

文章编号: 1007-4627(2015)S1-0043-04

## X射线源的静电自会聚电子枪的计算机模拟

于海波<sup>1</sup>, 林祖伦<sup>2</sup>, 祁康成<sup>2</sup>, 曹贵川<sup>2</sup>, 王小菊<sup>2</sup>

(1. 成都创元电子有限公司, 成都 610000;

2. 电子科技大学光电信息学院, 成都 610054)

**摘要:** 高功率、大电流密度、细聚焦X射线源在工业无损探伤、医学成像、安全技术等领域具有广泛的应用。本文设计了一种用于X射线管的静电自会聚电子枪, 该电子枪包括三部分: LaB<sub>6</sub>热阴极发射体、带有矩形孔和斜槽的聚焦极、阳极。采用EBS粒子束模拟软件对该电子枪的结构进行了模拟仿真。仿真结果表明: 电子枪的聚焦能力主要取决于聚焦极倾角, 当聚焦极倾角为46°时, 达到理想的电子束聚焦效果; 随着阴栅距的增加, 阳极电流以及束斑电流分布均匀性显著降低, 当阴栅距为0.3 mm, 可在工艺条件允许下, 得到具有较大阳极电流以及理想电流分布的电子束。

**关键词:** X射线源; 电子枪; LaB<sub>6</sub>热阴极; 电子束斑; 电流

**中图分类号:** TH703    **文献标志码:** A    **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.32.S1.43

### 1 引言

X射线成像技术在工业无损探伤、生化反应动力学、显微成像、超精细光刻等领域均具有广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。X射线源作为X射线的产生装置, 其性能直接决定X射线的质量。目前, 常用的X射线源是电子束打靶X射线源, 其原理是阴极发射的电子束在电场加速作用下轰击阳极, 与阳极的原子相互作用, 产生X射线波段的电磁辐射<sup>[4-6]</sup>。可以看出, 电子枪对于提高X射线管成像质量、降低功耗等具有非常重要的作用。

目前, 大多数电子束打靶X射线源采用钨阴极作为电子源<sup>[7-8]</sup>。由于钨的逸出功很高, 脉冲发射能力较差, 若实现大的发射电流则需要在直流条件下工作, 却易带来阳极功率密度太大, 将使阳极瞬时熔化的问题。对此, 本文采用具有优异电子发射能力的六硼化镧阴极代替传统钨阴极, 在脉冲工作方式下, 能产生高亮度、大电流密度的电子束。在此基础上, 利用计算机模拟的方法, 设计一种具有大电流密度、理想光斑形貌的静电自会聚电子枪。根据目前医用X光管的使用要求, 本文设计电子枪的目标为: 在120 kV阳极电压下, 产生的投影电子束斑大小约为1 mm×1 mm, 阳极电流为10 mA以上。

本文采用的计算机辅助设计软件名称为 (Electron Beam Simulation, EBS)。该软件通过逐次超松弛迭代法, 求解泊松方程的有限差分形式, 得到空间电场分

布; 并通过4阶龙格-库塔法模拟粒子空间轨迹。模拟计算时, 系统自动考虑空间电荷效应并分配边界条件。

### 2 物理模型

模拟中我们采用图1所示的结构, 以阴极中心作为坐标原点, 沿电子发射方向设为z轴。初步设置的几何参数为: LaB<sub>6</sub>阴极发射面为矩形, 尺寸0.8 mm×4.5 mm; 聚焦极为倾角 $\phi = 46^\circ$ 的斜槽, 斜槽下面为矩形开孔, 矩形孔高度0.2 mm, 开口尺寸1.2 mm×7.0 mm; 聚焦极电压为零; 阴极和聚焦极间距 $d_1 = 0.5$  mm; 阳极倾角 $\theta = 15^\circ$ , 阳极电压120 kV, 阳极距离栅极间距 $d_2 = 15$  mm。

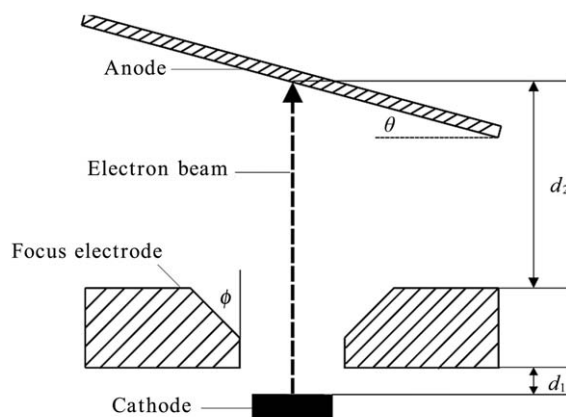


图1 静电自会聚电子枪计算模型

收稿日期: 2014-09-09; 修改日期: 2014-08-24

作者简介: 于海波(1979-), 男, 四川成都人, 从事物理电子技术研究; E-mail: yuhaible@sina.com。

### 3 模拟结果和讨论

#### 3.1 聚焦极倾角变化对发射性能的影响

图2给出了静电自会聚电子枪中聚焦极倾斜角度 $\phi$ 对于阳极电子束斑形貌的影响。从图中可看出,当 $\phi = 30^\circ$ 时,阳极表面的电子束斑有3个焦点;当 $40^\circ \leq \phi \leq 50^\circ$ 之间时,可形成较为规则的矩形电子束斑;当 $\phi = 60^\circ$ 时,电子束斑大致呈不规则的矩形。出

现该现象的可能原因在于以下几全方面:(1)当 $\phi \leq 30^\circ$ 时,聚焦极的聚焦能力太强,注内电子束产生严重的交叉;(2)当 $40^\circ \leq \phi \leq 50^\circ$ 时,虽然 $\phi$ 的增大会导致聚焦能力下降,但注内电子束交叉也相应减弱;(3)当 $\phi = 60^\circ$ 后,聚焦极的聚焦能力进一步下降,边缘电子束发散,束斑随 $\phi$ 的增加逐渐增大。由此可推出:(4)当 $40^\circ < \phi < 50^\circ$ 时,聚焦极对电子束的会聚效果较为理想。

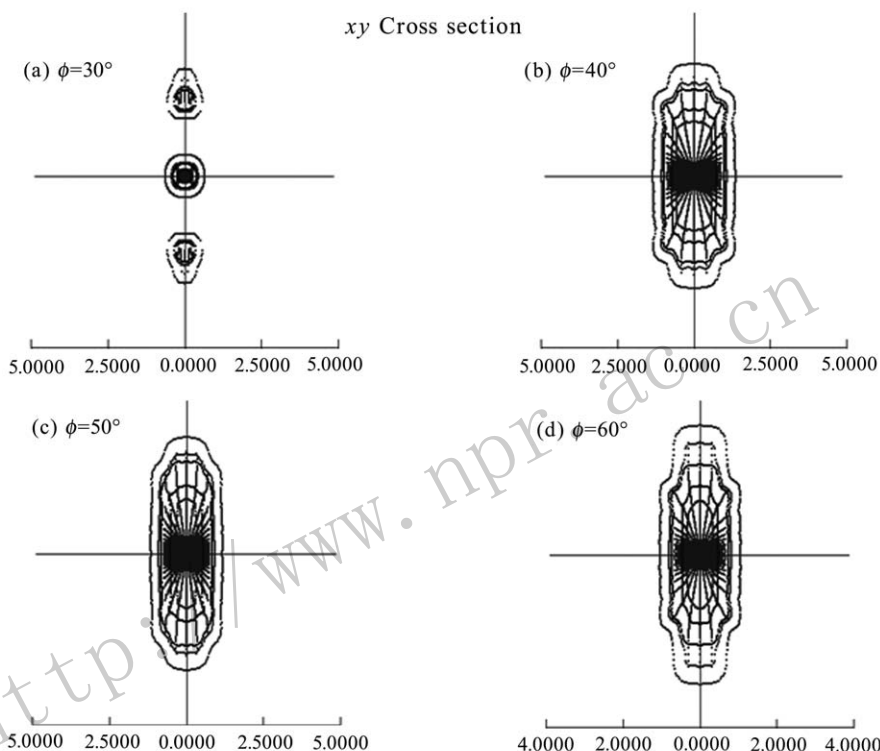


图 2 不同聚焦极倾角下的阳极电子束斑形貌

阳极电流 $I_a$ 随 $\phi$ 的变化曲线如图3所示。可以看出,当 $\phi < 50^\circ$ 时,发射电流基本不随 $\phi$ 的增大而变化,当 $\phi > 50^\circ$ ,发射电流随着 $\phi$ 增加而急剧下降。分析其原因,当 $\phi$ 逐渐增大时,聚焦极附近电场逐渐趋于平行分

布,聚焦极的聚焦能力下降。由于电子逸出阴极表面具有一定发射角,大量电子被聚焦极所截获。本文以 $\phi = 46^\circ$ 作为较佳的聚焦极倾角参数,此时,阳极电流 $I_a = 97.68 \text{ mA}$ 。

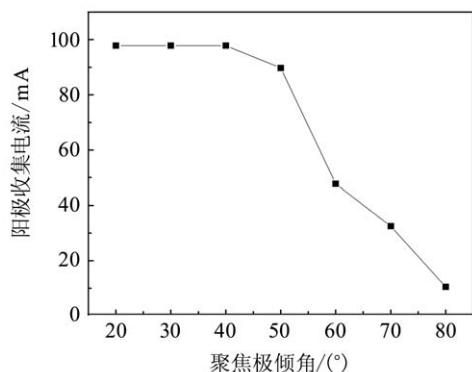


图 3 阳极电流随聚焦极倾角的变化

图4给出了 $\phi = 46^\circ$ 时的等位线分布和电子发射轨迹图。其中,横坐标为 $z$ 轴;纵坐标为 $x$ 轴。由于电子枪的平面对称性,图中仅给出第一象限结构。相邻等位线之间的电位差为 $6000 \text{ V}$ 。从图中可以看出,在远离聚焦极的区域,等位线趋于平行分布;在距离聚焦极较近的区域,等位线分布变化明显。同时,聚焦电极对于电场的屏蔽作用非常明显,在聚焦电极以下,基本没有电场分布。该聚焦极结构对电子束具有一定的会聚作用,但对于边缘电子束的会聚效果不明显。同时,由于空间电荷效应,电子束离开聚焦极后发生横向扩张,直接导致边缘电子束的发散。

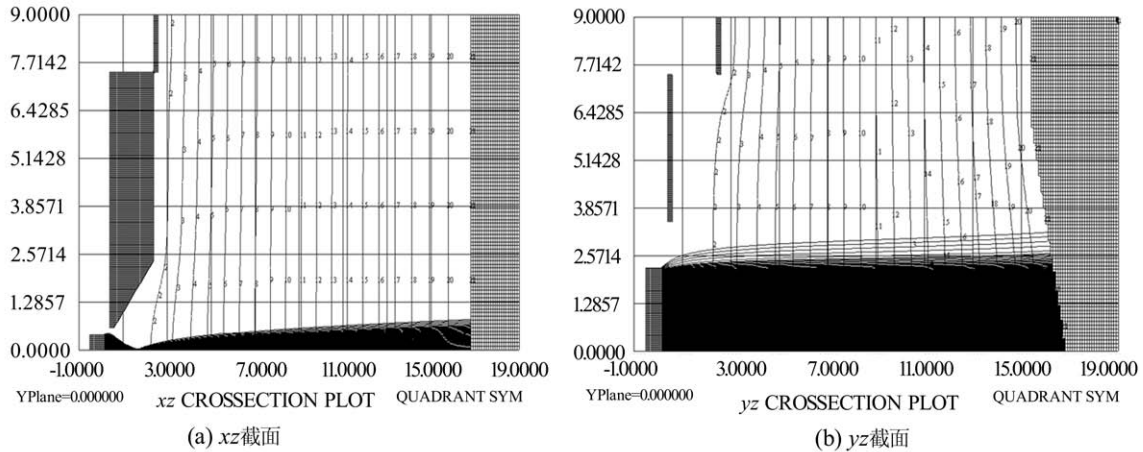


图 4 电子轨迹及电位分布图

### 3.2 矩形孔尺寸对发射性能的影响

表 1 给出了不同矩形孔尺寸下的阳极投影束斑及阳极电流。可以看出,束斑尺寸以及阳极电流均随矩形孔开口的增大而增加,但其增加的幅度很小。这是由于当  $\phi$  一定时,聚焦极附近电场分布确定,开口变化对于电场分布的影响很小。因此,聚焦极倾角是决定聚焦极聚焦能力的主要因素。

表 1 不同聚焦极开口下束斑及阳极电流的变化

聚焦极开口 / (mm×mm)	投影束斑尺寸 / (mm×mm)	发射电流/mA
1.2×7.0	0.996×0.74	97.68
1.2×8.0	0.996×0.74	97.73
1.2×9.0	0.997×0.74	97.75
1.2×10	0.997×0.74	97.76
1.2×11	0.998×0.74	97.76
1.2×12	0.998×0.74	97.76
1.2×13	0.999×0.74	97.77
1.2×14	0.999×0.74	97.77
1.2×15	0.999×0.75	97.77

### 3.3 阴栅距对发射性能的影响

当阴栅距  $d_1$  由 0.3 mm 逐渐增大到 1.0 mm 时,阳极电流  $I_a$  的变化如图 5 所示。当  $d_1 < 0.4$  mm 时,  $I_a$  基本不变;当  $d_1 > 0.4$  mm 后,随  $d_1$  的增加,  $I_a$  显著降低。根据阴极电子热发射原理,当温度一定时,阴极发射电流与外加场强成正比。当  $d_1$  较小时,减小  $d_1$ ,阴极附近电场强度增强,阴极发射能力增强;但由于电子带负电,聚焦极电位将随之降低,对阴极发射的电子具有一定排斥作用,限制了阴极的发射,因此,当  $d_1$  较小时,发射电流主要受到聚焦极的调制;随着  $d_1$  逐渐增大,由于聚焦极对电场的屏蔽,阴极附近电场强度显著降低,阴极发射能力下降,阳极电流随之降低。

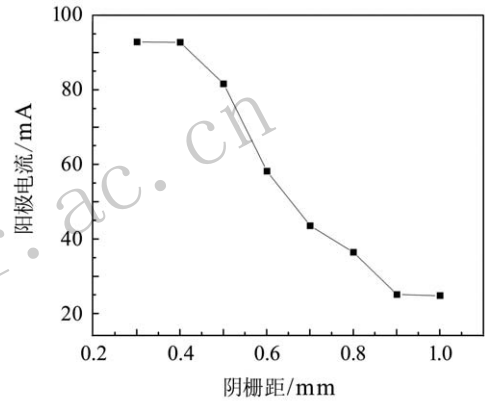


图 5 阳极电流随阴栅距的变化

图 6(a) 和 (b) 分别给出了  $d_1 = 0.3$  mm 与  $d_1 = 0.5$  mm 时,  $y$  轴方向电子束斑的电流分布。从图中可看出,随  $d_1$  增加,  $y$  轴方向束斑电流分布均匀性显著降低。这是由于随  $d_1$  增加,管内的空间电荷效应使得电子束内部的电位降低,电位分布发生显著变化,束斑电流分布均匀性降低。仿真结果表明,当  $d_1 < 0.4$  mm 时,能获得具有理想电流分布的电子束形貌。故在进行工艺加工时,可选择  $d_1 = 0.3$  mm。

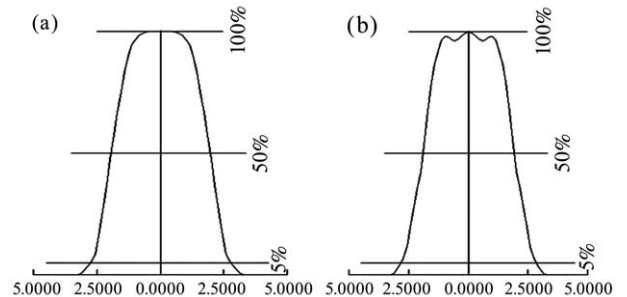


图 6 不同阴栅距下的  $y$  轴束斑电流分布

根据上述模拟结果,本文制作出了 LaB<sub>6</sub> 静电自会聚电子枪,如图 7 所示。



图 7 (在线彩图) LaB<sub>6</sub> 静电自会聚电子枪照片

#### 4 结论

采用EBS粒子束模拟软件对应用于X射线源的静电自会聚电子枪进行了结构模拟。重点讨论了聚焦极倾角、矩形孔开口尺寸以及阴栅距对电子束斑及阳极电流的影响,得到了各电极的最佳结构参数。根据模拟结果和理论分析,得出结论:聚焦极倾斜角度的改变对电子束斑的影响很大。当 $\phi \leq 30^\circ$ 时,注内电子束产生严重交叉;当 $40^\circ \leq \phi \leq 50^\circ$ 之间时,电子束斑形状较理想;当 $\phi = 60^\circ$ 时,聚焦极的聚焦能力下降,边缘电子束发散。矩形孔开口尺寸对束斑以及阳极电流的影响较小。阴栅距也会严重影响电子发射性能,当 $d_1 < 0.4$  mm时,阳极电流基本不变,电子束在阳极上分布均

匀;当 $d_1 > 0.4$  mm后,随 $d_1$ 的增加,阳极电流显著降低,束斑均匀性变差。本文最终设计出的最佳参数为:聚焦极倾角 $46^\circ$ ,阴栅距0.3 mm,矩形开孔 $1.2 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$ 。下一步将继续完善电子枪结构,进一步提高电子束斑的均匀性。

#### 参考文献:

- [1] LI Ruomei, Wang Siwei. Journal of Practical Medical Imaging, 2009, **6**: 026. (in Chinese)  
(李若梅, 王嗣伟. 实用医学影像杂志, 2009, **6**: 026.)
- [2] SAYRE D, CHAPMAN H N. Acta Crystallographica Section A: Foundations of Crystallography, 1995, **51**(3): 237.
- [3] TEUBNER U, MISSALLA T, USCHMANN I, *et al.* Applied Physics B, 1996, **62**(3): 213.
- [4] JANSSON P A C, VOGT U, HERTZ H M. Review of scientific instruments, 2005, **76**(4): 043503.
- [5] TAN Weishi, CAI Honglin, WU Xiaoshan. Journal of Changshu Institute of Technology, 2006, **20**(2): 97. (in Chinese)  
(谭伟石, 蔡宏灵, 吴小山. 常熟理工学院学报, 2006, **20**(2): 97.)
- [6] DONG Quanli, ZHANG Jie, WANG Shoujun, *et al.* Physics, 2007, **36**(8): 11. (in Chinese)  
(董全力, 张杰, 王首钧, 等. 物理, 2007, **36**(8): 11.)
- [7] JAKUBEK J, HOLY T, JAKUBEK M, *et al.* Nucl Instr Meth A, 2006, **563**(1): 278
- [8] DUDCHIK Y I, KOLCHEVSKY N N. Nucl Instr Meth A, 1999, **421**(1): 361.

## Simulation of Electrostatic Self-Focusing Lanthanum Hexaboride Electron Gun Applied in X-Ray Source

YU Haibo<sup>1,1)</sup>, LIN Zulun<sup>2</sup>, QI Kangcheng<sup>2</sup>, CAO Guichuan<sup>2</sup>, WANG Xiaojun<sup>2</sup>

(1. Chengdu Chuang Yuan Electronics Co., Ltd., Chengdu 610000, China;

2. School of Opto-electronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** High power, high current density, fine focus X-ray sources are widely used in the field of industrial nondestructive testing, medical imaging, security technology, and so on. An electrostatic self-focusing lanthanum hexaboride electron gun applied in X-ray source is designed using electron beam simulation (EBS) software. The electron gun consists of three parts: a lanthanum hexaboride thermionic emitter, a focusing electrode with a trapezoidal focusing groove and a rectangular hole, and an anode. The simulated results show that the inclination angle of focusing electrode has strong influence on electron focusing property and the best inclination angle is  $46^\circ$ . The anode current and the uniformity of the distribution are decreased with increasing the distance between the gate and cathode, and the best distance between the gate and cathode value is 0.3 mm.

**Key words:** X-ray source; electron gun; lanthanum hexaboride cathode; electron beam; current

Received date: 9 Sep. 2014; Revised date: 24 Aug. 2015

1) E-mail: yuhaible@sina.com.