

中子发生器中二次电子抑制的数值模拟

金大志^{1,2}, 杨中海¹, 戴晶怡²

(1. 电子科技大学物理电子学院 成都 610054; 2. 中国工程物理研究院电子工程研究所 四川 绵阳 621900)

【摘要】讨论了密封中子发生器中二次电子流的产生机制,介绍了几种不同的二次电子流的抑制方法。针对不同的抑制方法进行了粒子模拟实验,结果表明,在直接利用法拉第圆筒形状的加速电极抑制的情况下,只能抑制住部分二次电子,一部分电子还可以通过加速孔进入加速空间形成二次电子流,二次电子流约占靶面二次电子发射电流的1/5。在法拉第圆筒状加速电极的基础上加上电场抑制,能很好地抑制二次电子流的产生,当偏压为300 V时,二次电子电流近似为零。

关键词 中子发生器; 数值模拟; 二次电子; 抑制
中图分类号 TL501^{+.7} **文献标识码** A

Simulation for Suppressing of Secondary Electrons in Neutron Generator

JIN Da-zhi^{1,2}, YANG Zhong-hai¹, and DAI Jing-yi²

(1. School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;
2. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics Mianyang Sichuan 621900)

Abstract The producing mechanism of secondary electrons in sealed neutron generator is discussed and several methods to suppress secondary electrons are introduced. The PIC simulation is carried out for the different methods. The result indicates that only a part of secondary electrons can be suppressed by Faraday cylinder and a part of them can enter into the accelerating gap to form electron current. The secondary electron current is about 1/5 of emitting current of secondary electrons on target. But almost all secondary electrons can be suppressed by electrostatic field combined with Faraday cylinder and the secondary electron current is about zero when the deflection voltage is 300 V.

Key words neutron generator; PIC simulation; secondary electrons; suppressing

密封中子发生器主要由离子源、加速系统和靶等组成,主要利用 $T(d,n)^4He$ 反应来产生14 MeV中子。其主要优点:(1) 轻便、体积小、重量轻;(2) 与普通的放射源同位素中子源相比,其中子产额较高,中子能量的单色性好;(3) 储存管理方便、不使用时无中子产生;(4) 结构简单、紧凑,广泛应用于核物理实验、中子照相、中子活化分析、中子石油测井、中子检测等工农业生产和国防科研领域中^[1-3]。

密封式中子发生器在工作时,具有一定能量的氦离子束轰击氘靶,在发生氘核反应产生中子的同时,在靶表面产生二次电子发射,这些二次电子及它们在加速电极上打出的新的二次电子中的一部分进入中子发生器的加速空间会形成电子电流,电子电流叠加在离子束流上形成总的靶流,电子电流不产生中子,但消耗功率,增加电源负载。因此,

在中子发生器中,通常采用各种方法抑制二次电子以减少功耗,这不仅能减少中子发生器的总功率,还可以适当提高束流、增加工作寿命、减少发生器的体积。

目前,密封中子发生器主要采用法拉第圆筒状加速电极、在靶端加磁场、在靶与加速筒之间加电场等方法来抑制二次电子流。其中,加磁场的方法受到结构的限制而效果较差。法拉第圆筒状加速电极不能有效抑制二次电子,因此采用最多的方法是在法拉第圆筒加速电极的基础上加上电场抑制^[4-7]。

1 二次电子的产生机制

二次电子发射机制可以分为势能电子发射和动能电子发射。动能电子发射是由入射离子动能引起的电子发射,在入射离子和靶的系统中,入射离子

的动能转化为电子的动能, 能量大的电子脱离靶表面形成二次电子。当离子速度大于 10^5 m/s时, 动能电子发射比势能电子发射大得多。在密封中子发生器中, 离子能量一般加速到100 keV, 离子速度达到 10^6 m/s以上, 因此, 中子发生器中二次电子的产生主要是离子的动能电子发射^[8]。

二次电子的发射系数是指单个入射离子产生的平均二次电子数, 随入射离子的种类、能量及靶材料的不同变化很大。根据中子发生器的氘离子的能量约为100 keV, 并结合氘靶的材料特点及制备工艺, 将中子发生器中氘靶的二次电子发射系数估计为3~5是合理的^[8]。二次电子发射的角分布服从余弦定理, 对于不同离子种类、能量及靶材料, 多数二次电子的能量很低, 一般在几电子伏左右^[8]。

2 二次电子的抑制方法

2.1 法拉第圆筒抑制

将加速电极设计成法拉第圆筒, 把靶子放置在离加速孔尽可能远的底部, 以减少靶对加速孔所张立体角, 但这种方法只能抑制住部分二次电子, 部分电子还可以通过加速孔进入加速区间形成二次电子流, 同时增加中子发生器的长度^[4]。

2.2 磁场抑制

在中子发生器靶端外加轴向磁场, 在强磁场的作用下, 电子改变原有路径, 打回到靶上和加速电极内壁的几率增加。加磁场的方法有: 中子发生器靶端外加电流线圈, 通电流形成磁场; 外套环状磁体; 在靶端安装磁柱等^[5]。

2.3 电场抑制

把加速电极圆筒作为抑制极, 将靶与加速筒绝缘, 在靶上产生一个相对于加速筒为正的偏压, 即在靶上加一定的正偏压来抑制二次电子, 偏压一般在300~1 000 V。具体的电压选取取决于靶子与加速筒电极的具体结构, 不同的结构所需要的偏压是不同的, 过小与过大都不利, 过小可能抑制不住二次电子, 过大尽管能抑制住二次电子, 但损失加速电压, 离子能量会降低。具体的实现方法可以在靶和抑制电极之间加上电阻, 利用束流通过时自动在靶上形成正偏压, 电阻阻值的选取取决于束流的大小。但电阻的耐压也是有限的, 太高的抑制电压有可能造成电阻被击穿^[6-7]。

3 二次电子抑制的数值模拟

本文使用PIC粒子模拟程序MAGIC软件对密封

中子发生器二次电子的抑制问题进行数值模拟。MAGIC软件是美国MISSION RESEARCH公司不断开发完善的一个电磁粒子模拟软件, 其求解过程是采用有限差分法求解离散化的Maxwell方程和粒子运动方程^[9]。分别计算了法拉第圆筒和在法拉第圆筒基础上加电场的二次电子的抑制情况。计算中假定, 靶的二次电子发射系数为3.0, 离子发射面密度为 1 A/m^2 , 离子加速电压为-100 kV, 不考虑加速电极在二次电子流作用下产生新的二次电子发射和离子与中性残余气体分子碰撞电离产生的次级电子。

3.1 法拉第圆筒抑制

在单独采用法拉第圆筒抑制的情况下, 图1给出了不同时刻离子及二次电子的空间分布, 可见大量的二次电子进入了加速空间并打到了离子束发射面, 形成了二次电子流, 增大了靶流。

图2分别给出了靶面的二次电子发射电流和离子束发射面接收到的二次电子流。稳定后, 离子束发射面接收到的二次电子流与靶发射的二次电子流之比约为20%, 这是由于加速电极类似于法拉第圆筒, 靶在筒的底端, 减少了靶对加速孔所张的立体角, 只有部分二次电子通过加速孔进入了加速空间。

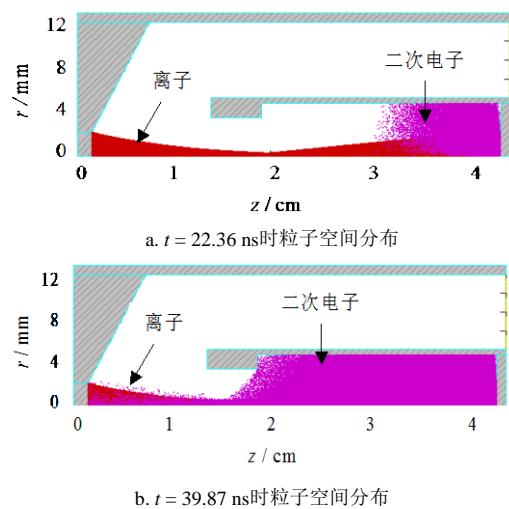
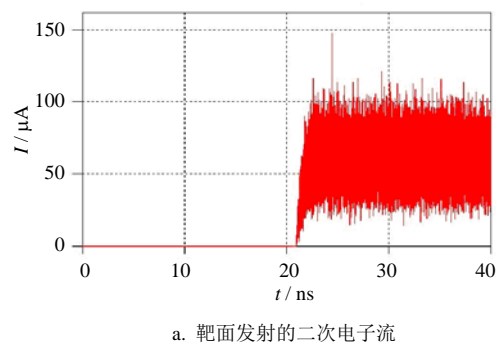
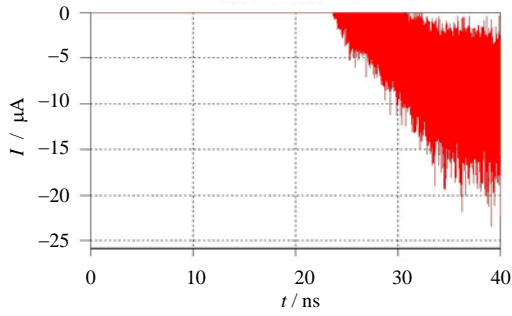


图1 法拉第圆筒抑制时离子及二次电子的分布



a. 靶面发射的二次电子流

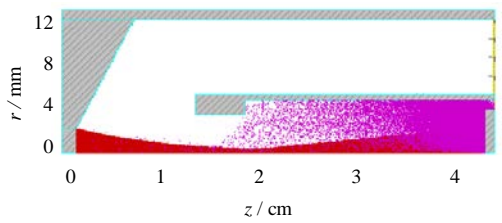


b. 离子发射面接收到的二次电子流

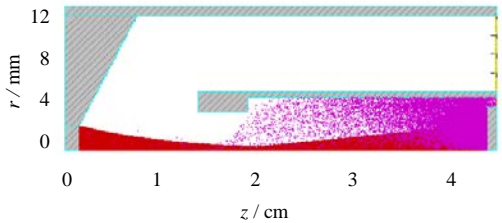
图2 法拉第圆筒抑制靶发射及离子发射面接收到的二次电子流

3.2 电场抑制

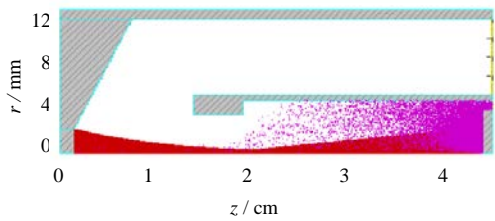
电场抑制的方法是在靶上加正偏压，加速电极电压仍为-100 kV，分别计算了抑制电压为50、100、200、300 V的情况。不同抑制电压情况下稳定后二次电子与离子的空间分布如图3所示，离子束发射面接收到的二次电子流如图4所示。



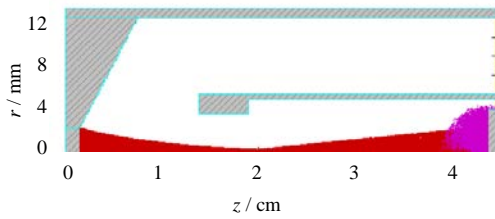
a. 抑制电压50 V



b. 抑制电压100 V



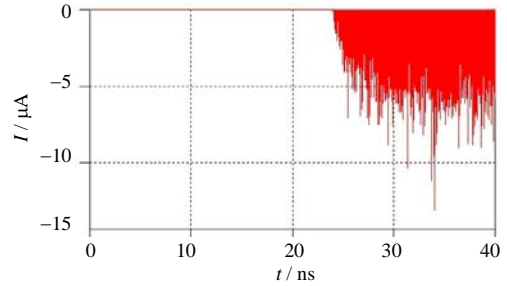
c. 抑制电压200 V



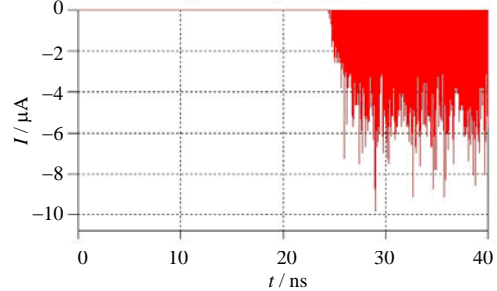
d. 抑制电压300 V

图3 不同抑制电压下粒子的空间分布

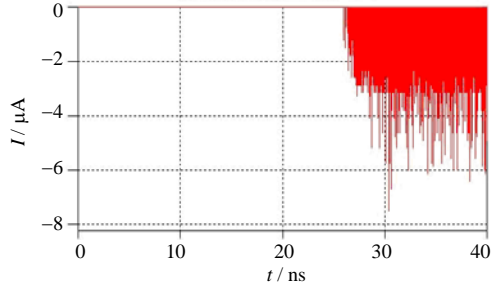
结果表明，在法拉第圆筒抑制的基础上加上电场抑制，当抑制电压大于300 V时就能将二次电子完全抑制在靶的附近，不能进入加速空间，离子束发射面接收不到二次电子流。



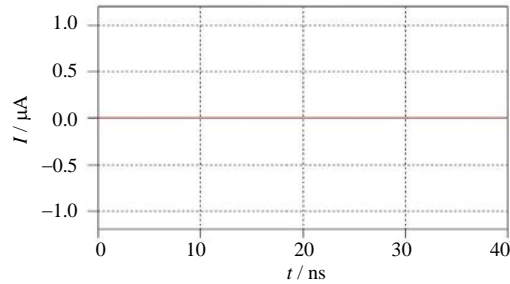
a. 抑制电压50 V



b. 抑制电压100 V



c. 抑制电压200 V



d. 抑制电压300 V

图4 不同抑制电压下离子发射面接收到的二次电子流

3.3 讨论

计算表明，直接将加速电极设计成类似于法拉第圆筒的形状，靶对加速孔所张立体角较小，可以抑制住大部分二次电子，但仍有约1/5的二次电子进入了加速空间而形成了二次电子流，不能有效地抑制二次电子，从而增大了发生器的总束流。在法拉

第圆筒抑制的基础上加上电场抑制,二次电子能被完全抑制住,不能形成二次电子流。这种方式只需要在靶上加上几百伏的正偏压,具体的方式可以在靶与加速电极之间加一电阻,利用束流在靶与加速电极之间形成正的偏压。

在计算中未考虑二次电子轰击加速电极内壁形成新的二次电子,同时也未考虑离子与中性残余气体分子碰撞电离产生的次级电子,由于电离发生在加速空间,电离产生的电子在加速电场的作用下也很容易形成二次电子流。因此,在实际工作时,可能会有少量的电子进入加速空间而形成二次电子流。

4 结 论

模拟计算结果表明,在中子发生器的工作过程中,直接利用法拉第圆筒形状的加速电极,只能抑制住部分二次电子流,部分电子还可以通过加速孔进入加速区间形成二次电子流。采用与法拉第圆筒与电场相结合的方式能很好地抑制二次电子流的产生,当抑制电压大于 300 V 时就能将二次电子完全抑制在靶的附近,使其不能进入加速空间而形成二次电子流。

参 考 文 献

- [1] CHICHESTER D L, SIMPSON J D. Compact accelerator neutron generators[J]. *The Industrial Physicist*, 2004, 9(6): 22-24.
- [2] 丁大钊, 叶春堂, 赵志祥. 中子物理学[M]. 北京: 原子能出版社, 2001: 60-62.
DING Da-zhao, YE Chun-tang, ZHAO Zhi-xiang. *Neutron physics*[M]. Beijing: Atom Energy Publishing Press, 2001: 60-62.
- [3] CHICHESTER D L, SIMPSON J D, LEMCHAK M. Advanced compact accelerator neutron generator technology for active neutron interrogation field work[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2007, 271(3): 629-637.
- [4] 金斗英, 苏荫权, 廖朝阳. 利用永久磁场抑制中子管中的二次电子[J]. 吉林大学自然科学学报, 1998, 36(3): 72-74.
JIN Dou-ying, SU Yin-quan, LIAO Zhao-yang. Suppressing secondary electrons in neutron tubes by means of a permanent magnet[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Jilinensis*, 1998, 36(3): 72-74.
- [5] NISHIMURA K, KATO M, RINTSU Y, et al. Sealed neutron tube[P]. United States Patent, 6141395. 2000.
- [6] REIJONEN J, GICQUEL F, HAHTO S K, et al. D-D neutron generator development at LBNL[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2005, 63: 757-760.
- [7] 王 静, 段 萍. 中子管靶面二次电子抑制[J]. 长安大学学报, 2003, 23(2): 107-110.
WANG Jing, DUAN Ping. Principle and method of controlling second production of electrons from target surface[J]. *Journal of Changan University (Natural Science Edition)*, 2003, 23(2): 107-110.
- [8] 金斗英. 密封式中子管中电子电流形成过程[J]. 吉林大学自然科学学报, 1998, 36(1): 40-44.
JIN Dou-ying. The formation process of the electron current in a sealed neutron tube[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Jilinensis*, 1998, 36(1): 40-44.
- [9] 祝大军, 雷 翔, 严 萍. 紧凑型静电加速管的原理设计[J]. 电子科技大学学报, 2008, 37(3): 414-416.
ZHU Da-jun, LEI Xiang, YAN Ping. Design of a novel compact electrostatic accelerator tube[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2008, 37(3): 414-416.

编辑 漆 蓉