

电光采样 (EOS) 法测量超短电子束束团长度中的模拟计算与误差分析*

孙大睿¹⁾ 徐金强 唐坤

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 随着高能物理的发展, 高能正负电子对撞机, X射线自由电子激光器, 先进的同步光源等, 都需要产生高流强超短脉冲的相对论电子束团. 于是, 亚皮秒电子束束团诊断成为加速器物理新发展的关键技术, 电子束长度的监测是其中的一部分. 电光采样(EOS)法测量超短电子束束团长度有非侵入、非破坏、实时测量的特点, 具有较好的应用前景. 本文介绍该方法的原理, 通过模拟计算分析电子束束团与探测光间距、电子束电场与电光晶体晶轴夹角、探测光偏振方向与电光晶体晶轴夹角等实验参数与束团长度测量的关系, 做系统误差分析, 对实际实验有指导意义.

关键词 电光采样 超短脉冲电子束 束团长度测量

1 引言

随着高能物理的发展, 高能正负电子对撞机、基于SASE或者HGFG的X射线自由电子激光器以及先进的同步光源等装置对相对论电子束团性能的要求不断提高. 亚皮秒量级的高流强超短脉冲相对论电子束团成为新的发展方向, 同时高流强超短脉冲束团诊断成为先进加速器新发展的关键技术之一, 电子束团长度的测量是其中重要部分.

测量亚皮秒量级的短脉冲相对论电子束团长度的方法有条纹相机法、相干辐射法、电光采样法等. 而高分辨率的条纹相机成本很高, 且操作复杂; 相干辐射测量法需要插入测量元件, 对电子束有干扰, 而且不能实现实时测量, 因此都存在一定局限. 电光采样法是一种非侵入测量法, 能够在几微秒内完成测量, 可以实现实时监测^[1]. 因此, 电光采样测量法具有非破坏性、非侵入性、实时监控、高分辨率等特点, 是一种有潜力的束团长度测量方法^[2-4]. 本文通过模拟计算, 分析了电光采样法测量束团长度中实验装置引起的系统误差.

2 电光采样法测量束团长度原理

电子束团的库仑场分布表征了束团中的电荷分

布, 当束团库仑场作用在电光晶体上时, 电光效应使通过晶体的探测光偏振态发生变化, 经过1/4波片、渥拉斯顿棱镜将信号光分解为偏振方向相互垂直的两路光束, 用平衡探测器接收得到二者的光强差信号 ΔI , ΔI 携带有束团电场信息. 利用激光脉冲扫描电子束团, 探测束团库仑场的分布, 由此确定束团长度. 电

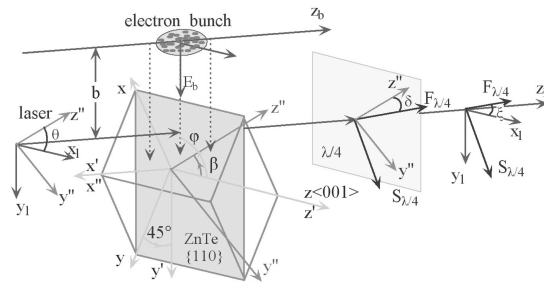


图 1 电光采样实验中各坐标系关系及 ZnTe 坐标系变换

光采样实验中 ZnTe 坐标系变换及各坐标系关系见图 1. 其中 b 为束团与探测光间距, φ 为束团库仑场 E_b 与 ZnTe $\langle 001 \rangle$ 方向的夹角, ZnTe 在 E_b 作用下先以 z 轴为心旋转 45° , 然后以 x' 轴为心旋转 β . θ , δ , ξ 分别为探测光初始偏振方向与 z'' 的夹角、 z'' 与波片快轴的夹角、波片快轴与探测光初始偏振方向的夹角, 三者满足关系 $\delta + \xi = \theta$.

2008 - 01 - 07 收稿

* 国家自然科学基金项目 (10575116) 资助

1) E-mail: sunray@ihep.ac.cn

电子分布为 $\rho(x, y, z)$ 的束团在距离 z_0 轴 b 处的垂直库仑场 E_b 为

$$E_b = \frac{\gamma}{4\pi\epsilon_0} \int_V \frac{(b-y)\rho(x, y, z)}{(x^2 + (b-y)^2 + \gamma^2 z^2)^{3/2}} dV. \quad (1)$$

在电光效应作用下, 透过晶体的探测光两正交偏振分量的相位差 Γ 正比于束团库仑场 E_b :

$$\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda_0} L \Delta n'' = \frac{\pi}{\lambda_0} L n^3 \gamma_{41} E_b \sqrt{1 + 3\sin^2 \varphi}, \quad (2)$$

其中 λ_0 为探测光波长, L 为晶体厚度, n 为晶体主折射率, γ_{41} 为晶体的非零线性电光张量. 取 $\varphi = 90^\circ$, 则 $\beta = 45^\circ$, Γ 为最大值. 利用琼斯矩阵^[5]可得到平衡探测器测量到的光强差 ΔI ^[6]:

$$\Delta I = I_0 |\cos 2\theta \cos(2\theta - 2\xi) \cos 2\xi + \sin 2\theta [\sin(2\theta - 2\xi) \cos 2\xi \cos \Gamma - \sin 2\xi \sin \Gamma]|, \quad (3)$$

其中 I_0 为入射光强. 取 $\theta = 45^\circ$, $\xi = 45^\circ$, 则 $\Delta I = I_0 \sin \Gamma$. 由于一般情况下 Γ 很小, 则有 $\Delta I \propto \Gamma \propto E_b$, 因此测量到的光强差信号 ΔI 的宽度就为束团长度测量值 l_M .

3 误差分析

在实际测量中, 由于实验装置的机械精度、光路调整精度等限制, 束团、探测光及各种光学元件间的几何关系总会与理想状态存在偏差, 由此产生实验装置系统误差. 这些偏差主要包括: 间距 b 、角度 φ 、角度 θ 、角度 ξ 偏差等引起的误差. 本文选用北京自由电子激光装置 (BFEL) 产生的电子束束团参数模拟计算 EOS 测量中的实验装置系统误差, 参数如下: 束团电荷 $Q = 80\text{pC}$, 束团长度 (FWHM) $l = 4\text{ps}(1.2\text{mm})$, 束团能量 $\gamma = 60$. 为了简化计算, 进行理想化处理, 电子束团以一维高斯分布来计算.

3.1 电子束团与探测光的间距 b

电子束与探测光传播方向平行, 间距为 b , 观测点所在位置的电场强度分布与 b 有关^[6]. 图 2 给出了不同间距 b 时, 光强差 ΔI 曲线. 随着 b 的增加, 光强差曲线

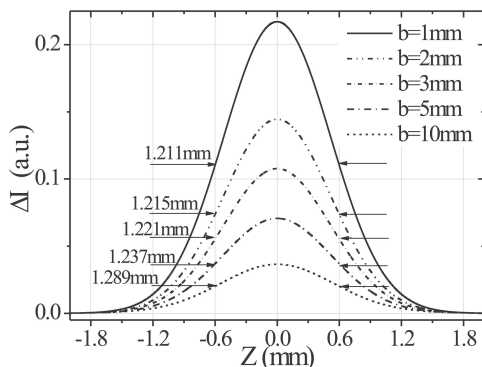


图 2 间距 b 与光强差 ΔI 分布曲线的关系

波形发生畸变, 逐渐偏离高斯分布曲线, 其 FWHM 宽度也逐渐增加. 当 b 分别取 1mm, 2mm, 3mm, 5mm, 10mm 时, 束团长度测量值 l_M 的相对误差 E_R 分别为 0.92%, 1.25%, 1.75%, 3.08% 和 7.42%. 因此, 在 EOS 测量束团长度时, 在条件允许的前提下应尽量减小 b .

3.2 束团电场与电光晶体 $\langle 001 \rangle$ 方向夹角 φ

当电光晶体以 x' 为轴转动 χ 角偏离理想位置, 则束团电场与晶体 $\langle 001 \rangle$ 方向夹角 $\varphi = 90^\circ \pm \chi$. 夹角 φ 偏离理想值 90° 时, 探测光通过 ZnTe 晶体后, y'' , z'' 轴上的相位差偏离最大值, 但 Γ 与 E_b 仍然成正比; 另外, ZnTe 晶体的折射率椭球坐标系进行坐标变换时, y' , z' 轴的旋转角度 β :

$$\beta = \arctan(-2\tan\varphi)/2, \quad (4)$$

这时, 探测光初始偏振方向与电光晶体 z'' 轴的夹角 $\theta = \beta \neq 45^\circ$. 则探测到的光强差 ΔI 为

$$\Delta I = I_0 |\sin 2\beta \sin \Gamma|. \quad (5)$$

因此, 角度 φ 的偏差影响了 ΔI 的强度系数 ($\sin 2\beta$) 和分布 ($\sin \Gamma$). 但是由于在用 EOS 测量束团长度时, 观测点处的电场强度有限, 通常 Γ 的值很小, 因此仍有 $\Delta I \propto \Gamma \propto E_b$ 的关系. 所以 φ 的偏差对 ΔI 分布的影响最终也转换为对其强度的影响. 因此角度 φ 的偏差, 只减小光强差 ΔI 的强度, 对其分布和波形没有影响, 因此不会给测量结果带来系统误差.

另外, 当束团与探测光传播方向平行, 但二者的传输轴线在水平面的投影不重合, 两投影间距离为 a 时, 对 EOS 测量束团长度的最终影响, 也是导致角度 φ 有角度偏差, 这时有 $\chi = \text{atan}(a/b)$.

3.3 探测光初始偏振方向与电光晶体 z'' 轴夹角 θ

当探测光传播方向垂直于电光晶体, 而初始偏振方向偏离理想方向 ψ 角时, 探测光初始偏振方向与电光晶体 z'' 轴夹角变为 $\theta = 45^\circ \pm \psi$, ΔI 与 θ 的关系为

$$\Delta I = I_0 |\sin 2\theta \sin \Gamma|. \quad (6)$$

角度 θ 的偏差只减小光强差的强度, 对其分布和波形没有影响, 因此不会给测量结果带来系统误差.

3.4 波片快轴与探测光初始偏振方向夹角 ξ

当波片快轴方向存在偏差, 与探测光初始偏振方向夹角 $\xi = 45^\circ \pm \alpha$ 时, 对平衡探测器测量到的光强差有影响, ΔI 与 ξ 的关系为

$$\Delta I = I_0 |\cos^2 2\xi \cos \Gamma - \sin 2\xi \sin \Gamma|. \quad (7)$$

图 3 给出了 α 取不同值时的光强差 ΔI 分布曲线.

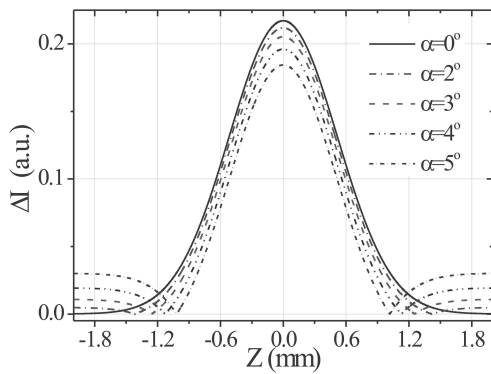


图 3 波片快轴角偏差 α 与光强差 ΔI 分布曲线的关系

表 1 波片快轴角偏差与束团长度测量值及相对误差关系

| α | 0° | 2° | 3° | 4° | 5° |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| l_M | 1.211mm | 1.193mm | 1.167mm | 1.133mm | 1.089mm |
| Er | 0.92% | -0.58% | -2.75% | -5.58% | -9.25% |

可见, ξ 的偏差对 ΔI 的波形影响很大, 光强差信

号在脉冲根部发生反转, 其 FWHM 宽度减小, 相对误差增加, 见表 1.

4 结论

综上所述, 电光采样法测量束团长度实验中, 实验装置安装偏差会引起的系统误差. 被测电子束团与探测光的间距 b 对测量的误差影响较大, 应在实验条件允许的前提下尽量减小 b 的取值. 波片快轴与探测光初始偏振方向的夹角 ξ 偏离实验设计理想角度 45° 时, 对测量结果影响很大, 不但会引入较大的测量误差, 严重时甚至导致测量信号波形畸变, 因此测量中应尽量保证该 ξ 的精确. 另外束团电场与晶体 $\langle 001 \rangle$ 方向的夹角 φ 和探测光初始偏振方向与晶体 z'' 轴的夹角 θ 的偏差不会引入系统误差, 只会影响探测信号的强度. 因此, 间距 b 和角度 ξ 是搭建 EOS 测量束团长度的实验装置的关键之处.

参考文献 (References)

- 1 YAN X, MacLeod A M, Gillespie W A et al. Phys. Rev. Lett., 2000, **85**(16): 3404—3407
- 2 Berden G, Knippels G M H, Oepts D et al. Proc. DIPAC., 2003, **IT05**: 20—24
- 3 Wilke I, MacLeod A M, Gillespie W A et al. Phys. Rev. Lett., 2002, **88**(12): 124801-1—124801-4
- 4 Berden G, Redlich B, van der Meer A F G. Proc. FEL. 2004, 343—346
- 5 Yariv A. Optical Electronics in Modern Communications. Oxford University Press, 1997. 17—38
- 6 SUN Da-Rui et al. Measurement of Relativistic Electron Beam Bunch Length by Electro-Optic Sampling Method. HPL & PB, to be published (in Chinese) (孙大睿等. 用电光采样法测量相对论电子束团长度. 强激光与粒子束, 待发表)

Simulation and Error Analysis of Electro-optic Sampling Measurement of Ultrashort Electron Beam Bunch Length*

SUN Da-Rui¹⁾ XU Jin-Qiang TANG Kun

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract For the development of high energy physics, it is needed to improve the performance of the relativistic electron bunch. The measurement of the ultrashort relativistic electron pulse becomes one of the key technologies. The electro-optic sampling measurement of relativistic electron pulses is a promising method. This method is nondestructive, non-intrusive, and real-time monitoring. Distance and angles of the reference frames will cause system deviations. In this paper these system deviations are analyzed by simulation. It provides a reference for the experiment.

Key words electro-optic sampling, ultrashort electron beam bunch, measurement of electron bunch length

Received 7 January 2008

* Supported by NSFC (10575116)

1) E-mail: sunray@ihep.ac.cn