



·高亮度束流物理及技术·

强流目标的 DC-SRF-II 光阴极驱动激光系统设计

吴 桐^{1,2}, 徐 航^{3,4}, 徐金强³, 李京祎³, 黄森林^{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; 3. 中国科学院高能物理研究所粒子加速物理与技术重点实验室, 北京 100049; 4. 散裂中子源科学中心, 广东 东莞 523803)

摘 要: 为推动北京大学超导加速器实验装置不断向强流目标迈进, 提出 100 W 红外高重复频率光阴极驱动激光的设计方案, 主放大器采用先进的光子晶体增益光纤, 保证输出光束的质量。对激光系统中的关键问题, 如各部分功率指标、脉冲展宽和压缩、激光耦合等进行了设计, 并且考虑了激光的非线性影响。为实现强流加速器开机运行所必需的诊断模式, 也提出了对于高重复频率激光进行两级选频的独特设计方案。将高速的 SOA 光开关和低速的声光调制器相结合, 产生宏脉冲结构的输出激光, 从而实现加速器在诊断模式下的运行。

关键词: 强流电子加速器; 光阴极驱动激光; 宏脉冲诊断模式; 激光传输

中图分类号: TN248

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.220244

Design of the photocathode drive laser system for high current electron beam operation of DC-SRF-II gun

Wu Tong^{1,2}, Xu Hang^{3,4}, Xu Jinqiang³, Li Jingyi³, Huang Senlin^{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;

3. Key Laboratory of Particle Acceleration Physics & Technology, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Spallation Neutron Source Science Center, Dongguan 523803, China)

Abstract: We present the design of a 100 W high repetition rate photocathode drive laser system for realizing high average current operation of the superconducting accelerator at Peking University. To achieve good beam quality and reliability, we choose photonic crystal fiber (PCF) as the gain medium of the main amplification unit. In addition, we address several key issues for the drive laser system, including the evaluation of the output power of each amplification unit, the design of pulse stretcher and compressor, the optimization of free space coupling setups for pump pulse and seed pulse, etc. We also combine a high-speed semi-conductor optical amplifier (SOA) optical switch with a low-speed acousto-optic modulator (AOM) to achieve the necessary diagnostic mode for the intense electron beam accelerator. This unique design is of importance for the photocathode drive laser with the repetition rate around or above 100 MHz.

Key words: intense electron beam accelerator, photocathode drive laser system, diagnostic mode, laser transmission

基于超导电子直线加速器的自由电子激光(FEL)^[1-2]和能量回收型直线加速器(ERL)光源^[3]能够产生超高亮度、超短脉冲、相干性极好的辐射脉冲,在固体表面物理、半导体物理、光谱学、生物学、化学、材料科学、医学、通信、国防科学等领域有非常重要的应用,是未来先进加速器装置的发展方向。作为加速器装置的核心组件之一,光阴极电子枪是产生高品质电子束的重要工具^[4]。驱动激光系统的输出功率、光束质量和系统稳定性则是保证电子枪及直线加速器在高平均功率状态下稳定运行的重要基础。日本 KEK 为其 cERL 装置设计搭建了 1.3 GHz 驱动

* 收稿日期:2022-08-09; 修订日期:2022-09-01

基金项目:北京大学核物理与核技术国家重点实验室自主科研课题(NPT2022ZZ01);北京大学核物理与核技术国家重点实验室开放课题(NPT2020KFY15)

联系方式:吴 桐, wu_tong@pku.edu.cn。

通信作者:徐 航, xuhang@ihep.ac.cn;

黄森林, huangsl@pku.edu.cn。

激光系统,可获得 50 W 的红外放大输出,倍频后可获得 532 nm、20 W 的绿光^[5-6];美国 Cornell 大学为 ERL 装置设计搭建的 1.3 GHz 驱动激光系统历经数次的升级和优化^[7-8],倍频效率及输出激光的功率和稳定性均有所提升,已获得最大平均功率达到 167 W 的红外放大激光及 124 W 的绿光^[9];国内的中国工程物理研究院搭建的短脉冲光纤激光系统运行在 80 MHz 重复频率下,可获得 105 W 的红外激光^[10];中科院高能物理研究所的驱动激光系统^[11]经升级后,在 81.25 MHz 重频下已获得 116.2 W 的红外放大输出,倍频后获得了 515 nm、39.4 W,脉宽为 2 ps 的绿光^[12]。

北京大学 1.3 GHz 超导加速器装置以强流为目标^[13-14],其新一代超导光阴极电子枪 DC-SRF-II 已于近期实现连续波模式稳定运行,不断提高 DC-SRF-II 光阴极电子枪驱动激光系统的脉冲重复频率是实现强流的必经之路。目前,DC-SRF-II 驱动激光系统可运行在 1 MHz 及 10 MHz 重复频率下^[15];为满足北京大学光阴极电子枪的发展需求,实现将重复频率提升至 81.25 MHz 及 650 MHz 的目标,我们设计了一套全新的驱动激光系统,其放大系统采用光子晶体光纤作为增益介质,中心波长为 1030 nm,目标输出功率为 100 W。此外,激光系统还需具有同步、倍频、整形等功能和宏脉冲诊断模式。

1 驱动激光系统整体结构及宏脉冲诊断模式

DC-SRF-II 驱动激光系统整体布局如图 1 所示,采用 MOPA 结构,由种子源、脉冲展宽系统、功率放大系统、脉冲压缩系统、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构成。其中,激光种子源用于产生与超导加速器微波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,再经过纵向及横向整形系统,形成纵向近平顶、横向为截断高斯分布的激光脉冲入射至光阴极表面。

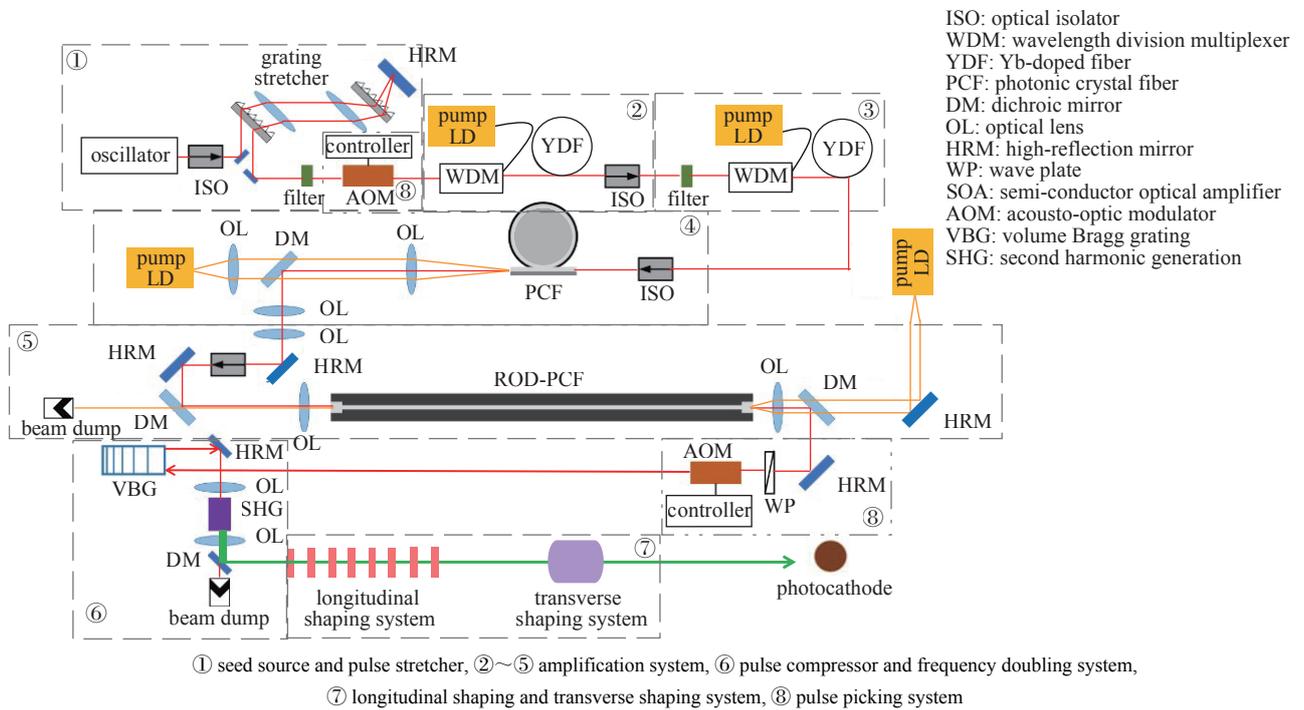


Fig. 1 Peking University DC-SRF-II photocathode drive laser system

图 1 北京大学 DC-SRF-II 双碱光阴极驱动激光系统

光阴极表面逸出的电子数取决于入射至光阴极的光子数和光阴极的量子效率。量子效率 Q_e 、入射激光的单脉冲能量 E 、光阴极产生的电子束流的单束团电荷量 q 与入射激光波长 λ 之间的关系为

$$\frac{Q_e}{\%} = 124 \frac{\frac{q}{\text{pC}}}{\frac{E}{\text{nJ}} \frac{\lambda}{\text{nm}}} \quad (1)$$

如果要实现 650 MHz 重复频率下 50 mA 电子束流的目标,则电子束团电荷量为 77 pC。按照 $K_2\text{CsTe}$ 光阴极的量子效率 $Q_e = 1\%$ 计算,根据式(1)可得,对于波长为 515 nm 的入射绿光,要求单脉冲能量为 18.6 nJ,对应激光功率分别为 1.51 W@81.25 MHz 和 12.1 W@650 MHz。考虑到压缩、倍频及整形造成的功率损耗,压缩效率约为 80%,倍频效率约为 50%,横向及纵向非相干整形效率约为 40%,因此,要求放大系统输出单脉冲能量达到 116 nJ 的红外激

光, 对应激光功率分别为 9.4 W@81.25 MHz 和 75 W@650 MHz。为预留出激光功率损耗的空间, 我们将放大系统红外激光的目标输出功率设定为 100 W。考虑激光纵向相干堆叠的升级选项, 其整形效率通常为 10%~20%, 当放大系统输出 100 W 红外时, 能够满足在 81.25 MHz 重频下进行高损耗相干整形实验的需求。

当前使用的激光种子源为 Menlo System 公司的 Orange 锁模光纤激光器, 其输出中心波长 1030 nm, 重复频率 81.25 MHz, 光谱宽度为 12 nm, 经过滤波器后输出 1 nm@1030 nm 的红外激光。脉冲宽度 2 ps、平均功率 0.2 mW 的入射激光经过脉冲展宽后, 进入功率放大系统, 各级放大器的目标输出功率如表 1 所示。重复频率为 650 MHz 的入射激光拟采用延迟线的方式产生^[16]。

表 1 功率放大系统输出参数表

Table 1 Parameters of DC-SRF-II laser amplifier

amplifier unit	output power/mW
pre-amplifier I (Yb-doped fiber)	10
pre-amplifier II (Yb-doped fiber)	200
main-amplifier I (PCF)	50 000
main-amplifier II (ROD - PCF)	100 000

高平均流强的电子直线加速器装置在运行时, 通常需要先使装置运行在电子束平均功率较低的诊断模式下进行束流调试, 稳定后再将重复频率逐步增加至目标运行值; 同时, 要求诊断模式与正常运行状态下的电子束具有相同的单束团电荷量。图 2 是北京大学 DC-SRF-II 光阴极驱动激光系统宏脉冲诊断模式的结构框图, 设计采用双开关的方式, 在光纤放大器前后分别放置开关时间不同的光开关。半导体光放大器(SOA)的开关时间较快, 可达到 0.5 ns, 位于光纤放大器前, 用于第一次选频, 降低种子激光的重复频率; 产生的宏脉冲经过光纤放大器后, 由低速的声光调制器进行第二次选频, 进一步降低重复频率, 从而获得重频更低的宏脉冲结构激光。由于 SOA 自身带有增益, 因此在作为高速光开关的同时, 还能够节省 1~2 级放大器, 从而简化激光系统的结构; SOA 的开关时间也能够满足高重频激光脉冲的时间间隔要求。

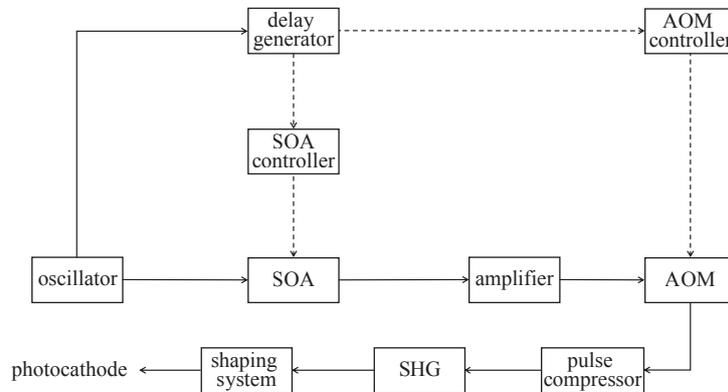


Fig. 2 Macro pulse mode of Peking University DC-SRF-II photocathode drive laser system

图 2 北京大学 DC-SRF-II 驱动激光系统宏脉冲诊断模式

2 主放大模块中泵浦光及信号光的耦合匹配

主放大模块的结构及光路如图 3 所示, 增益介质采用光子晶体光纤(PCF)和棒状光子晶体光纤(ROD-PCF)级联的方式, 由于光子晶体光纤空间耦合的结构, 因此, 在泵浦与增益光纤之间、PCF 与 ROD-PCF 之间需要使用焦距合适的透镜来进行泵浦光与信号光的耦合, 从而实现数值孔径与模场直径的匹配。主放大模块的激光耦合匹配对于放大系统至关重要, 精确的耦合匹配能够极大地提高泵浦光的利用效率, 也能够减少信号光在传输过程中的

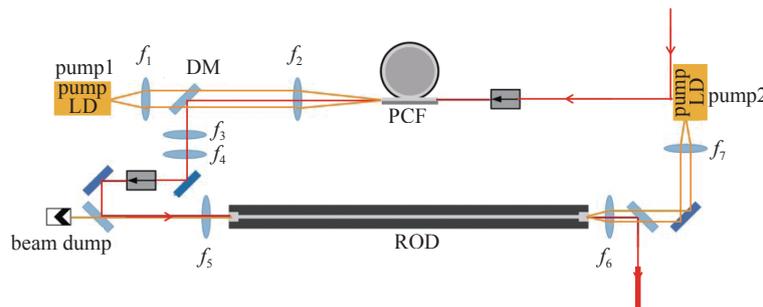


Fig. 3 The main amplification unit of Peking University DC-SRF-II photocathode drive laser system

图 3 北京大学 DC-SRF-II 驱动激光系统主放大器

损耗。如图 3 所示, 预放大模块的输出激光通过光隔离器耦合进 PCF 中, 泵浦光由一对透镜组 (f_1 、 f_2) 反向耦合进 PCF 中。经过 PCF 放大后, 输出的信号光经过多个透镜 (f_2 、 f_3 、 f_4 、 f_5) 耦合进 ROD-PCF 中; ROD-PCF 的泵浦光同样采用反向泵浦的方式, 由一对透镜组 (f_6 、 f_7) 将其反向耦合进 ROD-PCF 中。

图 4 是 PCF 与 ROD-PCF 的泵浦光耦合匹配光路, 均采用双透镜耦合的方式。

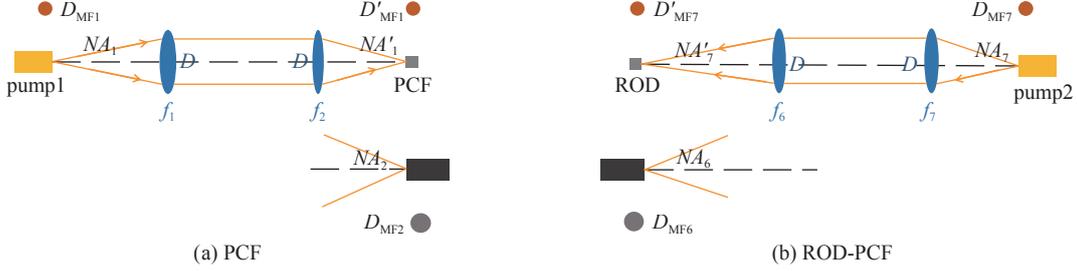


Fig. 4 Pump laser coupling optical path

图 4 泵浦光耦合光路

以 PCF 的泵浦光耦合匹配为例, 如图 4(a) 所示, 将泵浦的输出端调节至透镜 f_1 的焦距处, 同时, 使 PCF 的端面位于透镜 f_2 的焦距处, f_1 作为准直透镜, f_2 作为聚焦透镜, 存在如下关系

$$NA_1 \cdot f_1 = NA'_1 \cdot f_2 \quad (2)$$

$$\frac{D_{MF1}}{f_1} = \frac{D'_{MF1}}{f_2} \quad (3)$$

整理可得, 经透镜对变换后, 泵浦光斑的发散角 NA'_1 与光斑直径 D'_{MF1} 存在如下关系

$$NA'_1 = NA_1 \cdot \frac{f_1}{f_2} \quad (4)$$

$$D'_{MF1} = D_{MF1} \cdot \frac{f_2}{f_1} \quad (5)$$

要使泵浦光完全耦合进 PCF 中, 需满足

$$NA'_1 < NA_2 \quad (6)$$

$$D'_{MF1} < D_{MF2} \quad (7)$$

由于 $NA_1 = 0.22$, $D_{MF1} = 200 \mu\text{m}$, $NA_2 = 0.6$, $D_{MF2} = 200 \mu\text{m}$, 结合式 (4)~(5)、(6)~(7) 可知, 透镜 f_1 与 f_2 的焦距需满足

$$\frac{200}{200} < \frac{f_1}{f_2} < \frac{0.6}{0.22} \quad (8)$$

考虑到耦合透镜的焦距不能过大或过小, 因此, 综合现实的考虑因素, 将此处透镜焦距设计为 $f_1 = 25 \text{ mm}$ 、 $f_2 = 20 \text{ mm}$ 。此时, 变换后泵浦光斑的发散角 $NA'_1 = 0.275$, $D'_{MF1} = 160 \mu\text{m}$, 满足 PCF 接收的条件, 泵浦光能够被完全耦合进 PCF 中。同理, 对于 ROD-PCF 的泵浦光耦合, 如图 4(b) 所示, 泵浦光的发散角、光斑直径分别为 $0.22 \mu\text{m}$ 、 $200 \mu\text{m}$, ROD-PCF 对泵浦光的数值孔径与模场直径分别为 $0.5 \mu\text{m}$ 、 $260 \mu\text{m}$, 可计算出 ROD-PCF 的泵浦耦合透镜组 f_6 、 f_7 需满足的条件, 即

$$\frac{200}{260} < \frac{f_7}{f_6} < \frac{0.5}{0.22} \quad (9)$$

将 ROD-PCF 的泵浦耦合透镜的焦距设计为 $f_6 = 25 \text{ mm}$ 、 $f_7 = 25 \text{ mm}$, 经过透镜变换后的光斑发散角和光斑直径同样满足耦合进 ROD-PCF 的要求。

PCF 与 ROD-PCF 之间的红外信号光耦合光路如图 5 所示, f_2 、 f_3 、 f_4 作为准直透镜, f_5 作为聚焦透镜, 由于信号光始终保持单模传输, f_5 可由下式确定

$$f = \frac{\pi \cdot D \cdot D_{MF}}{4\lambda} \quad (10)$$

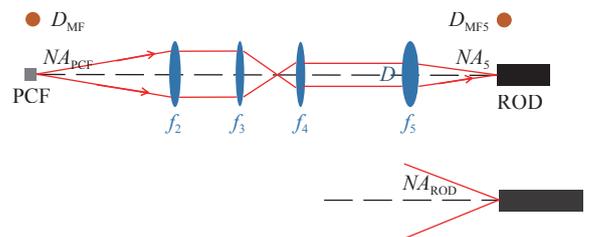


Fig. 5 The signal laser is coupled from PCF into ROD-PCF by four focal lenses

图 5 PCF 与 ROD-PCF 的红外信号光耦合

其中, D 为光斑直径, D_{MF} 为 ROD-PCF 的信号光模场直径, λ 为信号光的波长。由于光隔离器的通光孔径为 1 mm, 因此式(10)中 $D = 1$ mm, 且 $D_{MF} = 65$ μm , 代入式(10)可得 $f_3 = 50$ mm。采用与上述同理的透镜变换关系, 可计算出透镜 f_3 与 f_4 需满足的关系, 即

$$\frac{31f_3}{65f_2} < \frac{f_4}{f_3} < \frac{f_5}{f_2} \quad (11)$$

将 PCF 与 ROD-PCF 之间信号光耦合透镜的焦距设计为 $f_3 = 25$ mm、 $f_4 = 20$ mm。

综上, 为实现主放大模块中泵浦光与信号光的耦合匹配, 经过理论计算与基于实际因素的考虑, 将耦合透镜的参数设计为如表 2 所示。

表 2 激光耦合透镜的焦距参数表
Table 2 Focal length of coupling lenses

f_1/mm	f_2/mm	f_3/mm	f_4/mm	f_5/mm	f_6/mm	f_7/mm
25	20	25	20	50	25	25

3 预放大模块中的非线性展宽

光阴极驱动激光系统的非线性展宽对输出脉冲参数、运行安全与稳定性都有重要影响。DC-SRF-II 驱动激光系统中的种子源与脉冲展宽器如图 6 所示。当前种子源输出的 81.25 MHz 激光脉冲经过滤波器后, 输出 1 nm@1030 nm、半高全宽 2 ps 的红外激光, 作为放大系统的入射激光。根据设计, 经过两级预放大后, 主放大模块需要平均功率 200 mW 的入射激光。由于高峰值功率的激光在光纤中传输时会引起强烈的非线性效应, 导致产生新的光谱成分, 因此, 在激光系统中应用啁啾脉冲放大(CPA)技术, 在入射激光传输至放大器前先对其进行脉冲展宽, 以降低其峰值功率; 放大后再进行脉冲压缩, 从而提高其峰值功率。由于预放大模块采用单模增益光纤, 而主放大模块采用光子晶体增益光纤, 因此高峰值功率的入射激光在放大系统中引起的非线性效应主要来源于由单模光纤构成的预放大模块。

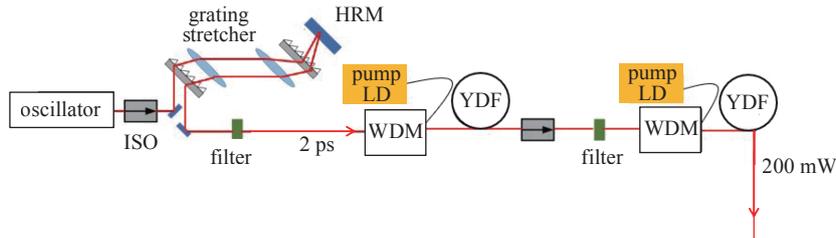


Fig. 6 Seed pulse and pulse stretcher of Peking University DC-SRF-II photocathode drive laser system

图 6 北京大学 DC-SRF-II 驱动激光系统种子源与脉冲展宽器

如果直接将半高全宽为 2 ps 的激光入射至放大器中, 此时的峰值功率达到 $P_0 = 1230.8$ W, 对于 6 $\mu\text{m}/125$ μm 的单模掺 Yb^{3+} 增益光纤, 激光在其中传输时所引起的非线性光谱展宽为

$$\Delta\nu = e^{-1/2} \frac{\gamma P_0 L_{\text{eff}}}{\sqrt{2\pi} T_0} \quad (12)$$

式中: γ 为光纤的非线性系数; P_0 、 T_0 分别为脉冲的峰值功率和脉冲宽度, T_0 与入射激光的半高全宽 T_{FWHM} 之间的换算关系为 $T_{\text{FWHM}} = 2\sqrt{\ln 2} T_0$; L_{eff} 为激光在光纤中传输的有效长度, 由于脉冲在增益光纤中传输时的功率被逐渐放大, 因此增益光纤的有效长度不等于光纤长度, 但传输光纤的有效长度即为光纤长度。

对于长度为 2 m 的增益光纤和 2 m 的传输光纤, 经计算其有效长度之和为 $L_{\text{eff}} = 2.45$ m, 非线性系数 $\gamma = 5.71 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, 代入式(12)可得半高全宽为 2 ps 的入射激光在增益光纤和传输光纤中引起的非线性光谱展宽总量为 $\Delta\nu = 1.96$ THz。对 $\nu = c/\lambda$ 中的波长 λ 进行微分, 可得

$$|\Delta\lambda| = \frac{\lambda^2}{c} \Delta\nu \quad (13)$$

由式(13)可知, 半高全宽 2 ps 的入射激光在增益光纤和传输光纤中传输时, 由于非线性效应引起的波长展宽总量为 $\Delta\lambda = 6.92$ nm, 远大于 1 nm 的光谱宽度, 不利于后续倍频及整形实验的进行。为此, 需要在放大前对入射激

光进行脉冲展宽,以降低其峰值功率,减小在光纤传输过程中非线性效应的影响。

当脉冲宽度被展宽至 20 ps 时,入射激光的峰值功率降低至 $P_0 = 123.1$ W,同理,可计算出此时在增益光纤和传输光纤中产生的非线性光谱展宽总和为 $\Delta\lambda = 0.07$ nm。因此,脉冲展宽可显著降低增益光纤中产生的非线性效应。

综上,光纤放大器的入射激光为 1030 nm、2 ps 的红外激光,平均功率 0.2 mW,经过脉冲展宽和功率放大后输出 1030 nm、20 ps 的高能量激光,平均功率达到 100 W;然后由 18 ps/nm 的体光栅压缩至 2 ps,进行倍频及横向、纵向整形后,传输至光阴极表面。

4 双滤光片实现光谱宽度连续调节

光阴极驱动激光系统中光谱宽度的连续调节对于研究激光纵向相干整形过程具有重要意义,设计采用双滤光片来实现光谱宽度的连续调节。如图 1 中的⑥~⑦模块,为满足 K_2CsTe 光阴极对入射激光的要求,需对功率放大后的红外激光依次进行压缩、倍频、纵向及横向整形,产生低发射度的绿光传输至光阴极。其中,纵向相干整形系统通常基于 SOLC 干涉滤波器^[17-18],要求入射激光具有较窄的光谱宽度,而种子源输出激光的谱宽为 12 nm。我们拟设计采用两片完全相同的介质膜滤光片级联的方式,能够在一定范围内实现放大器入射激光的光谱宽度连续调节。调节其中一片介质膜滤光片的入射角度,另一片不进行调节;被调节的滤光片,其中心波长与入射角之间存在如下关系

$$\lambda_\theta = \lambda_0 \sqrt{1 - \left(\frac{n_0}{n_{\text{eff}}} \sin\theta\right)^2} \quad (14)$$

式中: λ_0 为入射激光的中心波长; λ_θ 为入射角 θ 所对应的输出激光的中心波长; n_0 、 n_{eff} 分别为入射介质的折射率及滤光片的有效折射率,通常, $n_0/n_{\text{eff}} = a \approx 0.4$ 。因此,对于 $\lambda_0 = 1030$ nm 的入射激光,随着入射角 θ 的增加,可调谐滤波器输出激光的中心波长会逐渐减小,出现光谱“蓝移”,如图 7 所示。

若两片介质膜滤光片的输出激光谱宽均为 4 nm,当 12 nm@1030 nm 的种子激光正入射时,则两片滤光片输出激光的光谱重合,输出激光的中心波长仍为 1030 nm,谱宽则由 12 nm 减小至 4 nm。当改变种子激光的入射角时,其中一片滤光片的输出光谱“蓝移”,中心波长逐渐偏移 1030 nm,谱宽仍为 4 nm,如图 7 所示;另一片滤光片的输出光谱不发生变化,仍为 4 nm@1030 nm,则二者输出光谱的重合部分即为最终可获得的激光光谱。表 3 展示了随着入射角的偏移,输出激光光谱的变化范围。因此,随着入射角度的增加,可获得光谱在 4 nm 范围内变化的输出激光,从而实现放大器入射激光的光谱宽度在一定范围内的连续调节。可用于研究纵向相干整形的输出激光质量、整形效率与激光脉冲光谱宽度之间的依赖关系,以实现整形措施的优化。

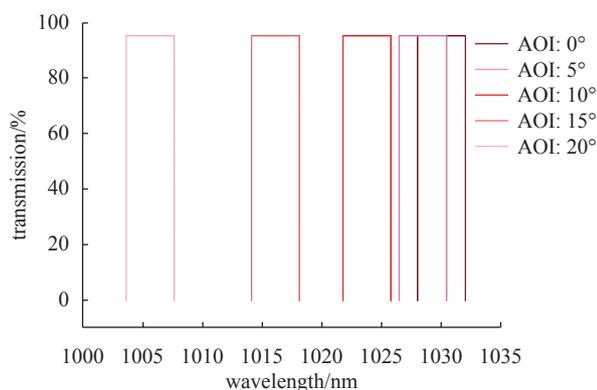


Fig. 7 Hypsochromic shift with the increasing angle of incidence (AOI) of tunable filter

图 7 随着可调谐滤波器的入射角度增大,输出激光的光谱中心波长“蓝移”

表 3 不同入射角度所对应的输出激光光谱

Table 3 Spectral region and width of different AOI

angle of incidence/(°)	spectral region/nm	spectral width/nm
0	1028~1032	4.0
2.5	1028~1031.5	3.5
3.5	1028~1031	3.0
4.5	1028~1030.5	2.5
5.5	1028~1030	2.0
6.0	1028~1029.5	1.5
6.5	1028~1029	1.0
7.0	1028~1028.5	0.5

5 结 论

为满足北京大学 DC-SRF-II 光阴极电子枪高平均流强运行的要求,设计了一套全新的功率放大系统,目标为输出 100 W 红外激光,采用先进的光子晶体光纤作为增益介质,从而保证输出激光的质量及激光系统的稳定性。同时,对于高重复频率激光系统,在光纤放大器前后分别放置开关时间不同的光开关,即 SOA 和声光调制器,通过

双开关结构这一特殊设计来获得时间结构可调的宏脉冲激光,从而满足加速器装置在诊断模式下对低功率电子束的需求。

参考文献:

- [1] Galayda J N. The LCLS-II: a high power upgrade to the LCLS[C]//Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference. Vancouver: JACoW Publishing, 2018.
- [2] Zhu Z Y, Zhao Z T, Wang D, et al. SCLF: an 8-GeV CW SCRF linac-based X-ray FEL facility in Shanghai[C]//Proceedings of the 38th International Free Electron Laser Conference. Santa Fe, NM, USA: JACoW Publishing, 2017: 20-25.
- [3] 黄森林, 刘克新. 基于能量回收技术的光源—ERL光源[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 104011. (Huang Senlin, Liu Kexin. Energy recovery linac light source[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 104011)
- [4] Stephan F, Krasilnikov M. High brightness photo injectors for brilliant light sources[M]//Jaeschke E J, Khan S, Schneider J R, et al. Synchrotron Light Sources and Free-Electron Lasers: Accelerator Physics, Instrumentation and Science Applications. Cham: Springer, 2020: 603-646.
- [5] Nakamura N. Review of ERL projects at KEK and around the world[C]//International Particle Accelerator Conference 2012. 2012: 1040.
- [6] Honda Y. Development of a photo-injector laser system for KEK ERL test accelerator[C]//International Particle Accelerator Conference 2012. 2012: 1530-1532.
- [7] Ouzounov D, Li Heng, Dunham B, et al. Fiber-based drive laser systems for the Cornell ERL electron photoinjector[C]//Proceedings of SPIE 7581, High Energy/Average Power Lasers and Intense Beam Applications IV. SPIE, 2010: 75810N.
- [8] Zhao Zhi, Dunham B M, Bazarov I, et al. Generation of 110 W infrared and 65 W green power from a 1.3-GHz sub-picosecond fiber amplifier[J]. *Optics Express*, 2012, 20(5): 4850-4855.
- [9] 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.
- [10] 许党朋, 林宏奂, 邓颖, 等. 高重复频率短脉冲全光纤激光系统[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 091002. (Xu Dangpeng, Lin Honghuan, Deng Ying, et al. High repetition frequency all fiber short pulse laser system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 091002)
- [11] 李孝燊, 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] Xu Hang, Xu Jinqiang, Li Xiaoping, et al. High power drive laser system for photocathode at IHEP[J]. *Optics Express*, 2021, 29(18): 29550-29556.
- [13] Liu K, Chen J, Feng L, et al. Commissioning and operation of DC-SRF injector[C]//Proceedings of SRF2013. Paris, France, 2013.
- [14] 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.
- [15] 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[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 104016. (Feng Liwen, Wang Tianyi, Jia Haoyan, et al. Peking University's DC-SRF-II photoinjector drive laser system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 104016)
- [16] Haboucha A, Zhang W, Li T, et al. Optical-fiber pulse rate multiplier for ultralow phase-noise signal generation[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(18): 3654-3655.
- [17] Will I, Klemz G. Generation of flat-top picosecond pulses by coherent pulse stacking in a multichannel birefringent filter[J]. *Optics Express*, 2008, 16(19): 14922-14937.
- [18] Liu Fangming, Huang Senlin, Si Shangyu, et al. Generation of picosecond pulses with variable temporal profiles and linear polarization by coherent pulse stacking in a birefringent crystal shaper[J]. *Optics Express*, 2019, 27(2): 1467-1478.