

文章编号 1004-924X(2012)05-1069-07

微机电系统光学组件的系统级建模

李晓莹*, 李慧敏, 常洪龙, 何 洋, 焦文龙

(西北工业大学 陕西省微/纳米系统重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要:为提高微机电系统(MEMS)中光学系统整体仿真的准确性和效率,解决光学组件系统级建模存在的问题,提出了一种光学组件系统级建模方法,该方法可同时支持与 MEMS 系统级机械组件和电路组件共同仿真。首先,介绍了多端口组件网络方法、高斯光束特点和空间坐标系变换理论。接着,以微平面镜为例,介绍了光学组件系统级建模方法的流程。最后,采用 Verilog-A 硬件描述语言建立了包含多个典型光学组件的系统级光学库。使用该库的光学组件在 MEMS 集成设计工具 MEMS Garden 中搭建微扫描系统进行了仿真与测试。与商业软件 CoventorWare 的分析结果相比,提出的建模方法解决了扫描盲区问题,且非差分电压分析的误差小于 3%。结果显示,本文提出的建模方法精确有效,对 MEMS 的系统级设计有参考价值。

关键词:微机电系统(MEMS);光学组件;建模;Verilog-A 硬件描述语言

中图分类号:TH703;TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122005.1069

System-level modeling for MEMS optical components

LI Xiao-ying*, LI Hui-min, CHANG Hong-long, HE Yang, JIAO Wen-long

(Laboratory of Micro and Nano Electromechanical Systems,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

* Corresponding author, E-mail: xiaoy@nwpu.edu.cn

Abstract: To improve the accuracy and efficiency of the simulation for the optical system in a Micro-electro-mechanical System (MEMS) and to overcome the difficulties in the system-level modeling of MEMS optical components, a system-level modeling method was proposed to support the co-simulation for MEMS system-level mechanical components and electrical components. First, the modeling methodology of Multi-Port-Element Network (MuPEN), the characteristics of Gaussian beam and the theory of space coordinate transformation were introduced. Then, the modeling process of a micro-mirror was given to explain the modeling method of all optical components. Finally, using the hardware description language of Verilog-A, an optical library including some typical components was established. The non-differential voltage simulation results of the system-level scanning system were compared with those of CoventorWare and results show that the scanning system in former environment can eliminate the blind area, and the maximum error is within 3%. It indicates that the proposed modeling method for optical components could work effectively and accurately, and the study is significant value to the MEMS system-level design.

收稿日期:2011-12-27;修订日期:2012-02-16.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划(MEMS 重大专项)资助项目(No. 2007AA04Z347, No. 2009AA04Z320)

Key words: Micro-electro-mechanical Systems(MEMS); optical component; modeling; Verilog-A

1 引言

微机电系统(Micro-electro-mechanical System, MEMS)设计作为产品形成的第一步,对产品的开发具有举足轻重的作用。其多学科交叉,多能量场耦合的特点,使得以前基于工艺和版图的设计方法越来越不能满足 MEMS 设计需要。同时, MEMS 产品市场竞争日趋激烈,缩短研发周期,降低成本已经成为 MEMS 设计者的迫切需求。因此,发展微机电系统设计工具(MEMS CAD)受到该领域科研人员的广泛关注^[1]。借助于 MEMS CAD 对 MEMS 进行快速准确的建模与仿真,使得设计者在加工产品之前能预测其性能,是提高设计效率,降低研发成本,缩短研发周期的有效方法。

目前,国际主流的 MEMS CAD 软件均通过“系统级—器件级—工艺级”结构化分层设计理念来降低设计复杂性,提高设计自动化程度^[2-3]。其中,系统级设计利用系统级参数化组件库中的组件模型,可以对 MEMS 器件的整体性能进行快速的仿真,从而寻求合理的整体设计方案。

由于 MEMS 多能量域耦合特点,涉及到机械、电子、流体、光学等领域,使得 MEMS 系统级参数化组件的建模及仿真一直是 MEMS 设计中的难题。国内外 MEMS 机械组件和电学组件系统级建模设计方法的研究已经成熟,但是光学组件建模方法的研究却很少。一些 MEMS CAD 软件,如商业软件 Coventware^[4]、匹兹堡大学的 Chatoyant^[5]等,虽然建立了部分光学组件的系统级模型,但其文档却主要对使用方法进行介绍,对光学组件的建模方法极其保密,很少进行详述。因此,研究在三维空间内建立 MEMS 光学组件系统级模型的一般方法和建立具有自主知识产权的包含典型光学组件的光学库具有重要的理论意义和参考价值。光学组件的建模方法主要存在以下难点:(1)光束模型的建立;(2)光学组件的建模不只涉及到光学域,还涉及到与机械域和电学域的耦合;(3)空间中各个光学组件及光束的坐标系转换。

为解决以上难题,本文在多端口组件网络方法^[6]的基础上,提出了 MEMS 光学组件的系统级建模方法,并依托于国产设计工具 MEMS Garden,使用 Verilog-A 硬件描述语言对典型光学组件——微平面镜的系统级的建模过程进行了介绍。最后搭建了光学扫描系统,对本文提出的建模方法进行了验证。

2 建模理论与方法

2.1 多端口组件网络方法^[6]

本文 MEMS 光学组件的系统级建模方法是在多端口组件网络方法的基础上建立的。多端口组件模型可以用 5 元组表示: $MPE = \langle CID, Ports, Behaviors, Schematic, Parameters \rangle$ 。其中, CID 为组件标识符,唯一地标识该组件。Ports 为组件端口集合,是组件之间进行能量与信号交换的接口,若端口表示能量的转换,则称其为能量保守端口,需在端口上设置 2 个端口变量(即,跨量和通量);若端口表示信号随时间的变化而不关注这种信号的能量来源,则称其为能量非保守端口,只需在端口上设置一个端口变量来表示信号大小的变化。Behaviors 为组件的行为模型,是通过研究组件的物理属性建立的数学模型。Schematic 为组件的图形化示意图,便于对组件模型进行操作。Parameters 为组件的参数,修改参数可实现组件的重用,一般包括器件的几何尺寸、空间位置、材料属性等。

为构成完整的 MEMS 系统,按照拓扑结构将多个组件相互连接,便形成多端口组件网络模型。此时不论是能量保守端口还是能量非保守端口均遵循广义基尔霍夫(Kirchoffian)定律。

2.2 光束模型与组件端口

目前在 MEMS 领域用到的光学器件一般都采用激光进行信号传递。激光信号主要采用单模光波导(单模光纤)传输,由于其模场的分布不均匀,呈高斯分布,故又称其为高斯光束^[7]。本文光束模型的理论基础便是建立在圆形高斯光束的基础上。

自由空间中的高斯光束,当确定了其光束腰

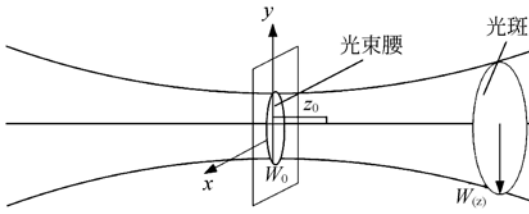


图 1 自由空间中高斯光束的传输情况

Fig. 1 Transmission of Gaussian beams in free space

的中心点位置及传播方向,传输情况就可以完全确定,如图 1 所示。设光束腰中心点坐标为 (x, y, z) ,则沿 Z 轴传输的高斯光束的波动方程为:

$$U(x, y, z) = A_0 \frac{W_0}{W(z)} \exp\left[-\frac{\rho^2}{W(z)^2}\right] \cdot \exp\left[-jkz - jk \frac{\rho^2}{2R(z)} + i\xi(z)\right], \quad (1)$$

其中, A_0 是电场的复振幅,为常数,光束功率 $P = A_0^2$; 光束腰的半径为 W_0 ; $z_0 = \pi W_0^2 / \lambda$, 为瑞利距离,即光斑的半径变为光束腰半径的 $\sqrt{2}$ 倍时其与腰斑的距离; $W(z) = W_0 [1 + (z/z_0)^2]^{1/2}$, 为光轴 z 处的光斑半径; $\rho^2 = x^2 + y^2$; $R(z) = z [1 + (z_0/z)^2]$, 为波前曲率; $\xi(z) = \arctan(z/z_0)$, 为相位延迟; $kz + k(\rho^2/2R(z)) - \arctan(z/z_0)$ 为总相移。

2.2.1 光束端口

由式(1)知,高斯光束的性质由功率、相位、波长、光束腰半径、瑞利距离、光束腰的位置和光束传播方向决定。为了进行精确建模,光学组件需用 11 个光学端口来描述光束模型,分别为:光束的功率(power),相位(phase),波长(λ),光束腰半径(w_0),瑞利距离(z_s),光束腰中心坐标(x, y, z),光束传播方向的欧拉角(α, β, γ)。由于这些光学端口只表示信号大小的变化,根据多端口组件网路方法可知它们均为能量非保守端

口,只需在每个端口上设置一个端口变量。

2.2.2 机电耦合端口

由于一些光学组件受到机电驱动器(如梳齿电容器,平行板电容器等)的控制,可在自由空间进行 6 自由度的运动,因此需设置 6 个机电耦合端口,即 3 个机电平动输入端口(dx, dy, dz)和 3 个机电转动输入端口(rx, ry, rz)。图 2 为微平面镜的图形化示意图。由于这些端口表示能量的转换,可知它们为能量保守端口,需在每个端口上设置一个端口变量。

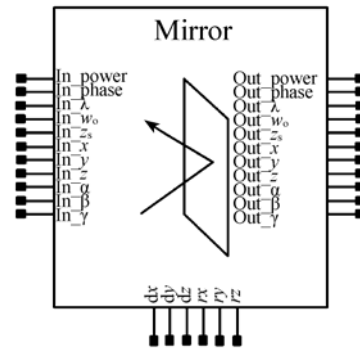


图 2 微平面镜的图形化示意图

Fig. 2 Schematic of micro-mirror

2.3 空间坐标系变换

2.3.1 组件坐标变换

为形成一个完整的系统级光学系统,需要将多个组件连接成多端口组件网路。由于各个组件的局部坐标系不相同,应当把组件的行为模型向全局坐标系转换,如图 3 所示。本文以芯片坐标系作为全局坐标系。设局部坐标系与芯片坐标系的夹角为(α, β, γ),若光学组件的机电转动输入端口(rx, ry, rz)有输入时,把组件模型从局部坐标系转化到芯片坐标系的矩阵为:

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(rx) & -\sin(rx) \\ 0 & \sin(rx) & \cos(rx) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(ry) & 0 & \sin(ry) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(ry) & 0 & \cos(ry) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(rz) & -\sin(rz) & 0 \\ \sin(rz) & \cos(rz) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

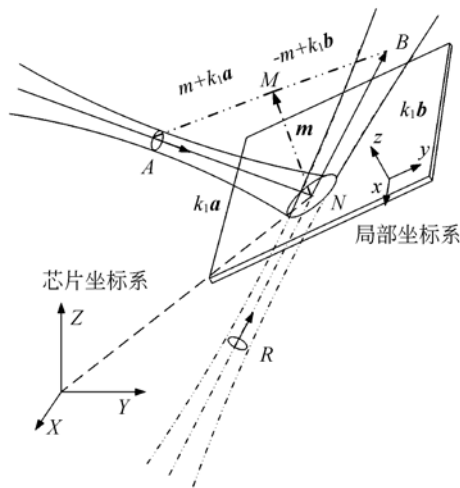


图 3 高斯光束在微平面镜上的反射情况
Fig. 3 Gaussian beam reflected by micro-mirror

在局部坐标中设点 $A=(x, y, z)$, 则变换到芯片坐标系后, 其坐标为:

$$A' = M_1 \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad (4)$$

某些光学组件, 如光电探测器 (Position Sensitive Device, PSD), 其输出端口需检测出入射光束的光斑在局部坐标系的位置, 因此应当把组件模型从芯片坐标系转化到局部坐标系, 其转化矩阵为 M_1 的逆矩阵, 即

$$M_2 = M_1^{-1}. \quad (5)$$

2.3.2 光束坐标变换

当高斯光束与光学组件相互作用时, 需要将光束模型转换到全局坐标系, 如图 3。设光束传输方向的欧拉角为 (g_x, g_y, g_z) , 从局部坐标系到芯片坐标系的转化矩阵为:

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(g_x) & -\sin(g_x) \\ 0 & \sin(g_x) & \cos(g_x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(g_y) & 0 & \sin(g_y) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(g_y) & 0 & \cos(g_y) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(g_z) & -\sin(g_z) & 0 \\ \sin(g_z) & \cos(g_z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

3 光学组件的系统级建模

为了便于在同一仿真器中实现 MEMS 各个能量域的共同仿真, 应当使用可描述连续信号的硬件描述语言对各组件进行统一编码。本文在集成设计软件 MEMS Garden 上进行光学组件的建模和仿真, 此软件集成了华大九天的 ZeniVLG 仿真器, 采用的是 Verilog-A 硬件描述语言。

常用的 MEMS 光学组件有微平面镜、透镜、准直光纤发射器、光电探测器、垂直腔表面发射激光器 (VCSEL) 等。这里以微平面镜为例来说明建模方法, 建模流程如图 4。

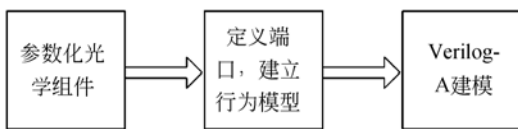


图 4 光学组件建模的流程图
Fig. 4 Modeling flowchart for optical components

3.1 参数化

参数化光学组件, 设定组件的材料特性、尺寸及拓扑形状等参数。设平面镜中心坐标为 $(x_{\text{mirror}}, y_{\text{mirror}}, z_{\text{mirror}})$, 平面镜的欧拉角为 $(\alpha_{\text{mirror}}, \beta_{\text{mirror}}, \gamma_{\text{mirror}})$, 形状为 geometry_type, 大小为 size, 反射率为 reflectivity。

3.2 建立行为模型

定义端口, 建立组件的行为模型。高斯光束在自由空间中由微平面镜反射前后的传输情况如图 3 所示。设置 22 个端口表示光束被微平面镜反射前后性质的变化, 6 个端口表示微平面镜的 6 自由度运动, 建立的图形化示意图如图 2 所示。

在图 3 中, 设入射光束的光束腰中心点为 $A(in_x, in_y, in_z)$, 光束与平面镜相交光斑的中心点为 $N(N_x, N_y, N_z)$, 反射光束的光束腰中心在平面镜后面一个虚拟点 $R(out_x, out_y, out_z)$ 。设入射光束的单位向量为 $a(in_\alpha, in_\beta, in_gamma)$, 反射光束的单位向量为 $b(out_alpha, out_beta, out_gamma)$, 平面镜法线向量为 $m(l, m, n)$ 。组件的机电平动输入端口为 (dx, dy, dz) , 机电转动输入端口

为 (rx, ry, rz) , 设 k_1 为 AN 的长度, 建立等腰直角三角形 $\triangle ANB$ 。微平面镜的行为模型为:

$$\begin{cases} [l, m, n]^T = \mathbf{M}_1 \cdot [0, 0, 1]^T \\ k_1 = -1 / [\text{in}_\alpha, \text{in}_\beta, \text{in}_\gamma] \cdot [l, m, n]^T \\ [N_x, N_y, N_z]^T = [\text{in}_x, \text{in}_y, \text{in}_z]^T + k_1 \cdot [\text{in}_\alpha, \text{in}_\beta, \text{in}_\gamma]^T \\ [\text{out}_\alpha, \text{out}_\beta, \text{out}_\gamma]^T = [\text{in}_\alpha, \text{in}_\beta, \text{in}_\gamma]^T + \frac{2}{k_1} [l, m, n]^T \\ [\text{out}_x, \text{out}_y, \text{out}_z]^T = [N_x, N_y, N_z]^T - k_1 \cdot [\text{out}_\alpha, \text{out}_\beta, \text{out}_\gamma]^T \end{cases} \quad (7)$$

3.3 Verilog-A 语言建模

Verilog-A 语言可描述多种能量域(如机械学、热力学、电学等)的系统级模块,具有自由度高,兼容性好,求解效率高等特点,应用非常广泛^[8]。Verilog-A 模型遵循广义基尔霍夫定律,通过跨量和通量的变化来描述模型的行为,基本结构包括模型名、输入输出端口、参数、行为方程^[9]。

根据步骤 2 建立的微平面镜行为模型(7),采用 Verilog-A 语言进行编码,便获得微平面镜的参数化系统级模型。

同理,对于其它需要建模的 MEMS 光学组件,可参照图 4 所示的建模流程,首先对其参数化;然后,定义输入输出端口,分析高斯光束与组件相互作用后光束性质的变化,建立每个组件的行为模型;最后,使用 Verilog-A 硬件描述语言对行为模型进行编码仿真,最终得到透镜、准直光纤发射器、光电探测器、垂直腔表面发射激光器(VCSEL),光纤发射器,光纤接收器等光学组件的系统级模型,组成系统级光学组件库。

4 光学系统的搭建与仿真分析

本文以一种典型的 MEMS 光学系统——微扫描系统为例,说明光学组件系统级建模方法的有效性。

图 5 是微光学扫描系统的示意图。光源经准直光纤发射器发射的高斯光束被平面镜反射,打在 PSD 上;再由 PSD 光电转换形成电流并检测出入射光斑在其局部坐标的位置。微平面镜在 4 个电极的作用下发生偏转,改变反射光束的方向,PSD 检测的光斑位置因此变化,从而实现了扫描或成像功能。

调用本文建立的光学组件模型,搭建微扫描系

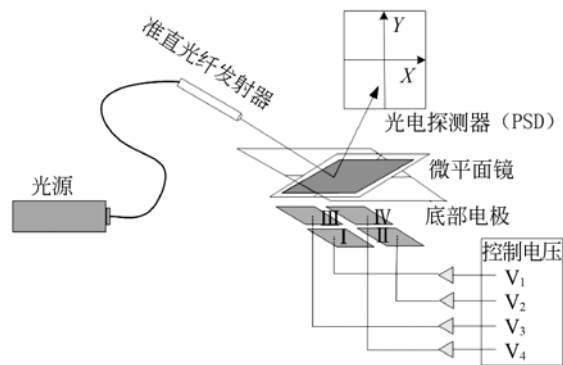


图 5 微扫描系统

Fig. 5 Micro scanning system

统的光学部分。使用 MEMS Garden 软件的系统级机械组件和电学组件^[10],搭建机电驱动部分使平面镜能自由偏转。设置每个组件的参数^[11],形成的微扫描系统的多端口组件网络模型,如图 6 所示。

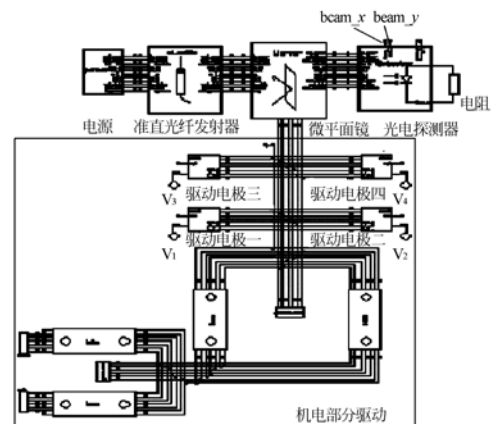


图 6 MEMS Garden 中搭建的微扫描系统的系统级模型

Fig. 6 System-level model of micro scanning system in MEMS Garden

依据表 2 设置 4 个驱动电极的电压,对系统进行非差分电压分析。

表 2 驱动电极的电压参数

Tab. 2 Voltage parameters of four electrodes

时间	电压设置
0~45 ms	$V_x: 0\sim 16\text{ V}$, 仿真步长: 4 V $V_y: 0\sim 32\text{ V}$, 仿真步长: 4 V $V_1 = V_x; V_2 = 0; V_3 = V_y; V_4 = V_x + V_y$
46~91 ms	$V_x: 0\sim 16\text{ V}$, 仿真步长: 4 V $V_y: 0\sim 32\text{ V}$, 仿真步长: 4 V $V_1 = V_x + V_y; V_2 = V_x; V_3 = 0; V_4 = V_y$
92~137 ms	$V_x: 0\sim 16\text{ V}$, 仿真步长: 4 V $V_y: 0\sim 32\text{ V}$, 仿真步长: 4 V $V_1 = V_y; V_2 = V_x + V_y; V_3 = V_x; V_4 = 0$
137~182 ms	$V_x: 0\sim 16\text{ V}$, 仿真步长: 4 V $V_y: 0\sim 32\text{ V}$, 仿真步长: 4 V $V_1 = 0; V_2 = V_y; V_3 = V_x + V_y; V_4 = V_x$

PSD 检测的光斑中心点坐标 (beam_x , beam_y) 在 0~45 ms 时间内的仿真结果如图 7 所示。

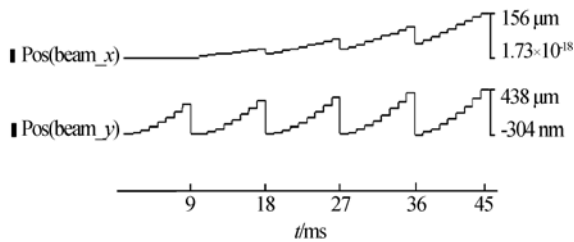


图 7 0~45 ms 仿真时间内光斑的位置坐标

Fig. 7 Spot position in the simulation time of 0~45 ms

将仿真得到的坐标 (beam_x , beam_y) 用散点图表示, 如图 8 所示。

国外商业软件 CoventorWare 是目前业界公认的功能最强、规模最大的 MEMS 专用设计软件, 占有 80% 的市场份额^[4]。为验证仿真结果, 在 CoventorWare 中搭建相同的微扫描系统进行分析, 其光电探测器检测的位置坐标的散点图如图 9 所示。可以看出本文搭建的扫描系统没有出现位置盲区, 实现了更精确的仿真。分别选取相同位置的 2 点, 图 8 的坐标值分别为 ($109\ \mu\text{m}$, $394\ \mu\text{m}$) 和 ($141\ \mu\text{m}$, $350\ \mu\text{m}$), 图 9 的坐标值分别为 ($106\ \mu\text{m}$, $399\ \mu\text{m}$) 和 ($106\ \mu\text{m}$, $349\ \mu\text{m}$), 2 点的相对误差均小于 3%。

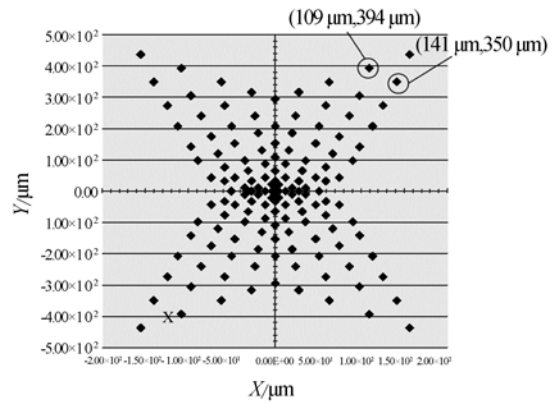


图 8 MEMS Garden 中光斑坐标的散点图

Fig. 8 Scatter plots of spot position in MEMS Garden

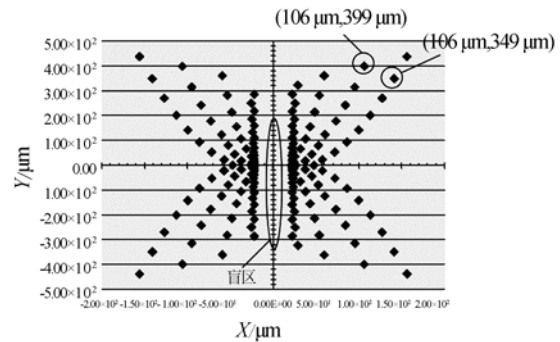


图 9 CoventorWare 中光斑坐标值的散点图

Fig. 9 Scatter plots of spot position in CoventorWare

5 结 论

为了对 MEMS 光学系统进行快速准确的建模与仿真, 提高设计效率, 本文提出了一种在三维空间内建立 MEMS 光学组件的系统级建模方法, 并使用 Verilog-A 硬件描述语言建立了一个包含多个典型器件的系统级光学库。在集成软件 MEMS Garden 中搭建的光学系统的测试结果表明, 所提出的建模方法可以有效地实现 MEMS 光学组件系统级建模; 非差分电压分析与主流 MEMS 集成设计软件 CoventorWare 的仿真结果的对比显示, 提出的方法解决了扫描盲区的问题, 且所取 2 点的相对误差在 3% 以内, 表明通过该方法建立的系统级模型具有较高精度。

参考文献:

- [1] FEDDER G K. A vision of structured CAD for MEMS [C]. *Proceedings of the Fifth ACM/SIGDA Physical Design Workshop, Reston*, 1996:76-80.
- [2] MUKHERJEE T, FEDDER G K. Structured design of microelectro-mechanical systems[C]. *Proceedings of the 34th Annual Design Automation Conference(DAC'97), New York, USA*, 1997.
- [3] 苑伟政,常洪龙. 泛结构化微机电系统集成设计方法[M]. 西安:西北工业大学出版社,2010.
YUAN W ZH, CHANG H L. *The Structured Microelectromechanical System Integration Design Method*[M]. Xi'an: Northwestem Polytechnical University Press, 2010. (in Chinese)
- [4] Coventorware, SanMateo, CA. [EB/OL]. Available: <http://www.coventor.com>
- [5] KUZWEG T P, MARTINEZ J A. New models for optical MEMS[J]. *Photonics East, Boston, MA*, 2001:1-12.
- [6] 霍鹏飞. 微机电系统的多端口组件网络方法系统级建模研究[D]. 西安:西北工业大学,2004.
HUO P F. *A methodology of multi-port-element network for MEMS system-level modeling*[D]. Xi'an: Northwestem Polytechnical University, 2004. (in Chinese)
- [7] 叶玉堂,饶建珍,肖峻. 光学教程[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
YE Y T, RAO J ZH, XIAO J. *Optical Tutorial* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)
- [8] KUNDET K, ZINKE O. *The Designer's Guide to Verilog-AMS*[M]. Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [9] QI J. *Modeling and simulation for design of suspended MEMS* [D]. Carnegie Mellon University, 2003.
- [10] 苑伟政,牛昊彬,常洪龙,等. MEMS器件与电路共同仿真原型系统[J]. 光学精密工程, 2010, 18(10): 2206-2211.
YUAN W ZH, NIU H B, CHANG H L, et al. Co-simulation of MEMS and circuits in Zeni-VLG [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10): 2206-2211. (in Chinese)
- [11] TOSHIYOSHI H, TANAMETHA W P, CHENG-T C. Linearization of electrostatically actuated surface micromachined 2-D optical scanner [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2001, 10(2): 205-214.

导师简介:



李晓莹(1968—),女,陕西合阳人,副教授,硕士生导师,1992年于西北工业大学获得硕士学位,主要研究方向为传感器与测试技术及微机电系统。E-mail: xiaoy@nwpu.edu.cn



何洋(1979—),男,四川广元人,讲师,主要研究方向为微机电系统计算机辅助设计及纳米技术。E-mail: heyang@nwpu.edu.cn

作者简介:



李慧敏(1986—),女,四川广元人,硕士研究生,主要研究方向为微机电系统集成设计及惯性器件设计。E-mail: lhm3745@126.com



焦文龙(1985—),男,山东潍坊人,博士研究生,主要研究方向为微机电系统集成设计。E-mail: jwlvictory5515@qq.com



常洪龙(1977—),男,河南洛阳人,教授,主要研究方向为微机电系统集成设计及微惯性技术。E-mail: changhl@nwpu.edu.cn