

# SDUV-FEL 装置上利用电光频谱解码法测量束团长度实验设计与仿真

华连发<sup>1,2</sup> 张文艳<sup>2</sup> 王兴涛<sup>2</sup> 李珍<sup>1</sup> 刘波<sup>2</sup>

1 (上海大学 环境与化学工程学院 上海 200444)

2 (中国科学院上海应用物理研究所 嘉定园区 上海 201800)

**摘要** 电子束团纵向长度是束流诊断中的重要参数,电光频谱解码法(Electro-Optical Spectral Decoding, EOSD)是为数不多的可进行单发测量的高时间分辨率测量方法。本文基于上海深紫外自由电子激光装置(Shanghai Deep Ultraviolet Free Electron Laser, SDUV-FEL)设计了一套电光频谱解码法测量束团长度实验方案。通过采用针尖粗同步和可调的光栅展宽器可实现长度在 1-10 ps 内变化的束团无损测量。通过对电光调制过程及其后探测的仿真研究表明,选用 0.5 mm 厚的 ZnTe 晶体在距离束流中心 3-5 mm 处测量时,时间分辨率最高可达 180 fs (Root Mean Square, RMS),信号展宽在 3% 以内,测量的电场形状无可观测畸变,满足 SDUV-FEL 的实验需求。  
**关键词** 束团长度, 电光频谱解码, 库伦电场, 展宽与畸变, 束流诊断

中图分类号 TL506

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.040102

## Design and simulation of bunch length measurement with electro-optical spectral decoding at SDUV-FEL

HUA Lianfa<sup>1,2</sup> ZHANG Wenyan<sup>2</sup> WANG Xingtao<sup>2</sup> LI Zhen<sup>1</sup> LIU Bo<sup>2</sup>

1(Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

2(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Jiading Campus, Shanghai 201800, China)

**Abstract Background:** The longitudinal length of electron bunch is an important parameter in beam diagnostics. Electro-Optical Spectral Decoding (EOSD) is one of the few powerful approaches to accurately measure bunches down to sub-picosecond level. **Purpose:** This study aims to design and evaluate a complete system to measure the bunch length at Shanghai Deep Ultraviolet Free Electron Laser (SDUV-FEL). **Methods:** The EOSD with a probe used for coarse synchronization and a tunable grating pair used as laser stretcher was designed, and the processes of Electro-Optical modulation and detection were simulated in detail. **Results:** The bunch length varying from 1 ps to 10 ps can be measured without beam destruction in the whole process. The time resolution (Root Mean Square, RMS) is expected up to 180 fs at best and signal broadening within 3%. **Conclusion:** The longitudinal bunch length can be measured with high quality utilizing our EOSD setup. The system can meet the demands of SDUV-FEL.

**Key words** Bunch length, EOSD, Coulomb field, Broadening and distortion, Beam diagnostics

国家自然科学基金(No.11322550)资助

第一作者: 华连发, 男, 1990 年出生, 2013 年毕业于南华大学, 现为硕士研究生, 研究领域为加速器束流诊断

通信作者: 刘波, E-mail: liubo@sinap.ac.cn; 李珍, E-mail: lizhen@shu.edu.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.11322550)

First author: HUA Lianfa, male, born in 1990, graduated from University of South China in 2013, master student, focusing on acceleration beam diagnostic

Corresponding author: LIU Bo, E-mail: liubo@sinap.ac.cn; LI Zhen, E-mail: lizhen@shu.edu.cn

收稿日期: 2016-01-20, 修回日期: 2016-03-08

新一代 X 射线自由电子激光装置需要超短、超高峰值流强、稳定的相对论性电子束团。对于电荷量给定的束团，峰值流强的大小和稳定性取决于束团长度与纵向电荷密度分布。电子束团在发光之前将与直线加速结构、束团压缩部分以及色散部分等相互作用，这些过程包含各种复杂的效应，通过对束团长度与电荷密度分布的诊断能够深入理解束团压缩形成机制并指导机器的调试与优化<sup>[1]</sup>。然而由于加速器系统参数的变化，每发束团的形状和到达时间各不相同，因此单发测量对于实时监测束团参数极为重要。

目前拥有亚皮秒量级及以下时间分辨率的单发测量手段不多。横向偏转腔(Transverse Deflecting Structure, TDS)是迄今为止分辨率最高(<15 fs)的单发测量手段<sup>[2-3]</sup>，但它需要额外且昂贵的射频功率源并占用较大的空间，且对束流造成破坏。电光频谱谱解码法(Electro-Optical Spectral Decoding, EOSD)同横向偏转腔相比<sup>[4]</sup>，虽分辨率不及后者，但它具有简单经济、不破坏束流、能实现在线实时测量、几乎不受束流横向尺寸的影响<sup>[5]</sup>等优点，还能同时监测束团到达时间<sup>[6]</sup>等参数。电光频谱谱解码探测最先被用于 THz 测量<sup>[7-9]</sup>，2002 年首次被用于加速器电子束团测量<sup>[10]</sup>，目前已在各相关实验室得到广泛的研究。类似的基于电光采样的方法还有时间解码法<sup>[11]</sup>、空间解码法<sup>[12]</sup>和频谱上转换法<sup>[13]</sup>等。

随着国内自由电子激光研究的发展，对束团长度与电荷密度分布的单发测量变得越发迫切。依托于上海深紫外自由电子激光实验装置(Shanghai Deep Ultraviolet Free Electron Laser, SDUV-FEL) 本文进行了基于电光频谱解码法测量电子束团长度的方案设计和仿真研究。

## 1 实验原理与实验设计

### 1.1 实验原理

接近光速前进的电子束团产生的库伦电场几乎完全集中在与束团前进方向垂直的狭小圆盘内，电场张角为  $2/\gamma$ <sup>[14]</sup>，前进中的电场作用到电光晶体上将引起晶体双折射，此时通过晶体的偏振激光的偏振态将发生改变，且变化程度与电场大小成正比，电场信息将被线性编码进激光中，通过对激光的测量可以得到电场的相关信息，这就是电光探测的基本原理。电光频谱解码是预先将激光展宽成带线性啁啾(激光频率在纵向上呈线性分布)的脉冲，展宽后的激光脉冲长度大于电子束团长度，当激光与库仑场同时入射晶体时，某一特定时刻的电场将对

特定频率的激光进行调制，单个束团信息将编码到单发激光中，再对激光的光谱进行测量便能得到束团的信息。

### 1.2 实验设计

上海深紫外自由电子激光实验装置是一台由中国科学院、科技部和自然科学基金委联合资助研制的自由电子激光器，并于 2009 年试运行<sup>[15]</sup>。整个装置由低发射度光阴极注入器、直线加速器、束团压缩器、调制段波荡器、辐射段波荡器以及驱动激光、种子激光和束流诊断等部分组成。图 1 为装置结构示意图，规划中的探测点位于辐射段波荡器入口之前。与设计的 EOSD 相关的系统参数见表 1。

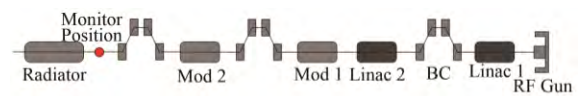


图 1 SDUV-FEL 的布局示意图  
Fig.1 Schematic layout of the SDUV-FEL.

表 1 SDUV-FEL 的激光与电子束团相关参数  
Table 1 Parameters of laser system and electron bunch for EOSD at SDUV-FEL.

系统参数 Parameters	参数值 Value
束团能量 Bunch energy / MeV	140-160
束团电荷量 Bunch charge / pC	140
束团长度 Bunch length / ps	1-10
束团重复频率 Bunch repetition rate / Hz	2
束团发射度 Bunch normalized emittance / mm-mrad	4
激光中心波长 Laser central wavelength / nm	800
激光脉冲长度 Laser pulse duration / fs	35
激光带宽 Laser spectral bandwidth / nm	26
激光重复频率 Laser repetition rate / Hz	1 000
激光脉冲能量 Laser pulse energy / mJ	3

实验总体布局如图 2 所示。激光系统位于辐射保护墙外的激光棚屋内，产生的脉冲激光通过光学传输管道进入加速器隧道，经过光学展宽器和线偏振片进行展宽和起偏后入射真空腔。真空腔内，电光晶体毗邻束流安装，晶体的(1 1 0)切割面垂直于束流前进方向。如果在激光通过电光晶体的同时恰有电子束团从晶体侧面通过，电子束团携带的库伦电场将对激光进行调制，从而相关信息被编码进激光中。然后激光被引出真空腔，通过分析器将激光的偏振变化转化为易于探测的幅度变化，最后用光谱仪测量激光的光谱。库伦电场的纵向时间结构为束流存在与不存在时的光谱图像之差，通过数据处理即可获得库伦电场(也即是电子束团纵向分布)

的信息；与此同时，通过测量信号峰的位置变化还可以得到束团相对于测量激光的到达时间抖动。

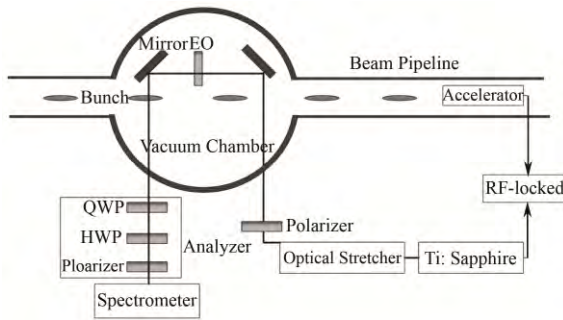


图 2 EOSD 设计图  
Fig.2 Setup of EOSD.

### 1.2.1 真空腔及同步方案设计

激光与电子束团时间同步是本实验的前提，由于实验中束团的长度与展宽后激光的长度都在几个皮秒，而同步精度至少要与束团长度在同一个量级，因此对激光与电子束团的同步精度要求很高。

图 3 展示了由上海三浩公司加工的用于实验的真空腔照片和同步方案布局的俯视图。真空腔内装有可电动的金属圆盘，电光晶体、反射镜与金属探针固定在腔内圆盘上，电光晶体与金属探针位于束流两侧，实验过程中可通过移动圆盘来改变金属探针和电光晶体到束流中心的距离，金属探针与真空腔外的示波器相连。真空腔外的反射镜放在电动导轨上，可左右移动，用于将激光沿不同的路径反射进真空腔内。

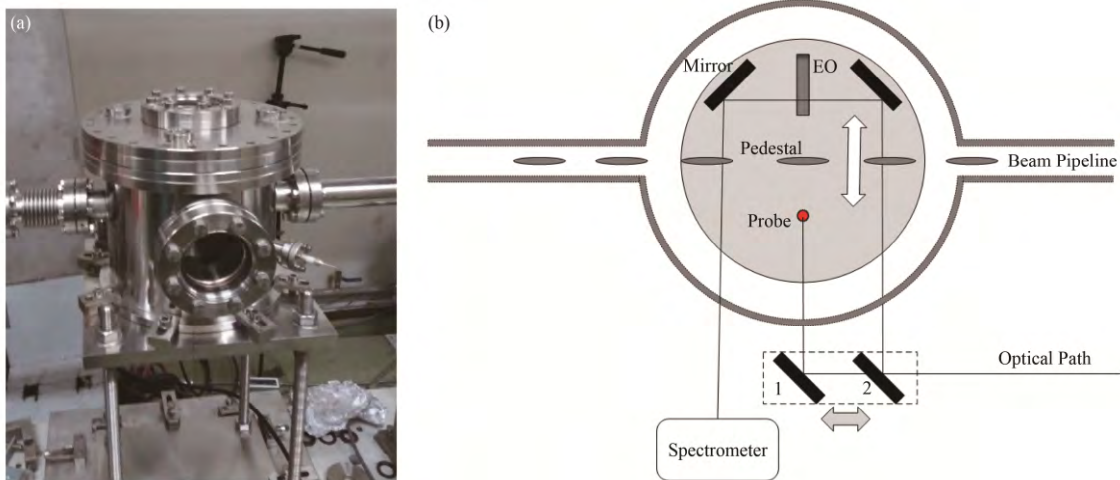


图 3 真空腔照片(a)与同步方案原理俯视图(b)  
Fig.3 The picture of vacuum chamber (a) and the vertical view of synchronization scheme (b).

实验前激光的重复频率事先通过锁相环与加速器的主频时钟锁定，同步过程分为两步。粗同步时，将针尖移近束流，电子束团前进过程中库伦电场加载到金属探针上，在针尖内部激发电信号，信号大小可以通过改变针尖与束流的距离来控制。与此同时，腔外反射镜左移，激光被反射到金属探针上，在针尖内引起光电流，信号大小可以通过改变激光功率及脉冲长度来控制。两个信号都将显示在示波器上，以其中一个信号为参考信号，通过调节另一路信号在示波器上的相对位置来完成粗同步，同步的精度主要取决于材料的响应时间和示波器的时间分辨率。该方案相比于传统的 OTR (Optical Transition Radiation)更加简单灵活。精细同步时，反射镜右移，通过调节激光与束团的相对延时，并观察光谱图像变化，如果观察到较明显的信号起伏，代表精细同步完成。整个同步过程都不会对束流品质造成影响。

### 1.2.2 光栅对展宽器设计

为了能单发激光测量整个束团的信息，激光与电场相互作用之前需预先展宽，长度至少能覆盖束团的长度，但激光展宽得过宽，测量的分辨率将下降，图像将出现畸变与展宽<sup>[16]</sup>；激光展宽得过窄，测量视野范围很小，不利于同步与测量，因此需要一个平衡。一般情况下，把激光展宽到束团长度的 1.5-2 倍。实验装置产生的束团长度根据不同的压缩条件在 1-10 ps 之间变化，为满足能在不同情况下对束团长度进行测量，需要将激光展宽到 2-20 ps 且能连续可调。常用的激光展宽方法有利用棱镜展宽、光纤展宽与光栅对展宽，但只有光栅对展宽器能提供本实验所需的大范围连续可调的激光展宽。

如图 4 所示，光栅对展宽器由两块相对的反射型光栅（美国索雷博公司生产）与一对在竖直方向垂直的平面反射镜组成。一块光栅固定，另一块光栅可沿导轨移动，入射光在两片光栅上分别衍射，

再经过反射镜，光路被拔高，最后经光栅对衍射出射。不同频率成分的激光因经过的光程不同，最终在纵向上线性排列，且可通过移动其中一块光栅来改变光程差改变展宽后激光的脉宽，以适应不同束团长度的测量需求。

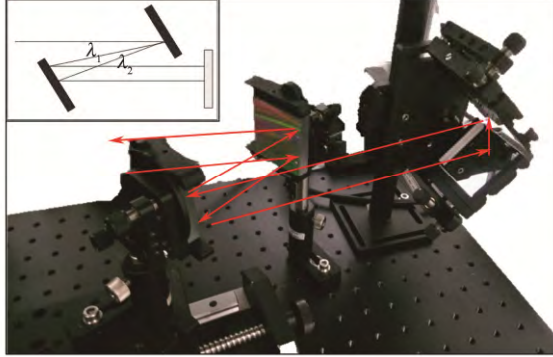


图 4 光栅对展宽器  
Fig.4 Grating pair stretcher.

## 2 参数模拟与方案评估

### 2.1 库伦电场

电荷量为  $q$ 、相对论能量为  $\gamma$  的单粒子光速运动时的库伦电场为：

$$E_r = \frac{q\gamma}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{r}{(r^2 + \gamma^2(z - vt)^2)^{3/2}} \quad (1)$$

假设电子束团的横向尺寸无限小且纵向电荷密度分布为  $\rho(t)$ ，电子束团库伦电场可以看成是单粒子电场与束团线电荷密度分布的卷积，即为：

$$E_{r,\rho}(r,t) = (E_r * \rho)(r,t) = \int_{-\infty}^{\infty} E_r(r,t-t')\rho(t')dt' \\ \approx k \times \rho(t) \quad (2)$$

单粒子电场  $E_r$  的脉宽很小，可近似看成  $\delta$  函数，则卷积可以得到简化，束团库伦电场分布近似与电荷密度分布成正比，于是测量的虽为库伦电场，得到的却是束团纵向电荷密度分布，从电荷密度分布图像中容易得到束团纵向长度。

图 5 为束团电场的模拟。假设电荷密度为高斯分布，由图 5 可知，库伦电场的大小近似与测量点到束流中心距离及束团长度成反比例关系。因散角引起的电场纵向长度相对于束团纵向长度的展宽随束团长度的增长而迅速下降，当测量点距离束流中心 5 mm、束团长度 1–10 ps 时，展宽比在 2% 以内。

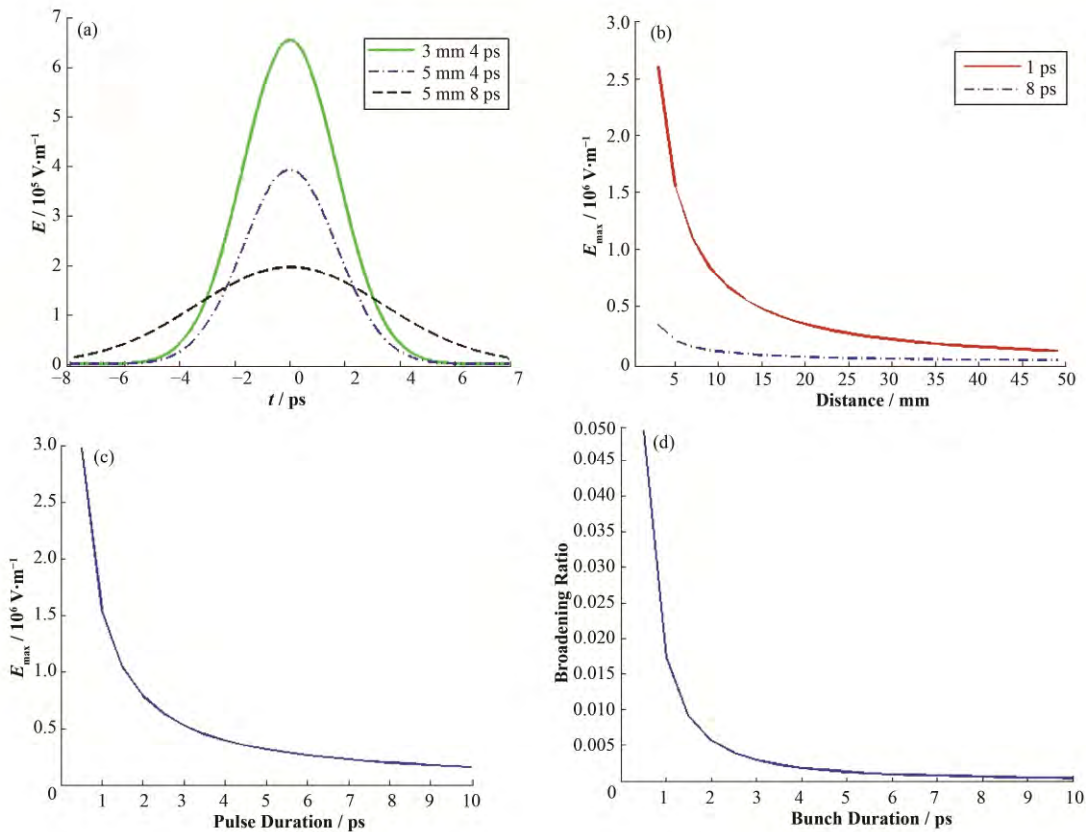


图 5 库伦电场模拟电场形状(a)，电场峰值与距离的关系(b)，电场峰值与束团长度的关系(c)，5 mm 处电场展宽(d)  
Fig.5 Simulation of Coulomb field shape (a), the relation between field peak and distance (b), the relation between field peak and bunch length (c), the broadening of coulomb field at 5 mm (d).



### 2.2 电光晶体响应及其对库伦电场的影响

目前最常用的晶体有 ZnTe 和 GaP, GaP 晶体拥有更大的横向共振频率(Transverse Optical, TO), 能测量更短的束团, 但由于电光系数( $r_{41}$ )较小, 得到的信号在同等条件比 ZnTe 小 4 倍。ZnTe 的 TO 是 5.3 THz, GaP 的 TO 是 10.98 THz, GaP 的  $r_{41}$  是  $0.97 \text{ pm}\cdot\text{V}^{-1}$ , ZnTe 的  $r_{41}$  是  $3.9 \text{ pm}\cdot\text{V}^{-1}$  [17]。

激光与库伦电场同时入射电光晶体, 最理想的情况为两者速度相同, 则特定频率的激光将接受特定部分的电场调制, 但实际上两者速度并不相同。图 6 展示了 ZnTe 与 GaP 晶体中激光与库伦电场传播速度 (除以光速) 的不匹配, 正如文献[18]所述:

ZnTe 晶体与 800 nm 激光、GaP 晶体与 1 030 nm 激光分别为更合适的组合。

除了传播速度的不匹配外, 还应同时考虑电场在晶体界面的透射反射以及内部的衰减效应, 可以得到晶体的频率响应函数为 [19-21]:

$$G(f) = \frac{2}{1+n(f)+ik(f)} \frac{1}{d} \int_0^d \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t - \frac{z}{v_g}) e^{(kz-2\pi ft)} e^{-2\pi f \frac{\kappa(f)}{c} z} dt dz$$

$$= \frac{2}{1+n(f)+ik(f)} \frac{1}{d} \int_0^d \exp(\frac{i2\pi fz}{c} (n_p(f) - n_g(f))) e^{-2\pi f \frac{\kappa(f)}{c} z} dz$$
(3)

晶体的频率响应函数曲线如图 7 所示。

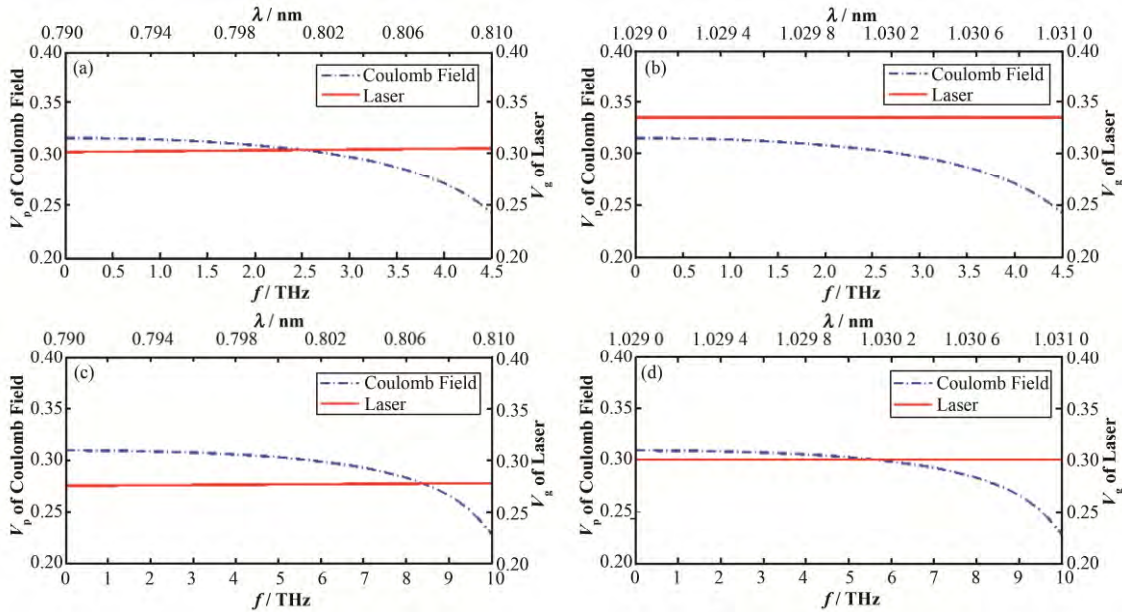


图 6 不同晶体内不同中心波长激光与库伦电场的速度不匹配  
 (a) ZnTe 800 nm, (b) ZnTe 1 030 nm, (c) GaP 800 nm, (d) GaP 1 030 nm  
**Fig.6** Velocity mismatch between laser and coulomb field in crystal.  
 (a) ZnTe 800 nm, (b) ZnTe 1 030 nm, (c) GaP 800 nm, (d) GaP 1 030 nm

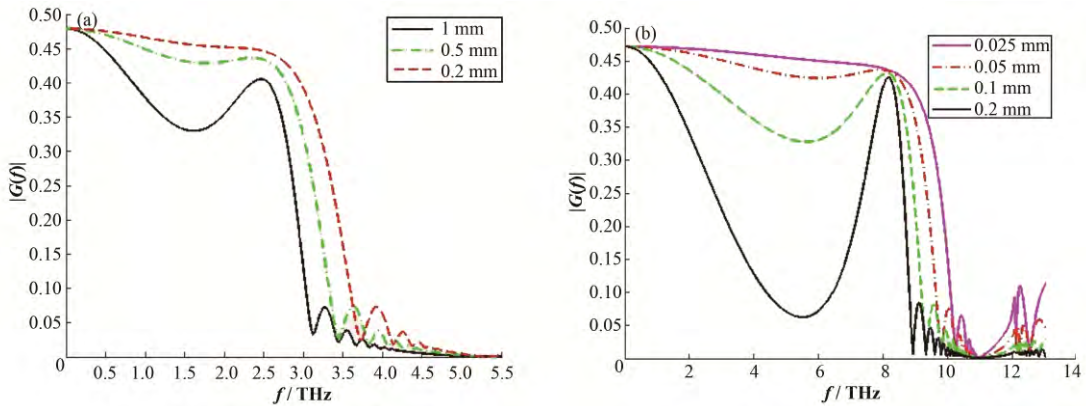


图 7 晶体响应函数曲线 (a) ZnTe, (b) GaP  
**Fig.7** Response function curve of crystal. (a) ZnTe, (b) GaP

晶体响应函数曲线质量的好坏可以通过曲线的截止频率和曲线的平坦性来评估, 曲线的截止频率越大曲线越平坦, 性能越好。从图 7 中可以看出, 随着晶体厚度的增加, 截止频率变小, 曲线平坦性变差。尽管 GaP 晶体拥有更大的横向共振频率能用于更短束团长度测量, 但是这种优势的发挥需要非常薄的晶体才行 (小于  $100\ \mu\text{m}$ ), 然而过薄的晶体生产使用不便, 且得到的信号也非常小, 影响信噪比; 当厚度较大时 (比如  $300\ \mu\text{m}$ ), 由于较小的电光系数和较小的截止频率 (3 THz), GaP 晶体相对于 ZnTe 晶体将丧失优势。

本实验室的束团长度在几个皮秒, 所用的激光中心波长为  $800\ \text{nm}$ , 所以选用 ZnTe 晶体作为实验晶体, 同时综合考虑在一定范围内信号幅度随晶体厚度而增加, 但晶体响应曲线质量变差, 所以厚度选为  $0.5\text{--}1\ \text{mm}$ , 未指明厚度时本文默认为  $0.5\ \text{mm}$ 。

电光晶体可以看成是一个系统, 将入射库伦电场看成输入, 并将与晶体相互作用之后的库伦电场 (有效电场) 看成输出, 则输出表达式为:

$$E = \text{IFFT}[\text{FFT}(E_{r,\rho}) \cdot G(f)] \quad (4)$$

现在对 ZnTe 晶体的输出进行模拟并与输入对比来推断晶体对电场的影 响。图 8 模拟了束团长度在  $0.1\ \text{ps}$ 、 $1\ \text{ps}$ 、 $10\ \text{ps}$  情况下的输出输入的对比。由理论可知, 束团长度越长, 晶体的相对影响就越小, 引起的图像畸变也越小, 所以从图 8 中可以推断: 当束团长度在  $1\text{--}10\ \text{ps}$  时, 除了幅度有所减小, 有效电场形状未出现可观测的畸变, 而幅度的同比例变化不影响束团长度的测量。图 9 模拟了不同厚度晶体对不同束团长度的库伦电场幅度的影响, 可以看出脉冲越短, 输出与输入比值变化越大, 并且随着晶体厚度的增加电场幅度也会相应下降, 比值是一个关于脉冲长度与晶体厚度的减函数。图 10 模拟了  $0.5\ \text{mm}$  厚的晶体输出相对于输入的展宽。由图 10 可知, 晶体与库伦电场相互作用使库伦电场的展宽在  $1\%$  以内。

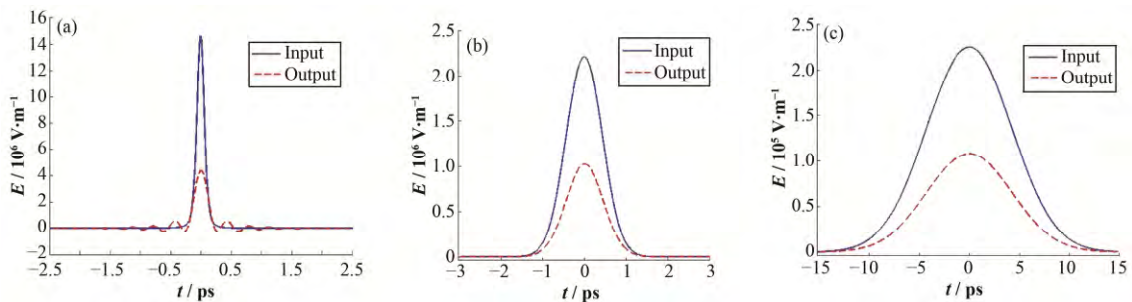


图 8 比较晶体的输入输出 (a)  $0.1\ \text{ps}$ , (b)  $1\ \text{ps}$ , (c)  $10\ \text{ps}$   
Fig.8 Comparison between input and output of crystal. (a)  $0.1\ \text{ps}$ , (b)  $1\ \text{ps}$ , (c)  $10\ \text{ps}$

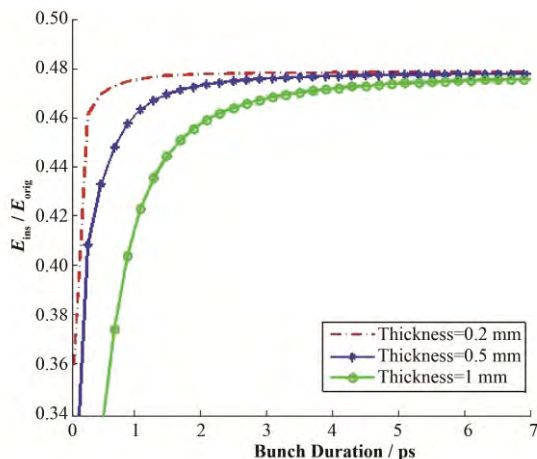


图 9 晶体厚度对电场幅度的影响  
Fig.9 Influence of crystal thickness on field amplitude.

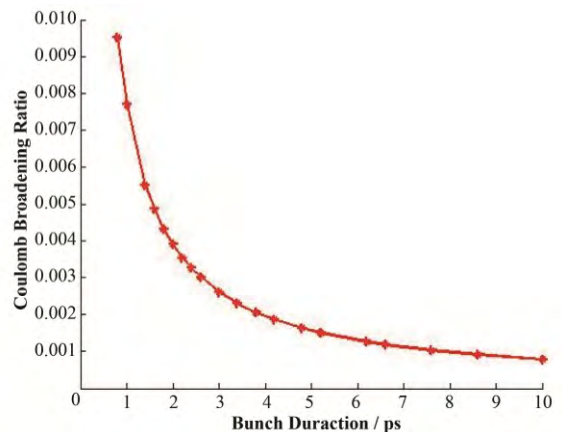


图 10 测量电场相对于束团长度展宽比  
Fig.10 Coulomb broadening vs. bunch length.

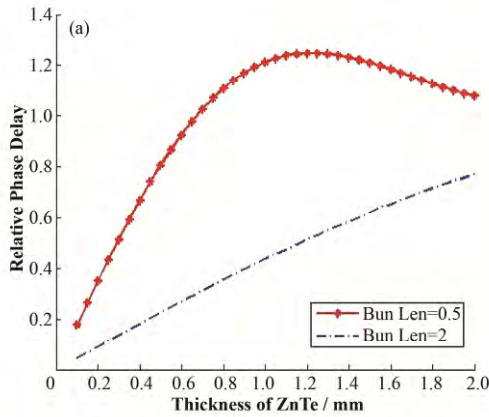
由此可知，同时考虑电场散角与晶体的影响，通过电光采样法在晶体厚度为 0.5 mm、距离为 5 mm 情况下，测量得到的信号相对于电子束团长度总的展宽在 3% 以内且无明显的畸变。

### 2.3 信号测量

#### 2.3.1 相对相位延迟

电场对激光的调制程度常用相对相位延迟  $\Gamma$  来表征：

$$\Gamma = \frac{n_0^3 r_{41} \omega}{c} \cdot d \cdot E \quad (5)$$



式中： $d$  为晶体厚度； $E$  为有效电场。

理论上  $\Gamma$  将随着  $d$  线性增长，但由于有效电场幅度也是晶体厚度的函数，所以  $\Gamma$  与  $d$  并非简单的线性关系。由图 11 可知，随着晶体厚度的增长，相对相位延迟的增长速度要慢于线性增长，特别是用晶体测量超短束团时，当晶体厚度达到某个值之后，曲线不再增长反而下降，束团越短，曲线反转越早。因为 GaP 晶体曲线反转点的值更小、更多的用于测量超短束团且电光系数小，所以在选择 GaP 晶体厚度时需要注意。

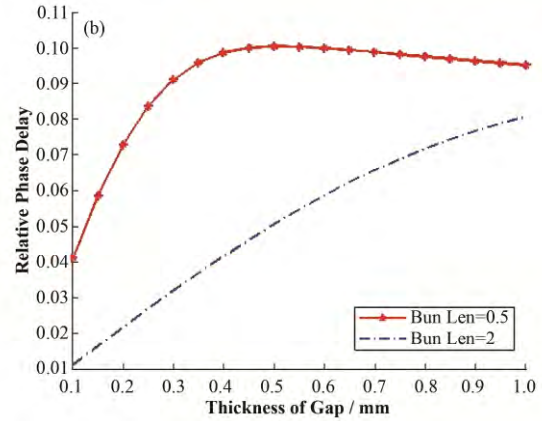


图 11 晶体厚度对相位延迟的影响 (a) ZnTe, (b) GaP  
Fig.11 Influence of crystal thickness on relative phase delay. (a) ZnTe, (b) GaP

#### 2.3.2 分析器

分析器用于将激光调制后的激光偏振态变化转换成可测量的幅度变化。常用的分析器组成方式有三种：正交偏振设置(Crossed Polarization, Cro)、平衡探测设置(Balanced Detection, Bal)、近交叉偏振设置(Near Crossed Polarization, NC)<sup>[21]</sup>。

正交偏振设置情况下的探测信号与入射激光强度之比为：

$$\frac{I_C}{I_{C0}} = \sin^2\left(\frac{\Gamma}{2}\right) \approx \left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2 \sim E^2 \quad (6)$$

平衡探测情况下的探测信号与入射激光强度的比值为：

$$\frac{I_B}{I_{B0}} = \sin(\Gamma) \approx \Gamma \sim E \quad (7)$$

比较式(6)、(7)可知，正交偏正法测得的信号很小且与电场近似存在平方关系，平衡探测得到的信号近似比正交偏振大  $4/\Gamma$  倍且与电场存在线性关

系，但是噪声比较大，也不适合单发测量。

本实验室将要用到的是近交叉偏振法，分析器依次由 1/4 玻片、1/2 玻片、线偏振片组成(图 2)，调整 1/4 玻片角度( $\phi$ )用于补偿剩余双折射，调整 1/2 玻片角度( $\theta$ )，使信号近似与电场成线性关系且可在一定范围内调节信号的大小。

$$\frac{I_{NC}(\theta, \phi = 0, \Gamma)}{I_{NC0}} = \frac{1 - \cos(\Gamma + 4\theta)}{2} \quad (8)$$

图 12 模拟了晶体距离束流中心 3 mm 处测量信号强度相对于入射激光强度的比值。以平衡探测和正交偏振法得到的信号为上下界参考，当  $\phi=0^\circ$ 、 $\theta$  为一个很小的角度(角度制)时，近交叉偏振信号大于正交偏振信号且随  $\theta$  而增大。尽管束团长度较大时，比值很小，但是由于实验室的激光能量很高，仍能得到较大的信号噪声比。



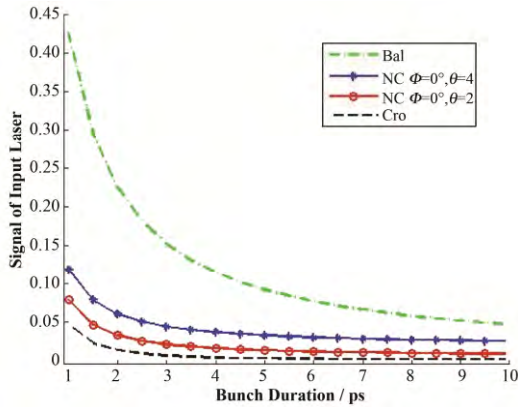


图 12 不同探测方法信号比较  
Fig.12 Signal comparison of different detection methods.

### 3 分辨率分析与方案改进

光谱解码法的时间分辨率主要受以下几个因素的影响：

1) 电子束流中心与晶体上探测激光光斑位置间相对距离  $r$ ：实验条件下距离  $r$  在比较大的范围可调，取  $r=3\text{ mm}$ ，根据  $\Delta t_r=2r/\gamma c$ ，可得库仑场散角所加的分辨率极限约为  $67\text{ fs}$ 。

2) 激光展宽前后脉宽影响： $\Delta t_i = \sqrt{T_0 T_{\text{Ch}}}$  [22]，实验室激光展宽前脉宽  $T_0=35\text{ fs}$ ，展宽后的激光脉宽  $T_{\text{Ch}}$  在  $2\text{--}20\text{ ps}$  之间可变，测量时脉宽为  $2\text{--}15\text{ ps}$ ，由此分辨率极限在  $264\text{--}725\text{ fs}$ 。

3) 由晶体的类型和厚度决定频率响应函数：实验选用  $0.5\text{ mm}$  厚的  $\text{ZnTe}$  晶体的截止频率约为  $3.4\text{ THz}$ ，相位不匹配引起的分辨率限制为  $295\text{ fs}$ 。

4) 光谱仪分辨率影响：实验室光谱仪的频谱分辨率为  $0.1\text{ nm}\cdot\text{pixel}^{-1}$  相应的时间分辨率  $20\text{--}150\text{ fs}$ 。

该方法总的测量束团长度的时间分辨率最高可达  $425\text{ fs}(\text{FWHM})/180\text{ fs}(\text{RMS})$ 。测量束团到达时间的分辨率在理论上好于长度测量分辨率的  $1/4$  [23]，即最好情况下时间分辨率可达  $45\text{ fs}(\text{RMS})$ 。

为适应未来更短脉冲长度测量的需要，该方案可以从以下方面进行改进：

1) 通过选用响应时间更短的针尖材料并设计合理的针尖形状与尺寸来提高粗同步探测信号的灵敏性和信号幅度。

2) 通过选用截止频率更高的  $\text{GaP}$  晶体作为测量晶体提升对短脉冲的测量潜能。

3) 通过算法修正来改善激光展宽带来的时间分辨率变差的问题 [24–26]，理论上可以将其影响降低到  $T_0$ 。

4) 通过选用宽谱激光以缩小展宽器尺寸，将元器件小型化并集成在一块光学平板上，以实现小型化可移植的目的 [27]。

### 4 结语

本文针对 SDUV-FEL 装置设计了一套用于电子束团长度测量的电光频谱解码探测实验方案。通过选用简单灵活的针尖粗同步方案能使整个测量过程真正实现束流的无损测量；通过设计大范围连续可调的光栅激光展宽器能满足装置产生的长度在  $1\text{--}10\text{ ps}$  范围内变化的束团测量需求。通过仿真模拟分析可知， $\text{ZnTe}$  晶体在皮秒量级束团长度测量中比  $\text{GaP}$  晶体更具优势，晶体测量的信号强度与晶体厚度呈非线性关系，尤其在测量超短束团时存在“拐点”现象。接下来的实验将选用  $0.5\text{ mm}$  厚的  $\text{ZnTe}$  晶体，测量点距离束流中心  $3\text{--}5\text{ mm}$ ，预期的时间分辨率最高可达  $180\text{ fs}(\text{RMS})$ ，信号展宽小于  $3\%$ ，库伦电场图像能得到保真，通过选用近交叉偏振法可实现信噪比可调。该方案满足 SDUV-FEL 装置的需求，将来通过一定的修改能够比较方便地应用于上海 X 射线自由电子激光试验装置和大连极紫外相干光源。

### 参考文献

- 1 Steffen B, Arsov V, Berden G, *et al.* Electro-optic time profile monitors for femtosecond electron bunches at the soft X-ray free-electron laser FLASH[J]. Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams, 2009, 12(3): 032802. DOI: 10.1103/PhysRevSTAB.12.032802
- 2 Berden G, Gillespie W A, Jamison S P, *et al.* Benchmarking of electro-optic monitors for femtosecond electron bunches[J]. Physical Review Letters, 2007, 99(16): 164801. DOI: 10.1103/PhysRevLett.99.164801
- 3 Tan J H, Gu Q, Fang W C, *et al.* X-band deflecting cavity design for ultra-short bunch length measurement of SXFEL at SINAP[J]. Nuclear Science and Techniques, 2014, 25(6): 060101. DOI: 10.13538/j.1001-8042/nst.25.060101
- 4 Čutić N, Erny C, Lindau F, *et al.* Characterization of the arrival time jitter at the MAX-lab test-FEL using electro-optical spectral decoding[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2011, 626–627: 16–19. DOI: 10.1016/j.nima.2010.10.090
- 5 Ivanisenko Y, Schlott V, Peier P. Measurements of compressed bunch temporal profile using electro-optic monitor at sitf[C]. Basel, Switzerland: Proceedings of FEL, 2014
- 6 Cutic N, Lindau F, Werin S, *et al.* On-line arrival time and jitter measurements using electro-optical spectral decoding[C]. International Free Electron Laser



- Conference, 2010
- 7 Galvanauskas A, Tellefsen Jr J A, Krotkus A, *et al.* Real-time picosecond electro-optic oscilloscope technique using a tunable semiconductor laser[J]. Applied Physics Letters, 1992, **60**(2): 145–147. DOI: 10.1063/1.107456
  - 8 Jiang Z, Zhang X C. Electro-optic measurement of THz field pulses with a chirped optical beam[J]. Applied Physics Letters, 1998, **72**(16): 1945–1947. DOI: 10.1063/1.121231
  - 9 Jiang Z, Zhang X C. Single-shot spatiotemporal terahertz field imaging[J]. Optics Letters, 1998, **23**(14): 1114–1116. DOI: 10.1364/OL.23.001114
  - 10 Wilke I, MacLeod A M, Gillespie W A, *et al.* Single-shot electron-beam bunch length measurements[J]. Physical Review Letters, 2002, **88**(12): 124801. DOI: 10.1103/PhysRevLett.88.124801
  - 11 Berden G, Jamison S P, MacLeod A M, *et al.* Electro-optic technique with improved time resolution for real-time, nondestructive, single-shot measurements of femtosecond electron bunch profiles[J]. Physical Review Letters, 2004, **93**(11): 114802. DOI: 10.1103/PhysRevLett.93.114802
  - 12 Srinivasan R T, Amin M, Castillo V, *et al.* Novel single shot scheme to measure submillimeter electron bunch lengths using electro-optic technique[J]. Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams, 2002, **5**(4): 042801. DOI: 10.1103/PhysRevSTAB.5.042801
  - 13 Berden G, van der Meer A F G, Jamison S P, *et al.* Longitudinal electron beam diagnostics *via* upconversion of THz to visible radiation[C]. Liverpool, UK: Proceedings of the FEL09, WEPC80, 2009
  - 14 Jackson J D. 经典电动力学[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2013: 558–561  
Jackson J D. Classical electrodynamics[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2013: 558–561
  - 15 Zhao Z T, Wang D. Progress in the SDUV-FEL and development of X-ray FELs in Shanghai[C]. Proceedings of FEL, 2010
  - 16 Sun F G, Jiang Z, Zhang X C. Analysis of terahertz pulse measurement with a chirped probe beam[J]. Applied Physics Letters, 1998, **73**(16): 2233–2235. DOI: 10.1063/1.121685
  - 17 Gallot G, Zhang J, McGowan R W, *et al.* Measurements of the THz absorption and dispersion of ZnTe and their relevance to the electro-optic detection of THz radiation[J]. Applied Physics Letters, 1999, **74**(23): 3450–3452. DOI: 10.1063/1.124124
  - 18 Pan R, Lefevre T, Jamison S P, *et al.* Design of an electro-optic bunch length monitor for the CERN-CTF3 probe beam[J]. Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams, DITANET Edition, 2012
  - 19 Casalbuoni S, Schlarb H, Schmidt B, *et al.* Numerical studies on the electro-optic sampling of relativistic electron bunches[C]. Particle Accelerator Conference (PAC), Proceedings of the IEEE, 2005: 3070–3072. DOI: 10.1109/PAC.2005.1591367
  - 20 Casalbuoni S, Schlarb H, Schmidt B, *et al.* Numerical studies on the electro-optic detection of femtosecond electron bunches[J]. Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams, 2008, **11**(7): 072802. DOI: 10.1103/PhysRevSTAB.11.072802
  - 21 Steffen B R. Electro-optic methods for longitudinal bunch diagnostics at FLASH[D]. Hamburg: DESY, 2007
  - 22 Berden G, van der Meer A F G, Jamison S P, *et al.* Time resolved single-shot measurements of transition radiation at the THz beamline of FLASH using electro-optic spectral decoding[C]. Proceedings of EPAC, 2006: 1058
  - 23 Steffen B, Casalbuoni S, Knabbe E A, *et al.* Spectral decoding electro-optic measurements for longitudinal bunch diagnostics at the DESY VUV-FEL[C]. Proceedings of the 27th International Free Electron Laser Conference (FEL 2005), 2005: 549
  - 24 Kim K Y, Yellampalle B, Rodriguez G, *et al.* Single-shot, interferometric, high-resolution, terahertz field diagnostic[J]. Applied Physics Letters, 2006, **88**(4): 041123. DOI: 10.1063/1.2168897
  - 25 Yellampalle B, Kim K Y, Rodriguez G, *et al.* Algorithm for high-resolution single-shot THz measurement using in-line spectral interferometry with chirped pulses[J]. Applied Physics Letters, 2005, **87**(21): 211109. DOI: 10.1063/1.2135869
  - 26 Zhu L G, Li Z R, Pu Y K. Approach to broadband terahertz pulse field detection and recovery with electro-optic sampling measurement[J]. Optics Communications, 2010, **283**(9): 1873–1876. DOI: 10.1016/j.optcom.2009.12.040
  - 27 Breunlin J. Commissioning of an electro-optic electron bunch length monitor at FLASH[D]. Hamburg: DESY, 2011