

e 型电子枪中非均匀磁场偏转系统的聚焦特性研究

韩亮, 宁涛, 李想, 赵玉清

(西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 利用永磁铁结构的偏转聚焦系统产生的非均匀磁场, 改进了目前 e 型电子枪电子束偏转聚焦特性, 同时缩小了枪体体积, 减小了功耗. 采用边界元法与等效磁荷法, 模拟了偏转聚焦系统的非均匀磁场, 再利用龙格-库塔法模拟出电子在该系统中的运动轨迹. 为获得良好的聚焦特性, 电子发射速度和发射位置应进行优化选择, 同时电子束保持水平出射. 研究表明: 电子枪阳极板端点与阴极灯丝中心点保持水平可满足电子水平出射; 非均匀分布的磁场对 e 型电子枪中电子束具有良好的聚焦作用; 所设计的偏转聚焦系统在电子束流为 50~100 mA 时, 束斑小于 3 mm.

关键词: e 型电子枪; 永磁体; 边界元法; 龙格-库塔法

中图分类号: TN102 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)12-0111-04

The Focusing and Deflecting Characters of e-Type Electron in Heterogeneous Magnetic Field

HAN Liang, NING Tao, LI Xiang, ZHAO Yuqing

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The focusing and deflecting system is formed by heterogeneous magnetic field structure, which improves the focusing and deflecting characters of e-type electrons. The electron trajectory in the deflection system of electron gun is calculated by using the boundary element method and the Runge-Kutta method. Then the focusing and deflection characteristics of electron gun are studied. The good characteristics of the deflection system of electron gun can be obtained by optimizing the velocity and the location of emitting electron beam and by the aclinic emission of the electron beam, that can be achieved by making the end of the anode and the middle part of the cathode level. A new type of deflection system of electron gun is designed, and results with the new system show that non-uniform magnetic field makes the beam of e-type electron gun focus well, and the electronic beam diameter is less 3 mm when the emitting current is 50 to 100 mA.

Keywords: e-type electron gun; permanent-magnet; boundary element method; Runge-Kutta method

目前, 电子束蒸发镀膜技术已被广泛应用于各类薄膜的制备中^[1-4]. 电子束蒸发用电子枪性能的优劣对电子束蒸发镀膜的质量至关重要. 为了保证良好的镀膜质量, 要求电子枪的电子束斑具有良好的聚焦性、均匀性、电子束扫描的一致性和电子束能量变化对束斑位置的变化可调性^[5].

电子束蒸发用电子枪大多采用弯转 270° 的 e 型电子枪, 目前主要方法是采用电磁铁产生的均匀磁

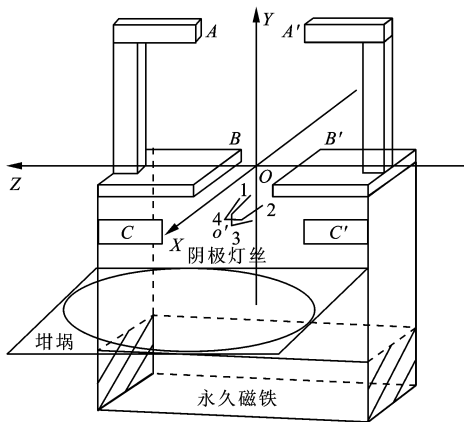
场构成电子束偏转系统^[6]. 在该系统中, 由于空间电荷的作用和偏转磁场的非旋转对称性, 在电子束偏转 270° 后, 实现聚焦有一定困难, 往往使束斑发散, 且在坩埚中心与坩埚边缘处的束斑直径和形状不一致, 功率密度分散、不均匀, 因此电子束打到坩埚蒸发物表面时, 会产生蒸发速度不一致, 从而影响镀膜的质量. 为了克服 e 型电子枪存在的问题, 国内外有关公司和研究单位开展了大量的研究工作^[7-9], 集中

起来可分为2类:①在坩埚或偏转场的边缘处加极靴,以改变磁极的形状来改变偏转特性,这种方法虽然可改善偏转特性,但没有解决电子束对称聚焦的问题;②采用180°偏转替代270°偏转改善电子束聚焦特性,这种方法虽然可以大大改善束斑性能,但加大了枪的体积,同时易造成污染。

本文利用永磁铁构成的非均匀磁场,改变了传统e型电子枪的空间磁场分布,使电子束在偏转的同时产生对称聚焦.该结构可以实现良好的束斑聚焦,同时缩小枪体体积,减少能耗,并且设计的最大功率为10 kW,在此范围内,功率可以任意调节。

1 e型电子枪非均匀偏转磁场结构及偏转聚焦系统中的电子轨迹模拟

本文改进后的e型电子枪非均匀偏转磁场由永磁铁和软铁组成,永磁铁采用水冷,防止退磁,如图1所示。



AA', BB', CC'均为偏转聚焦磁极;

1, 2, 3, 4为束包络边缘的4个点

图1 e型电子枪结构图

由于软铁为良导磁体,因此软铁A、B、C及A'、B'、C'均匀磁化,无体磁荷,仅有面磁荷分布在A、B、C及A'、B'、C'端面上,因此根据等效磁荷法^[10]可以计算出磁化物体表面的等效磁荷密度

$$\frac{(\mu_T + \mu_0)}{(\mu_T - \mu_0)} \frac{\rho_{mx}}{2\mu_0} - \frac{\partial}{\partial n} \int \frac{\rho_{mx}}{4\pi\mu_0 R} d\Omega = H_{sn} \quad (1)$$

式中: ρ_{mx} 为磁极表面磁荷密度; μ_T 和 μ_0 分别表示软铁及空气的磁导率; H_{sn} 为磁极法向磁场强度; Ω 为面积分域.再利用边界元方程理论,可计算得到偏转聚焦系统空间任意一点的磁场强度。

e型电子枪发出的电子在偏转聚焦系统中受到

洛伦兹力的作用而发生270°偏转,电子束将打在蒸发材料上,由于蒸发用电子枪设计不考虑电子束的光学性能,因此可以忽略空间电荷效应.假设电子出阳极口后无电场作用,只有磁场作用,能量不变,仅发生偏转,则电子轨迹为

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 X}{dt^2} &= -\eta \left(\frac{dY}{dt} B_z - \frac{dZ}{dt} B_y \right) \\ \frac{d^2 Y}{dt^2} &= -\eta \left(\frac{dZ}{dt} B_x - \frac{dX}{dt} B_z \right) \\ \frac{d^2 Z}{dt^2} &= -\eta \left(\frac{dX}{dt} B_y - \frac{dY}{dt} B_x \right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

可以应用4阶龙格-库塔法^[11]求解电子在偏转聚焦系统中的运动轨迹。

2 非均匀磁场偏转系统的聚焦特性

为了分析e型电子枪偏转系统的聚焦特性,讨论如图1所示的一束由阳极引出的电子。 $Z=0$, XY面为磁场对称面,其中1、2、3、4为束包络边缘的4个点,其电子轨迹为电子枪发出电子束包络的4条轮廓线,且1、3点位于 $Z=0$ 的XY平面内,电子发射方向沿X负方向。

2.1 电子束纵向1、3点发射的电子聚焦特性分析

1、3点位于 $Z=0$ 的XY平面内,XY面为磁场对称面,该面磁场只有Z分量,因此从1、3点发射的电子经过BB'间隙时,电子沿Z方向受力为0,即

$$F_x = e_x \dot{Y} B_z; \quad F_y = -e_y \dot{X} B_z; \quad F_z = 0$$

式中: F_x 、 F_y 、 F_z 为电子在X、Y、Z方向所受的洛伦兹力。

电子由于在X和Y方向受力的作用,因而在XY平面发生偏转,偏转半径与磁场强度成反比.当电子通过AA'极靴产生的磁场时,由于磁场是非均匀分布,因此偏转半径将改变.通常,电子轨迹在AA'中心线以下通过,距离AA'中心线越远,磁场越弱,电子偏转半径越大,因此可以通过偏转半径的不同来改变电子束的聚焦特性.将1、3点之间的间距定义为电子在Y方向的原始束斑宽度 d_1 ,将1、3点经过偏转聚焦后,打在坩埚上Y方向的束斑宽度定义为 d_2 , d_2/d_1 定义为聚焦比,应小于1。

在给定磁场强度下,电子枪的聚焦特性受到引出速度和电子出射角的影响,如图2和3所示.由磁场内电子的偏转半径公式可以得到速度和半径成正比,在本文给定的磁场下,电子在速度为 2×10^7 m/s时,聚焦特性最佳.计算结果表明,当电子出射

角为 0° , 并沿 X 负方向水平发射时, 聚焦特性最好, 而电子出射角将受到引出电场的作用.

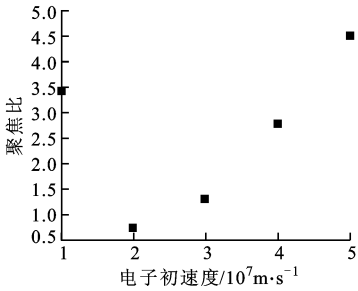


图 2 电子初速度对聚焦比的影响

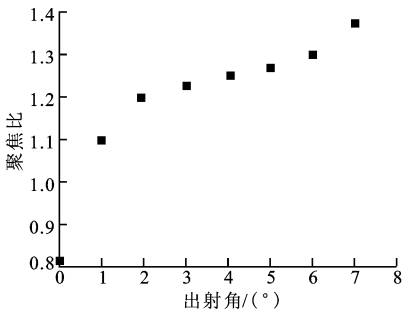


图 3 电子出射角对聚焦比的影响

将磁极表面 $A(A')$ 和 $B(B')$ 中心点之间的高度定义为磁极表面高度, 实验结果表明磁极表面之间的高度对电子聚焦的影响不显著, 如图 4 所示. 这是由于磁极之间的高度仅仅影响磁场区域的大小, 并不影响磁场的形态, 因此电子运动轨迹的形状不变.

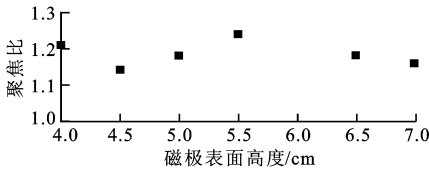


图 4 磁极表面高度对聚焦比的影响

当磁极 A 、 B 和 A' 、 B' 的表面磁荷密度确定后, 磁极 $A(B)$ 和 $A'(B')$ 中心点之间的宽度将影响磁力线分布的疏密. 定义磁极 B 和 B' 中心点之间的距离为磁场宽度, 改变磁场的形态对电子枪聚焦特性产生的影响如图 5 所示. 可以看出, 磁场宽度相对于聚焦比存在一个最佳值 (7 cm), 这说明在设计电子枪的过程中, 应当综合考虑磁场宽度与磁极表面磁荷密度对电子枪聚焦特性的影响.

图 6 为电子出射位置与聚焦比之间的关系. 电子发射位置沿 Y 轴正方向变化时, 因为发射的电子受到磁场的作用越来越强, 因此电子的聚焦特性也在增强. 经过聚焦比最小值后, 由于电子发射位置

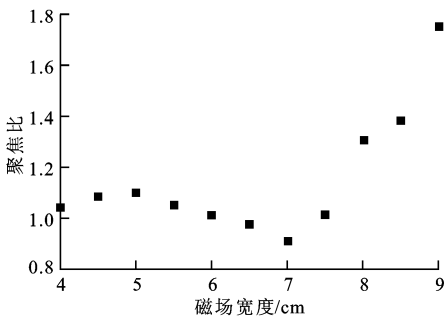


图 5 磁场宽度对聚焦比的影响

继续向 Y 正方向变化, 在偏转磁场的作用下电子束会渡越到 AA' 之上, 因此磁场衰减很快, 无法完成聚焦. 在磁极条件已经给定的情况下, 可以利用这一规律, 仅通过调整电子发射位置就可以完成电子束偏转聚焦的优化, 节约设计成本. 根据上述分析, 调整以上各参数, 可以优化出较满意的电子聚焦轨迹, 如图 7 所示, 坩埚平面可以选择电子束的聚焦处.

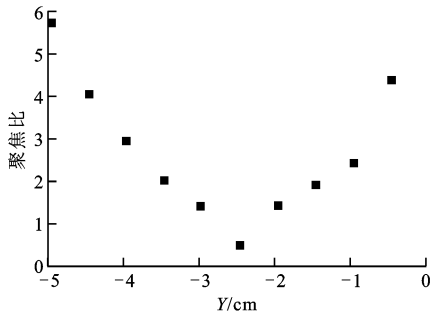


图 6 电子出射位置对聚焦比的影响

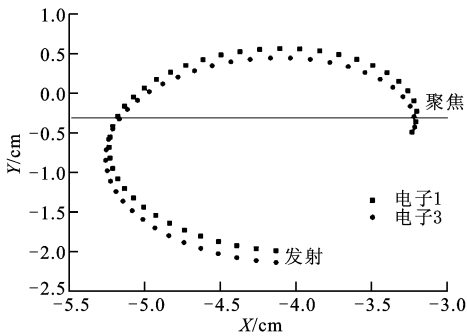


图 7 对称面 XY 上的电子束偏转聚焦轨迹

2.2 电子束在横向不同初始位置点的电子聚焦特性分析

图 1 中 AA' 和 BB' 构成的电子枪偏转聚焦磁场的分布如图 8 所示. 当电子通过 AA' 横截面时, 电子位于 AA' 中心面以上, 磁场为 B_z 和 $-B_y$, 其中 B_z 与电子作用产生一个向下的弯曲力, 使电子发生偏转, 而 B_y 和 $-B_y$ 与电子作用后分别发生偏离中心

面的力,称为发散力.

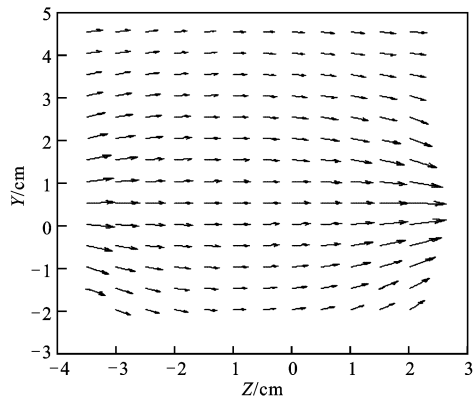


图 8 电子枪偏转聚焦磁场分布图

电子位于 AA' 以下,由于磁场的作用,在 Z 方向会产生向中心汇聚的力,称为聚焦力,电子束的位置应位于 AA' 以下.在 Y 方向,由于磁感应强度沿着 Y 方向,无论向上或向下变化,场强都越来越弱,位置高的电子受到的作用力大,偏转半径小,位置低的电子偏转半径大,因此在 Y 方向也形成了汇聚力.总之,经过 AA' 两个磁极形成的不均匀场后,电子总可以在 Z 和 Y 两个方向形成聚焦,只要适当调节电子束的位置和磁极间的磁场分布曲线的曲率半径,就可以实现电子束斑的良好聚焦性能.从图 1 中阴极上的 2、4 点发出的两条电子运动轨迹的俯视图如图 9 所示,可以看出电子经过非均匀磁场后,总地向对称面汇聚,以保证电子束不会发散,会聚点可选择为坩埚中心.

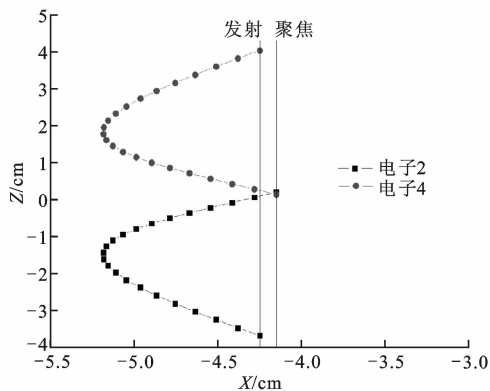


图 9 电子从阴极灯丝两侧出的射轨迹

3 电子枪阳极位置对电子束初始条件的影 响

从以上分析可以看出,非对称面上发出的电子总能在非均匀磁场的作用下形成向对称面的聚焦.但是,从图 4 中可以看出,对称面上电子发射的出射

角度的微小变化强烈影响着 e 型电子枪的聚焦特性,而电子束出射角则由电子枪的阳极板位置决定.在本文的设计中,利用 Ansys 软件模拟了阳极板位置的变化对电子束出射角的影响.当阳极板边沿与灯丝中心点水平时,电子在阳极出口处可以形成平行出射,如图 10a 所示.当阳极板边沿位于灯丝中心点之上时,电子束会向上出射,如图 10b 所示.当阳极板边沿位于灯丝中心点之下位置时,电子束向下倾斜,如图 10c 所示.因此,应保持阳极板端点位置与灯丝中心点水平,此时可以保证对称面上电子束以 0° 角出射,完成聚焦.

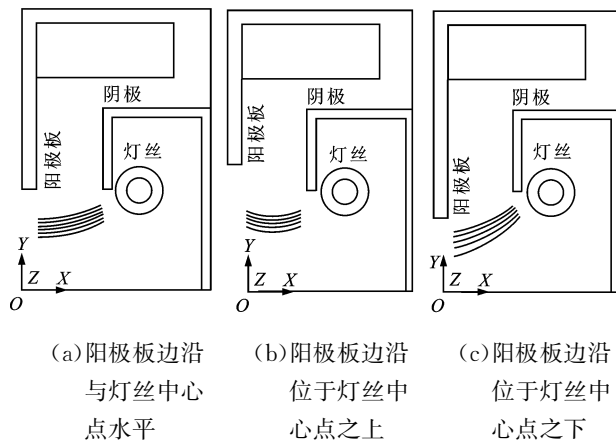


图 10 阳极板位置的变化对电子束出射角的影响

4 结 论

采用非均匀磁场构成 e 型电子枪电子束偏转聚焦系统,通过对电子束横截面电子轨迹的研究发现:在 e 型枪的横向非对称面上发出的电子,通过非均匀磁场的作用总向对称面聚焦;在 e 型枪对称面(纵向)发出的电子在给定磁场强度时,电子的发射速度、出射角度、发射位置和磁极宽度的变化都对聚焦特性有强烈的影响;磁极之间高度的变化对电子束聚焦特性几乎没有影响.本文利用 Ansys 软件模拟了阳极板位置对对称面发射电子束出射角的影响,模拟表明阳极板位置与灯丝中心点位置保持水平时,聚焦效果最佳.根据以上结论设计的偏转聚焦系统在电子束流为 $50\sim 100\text{ mA}$ 时,束斑小于 3 mm .实验结果表明,电子在非均匀磁场构成的偏转聚焦系统中,在横截面上任意位置的电子束都具有很好的聚焦作用,解决了传统 e 型枪中电子束难以聚焦的问题.

参考文献:

- [1] REBHOLZ C, MONCLUS M A, BAKER M A, et al. Hard and superhard TiAlBN coatings deposited by twin electron-beam evaporation [J]. *Surf Coat Technol*, 2007, 201(13): 6078-6082
- [2] HSU S W, YANG T S, CHEN T K, et al. Ion-assisted electron-beam evaporation of carbon-doped titanium oxide films as visible-light photocatalyst [J]. *Thin Solid Films*, 2007, 515(7): 3521-3526.
- [3] WEI Ronghua, BOOKER T, RINCON C, et al. Metal plasma immersion ion implantation and deposition (MPIII and D) using a metal plasma electron evaporation source (MPEES) [J]. *Surf Coat Technol*, 2005, 199(2): 579-583.
- [4] SUBRAHMANYAM A, BARIK U K. Synthesis of P-type transparent conducting silver: indium oxide (AIO) thin films by reactive electron beam evaporation technique [J]. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2005, 66(5): 817-822.
- [5] 赵玉清. 电子束离子束技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- [6] 孔庆生. 四坩埚磁偏转电子束蒸发源[J]. *真空科学与技术*, 1981, 1(2): 86-94.
- KUNG Chingsheng. Evaporator with magnetic reflection electron beam using four crucibles[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 1981, 1(2): 86-94.
- [7] DENG Lifan, XIONG Yuansheng, XIAO Ping. Modeling and experimental study of impedance spectra of electron beam physical vapour deposition thermal barrier coatings [J]. *Surf Coat Technol*, 2007, 201(18): 7755-7763.
- [8] VAN VEENHUIZEN M J, MOODERA J. Electron deflector in UHV system: scattered electrons in e-beam evaporation [J/OL]. *Rev Sci Instrum*, 2008, 79(3) [2008-10-11]. <http://link.aip.org/?RSINAK/791/033907/1>.
- [9] IQBAL M, ALEEM F. Design and performance of high uniformity linear filament electron gun [J/OL]. *Rev Sci Instrum*, 2006, 77(10) [2008-10-11]. <http://link.aip.org/?RSINAK/77/106101/1>.
- [10] 盛剑霓. 工程电磁场数值分析[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991.
- [11] 孙伯尧, 汪健如. 电子离子光学计算机辅助设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.

(编辑 刘杨)