

文章编号 1004-924X(2024)13-2061-09

微型阵列束闸设计与实验

张利新¹, 孙博彤¹, 刘星云^{1,2}, 殷伯华^{1,2*}, 刘俊标^{1,2}, 韩立^{1,2}

(1. 中国科学院电工研究所微纳加工技术与智能电气设备研究部, 北京 100190;

2. 中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

摘要: 微型阵列束闸是多束电子束曝光系统的关键部件, 用于控制多束电子束的开/关, 实现复杂图形的快速曝光。对 3×3 微型阵列束闸进行了设计与制作, 并进行了多束电子束偏转实验研究。对阵列束闸结构进行了优化设计, 并基于 MEMS 加工工艺成功制备了阵列束闸。针对阵列束闸的控制要求, 设计了可单独控制的阵列束闸控制器。将控制器与阵列束闸进行连接, 验证了控制器的偏转速度与功能完整性。最后, 在多束电子束测试平台对阵列束闸进行了偏转实验, 研究串扰对电子束偏转的影响。实验结果表明: 阵列束闸控制器的偏转速度达到 43.5 MHz, 大于设计值 10 MHz; 阵列束闸成功实现了单独控制电子束开和关, 束闸的偏转距离在 $25\sim 30\ \mu\text{m}$ 之间, 小于计算值 $43.29\ \mu\text{m}$; 串扰程度均小于 3%。该阵列束闸已经具备多束电子束开/关控制功能, 但在偏转精度, 设计和加工工艺等方面还需进一步优化和完善。

关键词: 电子束曝光; 阵列束闸; 多束电子束; 串扰; 偏转速度

中图分类号: TN16 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243213.2061

Design and experiment of micro-arrayed beam blanker

ZHANG Lixin¹, SUN Botong¹, LIU Xingyun^{1,2}, YIN Bohua^{1,2*}, LIU Junbiao^{1,2}, HAN Li^{1,2}

(1. Research Department of Micro-nano Fabrication Technology and Intelligent Electronic Devices,
Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering,
University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: yinbh@mail. iee. ac. cn

Abstract: The micro-arrayed beam blanker is essential for the multi-beam electron beam lithography system, enabling the rapid exposure of complex graphics by controlling the electron beam's opening and closing. In this study, a 3×3 micro-arrayed beam blanker was designed and fabricated, followed by an experiment on multi-beam electron beam deflection. Based on prior optimization, the structural design and MEMS-based processing technology were developed, resulting in successful fabrication of the beam blanker. A controller capable of independently managing the multi-beam was then created and connected to the beam blanker to validate its deflection speed and functionality. The deflection experiment conducted on a multi-beam test platform examined crosstalk effects. Results indicate that the controller's deflection speed

收稿日期: 2024-04-09; 修订日期: 2024-06-19.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 62101528); 中国科学院科研仪器设备研制项目 (No. GJJ-STD20200003)

reaches 43.5 MHz, exceeding the design target of 10 MHz. The beam blanker independently opens and closes the electron beam, with a deflection range of 25-30 μm , which is below the predicted 43.29 μm . Crosstalk levels were all under 3%. While the designed micro-arrayed beam blanker effectively controls the multi-beam electron beam, further optimization is needed for deflection accuracy and processing technology.

Key words: electron beam lithography; arrayed beam blanker; multi-beam electron beam; crosstalk; deflection speed

1 引 言

在电子束曝光(Electron Beam Lithography, EBL)系统中,电子束作为主要光源,加工分辨率明显优于深紫外(DUV)和极紫外(EUV)等光刻技术,在掩模版制作和微纳米器件加工中具有重要应用^[1-4]。然而,EBL系统由于曝光通量太低,无法实现大批量生产,只能用于实验室研究或小批量生产。因此,提高电子束曝光通量,实现大批量生产,是目前研究热点之一。

提高电子光学系统通量的主要方法是开发多束电子光学系统(Multi-beam Electron Optical system, MBEOS)。如果在一个单束电子束系统中获得几十到几百束电子束并保持与单束设备同等束流密度和同等束斑尺寸,那么通量随之被提高了几十到几百倍。这是提高通量可行的技术方案之一。早在1984年,Roelofs和Barth论证了多束电子光学曝光技术的可行性,并给出了相应的解决方案^[5]。目前,多束电子束系统的实现方案主要有多源多镜筒、多源单镜筒、单源多镜筒和单源单镜筒4种MBEOS形式。为了实现多束EBL,以上4种结构形式都依靠阵列束闸,实现多束电子束的单独开、关控制,完成不同图案的曝光。作为关键部件之一,阵列束闸直接制约着整个多束EBL系统的曝光精度和速度。

最早的阵列式束闸可见于1989年发表的多束电子束控制系统^[6-7],该微结构电子束偏转控制系统可以实现亚微米的图案刻写,但其相关性能未见报道。随后,Yasuda等对阵列式束闸进行了仿真分析和实验研究,主要分析了邻近电场的串扰,提出采用在相邻两个束闸之间设计一个接地隔离壁,抑制电场的发散现

象^[8-9]。Winograd等设计了一个基于MEMS的全新结构^[10-12],对阵列束闸进行了理论计算和实验验证,并研究了阵列束闸邻近电场的串扰现象,实验验证的最大串扰达到了12%,但此研究没有给出串扰与束闸的设计参数及偏转电压的关系。Kim等报道了 3×3 双层互联结构的阵列束闸,采用MEMS制造技术,他们对各个束闸间的信号延迟进行了模拟分析,指出此种方法对理解信号延迟之间的差别具有一定的意义^[13]。奥地利IMS公司研制了一种更加复杂的束闸阵列,数目达到了 32×32 ,并对束闸的装配和实验验证进行了报道,但没有给出阵列束闸的相关性能测试^[14-16]。

2006年,来自荷兰代尔夫特理工大学的Zhang报道了阵列束闸实验用器件,推荐采用接地层抑制束闸的边缘场和串扰的影响,并对束闸串扰进行了评估,但未见最终实验结果^[17]。2009年,荷兰MAPPER公司报道了一个实际应用的束闸,但没有报道具体的设计细节以及相关的性能研究^[18]。此外,美国NuFlare公司于2021年先后发布了两款多束电子束制版直写设备,MBM-2000和MBM-2000PLUS,260 000束电子束,分别针对3 nm+和2 nm节点设计,但关于多束阵列束闸的设计等没有报道^[1]。由此可知,阵列束闸作为MBEOS的核心关键部件,相关研究单位对其核心技术鲜有报道。本研究团队从2020年开始对MBEOS进行研究,张雨露等对阵列束闸进行了理论研究,包括串扰以及结构优化等^[19]。在此基础上,本文给出了 3×3 阵列束闸的设计与实验结果,以及优化方案。

2 工作原理及其设计

2.1 工作原理

阵列束闸基于的多束电子光学系统如图 1 所示,通过分束板获得多束电子束,经过静电透镜聚焦后,通过阵列束闸控制单束电子束的偏转,在光路下方的光阑起到拦截作用,最终实现电子束的单独开/关控制,如图 1 中红色轨迹所示(彩图见期刊电子版)。

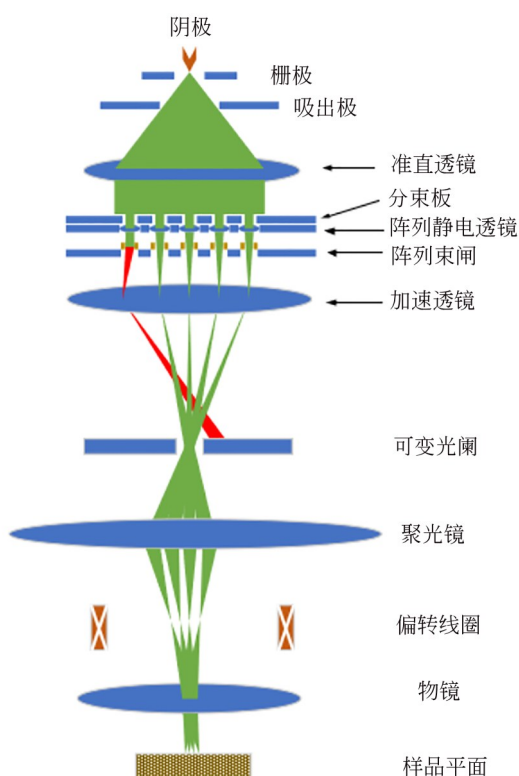


图 1 多束电子光学系统示意图

Fig. 1 Schematic drawing of multi-beam electron optical system

束闸的工作原理如图 2 所示。束闸主要由两个偏转极板组成,通常一个极板接地,一个极板接电压 V 。电子束在加速透镜平面的偏转距离 δ 可推导得^[19]:

$$\delta = \frac{LV(L+2H)}{4d\Phi}, \quad (1)$$

其中: Φ 是电子束加速电压; L 为束闸偏转极板长度; d 为偏转极板间距; H 为束闸到加速透镜距离; V 为束闸偏转极板电压。

多束 EBL 系统在工作时,根据曝光图案控制

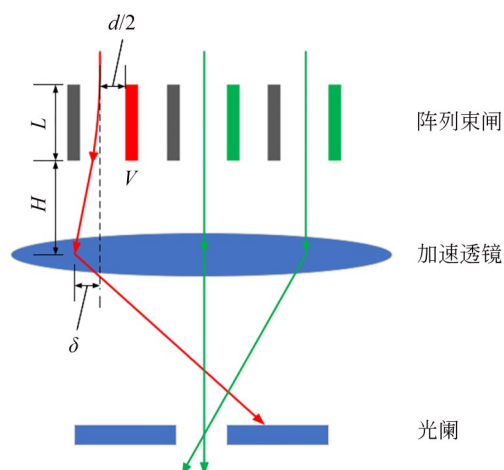


图 2 阵列束闸的工作原理

Fig. 2 Working principle of arrayed beam blaker

电子束的开和关,实现目标图案的曝光。为了减少电子束残余剂量的影响,阵列束闸的偏转速度非常重要,本文中阵列束闸的偏转速度要求大于 10 MHz,偏转电压 0~20 V 可调。

2.2 设计

根据阵列束闸的偏转特性,通过仿真分析,在长宽比不变的情况下,边缘场对电子束偏转的影响在总偏转量中的占比与偏转电压无关;偏转极板的长宽比越大越有利于精确控制电子束的偏转;通过优化隔离接地电极结构与参数,可减小束闸之间的串扰引起的束斑模糊问题^[19]。

通过结构优化并结合 MEMS 制造技术水平设计的 3×3 阵列束闸如图 3 所示(彩图见期刊电子版)。图中,两边“L”形和“十字”形结构为装配对准光栅,共有 12 条引线从中间区域连接到边缘,用于给束闸极板供电和接地。束闸的核心区域主要包括“E”字形接地电极,蓝色偏转电极以及电子束经过的通孔结构。其中,“E”字形接地电极可以有效抑制邻近束闸电场对电子束的偏转影响。束闸安装及实验设计中,12 根引线通过黄色金属线连接到外部控制器。紫色部分是一层厚度为 500 nm 的氧化硅,起到绝缘作用。

微型阵列束闸采用 MEMS 技术进行制造,主要设计尺寸如图 4 所示。极板高度和间距均为 10 μm ,阵列周期为 100 μm 。

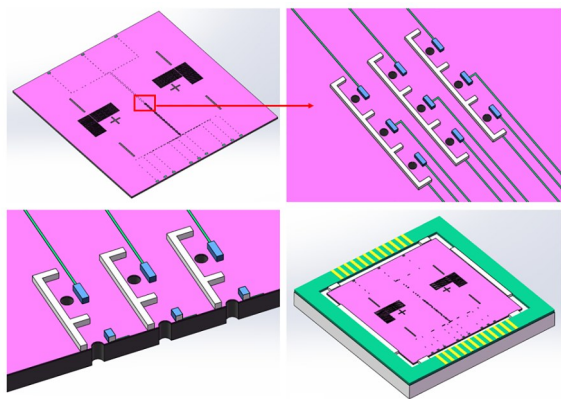


图3 阵列束闸设计

Fig. 3 Design of micro-arrayed beam blinder

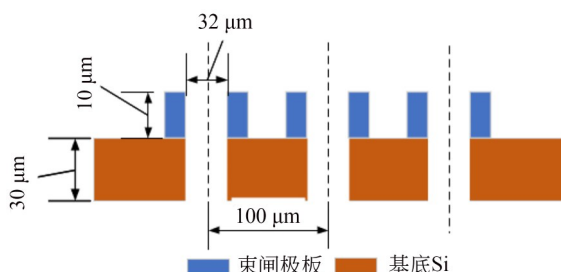


图4 阵列束闸的关键尺寸

Fig. 4 Critical dimensions of arrayed beam blinder

2.3 加工

微型阵列束闸加工采用 MEMS 技术,其结构尺寸只有几十微米,结构设计和线路设计非常重要,对加工工艺要求较高,尤其是用于电镀的深刻蚀,电镀高度决定了束闸偏转极板的长度。加工流程如图 5 所示。具体加工步骤如下:

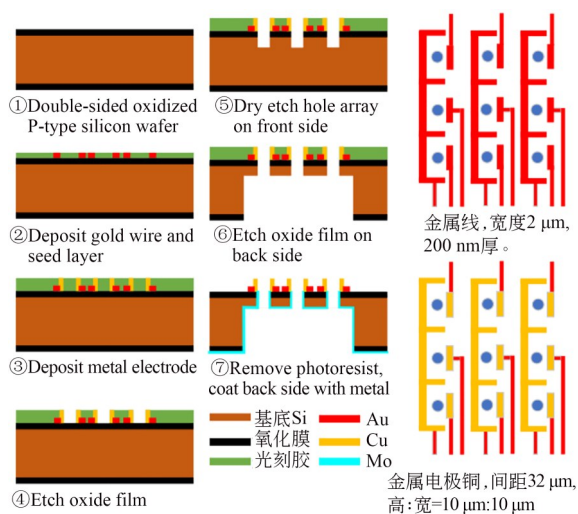


图5 阵列束闸加工工艺流程

Fig. 5 Fabrication flow chart of arrayed beam blinder

(1) 选用双面带氧化膜 P 型硅片,厚度 300 μm ,氧化膜厚度 500 nm;

(2) 光刻 1,氧化硅表面沉积金线和种子层,用于给电极供电,宽度 2 μm ,厚 200 nm;

(3) 光刻 2,沉积金属电极,间距 32 μm ,材料为铜,高宽均为 10 μm ;

(4) 光刻 3,刻蚀氧化膜;

(5) 正面干法刻蚀孔阵列,直径 17 μm ,以及边缘的对准光栅,深度 20~30 μm ;

(6) 光刻 4,背面氧化膜刻蚀;干法刻蚀,深度 280 μm ,宽度 3 mm $\times$ 3 mm;

(7) 去除光刻胶,背面镀金属 Cr(20 nm)+Mo(200 nm)。

加工后的阵列束闸如图 6 所示,从图中可以看出,束闸的偏转极板及连接线清晰,且无短路现象。安装后的束闸如图 7 所示,在束闸

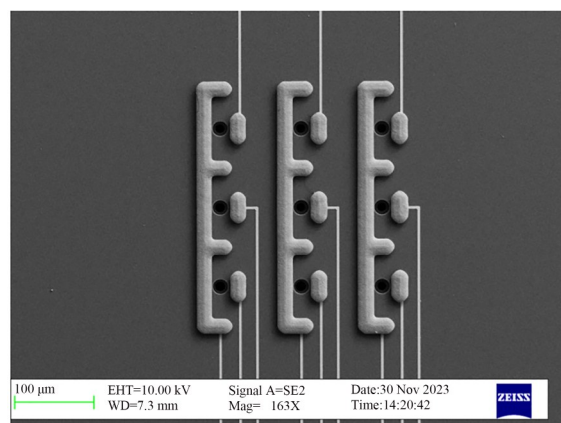


图6 阵列束闸加工实物

Fig. 6 Image of fabricated arrayed beam blinder

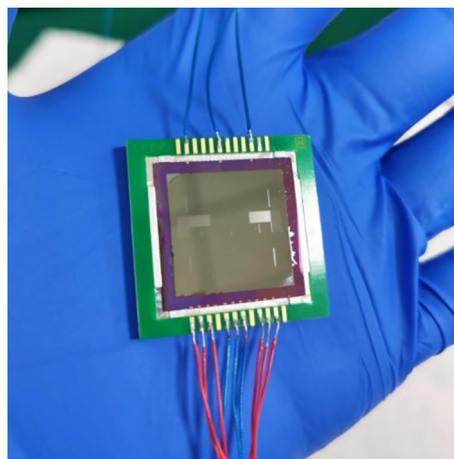


图7 束闸安装后实物

Fig. 7 Physical map of assembled beam blinder

上方又装配了一层分束板,以获得多束电子束进行偏转实验。束闸的供电电压通过导线与束闸控制器上的信号输出端相连。

3 阵列束闸控制系统设计

3.1 控制系统设计方法

为满足输出电压 $0\sim 20\text{ V}$,且上升/下降沿 $<100\text{ ns}$ 的要求,以及可单独控制阵列束闸,采用拨动开关方式,施密特触发器结合高压电平转换器,具体方案如图8所示。无论是拨动开关输出的信号还是外部信号都可能包含一定噪声,为处理噪声引起的束闸误动作,输入信号需要滤波,抑制噪声幅值。这里采用低通滤波的方式,该方式在抑制高频分量的同时,会使信号跳变边沿变缓,这与上升/下降沿 $<100\text{ ns}$ 要求相背。因此,使用施密特触发器进行波形整形,整形后的波形边沿 $<10\text{ ns}$ 。高压电平转换器将 5 V TTL信号转为高压信号,其高电平电压为DC-DC1的输出电压。

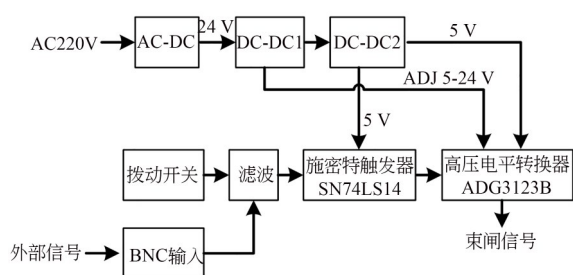


图8 束闸控制器设计方案

Fig. 8 Controller design scheme of beam blaster

目前束闸为 3×3 ,为了方便测试,用户通过手动拨动开关选择相应通道的束闸开断。需要高速连续控制时,从高频开关信号输入口接入TTL信号。

该方案选择现有电源模块 220 V 市电输入后由小型AC-DC模块HLK-10M24转为DC 24 V ,再经由DC-DC1模块无极调压。DC-DC1该模块同时支持输入输出电压检测,用户可以直观看到束闸电压。DC-DC2则将电压转

为 5 V 供给板卡上各芯片。该方案支持用户无极调节束闸开断时电压。控制器设计实物如图9所示。

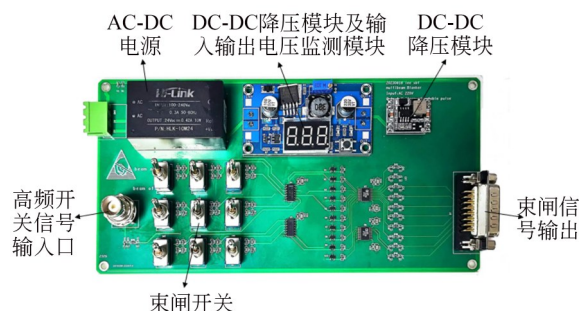


图9 束闸控制器实物

Fig. 9 Physical map of arrayed beam blaster controller

3.2 控制系统验证实验

针对单个束闸,实验测试了其偏转速率,束闸编号如图10所示。束闸与控制器相连,通过示波器测量束闸偏转极板上的电压上升与下降时间,测试结果如表1所示,9个束闸的偏转时间都小于 100 ns ,达到了偏转速度大于 10 MHz 的要求,最大可达 43.5 MHz 。由此可见,束闸控制器满足了束闸设计要求。上升速度不同的原因主要取决于束闸的电容,由图6可知,金属沉积上端面出现圆滑,导致电容大小不一致。

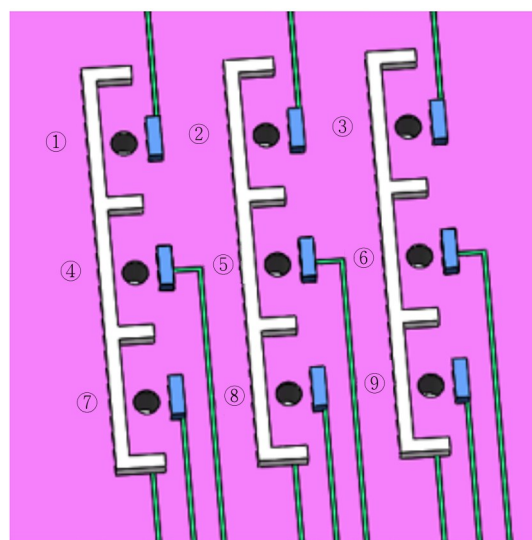


图10 束闸编号

Fig. 10 Numbering of arrayed beam blaster

表 1 束闸的上升与下降时间测试结果

Tab. 1 Experimental results of rise and fall time of arrayed beam blanker

束闸编号	上升时间 /ns	下降时间 /ns	偏转速度(按上升 时间计算)/MHz
1	36	54	27.8
2	30.2	43.6	33.1
3	33.7	55.8	29.7
4	29.7	47.6	33.7
5	23	47.4	43.5
6	32	47.4	31.3
7	26.6	55.9	37.6
8	31.9	55	31.4
9	34.6	50.7	28.9

4 实验与讨论

4.1 实验平台

多束电子束测试需要带有准直功能的电子枪,获得平行于光轴的电子束,再经过分束板后获得多束电子束,阵列束闸可以单独控制多束电子束的开/关。本实验具有基于 LaB₆ 电子枪的多束测试平台,包含多束成像系统,阵列束闸安装座等,如图 11 所示。基于此平台对阵列束闸进行了偏转实验研究及束斑之间串扰的影响分析。

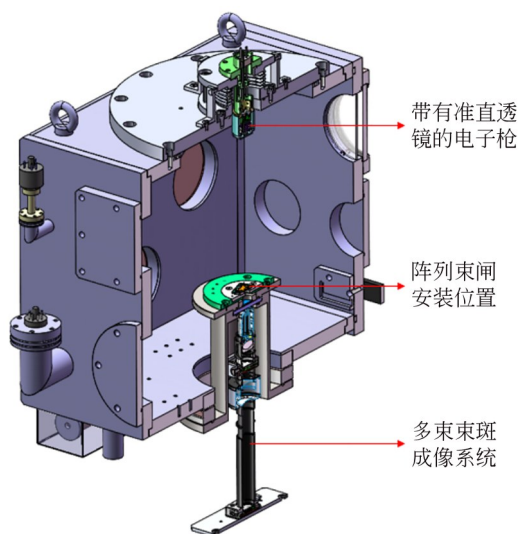


图 11 多束电子束测试平台

Fig. 11 Multi-beam electron beam test bench

4.2 多束电子束偏转实验及串扰评估

首先,对 3×3 阵列束闸的偏转功能和束斑之间的串扰程度进行了验证。束斑的串扰程度定义为:

$$\Delta = \frac{\delta_1 - \delta_0}{\delta_0} \times 100\%, \quad (2)$$

其中: δ_0, δ_1 分别为偏转前后的距离。实验中,电子束加速电压为 2.8 kV,束闸偏转电压为 12 V,束闸到实验平台荧光屏的距离为 20.2 mm,利用式(1)计算,电子束在荧光屏平面处偏转距离为 43.29 μm 。9 个束闸可以顺利完成对电子束的单束控制,电子束的束斑偏转结果如图 12 所示。经过多束束斑图像处理,计算得到束斑之间的偏转距离,如表 2 所示。为了计算束斑的偏转位移以及束斑之间的串扰程度,根据表 2 中的数据,1 号到 9 号束闸的间距减去初始位置束闸的间距,得到的结果如表 3 所示。表 3 中粗体数字为束闸偏转距离,正负号没有实际意义,只代表计算顺序存在差异,其余数字代表串扰。通过计算,束闸的偏转位移集中在 25~30 μm 之间,大部分比计算值 43.29 μm 小,主要是由于束闸偏转极板存在加工误差,极板间电容变小,而且实验中的准直电子束不完全平行于光轴,存在一定角度偏差,最终导致电子束偏转位移减小。表 3 中的数据再除以各自束闸的初始间距,得到串扰程度,如图 13 所示。偏转量为 $\pm 20\%$ 左右的为正常偏转,其余均为串扰。从图 13 可以看到,其中 2 号、5 号和 8 号束闸有明显的正和负的差值,理论上这两个正负差值相等,说明束闸偏转时两边距离变化量相等。2 号束闸的误差为 3.89%,5 号束闸和 8 号束闸的变化量均小于 1%。除了正常偏转外,阵列束闸的串扰程度均小于 3%。

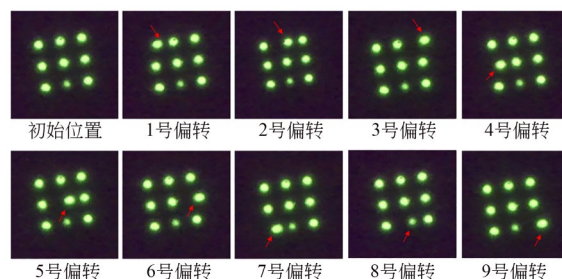


图 12 3×3 阵列束闸偏转电子束实验结果

Fig. 12 Experimental results of electron beam deflection by 3×3 arrayed beam blanker

表 2 束闸偏转距离计算

Tab. 2 Calculation result of deflection distance of arrayed beam blanker (μm)

束闸编号	1-2 间距	2-3 间距	4-5 间距	5-6 间距	7-8 间距	8-9 间距
初始位置	132.94	133.98	133.84	130.67	131.57	130.08
1 号偏转	107.03	135.57	133.83	131.63	130.76	131.24
2 号偏转	163.79	108.09	134.37	130.26	131.05	131.69
3 号偏转	131.19	161.84	134.02	131.79	130.05	132.10
4 号偏转	129.63	132.79	105.70	132.43	129.51	130.96
5 号偏转	133.40	131.62	163.45	102.99	130.24	130.73
6 号偏转	132.50	135.20	133.58	160.36	129.40	132.04
7 号偏转	133.14	134.14	133.76	129.52	104.75	132.48
8 号偏转	132.69	134.43	134.08	130.38	154.13	107.91
9 号偏转	132.95	135.07	133.64	130.93	130.75	160.79

表 3 束闸偏转距离差值计算

Tab. 3 Deviation calculation result of deflection distance of arrayed beam blanker (μm)

束闸编号	1-2 间距	2-3 间距	4-5 间距	5-6 间距	7-8 间距	8-9 间距
1 号偏转	-25.91	1.60	-0.02	0.95	-0.82	1.16
2 号偏转	30.85	-25.89	0.53	-0.42	-0.53	1.61
3 号偏转	-1.75	27.87	0.18	1.11	-1.53	2.03
4 号偏转	-3.31	-1.19	-28.15	1.75	-2.06	0.88
5 号偏转	0.46	-2.36	29.60	-27.68	-1.34	0.65
6 号偏转	-0.45	1.22	-0.26	29.69	-2.17	1.97
7 号偏转	0.20	0.17	-0.08	-1.16	-26.82	2.40
8 号偏转	-0.25	0.45	0.23	-0.29	22.55	-22.17
9 号偏转	0.01	1.09	-0.20	0.26	-0.82	30.72

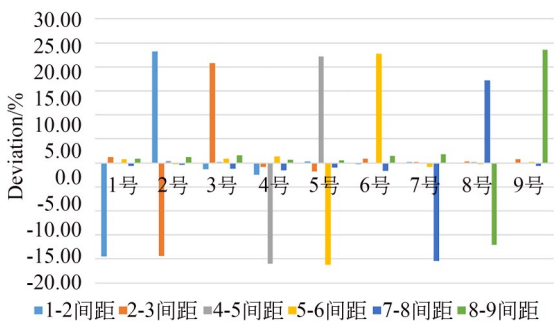


图 13 束闸偏转差值对比

Fig. 13 Comparison of deviation calculation of arrayed beam blanker

统的微型阵列束闸,采用 MEMS 技术制造,可实现对多束电子束的单独开/关控制,从而实现复杂图案的多束电子束曝光。阵列束闸的主要尺寸包括极板长度和极板间距,它们都为 10 μm。极板长度主要取决于金属沉积的高度,但金属沉积上表面不够平滑,还存在圆角现象,会影响实际电场分布。此外,由于目前 MEMS 的加工能力有限,只能电镀 10 μm 高度的 Cu,受到光刻胶曝光深度的制约,对高速电子束的偏转也具有一定的局限性。这是后续工作需要解决的难题,重点是提升 MEMS 加工工艺。

5 结 论

本文设计并制作了一种用于多束电子束系

针对阵列束闸的控制,本工作同时设计了阵列束闸控制器,可以实现阵列束闸的单独控制,偏转速度达到 43.5 MHz,满足束闸设计要求。

但束闸的偏转距离在 $25\sim 30\ \mu\text{m}$ 之间, 小于计算值 $43.29\ \mu\text{m}$, 主要是由于束闸偏转极板加工存在误差, 极板间电容变小造成的。串扰程度均小于 3%, 在实际应用中, 由于束闸到加速透镜的距离比本实验中的距离更小, 因此串扰程度在可接受

范围之内。

综上所述, 本文设计的阵列束闸已经具备多束电子束的单独控制能力, 但在性能方面还有待提升, 如降低串扰影响等, 设计和加工工艺需要不断的优化和完善。

参考文献:

- [1] YASUDA J, NOMURA H, MATSUMOTO H, *et al.* Recent progress and future of electron multi-beam mask writer[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2023, 62: SG0803-1-10.
- [2] 李艺杰, 肖君, 陈宜方, 等. 电子束直写大深宽比 Si_3N_4 薄膜支撑的光栅 X 射线准直器[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(10): 1181-1188.
LI Y J, XIAO J, CHEN Y F, *et al.* Grating X-ray collimator supported by Si_3N_4 membrane with large aspect ratio written directly by electron beam [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(10): 1181-1188. (in Chinese)
- [3] 曾沛, 舒志文, 陈艺勤, 等. 宽束离子束刻蚀快速加工金属纳米间隙结构[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(1): 109-118.
ZENG P, SHU ZH W, CHEN Y Q, *et al.* Rapid fabrication of metallic nanogap structures by shower ion beam etching [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(1): 109-118. (in Chinese)
- [4] 陈宜方. X 射线衍射光学部件的制备及其光学性能表征[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(11): 2779-2795.
CHEN Y F. Fabrication of diffractive X-ray optics and their performance characterization [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(11): 2779-2795. (in Chinese)
- [5] ROELOFS B J G M, BARTH J E. Feasibility of multi-beam electron lithography[J]. *Microelectronic Engineering*, 1984, 2(4): 259-279.
- [6] SCHNAKENBERG U, BENECKE W, WALLENDZUS V, *et al.* Multi electron beam lithography: fabrication of a control unit[J]. *Microelectronic Engineering*, 1989, 9(1/2/3/4): 205-208.
- [7] JONES G W, JONES S K, WALTERS M D, *et al.* Microstructures for control of multiple ion or electron beams[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1989, 36(11): 2686-2692.
- [8] YASUDA H, ARAI S, KAI J I, *et al.* Fast electron beam lithography system with 1024 beams individually controlled by blanking aperture array [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1993, 32(12S): 6012-6017.
- [9] YASUDA H, ARAI S, KAI J I, *et al.* Multielectron beam blanking aperture array system SYNAPSE-2000 [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 1996, 14(6): 3813-3820.
- [10] WINOGRAD G I, PEASE R F W, MCCORD M A. Blanked aperture array for parallel electron beam lithography [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 1997, 15(6): 2289-2292.
- [11] WINOGRAD G I, HAN L, MCCORD M A, *et al.* Multiplexed blanker array for parallel electron beam lithography [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 1998, 16(6): 3174-3176.
- [12] WINOGRAD G, KRISHNAMURTHI V, GARCIA R, *et al.* Demonstration of multiblanker electron-beam technology [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 2000, 18(6): 3052-3056.
- [13] KIM H, HAN C, CHUN K. The novel deflector for multi arrayed microcolumn using microelectromechanical system (MEMS) technology [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2003, 42(Part 1, No. 6B): 4084-4088.
- [14] DOERING H J, ELSTER T, HEINITZ J, *et al.* Proof-of-concept tool development for projection mask-less lithography (PML2) [C]. *SPIE Proceedings, Emerging Lithographic Technologies IX*. San Jose, CA. SPIE, 2005, 5751: 355-365.
- [15] MOHAUPT M, EBERHARDT R, DAMM C, *et al.* Assembly of an aperture plate system for projection mask-less lithography [J]. *Microelectronic*

- Engineering*, 2006, 83(4/5/6/7/8/9): 980-983.
- [16] EDER-KAPL S, HAUGENEDER E, LANG-FISCHER H, *et al.* Projection mask-less lithography (PML2): first results from the multi beam blanking demonstrator [J]. *Microelectronic Engineering*, 2006, 83(4/5/6/7/8/9): 968-971.
- [17] ZHANG Y X, HEERKENS C T H, VAN BRUGGEN M J, *et al.* Integrated multi-electron-beam blander array for sub-10-nm electron beam induced deposition[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 2006, 24(6): 2857-2860.
- [18] WIELAND M J, DE BOER G, BERGE G FTEN, *et al.* MAPPER: high-throughput maskless lithography [C]. *Alternative Lithographic Technologies, SPIE Proceedings. San Jose, California, USA. SPIE*, 2009, 7271: 72710O-72710O-8.
- [19] 张雨露, 张利新, 刘俊标, 等. 微型阵列束闸电子束偏转特性研究[J]. *电子显微学报*, 2023, 42(2): 171-179.
- ZHANG Y L, ZHANG L X, LIU J B, *et al.* Study on the deflection characteristics of electron beam in micro-arrayed beam blander [J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2023, 42(2): 171-179. (in Chinese)

作者简介:



张利新(1987—),男,辽宁凌海人,博士,副研究员,2011年于沈阳理工大学获得学士学位,2014年于中北大学获得硕士学位,2020年于北京航空航天大学获得博士学位,2022年于中国科学院电工研究所博士后出站,主要从事电子光学系统设计及其应用的研究。E-mail: zhanglx@mail.iee.ac.cn

通讯作者:



殷伯华(1973—),男,天津人,博士,正高级工程师,长期从事电子束检测及曝光控制技术的研究。E-mail: yinbh@mail.iee.ac.cn