

高能所光阴极驱动激光系统研制^{*}

李孝桑^{1,2}, 徐金强¹, 孙大睿¹

(1. 中国科学院 高能物理研究所, 北京 100049; 2. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049)

摘 要: 能量回收型直线加速器(ERL)可能提供低发射度、高平均流强的连续电子束团,其电子枪的光阴极需要高重复频率、高平均功率的驱动激光系统。采用先进的光纤激光技术,特别是在激光系统中采用了掺铋光子晶体增益光纤,能实现高重复频率高平均功率激光输出。利用啁啾脉冲放大(CPA)技术,通过优化设计,将重复频率 100 MHz 和 1.3 GHz 的两套激光振荡源集成到同一个激光系统,整个激光系统的结构简化,使用方便。两种重复频率激光倍频效率分别达到 50% 和 30%,绿光能达到 5 W 以上,满足光阴极实验平台的使用要求。

关键词: 光阴极; 光阴极驱动激光; 光纤激光; 光子晶体光纤; 光纤放大器

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **doi:**10.11884/HPLPB201830.170344

在光阴极中,光阴极发射的电子束团由激光脉冲激发,激光脉冲的结构和质量决定着电子束团的结构和质量。ERL 加速器上可以采用高重复频率的连续脉冲,连续脉冲替代以往低重复频率的微秒脉冲串,在显著提高加速器平均流强的情况下,选用较小的束团电荷量,达到极低的电子发射度。束流脉冲的连续工作模式要求高重复频率的高平均功率光阴极驱动激光系统。近几年国际上的同类实验研究,ERL 光阴极驱动激光系统,在研制过程中都不断完善,由于要求的光参数指标较为复杂,逐渐演变成三种不同的结构。Jlab 实验室是传统的全固态结构,Cornell 采用的是光纤激光器,KEK 是固态振荡源和光纤放大器混合结构^[1-6]。不过,使用光纤技术已经是 JLab 实验室、Cornell 大学和 KEK 等研究机构的共识^[5-6]。本文介绍在 高能物理研究所建立的光阴极实验平台上,研制的复合 100 MHz 和 1.3 GHz 两种脉冲重复频率的光阴极驱动激光系统。将重复频率 100 MHz 和 1.3 GHz 的两套光纤激光振荡源使用了一套主激光光纤放大器。在主光纤放大器中,为了避免高功率脉冲在光纤中的非线性效应,采用了脉冲展宽和压缩技术^[7-10]。两种重复频率激光工作时,倍频后的绿光达到 5 W 以上。

1 激光系统结构和基本参数

Cornell 大学的 ERL 装置中,用低重复频率 50 MHz 和高重复频率 1.3 GHz 的两套独立的激光系统,分别提供两种重复频率,用于束流的调试和运行模式。我们的实验平台也需要两种重复频率激光,100 MHz 和 1.3 GHz 的两种脉冲重复频率激光脉冲。分别对应于 1 μm · rad 和 0.1 μm · rad 两种发射度指标,束团电荷量对应于 77 pC 和 7.7 pC。对于激光系统的指标要求如表 1 所示。

表 1 两种运行状态对应的激光要求

Table 1 Laser requirements for two operation modes

parameters	electron bunch charge/pC	pulse energy at cathode/nJ	pulse repetition rate/MHz	power at cathode/W	pulse length (flattop)/ps
1st mode	77	18	100	1.8	20~30
2nd mode	7.7	1.8	1.3	2.3	20~30

如果使用两套独立的激光系统,激光系统光路就会庞大而且复杂。通过优化设计,研制出一套激光系统,把 100 MHz 和 1.3 GHz 的激光集成到一起,两种重复频率的激光可以使用相同脉冲压缩、倍频系统、整形系统和传输系统,从而使得整个激光系统占据的空间小,结构简洁,使用方便。激光的模式选择可以在小功率的预先放大器前通过激光振荡源切换。激光系统的结构如图 1 所示。100 MHz 和 1.3 GHz 的激光种子源分别是被动锁模飞秒激光器和主动锁模的皮秒激光器,激光参数差异较大,要复合在同一激光系统中使用,需要

^{*} 收稿日期:2017-08-31; 修订日期:2017-10-23
基金项目:国家自然科学基金项目(11275217,11475199);高能所创新基金项目
作者简介:李孝桑(1991—),男,硕士研究生,从事激光技术研究;lixs@ihep.ac.cn。
通信作者:徐金强(1965—),男,副研究员,从事激光技术研究;xujq@ihep.ac.cn。

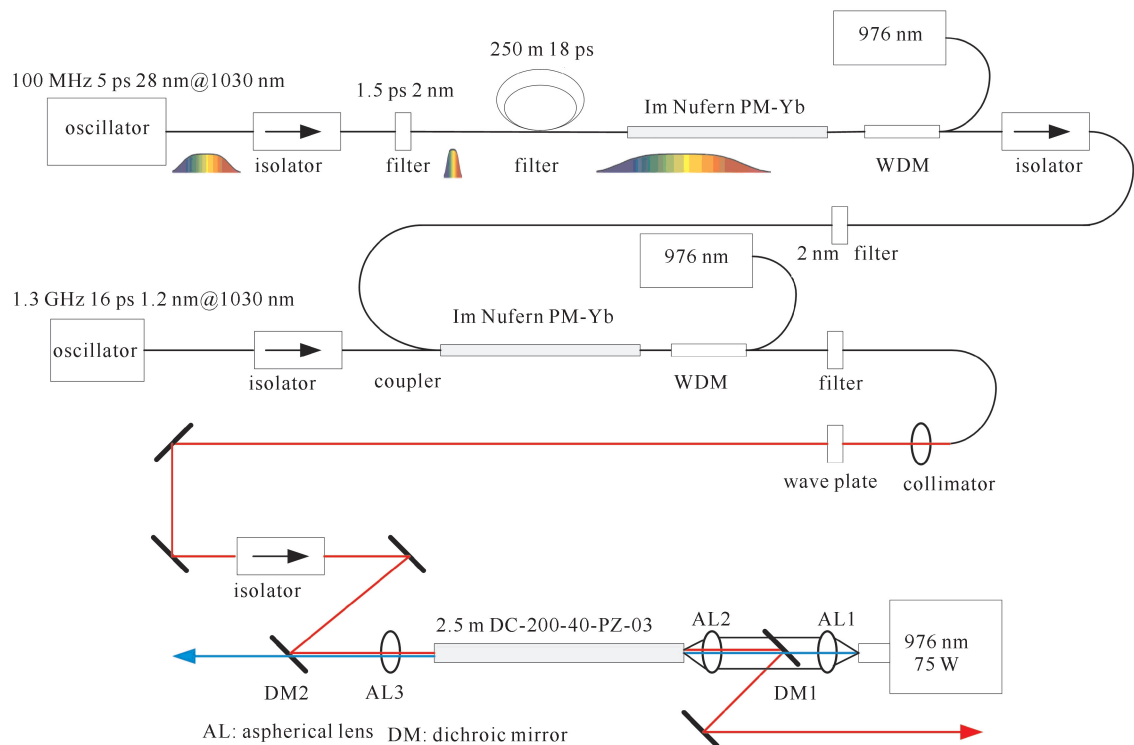


图 1 Layout of photocathode drive laser system

图 1 光阴极驱动激光系统结构

对激光参数进行特别处理。主动调制锁模的皮秒激光光谱比较窄,在 1.2 nm 左右,而飞秒激光光谱比较宽,高达 28 nm,不利于后续的倍频优化。对飞秒激光振荡源进行优化处理,使其接近皮秒激光的参数是一个比较合适的选择。飞秒振荡源经过优化后,输出脉冲就可以与 1.3 GHz 主动锁模的皮秒激光复合进同一个激光系统,从而两路振荡源可以使用相同的预先放大器、主放大器、倍频、整形以及后续的激光光路。

2 激光脉冲压缩和激光倍频

由于高功率激光脉冲经过光纤时,引起的非线性效应而产生新光谱,影响后续的脉冲压缩和倍频,所以进入放大器的激光脉冲需要长的脉冲宽度,降低峰值功率,但这对于后续的激光倍频和纵向整形是不利的,要解决这个问题,需要使用 CPA 技术,先把展宽的带有正色散激光脉冲放大,然后在激光主放大器后再进行激光脉冲压缩。

图 2 为脉冲压缩器的结构。脉冲压缩使用了一对透射光栅,激光一共通过光栅四次。包括激光扩束准直镜片的损耗在内,激光的输出功率降低接近 4 成。在对 100 MHz 激光的单独测量中,主放大器输出 16 W,压缩器输出降低到 9.6 W,测得倍频后的绿光达到 5.6 W,据此计算倍频效率达到 58%。100 MHz 和 1.3 GHz 激光复合在一起后,两套激光系统输出的光参数有差异,二者的压缩器的压缩参数因此也不一致。为了统一压缩器的参数,重新对 100 MHz 飞秒激光振荡源进行了脉冲展宽调整,使其输出脉冲能匹配振荡源为 1.3 GHz 的 450 mm 光栅距离的压缩器,以便在倍频系统中得到一致的小于 2 ps 的脉冲,满足脉冲的纵向整形需要。

实验发现对于 100 MHz 激光,经过这一调整后,在相同条件下,输出功率有所降低。可能需要进一步优化色散值。目前通过提高泵源功率补偿功率降低。

1.3 GHz 高重复频率由于脉冲重复频率高,单脉冲峰值功率较低,其倍频效率会比 100 MHz 激光低很多,而实际经过测量计算倍频效率达到了 30% 以上。

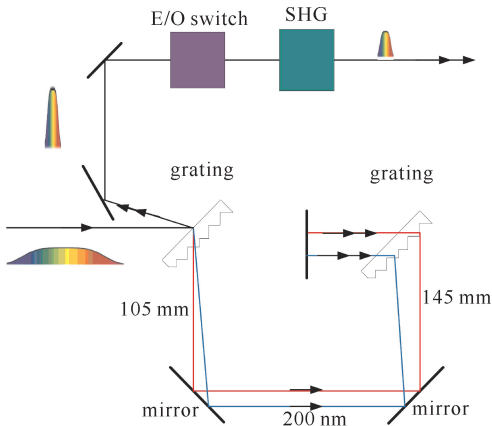


Fig. 2 pulse compressor, SHG

图 2 激光脉冲压缩器、倍频

3 激光脉冲纵向整形

对于直流高压光阴极,激光脉冲的纵向整形显著降低了束团内部的电荷分布密度,减少束团中电荷力引起的发射度增长,需要对激光脉冲进行横向和纵向整形。根据国际经验,激光的横向整形可以直接用光阑对高斯脉冲截取,不需要特别的均匀化处理。纵向整形一般采取脉冲延迟堆积方法获得柱状脉冲,也就是把倍频后输出的激光窄脉冲,通过不同的延迟后重新排列产生 20~30 ps 的矩形脉冲。

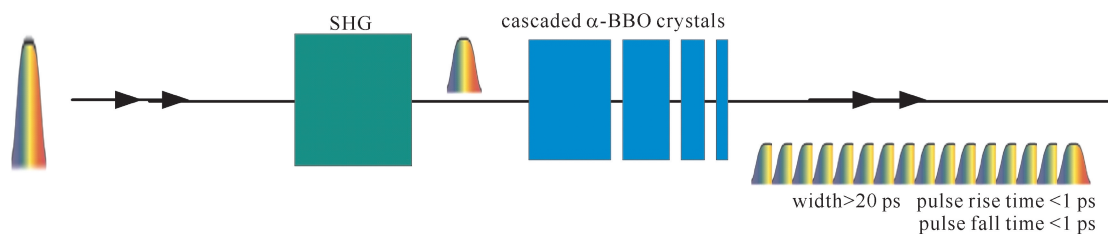


Fig. 3 pulse shaping by cascaded crystals
图 3 用级联的双折射晶体脉冲整形

图 3 是利用钽酸铋晶体进行脉冲堆积的示意图。该晶体的快轴和慢轴折射率差异较大,使用较薄的晶体就能使通过它的脉冲在两个轴上很快分开,达到延迟要求。显然矩形脉冲边沿的宽度取决于堆积前的脉冲边沿,堆积前的脉冲宽度最好小于 2 ps。光脉冲的堆积也不可能形成完全均匀分布的长激光脉冲,但是束团内部的电荷力会大大降低,出射后束团内部电荷力对电子密度的自然调整会使电子束团分布比激光更均匀。

如图 4(a)是一次实验中整形前的初始绿光脉冲,使用光学自相关仪测量,脉冲宽度为 1.3 ps。使该脉冲偏振方向与晶体的快慢轴成 45°,脉冲通过级联的钽酸铋晶体后,在两个光轴上,产生两个延迟脉冲。经过特别设计的不同厚度的晶体后,脉冲会经由不同延迟产生堆积形成矩形脉冲。根据晶体的快慢轴折射率,选取了 1.59,3.18,6.36 和 12.72 mm 四种厚度。因为没有直接的互相关测量工具,使用自相关仪测量。矩形脉冲的自相关曲线是三角形,根据三角形的宽度来推算矩形宽度。由图 4(b)可以看到整形后的矩形脉冲宽度为 29 ps。

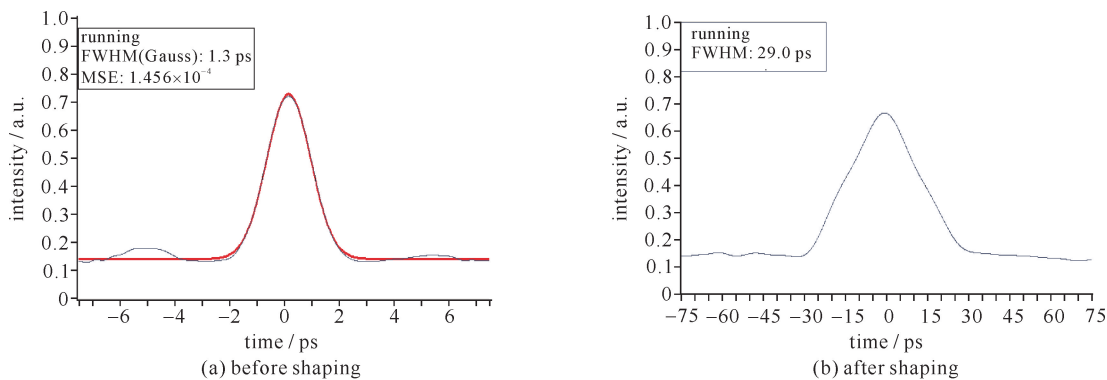


Fig. 4 Measurement results of pulse shaping
图 4 脉冲整形测量结果

4 入靶前激光功率

经过脉冲整形后,功率会因为纵向整形晶体的吸收和横向光阑的截取有所下降。测量纵向整形后的绿光功率,100 MHz 激光在主放大器泵源电流 35 A 时,1.3 GHz 激光在主放大器泵源电流 45 A 时,均能达到 5 W 以上。通过传输和横向整形后,功率达到 3 W 以上,满足设计要求。连续 10 h 测量 100 MHz 激光的绿光输出功率,标准偏差为 14.16 mW,功率变化如图 5 所示。

5 结 论

根据 ERL 光阴极实验平台的要求,我们研制出包含两

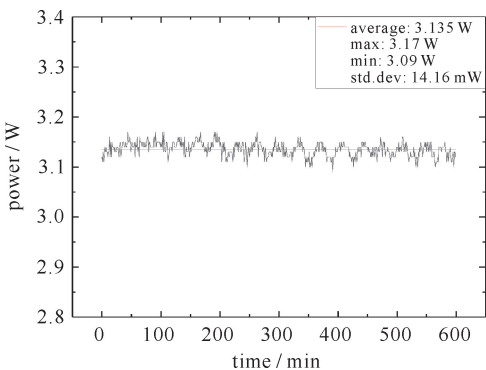


Fig. 5 Stability of laser power
图 5 激光功率稳定性

种重复频率振荡源的激光系统。把 100 MHz 和 1.3 GHz 两套激光振荡源集成到一个激光系统中,使用同一个主放大器、脉冲压缩器、倍频器、整形和传输光路,最大限度简化了激光系统,完成了激光脉冲的整形。下一步将进行激光系统各个部分的机械结构优化、模块化处理。增加恒温系统,降低激光系统运行对环境温度和洁净条件的严苛要求,为北京先进光源技术研发与测试平台中的光阴极驱动激光系统提供备份措施技术保障。近期将增加泵源,提升主放大器功率,实现未来高平均功率 ERL 加速器 100 mA 运行指标。

参考文献:

- [1] Ito I, Nakamura N, Dai Y, et al. Development of an Yb-doped fiber laser system for an ERL photocathode gun[J]. *Proceedings of Ipac*, 2010; 2141-2143.
- [2] Honda Y. Development of a photo-injector laser system for KEK ERL test accelerator[J]. *Proceedings of Ipac*, 2012; 1530-1532.
- [3] Sakanaka S, Akemoto M, Aoto T, et al. Status of the energy recovery linac project in Japan[J]. *Proceedings of Ipac*, 2009, **64**(s): 1278-1280.
- [4] Zhao Z, Bartnik A, Wise F W, et al. High-power fiber lasers for photocathode electron injectors[J]. *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, 2014, **17**(5):986-1000.
- [5] Ouzounov D G, Bazarov I V, Dunham B, et al. The laser system for the ERL electron source at Cornell University[C]//Particle Accelerator Conference. 2008; 530-532.
- [6] Onda T, Shinnosuke M, Shoji I. A new walk-off compensating BBO device with thinner-plate-stacked structure fabricated by room-temperature bonding[C]//Nonlinear Optics. 2013.
- [7] 徐金强, 孙大睿. 用于光阴极的光纤激光研制实验[J]. 强激光与粒子束, 2015, **27**: 051002. (Xu Jinqiang, Sun Darui. Development of fiber laser system for a photocathode gun. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, **27**: 051002)
- [8] 黄志华, 林宏奂, 王建军, 等. 基于光子晶体光纤的全光纤脉冲放大器[J]. 强激光与粒子束, 2014, **26**: 021001. (Huang Zhihua, Lin Honghuan, Wang Jianjun, et al. All-fiber pulsed amplifier based on photonic crystal fiber. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, **26**: 021001)
- [9] 黄志华, 许党朋, 林宏奂, 等. 高功率全光纤啁啾脉冲放大激光系统[J]. 强激光与粒子束, 2014, **26**: 091015. (Huang Zhihua, Xu Dangepeng, Lin Honghuan, et al. High power all-fiber chirped pulse amplification laser system. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, **26**: 091015)
- [10] Zhang S, Benson S, Evtushenko P, et al. A simple gating technique for high-average-current photo-injectors[J]. *Nuclear Inst & Methods in Physics Research A*, 2011, **629**(1):11-15.

Drive laser system for a photocathode at IHEP

Li Xiaoshen^{1,2}, Xu Jinqiang¹, Sun Darui¹

(1. *Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

2. *College of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The Energy Recovery Linac (ERL) can produce continuous electron bunches with low emittance at high average current. The photocathode electron gun needs high repetition rate, high average power drive laser system. Adopting advanced fiber laser technologies, especially using Yb-doped photonic crystal fiber in the laser system, a high repetition frequency, high average power laser system was set up. By using chirped pulse amplification (CPA) and optimizing the design, a 100 MHz oscillator and a 1.3 GHz oscillator were integrated into one laser system. The structure of the whole laser system can be simplified and easy to operate. The second harmonic generation (SHG) efficiencies of the laser system at two different repetition rates have already reached 50% and 30%, respectively. In addition, more than 5 W green light has been achieved, which meets the needs of test platform of photocathode at IHEP.

Key words: photocathode; drive laser for a photocathode; fiber laser; photonic crystal fiber; fiber amplifier

PACS: 42.55.Wd; 42.60.-v; 85.60.Ha