

# BFEL束团长度测量系统的离线实验研究\*

朱俊彪<sup>1;1)</sup> 李智慧<sup>2</sup> 白莎<sup>1</sup> 谢家麟<sup>1</sup>

1 (中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2 (清华大学核能与新能源技术研究所 北京 102201)

**摘要** 短和超短束团长度测量技术是发展短波长FEL和高级加速器的关键技术之一. 为测试研制的短和超短束团长度测量系统锥形装置, 利用黑体辐射仪的连续远红外-毫米波辐射替代BFEL的4ps微束团产生的亚毫米波-毫米波CTR, 进行了离线模拟实验, 获得良好调制的干涉图. 实验表明, 该锥形装置软硬件系统的运行满足初期的设计构想; 干涉仪经细致的光学调节, 可获得较为调制充分的干涉图; LabVIEW编制的测控软件满足控制和采集的基本需要. 提出了进一步改善的措施.

**关键词** 束团长度测量装置 黑体辐射 相干渡越辐射 离线实验

## 1 引言

短和超短电子束团的产生和应用研究日趋白热化. 热阴极或光阴极射频电子枪和磁压缩系统, 通过单级或多级压缩, 可用以产生几皮秒、亚皮秒、几百飞秒甚至几十飞秒的电子束团. 依赖于不同的研究目的, 短和超短电子束团已在相干THZ辐射产生<sup>[1, 2]</sup>、X射线自由电子激光器(SASE FEL)<sup>[3, 4]</sup>、高级加速器<sup>[5]</sup>、激光加速<sup>[6]</sup>、强相干远红外辐射源<sup>[7]</sup>、康普顿背散射软硬X射线源<sup>[8]</sup>等领域开展了广泛研究.

首先从理论上讨论, 利用北京自由电子激光装置(BFEL)的皮秒束团产生CTR与该电子束团序列参数的关系; 介绍研制的类Machelson干涉仪束长测量系统; 最后给出利用黑体辐射远红外光源作为1μs束团模拟光源对该测量系统检验的实验结果.

## 2 相干渡越辐射理论

带电粒子穿过具有不同介电常数的两种介质界面(如真空和金属)时发射的辐射称渡越辐射(TR). 单电子沿单位立体角在单位频率间隔内发射的Garibyan后向TR谱能量是:

$$\left. \frac{d^2 E}{d\omega d\Omega} \right|_{e^-} = \frac{e^2 \beta^2}{\pi^2 c} \frac{\sin^2 \theta}{(1 - \beta^2 \cos^2 \theta)^2}, \quad (1)$$

式中 $\beta$ 是与相对论归一化能量因子 $\gamma(=1/\sqrt{1-\beta^2})$ 相关的速度因子,  $\theta$ 是电子运动方向与观测方向之间的夹角. 对电子束团入射, 当束团长度远小于探测距离并可于辐射波长相比时, 单个束团发射的渡越辐射总能量由Nodvick-Saxon公式给出:

$$E_{\text{tot}}(k, \sigma_z) \approx E_e(k)[N + N^2 F(k\sigma_z)], \quad (2)$$

式中 $I(k)$ 为单电子渡越辐射能谱,  $N$ 为束团电子数.  $F(k)$ 为束团形状因子, 是归一化束团电子密度分布函数 $S(z)$ 的付氏变换的平方:

$$F(k, \sigma_z) = \left| \int e^{ikz} S(z) dz \right|^2, \quad (3)$$

其中 $k$ 是辐射波数,  $z$ 沿电子运动方向. 从式(2)可以看出, 当 $F(k) = 0$ 时, 总辐射能约化成 $N$ 个束团电子辐射的简单叠加,  $NI(k)$ , 即非相干渡越辐射(ITR); 当 $F(k)$ 逼近1时, 总辐射约 $N$ 倍于 $NI(k)$ , 即相干渡越辐射(CTR). 当束团内 $N$ 个电子同相发射辐射, 导致CTR较之ITR增长束团电子数倍(BFEL束团 $N = 10^8 - 10^9$ ). 测量CTR与ITR相对强度给出轴向束团形状因子 $F(k)$ , 进而得到束团轴向粒子分布函数 $S(z)$ .

以高斯束团作为理论模型, 为求单束团辐射能谱, 合并式1, 2和3, 得出总CTR辐射能谱与入射电子能

\* 国家自然科学基金(19875066), 国家高技术-激光技术领域经费和中国科学院创新基金资助

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

$\gamma$  和辐射波长  $\lambda$  的关系如下:

$$\frac{dE}{d\lambda} \approx \frac{2N^2 r_e m c^2 [2\ln(2\gamma) - 1]}{\lambda^2} e^{-(\frac{2\pi\sigma_z}{\lambda})^2}, \quad (4)$$

式中  $\sigma$  是电子束团长度,  $m c^2$  电子静止能量,  $r_e$  经典电子半径. 由式可见, 提高电子能量对 CTR 贡献不大; CTR 能量强烈依赖于束团长度与 CTR 波长之比. 当  $\lambda$  小于等效束长  $\sqrt{2\pi}\sigma_z$  时, CTR 辐射能急剧减小为零, 束团电子辐射能变为 ITR; 当  $\lambda$  可与等效束长相比时, CTR 远大于 ITR. 基于 BFEL 微束团属几个皮秒的束团, 其发射的 CTR 位于远红外-毫米波段, 即 BFEL 短束团是宽带强相干的 THz 辐射源. 以典型束团参数 30MeV 束能, 4ps 束长, 20A 峰值流强估计, 宏脉冲辐射能约高达 4mJ.

### 3 黑体模拟光源

为检测所研制的束长测量系统本身的初始运行状况, 利用黑体辐射光源的远红外部分作为微束团产生的 CTR 远红外-毫米波相干辐射源的模拟光源进行了离线实验.

如所周知, 黑体辐射谱是连续谱, 覆盖整个从紫外至远红外波段. Planck 辐射定律给出黑体辐射完整的谱分布. 在一定温度  $T$  下, 单位面积的黑体在单位时间、单位立体角和单位波长间隔内发射出的辐射能量与辐射波长  $\lambda$  的关系如下:

$$B(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 [\exp(hc/\lambda kT) - 1]}, \quad (5)$$

式中  $h$  是 Planck 常数,  $c$  是光速,  $k$  是 Boltzman 常数. 图 1 给出不同温度下, 黑体辐射能量随辐射波长变化曲线. 随温度的上升, 辐射强度 (曲线下面积) 成 4 次方迅速增长 (亦见 Stefan 定律); 依序, 增长着的峰值强度与对应着变小的波长意味着其积为常数. 在我们感兴趣的波段, 100 $\mu$ m 至几个 mm 范围内, 存在相当的强度. 试验中选用天地天公司 1200K 黑体辐射仪, 辐射出射孔径 12mm. 对波长范围 100 $\mu$ m—5mm 波段, 辐射强

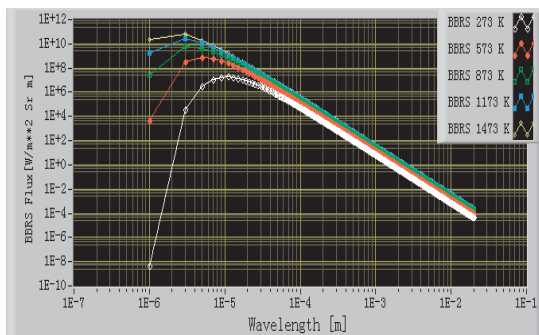


图 1 黑体辐射能量与辐射波长和温度的关系

度经计算可用作所研制装置在线实验中几个皮秒束团 CTR 辐射的模拟光源.

### 4 离线实验研究

正在研制的束团长度测量系统是根据典型的迈克尔逊干涉仪自相关测量原理发展而成. 整个系统由 CTR 产生收集系统、类迈克尔逊偏振干涉仪、OTR 图像采集系统、干涉信号数据采集系统和动镜移动步进电机控制系统. 动镜移动、数据采集、图像采集和处理显示均由计算机控制. LabVIEW 图形语言编制的测控软件. 采用步进扫描模式. 如图 2 所示为利用黑体模拟光源在所研制的类迈克尔逊偏振干涉仪试验中测得的干涉图. 横轴是扫描距离, 纵轴是探测器测得的逐点对应的干涉光强度. 测试条件如下: 黑体温度 1200K, 辐射信号强度近 60mV, 斩波频率 9Hz, 动镜移动 100mm, 移动步长 100 $\mu$ m, 采样频率 5000Hz, 定点扫描 5 次平均测一点. 100mm 的动镜行程意味着 200mm 光程差导致其对应的光谱分辨率为 0.05 $\text{cm}^{-1}$ . 干涉图中央主极大  $I(0)$  接近于干涉图平均值  $I(\infty)$  的 2 倍表明干涉图调制较充分.

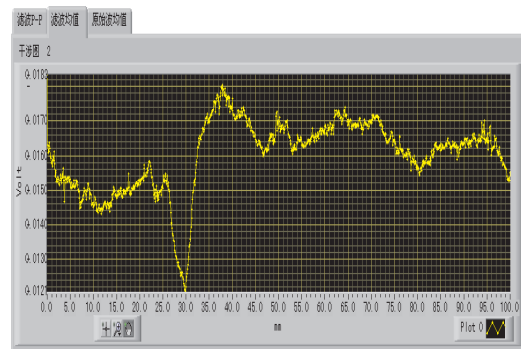


图 2 利用黑体远红外光源测试束长测量系统获得的自相关扫描干涉图

### 5 总结

为测试研制的短和超短束团长度测量系统锥形装置, 利用黑体辐射远红外-毫米波辐射进行了离线模拟实验. 实验表明, 该锥形装置软硬件系统的运行满足初期的设计构想, 可获得较为调制充分的干涉图. 较之非相干的黑体辐射, 束团产生的相干辐射应获得更好调制干涉图. 拟改进之处: 配备可较准确测定动定镜等光程位置的辅助定位系统以提高所测干涉图的对称性; 提高干涉仪组件的精确度和提高光学准直技术以改善系统测量结果的可重复性; 设计加速器强

辐射环境屏蔽系统以实现BFEL皮秒束团长度的在线测量.

---

### 参考文献(References)

- 1 Lihn H C, Kung P, Settakorn C et al. Phys. Rev., 1996, **E53**: 6413—6418
- 2 Barry W. CEBAF Report No. PR-91-012, 1991, SURA, VA, USA
- 3 TESLA Technical Design Report 2001-05, Humberg, 2001
- 4 LCLS Technical Design Report SLAC-R-593 LC-414, April 2002
- 5 Palmer D T, Colby E, Hogan M. Proc. PAC Chicago, 2001. 2251—2253
- 6 Kimura W D. Phys. Rev., 2001, **ST4**:101301, 1—6
- 7 Abo-Bakr M. Phys. Rev. Lett., 2002, **88**(25): 254801, 1—4
- 8 Pogorelsky I V. Phys. Rev., 2000, **ST3**: 090702, 1—6

## Off-Line Experiment on the Bunch Length Diagnostic Device at the BFEL\*

ZHU Jun-Biao<sup>1;1)</sup> LI Zhi-Hui<sup>2</sup> BAI Sha<sup>1</sup> XIE Jia-Lin<sup>1</sup>

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

2 (Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 102201, China)

**Abstract** Short and ultra-short bunch length measurement technique is one of the key techniques used to develop the short wavelength FEL and advanced accelerators. Off-line test experiment on a newly-developed bunch-length diagnostic device was implemented with the far-IR radiation emitted from a black body radiator instead of far-IR to mm wave coherent transition radiation generated by a train of micro-bunches, and got a good autocorrelation interferogram. The experiment showed that its hard and soft-ware worked as good as expected. Through a fine collimation, the well-modulated interferogram can be obtained. Further improvements are put forward.

**Key words** bunch length diagnostic device, black body radiation, coherent transition radiation, test experiment

---

\*Supported by NSFC(19875066), Nation High Technology-Laser Technology Field Program and CAS Innovation Foundation

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