

文章编号 1004-924X(2011)01-0029-06

深紫外光刻照明系统光束整形单元的设计

赵 阳^{1,2}, 巩 岩¹

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 为了使曝光波长为 193 nm 的深紫外光刻系统能够制备曝光线宽为 90 nm 及以下节点的集成电路芯片, 设计了采用环形照明模式且部分相干因子 σ 连续可调, 能满足不同曝光线宽要求的光刻照明系统光束整形单元。首先, 用几何光学定律和三角函数推导了轴锥镜移动距离与光束放大倍率之间的函数关系; 根据对变倍凸轮的合理性和装调公差灵敏度的分析, 确定了轴锥镜组参数的变化范围, 完成了变倍镜组与轴锥镜组合的光束整形单元的设计。最后, 在组合系统后面加入了可连续变倍的缩束系统, 实现了 σ 的连续可调。设计结果显示, 在环形照明模式下, 归一化的环宽 $\Delta\sigma$ 和外环直径 σ_{outer} 分别在 $[0.25, 1]$ 和 $[0.4, 1]$ 内连续可调, 满足设计要求。

关键词: 深紫外光刻; 环形照明; 轴锥镜; 部分相干因子; 无焦变倍镜组

中图分类号: TN305.7; O435.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111901.0029

Design of beam shaping unit for deep ultraviolet lithographic illumination system

ZHAO Yang^{1,2}, GONG Yan¹

- (1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: To manufacture the integrated circuit chips at 90 nm or below their nodes by using a 193 nm exposed wavelength deep ultraviolet lithography, a beam shaping unit for the lithographic illumination system was designed to achieve the annular illumination and the continuous adjustment of a partial coherent factor σ to meet the requirements of different exposed line widths. Firstly, the function relationships between the moving distance of axicon and the light beam magnification were deduced by using the laws of geometric optics and trigonometric functions, and the ranges of parameters of axicon were determined after analyzing the feasibility of zoom cam and the tolerance sensitivities. Then, the axicon and zoom lens were combined to implement the beam shaping unit. Finally, a kind of reducing scale zoom lens was designed to add into the combined system to achieve the continuously adjustment of the σ . The result shows that the normalized annular width $\Delta\sigma$ and the outer diameter of annulus σ_{outer} can be adjusted continuously in the range of $[0.25, 1]$ and $[0.4, 1]$, respectively, which meets

收稿日期: 2010-01-13; 修订日期: 2010-05-27.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 40974110)

the needs of design.

Key words: deep ultraviolet lithography; annular illumination; axicon; partial coherent factor; afocal zoom system

1 引言

曝光波长为 193 nm 的投影式光刻机是目前国际上制造极大规模集成电路的主流设备,主要用于制备 90, 65, 45 nm 乃至更低特征线宽的集成电路芯片^[1]。光刻机最核心的部分是投影曝光光学系统,该系统由照明系统和投影物镜系统两部分组成。其中,照明系统用于保证掩膜面具有高均匀性照明,控制曝光剂量和实现离轴照明,以提高光刻系统分辨率和增大焦深(Depth of Focus, DOF)。其主要由扩束单元、光束传输单元、能量检测和控制单元、光束整形单元、匀光单元、可变光阑狭缝单元和照明物镜组成。各单元结构形式的演变都以提高光刻系统分辨率为最终目的。为了使光刻系统达到衍射极限的分辨能力,国际上先后提出了若干分辨率增强技术(Resolution Enhancement Technology, RET)^[2-4],其中离轴照明技术(Off-Axis Illumination, OAI)是目前技术最成熟,应用最为广泛的 RET,该技术由照明系统中的光束整形单元设计实现。

目前,光束整形单元的设计方法有几何光学方法和物理光学方法两种。前者利用轴锥镜的锥顶角分割入射光束^[5-7],实现环形照明模式。通过改变轴锥镜组之间的间隔 d 实现部分相干因子 σ 的连续调节。 σ 定义为照明系统数值孔径与投影物镜物方数值孔径之比,它与曝光系统的分辨能力有关,调节 σ 可使不同曝光线宽达到最佳分辨率。轴锥镜的优点是结构简单、装调容易,通过加入塔形棱镜元件能够实现四极照明模式,不足之处是不能实现偶极照明模式。文献[8]报道了用轴锥镜调整 σ 的方法,但仅给出了锥角 α 在 10° 以内时光束放大倍率的近似计算公式,该公式定义放大倍率为出射光束外环口径与入射光束口径之比,通过改变放大倍率可实现 σ 连续调节。此外,随着 d 增加,环形照明模式的外、内环直径 σ_{outer} 和 σ_{inner} 只能按照环宽度 $\Delta\sigma = \sigma_{\text{outer}} - \sigma_{\text{inner}}$ 为定值的规律变化,这个约束条件限制了 σ 的调节范围。

另一方面,通过物理光学方法设计的衍射光

学元件(Diffractive Optical Element, DOE)虽能够实现各种 OAI 模式^[9],但每个 DOE 只能实现一种照明模式,不能实现 σ 连续调节^[10]。

本文基于几何光学方法设计了光束整形单元,用几何光学定律和三角函数公式推导了 d 与轴锥镜放大倍率之间的精确计算公式,分别实现了 $\Delta\sigma$ 和 σ_{out} 的调节,从而使 σ 连续可调。光束整形单元分两个步骤设计:首先结合轴锥镜的放大倍率公式设计缩小倍率的变倍镜组,在保证光束整形单元的入射、出射光束口径不变的前提下,实现 $\Delta\sigma$ 在 $[0.25, 1]$ 内连续可调。然后,设计了放大倍率在 $[0.4, 1]$ 内连续变化的缩束镜组控制 σ_{outer} 的大小,最终满足调节 σ 的要求。

2 OAI 技术简介

OAI 技术在光刻系统中的主要作用是提高分辨率的同时增大焦深,并调整 σ 使光刻系统对不同的曝光线宽有最佳的分辨率。

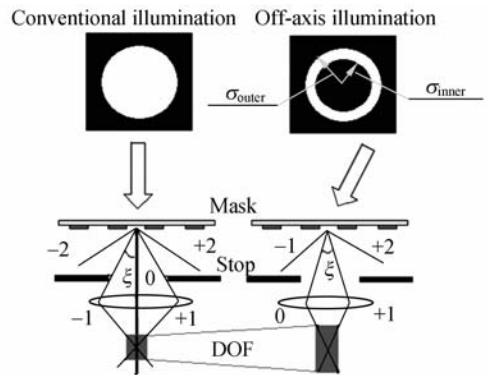


图 1 离轴照明原理

Fig. 1 Principle of OAI

首先,如图 1 所示,掩模面(mask)上分布的密集线条使入射其上的光束产生明显的衍射效应,±1 级衍射光对称分布于 0 级光的两侧。当采用传统照明时,如果掩模面最小线宽尺寸小于某一值 R_0 ,则 0 级和 ±1 级衍射光之间的夹角均大于投影物镜的物方孔径角,造成高级次衍射光不能参与成像。当采用离轴照明时,离轴光束以一定的角度入射到特征线宽为 R_0 的掩模面上

时,0级和+1级衍射光进入投影物镜系统,即有高频分量参与曝光成像,提高了光刻系统的分辨能力。

其次,与传统照明相比,离轴光束进入投影物镜系统的孔径角NA较小,根据瑞利焦深公式:

$$DOF = k_2 = \frac{\lambda}{NA^2}. \quad (1)$$

式中 k_2 是工艺因子, λ 是曝光波长,可知较小的NA有利于增大焦深^[11-12]。

最后,根据不同曝光线宽的需要,OAI模式主要有环形照明、四极照明和偶极照明。环形照明对于在任意方向上排布的曝光线条具有相同的分辨能力。与环形照明相比,四极照明能够明显提高与对极连线成 45° 方向上的正交排布的曝光线条的分辨能力;偶极照明则可对排布方向垂直于两极连线的曝光线条提供最佳分辨率。针对曝光线宽为90 nm节点的深紫外光刻设备,采用环形照明模式可以满足分辨率的要求,当曝光线宽小于65 nm及以下节点时,则要用到四极照明及偶极照明模式^[13-14]。

此外,深紫外光刻照明系统采用部分相干光源照明,相干度由 σ 衡量。根据瑞利分辨率公式^[15]:

$$R = k_1 \cdot \frac{\lambda}{NA(1 + \sigma + \frac{\sin \varphi}{NA})}. \quad (2)$$

式中, R 为光刻系统分辨率, k_1 为工艺因子, φ 为离轴角。可知为了使不同曝光线宽均达到最佳分辨率,要求 σ 连续可变。

3 光束整形单元设计

3.1 设计参数计算

已知入射光束直径 $D_{\text{input}} = 8 \text{ mm}$,根据 $\Delta\sigma_{\text{min}} = 0.25$ 的要求,计算出最大出射光束直径为 $D_{\text{output}} = D_{\text{input}} / \Delta\sigma_{\text{min}} = 32 \text{ mm}$,即光束放大倍率为 $D_{\text{output}} / D_{\text{input}} = 4$ 。轴锥镜材料采用熔融石英玻璃,它在193 nm波段的折射率为1.5607。根据图2中表示的各参量的符号,得到轴锥镜放大倍率公式为:

$$M_{\text{axicon}} = \frac{a+b}{a} = 1 + \frac{BC \cdot \cos(\angle BCE)}{a} = 1 + \frac{BC \cdot \cos(\alpha)}{a}. \quad (3)$$

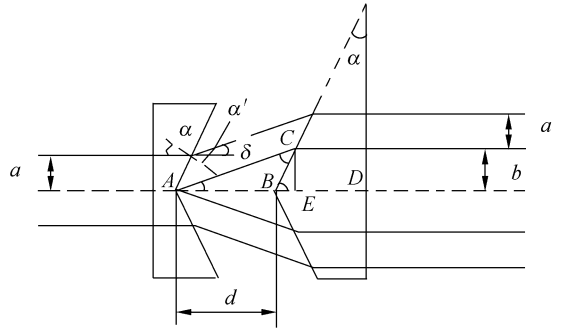


图2 轴锥镜原理

Fig. 2 Principle of axicon prism

在三角形ABC中应用正弦定理:

$$\frac{BC}{\sin(\angle CAB)} = \frac{AB}{\sin(\angle BCA)}, \quad (4)$$

其中 $\angle CAB = \delta = \alpha' - \alpha$,

$$\begin{aligned} \angle BCA &= \angle CBD - \angle CAB = (\frac{\pi}{2} - \alpha) - (\alpha' - \alpha) = \\ &= \frac{\pi}{2} - \alpha'. \end{aligned}$$

根据和差化积公式 $\sin(\alpha' - \alpha) = \sin \alpha' \cdot \cos \alpha - \cos \alpha' \cdot \sin \alpha$ 以及斯涅尔定律 $n \sin \alpha = \sin \alpha'$,推导出锥角 α ,间隔 d 和放大倍率 M_{axicon} 之间的准确计算公式:

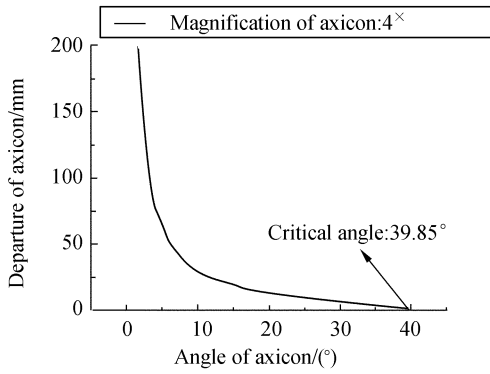
$$M_{\text{axicon}} = \frac{a+b}{a} = 1 + \frac{d}{a} \left[\frac{n \sin \alpha \cos^2 \alpha}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \alpha}} - \sin \alpha \cos \alpha \right]. \quad (5)$$

由公式(5)可知, M_{axicon} 与 d 呈线性关系有利于通过控制凸轮驱动电机的转角步长达到 σ 的分辨率要求。考虑到全反射现象,锥角的 α 取值有一定范围, M_{axicon} 为4时, d 和 α 之间的关系如图3所示。 α 越小,入射到轴锥镜上光线的入射角度越小,透过率越高。

从变倍凸轮的工程角度分析,凸轮的升角 β 不能大于 45° ,否则凸轮运动时会出现卡滞现象。 β 与轴锥镜移动步长 Δx 之间的关系表示为:

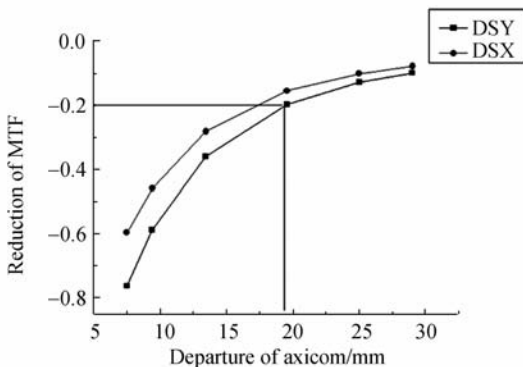
$$\beta = \arctan\left(\frac{\Delta x}{r \cdot \Delta \theta}\right), \quad (6)$$

式中, r 是凸轮筒半径, $\Delta \theta$ 是凸轮转角步长, Δx 是每转动 $\Delta \theta$ 角时对应的轴锥镜轴向移动量。本文凸轮转角取 200° ,步数 $m = 500$,即 $\Delta \theta = 0.4^\circ$ 。取 $r = 10 \text{ mm}$,计算得到凸轮升角 $\beta = 40^\circ$ 时,对应的 $d = \Delta x \cdot m = 29.3 \text{ mm}$,为保证凸轮工作时转动平滑, d 要小于该值。

图 3 α 与 d 的关系Fig. 3 Relationship between α and d

另一方面,当步数 m 一定时,随着 d 的减小,步长 Δx 也减小,对凸轮机构的运动精度要求增加,使得公差灵敏度提高。图 4 表示 d 与轴锥镜在 x, y 方向的偏心误差 DSX, DSY 为 0.1 mm 时导致的调制传递函数 MTF 下降量之间的关系。可知当 $d < 18$ mm 时,仅偏心公差一项便使 MTF 下降量超过 0.2,严重影响了光束整形单元的性能。

基于上述两方面考虑,确定 d 的取值为 18~29.3 mm,为了保证 σ 的移动精度,取 $d = 29$ mm。

图 4 d 与公差灵敏度的关系曲线Fig. 4 Relationship between d and tolerance sensitivity

3.2 光束整形单元结构分析

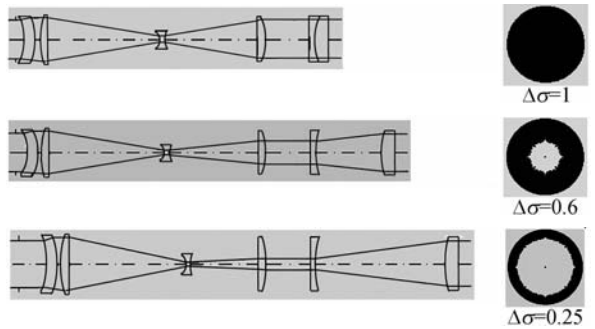
根据计算得到的参数,用光学设计软件 CODEV 设计了无焦变倍扩束镜组和轴锥镜组,前者放大倍率为 $(1/4)^{\times}$,采用“正-负-正”的结构形式,材料全部使用熔融石英玻璃。变倍镜组与轴锥镜组合的方式分为轴锥镜放在前或后两种,每种方式的整形单元性能比较如表 1 所示。由表 1 可

知,轴锥镜放在后面时的光束整形单元有如下优点:加工装调误差灵敏度低;元件的最大口径小于 10 mm,便于加工;入射角度较小,提高了系统的透过率。光束整形单元的设计结果如图 5 所示,实现了 $\Delta\sigma$ 在 $[0.25, 1]$ 间的连续可调。

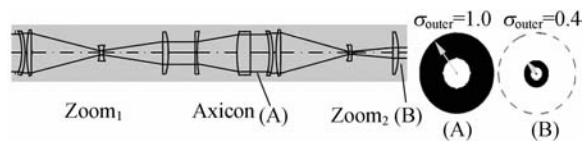
表 1 不同组合方式光束整形单元对其性能的影响

Tab. 1 Influence of beam shaping units with different structures on its performance

		MTF	Max	Max
		decrease by	incident	diameter
	d/mm	DSY=0.1 mm	angle/($^{\circ}$)	/mm
Axicon & Zoom	29	-0.710 7	73.95	19.1
Zoom & Axicon	29	-0.096 3	43.26	9.2

图 5 实现连续可调的光束整形单元结构及输出光强分布
Fig. 5 Structures of beam shaping unit for continuously adjusting $\Delta\sigma$ and intensity distribution of output beam

为了满足 σ_{outer} 在 $[0.4, 1]$ 内连续可调的要求,在轴锥镜组后部加入了放大倍率同样为 $[0.4, 1]$ 的连续变倍无焦缩束镜组,如图 6 所示。光束整形单元轴向总长度为 150 mm。

图 6 实现 $\Delta\sigma$ 与 σ_{outer} 连续可调的光束整形单元及输出光强分布Fig. 6 Beam shaping unit for continuously adjusting $\Delta\sigma$ & σ_{outer} and intensity distribution of output beam

4 结 论

本文设计的照明系统光束整形单元实现了环形照明模式,并且 σ 连续可调,可适用于不同曝光线宽的要求。光束整形单元的设计分为两步:首先根据几何光学定律和三角函数确定了轴锥镜移动距离与光束放大倍率之间的函数关系;然后分别从变倍凸轮可行性设计和装调公差灵敏度两个角度合理地给出移动距离的取值范围,设计了放大倍率为 $(1/4)^\times$ 的无焦变倍镜组。通过分析轴

锥镜与变倍镜组的位置关系确定了光束整形单元的结构形式,实现了 σ_{outer} 不变, $\Delta\sigma$ 在 $[0.25, 1]$ 内连续可调。在上述整形单元后部设计了放大倍率为 $[0.4, 1]$ 的连续变倍缩束镜组,满足了 σ_{outer} 连续调节的要求。

此外,为了使深紫外光刻系统的曝光线宽尺寸达到65 nm及以下节点,要求光束整形单元能够实现四极照明模式。对上述整形单元进行扩展,设计塔型棱镜与轴锥镜组合即可实现四极照明,且 σ 仍然可以连续调节,扩大了基于几何光学设计的光束整形单元的使用范围。

参考文献:

[1] 林强,金春水,向鹏,等. 离轴照明 Schwarzschild 投影物镜的计算机辅助装调方法[J]. 光学精密工程, 2003, 11(2):144-150.

LIN Q, JIN CH SH, XIANG P, *et al.*. Computer-aided alignment of Schwarzschild objective with off-axis illumination [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(2):144-150. (in Chinese)

[2] RYULI H, NOBUHITO T, KIMIO I, *et al.*. Optimization of source distribution for half-wavelength DOE[J]. *SPIE*, 2006, 6283:62838U.

[3] SARA L, UMBERTO I, ROBERT C. Analysis of the combined impact of the laser spectrum, illuminator miscalibrations, and lens aberrations on the 90nm technology node imaging with off axis illuminations[J]. *SPIE*, 2006, 6154:615434.

[4] HSIUNG H, LING C L, LIN C L. Novel illumination apertures for resolution-enhanced technology and through-pitch critical dimension control [J]. *SPIE*, 2005, 5754:1395-1404.

[5] 刘万里, 欧阳健飞, 曲兴华. 激光光束入射角度变化对角锥棱镜测量精度的影响[J]. 光学精密工程, 2009, 17(2):286-291.

LIU W L, OUYANG J F, QU X H. Effect of incident laser beam angle varying on cube corner retro-reflector measurement accuracy [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2):286-291. (in Chinese)

[6] 刘华, 卢振武. 可横向分光的大接收角非成像式聚光系统[J]. 光学精密工程, 2009, 17(12):2881-2886.

LIU H, LU ZH W. Lateral splittable non-imaging concentrators with large acceptable angles [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(12):2881-2886. (in

Chinese)

[7] 赵峻彦. 棱镜几何参数的类复向量解法[J]. 光学精密工程, 1995, 3(2):38-41.

ZHAO J Y. Calculation of the geometrical parameters of prisms with the similar complex vector method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1995, 3(2):38-41. (in Chinese)

[8] RIOUX M, TREMBLAY R, BELANGER P A. Linear, annular, and radial focusing with axicons and applications to laser machining [J]. *Applied Optics*, 1978, 17:1532-1536.

[9] 张巍, 巩岩. 投影光刻离轴照明用衍射光学元件设计[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11):2081-2086.

ZHANG W, GONG Y. Design of diffractive optical elements for off-axis illumination in projection lithography [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11):2081-2086. (in Chinese)

[10] HIDEKI K, KAVASAKI. Method and apparatus for illuminating a surface using a projection imaging apparatus; US, 6563567[P]. 2003.

[11] GARY Z, STEVE H. Illumination source mapping and optimization with resist based process metrics for low k_1 imaging[J]. *SPIE*, 2004, 5377:369-380.

[12] SABITA R, DOUG V D B, FUNG C, *et al.*. Extending aggressive low- k_1 design rule requirements for 90 and 65 nm nodes via simultaneous optimization of numerical aperture, illumination and optical proximity correction [J]. *SPIE*, 2005, 4(2):023003.

[13] CREIGHTON M A. Influence of illumination non-uniformity on pattern fidelity[J]. *SPIE*, 2005, 5754:1519-1528.

[14] PARTLO W N, TOMPKINS P J, DEVA P G, *et*

al., Depth of focus and resolution enhancement for i-line and deep-UV lithography using annular illumination[J]. *SPIE*, 1993,1927:137-142.

thography using the AERIARTM illuminator in a variable NA wafer stepper[J]. *SPIE*, 1996,2726:54-70.

[15] RICHARD R, GUY D, JAN M, *et al.*. Photoli-

作者简介:



赵 阳(1982-),男,吉林长春人,博士研究生,2007年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: juventus-xx@126.com

导师简介:



巩 岩(1968-),男,吉林梅河口人,博士后,研究员,主要从事光学系统设计、光机一体化设计及光机系统集成技术方面的研究。E-mail: ygong2000@sina.com

● 下期预告

激光器应用的电感储能发生器

V. F. Tarasenko, A. N. Panchenko, A. E. Tel'minov, D. E. Genin

(俄罗斯科学院 西伯利亚分院 强流电子所, 俄罗斯)

研发了适用于激光器的电感储能发生器(GIES),并研究了在高压混合气体中的放电和激光参数。研究表明,电感储能发生器产生高压预脉冲并引起放电电流突然增大的现象可在不同的混合气体中形成长时间的稳定放电。该预脉冲参数可以很容易地控制和优化每一种气体的混合物。在没有 IES 击穿电压和首次放电幅度下,电流尖峰会按因子 1.5~2 减少,从而导致纯激光参数。得到了最大的辐射功率,输出能量和氮气激光脉冲持续时间。在 40 ns 的脉冲持续时间里,紫外输出高达 50 mJ,红外输出也超出了 25 mJ,实现了梯级氮分子激光转换。因此 $C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$ 带总的脉冲持续时间延长至 100 ns。在 XeCl, XeF 和 KrF 受激准分子激光器中,脉冲宽度和输出能量都得到了改善。XeF 激光器的最大效率达到了 1.6%,同时峰值输出能量达到了 0.85 J,最大脉冲持续时间超过了 200 ns。在 248 nm 波长处,效率 3.3% 的 KrF 激光器产生的 160 ns 脉冲能量高达 650 mJ。最终得到了效率为 7.7%~10% 的非链式 HF(DF)激光器。演示了基于 CO₂ 分子高功率的有效运行,激光器在 10 600 nm 处的输出能量为 6.2 J,效率高达 25%。