

高能脉冲 X 射线能谱测量*

苏兆锋[†] 杨海亮 邱爱慈 孙剑锋 丛培天 王亮平 雷天时 韩娟娟

(西北核技术研究所, 西安 710024)

(2008 年 12 月 11 日收到; 2010 年 2 月 5 日收到修改稿)

给出了高能脉冲 X 射线能谱测量的基本原理及实验结果. 采用 Monte-Carlo 程序计算了高能光子在能谱仪中每个灵敏单元内的能量沉积, 利用能谱仪测量了“强光 I 号”加速器产生的高能脉冲 X 射线不同衰减程度下的强度, 求解得到了具有时间分辨的高能脉冲 X 射线能谱, 时间跨度 57 ns, 时间步长 5 ns, 光子的最高能量 3.0 MeV, 平均能量 1.04 MeV, 能量在 0.2—0.9 MeV 之间的光子数目最多, 占 46.5%. 也利用二极管的电压电流波形理论计算了光子的能谱, 并与利用能谱仪测得的能谱进行了比较, 两种方法所得结果基本一致.

关键词: 能谱, 高能脉冲 X 射线, 时间分辨, 反卷积

PACC: 0777, 2990, 2940P

1. 引 言

高能射线能谱测量^[1]是核辐射探测的一个重要手段, 在核物理的研究(如测量原子核激发态能级, 研究核的衰变纲图, 测定短的核寿命等), 表面分析^[2], 指纹识别^[3,4], ³⁷Ar 的探测^[5], 辐射热波研究^[6], 与放射性同位素相关的工业, 农业, 医疗^[7]等许多应用领域中^[8], 都要确定高能射线能谱.

利用“强光 I 号”加速器短脉冲电子束通过韧致辐射作用产生 X 射线, 这种 X 射线是高强度脉冲形成的, 到达待测点的光子注量率可达 $10^{20}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$. 各种多道谱仪的时间响应无法满足这类高强度脉冲射线束测量的需求, 而射线的能谱数据是加速器的主要输出参数之一. 虽然真空康普顿或介质康普顿探测器测量系统^[9]等此类探测器线性电流大, 性能优异, 但灵敏度通常低于 $10^{-19} \text{ C} \cdot \text{cm}^2$, 很难得到射线的低能部分. 如果通过微分吸收谱仪(DAS)^[10], 则只能得到积分能谱, 无法体现出光子能量随时间的具体变化关系. 为了真实地反映射线和被辐照材料的作用关系, 需要给出不同时间段内 X 射线的能谱数据. 利用自行研制的能谱仪获得了“强光 I 号”加速器产生的高能脉冲 X 射线的不同时间段的能谱, 并与二极管电压和电流波形理论计

算的能谱进行了比较, 两种方法所得结果基本一致.

2. 光子在能谱仪上能量沉积的计算

高能 X 射线在透过不同元素各种厚度的物质时, 满足指数衰减规律^[11]

$$T(y) = \int_0^{E_{\max}} \exp[-\mu(E)y] F(E) dE, \quad (1)$$

其中, y 为衰减材料厚度, $F(E)$ 为分布函数, 即特征谱, $\mu(E)$ 为材料的线性减弱系数. 高能 X 射线穿过衰减物质的透射系数不同, 不同能量的光子经过衰减片后在探测器灵敏区内的能量沉积不同, 进而得到衰减程度不同的波形. Si-PIN 探测器^[12]体积小, 耐辐照冲击的线性输出电流大, 测量能量范围宽, 线性响应好, 灵敏度易于计算^[13], 可以作为射线的测量系统.

整个谱仪呈圆柱状, 直径 161 mm, 高 61 mm, 4 个准直孔位置对称, 大小相同, 直径均为 26 mm, 深 31 mm. 4 个准直孔前端放置不同厚度、直径均为 26 mm 的铅衰减片, 后面是 Si-PIN 探测器, 探测器灵敏区面积为 10 mm^2 , 灵敏区厚度为 $300 \mu\text{m}$, 准直孔末端留有 2 个直径为 2 mm 的小孔, 用于引出探测器的信号输出线 and 高压输入线, 如此设计可减少从探测器后端进入的射线. 4 个准直孔之间为铅(Pb)体

* 国家自然科学基金(批准号: 10775112), 国防科技预研基金(批准号: NYS311060205)资助的课题.

[†] E-mail: xcw9504@sohu.com

屏蔽,可减少互相之间的干扰.实验时整个能谱仪用 2 mm 厚的铜网包裹以减少电磁干扰,提高信噪比.图 1 是单个准直孔的剖面图.射线通过不同厚度的铅衰减片照射在 Si-PIN 探测器上,由于不同能量的光子在衰减片中的透射率不同,在探测器的灵敏区上的能量沉积也不同,再根据实测波形计算出光子产生的电荷量,可以解出不同能量的光子个数,由此得到高能射线的能谱.

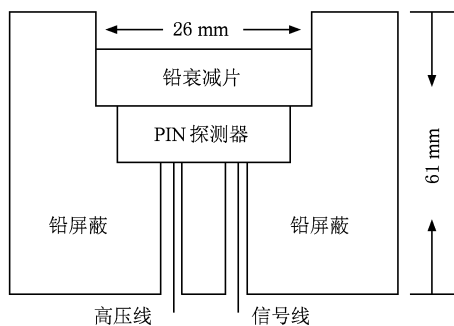


图 1 单个准直孔的剖面图

根据能谱仪的物理模型及实验环境,利用 Monte-Carlo 程序模拟了光子在探测器阵列中的输运过程,计算了不同能量的光子经过厚度分别为 6, 15, 20 和 26 mm 的衰减片后在探测器灵敏区内的能量沉积.图 2 显示了能量 0—3.0 MeV 的光子在探测器上的能量沉积变化情况.

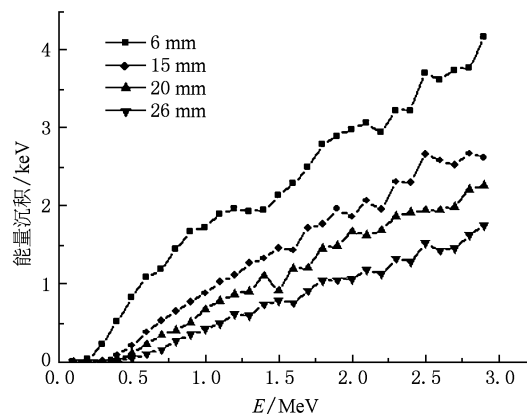


图 2 不同能量的光子经过不同厚度的铅衰减片后在探测器上的能量沉积变化情况

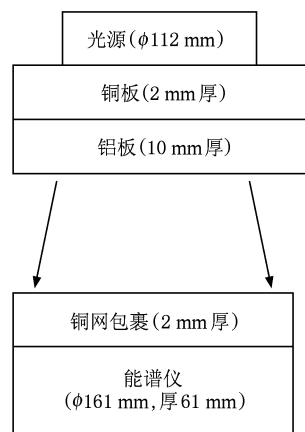


图 3 实验中的能谱仪布局示意图

3. 实验结果

能谱仪测量高能脉冲 X 射线的强度是在“强光 I 号”加速器上进行的.“强光 I 号”加速器^[14]是一台大型强流脉冲相对论电子束加速器,产生宽度约

为 20 ns 的高能脉冲 X 射线是该加速器的重要辐射输出状态,此时整个装置的基本构成部件有直线型脉冲变压器,水介质同轴线和短脉冲 X 射线负载.其中,短脉冲 X 射线负载包括管绝缘体、磁绝缘电

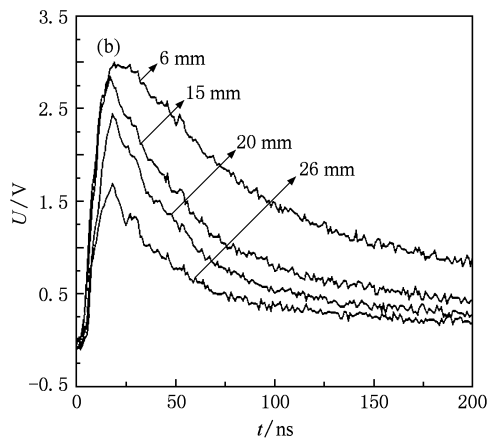
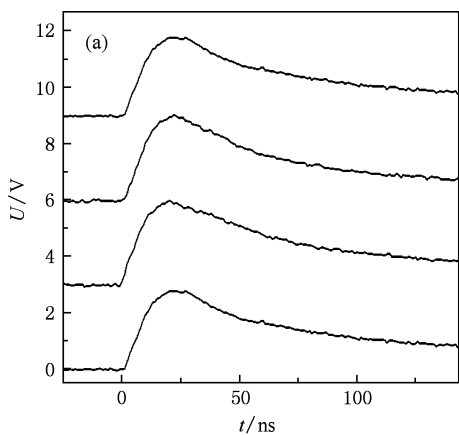


图 4 能谱仪在“强光 I 号”加速器上所测束流强度 (a) 未覆盖衰减片; (b) 覆盖不同厚度的铅衰减片

感储能真空同轴线、等离子体断路开关、电子束二极管和辐射转换靶等部件,它的作用是将脉冲功率源产生的电脉冲进行电压倍增和脉冲压缩,进而产生短脉冲电子束,通过轫致辐射输出 X 射线。

利用研制的能谱仪对该加速器产生的高能脉冲 X 射线进行了测量。实验中,能谱仪距离二极管 1 m,能谱仪的准直孔正对二极管,图 3 是能谱仪布局示意图。图 4(a) 显示了能谱仪前面未覆盖衰减片时所测光子强度的分布情况,图 4(b) 是能谱仪前覆盖厚度分别为 6, 15, 20, 26 mm 的铅衰减片时所测的波形。

由图 4(a) 中可以看出,光子束流的强度分布比较均匀,各个探测器的个体差异也比较小,从图 4(b) 中可以看出,由于 PIN 探测器的时间响应问题,能谱仪对信号有一定的展宽作用,得到的波形无法直接进行解谱,可以通过反卷积程序还原出高能脉冲 X 射线的真实波形,作为解谱的原始数据。

4. 解 谱

Si-PIN 探测器的时间响应特性与灵敏层厚度,外加偏压,电子和空穴的迁移率,电子和空穴的收集时间,探测器灵敏层电容,外接负载电阻,入射辐射类型和输出电流大小等因素有关^[15]。ST401 塑料闪烁体的闪烁衰减时间为 2.8 ns,光电管的脉冲上升时间约为 3 ns,由它们组成的闪烁探测器的时间响应^[16,17]比能谱仪中 Si-PIN 探测器阵列的时间响应快(图 5)。

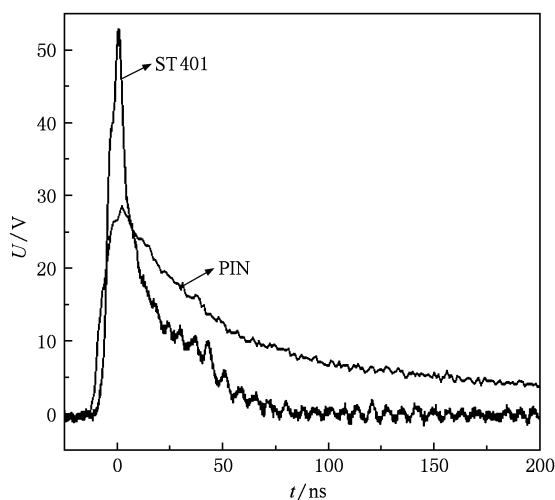


图 5 闪烁探测器与 PIN 探测器的时间响应对比

图 6 是依据同一炮中闪烁探测器测得的高能脉

冲 X 射线的脉冲波形对 PIN 探测器的时间响应进行卷积计算的结果,从卷积的效果看,当 $T_r = 1$ ns, $T_d = 20$ ns 时波形较为符合。根据上述卷积结果,编写反卷积程序,对“强光 I 号”加速器 06163 炮中的

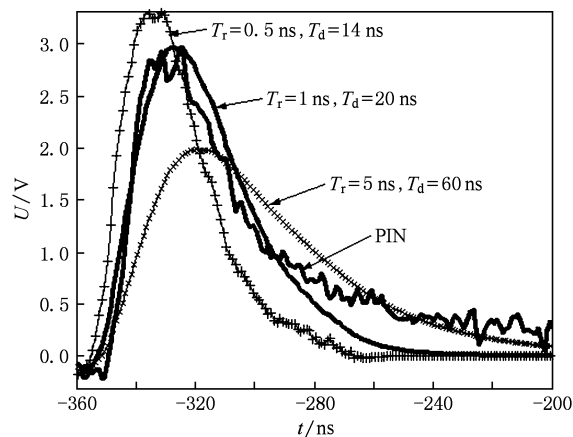


图 6 卷积计算 PIN 探测器时间响应的效果图

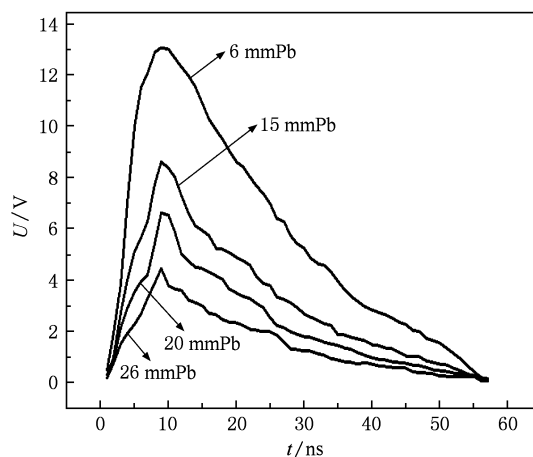


图 7 “强光 I 号”加速器 06163 炮经过反卷积以后的波形

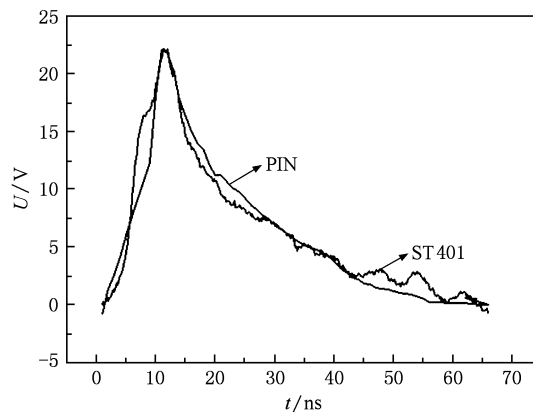


图 8 波形在时间响应上的比较

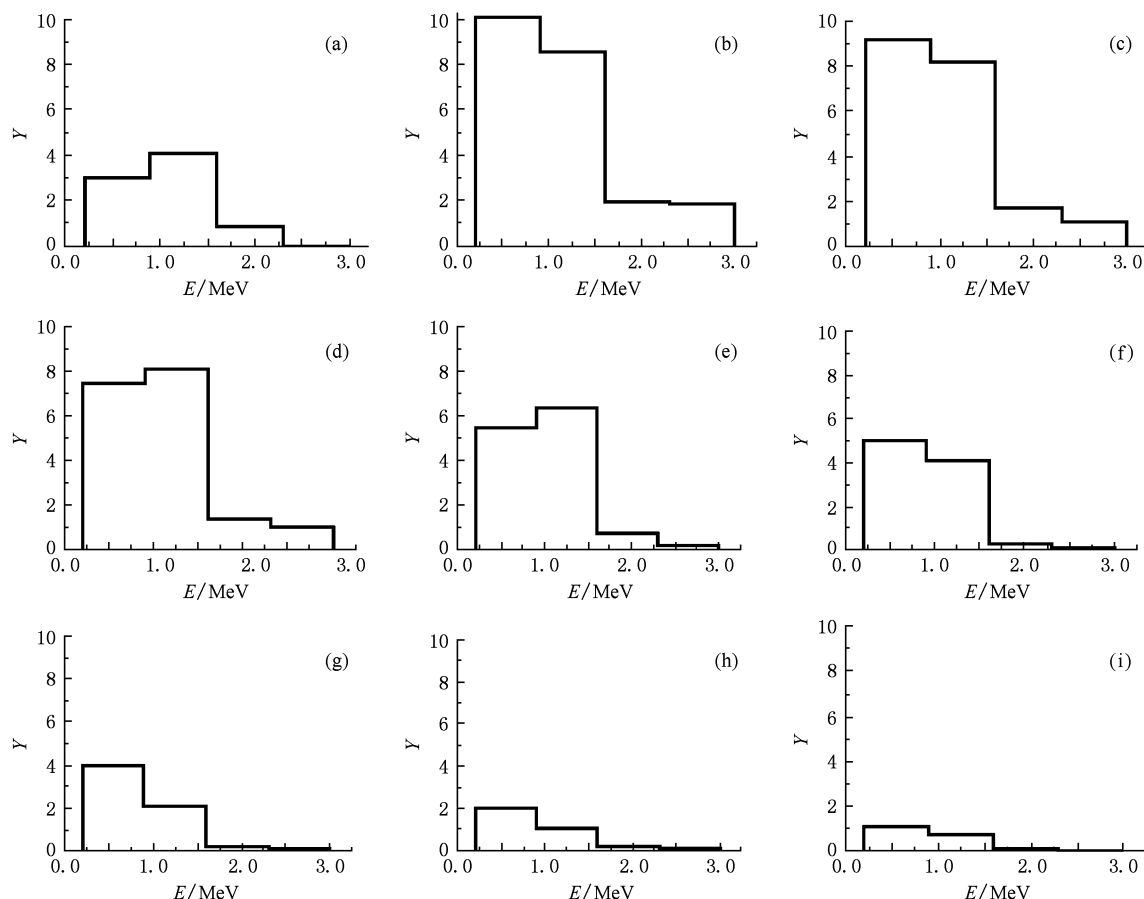


图9 “强光 I 号”加速器上具有时间分辨的高能脉冲 X 射线能谱 (a)1—5 ns; (b)6—10 ns; (c)11—15 ns; (d)16—20 ns; (e)21—25 ns; (f)26—30 ns; (g)31—35 ns; (h)36—40 ns; (i)41—45 ns

能谱仪得到的波形进行还原计算. 图 7 是反卷积后的波形.

为了验证反卷积以后的波形在时间响应上与闪烁探测器得到的结果是否一致,把反卷积波形和闪烁探测器得到的波形进行了比较,图 8 显示了反卷积以后的 PIN 探测器波形和闪烁探测器波形在时间响应上的一致性.

从对比效果看,经过反卷积以后的归一化波形和闪烁探测器实测波形基本一致,波形的基本参数也基本一致,说明 Si-PIN 探测器测试波形在经过反卷积以后在时间响应上达到了要求,可以用来解谱.

假定初始能谱分布是 $\{I_1, I_2, \dots, I_{n-1}, I_n\}$, 高能脉冲 X 射线能谱是一个连续谱,把能量离散化, E_{ij} 对应上面的能谱分布. 则有如下线性方程组:

$$\begin{aligned} E_{11}I_1 + E_{12}I_2 + \dots + E_{1n}I_n &= A_1, \\ E_{21}I_1 + E_{22}I_2 + \dots + E_{2n}I_n &= A_2, \\ E_{n1}I_1 + E_{n2}I_2 + \dots + E_{nn}I_n &= A_n, \end{aligned} \quad (2)$$

其中, A 是实验中探测器上接收到的电荷量. 方程组

写成矩阵形式

$$EI = A. \quad (3)$$

把反卷积后的波形分为 10 段,时间跨度 57 ns, 每 5 ns 分为一个时间段,求解(2)式,可以得到不同时间段内不同能量的光子相对份额. 图 9 为“强光 I 号”加速器上具有时间分辨的高能脉冲 X 射线能

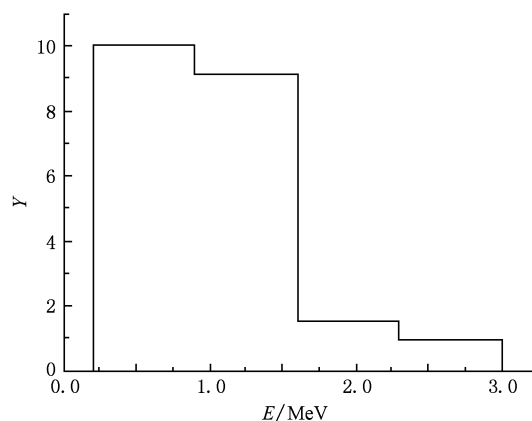


图 10 高能脉冲 X 射线总能谱

谱,光子的最高能量为 3.0 MeV,平均能量为 1.04 MeV. 其中 0.2—0.9 MeV 内的光子数最多,占 46.5%,0.9—1.6 MeV 的光子次之,占 42.4%.

把每个能量的各个时段的光子数相加,即可得

到总能谱,如图 10 所示.

图 11 是每个能量段的光子随时间变化的分布情况,它更清楚地显示了各个能量段的光子个数随时间的变化规律.

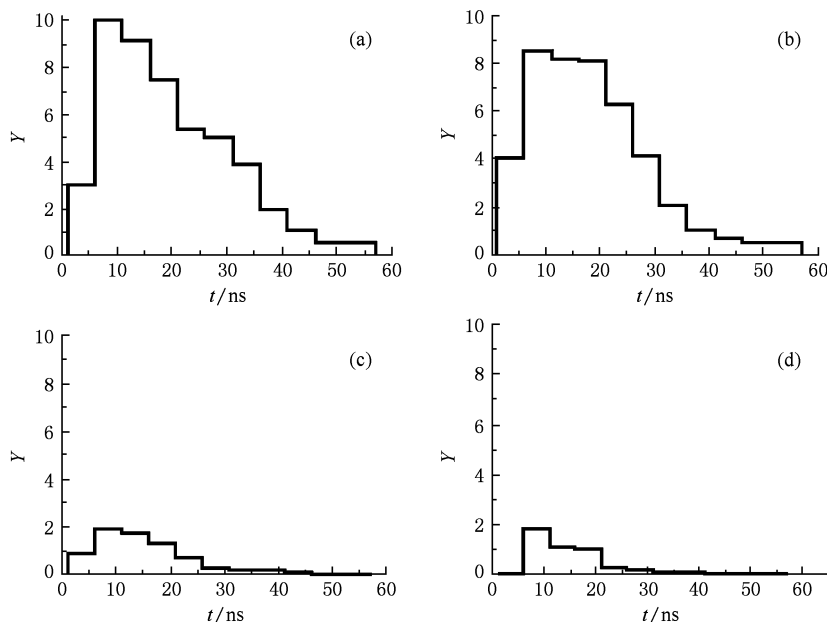


图 11 不同能量段的光子数目随时间变化的分布情况 (a)0.2—0.9 MeV; (b)0.9—1.6 MeV; (c)1.6—2.3 MeV; (d)2.3—3.0 MeV

5. 实验能谱与理论能谱的比较

依据二极管的间隙电压,考虑阴阳极等离子体运动对二极管束流强度的影响,根据电子束流强度波形与二极管电压的对应关系,可以计算得到电子束的能谱. 利用 Monte-Carlo 方法计算“强光 I 号”加速器电子轰击靶后得到的高能脉冲 X 射线的能谱,图 12 是实验能谱和理论能谱直方图的对比.

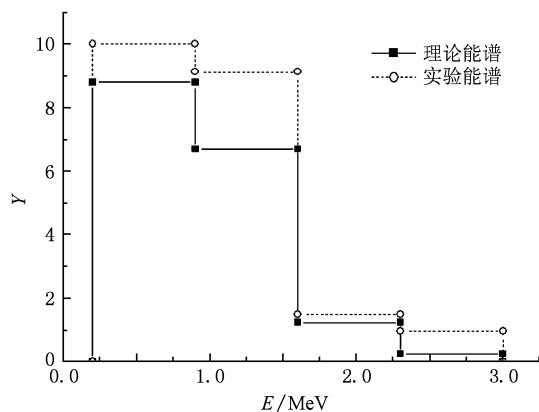


图 12 理论能谱与实验能谱的对比

从比较结果来看,实验所得能谱和根据二极管电压和电流波形理论计算的 X 射线能谱基本相同,平均能量相差 7.7%. 实验谱和理论谱的差异主要来自以下两点:首先,能谱仪测量实验环境均为 X 射线的强散射体,所以能谱仪测量存在一定的散射不确定度;另外,二极管电压波形是由电感修正的方法得到,本身存在误差,影响了理论谱的计算.

6. 结 论

利用能谱仪前端加不同厚度的铅衰减片,实验得到了“强光 I 号”加速器产生的高能脉冲 X 射线衰减程度不同的波形. 考虑能谱仪测量系统的时间响应和实验环境,编制了波形还原(反卷积)程序,得到了射线的原始波形,解谱得出了具有时间分辨的高能脉冲 X 射线能谱,清楚地表示出了在各个时间段内光子的变化情况. 射线的最高能量为 3.0 MeV,平均能量约为 1.04 MeV,其中 0.2—0.9 MeV 内的光子数最多,占 46.5%,0.9—1.6 MeV 的光子次之,占 42.4%.

还将能谱仪测量的光子总能谱的结果和用二

极管电流电压理论计算的总能谱进行了比较,两种方法的能谱结果基本一致. 利用二极管电压电流波

形理论计算的总能谱的平均能量约为 0.96 MeV,与实验谱相差 7.7%.

-
- [1] Hiroshi Tsutsui, Tetsuro O, Koichi O, Sueki B 1993 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **39** 40
- [2] Ou G P, Song Z, Gui W M, Zhang F J 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5717 (in Chinese) [刘谷平、宋 珍、桂文明、张福甲 2005 物理学报 **54** 5717]
- [3] Liu S P, Wu H L, Gu D C, Gong J, Hao F H, Hu G C 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2411 (in Chinese) [刘素萍、伍怀龙、古当长、龚 建、郝樊华、胡广春 2002 物理学报 **51** 2411]
- [4] Wang C J, Bao D M, Cheng S, Zhang A L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5361 (in Chinese) [王崇杰、包东敏、程 松、张爱莲 2008 物理学报 **57** 5361]
- [5] Xiang Y C, Gong J, Li W, Bian Z S, Hao F H, Wang H X, Wang Q, Xiong Z H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 784 (in Chinese) [向永春、龚 建、李 伟、卞直上、郝樊华、王红侠、王茜、熊宗华 2008 物理学报 **57** 784]
- [6] Yang J M, Ding Y N, Sun K X, Huang T X, Zhang W H, Wang Y M, Hu X, Zhang B H, Zheng Z J 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 2408 (in Chinese) [杨家敏、丁耀南、孙可煦、黄天喧、张文海、王耀梅、胡 昕、张保汉、郑志坚 2000 物理学报 **49** 2408]
- [7] Zhao Q, Tian Y, Liu H F 2007 *High Energy Physics and Nuclear Physics* **31** 506 (in Chinese) [赵 强、田 毅、刘华锋 2007 高能物理与核物理 **31** 506]
- [8] Yang H L, Qiu A C, Li J Y, Sun J F, He X P, Tang J P, Wang H Y, Huang J J, Ren S Q, Zhou L L, Yang L 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4072 (in Chinese) [杨海亮、邱爱慈、李静雅、孙剑锋、何小平、汤俊萍、王海洋、黄建军、任书庆、邹丽丽、杨莉 2005 物理学报 **54** 4072]
- [9] Kroeger, Johnson R A, Kurfess W N, Philips J D, Wulf B F E A 2001 *IEEE Trans. Nuc. Sci.* **1** 8
- [10] Carlson G A, Lorence L J 1988 *IEEE Trans. Nuc. Sci.* **35** 1255
- [11] Xiao K Y, Cui G X, Liu H C, Lei J R, Zhao L, Zhao M Z 1995 *Nuclear Electronics and Detection Technology* **15** 365 (in Chinese) [肖开宇、崔高显、刘浩才、雷家荣、赵 林、赵敏智 1995 核电子学与探测技术 **15** 365]
- [12] Ouyang X P, Li Z F, Wang Q S, Huo Y K, Ma Y L, Zhang Q M, Zhang G G, Jin Y R 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4643 (in Chinese) [欧阳晓平、李真富、王群书、霍裕昆、马彦良、张前美、张国光、金玉仁 2005 物理学报 **54** 4643]
- [13] Ouyang X P, Li Z F, Zhang G G, Huo Y K, Zhang Q M, Zhang X P, Song X C, Jia H Y, Lei J H, Sun Y C 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1502 (in Chinese) [欧阳晓平、李真富、张国光、霍裕昆、张前美、张显鹏、宋献才、贾焕义、雷建华、孙远程 2002 物理学报 **51** 1502]
- [14] Kuai B, Qiu A C, Zeng Z Z, Cong P T, Wang L P, Liang T X 2005 *High Power Laser and Particle Beams* **17** 595 (in Chinese) [蒯 斌、邱爱慈、曾正中、丛培天、王亮平、梁天学 2005 强激光与粒子束 **17** 595]
- [15] Ouyang X P, Li Z F, Huo Y K, Song X C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1353 (in Chinese) [欧阳晓平、李真富、霍裕昆、宋献才 2007 物理学报 **56** 1353]
- [16] Guo C, Xu R K, Li Z H, Xia G X, Ning J M, Song F J 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1331 (in Chinese) [郭 存、徐荣昆、李正宏、夏广新、宁家敏、宋凤军 2004 物理学报 **53** 1331]
- [17] Zhang G G, Ouyang X P, Zhang J F, Wang Z Q, Zhang Z B, Ma Y L, Zhang X P, Chun J, Zhang X D, Pan H B, Luo H L, Liu Y N 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2165 (in Chinese) [张国光、欧阳晓平、张建福、王志强、张忠兵、马彦良、张显鹏、陈军、张小东、潘洪波、骆海龙、刘毅娜 2006 物理学报 **55** 2165]

Measurements of energy spectra for high energy pulsed X-ray^{*}

Su Zhao-Feng[†] Yang Hai-Liang Qiu Ai-Ci Sun Jian-Feng Cong Pei-Tian Wang Liang-Ping

Lei Tian-Shi Han Juan-Juan

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

(Received 11 December 2008; revised manuscript received 5 February 2010)

Abstract

The basic principle and the experimental results of measuring energy spectra of high energy pulsed X-ray are reported. The Monte-Carlo code is developed to calculate the energy deposition of high energy photons in each sensitive cell of the energy spectrometer. The intensity of high energy pulsed X-ray created on the Qiangguang- I accelerator is measured by using the energy spectrometer. According to the deposited energy and the integral data, the time-resolved high pulsed x-ray energy spectrum is obtained. By using the voltage waveform and the current waveform of the diode, the energy spectrum is calculated in details. The results are in agree with the measured values from the experimental energy spectrum.

Keywords: energy spectrum, high energy pulsed X-ray, time-resolved, deconvolution

PACC: 0777, 2990, 2940P

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 10775112), the National Defence Foundation of China (Grant No. NYS311060205)

[†] E-mail: xcw9504@sohu.com