

文章编号: 1001-3806(2009)06-0619-03

FEL 驱动激光器的研究

黎维华¹, 唐军², 陈亚男¹, 李福权², 李明中², 黎明¹, 杨兴繁¹

(1. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

摘要: 为了获得高亮度和高品质的电子束, 在自由电子激光实验装置中采用光阴极注入器作为电子源, 其驱动激光器系统采用主振功率放大结构, 振荡器为二极管抽运连续锁模激光器, 放大器为一级双程及两级单程二极管脉冲抽运放大, 后接4倍频系统。经过工程研制及调试, 获得的输出指标为: 波长266nm, 微脉冲能量4μJ, 宏脉冲宽度2μs至6μs可调, 微脉冲能量抖动优于3%。结果表明, 采用Cs₂Te阴极的光阴极注入器实验, 该系统能够获得不低于40A的电子束流, 达到了自由电子激光实验对电子源的束流要求。

关键词: 激光技术; 驱动激光器; 二极管抽运; 光阴极

中图分类号: TN248.3+3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.06.017

Research of the drive laser for FEL

LI Wei-hua¹, TANG Jun², CHEN Ya-nan¹, LI Fu-quan², LI Ming-zhong², LI Ming¹, YANG Xing-fan¹

(1. Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China; 2. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: In order to achieve high quality and high brightness electron beam, a photocathode injector is used as the electron source in the experimental setup of a free electron laser (FEL). The drive laser system is a master oscillator power amplifier configuration, consisting of a continuous wave diode-pumped mode-locked oscillator, one double-pass and two single-pass regenerative diode-pumped pulse amplifiers and a four fold frequency conversion part. After adjustment, single micropulse energy of 4μJ with less than 3 percent of jitter at wavelength 266nm was obtained. These micropulses were contained within a macropulse envelope as long as 2μs to 6μs. In the experiments, adopting Cs₂Te photocathode as the photoinjector, more than 40A electron beam was obtained, meeting the requirement of beam current for the FEL.

Key words: laser technique; drive laser; diode-pumped; photocathode

引言

紧凑、可靠的驱动激光器是自由电子激光 (free electron laser, FEL) 稳定运行的关键部件之一, 驱动激光器按脉冲结构可分为单脉冲驱动激光器、宏脉冲驱动激光器和连续波驱动激光器^[1], 是自由电子激光实验装置的重要组成部分, 它在很大程度上决定了注入器乃至整个 FEL 实验系统的性能; 如电子束微脉冲宽度、电子束微脉冲电流强度、电子束微脉冲峰值抖动等。同时, FEL 实验研究也对驱动激光器系统的稳定性、诸如时间稳定性、能量稳定性、指点稳定性等提出了严格的要求^[2]。国外研究驱动激光器技术的单位很多, 如美国 Los Alamos^[3-4]、美国布克海文国家实验室^[5] 和 Femi 公司^[6] 等; 国内除中国工程物理研究院

外, 北京大学^[7]、清华大学等单位也在进行相关技术的研究, 但真正用于 FEL 实验研究的驱动激光器系统还未见报道。针对中国工程物理研究院 FEL 实验装置对电子源的需求, 研制了一套全固态驱动激光器系统, 该系统采用主振功率放大结构, 主振荡器及功率放大器均为二极管抽运方式, 现已研制完毕并安装使用在中国工程物理研究院的 FEL 实验研究中。

1 驱动激光器系统

驱动激光器系统如图 1 所示, 由被动锁模振荡器

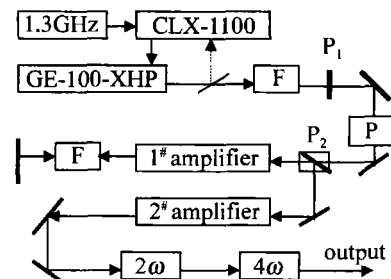


Fig. 1 Layout of the drive laser system for FEL

作者简介: 黎维华 (1974-), 男, 助研, 主要从事 FEL 驱动激光技术及摇摆器技术研究。

E-mail: auhiewil@sina.com

收稿日期: 2008-08-05; 收到修改稿日期: 2008-12-03

GE-100-XHP、时间同步器 CLX-1100、再生放大器及倍频系统 4 部分组成。其中, F 为法拉第隔离筒, P_1, P_2 为偏振片, P 为电光调制器; 1[#] 激光功率放大器为双程放大器, 2[#] 激光功率放大器为单程放大器。

1.1 激光振荡器 GE-100-XHP

GE-100-XHP 是二极管抽运的锁模激光器, 采用半导体可饱和吸收反射镜实现自锁模^[8], 输出为线偏振光。其性能参量见表 1。

Table 1 The parameters of GE-100-XHP

1	laser medium	Nd:YAG
2	wavelength/nm	1064
3	frequency/MHz	54.167
4	output power/W	10
5	pulse width(FWHM)/ps	12
6	amplitude jitter(RMS)	less than 1%
7	time jitter/ps	less than 1
8	mode	TEM ₀₀
9	pointing stability/(mrad · 10 ⁻¹ h ⁻¹)	0.03

1.2 时间同步器 CLX-1100

CLX-1100 是频率为 54.17MHz 的时间同步器, 它通过检测标准信号(1.3GHz 的 24 分频射频信号)和激光

信号之间的相位差, 据相位差自动调节激光器的腔长, 使振荡器锁模频率与标准信号频率保持一致, 从而实现同步^[9]。通过该系统, 时间抖动可控制在 1ps 以内。

1.3 再生放大器

激光功率放大器通过 Pockels cell 从振荡器的连续输出脉冲串中截取长度为 2μs 至 6μs 的宏脉冲进行放大, 每个宏脉冲包含了 100 个至 300 个微脉冲。放大器由一段双程放大器和两段单程放大器组成。

1.4 倍频系统

倍频系统将放大后的基频光转化成紫外光, 用于照射 Cs₂Te 光阴极产生电子。经过倍频后, 一个宏脉冲的能量为 1.2mJ, 一个微脉冲的能量为 4μJ, 宏脉冲的宽度取 6μs。

2 激光器性能

2.1 幅度一致性

FEL 对同一宏脉冲包络内微脉冲与微脉冲之间的幅度一致性有很严格的要求, 利用模拟示波器在放大器出口、2 倍频出口及 4 倍频出口处进行了测量, 测量结果见图 2a ~ 图 2c, 同一宏脉冲包络内微脉冲与微脉冲之间的幅度一致性优于均方根 3%。

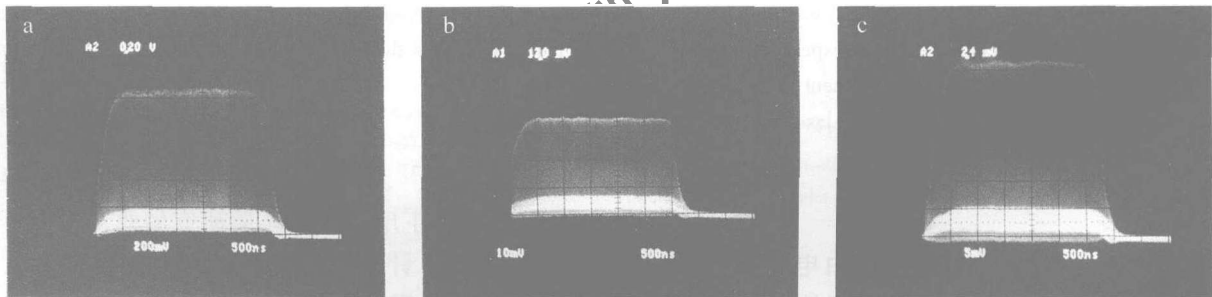


Fig. 2 a—the macropulse at the port of amplifier b—the macropulse at the port of 2-th harmonics c—the macropulse at the port of 4-th harmonics

2.2 能量稳定性

利用激光能量计测量了 300 次宏脉冲能量, 其统计结果显示, 均方根误差为 2.8%。取其中 84 次读数相对于平均值的误差绘成的曲线图如图 3 所示。

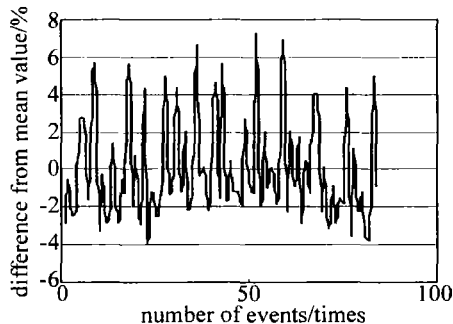


Fig. 3 The UV energy fluctuation from mean value

2.3 时间稳定性

时间稳定性是利用时间同步器探测激光振荡器输

出激光信号与标准射频信号间的相位差来决定的, 故可利用时间同步器的读数来评价, 其读数一般小于 0.4ps。

2.4 指点稳定性

紫外光的指点稳定性采用在距离 4 倍频出口 30m 的地方设置一白纸屏, 通过 CCD 相机测量其光斑分布情况(像素: 实际尺寸 = 13.7:1mm), 其质心的 x 方向

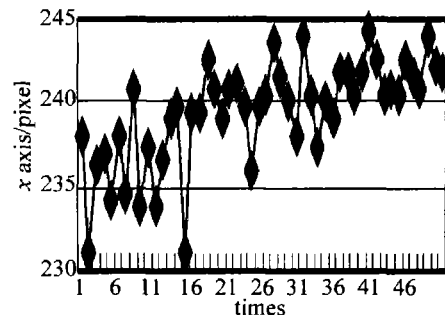


Fig. 4 The pointing stability at x direction

稳定性为 0.01mrad, 见图 4; y 方向的稳定性为 0.1mrad, 见图 5。紫外光光斑形状见图 6 所示。驱动激光器的其它性能指标见表 2。

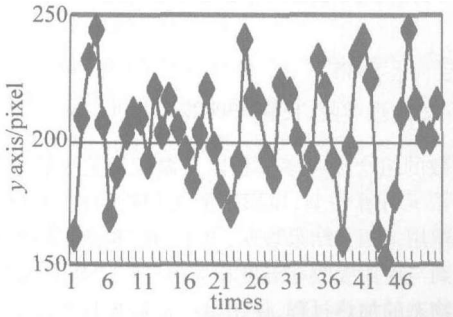


Fig. 5 The pointing stability at y direction

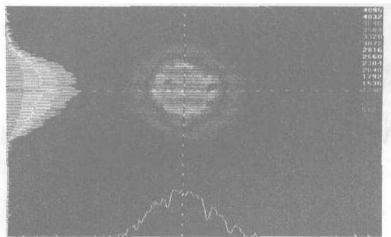


Fig. 6 The profile of UV pulse spot

Table 2 The performance of the drive laser system

1	wavelength/nm	266
2	pulse width/ps	10 to 15
3	frequency/MHz	54.17
4	pulse energy/ μ J	3 to 5
5	macropulse duration/ μ s	2 to 6
6	macropulse repetition rate/Hz	3, 6, 12
7	pulse time jitter/ps	less than 2
8	amplitude jitter/(RMS)	3%
9	pointing stability/mrad	0.11

3 光阴极射频腔注入器实验

光阴极射频腔注入器是 FEL 装置的重要组成部分, 如图 7 所示。1 为光阴极制备室, 阴极材料为

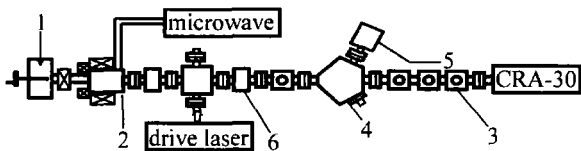


Fig. 7 The arrangement of RF photoinjector, 1—photocathode preparation chamber; 2— $4 + \frac{1}{2}$ RF photoinjector; 3—quadrupole magnet; 4—bend magnet; 5—Faraday collector; 6—fluorescence target

Cs_2Te ; 2 为 $(4 + 1/2)$ 射频腔注入器; 3 为四极子, 起聚焦电子束的作用; 4 为偏转磁铁; 5 为法拉第筒, 用于收集电子; 6 为用于检测束斑位置和形状的荧光体, 与电子束线成 45° 夹角, 可远程控制其上下运动; CRA-30 为 30MeV 加速器。

图 8 为电子束斑, 图 9 为电子束微脉冲波形。根据图 9, 可计算电子束宏脉冲电流强度: $I_m = V_F / \text{阻}$

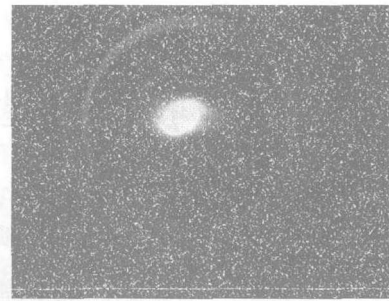


Fig. 8 The beam spot

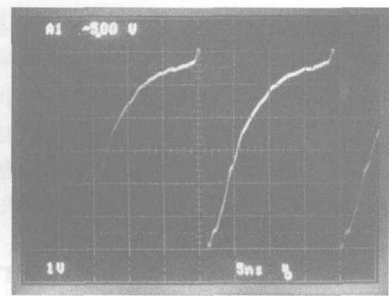


Fig. 9 The profile of micropulse

抗 $= I_{\text{micro}} \times \text{占空比因子}$, 式中, V_F 为法拉第筒电势, I_{micro} 为微脉冲电流强度, $V_F = 6\text{V}$, 阻抗为 50Ω , 占空比因子 54.167×10^{-5} , 得到 $I_{\text{micro}} = 221.5\text{A}$ 。这里很有必要指出, 这是在新制备的阴极材料时测得的结果, 考虑到阴极材料的正常量子效率一般为新制备时的 0.2 ~ 0.4, 所以真正稳定运行的电子束流强度在 40A ~ 80A 之间。

4 结论

采用连续锁模振荡器 (Nd:YAG) 的激光输出作为种子光, 经宏脉冲切割与成形, 再经脉冲二极管抽运放大, 最后进行 4 倍频, 获得了波长为 266nm、重复频率为 54.167MHz、微脉冲能量为 $4\mu\text{J}$ 的激光脉冲串, 脉冲串的宽度为 $2\mu\text{s}$ 至 $6\mu\text{s}$ 可调。该驱动激光器紧凑、稳定, 实现了大于 40A 的束流输出。

参考文献

[1] LI Z H, HU K S, LIU Z Q, *et al.* The driving laser of photoinjector [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2000, 12(6): 737-740 (in Chinese).

[2] SAKAI F, YOROZU M, OKADA Y. All-solid-state picosecond laser system for photocathode RF gun [C]//Proceeding of the 1999 Particle Accelerator Conference. New York: IEEE, 1999: 2036-2038.

[3] EARLY J, BARTON J, WENZEL R, *et al.* The los alamos FEL photoinjector drive laser [J]. IEEE J Q E, 1991, 27(12): 2644-2649.

[4] O'SHEA P G. The los alamos photoinjector-driven free electron laser [J]. Proc SPIE, 1991, 1552: 36-41.

[5] BABZIEN M, FISHER A, POGORELSKY I, *et al.* A high stability Nd:YAG photocathode drive laser [EB/OL]. [2009-01-05]. <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/377614-7DzF01/webviewable/377614.pdf>.

场进行了计算,此时的计算过程仅仅涉及固态。得到的几个定点的温升历史曲线如图4所示。图中曲线a和曲线b分别表示在采用随温度变化的吸收率模型时得到的前、后表面中心点的温升。依据(9)式取平均吸收率,然后使用单一吸收率模型进行计算,得到前、后表面中心点温升曲线c和曲线d。对比后可见,采取单一常数吸收率模型可以得到与采用随温度变化吸收率模型得到相似的温升曲线,但温升曲线难以完全符合,不过差异相对较小。这是由于在物态为单相(仅为固态)时使用单一常数吸收率模型尽管可以调整总的沉积能量与随温度变化的吸收率模型相一致,但却难以调整能量沉积的速率也与之一致,因此,使得温升的历史曲线有一定差异。

3 结论

分别使用这3种吸收率模型对于铝板的激光加热问题进行有限元仿真计算,对比了不同吸收率模型下的计算结果。结果表明:对于固态和液态均明显存在的加热过程,固态和液态阶段分别为不同常数的组合吸收率模型能得到与使用吸收率温度相关模型很相似的结果,而使用单一的常数吸收率模型与之相比则差别较大;对于加热区域为单一物态的加热过程,使用单一常数吸收率模型与使用吸收率温度相关模型的计算结果有一定的差别,但差别不大。

在这3种吸收率模型中,拟合温度相关的吸收率当然是最理想的,但通过试错来对其进行确定很困难。对于固态和液态均明显存在的加热过程,使用组合吸收率模型分别确定固态和液态阶段的常数吸收率要方便得多,并且能得到与使用吸收率温度相关模型很相似的结果,而使用单一的常数吸收率模型与使用吸收率随温度变化的吸收率模型相比则差别较大,因此,此种情况下使用组合吸收率模型既能比较方便,又能得

到较好的结果。对于加热区域为单一物态的加热过程,使用单一常数吸收率模型与使用吸收率温度相关模型的计算结果有一定的差别,温升过程难以完全一致,但差别不大,基本能反映出温升过程。

此外,金属吸收率随温度的变化在加热过程上会表现为吸收率随时间发生变化,若能够拟合出一个随时间变化的吸收率也是一种比较合理的方法。

参 考 文 献

- [1] SHEN X F, WANG Y, YAO J, *et al.* Finite element simulation of thermal stress distribution in direct metal laser sintering [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(4): 343-346 (in Chinese).
 - [2] LONG R Sh, LIU W J, SHANG X F. Numerical simulation of temperature field on laser metal deposition shaping [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(4): 394-396 (in Chinese).
 - [3] LU J, NI X W, HE A Zh. Interaction physics between laser and materials [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1996: 19-22 (in Chinese).
 - [4] ZUO T Ch. Laser materials processing of high strength aluminum alloys [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 20-21 (in Chinese).
 - [5] LIN X Ch, SHAO T M. Lumped method for the measurement of laser absorptance of materials [J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, 50(5): 856-859 (in Chinese).
 - [6] ZOU D N, LEI Y P, LIANG G Y, *et al.* Determination of laser absorptivity of metal by numerical calculation technique and trial-and-error method [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2001, 37(7): 737-740 (in Chinese).
 - [7] HUANG Y L, YANG F H, LIANG G Y, *et al.* Using in-situ technique to determine laser absorptivity of Al-alloys [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(5): 449-453 (in Chinese).
 - [8] CHEN W L, YANG Y Ch, LEE H L. Estimating the absorptivity in laser processing by inverse methodology [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2007, 190(1): 712-721.
 - [9] KONG X Q. The application of the finite element method in heat transfer [M]. Beijing: Science Press, 1998: 204 (in Chinese).
 - [10] FANG K F. Handbook of engineering materials (volume: nonferrous metal) [M]. Beijing: Beijing Publishing House, 2002: 580-585 (in Chinese).
-
- (上接第621页)
- [6] FRY A R, FITCH M J, MELISSIONS A C, *et al.* Laser system for the TTF photoinjector at FERMILAB [C]//Particle Accelerator Conference, 1997. Vancouver, BC, Canada; IEEE, 1998: 2867-2869.
 - [7] LU X Y, LIN L, ZHAO K, *et al.* Drive laser system of a high average current photocathode electron gun in PKU [J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2004, 28(8): 881-884.
 - [8] IGOR K. High power mode-locked diode-pumped picosecond laser [M]. Switzerland: User Manual, Time-Bandwidth Ltd, 2002: 6-7.
 - [9] IGOR K. Timing stabilizer feedback system accessory [M]. Switzerland: User Manual, Time-Bandwidth Ltd, 2002: 18-20.