

文章编号: 0253-2239(2004)03-423-4

电子束曝光机偏转系统及可动物镜分析*

尹 明 张玉林

(山东大学电子束实验室, 济南 250061)

摘要: 电子束大扫描场偏转系统设计中,像差的确定是一个必须解决的实际问题。以 SDS-3 电子束曝光机的磁复合偏转系统为基础,以双通道扫描原理进行扫描,分析了像差与电子束主轨迹的关系。给出了可动物镜的条件,并利用这一条件分析电子束最佳轨迹的结构和方法。并使用计算机辅助设计研究电子束曝光机聚焦偏转系统的结构。由该电子束曝光机试验结果表明,复合系统结构简单紧凑,像差小而可以不用动态校正。采用矢量描写电子轨迹,以积分式表示像差。以 0.005 rad 半张角, 5×10^{-5} 的高压纹波, 50 mm 的像距, 10 mm \times 10 mm 扫描场的边脚处,使动态校正前的总像差为 0.03 μm 。

关键词: 成像光学; 电子束; 像差; 扫描系统; 可动物镜; 动态校正; 偏转

中图分类号: TN305.7 文献标识码: A

Deflecting System and Moving Objective Lens in Electron Beam Exposure Machine

Yin Ming Zhang Yulin

(*Electron Beam Laboratory, Shandong University, Ji'nan 250061*)

(Received 23 December 2002; revised 14 April 2003)

Abstract: In the design of electron beam deflection system with a large scanning field, determination of aberration is a practical problem. The relationship between the principal trajectory of electron beam exposure and aberrations has been investigated in combined round magnetic lenses and deflection system of SDS-3 electron beam machine. The double passageway principle in scanning system is used. Conditions of moving objective lens (MOL) are given and used for improving the performance of electron beam scanning system. The construction and the way to obtain the best trajectory have been analyzed. The structure of the electron beam focusing and deflection system of electron beam exposure machine is analysed with computer-aided design (CAD). The result of scanning system of this electron beam exposure machine indicates that the aberration of superimposed focusing-deflection system is so small that the dynamic correction is unnecessary. The electron trajectories are parameter of electrostatic deflection described in the vector form, the aberrations and structure equation are described in the integral form. The arrangement with 50 mm working distance at the 10 mm \times 10 mm deflection field with 0.005 rad aperture and 5×10^{-5} beam voltage ripple produces a total aberration disk of 0.03 μm before dynamic correction.

Key words: imaging optics; electron beam; aberration; scanning system; objective lens; dynamic correction; deflection

* 国家自然科学基金(90307003)与山东省高新技术研究和
发展计划(022070105)资助课题。

E-mail: sdyinming@sohu.com

收稿日期: 2002-12-23; 收到修改稿日期: 2003-04-14

1 引 言

电子束曝光技术是 20 世纪 60 年代发展起来的一种新的光刻技术,并在微电子制造方面得到广泛的应用和发展。如今它又成为微机电系统

(Microelectromechanical system, MEMS)的重要加工技术。在电子束曝光机系统的研制过程中为了解决大扫描场精度和工作频率的问题,发展了透镜后偏转系统。透镜后偏转系统,涡流效应容易控制,偏转后的电子束不再穿过透镜系统,克服了透镜激励而造成透镜前偏转存在的场旋转等问题。总的偏转像差也低于透镜前偏转系统。在这种结构中,当像平面进一步远离透镜时,某些像差,如畸变、场曲、像散减少了,而另一些像差,如球差、色差、彗差变坏了,对一个实际的透镜后偏转系统,最佳的像面位置在总像差的最小处。透镜后偏转系统有不可修正的缺点,偏转像差仍较大、偏转灵敏度低、中心分辨率较低以及电子之间作用效应的影响较大。为了解决大扫描场精度和工作频率的要求并摆脱如光栅扫描的庞大的机械结构等问题。奥希瓦等最早提出了可动物镜(Moving objective lens)的概念(1971年)。在可动物镜概念指导下,1977年奥希瓦作出了一个利用“可动物镜L”的复合偏转系统设计。但该设计完成后一直没得到实际应用。后来IBM公司VS-1电子束曝光机最早采用了其中的技术。但仅仅是将偏转置于物镜中,并非真正可动物镜概念。笔者认为当时的条件不可能实现这一概念^[1~5]。我们以SDS-3矢量扫描偏转系统为基础,对其扫描偏转输出进行反复修改,分析和计算获得了良好的结果。

2 可动物镜状态分析及条件

2.1 可动物镜电子光学路径及条件

首先我们分析可动物镜的电子光学路径及条件,在磁聚焦偏转系统中,高斯轨迹方程为

$$W''_1 - i\left(BW'_1 + \frac{B'W_1}{2}\right) = -iKDI, \quad (1)$$

$$K = \left(\frac{e}{2m_0U}\right)^{1/2}, \quad (2)$$

其中 W_1 为复坐标, i 为虚数单位, B 为透镜轴上磁通密度, U 为电子电压, I 为偏转器中的复电流, D 为偏转场上的磁密分布, m_0 为电子质量, e 为电子电荷。令 $a(z), b(z)$ 为(1)式的齐次方程的独立解,初始条件如下:

$$\begin{aligned} a(z_0) &= 0, \\ a'(z_0) &= 1, \\ b(z_0) &= 1, \\ b'(z_0) &= 0, \end{aligned}$$

这样(1)式的解可表示为

$$W_1(z) = a(z)S_0 + C(z)I, \quad (3)$$

其中 $C(z)$ 为电子束主轨迹, S_0 为电子从物点发出时的初始斜率。

如 $D(z)$ 为矩形分布,相应的 $B(z)$ 应为斜面分布。可动物镜系统必须加一个预偏转器将电子束偏入移动物镜中心。这时物镜是一个随预偏转量的变化而变化的电磁同步位移的物镜。图1为可动物镜的光学示意图。这一预偏转量的变化可以用磁移位的一级泰勒展开式表示

$$\phi(x-d, y, z) = \phi(x, y, z) - d \frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad (4)$$

这表示在透镜场 ϕ 上叠加一个偏转场 $-d \frac{\partial \phi}{\partial x}$,等价于透镜位移一个距离 d 。设 $B(z)$ 为轴对称磁透镜轴上场分布, $D(z)$ 为需要的轴上偏转磁密,因此得到

$$D(z) = -\frac{dB'(z)}{2}, \quad (5)$$

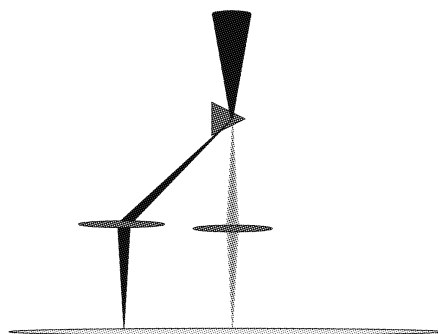


Fig. 1 Moving objective lens schematic diagram

经预偏转器偏转后进入磁透镜场的电子束受透镜场的聚焦作用,电子束一方面本身围绕主轨迹聚焦,另外整个电子束将绕透镜光轴旋转。这一旋转在透镜场的作用下使电子束具有向透镜光轴的会聚作用。于是当电子束射入像平面时,由预偏转产生的偏转量大大减少了,或者说对于在像平面上所获得的相同偏转量,受磁场聚焦作用的电子束走过的路径长得多。令主偏转线圈产生的偏转磁场 D 符合如下条件:

$$D = BC' + \frac{B'C}{2}, \quad (6)$$

这时电子束沿着一阶近似的由磁聚焦场和适当的偏转场叠加而形成的复合光轴前进。把(6)代入像差公式,可得到可动物镜的几何像差公式:

$$\begin{aligned}
K_S &= -\frac{1}{[\bar{a}'a'^2\bar{a}']_{z_1}z_0} \int_{z_0}^{z_1} \left\{ \bar{a}'a'a'' + \frac{\bar{a}a''a'^2}{2} + iK \left[-\frac{\bar{a}''a^2\bar{a}B'}{8} - \frac{\bar{a}'a^2\bar{a}'B'}{8} + \frac{\bar{a}a'^2\bar{a}B'}{8} + \frac{\bar{a}aa''\bar{a}B'}{8} \right] \right\} dz, \\
K_L &= -\frac{1}{[\bar{a}'ca'\bar{a}']_{z_1}z_0} \int_{z_0}^{z_1} \left\{ \bar{a}c'a'a'' + \bar{a}a'c'a'' + iK \left[-\frac{\bar{a}^2a'c'B'}{2} - \frac{\bar{a}a'a'c'B'}{2} \right] \right\} dz, \\
K_r &= -\frac{1}{[\bar{a}'ca'^2]_{z_1}z_0} \int_{z_0}^{z_1} \left\{ -\bar{a}a'c'a'' + iK \left[-\frac{\bar{a}''a^2cB'}{8} - \frac{\bar{a}a'^2cB'}{4} - \frac{\bar{a}aa''cB'}{4} - \frac{\bar{a}aa'cB'}{4} \right] \right\} dz, \\
K_A &= -\frac{1}{[\bar{a}'c^2\bar{a}']_{z_1}z_0} \int_{z_0}^{z_1} \left\{ \frac{\bar{a}a''c'^2}{2} + iK \left[-\frac{3\bar{a}^2c^2B}{8} + \frac{\bar{a}''c^2\bar{a}B'}{8} + \frac{\bar{a}'^2c^2B'}{8} - \frac{\bar{a}a\bar{a}'cc'B}{2} \right] \right\} dz, \\
K_F &= -\frac{1}{[\bar{a}'a'c^2]_{z_1}z_0} \int_{z_0}^{z_1} \left\{ -\bar{a}c^2a'' + iK \left[-\frac{\bar{a}''ac^2B'}{8} - \frac{\bar{a}a'c'cB'}{2} - \frac{\bar{a}c^2a''B'}{8} + \frac{\bar{a}ac'^2B'}{2} \right] \right\} dz, \\
K_D &= 0, \quad K_{TV} = 0, \quad K_{TE} = -\frac{iK}{[\bar{a}'c]_{z_1}z_0} \int_{z_0}^{z_1} \bar{a} \left[c'B + \frac{cB'}{2} \right] dz, \\
K_{TX} &= -\frac{iK}{[\bar{a}'a']_{z_1}z_0} \int_{z_0}^{z_1} \bar{a} \left[-\frac{a'B}{2} - \frac{aB'}{4} \right] dz,
\end{aligned} \tag{7}$$

其中 c' 为电子束主轨迹 $C(z)$ 在对应点 c 的导数, \bar{a} 为函数 $a(z)$ 在对应点 a 的共轭, a'' 为 $a(z)$ 在对应点 a 的二阶导数, K_S 为球差, K_L 为彗差长度, K_r 为彗差半径, K_F 为场曲, K_A 为像散, K_D 为畸变, K_{TV} 为束压横向色差, K_{TE} 为透镜激励横向色差, K_{TX} 为轴上色差。

2.2 透镜电流稳定度及其条件

因为磁透镜的焦距 f 与聚焦电流 I 、加速电压 V 之间的关系为

$$\frac{\Delta f}{f} = \left| \frac{\Delta V}{V} \right| + 2 \left| \frac{\Delta I}{I} \right|,$$

当聚焦电流不稳定时,色散半径表示为

$$\delta_c = \alpha \cdot f \sqrt{\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2 + 4\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2},$$

这里 α 为几何夹角, δ 为欲分辨最小距离。取 $\alpha = 5 \times 10^{-3}$ rad, $\delta = 1$ nm, 并常态要求下有

$$2\delta_c < (0.1 \sim 0.2)\delta,$$

可求出

$$\sqrt{\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2 + 4\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2} < 1 \times 10^{-5},$$

这就要求高压稳定度至少为

$$\Delta V/V < 7 \times 10^{-6},$$

聚焦线圈电流稳定度至少为

$$\Delta I/I < 3.5 \times 10^{-6},$$

这就是电子束曝光机物镜电源的一般要求。十

几年前我们完成一个稳定度 10^{-6} 量级(数小时)的静态恒流电源^[6]。作为一个大电流的复杂系统的噪声,百微伏的数量级并不算太大。而对 10^{-6} 量级的稳定度,目前的器件尚难以完成。但对一个可动物镜来说,一组静态的恒流电源变为八组动态电源(扫描电流随电压变化)。即使电流稳定度在一小的时间域不变,八对模数转换器组成的恒流电源输出噪声(即使模数转换器的输出动态瞬间幅度被忽略),对透镜电流稳定度的影响也难以解决。可见可动物镜的设想是非常优秀的。但实际完成的难度不仅仅是系统的设计繁杂性。解决透镜大电流的静态稳定度与可动物镜的动态输出的矛盾也成为必须的关键问题。

3 以扭曲环形线圈为第二偏转线圈的 SDS-3 曝光机偏转系统

直环线圈作为第二线圈,当该偏转线圈较前偏转线圈转一定角度时,可得到优化结果。但以直环线圈补偿的结果远不够满意^[7]。所有像差中,场曲仍是主要像差。为进一步减少场曲等像差。必须调整电子束主轨迹在穿越透镜时的旋量。为了使电子束在透镜中按需要作适度旋转,我们使用了一个逆向扭曲环形线圈代替直环线圈,完成了 SDS-3 电子束曝光机的偏转系统。图 2 表示逆向扭曲环形线

圈作为第二偏转线圈的优化结构透镜场和偏转场的轴向场量分布。

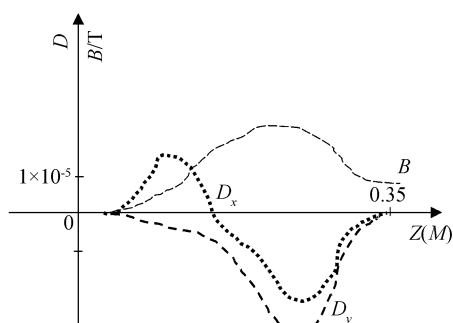


Fig. 2 Magnetic field dispersed of twisty annular coil

系统采用双层屏蔽隔离,各模块之间除静电隔离外,还有极严格的接地措施,消除计算机控制信号长线的反射及串扰。

系统的技术指标如下:

地址分辨力为 15 Bit,

逐点式扫描速率为 1 MHz,

系统噪声为 $300 \mu\text{V}$ 。

像差系数 K (单位为 μm)如下:

$$K_D = 0.132,$$

$$K_A = 0.0038,$$

$$K_L = 0.012,$$

$$K_S = 0.009,$$

$$K_{TV} = 0.002,$$

$$K_{TX} = -0.012,$$

$$K = 0.03,$$

曝光实验,参见图 3 斜线族及斜线头视角分辨 ($1 \mu\text{m}$)

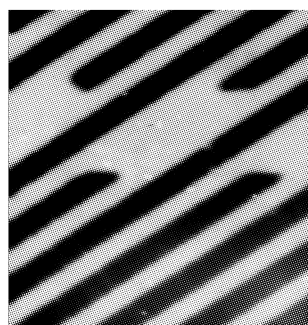


Fig. 3 View-angle resolution of oblique lines and oblique line points (line width is $1 \mu\text{m}$)

结论 众所周知,复合偏转场像差分析问题是一个

复杂的非线性问题。动态物镜即要满足一般物镜的大电流、高稳定性,又要满足动态偏转系统的高精度、高速度、高分辨率、低漂移和良好的动态稳定性,还要满足成本较低而系统前期高速运算与后期定位准确的特性。而其复杂的系统(由计算机系统控制八对高速模数转换器大电流输出的高稳定系统)令人难以用现有的部件(元器件)完成。

汇集 SDS-1、SDS-2 以及 EBES-40A 光栅扫描电子束曝光的扫描偏转系统的优势,使用了一个逆向扭曲环形线圈代替直环线圈。完成了 SDS-3 的偏转系统。在 0.005 rad 半张角, 5×10^{-5} 的高压纹波, 50 mm 的像距, $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 扫描场边脚处,使动态校正前的总像差为 $0.03 \mu\text{m}$ 。

参 考 文 献

- 1 Wang Zhanguo. The fabrication and characterization on nano-scale semiconductor. *Micronanoelectronic Technology* (微米电子技术), 2002, **39**(1):9~14 (in Chinese)
- 2 Pfeiffer H C. Projection reduction exposure variable axis immersion lenses; next generation lithography. *Vac. Sci. Technol.*, 1999, **B17**(11/12):2566~2576
- 3 Gao Wangrong, Yang Xiaochun, Huang Lin *et al.*. Signal-to-noise ratio and information capacity of a conform scanning fluorescence microscope. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(10):1229~1235 (in Chinese)
- 4 Dewolf P, Brazel E. Electrical testing application for scanning probe microscopes. *Solid State Technol.*, 2000, **38**(9):117~125
- 5 Tan Jinbin, Zhang Jie. Analysis of 3-D coherence imaginary property of the gradient-index lens. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(12):1484~1487 (in Chinese)
- 6 An Dexiang, Yin Ming. A SDS-2 multifunction electron beam scanning system. *Acta Electronica Sinica* (电子学报), 1987, **15**(3):27~31 (in Chinese)
- 7 Yin Ming, Sun Xiaojun, Zhang Yulin. Automatic compensation for temperature drift of deflecting output of E-beam system. *Microfabrication Technology* (微细加工技术), 1999, **17**(1):39~43 (in Chinese)
- 8 Gao Fuhua, Zeng Yangsuo, Xie Shiwei *et al.*. Using E-beam direct writing method to fabricate low-efficiency beam sampling grating. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2003, **2**(30):134~136 (in Chinese)
- 9 Liu Liangyun, Xiang Libin, Yang Jianfeng *et al.*. Simulation study of computed - tomography imaging spectrometer. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(6):805~809 (in Chinese)