



国际信息工程先进技术译丛



CRC Press
Taylor & Francis Group

微光学和纳米光学 制造技术

Microoptics and Nanooptics Fabrication

(美) Shanalyn A. Kemme 编著

周海宪 程云芳 译

周华君 程 林 校



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

关于本书

微纳米光学制造技术基本上朝着两个方向发展：一是寻求更简单便宜的微纳米结构生产方法，即在非极限环境下大面积生产微纳米结构的复制技术，包括纳米印制技术、纳米压模技术、软光刻技术和微接触印制技术。其研究方式不是利用光学和电子等物理学工具，而是应用日常生活中所熟悉的机械过程。二是用物理、化学或生物方法制作均匀性很好、有特殊功能的微纳米颗粒或系统，例如用原子、分子束外延方法生长半导体量子点阵等。本书将向您呈现这两方向目前尖端的研究内容。



国际信息工程先进技术译丛

微光学和纳米 光学制造技术

(美) Shanalyn A. Kemme 编著

周海宪 程云芳 译

周华君 程 林 校



机械工业出版社

本书详细介绍了微光学和纳米光学元件成功的、最新的制造工艺，重点强调了关键性的专业技巧，提供了最新的技术信息，内容包括面浮雕衍射光学元件、微光学等离子体刻蚀加工技术、使用相位光栅掩模板的模拟光刻术、光学器件的电子束纳米光刻制造技术、纳米压印光刻技术和器件应用、平面光子晶体的设计和制造、三维（3D）光子晶体的制造——钨成型法。

本书参编作者都是微纳米光学制造技术领域的专家，代表了当今微光学加工的领先水平。本书可供光电子领域从事光学仪器设计、光学设计和光机结构设计（尤其是从事光学成像理论、微纳米光学研究）的工程师使用，也可以作为大专院校相关专业本科生、研究生和教师的参考书。

版权声明

Microoptics and nanooptics fabrication/Editor, Shanalyn Kemme/ISBN: 978-0849336768

Copyright © 2010 by Taylor and Francis Group, LLC

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved.

China Machine Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签，无标签者不得销售。

本书中文简体翻译版授权由机械工业出版社独家出版，未经出版者书面许可，不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

本书版权登记号：图字 01-2011-3028 号。

译 者 序

当前,高速发展的信息工业对集成电路器件的集成度要求越来越高,促使人们不断探索突破器件尺寸极限的途径。纳米尺度的光学现象日益受到人们关注,而光子作为信息载体,有着电子无法比拟的优势,如高带宽、高密度、高速度和低耗散等。另外,光信号传输速度比电子快 1000 倍,并且可以携带强度、偏振、相位和频率等信息,进而突破二进制的限制。随着对微纳米光电系统的深入研究,光电子技术正在向光电子集成和纳米光电子集成方向发展。光学、光电子学、纳米光学与纳米电子学相结合,产生了一门新的学科——微纳米光电子学。微纳米光电子学的重要特征是光学结构和器件的特征尺度在微纳米量级,是微纳米技术与微电子、激光、光电子、通信等学科交叉而发展起来的一门科学,与光相互作用的结构和器件的特征尺寸已经从波长量级进一步减小到纳米量级,使微光学的发展进入到纳米和亚光波长的阶段。微纳米光学结构和器件的光学特性与传统意义上的光学结构和器件有着本质不同,许多新现象和奇异特性值得人类探索和研究,并且还需要建立完备的理论模型,用以分析电磁波与微纳米结构的相互作用引起的宏观奇异特性的物理机制。所以,微纳米光电子学是研究微纳米光电子器件及其结构中电子与光子相互作用的高科技学科,是目前光学领域的前沿研究方向。其研究对象是微纳米光学尺度的光学效应,以及利用微纳米光学效应开发的光学器件、系统及装置。换句话说,它是研究微米或纳米级尺度光机电元件(和系统)的设计、制作及用其实现光波发射、传播、变换和接收的理论和技術。微纳米光电子学极大地推动着光电子产业的发展,是重要的发展方向之一。

微纳米技术的发展,使人们通过微纳米加工技术能够获得所需要的具有光学、电学、磁学、热学、力学特殊性能的功能结构。所以,该技术具有广泛而重要的应用前景。用硅材料制成的微机械,如用于微加速度计、气体传感器、高速打印喷头及磁记录头的元器件和装置,在汽车、航空航天、计算机等领域得到了很广泛的应用。微纳米光电子器件(如纳米激光器、纳米级红外光电探测器)、微纳米光电集成电路和微纳米光导集成电路不再遵循传统的电子学规律,而电子的波动性和量子效应将在此类器件中起着重要作用。目前,面世的纳米光电子器件有纳米激光器(如量子阱激光器、量子线激光器和量子点激光器)、量子红外光电探测器、InGaAs/GaAs 多量子阱自电光效应器件(Multi-Quantum-Well Self-Electrooptic Effect Device, MQW-SEED)、CMOS/SEED 光电子集成器件,聚光物发光二极管(Light Emitting Diode, LED)、谐振腔增强型光敏二极管(Resonant-Cavity-Enhanced Photodiode RCE-PD)探测器、AlGaAs/GaAs 超晶格多量子阱红外光电子探测器阵列、

垂直腔面发射激光器 (Vertical Cavity Surface Emitting Laser, VCSEL) 阵列、纳米级薄膜制作的红外摄像器件 (例如纳米级硅化铂薄膜肖特基势垒红外光焦平面阵列) 等。最近, 微纳米光学在下一代可再生能源的应用方面发挥着越来越重要的作用, 包括光伏电池 (太阳电池、热光电池和光电检测器)、固态照明 (如 LED) 和光合作用等。微纳米光学有希望提供极小规模照明能力, 以及提高可再生能源装置的光转化效率, 也可以用于高端的光学场合。

微纳米光电系统的重要优势, 除了体积微型、重量超轻、集成化、规模化和低成本之外, 更值得注意的是通过微纳米光学制造技术, 可以预先将光学与电子器件的相对位置精确定位, 无须进行非常麻烦和耗时的对准调整, 系统的稳定性和可靠性得到极大提高。另外, 微纳米光学系统能够非常方便地与其他功能的光电系统进行融合、集成和组合, 从而得到更为广阔的应用和发展。

微纳米光学制造技术, 是微纳米领域 (包括微纳米制造技术、微纳米电子学、微纳米生物学、微纳米材料学) 的核心技术之一, 不仅为微纳米科学各领域的研究和拓展提供了强有力的手段, 也是未来微纳米产业中的支柱。借助微纳米制造技术, 可以制造出一系列新型光学和光电子学元器件和系统。

微纳米光学制造技术在过去 20 年里取得了迅猛发展。光存储、光通信、光显示、激光器和激光材料等多个光电子产业都进入了微纳米光学领域, 并影响到整个光学及其他学科的进步。随着现代光学和光电子技术的更深研发, 光电子仪器的微型化终将成为可能。

众所周知, “纳米是微米的延伸”, 很多材料和器件在纳米尺度范围内具有全新的物理性能, 因此微纳米光学制造技术的发展具有至关重要的意义。世界各国政府、科学界及企业界对此高度重视, 竞相开发研究, 形成持续的研究热潮。半导体工艺技术的进步, 使微米尺度的任意线宽都能加工出来。随着制造水平的不断进步, 逐渐发展到纳米光学制造领域, 创新出一些新的制造技术, 例如光子晶体技术、表面等离子体光学技术及奇异材料制造技术。从而通过引入微纳米结构控制光的衍射和传播, 实现新的光学功能。

微纳米光学制造技术基本上朝着两个方向发展: 一是, 寻求更简单便宜的微纳米结构生产方法, 即在非极限环境下大面积生产微纳米结构的复制技术, 包括纳米印制技术 (Nanoimprinting)、纳米压模技术 (Nanoembossing)、软光刻技术 (Soft-lithography) 和微接触印制技术 (Microcontactprinting)。其研究方式不是利用光学和电子等物理学工具, 而是应用日常生活中所熟悉的机械过程——印、压和塑等技术。具体来说, 就是以制膜为基础, 用高分辨率电子束及刻蚀方法将结构复杂的微纳米结构制作在薄膜上, 再将其精确地大面积复制到聚合物乳胶薄膜上, 经处理得到各种功能的集成。该方法简单、应用面广、可选择性强。二是, 用物理、化学或生物方法制作均匀性很好、有特殊功能的微纳米颗粒或系统, 例如用原子、分子束外延方法生长半导体量子点阵等。

不论在微纳米光学的理论研究和设计方面，还是微纳米光学的制造技术，或者微纳光学成果的产业化，我国与世界发达国家都有一定差距。之前，我们曾经翻译了《微光学——元件、系统和应用》和《微光机电系统》两本书，但都偏重于微纳米光学的理论研究和设计内容，而不容忽视的是，微纳米光学制造技术正是实现微纳米成果产业化，从实验室走向实际应用的关键技术。

原书作者 Shanalyn A. Kemme 博士，1985 年在堪萨斯大学（Kansas State University）物理系获得硕士学位，工作 8 年后重新回到大学学习，于 1998 年在亚利桑那大学（The University of Arizona）光学中心获得光学博士学位，此后，一直在美国 Sandia 国家实验室从事微纳米光学制造技术的研究工作。

微纳米光学制造技术是光电子学制造业的前沿技术，最近几年发展很快，研究热潮此起彼伏。随着微纳米光学技术（包括光子晶体学）的应用越来越广泛，其制造技术的发展也越来越快，并愈加成熟。由于微纳米光学制造技术是一种高度精密制造技术的总称，会涉及不同的制造方法。因此，依靠某个人编撰该领域的专著，总显得力不从心，一个人的知识难以涵盖整个微纳米光学制造技术领域。为此，Shanalyn Kemme 博士带领一个由 16 人组成的专家团队（其中 7 位来自学术界和大学，3 位来自工业界，6 位来自美国 Sandia 国家实验室），基于众多科学家和专家多年的工作实践和研究成果，综合国际学术界在该领域的新观点及新技术，高标准撰写了《Microoptics and Nanooptics Fabrication》。原书第一次较为系统、全面地论述了微纳米光学制造技术、最新应用和未来的发展趋势，使读者能够站在该领域前沿，全面并较深刻地了解微纳米光学制造技术的现状和具有的潜在优势，是一本难得的、优秀的参考书。

在原书的翻译过程中，得到了原书作者之一 Shouyuan Shi 教授及美国特拉华大学电气计算机工程系（CEC Department, University of Delaware, USA）姚鹏博士的大力支持，对原书中的有关问题进行了及时沟通和认真审校，并对书中一些重要变动增加了“译者注”。另外，为了帮助读者理解各章节内容，使读者能更准确地理解有关内容并有效地利用本书，保留了原书的英文参考文献。

程云芳翻译了第 1 章，周海宪翻译了第 2~7 章，在美国工作的周华君和程林先生对全书进行了认真的审校。程云芳高级工程师、孙维国研究员对本书做了专业审校。

清华大学教授、中国工程院院士金国藩先生，美国 Shouyuan Shi 教授，北京理工大学王涌天教授，以及刘永祥、郭世勇、韩鹏、祖成奎、黄存新、仇志刚、翟文军、金朝翰等高级工程师也对本书的翻译做了很多工作，并对关键技术进行了有益讨论，在此表示衷心感谢！

机械工业出版社电工电子分社的牛新国社长和王欢编辑对本书的出版给予了非常大的鼓励和支持，在此特别致以谢意！

本书可供光电子领域从事光学仪器设计、光学设计和光机结构设计（尤其是

从事光学成像理论、微纳米光学研究)的研发设计师、光机制造工艺研究的工程师阅读,也可以作为大专院校相关专业本科生、研究生和教师的参考书。希望本书提供的内容能够对研发微纳米光电子仪器,特别是在军事、航空航天及民用光学仪器领域中的应用提供有益指导,并希望能够进一步推动我国微纳米光学制造技术的研究,扩展相关领域的应用。

译 者

前言

基于以下的原因，很容易理解微光学和纳米光学从开始出现就受到了普遍关注：无论从机械方面还是热效应方面，微小集成光学元件都比体积大得多的同类产品或设备更为坚固和可靠，并且微光学元件可以与通常使用的小尺寸光源和探测器相匹配。在这些驱使因素存在的同时，一些更令人激励的进步将继续推动微纳米光学研究的发展，即微型精密制造技术有可能加工出新型光学元件，并成功地应用于物理光学领域，甚至包括紫外光学波段，并达到亚波长水平，从而影响诸如偏振之类的性质。

最后，要强调的是微纳米光学概念与相关的制造技术之间的重要关系。实际上，微纳米光学制造技术的研究初衷，是解决微纳米光学设计中两个相关问题。

遗憾的是，微纳米光学元件的制造实际上受到材料选择、元件的横向尺寸及/或最小特征尺寸的约束，这就是为什么微纳米制造技术常常滞后于其相应理论研究的原因。当设计师毫无约束地讨论光学元件在光路中所需要的理想形状和精确位置时，决定其成败的元件只能在实验室中得以实现。

一种微纳米光学制造方法与由此生产的光学元件有着非常密切的关系，以致加工方法的变化可能会制造出一种新的光学元件。由于光子晶体带来的革命性变化，当今的文献著作都用大量篇幅阐述一维和二维光子晶体的内容，而在此之前，光学元件的共用基体应当为厚膜、波纹或者光栅。然而，研发出的新二维和三维光子晶体制造技术可以使许多材料得以应用，扩大了横向尺寸，放宽了准确度要求，使以前不能实现的元件结构布局得以实现。

实际上，与光子晶体制造技术相比，如今又确立了更为广泛的衍射光学元件制造领域，这在很大程度上是源自称为二元光学（Swanson 和 Veldkamp 发明）的衍射光学元件制造方法。该方法承接了半导体业成熟制造工艺的全部优点。即使如此，为了达到所需的光学要求，必须重新确定工艺过程的每一个步骤（从材料选取到模板确定，以及表面刻蚀/膜层淀积等工序），以获得具有特定平面度和光洁度（粗糙度）的表面，而在半导体工业领域几乎没有这些要求。

随着衍射光学元件特征尺寸的减小和纵横比的增大，衍射光学元件的成功应用已从微波领域扩展到可见光，甚至到红外光谱区。基于复制工艺保真度的提高，衍射光学元件（成本随之下降）已经进入了商业市场。

正如前所述，由于微纳米光学元件的概念与制造技术密切相关，本书将详细介绍微纳米光学元件成功的制造工艺，并阐述制造工艺的最新水平，因为这直接影响微纳米光学元件的相关性能。阅读本书的专业工程师请注意，本书重点强调关键性

的专业技巧，而不是众所周知的处理工艺的基本原理。本书的各位作者都是微纳米光学制造技术领域的专家，作为整体，代表着当今微光学加工的领先水平。微纳米光学制造技术是不断更新的，应此要求，本书提供了最新的技术信息。本书充分利用了 Taylor & Francis 出版商提供的这次机会，在各位作者的共同努力下最终完成。

MATLAB[®]是美国 MathWorks 公司的注册商标，相关产品的资料，请按照下面的联系方式与该公司联系：

The MathWorks, Inc.
3 Apple Hill Drive
Natick, MA 01760-2098 USA
Tel: 508 647 7000
Fax: 508-647-7001
E-mail: info@mathworks.com
Web: www.mathworks.com

目 录

译者序

前言

第 1 章 面浮雕衍射光学元件	1
1.1 制造方法	2
1.2 周期和波长比	4
1.3 光栅形状	5
1.4 深度优化	5
1.5 错位失对准	10
1.6 边缘圆形化	16
1.7 几何形状偏离引起形状双折射光栅相位响应的变化	26
1.8 表面纹理结构	27
1.9 熔凝石英表面的纹理结构	27
1.10 太阳电池的表面纹理结构	30
1.11 8 阶熔凝石英 DOE 样片的制造方法	33
1.12 成形金属基准层的制造工艺	34
1.13 转印成形和第一层掩模板的刻蚀	35
1.14 转印成形和第二层掩模板的刻蚀	37
1.15 转印成形和第三层掩模板的刻蚀	37
致谢	37
参考文献	38
第 2 章 微光学等离子体刻蚀加工技术	39
2.1 概述和回顾	39
2.2 基本的刻蚀处理技术	41
2.3 玻璃类材料的刻蚀工艺	45
2.4 硅材料微光学结构的刻蚀	48
2.5 具有灰度微光学结构的 III - V 族材料的刻蚀工艺	50
2.6 GaN、SiC 和 Al_2O_3 刻蚀微光学元件	55
2.7 II - VI 族材料 ZnSe 和宽光谱 ZnS 的刻蚀工艺	61
2.7.1 ZnSe 和 ZnS 光学元件的应用	64

2.8 红外刻蚀材料——红外玻璃 IG6	70
2.8.1 IG6 玻璃刻蚀工艺	72
2.9 非反应光学材料刻蚀微光学元件的工艺	74
2.9.1 高斯光束均质器和 MLA 的灰度加工技术	74
致谢	77
参考文献	77
第3章 使用相位光栅掩模板的模拟光刻术	80
3.1 概述	80
3.2 相位掩模技术	81
3.3 光学元件的设计和制造	86
3.3.1 光致抗蚀剂的性质	86
3.3.2 相位掩模的设计	88
3.3.3 微光学光致抗蚀剂处理工艺	93
3.4 轴对称元件的设计和制造	96
3.5 结论	102
参考文献	102
第4章 光学器件的电子束纳米光刻制造技术	104
4.1 概述	104
4.2 电子束光刻术	105
4.2.1 电子束光刻术发展史	105
4.2.2 电子束光刻系统	106
4.2.3 电子束光刻技术	106
4.3 特殊材料光学器件的纳米制造技术	109
4.3.1 回顾	109
4.3.2 硅	109
4.3.3 砷化镓	109
4.3.4 熔融石英	110
4.4 光学器件加工实例	111
4.4.1 熔融石英自电光效应器件	111
4.4.2 熔融石英微偏振器	114
4.4.3 砷化镓双折射波片	117
4.5 结论	118
致谢	118
参考文献	118
第5章 纳米压印光刻技术和器件应用	121

5.1 概述	121
5.2 压印图形化和压印光刻术的发展史	122
5.3 纳米压印光刻术的相关概念	123
5.3.1 纳米压印组件和工艺	123
5.3.2 纳米压印设备	129
5.4 商业化器件的应用	132
5.4.1 通信用近红外偏振器	132
5.4.2 投影显示用可见光偏振器	134
5.4.3 光学读取装置的光学波片 (CD/DVD)	134
5.4.4 高亮度发光二极管	134
5.4.5 微光学 (微透镜阵列) 和衍射光学元件	134
5.4.6 多层集成光学元件	137
5.4.7 分子电子学存储器	138
5.4.8 光学和磁数据存储	138
5.5 结论	139
致谢	139
参考文献	140
第6章 平面光子晶体的设计和制造	143
6.1 概述	143
6.2 光子晶体学基础知识	143
6.2.1 晶体学术语	144
6.2.2 晶格类型	147
6.2.3 计算方法	148
6.3 原型平面光子晶体	153
6.3.1 电子束光刻工艺	153
6.3.2 普通硅刻蚀技术	155
6.3.3 时间复用刻蚀	158
6.3.4 先进的硅微成形刻蚀工艺	161
6.4 基于色散特性的平面光子晶体	163
6.4.1 平面光子晶体结构中的色散波导	164
6.4.2 负折射	168
6.5 未来应用前景	172
参考文献	172
第7章 三维 (3D) 光子晶体的制造——钨成型法	178
7.1 对称性、拓扑性和 PBG	178
7.2 金属光子晶体	182

7.3	金属结构的可加工性	184
7.4	三维光子晶体的制造	185
7.5	胶体模板法	185
7.6	微光刻工艺	186
7.7	利用“模压”技术制造光子晶体	188
7.8	膜层应力	191
7.9	对准	192
7.10	表面粗糙度	193
7.11	侧壁轮廓	193
7.12	释放刻蚀	193
7.13	测量方法、测试工具和失效模式	193
7.14	结论	195
	致谢	195
	参考文献	195

第 1 章 面浮雕衍射光学元件

Shanalyn A. Kemme, Alvaro A. Cruz-Cabrera

衍射光学元件 (Diffractive Optical Element, DOE) 是一种特殊的光学元器件, 可以使光线以精确的角度 θ_m 偏转到 m 级, 并用下列公式表示:

$$n_d \sin \theta_{dm} = \frac{m\lambda}{\Lambda} + n_i \sin \theta_i \quad (1.1)$$

一条与光栅法线成 θ_i 角的光线入射在光栅上, 将衍射成一个或多个出射角为 θ_{dm} 的光线, θ_{dm} 是周期 Λ 的函数。其中, n_i 是入射介质的折射率; n_d 是出射介质的折射率; m 是衍射级, 对于大部分应用, $m = 1$ 。图 1.1 还给出了其他不同的衍射级, 但没有标出其衍射效率。对于透镜, 除了希望使用的衍射级外 (通常为 $m = +1$ 级), 令其他衍射级的效率减至最小。

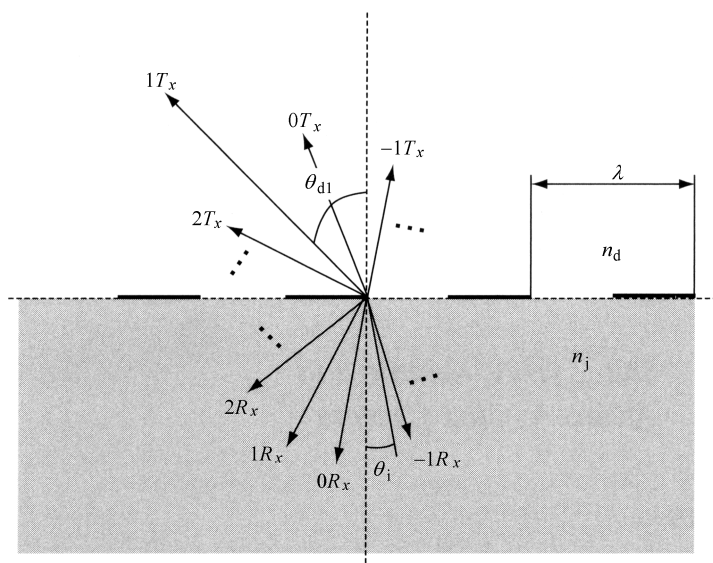


图 1.1 出射角是光栅周期、折射率和衍射级的函数
(图中给出了某些透射级和反射级)

周期是利用光刻技术进行横向控制的参数, 可以在技术要求中规定到纳米级。对于小像差透镜, 这种对周期横向位置的特殊控制会使 DOE 成为较理想的零件。例如, 透镜的一般应用是将光会聚成一个光斑, 可以设计和制造出能够达到衍射受

限光斑尺寸的衍射透镜。图 1.2 所示为一个 8 阶聚焦透镜，能够将一束每隔 2π 相位入射的平行光的相前会聚在一起，以保证 DOE 衍射的光线全部都聚焦到 DOE 上方、距离为 F 的中心点上。利用光线追迹程序很容易确定使平行光束聚焦所需要的相前。每一个 2π 离散相前的位置和距离对应着 DOE 上各点位置的周期。将这些数值输入到 CAD 程序中，转换成一系列 DOE 制造过程中所使用的光刻模板。该工艺比较复杂，但容易理解，所采用的技术也较成熟^[1]。

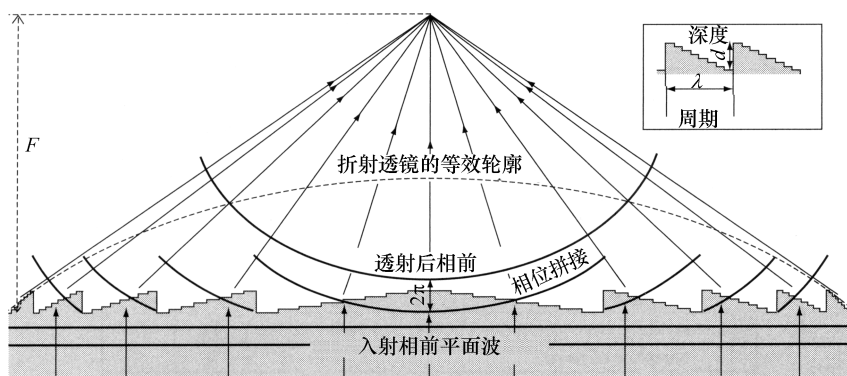


图 1.2 一个 8 阶聚焦透镜（每相隔 2π 相位的准直光束的相前会聚，以保证 DOE 衍射的所有光束都入射到 DOE 上方、距离为 F 的中心点上）

1.1 制造方法

合理选择制造方法和在其限定精度内工作是获得所需 DOE 效率的主要因素，例如，图 1.3 所示一个周期为 Λ 的理想闪耀光栅，具有可选择的多阶形式以逼近闪耀结构形状，包括 2 阶、4 阶和 8 阶的近似结构。其外形结构的阶数是 2^N ， N 是模板数目^[2]。对于每块模板，一种典型的制造工艺过程分 4 步，即旋镀光致抗蚀剂、曝光和显影、刻蚀、清洗。随着模板数目增加，DOE 的外形结构越接近理想的闪耀结构形状。如果周期大于 10λ ，并考虑到标量模式，理想闪耀结构形状的光栅就有最高效率。按照标量理论，较多阶（比较细的梯形）会相应地提高效率，如图 1.4 所示。然而，随着模板数目增加，当获得的增益开始与制造误差有关时，效率增幅会逐渐减小。例如，模板从 2 阶到 4 阶（多于一块模板），最大增幅是 40.6%；而模板从 8 阶提高到 16 阶时，增加一个模板仅实现 4% 的增幅。

使用单块灰度等级模板，可以制造出理想的闪耀光栅，并且后面不存在模板之间的对不准问题。其主要缺点是，由于光致抗蚀剂、曝光和刻蚀的非线性响应，使研发过程特别耗时，这些工艺步骤中的每一步都必须精确地用设计参数表示。工艺

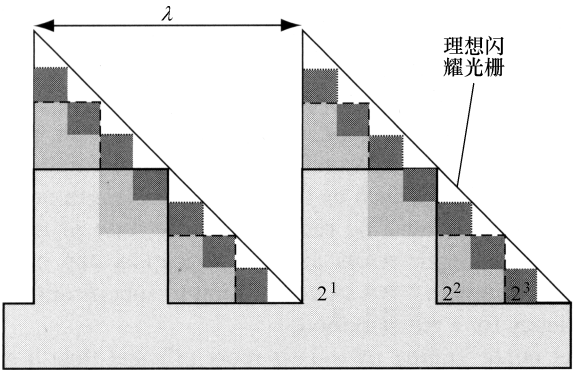


图 1.3 2、4、8 阶理想闪耀光栅的多阶轮廓图（标量模式下，理想闪耀光栅比其他任何等效多阶光栅的效率更高）

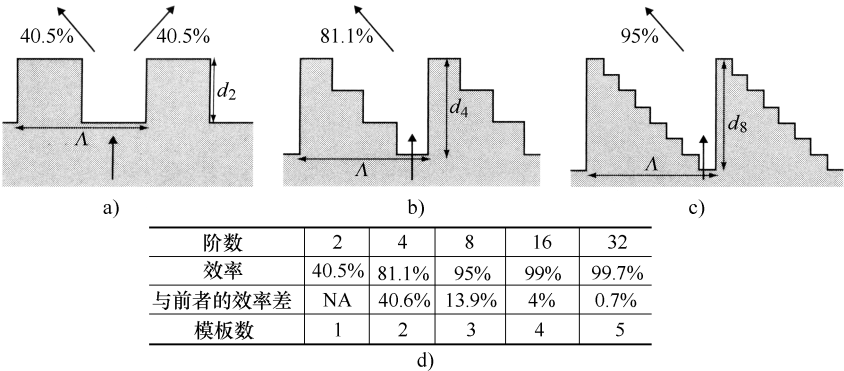


图 1.4 标量模式计算出的衍射效率

a) 2 阶光栅 b) 4 阶光栅 c) 8 阶光栅 d) 2 ~ 32 阶光栅的标量效率和增加模板产生的效率增幅
注意：2 阶光栅的深度 d_2 产生 π 的相位延迟，而任何较高阶光栅的总深度接近 2π 延迟。

过程中的任何事情，例如设计波长或使用的光致抗蚀剂需要变化，则整个工艺都必须重新标定。由于这种按照顺序进行的步骤的非线性特性，使各步骤中的深度误差都会相当大。当然，按照技术要求加工理想的闪耀光栅可以保证在一个标量周期下得到最高的衍射效率。

即使一个 2 阶相位光栅 ($N = 1$) 也比用两束光干涉制造的正弦相位光栅（见图 1.5）具有更高的效率：用一束垂直入射光束照射具有最佳深

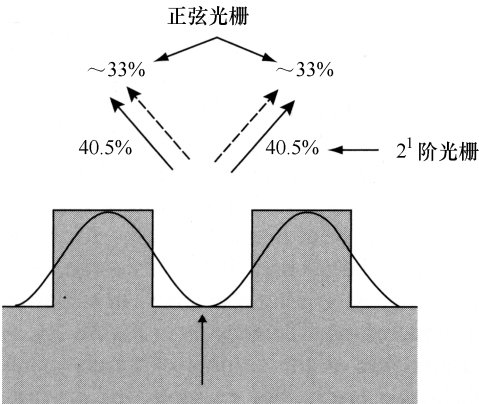


图 1.5 一个 2 阶相位光栅的例子（比正弦相位光栅更有效）