

文章编号: 1001- 4322(2000)06- 0737- 04

# 光阴极注入器的驱动激光器\*

李正红, 胡克松, 刘志强, 杨茂容

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川绵阳 919-1018 信箱 621900)

**摘要** 光阴极注入器要求驱动激光器的激光时间抖动小、脉冲宽度窄、激光波长短和脉冲功率高。从原理和实验上介绍光阴极注入器的驱动激光器, 包括连续波锁模振荡腔、时间同步、激光脉冲功率放大等。该激光器输出激光微脉冲宽度 10ps, 微脉冲时间抖动小于 2ps, 宏脉冲宽度 2μs, 峰值功率 100kW, 已用于光阴极 RF 腔注入器实验, 并获得了很好的结果。

**关键词** 光阴极注入器; 光阴极; 锁模激光器

**中图分类号** TN 248.3<sup>3</sup> **文献标识码** A

驱动激光器主要由连续波锁模振荡腔、连续脉冲或脉冲串的功率放大器、脉冲切选、倍频和同步控制等部件组成。目前运行中的驱动激光器按输出方式分为三类: 脉冲串输出、连续波输出和单脉冲输出。具有代表性的结构有美国 LANL<sup>[1]</sup>、CEBA F、BNL<sup>[1]</sup>、ANL、Fermi<sup>[2]</sup>和 SLAC 等单位的注入器驱动激光器, 本文介绍的驱动激光器是脉冲串输出。

## 1 驱动激光器基本原理及组成

### 1.1 驱动激光器的基本组成

本文研究的光阴极注入器中的驱动激光器结构如图 1, 振荡腔输出受 RF 控制信号控制的连续锁模激光脉冲列, 经三级脉冲氙灯放大, 用 Pockel 从放大后的脉冲包络中切选 2~10μs 激光宏脉冲, 再两次倍频, 最后将输出激光送入 RF 腔中, 作用于光阴极产生光电子。

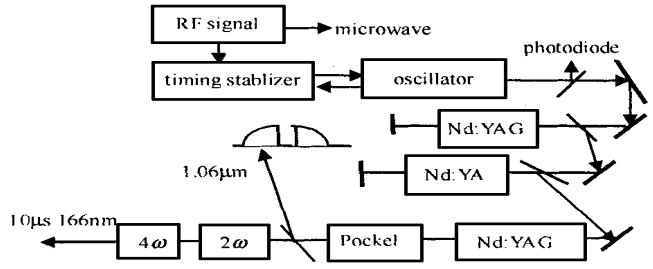


Fig. 1 Setup of the driving laser of RF photoinjector

图 1 光阴极注入器驱动激光器的结构图

### 1.2 连续波锁模振荡腔

驱动激光器中连续波锁模振荡腔是 GE-100 二极管泵浦的锁模激光器, 用半导体可饱和吸收反射镜 (SESAMs)<sup>[3]</sup> 实现自锁模, 其参数为: 平均功率 500mW、激光微脉冲宽度 8ps、重复频率 81.25MHz、激光波长 1.064μm。

### 1.3 时间同步器

时间同步器 (CLX-1000) 的工作原理<sup>[4]</sup> 是当同步器接收到 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 2), 激光脉冲时间抖动的最大值为 4.4ps, 均方根为

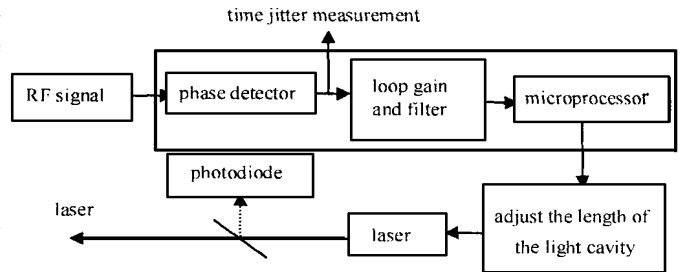


Fig2 The arrangement of timing stabilizer

图 2 时间同步器的工作框图

\* 收稿日期: 2000-01-12; 修订日期: 2000-04-21

基金项目: 中国工程物理研究院预研基金

作者简介: 李正红(1968-), 男, 博士。



0.86 ps

当激光器稳定工作时, 激光脉冲的时间抖动与定标信号(见图 3)的关系为

$$\Delta t_j = sV(t) \tag{1}$$

式中  $s$  由实验定标信号确定(见图 3), 当激光脉冲与 RF 信号之间的频率差为  $\Delta f$  时,  $s(d t/dV)(\Delta f/f_0) = 0.58(\text{ps/mV})$ , 式中  $d t/dV$  为定标信号过时间轴处斜率的倒数;  $\Delta f = 1\text{kHz}$ ;  $f_0$  为激光脉冲的重复频率

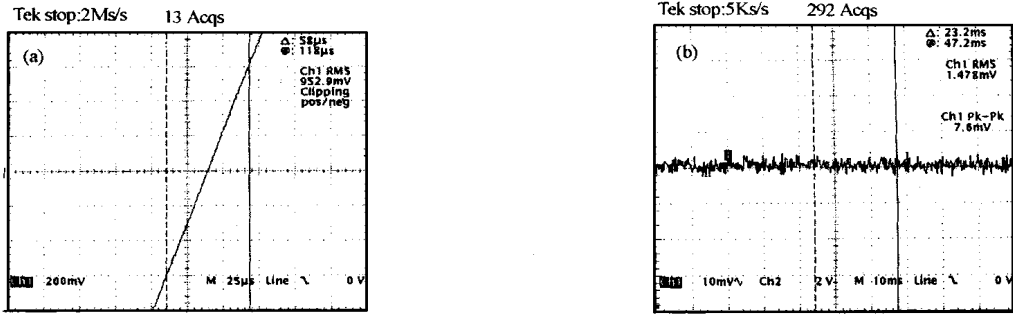


Fig. 3 Measurement of the laser timing jitter (a) calibration; (b) measurement

图 3 激光脉冲的时间抖动信号及定标信号图

### 1.4 激光脉冲放大和倍频

#### 1.4.1 激光脉冲放大

激光功率放大器的放大单元由工作介质(Nd:YAG 等)和泵浦源两部分组成(见图 4)。

当一个长度为  $l$  的放大介质的储能密度为  $E_{st}$

时, 增益为

$$g = \beta E_{st} l \tag{2}$$

式中  $\beta = 1/E_s = 4.73\text{cm}^2/\text{J}$  (Nd:YAG 介质);  $E_s$  为介质的饱和能量密度。

当能量为  $E_m$  的激光脉冲经放大单元后, 输出激光脉冲的能量<sup>[5]</sup>为

$$E_{out} = S E_s \ln \{ 1 + e^g [e^{(\beta E_m)}] - 1 \} \tag{3}$$

式中  $S$  为激光包络面积。

当脉冲宽度为  $\sigma_0$  的高斯分布的激光脉冲经放大后, 其脉冲宽度<sup>[6]</sup>  $\sigma_1$  为

$$\sigma_1 = \sigma_0 \sqrt{1 + 4 \frac{g}{\sigma_0^2 \Delta\nu^2}} \tag{4}$$

式中  $\Delta\nu$  为介质增益带宽,  $\Delta\nu = 3.5 \times 10^{11} (\text{s}^{-1})$ 。

#### 1.4.2 倍频

根据倍频理论, 当脉冲宽度为  $\sigma$  的高斯分布的激光脉冲倍频后, 脉冲形状为

$$P_1(t) = \eta_l P_0^2 e^{-2t^2/\sigma^2} \tag{5}$$

四倍频后, 激光微脉冲形状为

$$P_2(t) = \eta_4 P_0^4 e^{-2t^2/\sigma^2} \tag{6}$$

式中  $\eta_l$  为倍频效率;  $\eta_4$  为四倍频效率;  $P_0$  为基频激光的峰值功率。

二倍频后激光微脉冲宽度减小到  $0.707\sigma$ , 四倍频后脉冲宽度减小  $0.5\sigma$

## 2 实验结果和理论分析

根据泵浦灯的放电理论, 可以得到其放电功率曲线, 图 5 为  $V = 1\text{kV}$  时灯的放电功率曲线, 放大器的输入为连续波锁模振荡腔的输出(如图 6, 激光脉冲能量为  $6\text{mJ}$ , 间隔  $12.5\text{ns}$ ), 由此可以得到介质增益(图 7)和

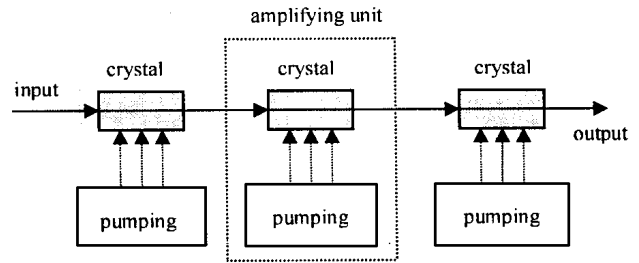


Fig. 4 Laser power amplifiers

图 4 激光功率放大器

放大后微脉冲幅度包络(图 8), 及相应于 Pockel 切选后宏脉冲的增益 ( $g = 2$ ) 及微脉冲能量的计算值 ( $E = 25\mu\text{J}$ )。图 9 为实验测得的放大后激光脉冲包络, 同计算结果(图 8)一致, 图 10 为 Pockel 切选后激光的宏脉冲包络, 宏脉冲能量约为  $4\text{mJ}$ , 相应的微脉冲能量约为  $25\mu\text{J}$ , 也同计算结果一致。由于增益  $g = 2$ , 根据式(4)可得微脉冲宽度为  $15\text{ps}$ , 则二倍频后的微脉冲宽度为  $11\text{ps}$ , 四倍频后的微脉冲宽度为  $7.5\text{ps}$ 。图 11 是用条纹相机测得的二倍频微脉冲的结构, 激光脉冲宽度约为  $11\text{ps}$ , 同计算结果符合。

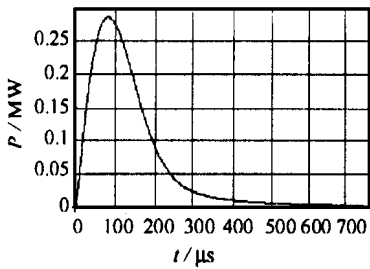


Fig 5 The curve of pumping power  
图 5 灯的放电功率曲线

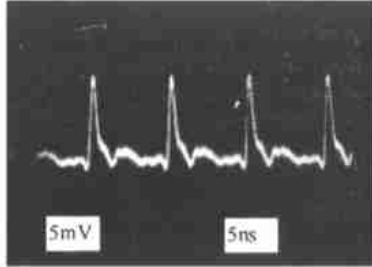


Fig 6 Output of oscillator  
图 6 连续波锁模振荡腔的输出

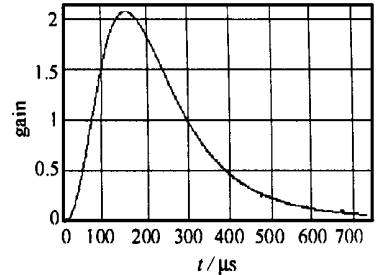


Fig 7 The gain of the laser pulse in the cyrttal  
图 7 放大介质的增益变化曲线

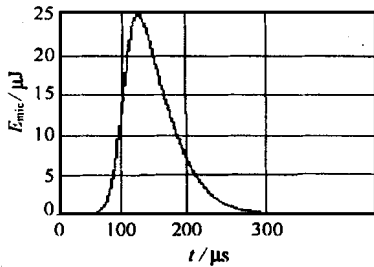


Fig 8 The laser pulse envelope after amplification  
图 8 放大后的微脉冲包络的波形图

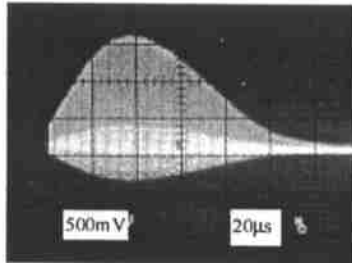


Fig 9 Measured pulse envelope after amplification  
图 9 放大后的激光脉冲包络

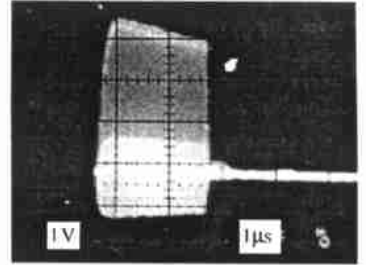
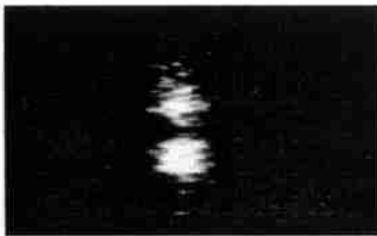
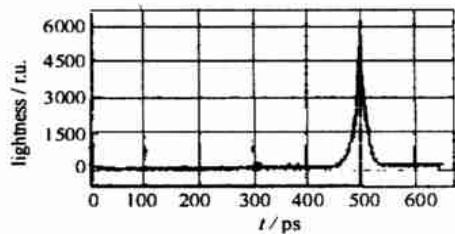


Fig 10 Pulse envelope after pulse picker  
图 10 Pockel 切选后的激光脉冲包络



(a) image on the streak camera



(b) measured result

Fig 11 Measurement of micropulse(2ω) on laser on streak camera  
图 11 二倍频微脉冲在条纹相机上的测量结果

### 3 光阴极注入器实验

驱动激光器已经用于注入器实验, 图 12 为法拉第筒测得的光电流波形, 图 13 为荧光靶测得的电子束束斑, 包络半径为  $2\text{mm}$ 。实验中电子束流强  $70\text{A}$ , 能量  $2.5\text{MeV}$ , 微脉冲宽度  $10\text{ps}$ , 重复频率  $81.25\text{MHz}$ , 宏脉冲宽度  $2.5\mu\text{s}$ , 重复频率  $3.125\text{Hz}$ , 电子束发射度  $4\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 。

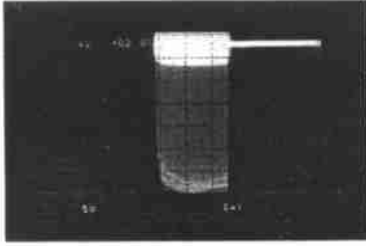


Fig. 12 Photocurrent measured by Farady cup  
图 12 法拉第筒测得的光电流波形

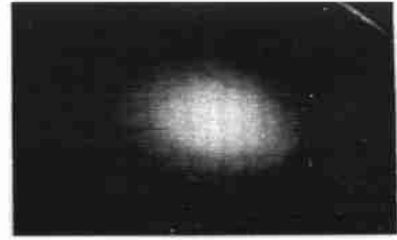


Fig. 13 Spot of electron beam on the phorsphor  
图 13 荧光靶测得的电子束束斑

## 参考文献

- [1] O'shea P G. The Los Alamos photoinjector-driven free-electron laser[A]. SPIE[C], 1991, **1552**: 143
- [2] Fry A R, Fish M J, Melissinos A C, et al Laser system for the TTF photinjector at Fem Lab[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1998, **32**: 2867~ 2869
- [3] Keller U. Solid-state low-loss intracavity saturable absorber for Nd: YLF lasers: an antiresonant semiconductor Fabry-Perot saturable absorber[J]. *Optics Lett*, 1992, **17**: 505~ 507.
- [4] Rodwell M J W, Bloom D M, Weingarten K J. Subpicosecond laser timing stabilization[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1989, **25** (4): 817~ 827.
- [5] [西德]克希奈尔 W. 固体激光工程[M]. 北京: 科学出版社, 1980
- [6] Li Zhenghong, Liu Zhiqiang, Qian Mingquan, et al Amplification of ps laser pulse[A]. SPIE[C], 1999, **3862**: 240

## The Driving Laser of Photoinjector

LI Zheng-hong, HU Ke-song, LIU Zhi-qiang, YANG Mao-rong

(Institute of Applied Electronics, CAEP P. O. Box 919-1018, Mianyang 621900, China)

**ABSTRACT:** As the driving laser of photoinjector, there are many hard requirements, for example the low timing jitter ( $< 2\text{ps}$ ), the narrow pulse width, the high peak power, and etc. According to its characters, the paper discusses the driving laser of photoinjector, which is made of the oscillator, timing stabilizer, the amplifier, and etc. The theoretical analysis and some experimental results are also presented in the paper.

**KEY WORDS:** photoinjector; photocathode; mode-locked laser