

# 光阴极电子枪微波与激光同步系统研究<sup>\*</sup>

刘圣广<sup>1)</sup> 王鸣凯 孙大睿 顾小冯

(中国科学院高能物理研究所 北京 100080)

**摘要** 光阴极微波电子枪中,微波与激光脉冲的同步问题是其能否稳定工作的关键之一.我们自行设计、采用了一种取样锁相电路,用频率不很稳定的激光脉冲的基波与 S 波段高频微波直接取样鉴相,提高了锁相精度,实现了超快激光脉冲与高频微波的精准同步,这在国内还是第一次.均方根时间抖动为 0.57ps,时间抖动的最大值为 2.6ps,锁相精度完全满足 SDUV 项目光阴极微波电子枪的要求.

**关键词** 光阴极微波电子枪 锁模激光 同步 取样鉴相器

## 1 引言

光阴极微波电子枪能够提供发射度低、能散小、峰值流强高的高品质电子束团,是高能电子直线对撞机、高增益 FEL、康谱顿背散射 X 射线等研究领域的关键技术.自 1984 年,由 G. H. Lee 等人第一次完成原理性实验后,世界许多实验室都开展了光阴极微波电子枪研究<sup>[1-3]</sup>.

对于光阴极微波电子枪,激光与微波的时间上的同步及稳定性又是其能否工作的关键之一.同步控制系统就是用来控制激光脉冲与微波源信号的精准同步.上海 SDUV 项目要求激光脉冲相对微波的均方根时间抖动值小于 2ps.在文献[4]中,是将 75MHz 的激光脉冲与 3GHz 的微波同步,采用的技术是利用激光信号的 5 次谐波 375MHz 与 3GHz 微波信号的 1/8 分频进行 375MHz 同频鉴相.文献[5]中是将 1GHz 的自由电子激光脉冲与 100MHz 的掺钛蓝宝石锁模激光同步,采用的技术是利用掺钛蓝宝石锁模激光脉冲的 10 倍频信号与自由电子激光脉冲在 1GHz 同频鉴相.在实验中则是采用了一种取样锁相技术,将 102MHz 的掺钛蓝宝石锁模激光与 2856MHz 的微波信号直接鉴相——取样鉴相<sup>[6]</sup>.

## 2 取样鉴相原理

取样鉴相器由脉冲形成器、取样器和保持电路 3 部分组成,如图 1 所示.鉴相过程如下:首先取样信号经过一个阶跃二极管,由正弦信号变为一窄脉冲信号,脉冲宽度 2—3ps,如图 2.这个窄脉冲信号如同一个开关,只有当窄脉冲进入取样器,开关打开,允许被取样信号通过,否则,被取样信号被阻断.

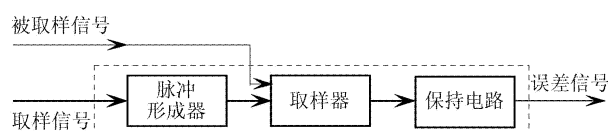


图 1 取样鉴相器

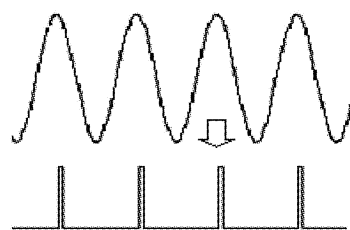


图 2 正弦信号变为窄脉冲信号

2004-03-10 收稿

<sup>\*</sup> 中国科学院知识创新工程重大项目基金(KJ CX2-No.3)资助

1) E-mail: liushg@ihepa.ac.cn

因为窄脉冲很窄,通过的被取样信号电压可视为对应点时刻的电压,此过程为取样过程,如图 3 所示.

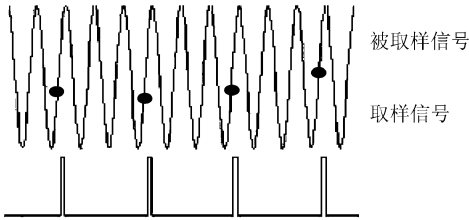


图 3 取样示意图

取样电压,通过保持电路保持,直到下一次窄脉冲到来,再次取样.由上面分析,误差电压完全取决于两个信号间的相对时间关系.取样信号可表示为

$$v_r(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_r + t_1), \quad (1)$$

式中  $T_r = 1/f_r$  为取样脉冲周期;  $t_1$  表示初始时延,其对应的初始相移

$$\theta_1 = (2\pi/T_r)t_1,$$

被取样的正弦波信号表示为

$$v_0(t) = V_0 \sin(\omega_0 t + \theta_0), \quad (2)$$

当  $f_0$  约为  $f_r$  的  $m$  倍时,上式可写成:

$$v_0(t) = V_0 \sin(m\omega_r t + \theta_2), \quad (3)$$

其中  $\theta_2 = (\omega_2 - m\omega_1)t + \theta_0$  为以  $m\omega_r t$  为参考的瞬时相位.

由上述分析可知,取样发生在时刻  $t_n = nT_1 - t_1$ . 所以将  $t_n$  代入(1)式,即可得到取样点的电压值为

$$v_d(t_n) = V_0 \sin \left[ m \frac{2\pi}{T_r} (nT_r - t_1) + \theta_2 \right] = V_0 \sin(2mn\pi + \theta_2 - m\theta_1), \quad (4)$$

$$v_d(t_n) = V_0 \sin(\theta_2 - m\theta_1) = V_0 \sin \theta_e(t),$$

其中

$$\theta_e(t) = (\omega_0 t + \theta_0) - (m\omega_r t + m\theta_1), \quad (5)$$

$\theta_e(t)$  为被取样信号与取样脉冲信号的  $m$  次谐波信号间的相位差.这里说的取样脉冲信号  $m$  次谐波,只是理论上的,锁相过程并不需要真正的  $m$  次谐波成分.

### 3 实验研究

取样锁相更多地应用于固态频率源电路中,一般取样信号是较低频的、稳定度非常高的晶振信号,被取样信号是高频的压控振荡器的输出信号,自身

的频率稳定度很差,两者锁定后,可以得到频率稳定度非常的高频信号.而在我们的锁相回路中,取样信号是 102MHz 左右的激光信号,频率受环境影响,有抖动.而被取样信号是 2856MHz 的稳定微波信号.由(4)式可推知,和频率为 102MHz 的同频鉴相相比,取样鉴相器将把激光频率抖动(或者相位抖动)放大了 28 倍,极大地提高了鉴相的灵敏度和锁相精度.工作原理如图 4.

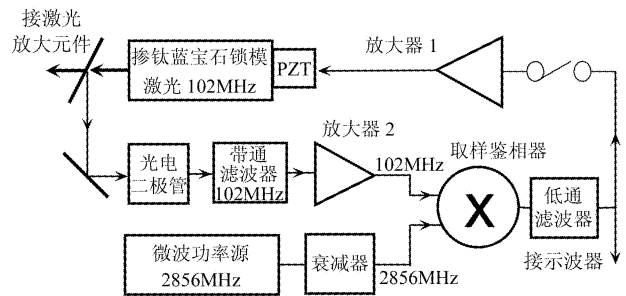


图 4 同步系统原理

#### 3.1 锁模激光

激光是由 532nm 光泵浦的掺钛蓝宝石自锁模激光,脉冲宽度为 30fs,重复频率为 102MHz 左右.为提高激光系统的稳定性,激光的一端腔镜是可饱和吸收镜 (SESAMs),并且实验是在 1000G 超净室中完成的.激光脉冲经过光电二极管后的信号如图 5.

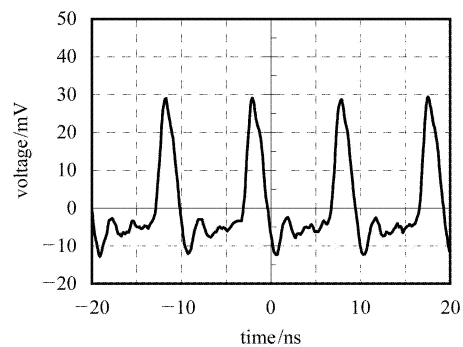


图 5 光电二极管输出的激光脉冲信号

激光的脉冲频率取决于腔长,有  $f = 2c/L$ , 所以有

$$\Delta f = - \frac{2c}{L^2} \cdot \Delta L \quad (6)$$

腔长的变化,对应脉冲频率的变化.实验中, SESAMs 固定在压电陶瓷上,腔长的改变是通过改变压电陶瓷上的电压实现的.

### 3.2 压电陶瓷

压电陶瓷在锁相系统中,非常关键.其形变系数、形变的线性范围和自身的固有频率直接影响着锁相的同步带范围和锁相精度.利用一根 3cm 长压电陶瓷,对其性能进行了测试,结果如图 6.考虑到压电陶瓷的线性范围,实验时,通过放大器,对其加了 50V 的直流偏置电压.

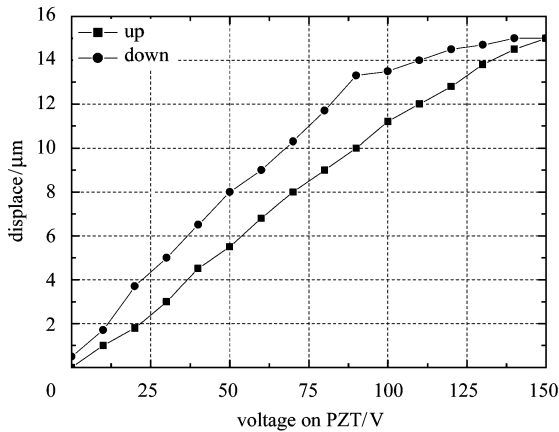


图 6 形变量与电压的关系

### 3.3 实验过程

2856MHz 的微波源信号经可变衰减器,功率衰减为 2mW,接取样鉴相器;锁模激光经过光电二极管,变为不规则的电信号.因为取样鉴相器需要正弦信号输入,所以此电信号先通过  $120\text{MHz} \pm 5\text{MHz}$  的带通滤波器,滤出其基波,然后放大到 2mW,如图 7 所示,接取样鉴相器.鉴相器输出的误差信号接示波器显示.压电陶瓷接通 50V 直流电压,调节激光器腔长,监视示波器.当误差信号频率调节到 500Hz 以内时,误差信号接放大器,闭环锁定.

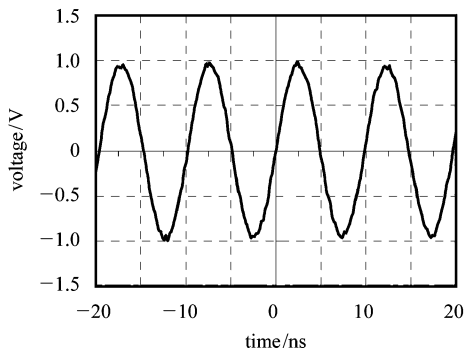


图 7 滤波放大后的激光脉冲信号

### 3.4 实验结果

图 8 中 a,b 分别是环路锁定前、后的误差信号.在式(4)中,  $V_0$  是误差信号的振幅.实验中测得,  $V_0 = 9\text{V}$ .所以,式(4)可写为

$$V_{\text{error}} = 9\sin\theta_e(t). \quad (7)$$

在锁定状态下,相位误差  $\theta_e(t)$  在零附近上下抖动,  $\sin\theta_e(t) \approx \theta_e(t)$ , 所以

$$V_{\text{error}} = 9 * \theta_e(t), \quad (8)$$

$$\Delta V_{\text{error}} = 9 * \Delta\theta_e(t), \quad (9)$$

$$\Delta\theta_e(t) = \Delta V_{\text{error}}/9. \quad (10)$$

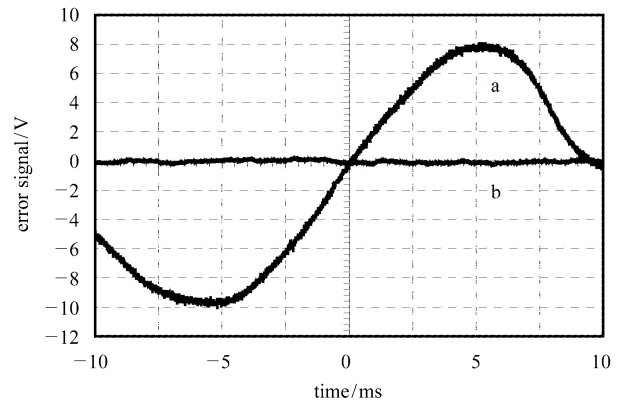


图 8 误差信号

a 锁定前, b 锁定后.

锁定状态下,误差信号的均方根  $\Delta V_{\text{errorRMS}} = 92.8\text{mV}$ ,峰-峰值  $\Delta V_{\text{errorp-p}} = 420\text{mV}$ ,所以,有

$$\Delta\theta_e(t)_{\text{RMS}} = 0.01\text{rad} = 0.59^\circ,$$

$$\Delta\theta_e(t)_{\text{p-p}} = 0.045\text{rad} = 2.67^\circ.$$

相对于 2856MHz 微波信号的时间抖动为

$$\Delta t_{\text{RMS}} = 0.59 \times \frac{350}{360} = 0.57\text{ps},$$

$$\Delta t_{\text{p-p}} = 2.67 \times \frac{350}{360} = 2.6\text{ps}.$$

## 4 结语

实验结果表明,采用取样锁相技术,可以实现超快激光脉冲与 2856MHz 微波信号的精准同步,同步精度完全满足 SDUV 项目的要求.下面将把激光腔的一端镜安装在步进电机上,开发软件,自动采集激光、微波频率,实时精控激光腔长,实现环路的自动锁定和长时间同步.

## 参考文献 (References)

- 1 Bakker R et al. Proceedings of EPAC, 2002, 1812
- 2 Kuroda R et al Proceedings of EPAC, 2002, 1783
- 3 Batchelor K et al. Proceedings of EPAC, 1990, 541
- 4 Kiewiet F B et al. Nucl. Phys., 2002, **A484**:619
- 5 Mark J W et al. IEEE Jour. Quan. Electronics, 1989, **25**:817
- 6 CHEN Shi-Wei. Theory and Application of the Phase locking technology. Beijing: Publishing house of Weapon Industry, 1990. 287—298 (in Chinese)  
(陈世伟. 锁相环路原理及应用. 北京: 兵器工业出版社, 1990. 287—298)

**Research on the Synchronization System of Ultrafast Laser and the S-Band Microwave**\*LIU Sheng-Guang<sup>1)</sup> WANG Ming-Kai SUN Da-Rui GU Xiao-Feng

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100080, China)

**Abstract** We have synchronized a 102MHz ultrafast self-mode-locked Ti:sapphire laser to a 2856MHz RF source with the sample-locking technology. The relative root-mean-square time-jitter is 0.57ps and the maximum time jitter is 2.60ps. This is the first time to accomplish the synchronization between the ultrafast laser pulse and the S-band microwave in china. Potential applications include synchronization of lasers and RF power sources in particle accelerator experiments and high-resolution pump-probe experiments.

**Key words** photocathode RF gun, mode-locked laser, synchronization, sample mixer

---

Received 10 March 2004

\* Supported by Knowledge Innovation Project of CAS(KJ CX2-No.3)

1) E-mail: liushg@ihepa.ac.cn