

# 12MeV 直线感应加速器 X 光能谱的实验测量\*

禹海军<sup>1;1)</sup> 李裕熊<sup>2</sup> 石金水<sup>1</sup> 李勤<sup>1</sup> 陈楠<sup>1</sup>

1 (中国工程物理研究院流体物理研究所 绵阳 621900)

2 (中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230029)

**摘要** 12MeV 直线感应加速器能够产生能量~12MeV、流强2.2kA的电子束,被传输、聚焦后形成~4mm的束斑,与韧致辐射靶作用来产生高剂量的X光.首先设计了X光探测器,并利用多层吸收拟合法来对X光能谱进行了测量,得到了X光的韧致辐射能谱,X光峰值大约在2MeV,最后对实验结果进行了分析.

**关键词** 直线感应加速器 探测器 吸收系数 能谱

## 1 引言

12MeV 直线感应加速器(LIA)<sup>[1]</sup>能够产生能量约12MeV、束流强度2.2kA的电子束,电子束经过长距离的传输、聚焦后被打击到高原子序数材料的韧致辐射靶(如钽)上,在靶正前方1m处可以产生具有上百伦琴剂量的X光,X光经过准直后可以对物体进行闪光照相.作为限制闪光照相能力的主要因素,研究X光的特性及其性能参数进行诊断对于闪光照相是极其重要的.X光的特性参数包括X光照射量的大小与角分布、焦斑大小以及X光能谱等.这些参数中,X光照射量的大小与角分布主要是通过热释光测量片来进行测量<sup>[2]</sup>;X光焦斑大小是通过大孔法和刀口法<sup>[3]</sup>来进行测量;而对于图象处理技术中所需要的X光能谱主要是利用EGS4程序来对其进行蒙特卡罗模拟后得到的结果,在实验测量方面,崔高显等人利用透射系数数值分析的叠代最小二乘法<sup>[4]</sup>以及李成刚利用设计的一体化X射线参数测量装置<sup>[5]</sup>等对12MeV LIA的X光能谱进行了初步的测量.设计了一种X光探测器,利用多层吸收拟合法来对12MeV LIA的X光能谱进行实验测量.

## 2 测量原理

采用与12MeV LIA的X光辐射场时间结构无

关的探测器并结合多层吸收拟合法进行测量.多层吸收拟合法的原理是基于簇多种能量的X光通过某种吸收介质时,会同该物质发生光电效应、康普顿散射、电子对效应等相互作用,结果使得X光被逐渐吸收,X光的强度按各自的指数规律衰减,即 $I = I_0 e^{-\mu x}$ ,其中的 $I_0$ 和 $I$ 为X光通过吸收介质前后的X光的光强(C/kg), $\mu(\text{cm}^2/\text{g})$ 为吸收介质的质量吸收系数(质量吸收系数是能量的函数), $x$ 为吸收介质的质量厚度( $\text{g}/\text{cm}^2$ ),而通过该层介质被吸收的份额与吸收介质的厚度和X光的能量有关,将多层介质叠加在一起并分别在每层介质后放置能记录X光强度的测量片(本文中利用热释光测量片来测量X光强度),就构成一套测量系统.将该系统放置于X光的辐射场中,可以采集到一组通过不同厚度后的X光强度的数据,通过对该组数据进行适当的处理,就可以得到对应于各能量值的X光强度,从而可以得到X光的能谱分布.

## 3 X光探测器设计与实验测量

依据上述测量原理,设计如图1所示的X光探测器,该探测器由9层铁吸收层组成,第1层铁吸收层的几何厚度为5cm,其余的都为2cm.实验时探测器被放置在待测位置处(图2),实验后依次测量各吸收层后的剂量.其中图2中的各参量为: $d=6\text{cm}$ , $D=9\text{cm}$ , $l=50\text{cm}$ , $L=32\text{cm}$ .

\* 国防科技基础研究基金资助

1) E-mail: haijunyu@21cn.com

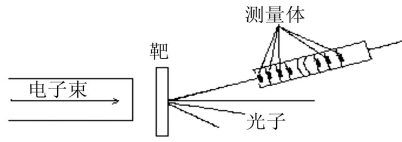


图 1 X 光探测器

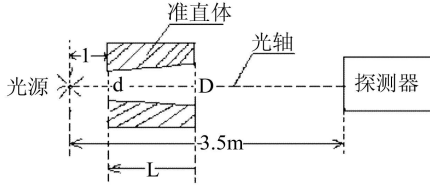


图 2 实验布局

利用上述探头和实验布局, 在表 1 的实验条件下进行了多次辐照实验, 并对辐照后的热释光片进行测量。

表 1 多次辐照实验参数

实验号	打靶束流/kA	电荷量/ $\mu\text{C}$	能量/MeV
54	2.18	174	11.28
55	2.22	180	11.38
56	2.26	163	10.57
57	2.06	165	11.37
58	2.20	165	11.15

### 4 数据处理方法

由于 12MeV LIA 上产生的韧致辐射 X 光光子的特点是能量呈连续分布, 所以首先将整个待求能区作合适的区间划分, 划分为 1, 2,  $\dots, n$  个能量区间, 待求的各区间的光强分别为  $I_1, I_2, \dots, I_n$ , 对于同一吸收体各能量下的质量吸收系数分别为  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ , 根据各吸收层前后的总的光强相等的原则可列出如下的方程组。

$$\begin{cases} b_1 I_1 + b_2 I_2 + \dots + b_n I_n = b_{00} I_{00} \\ b_1 I_1 e^{-\mu_1 x_1} + b_2 I_2 e^{-\mu_2 x_1} + \dots + b_n I_n e^{-\mu_n x_1} = b_{10} I_{10} \\ b_1 I_1 e^{-\mu_1 x_2} + b_2 I_2 e^{-\mu_2 x_2} + \dots + b_n I_n e^{-\mu_n x_2} = b_{20} I_{20} \\ \vdots \\ b_1 I_1 e^{-\mu_1 x_n} + b_2 I_2 e^{-\mu_2 x_n} + \dots + b_n I_n e^{-\mu_n x_n} = b_{n0} I_{n0} \end{cases}$$

上述方程组中,  $b_{00} I_{00}, b_{10} I_{10}, \dots, b_{n0} I_{n0}$  为吸收层前以及各吸收层后的 X 光强度 (C/kg);  $I_1, I_2, \dots, I_n$  为待求的各能量区间的 X 光强度 (C/kg);  $x_1, x_2, \dots, x_n$  为各测量点前总吸收层的质

量厚度 ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ );  $b_1, b_2, \dots, b_n, b_{00}, b_{10}, \dots, b_{n0}$  为转换和修正因子;  $I_{00}, I_{10}, \dots, I_{n0}$  为吸收层前以及各吸收层后的 X 光强度 (C/kg)。

求解上述方程组可以得到各能量区间的 X 光强度  $I_1, I_2, \dots, I_n$  等, 进而可以得到 X 光能谱。

### 5 实验结果与误差分析

在利用上述方法对测量结果进行处理时, 需要考虑两个方面的影响, 一是探测器长度 (即探测器内不同探测点到光源的距离) 所引起的误差, 二是探测器内每层吸收层所引起的散射效应。前者可以通过在转换和修正因子 ( $b_i$ ) 中添加距离衰减修正系数 ( $(D/(D+d))^2$ ) 来解决, 后者可以通过扣除能量吸收积累因子来消除散射影响。

综合分析测量结果, 通过数据处理, 最后得到了 12MeV LIA 归一化的 X 光能谱 (图 3)。

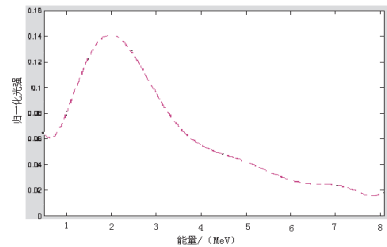


图 3 12MeV LIA 的 X 光能谱

本文利用多层吸收拟合法对 12MeV LIA 的 X 光能谱进行了测量, 结果表明该能谱的峰值约在 2MeV, 与文献[4]和[5]中得到的能谱结果较为相近, 其中文献[4]中的结果为 2.1MeV, 文献[5]中实验得到的能谱峰值为 2.6MeV。比较 3 种测量方法和结果, 原理都是利用物质的质能吸收系数来得到 X 光能谱, 所得结果也较为相近。

实验结果的测量误差主要来自于以下两类: 一是利用热释光剂量片来测量 X 光强度, 由于没有更高的单能光子源 (MeV 量级以上) 对热释光片进行定标, 热释光片的高能响应不确定 (MeV 量级的测量), 因此测量本身存在有一定的系统误差; 二是随机误差, 包括在标准  $\gamma$  源上刻度 LiF 剂量片的刻度系数时, 在刻度过程中存在场的传递误差, 此误差一般认为是 3.5%; 刻度和测量过程中所应用的 LiF 剂量片有一定的复现性, 其复现性误差一般取 3%; 在瞬态电子平衡条件下, 由测量所得的 LiF 剂量片的吸收剂量计算 X 光照射量时, 用线能量吸收系数近似代替等效线减弱系数, 由此引入的误差是 3%; 测量场点的照射量分布不均匀所

导致的误差是5%;因而可以得到整个测量过程中产生的随机误差为9.6%.

### 参考文献(References)

- 1 SHI Jin-Shui, DENG Jian-Jun, DING Bo-Nan et al. High Power Laser & Particle Beams, 1997, **9**(4): 599—604(in Chinese)  
(石金水, 邓建军, 丁伯南等. 强激光与粒子束, 1997, **9**(4): 599—604)
- 2 HE Guo-Rong. Measurement of X Ray Intensity for 10MeV LIA. In: Editionial Office of High Power Laser and Particle Beams. Proceedings of The Conference on 10MeV LIA. Mianyang: High Power Laser and Particle Beams Press,1994. 201—205( in Chinese)  
(何国荣. 10MeV LIA X光照射量测试研究. 见: 强激光与粒子束编辑部编辑. 10MeV直线感应加速器会议文集. 绵阳: 强激光与粒子束出版社, 1994. 201—205)
- 3 SHI Jin-Shui, LI Jin, HE Yi et al. High Power Laser and Particle Beams, 1999, **11**(2): 177—179(in Chinese)  
(石金水, 李劲, 何毅等. 强激光与粒子束, 1999, **11**(2): 177—179)
- 4 CUI Gao-Xian. Experimental Measurements of Bremspectrum From 10—20MeV X-ray, In: Annual Report of CAEP. Mianyang: CAEP, 2001 (in Chinese)  
(崔高显. 10—20MeV X射线能谱的实验测定, 中国工程物理研究院年度总结报告. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2001)
- 5 LI Cheng-Gang. Measurement of High Energy X-Ray Parameters. In:Master Thesis of CAEP. Mianyang: CAEP, 2004. 26—36(in Chinese)  
(李成纲. 高能X射线参数测量研究. 见: 中国工程物理研究院硕士论文. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2004. 26—36)

## Experimental Measurement of the X-Ray Energy Spectrum for the 12MeV LIA \*

YU Hai-Jun<sup>1;1)</sup> LI Yu-Xiong<sup>2</sup> SHI Jin-Shui<sup>1</sup> LI Qin<sup>1</sup> CHEN Nan<sup>1</sup>

1 (Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

2 (National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

**Abstract** The 12MeV Linear induction accelerator can generate the pulse electron beam with energy  $\sim 12\text{MeV}$  and current  $2.2\text{kA}$ . The beam is transported and focused onto the bremsstrahlung converter target (Ta) with about  $4\text{mm}$  spot to produce high intensive X-ray. The X-ray detector and the multi-layer attenuation method are designed and applied to measure X-ray bremsstrahlung spectrum. The results show that the maximum energy of the X-ray is about  $2\text{MeV}$ . The measurement results are also analyzed and discussed.

**Key words** linear induction accelerator, detector, attenuation coefficient, bressumtrahlung spectrum

---

\*Supported by Fundamental Research Foundation of National Defence Technology

1) E-mail: haijunyu@21cn.com