

下一代光刻技术的 EUV 光源收集系统的发展

左保军, 祝东远, 张树青, 李润顺

(哈尔滨工业大学空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:当前半导体器件加工水平正在向 22 nm 方向发展, 而最有希望实现这一尺寸的光刻技术即为 EUV 光刻技术。EUV 光源所发出的 13.5 nm 辐射因为波长极短, 物质对其吸收十分强烈, 所以使采用透射式光学系统对辐射进行收集的可能几乎为零。如何高效地收集 EUV 光源发出的辐射能成为了 EUV 光刻技术中的一大难题。本文主要介绍了国外在 EUV 光源收集系统方面的发展现状, 描述了两大类 EUV 光源收集系统(垂直入射式和掠入射式)的一些设计形式和设计实例, 并对各种设计形式的 EUV 收集系统进行了分析和比较。还重点介绍了目前被普遍看好的内嵌式掠入射 Wolter I 型收集系统的设计与加工等情况。

关键词:光刻; EUV; 垂直入射式; 掠入射式; 收集效率; 内嵌式; Wolter I 型

中图分类号: TN305.7

文献标识码: A

Development of EUV source collectors for next generation lithography

ZUO Bao-jun, ZHU Dong-yuan, ZHANG Shu-qing, LI Run-shun

(Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: At present, the semiconductor chips' processing is developing toward 22 nm. The most probable method to achieve this size is EUV Lithography. The light emitted from EUV sources is very short (13.5 nm), and most of substances would absorb this radiation strongly, so using the transmission optics to collect the radiation is impossible. How to collect the radiation emitted from EUV sources efficiently becomes a big problem in EUV Lithography. This paper presents two kinds of EUV source Collector, near normal incidence collector and grazing incidence collector, and some designs or instances of them. Emphasis is put on the introduction about the nested grazing incidence Wolter I Collector.

Key words: lithography; EUV; normal incidence; grazing incidence; collection efficiency; nested; Wolter I

1 引言

当前, 半导体工业正在向光刻技术的物理极限发展。目前国外已经开发出节点为 32 nm 的半导体芯片。下一代的半导体芯片将向 22 nm 尺寸发展。而实现这一尺寸最有希望的技术即为 EUV 光刻技术, 首选波长为 13.5 nm。最近 20 年来, 业界一直认为 EUV 光刻是最有希望的下一代微芯片生产工艺。采用 EUV 光源进行光刻的主要难点有: 高功率 EUV 光源的研究、高效率收集装置的研制、掩模板的制造、高灵敏度且具有低线边缘粗糙度(line edge roughness, LER)的光刻胶的开发^[1-5]。由于诸多原因, 收集系统是整个 EUV 光源系统中最重要的部

分。该部分最靠近 EUV 辐射源, 需要在承受巨大的连续辐射和 EUV 辐射源产生的碎屑的影响下保持较好的反射率, 收集 EUV 光中 13.5 nm 波长的大部分光线, 并且需要解决在这一短波长下所产生的光学问题^[6]。EUV 光源所发出的极紫外光波长在 13.5 nm, 绝大多数光学材料对极紫外光都是强烈吸收的, 因而采用传统的透射式光学收集系统的可能性几乎为零。目前各国研究的 EUV 光源收集系统绝大多数都是反射式的。有采用垂直入射式反射系

作者简介:左保军(1955-), 男, 高级工程师, 主要从事光学设计等方面的研究。

收稿日期:2010-07-21

统,有掠入射式反射系统。各类收集系统有各自的优缺点,但其目的都是相同的,即提高对 EUV 光源辐射的收集效率,在光源像点位置获得均匀分布、高功率的光源像,用于后续系统照明。目前对于 EUV 辐射的收集装置最有希望的光学构造是基于掠入射内嵌式 Wolter I 设计形式^[7-8]。

2 收集系统发展现状与比较

2.1 垂直入射式收集系统

垂直入射形式收集系统是基于非球面反射镜设计,包含有较少的反射镜,光源位于系统的一个焦点处,光源所发出的辐射会聚到系统另一个焦点上。垂直入射形式收集系统的优点在于结构设计简单,加工容易,收集光能立体角大,热负荷要求不高等。目前垂直入射式收集系统主要有如下几种形式。

图1中所示为 SAGEM 公司对于放电等离子光源设计的一种垂直入射式收集系统,其参数如表1所示。该系统的收集角在 $\pm 19.25^\circ$ 和 $\pm 71^\circ$ 之间,相当于收集到光源在 2π 立体角内发出的 62% 左右的光能。在该系统中由于消碎屑装置的需要,反射镜 M1

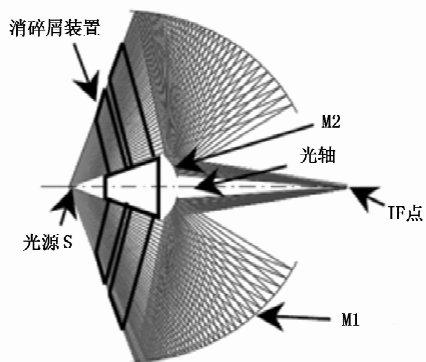


图1 由 SAGEM 为 DPP 光源设计的一种垂直入射收集系统

Fig. 1 collector for DPP source by SAGEM

表1 图1中所示系统的具体参数

Tab. 1 parameters of the system in Fig. 1

参数	数值
收集角	19.25° to 71°
像方孔径角	3.6° to 10°
输出像斑直径	8 mm
M1 直径	930 mm
M1 曲率半径	457 mm
M1 非球面二次项系数	-0.0266
反射镜 M1 上入射角	6° - 18°
M2 直径	180 mm
M2 曲率半径	122 mm
M2 非球面二次项系数	0.1
反射镜 M2 上入射角	18° ~ 58°

的直径相当大,接近 1 mm。

图2所示为 SAGEM 公司对于 LPP 光源设计的一种垂直入射收集系统。该系统由单一椭球面组成。LPP 光源位于椭球面一侧的焦点上,所发出的辐射通过椭球面会聚到另一个焦点上。这种结构在椭球面反射镜直径小于 700 mm 的情况下就能获得 80° 的收集角,相当于收集光源在 2π 立体角内发出辐射能量的 80%。由于所用的是 LPP 光源,所以该系统中没有加消碎屑装置,这样又避免由于消碎屑装置产生的辐射传输损耗^[6]。

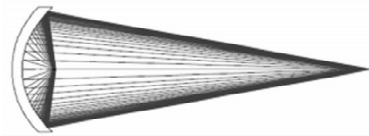


图2 由 SAGEM 为 LPP 光源设计的一种垂直入射收集系统

Fig. 2 collector for LPP source by SAGEM

图3所示的垂直入射收集系统由两部分组成。一部分是旋转椭球面镜,另一部分是球面镜部分。光源位于椭球面的一个焦点处,光源发出的辐射经椭球面反射后,会聚到椭球面的另一个焦点位置。球面镜的作用是收集椭球面镜收集不到的辐射,提高系统收集效率^[9]。

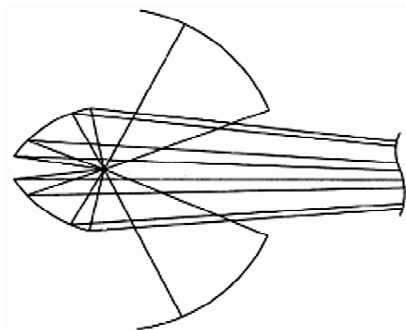


图3 另一种垂直入射式收集系统

Fig. 3 another near normal incidence collectors

除了上述三种之外还有一些垂直入射形式的收集装置,不过他们的大体结构均有一定的相似性。

垂直入射形式的收集系统与传统的反射式光学系统相似,其优点在上面也提到过,设计简单、加工容易、收集立体角大等。不过,由于绝大多数物质对极紫外波段存在强烈的吸收,采用垂直入射形式必然会大大降低反射率,需要较为复杂的涂层才能满足要求,而相比之下,掠入射形式的收集系统不需要很复杂涂层就可以获得很高的反射率(相对于垂直入射)。

2.2 掠入射式收集系统

掠入射式收集系统最大特点就是反射面上的掠

入射角很小(即入射角很大),采取这种入射方式是为了提高极紫外光的反射率,减少反射损失。理论上可以证明对于一般的掠入射式收集系统,系统对光源的收集立体角与系统的掠入射角有一定的关系,当收集立体角增大时,掠入射角也将随着增大,从而降低了反射率,这是与采用掠入射思想相背的,为了保证反射率满足要求,或者为了保证收集立体角足够大,一般都采用多层反射镜内嵌的形式,具体层数需要根据实际要求来定。

图4所示为内嵌式旋转椭球面收集系统示意图。各层椭球面拥有两个公共焦点S和IF。EUV光源位于焦点S处,其发出的辐射由收集系统收集后会聚到另一个公共焦点IF处^[10]。光线在反射镜面反射一次。该系统结构的特点将与图5所示的内嵌式 Wolter I 型收集系统一起比较。

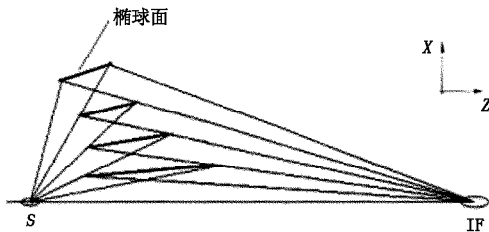
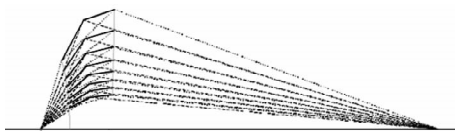


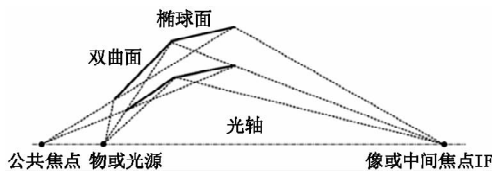
图4 4层内嵌式旋转椭球面收集系统

Fig.4 a nested collector with four elliptical shells



(a)8层内嵌式 Wolter I 型收集系统

(a) schematic eight-mirror-shell-Wolter I collector



(b)2层内嵌式 Wolter I 型收集系统示意图

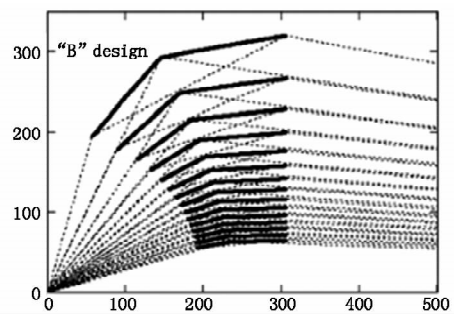
(b) schematic two-mirror-shell-Wolter I collector

图5 内嵌式 Wolter I 型收集系统示意图

图5(a)、图5(b)所示为内嵌式 Wolter I 型收集系统示意图。该系统结构式由 Wolter I 型天文望远镜演化而来。与图4所示结构不同的是, Wolter I 型收集系统的反射镜单元由具有一个公共焦点双曲面和椭球面构成,该双曲面和椭球面均绕光轴旋转对称,光线分别在两曲面上反射一次(共两次反射)到达椭球面另一焦点(IF点)。各层反射镜的双曲面和椭球面的焦点相同。与图4中由椭球面构成的内嵌式收集系统相比,内嵌式 Wolter I 型收集系统的结构较为复杂,而且在给定相同的规格要求下,

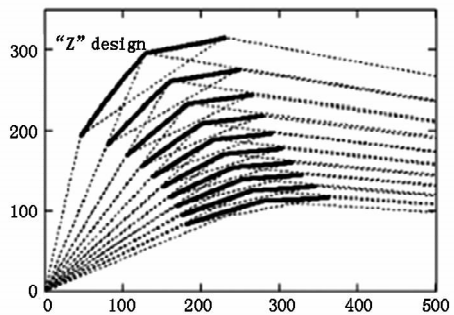
图4所示收集系统所用的内嵌反射镜层数要少于 Wolter I 型收集系统。但是,通过仿真可以证明,在系统对光源的收集角较小时,两系统的收集效率近似相等;当收集角增大时,Wolter I 型结构的总反射率和收集效率及 IF 点处的光斑均匀性均要明显好于图4所示的内嵌式旋转椭球面收集系统^[7]。

图6(a)、图6(b)所示分别为“B”形式收集系统和“Z”形式收集系统。这两种收集系统形式均可看作是在内嵌式 Wolter I 型收集系统基础上演化而来的。其目的是为了根据实际需求,提高收集效率。其中“B”形式的设计思想是让图5(b)所示的公共焦点位于光轴以外(如图7所示)。



(a)“B”形式收集系统

(a)“B” design collector



(b)“Z”形式收集系统

(b)“Z” design collector

图6 “B”和“Z”形式收集系统

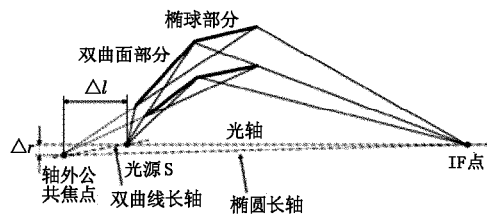


图7 “B”设计示意图

Fig.7 schematic “B” design

这种形式的优点是可以适当地减小两曲面上光线的掠入射角,提高反射率。同时,整个系统是由图7所示截面内双曲线部分和椭圆部分沿光轴旋转一周得到,这样系统中的曲面将不再是 Wolter I 型收集系统中的双曲面和椭球面。其公共焦点为一圆

周。经仿真验证,该设计对于扩展光源具有较高的收集效率。“Z”形式的设计思想是保证任一光线在两个曲面上的掠入射角相等,这样两个面上的反射率可以很好地匹配,得到较高的总反射率来提高收集效率。在这一思想下,建立数学模型计算出两曲面的面型。所得曲面也不再是二次曲面,而是两个高次曲面^[11]。综合来看“B”形式和“Z”形式收集系统在收集效率上均要高于 Wolter I 型收集系统,但实际收集效率提高很小(见参考^[11]),此外后两种形式在加工和检测方面要较 Wolter I 型困难很多,所以在实际应用时需要谨慎考虑。

综合比较以上几种垂直入射式收集系统和掠入射式收集系统,不难发现 Wolter I 型收集系统更具有应用潜力。虽然较垂直入射式收集系统相比,Wolter I 型收集系统在加工、制造及散热处理方面要相对劣势一些,但随着设计和加工水平的提高,Wolter I 型收集系统应用于实际已成为可能。而且现在也普遍认为内嵌式掠入射 Wolter I 型收集系统最有希望应用于 EUV 光刻系统中^[7]。

3 内嵌式掠入射 Wolter I 型收集系统

从上面的比较可知道,内嵌式掠入射 Wolter I 型收集系统具有收集效率高、IF 点处光能分布均匀、加工制造可行等优点将最有希望成为用于下一代光刻技术——EUV 光刻技术的光源辐射收集系统。由于其内嵌式结构及椭球面与双曲面结合的双反射镜形式的特殊性,在设计时不能按照常规的光学系统来考虑,应从该系统的目的和特点出发对其进行设计。对于 EUV 光源收集系统,其最重要的技术要求就是系统的收集效率。所以在对内嵌式 Wolter I 型收集装置进行设计时,必须以收集效率为主,同时兼顾像方(IF 点)数值孔径、像质、机械、热负荷、反射镜面涂层材料、加工、装配与调试等因素。同时设计者还必须要考虑到收集系统所衔接的前后两部分系统的具体要求,需要与这两部分系统的设计者进行综合讨论,以确定最合适、最理想的总体结构。

在对内嵌式 Wolter I 型收集系统进行设计时,在确保收集效率的前提下,应较为重要地考虑机械和热负荷以及涂层材料的选择。为了满足足够的收集立体角,所采用的层数可能较多,一般在 8 层左右甚至更多,这样内部各层之间间隔很小,对系统散热、以及由此引发的机械变形等会产生很大影响。涂层材料的选择需要使所用的 13.5 nm 波长的极紫外光在一定的掠入射角范围内具有较高的反射

率,而且涂层自身的稳定性和均匀性也需要认真考虑。

目前对 Wolter I 型系统反射镜的加工都是将椭球面和双曲面反射镜加工在一个基底上,这样对于装调来说节省很多时间,而且机械性能也相应提高。目前国外对这种特殊类型的反射镜加工方法为电镀加工方法。首先加工与反射镜匹配的高精度同心轴(如图 8 所示),好的心轴不仅要有精准的轮廓,而且还应具有平滑、超级精磨的表面。之后在心轴外表面进行镀膜。再对镀膜后的心轴进行镀镍,即构造反射镜主体,达到规定的反射镜厚度后,通过热胀冷缩作用将薄膜和镍基底一同从心轴上剥离,此时薄膜吸附在镍基底上,即获得了一层反射镜单元。



图 8 用于加工 Wolter I 型收集系统反射镜的心轴^[12]

Fig. 8 a mandrel for Wolter I collector

对于整体结构来说,设计时应尽量减小内层对外层上的反射光线的遮挡,即系统的渐晕。同时反射镜厚度应在机械条件满足的情况下尽可能的小,以减少反射镜厚度对辐射的遮挡。还要考虑靠近光源一侧需要加装的消碎屑装置对收集系统的影响等。整体结构还应保证便于装备和节。

对于内嵌式 Wolter I 型收集系统,目前有很多设计思想。其中一种是将 Wolter I 型收集系统设计分成两部分:①角度设计,即先根据收集效率推导出收集系统所要满足的角度关系,确定一基础模型;②空间结构设计,即根据实际尺寸等要求,在角度设计基础上对基础模型进行放大,确定各层尺寸和参数,最后得到整体结构^[7]。各层之间有一定联系,这可以从图 5(b)中看出。这种设计思想是一种很好的设计方式。其他设计者也可以从自己的角度出发,选用新的设计方式来完成设计。

4 总结

作为下一代微芯片生产的首选光刻技术,EUV 光刻将对整个半导体芯片制造产生巨大的影响。

EUV 光刻具有目前许多其他光刻技术不具备的优点,如波长短,分辨率高,曝光效率高等。但同时 EUV 光刻也有诸多不足,最主要的缺点就是极紫外辐射易被吸收,光源利用率低,所以,对于 EUV 光源收集系统的设计显得尤为重要。设计出高收集效率的 EUV 光源收集系统将对整个 EUV 光刻技术起着重要作用。随着理论的完善和实际中不断地创新与改进,相信会有更多更好的针对短波长辐射的收集系统出现。

参考文献:

- [1] Editorial office of EPE. Advance in EUVL Technique [J]. EPE,2008,165:2-27. (in Chinese)
EPE 编辑部. EUV 光刻技术的发展 [J]. EPE,2008,165:2-27.
- [2] Wang Li-hui, He Ling-ping, Wang Xiao-kun, et al. 30.4 nm filter in normal incidence imager [J]. Opt. Precision Eng.,2008,16(1):43-46. (in Chinese)
王丽辉,何玲平,王孝坤,等. 30.4 nm 正入射成像系统滤光片[J]. 光学精密工程,2008,16(1):43-46.
- [3] Dong Ning-ning, Li Min, Liu Zhen, et al. Wavelength calibration of extreme ultraviolet monochromator [J]. Opt. Precision Eng.,2008,16(9):1661-1664. (in Chinese)
董宁宁,李敏,刘震,等. 极紫外单色波长标定[J]. 光学精密工程,2008,16(9):1661-1664.
- [4] Ni Qi-liang, Liu Shi-jie, Cgeb Bo. Compact high-precision soft X-ray and extreme ultraviolet reflectometer [J]. Opt. Precision Eng.,2008,16(10):1887-1889. (in Chinese)
尼启良,刘世界,陈波. 小型高精度软 X 射线-极紫外反射率计[J]. 光学精密工程,2008,16(10):1887-1889.
- [5] G Derra, W Singer. Collection efficiency of EUV sources [J]. Proc. SPIE,2003,5037:728-741.
- [6] R Mercier Ythier, X Bozec. EUV near normal incidence collector development at SAGEM [J]. Proc. SPIE,2008,6921:1-5.
- [7] Fabio E Zocchi, Enrico Buratti A. Design and optimization of collectors for extreme ultra-violet lithography [J]. Proc. SPIE,2006,6151:1-6.
- [8] Fabio E Zocchi. High-efficiency collector design for extreme-ultraviolet and x-ray applications [J]. Applied Optics,2006,45(35):1-6.
- [9] W N Partlo, J M Algots, G M Blumenstock, et al. Fomenkov, and X. Pan. collector for EUV light sources [P]. U. S. Patent Appl. No. 2006/0131515.
- [10] W Singer, J Wangler. Collector for an illumination system with a wavelength of less than or equal to 193 nm [P]. U. S. Patent Appl. No. 2003/0043455.
- [11] Zocchi F E, Benedetti, E. Optical designs of grazing incidence collector for extreme ultraviolet lithography [J]. Proc. SPIE,2007,6(4):1-6.
- [12] Wilhelm Egle, Wolfgang Hafner. EUV collectors: design, development, fabrication and testing [J]. Proc. SPIE,2004,5193:39-48.