



从光学光刻到极紫外 (EUV) 光刻，  
打开半导体芯片制造核心技术的大门！

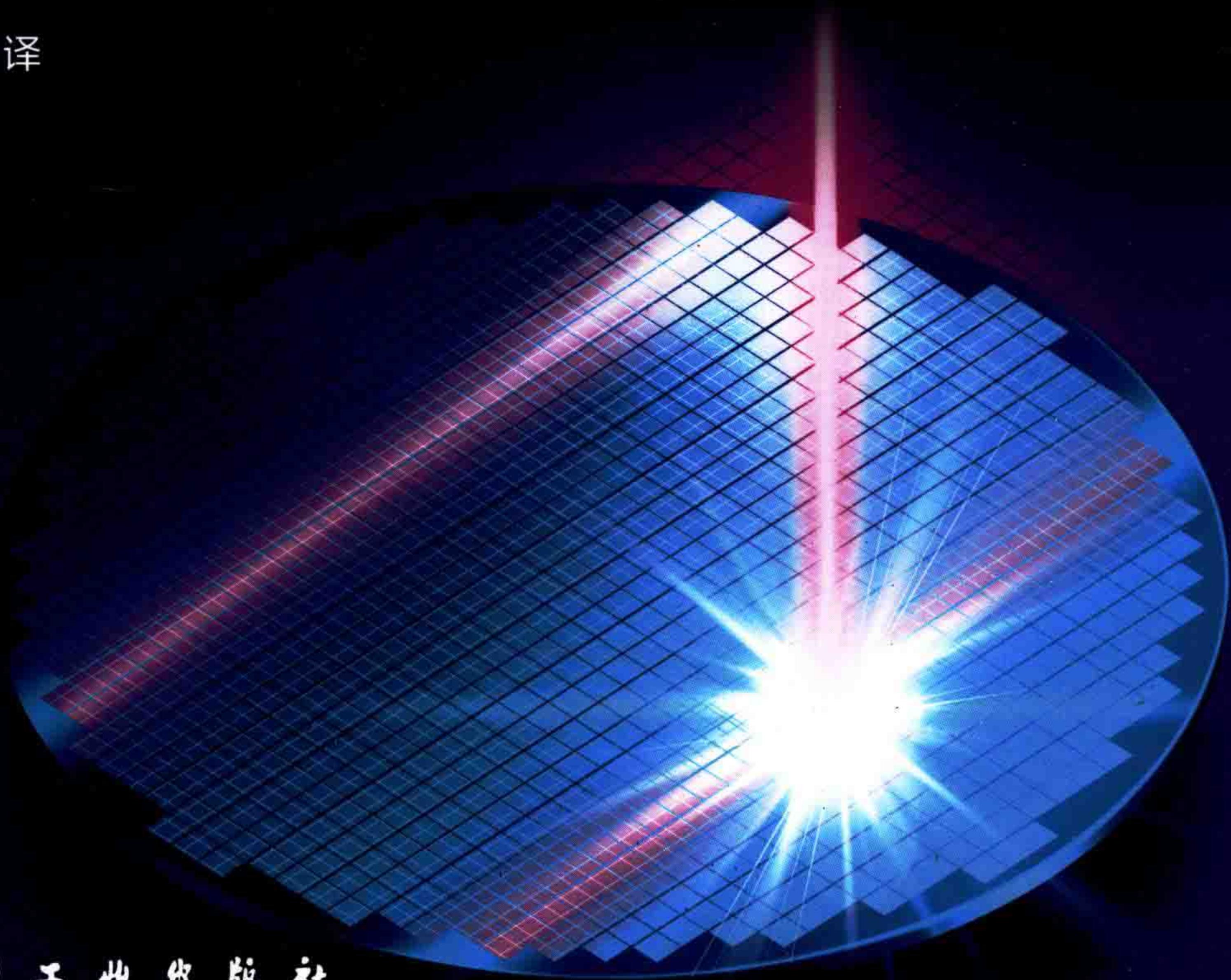
# 半导体先进光刻 理论与技术

Optical and EUV Lithography:  
A Modeling Perspective

(德) 安德里亚斯·爱德曼 著

Andreas Erdmann

李思坤 译



化学工业出版社



# 半导体先进光刻 理论与技术

Optical and EUV Lithography:  
A Modeling Perspective

---

(德) 安德里亚斯·爱德曼 著  
Andreas Erdmann

李思坤 译



· 北京 ·

## 内容简介

本书是半导体先进光刻领域的综合性著作，介绍了当前主流的光学光刻、先进的极紫外光刻以及下一代光刻技术。主要内容涵盖了光刻理论、工艺、材料、设备、关键部件、分辨率增强、建模与仿真、典型物理与化学效应等，包括光刻技术的前沿进展，还总结了极紫外光刻的特点、存在问题与发展方向。书中融入了作者对光刻技术的宝贵理解与认识，是作者多年科研与教学经验的结晶。

本书适合从事光刻技术研究与应用的科研与工程技术人员阅读，可作为高等院校、科研院所相关领域的科研人员、教师、研究生的参考书，也可作为微电子、光学工程、微纳加工、材料工程等专业本科生的参考教材，还可为芯片制造领域的科技工作者与管理人员提供参考。

Optical and EUV Lithography: A Modeling Perspective by Andreas Erdmann

ISBN 978-1-5106-3901-0

Copyright 2021 SPIE. All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage and retrieval system, without permission in writing from the Publisher and SPIE.

### Authorized Chinese-language edition.

本书中文版由 SPIE 授权化学工业出版社出版发行。

本书仅限在中国内地（大陆）销售，不得销往中国香港、澳门和台湾地区。未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分，违者必究。

## 图书在版编目（CIP）数据

半导体先进光刻理论与技术 / (德) 安德里亚斯·爱德曼 (Andreas Erdmann) 著；李思坤译. —北京：化学工业出版社，2023.7

书名原文：Optical and EUV Lithography:A Modeling Perspective

ISBN 978-7-122-43276-6

I. ①半… II. ①安… ②李… III. ①半导体光电器件 - 光刻设备 - 研究 IV. ① TN305.7

中国国家版本馆 CIP 数据核字（2023）第 062564 号

---

责任编辑：毛振威  
责任校对：王鹏飞

装帧设计：史利平

---

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）  
印 装：中煤（北京）印务有限公司  
710mm×1000mm 1/16 印张 20<sup>1/4</sup> 彩插 1 字数 486 千字 2023 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询：010-64518888  
网 址：<http://www.cip.com.cn>  
凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

售后服务：010-64518899

---

定 价：198.00 元

版权所有 违者必究

# 序言

光是人类认识与改变世界的重要媒介，与信息、健康、先进制造、国家安全都密切相关。光学的发展带来了许多改变人类社会生活的变革性技术。

光刻就是这样一种技术，是光科学在先进制造中应用的典型案例，涉及几何光学、波动光学、信息光学、薄膜光学、量子光学、傅里叶光学、非线性光学等多个光学分支。光刻过程，从光学的视角来看，就是光的产生、传播、调控，以及光与物质相互作用的过程；服从光学理论，受到衍射极限的约束。光刻的发展可看作是不断追求更高分辨率的过程。

为了提高分辨率，需要减小波长。所以我们看到，曝光波长在不断缩短，由可见光波段缩短至紫外波段、深紫外波段，再到极紫外波段。结合分辨率增强技术与负显影工艺，光学光刻已实现 7nm/5nm 节点芯片的制造。曝光波长为 13.5nm 的极紫外光刻在历经二十多年实验室研发与十多年量产研发后进入了量产。波长的缩短伴随着整个生态系统的变化。在设备、材料、工艺，以及许多先进技术的共同作用下，可以刻写的图形更加微细，芯片集成度越来越高。面向未来更小节点，基于不同工作原理的导向自组装、多电子束、纳米压印等高分辨率光刻技术也正在通往量产的研发道路上。

后摩尔时代，芯片的集成度、性能、功耗、成本不再统一地提升或者缩减；由传统等比例微缩的单一发展路径向等效微缩、高性能、低功耗、多功能等多发展路径方向转变；由单一的光刻技术驱动变为多元驱动；多源头创新，跨学科、跨领域协作的特点更加明显。

这本书是关于光刻技术的综合性著作，是 Erdmann 教授近三十年科研与教学经验的结晶。将这本书引进来翻译为中文是一件很有意义的事情，特别是在我们比以往更加追求集成电路产业突破的今天，值得花些时间去做。



中国科学院院士

2023 年 2 月 3 日

非常高兴看到我的专著 *Optical and EUV Lithography: A Modeling Perspective* 被翻译为中文。2010 年至 2012 年期间，我经常访问中国科学院上海光学精密机械研究所。访问期间开设了与本著作主题相同的光刻技术讲座。2014 年至 2015 年，我在北京理工大学访问期间也开设了同样的光刻技术课程。许多研究生和本科生参加了课程。他们教育背景良好、聪明，对科学充满好奇心。我非常喜欢与他们交流讨论。但是在授课过程中也发现一个问题，由于光刻是多学科交叉融合的一门技术，涉及大量的专业名词和专业表达，语言的障碍在一定程度上给学生的学习带来了不便。

非常感谢李思坤研究员将我的专著翻译为中文。此前在访问中科院上海光学精密机械研究所期间，我与李思坤研究员进行了很多有益的交流与讨论。相信在李思坤研究员的努力以及诸多教授、专家和研究生同学们的热情参与下，本书会有很高的翻译质量。该译著可帮助相关领域的学生、科研人员和工程师跨过语言障碍，深入理解书中的技术内容，帮助他们快速提高自身技能，将他们掌握的技术更快速地付诸应用。

本人在埃尔朗根 - 纽伦堡大学从事教学工作多年。以教师的视角来看，学习英文是必须的。学习英文有利于快速获取光学光刻与极紫外光刻技术领域的最新进展。将中文版与英文原版对照阅读，对学习光刻领域的专业词汇和表达、训练英文表达技能都有很大帮助，可帮助学生更快速地学习现代半导体光刻技术方面的知识。

我一直觉得教育工作是最令人感到荣耀的工作。相信李思坤研究员的译作将帮助对光刻感兴趣的学生、科研人员与工程师快速开启光学光刻与极紫外光刻学习的道路，帮助他们扩大视野，对中国以及世界科技的创新与繁荣作出应有的贡献。

安德里亚斯 · 爱德曼

德国，埃尔朗根

2023 年 1 月 8 日

光刻位于集成电路制造工艺的中心，其主要作用是将承载电路与器件信息的掩模图形高保真地转移到硅片上的光刻胶内。为实现特征尺寸微缩，光刻曝光波长不断减小，先后经历了可见光波段、紫外波段、深紫外波段、极紫外波段，需要解决光源、光刻胶、光衍射、成本等方面的问题。436nm/365nm 波长光刻普遍采用高压汞灯光源与酚醛树脂光刻胶。248nm 波长光刻首次引入 (KrF) 准分子激光器与化学放大光刻胶（芳香族化合物）。到 193nm 波长光刻，演化为 ArF 准分子激光器与丙烯酸酯化学放大光刻胶。由 193nm 深紫外波长至 13.5nm 极紫外波长是前所未有的进步，带来了全方位的技术革新，首次采用激光等离子体光源、全反射式光学系统与真空工作环境。离轴照明、相移掩模、光学邻近效应修正、光源掩模优化等分辨率增强技术，以及增大物镜数值孔径的方法，都可以归结为优化光衍射的方法。新技术、新工艺的应用，提高了光刻复杂度与成本。在极紫外光刻实现量产的同时，许多研发机构也在尝试研发导向自组装、多电子束，以及纳米压印等成本相对较低的高分辨率光刻技术。光刻技术的进步伴随着整个生态系统的变化。在设备（光刻机、涂胶显影机、量测 / 检测设备等）、材料（光学材料、光刻胶材料等）、工艺（旋涂、烘焙、显影等），以及各种先进技术的共同作用下，光刻技术由微米水平发展至纳米水平，芯片集成度越来越高，单个晶体管的造价越来越低。

Erdmann 教授的著作是最新出版的光刻技术综合性学术专著。该著作涵盖了当前主流的半导体光学光刻、最先进的极紫外光刻，以及下一代半导体光刻，包括光刻原理、设备、工艺、材料、关键部件、分辨率增强技术等方面的内容。详细地介绍了光刻领域的最新进展，系统地分析了各种技术的优点和不足，重点描述了工程技术背后的物理原理，特别是光刻成像与图形工艺的光学原理、化学原理，以及影响光刻成像质量的各种物理化学效应背后的物理本源。作者借助简单易懂的表达式和仿真实例，从建模角度切入，行文中融入了作者对光刻技术的宝贵理解和认识。全书深入浅出，便于读者理解。通过阅读该专著，可以加深工程师和科研人员对光刻技术的理解，对工程技术实施和新技术研发大有裨益；有助于研究生和本科生掌握光刻技术的物理与化学原理，较全面地了解光刻关键技术与发展现状。书中对各种先进光刻技术的综述、分析与发展方向的讨论，对我国光刻技术领域的发展规划与决策也有一定参考价值。

书中内容涉及光学、化学、材料、数学、等离子体物理、微电子学等多个学

科。以光学为例，书中涉及几何光学、波动光学、信息光学、薄膜光学、量子光学、傅里叶光学、非线性光学等多个光学分支，内容覆盖范围广。同一个英语词汇在不同研究领域对应的中文名词会不同，例如“system”在设备领域常翻译为“系统”，而在光刻胶等材料领域常翻译为“体系”。为了准确翻译并贴近国内研究人员常用的专业术语与表达方式，译者在翻译过程中与国内外光刻设备、材料、工艺、软件、微纳加工、新型芯片 / 器件等研究领域的专家进行了大量交流，得到了许多专家、学者的帮助。特别感谢：张江实验室熊诗圣研究员、王成副研究员，复旦大学伍强研究员、李自力青年副研究员，德国西门子公司 (Mentor Graphic) 邵峰博士，美国天普大学 Xiao-Hua Hu 博士，东方晶源微电子科技（北京）有限公司施伟杰博士、张生睿先生、牛志元博士、丁明博士，长春理工大学林景全教授，上海微电子装备（集团）有限公司段立峰博士，中国科学院微电子所韦亚一研究员、董立松副研究员，中国科学院长春应用化学研究所季生象研究员、刘亚栋副研究员，华中科技大学刘世元教授，广东工业大学沈逸江副教授，北京理工大学马旭教授，全芯智造技术有限公司孟晓东先生、成维博士，上海镭望光学科技有限公司黄惠杰博士、曾爱军研究员，上海集成电路研发中心解小明工程师，中国科学院上海光学精密机械研究所冷雨欣研究员、新刚研究员、林楠研究员、余俊杰副研究员、魏劲松研究员、李笑然研究员、苏榕研究员、赵娇玲副研究员、王俊研究员、王少卿副研究员、赵成强副研究员、田野研究员、吴卫平研究员、唐锋研究员、胡国行副研究员。

该著作的主要内容来源于 Erdmann 教授在埃尔朗根 - 纽伦堡大学开设多年的光刻课程，内容和章节安排都适合教学使用。为了提高本译著对学生群体的可读性，特邀请多位研究生同学进行了试读，他们从课程学习的角度提出了很多宝贵建议，感谢本课题组研究生张涛、雷威、郑杭、潘东超、江一鹏。感谢刘宇洋、王浩岚同学帮忙编辑了公式。

特别感谢李儒新院士、Erdmann 教授为本书作序。特别感谢浙江大学（中国科学院上海光学精密机械研究所）王向朝教授、张江实验室刘德安研究员对翻译工作的支持。感谢国家二级翻译王丽女士提出的宝贵建议。感谢化学工业出版社提供的专业化支持。在大家的共同努力下，这本译书才得以圆满出版。

感谢张江实验室科技攻关项目、“极大规模集成电路制造装备及成套工艺”国家科技重大专项课题（2017ZX101004, 2017ZX101004-002）、国家自然科学基金区域创新发展联合基金重点项目（U22A2070）的支持。

Erdmann 教授是中国科学院上海光学精密机械研究所的特聘研究员。译者与他在同一领域工作多年，进行了密切的合作研究。非常荣幸能够翻译 Erdmann 教授的著作。鉴于译者水平有限，疏漏之处在所难免，恳请各位读者朋友批评指正。

李思坤

中国科学院上海光学精密机械研究所

2022 年 12 月 28 日

先进半导体光刻是超精密微纳结构制备技术，是超精密光学系统与精巧设计、高度优化的光化学材料和工艺的高度融合，支撑了现代信息社会的发展。该技术有机地结合了应用光学、化学与材料科学，为应用科学与技术领域的科学家和工程师提供了理想的施展空间。多年来，光刻图形化技术的发展主要由尺寸微缩驱动，专注于提高分辨率，不断延续戈登·摩尔的预言，将更多组件集成进集成电路中。尽管这种微缩尚未达到极限，但在半导体芯片上制备更多、更小、均匀、无缺陷微细图形的难度越来越大，成本也不断提高。用于新兴应用的下一代光刻技术需要聚焦三维形状控制、新型（功能）材料集成、非平面图形化工艺、应用导向型目标图形设计等不同需求。光刻技术 50 多年发展历程中积累的知识和经验，为开发新型微纳技术的应用打下了坚实的基础。

本书的内容主要来源于本人在埃尔朗根-纽伦堡大学（埃尔朗根-纽伦堡 弗里德里希-亚历山大大学）开设的光刻课程，课程内容包括光刻技术、物理效应和建模等。本书还收录了本人为一些公司以及学术会议同期活动开设的光刻专题讲座的内容。本书旨在帮助物理、光学、计算工程、数学、化学、材料科学、纳米技术和其他专业背景的学生开启通往纳米制造光刻技术领域的门，帮助工程师和管理人员了解光刻领域的常见方法与应用，拓展知识面。

这本书的目标不是全面地介绍光刻图形化技术，而是侧重于解释成像与图形转移的基本原理。利用简单易懂的例子证明这些基本原理，讨论某些方法与技术的优缺点。本书提供了丰富的参考文献，可供有意进一步了解有关技术的读者查阅。为了限制篇幅与撰写时间，书中没有涵盖所有重要的光刻图形化技术，或者仅对其中的一些作了简略介绍：计量和工艺控制对于大规模量产光刻的重要性越来越高。为获得高质量掩模，先进深紫外（DUV）与极紫外（EUV）投影光刻需要灵活的掩模制造、检测、调整与修复技术。为了获得对光刻“友好”的设计，电路设计人员与光刻工艺专家之间需要保持密切互动。除此之外还有许多非光学光刻技术。这些内容在其他几位作者的书和综述文章中已有介绍。

本领域已经出版了几本关于半导体光刻的优秀书籍，为什么还需要再写一本关于该主题的书？主要是因为光刻是最具活力的技术领域之一。光刻技术融合了不同

领域的新思想和新技术，不断演化发展。高度多学科化是现代光刻技术研究与开发的特点。深入了解相关的物理和化学效应是精确制备和表征纳米图形的前提。本书从建模角度帮助读者加深对光刻技术的理解，但同时又尽量避免使用复杂的数学公式。本书的内容反映了本人在应用光学、衍射光学、严格建模以及光与微纳米结构相互作用方面的研究兴趣和背景。因此，本书更加系统地讨论了掩模与硅片形貌效应，以及相关的光散射效应。最后，本书旨在弥合半导体制造领域专业工程师与致力于光刻技术新应用研发的科学家、工程师之间的知识差异。

光学（投影）光刻将掩模或模板成像到感光材料（光刻胶）中，经过光刻胶工艺处理后，将光学像转换成三维图形。第1章介绍空间像和光刻胶工艺，给出了定量描述空间像、光刻胶形貌和光刻工艺变化的参数定义。对这些参数的分析有助于理解本书后面介绍的成像和工艺增强方面的内容。第2章介绍了成像的物理过程，穿过投影物镜数值孔径的衍射光相互叠加，被聚焦到光刻胶上成像。投影系统的分辨率服从阿贝-瑞利公式。第3章介绍光刻胶与光刻工艺的基本原理。第4章和第5章介绍在波长和数值孔径一定的情况下实现分辨率增强的方法。光学分辨率增强技术包括离轴照明（OAI）、光学邻近效应修正（OPC）、相移掩模（PSM）和光源掩模优化（SMO）等。多重图形技术与定向自组装（DSA）使用特殊材料和工艺制备更小的图形。波长为13.5nm的EUV光刻将光学投影光刻扩展到软X射线波段。由于任何材料都不能透过该波段的光，EUV光刻必须使用反射式光学元件与掩模，以及新型光源和光刻胶材料，请见第6章。第7章概述了三维光刻等备选光学光刻方法。

其余章节主要介绍先进光学光刻和EUV光刻中的重要物理与化学效应。第8章讨论了波像差、偏振效应与随机散射光对光刻胶内强度分布的影响。掩模与硅片上的微细图形对光的散射引起了掩模与硅片形貌效应，相关内容见第9章。本书的最后一章介绍随机效应。随机效应导致了线边粗糙度（LER）在纳米量级的光刻胶形貌，产生了微桥连、未完全打开的接触孔等致命缺陷。

本书章节的安排参照了本人在埃尔朗根-纽伦堡大学的课程安排。这样安排可将光学/化学背景理论与应用有机地融合在一起，方便对各种技术展开论述。第1~5章描述了光学和光刻胶的背景知识，建议按顺序阅读。读者可以根据个人兴趣阅读第6~10章。第7章概述了备选（光学）光刻方法，这些方法主要应用于纳米电子领域之外的微纳加工中，仅对（先进）半导体光刻技术感兴趣的读者可以跳过此章。

与同事和项目合作伙伴的合作研究与讨论也是本书宝贵的材料来源。本人非常感谢专家们的宝贵建议，特别致谢：ASML公司的Antony Yen、Synopsys公司的Hans-Jürgen Stock、Mentor Graphics公司的John Sturtevant、哥廷根大学的Marcus

Müller、Zeiss SMT 公司的 Michael Mundt、Enx Labs 公司的 Uzodinma Okoroanyanwu、CEA-Leti 公司的 Raluca Tiron。

感谢弗劳恩霍夫协会系统集成与元件研究所 (Fraunhofer IISB) 计算光刻与光学研究组的成员、前成员与研究生们，特别是 Peter Evanschitzky、Zelalem Belete、Hazem Mesilhy、Sean D'Silva、Abdalaziz Awad、Tim Fühner、Alexandre Vial、Balint Meliorisz、Bernd Tollkühn、Christian Motzek、Daniela Matiut、David Reibold、Dongbo Xu、Feng Shao、Guiseppe Citarella、Przemislaw Michalak、Shijie Liu、Temitope Onanuga、Thomas Graf、Thomas Schnattinger、Viviana Agudelo Moreno 和 Zhabis Rahimi。所有成员都为我们研发 Dr.LiTHO 光刻仿真软件做出了贡献。本书中的大部分仿真都采用了该软件。弗劳恩霍夫协会光刻组成员和选修光刻课程的学生也帮助我提高了材料的质量。

特别感谢 SPIE 出版社的 Dara Burrows 和 Tim Lamkins，他们提供了许多有益的建议，协助我进行了编辑工作。

安德里亚斯 · 爱德曼  
德国，埃尔朗根

# 常用符号中英文对照表

$A_{\text{Dill}}$	photoresist bleachable absorption	光刻胶漂白吸收系数
$B_{\text{Dill}}$	photoresist unbleachable absorption	光刻胶不可漂白吸收系数
$C_{\text{Dill}}$	photoresist exposure sensitivity	光刻胶曝光敏感度
$D$	exposure dose	曝光剂量
$I$	intensity	光强 / 强度
$P$	pupil function	光瞳函数
$T$	temperature	温度
$Z_i$	Zernike coefficients	泽尼克系数
$[A]$	photoacid concentration	光酸浓度
$[M]$	concentration of dissolution inhibitor or deprotected sides	溶解抑制剂或者脱保护位点的浓度
$[Q]$	quencher concentration	猝灭剂浓度
$\alpha$	absorption coefficient	吸收系数
$\varepsilon$	(relative) electric permittivity	(相对)介电常数
$\varepsilon_0$	vacuum electric permittivity	真空介电常数
$\eta$	diffraction efficiency	衍射效率
$\gamma$	photoresist contrast	光刻胶对比度
$\kappa_{1-5}$	kinetic reaction coefficients	动力学反应常数
$\lambda$	wavelength	波长
$\mathfrak{I}$	Fourier transform	傅里叶变换
$\mu_0$	vacuum magnetic permeability	真空磁导率
$\nabla$	nabla-operator	矢量微分算子
$\phi$	phase (of light)	(光的)相位
$\rho$	diffusion length	扩散长度
$\sigma$	spatial coherence factor	空间相干因子
$\sigma_{\text{LER}}$	line edge roughness	线边粗糙度
$\tau$	amplitude transmission	振幅透过率
$\theta$	diffraction or opening angle	衍射角或者张角
$\tilde{D}$	diffusion coefficient	扩散系数
$\tilde{k}$	magnitude of wave vector	波矢大小
$\mathbf{E}$	electric field vector	电场矢量
$\mathbf{H}$	magnetic field vector	磁场矢量

<b><math>\mathbf{k}</math></b>	wave vector	波矢
$\tilde{T}$	intensity transmission	光强透过率
$c$	vacuum velocity of light	真空中的光速
$d$	(photoresist) thickness	(光刻胶) 厚度
$f_{x/y}$	spatial frequencies	空间频率
$h$	Planck constant	普朗克常数
$k$	extinction coefficient	消光系数
$k_{1,2}$	technology factor in first/second Abbe-Rayleigh criterion	第一 / 第二阿贝 - 瑞利准则的工艺 因子
$n$	refractive index	折射率
$p$	pitch or period	周期
$t$	time	时间
$x/y/z$	spatial coordinates	空间坐标

# 目 录

## 常用符号中英文对照表

<b>第1章 光刻工艺概述</b>	1
1.1 从微电子器件的微型化到纳米技术	1
1.2 发展历程	3
1.3 步进扫描投影光刻机的空间像	5
1.4 光刻胶工艺	8
1.5 工艺特性参数	10
1.6 总结	16
参考文献	17
<b>第2章 投影光刻成像理论</b>	19
2.1 投影光刻机	19
2.2 成像理论	20
2.2.1 傅里叶光学描述方法	20
2.2.2 倾斜照明与部分相干成像	24
2.2.3 其他成像仿真方法	28
2.3 阿贝－瑞利准则	28
2.3.1 分辨率极限与焦深	29
2.3.2 结论	33
2.4 总结	36
参考文献	36
<b>第3章 光刻胶</b>	38
3.1 光刻胶概述、常见反应机制与唯象描述	39
3.1.1 光刻胶的分类	39

3.1.2 重氮萘醌类光刻胶	41
3.1.3 最先进的正性化学放大光刻胶	42
3.1.4 唯象模型	44
<b>3.2 光刻工艺与建模方法</b>	<b>45</b>
3.2.1 光刻工艺简介	46
3.2.2 曝光	46
3.2.3 后烘	49
3.2.3.1 重氮萘醌光刻胶	50
3.2.3.2 化学放大光刻胶	50
3.2.4 化学显影	52
<b>3.3 建模方法与紧凑光刻胶模型</b>	<b>56</b>
<b>3.4 负性与正性光刻胶材料与工艺</b>	<b>59</b>
<b>3.5 总结</b>	<b>63</b>
<b>参考文献</b>	<b>64</b>

## **第 4 章 光学分辨率增强技术** ..... 70

<b>4.1 离轴照明</b>	<b>70</b>
4.1.1 线空图形的最佳离轴照明	72
4.1.2 适用于接触孔阵列的离轴照明	73
4.1.3 由传统和参数化光源形状到自由照明	75
<b>4.2 光学邻近效应修正</b>	<b>76</b>
4.2.1 孤立 - 密集图形偏差的补偿	76
4.2.2 线端缩短的补偿	79
4.2.3 从基于规则的 OPC 到基于模型的 OPC，再到反向光刻	79
4.2.4 OPC 模型与工艺流程	82
<b>4.3 相移掩模</b>	<b>83</b>
4.3.1 强相移掩模：交替型相移掩模	84
4.3.2 衰减型相移掩模	89
<b>4.4 光瞳滤波</b>	<b>92</b>
<b>4.5 光源掩模优化</b>	<b>94</b>
<b>4.6 多重曝光技术</b>	<b>97</b>
<b>4.7 总结</b>	<b>99</b>

参考文献 .....	100
<b>第 5 章 材料驱动的分辨率增强技术 .....</b>	<b>106</b>
5.1 分辨率极限回顾 .....	106
5.2 非线性双重曝光 .....	109
5.2.1 双光子吸收材料 .....	109
5.2.2 光阈值材料 .....	110
5.2.3 可逆对比度增强材料 .....	110
5.3 双重与多重图形技术 .....	112
5.3.1 光刻 – 刻蚀 – 光刻 – 刻蚀 .....	112
5.3.2 光刻 – 冻结 – 光刻 – 刻蚀 .....	114
5.3.3 自对准双重图形技术 .....	115
5.3.4 双重显影技术 .....	115
5.3.5 双重或多重图形技术的选择 .....	116
5.4 导向自组装 .....	117
5.5 薄膜成像技术 .....	121
5.6 总结 .....	123
参考文献 .....	123
<b>第 6 章 极紫外光刻 .....</b>	<b>129</b>
6.1 光源 .....	130
6.2 EUV 和多层膜薄膜中的光学材料特性 .....	132
6.3 掩模 .....	135
6.4 光刻机与成像 .....	139
6.5 光刻胶 .....	143
6.6 掩模缺陷 .....	144
6.7 EUV 光刻的光学分辨率极限 .....	147
6.7.1 $6.x\text{ nm}$ 波长 EUV 光刻 (BEUV 光刻) .....	147
6.7.2 高数值孔径光刻 .....	148
6.7.3 减小工艺因子 $k_1$ : EUV 光刻分辨率增强技术 .....	151
6.8 小结 .....	152
参考文献 .....	153

## **第7章 无需投影成像的光学光刻 ..... 163**

<b>7.1 无投影物镜的光学光刻：接触式与接近式光刻技术 ..... 163</b>
7.1.1 成像及分辨率极限 ..... 164
7.1.2 技术实现 ..... 166
7.1.3 先进的掩模对准光刻 ..... 169
<b>7.2 无掩模光学光刻 ..... 172</b>
7.2.1 干涉光刻 ..... 173
7.2.2 激光直写光刻 ..... 176
<b>7.3 无衍射极限的光学光刻 ..... 180</b>
7.3.1 近场光刻 ..... 180
7.3.2 光学非线性光刻 ..... 183
<b>7.4 三维光学光刻 ..... 187</b>
7.4.1 灰度光刻 ..... 187
7.4.2 三维干涉光刻 ..... 189
7.4.3 立体光刻与 3D 微打印技术 ..... 190
<b>7.5 关于无光光刻的几点建议 ..... 193</b>
<b>7.6 总结 ..... 193</b>
<b>参考文献 ..... 194</b>

## **第8章 光刻投影系统：进阶主题 ..... 206**

<b>8.1 实际投影系统中的波像差 ..... 206</b>
8.1.1 泽尼克多项式描述方法 ..... 206
8.1.2 波前倾斜 ..... 211
8.1.3 离焦像差 ..... 212
8.1.4 像散 ..... 212
8.1.5 彗差 ..... 213
8.1.6 球差 ..... 216
8.1.7 三叶像差 ..... 217
8.1.8 泽尼克波像差总结 ..... 218
<b>8.2 杂散光 ..... 219</b>
8.2.1 常数杂散光模型 ..... 219
8.2.2 基于功率谱密度的杂散光模型 ..... 220
<b>8.3 高 NA 投影光刻中的偏振效应 ..... 223</b>
8.3.1 掩模偏振效应 ..... 224

8.3.2 成像中的偏振效应.....	224
8.3.3 光刻胶与硅片膜层材料界面引起的偏振效应.....	226
8.3.4 投影物镜偏振效应与矢量光刻成像模型.....	229
8.3.5 偏振照明.....	230
8.4 步进扫描投影光刻机中的其他成像效应 .....	231
8.5 总结 .....	232
参考文献 .....	232
<b>第9章 光刻中的掩模形貌效应与硅片形貌效应 .....</b>	<b>236</b>
9.1 严格电磁场仿真方法.....	238
9.1.1 时域有限差分法 .....	239
9.1.2 波导法 .....	241
9.2 掩模形貌效应 .....	243
9.2.1 掩模衍射分析.....	244
9.2.2 斜入射效应 .....	247
9.2.3 掩模引起的成像效应 .....	248
9.2.4 EUV 光刻中的掩模形貌效应与缓解策略 .....	252
9.2.5 三维掩模模型.....	256
9.3 硅片形貌效应 .....	258
9.3.1 底部抗反射涂层的沉积策略.....	259
9.3.2 多晶硅线附近的光刻胶残留.....	260
9.3.3 双重图形技术中的线宽变化.....	261
9.4 总结 .....	262
参考文献 .....	262
<b>第10章 先进光刻中的随机效应 .....</b>	<b>269</b>
10.1 随机变量与过程 .....	269
10.2 现象 .....	272
10.3 建模方法.....	274
10.4 内在联系与影响.....	276
10.5 总结 .....	279
参考文献 .....	279
<b>附录 .....</b>	<b>285</b>
附录1 名词中英文对照.....	285
附录2 缩略语中英文对照.....	301

# 第 1 章 ➤ 光刻工艺概述

本章介绍光刻工艺对纳米器件小型化和新兴纳米技术的重要意义。光刻技术具有高精度和高产率的优点，常用于制造微细化程度很高的电子设备等等。本章简要回顾光刻技术的发展历程，介绍光学投影光刻系统的基本组成部分与光刻工艺的基本步骤，概述光刻成像质量以及光刻胶形貌质量的标准评估方法。最后介绍几种重要的光刻工艺评价方法。

## 1.1 从微电子器件的微型化到纳米技术

1947 年，贝尔实验室的约翰·巴丁、沃尔特·布拉顿和威廉·肖克利发明了第一个半导体信号放大器，即点接触式晶体管。他们用弹簧固定锗晶体上的两个金触点，该晶体管的大小约为 13mm。11 年后的 1958 年，德州仪器公司的杰克·基尔比将硅基晶体管、电阻和电容集成到第一个集成电路中，该集成电路的大小为 11mm。十几年之后，费德里科·费丁、泰德·霍夫和斯坦·马佐尔领导的团队将 2300 个晶体管集成到第一个英特尔 4004 微处理器中，该处理器只有 4mm 大小。从那时起，半导体集成电路上的晶体管数量大幅增加。图 1.1 的左图总结了这一发展趋势，图中纵轴采用了对数坐标。戈登·摩尔在 1965 年的一篇卓有远见的文章<sup>[1]</sup> 中预言了这一趋势。今天，摩尔的预测被解释为晶体管数量每 18 个月翻一番。

集成电路中晶体管数量的不断增长不是通过增大芯片面积实现的，相反，半导体芯片上最小结构的尺寸正在逐渐减小。某种技术可印制的最小特征尺寸定义为该技术的分辨率。2.3.1 节详细讨论了分辨率及其与几个特征参数之间的关系。

最小特征尺寸的演化趋势如图 1.1 右图所示。20 世纪 70 年代中期，光学投影技术首次应用于制造最小尺寸约为  $2 \sim 3\mu\text{m}$  的图形。这些图形比当时 436nm 波长光刻可以印制的图形约大了 4 倍。2018 年，193nm 波长投影光刻技术被用来制造 20nm 宽的图形。特征尺寸几乎是波长的十分之一。光学投影和光刻胶工艺技术的

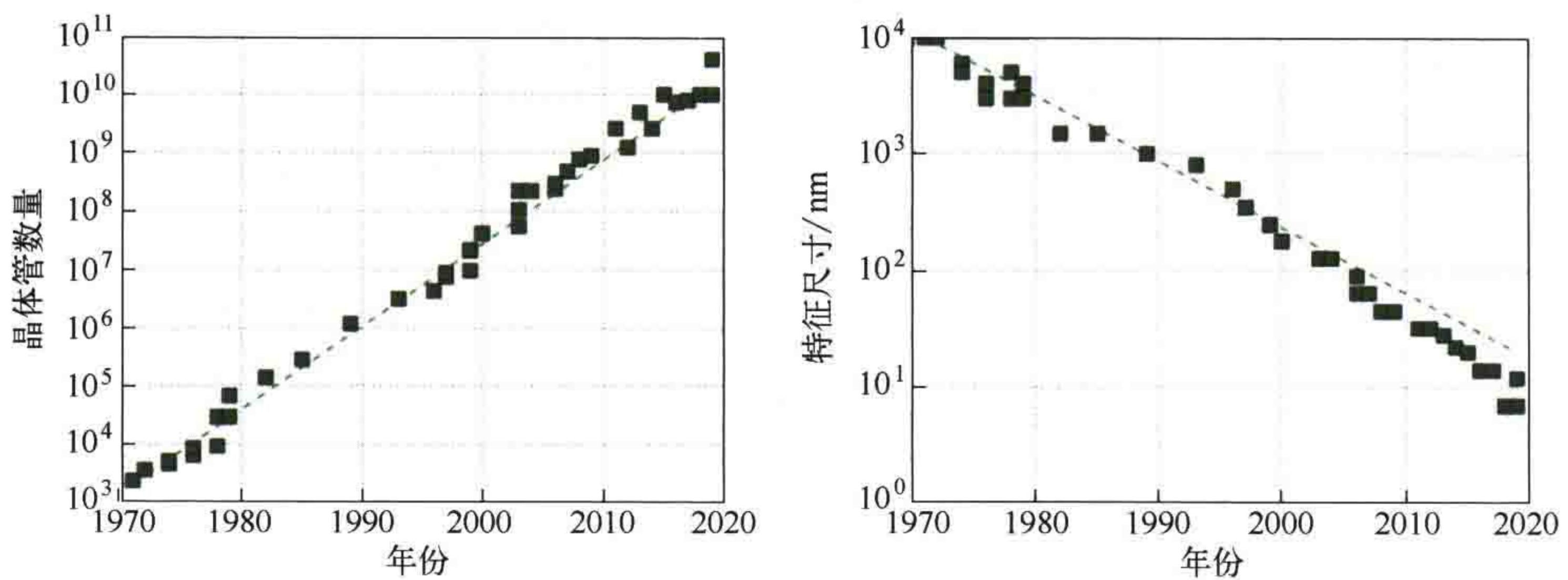


图 1.1 芯片上晶体管数量的演化历史（左图）以及相应的最小特征尺寸（右图）。

数据来自 [http://en.wikipedia.org/wiki/Transistor\\_count](http://en.wikipedia.org/wiki/Transistor_count)

巨大进步需要深入理解其背后的物理与化学原理。2019 年，利用极紫外（EUV）光刻技术制造了第一批半导体芯片。EUV 光刻技术有望将微细化趋势延伸到几纳米量级。

1959 年 12 月 29 日，理查德·费曼在加州理工学院举行的美国物理学会年会上发表了一次极具战略眼光的演讲。“我想说的是在小尺度水平对事物进行操纵和控制的问题。每当我提到这一点，人们就会告诉我器件的微细化以及它今天取得的巨大进步。拿只有指甲大小的电动机来举例，告诉我市场上有一种装置，使用这种装置可以在针尖上写主祷文。但我觉得这些都不算什么，这还仅仅是最初级的一步。继续缩小下去，后面会有一个小到令人震惊的世界。2000 年，当他们回顾这个时代，他们会想知道为什么直到 1960 年才有人开始认真朝着这个方向前进。”<sup>[2]</sup>

如今，微米和纳米技术在我们生活中几乎已无处不在。基于不同类型微型发光器件的平板显示器已经取代了老式的阴极射线管显示器。微型电、磁、光和电化学传感器阵列被用来监测食品安全和人体健康，广泛应用于汽车、智能手机等设备上。微米和纳米技术可以用于制造新材料，这些新材料具有自然界中不存在的性质，它们即所谓的超材料。基于纳米技术的薄膜太阳能电池对太阳能的收集效率更高。这方面的例子还有很多，充分显示了微米和纳米器件对现代技术的重要性。

如何以快速、廉价、可靠、环保的方式制造这些小器件呢？一般有两种方法。一种是自下而上的纳米制造方法。受生物学的启发，这种方法从基本原子或分子出发构建具有特定功能的纳米结构。找出合适的分子和原子，并将其排列成具有所需性质和功能的特定纳米结构。自下而上的技术和工艺提供了一种在表面上制备分子尺度结构的方法<sup>[3]</sup>。但是当用其制造用户自定义的复杂图形时，这种工艺常难以控制。

大多数功能性微纳米器件，比如半导体芯片，都是利用另一种自上而下的纳米

工艺制造的。这种自上而下的方法通过光刻和其他工艺将芯片设计图转换为由某种材料组成的“积木”。利用不同设计和材料的组合以及后续的图形化工艺将材料加工成所需的几何结构。一般来说，这个过程需要进行一次或多次光刻才能将芯片设计转移到光敏材料——光刻胶上。光刻胶图形充当刻蚀、沉积、掺杂等其他图形化步骤的掩模。

## 1.2 发展历程

“光刻”一词在希腊语中是“在石头上刻字”的意思（起源于希腊语的λιθος——lithos、“石”，以及 γραφειν——graphein、“刻写”）。1796年，阿洛伊斯·塞内费尔德发明了这项技术，它是一种可在纸或其他材料上打印文字或艺术品的低成本方法。《大英百科全书》中对“光刻”的解释很好：“一种利用油脂和水之间不相溶性的平面印刷工艺。在这一时期的光刻工艺中，先用油脂处理印刷平面上的图像区域，然后将油墨涂在图像区域；无图像（空白）区域为水性，对油墨有排斥性。喷涂了油墨的一面被打印在纸上。”塞内费尔德的书<sup>[4]</sup>中详细描述了他在材料与工艺技术等方面的研究。

20世纪50年代，光刻开始用于（微）电子电路制造<sup>[5]</sup>。约翰·布鲁宁<sup>[6]</sup>以及Pease和Chou<sup>[7]</sup>的文章生动地回顾了光刻技术和半导体集成电路制造设备的发展历史。1960年至1975年间，用于半导体集成电路制造的光刻机为接近式光刻机。这种光刻机通过阴影印刷的方式曝光光刻胶。掩模上包含需要曝光的图形。半导体硅片上涂覆有光刻胶。硅片被放置在靠近掩模的位置。典型的掩模由均匀透明的石英基底和带有图形的不透明薄膜（例如铬薄膜）组成。当用汞灯照明时，入射光将掩模的阴影投射到距离掩模20~100mm处的硅片上。这种技术的光学分辨率仅有3~5μm。为了提高分辨率，需要减小掩模与硅片的间距，或者使两者直接接触。直接接触也称为硬接触。间距较小时很容易导致掩模污染。所以生产中间距不能小于20μm，更不能发生硬接触。图1.2展示了用于制造第一代半导体电路的典型光刻设备。本书的7.1节详细介绍接近式光刻机。这种光刻机在今天仍然被作为高性价比设备应用于大尺寸图形的光刻。

投影光刻的发展始于20世纪70年代初。这种光刻技术的工作波长在可见光和紫外波段。这类光刻机使用反射镜或者透镜将掩模1:1成像到光刻胶内。后来1:1投影系统被缩小投影系统取代。缩小投影系统能够对掩模进行缩小成像。缩小倍率降低了掩模制造的复杂度。微缩光学系统问世之初的一小段时间被视为掩模制造商的假日。蔡司推出了第一个微缩光学系统，采用了10×缩小倍率。今天，投影系统的缩小比例因子普遍为4。



图 1.2 20 世纪 60 年代的光刻图形生成设备。转载自参考文献 [6]

现代投影光刻机的像场可达  $26\text{mm} \times 33\text{mm}$ ，但与直径为  $200 \sim 300\text{mm}$  的典型硅片尺寸相比，仍然很小。分布重复式投影光刻机通过依次曝光硅片的不同区域完成整个硅片的曝光。对每个区域的曝光为静态曝光，曝光过程中掩模和硅片保持静止。现代步进扫描投影光刻机具备复杂的掩模台和工件台，两者能够完美地同步运动。完成  $300\text{mm}$  硅片曝光仅需要几秒，产率可以接近每小时 300 片硅片。

图 1.3 为两种最先进的步进扫描投影光刻机。尼康 NSR-S635E 光刻机的工作波长为  $193\text{nm}$ ，数值孔径 (NA) 为 1.35。右图是 ASML 公司的 NXE-3400B EUV 步进

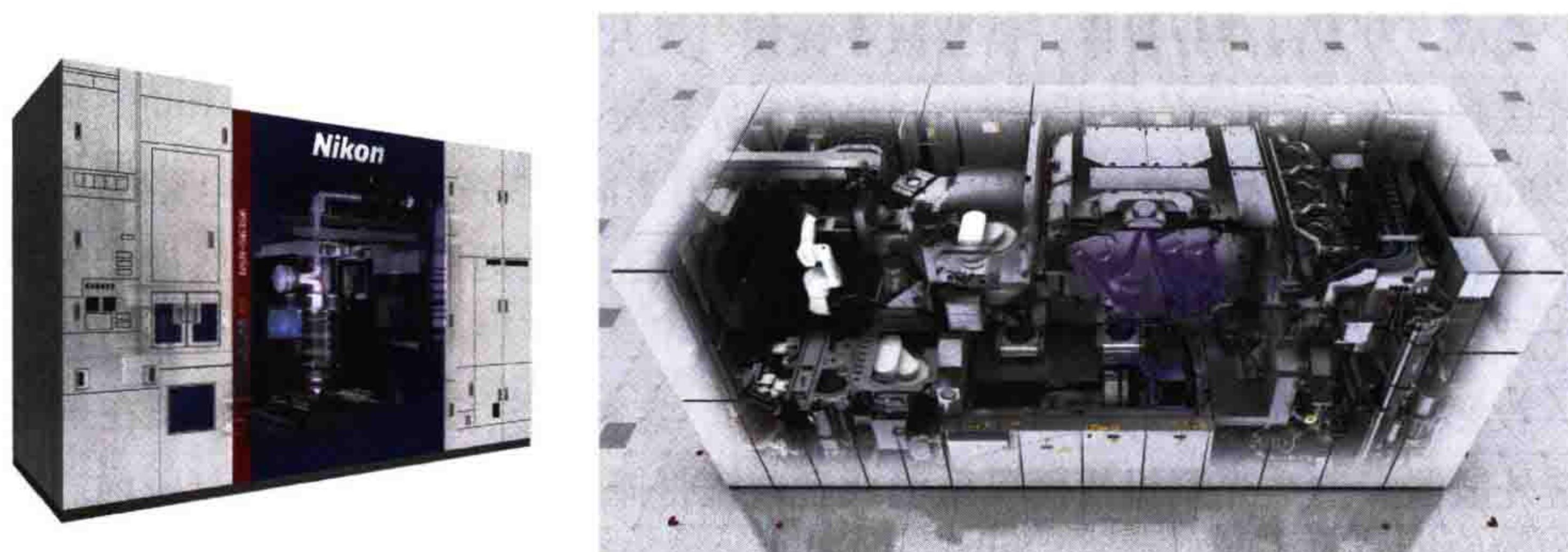


图 1.3 高性能缩小倍率光刻机。左图为尼康公司的 NSR-S635E 浸没式光刻机，数值孔径为 1.35，曝光波长为  $193\text{nm}$ （尼康公司的 Donis Flagello 提供图片）；右图为 ASML 公司的 NXE-3400B EUV 光刻机，曝光波长为  $13.5\text{nm}$ （ASML 提供图片）

扫描投影光刻机，波长为 13.5nm，NA 为 0.33。本书后续章节将讨论这些光刻机的分辨率。

## 1.3 步进扫描投影光刻机的空间像

步进扫描投影光刻机广泛应用于半导体制造领域，它将模板（掩模）高质量地投影成像到半导体硅片上的光敏材料（光刻胶）内。扫描是指曝光过程中掩模和硅片需要进行连续扫描运动。曝光过程中，步进重复投影光刻机的掩模和硅片保持位置固定，需要按照一定顺序连续曝光拼接出大像场。与之相比，扫描曝光提高了产率和产能。8.4 节将简要讨论扫描运动对成像、有关效应和建模方法的影响。

光刻掩模或光掩模包含需要转印的目标图形信息。这些信息被编码到透明石英基底（掩模白板）顶部的吸收层图形中。吸收层的透过率或相位随空间变化。掩模保护膜是一层与吸收层间距为 6mm 的薄膜，起到保护吸收层的作用。

图 1.4 为 ASML 公司的高数值孔径浸没式步进扫描投影光刻机。该光刻机的工作波长为 193nm。准分子激光器放置在光刻机的外面，图中未显示。位于右上方的照明系统将准分子激光器输出的激光转换为掩模面强度均匀的照明光场。投影物镜将掩模成像到硅片上。右图为该系统的简化图。光源发出的光转化为平面波照明掩模。光穿过掩模发生衍射。投影物镜收集一部分衍射光，会聚到光刻胶附近的像面，在光刻胶的内部和顶部产生掩模的像。光刻胶内部和顶部某个平面上像强度的二维分布被称为空间像。光刻胶内部的三维强度分布被称为体像。下面讨论空间像的几个重要性质。体像用于连接光学像到光刻胶形貌的形成过程。

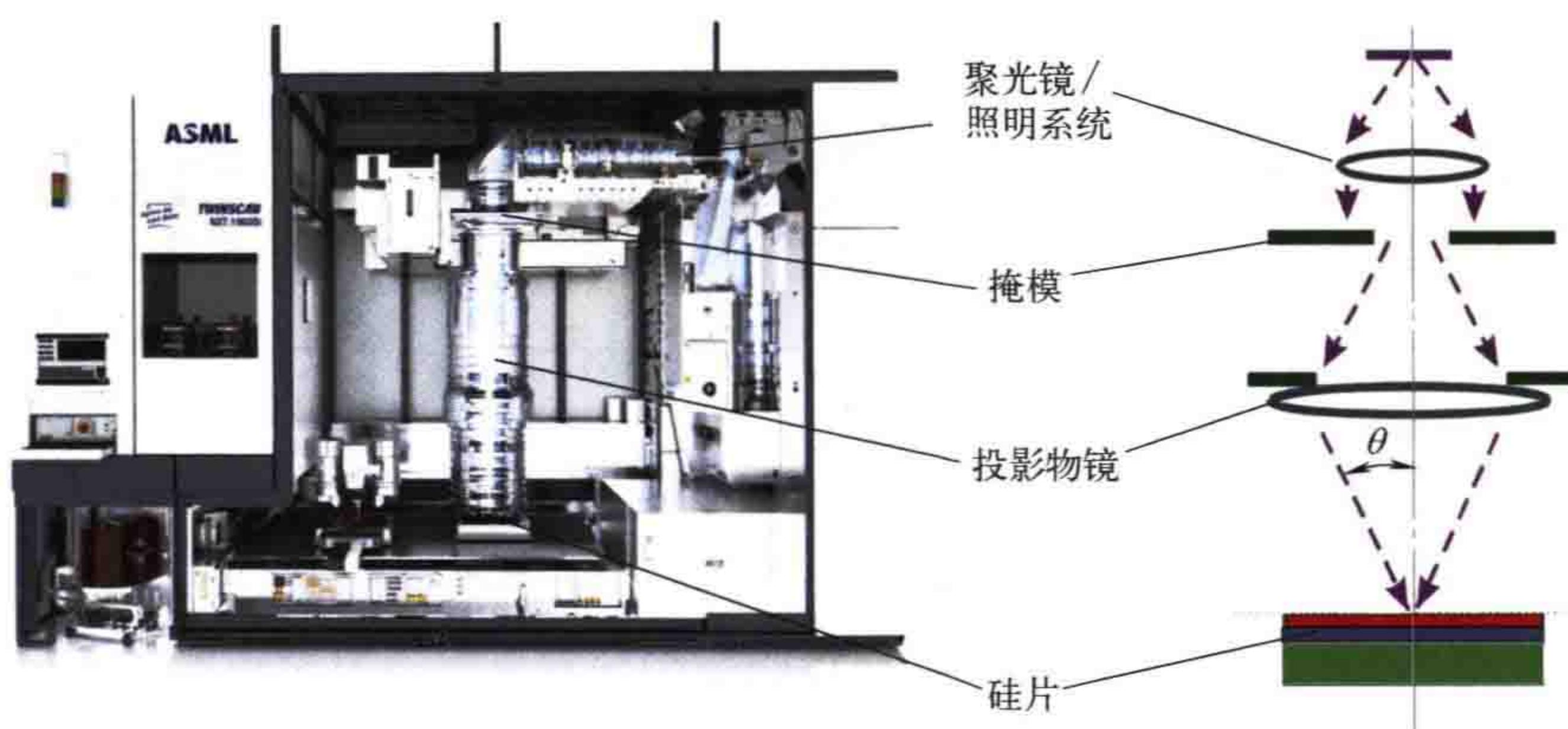


图 1.4 DUV 投影光刻机。左图：ASML 公司的高性能浸没式光刻机 TWINSCAN:1980Di 详细结构图（由 ASML 公司提供），曝光波长为 193nm；右图：原理图

空间像的质量取决于步进扫描投影光刻机的光学参数。照明系统最重要的参数是工作波长、空间相干性（见 2.2.2 节）和光的偏振态。投影物镜的主要参数是缩小倍率（典型值为  $4\times$ ）与数值孔径 NA。NA 取决于光线的像面孔径角  $\theta$ ，以及投影物镜最后一个透镜元件与光刻胶之间材料的折射率，即所谓的浸没折射率  $n_{\text{imm}}$ ：

$$\text{NA} = n_{\text{imm}} \sin \theta \quad (1.1)$$

空间像随离焦的变化而变化。离焦是指投影物镜理想像面与实际观测面之间的距离。

图 1.5 为不同数值孔径的投影系统对同一掩模版图的成像结果。掩模版图中字母 “I” 的宽度为 90nm。用低数值孔径 ( $\text{NA}=0.3$ ) 系统对该掩模进行成像，会在字母区域产生一个光强几乎均匀的光斑，从这幅模糊的空间图像中无法识别出任何细节。当 NA 为 0.5 时，空间像的第一个细节变得可见，可以识别出单个字母，但很难判断最后一个符号是 “B” 还是 “8”。当 NA 进一步增大，更多原始掩模版图的细节出现在空间像中。这些现象可定性地解释为：数值孔径较高的投影物镜收集了大量掩模衍射光。多收集的光在像面产生清晰度和对比度更高的光强分布。在 2.2.1 节中，我们将通过衍射级次来量化这些多出来的光。投影物镜的数值孔径收集的衍射级次越多，空间像就越加清晰。

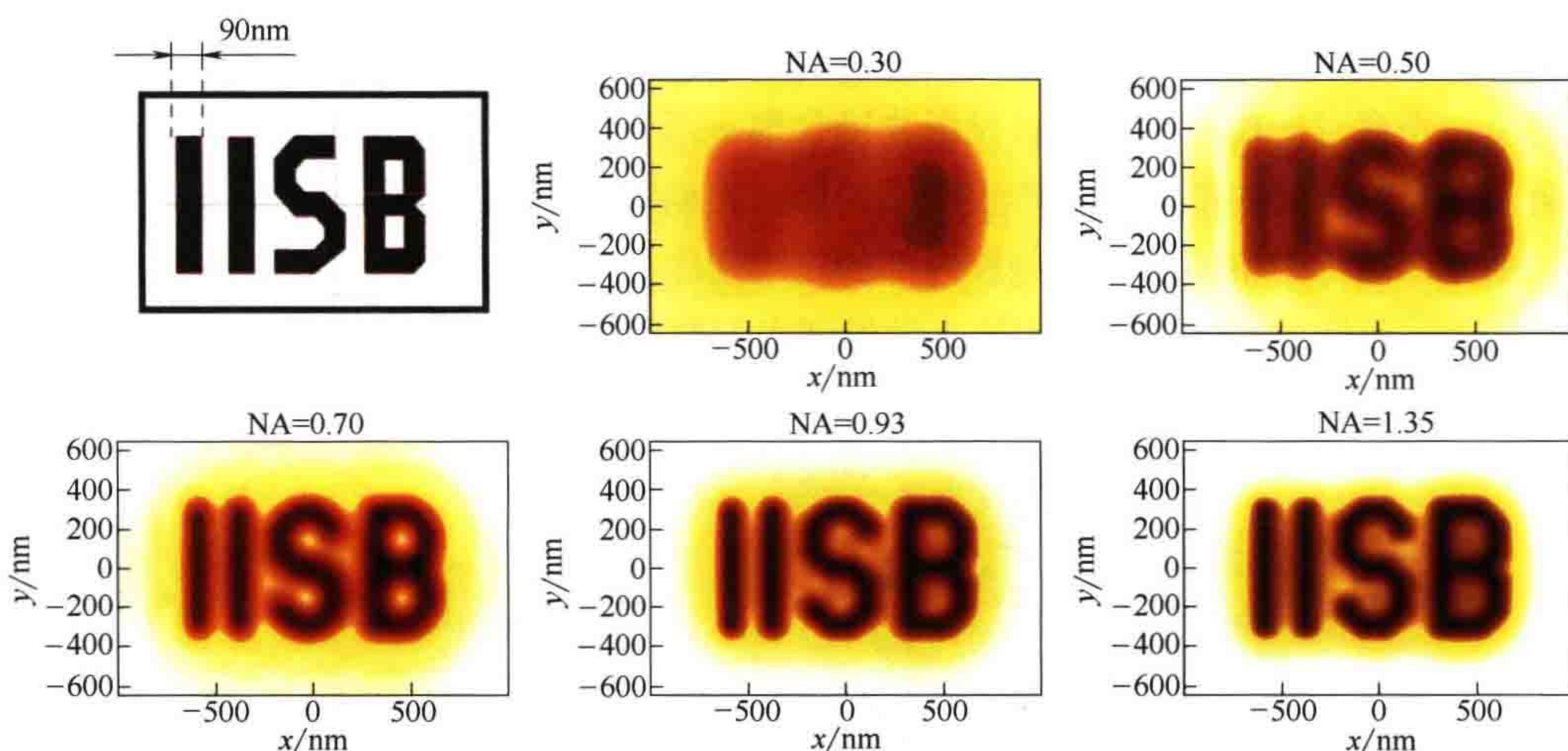


图 1.5 不同数值孔径下掩模版图（左上）的像。IISB 代表“系统集成与元件研究所”，是德国弗劳恩霍夫协会下属研究所德文名的缩写。该研究所研发了光刻仿真软件 Dr.LiTHO，本书的大部分仿真都采用了 Dr.LiTHO。字母 “I” 的宽度为 90nm，曝光波长为 193nm

目前已经发展了几种方法来量化评估光刻图形转移过程中空间像的质量<sup>[8]</sup>。将在本节的其余部分和 1.5 节中介绍这些方法。

阈值法是预测光刻胶工艺（见下一节）完成后硅片上印出图形之形状的最简单

方法。图 1.6 左图的轮廓为对图 1.5 中  $NA=0.7$  时的空间像应用这种阈值操作后的结果。黑色和白色区域分别表示强度低于和高于阈值 0.35，对应于有或没有光刻胶的区域。

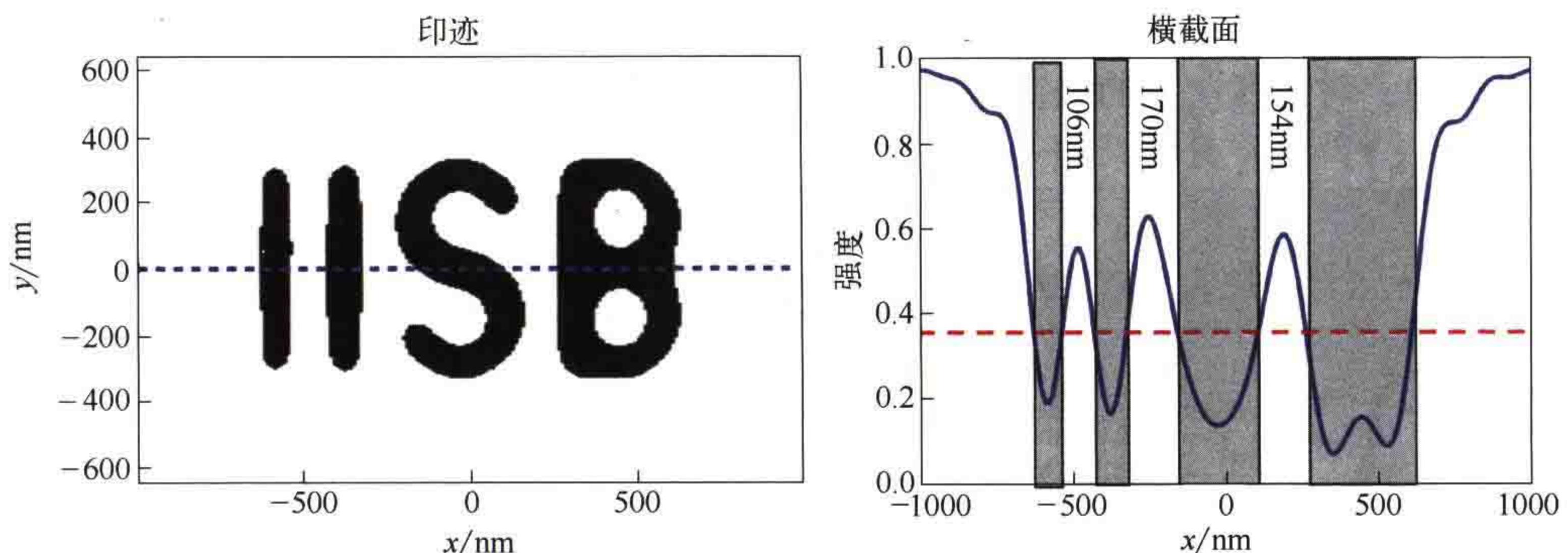


图 1.6 对图 1.5 所示的空间像应用简单的阈值模型，数值孔径为 0.7。左图：阈值为 0.35 时图形的轮廓。右图： $y=0$  时的空间像横截面图，阈值为 0.35，图顶部的数字为利用阈值截取透光图形得到的特征尺寸或者关键尺寸（CD）

通过改变阈值可以仿真曝光过度或者曝光不足的情况。可直接假设曝光剂量  $D$  与阈值（THR）之间成反比关系： $D \approx 1/THR$ 。考虑剂量测量引入的偏差，David Fuard 等人<sup>[9]</sup> 提出了如下关系式：

$$THR = \frac{a}{D+b} \quad (1.2)$$

式中， $a$  和  $b$  是取决于光刻胶和工艺条件的两个典型工艺参数。这种简单的阈值模型对研究掩模和成像系统参数对光刻性能的影响很有用。在 3.3 节中讨论了扩展后的阈值模型，这些模型对光刻工艺仿真预测的能力更强。

横截面图为像面上沿某条直线的强度分布图。图 1.6 的右图显示了  $y=0$  处的空间像横截面图和阈值操作示意图。如横截面图的上半部分所示，阈值处理后得到的轮廓可以用来提取图形的大小或关键尺寸（CD）。阈值的变化会导致提取的 CD 值发生变化。可产生与目标 CD 值相同 CD 值的特定阈值称为目标尺寸阈值（threshold-to-size, THRS）。

为了介绍下一个成像质量参数，我们考虑由无限长线（line）和空（space）组成的周期性阵列（即所谓的线空图形）的成像。这些线空图形的特征参数包括周期、尺寸大小或占空比。密集线空图形的占空比为 1 : 1，孤立图形的占空比约为 7 : 1 或更大，半密集图形的占空比介于两者之间。

图 1.7 中左侧所示的成像对比度  $c_{img}$  可以有效地评价密集线空图形的成像质量。它的定义为：

$$c_{\text{img}} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (1.3)$$

式中,  $I_{\min}$  和  $I_{\max}$  分别为像的最小和最大强度。这种对比度的定义方式也可以应用到光刻胶内化学物质的浓度(化学对比度)等其他评价量。如果没有特别指明, 在本书中的“对比度”指的是空间像对比度。

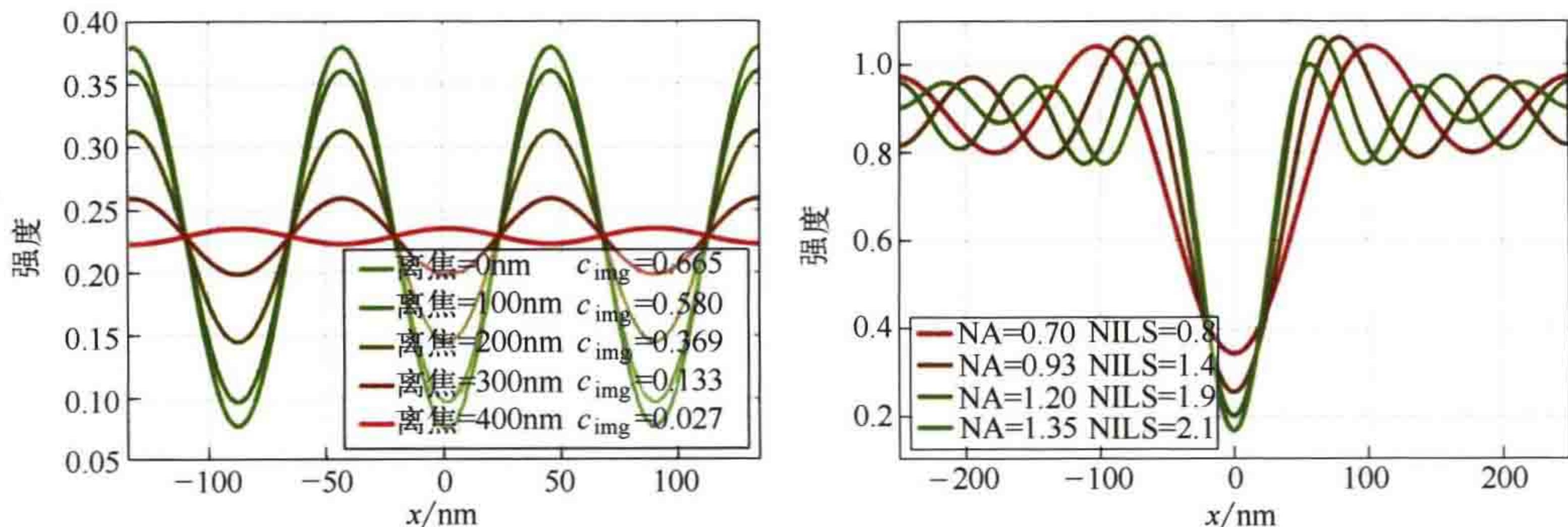


图 1.7 空间像横截面图以及典型的评价参数。左图: 宽度为 45nm、周期为 90nm 的线图形的空间像, 以及不同焦面位置的对比度, 数值孔径为 1.2。右图: 45nm 孤立线以及理想焦面处不同数值孔径下的归一化像对数斜率 (NILS)

归一化像对数斜率 (NILS) 表示局部对比度, 也为半密集和孤立图形成像提供了更有用的信息。它与周期无关, 可有效表征目标图形理想像边缘附近光强分布的陡峭程度。NILS 值越大, 意味着图形尺寸对光强波动的敏感度越低。NILS 可从空间像中计算得到:

$$\text{NILS} = w \frac{d[\ln I(x)]}{dx} \quad (1.4)$$

式中,  $I(x)$  表示横截面处的光强;  $x$  表示横截面的空间坐标; 采用目标图形的宽度  $w$  对空间像强度对数的空间坐标的导数进行归一化。光刻胶章节的 3.1.4 节将介绍一种唯象光刻胶模型。该模型解释了 NILS 在光刻工艺中的重要性。模型中用相关光刻胶参数对 NILS 的定义式进行了完善。

## 1.4 光刻胶工艺

图 1.8 为一个典型的光刻工艺流程图。硅片上面是  $\text{SiO}_2$  层。光刻工艺被用来制作光刻胶线条。首先采用化学或者机械方法去除硅片表面的污染物。在清洗和表面预处理步骤的最后, 利用增黏剂, 例如六甲基二硅氮烷 (HMDS) 进行成底膜处

理，增强光刻胶的黏附性。之后采用旋转涂胶的方法将液相光刻胶旋涂到硅片表面。光刻胶厚度的典型值为  $50\text{nm} \sim 1\mu\text{m}$ 。通过调整转速和光刻胶黏度可对光刻胶厚度进行调整。前烘是第一个烘焙步骤，作用是去除光刻胶中的溶剂，提高硅片和光刻胶之间的黏附性。

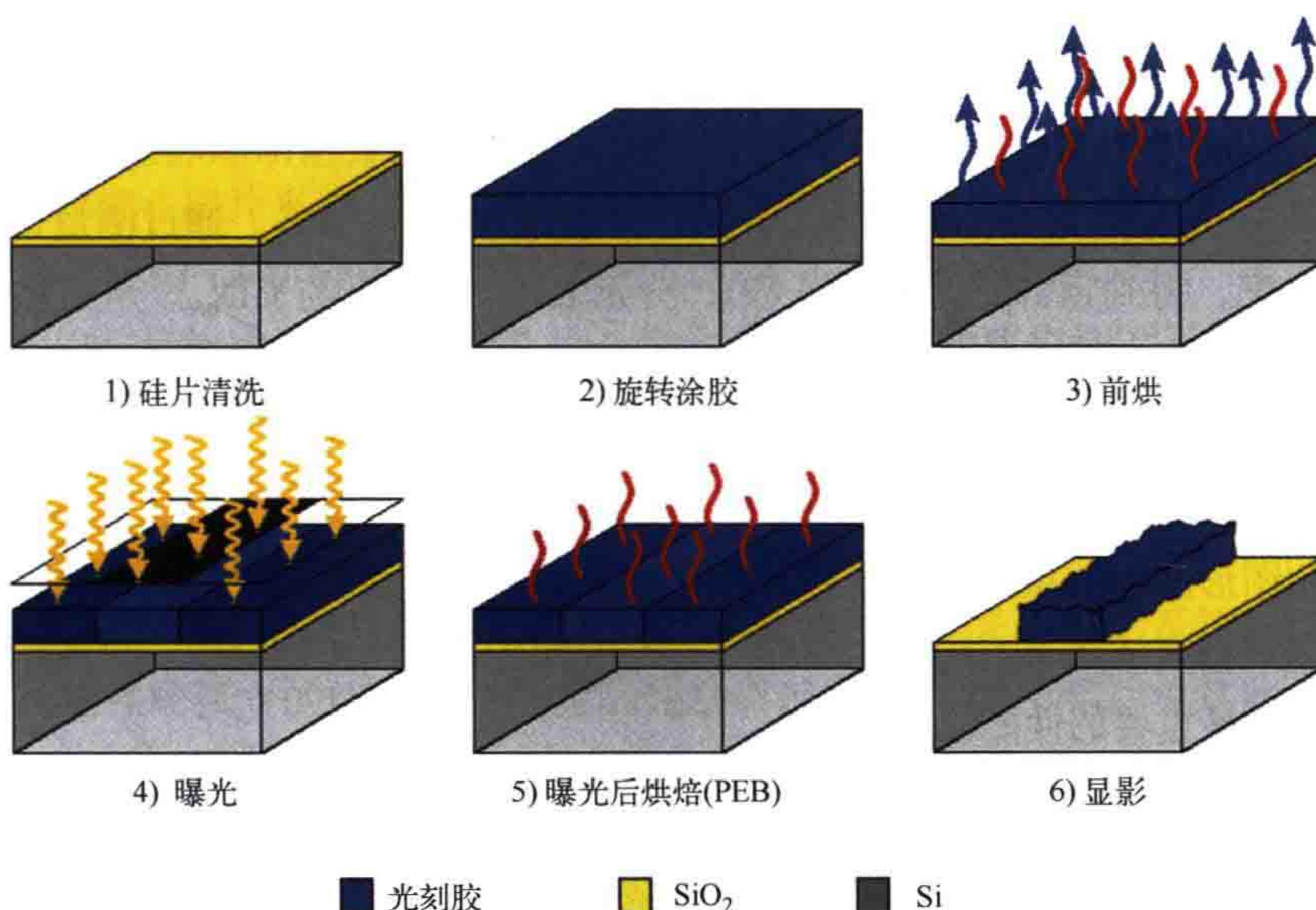


图 1.8 在硅片表面制作光刻胶线的光刻工艺流程。从左上至右下：硅片清洗，旋转涂胶，前烘，曝光，曝光后烘焙（PEB），显影。转载自参考文献 [10]，版权（2015）Elsevier

曝光是把投影光刻机产生的像转移到光刻胶内的步骤。根据掩模版图的透光区分布，光刻胶的某些区域被曝光。曝光区域的光刻胶性质发生变化。3.1.1 节讨论了典型的曝光机制。一般情况下，曝光后的光刻胶需要再经过一次烘焙，即曝光后烘焙（PEB）。PEB 需要具备的功能和实施的必要性取决于光刻胶的类型和其他工艺要求。一些光刻胶需要 PEB 来触发某些重要的化学反应。此外，PEB 可以完全去除溶剂，并加速光刻胶内物质的扩散，平滑光刻胶轮廓。

最后，将曝光和局部化学改性的光刻胶浸入显影液中进行显影。显影结果取决于光刻胶的极性。正胶被曝光和化学改性的部分在显影过程中被移除。负胶则相反，未被曝光的区域被显影液移除。对光刻胶下的材料层进行后续刻蚀和掺杂等处理时，显影得到的光刻胶图形起到掩模的作用。

用于表征光刻胶图形的技术包括扫描电子显微镜（SEM）等技术。SEM 可拍摄俯视图（在线）和横截面图。硅片的横截面 SEM 图可提供更多的光刻胶图形形状信息。但拍摄横截面图需要进行切片，会破坏硅片，使得硅片无法用于进一步的加工处理。除了上述 SEM 之外，现在还存在双束聚焦离子束（FIB）扫

描电镜<sup>[11]</sup>和倾斜扫描电镜<sup>[12]</sup>等无损扫描电子显微镜技术。虽然这些技术的产率有限，但它们可以为工艺开发提供非常有价值的信息。与可能导致光刻胶收缩<sup>[13]</sup>的电子计量技术不同，光学散射法<sup>[14, 15]</sup>是一种无损的光刻胶轮廓间接测量方法。

图 1.9 为 45nm 线宽、120nm 周期的暗线条在不同离焦位置的光刻胶轮廓仿真截面图。光刻胶轮廓的宽度和形状都不同。图 1.9 中应用了一个带模型以反映仿真光刻胶轮廓的重要细节。定义了两个带，分别位于光刻胶顶部和底部（见图 1.9 中的灰色带）。这些带的典型宽度约为光刻胶厚度的 10% ~ 20%。通过测量这些带内的平均线宽，得到顶部 CD 和底部 CD，分别表示为  $CD_{top}$  与  $CD_{bot}$ 。从这些数据中提取出左侧、右侧以及平均侧壁倾角  $SW_{angle}$ 。一般来说，底部线宽对后续工艺步骤（如刻蚀或掺杂）最重要。因此，评估光刻工艺时常令  $CD=CD_{bot}$ 。

除了图形的大小或 CD 外，图形的放置或位置也很重要。图形位置不仅对保证单次光刻图形间距的正确性很重要，而且对保证不同光刻图形之间的正确定位也很重要。套刻精度描述了不同光刻步骤产生的图形之间的位置准确度。套刻精度是光刻机和工艺最重要的性能参数之一。

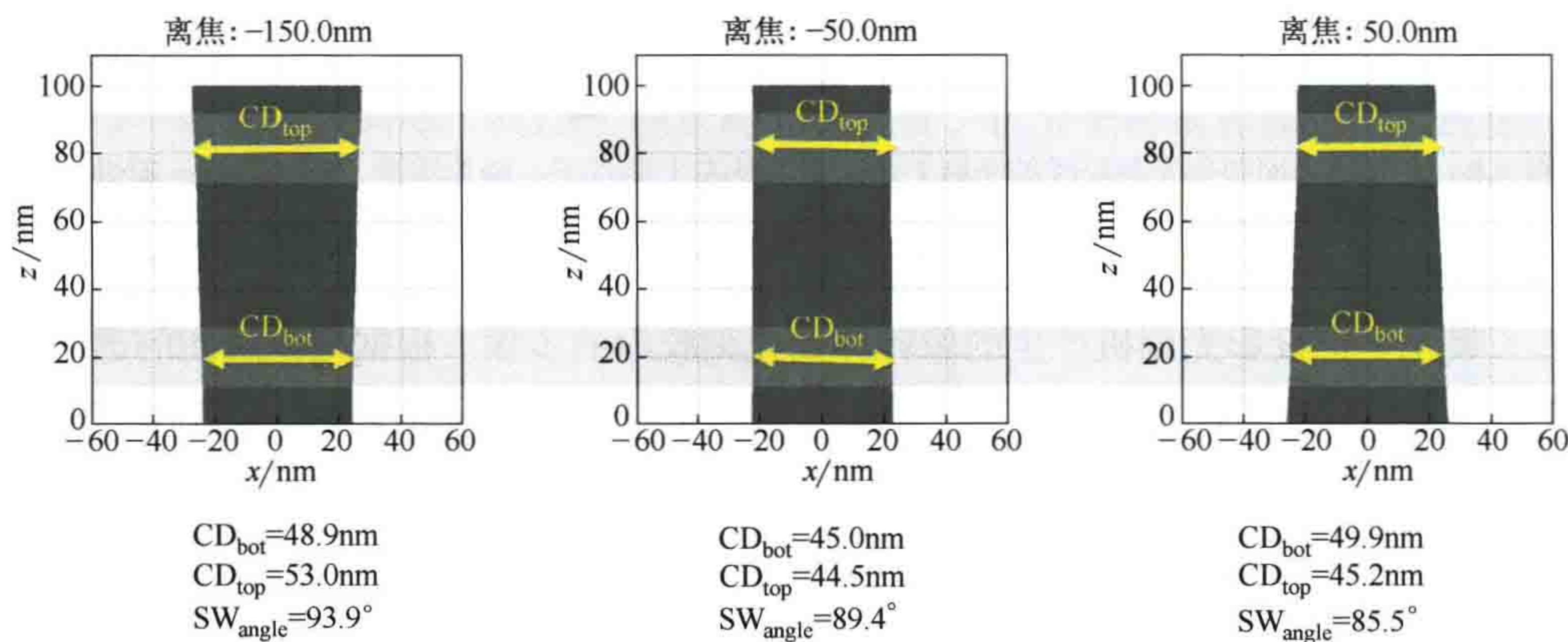


图 1.9 周期为 120nm、宽度为 45nm 暗线条的光刻胶形貌仿真结果。从左至右分别采用了三种不同的离焦设置。图中给出了顶部  $CD_{top}$  和底部  $CD_{bot}$  以及侧壁倾角  $SW_{angle}$

## 1.5 工艺特性参数

光刻工艺会受工艺条件和光刻机参数变化的影响。例如，曝光过程中焦面位置或离焦无法保持恒定。掩模和硅片相对于物平面和像平面的位置可能略有变化。掩模和硅片都不是完全平整的。成像系统光学像差和光刻胶厚度的变化也会造成焦面

变化。激光输出的微小波动、光学元件透过率的不均匀性、杂散光以及系统某些部位对光的微弱背向反射都会导致曝光剂量的变化。掩模质量受限于制造精度。

本章剩余部分将介绍光刻工艺的几个重要评价参数及它们对相关效应的灵敏度。这些评价参数中的大部分都可以用于表征从空间像或者光刻胶轮廓中获得的印迹。

**关键尺寸均匀性 (CDU)**: 所有光刻条件的变化都会导致目标尺寸和位置偏差。常利用关键尺寸均匀性和全局套刻精度量化光刻机和工艺对这些偏差的影响。掩模、光刻机、硅片平面度等都会影响这两个参数的值。

**工艺变化带 (PV band)**: 接下来我们研究光刻得到的图形轮廓，或者称为印迹，将它们与目标图形相比较。图 1.10 给出了不同阈值和离焦位置下仿真空间像的印迹。左图为掩模版图，在中图和右图中用虚线表示。中图和右图中的实线表示在不同阈值和离焦条件下提取的印迹。这类图被称为工艺变化带<sup>[16]</sup>。可以从仿真空间像或光刻胶形貌中提取工艺变化带。

图 1.10 所示的印迹与掩模版图之间存在偏差。由于光学投影系统的衍射受限特性，线端和较孤立的线条存在严重的光学邻近效应。4.2 节将讨论这些效应以及抵消它们对光刻图形影响的方法，使印迹与目标图形或者掩模版图偏差最小的离焦和阈值为最佳工艺条件。不同阈值和离焦导致的印迹变化表征了该工艺对这些参数的灵敏度。可以观察到，线端和孤立线对工艺条件的灵敏度高于处于密集环境中的线条（线条的周围存在其他线条）。

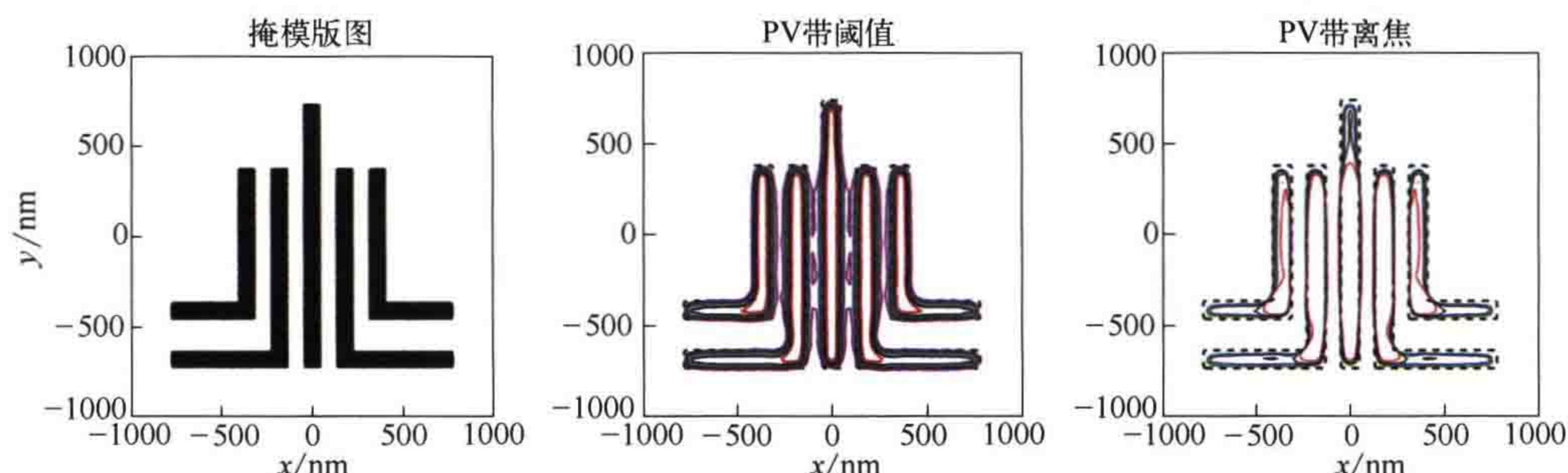


图 1.10 工艺变化带。曝光剂量 / 阈值与焦面的变化对印迹的影响仿真结果。掩模版图（左图）；最佳焦面处阈值 0.12、0.19、0.26、0.33、0.40 对应的印迹（中图）；阈值为 0.26 时离焦量为 0nm、50nm、70nm 以及 90nm 对应的印迹（右图）。线条宽度为 90nm（硅片面）。成像条件：波长 193nm，数值孔径为 1.2，CQuad 照明（照明的定义请见 4.1 节）

图 1.11 显示了使用工艺变化带研究掩模缺陷及其对光刻工艺影响的方法。图中的掩模缺陷可能是由掩模制造过程中出现的问题引起的。图 1.11 以孤立暗线条附近的一个暗缺陷为例。如左图所示，无缺陷时工艺变化带平行于线条。线宽随阈值或曝光剂量均匀变化。在阈值 0.45 处，印迹与掩模版图或目标线宽完全一致。20nm

的缺陷会导致印迹在缺陷区域发生轻微弯曲。缺陷较大时，这种弯曲变得更加明显。弯曲的大小取决于阈值。该例子表明，阈值较大或剂量较小时，该类缺陷的影响更大。

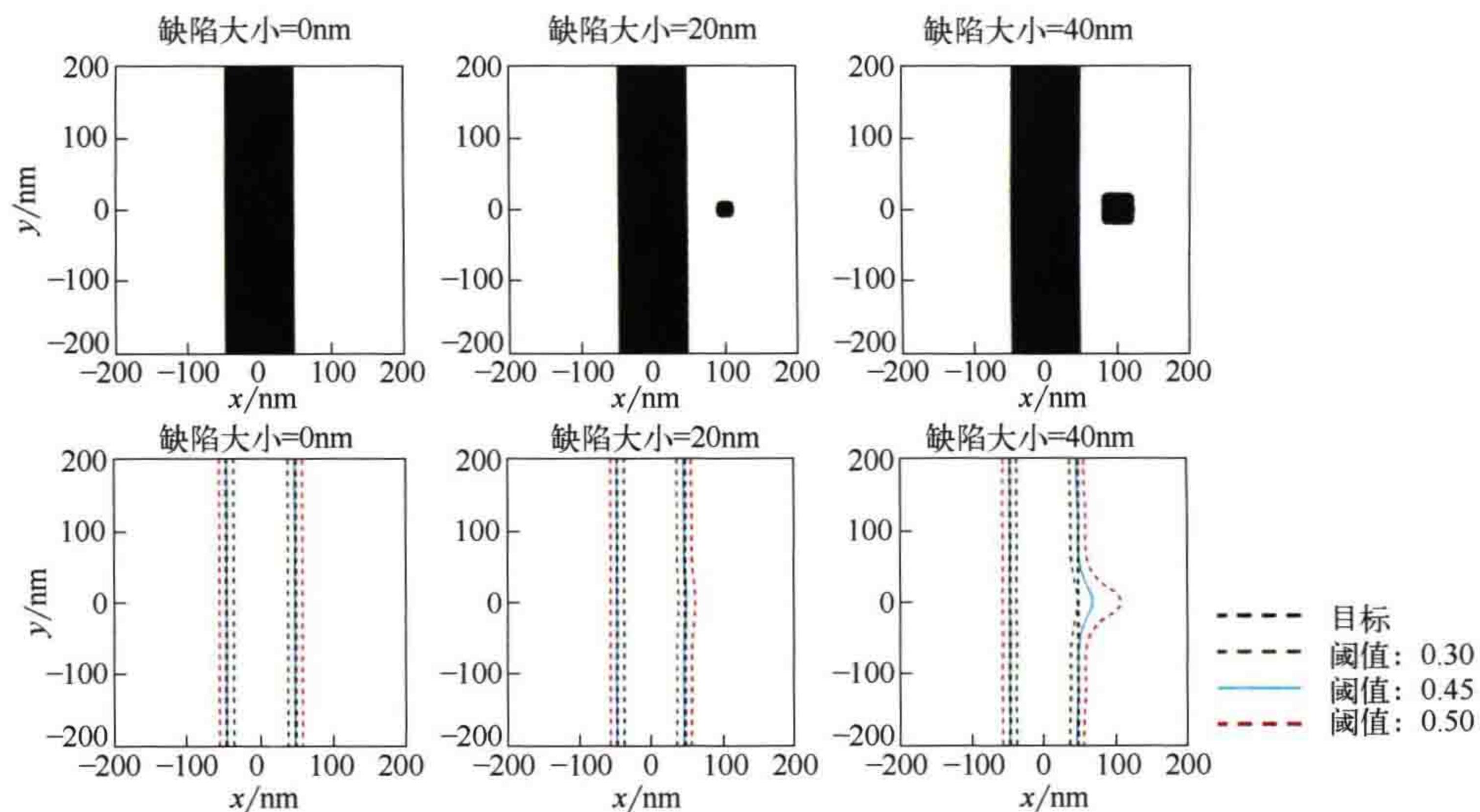


图 1.11 90nm 孤立不透光线条附近暗缺陷的工艺变化带。第一行：无缺陷掩模的透过率（左图），含不同大小缺陷掩模的透过率（中图和右图）；第二行：对应不同曝光剂量或者阈值的 PV 带。成像条件：波长 193nm，数值孔径 1.2，CQuad 照明

**边缘放置误差 (EPE)**：常利用给定焦面和剂量 / 阈值条件下的印迹的形状确定 EPE。Nick Cobb 引入了 EPE 的概念，指的是线条或其他图形的边缘相对于电路设计者所设目标位置的差异<sup>[17]</sup>。在所考察长度 (LOI) 范围内的平均 EPE (表示为  $EPE_{LOI}$ ) 定义为目标向右  $A_r$  和向左  $A_l$  的线条边缘偏移量之差除以长度 LOI<sup>[18]</sup>：

$$EPE_{LOI} = \frac{A_r - A_l}{LOI} \quad (1.5)$$

为了最小化 EPE，光刻后图形的尺寸和位置应该尽可能接近目标尺寸和位置。光学邻近效应修正 (OPC) 使用模型或规则对掩模版图进行修改，以最小化 EPE (见 4.2 节)。可以利用空间像以及仿真或实测光刻胶图形计算工艺变化带的形状与 EPE。

工艺变化带和 EPE 全面地评估了硅片面光刻图形的保真度。接下来我们将研究特定图形的光刻特性。为了简化讨论，我们将分析周期性线空图形中单个线条的光刻特性。这种线空图形的参数包括周期、线宽、空宽或占空比以及方向。我们一

般只需要取无限大周期性线空图形中的一个周期来研究其成像性能。类似分析也可以应用于其他类型的图形。用同样的方法分析接触孔阵列或线 / 空图形的端点等二维图形时，需要指定几个切线来提取图形的尺寸信息。

**光刻胶形貌随曝光剂量和焦面的变化：**图 1.12 显示了仿真的光刻胶形貌随曝光剂量和离焦等两个最重要工艺变量的变化。本书中，我们使用了符号惯例，即负离焦为（硅片和光刻胶）更靠近投影物镜方向的离焦。光刻胶形貌的宽度随曝光剂量的增加而减小。这是正胶的典型特点。在离焦范围的中心位置，所有曝光剂量下光刻胶形貌的侧壁几乎都垂直。

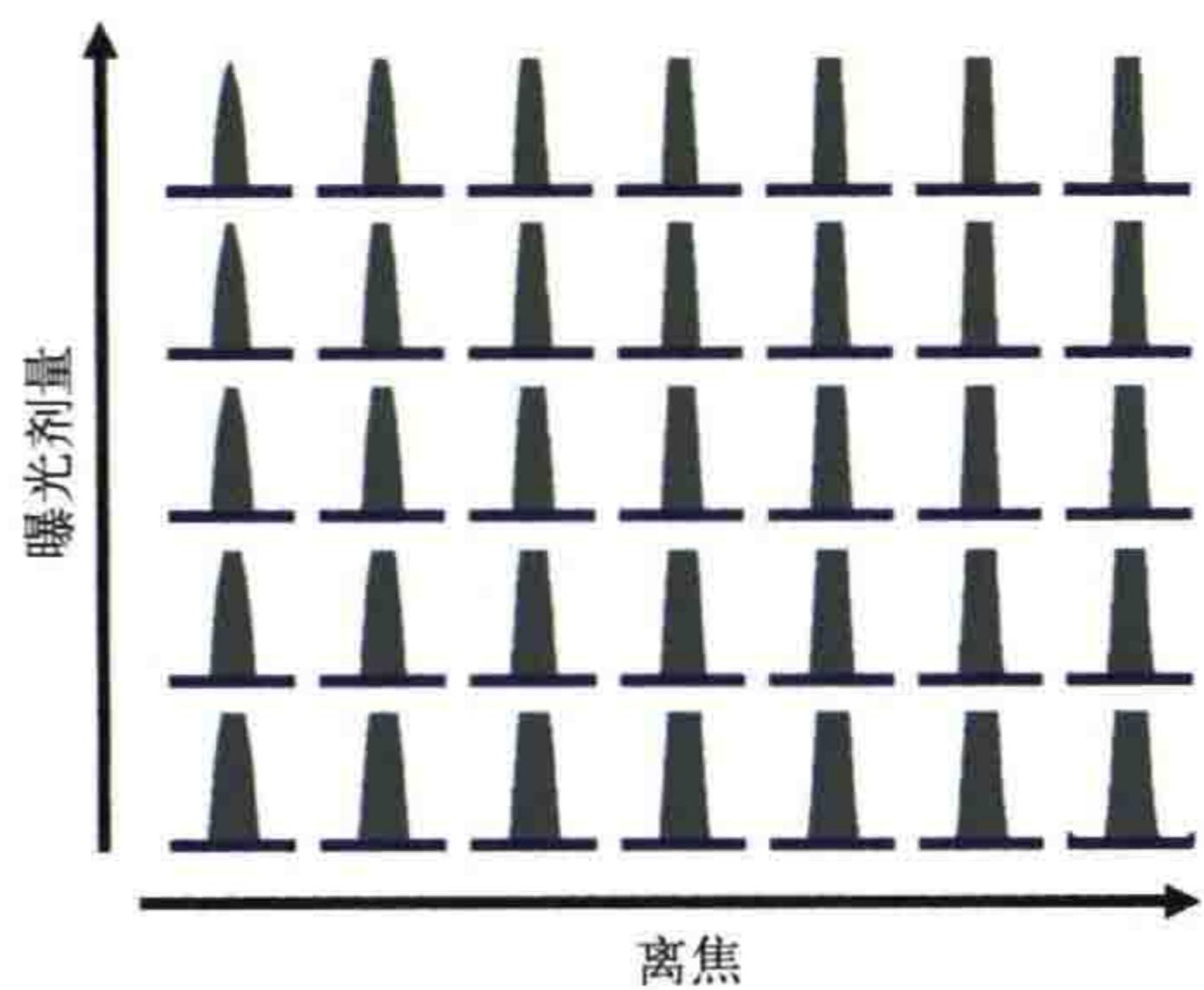


图 1.12 不同曝光剂量和离焦条件下的光刻胶形貌，线宽为 90nm，周期为 250nm，曝光剂量  $20 \sim 26\text{mJ/cm}^2$ ，离焦  $-120 \sim 0\text{nm}$ 。成像条件：波长为 193nm，数值孔径为 1.2，二极照明，光刻胶厚度为 150nm

然而，在左右两侧的离焦位置情况发生了变化。离焦量较小或负离焦时，光刻胶离投影物镜太近。只有光刻胶底部会成清晰的像。位于光刻胶顶部的像发生离焦，越靠近顶部成像越模糊。因此，理论上没有光的区域也会存在一些光，这些区域的光刻胶也会被移除，特别是曝光剂量较大时。正离焦时可以观察到相反的现象。曝光剂量较大时，离焦使得光刻胶底部像变得模糊，导致显影后光刻胶底部发生内缩，图形可能会坍塌。

**Bossung 曲线：**接下来，我们从仿真的光刻胶形貌中提取底部 CD 数据，并绘制出它们相对于离焦的关系曲线，如图 1.13 所示。图中不同的曲线代表了特定曝光剂量下 CD 与离焦量的关系。这种类型的曲线被称为 Bossung 曲线<sup>[19]</sup>。平坦的 Bossung 曲线表明该工艺对离焦的灵敏度较低。曝光剂量方向上各曲线之间的距离表示该工艺对曝光剂量的灵敏度。图 1.13 中阴影区域表示目标尺寸为 90nm，变化范围为  $\pm 10\%$ 。能够使 CD 在这个灰色区域内的所有曝光剂量和离焦量都是可以接受的，都满足工艺需求。

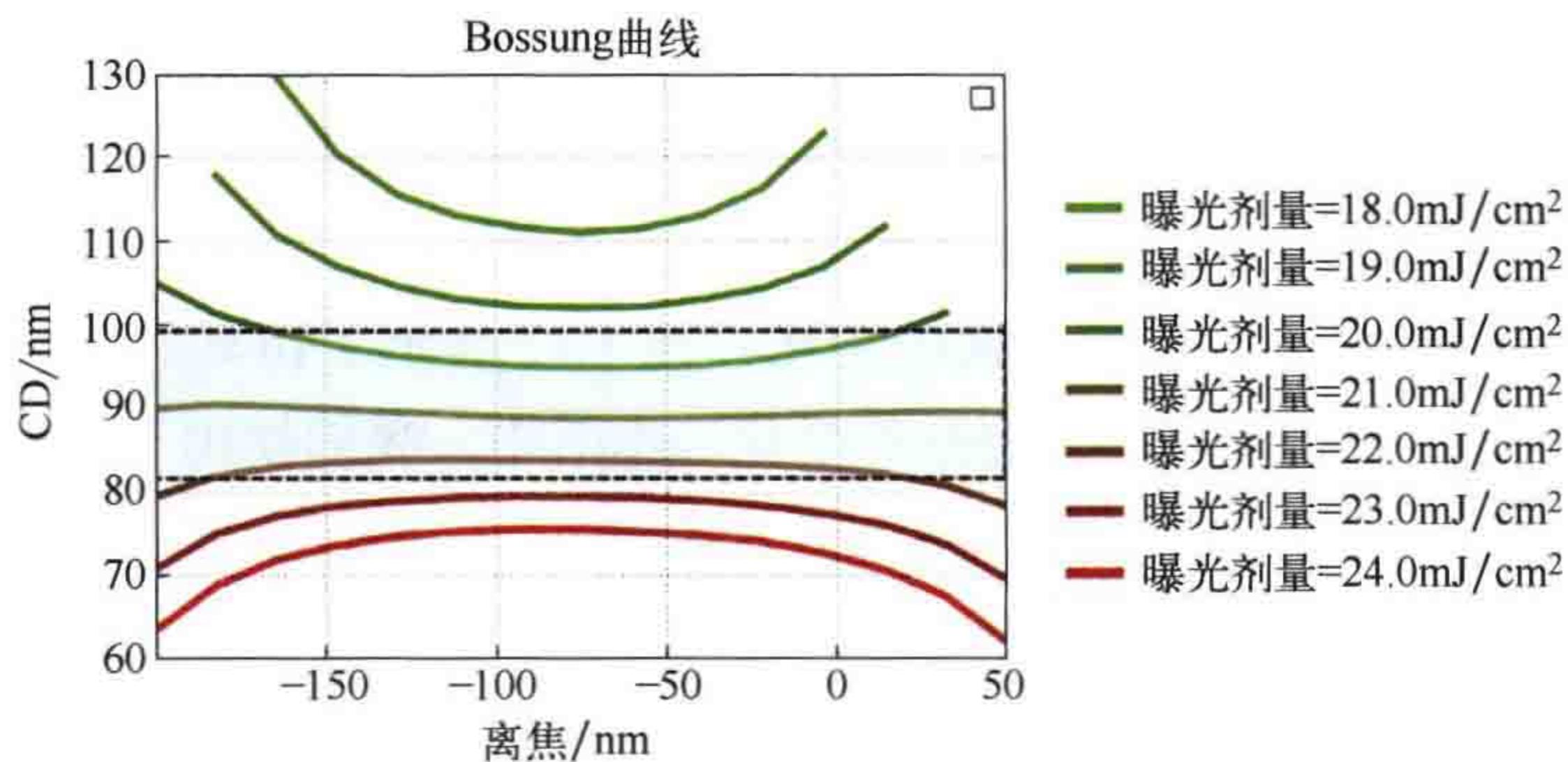


图 1.13 光刻胶底部 CD 随着曝光剂量和离焦量的变化图。仿真线图形的周期为 250nm，宽度为 90nm。成像条件：波长为 193nm，数值孔径为 1.2，二极照明，光刻胶厚度为 150nm

**工艺窗口：**CD 相对于曝光剂量和离焦量的变化关系也可以用另一种图示表示。图 1.14 左图的三条曲线分别代表产生 90% 的目标 CD (上曲线)、目标 CD (产生目标 CD 的曝光剂量，中间的曲线) 和 110% 的目标 CD (下曲线) 图形所需的曝光剂量数据。利用上下曲线之间的所有曝光剂量和离焦量组合均可获得关键尺寸精度优于  $\pm 10\%$ CD 的图形。如图中阴影区域所示，可以利用椭圆或者矩形对这一区域进行拟合，得到工艺窗口。工艺窗口的高度和宽度定义了该工艺的曝光剂量裕度和焦面裕度。焦面裕度决定了可用焦深 (DoF)，将在 2.3.1 节中进行讨论。曝光剂量裕度和焦深不是相互独立的。在许多应用中，常根据 5% 或 10% 的曝光剂量裕度确定可用焦深。有时也会绘制焦深相对于曝光剂量裕度的关系曲线，或者曝光剂量裕度相对于焦深的关系曲线。

实际的掩模版图包含多种线宽和周期。所有图形都需要在相同的曝光剂量和离焦条件下进行曝光。为了实现曝光，各个图形的工艺窗口必须重叠，如图 1.14 右图所示。与左图的阴影区域相比，两图形共同工艺窗口的面积明显缩小。

常利用可实现的工艺窗口大小对新光刻工艺和工艺技术进行评估。实际可用于芯片制造的工艺需要具备一定大小的工艺窗口。工艺窗口越大，表示工艺的鲁棒性更高。上面的例子中根据目标图形的大小或 CD 数据生成 Bossung 曲线和工艺窗口。一般来说，工艺窗口还可以包含边缘位置、图形位置、光刻胶侧壁倾角和线边粗糙度 (LER) 等其他考察项。

**工艺线性度：**如图 1.15 所示的线性度曲线描述了工艺实现尺寸微缩的能力大小。图中所示为密集线和孤立线底部 CD 与特征尺寸的关系。图中点线表示理想的线性工艺。特征尺寸  $\geq 150\text{nm}$  时，密集线和孤立线都非常接近理想的线性曲线。硅片上的图形与掩模图形完全一致。特征尺寸为  $90 \sim 150\text{ nm}$  时，曲线斜率与理想曲线斜率之间有微小差异。密集和孤立图形成像的 CD 略有不同，但是，这两条曲线

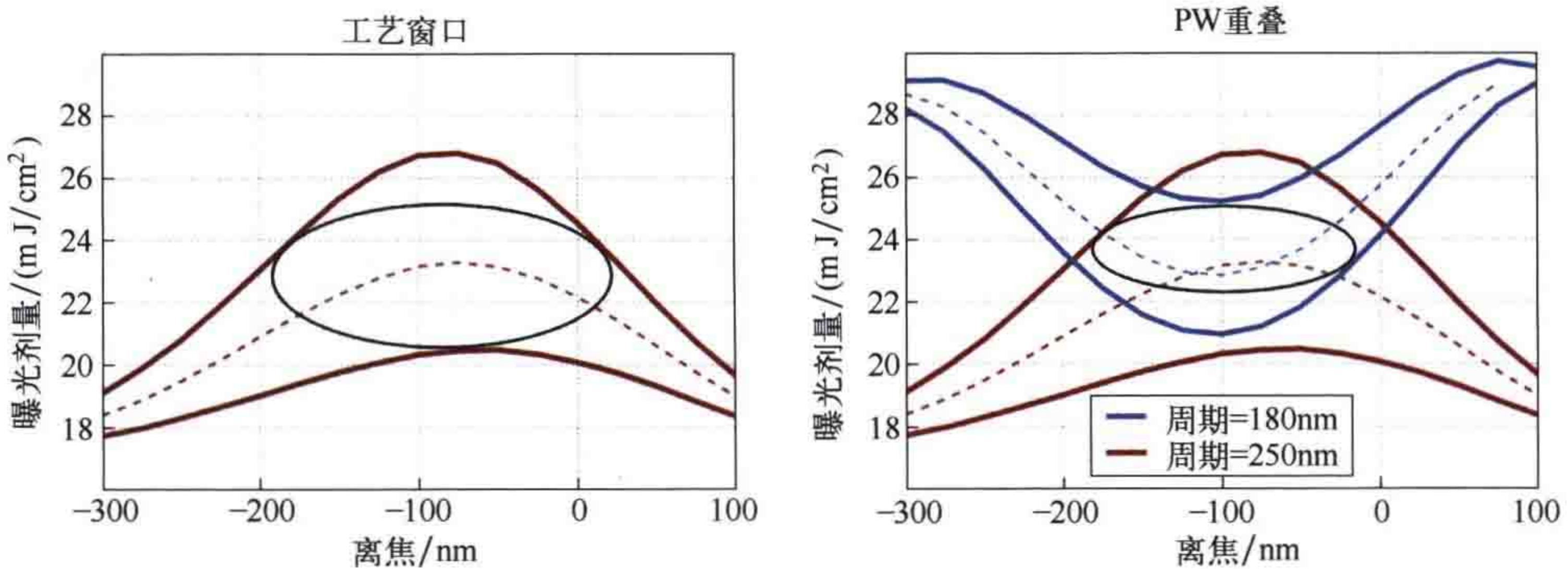


图 1.14 90nm 线图形的工艺窗口仿真结果。左图：周期 180nm 时的工艺窗口（PW）。右图：周期 250nm、线宽 180nm 线图形的共同工艺窗口。成像条件：波长为 193nm，数值孔径为 1.2，圆形照明，光刻胶厚度为 150nm

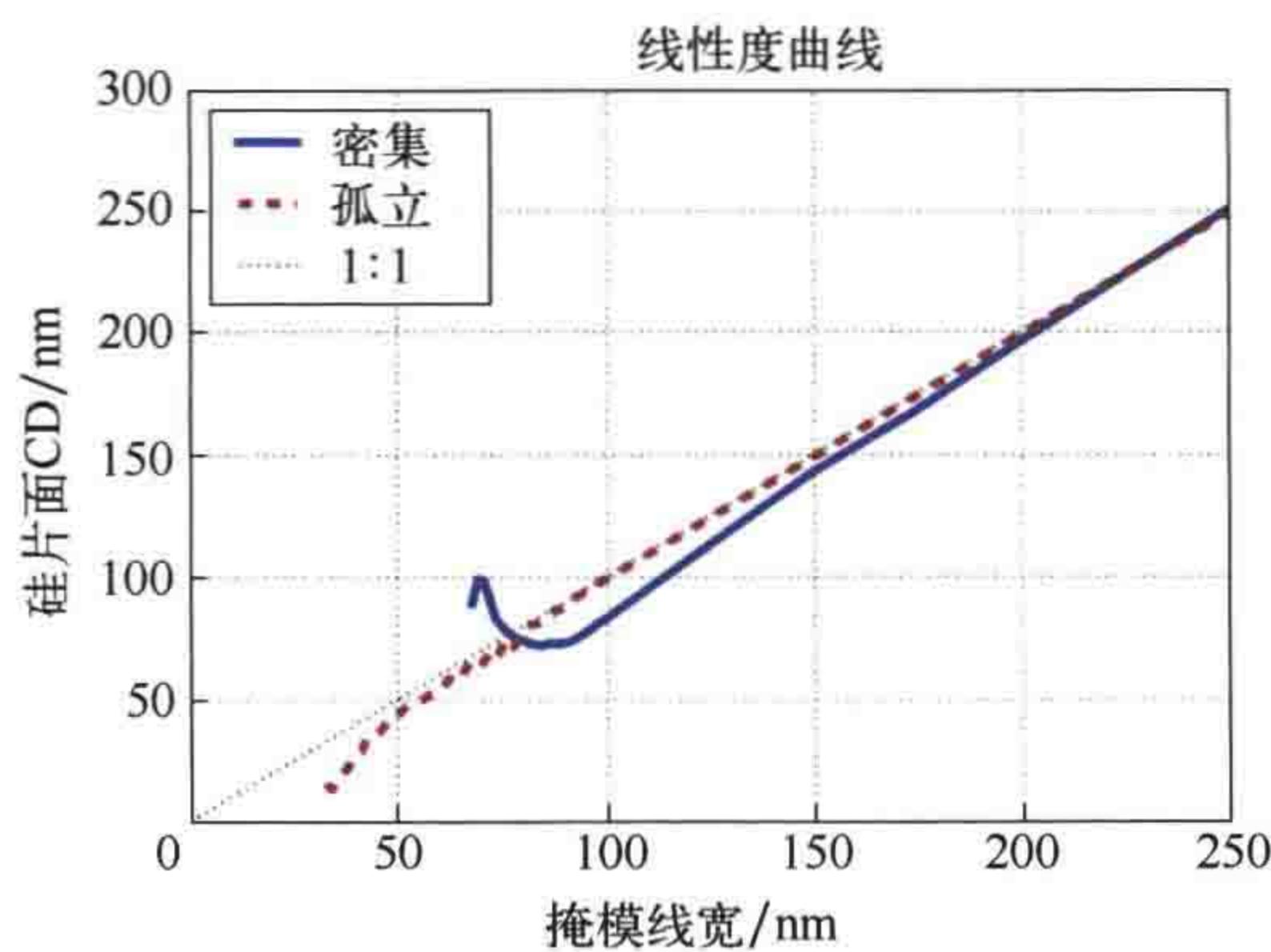


图 1.15 密集和孤立线图形的光刻胶底部 CD 随着线条尺寸的变化曲线。成像条件：波长为 193nm，数值孔径为 1.35，圆形照明，光刻胶厚度为 150nm

几乎都是线性的。当尺寸小于 90nm 时，曲线的非线性度越来越高。密集图形的最小 CD 约为 75nm。设计掩模时必须考虑从掩模到硅片特征尺寸转移的非线性（见 4.2 节）。

**光学邻近效应 (OPE) 曲线：**图 1.16 为 90nm 线条的光刻胶 CD 仿真值随周期的变化。以能够光刻 250nm 半密集图形的曝光剂量为标准来确定曝光剂量。由于邻近图形对成像的影响，CD 值与周期密切相关，这种现象即所谓的光学邻近效应。因此，这种曲线通常称为 OPE 曲线。在不同的掩模类型、照明模式和工艺条件下，OPE 曲线的形状会有所不同。

**掩模误差增强因子 (MEEF)：**非线性和邻近效应也会影响掩模的制造公差<sup>[20]</sup>。MEEF 表示工艺对掩模制造误差的灵敏度：

$$\text{MEEF} = M \frac{\Delta \text{CD}_{\text{wafer}}}{\Delta \text{CD}_{\text{mask}}} \quad (1.6)$$

式中,  $\Delta \text{CD}_{\text{wafer}}$  表示掩模尺寸变化量  $\Delta \text{CD}_{\text{mask}}$  引起的硅片面 CD 变化量;  $M$  为投影物镜的缩放倍率。关键尺寸接近分辨率极限时 MEEF 甚至可以超过 5。

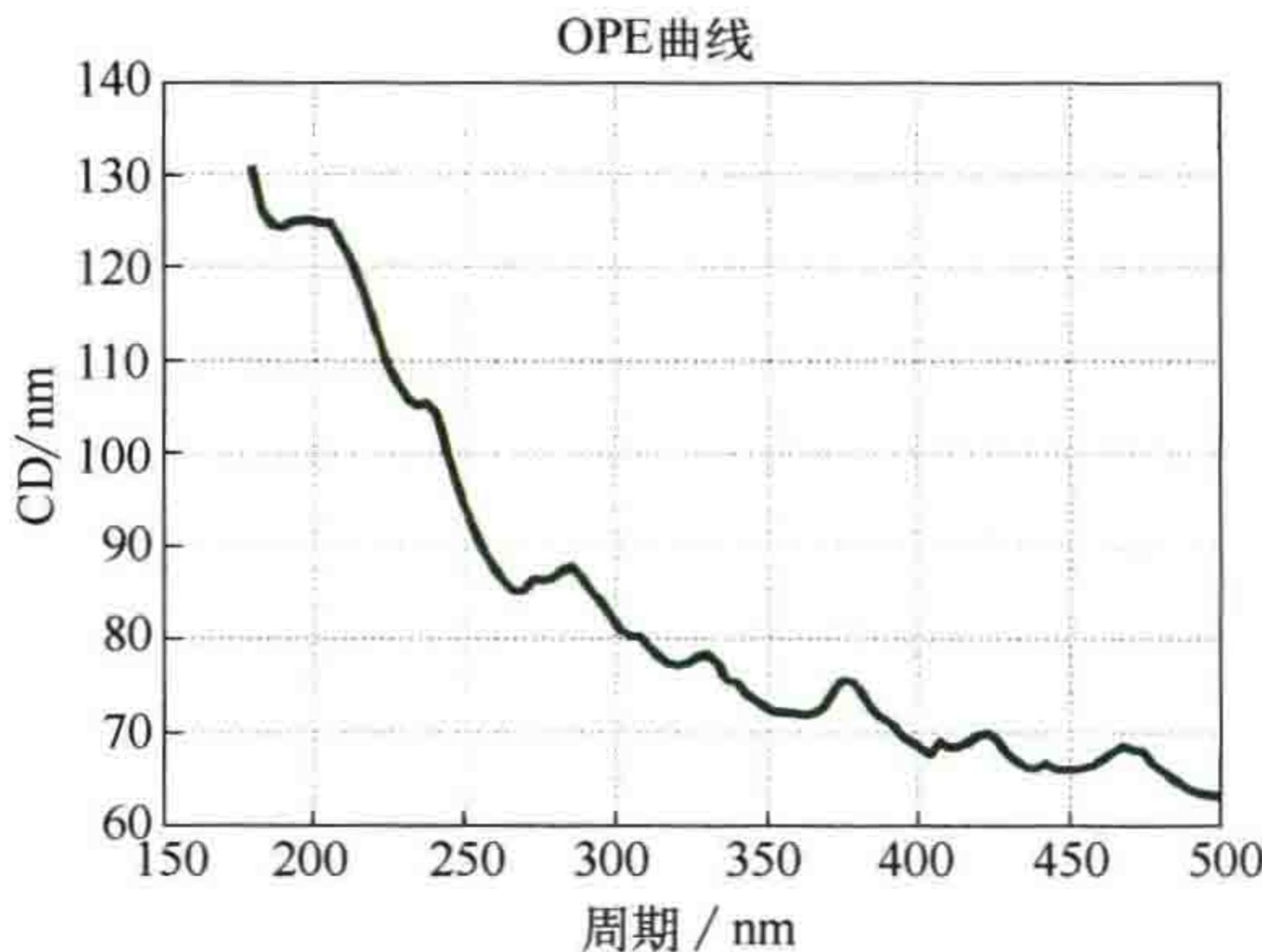


图 1.16 90nm 线图形的光刻胶底部 CD 随线条周期的变化曲线。成像条件: 波长为 193nm, 数值孔径为 1.35, 二极照明, 光刻胶厚度为 150nm

## 1.6 总结

光学投影光刻是半导体制造中的标准图形化方法。光学系统包括照明系统和投影物镜系统。投影物镜将掩模成像到硅片上的光刻胶内。投影光刻成像系统最重要的参数是照明系统的波长、投影物镜的数值孔径和离焦量。常用的空间像表征方法包括对比度、(归一化的) 像对数斜率 (NILS) 以及采用简单阈值模型得到的 CD。

典型的光刻工艺流程包括硅片清洗、旋转涂胶、曝光、烘培和光刻胶化学显影。用俯视 (在线) 或横截面扫描电子显微镜测量显影后的光刻胶轮廓。光刻胶形貌的线宽或者关键尺寸 (CD) 随曝光剂量、离焦和其他工艺参数的变化而变化。

表征光刻工艺性能随工艺参数典型波动的变化关系的标准方法包括 Bossung 曲线 (表征 CD 与曝光剂量和离焦的关系) 和工艺窗口 (能够实现给定精度图形转移的曝光剂量和焦面的组合)。关键尺寸均匀性 (CDU)、套刻精度、边缘放置误差 (EPE)、线性度、光学邻近效应曲线 (OPE 曲线) 和掩模误差增强因子 (MEEF) 也是重要的工艺性能参数。

## 参 考 文 献

- [1] G. E. Moore, “Cramming more components onto integrated circuits,” *Electronics Magazine* **38**, 4, 1965.
- [2] R. P. Feynman, “There’s plenty of room at the bottom,” *Caltech Engineering and Science* **23**, 22, 1960.
- [3] K. Ariga and H. S. Nalwa, Eds., *Bottom-up Nanofabrication*, American Scientific Publishers, Valencia, California, 2009.
- [4] A. Senefelder, *The Invention of Lithography* [Translated from the original German by J. W. Muller], Fuchs & Lang Manufacturing Co., New York, 1911.
- [5] J. W. Lathrop, “The Diamond Ordnance Fuze Laboratory’s photolithographic approach to microcircuits,” *IEEE Annals of the History of Computing* **35**(1), 48–55, 2013.
- [6] J. H. Bruning, “Optical lithography ... 40 years and holding,” *Proc. SPIE* **6520**, 652004, 2007.
- [7] F. Pease and S. Y. Chou, “Lithography and other patterning techniques for future electronics,” *Proc. IEEE* **96**, 248, 2008.
- [8] D. G. Flagello and D. G. Smith, “Calculation and uses of the lithographic aerial image,” *Adv. Opt. Technol.* **1**, 237–248, 2012.
- [9] D. Fuard, M. Besacier, and P. Schiavone, “Assessment of different simplified resist models,” *Proc. SPIE* **4691**, 1266–1277, 2002.
- [10] A. Erdmann, T. Fühner, P. Evanschitzky, V. Agudelo, C. Freund, P. Michalak, and D. Xu, “Optical and EUV projection lithography: A computational view,” *Microelectron. Eng.* **132**, 21–34, 2015.
- [11] J. S. Clarke, M. B. Schmidt, and N. G. Orji, “Photoresist cross-sectioning with negligible damage using a dual-beam FIB-SEM: A high throughput method for profile imaging,” *J. Vac. Sci. Technol. B* **25**(6), 2526–2530, 2007.
- [12] C. Valade, J. Hazart, S. Berard-Bergery, E. Sungauer, M. Besacier, and C. Gourgon, “Tilted beam scanning electron microscopy, 3-D metrology for microelectronics industry,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **18**(3), 1–13, 2019.
- [13] B. Bunday, A. Cordes, C. Hartig, J. Allgair, A. Vaid, E. Solecky, and N. Rana, “Time-dependent electron-beam-induced photoresist shrinkage effects,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **11**(2), 23007, 2012.
- [14] J. Bischoff, J. W. Baumgart, H. Truckenbrodt, and J. J. Bauer, “Photoresist metrology based on light scattering,” *Proc. SPIE* **2725**, 678, 1996.
- [15] A. Vaid, M. Sendelbach, D. Moore, T. A. Brunner, N. Felix, P. Rawat, C. Bozdog, H. K. H. Kim, and M. Sendler, “Simultaneous measurement of optical properties and geometry of resist using multiple scatterometry targets,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **9**(4), 41306, 2010.

- [16] J. A. Torres and C. N. Berglund, “Integrated circuit DFM framework for deep sub-wavelength processes,” *Proc. SPIE* **5756**, 39–50, 2005.
- [17] N. B. Cobb, *Fast Optical and Process Proximity Correction Algorithms for Integrated Circuit Manufacturing*. PhD thesis, University of California at Berkeley, 1998.
- [18] A. H. Gabor, A. C. Brendler, T. A. Brunner, X. Chen, J. A. Culp, and H. J. Levinson, “Edge placement error fundamentals and impact of EUV: Will traditional design-rule calculations work in the era of EUV?” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **17**(4), 41008, 2018.
- [19] J. W. Bossung, “Projection printing characterization,” *Proc. SPIE* **0100**, 80–85, 1977.
- [20] A. K. K. Wong, R. A. Ferguson, L. W. Liebmann, S. M. Mansfield, A. F. Molless, and M. O. Neisser, “Lithographic effects of mask critical dimension error,” *Proc. SPIE* **3334**, 106–116, 1998.

# 第 2 章

## 投影光刻成像理论

本章首先简要介绍现代深紫外 (DUV) 投影光刻机的特点及关键性能参数。结合 1.3 节中的投影光刻机光学系统示意图介绍光刻成像的理论背景。之后，推导描述光学投影光刻分辨率极限的瑞利准则，并讨论半导体光刻技术的发展趋势。第 8 章将详细讨论投影光刻机中的各种光学效应。

### 2.1 投影光刻机

投影光刻机是最先进的光学仪器之一。1.3 节已介绍了光学投影成像的基本原理。为了实现高分辨率，所有投影光刻机都配有高数值孔径 (NA) 投影物镜和灵活的照明系统 (聚光光学系统)，并配备支持高产率扫描曝光的掩模台与硅片台，以及用于控制曝光过程中掩模与硅片位置的原位计量技术。典型的技术参数包括工作波长 (例如常见的波长值 193nm)，大小在一定范围内的数值孔径 (例如  $0.85 \sim 1.35$ )，单次曝光分辨率 (例如  $\leq 38\text{nm}$ )，最大像场尺寸 (例如  $26\text{mm} \times 33\text{mm}$ )，单机套刻精度 (例如  $\leq 1.4\text{nm}$ )，以及产率 (例如  $\geq 275$  片 / h)。以上示例数据是 ASML TWINSCAN NXT:2000i 光刻机的技术参数。

如图 1.4 所示，聚光镜 (照明系统) 和投影物镜系统均由许多片透镜组成。需要使用特殊的光线追迹软件设计这些复杂的透镜系统<sup>[1]</sup>。设计参数包括大小在一定范围内的数值孔径、缩放倍率 (通常为  $4\times$ ) 和像场大小。其他约束条件还包括系统的总尺寸、总重量、环境条件 (如温度和气压)、激光光源带宽、玻璃的均匀性，以及制造和装配公差等。

虽然理论上可以采用光线追迹方法描述光刻系统的成像过程，但实际上这种方法是不现实的，主要有两个原因。物镜设计数据是镜头供应商的技术机密，投影光刻机用户无法获得。此外，利用光线追迹进行成像计算非常耗时。因此，常利用照明、掩模和投影物镜的传递函数表征光学系统。可以利用不同的方法获得这些传递函数。一般情况下，理想传递函数都可以满足使用要求。理想传递函数需要对光学

系统进行一些假设，例如基尔霍夫方法假设掩模无限薄或假设整个成像过程为理想衍射受限成像（见下一节）。也可以利用更加物理的建模方法得到传递函数，例如利用严格电磁场方法计算掩模衍射场，对整个系统进行光线追迹等。此外，也可以通过实验测量出传递函数，实验方法包括掩模散射光测量、干涉测量、测试对象的成像测量等。下一节中，我们利用传递函数描述光学投影光刻的成像过程。

## 2.2 成像理论

研究成像时首先对成像过程做几个假设，便于对其中最重要的成像效应展开讨论。2.2.1 节首先介绍单方向平面波照明条件下相干投影成像系统的傅里叶光学描述方法，详见参考文献 [2]。然后将该理论推广到部分相干成像系统。这种描述

成像的方法的理论基础是阿贝成像理论。在本节末尾，简要概述了其他备选成像仿真方法。

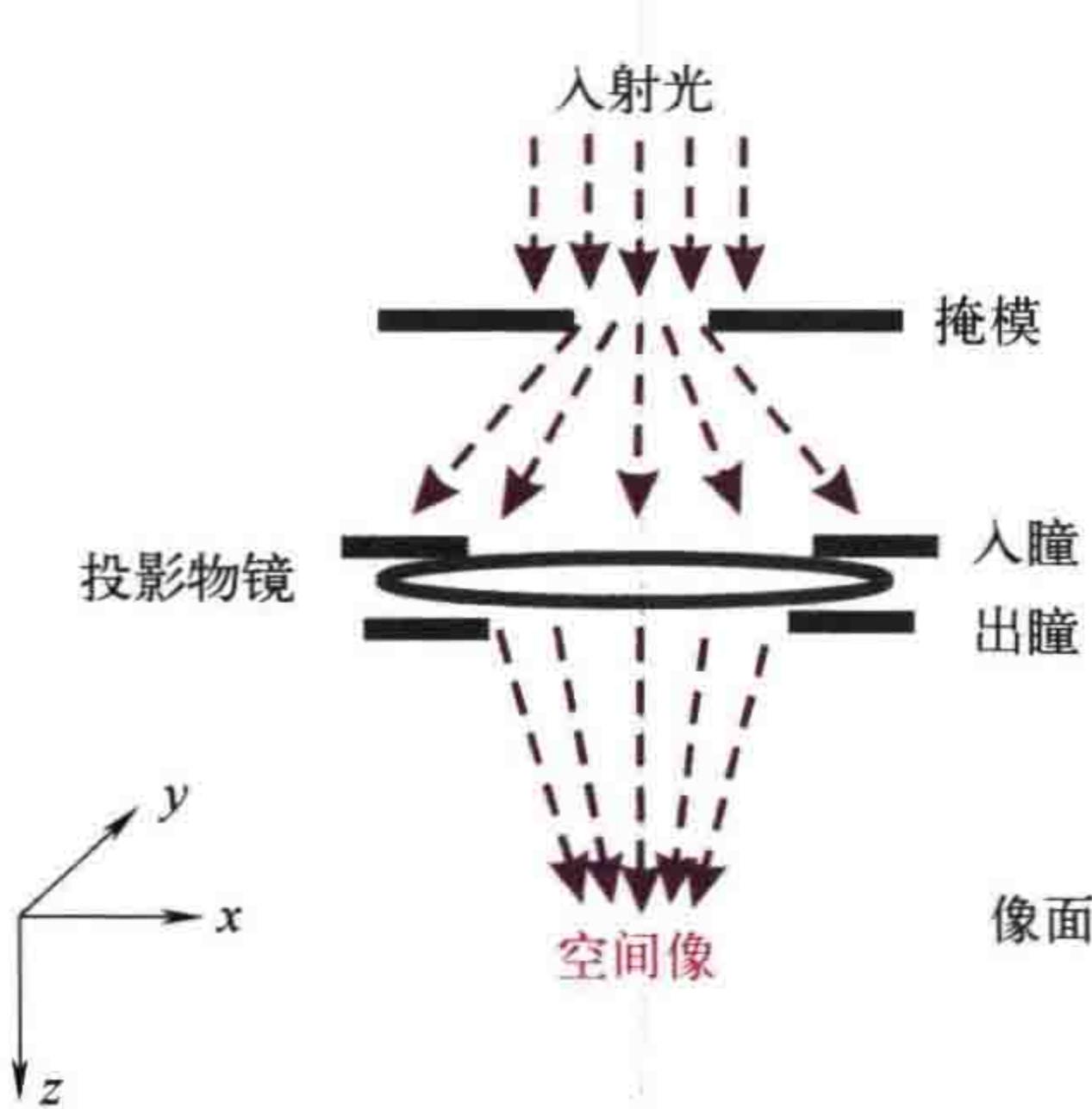


图 2.1 相干成像原理示意图

### 2.2.1 傅里叶光学描述方法

图 2.1 为相干光照明条件下的光学投影系统，系统光轴沿  $z$  方向。沿光轴传播的平面波照明掩模后发生衍射。部分衍射光进入投影物镜入瞳，投影物镜改变衍射光的方向，通过出瞳的光到达像面成像。下文假设掩模为无限薄层。这种掩模可以用横向坐标为  $x$  和  $y$

的透过率函数  $\tau(x, y)$  来表示。此外，假设系统中光的传播为近轴传播。光被认为是标量。第一种描述成像的方法没有考虑偏振效应，比较简单。

$x$ 、 $y$  表示物面坐标， $x'$ 、 $y'$  表示观测面坐标。观测面与物面之间的距离为  $z$ 。掩模位于物面，首先计算掩模衍射光，获得观测平面光的分布。在物面和观测面之间的均匀介质内，光的传播满足标量亥姆霍兹方程。

$$(\nabla^2 + \mathbf{k}^2)U = 0 \quad (2.1)$$

式中， $\mathbf{k}$  是波矢，大小为  $\frac{2\pi}{\lambda}$ 。观测面上  $x'$ 、 $y'$  处光的复振幅  $U$  可以表示为：

$$U(x', y') = \frac{1}{j\lambda} \iint_{\Sigma} U(x, y) \frac{\exp jk\mathbf{r}_{01}}{r_{01}} \cos \theta dx dy \quad (2.2)$$

积分区间为物面上整个开孔区域  $\Sigma$ 。矢量  $\mathbf{r}_{01}$  的长度  $r_{01}$  为观测面上点  $P_0$  到物面

上点  $P_1$  的距离。该矢量与  $z$  轴之间的夹角  $\theta$  如图 2.2 所示。可用惠更斯 - 菲涅耳原理来解释式 (2.2)。物面上开孔  $\Sigma$  内的每一点都发出一个球面波。各球面波相干叠加后可以得到观测面上某一点的复振幅  $U$ 。根据基尔霍夫边界条件，物面复振幅分布可以表示为：

$$U(x, y) = \begin{cases} \tilde{U}(x, y), & \text{区域 } \Sigma \text{ 内} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2.3)$$

式中， $\tilde{U}(x, y)$  表示光源发出的入射光场，是物面不存在开孔情况下的平面波。

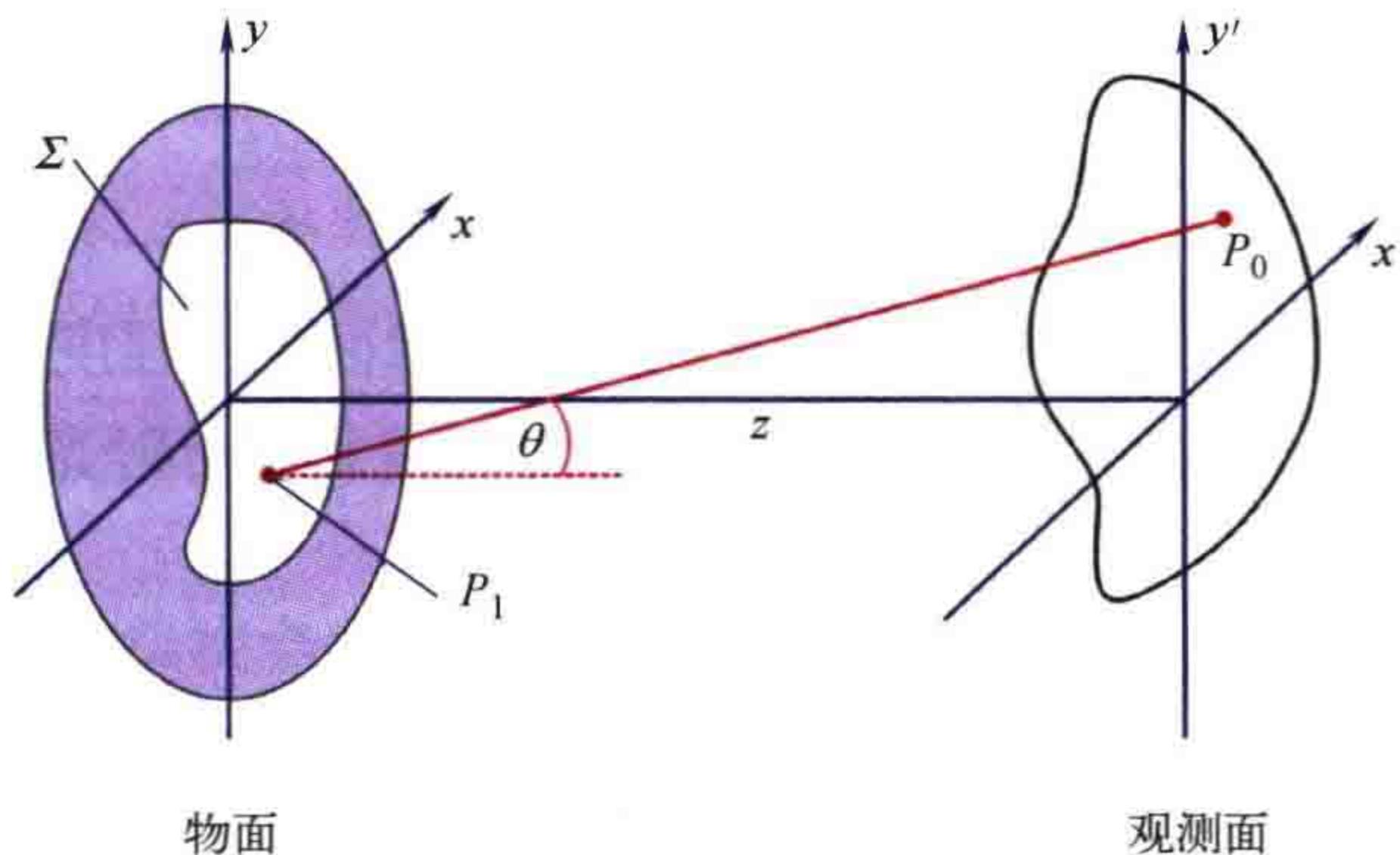


图 2.2 衍射问题：从左边入射的光经过位于物面  $(x, y)$  的孔径衍射。在距离物面距离为  $z$  的观测面探测到衍射光。观测面上点  $P_0$  处的光是来自孔径  $\Sigma$  上所有点  $P_1$  的光的叠加

对  $r_{01}$  进行二项式展开：

$$r_{01} \approx z \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{x' - x}{z} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{y' - y}{z} \right)^2 \right]$$

当物面和观测面之间的距离足够大时该表达式有效，此时：

$$z \gg z \frac{4\pi}{\lambda} \left[ (x' - x)^2 + (y' - y)^2 \right]$$

将该展开式应用于式 (2.2)，得到菲涅耳衍射积分公式：

$$U(x', y') = \frac{\exp j\tilde{k}z}{j\lambda z} \iint_{\Sigma} U(x, y) \exp \left( j \frac{\tilde{k}}{2z} \left[ (x' - x)^2 + (y' - y)^2 \right] \right) dx dy \quad (2.4)$$

当物面和观测面之间的距离进一步增大， $z \gg \tilde{k}(x^2 + y^2)/2$ ，式 (2.4) 可以进一步简化为夫琅禾费衍射积分公式：

$$U(x', y') = \frac{\exp j\tilde{k}z \exp j\frac{\tilde{k}}{2z}[(x')^2 + (y')^2]}{j\lambda z} \times \iint_{\Sigma} U(x, y) \exp \left[ -j\frac{2\pi}{\lambda z}(x'x + y'y) \right] dx dy \quad (2.5)$$

式(2.5)可以写成傅里叶变换的形式:

$$U(x', y') = \frac{\exp j\tilde{k}z \exp j\frac{\tilde{k}}{2z}[(x')^2 + (y')^2]}{j\lambda z} \mathcal{F}[U(x, y)]_{f_x=x'/(λz), f_y=y'/(λz)} \quad (2.6)$$

式(2.6)右边的第一项与复振幅  $U(x, y)$  无关。它是一个纯相位因子，其大小取决于物平面与观测面之间的距离。在计算理想像面上的强度分布时，可予以忽略。假设物面掩模的透过率函数为  $\tau(x, y)$ ，则掩模远场衍射光可以通过式(2.7)得到:

$$s(f_x, f_y) = \mathcal{F}[\tau(x, y)] \quad (2.7)$$

复函数  $s(f_x, f_y)$  即掩模衍射谱。

线空图形和小周期接触孔阵列的衍射谱仅包含几个离散的衍射级(见2.3.1节)。光发生衍射的效率由衍射效率表示，即某个衍射级次或者某个方向上衍射光强度与入射光强度之比。

图2.3左侧所示为成像的第一步。投影物镜的入瞳位于掩模衍射的远场位置。入瞳面的衍射光采用空间频率坐标  $f_x, f_y$  表示。 $f_x, f_y$  与衍射角  $\theta_x, \theta_y$  密切相关， $f_x = x/\theta_x = \sin\theta_x/\lambda, f_y = y/\theta_y = \sin\theta_y/\lambda$ 。

空间像计算的第二步是计算穿过投影物镜的衍射级次。投影物镜的光学性质用光瞳函数  $P(f_x, f_y)$  表示。光瞳在数值孔径之外的透过率为零。光瞳函数值在数值孔径内部的值取决于投影物镜的离焦量、波像差、切趾以及缩小倍率。光瞳滤波也可对光瞳  $P(f_x, f_y)$  产生调制:

$$P(f_x, f_y) = \begin{cases} 0, & \sqrt{\sin^2 \theta_x + \sin^2 \theta_y} > \text{NA} \\ \text{离焦量、像差、切趾等的函数, 其他} & \end{cases} \quad (2.8)$$

投影物镜对数值孔径内的衍射级次没有任何调制时，即数值孔径内  $P(f_x, f_y) = 1$  时称为衍射受限。投影物镜收集光瞳内所有衍射级次，将光传播方向修改为理想方向，向像面传播。

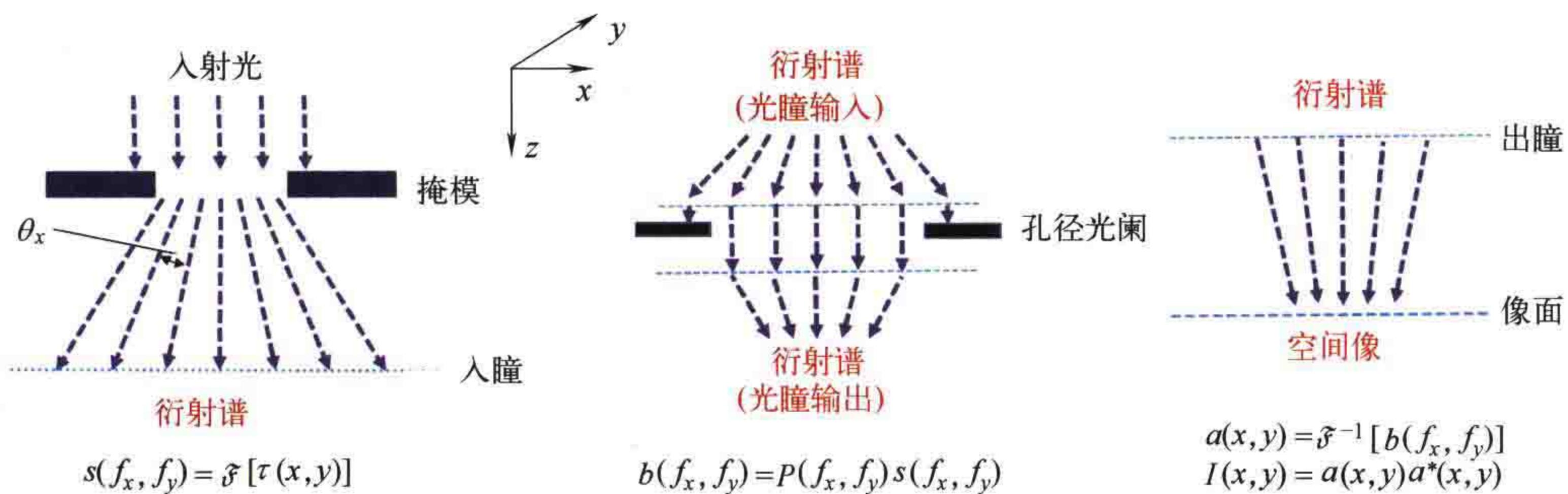


图 2.3 相干光成像的基本计算步骤。左图：对掩模透过率函数  $\tau(x, y)$  进行傅里叶变换得到掩模的衍射谱  $s(f_x, f_y)$ 。中图：光场乘复光瞳函数  $P(f_x, f_y)$ ，描述光穿过投影物镜光瞳的过程。右图：从光瞳出射的衍射光形成空间像，强度为  $I(x, y)$

出瞳处衍射谱的计算公式如下：

$$b(f_x, f_y) = P(f_x, f_y)s(f_x, f_y) \quad (2.9)$$

出瞳出射的衍射级次会聚于像面。这一过程可以看作是光从掩模近场传播至投影物镜入瞳所在远场的逆过程，可以用傅里叶逆变换描述。空间像复振幅  $a(x, y)$  的计算公式为：

$$a(x, y) = \mathcal{F}^{-1}[b(f_x, f_y)] \quad (2.10)$$

则空间像的强度分布为：

$$I(x, y) = a(x, y)a^*(x, y) \quad (2.11)$$

图 2.4 所示为相干成像系统中空间像的计算方法。掩模复透过率的傅里叶变换为投影物镜入瞳处的掩模衍射谱。图 2.4 仅显示了衍射谱的强度。衍射谱的相位对最终成像也非常重要。将该衍射谱与光瞳函数相乘得到投影物镜出瞳或者出射的衍射谱。图中数值孔径 ( $NA=0.75$ ) 之外的衍射级次都已被阻挡住，对成像没有贡献。最后，通过逆傅里叶变换得到空间像。投影物镜数值孔径收集的衍射级次越多，空间像对比度越高（参见 1.3 节中对图 1.5 的讨论）。

图 2.5 为投影成像原理的另一种示意图。物体上一点发出球面波。投影物镜收集到该球面波的一部分。理想或衍射受限投影系统，如图中右侧实线半圆所示，将发散球面波的一部分转换成以像点为中心的会聚球面波。真实系统的波像差会导致像空间的波前变形（虚线）。实线所示的会聚球面波的角度范围受投影物镜数值孔径的限制。虚线波前相对于会聚球面波的偏差定义为系统的波像差（见 8.1 节）。

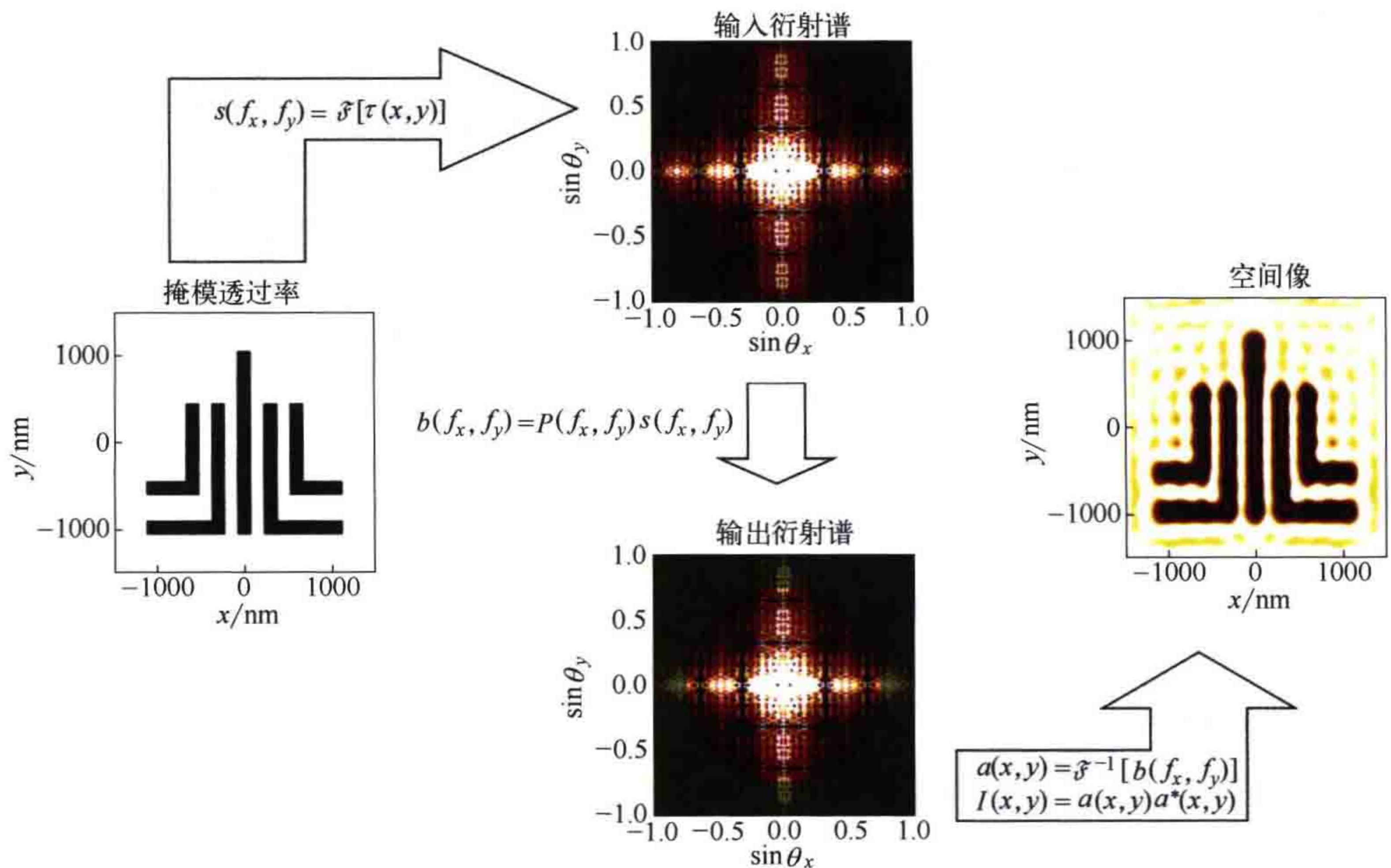


图 2.4 相干成像系统的空间像计算流程。经过许可转载自参考文献 [3]，版权 (2020) Elsevier

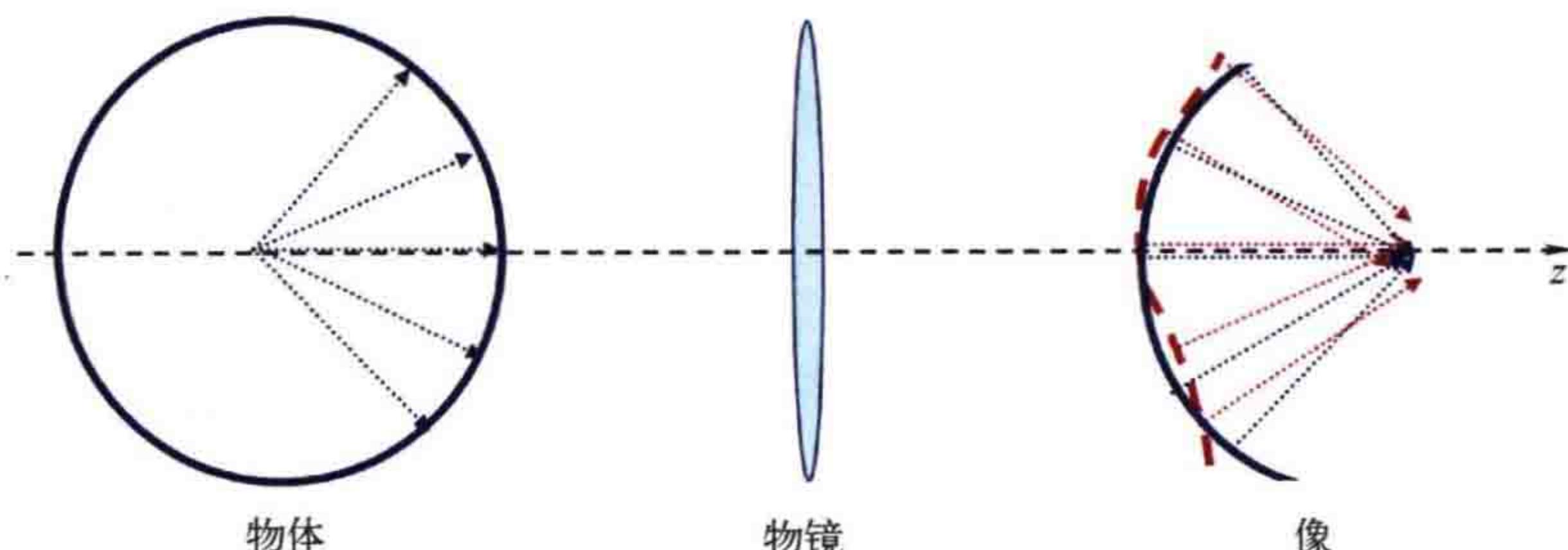


图 2.5 投影光刻成像的另一种视图

## 2.2.2 倾斜照明与部分相干成像

目前为止的讨论中均采用沿光轴传播的平面波照明掩模，如图 2.3 所示，光轴与  $z$  轴重合。图 2.6 右侧显示了倾斜照明对衍射谱的影响。衍射光的方向随照明方向的变化而变化。后文通过平移垂直照明下的衍射谱  $s(f_x, f_y)$  得到与光轴夹角为  $\theta_x^{\text{inc}}$ 、 $\theta_y^{\text{inc}}$  的倾斜照明下的掩模衍射谱。空间频率的平移量为  $f_x^{\text{inc}} = \sin \theta_x^{\text{inc}} / \lambda$ 、 $f_y^{\text{inc}} = \sin \theta_y^{\text{inc}} / \lambda$ 。这就是所谓的霍普金斯方法，在 9.2.2 节的先进掩模建模方法中将再次讨论这种方法。

图 2.7 给出了出瞳处的衍射谱以及与光轴存在一定夹角的几束照明光对应的空间像。光照方向对衍射级次的选择有很大影响。被选出的衍射级次穿过投影透镜的

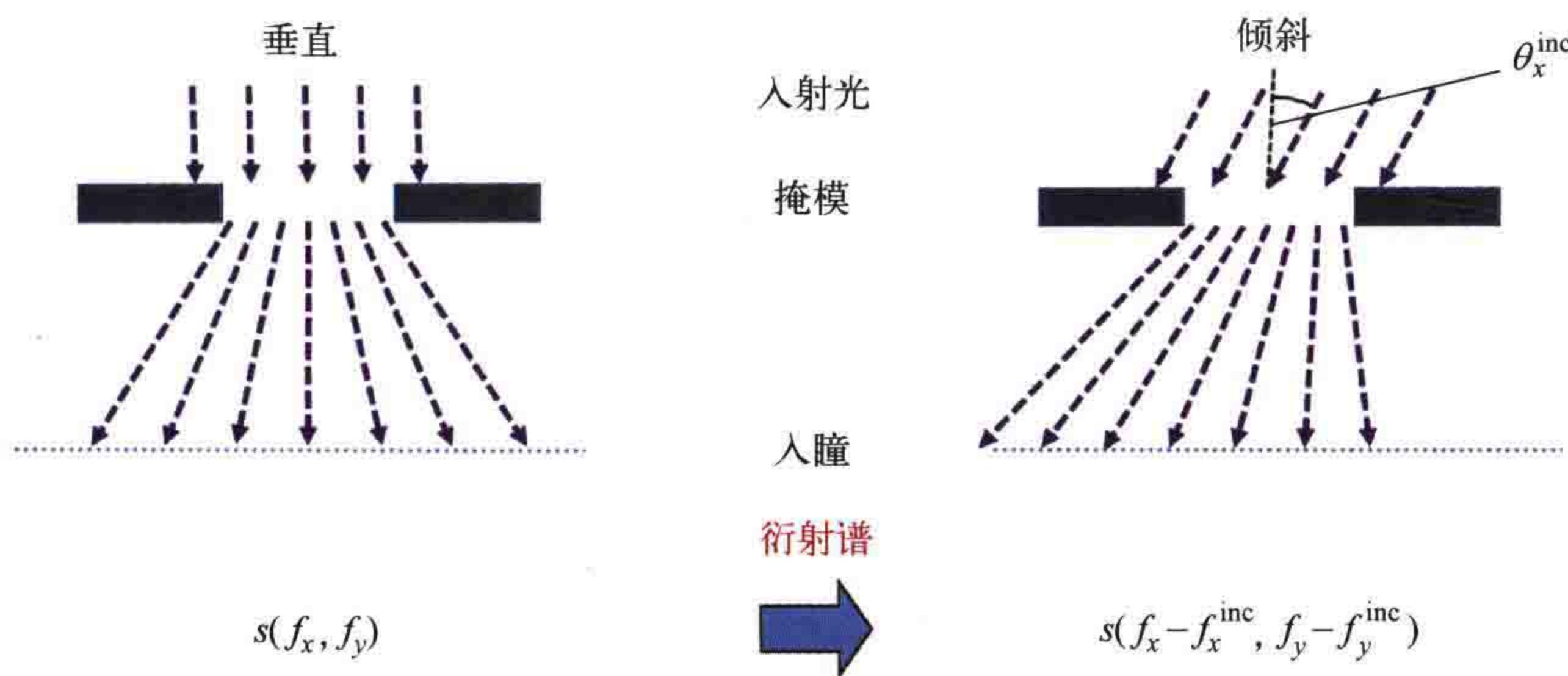


图 2.6 入射角为  $\theta_x^{\text{inc}}$  的倾斜照明对掩模衍射谱  $s(f_x, f_y)$  的作用

数值孔径形成空间像。图 2.7 左图中，照明光方向沿  $y$  轴倾斜。 $x$  方向正负一级衍射光被数值孔径阻挡。与  $y$  方向平行的线空图形不能清晰成像。 $y$  方向的几个衍射级次穿过光瞳，使得  $x$  方向线图形的成像分辨率很高，见图中空间像靠下的部分。图中右侧， $90^\circ$  旋转后的照明将  $x$  方向的高衍射级次移动到光瞳内，为  $y$  方向平行线图形提供了良好的成像条件。但是，丢失了对成像非常重要的  $y$  方向一级衍射光，相应的  $x$  方向平行线条不可分辨。图 2.7 中间，照明在对角线方向的倾斜将  $x$  和  $y$  方向的分辨率进行了折中。但是，照明不对称会引起成像不对称。为避免成像不对称，一般采用对称照明。

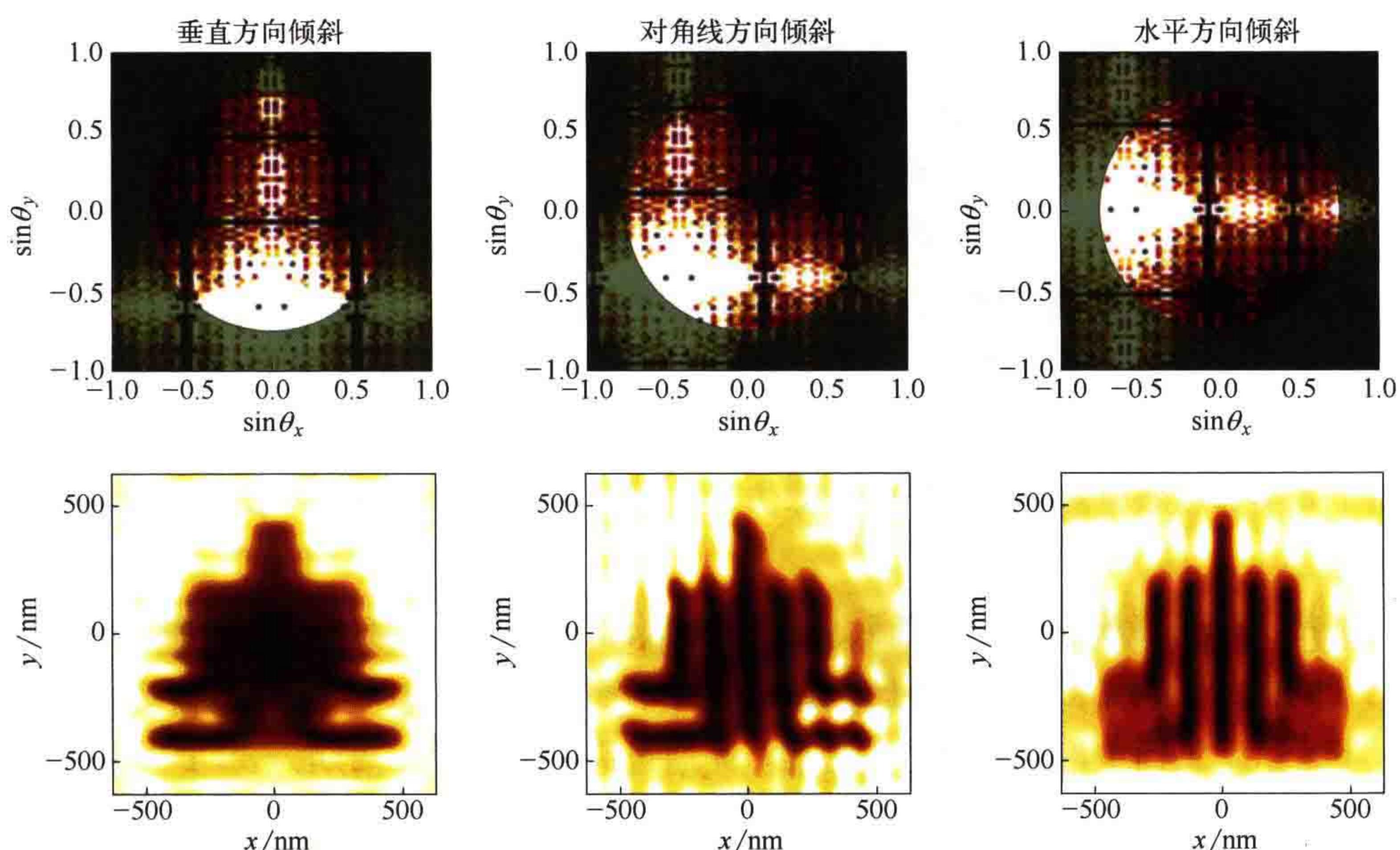


图 2.7 不同离轴照明条件下出瞳处的衍射谱（第一行）以及相应的空间像（第二行）。除了缩放因子之外，掩模版图与图 2.4 相同

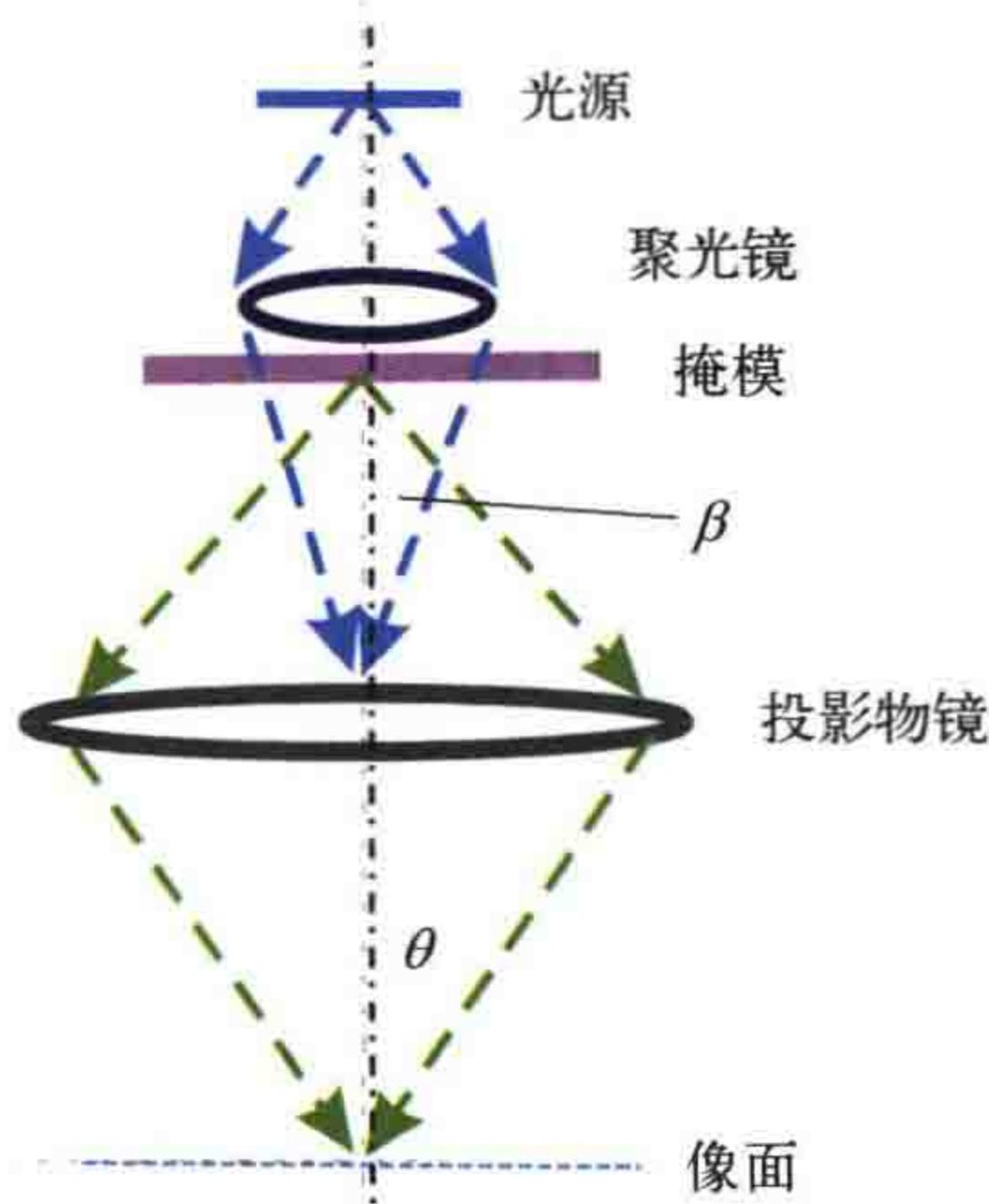


图 2.8 光刻投影系统的科勒  
照明示意图

离轴照明、光源掩模优化等光学分辨率增强技术利用了成像对掩模面照明方向的敏感性。

为了实现掩模面均匀照明，使得大像场范围内的光强分布均匀，所有光刻投影系统都采用科勒照明<sup>[4, 5]</sup>。如图 2.8 所示，聚光镜将光源成像在投影物镜的入瞳面。这种特殊的照明方式中，聚光镜将光源中的一个点转换为平面波，照明掩模。

不同光源点发出的光的相位没有固定关系。多个光源点发出的光相互叠加产生空间非相干光。空间非相干性随着照明角度范围的增大而增大。

图 2.8 中的角度  $\beta$  定义了聚光镜的数值孔径。聚光镜数值孔径与投影物镜数值孔径之比定义为系统空间相干因子  $\sigma$ ：

$$\sigma = \frac{\sin \beta}{\sin \theta} \quad (2.12)$$

空间相干因子  $\sigma=0$  表示系统为相干系统，该系统用单个平面波照明掩模。 $\sigma>0$  意味着掩模被来自多个方向的平面波照明。来自不同方向的光，即不同光源点发出的光，没有固定的相位关系。系统的空间非相干性随着光源点之间的最大距离以及相应照明角度范围的增大而增大。

一般来说，光源的相干特性可以用空间相干和时间相干来描述。时间相干性描述了来自单一光源的光在不同时间的相位关系。它与光源出射光的波长范围有关。本书中的大多数例子采用的是单色光成像，即采用了具有理想时间相干性的光。利用这种方法可合理地解释本书所讨论的成像效应。先进的 DUV 光刻与 EUV 光刻中，用于光学邻近效应修正的高精度成像仿真需要考虑一定的（小的）波长范围或照明带宽。

接下来，将成像理论扩展至（空间）部分相干成像。（空间）部分相干成像和相干成像的区别见图 2.9。相干成像情况下，仅用一个平面波照明掩模。大多数情况下，这个平面波沿着光轴方向传播。光通过周期性掩模（周期为  $p$ ）产生离散的衍射级次。这些衍射级次在特定的位置进入投影物镜。部分相干成像情况下，几个入射角不同的平面波同时照明掩模。投影物镜光瞳内衍射级次的位置随光照方向的不同而不同（有关效应的讨论，请参见图 2.10）。

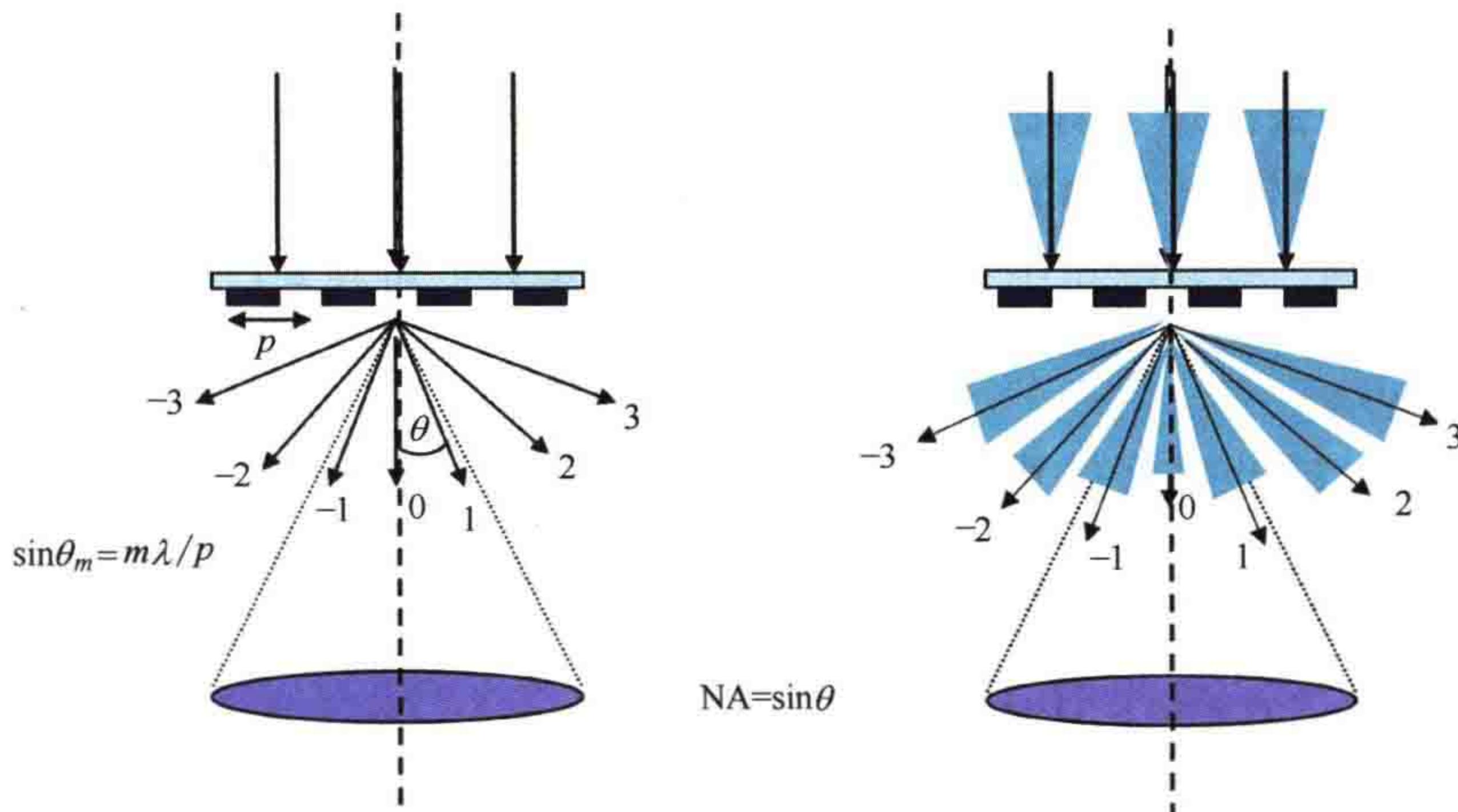


图 2.9 相干成像 (左) 和部分相干成像 (右)。箭头和光锥表示照明光和  $m$  级衍射光的方向 ( $\theta_m$ )，掩模图形为周期为  $p$  的线空图形。参考美国劳伦斯伯克利国家实验室 X 射线光学中心的课程材料重新绘制的图片, 2005

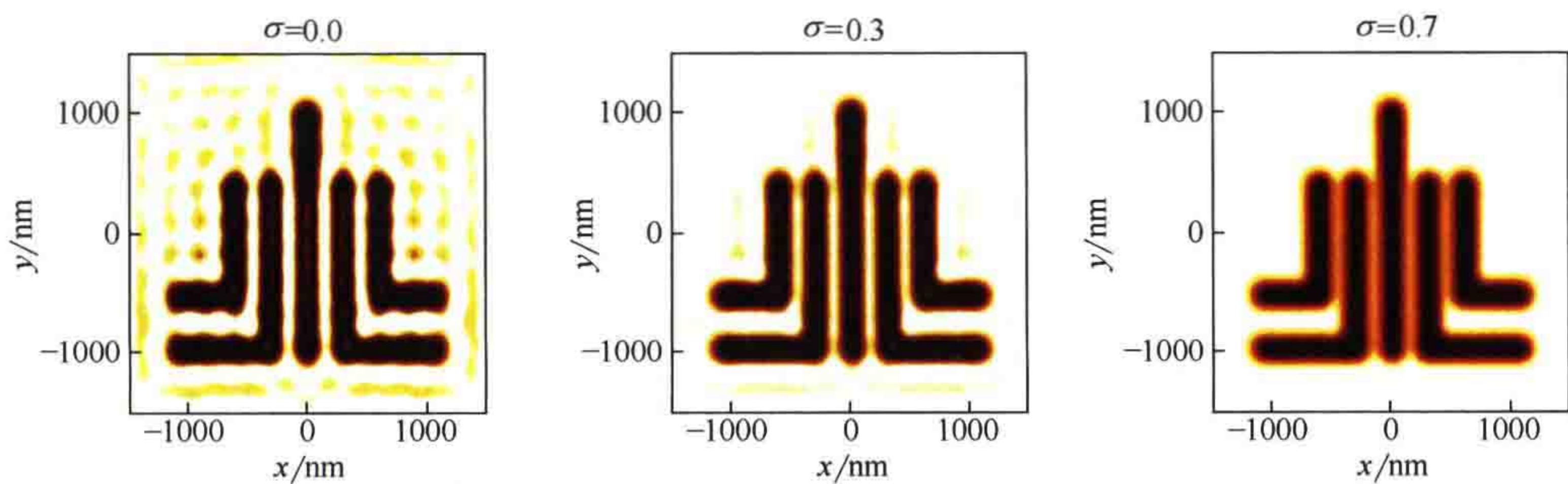


图 2.10 部分相干因子  $\sigma$  对空间像的影响仿真。掩模版图如图 2.4 所示

部分相干系统成像可以用阿贝方法描述。光源用离散光源点表示。光源点发出的光照明掩模，光线的角度为  $\theta_x^{\text{inc}}$ 、 $\theta_y^{\text{inc}}$ ，对应的空间频率分别为  $f_x^{\text{inc}}=\sin\theta_x^{\text{inc}}/\lambda$ 、 $f_y^{\text{inc}}=\sin\theta_y^{\text{inc}}/\lambda$ 。像面标量光场的复振幅为：

$$a(x, y, f_x^{\text{inc}}, f_y^{\text{inc}}) = \mathcal{F}^{-1} \left[ P(f_x - f_x^{\text{inc}}, f_y - f_y^{\text{inc}}) \mathcal{F}(\tau(x, y)) \right] \quad (2.13)$$

上式利用了卷积运算的平移不变性。衍射谱不变，光瞳函数发生位移，在数学上与衍射谱发生位移、光瞳函数不变的情况是等效的。

不同光源点发出的光没有固定的相位关系。因此，将所有离散光源点照明下的成像结果进行非相干叠加即可得到整个光源照明下的成像结果：

$$I(x, y) = \iint_{\text{source}} a(x, y, f_x^{\text{inc}}, f_y^{\text{inc}}) a(x, y, f_x^{\text{inc}}, f_y^{\text{inc}})^* df_x^{\text{inc}} df_y^{\text{inc}} \quad (2.14)$$

图 2.10 给出了不同部分相干因子  $\sigma$  情况下计算的空间像。完全相干光 ( $\sigma=0$ ) 照明下的空间像出现了明显的旁瓣。该旁瓣是主图形附近的局部极小值和极大值。部分相干照明 ( $\sigma>0$ ) 减少了旁瓣。老式光刻投影系统的部分相干因子在 0.3 和 0.7 之间。较新的系统采用更复杂的照明模式，将在 4.1 节和 4.5 节中进行介绍。

### 2.2.3 其他成像仿真方法

从霍普金斯成像公式可以导出另一种空间像计算方法<sup>[6]</sup>:

$$I(x, y) = \iiint t(\xi_1, \xi_2) J_0(\xi_1, \xi_2, \eta_1, \eta_2) \tau^*(\eta_1, \eta_2) \times \\ K(x, y, \xi_1, \xi_2) K^*(x, y, \eta_1, \eta_2) d\xi_1 d\xi_2 d\eta_1 d\eta_2 \quad (2.15)$$

式中， $\tau(\dots)$  表示掩模的复透过率； $K(\dots)$  是相干点扩散函数，点扩散函数是投影物镜光瞳函数的傅里叶变换； $J_0(\dots)$  表示由照明决定的互强度。式 (2.15) 所示的四重积分可以通过交叉传递函数的卷积进行计算。交叉传递函数由投影物镜光瞳和光源决定，可以在积分前预先算好。

前面几节介绍的部分相干成像仿真方法为阿贝方法。与之相对照，应用交叉传递函数的方法称为霍普金斯方法。这两种方法的积分顺序不同。阿贝方法首先对掩模和投影物镜光瞳进行积分，而霍普金斯方法首先对光源和投影物镜光瞳进行积分<sup>[7]</sup>。阿贝方法便于计算不同光源和投影物镜参数下的空间像，常用于光学系统的表征与光源优化。在给定光源和投影物镜情况下，霍普金斯方法是计算不同掩模版图空间像的优选方法，可用于光学邻近效应修正等技术。

为了提高霍普金斯方法的计算效率，开发了相干系统叠加 (SOCS) 分解<sup>[8-10]</sup>等专用分解技术。类似地，提出了适用于阿贝方法的奇异值分解方法<sup>[11]</sup>。这些分解方法的计算速度比传统阿贝方法快，但是一般需要牺牲一定的仿真精度。这些方法的精度取决于分解时所取计算核心的数量。当光学成像系统的参数设置发生改变时，必须重新计算这些核函数。

## 2.3 阿贝 – 瑞利准则

给定数值孔径和波长，从物面投影成像到像面的图形的最小尺寸是多少？这取决于物体或掩模图形的形状以及照明方式等因素。需要采用某种标准来确定物体是否可以被分辨或者清晰成像。本节首先讨论一些简单掩模图形的成像，建立简单的规则来描述光学投影技术的分辨率极限。研究表明这些规则主导了投影光刻技术和特征尺寸微缩的发展历程。

### 2.3.1 分辨率极限与焦深

**最小可分辨特征尺寸的第一阿贝 - 瑞利准则：**首先，考虑一维（1D）空图形阵列在空间相干投影系统中的成像。如图 2.11 左图所示，采用沿光轴传播的单色平面波照明线空掩模。周期性物体的衍射光为离散的衍射级次，各衍射级次沿不同方向传播：

$$\sin \theta_m = m \frac{\lambda}{p} \quad (2.16)$$

式中，整数  $m$  表示衍射光的级次； $m$  级衍射光与光轴的夹角为  $\theta_m$ ； $p$  是线空图形的周期。由光栅方程式 (2.16) 可知，只有有限衍射级次的衍射角  $\theta_m$  为实数值。这些是可传播的衍射级。 $|m\lambda / p| > 1$  时，衍射角  $\theta_m$  是复数。它们是所考察投影系统中的倏逝波，不会传播到远场，也不会对成像有贡献。当光沿  $z$  轴入射到掩模时，正负衍射级次关于  $z$  轴对称。

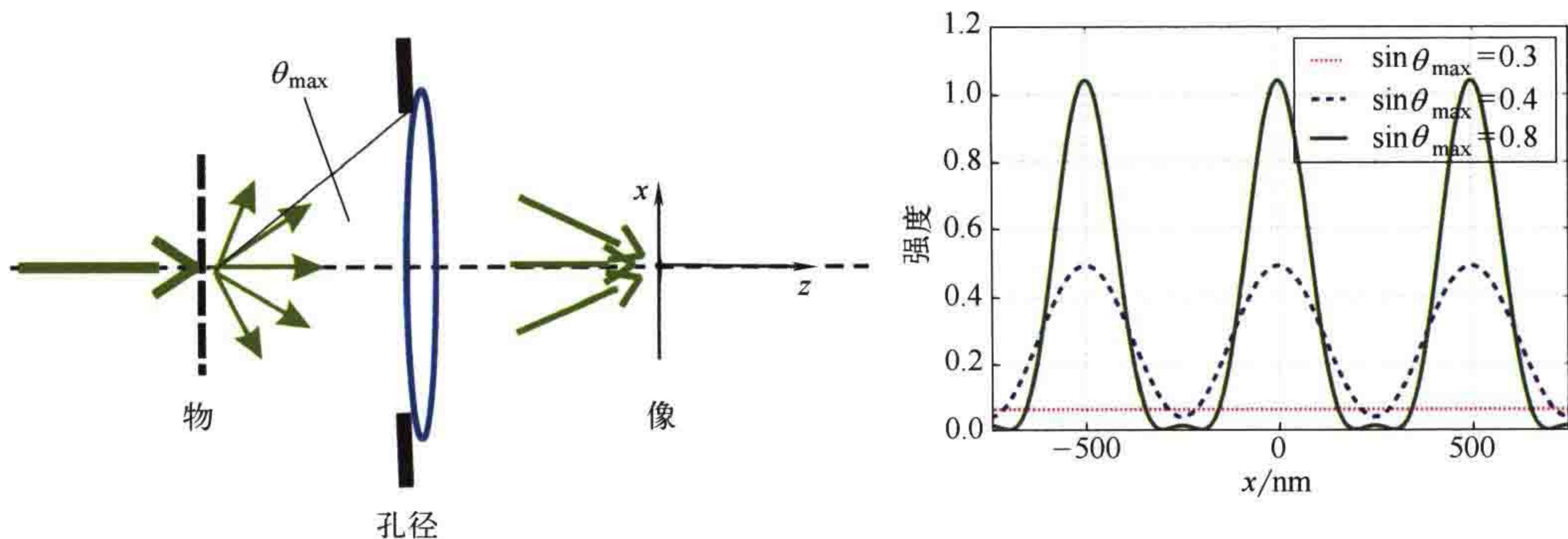


图 2.11 相干照明条件下线空光栅的成像。左图：基本光路结构。右图：波长 193nm、不同物方孔径角  $\theta_{\max}$  照明条件下，对周期为 500nm、宽度为 125nm 的线空图形的仿真空间像

按照上一节提到的阿贝成像方法所表述的成像原理，通过投影物镜数值孔径的所有衍射级发生干涉后形成空间像。由不同数量的衍射级次形成的空间像的截面图如图 2.11 所示。如果仅有 0 级光 ( $\theta_{\max} < 0.39$ ) 参与成像，则像的强度是一个常数，大小由掩模的局部平均透过率决定。投影系统没有传递掩模图形的周期信息，因此像不能分辨。

当孔径或孔径角  $\sin \theta_{\max} \geq \lambda / p$  时，投影物镜像面至少有三个衍射级参与成像。三个平面波 (0 级和  $\pm 1$  级) 之间的干涉形成了空间像。空间像中包含掩模图形的周期信息。因此，可以认为像是空间可分辨的。进一步增大孔径角，捕获二级衍射光后 ( $\theta_{\max} > 0.77$ )，提高了图形边缘的成像对比度。

一般至少需要两个衍射级次才能形成包含光栅周期信息的像。对于给定波长和数值孔径的投影成像系统，穿过数值孔径的1级衍射光决定了系统可以传递或成像的最小周期：

$$p_{\min} = \frac{\lambda}{\sin \theta_{\max}} = \frac{\lambda}{NA} \quad (2.17)$$

接下来研究空间相干光照明条件下透明点物的成像问题。成像系统原理如图2.12左图所示。成像物体是一个不透明平板上的小孔，小孔的尺寸小于波长。入射平面波通过物面上的小孔发生衍射，产生球面波。球面波均匀照明投影物镜的入瞳。圆形物体（如投影物镜的孔径）对光的衍射可以用艾里斑来描述：

$$I(x, y) = \left[ \frac{2J_1(a\sqrt{x^2 + y^2})}{a\sqrt{x^2 + y^2}} \right]^2 \quad (2.18)$$

式中， $J_1(\dots)$ 为一阶贝塞尔函数；参数  $a$  由投影物镜的最大张角  $\theta_{\max}$  和波长  $\lambda$  决定， $a=2\pi\sin\theta_{\max}/\lambda$ 。图2.12右图显示了波长为193nm、数值孔径为0.9时的光强分布。图中设置了合适的缩放比以突出显示环形旁瓣的强度。在像中心主图形的周围可以观察到旁瓣。中心亮斑的宽度、旁瓣之间的距离都取决于波长和数值孔径。

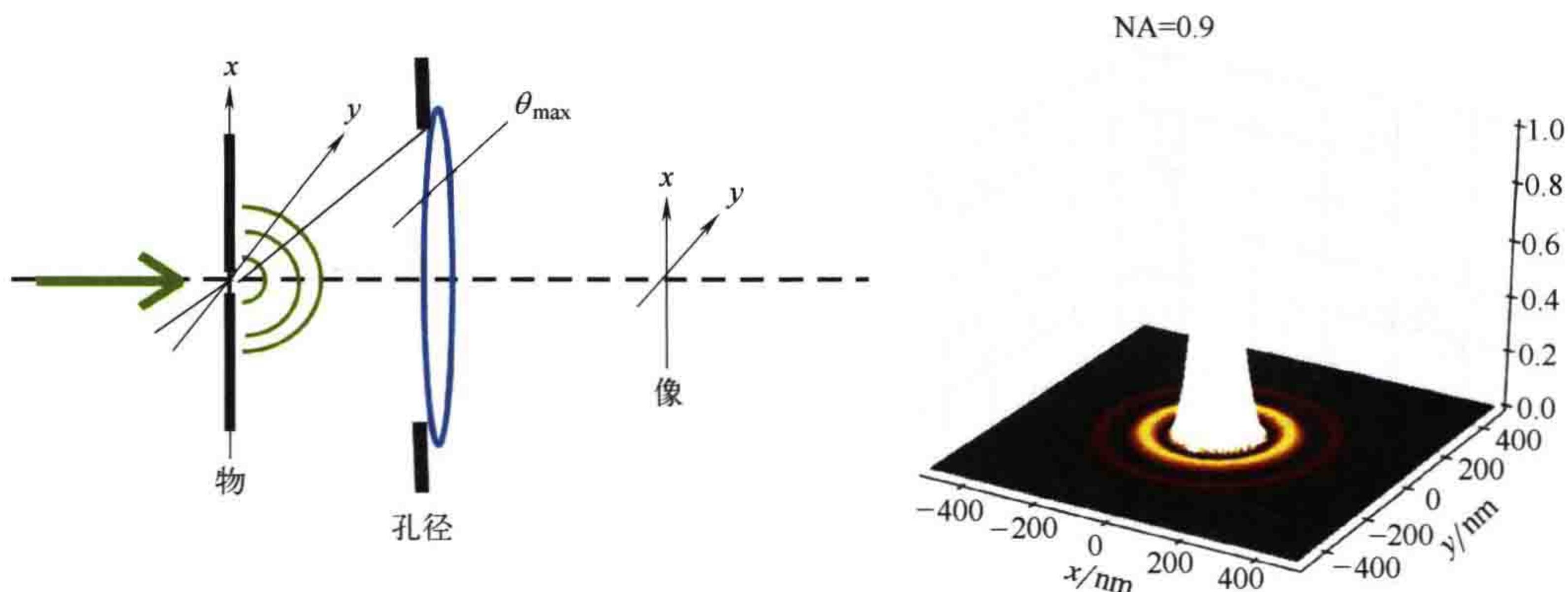


图 2.12 相干照明条件下孤立点物的成像。左图：基本光路结构。右图：波长 193nm、数值孔径 0.9 仿真条件下计算的空间像

图2.13是具有一定间距的两个透光物体的像。右图对应的间距为160nm，可以观察到两个明显分开的像点，可以认为两个点物在空间上是可分辨的。左图中的间距为100nm，成像系统的空间分辨率不足以分辨这两个物体，两个亮斑融合成了一个。间距在100nm和160nm之间时情况不明确。例如，间距为130nm时在两个峰之间可以观察到一个局部极小值。系统的分辨率取决于图像探测器识别这个局部极小值的能力，以及区分相邻点成像强度峰值的能力。

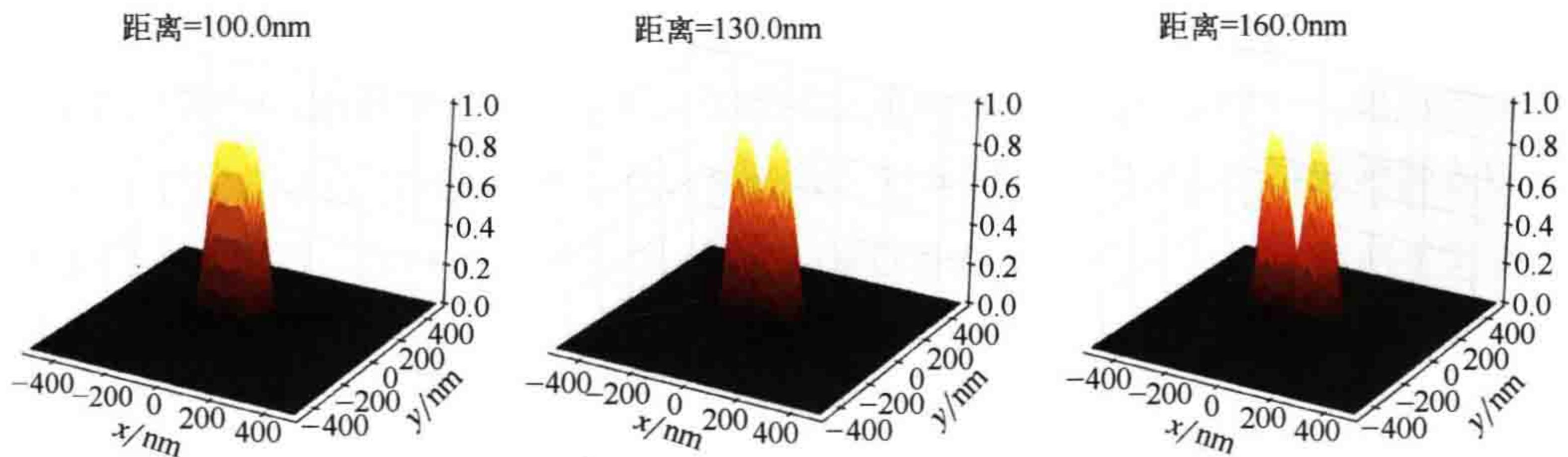


图 2.13 相干照明条件下不同距离的两个点物的像。数值孔径为 0.93，波长为 193nm

为了给出分辨率的定量评价标准，瑞利<sup>[12]</sup>认为一个点物的艾里斑中心与另一个点物艾里斑的第一极小值重合时，两个相邻点物恰好可分辨。对式(2.18)中一阶贝塞尔函数的极值进行数学分析，得到两点物之间的最小可分辨距离  $d_{\min}$  为：

$$d_{\min} = 0.61 \frac{\lambda}{\sin \theta_{\max}} = 0.61 \frac{\lambda}{NA} \quad (2.19)$$

除了前面的常数因子之外，式(2.19)与式(2.17)相同，表示一维周期物体的分辨率。在其他类型的物体和光照条件下也可以得到类似的表达式。基于此，恩斯特·阿贝建立了描述光学显微镜成像和分辨能力的第一套理论<sup>[13]</sup>。在光刻中，常用下面的公式来描述最小可分辨特征尺寸  $x_{\min}$ ：

$$x_{\min} = k_1 \frac{\lambda}{NA} \quad (2.20)$$

式中，参数  $k_1$  是工艺因子，取决于掩模图形、照明几何形状、光刻胶、工艺条件等。式(2.20)即为光学投影光刻的阿贝-瑞利准则。

考虑恰好通过投影物镜光瞳两侧边界的两束平面波照明情况下的成像，可以得到密集线空图形的工艺因子  $k_1$  的理论极限。这两个平面波形成的干涉图的调制项为：

$$I \propto \cos \left( \sin \theta_{\max} \frac{4\pi}{\lambda} x \right) = \cos \left( NA \frac{4\pi}{\lambda} x \right) \quad (2.21)$$

图形半周期（周期的一半）的大小为  $0.25\lambda/NA$ 。因此，密集线空图形工艺因子的理论极限为  $k_1=0.25$ 。

孤立图形的成像没有理论极限。例如，通过适当选择阈值，可以使图 1.7 右侧所示孤立线的宽度无限减小。阈值设置为极端值时，可能会产生任意小的亮（暗）斑。然而，大多数情况下这些极端阈值都与实际不符。阈值或相应剂量的微小变化容易导致特征尺寸变化，这些变化不可接受。

**关于焦深的第二阿贝 - 瑞利准则：**到目前为止本书讨论的都是在投影物镜理想像面的成像。一般来说，观测面偏离理想像面会导致成像变得模糊。只有在焦深范围内才能够观察到清晰的像。图 2.14 为焦深示意图。

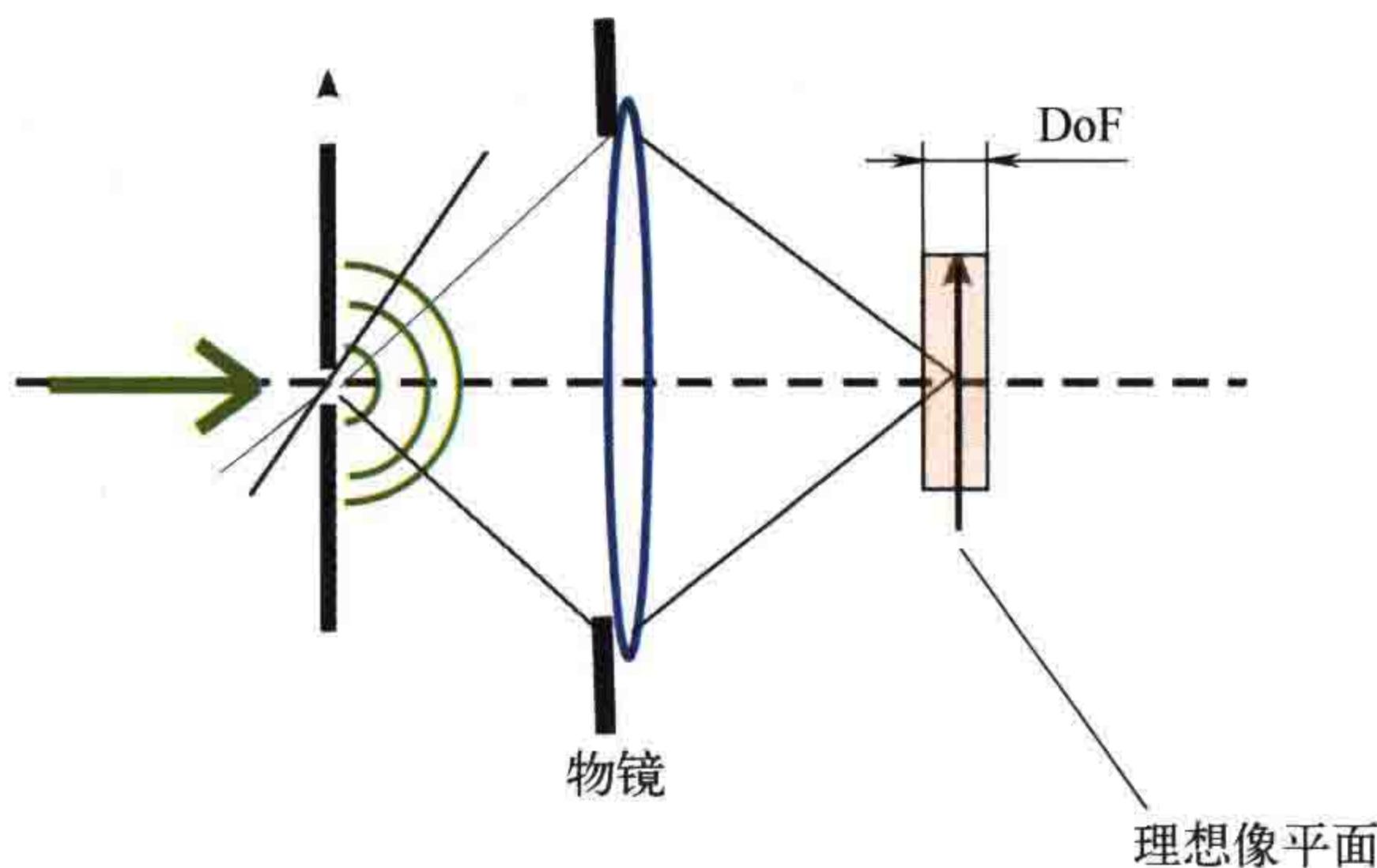


图 2.14 光学投影系统的焦深 (DoF)

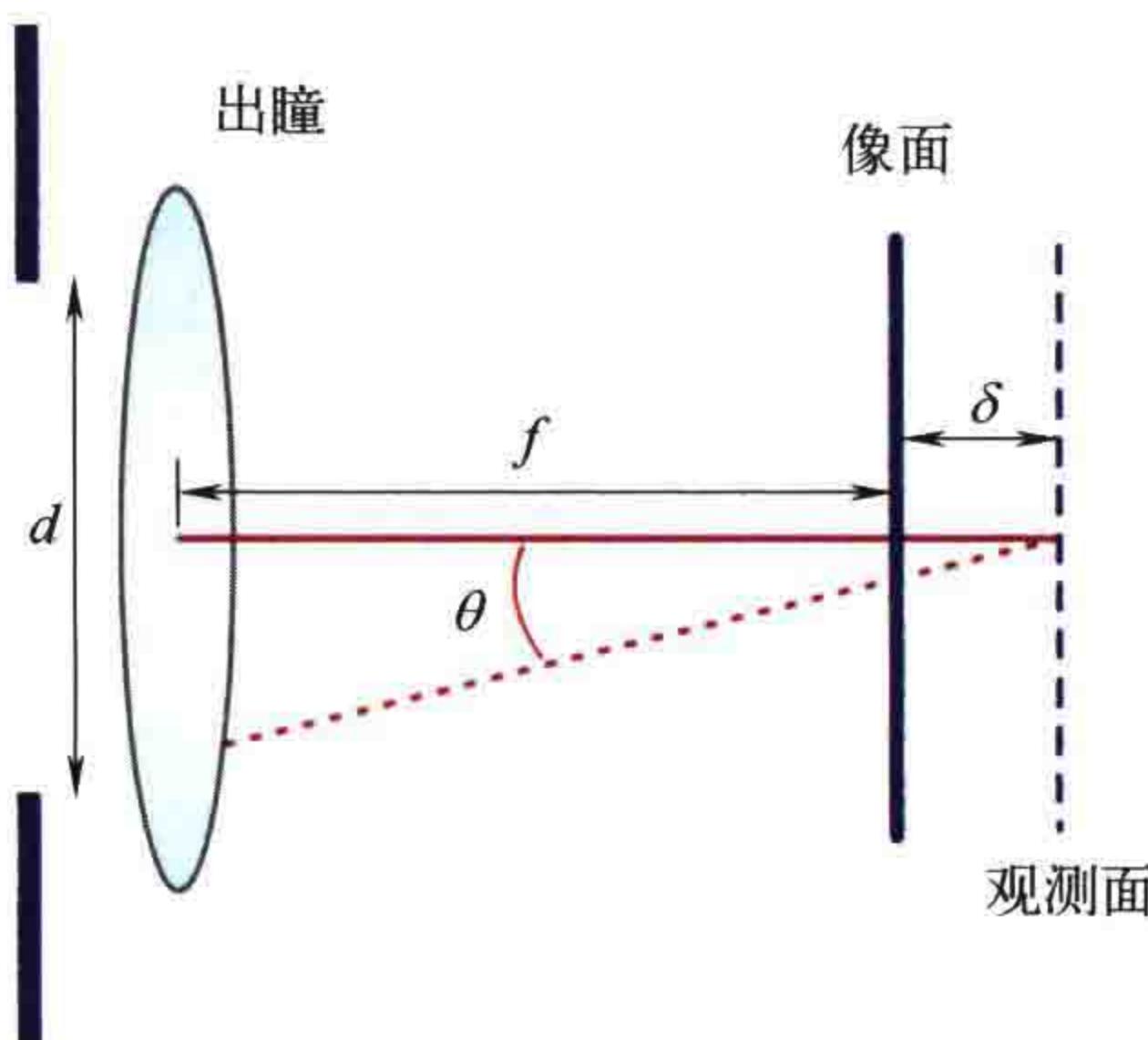


图 2.15 用于推导焦深 (DoF) 公式的几何图

下面估算焦深的大小。投影物镜出瞳中心和边缘发出的两列光波之间的光程差为 OPD。观测面和理想像面的偏差表示为  $\delta$ 。由图 2.15 可知，这两列光波之间的 OPD 可以表示为：

$$OPD = \delta(1 - \cos \theta) \approx \frac{1}{2} \delta \sin^2 \theta$$

这里张角  $\theta$  很小，采用了傍轴近似。最大 OPD 不能超过四分之一波长，即：

$$\frac{1}{2} \delta \sin^2 \theta \leq \lambda / 4$$

利用数值孔径改写 OPD 的表达式，并引入第二工艺因子  $k_2 \leq 1$ 。由  $DoF = 2\delta$  得到：

$$\text{DoF} = k_2 \frac{\lambda}{\text{NA}^2} \quad (2.22)$$

通常用尺寸最小的图形定义系统的 DoF。较大尺寸图形的衍射谱位于投影物镜光瞳的中心附近。尺寸较大的图形对应的 OPD 和离焦效应不明显。利用工艺窗口直接定义 DoF 更具实际意义。例如，图 1.14 中，左右两幅图中椭圆的宽度分别表示了密集图形和半密集图形的 DoF。通常，DoF 受半密集或者孤立图形的限制，这些图形在投影物镜光瞳内产生的衍射级次和相移更多。最近 DoF 的定义被改为聚焦范围，在聚焦范围内，实际 NILS 值均大于给定的 NILS 目标值<sup>[14]</sup>。

由于推导过程用到了傍轴近似条件，所以式 (2.22) 对高数值孔径成像系统不成立。Brunner 等人<sup>[15]</sup> 给出了更具一般意义的 DoF 公式：

$$\text{DoF} = k_2 \frac{\lambda}{2(1 - \sqrt{1 - \text{NA}^2})} \quad (2.23)$$

### 2.3.2 结论

式 (2.20) 所示的第一阿贝 - 瑞利准则描述了最小可分辨特征尺寸  $x_{\min}$  与曝光波长和数值孔径之间的基本关系，它解释了光刻发展历史上的重要趋势和未来发展方向。2003 年，Alfred Wong 将这些趋势总结为一幅图（见图 2.16）。图 2.16 采用了对数坐标，特征尺寸微缩源自减小波长、增大数值孔径以及减小工艺因子  $k_1$  三方面的贡献。2003 年开始，该领域的技术预测显示波长为 13.5nm 的极紫外光刻将在 2011 年进入量产。尽管如此，直至 2018 年仍然在用波长为 193nm 的深紫外光刻系统制造尺寸最小、最关键的半导体芯片图形。21 世纪初期，引入了以水作为浸没液体的浸没式光刻，光刻机的数值孔径增大到 1.35。2007 年引入高数值孔径的浸没式 ArF 光刻机之后，10 多年来曝光波长和最大数值孔径没有再发生变化。光源掩模优化、双重图形技术等更强的分辨率增强技术，使工艺因子  $k_1$  减小到预期值之下。第 4 章和第 5 章将讨论这些技术以及光学与材料驱动的分辨率增强技术。2019 年起，EUV 光刻机进入芯片量产，将在第 6 章进行介绍。

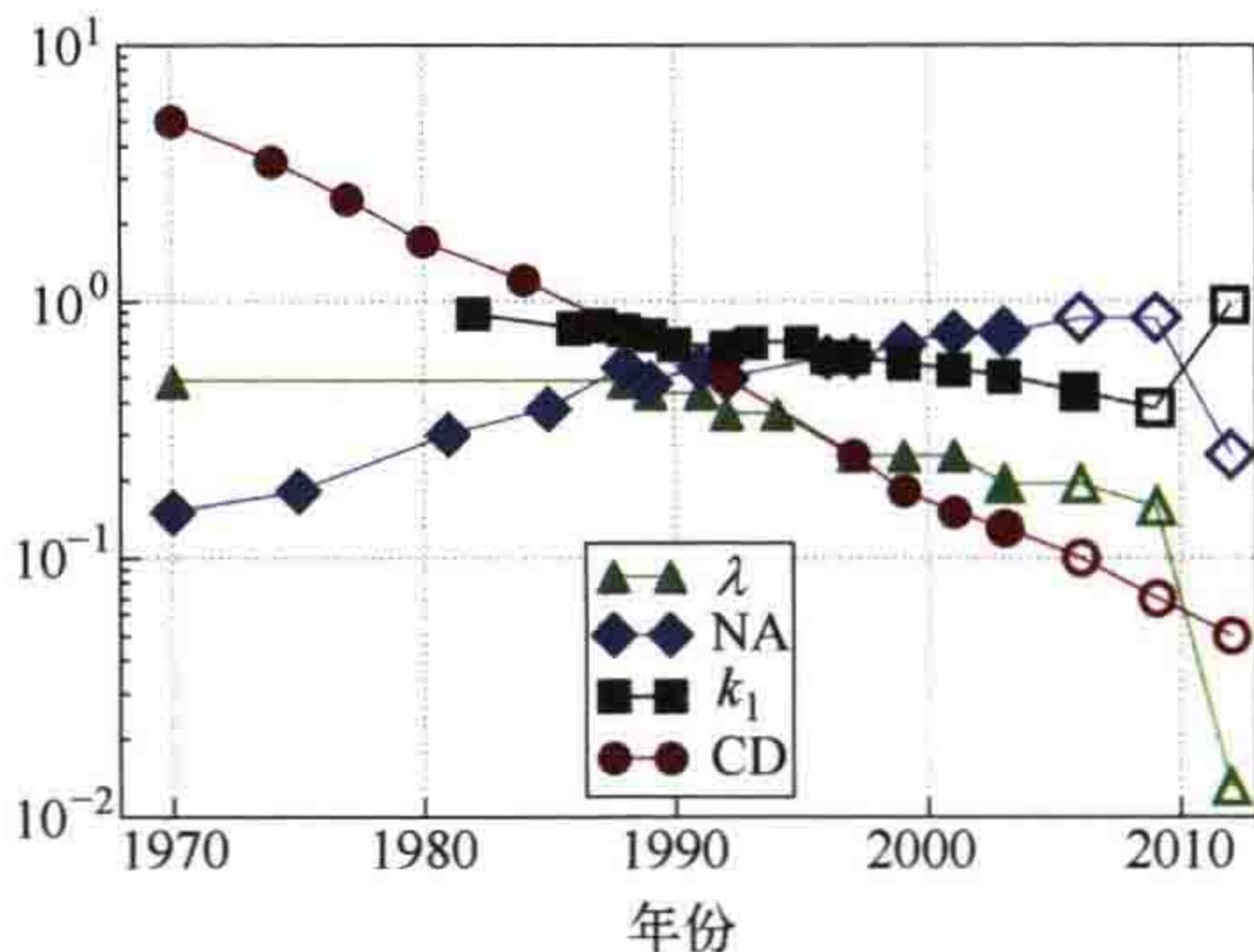


图 2.16 光刻随着波长  $\lambda$ 、数值孔径 NA、工艺因子  $k_1$  的变化而微缩的规律。实心标记为 1970 至 2003 年之间的实际数据，空心标记为 2003 年预测的发展趋势。改编自参考文献 [16]，数据由 Alfred Wong<sup>[17]</sup> 提供

下面将详细介绍波长、数值孔径与  $k_1$  对芯片持续微缩的贡献。

**减小波长：**早期的光刻系统使用汞灯的紫外光谱线作为光源，包括 436nm 波长的 g 线、405nm 的 h 线以及 365nm 的 i 线。DUV 光刻技术的发展离不开两个重要的技术创新。准分子激光器被用作新型光刻光源。重氮萘醌型光刻胶常用于 300nm 及更大波长的光刻。由于重氮萘醌型光刻胶在 DUV 波段的透光率太低，所以引入了化学放大光刻胶。深紫外光刻机采用的第一个准分子激光器是波长为 248nm 的 KrF 准分子激光器。21 世纪初，引入了波长为 193nm 的 ArF 光刻机。目前这些光刻机仍广泛应用于芯片制造中。2004 年左右，业内曾计划引入以 F<sub>2</sub> 准分子激光器作为光源的光刻系统，波长为 157nm。尽管对 157 nm 光刻技术进行了大量的研究，但由于该波段光学透镜的材料问题未得到解决，这项技术最终未能应用到生产中。

20 世纪 80 年代末，Kinoshita 等人<sup>[18]</sup> 和 Hawryluk、Seppala<sup>[19]</sup> 首次发表了软 X 射线投影光刻方面的论文。20 世纪 90 年代中期，开始了波长为 13.5nm 的 EUV 光刻系统的密集开发工作。从那时起，极紫外光刻被认为是深紫外光刻的继任者。2010 年与 2011 年，该波段的第一个投影系统交付到晶圆厂。高功率、寿命长的光源，高灵敏度光刻胶，以及掩模基础设施的开发，又花费了几年时间。2019 年，采用了 EUV 光刻芯片的首款智能手机面世。第 6 章将详细介绍 EUV 光刻。

**增大数值孔径：**对光刻掩模上的微细图形进行大视场（10mm × 10mm，甚至更大）、无像差成像需要高质量的投影系统设计与制造。数值孔径的增大，使得设计和制造变得更加复杂。为了在给定的视场范围内获得高成像质量，需要采用更多透镜。20 世纪 70 年代末，第一台步进光刻机进入芯片量产，其工作波长为 436nm（汞灯 g 线），数值孔径为 0.28。这些步进光刻机的投影物镜大约包含 10 片镜片。从那时起，投影物镜的数值孔径和镜片数不断增加。21 世纪初，引入了 NA=0.85 的高数值孔径系统，该系统由 40 多片透镜组成。这些高数值孔径系统镜片表面光线的入射角很大。为减小这些表面对光的散射以及反向反射，需要开发非常先进的抛光和镀膜技术。

张角正弦值的实际极限约为 0.93。在投影物镜最后一片镜片和光刻胶之间加入浸没液体可以增大数值孔径（见图 2.17）。浸没液的吸收率必须很低，并与投影物镜最后一片镜片、光刻胶化学相容。为实现光从投影物镜到光刻胶的良好耦合，最后一片镜片、浸没液体以及光刻胶的折射率应该足够大。这三种材料的最小折射率值决定了实际可达到的最大张角的正弦值。

在 193nm 波段，超纯水的折射率为 1.44。超纯水不仅不吸收该波长的光，而且不会影响光刻胶的性能。这些特点使得水成了先进 DUV 光刻系统的理想浸没液体。水几乎具备实现浸没式光刻的最佳光学特性。这是一个工程上的偶然发现，非常

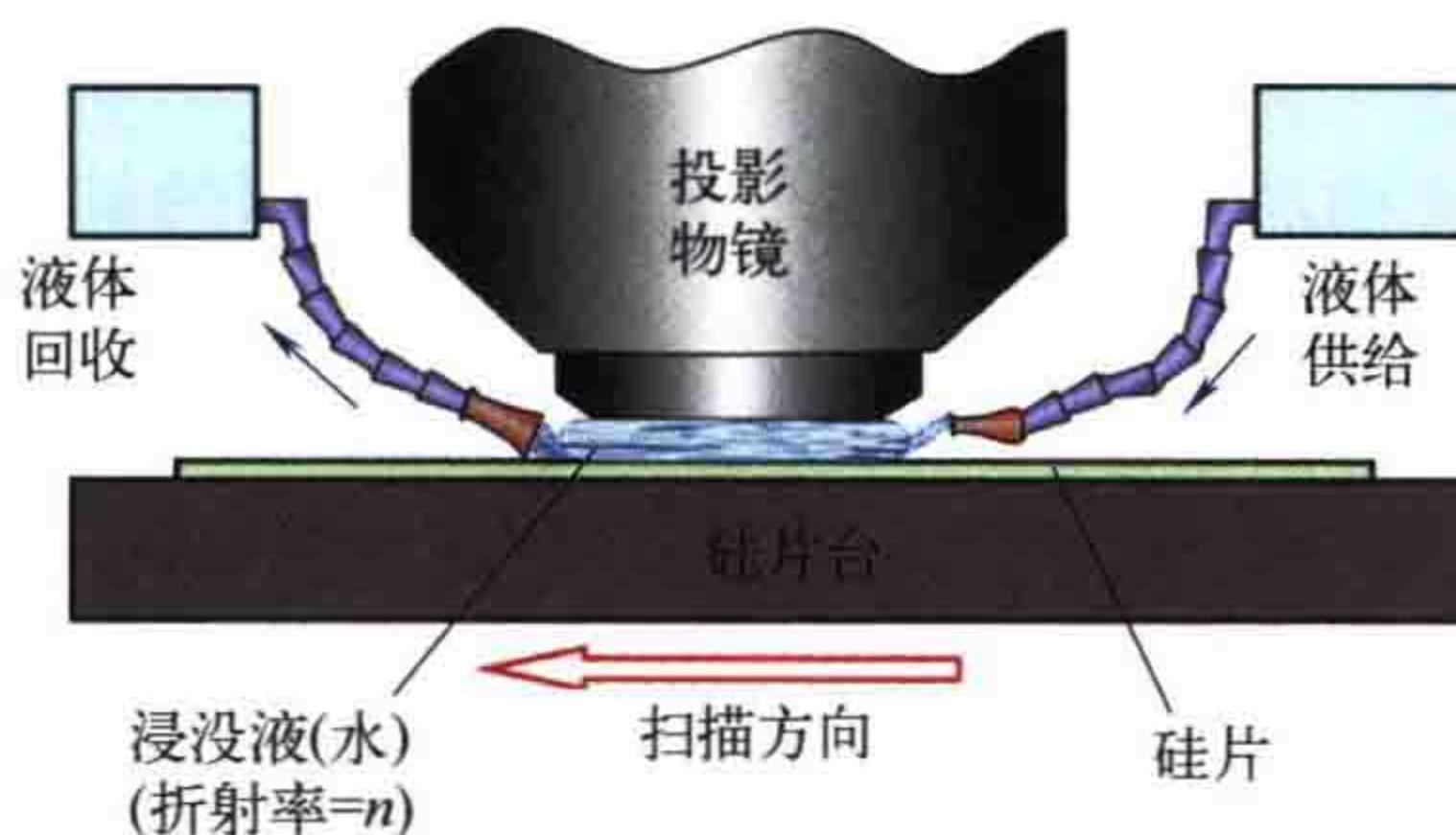


图 2.17 浸没式光刻系统示意图。改编自参考文献 [20]

少见。利用水作为浸没液体，数值孔径可以高达 1.35。历史上也曾经尝试过其他高折射率浸没液体，但没有找到吸收率足够低且化学兼容性良好的液体，而且投影系统最后一片镜片所需的高折射率材料也无法及时交付。因此，目前没有把  $NA>1.35$  的超高 NA 浸没式光刻作为下一代候选光刻技术。

**减小工艺因子  $k_1$** ：通过减小工艺因子  $k_1$  可以进一步减小最小线宽。在整个 20 世纪 90 年代，人们普遍认为  $k_1$  需要大于 0.7。图 2.18 为对一个设计图形进行仿真得到的空间像与印迹。当  $k_1>0.6$  时，空间像差不多可以是物体的正确复制。随着  $k_1$  的减小，像变得越来越模糊。空间像对比度（局部）大大降低。在给定位置，空间像的强度受其邻近图形的影响，即产生了光学邻近效应。光学邻近效应对空间像的影响很大。可以观测到目标图形和成像印迹之间的偏差越来越大，特别是在线端和

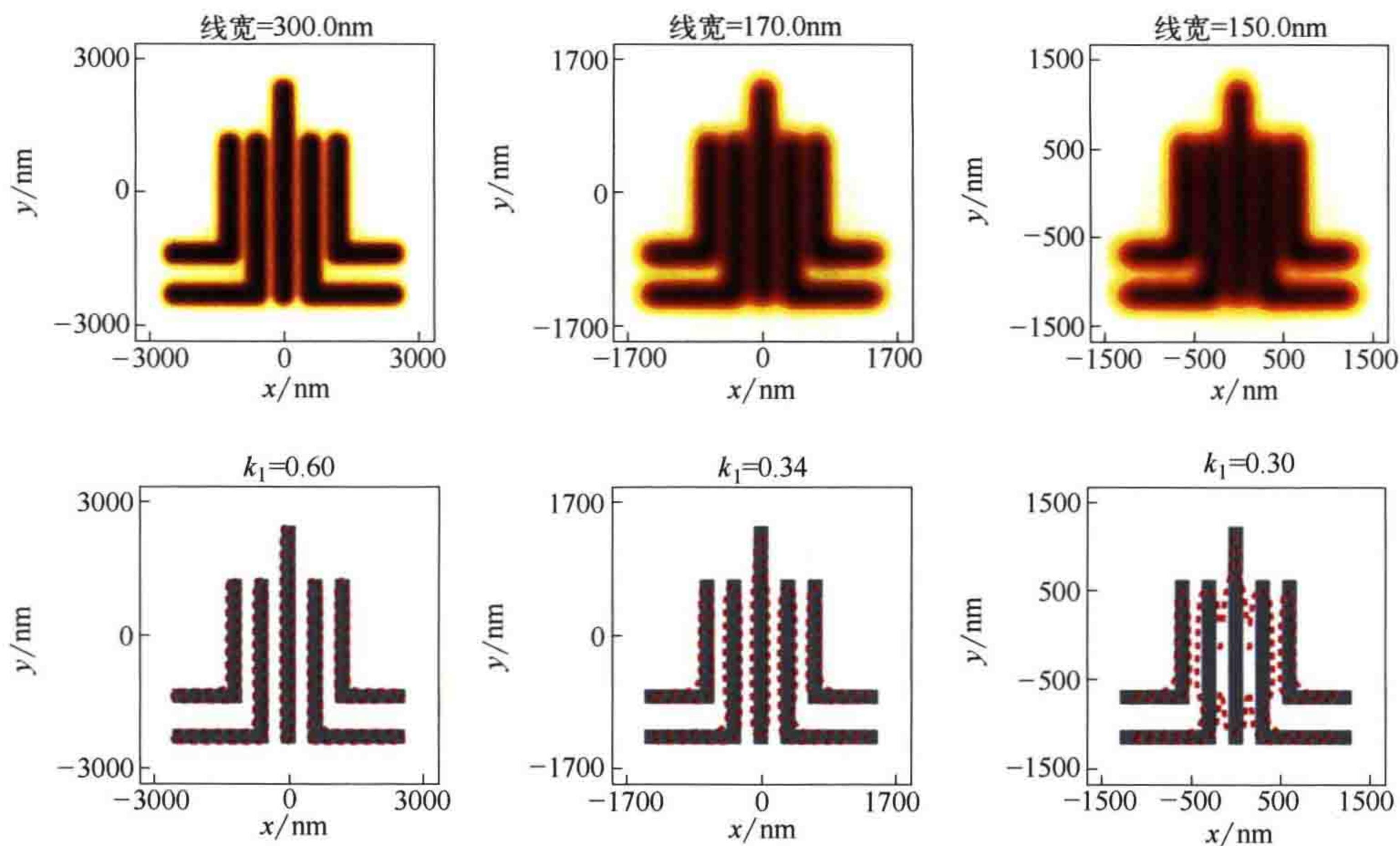


图 2.18 光学邻近效应示例。第一行：空间像。第二行：掩模 / 目标版图（灰色）和模拟的印迹边缘（虚线）。线宽和  $k_1$  从左到右分别为：300nm, 0.60；170nm, 0.34；150nm, 0.3。其他成像参数： $\lambda=248\text{nm}$ ,  $NA=0.5$

拐角位置。孤立图形与位于密集图形区域的图形的光刻成像结果存在差异。已开发了不同的方法来抵消这种对比度损失和与目标图形之间的偏差。第 4 章讨论了几种实现低  $k_1$  光刻的光学分辨率增强技术。为将  $k_1$  缩小至 0.25 以下，开发了专用于双重图形技术的光刻胶材料和工艺。

## 2.4 总结

光刻投影系统是最先进的光学系统之一，其主要参数为工作波长和数值孔径 (NA)。为了可以每小时曝光 200 片以上硅片，现代 DUV 步进扫描投影光刻机采用的缩放倍率为  $4 \times$ 、像场大小为  $33\text{mm} \times 26\text{mm}$ 。

采用傅里叶光学理论描述光刻投影系统：投影物镜入瞳处的衍射谱为掩模透射光的傅里叶变换。衍射谱乘以由系统数值孔径、离焦量和波像差决定的光瞳函数，再经过傅里叶逆变换得到空间像。

光刻投影系统的照明系统为空间部分相干的科勒照明。在这种照明方式下非相干光从不同方向照明掩模。

阿贝 - 瑞利准则决定了最小可分辨线宽和焦深 (DoF)，定义了成像系统的主要特征。

当特征尺寸接近或者小于曝光波长时会产生对比度损失、拐角圆化、线端缩短等现象。图形成像结果受其周围图形的影响。先进光刻技术必须考虑成像的非线性效应和邻近效应。

## 参 考 文 献

- [1] G. H. Spencer and M. Murty, “General ray-tracing procedure,” *J. Opt. Soc. Am.* **52**, 672–678, 1962.
- [2] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, Roberts & Company Publishers, Greenwood Village, Colorado, 2005.
- [3] A. Erdmann, T. Fühner, P. Evanschitzky, V. Agudelo, C. Freund, P. Michalak, and D. Xu, “Optical and EUV projection lithography: A computational view,” *Microelectron. Eng.* **132**, 21–34, 2015.
- [4] A. Köhler, “Ein neues Beleuchtungsverfahren für mikrophotographische Zwecke,” *Zeitschrift für wissenschaftliche Mikroskopie und für Mikroskopische Technik* **10**, 433–440, 1893.
- [5] D. G. Smith, “Illumination in microlithography,” *Proc. SPIE* **9293**, 92931G, 2014.

- [6] H. H. Hopkins, “On the diffraction theory of optical images,” *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* **217**, 408–432, 1953.
- [7] D. G. Flagello and D. G. Smith, “Calculation and uses of the lithographic aerial image,” *Adv. Opt. Technol.* **1**, 237–248, 2012.
- [8] Y. C. Pati, A. A. Ghazanfarian, and R. F. Pease, “Exploiting structure in fast aerial image computation for integrated circuit patterns,” *IEEE Trans. Semicond. Manuf.* **10**, 62, 1997.
- [9] N. B. Cobb, *Fast Optical and Process Proximity Correction Algorithms for Integrated Circuit Manufacturing*. PhD thesis, University of California at Berkeley, 1998.
- [10] K. Yamazoe, “Computation theory of part coherent imaging by stacked pupil shift matrix,” *J. Opt. Soc. Am. A* **25**, 3111, 2008.
- [11] C. C. P. Chen, A. Gurhanli, T.-Y. Chiang, J.-J. Hong, and L. S. Melvin, “Abbe singular-value decomposition: Compact Abbe’s kernel generation for microlithography aerial image simulation using singular-value decomposition method,” *J. Vac. Sci. Technol. B* **26**(6), 2322–2330, 2008.
- [12] L. Rayleigh, “On the resolving power of telescopes,” *Philisophical Magazine* **10**, 116–119, 1880.
- [13] E. Abbe, “Beiträge zur Theorie des Mikroskops und der mikroskopischen Wahrnehmung,” *Archiv für Mikroskopische Anatomie* **9**, 413–468, 1873.
- [14] E. van Setten, J. McNamara, J. van Schoot, G. Bottiglieri, K. Troost, T. Fliervoet, S. Hsu, J. Zimmermann, J.-T. Neumann, M. Roesch, and P. Graeupner, “High-NA EUV lithography: The next step in EUV imaging,” *Proc. SPIE* **10809**, 2018.
- [15] T. A. Brunner, N. Seong, W. D. Hinsberg, J. A. Hoffnagle, F. A. Houle, and M. I. Sanchez, “High numerical aperture lithographic imagery at Brewster’s angle,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **1**(3), 188, 2002.
- [16] A. K.-K. Wong, “Microlithography: Trends, challenges, solutions, and their impact on design,” *IEEE Micro* **23**(2), 12–21, 2003.
- [17] A. K.-K. Wong, *Resolution Enhancement Techniques in Optical Lithography*, SPIE Press, Bellingham, Washington, 2001.
- [18] H. Kinoshita, R. Kaneko, K. Takei, N. Takeuchi, and S. Ishihara, “Study on x-ray reduction projection lithography (in Japanese),” in *Autumn Meeting of the Japan Society of Applied Physics*, 1986.
- [19] A. M. Hawryluk and L. G. Seppala, “Soft x-ray projection lithography using an x-ray reduction camera,” *J. Vac. Sci. Technol. B* **6**, 2162, 1988.
- [20] S. Owa and H. Nagasaka, “Advantage and feasibility of immersion lithography,” *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **3**(1), 97–103, 2004.

# 3 章 ➤

## 第 3 章 光刻胶

第 2 章描述了空间像成像的基本原理。第 8 章和第 9 章将进一步讨论波像差、高数值孔径成像系统的偏振效应、掩模与硅片形貌对光的散射等方面的内容。光刻成像的目的是将空间像或像的强度分布转换为微纳结构。这些微纳结构由不同的材料或具有空间调制特性的材料构成。通过专用的光学与工艺技术调节光刻胶的溶解度可对材料进行空间调制。利用光刻胶的非线性特性，把低对比度、平滑的空间像光强分布转化为边缘接近垂直的二元轮廓。

1.4 节介绍了光刻胶成像的基本工艺流程。本章概述典型光刻胶材料及其在各个工艺步骤中发生的物理化学变化。内容包括比较重要的几类光刻胶的物理建模方法，以及计算光刻中广泛使用的光刻胶紧凑型模型。本章最后一部分将比较负性和正性光刻胶以及光刻胶工艺。

为了将光学像准确地转移到基底表面形成图形，光刻胶需要满足如下要求：首先，应当具备足够高的分辨率，光刻胶的分辨率或可以实现的特征尺寸受限于分子扩散、材料非均匀性与机械稳定性等因素；为满足半导体制造高产率的需求，光刻胶还需具备较短的曝光时间和较高的剂量灵敏度；在曝光波长下光刻胶的透过率应该足够高，否则光刻胶底部将无法被曝光；为了在显影后可以得到光刻胶图形，光刻胶还要能够吸收一定量的光能，以触发光化学反应；为了降低光刻胶轮廓对曝光剂量或离焦量变化的灵敏度，一款好的光刻胶还应该具备较高的对比度；此外，合理的光刻胶图形转移线性度有利于降低与光刻胶有关的邻近效应，进而降低它们对光学邻近效应修正的影响，参见 4.2 节。

光刻胶还需要满足工艺和材料兼容性的需求。为了在硅片上沉积均匀的光刻胶薄层，需要将光刻胶材料与适当的溶剂混合，形成黏度适当的溶液。光刻胶薄膜与硅片之间需要具有良好的黏附性。光刻胶需要具有足够的耐热性，以避免在烘焙过程中发生回流（仅有某些特殊工艺需要回流）等有害效应。光刻胶应足够坚固，能阻止来自基底或所处环境的化学组分扩散至其内部。此外，还必须避免光刻胶中化学组分释放的气体污染投影系统的光学元件。根据在光刻后工艺步骤中的用途不

同，光刻胶还需要满足其他要求。光刻胶常常被用作干法刻蚀工艺的掩模，将光刻胶图形转移到其下面的材料中，这时光刻胶需要具有足够的耐蚀性。光刻胶（抗蚀剂）这个术语也是由抗刻蚀能力派生而来的。离子注入、剥离或回流等图形化工艺，还要求光刻胶具有特定的化学和物理性质。

这些要求只能通过对光刻胶材料进行巧妙的化学设计并结合优化的工艺技术来实现。现在所有的光刻胶都是多组分化合物，这些组分包括成膜树脂、溶剂、敏化剂、光引发剂，以及猝灭剂碱、表面活性剂、稳定剂等添加剂和相关化学品。利用光引发、热或催化反应对光刻胶溶解度进行空间调制。本章的第一部分概述了不同类型的光刻胶及其基本化学成分、反应路径；介绍了一种简单的唯象模型，该模型可以表征曝光系统和光刻胶对表面轮廓的影响。第二部分详细讨论了相关的工艺步骤和半经验建模方法。其余部分概述了用于 OPC、负性光刻胶材料和工艺建模的紧凑型光刻胶模型。

## 3.1 光刻胶概述、常见反应机制与唯象描述

### 3.1.1 光刻胶的分类

不同光刻胶的极性、厚度、光学性质、化学组分和对入射光的反应机制都各不相同。曝光后，正性光刻胶（正胶）的溶解度会升高，负性光刻胶（负胶）的溶解度会降低。化学显影过程中，光刻胶中溶解度较高的部分被显影掉，保留下来的光刻胶充当刻蚀或掺杂等工艺的掩模。

图 3.1 比较了正胶工艺和负胶工艺的流程。两种工艺的起点都是光刻胶旋涂和第一次烘焙。第一次烘焙也常被称为涂胶后烘（PAB, post-apply bake）或前烘。曝光和曝光后烘焙（PEB, post-exposure bake）会改变光刻胶曝光区域的溶解度。根据光刻胶的极性，化学显影冲洗掉光刻胶的曝光部分（正胶）或未曝光部分（负胶）。留下的光刻胶充当选择性刻蚀、注入、沉积等其他工艺的掩模，最后光刻胶被剥离掉。由正胶或负胶工艺形成的图形彼此互补。

可以根据不同的机制改变光刻胶在显影液中的溶解度（参见参考文献 [1]），常见机制如下。

**改变极性：**大多数现代光刻胶体系都包含一个可以改变极性的官能团。重氮萘醌（DNQ）光刻胶适用的波长范围在 350nm 和 450nm 之间，通过光诱导将不溶于碱的分子转化为可溶于碱的分子（见参考文献 [2]）。最先进的正性化学放大光刻胶（CAR）采用酸催化的脱保护反应将亲脂（吸脂或疏水）聚合物基团转化为亲水基团<sup>[3]</sup>。更多关于这两类光刻胶的细节将在后续两个小节中讨论。

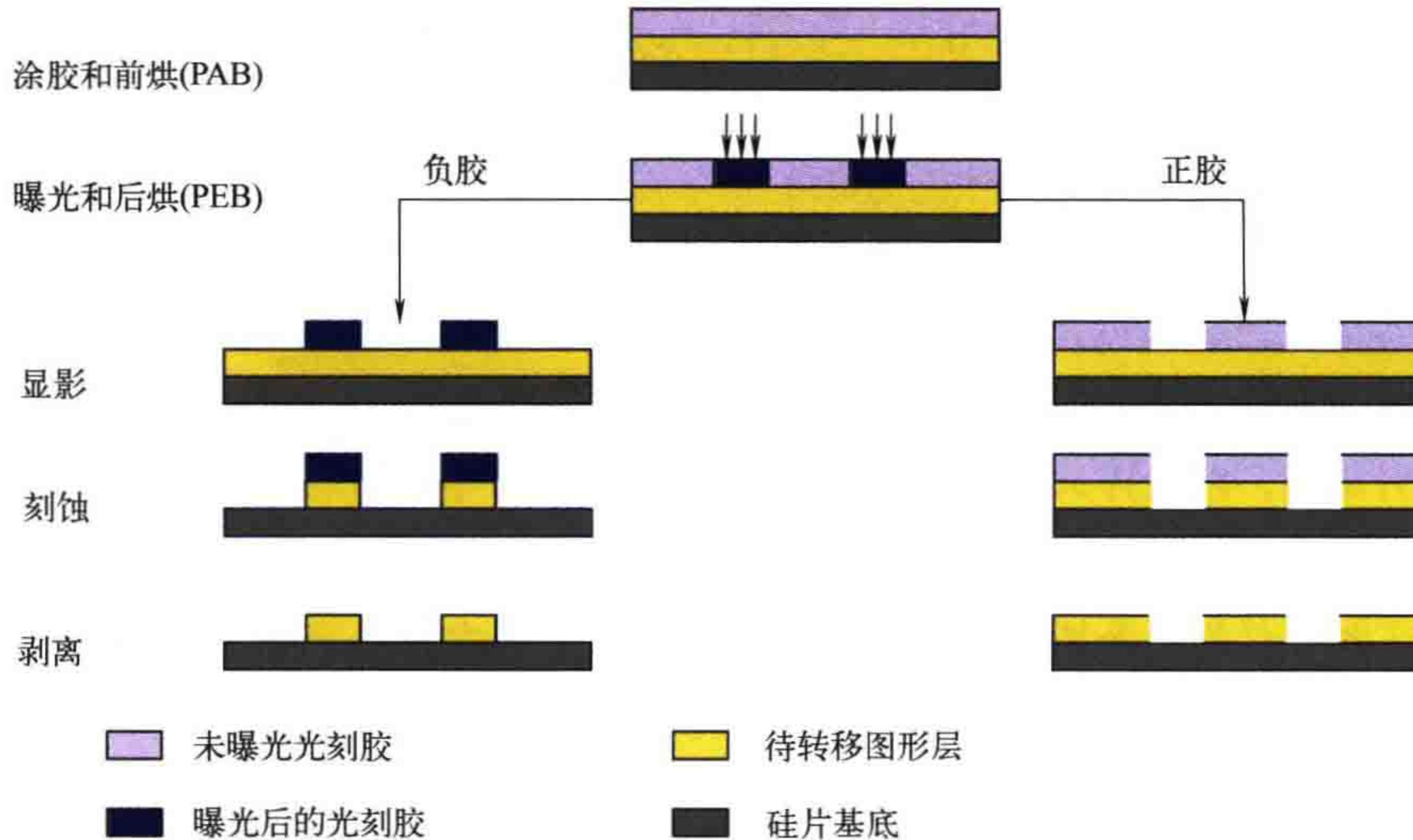


图 3.1 正胶 (右侧) 和负胶 (左侧) 光刻工艺流程示意图

**聚合与解聚：**光引发的分子间反应可以生成或破坏聚合物的长链。大多数光刻胶体系都利用光引发剂来激活官能团的聚合反应。在光刻胶材料中加入猝灭剂分子可控制聚合反应的扩散。单体的聚合和解聚反应会影响材料的平均分子量和溶解度。自由基聚合光刻胶常用于激光直写光刻<sup>[4]</sup>（参见 7.2.2 节）。SU-8 光刻胶是一种典型的负性聚合材料<sup>[5]</sup>。SU-8 在紫外光谱范围内的透过率很高，适用于厚胶工艺，特别是在微机电系统（MEMS）、微型光学和微流控中的应用。不过，许多基于聚合反应的负胶工艺都存在膨胀问题。早期的光化学放大胶也曾应用了解聚反应，参考文献 [6] 给出了一些示例。

**交联：**经辐射产生的活性物质触发，线性聚合物链之间可生成键，发生交联。交联改变了不同区域的分子大小，并影响聚合物材料的平均分子量。生成的聚合物三维网状结构被称为凝胶。需要一定的曝光剂量才能够启动凝胶化过程，该曝光剂量即胶凝点。光诱导的凝胶化反应会降低材料的溶解度。氢倍半硅氧烷（HSQ）就是这种类型的光刻胶<sup>[7]</sup>。与许多基于聚合反应的负胶不同，这种光刻胶不会膨胀。

**主链断裂：**在 250nm 以下的波长范围内，光子 / 粒子的能量超过了光刻胶 C—C 键的结合能<sup>[1]</sup>。因此可以利用光致主链断裂提高光刻胶在曝光区域的溶解度。以聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）为例，虽然它的分辨率很高<sup>[8]</sup>，但是耐蚀性和灵敏度较差，限制了这种材料的使用空间。基于链断裂的正性光刻胶还有很多，例如聚丁烯砜（PBS）、砜 - 酚醛树脂体系（SNS）和聚氯丙烯酸酯 - $\alpha$ - 甲基苯乙烯共聚物（ZEP）等，这些材料常用于电子束光刻。

**光致异构化：**可以采用光激发的方式触发异构体之间的结构转换。异构体为对应每种元素的原子数相同但排列不同的分子。对偶氮类聚合物的最新研究表明，光

致异构化在纳米图形技术中的应用存在几种新的切入点，特别是在光子应用方面<sup>[4,9]</sup>。偶氮类聚合物的结构变化对入射光的偏振态十分敏感，有可能成为实现偏振敏感型光刻胶的技术途径。

**光掺杂：**该技术采用了硫系玻璃薄膜（如  $\text{As}_2\text{S}_3$ 、 $\text{Ge}_x\text{Se}_{1-x}$ ）及其顶部的含金属（如 Ag、AgCl 等）薄膜组成的双层体系。对金属膜的部分区域进行曝光，产生光致金属迁移，金属会迁移到硫系玻璃中。金属的迁移提高了硫系玻璃在碱性溶液中的溶解度。利用这一现象可以实现高精度正性图形转移<sup>[10]</sup>。金属从未曝光区域向曝光区域的横向扩散和光漂白可以进一步锐化图形边缘、提高对比度<sup>[11, 12]</sup>。但是光掺杂时发生金属离子和原子污染的风险很高，而且一些硫族化合物光刻胶有剧毒。

光刻胶可以被化学放大（或不放大）。化学放大光刻胶被曝光后会产生催化剂，催化剂作用于周围的分子，引发级联反应或引发改变光刻胶溶解度的连锁反应（定义改编自参考文献[1]）。化学放大提高了光刻胶对入射光的灵敏度。所有曝光波长为 248nm 和 193nm 的标准光刻胶都是化学放大光刻胶（参见 10.4 节中关于新型光刻胶材料的评论，这些新材料提高了线边粗糙度和其他指标）。

本书不会全面地介绍光刻胶的化学特性和原理，也没有对特定的光刻胶进行详细讨论。对光刻胶化学细节感兴趣的读者可参考文献[1, 2, 6, 13]。

### 3.1.2 重氮萘醌类光刻胶

曝光波长在 350nm 和 450nm 之间的光学光刻使用的绝大多数正胶都是酚醛树脂和重氮萘醌（DNQ）的混合物，参考文献[2, 13]对这些材料进行了详细介绍，其化学结构及主要反应路径如图 3.2 所示。酚醛树脂的环状结构具有良好的耐蚀性，在水性显影液中的溶解度为中等大小。DNQ 是一种溶解抑制剂，可将材料的溶解速率降低两个数量级。曝光富含 DNQ 的酚醛树脂聚合物会触发被称为沃尔夫重排的化学反应。沃尔夫重排将 DNQ 感光结构转化为光解产物，同时消耗水，释放氮气。光解产物增加了光刻胶材料的溶解度，其溶解速率大大高于纯酚醛树脂材料。因此，基于 DNQ 的光刻胶被曝光后，在水性显影液中曝光区域会被冲洗掉。

基于 DNQ 的光刻胶在光刻过程中的化学状态主要由 DNQ 分子的浓度来表征。这些 DNQ 分子提供了光刻胶的光活性成分（PAC），并充当溶解抑制剂。图 3.3 显示了光刻过程中光刻胶的化学状态，图中以 PAC/ 抑制剂的浓度表示这些化学状态。旋涂好光刻胶后，PAC/ 抑制剂均匀地分布在光刻胶内。被光照射后，光刻胶被曝光区域的 PAC/ 抑制剂会分解。PAC/ 抑制剂发生光化学反应后，所得产物通常会降低光刻胶对光的吸收率。利用这种漂白效应可在相对较厚的光刻胶层中形成图形。曝光后烘培（PEB）不会改变光刻胶内 PAC/ 抑制剂分子的总数。但是，PEB 过程

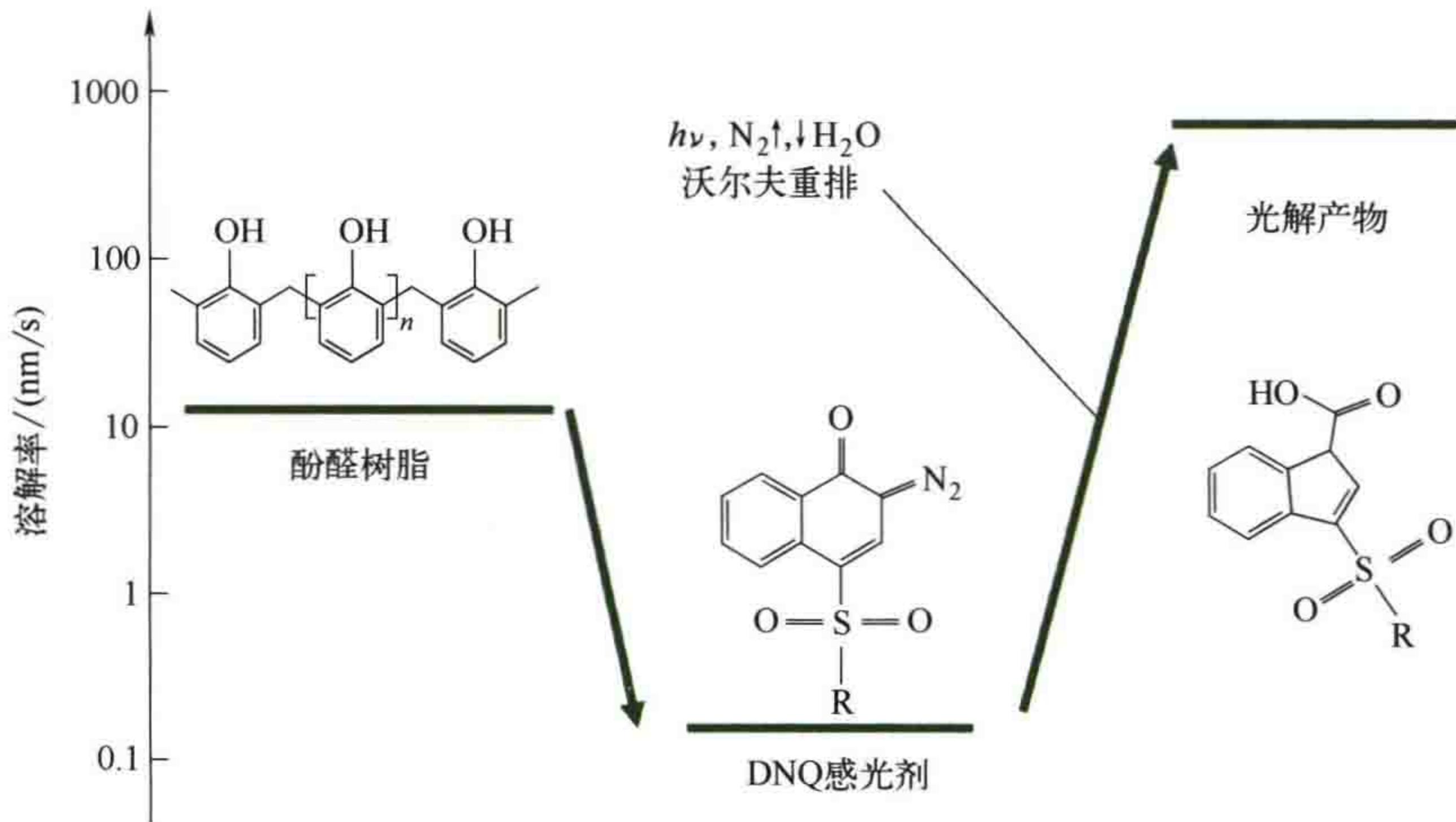


图 3.2 DNQ 光刻胶的化学成分、主要反应路径和溶解度（改编自参考文献 [1, 14]）

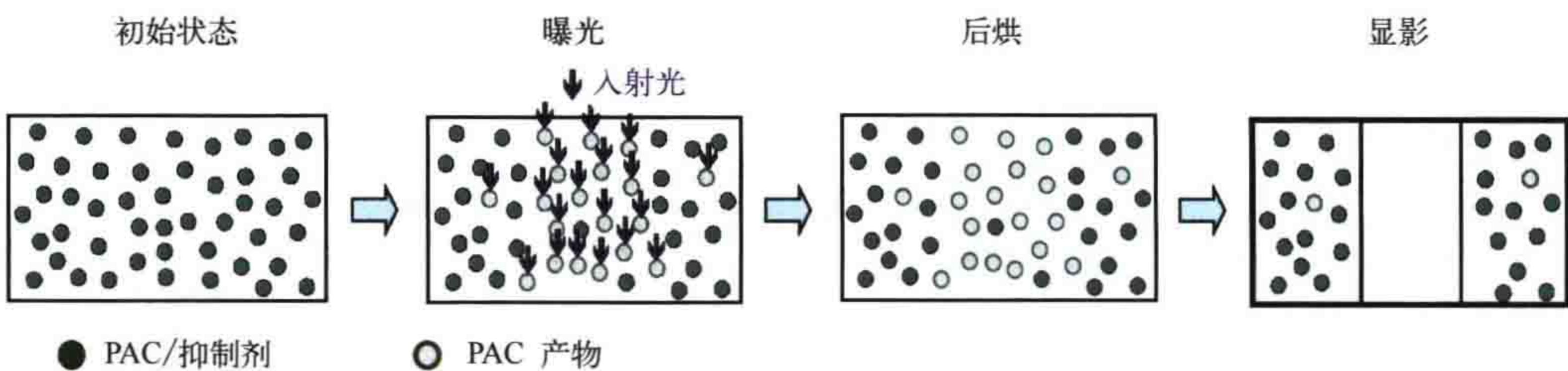


图 3.3 DNQ 型光刻胶工艺原理示意图

中 PAC 分子的扩散会对光刻胶形貌产生重要影响，参见 3.2.3 节。显影后光刻胶中 PAC/抑制剂浓度较小的部分会被去除。

DNQ 型光刻胶对波长小于 300nm 的光会强吸收，造成光刻胶底部曝光不充分。此外，这些材料的灵敏度太低，无法用于 248nm 与 193nm 波长的量产投影光刻。

### 3.1.3 最先进的正性化学放大光刻胶

曝光波长小于 300nm 的 DUV 光刻采用的光刻胶为化学放大光刻胶 (CAR)。典型 248nm 曝光波长的化学放大光刻胶由聚羟基苯乙烯 (PHOST) 基聚合物和鎓盐等分布稀疏的光酸生成剂 (PAG) 组成。光酸生成剂被曝光后会生成光酸。一个光酸分子可以催化多个脱保护反应，从而改变其周围聚合物的溶解度。图 3.4 所示为酸催化脱保护反应的一个例子。

PHOST 等芳香族聚合物对 193nm 波长的透过率不足。因此，ArF 光刻采用 (聚)丙烯酸酯<sup>[15]</sup> 和酯保护脂环聚合物<sup>[16, 17]</sup> 等类型的化学放大光刻胶。

正性化学放大光刻胶的化学状态在光刻工艺过程中的演变过程如图 3.5 所示。在曝光前的初始状态下，高浓度的保护位点均匀分布在光刻胶中。保护位点使得光

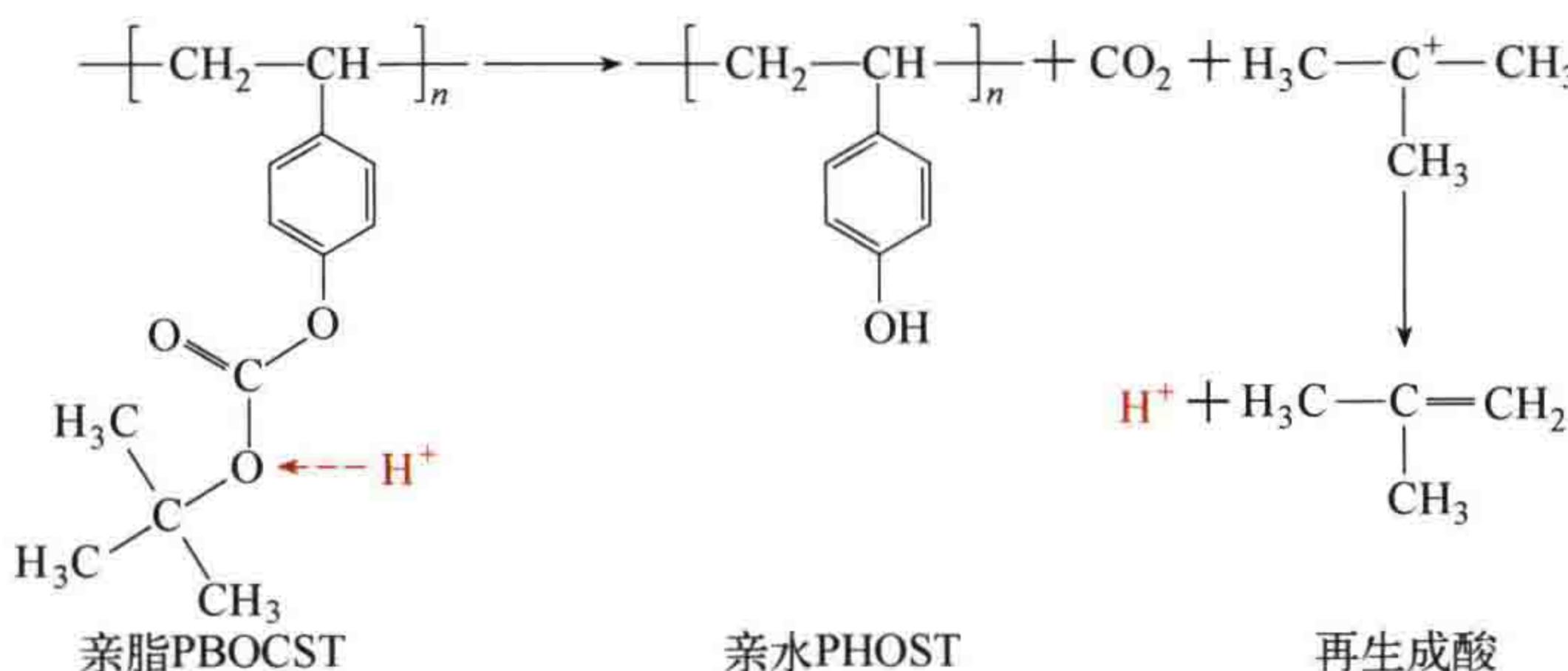


图 3.4 化学放大光刻胶中的酸催化脱保护反应示例。H<sup>+</sup>, 光酸; PBOCST, 聚丁氧羰基苯乙烯; PHOST, 聚羟基苯乙烯。改编自参考文献 [1]

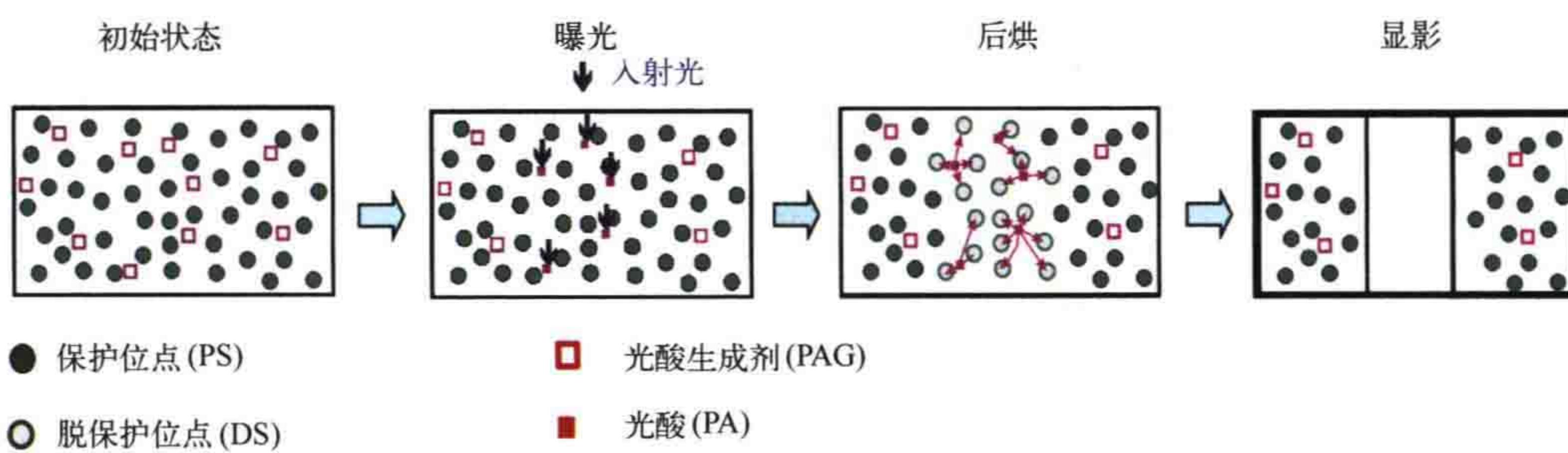


图 3.5 正性化学放大光刻胶工艺原理图

刻胶材料不溶于显影液。此时，光酸生成剂（PAG）稀疏地分布于光刻胶内。入射光子撞击 PAG 后产生光酸，提高了透光区域的光酸浓度。入射光不会直接影响保护位点的浓度。光酸引发催化反应，使与其邻近的保护位点失去保护作用。大多数化学放大光刻胶都是高活化能光刻胶，这些材料的催化脱保护反应只发生在曝光后烘焙工艺中。除了高活化能光刻胶材料之外还存在一些低活化能光刻胶材料，例如缩酮抗蚀体系（KRS）<sup>[18]</sup>。低活化能材料中，脱保护反应不需要通过后烘加热提供能量。显影后，光刻胶中保护位点浓度低的区域被冲洗掉。

化学放大使得材料和工艺对酸浓度的微小变化非常敏感。很小的曝光剂量产生的酸分子就足以改变光刻胶的溶解度。化学放大光刻胶的高光敏性提高了光刻投影系统的产率，即增大了每小时曝光的硅片数量。另一方面，意外污染携带的少量碱基分子会中和光刻胶中的酸，进而对工艺结果产生较大影响。因此，大多数化学放大光刻胶对来自环境的碱污染非常敏感。通过适当的退火处理减少自由体积（光刻胶基体中的空隙）可提高光刻胶的稳定性。IBM 开发的 ESCAP（不受环境影响的化学放大光刻胶）就采用了这种技术<sup>[19]</sup>。

为了解除保护位点的保护，光酸必须在光刻胶内移动一定的距离。光酸的高迁移率使许多保护位点可以脱保护，提高了光刻胶的灵敏度。另一方面，高迁移率意味着扩散，扩散降低了对比度，会限制分辨率。在刚引入化学放大光刻胶时，这些

限制对当时的典型特征尺寸来说不是问题。但在先进光刻技术中，如何平衡灵敏度和分辨率是材料方面的基础问题之一。更多的讨论请参阅第 10 章。

### 3.1.4 唯象模型

特征对比度曲线是表征光刻胶性能的最直接方法。在不同曝光剂量条件下，对

旋涂了一定厚度 ( $d_0$ ) 的光刻胶进行曝光和显影，测量对应于每个曝光剂量  $D$  的剩余光刻胶厚度  $d$ ，获得特征对比度曲线数据。图 3.6 为两种典型正胶的对比度曲线，即剩余光刻胶的相对厚度  $d/d_0$  与曝光剂量  $D$  的对数关系图。最小曝光剂量  $D_0$  即光刻胶完全被去除的剂量 ( $d/d_0=0$ )，称为清除剂量 (dose-to-clear)。当曝光剂量小于清除剂量时，对比度曲线在一定剂量范围内几乎是线性的。以对数

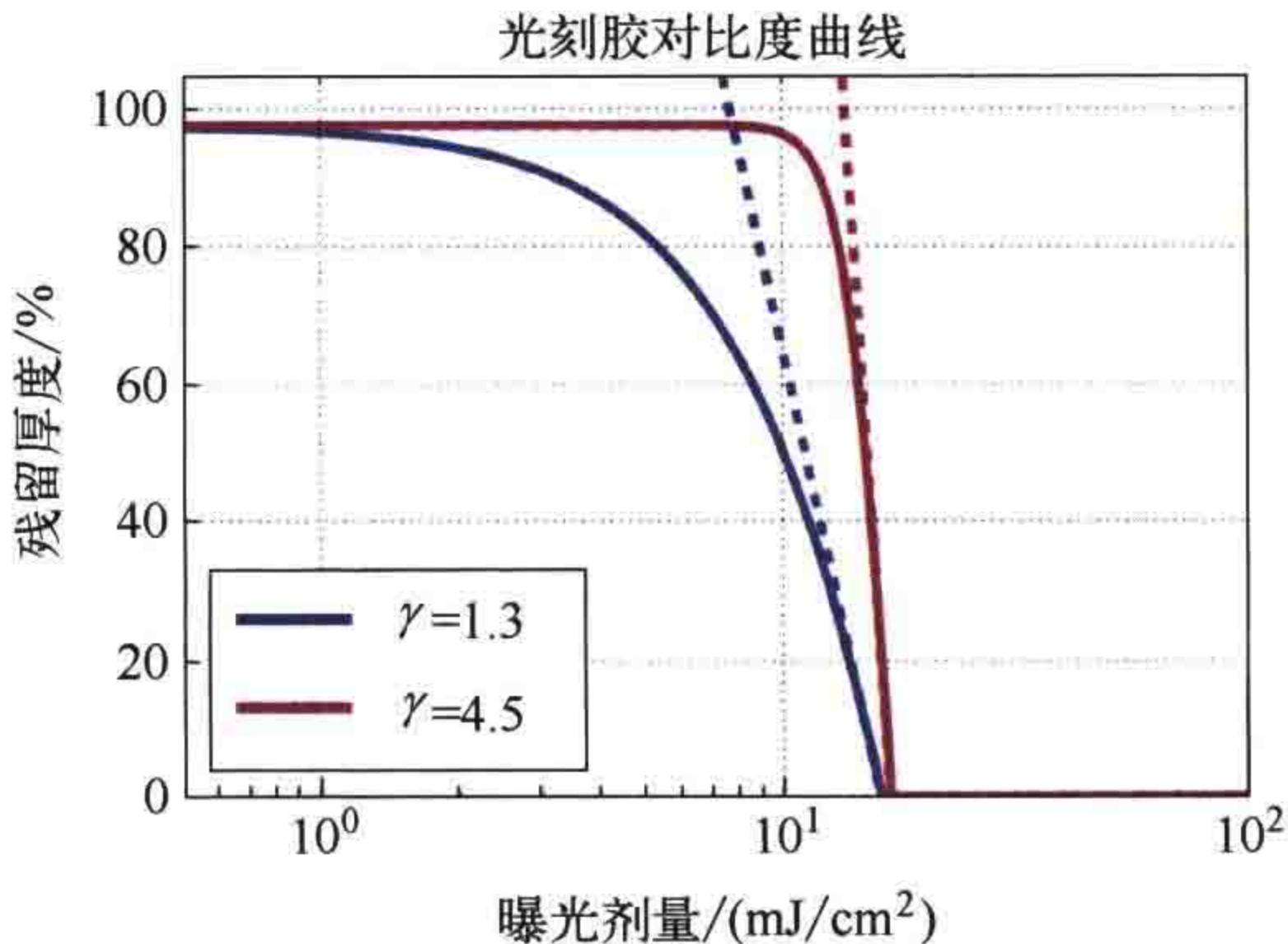


图 3.6 低对比度 ( $\gamma=1.3$ ) 和高对比度 ( $\gamma=4.5$ ) 光刻胶的特征对比度曲线。虚线是特征对比度曲线的线性区

坐标表示曝光剂量，对比度曲线可以写为：

$$\frac{d}{d_0} = \gamma \ln\left(\frac{D}{D_0}\right) \quad (3.1)$$

光刻胶对比度  $\gamma$  表征了在清除剂量附近特征对比度曲线的陡度。当剂量值远小于清除剂量时，两种光刻胶的相对厚度接近 100%；也就是说，光刻胶几乎不受曝光剂量和后续工艺的影响。两条对比度曲线的陡度和对应的  $\gamma$  值不同。参考文献 [20] 的 7.2 节讨论了光刻胶对比度的一些其他定义方式及其优缺点。

曝光剂量是随空间变化的：

$$D(x, y) = t_{\text{exp}} I(x, y) \quad (3.2)$$

式中， $t_{\text{exp}}$  是曝光时间； $I(x, y)$  代表光刻成像系统形成的空间像强度分布。通过使目标图形名义边缘处的局部曝光剂量  $D(x, y)$  接近清除剂量确定出曝光时间。常利用光刻胶特征对比度曲线的线性部分表征名义边缘处光刻胶厚度  $d$  的灵敏度。光刻工艺的最终目标是在目标图形边缘处形成厚度快速变化的光刻胶图形。在标称特征边缘  $x_0$  处，光刻胶厚度的灵敏度可以写成：

$$\left. \frac{\partial d}{\partial x} \right|_{x_0} = \left. \frac{\partial d}{\partial D} \times \frac{\partial D}{\partial x} \right|_{x_0} = -d_0 \gamma \left. \frac{1}{D} \times \frac{\partial D}{\partial x} \right|_{x_0} \quad (3.3)$$

这里用式(3.1)将厚度灵敏度分为两部分:  $d_0\gamma$  表示光刻胶的贡献量, 其余项取决于曝光。第二项可以进一步改写为

$$\frac{1}{D} \times \left. \frac{\partial D}{\partial x} \right|_{x_0} = \left. \frac{\partial \ln D}{\partial x} \right|_{x_0} = t_{\exp} \left. \frac{\partial \ln I}{\partial x} \right|_{x_0} \quad (3.4)$$

将式(1.4)所示的归一化像对数斜率(NILS)代入式(3.3)与式(3.4), 可以得到在宽度为  $w$  的目标图形标称边缘  $x_0$  处的光刻胶厚度变化率:

$$\left. \frac{\partial d}{\partial x} \right|_{x_0} = -d_0\gamma \left. \frac{\text{NILS}}{w} \right|_{x_0} \quad (3.5)$$

为了在目标图形标称边缘获得较大的光刻胶厚度变化, 需要空间像具有较高的 NILS、光刻胶具有较高的对比度  $\gamma$ 。

在整个曝光剂量范围内光刻胶对比度  $\gamma$  不变的假设条件下, Mack 导出了一个集总参数模型。该模型通过空间像强度分布函数  $I(x)$  计算实现特定图形 CD 所需的曝光剂量  $D(\text{CD})$ <sup>[21, 22]</sup>:

$$\frac{D(\text{CD})}{D_0} = \left[ 1 + \frac{1}{\gamma d_{\text{eff}}} \int_0^{\text{CD}/2} \left( \frac{I(x)}{I(0)} \right)^{-\gamma} dx \right]^{\frac{1}{\gamma}} \quad (3.6)$$

式中,  $D_0$  是裸曝光对应的清除剂量。该模型有对比度  $\gamma$  和有效厚度  $d_{\text{eff}}$  两个参数。式(3.6)中积分项的积分区间为从强度最高  $I(0)$  的空间像中心到标称特征图形边缘  $x=\text{CD}/2$ 。利用该集总参数模型, 可从不同焦面位置的空间像横截面图中计算出完整的 Bossung 曲线或焦面-曝光矩阵。该模型的扩展版本还可以预测光刻胶形貌的侧壁角度。

对于目前最先进半导体制造中使用的光刻胶来说, 光刻胶对比度  $\gamma$  恒定的假设是无效的。这些材料在一个很小的曝光剂量范围内表现出很高的对比度, 表现得更像阈值材料。集总参数模型可以预测低对比度光刻胶和较大特征图形的工艺性能。集总参数模型不只对投影光刻有效, 也可以应用于掩模对准光刻或激光直写光刻, 相关内容请见第 7 章。

## 3.2 光刻工艺与建模方法

本节首先在技术层面上介绍几种工艺步骤, 然后介绍曝光、曝光后烘培(PEB)和显影的物理/化学模型, 并利用这些模型研究光刻工艺中的几个重要的效应。其他工艺的模型还不太成熟, 而且在标准的光刻建模中也很少会用到。

### 3.2.1 光刻工艺简介

光刻工艺的第一步是硅片清洗，采用机械或化学方法去除颗粒、污染物和其他缺陷。然后利用六甲基二硅氮烷（HMDS）处理硅片表面，提高光刻胶对硅片上氧化物（二氧化硅）的黏附性。之后，光刻胶被旋涂在硅片上，即旋转涂胶：在硅片上涂上一定量的光刻胶，通过旋转使光刻胶均匀地分布于硅片表面。通过调整涂胶机的转速和光刻胶溶液的黏度来控制光刻胶的厚度。

光刻工艺包含几个烘焙步骤。烘焙可以在热板或对流烘箱中进行，光刻胶较厚时有时也会采用微波烘焙。不同烘焙步骤的目的不同。预烘或前烘（PAB）发生在旋转涂胶之后、曝光之前。预烘的温度通常在  $90 \sim 100^{\circ}\text{C}$ ，以蒸发出用于旋转涂胶的光刻胶溶剂。后烘（PEB）有多个用途。对于大多数化学放大光刻胶，PEB 的作用是启动脱保护反应。此外，化学物质的热扩散有利于提高关键尺寸 CD 的均匀性，增大显影后图形的侧壁陡度。需要注意的是，烘焙过程中的热处理还可以改变光刻胶材料的消光系数、折射率、扩散和力学性能等物理性能。先进工艺需要非常精准地控制不同时刻的温度，常用冷板进行温度控制。

曝光 / 烘焙后的光刻胶与液态显影液（如水性碱溶液）之间的化学反应即为显影。将硅片表面浸入显影液的方法有两种。第一种方法是旋覆浸没式显影，即将显影液滴到硅片 / 光刻胶表面，然后旋转硅片——类似于旋涂光刻胶的过程。第二种方法是将显影液喷洒在硅片上，边喷洒边旋转硅片。可以在几秒内除去曝光区域的正性光刻胶。显影 30s 或 60s 后，显影液与光刻胶之间的反应几乎就停止了。用超净水冲洗硅片并干燥，以确保不会继续显影。

先进光刻工艺中的光刻胶工艺在涂胶显影机上进行。涂胶显影机包括停放未处理硅片或已处理硅片的上下料工位、承接经扫描 / 步进光刻机曝光的硅片的转移工位，以及进行硅片预处理、旋转涂胶、显影和清洗、去边、烘焙和冷却工艺的几个工位。

### 3.2.2 曝光

曝光将光刻投影系统形成的强度分布转换为光刻胶中感光材料化学性质的变化。光子能量的大小决定了入射光能量向光刻胶中转移的物理机制。光刻胶吸收的光子能量如果与其价带能级或外层电子激发能量匹配，即可引发光化学反应。大多数深紫外光学光刻都采用了这种光化学反应，即光刻胶敏化机制。John Sturtevant 等人<sup>[23]</sup> 讨论了 APEX-E DUV 光刻胶的光敏化机制，这是另一种光敏化机制，即光诱导电子从聚合物转移到 PAG 上。用高能光子（例如极紫外光）或粒子（例如电子或离子）进行曝光会形成不同的辐射化学敏化机制。

Dill 模型描述了光学曝光时光刻胶化学性质的变化<sup>[24]</sup>。该模型包括两个方程：

$$\alpha = A_{\text{Dill}}[\text{PAC}] + B_{\text{Dill}} \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial[\text{PAC}]}{\partial t} = -C_{\text{Dill}}I[\text{PAC}] \quad (3.8)$$

第一个方程是从朗伯-比尔定律推导而来，描述了光在光刻胶内传播时被化学组分吸收的过程。 $\alpha$  是含光敏成分（PAC）或者光敏成分的相对浓度为 [PAC] 的光刻胶的吸收系数，它包括可漂白（光敏）成分吸收部分和不可漂白成分吸收部分。将未曝光状态下的光敏成分浓度归一化为 1，则未曝光区域或未漂白区域的吸收系数为  $A_{\text{Dill}}+B_{\text{Dill}}$ 。在充分曝光的区域，PAC 的浓度为 0，光刻胶吸收系数为  $B_{\text{Dill}}$ 。式 (3.8) 描述了 PAC 的一级动力学过程与入射光光强  $I$  的关系。光敏度  $C_{\text{Dill}}$  是光刻胶的另一个基本材料参数。

根据光刻胶类型的不同，PAC 可以是 DNQ 敏化剂、光酸生成剂（PAG），也可以是其他光敏化学成分。现代化学放大光刻胶也可能包含一定量的光漂白猝灭剂<sup>[25, 26]</sup>。有些光刻胶材料供应商会提供这些与波长有关的 Dill 材料参数。Cliff Henderson 的博士论文系统地综述了 Dill 参数和其他典型光刻胶材料参数的测量技术<sup>[27]</sup>。Dill 模型及上述三个材料参数较好地描述了大多数现代光刻胶的光学响应特性。在厚胶情况下，入射光与光刻胶之间的相互作用长度增加，还需要考虑曝光过程中的光致折射率变化<sup>[28, 29]</sup>。特殊的光学材料和曝光技术（例如双光子吸收光刻）还需要考虑高阶动力学项。

Dill 方程中光强和 PAC 的分布通常是位置  $(x, y, z)$  与时间  $t$  的函数。因此方程式 (3.7) 和式 (3.8) 是互相耦合的。PAC 浓度的变化导致吸收率  $\alpha(x, y, z, t)$  空间分布的变化，进而引起光强分布  $I(x, y, z, t)$  发生改变。需要通过迭代方法求解 Dill 方程，而且每次迭代都需要重新计算体像，因此方程的求解非常耗时。标量离焦模型能够将光强和 PAC 的变化在横向  $(x, y)$  和轴向  $(z)$  解耦，可以在实现合理精度的同时高效地对中小 NA ( $\leq 0.7$ ) 投影光刻系统中具有漂白行为的光刻胶曝光过程进行建模。应用于 193nm/248nm 波长的高 NA 光刻中的大多数化学放大光刻胶都没有漂白行为。这种情况下  $A_{\text{Dill}}$  接近于 0，式 (3.8) 可以直接积分为：

$$[\text{PAC}] = \exp(-It_{\text{exposure}}C_{\text{Dill}}) = \exp(-DC_{\text{Dill}}) \quad (3.9)$$

式中， $t_{\text{exposure}}$  和  $D$  分别是曝光时间和曝光剂量。

光向光刻胶耦合的效率高低取决于硅片膜层的材料与结构。如 8.3.3 节所述，光刻胶顶部表面和底部对光的折射和反射影响光刻胶内的光强分布。对不同厚度的光刻胶进行曝光，曝光后 PAC 的浓度以及显影后光刻胶形貌的仿真结果如图 3.7 所

示。硅基底对曝光波长的折射率和消光系数很高，导致了强反射和明显的驻波，驻波干涉图与透光空图形的空间像叠加在一起。叠加后形成的光强分布被转换为 PAC 浓度分布，如图 3.7 第一行所示。颜色较暗的区域表示 PAC 浓度降低。驻波图形中极小值点的数量随光刻胶厚度的增加而增加。

图 3.7 第二行的光刻胶形貌剖面图反映了光刻胶内的干涉现象带来的两个重要后果。驻波的强度分布被转移到具有周期性波纹形貌的侧壁上。耦合到光刻胶中的能量随光刻胶厚度周期性地变化。对于 430nm 和 530nm 厚的光刻胶（图 3.7 最左边与最右边的图），来自光刻胶表面的背反射光与来自光刻胶 / 硅片界面的反射光发生相长干涉。相长干涉增加了硅片膜层的反射光总量。反射光的增加降低了光刻胶内部的光强，从而使光刻胶中形成的空图形变窄。光刻胶厚度介于两者之间时，来自光刻胶表面和光刻胶 / 硅片界面的反射光会发生相消干涉，导致反射光减少，光刻胶内部的能量增加。因此，光刻胶剖面图上的开口略微变宽。在图 3.8 所示的 CD 摆动曲线中也可以观察到光刻胶厚度对光刻图形尺寸的影响，非常明显 [ 见无底部抗反射层 (BARC) 情况下的曲线 ]。

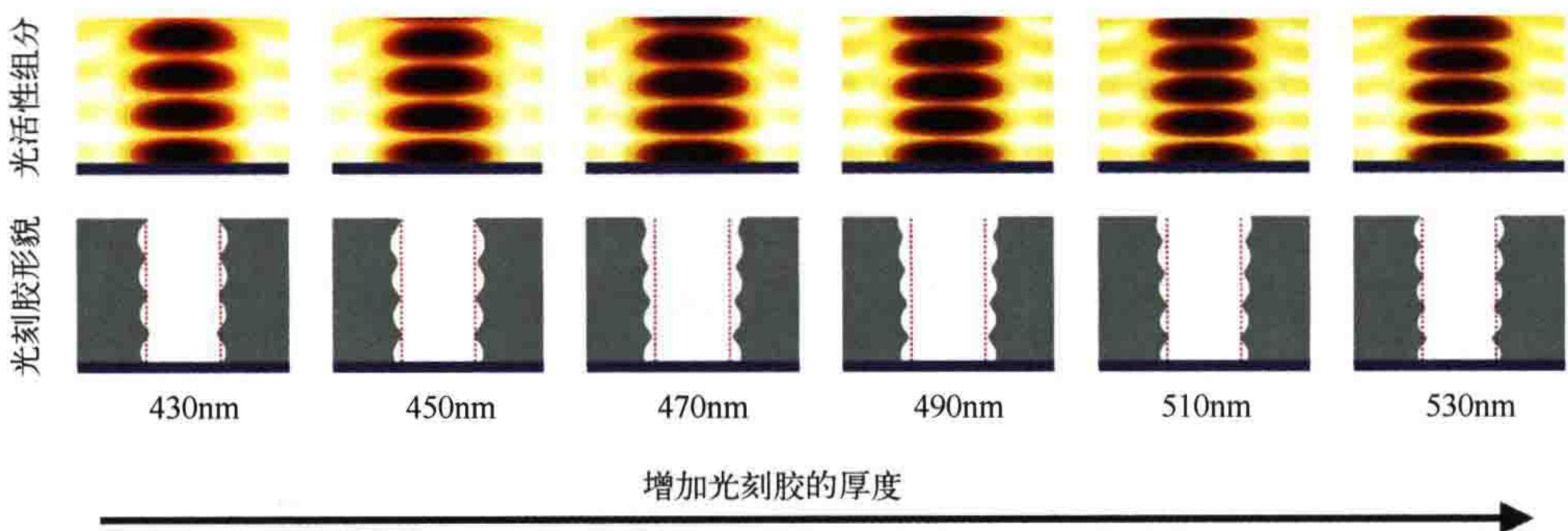


图 3.7 不同光刻胶厚度情况下（从左 430nm 到右 530nm）光敏成分浓度的仿真结果（第一行）及显影后的光刻胶形貌（第二行）。图中显示的是 350nm 宽  $y$  向孤立空图形的  $xz$  截面图。工艺条件： $\lambda=365\text{nm}$ ，曝光剂量  $=218\text{mJ}/\text{cm}^2$ ， $\text{NA}=0.7$ ，圆形照明  $\sigma=0.7$ ，光刻胶折射率  $n=1.7$ ，Dill 参数  $A_{\text{Dill}}=0.68\text{cm}^{-1}$ 、 $B_{\text{Dill}}=0.07\text{cm}^{-1}$ 、 $C_{\text{Dill}}=0.012\text{cm}^2/\text{mJ}$ ，硅基底  $n=6.53$ ，消光系数  $k=2.61$ 。其他工艺和光刻胶参数被设置为最有利于展示所述现象的值

CD 随着光刻胶厚度的变化以及光刻胶侧壁的波纹状形貌都会对工艺的稳定性产生负面影响。影响的大小取决于光刻胶内向上和向下传播的光形成的干涉图的幅度。Tim Brunner<sup>[32]</sup> 用摆动比例  $S$  表征相应的驻波图形。 $S$  的解析表达式为：

$$S = 4\sqrt{R_{\text{top}} R_{\text{bot}}} \exp(-\alpha d) \quad (3.10)$$

式中， $R_{\text{top}}/R_{\text{bot}}$  分别是光在光刻胶上 / 下表面的反射率； $\alpha$  是光刻胶的吸收系数； $d$  是光刻胶厚度。根据式 (3.10)，可以采用如下策略减轻驻波效应及其对工艺稳定性的

影响：

- 降低  $R_{\text{bot}}$ : 在基底和光刻胶之间增加底部抗反射层 (BARC) 可减弱底部反射光，是最有效的摆动效应（驻波效应）抑制方法。图 3.8 中的曲线也表明采用了 150nm 厚的底部抗反射层后，CD 变化量明显减少。BARC 增加了工艺的复杂性。工艺设计阶段需要考虑 BARC 的刻蚀性能，以及它与光刻胶和基底的兼容性。在实际应用中，至少需要增加 BARC 沉积和 BARC 清除等两个工艺步骤。

- 降低  $R_{\text{top}}$ : 顶部抗反射层 (TARC) 位于光刻胶上表面，可降低顶部的反射。虽然 TARC 的抗反射效果没有 BARC 好，但 TARC 容易实施，不需要 TARC 清除工艺。

- 增加  $\alpha$ : 通过染色增加光刻胶的吸收率是另外一种相对有效的摆动效应抑制方法。该方法虽然非常容易实施，但会降低光刻胶的灵敏度、曝光剂量和焦深。

一般仅在垂直入射条件下对底部和顶部抗反射层进行优化。但是这种做法不适用于高 NA 光刻。因为高 NA 光刻中，照射到光刻胶的平面波的入射角范围较大。非平面硅片上 BARC 和光刻胶厚度的变化对反射率控制提出了更多约束。在铜、多晶硅、钨硅化物和铝硅<sup>[33]</sup>等高反射基底上涂覆两层底部抗反射层，反射率可以低于 2%。不能用薄膜领域的标准方法对非平面硅片上 BARC 的性能进行建模，需要对硅片面进行严格电磁场仿真<sup>[34]</sup>。

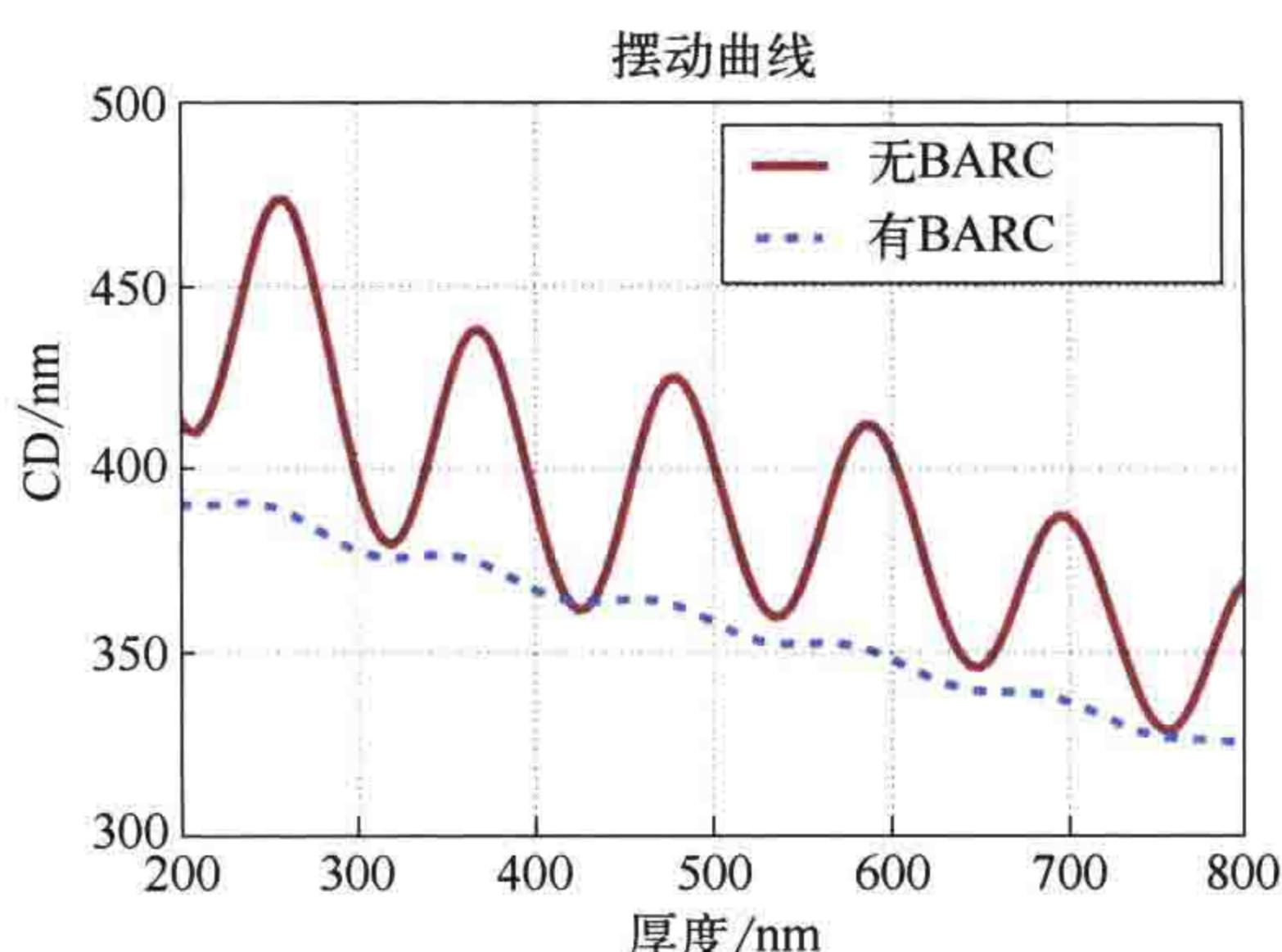


图 3.8 在有无底部抗反射层情况下，光刻胶厚度对孤立空特征尺寸的影响。BARC 参数： $n=1.84$ ,  $k=0.37$ ，厚度为 165nm。其他参数与图 3.7 相同

### 3.2.3 后烘

在曝光后烘焙（即后烘，PEB）过程中，热能转移到光刻胶上，光刻胶内的化学物质发生扩散。此外，光刻胶材料的热活化可以驱动某些动力学反应，影响聚合物的溶解度。光刻胶的扩散特性和动力学特性取决于光刻胶的类型和成分。本节讨论了 DNQ 型光刻胶和化学放大光刻胶的后烘工艺建模方法。

### 3.2.3.1 重氮萘醌光刻胶

采用 Fickian 扩散方程描述浓度为 [PAC] 的光活性组分 (DNQ 分子) 的热扩散:

$$\frac{\partial[\text{PAC}]}{\partial t} = \tilde{D} \Delta[\text{PAC}] \quad (3.11)$$

式中, 符号  $\Delta$  为拉普拉斯算子; 扩散系数  $\tilde{D}$  与 PAC 浓度无关, 取决于残留溶剂的浓度、前烘条件和 PEB 温度  $T_{\text{PEB}}$ 。在一定的温度范围内, 扩散系数可用阿伦尼乌斯公式表示:

$$\tilde{D} = A_R \exp\left(\frac{-E_a}{RT_{\text{PEB}}}\right) \quad (3.12)$$

式中<sup>①</sup>,  $A_R$  为指前因子;  $R$  是通用气体常数。扩散系数  $\tilde{D}$  可以采用扩散长度  $\rho$  和扩散时间  $t_{\text{PEB}}$  来表示:

$$\tilde{D} = \frac{\rho^2}{2t_{\text{PEB}}} \quad (3.13)$$

图 3.9 所示为不同扩散长度情况下的 PAC 浓度和光刻胶形貌。图片最左边的是不存在扩散时的计算结果, 分别对应 PAC 的浓度和没有进行 PEB 的形貌。由于采用了 BARC 层, 所以驻波效应比图 3.7 弱。但残留的 PAC 的浓度在竖直方向上存在变化。显影后, 还是在光刻胶侧壁上形成了波纹图样。扩散长度为 25nm 时, PAC 浓度在竖直方向的变化和光刻胶形貌几乎消失了, 如图中第二列所示。继续增加扩散长度至 50nm (第三列) 和 100nm (最右侧), PAC 浓度的化学对比度降低, 光刻胶侧壁形貌发生改变, 特别是光刻胶顶部的形貌变化更加明显。由这些结果可知, 少量的扩散可以提高光刻胶显影后侧壁形貌的质量。较大的扩散长度会降低化学对比度和工艺稳定性。扩散不会影响耦合进光刻胶中的光的平均强度, 也不会影响图 3.8 所示的 CD 摆动。

### 3.2.3.2 化学放大光刻胶

DNQ 型光刻胶主要以一种化学物质的浓度为特征。与之相比, 化学放大光刻胶 (CAR) 的成像机制与多种化学物质及反应路径有关。其中, 最重要的组分和反应如图 3.10 所示。3.1.3 节已经介绍了 CAR 的光敏组分是光酸生成剂 (PAG)。当 PAG 被光子击中时, 释放出酸 A。这种酸是化学反应的催化剂, 使保护位点 M 脱保护。此外, 化学放大光刻胶含有一定数量的猝灭剂碱 Q, 以减少参与脱保护反应的酸分子的数量。

<sup>①</sup>  $E_a$  为实验活化能。——译注

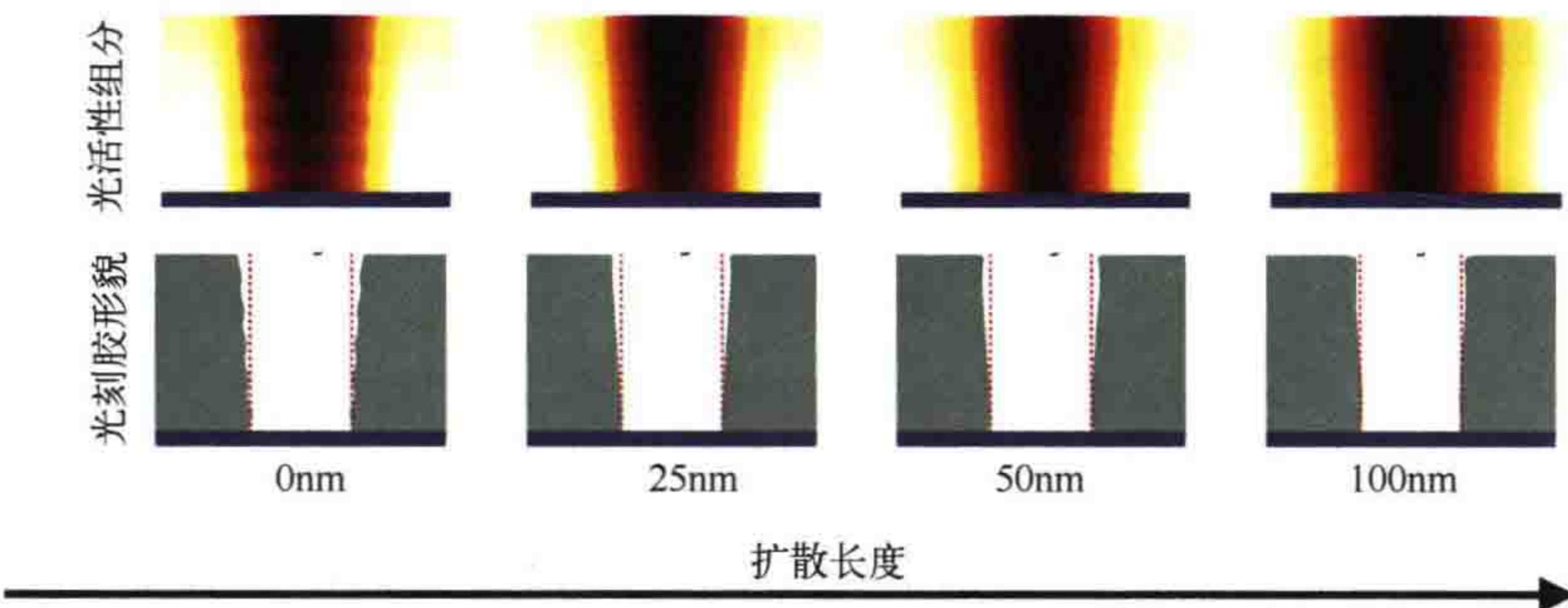


图 3.9 光活性组分浓度的仿真结果 (上) 和相应的显影后光刻胶形貌 (下)。扩散长度 (从左到右为 0nm、25nm、50nm 和 100nm)。图中显示的是 350nm 宽 y 向孤立空图形的 xz 截面图。光刻胶厚度为 590nm, BARC 厚度为 150nm; 其他参数与图 3.7 和图 3.8 相同

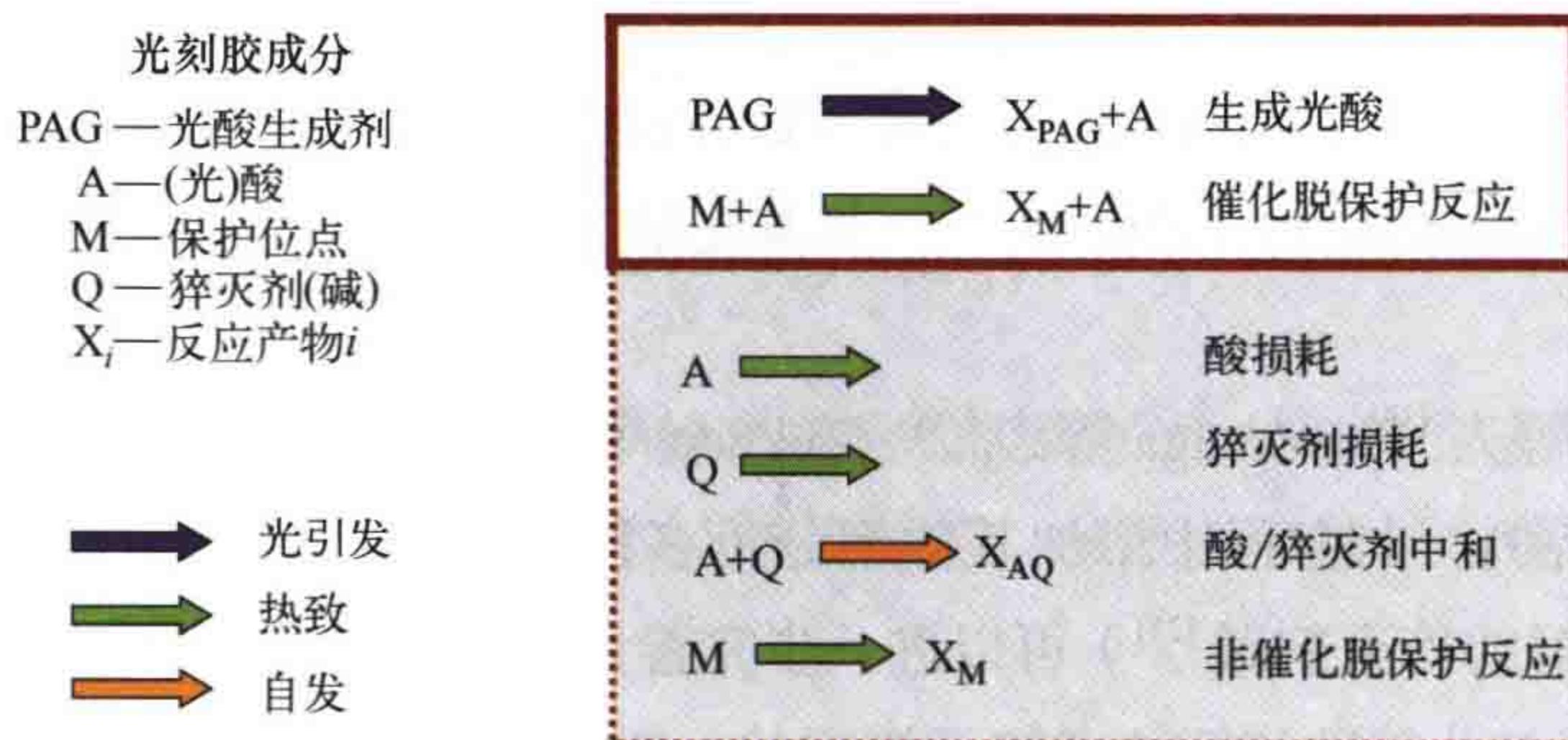


图 3.10 化学放大光刻胶的一般反应机制。光酸的产生和酸催化脱保护反应在上部右侧的线框中显示。光刻胶性能还会受到热致酸和猝灭剂扩散的影响

曝光过程中，在光的作用下会产生光酸。除此之外，化学放大光刻胶的基本成像机制还包括热致脱保护反应与自发放脱保护反应。此外，一些其他的反应也会影响光刻胶的性能。其中最重要的是相邻的酸分子和猝灭剂碱分子之间的中和反应。此外，PEB 时加热光刻胶也会引发脱保护反应。

PEB 过程中的动力学反应常伴随着酸和猝灭剂分子的扩散。这些分子的扩散特性通常取决于光刻胶的化学状态，特别是取决于保护位点的局部浓度高低。可以用非 Fickian 扩散项表征这些扩散特性。 $\tilde{D}_{A,Q}([M])$  分别表示酸 A 和猝灭剂 Q 的非 Fickian 扩散系数。Zuniga 等人已经研究了这种非线性扩散的机制<sup>[35]</sup>。酸的扩散会增加光刻胶灵敏度、降低对比度。酸需要具有一定流动性，可以向多个保护位点移动，进而催化脱保护反应。随着酸的迁移率或扩散率的增加，单个光酸会使更多的保护位点失去保护，进而对光刻胶的溶解度产生更大的影响。因此，较大的扩散系数增加了光刻胶材料的灵敏度。另一方面，组分的扩散降低了化学对比度和工艺裕度。如何有效平衡这些效应是先进光刻胶设计需要解决的重要问题。

基于上述考虑, CAR 的 PEB 动力学和扩散模型可以表示为:

$$\frac{\partial[M]}{\partial t} = -\kappa_1[M]^p[A]^q - \kappa_2[M] \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial[A]}{\partial t} = -\kappa_3[A]^r - \kappa_4[A][Q] + \nabla(\tilde{D}_A([M])\nabla[A]) \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial[Q]}{\partial t} = -\kappa_5[Q]^s - \kappa_4[A][Q] + \nabla(\tilde{D}_Q([M])\nabla[Q]) \quad (3.16)$$

第一个方程描述了相对浓度为  $[M]$  的保护位点的酸催化和自脱保护反应。系数  $\kappa_1$  和  $\kappa_2$  是脱保护反应常数;  $p$  和  $q$  是反应级次, 典型值接近 1。第二个和第三个方程表示酸和猝灭剂(碱)的中和反应与自发损耗(扩散)。方程中包括了非线性扩散项,  $\kappa_3$ 、 $\kappa_5$  及  $r$ 、 $s$  分别是相应反应常数和反应级次。式 (3.14)~式 (3.16) 即为 Henke 和 Torkler 提出的元模型<sup>[36]</sup>。参考文献 [37] 中描述了该模型在计算光刻建模中的应用。

Petersen 等人<sup>[38]</sup>、Zuniga 等人<sup>[39]</sup>、Fukuda 等人<sup>[40]</sup>提出的模型都可以看作是上述元模型的特例。向方程中增加其他组分(多种 PAG、残留溶剂等)与反应路径(例如可光分解的猝灭剂碱<sup>[25]</sup>)可以进一步完善元模型。给定初始条件和边界条件, 需要利用有限差分等数值算法求解元模型的一般式。虽然元模型是一种非常灵活的化学放大光刻胶后烘工艺建模方法, 但确定该模型参数是一项非常有挑战性的工作。在大多数情况下, 这些参数都不能直接测得。因此, 常采用特殊形式的元模型对化学放大光刻胶进行建模。比如假定所有反应级次都为 1。有时可以忽略酸、猝灭剂和保护位点的自发损耗。将扩散假定为 Fickian 扩散( $D_{A,Q}$  为常数)或线性扩散。利用实验数据标定出剩余的模型参数。

图 3.11 为元模型的一种典型应用。改变光刻胶猝灭剂碱的浓度, 研究其对光刻工艺窗口的影响。仿真结果表明猝灭剂总负载对工艺窗口形状和曲线都有较大的影响。它还会影响工艺窗口的曝光剂量大小。较大的猝灭剂浓度需要较高的曝光剂量。调整猝灭剂碱的浓度可以减小与焦面有关的图形 CD 变化。全面系统的材料参数研究可作为新型光刻胶材料实验研究的有益补充。

### 3.2.4 化学显影

光刻胶的溶解速度取决于局部脱保护位点的浓度  $[M]$ 。许多唯象显影模型都给出了  $[M]$  和显影速率  $r$  之间的定量关系。Chris Mack 推导出的模型综合考虑了显影液到光刻胶表面的扩散、显影液与光刻胶的反应、反应产物扩散回光刻胶等过程,

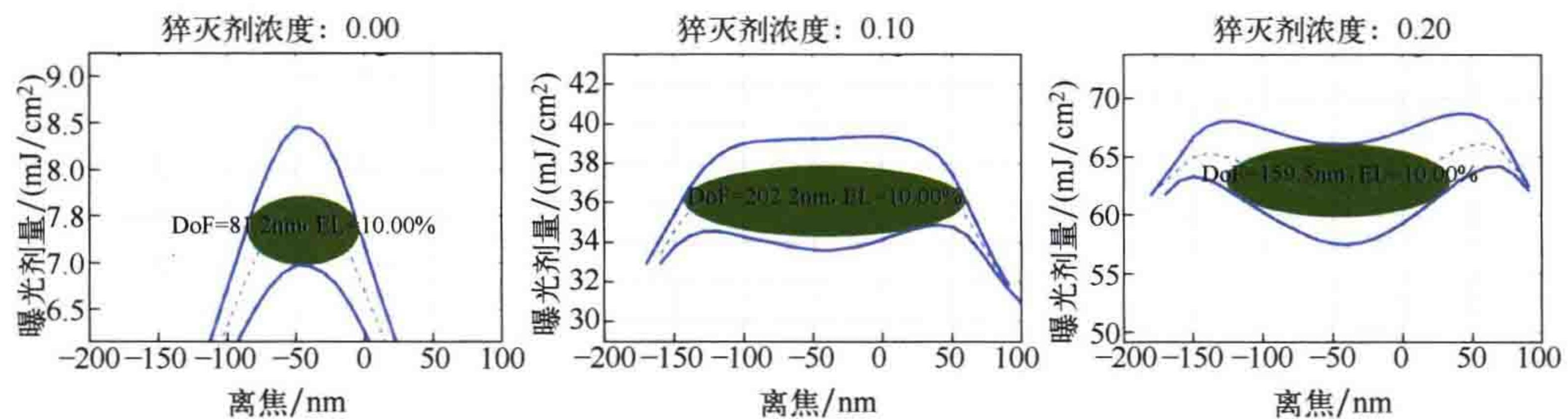


图 3.11 猥灭剂碱浓度(负载)对 60nm 线宽、250nm 周期的线条图形的工艺窗口形状影响的仿真。

仿真条件: ArF 浸没式光刻, NA=1.35, 二极照明, 100nm 厚的化学放大光刻胶。EL: 曝光裕度

得到了如下显影速率模型:

$$r = r_{\max} \frac{(a+1)(1-[M])^N}{a+(1-[M])^N} + r_{\min} \quad (3.17)$$

其中

$$a = \frac{N+1}{N-1} (1-M_{\text{th}})^N \quad (3.18)$$

式中,  $r_{\min}$  和  $r_{\max}$  分别是完全被保护的光刻胶和脱保护的光刻胶的显影速率;  $M_{\text{th}}$  是显影反应刚开始时的抑制剂或保护位点浓度阈值; 参数  $N$  表征显影速率曲线的斜率或陡度大小, 如图 3.12 所示。

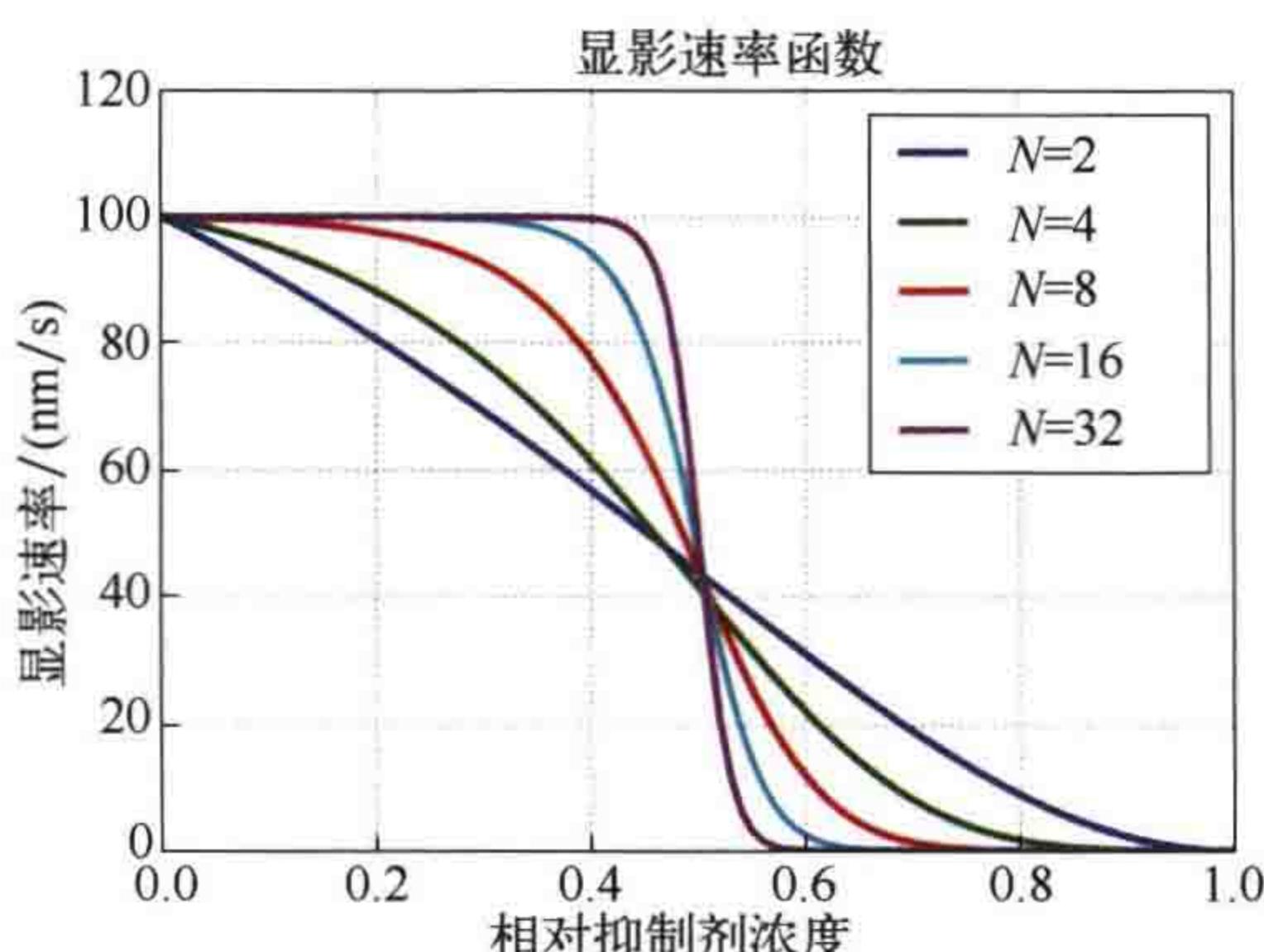


图 3.12 Mack 模型在不同斜率参数  $N$  条件下预测的显影速率曲线。其他参数:  $r_{\min}=0.1 \text{ nm/s}$ ,  $r_{\max}=100 \text{ nm/s}$ ,  $M_{\text{th}}=0.5$

Robertson 等人讨论了几种扩展后的 Mack 模型, 采用不同的光刻胶对这些模型的性能进行了研究<sup>[42]</sup>。这些模型已成功应用于许多先进化学放大光刻胶的建模。

Manfred Weiss 等人提出的有效酸模型可以应用于某些化学放大光刻胶的建模<sup>[43]</sup>。该模型将酸损耗机制和酸催化脱保护反应集总为一种有效酸及其对显影速率的影响:

$$r = r_{\min} + \frac{1}{2} r_{\max} \tanh \left[ \frac{r_s}{r_{\max}} (a_{\text{eff}} - a_0) \right] + \frac{1}{2} \sqrt{\rho_1^2 + r_{\max} \tanh \left[ \frac{r_s}{r_{\max}} (a_{\text{eff}} - a_0) \right]} \quad (3.19)$$

式中，有效酸浓度  $a_{\text{eff}}$  可以从 Dill 模型与后续的酸扩散中得到；除了最小和最大显影速率  $r_{\min}$  和  $r_{\max}$  外，该模型还包括酸阈值浓度  $a_0$ 、速率曲线斜率  $r_s$  和速率曲线在酸阈值附近的曲率  $\rho_1$  等纯拟合参数。虽然式 (3.19) 所示的 Weiss 速率模型是为化学放大光刻胶开发的，但将其与其他模型相结合，已成功应用于 DNQ 型光刻胶建模。

Reiser 与他的同事提出了一种基于渗流理论的 DNQ 光刻胶显影模型<sup>[44, 45]</sup>。该模型描述了显影液与酚醛树脂聚合物的疏水和亲水组分之间的相互作用。显影液不会均匀地扩散进光刻胶中，而是通过在亲水位点之间不断地跳跃和转移而扩散的，这导致了亲水位点簇集的形成。显影液渗透到光刻胶内的状态及光刻胶溶解速率  $r$  可以用渗流参数  $p$  表示：

$$r = c(p - p_0)^2 \quad (3.20)$$

式中， $p_0$  代表渗流阈值； $c$  是比例因子。基于渗流理论进行建模，不仅速率方程的形式简单，而且对某些光刻胶的仿真结果与实验数据吻合得也很好。Motzek 和 Partel<sup>[46]</sup> 成功地将该模型应用在多种掩模对准光刻 DNQ 光刻胶中。

临界电离模型可更详细地描述光刻胶显影过程中发生的物理化学现象<sup>[47, 48]</sup>。该模型假设只有当光刻胶表面聚合物链的脱保护位点超过一定数量时，光刻胶才可溶解。其他显影模型一般都会用到某种分子的浓度和溶解速率之间的经验关系。而临界电离模型可以在分子水平上模拟显影过程。Flanigan 等人将该模型用作连续的分子模型，并讨论了技术实现细节<sup>[49]</sup>。临界电离模型已成功地应用于光刻胶随机效应建模（见第 10 章）。

实验表明显影速率  $r$  随着光刻胶厚度的变化而变化。当光刻胶厚度较大时这一现象更加明显。显影速率在靠近光刻胶表面的位置通常会减小。得克萨斯大学奥斯汀分校（University of Texas at Austin）的肖恩·伯恩斯（Sean Burns）等人<sup>[50]</sup> 对酚醛树脂光刻胶的表面抑制效应进行了详细研究。厚光刻胶层中的材料不均匀性和超薄光刻胶表面引起的效应，也会导致光刻胶溶解速率表现出非线性。

可以将光刻胶的化学显影过程简化为显影液 - 光刻胶界面以给定显影速率  $r(x, y, z)$  演化的过程。这一问题可以用程函方程来描述。Sethian<sup>[51]</sup> 开发的快速行进算法（fast marching method）是一种快速有效的算法，可作为显影模型的实现算法。

图 3.13 显示了不同时刻的光刻胶形貌仿真结果。第一行是没有 BARC 和扩散情况下的仿真结果。PAC 的浓度呈现出明显的驻波现象，如图 3.7 所示。随着显影的进行，界面的演化大部分发生在驻波图形的暗节点上，这些位置的 PAC/ 抑制剂浓度很高，显影速率较低。90s 之后显影液还没有到达光刻胶底部。本书选择了这个带有明显驻波的仿真实例进行说明。应用 BARC 或者扩散长度较大的光刻胶都可以减弱驻波。显影液渗透的速度快很多，通常不到 1s 或几秒就能到达光刻胶的底部，如图 3.13 的第二行所示。实践中，为实现良好的工艺稳定性，通常将显影时间设置在 30 ~ 90s。

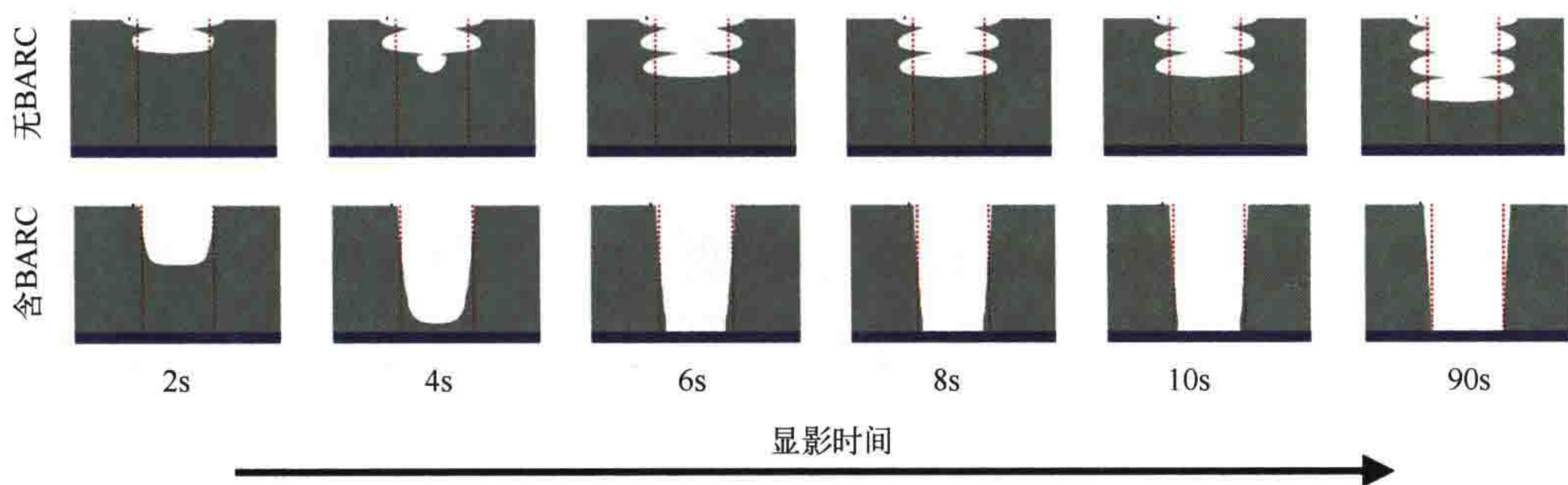


图 3.13 不同时刻光刻胶形貌的仿真结果。第一行：硅片膜层无 BARC，PAC 扩散长度为 5nm。第二行：硅片膜层含 BARC，PAC 扩散长度为 20nm。其他参数与图 3.7 和图 3.8 中的设置相同

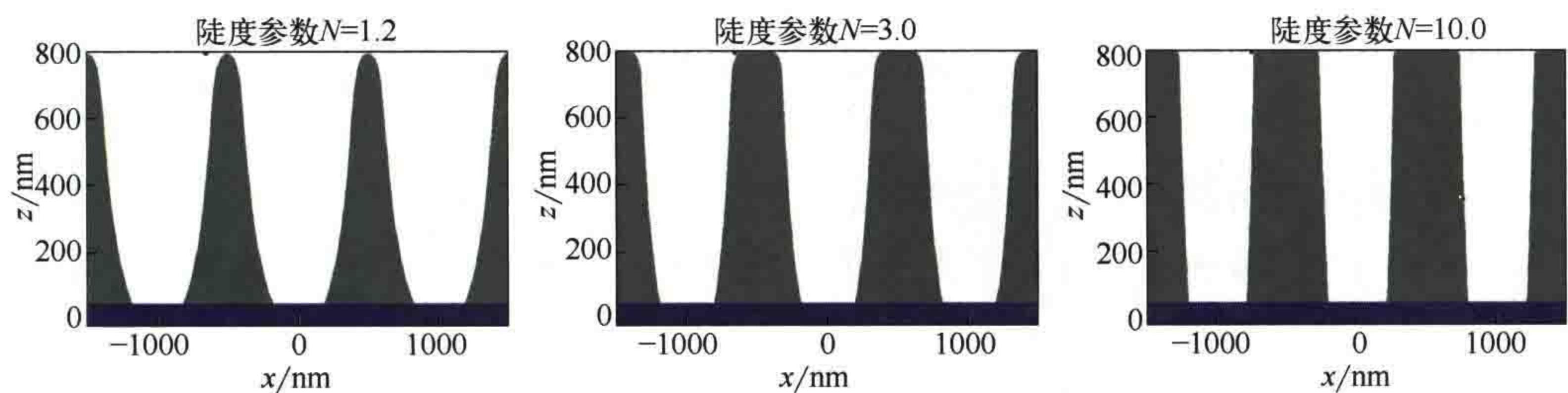


图 3.14 Mack 模型的陡度参数  $N$  对光刻胶形貌影响的仿真结果。采用符合  $\sin^2$  函数的光强分布对光刻胶进行曝光，光强分布图的周期为  $1\mu\text{m}$ ，DNQ 光刻胶的厚度为  $1.5\mu\text{m}$

陡度参数  $N$  对光刻胶形貌的影响如图 3.14 所示。仿真中对曝光剂量都进行了调整，使得显影后光刻胶底部 CD 相同。 $N$  较小时，光刻胶侧壁倾斜得非常明显。随着  $N$  不断增大，光刻胶的行为更像一个阈值检测器，能够产生竖直的侧壁。大多数光刻应用都需要陡峭的侧壁，需要采用  $N$  值较大的光刻胶。 $N$  值较小的光刻胶有利于产生表面变化连续的形貌，适用于灰度光刻，请见 7.4.1 节。

### 3.3 建模方法与紧凑光刻胶模型

通过对光刻胶的物理化学现象进行半经验抽象建模得到了上述光刻胶建模方法。这些方法利用理想的光刻胶模型和相应数学方程描述 CAR 光刻胶（以及 DNQ 型光刻胶）的基本反应机制和现象。将这些模型应用于不同的场景，可定性或定量地研究脱保护动力学、扩散效应和猝灭剂负载对光刻性能的影响。仿真结果是对实验数据和专业知识的有益补充，有助于新型光刻胶材料和工艺的开发。

然而上述模型不能完整地反映光刻胶的分子组分以及它们与显影液相互作用的所有细节，难以高精度地测出动力学反应常数和扩散系数等模型参数，而且这些参数还受工艺条件的影响。发生在光刻胶顶部和底部界面的有关效应越来越重要，需要利用数学公式设置合适的边界条件，这些都增加了模型参数的数量和计算复杂度。标定含有许多未知参数的光刻胶模型需要用到大量的实验数据。需要特别注意一些共性可移植的参数，标定结果须可以方便地适用于其他成像和工艺条件<sup>[52-54]</sup>。

在特征尺寸小于 100nm 的情况下，不能再将光刻胶视为组分分布连续的材料，即光酸浓度、猝灭剂和保护位点浓度都是空间上连续、平滑的物理量。为了解决这个问题，得克萨斯大学奥斯汀分校 Grant Willson 的学生引入了介观尺度光刻胶模型<sup>[49, 55]</sup>。这些模型用聚合物的分子量和分散性、PAG 负载、残余溶剂浓度和聚合物自由体积等直接可测量的量来描述光刻胶，不仅可以仿真（平均）特征尺寸，还能够仿真（线边）粗糙度。关于随机效应的各种成因、大小和影响的讨论，请参见第 10 章。

本节剩余部分将介绍几种软件中常用的紧凑型光刻胶模型。这些模型可以描述一些重要的光刻胶效应，常用于光学邻近效应修正（OPC）以及光刻掩模和光学系统新技术研发。这些紧凑模型形式非常简单，只需几个参数就可以描述光刻胶，计算量小、速度快，在其应用范围内，计算精度也足够。

最简单的光刻胶建模方法为 1.3 节中介绍过的阈值模型。该模型采用光强阈值  $I_{\text{THR}}$  描述光刻胶。正性光刻胶中成像光强  $I$  高于阈值的区域将被显影掉，其余区域保持不变。因此，可以采用阶跃函数描述归一化的光刻胶高度：

$$h(I) = \begin{cases} 0, & I \geq I_{\text{THR}} \\ 1, & I < I_{\text{THR}} \end{cases} \quad (3.21)$$

光强阈值  $I_{\text{THR}}$  取决于光刻胶、工艺条件和归一化成像光强，典型值介于 0.2 与 0.4 之间。

阶跃函数在光强阈值  $I_{\text{THR}}$  处的跳变会导致 OPC 等计算光刻技术中常用的优化算法产生数值问题，因此，常用含一个参数  $a$  的 S 型函数代替阶跃函数。 $a$  表征了完全显影光刻胶和完全未溶解光刻胶之间的过渡区域的陡度或锐利度<sup>[56-58]</sup>：

$$S(I) = \frac{1}{1 + \exp[-a(I - I_{\text{THR}})]} \quad (3.22)$$

图 3.15 比较了阶跃函数以及参数  $a$  不同的两个 S 型函数。阶跃函数可以被看作是具有无限大陡度的 S 型函数， $a \rightarrow \infty$ 。注意 S 型函数与图 3.12 所示的光刻胶显影速率函数很相似。

阈值模型不能准确近似真实光刻胶工艺。为了准确地预测 CD，需要根据工艺、掩模图形和周期调整阈值的大小。模型误差也会随着光刻胶厚度的增大以及图像对比度的降低而增大。

Brunner 和 Ferguson<sup>[59]</sup> 在阈值模型中加入了一个校正项。该校正项与光刻胶厚度、光刻胶对比度以及像对数斜率有关。该模型对显影工艺的仿真结果与 Mack 的集总模型相似，参见 3.1.4 节。

变阈值光刻胶模型 (VTRM) 可有效克服常数阈值模型的不足。这类模型都假设阈值是成像强度最大值、斜率等成像参数的函数<sup>[60]</sup>。继 Nick Cobb 提出第一个 VTRM 后，人们又提出了其他几种形式的变阈值模型<sup>[61, 62]</sup>。通常，可将 VTRM 看作是以像和工艺参数为变量的响应面模型。利用适当的实验数据可拟合出模型参数。

其他紧凑型模型利用不同的数学运算处理空间像或者体像，使处理之后的像与光刻胶轮廓相似。这些数学运算需要能够基于物理机制仿真出典型的光刻胶效应。为了最大程度地缩短计算时间，这类模型需要具备较高的计算效率。最简单的形式就是利用空间像的卷积来仿真光刻胶特定组分的扩散导致的对比度损失<sup>[63]</sup>。高级模型可以采用数学运算仿真耦合在一起的扩散 / 动力学效应与中和反应。

图 3.16 所示为 RoadRunner 模型将体像转变为光刻胶形貌的过程。该模型是由 Donis Flagello 等人提出的<sup>[67]</sup>。仿真中采用了一个简单的线空图形。

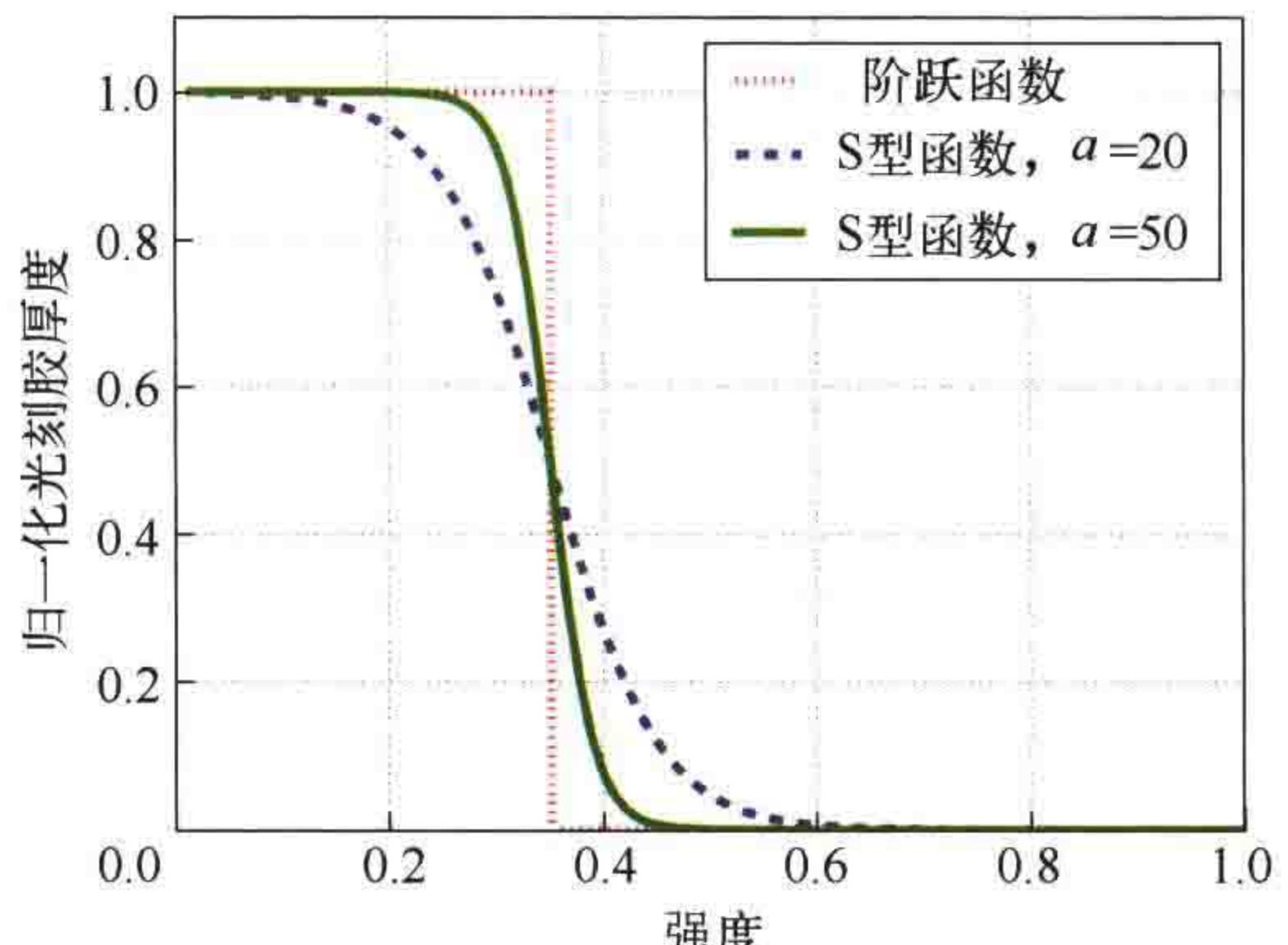


图 3.15 光强阈值模型：阶跃函数与两个不同陡度参数  $a$  的 S 型函数。光强阈值都为  $I_{\text{THR}}=0.35$ 。以曝光显影前的高度对光刻胶高度进行归一化

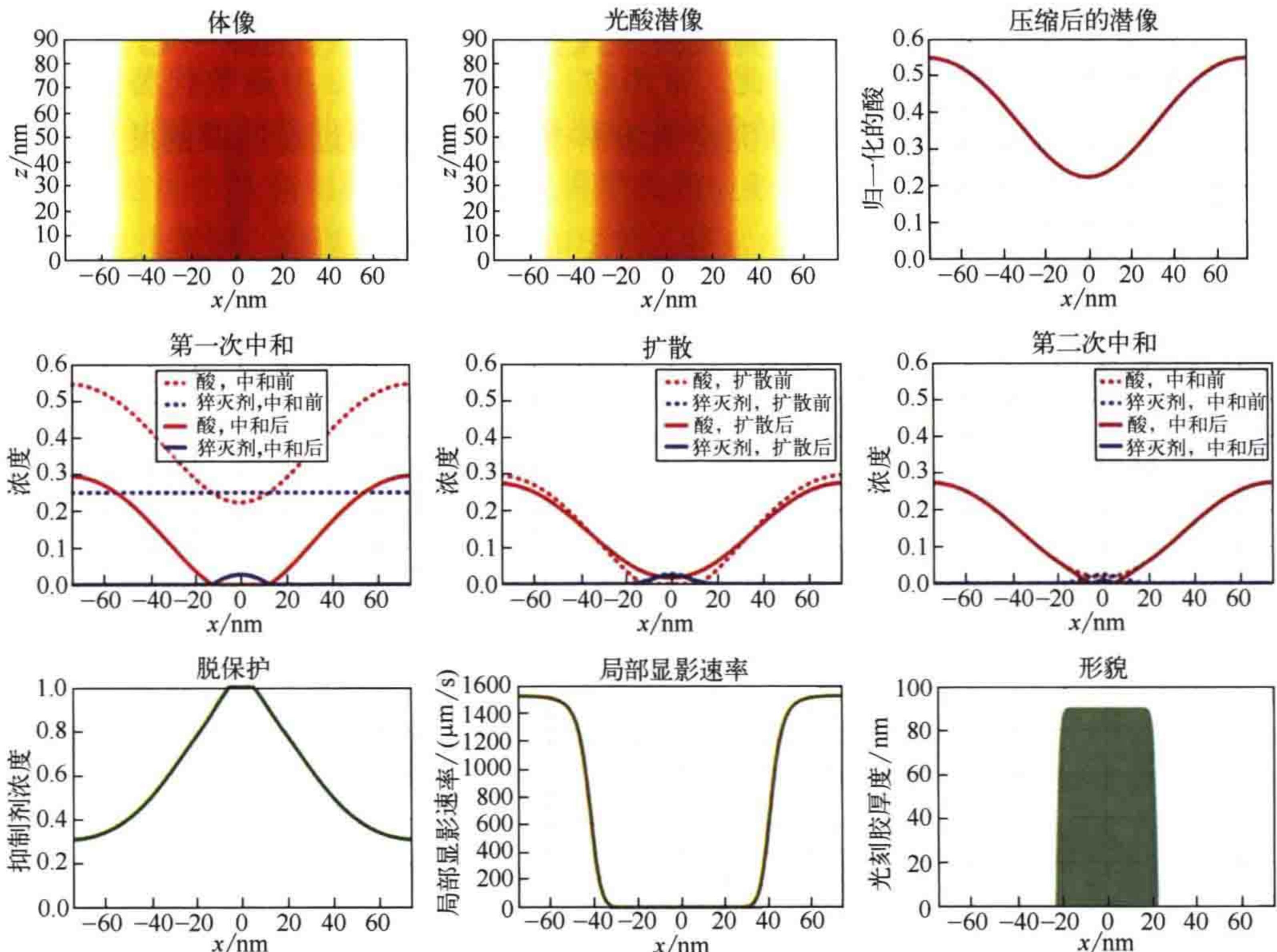


图 3.16 采用 RoadRunner 模型将光刻胶中的体像转变为光刻胶轮廓。掩模：6% 透光率的衰减型相移掩模，线图形的宽度为 45nm、周期为 150nm（基尔霍夫掩模模型）；光刻机：193nm 浸没式， $NA=1.35$ ， $y$  向偏振二极照明；光刻胶：90nm 厚的化学放大光刻胶

从体像开始建模。体像即光刻胶中的光强分布。建模步骤如下：

- ① 根据 Dill 方程计算光刻胶内酸的潜像，对于非漂白光刻胶： $A(x, z)=1-\exp[-C_{\text{Dill}}DI(x, z)]$ ，这里  $C_{\text{Dill}}$  代表光刻胶的灵敏度， $D$  是曝光剂量， $I(x, z)$  是体像。
- ② 在光刻胶高度  $z$  方向上对潜（酸）像进行平均： $A(x, z) \rightarrow \tilde{A}(x)$ 。在这一步中，可以利用高斯或线性加权函数突出某  $z$  向位置上的潜（酸）像，形成压缩潜像。压缩潜像仅与横向坐标  $x$  有关，降低了后续步骤的计算量。利用 Fukuda 的模型<sup>[40]</sup>对后续的两次酸与猝灭剂（碱）的中和反应，以及介于两次中和反应之间的酸与猝灭剂各自的扩散过程进行建模。

- ③ 在第一个中和反应步骤中，压缩潜（酸）像  $\tilde{A}$  与负载分布均匀的猝灭剂  $Q_0$  之间的反应可表示为：

$$\tilde{A}'(x) = \max[\tilde{A}(x) - Q_0, 0]$$

$$\tilde{Q}'(x) = \max[Q_0 - \tilde{A}(x), 0]$$

上式中的取最大值 (max) 运算保证了酸  $\tilde{A}$  和碱  $\tilde{Q}$  的浓度 (相减之后) 不为负数。

④ 酸和猝灭剂 (碱) 各自发生扩散, 分别用卷积高斯核  $\tilde{K}_A$ 、 $\tilde{K}_Q$  进行建模。卷积核的关键参数为酸和碱的 (有效) 扩散长度:

$$\tilde{A}''(x) = \tilde{A}'(x) * \tilde{K}_A(x)$$

$$\tilde{Q}''(x) = \tilde{Q}'(x) * \tilde{K}_Q(x)$$

⑤ 将步骤③所示的模型应用于扩散后的酸与猝灭剂, 对第二个中和反应进行建模:

$$\tilde{A}'''(x) = \max[\tilde{A}''(x) - Q_0, 0]$$

$$\tilde{Q}'''(x) = \max[Q_0 - \tilde{A}''(x), 0]$$

⑥ 利用步骤⑤中得到的酸浓度计算催化脱保护反应之后脱保护位点或抑制剂的有效浓度  $\tilde{M}$ 。会用到酸催化脱保护反应的放大系数  $\kappa_a$  和后烘时间  $t_{\text{PEB}}$ :

$$\tilde{M}(x) = 1 - \exp[-\kappa_a t_{\text{PEB}} \tilde{A}'''(x)]$$

⑦ 将式 (3.17) 所示的 Mack 的显影速率模型应用到  $\tilde{M}(x)$ , 得到图 3.16 中所示的局部速率。

⑧ 假设显影仅发生在竖直方向, 利用之前步骤中计算出的显影速率 (为常数), 计算出显影一段时间后剩余的光刻胶厚度。

可以很方便地将 RoadRunner 模型扩展应用到接触孔阵列或有限长线条等三维图形。该模型易于实现且计算时间短。校准后, DUV 和 EUV 工艺模型可以预测不同周期、离焦和曝光剂量情况下的实测 CD 值, 仿真精度约为 1nm。由于 RoadRunner 模型只沿  $z$  轴进行平均计算, 忽略了横向的显影, 因此不能准确地预测三维光刻胶形貌的侧壁角。

考虑到三维光刻胶效应的重要性, 最新的三维紧凑型光刻胶模型利用光刻胶内多个水平面上计算的像进行建模。这类模型包括了  $z$  向扩散效应, 以及光刻胶顶部与底部各自的边界效应<sup>[68, 69]</sup>。

## 3.4 负性与正性光刻胶材料与工艺

许多年来正性光刻胶一直是半导体制造中应用最广泛的光刻胶。负性光刻胶常因对比度较低以及膨胀的问题而被诟病。有意思的是, 早期用于量产的化学放大光

刻胶却是基于叔丁氧羰基 (*t*-BOC) 聚合物(负胶材料)和负显影工艺实现的。但新材料研发工作都聚焦于正性光刻胶。今天，几乎所有光刻方法都在不断优化，人们又开始重新研究工艺极性的影响、重新考虑负性材料与工艺。本节将讨论选择极性时需要考虑的问题，介绍几种改变工艺极性的方法。

为了研究不同工艺极性的光学性能，图 3.17 比较了两块极性相反的掩模的成像结果。第一行为标准暗场掩模上接触孔阵列的成像结果。衍射受限投影系统将掩模上透光的方形孔成像为一系列明亮的衍射受限光斑。如果是正性光刻胶，这些亮斑会在光刻胶上形成圆孔。后续刻蚀和沉积工艺会将光刻胶上的孔转换成不同层之间的导线。右图为孔的直径对应的光刻工艺窗口。这里采用了简单的光强阈值模型，不包含光刻胶信息。

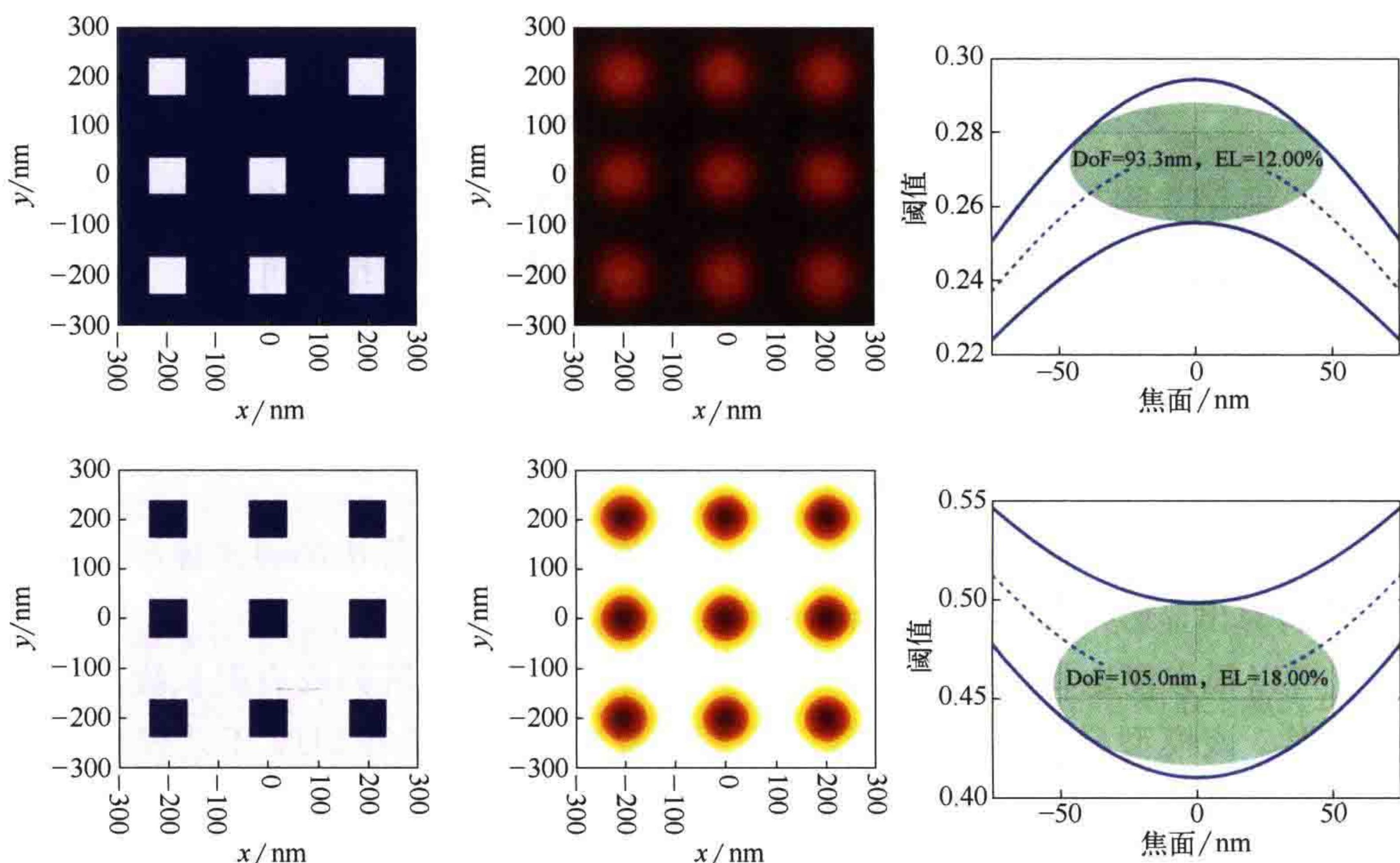


图 3.17 暗场掩模(第一行)和亮场掩模(第二行)上方孔阵列的成像性能比较。左列：掩模版图，方孔的尺寸为 75nm、周期为 200nm，6% 衰减型相移掩模。中列：空间像。成像条件：NA=1.35， $\lambda=193\text{nm}$ ，环形照明， $\sigma_{\text{in}}/\sigma_{\text{out}}=0.4/0.8$ 。右列：采用简单光强阈值模型计算的工艺窗口

图 3.17 第二行是亮场掩模情况下的仿真结果。掩模上的不透光方孔成像为暗斑。对比上下两行中的空间像可以看出暗斑的对比度比亮斑高。通过阈值模型计算的工艺窗口(右侧)也证明了这一结论。尽管亮场掩模和暗场掩模上方孔的尺寸相同，而且成像条件也完全相同，但亮场掩模对应的工艺窗口更大。只有采用负性光刻胶或工艺才能将暗斑成像为光刻胶上的通孔，最终形成连接不同层的导线。

分析结果表明亮场掩模的成像对比度高于暗场掩模。因此，孤立/半密集

线、柱状图形的成像适合采用正性工艺，而孔和孤立 / 半密集沟槽适合采用负性工艺。归一化像对数斜率的不对称性是不同极性的工艺存在成像差异的根本原因。空间像中较暗部分的 NILS 较高。许多年之前就观察到了这种普遍存在的现象<sup>[70, 71]</sup>。暗场和亮场图形之间的成像差异可归因于光学成像系统的部分相干性。非相干光照明条件下，极性相反的两个掩模的空间像叠加后可以形成强度分布均匀的光斑。

除了上述成像对比度和工艺窗口之外，极性还会对成像产生其他方面的影响。亮场掩模吸收的入射光比较少，对光的利用率比较高。但是亮场掩模对颗粒缺陷更加敏感。透光与不透光图形的光学邻近效应也不同。

工艺极性在其他方面的性能表现主要取决于光刻胶效应。光刻胶会吸收入射光，降低了光刻胶底部的曝光光强。所以使用正胶时，光刻胶图形底部会更宽一些。负性光刻胶产生的底部形貌与之相反，底部轮廓会出现内切现象。利用负胶在非平面硅片上曝光对光刻胶底部欠曝光区域的敏感度低于正胶。

光刻胶曝光区域的光致反应会导致光刻胶顶部丢失和收缩效应。移除化学放大光刻胶聚合物中遇酸会不稳定的“保护”基团时就会发生这种现象<sup>[72]</sup>。正性工艺中，光刻胶曝光区域显影后会被清除掉，因此其体积的收缩对剩余光刻胶形貌的影响不大。负性工艺中，曝光区域不会被清除，其体积的收缩对工艺的影响较大。本节的最后对相关的建模方法进行简要讨论。

正性和负性材料 / 工艺对硅片面某些类型缺陷的敏感度也不同。比如，负性光刻胶会产生微桥连，即在两根光刻胶线条之间残留了许多细串状的光刻胶材料，这些材料没有被显影<sup>[71]</sup>。

负性光刻胶常用于激光直写（参见 7.2.2 节）。多年来，与正性光刻胶相比，负性光刻胶在半导体光刻方面的应用非常有限。图 3.18 显示了将正性化学放大光刻胶的原理应用于负性工艺的方法<sup>[73]</sup>。光刻胶包含光碱生成剂（PBG）和热酸生成剂（TAG）。这样的光刻胶被曝光后会产生碱分子。后烘过程的热活化反应可生成分布均匀的酸。碱分子 / 猝灭剂分子在曝光区域与热致酸分子中和。未被曝光的区域没有碱分子，仅有热致酸分子。在这些残留酸分子的作用下，光刻胶发生脱保护反应，变得可溶解。由于没有碱，显影后未被曝光的区域被去除。这种工作机制中，常难以控制酸与碱的扩散。

今天，负性工艺已被广泛应用于（最具挑战性的）接触孔层的图形转移。负性显影（NTD）采用传统的正性光刻胶材料和有机溶剂负性显影液<sup>[74]</sup>。正性光刻胶材料带有保护基团，在酸催化反应后可溶解于显影液。图 3.19 比较 NTD 工艺与正性显影（PTD）标准工艺。PTD 为水基正性显影工艺。注意 PTD 和 NTD 工艺的侧壁倾角不同。

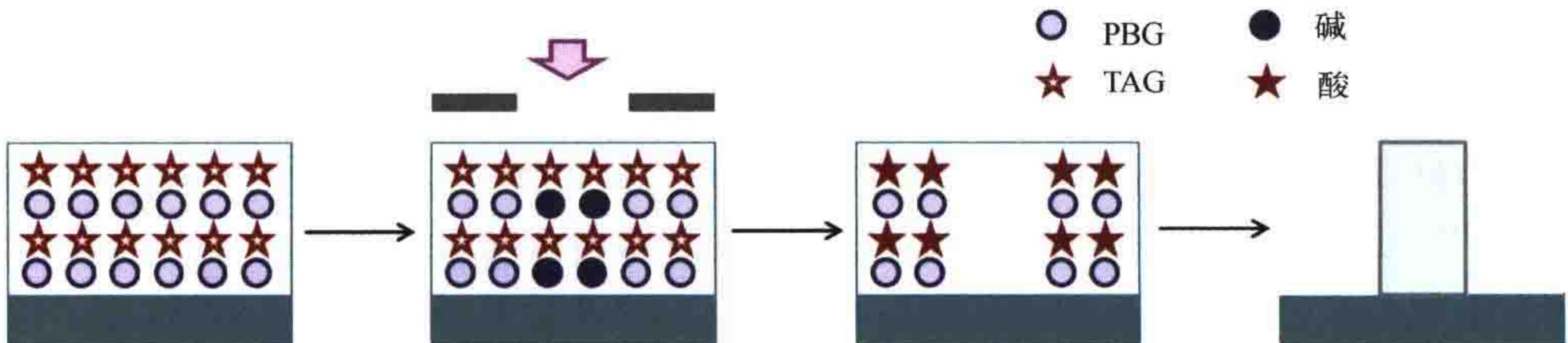


图 3.18 将光碱生成剂和热酸生成剂相结合实现负性化学放大光刻胶的原理示意图。  
改编自参考文献 [73]

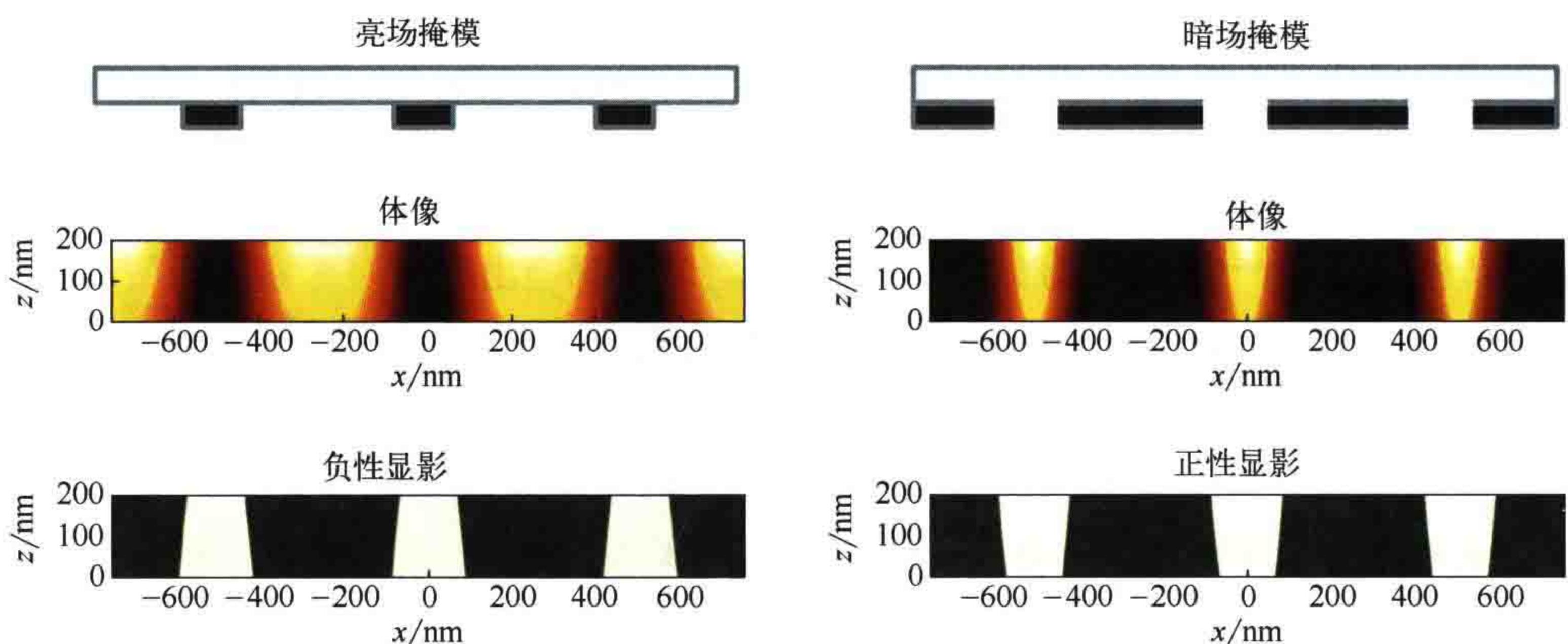


图 3.19 标准的正性显影 (PTD, 右侧) 和负性显影 (NTD, 左侧) 工艺产生半密集沟槽图形的机制  
对比：掩模版图（第一行），体像（中间行），光刻胶形貌（第三行）

随着 NTD 工艺重要性的日益提高，人们开发了专用的建模方法来精确描述 NTD 的相关效应。仅考虑显影过程中发生的极性反转的简化建模方法<sup>[75]</sup>，无法描述实验中观察到的光刻胶形貌效应。NTD 模型需要能够准确描述光刻胶收缩效应及其对 OPC 的影响。这些效应取决于光刻胶曝光区域的体积收缩量，以及为释放收缩引起的应变 / 应力而产生的光刻胶形变。

常采用连续介质力学模型和有限元仿真研究相关现象及其对工艺性能的影响<sup>[72, 76-80]</sup>。图 3.20 显示了收缩效应对光刻胶形貌的影响。图 3.20 中第一行的横截面图是不存在收缩效应时的仿真结果，图中含有与图 3.19 左侧的 NTD 横截面相似的侧壁内切。图 3.20 第二行的仿真中，考虑了 PEB 过程中脱保护引起的收缩效应。第三行的仿真还考虑了应变，对显影速率进行了修正，得到的侧壁倾角与第一行横截面图中的侧壁倾角符号相反。

对吸收导致的光刻胶底部强度损失以及顶部与底部的不同光刻胶变形进行充分平衡，有助于将光刻胶侧壁倾角调整至所需的大小。由于材料的用量和图形几何结构都可以不同，所述的收缩效应与图形和环境密切相关。收缩邻近效应比光学邻近效应更为复杂<sup>[76]</sup>。

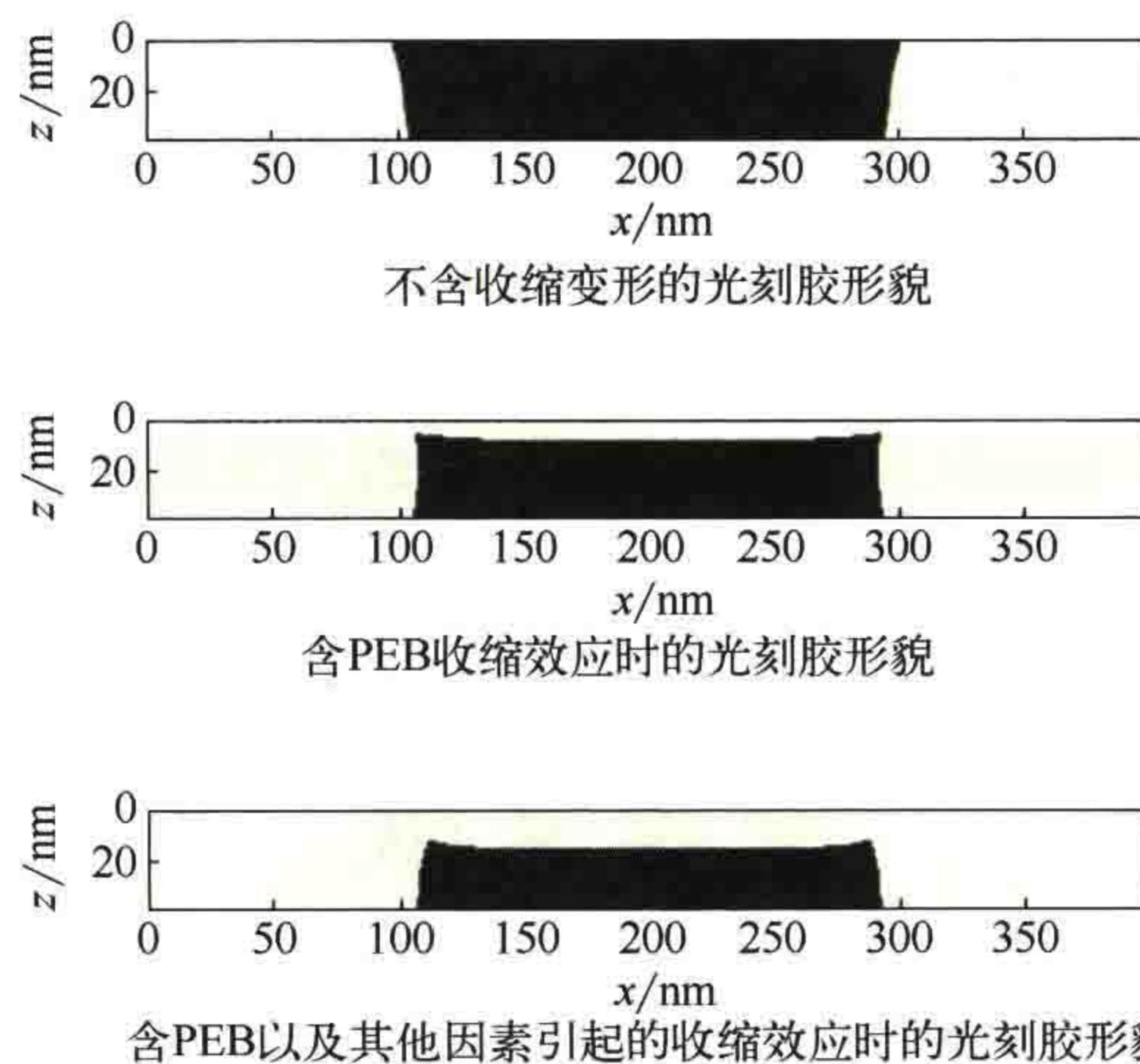


图 3.20 收缩效应对光刻胶轮廓的影响：不考虑收缩效应情况下的仿真结果（上），考虑 PEB 过程中脱保护引起的收缩效应（中），以及光刻胶显影时存在其他收缩效应情况下的仿真结果（下）。

改编自文献 [79]

## 3.5 总结

光刻胶的作用是将空间像或其形式的光强分布转移到硅片上的膜层中形成图形。这种转移是通过聚合、改变极性以及改变材料结构等不同的机制实现的。DUV 和 EUV 光刻广泛采用化学放大光刻胶（CAR）。化学放大光刻胶包括光酸生成剂（PAG）、猝灭剂和其他具有保护位点的分子。这些组分决定了光刻胶的显影性能表现。酸催化脱保护反应、酸与猝灭剂的中和反应以及物质扩散等动力学反应是 CAR 工艺性能的重要影响因素。曝光波长  $\geq 300\text{nm}$  的光刻通常使用重氮萘醌（DNQ）型光刻胶，其光敏组分直接影响了光刻胶的显影性能表现。

剩余厚度与曝光剂量（对数坐标）之间的关系曲线称为特性曲线，是描述光刻胶性能的最简单方法。常见的工艺都会选择在特征曲线的线性部分，用斜率  $\gamma$  表征工艺的特征。一般首先会采用光刻胶对比度  $\gamma$  和归一化像对数斜率（NILS）对光刻工艺进行初步评价。

典型的光刻工艺步骤包括硅片表面清洗、旋转涂胶、前烘、曝光、曝光后烘焙（PEB）与显影。光与光刻胶的相互作用可采用 Dill 模型进行描述。光刻胶下方材料对光的反射也会影响曝光结果。这种反射会引起驻波、侧壁波纹，以及特征尺寸或 CD 随光刻胶厚度发生周期性变化。添加底部抗反射涂层，可以减弱反射带来的影响。PEB 过程中化学物质的扩散也可以减少驻波效应。可以利用与材料有关的显影速率曲线表征光刻胶的显影行为。Mack 显影速率模型等模型可以产生显影速率

曲线。

光刻胶的极性也可以不同。正性光刻胶被曝光的区域会被移除，负性光刻胶被曝光的区域会被惰性化，不受化学显影的影响。光源的空间相干性导致暗斑比亮斑更容易成像。正性光刻胶或正性工艺适用于线条和柱状图形的成像。负性光刻胶或工艺在沟槽和接触孔图形的成像中表现更优。负性光刻胶和负显影（NTD）工艺正变得越来越受欢迎。

## 参 考 文 献

- [1] U. Okoroanyanwu, *Chemistry and Lithography*, SPIE Press, Bellingham, Washington, 2011.
- [2] R. Dammel, *Diazonaphthoquinone-based Resists*, SPIE Press, Bellingham, Washington, 1993.
- [3] H. Ito, “Chemical amplification resists for microlithography,” *Adv. Polym. Sci.* **172**, 37–245, 2005.
- [4] Z. Sekkat and S. Kawata, “Laser nanofabrication in photoresists and azopolymers,” *Laser & Photonics Reviews* **8**(1), 1–26, 2014.
- [5] J. Liu, B. Cai, J. Zhu, X. Z. G. Ding, and C. Y. D. Chen, “Process research of high aspect ratio microstructure using SU-8 resist,” *Microsyst. Technol.* **10**, 265–268, 2004.
- [6] C. G. Willson, R. R. Dammel, and A. Reiser, “Photoresist materials: A historical perspective,” *Proc. SPIE* **3051**, 28, 1997.
- [7] I.-B. Baek, J.-H. Yang, W.-J. Cho, C.-G. Ahn, K. Im, and S. Lee, “Electron beam lithography patterning of sub-10-nm line using hydrogen silsesquioxane for nanoscale device applications,” *J. Vac. Sci. Technol. B* **23**, 3120, 2005.
- [8] I. Zailer, J. E. F. Frost, V. Chabasseur-Molyneux, C. J. B. Ford, and M. Pepper, “Crosslinked PMMA as a high-resolution negative resist for electron beam lithography and applications for physics of low-dimensional structures,” *Semicond. Sci. Technol.* **11**, 1235, 1996.
- [9] A. Priimagi and A. Shevchenko, “Azopolymer-based micro- and nanopatterning for photonic applications,” *J. Polym. Sci. B Polym. Phys.* **52**(3), 163–182, 2014.
- [10] H. Nagai, A. Yoshikawa, Y. Toyoshima, O. Ochi, and Y. Mizushima, “New application of Se-Ge glasses to silicon microfabrication technology,” *Appl. Phys. Lett.* **28**, 145, 1976.
- [11] Y. Utsugi, A. Yoshikawa, and T. Kitayama, “An inorganic resist technology and its applications to LSI fabrication processes,” *Microelectron. Eng.* **2**, 281–298, 1984.