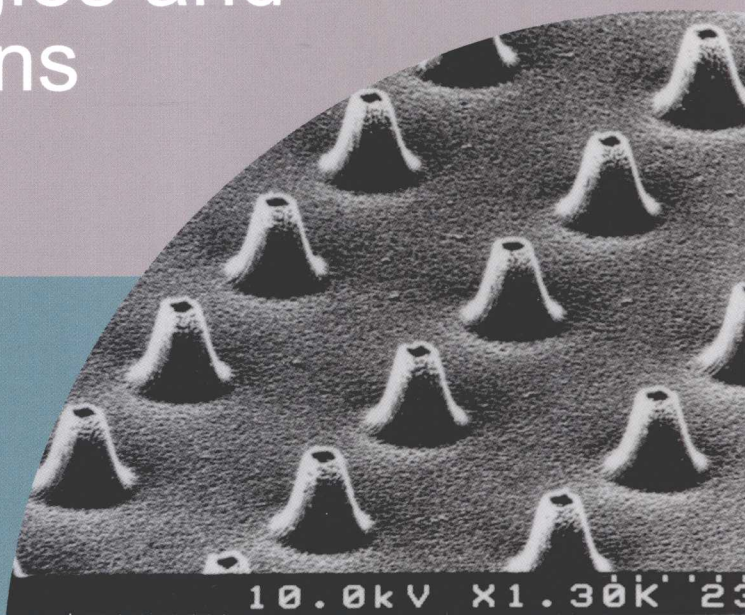


崔铮 著

微纳米加工技术 及其应用

第三版 3rd Edition

Micro-Nanofabrication
Technologies and
Applications



 高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

013044366

TB383
57-3

微纳米加工技术 及其应用

第三版 3rd Edition

Micro-Nanofabrication Technologies and Applications

崔铮 著



WEINAMI JIAGONG JISHU JIQI YINGYONG

TB383
57-3



北航

C1652314



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容提要

本书集作者多年来的实践经验与研究成果,并结合近年来国际上的最新发展,综合介绍微纳米加工技术的基础,包括光学曝光技术、电子束曝光技术、聚焦离子束加工技术、扫描探针加工技术、微纳米尺度的复制技术、各种沉积法与刻蚀法图形转移技术、间接纳米加工技术与自组装纳米加工技术。对各种加工技术的介绍着重讲清原理,列举基本的工艺步骤,说明各种工艺条件的由来,并注意给出典型工艺参数;充分分析各种技术的优缺点及在应用过程中的注意事项;以大量图表与实例说明各种加工方法,避免烦琐的数学分析;并以专门一章介绍微纳米加工技术在现代高新技术领域的应用,包括超大规模集成电路技术、纳米电子技术、光电子技术、高密度磁存储技术、微机电系统技术、生物芯片技术和纳米技术。通过应用实例说明现代高新技术与微纳米加工技术的不可分割的关系,并演示如何灵活应用微纳米加工技术来推动这些领域的技术进步。

与国内外同类出版物的相比,本书的显著特点是将用于超大规模集成电路生产、用于微机电系统制造与用于纳米技术研究的微纳米加工技术综合介绍,并加以比较。首次将微纳米加工归纳为平面工艺、探针工艺和模型工艺三种主要类型,突出了微纳米加工与传统加工技术的不同之处。全书既注重基础知识又兼顾微纳米加工领域近年来的最新进展,并列大量参考文献与互联网链接网址,供进一步发掘详细信息与深入研究。因此不论是对初次涉足这一领域的大专院校的本科生或研究生,还是对已经有一定工作经验的专业科技人员,都具有很好的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

微纳米加工技术及其应用 / 崔铮著. — 3版. — 北京: 高等教育出版社, 2013.4
(纳米科学与技术著作系列)
ISBN 978-7-04-036974-8

I. ①微… II. ①崔… III. ①纳米材料—新技术应用
IV. ①TB383

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第032476号

策划编辑 刘剑波 责任编辑 焦建虹 封面设计 于涛 版式设计 余杨
插图绘制 尹文军 责任校对 胡晓琪 责任印制 韩刚

出版发行	高等教育出版社	网 址	http://www.hep.edu.cn
社 址	北京市西城区德外大街4号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http://www.landaco.com
印 刷	涿州市星河印刷有限公司		http://www.landaco.com.cn
开 本	787mm×1092mm 1/16	版 次	2005年6月第1版
印 张	35.5		2013年4月第3版
字 数	610千字	印 次	2013年4月第1次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	79.00元
咨询电话	400-810-0598		

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 36974-00

第三版前言

自《微纳米加工技术及其应用》(第二版)出版发行以来,已经三年过去了。在过去的三年里,中国的科技事业发生了巨大的变化。中国发表的科技论文数已跃居全球第二位,而在纳米科技领域,中国已成为发表科技论文最多的国家。国家自然科学基金在2010年已达到95亿元人民币,比10年前的13.5亿元增长了604%。2010年国家科技投入达到7062亿元,比上一年增加了1260亿元。在西方发达国家科研经费增长率普遍减缓或下降的环境下,中国一枝独秀,科技投入在过去10年中以19.1%的增长率逐年增加。国家科技投入的增加,集中表现在国内的科研条件大大改善。国外的科研人员到中国来访问,无不惊叹中国科学家们的实验室装备精良,堪与国外最好的实验室媲美。科研硬件条件的改善当然也包括微纳米加工条件的改善。越来越多的大学与科研机构建立起具有一定规模的微纳米加工平台,越来越多的实验室购置了不同等级的微纳米加工设备,越来越多的科研人员与研究生能够接触到并在科研工作中使用到各种微纳米加工技术。当然,也有越来越多的人希望学习和了解微纳米加工技术。在这一进程中,《微纳米加工技术及其应用》(第二版)受到广大读者的信任,对此我既高兴,又感到肩上责任的重大。高兴的是我的书能够被国内广大读者所认可,成为学习了解微纳米加工技术的重要参考书。但同时也意识到,我决不能辜负广大读者的信任,应当继续为需要了解微纳米加工技术的广大读者提供准确可靠的、最新的信息与知识,为推动中国微纳米科技发展作贡献。《微纳米加工技术及其应用》(第三版)正是在这一背景下开始筹划,经过半年多在繁忙工作中见缝插针的努力终于完成了。

由于2009年出版的《微纳米加工技术及其应用》(第二版)已经对第一版作了较大修改与增补,基本奠定了微纳米加工技术的知识体系,这次出版的第三版中新增内容不多,主要是对第二版的修订,以反映过去三年中微纳米加工技术的一些新发展。常规微纳米加工技术已经趋于成熟,基本的加工方法已经确立。到任何一个微纳米加工平台,所接触到的加工设备不外乎光学曝光、电子束曝光、聚集离子束加工、各种薄膜沉积与刻蚀设备。考察过去三年中所发表的有关微纳米加工技术的科技论文,绝大多数是现有加工技术的各种应

用与改进。微纳米加工技术在过去三年中的主要发展是批量化与产业化加工技术的进步。第三版中特别增加了这方面的内容。在光学曝光方面,除了深紫外多重曝光与极紫外曝光技术的发展外,还将介绍滚筒式近场曝光与飞行扫描式近场曝光;在电子束曝光方面,多电子束无掩模曝光技术有了新发展;在聚集离子束加工方面,聚焦氦离子束技术的出现克服了目前聚集镱离子束的许多缺点;在复制技术方面,大面积连续纳米压印成为纳米压印走向工业化的一个重要发展方向;在沉积法加工方面,纳米材料印刷技术展现了批量化加工的优势;在分子自组装加工方面,嵌段共聚物的图案化自组装已经受到集成电路制造业界的认真对待。这反映了微纳加工技术发展的趋势,即从早期的“百花齐放”到后期的少数技术胜出,完成从微纳加工到微纳制造的过渡,发展成为批量化大生产的加工技术。

在过去的三年中,我个人的职业生涯也发生了巨大变化。2009年9月荣幸入选中共中央组织部第二批“千人计划”(创新类)。在国外工作了20年之后,于2009年10月全职回国,加盟中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所,创建了国内首个印刷电子技术研究中心,开辟了一个新的研究领域。印刷电子技术实质上是微纳米加工技术向批量化、产业化方向的延伸。印刷技术本身并不具备微纳米尺度的加工能力,但近年来随着纳米材料技术的成熟,许多纳米材料可以制备成墨水或油墨。印刷提供了将纳米材料低成本批量化地集成到各种电子器件与光电器件的新途径。这也是我转向印刷电子技术研究的重要原因。我始终认为,微纳米加工技术的最高境界是微纳米制造。能够将某种加工技术发展成为批量化工业制造技术是对微纳米加工技术发展最大的贡献。因此,回国后我积极参与了国家自然科学基金“纳米制造重大研究计划”,我本人也承担了该计划的“纳米材料印刷技术”研究项目。我的研究团队已发展到30余人的规模,已承担了多项印刷电子方面的科研项目。2012年3月,我和我的研究团队集体编著的《印刷电子学:材料、技术及其应用》由高等教育出版社出版,这是国内第一本印刷电子学方面的专著。我还创建了苏州纳格光电科技有限公司,将科研与产业化紧密结合。纳格公司已经开发出基于微纳米加工与纳米材料印刷的新型柔性透明导电膜,可以应用于手机与平板电脑触摸屏。通过我的科研团队与产业化公司,我正在将微纳米加工向微纳米制造过渡的理念付诸实践。

《微纳米加工技术及其应用》(第三版)是为国内读者撰写的,我本人现在已身在国内,成为中国科研大军中的一员。今后与国内广大科技人员交流的机会更多了,也更方便了。希望以此书会友,加强交流互动。希望国内

微纳米加工技术领域的专家学者对本书提出宝贵意见,指出谬误与不准确之处,使其更加完善,共同为推动微纳米加工技术在中国的普及应用而努力。



2012年8月15日于苏州

第二版前言

微纳米科技是一个新兴科技领域,也必然是一个不断发展进步的领域。自2005年6月《微纳米加工技术及其应用》(高等教育出版社)(第一版)出版以来,微纳米加工技术在过去3年多时间里有了许多新发展,一个最有力的证明是超大规模集成电路的大生产已经由3年前的90 nm技术时代进入45 nm技术时代,这一进步涵盖了诸多光学曝光技术和一系列相关微纳米加工技术的进步。在过去3年多时间里,纳米科学与纳米技术的研究与开发在世界范围内得到前所未有的关注,中国在纳米科技领域取得了举世瞩目的成绩。据统计,中国在2001—2006年间纳米科技方面发表的论文增加了300%。2006年全世界有20%的纳米科技方面的论文是由中国科学家发表的,总论文数仅次于欧洲共同体和美国,排名第三;如果按单个国家算,中国在纳米科技方面发表的论文仅次于美国,在全世界排名第二(见Youtie J, Shapira P, Porter A L. Nanotechnology publications and citations by leading countries and blocs. *J. Nanoparticle Research*, 2008, 10:981)。越来越多的科技工作者从不同领域转入纳米科技的研究开发。由于微纳米科技研发与微纳米加工技术密切相关,越来越多的装备了现代微纳米加工设备的中心和实验室在全国各地的大专院校和科研单位建立起来。以电子束曝光机为例,中国在5年前还只有一两个科研单位拥有这一比较高级的微纳米加工设备,现在全国有不下10个科研中心或实验室已经购买了或即将购买不同类型的电子束曝光机。科技工作者与在校大学生、研究生对微纳米加工技术知识的渴求也日益增长,这可以从两期微纳米加工技术暑期讲习班的出席情况略见一斑。我曾于2005年与2007年夏季分别在中国科学院物理研究所举办的全国微纳米加工技术暑期讲习班上担任主讲。2005年夏季的讲习班有来自全国49个大学与科研单位的近350人参加;而2007年的第二期讲习班则有来自全国51个大学与科研单位的近400人参加。在这一大环境下,我的《微纳米加工技术及其应用》一书自出版以来即受到广大科技工作者和在校大学生、研究生的青睐,目前第一版已近售罄。为了充分反映过去3年中微纳米加工技术的新进展,也为了满足国内广大科技人员从事纳米科技研究的需要,我在过去的半年中对《微纳米加工技术及其应用》一书进行了全面修订,增添了大量新内容。在高等教育出版社

的鼎力支持下,在此向广大读者呈献《微纳米加工技术及其应用》(第二版)。

与第一版相比,第二版增添了将近一倍的新内容。绝大部分章节均已重新撰写,力求反映当今微纳米加工技术的最新进展。第一版的手稿为 250 余页,而第二版的手稿为 450 余页;第一版有 8 章内容,第二版增至 11 章。修改和增加的主要内容包括:在第 2 章光学曝光技术中增加了为适应 45 nm 与 32 nm 大规模集成电路加工而开发的各种光学曝光新技术,例如极紫外曝光技术、浸没式曝光技术和多重加工技术;鉴于 X 射线曝光技术已不再成为主流光刻技术之一以及其不普及性,第二版中取消了 X 射线曝光技术一章,而仅在光学曝光技术一章中以较少篇幅介绍;在第 3 章电子束曝光技术与第 4 章聚焦离子束加工技术中均增加了与纳米加工相关的内容,例如电子束曝光技术中为实现极限分辨率所开发的一些特殊抗蚀剂显影工艺;在第 6 章复制技术中除了保留原有内容外,对近年来各种演变的纳米压印技术进行了全面介绍;第一版中与微机电系统、微流体加工有关的技术仍然保留,例如 LIGA 技术、厚胶光刻技术、面加工与体加工技术等,但有关内容均作了更新,加入了过去 3 年中出现的新进展;第二版新增加的章节包括第 5 章扫描探针加工技术、第 7 章沉积法图形转移技术、第 9 章间接纳米加工技术与第 10 章自组装纳米加工技术,增加这 4 个章节主要是为了反映近年来纳米加工技术的蓬勃发展。纳米加工技术,尤其是纳米科学研究中用到的纳米加工技术,并不一定需要昂贵的加工设备,简单的扫描探针显微镜或各种巧妙的间接技术均可以在小尺寸样品上制作出科研所需要的有限数量的纳米结构和器件。自组装纳米加工技术则代表了未来突破传统纳米加工极限的发展方向。需要一提的是,我的英文专著《Nanofabrication: Principles, Capabilities and Limits》刚刚由 Springer 出版社在国外出版。虽然国内读者不易见到该英文版,但该书中的主要内容均在《微纳米加工技术及其应用》(第二版)中有所反映。

第二版仍承袭了第一版的风格,即注重讲清楚各种加工技术的基本原理,以大量图例说明为主,避免烦琐的数学分析。尽管当今各种信息都可以从发达的互联网上搜索到,但对于不熟悉微纳米加工技术的人来说,如何从浩如烟海的互联网搜索条目中找出有用的信息并不是件易事。本书一方面是我十几年来实际工作经验的总结,另一方面也是对大量互联网信息与公开发表文献的去芜存精。相信不同专业领域的科技工作者都可以从此书中找到如何选择合适的微纳米加工技术的答案。另外,每章后面都附有精心挑选的参考文献与网址,供读者进一步搜寻更详细的信息。近年来国内对一些英文专业名词已经有了统一翻译,第二版中尽量采用这些统一译法。例如,“step and flash imprint”就采用了国内现在通行的译法“步进闪光压印”。

《微纳米加工技术及其应用》(第二版)虽然是我独立撰写的,但书中引用的大量实例来源于我与国内外专家学者合作的成果和各种公开发表的文献。特别是过去5年中我与中国科学院物理研究所的合作,使我对微纳米加工技术在纳米科学研究中的应用有了亲身体会。在此我向所有与我合作过的专家学者表示衷心感谢。最后感谢我的家人对我撰写本书的全力支持。



2008年10月15日于英国牛津

第一版前言

记得 1994 年夏天我第一次回国,到成都参加中国科学院青年学者学术讨论会,会议的主题是光学技术在微细加工中的应用。那时的微细加工还主要集中在半导体集成电路工艺技术领域。在那次学术讨论会上我介绍了我在英国从事的有关 $0.35\ \mu\text{m}$ 集成电路光学曝光技术的研究。国内同行的专家都感叹国内外发展水平的差距,却又无能为力。中国由于长期以来受到西方先进工业国家的封锁与禁运,西方只把落后的或淘汰的微细加工设备卖给中国。虽然国家投入大量资金与人力,自主开发包括光学曝光机、电子束曝光系统与聚焦离子束加工系统等微细加工设备,但性能与可靠性总是与国外设备有差距,而且从样机研制到推广使用,中间还有很大距离。所以,中国的微细加工技术发展与应用同国外相比差距是太大了。而当时的形势是韩国与中国台湾地区正在超过日本,成为亚洲半导体集成电路加工生产的主要基地。中国大陆地区若不奋起直追,就可能在这一高科技领域越加落后。1995 年我在国内《科学》杂志上撰文,系统介绍了光学、电子束、离子束与 X 射线曝光技术在超大规模集成电路加工方面的应用(VLSI 微细加工技术,科学,1995 年第 3 期),希望能对国内微细加工技术的发展有所启发。值得欣慰的是中国在过去的 10 年中,尤其是最近几年已疾步赶上来。一方面是国力强盛了,另一方面是西方工业国家为打入中国市场已开放了先进微细加工设备对中国的出口。这 10 年中,我每年都回国讲学或进行合作研究,亲眼目睹了中国一些大学与研究所相继建立起具有与国外一流水平实验室相媲美的微细加工基础设施,装备了先进的微细加工设备。中国的半导体集成电路生产企业也已跻身世界前五大公司的行列。除了微电子与集成电路工业的发展外,中国在微系统 MEMS(micro-electro-mechanical system)技术的开发研究方面也与国外水平不相上下。微细加工技术已经不仅限于集成电路加工,而且被应用到更广泛的 MEMS 技术、微流体技术、微光学技术与生物芯片技术。最近两年蓬勃发展的纳米技术更是将微细加工技术提到了对纳米科技发展举足轻重的地位。微细加工技术已经扩展成为微纳米加工技术,成为当今微纳米研究与产业化不可缺少的手段。

中国已经下决心在微纳米技术领域赶上和超过国际先进水平,在国家雄

厚的财力支持下,购置了先进的微纳米加工设备,建立起先进的实验基础,但这些先进设备都需要由人来操作使用,使其发挥最大效益。另外,微纳米结构器件的功能或特性与其加工成型技术密切相关,任何从事微纳米技术研究或开发的科技人员都应同时具备相应的微纳米加工技术知识。这些年来通过回国讲学与合作研究,我深深感到国内科技人员与即将投身这一领域的大学在校本科生、研究生需要一本全面介绍微纳米加工技术基础与国外最新发展的读物。我本人也一直希望将我多年来从事微纳米加工技术研究的经验与所学所知传授他人。高等教育出版社向海外学者发出的邀请终于圆了我这个梦。作为一名中国自己培养的工学博士,这本书也是我回报祖国培育之恩的一份心意。

近年来随着微纳米技术的蓬勃发展,国外介绍微纳米加工技术的专业出版物也陆续出现。但这些书或者专述集成电路微加工技术,或者专述微系统 MEMS 的微加工技术,而面向纳米科技的纳米加工技术尚无任何出版物系统加以介绍。我力求在本书中同时介绍超大规模集成电路的加工技术、MEMS 的加工技术以及纳米加工技术。这一方面反映了当今科技多领域互相借鉴、互相交叉渗透的发展趋势,另一方面也是我本人这些年来工作实践的真实总结。我于 1989 年在英国国家科学与工程研究委员会 (SERC) 的访问研究基金资助下,来到英国剑桥大学卡文迪许实验室 (Cavendish Laboratory) 微电子研究中心作博士后研究。一开始从事的是液态金属离子源与聚焦离子束技术的研究,随后又参加了电子束曝光技术的欧共体研究计划。1993 年受聘于英国卢瑟福国家实验室 (Rutherford Appleton Laboratory) 微结构中心,参加了超大规模集成电路光学曝光技术的欧共体研究计划。1996 年到 1998 年间主持了一项欧共体关于电子束纳米曝光与化学放大抗蚀剂技术的研究。1998 年后开始转向微系统 MEMS 技术的研究,并主持了欧洲的一个微系统技术中心 (Competence Centre for Microactuators and Non-silicon Microsystems), 因此开始有机会接触各种用于 MEMS 的加工技术。这些技术,包括我在这些领域的研究成果,都反映在本书之中。这也是我能够独立完成本书的原因,而不是像其他同类书籍那样由多名作者联合撰写。当然,我本人的经验与知识是有限的,不可能也不敢妄称在所有书中所介绍的技术方面都是专家,因此希望广大读者与专家学者对书中可能出现的谬误之处给予批评指正。书中对每一种微纳米加工技术的介绍也难免挂一漏万,好在每章之后都附有相关的参考文献,可供读者进一步深入研究与探讨。

目前国内全面介绍微纳米加工技术的中文书籍尚未见有出版,因此,我在撰写本书过程中经常为如何恰当地将英文的专业名词术语翻译成中文而困

扰。过去由于中国台湾地区与大陆地区在科技交流方面的缺乏,台湾地区在引进国外半导体集成电路加工技术的过程中创造了一套中文名词术语,大陆地区在过去几十年的半导体工业发展中也建立了一套专业名词术语体系。对同一英文专业名词,海峡两岸往往有完全不同的中文翻译。例如,“mask”在大陆一般翻译为“掩模”,而在台湾翻译为“图罩”;“resist”在大陆翻译为“光刻胶”或“抗蚀剂”,而在台湾翻译为“阻剂”;“silicon wafer”在大陆翻译为“硅片”,而在台湾翻译为“晶圆”。近年来随着台湾集成电路工业对大陆投资的增加,来自台湾的与集成电路加工有关的专业名词术语多见于各种出版物。为了便于读者阅读,本书在中英文名词对照索引中对部分译法不同的名词同时列出大陆与台湾的译法。台湾译法参照了台湾交通大学龙文安教授所著《积体电路微影制程》与《半导体微影技术》两书的中文名词索引。由于微纳米加工技术的发展日新月异,对近年来国外出现的新技术名词,作者只能自行定义其中文的称呼。对这些名词,本书中通常不采取字面直译,而是按某一技术的特性决定其中文名称。例如,纳米压印中的“step and flash”技术从字面翻译很难反映其所以然,本书将其译为“软印模曝光”,这至少可以反映该技术的特点。至于这些中文译法是否能被读者和业界接受,还需经过时间的考验。为了适应国内读者与国外技术接轨的需要,同时配合国内高校的双语教学,本书出版后将由高等教育出版社接着出版其英文版。

我诚挚感谢高等教育出版社对本书出版的全力支持,并感谢丁衡高院士为本书作序。我衷心地希望以此书为促进中国在微纳米科技领域的人才培养与赶超国际先进水平尽绵薄之力。



2005年1月20日于英国牛津

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010) 58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010) 82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 微纳米技术与微纳米加工技术	(2)
1.2 微纳米加工的基本过程与分类	(4)
1.3 本书的内容与结构	(9)
参考文献	(12)
第 2 章 光学曝光技术	(13)
2.1 引言	(14)
2.2 光学曝光方式与原理	(16)
2.2.1 掩模对准式曝光	(16)
2.2.2 投影式曝光	(20)
2.3 光学曝光的工艺流程	(24)
2.4 光刻胶的特性	(26)
2.4.1 光刻胶的一般特性	(27)
2.4.2 正型光刻胶与负型光刻胶的比较	(31)
2.4.3 化学放大胶	(32)
2.4.4 特殊光刻胶	(33)
2.5 光学掩模的设计与制作	(33)
2.6 短波长曝光技术	(37)
2.6.1 深紫外曝光技术	(37)
2.6.2 极紫外曝光技术	(39)
2.6.3 X 射线曝光技术	(43)
2.7 大数值孔径与浸没式曝光技术	(45)
2.8 光学曝光分辨率增强技术	(49)
2.8.1 离轴照明技术	(50)
2.8.2 空间滤波技术	(50)
2.8.3 移相掩模技术	(52)
2.8.4 光学邻近效应校正技术	(57)

2.8.5	面向制造的掩模设计技术	(61)
2.8.6	光刻胶及其工艺技术	(62)
2.8.7	二重曝光与加工技术	(65)
2.9	光学曝光的计算机模拟技术	(67)
2.9.1	部分相干光成像理论	(68)
2.9.2	计算机模拟软件 COMPARE	(72)
2.9.3	光学曝光质量的比较	(76)
2.10	其他光学曝光技术	(80)
2.10.1	近场光学曝光技术	(81)
2.10.2	干涉光学曝光技术	(84)
2.10.3	无掩模光学曝光技术	(88)
2.10.4	激光三维微成型技术	(91)
2.10.5	灰度曝光技术	(94)
2.11	厚胶曝光技术	(97)
2.11.1	传统光刻胶	(98)
2.11.2	SU-8 光刻胶	(99)
2.12	LIGA 技术	(102)
2.12.1	用于 LIGA 的 X 射线光源	(106)
2.12.2	X 射线 LIGA 掩模	(106)
2.12.3	用于 X 射线 LIGA 的厚胶及其工艺	(108)
2.12.4	影响 X 射线 LIGA 图形精度的因素	(111)
	参考文献	(113)
第 3 章	电子束曝光技术	(121)
3.1	引言	(122)
3.2	电子光学原理	(123)
3.2.1	电子透镜	(124)
3.2.2	电子枪	(127)
3.2.3	电子光学像差	(129)
3.3	电子束曝光系统	(131)
3.4	电子束曝光图形的设计与数据格式	(139)
3.4.1	设计中的注意事项	(139)
3.4.2	中间数据格式	(140)
3.4.3	AutoCAD 数据格式	(143)

3.4.4 机器数据格式	(143)
3.5 电子束在固体材料中的散射	(145)
3.6 电子束曝光的邻近效应及其校正	(154)
3.7 低能电子束曝光	(161)
3.8 电子束抗蚀剂及其工艺	(164)
3.8.1 高分辨率电子束抗蚀剂	(164)
3.8.2 化学放大抗蚀剂	(169)
3.8.3 特殊显影工艺	(174)
3.8.4 多层抗蚀剂工艺	(176)
3.9 电子束曝光的极限分辨率	(179)
3.10 电子束曝光的计算机模拟	(180)
3.11 高产出率电子束曝光技术	(183)
3.11.1 变形束曝光	(184)
3.11.2 电子束投影曝光	(185)
3.11.3 微光柱系统曝光	(187)
3.11.4 多电子束无掩模曝光	(188)
参考文献	(189)
第4章 聚焦离子束加工技术	(197)
4.1 引言	(198)
4.2 液态金属离子源	(198)
4.3 聚焦离子束系统	(201)
4.4 离子在固体材料中的散射	(203)
4.5 聚焦离子束加工原理	(206)
4.5.1 离子溅射	(206)
4.5.2 离子束辅助沉积	(210)
4.6 聚焦离子束加工技术的应用	(211)
4.6.1 审查与修改集成电路芯片	(211)
4.6.2 修复光刻掩模缺陷	(212)
4.6.3 制作透射电镜样品	(216)
4.6.4 多用途微切割工具	(217)
4.7 聚焦离子束曝光技术	(220)
4.8 离子束投影曝光技术	(223)
4.9 聚焦离子束注入技术	(225)

参考文献	(226)
第5章 扫描探针加工技术	(231)
5.1 引言	(232)
5.2 扫描探针显微镜原理	(234)
5.3 抗蚀剂曝光加工	(237)
5.3.1 STM 曝光	(237)
5.3.2 NSOM 曝光	(241)
5.4 局部氧化加工	(243)
5.5 添加式纳米加工	(246)
5.5.1 扫描探针场致沉积	(246)
5.5.2 蘸笔纳米探针加工	(248)
5.6 抽减式纳米加工	(250)
5.6.1 电化学刻蚀加工	(250)
5.6.2 场致分解加工	(251)
5.6.3 热力压痕法加工	(251)
5.6.4 机械划痕法加工	(253)
5.6.5 氢原子掩模加工	(256)
5.7 高产出率扫描探针加工	(257)
参考文献	(261)
第6章 复制技术	(267)
6.1 引言	(268)
6.2 热压纳米压印技术	(270)
6.2.1 热压纳米压印的印模	(271)
6.2.2 热压纳米压印材料	(272)
6.2.3 热压纳米压印的脱模	(276)
6.2.4 热压纳米压印的对准	(279)
6.3 室温纳米压印技术	(281)
6.4 紫外固化纳米压印技术	(283)
6.4.1 透明印模	(284)
6.4.2 紫外固化压印材料	(288)
6.4.3 步进闪光压印光刻技术	(290)
6.4.4 透明印模压印的对准	(293)