

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0160-03

自由电子激光光阴极注入器驱动激光器

陈亚男, 黎维华, 黎明

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 介绍了自由电子激光光阴极注入器驱动激光器的组成,研究了激光二极管(LD)抽运的连续锁模振荡器的性能,其输出的种子光的平均功率为 10.5 W,微脉冲宽度为 11.9 ps,时间同步器的时间抖动值为 0.56 ps。种子光经脉冲切割与成形,再经三级脉冲激光二极管抽运放大,最后进行四倍频,可以获得波长为 266 nm,微脉冲能量为 5 μ J 的激光脉冲串,脉冲串的宽度为 6 μ s。

关键词 激光技术; 光阴极注入器; 驱动激光器; 锁模激光器; 激光二极管抽运

中图分类号 TL503.3 **文献标识码** A

Drive Laser for the FEL Radio Frequency Photoinjector

CHEN Ya-nan, LI Wei-hua, LI Ming

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract The drive laser system of the free electron laser (FEL) radio frequency (RF) photoinjector is introduced. The characteristic of the mode-locked oscillator controlling high current laser diode bar drive is presented in detail. The output power is 10.5 W, the timing jitter of the timing stabilizer is 0.56 ps. 11.9 ps Gaussian pulses of 266 nm wavelength are generated at a repetition rate 54.167 MHz. These "micropulses" are contained within a "macropulse" envelope as long as 6 μ s. Micropulse energy of 5 μ J is obtained.

Key words laser technique; photoinjector; drive laser; mode-locked laser; laser diode-pumped

1 引言

在高功率自由电子激光(FEL)初级实验装置研究中,驱动激光器直接照射光阴极而发射电子,其性能在很大程度上决定注入器乃至整个自由电子激光实验系统的性能,如电子束微脉冲宽度、电子束微脉冲流强和电子束微脉冲峰值抖动等。针对 FEL 初期研究目标(3~8 μ m)对光阴极注入器的要求,对光阴极射频(RF)腔注入器的驱动激光器进行了研究,提出了驱动激光器的参量要求^[1]。按照参量要求购置了锁模激光器和时间同步器,放大与倍频系统正在优化当中,本文介绍了此项工作的进展情况。

2 光阴极 RF 腔注入器系统

光阴极 RF 腔注入器的结构如图 1 所示,主要由驱动激光器, Cs₂Te 阴极制备装置,光阴极 4.5 射频加速腔段,激光输入与调节装置,高功率微波源系

统和束流控制与测量装置等组成。其中驱动激光器的参量是影响注入器电子束质量的重要因素。光阴极经驱动激光照射,使大量电子逃逸光阴极材料的束缚,并在 RF 场下加速获得能量。

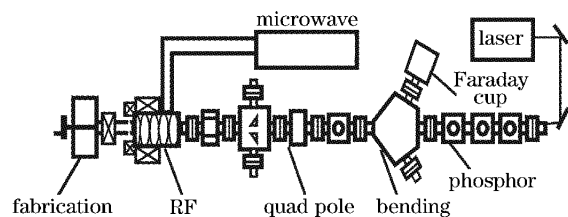


图 1 光阴极注入器实验系统图

Fig. 1 RF photoinjector

3 驱动激光器系统

3.1 驱动激光器的基本组成

注入器所使用的阴极材料为 Cs₂Te,需要波长约为 250 nm 的激光驱动,因此,驱动激光器系统主要由

基金项目: 国家 863 自由电子激光专题(2004AA826040)资助课题。

作者简介: 陈亚男(1978—),女,主要从事自由电子激光的研究。E-mail: cynheart@hotmail.com

激光振荡器、时间同步器、宏脉冲切割系统、宏脉冲放大和倍频四部分组成(图2),振荡腔输出受RF控制信号控制的连续锁模激光脉冲列,用Pockel从中切

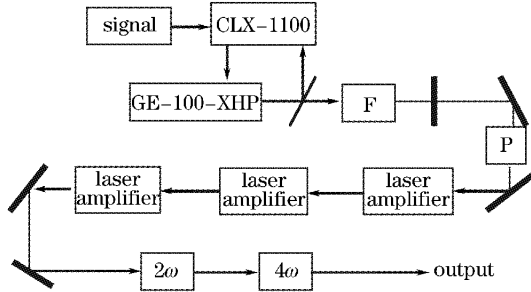


图2 驱动激光器结构示意图

Fig. 2 Experimental setup of drive-laser

选出 $6 \mu\text{s}$ 激光宏脉冲,经三级 YAG 激光二极管(LD)抽运放大器放大后,再经两次倍频,最后将输出激光送入 RF 腔中,作用于光阴极产生光电子。

3.2 GE-100-XHP 锁模激光器

驱动激光器中连续锁模振荡腔是激光二极管抽运的 GE-100-XHP 锁模激光器,用半导体可饱和吸收反射镜(SESAM)^[2]实现锁模,平均功率为 10 W,激光微脉冲宽度为 11.9 ps,重复频率为 54.167 MHz,激光波长为 1064 nm。其实际参量与我们所提出的技术参量对照见表 1,GE-100-XHP 锁模激光器很好地满足了技术要求。

表 1 振荡器参量对照

Table 1 Parameters of oscillator

Parameters	Theory value	Measurement value
Laser wavelength /nm	1064	1064
Micropulse repetition frequency /MHz	54.167(+/-0.003)	54.167
Average power /W	>9 (best effort>10)	10.5
Micropulse width /ps	<12	11.9
Repetition frequency range adjusted /MHz	+/-0.1	+/-0.1
Micropulse timing jitter /ps	<1	0.56

3.3 CLX-1100 时间同步器

在光阴极注入器实验中,驱动激光同 RF 信号的同步相当重要。由于激光二极管锁模激光器的输出稳定,采用高稳定度的 RF 信号源来驱动时间同步稳定器,自动调节振荡腔腔长,使激光脉冲频率与标准信号频率保持一致,达到同步要求。时间同步器^[3](CLX-1100)接收 RF 信号和激光信号时,检出

两个信号的相位差,根据此相位差信号自动调节激光器的腔长,使激光脉冲频率与标准信号频率保持一致,从而实现同步控制,如图 3 所示。

根据时间同步器中检相输出的相位差信号,可以得到激光脉冲对于 RF 信号的时间抖动。当激光脉冲与 RF 信号之间的频率相同时,时间同步器中检相输出的信号为

$$V(t) = V_0 \sin(2\pi f_0 \Delta t_j), \quad (1)$$

式中 f_0 为激光脉冲的频率, Δt_j 为激光脉冲相对于 RF 信号的时间抖动。

由于激光脉冲的时间抖动 Δt_j 远小于激光脉冲间隔,即 $2\pi f_0 \Delta t_j$ 很小,时间同步器中检相输出的信号可以近似为

$$V(t) = V_0 2\pi f_0 \Delta t_j, \quad (2)$$

定义

$$S = \frac{\Delta t_j}{V(t)} = \frac{1}{V_0 2\pi f_0}, \quad (3)$$

S 为检相灵敏度,则根据检相输出信号,就可以得到激光脉冲时间抖动。当检相输出信号的均方根为 V_{rms} ,最大值为 V_{max} 时,则激光脉冲时间抖动的均方根和最大值分别为

$$(\Delta t_j)_{\text{rms}} = S V_{\text{rms}}, \quad (\Delta t_j)_{\text{max}} = S V_{\text{max}}. \quad (4)$$

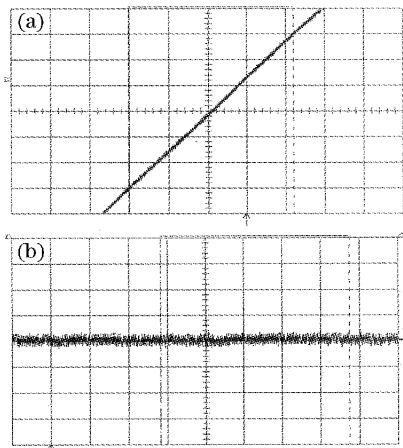


图3 激光脉冲的定标信号(a)及时间抖动信号(b)

Fig. 3 Scale signal (a) and timing jitter signal (b) of laser pulse

为了确定 S 值,在激光器稳定工作后,调节 RF 信号的频率,使之与激光脉冲信号有一个频率差(如 1 kHz),则检相输出的差频信号为

$$V(t) = V_0 \sin(2\pi f_0 t), \quad (5)$$

因为 $2\pi f_0 t$ 很小,所以 $V(t) = V_0 2\pi f_0 t$, 则 $\Delta V = V_0 2\pi \Delta f \Delta t$, 即

$$V_0 = \frac{\Delta V}{\Delta t 2\pi \Delta f}. \quad (6)$$

图 3(a)是工作频率 $f_0 = 54.167$ MHz 时,调节 RF 信号与激光脉冲信号之间的频率差 1 kHz 时,存储示波器记录的检相器输出的时间抖动标定信号,由图得

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{0.6 \text{ V}}{21 \mu\text{s}} = 28571 \text{ V/s},$$

$$\text{则 } V_0 = \frac{28571}{2\pi 1000} = 4.55 \text{ V}, \quad (7)$$

将 V_0 和 f_0 代入(3)式可得

$$S = \frac{1}{V_0 2\pi f_0} = 0.646 \text{ (ps/mV)}. \quad (8)$$

图 3(b)是激光器正常工作时,即激光脉冲同

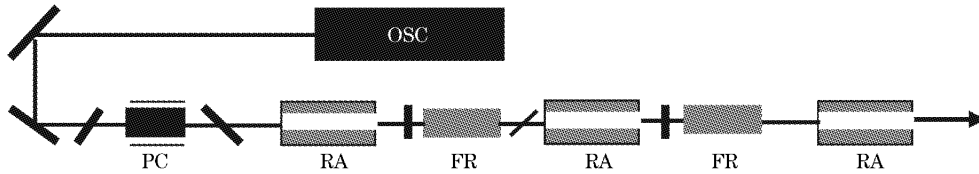


图 4 激光放大系统框图

Fig. 4 Schematic setup of laser amplifier

3.4.2 倍频

激光器输出的基频光子不能直接驱动光阴极产生光子,需要倍频。根据倍频理论^[4],当脉冲宽度为 σ 的高斯分布的激光脉冲倍频后,脉冲形状为

$$P_1(t) = \eta_1 P_0^2 \exp(-t^2/\sigma^2), \quad (9)$$

四倍频后,激光微脉冲形状为

$$P_2(t) = \eta_2 P_0^4 \exp(-2t^2/\sigma^2), \quad (10)$$

式中 η_1 为倍频效率, η_2 为四倍频效率, P_0 为基频激光的峰值功率。

从(9),(10)式可以看出,二倍频后激光脉冲宽度减小到 0.707σ ,四倍频后脉冲宽度减小到 0.5σ 。

4 结 论

采用连续锁模振荡器(Nd:YAG)的激光输出作为种子光,输出波长为 1064 nm,重复频率为 54.167 MHz,微脉冲宽度为 11.9 ps,微脉冲能量为 0.18 μJ 的脉冲串,经宏脉冲切割与成形,再经三级

RF 信号同步后,检相器输出的时间抖动信号,该信号得最大值为 6.6 mV,均方根为 0.87 mV,由(4)式得激光脉冲时间抖动最大值为 4.26 ps,均方根为 0.56 ps。

3.4 激光脉冲放大与倍频

3.4.1 激光脉冲放大

激光放大系统如图 4 所示,其中 PC 为用于脉冲切割的普克尔盒,RA 为激光二极管抽运放大单元,FR 为法拉第筒。激光功率放大器的放大单元由工作介质(Nd:YAG)和抽运源两部分组成,当激光脉冲通过放大单元后,脉冲能量得到放大,脉冲宽度也有一定的展宽。

FEL 光阴极注入器驱动激光器放大系统采用的抽运源是激光二极管,经实验测量,由于放大器对脉宽 10 ps 左右的激光脉冲增益太低(大约为 5),由此在原放大系统的基础上又增加了一程放大,并适当增加了激光二极管抽运电流,成功解决了自激振荡问题,此时系统总增益为 260 左右,能达到要求。

脉冲激光二极管抽运放大,最后进行四倍频,可以获得波长为 266 nm,微脉冲能量为 5 μJ 的激光脉冲串,脉冲串的宽度为 6 μs 。目前,激光脉冲放大与倍频系统正在进一步的优化中。

参 考 文 献

- 1 Li Weihua, Li Ming, Jin Xiao *et al.*. Drive laser for the CEFL RF photoinjector [J]. *Directed Energy Technology and Applications*, 2003, 2(2): 56~62
黎维华,黎明,金晓等. CFEL 光阴极注入器的驱动激光器研究 [J]. *强辐射技术与应用*, 2003, 2(2): 56~62
- 2 Keller U. Solid-state low-loss intracavity saturable absorber for Nd:YLF lasers; an antiresonant semiconductor Fabry-Perot saturable absorber [J]. *Opt. Lett.*, 1992, 17(7): 505~507
- 3 Rodwell M. J. W., Bloom D. M., Weingarten K. J.. Subpicosecond laser timing stabilization [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, 25(4): 817~827
- 4 Yao Jianquan. *Nonlinear Optical Frequency Transform and Laser Tuning Technology* [M]. Beijing: Science Press, 1995
姚建铨. *非线性光学频率变换及激光调谐技术* [M]. 北京: 科学出版社, 1995