

汤姆逊散射 X 射线源初步实验中电子束参数 测量及其对 X 射线性能影响的研究

杜应超¹⁾ 黄文会 唐传祥 华剑飞 程诚 杜泰斌
夏冰 何小中 杜强 郑曙新 陈怀璧 林郁正
(清华大学工程物理系 北京 100084)

摘要 为了准确计算和分析汤姆逊散射 X 射线源初步实验中产生的 X 射线参数, 对实验中所用的 16MeV 返波行波加速器产生的电子束参数进行了测量. 并通过模拟程序计算和分析了在该参数下初步实验中产生的 X 射线的参数.

关键词 汤姆逊散射 束测 发射度 能散

1 引言

基于汤姆逊散射的新型 X 射线光源由于其具有方向性好、时间结构短、峰值亮度高、在一定方向内近似单能、产生的 X 射线能量可以方便调节等特点, 在生物、物理、材料、光化学工程以及医学上有广泛的应用前景, 在近年获得较大的发展. 国外一些大学和科研机构进行了相关的原理验证实验^[1, 2], 并且在积极计划建造基于汤姆逊散射的超短脉冲 X 射线光源装置. 在国内, 北京大学、高能物理研究所等单位进行了相关的理论研究工作. 清华大学工程物理系加速器实验室也开展了相关方面的工作^[3, 4], 并且利用实验室现有的设备和条件开展了初步的实验研究^[5].

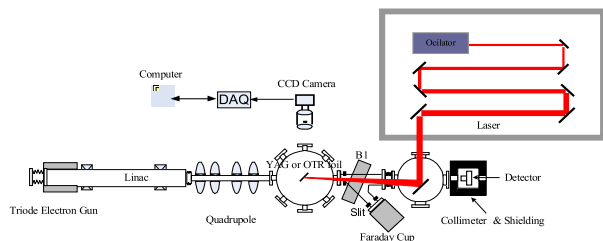


图 1 初步实验示意图

汤姆逊散射过程中, 产生的 X 射线各项参数由电子束和激光束的参数及其相互之间的作用角度决定. 激光参数和作用角度一定的情况下, 电子束能量、能

散、流强、发射度以及电子束与激光束作用的位置偏差决定了产生的 X 射线的产额、光子能量、光子空间分布和能谱分布. 准确地测量出电子束的能量、能谱、发射度和束斑位置抖动有助于计算和优化 X 射线各项参数, 选取合适的 X 射线探测方案和选取合适的实验参数. 在本文中介绍了电子束参数的测量结果, 并在此基础上对产生的 X 射线参数进行了计算和讨论.

2 16MeV 电子束性能测量实验

实验中电子束由 16MeV 返波行波加速器产生. 在实验中, 我们测量了电子束的作用点尺寸、束斑横向位置抖动、能量、能散和束团横向发射度.

2.1 束斑测量

在作用点处与束线成 45° 角放置 YAG 屏或铝膜渡越辐射靶, 用 CCD 对电子束在屏上产生的荧光或渡越辐射光成像可以获得电子束的束斑, 采集到的数据传输到计算机内进行采集和离线处理.

图(2)为实验中放置渡越辐射靶时测量到的束斑及其处理结果. 图中 x 方向 rms 尺寸为 1.775mm, y 方向 rms 尺寸为 0.843mm. 通过调整聚焦系统参数, 电

1) E-mail: dyech97@mails.tsinghua.edu.cn

子束束斑 rms 尺寸可以在 0.6—3mm 范围内调整. 测量结果与实验设计中模拟计算结果吻合很好.

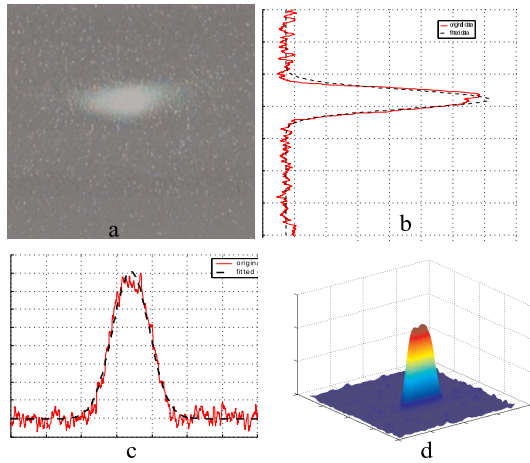


图 2 放置铝膜渡越辐射靶时 CCD 采集电子束束斑及其处理结果
(a) 采集到的电子束束斑; (b), (c) x , y 方向电子束分布; (d) 电子束空间强度分布.

对撞实验中, 电子束在作用点的稳定度对 X 射线光子产额有比较大的影响^[3, 4]. 在实验中, 测量得到束流中心最大抖动 $< 0.1\text{mm}$.

2.2 能量及能散测量

利用作用室后的分析磁铁 B1, 狭缝 S1, S2, 根据不同磁场强度 B 下法拉第桶内收集到的流强大小, 可以推算出电子束的中心能量和能散分布. 图 3 为测量到的电子束能谱分布曲线. 电子束中心能量为 16.1MeV , 计算得到电子束能散为 5.3%

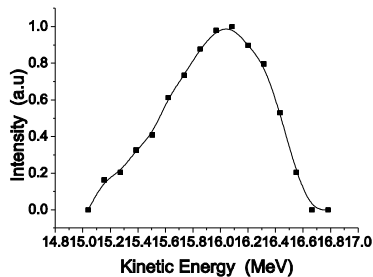


图 3 电子束能谱分布

2.3 发射度测量

发射度是衡量电子束品质的一个重要因素, 在能量一定的情况下, 产生的 X 射线的角向分布和亮度与电子束的发射度有很大的关系. 在实验中采用四极透镜扫描法和 CT(computerized tomography)^[6] 方法对电子束横向发射度进行测量, 获得了一致的结果. 测量得到 x , y 方向 rms 束流发射度分别为 $14.3\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$, $12.0\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$.

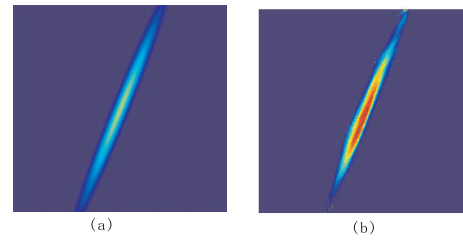


图 4 束团横向发射度测量结果
(a) 利用四极透镜扫描法测量的 Twiss 参数重建的 x 方向束团相椭圆; (b) 利用 CT 方法重建的 x 方向束团相空间(第 4 块四极透镜入口).

3 产生的 X 射线参数模拟计算

根据测量的电子束的参数和激光参数, 利用 CAIN^[7] 数值程序, 可以模拟计算得到在探测器位置 X 射线的参数. 实验中测量得到激光器激光脉冲能量为 2J , 脉冲长度 10ns , 在作用点 rms 光斑尺寸为 0.3mm .

图 5 为测量到的电子束发射度和能散等参数代入 CAIN 模拟计算得到的不同电子束聚焦尺寸下产生的 X 射线光子的分布情况. 图中电子束束斑 rms 尺寸分别为 0.4mm , 0.6mm , 0.8mm , 1.0mm , 1.2mm 和 1.4mm . 从图中可以看出, 由于电子束发射度的影响, 在正前方探测器位置(收集角 $< 0.005\text{rad}$) 收集到的光子数并非作用时电子束尺寸越小收集到的光子数越多, 这是因为在发射度一定的情况下, 电子束尺寸聚得越小, 它的散角就越大, 虽然产生的总的光子数增加, 但是 X 射线的散角也增大, 这导致在正前方的光子密度会降低. 但是如果电子束尺寸太大, 总的光子产额会降低, 同样也会降低探测器收集到的光子数. 当电子束 rms 尺寸为 $\sim 1\text{mm}$ 时在探测器上能收集到最多的 X 射线光子, 此时在全空间总的光子产额为 2.8×10^4 , 在探测器上(收集角 $< 0.005\text{rad}$) 收集到的光子数约为 6.8×10^2 个, 约为电子束发射度为零时收集到的光子数的 $1/8$, 收集到的最大光子能量为 4.62keV .

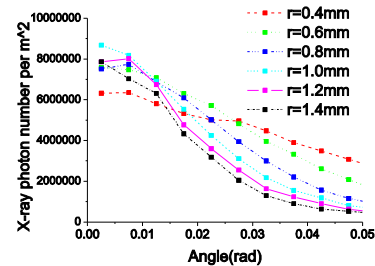


图 5 cain 程序模拟不同束团尺寸下探测器位置光子密度分布比较

电子束束团的横向抖动会引起X射线产额的变化. 由于束团抖动量远小于电子束和激光束的作用尺寸, 束团抖动对X射线光子的总产额影响很小, 在 x, y 分别抖动0.1mm的时候, X射线产额变化小于1%, 在实验中可以忽略束团抖动导致的影响.

4 总结

本文通过实验测量了用于汤姆逊散射初步实验的16MeV 返波行波加速器电子束的各项参数, 并通过模拟程序计算和分析了该电子束所产生的X射线的各项参数. 由于电子束发射度的影响, 在探测器位置收集

到的光子数远小于理想情况下收集到的光子数, 并且与作用时电子束的参数密切相关. 在实验中还注意到在探测器位置有较强的辐射本底干扰, 如何在降低干扰的同时获得信噪比高的汤姆逊散射X射线信号, 还需要通过模拟计算和实验对作用点电子束参数进行进一步的优化. 对汤姆逊散射X射线的探测和分析, 将是下一阶段实验重点解决的内容.

感谢中国科学院上海光学精密机械研究所的徐军、赵广军老师提供的掺铈YAG晶体切片, 清华大学物理系纳米研究中心姜开利老师提供的镀铝硅片.

参考文献(References)

- 1 Ting A et al. J. Appl. Phys., 1995, **78**: 575—577
- 2 Schoenlein R W et al. Science, 1996, **274**: 236—238
- 3 HUANG W H, HE X Z, HUANG G et al. High Energy Physics and Nuclear Physics, 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 TANG C X, HUANG W H, CHEN H B et al. Researches of Thomson Scattering X-ray Source at Tsinghua University, the International Conference of FEL's 2004, 2004
- 5 DU Y C, YUAN X D, HUANG W H et al. Nuclear Techniques, 2005, **28**(3): 196—199(in Chinese)
(杜应超, 袁晓东, 黄文会等. 核技术, 2005, **28**(3):196—199)
- 6 McKee C B, O'Shea P G, J Madey J M. Nucl. Instr. & Methods, 1995, **A355**: 264—267
- 7 CHEN P, Horton-Smith G, Ohgaki T et al. Nucl. Instr. & Methods, 1995, **A355**: 107

Preliminary Experiments of Thomson Scattering X-Ray Source: Measurements of Electron Beam's Parameters and Their Influence on the X-Ray Performance

DU Ying-Chao¹⁾ HUANG Wen-Hui TANG Chuan-Xiang HUA Jian-Fei
CHENG Cheng DU Tai-Bin XIA Bing HE Xiao-Zhong DU Qiang
ZHENG Shu-Xin CHEN Huai-Bi LIN Yu-Zheng

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

Abstract In order to study the X-ray's parameters produced by Thomson scattering, the beam profile, energy, divergence and emittance of the 16MeV electron beam accelerated by the backward traveling wave electron linac are measured. The simulated results of the Thomson scattering X-ray based on the measured electron beam parameters are also presented.

Key words Thomson scattering, beam diagnosis, emittance, energy spectrum

1) E-mail: dych97@mails.tsinghua.edu.cn