

# 激光等离子体 极紫外光刻光源

窦银萍 宋晓伟 陶海岩 著

国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 激光等离子体 极紫外光刻光源

窦银萍 宋晓伟 陶海岩 著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

激光等离子体极紫外光刻光源是下一代光刻的核心技术之一，广泛应用于半导体光电产业并对集成芯片向微型化和智能化发展具有极大的促进作用。

本书首先介绍了用于光刻的激光等离子体极紫外光源的国内外发展现状，并系统地阐述了激光等离子体光源的相关理论。其次介绍了用于6.7nm光源探测的平像场光栅光谱仪的设计、搭建及标定。最后，详细介绍了工作波长6.7nm极紫外光源离子碎屑特性及其阻挡的实验研究结果。

本书可作为光学、微电子等专业本科生的参考教材，也可作为激光与物质相互作用、激光等离子体、极紫外光刻技术、极紫外光辐射电子光谱术等领域的研究生、专业研究人员以及相关技术人员的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

激光等离子体极紫外光刻光源/窦银萍, 宋晓伟, 陶海岩著.

—北京: 国防工业出版社, 2018.12

ISBN 978-7-118-11793-6

I. ①激… II. ①窦… ②宋… ③陶… III. ①激光—等  
离子体—紫外线—离子刻蚀 IV. ①TN305.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第278749号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京虎彩文化传播有限公司印刷

新华书店经售



开本 880×1230 1/32 印张 3% 字数 104千字

2018年12月第1版第1次印刷 印数 1—500册 定价 79.00元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

# 前 言

极紫外光刻技术是制造特征尺寸小于 22 nm 芯片的首选关键技术，光源是极紫外光刻系统的重要组成部分。激光等离子体极紫外光源因体积小、亮度高并通过选择靶材及控制等离子体参数可实现光源的输出波长调谐等诸多优点而受到研究人员的青睐，它是一种性能优良的、较为适合于极紫外光刻应用的台式极紫外光源。近十年来，研究人员对 13.5 nm 光源进行了大量的理论和实验系统研究，为激光等离子体光源的广泛应用奠定了研究基础。伴随着极紫外光刻中其他各项关键技术难题的不断解决，工作波长 13.5 nm 极紫外光刻将在近期投入工业化量产。为了制备更小特征尺寸的芯片，近年来国外光刻界开始了 6.7 nm 附近极紫外光刻技术的研究。与 13.5 nm 激光等离子体光源的情况类似，研究高光谱辐射强度、低碎屑 6.7 nm 附近激光等离子体光源已成为极紫外光学领域新的研究热点。

本书以 6.7 nm 极紫外光刻为应用背景，对钷 (Gd) 靶激光等离子体极紫外光源的研究进行系统介绍。首先阐述了用于光刻的激光等离子体极紫外光源的国内外发展现状，系统介绍了激光等离子体光源的相关理论，为激光等离子体光源的研究提供了理论基础。书中还详细描述了设计并搭建一台工作在 5~50 nm 极紫外波段、高光谱精度的平像场光栅光谱仪的方法。系统介绍了激光 Gd 等离子体和  $Gd_2O_3$  纳米粒子掺杂玻璃靶等离子体在 6.7 nm 附近的光谱特性，此外，优化了产生 6.76 nm 极紫外辐射光的实验参数，并通过采用双脉冲激光打靶得到在 6.76 nm 处较高光谱纯度的极紫外辐射光谱。利用等离子体的光谱法研究  $Gd_2O_3$  纳米粒子掺杂玻璃靶等离子体的时空演化特性。分别通过采用向靶室内充入缓冲气体、外加磁场、双脉冲激光打靶以及缓冲气体与双脉冲相结合等方法来减缓光源碎屑对多层膜的影响。

本书的具体内容如下:

第1章,介绍极紫外光刻光源的国内外发展现状及研究背景和意义,综述了激光等离子体极紫外光刻光源的研究进展。

第2章,系统阐述激光等离子体光源的相关理论。对激光等离子体形成、等离子体的动力学特性,以及激光等离子体光谱辐射机制的相关理论等进行了较为系统的描述,为第4章和第6章中对光源研究获得的实验现象和结果的分析奠定了理论基础。此外,在第2章中对利用光谱法对激光等离子体的电子温度、电子密度等重要物理参量诊断的理论基础进行了描述,为第5章中利用光谱法对光源用激光等离子体特性研究提供了理论支持。

第3章,极紫外平场光栅光谱仪的设计、调试和标定。为获得激光等离子体极紫外辐射特性,进而优化光源输出,设计并搭建了一台摄谱范围为5~50 nm、分辨率可达0.02 nm极紫外平场光栅光谱仪,并对谱仪进行安装调试,分别通过飞秒激光高次谐波源和纳米厚度铯金属薄膜的吸收和玻璃靶形成激光等离子体中硅(Si)离子辐射出的线谱对光谱仪进行了标定,标定后的光谱仪成功地应用于极紫外光源的研究中。

第4章,Gd靶激光等离子体的极紫外辐射光谱特性。系统介绍了脉冲激光功率密度、激光聚焦光斑尺寸以及收集极紫外辐射方向对Gd靶激光等离子体极紫外辐射光谱的影响。采用双脉冲打靶方法和Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>纳米粒子掺杂的玻璃靶材形式分别获得Gd靶激光等离子体在6.7 nm附近较窄的极紫外辐射光谱,为极紫外多层膜光反射镜收集带内光辐射提高了效率。

第5章,Gd靶光源等离子体演化的研究。激光等离子体内部特性是获得有效光源的重要影响因素,在本章中采用光谱法研究Gd靶激光等离子体时空演化,并且通过Si(I) 250.7 nm和Si(I) 263.2 nm的发射线谱计算获得了等离子体的电子温度和电子密度及其随时间和空间分布变化规律,为得到有效光源提供良好的等离子体环境。

第6章,Gd靶激光等离子体光源碎屑的减缓研究。为解决激光等离子体光源碎屑对光刻系统中元件造成严重危害,从而获得洁净光源,在本章中重点地阐述了Gd靶激光等离子体光源碎屑的动力学特

性,并分别采用在光源产生靶室中加入中性缓冲气体、加入外部磁场、采用双脉冲方案以及缓冲气体与双脉冲相结合的方法对光源碎屑减缓作用进行对比研究。

本书在编写过程中,长春理工大学林景全教授给予了大力支持与指导,并提供了优越的实验条件及与极紫外光源国际知名专家 Toshihisa Tomie 教授的合作机会。陶海岩老师等长春理工大学超快光学实验室的老师及同学们也给予了极大鼓励,在此表示衷心感谢。最后感谢家人对我工作的支持与理解。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,欢迎各位读者批评指正。

作 者

2018 年 11 月

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 极紫外光刻光源的产生方式	5
1.2.1 同步辐射光源	5
1.2.2 气体放电等离子体源	5
1.2.3 激光等离子体源	6
1.3 激光等离子体极紫外光源的研究概况	8
1.3.1 13.5nm 工作波长极紫外光源转化效率的研究	8
1.3.2 13.5nm 工作波长极紫外光源碎屑有效减缓的研究	11
1.4 极紫外光源的国内研究进展	13
1.5 6.7nm 极紫外光刻光源研究进展	14
1.6 6.7nm 极紫外光源研究意义	18
1.7 小结	19
第 2 章 激光等离子体的物理特性	20
2.1 等离子体的产生方式	20
2.2 激光等离子体的膨胀过程	21
2.2.1 激光等离子体等温膨胀过程的特性方程	23
2.2.2 激光等离子体绝热膨胀过程的特性方程	25
2.3 激光等离子体电子密度和电子温度光谱法诊断	26
2.4 激光等离子体光谱辐射机制	30
2.5 等离子体中碎屑产生的物理机制	31
2.6 双脉冲激光打靶机制	33
2.7 小结	36

<b>第 3 章</b>	<b>极紫外平场光栅光谱仪的设计、调试和标定</b>	37
3.1	引言	37
3.2	极紫外平场光栅光谱仪设计	37
3.2.1	使用平场光谱仪的必要性	37
3.2.2	平场光谱仪的设计	38
3.3	平场光谱仪的准直、安装调试和检验	40
3.3.1	飞秒激光高次谐波产生的实验装置	40
3.3.2	平场光谱仪光路的准直	42
3.3.3	平场光谱仪的安装调试和检验	43
3.4	平场光谱仪的标定	43
3.4.1	飞秒激光高次谐波法标定	43
3.4.2	元素吸收边法标定	46
3.4.3	Si 离子线谱法标定	49
3.5	小结	51
<b>第 4 章</b>	<b>Gd 靶激光等离子体的极紫外辐射光谱特性</b>	53
4.1	引言	53
4.2	Gd 靶激光等离子体光源光谱辐射影响	54
4.2.1	Gd 靶激光等离子体的极紫外光谱特性	54
4.2.2	实验装置	54
4.2.3	Gd 靶实验结果与分析	56
4.3	预等离子体条件下 Gd 靶等离子体的极紫外光谱特性	61
4.3.1	实验装置	61
4.3.2	实验结果与分析	62
4.4	收集方向对极紫外辐射光谱特性的影响	63
4.5	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 纳米粒子掺杂玻璃靶等离子体的极紫外光谱特性	65
4.6	Gd 靶激光等离子体离带热辐射特性	69
4.7	小结	72
<b>第 5 章</b>	<b>Gd 靶光源等离子体演化特性</b>	73
5.1	引言	73



5.2	实验装置及方法	74
5.3	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 纳米粒子掺杂玻璃靶激光等离子体 时间演化特性	75
5.4	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 纳米粒子掺杂玻璃靶激光等离子体 空间演化特性	78
5.5	小结	81
<b>第 6 章</b>	<b>Gd 靶激光等离子体光源碎屑 动力学特性及其减缓方法</b>	<b>82</b>
6.1	引言	82
6.2	激光等离子体光源碎屑动力学特性	83
6.2.1	飞行时间法探测光源离子碎屑	83
6.2.2	飞行时间法测量离子速度的实验装置	84
6.2.3	6.7 nm 光源离子碎屑动力学特性	85
6.3	缓冲气体对激光等离子体极紫外光源碎屑的减缓	87
6.3.1	缓冲气体中 6.7 nm 辐射光传输特性	87
6.3.2	不同缓冲气体压强下 Gd 离子投射距离模拟	88
6.3.3	氦、氩等缓冲气体阻挡 6.7 nm 光源碎屑的 效果研究	89
6.4	外加磁场对光源碎屑的减缓	91
6.5	双脉冲激光打靶对光源碎屑的减缓	95
6.5.1	实验装置	95
6.5.2	实验结果与讨论	96
6.6	缓冲气体和双脉冲联合作用对光源碎屑的减缓	100
6.7	减缓碎屑方法对比总结	101
6.8	小结	102
	参考文献	104

# 第1章 绪 论

## 1.1 引 言

输出波长在 5~50 nm 之间的极紫外光源(图 1-1)正处在有待于深入探索、蓬勃发展的阶段,它在诸多领域有着非常重要的应用。极紫外显微术可对纳米尺度的微小结构进行高分辨率成像;极紫外光正好处于多数原子能级的共振区域,因此,这个波段的光非常适合于材料的光谱分析。除此之外,这一波段的光波也可应用于微纳米结构的加工、制造业中。

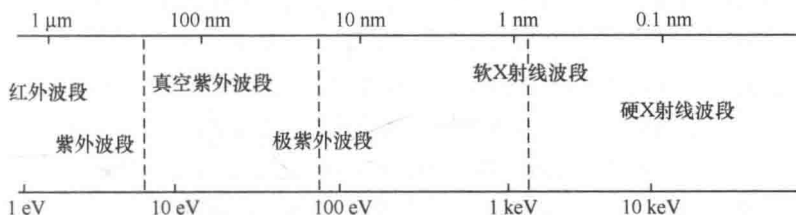


图 1-1 红外波段到硬 X 射线波段电磁波谱

目前,各种电子产品对半导体芯片集成度的要求越来越高,要求半导体芯片工艺尺寸更小,集成度更高,而现阶段用于生产芯片的光刻技术不能满足相应集成度提高的要求。因此,人们不得不把目光投向下一代光刻技术(Next Generation Lithography, NGL)。经过多年的探究与发展,人们在众多的方案中最终把目光聚焦到极紫外光刻(Extreme Ultraviolet Lithography, EUVL)技术上。这一技术是基于这一波段的电磁辐射。

极紫外光刻技术是深紫外光刻(Deep Ultraviolet Lithography,

DUVL) 向更短波长的自然延伸, 本质上与现有的光学光刻十分相似。芯片光刻技术经历了从最早由汞弧光灯发出的可见波段 (436 nm) 和紫外波段 (365 nm), 到准分子激光发出的深紫外波段 (248 nm 和 193 nm) 的发展过程。随着生产技术的提高和实际市场的需求, 要求半导体芯片在更小的尺寸上集成越来越多的功能, 人们通过各种手段来延长和扩展现有的深紫外光刻技术, 目前, Intel 公司采用液体浸润式技术已经成功地把 193 nm 技术应用于特征尺寸 22 nm 的晶圆生产中。但是, 深紫外波段的光刻技术从物理层面看已经发展到了极限, 所以研究能够制造出更小工艺线宽的光刻技术已经迫在眉睫。

极紫外光刻是能够制造出更小工艺线宽的首选技术。极紫外光刻的概念形成起始于 1988 年, 其后, 美国、欧洲和日本等国家对其在基本理论、技术难点和投入工业生产等进行了多方面的研究工作。国际上著名的大公司 (包括 Intel、Cannon、Nikon、Hitachi、Samsung、Philip、ASML 和 Cymer 等), 国立研究机构 (如美国的 Lawrence Livermore、Lawrence Berkeley、Sandia, 日本的产综研, 法国的 CEA 等) 以及许多知名的大学都投入了相当多的技术力量进行极紫外光刻技术的研究。美国能源部三个实验室, Sandia 国家实验室 (SNL)、Livermore 国家实验室 (LLNL)、Berkeley 国家实验室 (LBNL), 及 AT&T 公司和部分大学进行了对极紫外光刻技术的研究。到 1997 年, Intel 公司成立了包括 AMD、Motorola、Micron、Infineon 和 IBM 的 EUV LLC, 并与由 LBNL、LLNL 和 SNL 组成的国家技术实验室 (VNL) 签订了极紫外光刻联合研发协议 (CRADA)。目前, 美国共有超过 50 个单位, 包括国立实验室、大学、公司、集成电路公司和协调机构参与了极紫外光刻的研发工作。在欧洲, 与极紫外光刻相关的研究工作起步于 1996 年, 主要项目有 4 个, 约 110 个研究单位参与, 其中比较重要的项目为 MEDEA 和 MORE MOORE。日本的极紫外光刻研究工作开始于 1998 年, 并于 2002 年 6 月成立极紫外光刻系统研究协会 (EUVA), 目的是加速日本公司的极紫外光刻研发工作和有效地管理极紫外光刻研发项目<sup>[1]</sup>。

由于介质可对极紫外辐射造成强烈吸收, 使得在极紫外波段的光刻技术中较难使用常规的折射光学系统。因此, 极紫外光刻光学系统采用

反射式设计，并且需要放置在真空腔内。典型的极紫外光刻系统主要由极紫外光源、收集系统和投射曝光系统几部分组成，如图 1-2 所示。

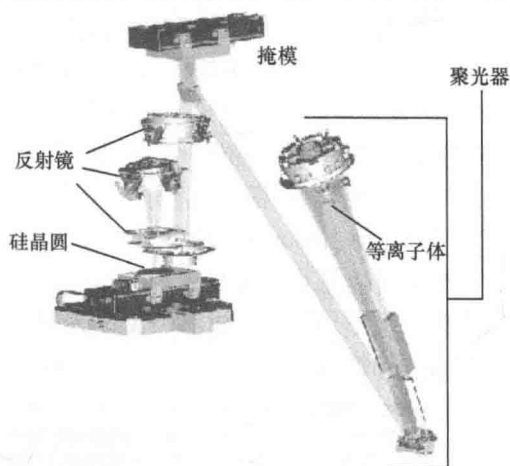


图 1-2 极紫外光刻系统

世界各国经过了大量的研发工作后，在紫外光刻方面已经取得重要的工作进展。目前 Intel、ASML 及 Nikon 等公司都已分别研制出低产量的极紫外光刻演示样机<sup>[2]</sup>。

极紫外光源为极紫外光刻机的重要组成部分<sup>[3]</sup>，这是因为缩短光源的工作波长可有效缩小光刻系统所能制造出的最小特征尺寸。光刻技术在半导体晶圆中可刻出的最小线宽  $d$  可表示为  $d = k\lambda/NA$ ，其中  $\lambda$  为使用的曝光波长， $NA$  为光学系统的数值孔径， $k$  是与生产工艺相关的技术常数。最直接有效地缩短线宽工艺的手段是减小光刻中的曝光波长。目前，下一代光刻技术方案有以下几种：一种是使用更短深紫外波长的 157 nm；一种是使用极紫外波段的 13.5 nm；还有一种方案是使用 X 射线波段的 0.4 nm，甚至使用更短波长的电子或离子束激光。157 nm 的深紫外技术可以无缝衔接现有的 193 nm 技术，但从它的波段位置看，若继续引入，则马上将面临再次升级的要求，因而发展前景不容乐观；而更短波段的 X 射线和原子、离子束激光技术有太多要解决的理论和技術难题，发展还很不成熟，所以从现阶段的技术成熟度来看，极紫外波段 13.5 nm 技术最有潜力接替现有 193 nm 光刻技术，

大幅度地提高芯片的生产工艺,推进特征尺寸进入 22 nm,甚至更短<sup>[4]</sup>。

对于极紫外光刻光源工作波长的选择,考虑到要保证光源产生的极紫外光能被有效地收集,减小在成像系统中的损耗,使光源产生的极紫外辐射最终被充分用于光刻,整个系统的反射元件必须具有非常高的发射率等,因此,多层膜反射元件决定了光源的工作波长。在中心波长 13.5 nm 处,光谱带宽 (BW) 2% 内,可制造出反射率接近 70% 的 Mo/Si 组成的多层膜反射镜<sup>[5]</sup>,如图 1-3 所示,Mo (钼) 和 Si 原子以几纳米的厚度交替叠放,使 13.5 nm 的极紫外光在其中产生相消干涉,从而形成很高的反射效率。这也是促使研究人员把 13.5 nm 作为极紫外光刻主要候选工作波长的原因之一,相应的激光等离子体光源研究工作大多都集中在该输出波长的附近<sup>[6]</sup>。

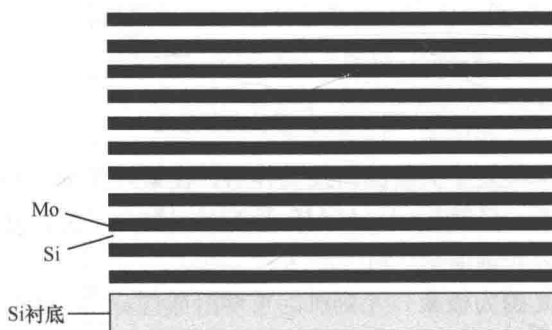


图 1-3 Mo/Si 多层膜示意图

在过去的十几年里,国外的研究机构以及国际的著名光刻机生产公司,都投入了很大的力量开展了工作波长为 13.5 nm 极紫外光刻的研究<sup>[7]</sup>。目前,13.5 nm 极紫外光刻技术正处于为满足高批量生产要求的工程化后期阶段<sup>[8]</sup>。随着 13.5 nm 极紫外光刻光源研究的逐渐成熟,世界众多的研究机构又开始了新一轮的更短工作波长、分辨率可优于 8 nm 的下一代极紫外光刻的研究工作。在这方面,目前采用工作波长小于 10 nm 极紫外光源的光刻为该领域的研究热点<sup>[9]</sup>。类似于 13.5 nm 极紫外光刻的情形,小于 10 nm 极紫外光刻工作波长的选择同样依赖于该波段范围内可制备出多层膜反射镜的工作性能。目前的研究表明,极紫外多层膜反射镜可在 6.7 nm 附近获得高的反射率。研究人员已制

备出反射率为 46.2 % 的 La/B<sub>4</sub>C 多层膜<sup>[10]</sup>，而且，这个波段工作多层膜的反射率存在着较大的提高空间（其反射率的理论计算值可超过 74%）<sup>[11]</sup>。因此，6.7 nm 被选定为下一代极紫外光刻的工作波长。

## 1.2 极紫外光刻光源的产生方式

为了满足大规模工业生产的需要，对于极紫外光刻中光源部分的基本要求是：提供足够高的带内极紫外辐射功率；对多层膜光学收集系统极低的污染，以保证整个系统的长时间稳定输出<sup>[12]</sup>。目前，获得极紫外光源主要有三种途径：同步辐射源（Synchrotron Radiation）、放电等离子体（Discharged Produced Plasma, DPP）和激光等离子体（Laser Produced Plasma, LPP）。

### 1.2.1 同步辐射光源

同步辐射环方法是通过在真空中二极磁场能够使电子在环形加速器中做高速循环曲线运动，同时，沿运动轨道切线方向产生电磁波。这种电磁波具有宽波段、高准直、高纯净、窄脉冲、高平行度、线偏振等优点，其缺点是体积庞大。1947 年，人们首次在电子同步加速器上观察到。2000 年，J. P. Benschop 等人<sup>[13]</sup>实验论证了由同步辐射环产生的极紫外带内辐射在 2 % BW 内功率能够高达 30 W，但同时需要注意的是这种产生装置本身的质量至少在 100 t 以上。2001 年，G. Dattoli 等人<sup>[14]</sup>也实验论证了通过同步辐射源方式能够达到极紫外光源输出功率的要求，但是其庞大的体积很难达到工业化半导体制造的要求。因此，同步辐射本身庞大、复杂的装置，昂贵的造价成本，缺乏灵活性，限制了其应用到商业光刻生产上。

### 1.2.2 气体放电等离子体源

气体放电等离子体源是通过在高压电极的阳极与阴极之间充入气体，当有强电流通过时会在其间形成环形磁场，这个磁场会压缩并电离处于两极之间的气体，从而形成等离子体，当等离子体电子温度

达到足够高时就会产生极紫外辐射，如图 1-4 所示。

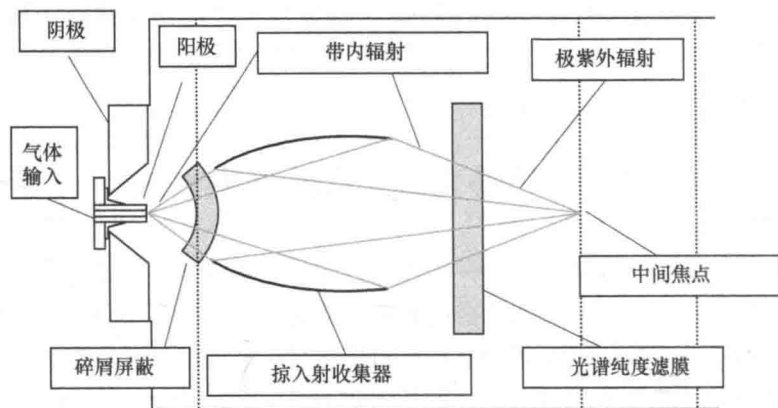


图 1-4 气体放电等离子体产生装置

气体放电产生等离子体的方法可以获得相当大强度的极紫外辐射，增大放电电流的输入功率可以提高极紫外的辐射输出，但等离子体在产生过程的同时会对电极产生热负荷和腐蚀，造成关键元件部分的损坏，并伴随产生大量的碎屑，污染光学系统，很难维持长时间的稳定工作，到目前为止也没有找到很好的解决方案，因此阻碍了放电等离子体在极紫外光刻中的应用。

### 1.2.3 激光等离子体源

激光等离子体方法使用脉冲激光照射靶材，使其吸收高能量产生等离子体。放电等离子体和激光等离子体共同的特点是形成极高的温度环境，产生高温等离子体发射，从而辐射出高强度的极紫外光。因此两者可以使用相同的燃料靶材，只是在形成的手段上有所区别。放电等离子体通过两个电极在高压下导致强烈的放电来产生高温高热的等离子体，而激光等离子体则通过高功率的激光脉冲直接作用到靶材来产生高温等离子体环境，并向外发出极紫外辐射光。相比于放电等离子体产生方式，光源具有更好的可控性和稳定性，不仅能够有效减少设备热负荷，大幅度提高光源工作频率，而且等离子体产生区域的空间稳定性和尺寸均可控。虽然激光等离子体也存在碎屑的污染问题，

但较放电等离子体光源要清洁很多。激光等离子体本身体积小、亮度高并且可以通过选择适当的燃料靶材和控制等离子体参数来实现极紫外等离子体光源输出波长的调谐，因此，其产生方式具有较高灵活性，可在更大的立体角范围内收集极紫外光，如图 1-5 所示。从多年来的发展来看，激光等离子体光源的巨大潜力不断被挖掘，最有希望能满足极紫外光刻未来高量产的需求。

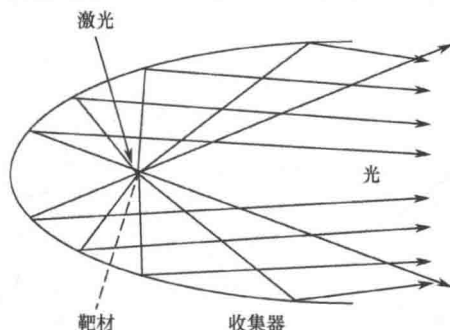


图 1-5 收集激光等离子体极紫外辐射示意图

图 1-6 所示为 CYMER 公司生产的以激光等离子体为基础的 13.5 nm 极紫外光源工业样机<sup>[15]</sup>。整个系统包括激光器、光束传播系统 (Beam Transport System, BTS) 和光源放置器。作为驱动光源的激光器采用可以多级放大的 CO<sub>2</sub> 激光器, 可提供高至 40 kW 的输入功率。激光和 BTS 完全封闭到真空环境中。BTS 使激光光束聚焦到靶材上, 产生稳定的高温、高密度的等离子体, 其发出的极紫外辐射经过多层膜反射镜组成的收集系统收集并送给下一级光刻系统。

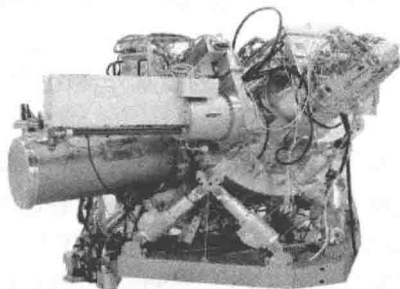


图 1-6 CYMER 公司生产的 13.5 nm 极紫外光源工业样机<sup>[15]</sup>



由于激光等离子体极紫外光源较同步辐射光源相比体积小,较放电等离子光源稳定性好、碎屑产生量低,以及可获得较高的极紫外光转化效率等诸多优点,因此,它是 13.5 nm 极紫外光刻的较为理想光源。

## 1.3 激光等离子体极紫外光源的研究概况

经过多年的不懈努力,研究人员对激光等离子体极紫外辐射的物理机制有了比较深入的理解,已经可以在极紫外光刻整机系统光源收集的中间聚焦处获得接近 100 W 的极紫外辐射强度<sup>[16,17]</sup>。伴随着极紫外光刻中其他各项关键技术难题的不断解决,以激光等离子体为工作模式的极紫外光刻有望在几年内投入工业化量产<sup>[18]</sup>。但是在极紫外光刻投入工业化生产之前,几个关键技术问题还必须进一步解决好,这些关键问题主要集中在 EUV 光源的转化效率和光源碎屑两个方面。

### 1.3.1 13.5 nm 工作波长极紫外光源转化效率的研究

为了满足基本的商业生产需求,同时有效地控制成本,实际的光刻生产需要保证每小时 100 片晶圆以上的生产率,这就要求极紫外光源在进入光刻系统的中间聚焦处的输出功率必须达到 115 W 以上。有效提高极紫外光源转化效率是实现这一功率要求的直接途径。极紫外光源的转化效率 (Conversion Efficiency, CE),对 13.5 nm 光源而言,是指在输出中心波长为 13.5 nm, 2% 的带宽内,极紫外输出能量与输入激光能量的比值。可以提供激光等离子体光源产生 13.5 nm 附近工作波长的燃料靶材有很多种,其中具有代表性的有氙 (Xe)、锂 (Li)、锡 (Sn) 等。目前, Xe 的极紫外转化效率最高为 1.4%<sup>[19]</sup>, Li 作为类氢元素,转化效率最高为 2%<sup>[20]</sup>,而 Sn 产生的转化效率最高可达 3%<sup>[21]</sup>。因此, Sn 是目前获得 13.5 nm 极紫外最理想的光源靶材。Sn 在 13.5 nm 附近的极紫外辐射,主要由形成的等离子体中 Sn 高价离子的  $4p64dN-4p54dN+1\sim 4p4dN-14f$  ( $1\leq N\leq 6$ ) 密集跃迁产生的类连续跃迁阵列,即不可分辨跃迁阵列 (Unresolved Transition Array, UTA) 形成,极紫外辐射的带内部分主要由  $\text{Sn}^{8+}-\text{Sn}^{13+}$  的离