

光阴极微波电子枪中时间抖动 对粒子动力学的影响

杜强^{1;1)} 何小中¹ 黄文会¹ 李荐民¹ 唐传祥¹ 孙大睿² 戴建枰²

1 (清华大学工程物理系 北京 100084)

2 (中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 对光阴极微波电子枪粒子束性能起决定性影响的因素之一就是激光脉冲相对加速微波相位的时间抖动. 对这种时间抖动的测量和反馈控制进行了理论和实验分析, 并对时间抖动对束流品质的影响进行了模拟研究, 得到了利用锁相环回路降低激光脉冲相位噪声的实验经验, 为光阴极微波电子枪中激光与微波相位同步问题提出了解决方法.

关键词 光阴极微波电子枪 时间抖动 相位噪声 锁相环 发射度

1 引言

清华汤姆逊硬X射线散射装置^[1, 2]对定时机制提出了很高的要求: 激光脉冲与微波参考源之间的相位同步性能决定了光阴极微波电子枪的电子束流品质^[3, 4]; 同时稳定的激光脉冲时间间隔也是保证电子束与激光束能够进行对撞的前提. 这样的同步机制要求激光脉冲到达时间与加速场中的微波相位的相对均方根抖动在皮秒以下.

光脉冲(即光阴极电子束团)到达时间间隔稳定度、加速过程微波场相位和幅度稳定性、太瓦激光脉冲与电子束团之间的同步性能等.

对整个定时系统来说, 光阴极微波电子枪中激光脉冲与微波参考频率源的时间同步指标对于系统整体同步性能和时间误差的贡献处于主导地位, 本文将通过对锁模脉冲激光器的相位噪声特征和测量、锁相环控制对相位噪声的抑制以及时间抖动对光阴极电子束团动力学特性的影响进行分析.

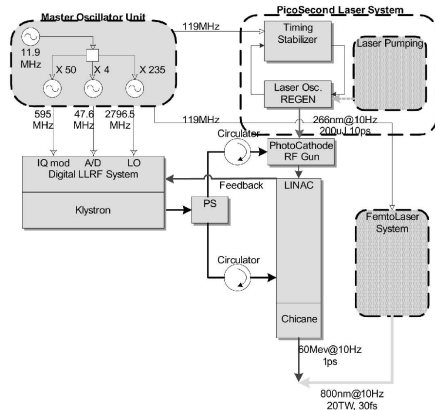


图1 汤姆逊散射装置定时同步系统框图

汤姆逊散射实验系统的同步系统设计如图(1). 汤姆逊散射系统对同步性能的要求主要包括束团到达时间和束团品质如能散和发射度的要求, 具体包括激

2 时间抖动对粒子动力学的影响

电子枪出口处中心粒子的出口相位(ϕ_G)与注入电子枪的激光脉冲相位(ϕ_0)的关系为^[5]

$$\phi_G = \phi_0 + \frac{1}{2\alpha \sin\left(\phi_0 + \frac{\pi}{6\sqrt{\alpha}}\right)} + \frac{\pi}{15\alpha}. \quad (1)$$

这里 $\alpha = eE_0/4\pi fmc$, E_0 是峰值加速电场强度, e 是电子电量, m 是电子质量. 将(1)式求导,

$$\frac{\partial \phi_G}{\partial \phi_0} = 1 - \frac{\cot\left(\phi_0 + \frac{\pi}{6\sqrt{\alpha}}\right)}{2\alpha \sin\left(\phi_0 + \frac{\pi}{6\sqrt{\alpha}}\right)}. \quad (2)$$

1) E-mail: duq97@mails.tsinghua.edu.cn

根据(2)式, 在2856MHz, 100MV/m即 α 为1.63的情况下模拟得到如图(2)所示的相位灵敏度关系曲线. 由图可见在小入射相位的情况下可以降低出射电子束渐进相位对入射相位抖动的灵敏度. 出射电子束平均能量对入射激光相位的关系为

$$\frac{1}{\gamma_G} \frac{\partial \gamma_G}{\partial \phi_0} = \frac{\partial \phi_G}{\partial \phi_0} \cot(\phi_G). \quad (3)$$

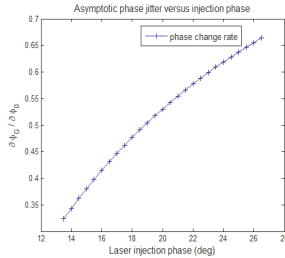


图2 出射电子束相位与入射激光束相位灵敏度关系

假设采用10ps脉宽, 上升时间0.7ps的平顶激光束团, 用PARMELA对束流品质对激光脉冲入射时间的灵敏度进行模拟, 图3(a)是如(3)式所示的平均能量对入射激光相位灵敏度以及渡越时间随入射相位的变化图, 图3(b)分别是能散和发射度对入射相位的变化图.

由于汤姆逊散射系统对能散和发射度的要求分别是 $< 0.1\%$ 和 $< 3\text{mm-mrad}$, 从模拟结果可以看出, 这两项参数对激光时间抖动的要求分别是10ps和 $> 25\text{ps}$, 大于到达时间提出的亚皮秒的要求, 故满足了后者之后可以满足系统对粒子束品质的要求.

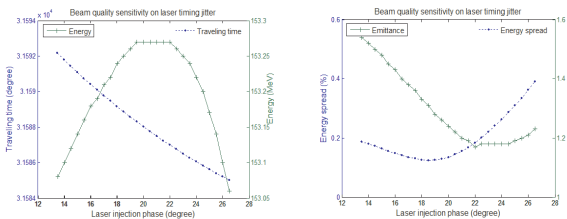


图3 (a) 粒子渡越时间和粒子能量与激光相位关系; (b) 能散和发射度与激光相位关系.

3 锁模激光时间抖动模型与测量

锁模激光脉冲之间时间间隔的不稳定性主要由增益介质的不稳定性、环境引起的机械腔长微变和量子效应引起的自发辐射因素决定^[6]. 激光脉冲的功率谱密度函数是由基频和它的 n 次倍频谐波构成, 幅度和相位噪声分别叠加在载波频率上造成展宽. 对于高次谐波相位噪声的贡献以 n^2 的系数增长, 而幅度噪声的贡献在高次谐波中保持基本恒定^[4, 7]. 在双边带功率

谱密度图上频率不稳定性量度可以用时域的量描述, 由帕索瓦定理可知在载波频率附近的频率不稳定性展宽可以表示为^[4]:

$$\sigma_J = \sqrt{\langle \phi(t)^2 \rangle} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\omega_{low}}^{\omega_{hi}} S_\phi(\omega) d\omega}. \quad (4)$$

其中积分上下限是功率谱谱偏离载波频率的频率积分范围. 单边带噪声功率谱是指谱密度函数中偏移载波 f 处1Hz的噪声功率占载波功率的对数比率, 定义为 lf (单位是dBc/Hz). 如果分离出幅度噪声谱和相位噪声谱, 可以利用(4)式计算出相应的均方根时间抖动. 即对于激光功率谱的 n 次谐波, 其幅度噪声和相位噪声谱的合成可以写为^[8]

$$\sigma_E^2 + (2n\pi f_l)^2 \sigma_J^2 = 2 \int_{f_{low}}^{f_{hi}} 10^{l_n(f)/10} df. \quad (5)$$

4 锁相环闭环控制和噪声测量

通常的谱分析办法是将带有幅度和相位调制的载波信号下变频至可以包含幅度或相位调制信号频宽的最小频宽, 将采样信号进行傅立叶分析.

闭环控制的原理是将激光脉冲的某次谐波信号与频率非常稳定的晶振信号源进行鉴相, 将相位误差信号转变成电压信号, 经增益和补偿后控制压控陶瓷晶体(PZT)改变激光谐振腔腔长, 这样在PZT的动态范围内(通常为几kHz)可以有效的补偿由环境因素等引起的激光脉冲时间抖动.

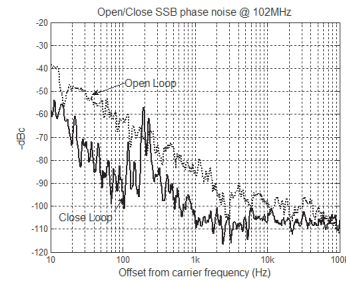


图4 基频开/闭环激光脉冲单边带噪声功率谱

系统结构如图(5)所示, 实验中采用102MHz的掺钛蓝宝石锁模激光器产生红外激光脉冲, 用PIN硅光电二极管采样, 使用锁相环回路来降低激光相位噪声, 由微波频谱分析仪测量激光信号频谱. 分别测量参考信号源和激光脉冲在开环与闭环情况下各次谐波的单边带相位噪声, 基频开/闭环的单边带相位噪声如图4所示. 计算25次谐波的均方根时间抖动由式(5)提取出幅度噪声和相位噪声分量如表1所示.

表 1 锁模脉冲激光噪声测量

类别	均方根抖动/ps
参考源	0.34±0.09
闭环	1.46±0.4
开环	3.42±0.5

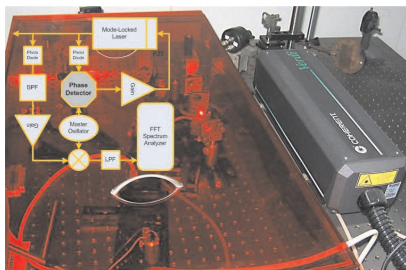


图 5 锁相环控制回路框图

5 结论

汤姆逊散射 X 射线源中, 对撞同步到达时间、粒子束能散和发射度分别对激光脉冲的时间抖动提出了要求. 本文分析了系统各项指标对于激光时间抖动的灵敏度, 提出了时间抖动的定标测量方法, 并实验实现了用锁相环反馈回路降低激光脉冲相位噪声的方法. 更精确的噪声测量手段和更完善的控制方法正在进一步研究中.

参考文献(References)

- 1 TANG C X, HUANG W H, CHEN H B. Researches of Thomson Scattering X-Ray Source at Tsinghua University. In: Free Electron Laser Conf, 2004. 622—624
- 2 HE Xiao-Zhong, HUANG Wen-Hui, TANG Chuan-Xiang et al. HEP & NP, 2004, **28**(9): 1007—1012 (in Chinese) (何小中, 黄文会, 唐传祥等. 高能物理与核物理, 2004, **28**(9): 1007—1012)
- 3 HUANG Wen-Hui, HE Xiao-Zhong, HUANG Gang et al. HEP & NP, 2004, **28**(4): 446—450 (in Chinese) (黄文会, 何小中, 黄刚等. 高能物理与核物理, 2004, **28**(4): 446—450)
- 4 Rodwell M J W, Bloom D M, Weingarten K J. IEEE. J. Quantum Electron, 1989, **25**(4): 817—827
- 5 Travier C. Nucl. Instrum. Methods, 1994, **A340**: 26—39
- 6 Haus H A, Mecozzi A. IEEE J. Quantum Electronics, 1993, **29**(3): 983—996
- 7 von der Linde D. Appl. Phys., 1986, **B39**: 201—217
- 8 Kobayashi K, Miura T, ZHANG Zhi-Gang. Nuclear Instrum. & Methods, 2000, **A445**: 239—243

Timing Jitter Sensitivity on Beam Dynamics in Photocathode RF Gun

DU Qiang^{1;1)} HE Xiao-Zhong¹ HUANG Wen-Hui¹ LI Jian-Min¹
TANG Chuan-Xiang¹ SUN Da-Rui² DAI Jian-Ping²

1 (Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

2 (Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

Abstract One of the crucial factors for the beam quality of photocathode RF gun is the relative timing jitter between the laser pulse and the RF phase. This paper introduces the sub-picosecond timing jitter measurement and the feedback control technologies, analyzing beam quality influence caused by the jitter, and acquired practical experience for using a PLL to reduce the laser pulse's phase noise, so as to solve the synchronization problem between the laser beam and the RF phase in the photocathode RF gun.

Key words photocathode RF gun, timing jitter, phase noise, PLL, emittance

1) E-mail: duq97@mails.tsinghua.edu.cn