枪的重要组成部分,半导体光阴极也是北京大学射频超导加速器实验室的研究重点.由于碲化铯(Cs_2Te)具有量子效率高、寿命长的特点,且对真空度要求相对较低,被低压空气污染后还可以部分恢复,DC-SRF样机与DC-SRF-I电子枪均采用

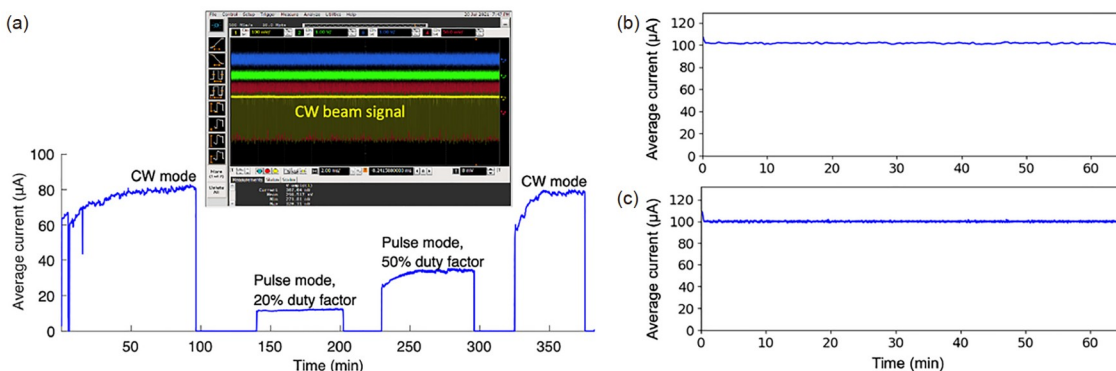


图3 DC-SRF-II电子枪CW模式运行.(a)第一阶段束流实验中脉冲模式与CW模式运行测试结果;(b)第二阶段束流实验中束线末端的法拉第杯测量结果;(c)第二阶段束流实验中DC-SRF-II出口处的FCT测量结果,经附近法拉第杯校准

Figure 3 CW operation of the DC-SRF-II gun. (a) Beam signal at pulsed and CW modes during the first-stage test operation; (b) the signal from a Faraday cup at the end of the beam line during the second-stage operation; (c) the signal from an FCT at the exit of the DC-SRF-II gun during the second-stage operation, which has been calibrated with a neighbouring Faraday cup

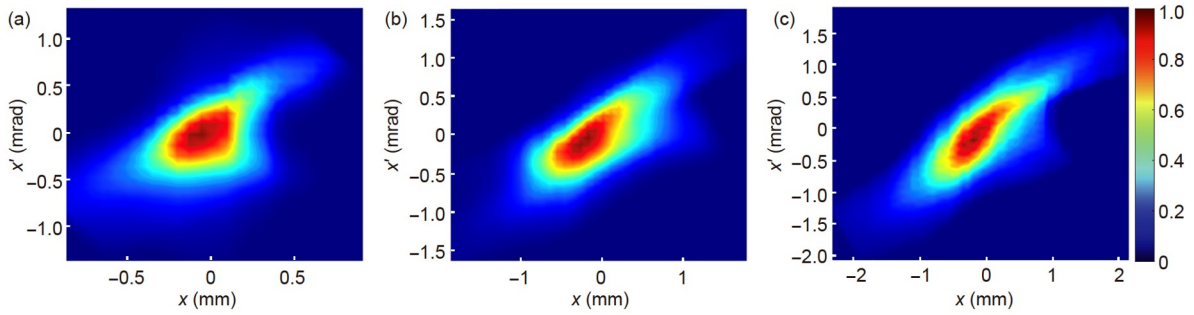


图4 DC-SRF-II电子枪第二阶段束流实验中发射度测量结果。(a)~(c)对应的束团电荷量分别为20、100和260 pC

Figure 4 Electron beam emittance measurement results of the DC-SRF-II gun during the second-stage operation. (a)~(c) show the phase space for the bunch charge of 20, 100, and 260 pC, respectively

表2 DC-SRF-II电子枪运行的主要参数

Table 2 Operation parameters of the DC-SRF-II gun

参数	第一阶段运行(2021年4~7月)	第二阶段运行(2022年3~4月)
DC电压(kV)	45	100
SRF加速腔梯度 E_{acc} (MV/m)	9	13(最大值)
暗电流(pA)	未测量	<1
电子束能量 E_k (MeV)	1.9~2.0	2.2
束团电荷量(pC)	20~88	20~260 0.01~0.1 ^{a)}
束团重复频率(MHz)	1	1
CW模式平均流强(μ A)	88(最大值)	100
归一化RMS发射度(mm-mrad)	0.52 @ 22 pC	0.5 @ 20 pC 0.85 @ 100 pC 1.25 @ 260 pC

a) 用于束流轨道调节及准直研究

Cs_2Te 光阴极。北京大学射频超导加速器实验室第一套可用于 Cs_2Te 光阴极研究的蒸镀系统建于1995年，而可为电子枪载束实验提供 Cs_2Te 光阴极的在线制备系统则于2002年建成^[47]。后者集 Cs_2Te 光阴极制备与传输为一体，并直接与电子枪连接。在2004年的DC-SRF样机实验中，该系统制备的光阴极产生了平均流强达数百微安的光电流，量子效率约为1.3%。为满足DC-SRF-I电子枪束流实验的要求，对 Cs_2Te 光阴极制备系统进行了系列改造^[48]，包括改进制备室内部结构及真空泵组以提高真空度、改进铯源和碲源的结构、改进光阴极基座设计、优化制备工艺等。在2014~2016年的DC-SRF-I束流实验中， Cs_2Te 光阴极的量子效率可稳定在4%左右并持续10天以上^[34]。

2017年，DC-SRF-II电子枪正式确定采用工作在绿光波段的 K_2CsSb 光阴极^[49]，并采用转移室(suitcase)将光阴极由制备室转运至电子枪。 K_2CsSb 光阴极制备系

统于2018年安装完成，2019年系统真空达到制备碱金属铯化物光阴极的要求(约 5×10^{-9} Pa)，之后经过近一年的工艺优化，制备的 K_2CsSb 光阴极量子效率达到6%左右，经转移室传入DC-SRF-II电子枪后，量子效率可保持在原有水平，如图5所示。

DC-SRF光阴极电子枪驱动激光系统的研制始于2002年前后。首套激光系统于2004年建成^[50]，主机为瑞士Time-Bandwidth Products公司的GE-100-XHP型半导体泵浦被动锁模激光器，工作晶体为Nd:YVO₄(掺钕钒酸钇)，输出激光的中心波长为1064 nm，脉冲宽度为10 ps，重复频率为81.25 MHz，平均功率为10 W。上述激光经KTP晶体二倍频和CLBO晶体四倍频产生平均功率大于1 W的266 nm紫外激光，再经4F传像光路传输至DC-SRF样机的光阴极。由于倍频晶体中的走离现象较为严重，光阴极处的光斑为长条形状。DC-SRF样机载束实验期间的光阴极驱动激光系统如图6(a)

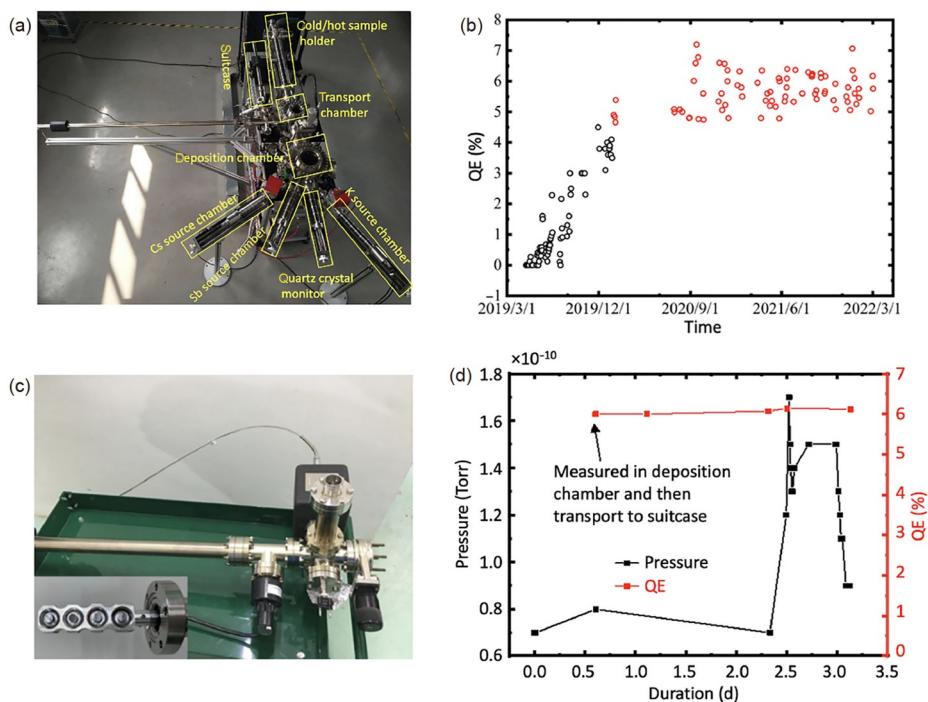


图5 K_2CsSb 光阴极制备与转移。(a) 光阴极制备系统实物照片；(b) 2019年3月~2022年3月制备的 K_2CsSb 光阴极量子效率统计；(c) 转移室实物照片；(d) K_2CsSb 光阴极由制备室转移至电子枪过程中的QE及真空监测结果, 1 Torr \approx 133.322 Pa

Figure 5 K_2CsSb photocathode preparation and transfer. (a) Photo for the photocathode preparation system; (b) QE statistics for the K_2CsSb photocathode prepared between March 2019 and March 2022; (c) photo for the suitcase; (d) QE and vacuum monitoring during transferring of the K_2CsSb photocathode from the preparation chamber to the DC-SRF-II gun, 1 Torr \approx 133.322 Pa

所示。

2009年, 针对DC-SRF-I mA级平均流强稳定运行的需要, GE-100-XHP主机被扩展为主振荡器功率放大器(master oscillator power amplifier, MOPA)结构, 即在主机之后增加四级半导体泵浦的Nd:YVO₄晶体, 将其输出功率放大至45 W。放大后的1064 nm激光经两次倍频, 其中, 二倍频晶体改用光损伤阈值高、对环境要求相对较低的LBO晶体, 四倍频晶体则改用性能相对稳定的BBO晶体, 且采用较短的两块晶体(每块长度为2 mm)形成走离补偿组合, 以避免走离效应对光束质量的影响^[51]。虽然倍频效率较低(约2.2%), 由此得到的266 nm紫外激光却具有较好的横向分布, 平均功率也达到了1 W, 可满足DC-SRF-I载束运行的要求。DC-SRF-I电子枪在2014~2016年载束实验期间的光阴极驱动激光系统如图6(b)所示。

2019年, GE-100-XHP停止运行, DC-SRF光阴极电子枪的驱动激光开始转向MOPA结构的全光纤激光系统^[52], 主振荡器采用Menlo System公司的Orange锁模光纤激光器, 输出激光中心波长为1038 nm, 脉冲宽度约为

300 fs, 重复频率为81.25 MHz, 平均功率约为100 mW。针对DC-SRF-II束流测试的迫切需求, 首套光纤放大系统从工业激光器厂家定制, 可工作在1、10及81.25 MHz三种重复频率下, 其中1和10 MHz重复频率下输出激光的平均功率分别为2和20 W。放大后的激光先经LBO晶体倍频产生519 nm绿光, 再依次通过由4块长度分别为1、2、4、8 mm的YVO₄晶体所组成的延迟(非相干)堆叠时间整形系统、由扩束光路和圆孔光阑所组成的横向整形系统以及4F传像系统传输至DC-SRF-II电子枪的光阴极, 如图6(c)所示。由互相关测量得到的519 nm激光平顶宽度约为18 ps, 上升/下降沿约6 ps, 基本达到束流测试的要求。

2022年, 为了更好地满足DC-SRF-II载束运行的需要, 实验室决定对光阴极驱动激光系统进行升级, 自行设计并搭建以光子晶体光纤作为增益介质的功率放大系统, 目标是实现百瓦级平均功率的放大输出, 同时提升输出激光的光束质量和功率稳定性^[53]。如图6(d)所示, 升级后的激光系统采用8~10块等厚YVO₄晶体所组成的相干堆叠时间整形系统, 可产生平整度更好的平

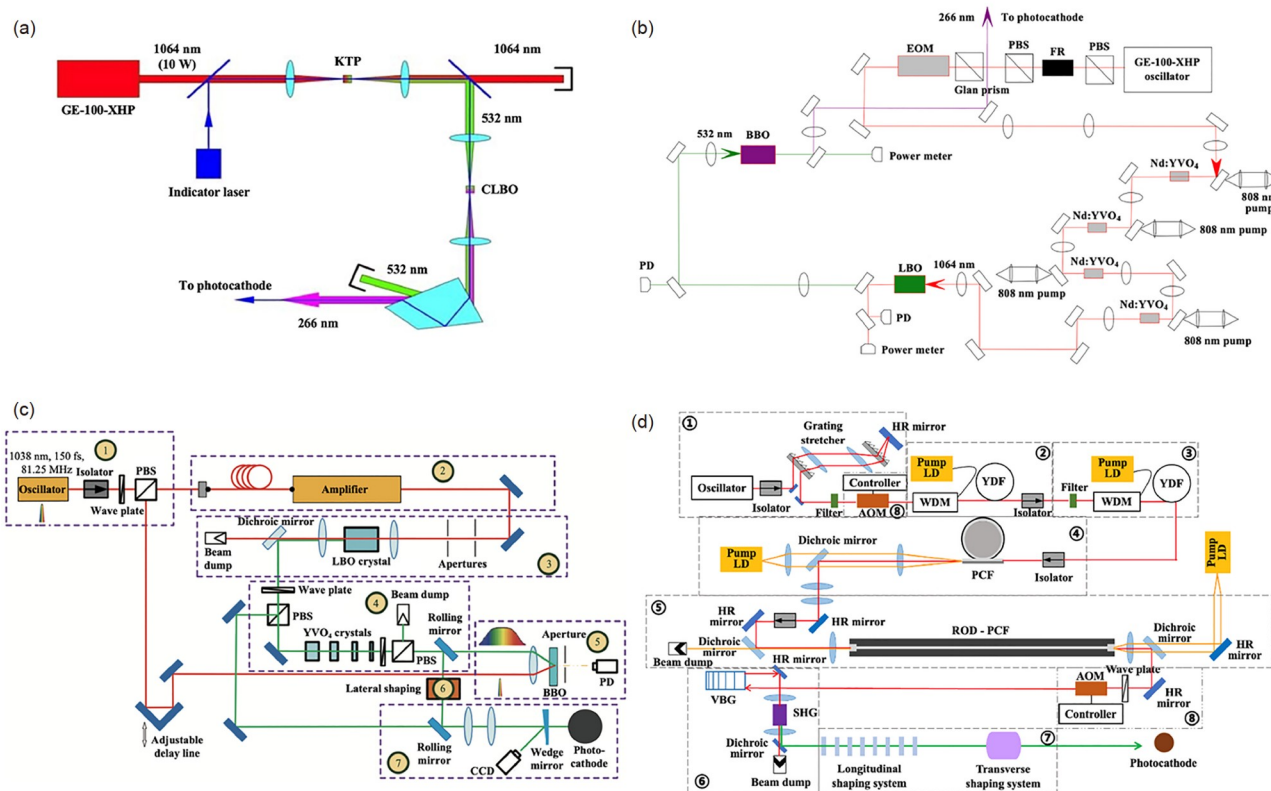


图6 DC-SRF光阴极电子枪的四代驱动激光系统。(a) DC-SRF样机的驱动激光系统；(b) DC-SRF-I电子枪的全固态驱动激光系统；(c) DC-SRF-II电子枪的首套全光纤驱动激光系统；(d) 自行研制的全光纤驱动激光系统

Figure 6 Four generations of the drive laser system for the DC-SRF photocathode gun. (a) Drive laser system for the DC-SRF prototype; (b) all-solid-state drive laser system for the DC-SRF-I gun; (c) first all-fiber drive laser system for the DC-SRF-II gun; (d) home-built all-fiber drive laser system

顶脉冲。相干堆叠时间整形是DC-SRF光阴极电子枪驱动激光系统的一项特色功能，可任意调节输出激光脉冲的时间分布，前期研究已产生多种不同形状的激光脉冲^[54]。

4 总结与展望

经过近20年的努力，DC-SRF光阴极电子枪由概念设计逐步发展成为综合性能领先、稳定运行的装置。DC-SRF电子枪解决了半导体光阴极与SRF加速腔的兼容问题，是超导型光阴极电子枪的一个成功范例，其结构紧凑，暗电流低(小于1 pA)，可产生MHz及以上重复频率、亚mm-mrad归一化发射度、MeV能量的CW束

流，是高亮度CW电子源的一个重要解决方案。

近年来，基于超导电子加速器的CW XFEL(X-ray free-electron laser)已成为先进加速器光源装置的发展主流之一。CW XFEL装置的建设正在推动高亮度CW电子枪技术的快速发展，这为DC-SRF电子枪的发展提供了重要的契机。DC-SRF-II电子枪在发射度、重复频率、平均流强等指标方面仍有很大的提升空间，在束流时间、空间分布操控方面已具备良好的条件，相关研究将是近期工作的重点。DC-SRF-II电子枪产生的高重复电子束在超快电子衍射、太赫兹自由电子辐射、电子-物质相互作用等方面有着重要的应用前景，未来有望做出具有特色的研究工作。

参考文献

- 1 Bostedt C, Boutet S, Fritz D M, et al. Linac coherent light source: The first five years. *Rev Mod Phys*, 2016, 88: 015007
- 2 Pellegrini C. The development of XFELs. *Nat Rev Phys*, 2020, 2: 330–331

- 3 Kao C C. Challenges and opportunities for the next decade of XFELs. *Nat Rev Phys*, 2020, 2: 340–341
- 4 Huang S L, Liu K X. Energy recovery linac light source (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2022, 34: 104011 [黄森林, 刘克新. 基于能量回收技术的光源——ERL光源. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 104011]
- 5 Albert F, Anderson S G, Gibson D J, et al. Characterization and applications of a tunable, laser-based, MeV-class Compton-scattering γ -ray source. *Phys Rev Spec Top Accel Beams*, 2010, 13: 070704
- 6 Du Y, Yan L, Hua J, et al. Generation of first hard X-ray pulse at Tsinghua Thomson Scattering X-ray Source. *Rev Sci Instrum*, 2013, 84: 053301
- 7 Ovodenko A, Agustsson R, Babzien M, et al. High duty cycle inverse Compton scattering X-ray source. *Appl Phys Lett*, 2016, 109: 253504
- 8 Du Y C, Chen H, Zhang H Z, et al. A very compact inverse Compton scattering gamma-ray source (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2022, 34: 104010 [杜应超, 陈寒, 张鸿泽, 等. 紧凑型单能伽马射线源. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 104010]
- 9 Li R, Tang C, Du Y, et al. Experimental demonstration of high quality MeV ultrafast electron diffraction. *Rev Sci Instrum*, 2009, 80: 083303
- 10 Weathersby S P, Brown G, Centurion M, et al. Mega-electron-volt ultrafast electron diffraction at SLAC National Accelerator Laboratory. *Rev Sci Instrum*, 2015, 86: 073702
- 11 Wu J, Tang M, Zhao L, et al. Ultrafast atomic view of laser-induced melting and breathing motion of metallic liquid clusters with MeV ultrafast electron diffraction. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2022, 119: e2111949119
- 12 Neil G R, Bohn C L, Benson S V, et al. Sustained kilowatt lasing in a free-electron laser with same-cell energy recovery. *Phys Rev Lett*, 2000, 84: 662–665
- 13 Neil G R, Behre C, Benson S V, et al. The JLab high power ERL light source. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 2006, 557: 9–15
- 14 Emma P, Akre R, Arthur J, et al. First lasing and operation of an ångstrom-wavelength free-electron laser. *Nat Photonics*, 2010, 4: 641–647
- 15 Decking W, Abeghyan S, Abramian P, et al. A MHz-repetition-rate hard X-ray free-electron laser driven by a superconducting linear accelerator. *Nat Photonics*, 2020, 14: 391–397
- 16 Prat E, Abela R, Aiba M, et al. A compact and cost-effective hard X-ray free-electron laser driven by a high-brightness and low-energy electron beam. *Nat Photonics*, 2020, 14: 748–754
- 17 Galayda J N. The LCLS-II: A high power upgrade to the LCLS. In: *Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference*, 2018. 18–23
- 18 Zhao Z T, Zhu Z Y, Wang D, et al. SCLF: An 8-GeV CW SCRF linac-based X-ray FEL facility in Shanghai. In: *Proceedings of the 38th International Free Electron Laser Conference*, 2017. 182–184
- 19 Petrushina I, Litvinenko V N, Jing Y, et al. High-brightness continuous-wave electron beams from superconducting radio-frequency photoemission gun. *Phys Rev Lett*, 2020, 124: 244801
- 20 Todd A. State-of-the-art electron guns and injector designs for energy recovery linacs (ERL). *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 2006, 557: 36–44
- 21 Xiang R. Review of superconducting radio frequency gun. In: *Proceedings of the 12th International Particle Accelerator Conference*, 2021. 2556–2561
- 22 Chaloupka H, Heinrichs H, Michalke A, et al. A proposed superconducting photoemission source of high brightness. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 1989, 285: 327–332
- 23 Teichert J, Arnold A, Ciovati G, et al. Successful user operation of a superconducting radio-frequency photoelectron gun with Mg cathodes. *Phys Rev Accel Beams*, 2021, 24: 033401
- 24 Calaga R, Ben-Zvi I, Blaskiewicz M, et al. High current superconducting gun at 703.75 MHz. *Physica C*, 2006, 441: 159–172
- 25 Neumann A, Bohlick D, Burger M, et al. The bERLinPro SRF photoinjector system—From first RF commissioning to first beam. In: *Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference*, 2018. 1660–1663
- 26 Vogel E, Barbanotti S, Brinkmann A, et al. Status of the all superconducting gun cavity at DESY. In: *Proceedings of the 19th International Conference on RF Superconductivity*, 2019. 1087–1090
- 27 Konomi T, Honda Y, Kako E, et al. Development of high intensity, high brightness, CW SRF gun with bi-alkali photocathode. In: *Proceedings of the 19th International Conference on RF Superconductivity*, 2019. 1219–1222
- 28 Belomestnykh S, Ben-Zvi I, Brutus J, et al. Commissioning of the 112 MHz SRF gun and 500 MHz bunching cavities for the CeC PoP linac. In: *Proceedings of the 6th International Particle Accelerator Conference*, 2015. 3597–3599
- 29 Bisognano J, Bissen M, Bosch R, et al. Wisconsin SRF electron gun commissioning. In: *Proceedings of the North American Particle Accelerator Conference, NAPAC'13*, 2013. 622–624
- 30 Harris J R, Ferguson K L, Lewellen J W, et al. Design and operation of a superconducting quarter-wave electron gun. *Phys Rev Spec Top Accel Beams*, 2011, 14: 053501
- 31 Zhao K, Hao J, Hu Y, et al. Research on DC-RF superconducting photocathode injector for high average power FELs. *Nucl Instrum Methods Phys*

- [Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip](#), 2001, 475: 564–568
- 32 Xiang R, Ding Y, Zhao K, et al. Experimental investigations of DC-SC photoinjector at Peking University. [Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip](#), 2004, 528: 321–325
- 33 Hao J, Lu X, Ding Y, et al. Primary beam-loading tests on DC-SC photoinjector at Peking University. [Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip](#), 2006, 557: 138–141
- 34 Quan S, Hao J, Lin L, et al. Stable operation of the DC-SRF photoinjector. [Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip](#), 2015, 798: 117–120
- 35 Zhu F, Quan S, Xu W, et al. A compact high-average current photo-injector. *High Energy Phys Nucl Phys*, 2007, 31: 496–500
- 36 He F S, Hao J K, Zhang B C, et al. Design of a capacitive main power coupler for RF superconducting accelerators. [Chin Phys C](#), 2008, 32: 584–588
- 37 Quan S, Zhu F, Hao J, et al. 3.5-Cell large grain niobium superconducting cavity for a DC superconducting RF photoinjector. [Phys Rev Spec Top Accel Beams](#), 2010, 13: 042001
- 38 Lin L, Hao J K, Xie H M, et al. Stable operation of the 2 K cryogenic system for the superconducting accelerator at Peking University. [Chin Phys Lett](#), 2013, 30: 080702
- 39 Wen X, Huang S, Lin L, et al. Superradiant THz undulator radiation source based on a superconducting photo-injector. [Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip](#), 2016, 820: 75–79
- 40 Feng L W, Lin L, Huang S L, et al. Ultrafast electron diffraction with megahertz MeV electron pulses from a superconducting radio-frequency photoinjector. [Appl Phys Lett](#), 2015, 107: 224101
- 41 Zhao S, Huang S, Lin L, et al. Longitudinal phase space improvement of a continuous-wave photoinjector toward X-ray free-electron laser application. [Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip](#), 2021, 1018: 165796
- 42 Luo X, Lao C, Zhou K, et al. Design and fabrication of the 2×4-cell superconducting linac module for the free-electron laser. [Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip](#), 2017, 871: 30–34
- 43 Zhu F, Quan S W, Lin L, et al. A 1.3 GHz cryomodule with 2×9-cell cavity for SET at Peking University. In: Proceedings of SRF2015, 2015. 1443–1445
- 44 Liu Y Q, Chen M, Huang S, et al. Engineering design of low-emittance DC-SRF photocathode injector. In: Proceedings of the 39th Free Electron Laser Conference, 2019. 460–462
- 45 Liu Y, Zhuang D, Wang F, et al. The performance of RF power couplers with capacitive coupling for SRF accelerators. [Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip](#), 2021, 1010: 165565
- 46 Tan T, Jia H, Zhao S, et al. Sub-micron normalized emittance measurement for a MeV continuous-wave electron gun. [Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip](#), 2023, 1045: 167552
- 47 Xiang R, Lin L, Zhang B C, et al. Research and fabrication of the photocathode used in DC-SC photocathode RF electron gun (in Chinese). *Atomic Energy Sci Technol*, 2004, 38: 185–188 [向蓉, 林林, 张保澄, 等. 用于DC-SC光阴极微波电子枪中的Cs₂Te光阴极研制. *原子能科学技术*, 2004, 38: 185–188]
- 48 Dai J, Quan S W, Chang C, et al. Cs₂Te photocathode fabrication system at Peking University. [Chin Phys C](#), 2012, 36: 475–478
- 49 Ouyang D, Zhao Y, Xie H, et al. Performance of bialkali photocathode in DC-SRF photoinjector. [Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip](#), 2022, 1026: 166204
- 50 Lu X Y, Lin L, Zhao K, et al. Drive laser system of a high average current photocathode electron gun in PKU (in Chinese). *High Energy Phys Nucl Phys*, 2004, 28: 881–884 [鲁向阳, 林林, 赵夔, 等. 北京大学高平均流强光阴极电子枪驱动激光系统. *高能物理与核物理*, 2004, 28: 881–884]
- 51 Wang Z W, Huang S L, Lin L, et al. Drive laser system for the DC-SRF photoinjector at Peking University. [Chin Phys C](#), 2016, 40: 017004
- 52 Feng L W, Wang T Y, Jia H Y, et al. Peking University's DC-SRF-II photoinjector drive laser system (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2022, 34: 104016 [冯立文, 王天一, 贾豪彦, 等. 北京大学DC-SRF-II注入器光阴极驱动激光系统. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 104016]
- 53 Wu T, Xu H, Xu J Q, et al. Design of the photocathode drive laser system for high current electron beam operation of DC-SRF-II gun (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2022, 34: 104018 [吴桐, 徐航, 徐金强, 等. 强流目标的DC-SRF-II光阴极驱动激光系统设计. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 104018]
- 54 Liu F, Huang S, Si S, et al. Generation of picosecond pulses with variable temporal profiles and linear polarization by coherent pulse stacking in a birefringent crystal shaper. *Opt Express*, 2019, 27: 1468

Summary for “直流-射频超导光阴极电子枪”

DC-SRF photocathode gun

Senlin Huang^{1,2*}, Kexin Liu^{1,2}, Kui Zhao^{1,2} & Jiaer Chen^{1,2}¹ State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China;² Institute of Heavy Ion Physics, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China* Corresponding author, E-mail: huangsl@pku.edu.cn

The DC-SRF photocathode gun, an important member of superconducting radio-frequency (SRF) guns, is a distinguished compact mega-electron-volt (MeV) electron source capable of generating picosecond to sub-picosecond electron pulses at megahertz (MHz) and higher repetition rate. The concept of DC-SRF was conceived by the SRF Accelerator Laboratory of Peking University in 2001, which combines a DC gap and a 1.3 gigahertz (GHz) SRF cavity connected by a short drift tube around 10 mm long. By introducing the DC gap, the semiconductor photocathode is moved out from the SRF cavity, which successfully solves the compatibility problem between the photocathode and the SRF cavity as validated by later experiments. Besides, the high vacuum in the cryogenic DC structure allows the usage of green laser photocathodes, which benefits the generation of high repetition rate, high average current electron beams. The development of the DC-SRF photocathode gun has so far undergone three stages: The prototype, DC-SRF-I, and DC-SRF-II. The feasibility of the DC-SRF concept was first tested in 2004 with the prototype employing a 1.5-cell SRF cavity and operated at pulsed mode under 4.2–4.4 K. In the following decade, the first-generation DC-SRF gun, DC-SRF-I, was developed with the purpose to deliver electron beams for research on infrared (IR) FEL, energy recovery linac, terahertz (THz) radiation, etc, and for a higher energy gain, it employed a 3.5-cell SRF cavity. The DC-SRF-I gun was brought into stable operation in 2014 with a DC voltage of 45–50 kV, an SRF cavity gradient of 7–9 MV/m (corresponding to an energy gain around 3 MeV), and a dark current evaluated to be lower than 1 nA. It is the first SRF gun that can operate steadily with semiconductor photocathodes. The MHz repetition rate electron beam from the DC-SRF-I gun had been used for applications including high repetition rate superradiant THz undulator radiation, ultrafast electron diffraction, etc. In 2015, the electron beam was injected into a 2×9-cell SRF linac and the energy was boosted to 10–20 MeV. Until DC-SRF-I's shutdown in 2016, no degradation of the SRF cavity had been observed. The design and the manufacturing technology, however, had imposed limits on the improvement of DC-SRF-I's performance. With the goals to achieve low-emittance CW operation and to generate high average current electron beam, the development of the second-generation DC-SRF gun, DC-SRF-II, was started in 2016. The physics design was accomplished in 2017, in which the DC voltage is increased to 100 kV and a 1.5-cell SRF cavity is adopted with an expected gradient of 13–14 MV/m. K₂CsSb photocathode is used in combination with temporal and spatial shaping of the drive laser. The beam optics is also carefully designed for optimized emittance compensation. Simulation indicates that a normalized emittance of 0.33 mm-mrad can be achieved at a bunch charge of 100 pC with the above measures. Based on the experiences with DC-SRF-I and the SRF linacs developed by the Laboratory, the engineering design and fabrication of DC-SRF-II have been greatly improved. Especially, a TTF3-type RF power coupler with enhanced cooling has been employed, allowing CW operation of DC-SRF-II with a maximum average current up to 10 mA. DC-SRF-II was built in 2021. It has succeeded in CW operation with a bunch charge of 100 pC and a repetition rate of 1 MHz. The dark current of the gun is below 1 pA and the normalized emittance of the delivered electron beam is at sub-mm-mrad level. These indicate a leading performance among the SRF guns worldwide.

continuous-wave electron source, photocathode gun, high repetition rate electron beam, DC-SRF gun, semiconductor photocathode, photocathode drive laser

doi: [10.1360/TB-2022-1091](https://doi.org/10.1360/TB-2022-1091)