



·高亮度束流物理及技术·

北京大学 DC-SRF-II 注入器光阴极驱动激光系统

冯立文¹, 王天一¹, 贾豪彦¹, 刘中琦¹, 徐航^{2,3}, 黄森林¹, 刘克新¹

(1. 北京大学核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871; 2. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;
3. 中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049)

摘要: 为满足北京大学新一代超导注入器 DC-SRF-II 注入器的需求, 设计了新的光阴极驱动激光系统。系统采用模块化的布局, 可以工作在从单脉冲到 81.25 MHz 连续波模式, 绿光输出功率 1.41 W @ 1 MHz。系统实现了激光的纵向和横向整形, 纵向整形后的激光脉冲为平顶分布, 脉宽约为 18 ps, 横向则为截断高斯分布。实验结果显示, 输出激光的 RMS 功率波动为 1.8%, 指向抖动小于 1 μ rad。

关键词: 光阴极; 光阴极驱动激光; 激光整形; 激光传输

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.210343

Peking University's DC-SRF-II photoinjector drive laser system

Feng Liwen¹, Wang Tianyi¹, Jia Haoyan¹, Liu Zhongqi¹, Xu Hang^{2,3}, Huang Shenlin¹, Liu Kexin¹

(1. State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China;
2. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A new drive laser system was developed to meet the requirement of DC-SRF-II photoinjector at Peking University. This modular drive laser system can operate from single pulse to 81.25 MHz CW mode, with green light output power 1.41 W @ 1 MHz. Longitudinal and transverse shaping were also implemented in the system, resulting in near flat-top 18 ps laser pulse with cut-Gaussian transverse profile. The stability measurement shows that the system output power stability is 1.8% RMS, and the pointing stability is less than 1 μ rad.

Key words: photocathode, photocathode drive laser, laser shaping, laser transport

光阴极注入器是一种可产生高品质脉冲电子束的电子源, 在粒子加速器等领域具有广泛应用。半导体光阴极响应时间短、量子效率高, 因此被广泛应用于产生各种短脉冲、高束团电荷量的电子束^[1]。对于光阴极注入器, 驱动激光的脉冲形状、截面强度分布以及功率直接决定了所产生电子束的时间结构、束斑形状和流强, 因此性能优良的驱动激光系统是光阴极注入器正常运行所必需的。为实现较低的发射度, 驱动激光需要引入纵向^[2]和横向^[3]整形系统。另一方面, 随着对光阴极注入器流强的需求越来越高, 光阴极驱动激光系统的重复频率和平均功率也在不断提高。美国 JLab 实验室的直流高压注入器采用重复频率为 74.85 MHz、最高输出功率 24 W、中心波长 532 nm 的绿光作为驱动激光^[4]。日本 KEK 实验室也为 c-ERL 装置发展了重复频率 85 MHz、输出功率 15 W、中心波长 515 nm 的驱动激光系统^[5-6]。美国康奈尔大学近年来研发的高流强光阴极电子枪, 目前已经产生了 76 mA 的最高纪录^[7], 其采用的驱动激光系统重复频率为 1.3 GHz, 绿光的最高输出功率到达了 167 W^[8]。国内中国工程物理研究院 FEL 驱动激光系统运行在频率 54.167 MHz 的宏脉冲模式^[9]。中国科学院高能物理研究所 500 kV 高压电子枪平台已经获得了 5 mA 流强的电子束^[10], 驱动激光系统有 100 MHz 和 1.3 GHz 两种运行模式^[11]。

DC-SRF-II 注入器是北京大学在 DC-SRF-I 基础上研发的新一代低发射度超导光阴极注入器^[12-14], 该注入器选用 K₂CsSb 作为光阴极材料^[15], 设计脉冲重复频率 10 MHz, 平均流强 1 mA^[16]。为 DC-SRF-II 注入器专门设计的驱动激光系统输出中心波长为 519 nm, 激光脉冲在纵向上为平顶分布, 在横向上为截断高斯分布, 1 MHz 和 10 MHz

* 收稿日期: 2021-08-06; 修订日期: 2022-04-18

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFA0701000)

联系方式: 冯立文, lvfeng@pku.edu.cn

模式下绿光脉冲能量均不小于 100 nJ。此外,还需要激光系统具有同步和脉冲选单功能。本文将介绍该整形驱动激光系统的结构设计、主要功能和实验结果。

1 驱动激光系统结构

北京大学 DC-SRF-II 注入器驱动激光系统整体布局如图 1 所示。该系统由种子源、放大系统、倍频系统、纵向整形系统、横向整形系统、互相关测量系统和激光传输系统 7 个部分组成。种子源产生与超导加速器微波系统同步的锁模脉冲激光,经过放大系统后进入倍频系统,产生二倍频绿光,再经过纵向、横向整形系统和传输、测量系统,最后形成纵向为近平顶分布、横向为截断高斯分布的激光脉冲入射到光阴极表面。

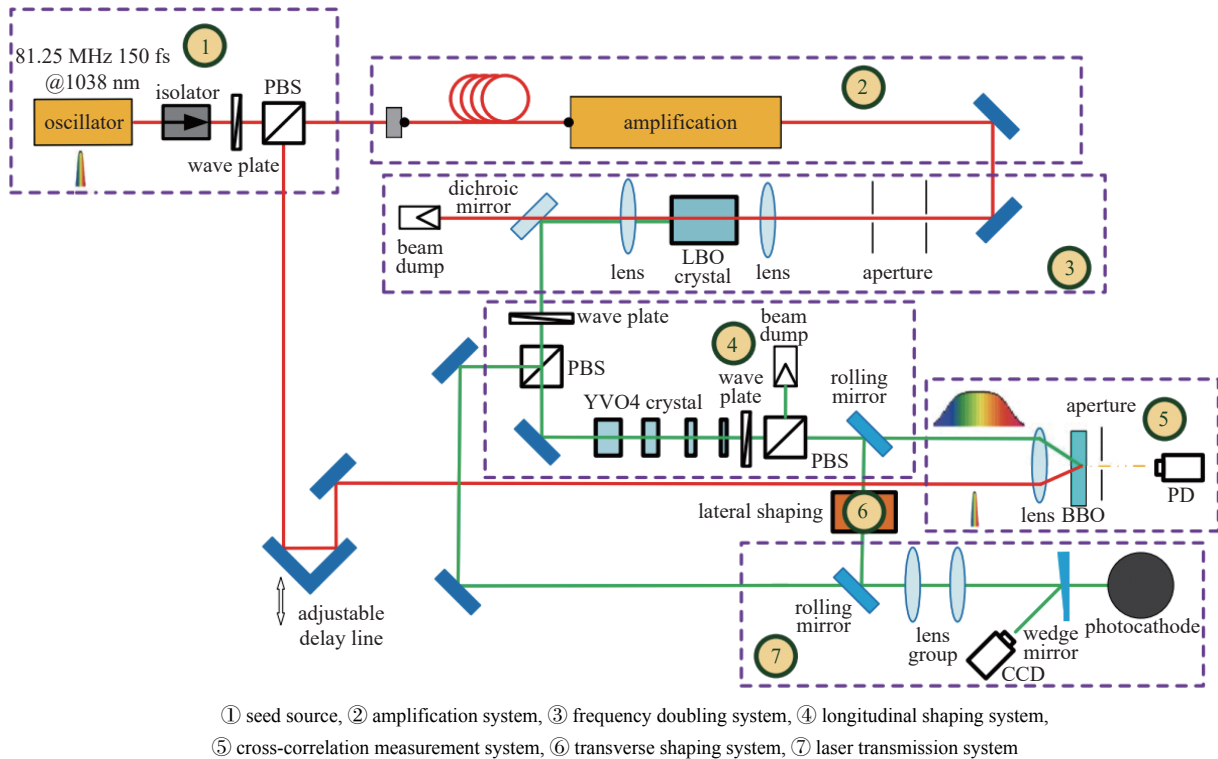


Fig. 1 Peking University's DC-SRF injector photocathode drive laser system

图 1 北京大学 DC-SRF 注入器双碱光阴极驱动激光系统

激光种子源选用了 Menlo System 公司的 Orange 锁模光纤激光器,其输出重复频率为 81.25 MHz,平均功率 100 mW,脉宽 160 fs,中心波长 1038 nm。种子源输出的激光经过自由空间隔离器后,利用偏振分光镜将其分成两路,其中一路用作放大器的输入,另一路则作为互相关测量的探测光。放大器由武汉华锐公司定制,输出参数见表 1。种子源输出的激光通过准直器耦合入单模保偏光纤,进入放大器后首先经过展宽、预放大,再利用高速光纤 AOM 进行第一级脉冲挑选,此时可以选择 3 种工作模式,分别是 1 MHz、10 MHz 和 81.25 MHz。经过第一级 AOM 后的激光进入主光纤放大级进行最终放大,在 1 MHz 和 10 MHz 模式下,主放大器输出的单脉冲能量约为 2 μJ。主放大器输出的激光,再经过第二级 AOM 斩波以及光栅压缩,最终可以输出约 1.5 ps,中心波长为 1037 nm 的红

表 1 放大器的输出参数表

Table 1 DC-SRF-II laser amplifier parameters

output power	21 W @ 10 MHz
	20.5 W @ 81.25 MHz
spectral width	2.2 W @ 1 MHz
	< 3 nm, @ 1037 nm
pulse energy	2 μJ @ 10 MHz
pulse width	1.5 ps @ 10 MHz & 1 MHz
	4 ps @ 81.25 MHz
M^2	< 1.3

外激光。

放大器输出的红外激光, 经过放大后进入倍频和纵向整形系统, 倍频晶体为福晶公司生产的 LBO 晶体。倍频产生的 519 nm 的激光通过偏振片分为两路, 一路是旁路光束, 输出 1.5 ps 左右的激光, 另外一路则通过 4 块 YVO₄ 晶体将激光纵向分布整形至宽度近 20 ps 的平顶脉冲。为了调试和监控纵向整形的输出, 搭建了互相关测量系统, 利用 1038 nm 种子激光和 519 nm 输出绿光进行和频, 以测量平顶光束的实际分布情况。纵向整形后的激光, 再经过由扩束镜和可调光阑组成的横向整形系统, 整形成具有横向截断高斯分布的激光光斑。整形后的激光进入到传输系统, 利用透镜组进行传像传输, 最终将激光脉冲投影到光阴极表面。为方便调试, 传输系统中设计有虚阴极光斑监控、光斑位置调节等功能。

2 激光倍频和纵向整形

DC-SRF-II 驱动激光系统倍频与纵向整形系统的光路布局如图 2 所示。倍频系统选用 3 mm×3 mm×10 mm 的 X-cut LBO 晶体, 工作在非临界相位匹配下, 理论工作温度 184.85 °C。晶体温控炉为 COVESION 公司生产的 OC2 精密温控炉, 在实验中, 通过调节温控器设置获得的实际最佳工作温度点在 183.6 °C, 此时输出二倍频激光功率为 1.41 W, 倍频效率达 52%。此时经过倍频产生的绿光脉冲近似为高斯分布, 脉宽 2.5 ps。

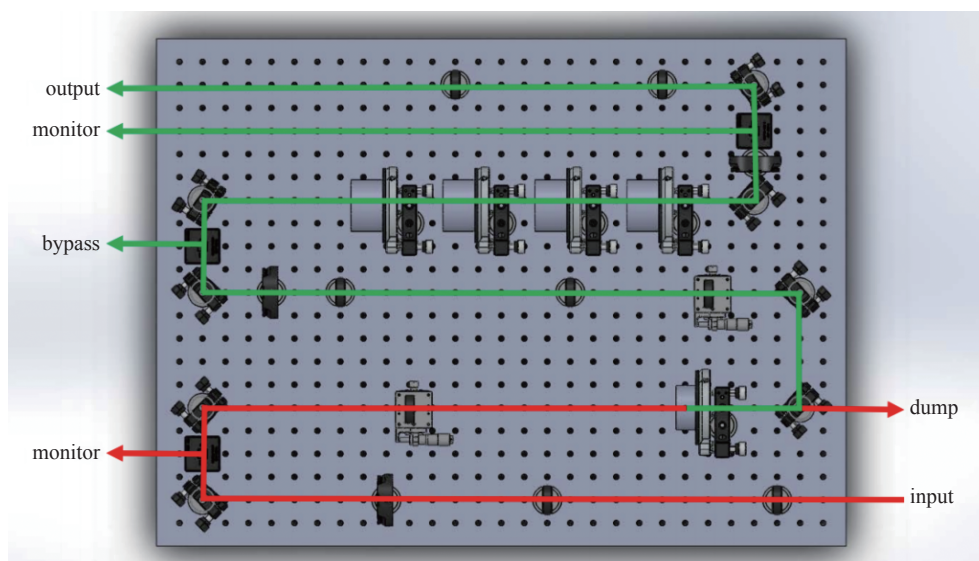


Fig. 2 Schematic diagram of frequency doubling and longitudinal shaping system

图 2 DC-SRF 驱动激光系统倍频与纵向整形系统光路示意图

纵向整形系统由一系列非等长的双折射晶体(YVO₄)构成。通过调节, 使晶体的光轴相对于输入光偏振方向成 45°、0°、45°、0°交替分布, 由于双折射效应, 激光脉冲在通过这些晶体时, 会沿快、慢轴分裂成两个不同偏振方向的脉冲。对于此处使用的 519 nm 绿光而言, 厚 1 mm 的 YVO₄ 晶体可以在 o 光和 e 光之间引入约 1 ps 的时间延迟。系统中采用 1、2、4、8 mm 四种厚度的晶体, 经过堆叠后, 可以得到脉宽约 20 ps 的纵向平顶激光输出。

图 3 为互相关测量系统。该系统将一部分种子源的输出红外激光作为探测光, 与堆叠后的待测绿光共同聚焦至 BBO 晶体中, 通过和频产生紫外信号光。通过可变光学延迟线改变探测光与待测光的时间延迟, 即可以得到待测绿光的时间分布。实际测得互相关信号如图 4 所示, 堆叠后的激光半高宽约 18 ps, 上升沿与下降沿约 6 ps, 形状近似平顶。

3 横向整形与传输

横向整形系统选用可调光阑方式实现, 为保证经过光阑的光可以完整地成像到光阴极表面, 需要将横向整形与激光传输作为一个整体系统设计, 光路如图 5 所示。纵向整形系统输出的激光, 先通过可调扩束系统被调节到合适的横向尺寸, 再使用可调的小孔光阑截取光束中心强度变化较为平坦的区域实现横向整形。在北京大学 DC-SRF-II 装置中, 激光室与注入器之间需要经过一段长度约 10 m 的传输光路, 为此采用一对焦距为 2.5 m 的透镜实现从光阑到光阴极表面的 4-f 传像。两透镜间安装了一段穿墙的真空气管, 以减少由激光室与加速器屏蔽大厅之间气流所造成的扰动。在激光进入注入器真空窗前, 还安装了一对电动调节的反射镜, 通过控制反射镜的角度可

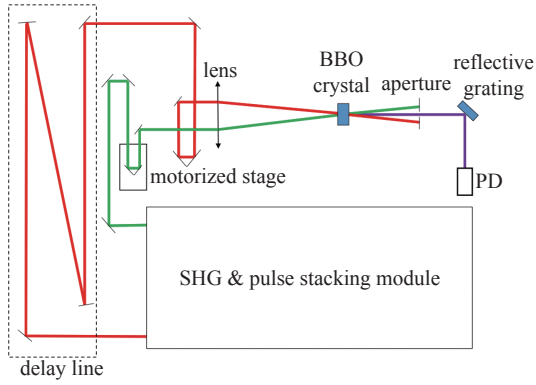


Fig. 3 Schematic diagram of cross-correlation measurement

图 3 互相关光路示意图

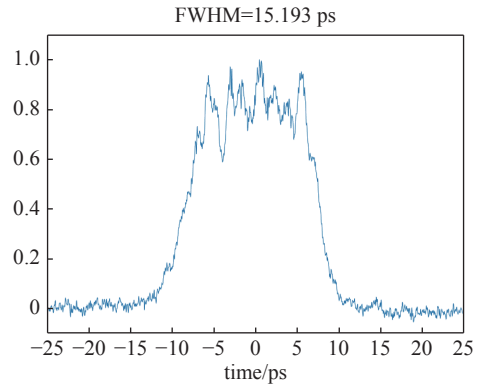


Fig. 4 Laser pulse shape measured by cross-correlation measurement system

图 4 利用互相关测量系统测得的激光脉冲形状

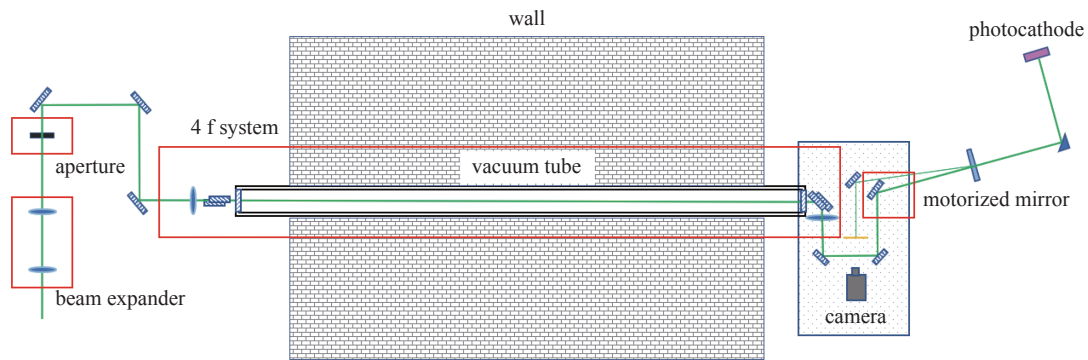


Fig. 5 DC-SRF-II laser transverse shaping and transmission system

图 5 DC-SRF-II 注入器驱动激光横向整形与传输系统

以改变激光打在光阴极上的位置,从而实现光斑扫描功能。注入器真空窗前,还安装有 5% 反射率的楔形采样镜,楔形采样镜将采样的光斑传输到虚阴极靶上。通过调节虚阴极靶的位置,可使楔形镜到光阴极的距离等于其到虚阴极靶的距离,从而保证虚阴极上观察到的光斑与注入器阴极表面的光斑一致。图 6 为进入横向整形前、经过横向整形和传输后的激光光斑分布。

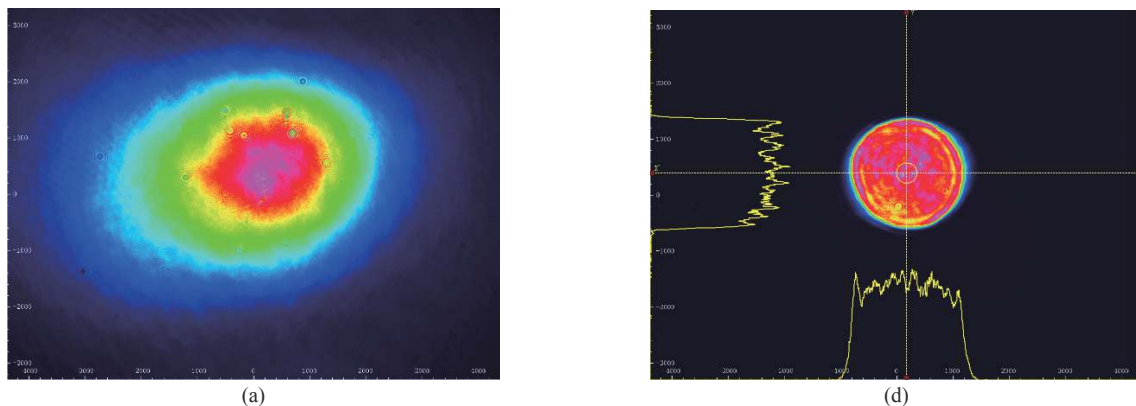


Fig. 6 (a) Laser distribution before transverse shaping; (b) Laser distribution at the virtual cathode after transverse shaping and transmission

图 6 (a) 横向整形前光斑分布; (b) 经过横向整形和传输后虚阴极处光斑分布

4 稳定性测量

系统搭建完成后,我们对驱动激光系统的指向和功率稳定性进行了测试。指向稳定性采用 CCD 相机对虚阴极光斑进行连续采样,再利用 Matlab 计算出每次采样的光斑中心位置值。其中 1 h 指向稳定性测量结果如图 7 所示,光斑中心在 X 方向和 Y 方向的位置抖动分别为 $1.75 \mu\text{m}$ 与 $2.51 \mu\text{m}$, X 与 Y 方向的指向稳定性分别为 $0.175 \mu\text{rad}$ 和 $0.251 \mu\text{rad}$ 。在注入器真空窗前,采用索雷博公司 S130 功率探头对激光功率稳定性进行了监测,结果如图 8 所示。

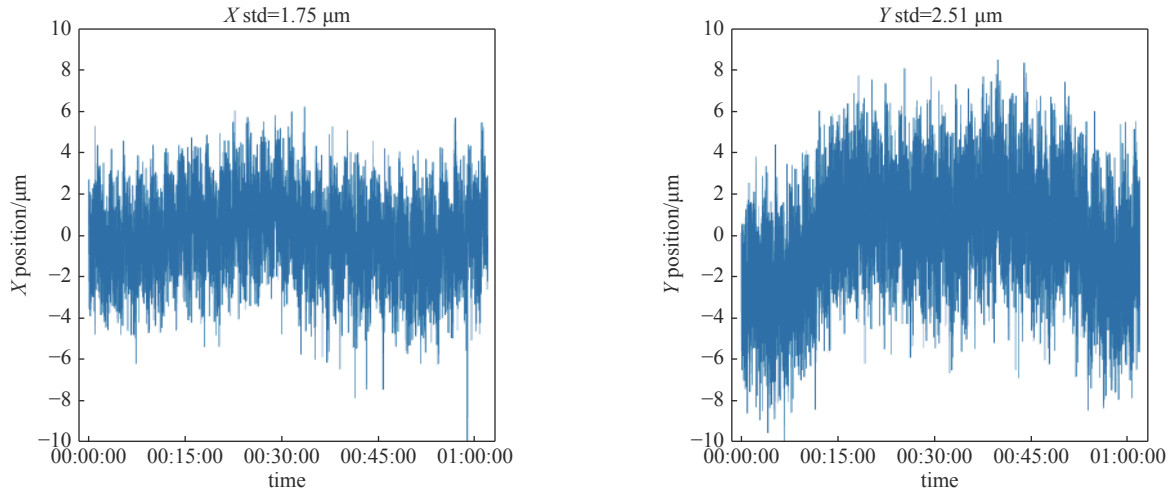


Fig. 7 The spot center position jitter at the virtual cathode

图 7 虚阴极处光斑中心位置抖动

在 1 MHz 运行模式下,连续测量 7 h 的激光功率抖动为 1.21%。

5 结论

为北京大学 DC-SRF-II 光阴极注入器设计的全新的光阴极驱动激光系统采用模块化设计,可工作在单脉冲、宏脉冲、1 MHz、10 MHz、81.25 MHz 等不同的运行模式。通过纵向和横向整形,输出激光脉冲纵向为近似平顶分布,横向为截断高斯分布。最新的注入器束流实验结果表明,该驱动激光系统能够满足 DC-SRF-II 注入器的要求,不仅实现了束流设计流强,也有效减小了束流发射度。

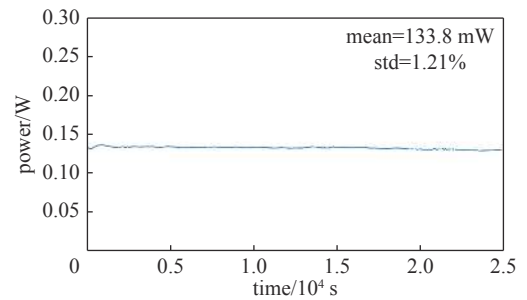


Fig. 8 Seven hour laser power stability measurement

图 8 7 小时激光功率稳定性测量

参考文献:

- [1] Stephan F, Krasilnikov M. High brightness photo injectors for brilliant light sources[M]//Jaeschke E, Khan S, Schneider J, et al. Synchrotron light sources and free-electron lasers: Accelerator physics, instrumentation and science applications. Cham: Springer, 2020: 603-646.
- [2] Sheehy B. ERL R&D: laser and laser light transport[R]. BNL-90921-2010-IR, 2010.
- [3] Li S, Alverson S, Bohler D, et al. Ultraviolet laser transverse profile shaping for improving X-ray free electron laser performance[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2017, 20: 080704.
- [4] Zhang Shukui, Hardy D, Neil G, et al. Characterization and performance of a high-power solid-state laser for a high-current photo-cathode injector[C]//Proceedings of the 27th International Free Electron Laser Conference. 2005: 351-354.
- [5] Ito I, Kawasaki T, Nakamura N, et al. Development of an YB-doped fiber laser system for an ERL photocathode gun[C]//Proceedings of IPAC10. 2010: 2141-2143.
- [6] Akemoto M, Arakawa D, Asaoka S, et al. Construction and commissioning of the compact energy-recovery linac at KEK[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2018, 877: 197-219.
- [7] Zhao Zhi, Dunham B M, Wise F W. Generation of 167 W infrared and 124 W green power from a 1.3-GHz, 1-ps rod fiber amplifier[J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 25065-25070.
- [8] Bartnik A, Gulliford C, Bazarov I, et al. Operational experience with nanocoulomb bunch charges in the Cornell photoinjector[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2015, 18: 083401.
- [9] 黎维华, 唐军, 陈亚男, 等. FEL驱动激光器的研究[J]. *激光技术*, 2009, 33(6): 619-621,625. (Li Weihua, Tang Jun, Chen Ya'nan, et al. Research of the drive laser for FEL[J]. *Laser Technology*, 2009, 33(6): 619-621,625)
- [10] Li Xiaoping, Wang Jiuqing, Xu Jinqiang, et al. Constructions and preliminary HV conditioning of a photocathode direct-current electron gun at IHEP[J]. *Chinese Physics Letters*, 2017, 34: 072901.
- [11] 李孝荣, 徐金强, 孙大睿. 高能所光阴极驱动激光系统研制[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 021001. (Li Xiaoshen, Xu Jinqiang, Sun Darui. Drive laser system for a photocathode at IHEP[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 021001)
- [12] Wang Zhiwen, Huang Senlin, Lin Lin, et al. Drive laser system for the DC-SRF photoinjector at Peking University[J]. *Chinese Physics C*, 2016, 40: 017004.

- [13] 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, 789: 117-120.
- [14] Liu Yunqi, Chen Meng, Huang Senlin, et al. Engineering design of low-emittance DC-SRF photocathode injector[C]//Proceedings of the 39th International Free Electron Laser Conference (FEL2019). 2019: 460-462. .
- [15] Ouyang Dongming, Feng Liwen, Huang Senlin, et al. Research on alkali antimonide photocathode fabrication recipe at PKU[C]//Proceedings of 63th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linacs. 2019: 120-122.
- [16] Hao Jiankui, Quan Shengwen, Lin Lin, et al. Development of DC-SRF injector at Peking University[C]//Proceedings of 6th International Particle Accelerator Conference. 2015: 2944-2947.