

# 叠片法测量“闪光二号”加速器的高功率离子束能谱\*

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

(西北核技术研究所, 西安 710024)

(2004 年 6 月 21 日收到)

给出了利用叠片法测量“闪光二号”加速器高功率离子束能谱的基本原理及初步实验结果. 采用 Ziegler 的拟合公式编制程序计算了不同能量质子和碳离子穿过不同厚度 Mylar 膜后的能量损失情况. 在偏压法拉第筒阵列各个法拉第筒的准直孔前分别覆盖 0—6 $\mu\text{m}$  厚的 Mylar 膜. 根据不同膜厚对应的信号衰减情况(叠片法), 得到了高功率离子束的离子能谱, 离子的最高能量 > 440keV, 平均能量约为 270keV, 能量为 200—300keV 之间的离子数目最多, 碳离子数和 90keV 以下的质子所占总离子数的组分不多于 32%. 所测量离子能谱和离子数目随时间的分布关系与二极管的电压和电流符合也较好. 还将叠片法的测量结果与利用磁谱仪和采用飞行时间法等的测量结果进行了比较, 三种方法所得的测量结果基本一致.

关键词: 高功率离子束, 离子能谱, 法拉第筒, 叠片法, 能量损失

PACC: 0777, 0781, 4180G, 9440L

## 1. 引 言

高功率离子束(HPIB), 亦称强流脉冲离子束(IPIB), 是在核聚变的研究中发展起来的, 后来在许多领域都得到了应用. 目前, HPIB 技术已用于能源、国防、材料和环境等科学技术领域.

离子能谱是表征离子束特性的一个重要参数, 在利用离子束产生准单能脉冲  $\gamma$  射线<sup>[1]</sup>, 模拟核爆 x 射线的热力学效应<sup>[2,3]</sup>, 表面处理、薄膜沉积和纳米粉末合成<sup>[4,5]</sup>, 进行冲击波和状态方程研究<sup>[6]</sup>, 产生强脉冲中子<sup>[7]</sup>等许多应用领域中, 都要确定离子束的能谱.

利用叠片法测量了“闪光二号”加速器产生的高功率离子束的能谱, 并将测量结果与利用磁谱仪和

采用飞行时间法等的测量结果进行了比较. 文中所采用的叠片法测量离子束能谱的技术也可以用于其他源的离子能谱测量技术, 如激光打靶所产生的离子<sup>[8,9]</sup>, 中子引起的反冲质子等.

## 2. 基本原理

高功率离子束是在“闪光二号”加速器上产生的, “闪光二号”加速器是国内电子束流强度最大的一台低阻抗强流脉冲电子束加速器, 主要由 Marx 发生器、水介质同轴线(包括脉冲形成线、主开关、传输线、预脉冲开关、输出线)和二极管等组成<sup>[10]</sup>. 通过重新设计二极管, 可以产生高功率离子束. 图 1 是实验装置方框图.

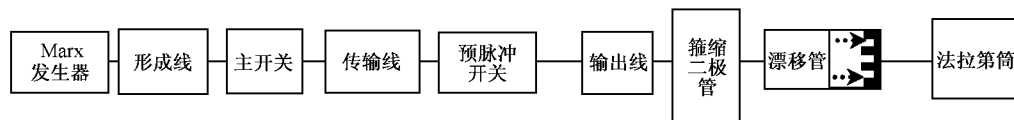


图 1 实验装置方框图

\* 国家自然科学基金(批准号: 10375048, 19975037)和国防科技预研基金资助的课题.

新研制的二极管是一种根据自箍缩原理工作的离子束二极管<sup>[11]</sup>,其阳极采用40—90 $\mu\text{m}$ 厚的聚乙烯( $\text{CH}_2$ )薄膜,采用空心圆环状石墨阴极.阴极发射的电子轰击阳极 $\text{CH}_2$ 膜,使膜迅速汽化而形成阳极等离子体,其中的质子和少量碳离子在二极管间隙电场中被加速后从环状阴极的空心处进入漂移管.利用该二极管所获得的离子束的峰值能量约为几百keV,峰值束流强度约为100kA,脉冲宽度约50ns,峰值功率约为几百GW,传输至靶上的能量密度约为10—20 $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ .由于在离子的产生过程中二极管的间隙电压是变化的,并且该离子源是质子和碳离子的混合源,因此,必须对离子束的组分和能谱进行测量.

目前,“闪光二号”加速器产生的高功率离子束的能量范围约为0—500keV<sup>[12]</sup>,实验中共采用8个独立的偏压法拉第筒<sup>[13]</sup>组成阵列,在每一个法拉第筒的准直孔前覆盖不同厚度(0~6 $\mu\text{m}$ )的Mylar膜,不同能量的离子在Mylar膜中的射程不同,某一厚度的膜可以挡掉低能离子而让高能离子穿透,利用法拉第筒测量穿透不同厚度Mylar膜的质子数目,由此可以得到离子束的能谱.

根据采用Ziegler的拟合公式编制程序计算了不同能量质子和碳离子穿透不同厚度Mylar膜后的能量损失情况(图2和图3),能量为200keV的质子在Mylar膜中的射程约为2 $\mu\text{m}$ ,即2 $\mu\text{m}$ 厚的Mylar膜可以挡掉所有能量在200keV以下的质子;能量为90keV的质子在Mylar膜中的射程约为1.01 $\mu\text{m}$ ,即1 $\mu\text{m}$ 厚的Mylar膜可以挡掉所有能量在90keV以下的质子;而5 $\mu\text{m}$ 厚的Mylar膜可以挡掉所有能量在440keV以下的质子.而1 $\mu\text{m}$ 厚的Mylar膜可以挡掉所有能量在440keV以下的碳离子.

每个偏压法拉第筒的结构如图4所示.为了尽可能一次测量得到较多点的数据,单个法拉第筒的尺寸设计得很小;为了约束和收集二次电子,将收集体设计成杯状;由于离子束在传输过程中伴随的中和电子会导致测量结果出现较大偏差,在收集体上加-800V的偏置电压<sup>[14]</sup>;为了确保在一个脉冲时间内偏置电压不变,偏压法拉第筒的时间常数RC远大于离子束脉冲宽度(约50ns);信号采集电阻采用大阻值无感电阻,可以相应减小回路电感对测量结

果的影响.

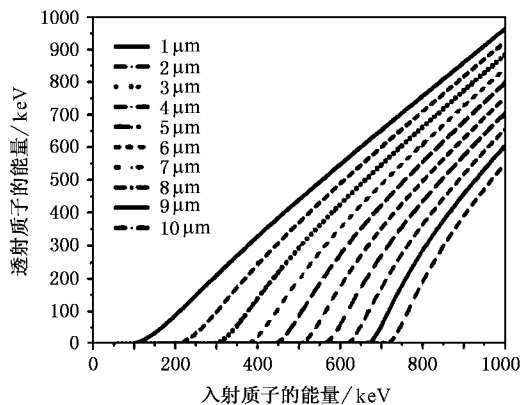


图2 不同能量的质子穿透不同厚度的Mylar膜后的能量损失情况

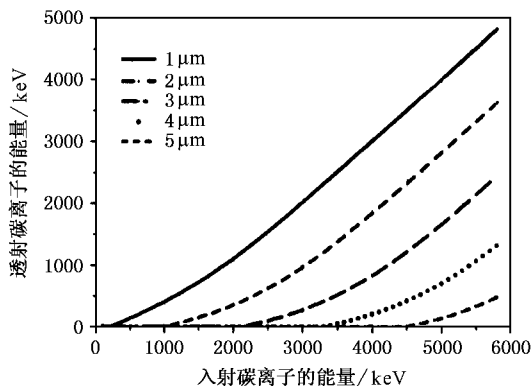


图3 不同能量的碳离子穿透不同厚度的Mylar膜后的能量损失情况

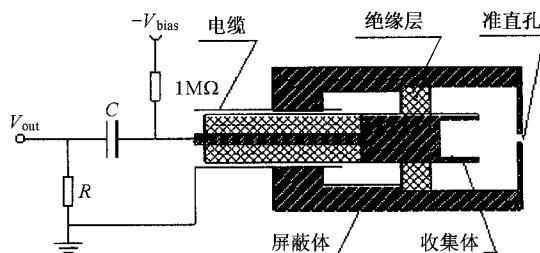


图4 偏压法拉第筒及偏压电路

### 3. 实验结果

8路法拉第筒阵列均匀布放在束流中心位置,图5是偏压法拉第筒阵列在束流中的位置示意图,图中也示出了二极管的阴阳极和离子束的传输情形.首先测量了准直孔前未覆盖Mylar膜时法拉第

筒所测束流强度分布情况(参见图6),由图可见离子束的束流强度分布是比较均匀的.

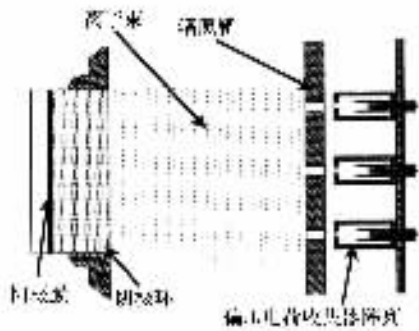


图5 偏压法拉第筒阵列在束流中的位置示意图

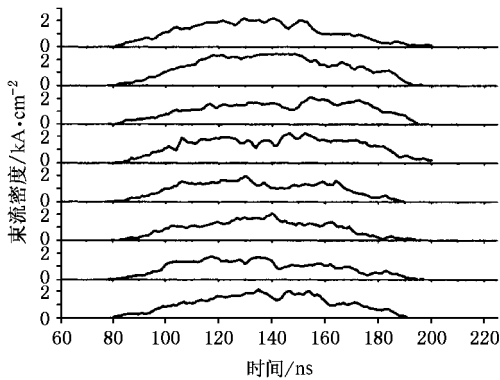


图6 “闪光二号”加速器高功率离子束流强度分布

图7是法拉第筒准直孔前覆盖不同厚度的Mylar膜时所测束流密度分布情况,可见束流密度分布随着Mylar膜厚度的变化是很显著的.孔前覆盖的Mylar膜厚度越大,所测信号的衰减也越明显.并且离子束流密度分布的脉冲时间宽度也是不一样的.孔前覆盖的Mylar膜越厚,得到的脉宽越窄.由于大于440keV的离子很少,加膜厚度为5 $\mu\text{m}$ 和6 $\mu\text{m}$ 时,用法拉第筒测不到信号.

图8是利用图7的实验数据,根据图2的计算结果处理得到的离子束能谱直方图,由图可见能量为200—300keV之间的离子数目最多.另外,根据图3的计算结果,能量小于440keV的碳离子不可能穿透1 $\mu\text{m}$ 厚的Mylar膜.结合图8的实验数据,可知碳离子数和90keV以下的质子数所占总离子数的份额不大于32%.由图8还可计算得出离子平均能量为270keV,而根据二极管的电压和电流计算得到的粒子平均能量为330keV,二者的相对偏差为19%,这是由于二极管中除了离子流,还有电子流,因而二极

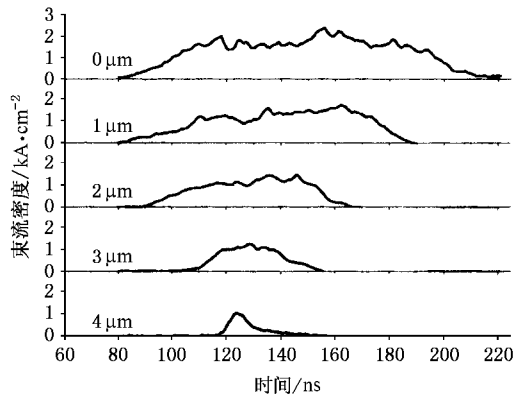


图7 法拉第筒准直孔前覆盖不同厚度的Mylar膜时所测束流强度

管的粒子(包括离子和电子)平均能量与用叠片法测量的离子平均能量并不完全相同.

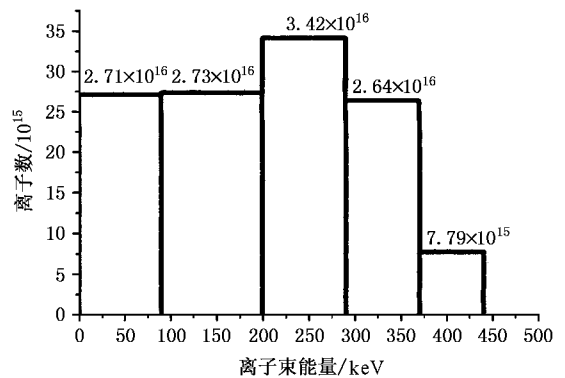


图8 叠片法测量的离子束能谱

从图7还可以看出,随着法拉第筒准直孔前覆盖的Mylar膜的厚度增大,信号的脉冲宽度变窄,由此还可以得到离子束的能量分布随时间的变化规律.在图7中,不加膜时束流从79ns开始,持续到220ns.加1 $\mu\text{m}$ 厚的膜时,束流从81ns开始,持续到189ns,表明79ns—81ns以及189ns—220ns间离子束能量不大于90keV,又由于二极管阴极(离子加速到最高能量的位置)到法拉第筒有一定的距离,离子在传输过程中会产生一定的时间延迟,在处理数据时,计算离子能量随时间的分布情况时,必须考虑这一延迟,处理结果见图9,图中还列出了二极管电压随时间的分布情形,图中的折线所示的就是考虑离子的传输所导致的时间延迟后得到的离子能量随时间的变化规律,与二极管电压相比,二者较为相近.从前沿符合情况来看,叠片法测得的离子能量比二极管电压略低,这是因为在二极管间隙电压开始上升时,所形成的阳极等离子体不够充分,而且由于阳极

等离子体的运动,使其加速获得能量的过程没有充分利用二极管的间隙电压.因此,在离子束二极管技术中,要选用好的阳极材料,使其尽可能早地形成比较完善的等离子体,则有利于充分利用二极管的间隙电压.

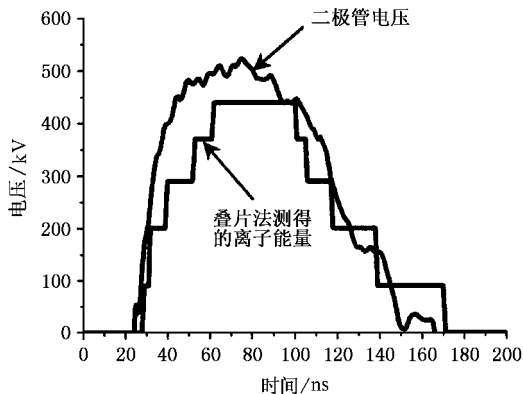


图 9 叠片法测量的离子能量随时间的分布与二极管电压比较

利用图 7 还可以得到各个能量的离子数随时间变化关系,处理结果如图 10 所示,由图 10(a)和(b)可以看出能量为 200keV 的离子除了一小部分分布在 80—110ns 之间外,绝大部分分布在 160ns 以后,而能量为 200—290keV 的离子主要分布在 90—170ns 之间,而 370—440keV 的离子主要出现在 112ns—151ns 之间,可见,在束流峰值处高能离子占大多数.同时也表明二极管电压与所加速的离子能量确实是相对应的,二极管电压高,加速得到的离子主要为高能离子,相反,在二极管电压的上升和下降阶段加速得到的离子能量低.因此,在产生离子束的二极管技术中,要尽量陡化上升沿,使其尽快达到较高电压并达到强箍缩,此时束流也迅速增大,这样,既有利于获得高能离子,也利于增强束流强度.

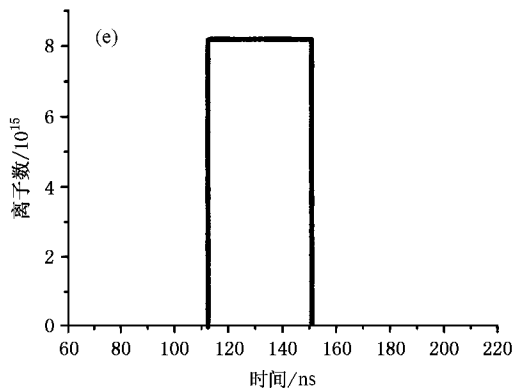
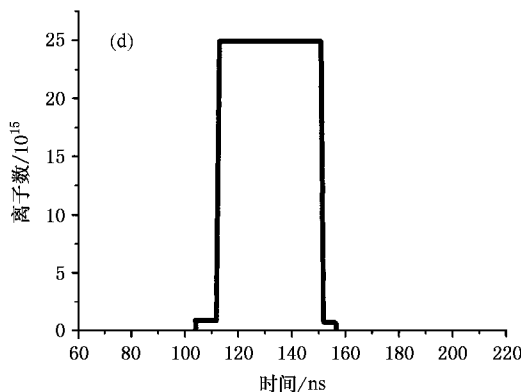
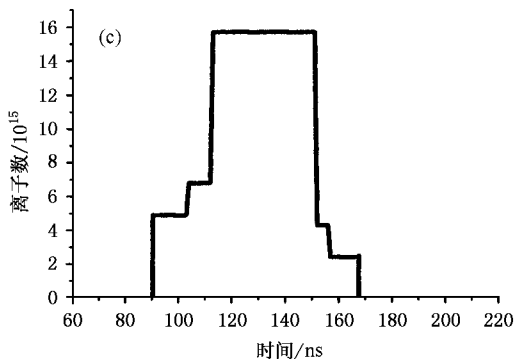
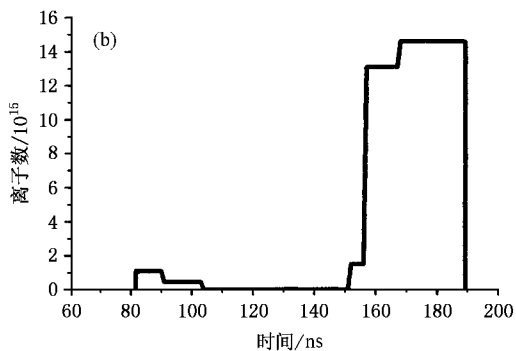
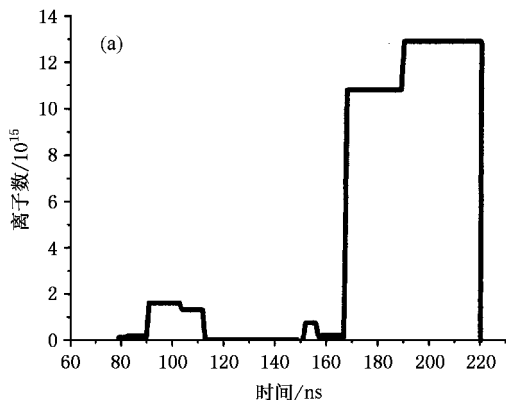


图 10 不同能量段粒子数目随时间的变化 (a) 0—90keV (b) 90—200keV (c) 200—290keV (d) 290—370keV (e) 370—440keV



## 4. 叠片法与其他测量方法的比较

还采用磁谱仪技术和飞行时间法测量了“闪光二号”加速器上产生的高功率离子束能谱,并将这两种方法的测量结果与叠片法的测量结果进行了比较.

图 11 为磁谱仪测量离子束的能谱,用 CR-39 记录的三次测量结果:第一次电磁场共同作用,两极间电压 2.8kV,磁感应强度为 0.8T;第二次仅在强度为 0.8T 的磁场作用下;第三次电场和磁场均为零.图中下部深色区域为碳离子的径迹,上部发亮部分为质子的径迹,其周围为成像针孔散射的质子径迹,发亮的主要原因是因为质子能谱集中在这一区域,将 CR-39 几乎剥落了一层.下部碳离子的径迹比较清晰,主要是因为它的数量少,通过成像针孔散射的离子少.又由于碳离子数量较少,在电磁场共同作用下偏转后,离子比较分散,很难发现其径迹.根据测量结果计算得到离子峰值能量约为 500keV,并且碳离子的数量比质子的数量小得多.叠片法所测结果基本与此相同.

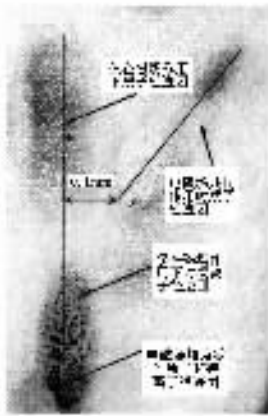


图 11 磁谱仪测量离子束的能谱和种类

还利用飞行时间法测量了离子束流峰值时刻的离子能量.离子束中的质子轰击含 $^{19}\text{F}$ 核素的靶发生核反应 $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$ 产生 6—7MeV 瞬发 $\gamma$ 射线<sup>[15,16]</sup>,离子束二极管中的电子流轰击阳极及其周围材料则产生韧致辐射,韧致辐射峰值时间与二极管的束流峰值时间相对应,也与离子束的峰值时间相对应.当离子束传输不同距离后再轰击靶,则所产生的瞬发 $\gamma$ 射线比韧致辐射的时间延迟也不同,根据时间延迟情况和离子束的飞行距离即可确定离子

束的能量<sup>[17]</sup>.

图 12 是采用 ST401 塑料闪烁体配光电倍增管(PMT)构成的闪烁探测器测得的离子束传输不同距离轰击靶产生的瞬发脉冲 $\gamma$ 射线比韧致辐射的延迟时间,根据图中曲线可以得到,大部分曲线中的瞬发脉冲 $\gamma$ 射线比韧致辐射信号峰值的单位距离时间延迟约为 $1.07\text{ns}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,由此可以认为,离子的飞行速度约为 $9.3\times 10^6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,相应离子能量约为 450keV,表 1 是根据飞行时间确定的束流峰值时刻的离子能量,表中也列出了利用 PIN 半导体探测器<sup>[18]</sup>测量的飞行时间及离子能量,由表中数据可以看出,离子束的峰值能量在 440keV—550keV 之间,而叠片法测量的结果与此基本相符.

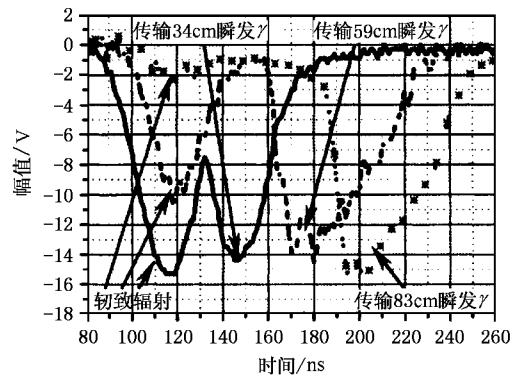


图 12 闪烁探测器测量质子传输不同距离轰击靶产生的瞬发脉冲 $\gamma$ 射线比二极管韧致辐射的延迟

表 1 根据飞行时间确定的束流峰值时刻的质子能量

探测器类型	Shot	传输距离/cm	飞行时间/ns	飞行速度/ $10^6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	束流峰值时刻质子能量/keV
PIN 探测器	02115	88.0	92	9.57	480
	02111	83.0	90	9.22	440
	01190	63.0	68	9.27	450
闪烁探测器	02111	83.0	90	9.22	440
	02091	59.0	65	9.08	430
	02110	34.0	33	10.3	550

## 5. 结 论

利用叠片法可以测量离子能谱及平均能量,这种方法可以给出直方图形式的离子能谱,还可以用于研究离子能量与二极管电压的对应关系以及离子能量和数目随时间的分布关系.

利用叠片法测量了“闪光二号”加速器上所产生

的高功率离子束的能谱,离子的最高能量  $> 440\text{keV}$ ,平均能量约为  $270\text{keV}$ ,能量为  $200\text{—}300\text{keV}$  之间的离子数目最多,碳离子数和  $90\text{keV}$  以下的质子所占总离子数的份额不大于  $32\%$ 。所测量的离子能量与二极管电压符合较好,而且离子能量和数目随时间的分布关系与二极管的电压和电流符合也较好。

根据叠片法的测量结果,在离子束二极管技术中,要选用好的阳极材料,使其尽可能早地形成比较完善的等离子体,则有利于充分利用二极管的间隙

电压,要尽量陡化上升沿,使其尽快达到较高电压并达到强箍缩,此时束流也迅速增大,这样,既有利于获得高能离子,也利于增强束流强度。

还将叠片法的测量结果与利用磁谱仪和采用飞行时间法等的测量结果进行了比较,三种方法所得的测量结果基本一致。

总之,叠片法测量离子的能谱及平均能量,方法简单方便,测量结果可靠,所得有用信息多,是一种有效的测量方法。

- [ 1 ] Yang H L , Qiu A C , Sun J F *et al* 2004 *Nuclear Techniques* **27** 188 ( in Chinese ) [ 杨海亮、邱爱慈、孙剑锋等 2004 核技术 **27** 188 ]
- [ 2 ] Qiu A C , Zhang J S , Peng J C *et al* 2002 *Nuclear Techniques* **25** 714 ( in Chinese ) [ 邱爱慈、张嘉生、彭建昌等 2002 核技术 **25** 714 ]
- [ 3 ] Zhou N , Niu S L , Ding S *et al* 2000 *High Power Laser and Particle Beams* **12** 249 ( in Chinese ) [ 周南、牛胜利、丁升等 2000 强激光与粒子束 **12** 249 ]
- [ 4 ] Zhao W J , Remnev G E , Yan S *et al* 2000 *Rev. Sci. Instrum.* **71** 1045
- [ 5 ] Zhu X P , Lei M K , Ma T C *et al* 2002 *Rev. Sci. Instrum.* **73** 1728
- [ 6 ] Baumung K , Bluhm H J , Goel B *et al* 1996 *Laser and Particle Beams* **14** 181
- [ 7 ] Wang G C 1989 *High Power Laser and Particle Beams* **1** 1 ( in Chinese ) [ 王淦昌 1989 强激光与粒子束 **1** 1 ]
- [ 8 ] Maksimchuk A , Gu S , Flippo K *et al* 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4108
- [ 9 ] Clark E L , Krushelnick K , Davies J R *et al* 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 670
- [ 10 ] Qiu A C , Li Y H , Wang Z G *et al* 1991 *High Power Laser and Particle Beams* **3** 340 ( in Chinese ) [ 邱爱慈、李玉虎、王知广等 1991 强激光与粒子束 **3** 340 ]
- [ 11 ] Yang H L , Qiu A C , Zhang J S *et al* 2004 *Acta. Phys. Sin.* **53** 406 ( in Chinese ) [ 杨海亮、邱爱慈、张嘉生等 2004 物理学报 **53** 406 ]
- [ 12 ] Yang H L , Qiu A C , Zhang J S *et al* 2002 *Proceedings of the Third International Symposium on Pulsed Power and Plasma Applications* , Mianyang China 180
- [ 13 ] He X P , Li H Y , Wang H Y *et al* 2004 *Nuclear Techniques* **27** 43 ( in Chinese ) [ 何小平、李洪玉、王海洋等 2004 核技术 **27** 43 ]
- [ 14 ] Li H Y , He X P , Sun J F *et al* 2004 *High Power Laser and Particle Beams* **16** 535 ( in Chinese ) [ 李洪玉、何小平、孙剑锋等 2004 强激光与粒子束 **16** 535 ]
- [ 15 ] Young F C , Goldon J , Kapetanacos C A *et al* 1977 *Rev. Sci. Instrum.* **148** 432
- [ 16 ] Young F C , Oliphant W F , Stephanakis S J *et al* 1981 *IEEE Trans Nucl. Sci.* **PS-9** 24
- [ 17 ] Yang H L , Qiu A C , Sun J F *et al* 2003 *Proceedings of the 4th National Conference on Nuclear Instrument & Its Applications* , Jiangyou China 241 ( in Chinese ) [ 杨海亮、邱爱慈、孙剑锋等 2003 全国第四届核仪器及其应用学术会议论文集 江油 241 ]
- [ 18 ] Ouyang X P , Li Z F , Zhang G G *et al* 2002 *Xcta Phys. Sin.* **51** 1502 ( in Chinese ) [ 欧阳晓平、李真富、张国光等 2002 物理学报 **51** 1502 ]

# Energy spectra of high-power ion beams measured with a pile of thin films on FLASH II \*

Yang Hai-Liang Qiu Ai-Ci Li Jing-Ya Sun Jian-Feng He Xiao-Ping Tang Jun-Ping Wang Hai-Yang Huang Jian-Jun  
Ren Shu-Qing Zou Li-Li Yang Li

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

( Received 21 June 2004 )

## Abstract

The preliminary experimental results obtained for the energy spectra of high-power ion beam (HPIB) with a pile of thin films on FLASH II accelerator are reported. Code was developed to calculate the theoretical energy-loss of proton and C ion beams transmitted through the Mylar films with different thickness. The apertures of Faraday Cups are covered with Mylar films of different thickness, and then the signal attenuations can be recorded with oscilloscope. The energy spectra of HPIB and the diode voltage are obtained according to the signal attenuations. The diode voltage measured with a pile of thin films agrees with the voltage measured with a differential ring. And the ion number versus time curve was given. In addition, the ion energy of HPIB is also measured with Thomson spectrometer and time of flight method and the results agree with those measured with a pile of thin films.

**Keywords** : high-power ion beam, energy spectrum, Faraday Cup, a pile of thin films, energy-loss

**PACC** : 0777, 0781, 4180G, 9440L

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 10375048, 19975037 ), and by the National Defense Foundation.