

ANOIMPRINT  
TECHNOLOGY

# 纳米 压印技术

孙洪文◎著



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>



# 纳米压印技术

孙洪文 著

電子工業出版社·

**Publishing House of Electronics Industry**

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书详细介绍了纳米压印技术的工艺、原理、仿真、应用及发展前景。纳米压印技术是在纳米尺度获得复制结构的一种成本低而速度快的方法,它可以大批量重复性地在大面积衬底上制备纳米图案结构,而且所制出的高分辨率图案具有相当好的均匀性和重复性。本书不仅可以供从事微电子、微纳加工、纳米技术的科技人员参考,也可供化学、生物、医学、光电子和磁学等领域的科研人员借鉴。同时,本书深入浅出,通俗易懂,也具有一定的科普价值。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

## 图书在版编目(CIP)数据

纳米压印技术 / 孙洪文著. —北京: 电子工业出版社, 2011. 1

ISBN 978-7-121-12199-9

I. ① 纳… II. ① 孙… III. ① 纳米材料-应用-微电子技术 IV. ① TN4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 216549 号

策划编辑: 秦绪军

责任编辑: 赵 娜

印 刷: 北京市天竺颖华印刷厂

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 720 × 1000 1/16 印张: 12.75 字数: 245 千字

印 次: 2011 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 36.00 元

凡所购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线:(010) 88258888。

# 前 言

1965 年, Intel 公司创始人之一 Moore 预测: 今后微电子技术和产业将以“每个芯片上集成的元件数平均每 18 个月翻一番”的规律发展, 这就是微电子技术领域中著名的摩尔定律。此后, 四十多年的发展证实了摩尔定律的正确性, 集成电路芯片的集成度平均每三年增加 4 倍。目前, 半导体集成电路的主流技术已进入 45nm, 并正在向 32nm 的时代过渡, 采用 32nm 工艺的六核 CPU 已经商业化。

信息社会是由微电子芯片驱动的。从航天事业到日常生活, 微电子芯片对于现代文明的影响可以说是无处不在, 而所有的微芯片又都是光刻工艺的产物。传统微电子工业中所使用的紫外曝光光刻技术面临昂贵的光刻设备和避免光学衍射和透镜材料选择等技术难题, 因此迫切需要研发出切实可行的下一代光刻 (Next Generation Lithography, NGL) 技术, 目前已有多种候选技术: 电子束刻蚀已被证明有非常高的分辨率, 但其生产效率太低; X 线光刻虽然具备高产率, 但 X 线光刻的工具相当昂贵; 极紫外光刻也可以达到较高的分辨率但整个工艺必须在真空中进行, 并且要求镜面必须近乎完美。难以克服的物理极限和昂贵的设备成本激发人们去寻找研发一种非光学、廉价且工艺简便的纳米图案复制技术, 纳米压印技术 (Nanoimprint Lithography, NIL) 应运而生, 该项技术是华裔科学家美国普林斯顿大学周郁在 1995 年发明的一种廉价且具备高分辨率的光刻技术。

纳米压印技术是在纳米尺度获得复制结构的一种成本低而速度快的方法。该技术采用纳米图案的刚性印章将基片上的聚合物薄膜压出纳米级花纹, 再对压印件进行常规的刻蚀、剥离等加工, 最终制成纳米结构和器件。它可以大批量重复性地在大面积衬底上制备纳米图形结构, 而且所制出的高分辨率图案具有相当好的均匀性和重复性。该技术还有简单易行和效率较高等优点。因此, 与极紫外光刻、X 射线光刻和电子束光刻等工艺相比, 纳米压印技术



具有很强的竞争力和广阔的应用前景。纳米压印技术是一种接触式光刻技术，可以得到很高的分辨率，实验室中可以达到 5nm 的分辨率。目前，纳米压印技术已经被国际半导体技术路线图（ITRS）收录，作为下一代光刻技术的候选者，有望在 2019 年用于 11nm 的结点。

在纳米压印技术中，相当昂贵的光刻只需被用一次来制造可靠的印章，印章就可以用于大量生产复制品。所以纳米压印自从发明以来就受到了各国科学家的广泛关注，成为纳米图案复制领域的一个热点。由于纳米压印采用聚合物衬底，其优点是：表面生物相容性好，易于加工，廉价，高产量，具有优异的光学、力学、化学和电学性能（如透明性、导电性、柔韧性）。因此纳米压印除了应用于微电子工业领域外，还可以用于  $\mu$ -TAS、化学、生命科学、微光学、通信、微纳流体和数据存储等领域。

然而关于纳米压印技术各方面进行全面综合论述的文章并不多，L Jay Guo 在 2004 年发表的“Recent Progress in Nanoimprint Technology and Its Applications”（纳米压印技术的最近进展和应用）比较详细地介绍了纳米压印技术各方面的发展。时至今日，纳米压印技术已经得到了更加全面的发展，因此迫切需要一本全面介绍纳米压印最新技术的书。

本书详细地介绍了纳米压印及相关技术的工艺、原理、仿真、应用和前景。全书共分 8 章：第 1 章对纳米压印技术和相关的微电子、微压印、微机电系统（MEMS）、纳米技术等背景技术进行了介绍。第 2 章~第 4 章重点讲述了纳米压印技术的工艺：第 2 章概述了包括热压印工艺、紫外压印工艺和微接触印刷在内的纳米压印技术工艺，并进行了比较，同时还介绍了相关的软刻蚀技术；第 3 章重点讨论了纳米压印印章制备的新途径，论述了两种加工软刻蚀印章的新方法；第 4 章给出了微纳米压印的实验结果，包括各种印章和压印胶组合进行压印的分析。第 5 章讨论了纳米压印技术的理论研究，包括压印胶填充机理、填充时间等。第 6 章介绍了一些纳米压印技术相关的仿真，如分子动力学仿真等。第 7 章讨论了纳米压印技术的应用，包括在光学、电子学、生物学、医学、光电子、磁学等领域的广泛应用。第 8 章对纳米压印技术和各种下一代光刻技术进行展望，分析了下一代光刻技术面临的困境和发展前景。

本书的完成得益于作者的导师——上海交通大学陈迪教授和刘景全研



究员的精心指导。在撰写过程中参考了大量的文献，特别是近几年来新发表的论文，在此对各位文献的作者表示衷心的感谢。本书受河海大学重点学科建设经费及中央高校基本科研业务费项目（2009B32514）资助，在此一并致谢。

尽管作者试图对纳米压印技术做一个全面、准确、详细的阐述，但限于水平和经验，书中难免还存在一些缺陷和不足，希望广大读者批评指正。

作 者

2010 年 9 月

# 目 录

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....           | 1  |
| 1.1 微电子 .....            | 1  |
| 1.1.1 光学光刻和极紫外光刻技术 ..... | 2  |
| 1.1.2 电子束光刻技术 .....      | 3  |
| 1.1.3 离子束光刻技术 .....      | 4  |
| 1.1.4 X 射线光刻技术 .....     | 4  |
| 1.2 微机电系统 .....          | 5  |
| 1.2.1 微机电系统简介 .....      | 5  |
| 1.2.2 LIGA 技术 .....      | 6  |
| 1.2.3 准 LIGA 技术 .....    | 7  |
| 1.3 微复制技术 .....          | 9  |
| 1.3.1 微复制的意义 .....       | 9  |
| 1.3.2 微复制工艺及其应用 .....    | 9  |
| 1.3.3 基于聚合物的微系统 .....    | 10 |
| 1.4 纳米技术 .....           | 11 |
| 1.5 纳米压印技术概述 .....       | 12 |
| 1.5.1 纳米压印技术的原理及特点 ..... | 12 |
| 1.5.2 纳米压印技术的发展 .....    | 13 |
| 1.5.3 纳米压印技术的应用 .....    | 15 |
| 1.6 纳米压印技术的研究现状 .....    | 16 |
| 1.6.1 国外研究现状 .....       | 16 |
| 1.6.2 国内研究现状 .....       | 20 |
| 1.6.3 纳米压印技术专利分析 .....   | 27 |
| 第 2 章 纳米压印工艺概述 .....     | 31 |
| 2.1 纳米压印工艺 .....         | 31 |



|                                      |           |
|--------------------------------------|-----------|
| 2.1.1 热压印 .....                      | 31        |
| 2.1.2 紫外压印 .....                     | 37        |
| 2.1.3 微接触印刷 .....                    | 38        |
| 2.1.4 常用纳米压印方法的比较 .....              | 39        |
| 2.2 软刻蚀技术 .....                      | 40        |
| 2.3 纳米压印印章 .....                     | 43        |
| 2.4 压印聚合物 .....                      | 43        |
| <b>第3章 纳米印章制备新方法 .....</b>           | <b>46</b> |
| 3.1 FIB 制备纳米印章的新途径 .....             | 46        |
| 3.1.1 聚焦离子束系统的工作原理和构成 .....          | 46        |
| 3.1.2 聚焦离子束系统的应用 .....               | 47        |
| 3.1.3 用聚焦离子束技术进行纳米压印印章的制备 .....      | 49        |
| 3.2 全息曝光制备微纳米印章 .....                | 52        |
| 3.3 纳米球光刻法加工印章 .....                 | 55        |
| 3.4 纳米压印方法制备纳米压印印章 .....             | 57        |
| 3.5 纳米压印和光学光刻结合制备三维印章 .....          | 58        |
| 3.6 旋涂法制备 PDMS 印章 .....              | 59        |
| 3.6.1 旋涂法制备 PDMS 印章的原理和工艺流程 .....    | 59        |
| 3.6.2 旋涂法制备 PDMS 印章的具体实例 .....       | 60        |
| 3.6.3 旋涂法制备 PDMS 印章的实验结果 .....       | 61        |
| 3.7 热压法大规模制备 PDMS 印章的新方法 .....       | 62        |
| 3.7.1 热压法大规模制备 PDMS 印章的工艺路线 .....    | 62        |
| 3.7.2 热压法大规模制备 PDMS 印章的实例 .....      | 63        |
| 3.7.3 热压法大规模制备 PDMS 印章的实验结果与讨论 ..... | 64        |
| 3.8 PDMS 印章中的缺陷分析 .....              | 66        |
| 3.8.1 空孔 .....                       | 66        |
| 3.8.2 裂纹 .....                       | 67        |
| <b>第4章 纳米压印结果分析 .....</b>            | <b>68</b> |
| 4.1 纳米压印印章抗粘连层的制备 .....              | 68        |
| 4.1.1 干法抗黏 .....                     | 69        |





|       |                                |     |
|-------|--------------------------------|-----|
| 4.1.2 | 湿法抗黏 .....                     | 71  |
| 4.1.3 | 两种方法对比 .....                   | 75  |
| 4.2   | 微压印结果及分析 .....                 | 78  |
| 4.2.1 | 硅模具和镍模具制备 .....                | 78  |
| 4.2.2 | 硅模具和镍模具微压印 PMMA、PC .....       | 80  |
| 4.2.3 | 不同线宽和图形的合格率分析 .....            | 81  |
| 4.2.4 | 线条镍模具的微米压印 .....               | 82  |
| 4.2.5 | 对可压印材料 PETG 的研究 .....          | 83  |
| 4.3   | 铝线条印章压印 mr-I 9020 .....        | 86  |
| 4.3.1 | mr-I 9020 胶介绍 .....            | 86  |
| 4.3.2 | 铝线条印章压印 mr-I 9020 .....        | 87  |
| 4.3.3 | 压印胶中的缺陷 .....                  | 89  |
| 4.4   | 正交法对纳米压印工艺的优化 .....            | 91  |
| 4.4.1 | 正交法的意义与原理 .....                | 91  |
| 4.4.2 | 热压印工艺中正交法的因子和水平 .....          | 92  |
| 4.4.3 | 正交法对工艺的优化研究 .....              | 94  |
| 4.5   | 石英模具室温压印 Hybrane .....         | 96  |
| 4.5.1 | Hybrane 胶介绍 .....              | 96  |
| 4.5.2 | Hybrane 胶的配置 .....             | 98  |
| 4.5.3 | 石英印章压印 Hybrane .....           | 99  |
| 4.6   | 复杂图案硅印章压印 SU-8 .....           | 100 |
| 4.6.1 | 硅印章制备 .....                    | 100 |
| 4.6.2 | 印章形貌 .....                     | 100 |
| 4.6.3 | SU-8 胶的旋涂 .....                | 100 |
| 4.6.4 | 硅印章压印 SU-8 .....               | 102 |
| 4.7   | 后续转移图案 .....                   | 105 |
| 4.7.1 | 残留胶厚度的计算 .....                 | 106 |
| 4.7.2 | O <sub>2</sub> 刻蚀速率计算 .....    | 106 |
| 4.7.3 | SF <sub>6</sub> 刻蚀速率对比计算 ..... | 107 |
| 4.7.4 | 双气体连续刻蚀法进行图案转移 .....           | 107 |
| 4.7.5 | 单一气体刻蚀法进行图案转移 .....            | 108 |



|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| 第5章 纳米压印理论 .....                    | 110 |
| 5.1 聚物流变机理 .....                    | 110 |
| 5.2 压印胶的流动行为 .....                  | 113 |
| 5.3 纳米压印填充时间的理论计算 .....             | 116 |
| 5.4 有效压强的理论分析及提高印章寿命的新方法 .....      | 117 |
| 5.5 纳米压印理论的最新研究进展 .....             | 119 |
| 第6章 纳米压印仿真 .....                    | 123 |
| 6.1 印章抗粘连层材料的选择 .....               | 123 |
| 6.1.1 分子动力学方法与原理 .....              | 123 |
| 6.1.2 分子动力学方法选择印章抗粘连层物质 .....       | 126 |
| 6.2 分子动力学对纳米压印工艺的仿真 .....           | 128 |
| 6.3 纳米压印仿真的其他研究 .....               | 133 |
| 第7章 纳米压印技术的应用 .....                 | 134 |
| 7.1 纳米压印技术在光学领域的应用 .....            | 134 |
| 7.1.1 采用微纳米压印技术复制微纳光栅 .....         | 134 |
| 7.1.2 纳米压印技术制备聚合物微环共振腔 .....        | 139 |
| 7.1.3 纳米压印技术加工超材料 .....             | 140 |
| 7.1.4 纳米压印技术加工偏光镜 .....             | 142 |
| 7.1.5 纳米压印技术加工微镜 .....              | 144 |
| 7.2 纳米压印技术在生物医学领域的应用 .....          | 145 |
| 7.2.1 生物医学实验的意义 .....               | 145 |
| 7.2.2 生物加工材料的选择 .....               | 146 |
| 7.2.3 微纳米压印技术在蛋白质实验中的应用 .....       | 146 |
| 7.2.4 微纳米结构对不同细胞生长的影响 .....         | 148 |
| 7.2.5 纳米压印技术加工的硅纳米线阵列用于生物电子领域 ..... | 152 |
| 7.2.6 纳米压印技术制备的微阵列在生物医学中的应用 .....   | 153 |
| 7.3 纳米压印技术在电子学领域的应用 .....           | 155 |
| 7.4 纳米压印技术在磁学领域的应用 .....            | 157 |
| 7.5 纳米压印技术在微纳流体领域的应用 .....          | 157 |

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| 7.6 纳米压印技术在光电子领域的应用 .....    | 158        |
| 7.7 纳米压印技术在其他领域的应用 .....     | 160        |
| 7.7.1 纳米压印技术加工铁电原件 .....     | 160        |
| 7.7.2 纳米压印技术加工探针 .....       | 161        |
| <b>第8章 纳米压印发展前景 .....</b>    | <b>164</b> |
| 8.1 纳米压印技术面临的挑战 .....        | 164        |
| 8.1.1 纳米压印自身技术面临的挑战 .....    | 164        |
| 8.1.2 纳米压印技术面临的其他技术的挑战 ..... | 166        |
| 8.2 纳米压印技术的发展前景 .....        | 168        |
| 8.2.1 纳米压印技术的创新技术 .....      | 168        |
| 8.2.2 纳米压印技术的研究方向 .....      | 171        |
| 8.2.3 纳米压印技术展望 .....         | 172        |
| <b>参考文献 .....</b>            | <b>174</b> |

# 第 1 章 绪 论

纳米压印技术的诞生有着广泛的技术背景，如微电子、微机电系统、微复制技术和纳米技术等。本章在介绍纳米压印技术诞生背景的基础上，对纳米压印技术和国内外的研究现状进行了简要介绍。

## 1.1 微电子

微电子技术是高科技和信息产业的核心技术，是信息社会的基石。实现信息化的网络及其关键部件无论是对各种计算机还是通信电子装备，基础都是集成电路。微电子技术是随着集成电路，尤其是超大型规模集成电路发展起来的一门新的技术，微电子产业是基础性产业，之所以发展得如此之快，除了技术本身对国民经济的巨大贡献之外，还与它极强的渗透性有关。可以毫不夸张地说，当前日益发展的信息社会是由微电子芯片驱动的，从航天事业到日常生活，微电子芯片对于现代文明的影响可以说无处不在。

1965 年，Intel 公司创始人之一 Moore 预测：今后微电子技术和产业将以“每个芯片上集成的元件数平均每 18 个月将翻一番”的规律发展，这就是微电子技术领域中著名的摩尔定律<sup>[1]</sup>。此后，四十多年的发展证实了摩尔定律的正确性，集成电路芯片的集成度平均每三年增加 4 倍，半导体器件的特征尺寸以每三年缩小 $\sqrt{2}$ 倍的趋势发展。目前，半导体集成电路的主流技术已进入 45nm，并正在向 32nm 的时代过渡，采用 32nm 工艺的六核 CPU 已经商业化，如 Intel 公司的 Core i7 980X。

所有的微芯片都是光刻工艺的产物，光刻是微电子工艺流程中最重要的和最关键的一环。国际微电子发展的趋势是：集成电路的特征尺寸将继续缩小，集成电路（Integrated Circuit，IC）将发展为系统芯片（System on a Chip，SOC）。而要实现这个目标就必须不断地改进光刻技术，对光刻技术不断提出新的要求和



挑战。

从微电子的发展历史可以看出,光学曝光工具的成本呈指数增长。在光学光刻中,通过减少特征尺寸得到高的产量,其最小特征尺寸 (Feature Size) 可以表达为:

$$F = k_1 \lambda / NA \quad (1.1)$$

式中,  $\lambda$  是曝光波长,  $NA$  (Numerical Aperture) 是光学光刻工具中透镜系统的数值孔径,  $k_1$  是与工艺相关的项。通过不断减小曝光波长,  $F$  值被减小。光学光刻现在采用深紫外光,但随着波长的减小,出现了许多新的技术难题,如分辨率及材料的选择等<sup>[2]</sup>。现行的沉浸式光学光刻技术<sup>[3~6]</sup>,成本和技术的复杂程度不断提高,现在大规模集成电路代工厂中用到的光刻机成本都在数千万美元以上。

传统微电子工业中所使用的紫外曝光光刻技术面临昂贵的光刻设备和避免光学衍射和透镜材料选择等技术难题,因此迫切需要研发出可行的下一代光刻 (Next Generation Lithography, NGL) 技术,已有多种候选技术,如极紫外光刻技术 (Extreme Ultraviolet Lithography, EUV), 电子束光刻技术 (Electron Beam Lithography, EBL), 离子束光刻技术 (Ion Beam Lithography, IBL) 和 X 射线光刻技术 (X-ray Lithography, XRL) 等。

### 1.1.1 光学光刻和极紫外光刻技术

光学光刻技术是 IC 工业中的主流光刻技术。人们通过不断开发各种分辨率增强技术,如短波长化、大数值孔径镜头、移相掩模、浸没式光刻、偶极照明双重曝光等,不断突破其理论极限,获得的 IC 器件的线宽已经进入纳米尺寸。

193nm 浸没式光刻技术 (Immersion Lithography) 在传统光刻机的光学镜头与晶圆之间的介质用水来替代空气,可以提高光刻系统的数值孔径,从而提高分辨率,延伸了 193nm 光刻技术<sup>[7~9]</sup>。193nm 浸入式光刻技术应解决的技术问题是:①研发高折射率的光刻胶;②研发高折射率的浸入液体,水折射率为 1.44,研发折射率为 1.6 ~ 1.7 的浸入液体;折射指数大于 1.65 的流体满足黏度、吸收和流体循环要求;③研发高折射率的光学材料。折射指数大于 1.65 的透镜材料满足透镜设计的吸收和双折射要求;④控制由于浸入环境引起的缺陷,包括气泡和污染。





157nm 光刻其光源采用氟气准分子激光, 发出波长 157nm 附近的真空紫外光。面临主要困难是光学成像系统中的透镜材料: 当波长短到 157nm 时, 大多数光学镜头材料都是高吸收态, 易将激光的能量吸收, 受热膨胀后造成球面像差。目前只有氟化钙为低吸收材料, 可供 157nm 使用。

随着曝光波长的缩短, 将对光学光刻技术提出更多具有挑战性的难题, 如高质量光源的获得, 优质光学材料 (高质量  $\text{CaF}_2$  单晶) 的制备将更难, 光刻机等生产设备昂贵, 无缺陷优质掩模、抗蚀剂等的获得将更加困难等<sup>[10~11]</sup>。

作为下一代光学刻蚀技术的可能候选者之一——极紫外光刻是将光刻光源的波长缩短至 13.5nm 的微电子光刻技术。1999 年, 极紫外光刻被负责 NGL 的美国半导体制造技术战略联盟 (Sematech) 选定为实现 50nm 及小于 50nm 光刻的技术途径。EUVL 被认为是最有前途的方法之一, 不过其实现难度也相当高, 从 20 世纪 80 年代开始探寻至今已经将近三十年, 仍然未能投入使用。极紫外光刻面临的挑战之一就是寻找合适的光刻胶 (Photoresist), 即用来在芯片层表面光刻出特定图案的材料。它必须对极紫外辐射非常敏感, 这样才能刻出图案, 同时又能够抵御随后的蚀刻和其他处理步骤。

在半导体产业盛会 Semicon West 2010 上, GlobalFoundries 公布了该公司推动极紫外光刻技术投入量产的一些规划细节。按照这份计划书, GF 将在 2014—2015 年将极紫外光刻技术推向商用, 届时半导体制造工艺也会进化到 22nm 和 20nm。Intel 公司一直在寻找一种能够同时满足高敏感度、高分辨率的光刻胶材料, 最近终于取得了重大突破。在国际光学工程学会 (SPIE) 举行的光刻大会上, Intel 就进行了这方面的展示, 使用一种正型化学放大光刻胶结合极紫外底层, 以及一种相应的漂洗剂, 最终达到了 22nm 半节距 (Half Pitch) 分辨率, 并满足敏感度要求。

### 1.1.2 电子束光刻技术

光学波长的限制及曝光设备的复杂化导致了非光学方法的光刻技术的发展, 其中电子束投影光刻 (Electron Projection Lithography, EPL) 是相对成功的方向之一。电子束光刻采用高能电子束对光刻胶进行曝光从而获得结构图形, 由于其德布罗意波长约为 0.004nm, 电子束光刻不受衍射极限的影响, 可获得接近原子尺度的分辨率。电子束光刻由于可以获得极高的分辨率并能直接产生图形, 不但在 VLSI 制作中成为不可缺少的掩模制作工具, 也是加工用于特殊目的器件和结



构的常用方法。

用电子束刻蚀工艺制作纳米器件起源于 20 世纪 70 年代。其利用电子枪所产生的电子束,通过磁场聚焦、扫描、经计算机控制电子束的剂量后,照射在硅片的光刻胶上形成图形。该技术具有高分辨、长焦深、无需掩模(即电子束直写)、可以在计算机控制下直写任意图形等优点,在下一代光刻技术中极具发展潜力,是纳米器件设计与制造的理想手段。电子束光刻技术的主要缺点是生产效率较低,其他还有电子光学系统的相差、电子束束径与抗蚀剂的相互作用等问题。电子束光刻的邻近效应是造成图形陡度下降、影响图形分辨率的主要因素<sup>[10,12]</sup>。

美国朗讯公司开发的角度限制散射投影电子束光刻(Scattering with Angular Limitation E-beam Lithography, SCALPEL)技术曾经令人瞩目,该技术如同光学光刻那样对掩模图形进行缩小投影,并采用特殊滤波技术去除掩模吸收体产生的散射电子,从而在保证分辨率条件下提高产出效率。如掩模板的基底材料用铍(Be),阻挡层用金(Au)。通过对入射电子的不同散射实现图案化,大散射部分(通过阻挡层的电子),不会使光刻胶曝光。

### 1.1.3 离子束光刻技术

离子束光刻(Ion Beam Lithography, IBL)是在聚焦离子束技术基础上将原子离化,形成能量可控的离子束( $10 \sim 200\text{keV}$ ),再用离子束对抗蚀剂进行曝光。通过离子束中的能量、离子注入等引起抗蚀剂发生反应,改变抗蚀层的物理化学性质,形成可溶或更难溶区域,再通过显影等后续处理技术以获得微细线条的图形。离子在固体中的散射效应较小,可用较快地直接写入速度进行小于  $50\text{nm}$  的刻蚀,另外可以不用掩模、甚至不用抗蚀剂。这使 IB 技术作为理想的纳米器件加工技术,成为  $50\text{nm}$  以下刻蚀技术领域人们关注的又一个焦点。目前仍需解决的关键技术有:获得稳定可靠的离子源,离子束曝光中的对准技术,掩模技术有待进一步提高,当使用负离子抗蚀剂时会出现抗蚀剂膨胀现象,从而影响分辨率<sup>[10]</sup>。另外,离子束的产生没有电子束容易,产能很低。

### 1.1.4 X 射线光刻技术

X 射线光刻技术(X-Ray Lithography, XRL)是 20 世纪 80 年代发展非常迅



速的技术之一，欧洲、美国、日本和中国等拥有同步辐射装置的国家相继开展了有关研究。主要分支是传统靶极 X 光、激光诱发等离子 X 光和同步辐射 X 光光刻技术。特别是同步辐射 X 光作为光源的 X 光刻技术，光源具有功率高、亮度高、光斑小、准直性良好，通过光学系统的光束偏振性小、聚焦深度大、穿透能力强。X 射线光刻采用波长小于 1nm 的 X 射线，是一种接近式光刻。X 射线光刻相对于其他下一代光刻技术而言有许多优点，其工艺宽容度大、成品率高、景深大、曝光视场大、成本低等。就光刻工艺性能而言，XRL 能同时实现高分辨率、大焦深、大像场等，是其他光刻手段难以比拟的。当光刻分辨率达到 50nm 以下时，采用的同步辐射 X 射线波长范围应该为  $0.2 \sim 0.4 \text{ nm}$  <sup>[13,14]</sup>。XRL 发展的主要困难是系统体积庞大，系统价格昂贵和运行成本居高不下等；主要技术难题是掩模制造技术，即获得具有良好机械物理特性的掩模衬底，近年来掩模技术研究取得较大进展。目前，SiC 被认为是最合适的衬底材料。

## 1.2 微机电系统

### 1.2.1 微机电系统简介

微电子机械系统（Microelectromechanical System, MEMS，简称微机电系统或微系统）是一门新兴的交叉学科，它将微电子、精密机械、生化和信息处理等高新技术有机整合，对 21 世纪的科学技术、人类生产和生活方式将产生革命性影响，并在未来高科技战争中扮演着举足轻重的角色，是关系国民经济发展和国家安全保障的关键技术。MEMS 技术在生物医疗、精密仪器、环境保护、航空航天、军事通信等领域都有广泛的应用前景。如利用 MEMS 技术，可以制成突破通信瓶颈的全光交换机，准确检测病变的基因芯片，比手掌还小的飞行器，重量仅有几十克的微小卫星。在过去的二十几年里，MEMS 技术得到了很大的发展，部分产品已成功地商业化，如气体传感器、喷墨打印机头和汽车安全气囊等。

微电子机械系统主要有三种制备工艺，第一种是以日本为代表的微机械加工方法，其核心思想是大机器加工小机器，小机器加工微机器；第二种是以美国为代表的基于硅微电子加工的方法，它可分为体加工工艺和表面牺牲层工艺；第三种是以德国为代表的 LIGA（德文 Lithographie Galvanoformung Abformung）技术。



本书主要介绍与微压印技术相关的 LIGA 技术。

### 1.2.2 LIGA 技术

早在 20 世纪 60 年代初,德国的 Karlsruhe 原子能研究中心就致力于开发一项技术,即用气体弯曲喷射的离心力方法处理六氟化铀和轻的辅助气体,从而分离出铀同位素。为了提高这个方法的效率,需要将分离喷嘴的相关结构尺寸缩小到几个微米的尺度,这促使了 LIGA 技术的开发研究。到 20 世纪 70 年代末由该中心的 Ehrfeld 教授等开发了 LIGA 技术,该研究所于 1986 年首次进行了公开报道<sup>[15]</sup>。

LIGA 技术是三个德文单词的缩写,其代表的中文分别是 X 光深层光刻、微电铸和微复制工艺。其工艺路线如图 1-1 所示。LIGA 技术实施前的准备工作是 X 光掩模板制备。X 光掩模板必须有选择地透过和阻挡 X 光,一般的紫外光掩模板不适合做 LIGA 掩模板。透 X 光薄膜有聚酰亚胺、钛、铍、氮化硅、金刚石和石墨等材料,而阻挡 X 光的材料是高原子系数的重金属材料,如金、铂、钨等。LIGA 技术的第一步是 X 光深层光刻工艺,由于光刻的厚度要达到几百微米至数微米,用一般的 X 光光源需要很长的曝光时间,而同步辐射的 X 光光源强度是普通 X 光的几十万倍,这样就可以大大缩短曝光时间。目前较为理想的 X 光光刻胶是聚甲基丙烯酸甲酯 (Poly (Methyl Methacrylate), PMMA) 基聚合物。LIGA 技术的第二步是微电铸工艺,它将显影后的光刻胶空隙用微电镀的方法填上各种金属,如镍、铜、金、铁镍合金等。微电铸的原理是在电压的作用下,阳极的金属失去电子,变成金属离子进入电铸液,金属离子在阴极获得电子,沉积在阴极上。当阴极的金属表面有一层光刻胶图形时,金属只能沉积到光刻胶的空隙中,形成与光刻胶相对应的金属微结构。LIGA 技术的第三步是微复制工艺,用微电铸工艺制造出的微复制模具可以用来进行塑料微结构器件的大批量生产。微复制工艺不仅可以廉价制造由高分子材料微器件,而且还可以在此基础上进行第二次微电铸,进行金属微器件的大批量生产<sup>[16~20]</sup>。

利用 LIGA 技术不仅可以加工硅材料,而且可以加工金属、陶瓷和塑料等各种材料。该技术的另一个显著优点是它能制造三维微结构器件,获得的微器件具有较大的高深宽比和精细的结构,侧壁陡峭、表面平整。图 1-2 是较深的 PMMA 光刻胶结构的电镜照片,其深度为 3.2 mm<sup>[21]</sup>。