

电子能量损失谱仪用中高能电子枪的研制

陈 昕¹ 徐卫青² 徐龙泉¹ 田红春¹ 刘亚伟¹ 朱林繁¹

1 (中国科学技术大学 近代物理系 合肥微尺度物质科学国家实验室 合肥 230026)

2 (蚌埠学院理学院 蚌埠 233030)

摘要 研制了一台电子能量损失谱仪用的中高能电子枪。其产生的电子与原子、分子发生碰撞,通过谱仪收集、分析散射电子的动量和能量,可以获得靶的电子结构和碰撞动力学信息。该电子枪结构简单,由热阴极、栅极、阳极、聚焦极和偏转板组成;电子能量可调范围大(1–3 keV),操作简单。为了获得最优的束流条件,利用 SIMION 电子光学软件模拟了电子发射源大小和初始发散角对靶点处的束斑大小和束流发散角的影响。在电子能量为 1.5 keV 条件下,实验检验给出在离电子枪出口 27 mm 处可获得束径约为 0.95 mm、束流发散角约 0.93°和束流强度 6.27 μA 的电子束,满足电子能量损失谱仪的使用要求。

关键词 电子枪, 热阴极, 电子光学, 发散角, 束流强度, 电子能量损失谱仪

中图分类号 O463⁺.1, O462.1, TN16

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.050102

Development of an electron gun operated at intermediate-high energies for electron energy-loss spectrometer

CHEN Xin¹ XU Weiqing² XU Longquan¹ TIAN Hongchun¹ LIU Yawei¹ ZHU Linfan¹

1(Hefei National Laboratory for Physical Sciences at Microscale and Department of Modern Physics,

University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

2(School of Science, Bengbu University, Bengbu 233030, China)

Abstract Background: In an electron energy-loss spectroscopy (EELS) experiment, the electron emitted by the electron gun collides with atoms and molecules, and the momentum and energy of the scattered electron are analyzed by EELS, then the information of electronic structure and collision dynamics of the target can be deduced. **Purpose:** A well designed intermediate-high energy electron gun with small beam size and divergence angle is needed to satisfy the requirement of EELS. **Methods:** To obtain the optimal beam condition, the electron optics software SIMION was utilized to simulate the space size and divergence angle of the electron beam at target position, the electron gun has a simple structure, i.e., consisting of thermionic cathode, grid electrode, anode electrode, focus electrode and deflection plates. The tuning range of electron energy is wide (1–3 keV) and easy to operate. **Results:** The beam size of 0.95 mm, divergence angel of 0.93°, and beam current of 6.27 μA of the constructed electron gun was obtained at 27 mm from the exit of electron gun at a beam energy of 1.5 keV. **Conclusion:** An electron gun which satisfies the requirements of EELS has been developed.

Key words Electron gun, Thermionic cathode, Electron optics, Divergence angle, Beam current, Electron energy-loss spectrometer

国家自然科学基金(No.U1332204、No.11604003)资助

第一作者: 陈昕, 男, 1991 年出生, 2014 年毕业于兰州大学, 现为硕士研究生, 研究方向为原子分子物理

通信作者: 朱林繁, E-mail: lfzhu@ustc.edu.cn; 徐卫青, E-mail: xuwxq412@mail.ustc.edu.cn

收稿日期: 2017-02-15, 修回日期: 2017-03-09

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.U1332204, No.11604003)

First author: CHEN Xin, male, born in 1991, graduated from Lanzhou University in 2014, master student, focusing on atomic and molecular physics

Corresponding author: ZHU Linfan, E-mail: lfzhu@ustc.edu.cn; XU Weiqing, E-mail: xuwxq412@mail.ustc.edu.cn

Received date: 2017-02-15, accepted date: 2017-03-09

电子能量损失谱学是一种重要的物质分析技术, 它基于电子与样品的非弹性散射过程, 通过测量不同能量损失的散射电子来获得物质的电子结构信息^[1-2]。电子能量损失谱学已被广泛用于原子分子的电子结构和碰撞动力学、固态材料表面物理化学性质、催化科学等领域的研究^[1,3]。对于低能电子入射, 一方面, 无法获得高空间分辨的靶样品信息^[3]; 另一方面, 由于样品靶分子波函数会受到入射电子的影响而发生扭曲, 不能得到纯粹的靶分子电子结构信息^[1]。因此, 开展中高能区的电子能量损失谱学研究就非常有必要了, 其关键之一在于研制一台产生中高能电子束的电子枪。之前的电子与原子分子碰撞研究小组的仪器主要集中于中低能区^[4-7], 中高能区仅有几个小组: 加拿大 Brion 小组^[8]谱仪工作能量为 3 keV 和 8 keV, 对应的能量分辨为 48 meV 和 1 eV, 缺点是不可转角度测量; 日本 Ohtani 小组^[9]谱仪工作在中能区 (500 eV 和 800 eV); 巴西 Souza 小组^[10]工作能量为 1 keV, 能量分辨为 0.6 eV。本课题组在自主研发的一台谱仪^[11]上 (工作能量为 1.5 keV 和 2.5 keV, 能量分辨约为 60 meV) 开展了一系列的原子分子结构和动力学研究工作^[12-14]。本文研制了一种电子束能量大范围可调的中高能区电子枪, 利用计算机模拟, 优化了其电子光学性能,

并进行了测试, 获得了电子枪发射束流的流强、发散角和束斑等参数, 与以前所用电子枪^[11]相比性能有了极大提升。

1 电子枪的设计

电子枪的作用为产生电子束并对其进行加速、聚焦和偏转, 基本结构如图 1 所示。主要由电子透镜系统和真空系统构成。电子透镜系统包括发叉型钨灯丝 V_0 、栅极 V_1 、阳极 V_2 、聚焦极 V_3 、偏转板 V_4 和钼片 (中心有直径 3 mm 的膜孔)。灯丝通过压片固定在栅极上, 其他电极之间通过聚四氟乙烯垫片进行绝缘隔离和机械定位, 并由螺丝固定在不磁不锈钢套筒内。每个电极上都有电极引线, 可连接到外面的高压电源。整个电子透镜系统固定在标准 CF35 法兰上, 形成一个独立模块, 可以方便连接于任何所需仪器设备上, 且带有独立的真空抽气接口, 可实现差分抽气, 对所使用场合的真空环境要求较低。电子枪真空系统主要由用于连接分子泵抽真空和真空度监测的法兰构成。另外, 电气贯穿引线焊接在 CF50 法兰上实现真空隔离, 通过 SHV 高压头与电源相连。

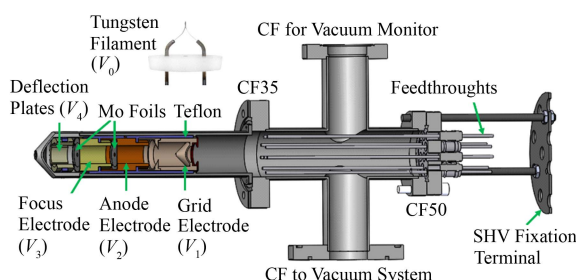


图 1 电子枪结构
Fig.1 Structure of the electron gun.

加电工作时 (电子枪内真空度要求好于约 10^{-4} Pa), 特殊形状的栅极 (图 1) 可以控制灯丝热发射电子束的形状和流强。阳极电位高于栅极, 可用于电子束的引出和聚焦^[15]。因此, 通过调节栅极和阳极电位大小可以控制发射电子束流强。经过阳极一级聚焦的电子束, 到达聚焦极后被二级聚焦至靶点处。调节偏转板所加电位可以实现电子束二维偏转。

2 电子光学模拟

电子枪的主要电子光学设计指标为: 1) 电子束能量在 1–3 keV 能区可调; 2) 电子束流强约为 5 μ A

(1 500 eV 能量下); 3) 样品处电子束径约为 1 mm, 发散角小于 1° 。为了实现上述目标, 电子透镜系统采用二级聚焦圆桶透镜。为了在不同电子束能量下获得电子枪电极几何尺寸、电子光学性能的最优化, 利用 SIMION 电子光学软件^[16]模拟了电子束的加速、聚焦和偏转过程。图 2 为 1 500 eV 能量下电子光学的模拟情况 (图 2 中曲线为电场等势线), 电子束在距出口 27 mm 处, 其束径为 0.70 mm, 发散角为 0.90° 。表 1 给出了 1–3 keV 能区几个能量点的模拟结果, 电子束径均小于 1 mm, 发散角均小于 1° , 且二者都随电子能量增加而逐渐减小, 满足电子光学设计要求。束流强度指标的检验在 §3 给出。

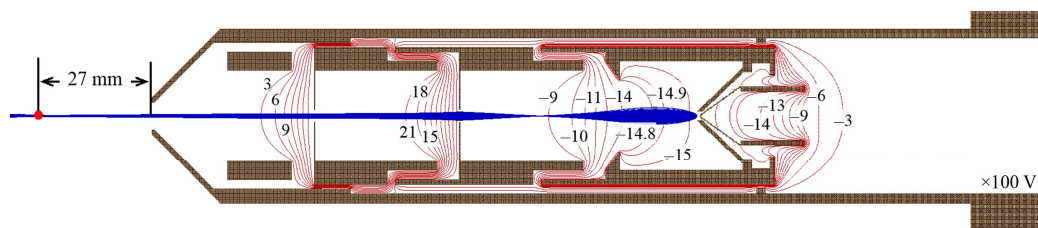


图2 电子能量为 1 500 eV 下电子枪的电子光学模拟结果和等势线
Fig.2 Simulation of electronic optics for electron gun at an electron energy of 1 500 eV and the equipotential lines of the electric field.

表 1 不同电子能量下的电子光学模拟结果
Table 1 Simulated results of electronic optics at different electron energies.

电子能量 Electron energy / eV	电位 V_1 V_1 / V	电位 V_2 V_2 / V	电位 V_3 V_3 / V	发散角 Divergence angle / (°)	束斑直径 Diameter of beam spot / mm
1 000	-1 003	-590	1 700	0.99	0.81
1 500	-1 503	-885	2 600	0.90	0.70
1 500	-1 501.5	200	-1 080	0.89	0.54
2 000	-2 003	-1 180	3 466	0.69	0.63
2 500	-2 503	-1 475	4 334	0.58	0.54
3 000	-3 003	-1 770	5 200	0.45	0.39

3 测试与结果分析

为了测试电子枪主要的性能指标，即电子束流强度、束斑尺寸和发散角，设计了如图 3 所示的测试配件来测量相关物理量。它由一个不锈钢桶状基座 A_1 和三片相互平行排列的喷涂有胶体石墨的钼片 (A_2 、 A_3 和 A_4) 组成。碰撞靶点和基座 A_1 与电子枪出口相距分别为 $D_0=10$ mm、 $D=27$ mm。 A_1 、 A_2 、 A_3 和 A_4 之间相距 $d=30$ mm， A_1 、 A_2 和 A_3 中心有一孔径为 $2a=1$ mm 的膜孔。基座和钼片间通过三根绝缘杆支撑固定，钼片外接电极，用于电流检测。

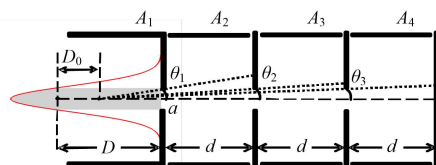


图3 测试配件示意图
Fig.3 Schematic diagram of the test accessory.

聚焦电子束在横截面上的电子密度分布满足高斯函数^[17] $n(r)$ (图 3 中曲线所示)，如图 4 所示， O 点电子密度最大，随半径 r 增大而逐渐减小。根据电流定义，环带 $r \rightarrow r+dr$ 内的电流微元 dI 为：

$$dI = ev_e n(r) ds = ev_e n(r) \cdot 2\pi r dr$$

$$n(r) = \frac{n_0}{\sigma_r \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad (1)$$

式中： e 为基本电荷电量； n_0 为电子密度幅度参数； σ_r 为高斯函数标准差（电子束径 $\Gamma_r = 2\sqrt{2\ln 2}\sigma_r$ ）。由于热电子能量分散 0.5 eV 远小于电子动能，例如 1 500 eV，可认为所有的电子速度近似相等，即 v_e 。据此，半径 r 内的总电子束流强度 I_c (即图 3 中曲线下方阴影部分所含的电子) 为：

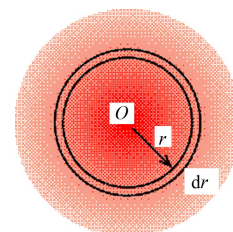


图4 电子束密度分布示意图
Fig.4 Schematic diagram of electron density distribution.

$$I_c(r) = \int_0^r dI = \int_0^r ev_e n(r) \cdot 2\pi r dr$$

$$= \sqrt{2\pi} ev_e n_0 \cdot \sigma_r \left[1 - \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_r^2}\right) \right] \quad (2)$$

为了得到电子束径 Γ_r ，可以通过调节电子枪偏转板电压来偏转电子束，使得束流最大可能地通过基座小孔，同时检测 A_1 、 A_2 、 A_3 和 A_4 上的电流，根据：

$$\eta = \frac{\sum_{i=2}^4 I_i}{\sum_{i=1}^4 I_i} = \frac{I_c(a)}{I_c(\infty)} = 1 - \exp\left(-\frac{a^2}{2\sigma_r^2}\right), I = \sum_{i=1}^4 I_i \quad (3)$$

可以反推得 σ_r , 即得到 A_1 处的电子束径 Γ_r 。其中: η 为电子束通过 A_1 膜孔的通过率; $I_i (i=1, 2, 3, 4)$ 为相应部位 $A_i (i=1, 2, 3, 4)$ 上检测到的电流值; I 为电子束总流强。

同理, 假定电子束发散角分布也满足高斯函数, 且近似认为电子在配件中沿着发散角方向直线飞行, 因此可以获得在不同发散角度 θ_j 内 (如图 3 所示, 可根据几何关系得到) 的电子束所占比例:

$$\varepsilon_j = \frac{\sum_{i=1+j}^4 I_i}{\sum_{i=1}^4 I_i} = 1 - \exp\left(-\frac{\theta_j^2}{2\sigma_\theta^2}\right) \quad (4)$$

式中: $j=1, 2, 3$; σ_θ 为高斯函数标准差; 参数 $\Gamma_\theta = \sqrt{2\ln 2}\sigma_\theta$ 为束流发散角。

3.1 电子枪测试工作模式

测试时, 电子枪灯丝电源被浮置在负主高压电源上, 束流聚焦处为地电位。因此, 主高压电源的电压值决定了电子束最终的能量。栅极的主要作用是控制电子束发射形状、强度和微聚焦, 其电位要稍低于灯丝电位。实际操作中, 也将栅极电源浮置在负主高压电源上。阳极电位远高于灯丝电位, 与栅极一起构成一级聚焦。聚焦极与阳极一起作为主要的聚焦透镜, 通过调节所加电位将电子束聚焦至靶点处。阳极和聚焦极都有电源单独供电。

3.2 结果分析

为了评估某个电极对束流聚焦特性和束流强度的影响, 通过固定优化后的其他电极电压, 改变该电极电压, 测量电子束通过 A_1 膜孔的通过率 η 可以获得相关信息。以电子能量 1 500 eV 为例, 图 5(a) 显示了随着栅极电位 V_1 减小 ($V_2=-890$ V, $V_3=2 600$ V), 总束流强度 I 近似线性减小; 通过率 η 先增大至最大值, 再逐渐减小。图 5(b) 为 I 、 η 与阳极电位 V_2 的变化关系 ($V_1=-1 503$ V, $V_3=2 600$ V), 随着 V_2 逐渐增大, I 先逐渐减小至最小, 再线性增大; η 先近似线性增大, 再缓慢增大至最大值。

为了评估式(3)的聚焦束模型的正确性, 对比了实验测量和 SIMION 模拟得到的束径 Γ_r 。加速模式下 ($V_1=-1 503$ V, $V_2=-885$ V, $V_3=2 600$ V), 测得 $\eta=53.93\%$, $\Gamma_r=0.95$ mm; 模拟得到 $\eta=71.64\%$, $\Gamma_r=0.70$ mm (表 1), 其相对偏差分别为 32.84% 和 26.32%。相应地, 减速模式下 ($V_1=-1 501.5$ V, $V_2=200$ V, $V_3=-1 080$ V), 测得 $\eta=70.76\%$, $\Gamma_r=0.75$ mm; 模拟得到 $\eta=78.89\%$, $\Gamma_r=0.54$ mm (表 1), 其相对偏差分别为 11.49% 和 28.00%。可见, 测量值和模拟值之间存在一定差异, 但其偏差在可接受范围内, 这是因为: 1) 电子束流强较大, SIMION 模拟过程没有考虑空间电荷效应; 2) 加速模式下, 聚焦极 V_3 和偏转板 V_4 之间压差很大, 引起电场分布发生畸变 (偏转板处为正方形分布), 进而导致电子束束斑的畸变。

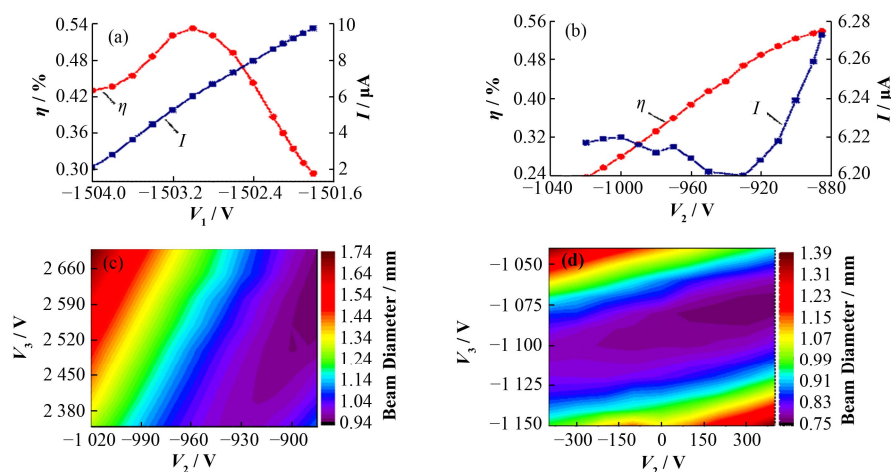


图 5 电子能量为 1 500 eV 下电子枪测试结果
Fig.5 Test results of electron gun at electron energy of 1 500 eV.

由不同实验条件下测量得到的 η , 根据式(3)可以获得相应的电子束径大小。图 5(c)和(d)分别是加速和减速模式下测量得到的束径 Γ_r 随 V_2 和 V_3 变化的等高线图。加速模式下, Γ_r 等高线呈斜带状分布,

倾斜斜率 k_a 约为 6.28, 最小束径分布于 $V_2 > -970$ V 区域; 减速模式下, Γ_r 等高线也呈斜带状分布, 倾斜斜率 k_d 约为 0.04, 远小于 k_a , 最小束径分布于 $V_3 > -1 130$ V 区域。这意味着减速模式下, Γ_r 在 V_2

和 V_3 构成的平面内具有更宽广、更稳定的最小束斑分布区间。

同时，通过测得各钨片 A_i 上的电流 I_i ，根据式(4)可以获知电子束发散角的情况。例如，在 1 500 eV 电子能量下，测得减速模式($V_1=-1\ 501.5\text{ V}$ ， $V_2=200\text{ V}$ ， $V_3=-1\ 080\text{ V}$)下各电流值分别为： $I_1=0.696\ \mu\text{A}$ ， $I_2=0.653\ \mu\text{A}$ ， $I_3=0.459\ \mu\text{A}$ ， $I_4=0.509\ \mu\text{A}$ 。据此，电子束发散角小于 $\theta_1=1.68^\circ$ 的占 $\varepsilon_1=69.96\%$ ；发散角小于 $\theta_2=0.61^\circ$ 的占 $\varepsilon_2=41.78\%$ ；发散角小于 $\theta_3=0.37^\circ$ 的占 $\varepsilon_3=21.97\%$ 。利用式(4)拟合，可得 $\sigma_\theta=0.79^\circ$ 、 $\Gamma_\theta=0.93^\circ$ ，与模拟得到的束流发散角 0.89° （表 1）符合得很好。因此，这一结果验证了电子束发散角分布满足高斯函数的模型，检测结果也显示满足所需指标。

4 结语

本文研制了一台能量在 1–3 keV 可调的电子能量损失谱仪用中高能电子枪，并测试了电子枪发射束流的特性。为了获得最优的束流条件，利用 SIMION 电子光学软件模拟了电子发射源大小和初始发散角对靶点处的束斑大小和束流发散角的影响。在电子能量 1.5 keV 下，在离电子枪出口 27 mm 处可获得束径约 0.95 mm、束流发散角约 0.93° 和束流强度 $6.27\ \mu\text{A}$ 的电子束，满足电子能量损失谱仪的使用要求。同时，电子枪测试和模拟结果吻合得较好，验证了聚束电子束电子密度和发散角分布的高斯函数模型。

参考文献

- Inokuti M. Inelastic collisions of fast charged particles with atoms and molecules—the Bethe theory revisited[J]. *Reviews of Modern Physics*, 1971, **43**(3): 297–347. DOI: 10.1103/RevModPhys.43.297.
- 朱林繁, 凤任飞, 王映雪, 等. 高分辨快电子能量损失谱仪的改进[J]. *核技术*, 2001, **24**(8): 663–667. ZHU Linfan, FENG Renfei, WANG Yingxue, *et al.* New development of high resolution fast electron-energy-loss spectrometer[J]. *Nuclear Techniques*, 2001, **24**(8): 663–667.
- Ibach H. *Electron energy loss spectrometers*[M]. Heidelberg: Springer-Verlag, 1991.
- Tanaka H, Brunger M J, Campbell L, *et al.* Scaled plane-wave born cross sections for atoms and molecules[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2016, **88**(2): 025004. DOI: 10.1103/RevModPhys.88.025004.
- Jones D B, Neves R F C, Lopes M C A, *et al.* Theoretical and experimental differential cross sections for electron impact excitation of the electronic bands of furfural[J]. *Journal of Chemical Physics*, 2016, **144**(12): 124309. DOI: 10.1063/1.4944615.
- Suzuki T Y, Suzuki H, Ohtani S, *et al.* Asymptotic behavior of apparent generalized oscillator strengths for optically forbidden transitions in rare-gas atoms[J]. *Physical Review A*, 2007, **75**(3): 032705. DOI: 10.1103/PhysRevA.75.032705.
- Hoshino M, Ishijima Y, Kato H, *et al.* Change in resonance parameters of a linear molecule as it bends: evidence in electron-impact vibrational transitions of hot COS and CO₂ molecules[J]. *The European Physical Journal D*, 2016, **70**(5): 1–13. DOI: 10.1140/epjd/e2016-70085-9.
- Feng R, Cooper G, Burton G R, *et al.* Absolute photoabsorption oscillator strengths by electron energy loss methods: the valence and S 2p and 2s inner shells of sulphur dioxide in the discrete and continuum regions (3.5–260 eV)[J]. *Chemical Physics*, 1999, **240**(3): 371–386.
- Suzuki T Y. Studies for excitation in rare gas atoms by electron impact: asymptotic behaviors of generalized oscillator strengths[D]. Tokyo: University of Electronic-Communications, 2000.
- Da Silva F F, Duflot D, Hoffmann S V, *et al.* Electronic state spectroscopy of halothane As studied by ab initio calculations, vacuum ultraviolet synchrotron radiation, and electron scattering methods[J]. *Journal of Physical Chemistry A*, 2015, **119**(31): 8503–8511. DOI: 10.1021/acs.jpca.5b05308.
- 凤任飞. 高分辨快电子能量损失谱仪的研制[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 1993. FENG Renfei. Development of a high-resolution electron energy-loss spectrometer[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 1993.
- Xu W Q, Sun J M, Wang Y Y, *et al.* Generalized oscillator strengths and integral cross sections for the valence-shell excitations of oxygen studied by fast electron impact[J]. *Physical Review A*, 2010, **82**(4): 042716. DOI: 10.1103/PhysRevA.82.042716.
- Vos M, McEachran R P, Zhu L F. A comparison of the theoretical and experimental results for keV electron scattering from argon[J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2014, **47**(5): 055201.

-
- 14 Lin M, Liu Y W, Zhong Z P, *et al.* Decay pathways of superexcited states of nitrous oxide[J]. Chinese Physics B, 2014, **23**(5): 053403.
- 15 薛冬冬, 孙秀宇, 游燕, 等. 低能量电子枪的研发[J]. 真空电子技术, 2016, (1): 34–37.
XUE Dongdong, SUN Xiuyu, YOU Yan, *et al.* Development of a low energy electron gun[J]. Vacuum Electronics, 2016, (1): 34–37.
- 16 David J M, David A D. SIMION 8.0 user manual[M]. United States of America: Scientific Instrument Services Inc., 2007.
- 17 任黎明, 陈宝钦. 电子束曝光高斯分布束斑的 Monte Carlo 模拟[J]. 微细加工技术, 2001, **19**(3): 60–63.
REN Liming, CHEN Baoqin. Monte Carlo simulation of Gauss-distribution beam spot in electron beam lithography[J]. Microfabrication Technology, 2001, **19**(3): 60–63.