

文章编号 1004-924X(2007)06-0829-06

应用于纳米级聚焦离子束系统的静电透镜设计

李文萍¹, 顾文琪²

(1. 北京航空航天大学, 北京 100083; 2. 中国科学院电工研究所, 北京 100080)

摘要:在不同束流和能量下对离子光柱体进行了优化设计。给出了用阻尼最小二乘法设计的单个透镜和透镜系统,并研究了像平面处的离子束性能。采用先分解再组合的方法确定单个透镜参数,并以大束流、无限大放大倍数下像差系数与焦距的比为优化目标。选取工作模式时综合考虑了系统的光学性能和可实现性,大束流下采用平行模式,小束流下采用交叉模式,设计的透镜系统在大、小束流下分别选轴上像差和放大倍数为优化目标。计算表明,2 nA束流下像差为16.33 nm,放大倍数为-0.539 095 5,束斑直径为31.52 nm;2.5 pA束流下像差为2.15 nm,放大倍数为0.084 359 9,束斑直径为4.73 nm。此离子光柱体能够获得纳米量级的离子束,并且只需调整第二透镜第二、第三电极之间的距离以及第二电极电位(对源)就能改变样品处的束能,增加了光柱体的应用范围,实现了一套系统内同时具有刻蚀、沉积、注入和离子成像等功能。

关键词:聚焦离子束;静电透镜;阻尼最小二乘法;工作模式;束流密度分布

中图分类号: TN16; TH703 **文献标识码:** A

Design of electrostatic lenses in nanometer scale focusing ion beam system

LI Wen-ping¹, GU Wen-qi²

(1. *Beihang University, Beijing 100083, China;*

2. *Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

Abstract: A new focusing system was designed by optimizing its optical properties in different beam currents and energies. Damped least square method was used to design a single lens and lens system. The single lens was designed through combination of separating and assembling, and the ratio of aberration coefficient and focus length at infinite magnification was chosen as the objective. Both optical properties and practicability were considered when choosing the working modes between lenses. Collimated mode was used in the larger beam current while crossover mode was in the smaller one. Axial aberration and magnification were the objective in bigger beam current and in the smaller one respectively when optimizing the two lenses. The results show that the resolution is 31.52 nm (the magnification is -0.539 095 5 and the aberration is 16.33 nm) and 4.73 nm (the magnification is 0.084 359 9 and the aberration is 2.15 nm) under beam current of 2 nA and 2.5 pA. The lens system can work under different beam energies when adjusting the potential on the second plane and the space between the second plane and the third plane of the lens 2, which will enlarge its applications, and the etching, deposition, implantation and imaging can be realized in the same system.

收稿日期:2006-07-26;修订日期:2006-12-18.

基金项目:科技部科学仪器设备升级改造专项项目(No. 2005JG100050)

Key words: focusing ion beam; electrostatic lens; damped least square method; working mode; current density contours

1 引言

聚焦离子束(Focused Ion Beam, FIB)技术诞生在 20 世纪 70 年代后期的美国^[1],最初主要用作扫描离子显微镜。因为离子束在 IC 产业中具有刻蚀、注入、淀积等多种功能^[2,3],FIB 的高分辨率既适应了产品向微型化发展,又具备离子束的所有功能,很快就得到了广泛的应用。随着 ULSI 规模的扩大和 MEMS 微机电系统的兴起^[4,5],FIB 系统逐渐显示出它在纳米加工和 IC 设计上的优越性,即缩短工艺流程,提高材料的利用率。FIB 技术的发展和应用的扩展对 FIB 装置提出了更高的要求:不仅要在大束流加工时稳定工作,还需在小束流下获得细束斑用于纳米领域^[6]。

目前聚焦离子束装置种类繁多,多是针对某一类功能而设,很少在一套设备内实现离子束的各项功能。聚焦系统是离子光柱体的基本,是获得纳米量级离子束的前提。单级透镜很难满足纳米级束斑的需要,一般采用两级透镜。前人的优化大多针对单个透镜特定指标,比如 M. Szilagyi 等人致力于寻找球差系数小的透镜^[7],而对其它指标和透镜系统较少涉及。用于透镜设计的优化算法主要有动态规划法、复合形法和阻尼最小二乘法^[7]。虽然用动态规划法可以得到光学性能很好的透镜,但是所得结构往往非常复杂,难于加工,实用性差。复合形法算法简单,精度较高,但是每次搜索都必须计算轴上电位分布,优化多维

问题时非常繁琐。阻尼最小二乘法是改进的最小二乘法,不仅简化了计算过程,能够有效地处理多维问题,而且精度较高、实用性强,但对设计者的要求较高。本文首先利用阻尼最小二乘法确定单个透镜的参数,然后在不同束流下对透镜系统进行优化,并研究了透镜系统的性能。

2 阻尼最小二乘法

最小二乘法主要用于一类特殊目标的最优化,其目标可表示为 $F(x) = \sum_{i=1}^m f_i^2(x)$ ($x \in E^n$)。其中 $f_i = \omega_i f_i^*$, ω_i 称为加权函数, f_i^* 代表轴上的几何像差和色差; $x \in E^n$ 表示 x 为 n 维欧氏空间的一个点,且 $m \geq n$ 。利用 $f_i(x)$ 及其偏导数在极小点 x^k 附近作线性逼近,代入式(1)得到 $F(x)$ 的一个二次逼近函数。

$$F(x) = \sum_{i=1}^m \left[f_i^2(x^{(k)}) + \sum_{j=1}^m a_{ij} (x_j - x_j^{(k)}) \right]^2, \quad (1)$$

其一阶偏导数 $a_{ij}(x) = \frac{\partial f_i(x)}{\partial x_j}$, $i=1, 2, 3, \dots, m$; $j=1, 2, 3, \dots, n$, 这样最优化问题转换为求解线性方程组 $\nabla F(x) = \frac{\partial F}{\partial \Delta x_j} = 0$, 其中, $\Delta x_j = x_j - x_j^{(k)}$, 将式(1)代入线性方程组整理得:

$$\sum_{i=1}^m a_{ik} \left[f_i + \sum_{j=1}^n a_{ij} (x_j - x_j^{(k)}) \right] = 0, \quad (2)$$

其矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & \cdots & a_{m1} \\ a_{12} & a_{22} & \cdots & a_{m2} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{1n} & a_{2n} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \cdots \\ f_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & \cdots & a_{m1} \\ a_{12} & a_{22} & \cdots & a_{m2} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{1n} & a_{2n} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \cdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} = 0, \quad (3)$$

即 $A^T F + A^T A \Delta X = 0$ 。有时为了降低求 $A^T A$ 逆矩阵的复杂度,引入正阻尼因子 ρ , 用 $A^T A + \rho^2 I$ 替代 $A^T A$ 求解线性方程组,这就是阻尼最小二乘法。它可以求解多维多目标优化问题,变量包括透镜的位置、比例因子及电极电位,参数调整后轴上电位分布等比例缩放,无需重新

计算场分布,且阻尼因子的引入加快了收敛速度,可以用于优化光柱体。

3 透镜系统的设计

在光柱体优化设计中,往往选取束斑直径作

为优化的目标。细束粒子系统中,束斑直径可以近似为:

$$d_{\text{spot}} = \sqrt{(Md_o)^2 + d_s^2 + d_c^2}, \quad (4)$$

其中, M 为系统的放大倍数, d_o 为虚源直径, 一般取 50 nm, $d_s (\propto \alpha_o^3, \alpha_o$ 是物方束半角) 为系统球差弥散圆的直径, $d_c (\propto \alpha_o \Delta E/E)$ 为系统色差弥散圆的直径, E 表示聚焦离子束的能量。和电子束相比, 离子束的能量散度大, 一般 $\Delta E = 5$ eV 或者更大, 因此, 像差中色差所占比重很大。随着束流的增大, 球差的影响也逐渐增大。要获得小束径, 应使 M, d_s 和 d_c 尽可能小。根据拉格朗日-亥姆霍兹关系 $MM_r \sqrt{V_i/V_o} = 1$, 其中 V_i 为加速电压, V_o 是吸极电压, M_r 为角放大倍数, 可知 M 和 M_r 成反比。相同参数下, M 减小则 M_r 增大, 经过透镜后, 束半角增加像差随之增加, 所以 M, d_s 和 d_c 不能同时为最小。FIB 系统的束流可以表示为:

$$I_p = \pi \alpha_o^2 (dI/d\Omega), \quad (5)$$

其中 α_o 含义同上, 角电流密度 $dI/d\Omega$ 为聚焦离子束的离子源参数。束流和束半角的平方成正比。依据式(4), 大束流下像差占束径的绝大部分; 小束流下, 由放大倍数引起的那部分束径不能忽略。设计过程包括单透镜的优化、工作模式的选取、透镜系统性能的研究。

3.1 透镜的设计优化

改变透镜结构参数时, 轴上电位分布将发生变化, 上面介绍的阻尼最小二乘法不能直接应用到单个透镜的设计中, 为此这里将单透镜分解成几个透镜进行优化。Lens 1 初步选用光学性能良好、机械上容易实现的三极单透镜, 它和吸极合在一起等效为三个两极透镜进行优化, 如图 1 所示。设计过程是: 根据初始的结构尺寸利用二阶有限元素法^[8]计算静电透镜的场分布, 相对精度

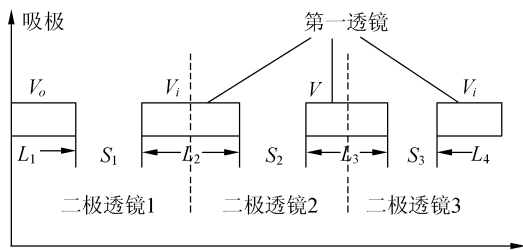
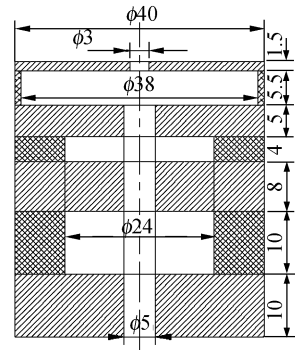


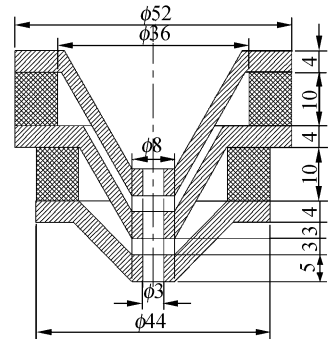
图 1 吸极和 lens 1 的等效原理

Fig. 1 Equivalent lenses of extraction and lens 1

为 10^{-15} , 然后采用阻尼最小二乘法优化三个透镜组成的光柱体。本设计中离子源采用电工所微纳加工部研究的液态金属离子源 DF-01^[9], 加速电压为 30 kV (即束能为 30 keV), 吸极电压为 6.7 kV, 角电流密度为 $20 \mu\text{A}/\text{sr}$, 虚源直径为 50 nm。约束条件为: 透镜电极电位 V 小于加速电压, 真空击穿电压为 10 kV/mm。大束流下 ($>1\text{nA}$) 放大倍数无限大时的 c_s/f_o 和 c_c/f_o 作为优化的目标, 其中 c_s, c_c 分别为透镜的物方球差和色差系数, 透镜物方渐近焦距 f_o 。近似等于物和透镜中心的距离。式(5)中, 因为角电流密度为 $20 \mu\text{A}/\text{sr}$, 那么物方束半角大于 4 mrad。将束半角、能散、能量以及 c_s, c_c 代入式(4), 为了保证球差弥散圆斑 ($6.4 \times 10^{-8} c_s$) 和色差弥散圆斑 ($6.667 \times 10^{-7} c_c$) 处于同一量级, c_c 的权值大于 c_s 的权值。通过调整三个等效透镜位置、比例因子和电极电压可以实现对 lens 1 极板长度 L 和极间间隙 S 和电极电位等参数得到目标的极小值列于表 1。将三个等效透镜的结构参数结果换算成吸极和 lens 1, 如图 2(a) 所示。



(a)



(b)

图 2 透镜的结构及尺寸: 单位 mm

Fig. 2 Structures of lenses; Unit mm

Lens 2 初选为三极单透镜,依据 lens 1 的等效原理将其分解成两个两极透镜,下面的设计过程同 lens 1 的设计类似。算出 Lens 2 结构尺寸,考虑到实际应用中需安装二次电子和二次离子的探测器件,采用锥形结构如图 2(b)所示。其中第一电极和中间电极锥角为 60° ,第三电极的锥角为 90° 。

3.2 工作模式的选取

两个透镜共有交叉、发散、平行和收敛四种工作模式,如图 3 所示。

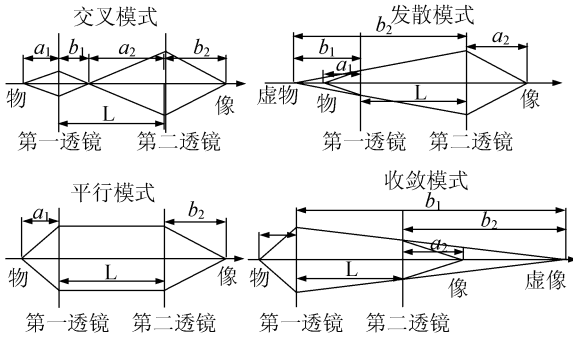


图 3 两个透镜的工作模式

Fig. 3 Working modes between lenses

假定透镜物距、像距分别用 a 和 b 表示,两个透镜和像屏固定后,那么四种模式下的 a_1 、 b_2 以及透镜间距 L 固定。假定物的电位分布为 V_o ,像处的电位分布为 V_i ,可近似算出四种模式下放大倍数。交叉模式下,第一透镜的放大倍数为 $|M_1| = \sqrt{V_o/V_i} \cdot b_1/a_1$,第二透镜的放大倍数为 $|M_2| = b_2/(L - b_1)$,相乘后得出系统总的放大倍数为 $|M| = b_1 b_2 \sqrt{V_o/a_1(L - b_1)} \sqrt{V_i}$ 。平行模式下相当于一个透镜,所以放大倍数为 $|M_p| = b_2 \sqrt{V_o/a_1} \sqrt{V_i}$ 。发散模式下,第一透镜的像距为虚物与透镜中心的距离 $|M_1| = \sqrt{V_o/V_i} \cdot b_1/a_1$,第二透镜的物距为虚物与透镜中心的距离 $|M_2| = b_2/(L + b_1)$,所以总的放大倍数为 $|M_d| = b_1 b_2 \sqrt{V_o/a_1(L + b_1)} \sqrt{V_i}$ 。收敛模式下,第一透镜的像距为虚像与透镜中心的距离 $|M_1| = \sqrt{V_o/V_i} \cdot b_1/a_1$,第二透镜的物距为虚像与透镜中心的距离 $|M_2| = b_2/(b_1 - L)$,所以总的放大倍数为 $|M_c| = b_1 b_2 \sqrt{V_o/a_1(b_1 - L)} \sqrt{V_i}$ 。比较发散模式(d)、平行模式(p)和收敛模式(c)的放大倍数,发现在相同的系统参数下 $|M_d| < |M_p| < |M_c|$ 。

表 1 透镜的优化参数

Tab. 1 Optimized parameters of lenses

类别	f_o (mm)	极板电位(kV)			放大倍数	c_s/f_o	c_c/f_a
		1	2	3			
吸极和第一透镜的等效透镜	12.11	0	20.519	0	5 868.84	5.223 3	3.891 8
第二透镜	13.95	0	20.672	0	5 868.84	22.877 5	3.067 0

表 2 不同模式下的成像条件

Tab. 2 Image conditions under different working modes

模式	物 (mm)	吸极		第一透镜 位置(mm)	第一透镜电极电位(kV)			第二透镜 位置(mm)	第二透镜电极电位(kV)			像 (mm)
		位置(mm)	电位(kV)		1	2	3		1	2	3	
平行	0	2.5	23.3	26.5	0	20.52	0	241	0	29.77	0	265
交叉	0	2.5	23.3		0	24.08	0		0	20.02	0	265(50)

表 3 不同能量下的光学参数

Tab. 3 Optical parameters under different beam energies

束能 (keV)	源尖电位 (kV)	吸极电位 (kV)	第一透镜电极电位(kV)			第二透镜电极电位(kV)			第二透镜 第二、三电极间距 (mm)
			1	2	3	1	2	3	
30	30	23.3	0	23.36	0	0	18.985	0	3
50	50	43.3	20	43.36	20	20	35.52	0	8

为了研究不同工作模式下系统的放大倍数和像差,首先利用 Munro 公司的光柱体设计软件 Projection 计算了不同束流下后三种工作模式下的放大倍数和像差:放大倍数的关系和理论结果一致;当束流 < 200 pA 时,像差 $A_d < A_p < A_c$,当束流 > 200 pA 时, $A_p < A_d < A_c$ 。由于成像条件的限制,对交叉模式下的性能分析采用 Optics 程序,系统的放大倍数可以通过改变交叉点的位置进行调整,像差大于平行模式下的像差。理论上,大束流宜采用平行模式,小束流下为获得高分辨率宜用发散模式^[10],但是实际应用中发散模式下透镜电位以及位置的波动对束的影响很大,而交叉模式相对来讲更稳定,因此小束流下采用交叉模式。

3.3 透镜系统的性能研究

聚焦离子束除了成像功能外,还可以进行微加工、光刻和注入等,不同的应用对束性能的要求也不完全相同,比如分辨率可以反映成像的优劣,束流密度的分布能反映微加工、光刻和注入的性能,很难找到一个统一的衡量指标。因为不同束流下放大倍数 M 、 d_s 和 d_c 在束斑直径中所占比率不尽相同,所以本文分别研究了大束流(2 nA)平行模式和小束流(2.5 pA)交叉模式下的放大倍数、像差和束流密度分布。

式(5)中,角电流密度为 $20 \mu\text{A}/\text{sr}$,平行模式和交叉模式的物方束半角分别为 5.6419 mrad 和 0.2 mrad,然后利用透镜场分布和阻尼最小二乘法确定出两个透镜位置和电极电位,并分别计算了两种工作模式下的放大倍数和五级像差。像平面处的束斑电流密度分布采用点扩散函数法获得,首先从离子源各区域选取很多具有代表性的离子,计算出它们的实际轨迹,然后统计它们在像平面处的落点就构成了束斑电流密度分布。表2列出了两种模式下透镜系统的成像参数,其中两个透镜的尺寸比率为1,平行和交叉模式下的放大倍数为 -0.5390955 和 0.0843599 。图4绘出了平行模式下像平面处的束斑电流密度分布,轮廓线的电流密度依次为 99%、88%、60%、40%、12%和 1%。电流密度分布图上,一般用 12%—88%之间的边沿距离作为成形束的像差,其数值和点源高斯分布的半宽高相对应。图4文字的上半部分的参数主要针对于成形束,对点源

的纯聚焦系统没有什么影响,这里设为零。像平面处的束半角(A)为 4.9656 mrad,能散(dV)为 5 eV,散焦距离(实际像平面和高斯像平面的距离,靠近源的方向为正)为 $2.6 \mu\text{m}$ 。平行模式下的像差为 16.33 nm,根据式(5)可得系统的束斑直径为 31.52 nm。交叉模式下像差约 2.15 nm,束径为 4.73 nm。

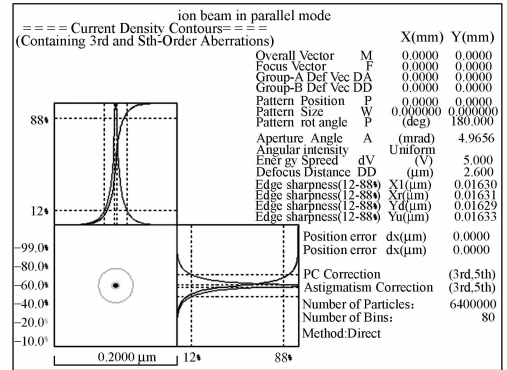


图4 平行模式下的束流密度分布图

Fig. 4 Current density contours in collimated mode

另外所设计的系统扩展性强,只需改变很少参数就可以应用在不同能量下。如 30 keV 下,可以实现 SIM 和淀积功能; 50 keV 下可以实现注入和刻蚀等功能。聚焦系统中只需调整第二透镜第二、三电极间的距离以及第二电极电位(对源)就能改变样品处的束能,增加了系统的应用范围。表3列出了 30 keV 和 50 keV 下光学参数,能量提高后束径减小为 4.15 nm。

4 结论

介绍了阻尼最小二乘法的基本思路 and 求解步骤,经过等价分解后,单个透镜可以用阻尼最小二乘法进行优化确定结构参数。从理论上分析并计算了四种工作模式下的放大倍数和像差后,决定大束流下采用平行模式,小束流下采用交叉模式。这样聚焦系统不仅能够大束流时快速稳定的加工,而且可以获得十几个纳米的细束斑。最后利用优化后的透镜场分布和阻尼最小二乘法设计整个光柱体,并绘制了束流密度分布图。调整 lens 2 电极电位和电极间距后,可在不同能量下获得性能优良的离子束,满足刻蚀、注入、淀积等不同领域的应用。另外,第二透镜采用锥形结构,便于

和其它设备比如扫描电镜等联机组成双束系统,从而增加了系统的可扩展性。离子的质量比电子大得多,相同情况下离子间的库仑效应将更明显,

尤其大束流工作下,如果在仿真计算中考虑到库仑力效应,将会更接近于实际情况,缩短设计周期,获得更高性能的 FIB 系统。

参考文献:

- [1] SELIGER R L. A high-intensity scanning ion probe with sub-micrometer spot size[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1979, 34(1): 310-312.
- [2] 刘立建, 谢进, 王家揖. 聚焦离子束(FIB)技术及其在微电子领域中的应用[J]. 半导体技术, 2001, 26(2):19-24.
LIU L J, XIE J, WANG J J. Focused ion beam technology and its applications in the field of microelectronics[J]. *Semiconductor Technolgy*, 2001, 26(2): 19-24.
- [3] GAO J S, XU Y, WANG X Y, *et al.*. ITO thin films prepared by electron beam evaporation with End-Hall ion source assisted without heating to the substrate[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(4): 397-402.
- [4] 吴一辉. 微机电系统(MEMS)专题文章导读[J]. 光学精密工程, 2005, 13(2):117-117.
WU Y H. A guide to reading micro electro-mechanical system(MEMS) Special subject[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2):117-117. (in Chinese)
- [5] SEO J, WANG X J. Magnetic-fluid micro-electromechanical light modulator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(5):542-547.
- [6] MSXKENZIE R A D. Developments and trends in the technology of focused ion beam[J]. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1991, B9(5): 2561-2565.
- [7] SZILAGYI M. Optimum design of electrostatic lenses [J]. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1983, B1(4): 1137-1140.
- [8] Munro's Electron Beam Software Ltd SOFEM Software, *User Manual(Version 3.2)*[M]. London(U. K.); Munro's Electron Beam Software Ltd, 2001.
- [9] 顾文琪, 马向国, 李文萍. 聚焦离子束微纳加工技术[M]. 北京:北京工业大学出版社, 2006.
GU W Q, MA X G, LI W P. *Nano-Micro Fabrication by Focused Ion Beam*[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2006. (in Chinese)
- [10] KIYOSHI S, TETSU S. Focused ion beam optical column design and consideration on minimum attainable beam size[J]. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1998, B16: 2462-2468.

作者简介:李文萍(1976-),女,山东人,北京航空航天大学理学院物理系讲师,主要从事电子显微镜和聚焦离子束系统的光学设计。E-mail:liwp@buaa.edu.cn