

## 双静电四极透镜点聚焦特性分析与仿真

袁 伟, 樊荣伟, 于 欣, 陈德应

(哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘 要:** 静电四极透镜具有优越的电子光学聚焦成像性能, 单一静电四极透镜可实现电子束线聚焦, 组合静电四极透镜系统拥有聚焦的能力。文中对实现点聚焦的双静电四极透镜系统相关参数进行了计算, 利用电子光学软件 SIMION 仿真发现, 静电四极透镜之间的畸变场与两端的边缘场引起的像差会严重影响系统聚焦成像质量。仿真分析了系统像差与发射电子初动能的关系。结果表明: 系统在保证点聚焦的情况下, 增加电子发射初动能可以有效减小系统像差; 当电子初动能增加至  $1 \times 10^5$  eV 时, 最大发散角为  $2^\circ$  的电子束在聚焦平面上的弥散斑减小至  $3.2 \mu\text{m} \times 28 \mu\text{m}$ 。

**关键词:** 双静电四极透镜; 点聚焦; 像差; SIMION

中图分类号: TN16 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0618001

## Analysis and simulation of point-focusing property of a quadrupole lens pair

Yuan Wei, Fan Rongwei, Yu Xin, Chen Deying

(National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

**Abstract:** A pair of quadrupole lens has excellent imaging performance, electrostatic quadrupole lens can focus the electron beam into a line, quadrupole lens pairs have the ability to focus the electron beam into a point. The point-focusing property of a quadrupole lens pair was investigated in this paper, using the electron ray tracing simulation program SIMION. The simulation of electron distribution quantitatively showed that the fringing field at both ends and the aberration in the crossover image caused an electron beam blur. The aberration of a quadrupole lens pair as a function of the electron initial kinetic energy was discussed, and the result indicated that the aberration would be effectively reduced if the kinetic energy of electrons increased. 10 000 electrons were flown in a SIMION simulation and the entry angle  $\alpha_0$  is randomly varied so that  $-1^\circ < \alpha_0 < 1^\circ$ , the size of diffuse spot at the focal plane reduced to  $3.2 \mu\text{m} \times 28 \mu\text{m}$  as the kinetic energy of electrons increased to  $1 \times 10^5$  eV.

**Key words:** a quadrupole lens pair; point-focusing; aberration; SIMION

收稿日期: 2015-10-05; 修订日期: 2015-11-03

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项资金(2012YQ040164)

作者简介: 袁伟(1991-), 男, 硕士生, 主要从事电子光学系统方面的研究。Email: yuanwei4523691@163.com

导师简介: 樊荣伟(1980-), 男, 副教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光电探测系统方面的研究。Email: fanmmi@163.com

## 0 引言

静电四极透镜是一种具有面对称场分布的电子光学系统,具有优越的电子光学成像性能<sup>[1]</sup>。单一静电四极透镜可实现电子束的线聚焦,组合静电四极透镜系统拥有线聚焦的能力,双静电四极透镜系统以其较强的聚焦能力引起了广泛研究<sup>[2-6]</sup>。目前的文献并没有从实际运用的角度针对系统点聚焦特性进行分析与仿真,例如参考文献[3]提出在双静电四极透镜后加圆筒形透镜,通过提高圆筒形透镜电压减小系统像差,然而,圆筒形透镜本身也会引起像差。参考文献[4,6]仅对双静电四极透镜的聚焦特性进行了理论分析与描述。文中对双静电四极透镜的点聚焦特性进行分析与仿真,探究减小系统像差的方法,对双静电四级透镜的设计与性能提升有重要的参考意义。

## 1 双静电四级透镜的聚焦特性

### 1.1 双静电四级透镜的点聚焦

静电四极透镜由平行于  $z$  轴的四根电极构成,实际中用到的几种结构包括圆棍电极、凹圆形电极、平面电极、棒状电极。文中主要针对凹圆形电极进行分析与仿真,具体结构如图 1 所示,为了其产生的电场更加接近于理想四极场,取  $\alpha=22.035^\circ, 2\beta=45.93^\circ$ <sup>[1]</sup>。

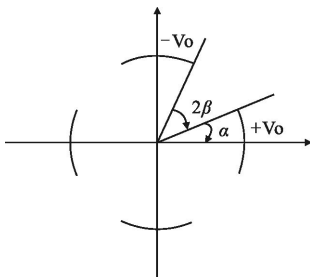


图 1 凹圆形电极结构

Fig.1 Structure of concave circular electrode

将两个静电四极透镜组合成静电四级透镜对,可以实现电子束的点聚焦,电子在双静电四极透镜中的轨迹如图 2 所示, $xz$  平面上,电子汇聚后发散; $yz$  平面上,电子发散后汇聚。由 H.A.ENGE 的讨论结果可知  $k_1A_C > 1$  时, $yz$  平面各参数满足以下关系<sup>[6]</sup>:

$$\frac{1}{k_1L} \coth(k_1L + \phi_1) = \frac{1}{k_2L} \cot(k_2L + \phi_2) - \frac{S}{L} \quad (1)$$

其中

$$\tan \phi_1 = \frac{1}{k_1A_C}, \tan \phi_2 = \frac{1}{k_2B_C} \quad (2)$$

$$k_1 = \frac{2}{d} \left( \frac{V_1}{E} \right), k_2 = \frac{2}{d} \left( \frac{V_2}{E} \right) \quad (3)$$

式中: $V_1, V_2$  为静电透镜所加电压; $E$  为电子发射初动能; $d$  为四极透镜的孔径。 $xz$  平面上,只需将  $B_D$  与  $A_C, B_C$  与  $A_D, k_1$  与  $k_2$  互换即可得到该平面各参数满足的方程。点聚焦要求  $A_C=A_D, B_C=B_D$ , 结合上述两个方程,计算选取一组特殊解; $S=0, k_1L=1.097, k_2L=1.022, A_C=A_D=2L, B_C=B_D=4L$ 。仿真时,取  $d=15 \text{ mm}, L=30 \text{ mm}$ 。

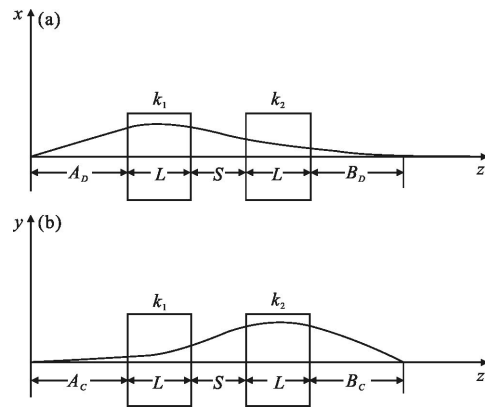


图 2 双静电四级透镜中电子轨迹示意图

Fig.2 Electron trajectories in two planes of a quadrupole lens pair

### 1.2 双静电四极透镜的像差

电子从固定点以最大发散角  $2\alpha_0$  发射进入双静电四极透镜,由于球差的存在,电子在  $yz$  与  $xz$  二维聚焦平面上会产生弥散(如图 3 所示)。其中, $Q$  为近轴射线的像平面(高斯平面), $Q'$  是有较大张角的射线,受到透镜强边缘场的作用,形成的聚焦平面, $S$  为弥散斑最小的平面。在实际运用中,为了获得较为清晰的图像,往往将屏置于  $S$  平面处。文中,将  $S$  面作为聚焦像平面。

由图 3 可见, $yz$  与  $xz$  两个平面维度上,电子束在  $S$  平面上的弥散不同,对应最大弥散宽度分别记为  $\Delta R_{yz}, \Delta R_{xz}$ , 该参数与电子最大发散角  $2\alpha_0$  有关,系统仿真分析时,选择固定  $\alpha_0$ 。由下节分析可知,除了边缘场引起的球差以外,四极透镜之间的畸变场也会影响系统聚焦成像质量,系统像差最终由二者共同决定。文中,利用电子束在  $S$  平面上的最大弥散宽度衡量系统像差大小。

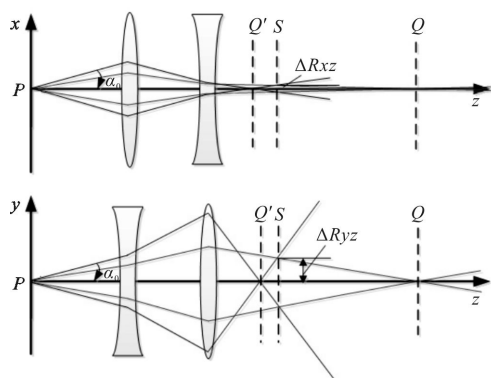


图 3 双静电四级透镜系统中的像差

Fig.3 Aberrations of a quadrupole lens pair in two planes

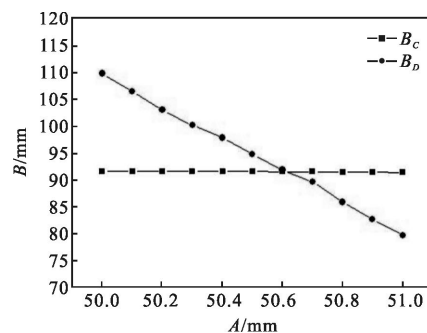


图 5  $B_C$  与  $B_D$  随  $A$  的变化关系

Fig.5 Relationships between  $B_C$  and  $A$ ,  $B_D$  and  $A$

### 2 双静电四级透镜的点聚焦仿真参数确定

SIMION 是一款电子光学系统分析仿真软件,可计算出静电透镜中静电场的分布,模拟出电子在其中的运动轨迹,文中,主要是用 SIMION 对双静电四级透镜进行仿真分析。

SIMION 模拟双静电四级透镜中电子运行轨迹如图 4 所示,上节选取的特殊解并没有考虑静电透镜两端边缘场的影响。实际仿真过程中,当电子初动能  $E=10\text{ eV}$ ,  $V_1=2.611\ 21\text{ V}$ ,  $V_2=3.008\ 522\text{ V}$  时,在上述特殊解( $A=60\text{ mm}$ )的附近改变  $A$  的值( $A=A_C=A_D$ ),得到不同的  $B_C$  与  $B_D$ ,结果如图 5 所示,将二者相差最小时的  $A$  值( $A=50.6\text{ mm}$ )确定为  $A$  的仿真参数。

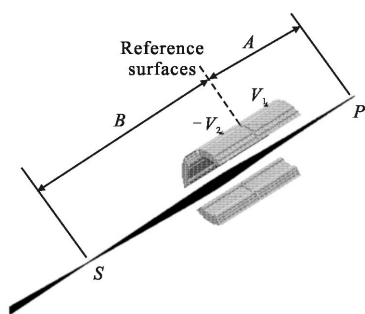


图 4 SIMION 仿真电子轨迹示意图

Fig.4 SIMION simulations of electron trajectories through a quadrupole lens pair

上节讨论可知,为了保证电子束实现点聚焦,  $k_1, k_2$  保持不变,由公式(3)知,  $E$  与  $V_1, V_2$  同时变化;另一方面,增大  $V_1$  与  $V_2$  的同时,双静电四级透镜的电场发生变化,影响电子运行轨迹( $P, S$  的位置发生变化)。因而,改变  $E$  的同时,需要重新确定  $A, B$  的值。

### 3 仿真结果与讨论

利用 SIMION 对系统进行分析,图 6 给出了双静电四级透镜的电场分布仿真结果,在两个四级透镜之间,电场发生畸变,产生畸变场,电场关于  $A$  参考面不对称;同时由于  $V_1$  与  $V_2$ (见图 4)不相等,双静电四级透镜的左右边缘场关于  $B$  参考面不对称。

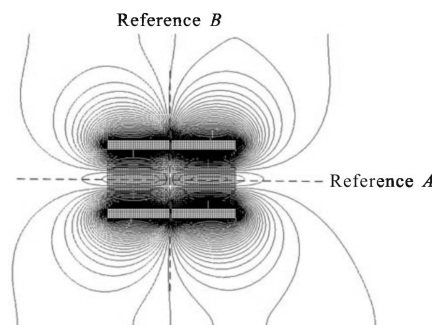
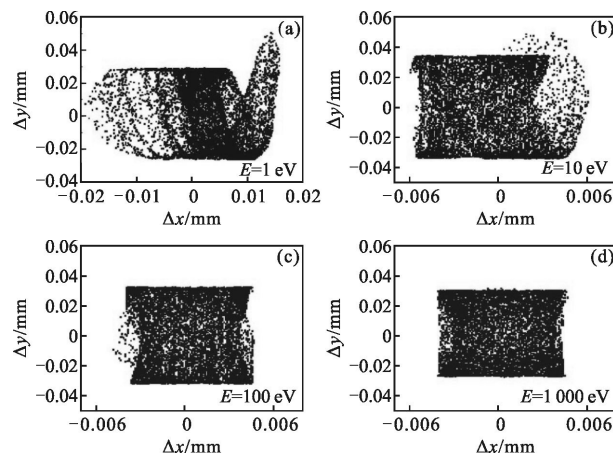


图 6 双静电四级透镜中等势线分布

Fig.6 Equipotentials in a quadrupole lens pair

电子(数目  $N=10\ 000$ )从  $P$  点以最大发散角  $2\alpha_0(2\alpha_0=2^\circ)$  发射进入双静电四级透镜,图 7 给出了 6 种典型不同初动能的电子在  $S$  平面上的聚焦成像仿真



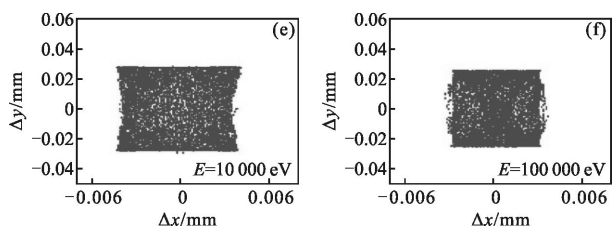


图 7 不同初动能的电子束在 S 平面上的弥散分布

Fig.7 Distribution of electrons with different initial kinetic energy at S plane

结果,  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  分别为电子到达 S 平面时距离聚焦中心的距离。由于像差的存在, 电子在 S 面上产生了弥散, 同时, 由于透镜之间畸变场的影响, 弥散斑形状不规整(图 7(a)、(b)所示)。电子初动能较小时, 畸变场与边缘场对电子轨迹影响较大, 电子在聚焦平面上弥散严重, 随着电子初动能的增大, 电子运动受其影响变小, 弥散斑减小, 成像质量提高,  $\Delta R_{yz}$ 、 $\Delta R_{xz}$  随电子初动能的变化结果如图 8 所示。

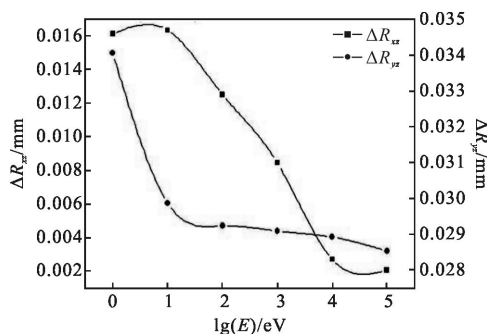


图 8 弥散斑大小与电子初动能的关系

Fig.8 Relationship between the size of diffuse spot and the initial kinetic energy of electrons

S 平面弥散斑的大小与畸变场、边缘场的大小和电子在其中的运行时间有关<sup>[7]</sup>。仿真记录了每种初动能(E)的 10 000 个电子从 P~S(见图 4)的平均运行时间(TOF), 结果如图 9 所示, 当电子初动能以指数形式增加时, 电子穿过的平均飞行时间以指数形式下降。

在保证系统点聚焦的情况下,  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $E$  同等倍数增加, 引起畸变场与边缘场的强度增加, 严重影响电子的运行轨迹, 然而, 由于电子穿过的时间减小, 最终电子束在聚焦平面上的弥散减小(如图 7 所示), 成像质量提高。

图 8 可见,  $xz$  平面上,  $\Delta R_{xz}$  随着电子初动能的

增加而减小, 在  $E=1\text{ eV}$  与  $E=10\text{ eV}$  之间下降迅速, 随后趋于平缓。原因在于,  $xz$  平面上, 电子始终在近轴范围场内运动, 像差较小, 当电子初动能增加至  $100\text{ eV}$  时, 像差变得很小, 此时增加电子初动能对系统像差的减小作用减弱。

$yz$  平面上,  $\Delta R_{yz}$  在  $E=1\text{ eV}$  与  $E=10\text{ eV}$  之间变化缓慢, 在  $E=10\text{ eV}$  与  $E=1\times 10^4\text{ eV}$  之间迅速下降, 随后趋于平缓。原因在于,  $yz$  平面上, 电子穿过第二极四极透镜时, 受到较强的远轴边缘场作用(图 3 所示), 像差较大,  $\Delta R_{yz}$  远大于  $\Delta R_{xz}$ 。

$E=1\text{ eV}$  与  $E=10\text{ eV}$  之间, 尽管电子穿过边缘场与畸变场的时间变短, 但二者综合作用下,  $\Delta R_{yz}$  基本不变, 需要注意的是, 电子受缘场与畸变场影响减小, 成像质量提高;  $E=10\text{ eV}$  与  $E=1\times 10^4\text{ eV}$  之间, 电子初动能增加时, 边缘场与畸变场强度增加, 电子穿过时间变短(图 9), 综合作用下,  $\Delta R_{yz}$  开始迅速减小, 成像质量提高。当电子初动能超过  $1\times 10^4\text{ eV}$  时, 系统像差较小, 增加电子初动能对像差的减小作用将会减弱, 因而,  $\Delta R_{yz}$  变化趋于平缓。

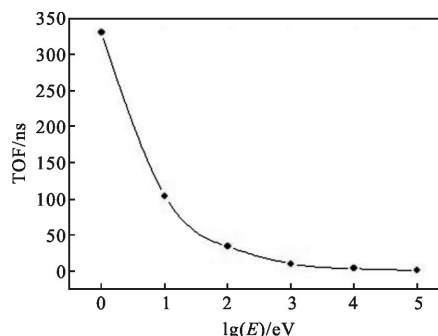


图 9 不同初动能电子的平均运行时间

Fig.9 Average flight time of electrons of different kinetic energy

上述分析可知, 在保证点聚焦的情况下, 增加电子初动能, 可以有效减小系统的像差; 当电子初动能增加至  $1\times 10^4\text{ eV}$  时, 对减小系统像差的作用减弱。然而, 由于此时  $V_1$  增加至  $2\ 611.21\text{ V}$ ,  $V_2$  增加至  $3\ 008.522\text{ V}$ , 对外部电源的要求迅速增加。因而, 设计者需要综合考虑, 选择合适的电子发射初动能。

## 4 结论

文中分析了双静电四极透镜的点聚焦特; 从实际运用的角度给出了仿真参数的选择方法; 在保证点聚焦的情况下, 仿真分析了系统的像差与发射电

子初动能的关系。结果表明,增加电子发射初动能,可以减小电子穿过边缘场与畸变场的时间,从而有效减小系统像差;当电子初动能增加至  $1 \times 10^5$  eV 时,最大发散角为  $2^\circ$  的电子束在聚焦平面上的弥散斑减小至  $3.2 \mu\text{m} \times 28 \mu\text{m}$ , 根据 Omer Sise 等人的研究结果<sup>[8]</sup>, 仿真结果准确度由网格单元密度(gu/mm)决定,当网格单元密度设置为 1 gu/mm, 误差在 3% 左右。然而,当电子发射初动能增加至  $1 \times 10^4$  eV 时,系统像差减小缓慢,对外部电源的要求迅速增加,因此,设计者需要综合考虑,选择合适的电子发射初动能。文中研究工作对双静电四极透镜系统的设计有一定的参考意义。

#### 参考文献:

- [1] Hua Zhongyi, Gu Changxin. Electron Optics [M]. Shanghai: Fudan University Press, 1991. (in Chinese)  
华中一, 顾昌鑫. 电子光学[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1991.
- [2] Baranova L A, Read F H. Aberrations caused by mechanical misalignments in electrostatic quadrupole lens systems [J]. *Optik*, 2001, 112(3): 131-138.
- [3] Baranova L A, Read F H. Minimisation of the aberrations of electrostatic lens systems composed of quadrupole and octupole lenses [J]. *International Journal of Mass Spectrometry*, 1999, 189(1): 19-26.
- [4] Matyshev A A. Ion focusing properties of an isotrajectory quadrupole lens pair [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A*, 1999, 427(1): 288-291.
- [5] Lu Chihshun, Howarde Carr. Electrostatic quadrupole lens pair for mass spectrometers [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1962, 39(8): 823-824.
- [6] EnGE H A. Ion focusing properties of a quadrupole lens pair [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1959, 39(4): 248-251
- [7] Omer Sise, Melike Ulu, Mevlut Dogan. Aberration coefficients of muti-element cylindrical electrostatic lens system for charged particle beam applications [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2007, 573(3): 329-339.
- [8] Omer Sise, Melike Ulu, Mevlut Dogan. Characterization and modeling of multi-element electrostatic lens systems [J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2007, 76(3): 593-598.