

高能质子束流强度绝对测量的 二次电子补偿原理研究

张忠兵^{1)†} 欧阳晓平¹⁾ 夏海鸿²⁾ 陈亮¹⁾ 王群书¹⁾ 王兰¹⁾
马彦良¹⁾ 潘洪波¹⁾ 刘林月¹⁾

1) (西北核技术研究所, 西安 710024)

2) (中国原子能科学研究院, 北京 102413)

(2009 年 8 月 24 日收到; 2009 年 11 月 23 日收到修改稿)

高能质子入射到金属接收体表面诱发的二次电子直接影响束流强度的测量精度, 如何消除二次电子影响是实现束流高精度测量的关键. 根据高能带电粒子在金属表面诱发二次电子发射理论, 对高能质子束流强度测量的二次电子补偿原理进行了研究, 设计了二次电子补偿结构. 采用三块金属极板构成的实验装置在质子源上开展实验研究, 实验测得在中间极板上输出的电流与入射质子束流强度的比值小于 0.7%, 中间极板上二次电子得到补偿, 验证了二次电子补偿原理的正确性. 研究表明, 采用设计的二次电子补偿结构对高能质子束流强度进行测量时二次电子贡献小于 1%.

关键词: 二次电子发射, 二次电子产额, 辐射探测

PACC: 2940, 7900, 7920H

1. 引言

高能质子等重带电粒子轰击金属表面时产生二次电子发射, 二次电子的发射机理、能量分布、发射角分布以及实验测量二次电子产额等已有广泛的研究^[1-8]. 一方面, 二次电子发射在多方面得到应用, 例如利用材料的二次电子发射特性制作电子倍增器和强脉冲电子束产生装置的电子发射阴极^[9-11], 通过测量二次电子的产额推算出重带电粒子在金属中的阻止本领或测量二次电子的角分布进行重带电粒子分辨等^[12,13], 测量金属薄膜发射的二次电子来确定和分辨入射粒子的位置^[14,15]. 另一方面, 二次电子发射对带电粒子测量也有不利的影响. 例如在利用金属收集极进行高能质子束流强度的精确测量时, 二次电子发射形成的电流使得测量结果增大约 10%^[16]. 研究者采取许多措施提高质子束流测量精度, 研究新型探测器^[17]、减小二次电子从金属收集极逸出等. 减小二次电子逃逸的主要方法有: 在法拉第杯收集极上加正高压抑制二次电

子的逃逸^[16], 在收集极前面外加电场使二次电子在电场作用下返回到收集极^[18], 在偏压法拉第筒装置的收集极加负高压抑制二次电子进入收集极^[19]. 虽然这些措施可在一定程度抑制二次电子发射, 但实验上很难确定其测量精度. 同时, 在束流接收方向增加二次电子抑制栅, 或在接收体上加正高压, 都会带来其它问题, 例如, 抑制栅受质子轰击将产生次级电子, 并有部分质子受到阻止.

因此, 研究高速带电粒子束流测量的二次电子补偿测量方法, 在加速器束流监测、脉冲中子束流探测中具有重要意义.

2. 二次电子补偿结构和原理

根据高速带电粒子轰击金属的二次电子发射理论可知, 收集极接收高能质子时, 高能质子在金属体中沉积能量产生激发电子, 这些被激发的电子向收集极表面运动, 部分逃逸出表面, 形成二次电子发射, 发射的二次电子主要源于金属表面下 0.5—2 nm 厚的表层. 每个能量为 E_i 的质子导致二

次电子逃逸收集极表面的数目 Y 为^[1]

$$Y = A \left\langle \frac{dE_i}{dx} \right\rangle_{av}, \quad (1)$$

式中 $\langle dE_i/dx \rangle_{av}$ 是能量为 E_i 的质子在金属体中平均阻止本领, A 是与金属材料及其表面状态密切相关的常数.

根据这一理论,设计了一种基于二次电子补偿的高能质子测量装置,如图 1 所示. 该装置由金属箔补偿片和收集极组成. 金属箔采用与收集极相同的材料,且与收集极的距离小于 1 mm,金属箔的厚度很薄,确保高能质子可以穿过;收集极厚度较厚,能使质子沉积其中;收集极和金属箔均置于真空中.

能量为 E_1 的高能质子入射到图 1 所示的探测结构时,质子穿过金属箔损失能量 ΔE ,穿出金属箔时的能量为

$$E_2 = E_1 - \Delta E. \quad (2)$$

由于收集极和金属箔均置于真空中,则质子到达收集极的能量也为 E_2 .

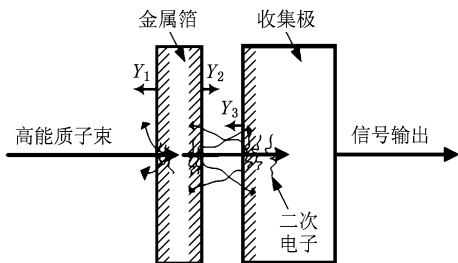


图 1 二次电子补偿方法测量高能质子探测结构示意图

图 1 所示结构的补偿过程如下:高能质子穿过金属箔到达收集极时,在金属箔的两个表面以及收集极表面均有二次电子发射. 前述已知入射到收集极表层的质子能量与从金属箔表层出射时的能量相同,则二次电子发射层(即表面 0.5—2 nm 厚的金属层)对质子的平均阻止本领 $\langle dE_2/dx \rangle_{av}$ 相等;由于这两层金属材料 and 表面状态一致,则二次电子发射比例系数 A 相等. 因此,在收集极表面和沿质子出射方向的金属箔表面产生的二次电子产额及角分布相同. 由于金属箔和收集极距离很近 (< 1 mm),从边缘泄漏出的二次电子比例很小,则收集极表面自身发射的二次电子数与金属箔补偿片发射并到达收集极的二次电子数应相等,即达到出入平衡,以此实现对收集极发射二次电子的补偿. 通过这样的二次电子补偿,可以实现收集极对高能质子数的精确测量.

3. 二次电子补偿实验

3.1. 实验设计

为对二次电子补偿原理进行实验验证,设计了一种装置进行实验研究,实验装置的工作原理如图 2 所示. 三块金属平行放置,高能质子穿过前两片金属箔后完全被阻止在第三块金属中. 当金属箔 1、金属箔 2 和金属片 3 具有相同的材料和表面状态时,则高能质子在这些金属表面产生二次电子时具有相同的常数 A . 设入射质子束流强度为 I_0 ,高能质子在金属箔 1、金属箔 2 的相对面产生的二次电子数相同,二次电子发射形成的电流分别为 I_{12e} 和 I_{21e} ,且 $I_{12e} = I_{21e}$. 在金属箔 2、金属片 3 相对面产生的二次电子数也相同,二次电子发射形成的电流分别为 I_{22e} 和 I_{31e} ,且 $I_{22e} = I_{31e}$. 当金属箔 1 沿质子出射方向一侧产生的二次电子全部到达金属箔 2 时,补偿金属箔 2 向质子入射方向一侧产生的二次电子;金属片 3 向质子入射方向一侧产生的二次电子全部到达金属箔 2 时,补偿金属箔 2 沿质子入射方向一侧产生的二次电子;则质子束流在金属箔 2 上诱发二次电子形成的净电流为

$$I_2 = I_{21e} - I_{12e} + I_{22e} - I_{31e} = 0. \quad (3)$$

实验测量金属箔 2 的电流输出 I_2 ,如果 $I_2 \approx 0$,则验证了二次电子补偿方法测量高能质子束流强度的原理. 同理,金属箔 2 沿质子出射方向一侧产生的二次电子全部到达金属片 3,对金属片 3 发射的二次电子进行补偿,金属片 3 输出电流为

$$I_3 = I_{31e} - I_{22e} + I_0 = I_0. \quad (4)$$

此时金属片 3 输出信号即为质子束流强度 I_0 . 金属箔 1 输出电流近似与收集极发射二次电子形成的电

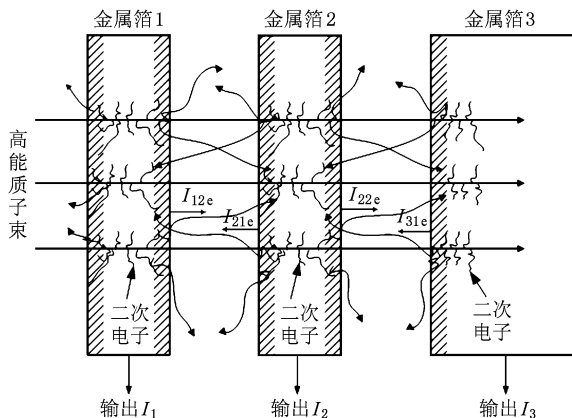


图 2 二次电子补偿实验原理图

流相等.

3.2. 实验装置

根据前述实验设计,制作的二次电子补偿实验测量装置由直径为 50 mm 的两片圆形金属箔与一块金属片组成,垂直于质子束流放置.金属箔厚度为 10 μm ,金属片 3 的厚度为 5 mm.金属箔 1、金属箔 2、金属片 3 之间加聚四氟乙烯绝缘衬环隔开,间距为 1 mm.在相同的金属箔上切下三片 $\phi 50$ 的圆形

箔,两片分别作为金属箔 1 和金属箔 2,第三片与 5 mm 厚的金属片紧密相贴且面向质子束流入射方向作为金属片 3,采用该方法确保金属表面具有相同的表面状态.

在中国原子能研究院 HI-13 串列加速器上进行实验,实验布局如图 3 所示,测量装置固定在与加速器管道连通的圆形实验腔体内.三个输出信号分别经过屏蔽同轴电缆连接到 Keithley 6517A 小电流计,计算机控制三台小电流计同时测量并获取数据.

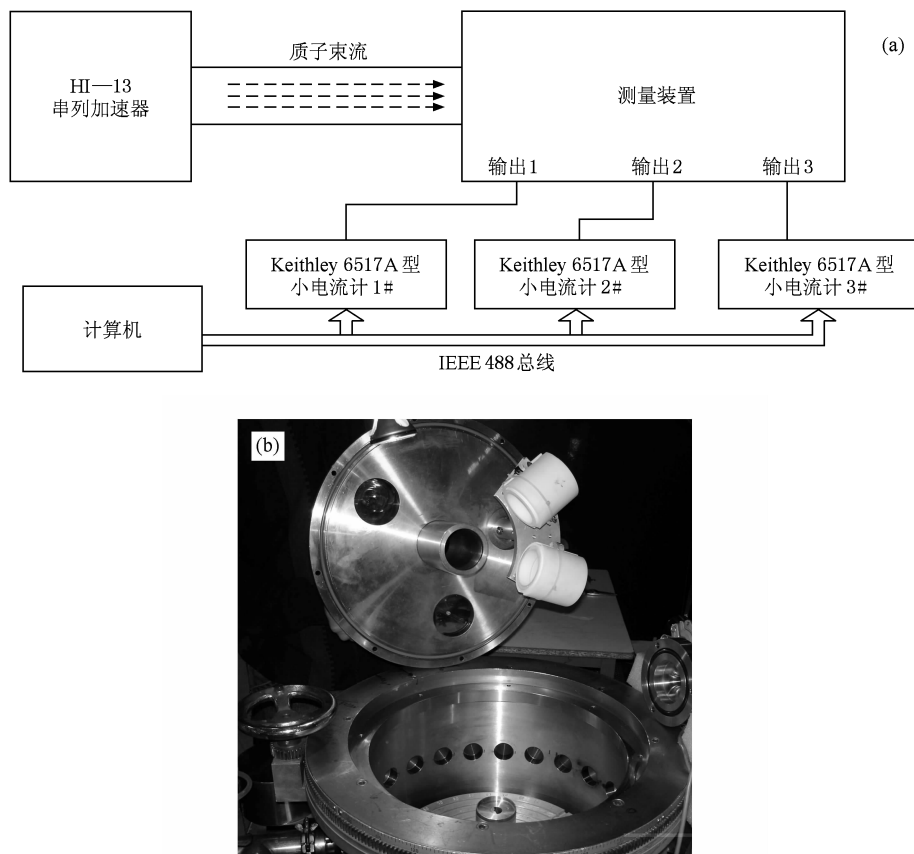


图3 HI-13 串列加速器上二次电子补偿实验 (a) 布局示意图; (b) 测量装置安装照片

3.3. 测量结果

金属箔为铜箔时,实验测得质子能量在 9—24 MeV 范围内变化时金属箔和金属片输出信号电流,如表 1 所示.可以看出,金属箔 2(中间金属箔)输出电流小于 1 nA,与金属片 3 输出电流的比值小于 0.7%,则可将金属箔 2 输出电流近似看作 $I_2 \approx 0$,即金属箔 2 沿质子入射方向和出射方向发射的二次电子得到了补偿.因此,金属片 3 输出电流 I_3 也就是入射的质子束流强度,二次电子贡献小于 0.7%.此

外还可以看到,如果无补偿片,用收集极直接测量能量为 9—24 MeV 范围的质子束流,二次电子发射产生的信号(约等于金属片 1 输出电流)将使真实质子信号偏大 4.8%—9.2%.

分别采用铝、钛和镍金属箔进行实验时,金属箔 2 输出电流与金属片 3 输出电流的比值如图 4 所示(在图 4 中也同时给出了对铜箔的实验曲线).从图 4 中可以看出,金属箔为铝时,输出电流 I_2 为负值,绝对值与金属片 3 输出电流的比值小于 1%.金属箔为钛和镍时,输出电流 I_2 有负有正,绝对值与

金属片 3 输出电流的比值小于分别 2% 和 3%。金属箔钛和镍的表面存在小的压痕起伏,三块金属箔之

间的表面一致性下降,从而引起二次电子补偿效果降低。

表 1 金属箔为铜时测量结果

质子能量 /MeV	金属箔 1 输出电流 I_1 /nA	金属箔 2 输出电流 I_2 /nA	金属片 3 输出电流 I_3 /nA	I_1/I_3 /%	I_2/I_3 /%
9.0	13.80	0.342	150.12	9.20	0.23
10.0	11.40	0.396	150.32	7.60	0.26
11.0	16.00	0.796	212.53	7.55	0.38
12.0	10.80	0.470	176.67	6.14	0.27
13.0	10.30	0.318	158.13	6.52	0.20
14.0	11.20	0.667	158.34	7.09	0.42
15.0	10.80	0.565	173.87	6.24	0.33
16.0	10.70	0.687	180.01	5.94	0.38
17.0	7.97	0.351	132.60	6.04	0.27
18.0	9.65	0.605	181.49	5.33	0.33
19.0	7.09	0.860	132.25	5.37	0.65
20.0	8.07	0.595	152.64	5.31	0.39
21.0	9.10	0.691	173.81	5.26	0.40
22.0	6.10	0.265	114.51	5.35	0.23
23.0	7.06	0.102	127.69	5.56	0.08
24.0	10.2	0.586	212.91	4.81	0.28

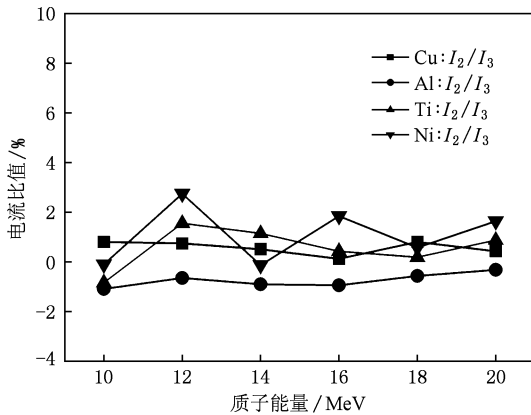


图 4 铜、铝、钛、镍薄膜对二次电子补偿结果

4. 结 论

本文对高能质子束流强度测量的二次电子补偿原理进行了研究.设计三片金属箔结构实验装置,利

用能量在 9—24 MeV 范围内变化的单能直流质子束流进行实验研究,实验结果验证了二次电子补偿原理,高能质子在测量二次电子补偿效果的金箔上(中间金属箔)形成的输出电流小于入射质子束流强度的 0.7%。采用铜、铝、钛、镍等金属作为二次电子补偿结构的材料,均得到了良好的二次电子补偿效果.研究表明,金属表面状态的一致性越好,对二次电子的补偿效果越佳,即使采用一般机械加工的铜、铝金属箔作为二次电子补偿结构的材料,对二次电子补偿也具有良好的效果.实验研究还表明,采用补偿后的测量装置对高能质子束流强度进行测量时二次电子贡献小于 1%。

感谢中国原子能科学研究院 HI-13 串列加速器实验室运行组全体工作人员、中国原子能科学研究院物理所中子组工作人员在实验中给予的大力支持和帮助.衷心感谢夏良斌博士在本文写作过程中进行的有益讨论。

- [1] Sternglass E J 1957 *Phys. Rev.* **108** 1
- [2] Schou J 1980 *Phys. Rev. B* **22** 2141
- [3] Clerc H G, Gehrhardt H J, Richter L, Schmidt K H 1973 *Nucl. Instr. And Meth.* **113** 325
- [4] Alonso E V, Baragiola R A, Ferrótn J, Jakas M M, Oliva-Florio A 1980 *Phys. Rev. B* **22** 80
- [5] Holmén G, Svensson B, Burén 1981 *Nucl. Instr. And Meth.* **185** 523
- [6] Lu Q L, Zhao G Q, Zhou Z Y 2003 *Acta. Phys. Sin.* **52** 1278 (in Chinese) [卢其亮、赵国庆、周筑颖 2003 物理学报 **52** 1278]
- [7] Thieberger P, Fischer W, Hseuh H, Pütsyn V, Snyderstrup L P, Trbojevic, Trbojevic D, Zhang S Y 2004 *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams* **7** 093201
- [8] Iton A, Majima T, Obata F, Hamamoto Y, Yogo A 2002 *Nucl. Instr. and Meth. B* **193** 626
- [9] Knoll G F 2000 *Radiation Detection and Measurement* 3rd ed. (New York: John Wiley and Sons, Inc) p276
- [10] Zhang L L, Xu Z, Feng Y J, Sheng Z X 2009 *Acta. Phys. Sin.* **58** 4249 (in Chinese) [张琳丽、徐卓、冯玉军、盛兆玄 2009 物理学报 **58** 4249]
- [11] Sheng Z X, Feng Y J, Huang X, Xu Z, Sun X L 2008 *Acta. Phys. Sin.* **57** 4590 (in Chinese) [盛兆玄、冯玉军、黄璇、徐卓、孙新利 2008 物理学报 **57** 4590]
- [12] Rothard H, Kroneberger K, Clouvas A, Veje E, Lorenzen P, Keller N, Kemmler J, Meckbach W, Groeneveld K O 1990 *Phys. Rev. A* **41** 2521
- [13] Zebelman A M, Melyer W G, Halbach K, Poskanzer A M 1977 *Nucl. Instr. and Meth.* **141** 439
- [14] Shapira D, Lewis T A, Hulett L D, Cio Z 2000 *Nucl. Instr. and Meth. A* **499** 396
- [15] Shapira D, Lewis T A, Hulett L D 2000 *Nucl. Instr. and Meth. A* **454** 409
- [16] Matteson S, Nicolet M A 1979 *Nucl. Instr. and Meth.* **160** 301
- [17] Wang L, Ouyang X P, Fan R Y, Jin Y J, Zhang Z B, Pan H B, Liu L Y, Lü F X, Bu R A 2008 *Chin. Phys. B* **17** 3644
- [18] Huizenga W 1968 *Nucl. Instr. and Meth.* **63** 109
- [19] He X P, Shi L, Zhang J S, Qiu A C 2000 *High Power Laser and Particle Beams* **12** 753 (in Chinese) [何小平、石磊、张嘉生、邱爱慈 2000 强激光与粒子束 **12** 753]

Accurate measurements of high energy proton beam by secondary electron compensation

Zhang Zhong-Bing^{1)†} Ouyang Xiao-Ping¹⁾ Xia Hai-Hong²⁾ Chen Liang¹⁾ Wang Qun-Shu¹⁾
Wang Lan¹⁾ Ma Yan-Liang¹⁾ Pan Hong-Bo¹⁾ Liu Lin-Yue¹⁾

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

2) (China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

(Received 24 August 2009; revised manuscript received 23 November 2009)

Abstract

Accuracy in the measurement of an intense high-energy proton beam is generally disturbed by high energy proton induced secondary electron emission. In the present work, the compensation mechanism for secondary electron emission is investigated for the accurate measurement of high-energy proton beam. An experimental approach with using three metal foils to compensate for secondary electron emission is implemented and described. The experiment is carried out on the HI-13 tandem accelerator. The current detected from the middle metal foil is 0.7% of the proton beam. The experimental results show that the measured current of the high-energy proton beam is reliable within 1%.

Keywords: secondary emission, secondary electron yield, radiation detection

PACC: 2940, 7900, 7920H