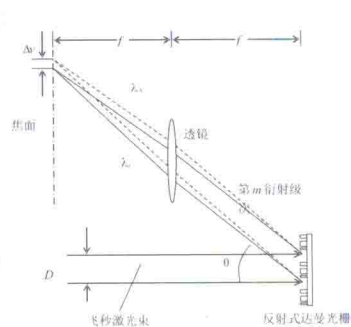




达曼光栅原理及应用

周常河 等著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

达曼光栅原理及应用

周常河 等 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是作者所在课题组在达曼光栅原理及应用领域 20 多年研究工作的系统性总结。第 1 章介绍达曼光栅的基本原理,包括圆环达曼光栅、达曼波带片、三维达曼光栅、扭曲达曼光栅以及涡旋达曼光栅等新型光栅器件。第 2 章介绍矢量达曼光栅,特别是采用简化模式方法发展出的矢量达曼光栅的理论解释和设计方法。第 3 章介绍飞秒达曼光栅的分束、合束、飞秒测量、飞秒多脉冲产生等一系列技术。第 4 章介绍达曼光栅的应用,包括达曼光栅在光纤通信、三维测量、激光直写、逆达曼光栅激光组束、达曼光栅光纤组束、达曼光栅激光腔内泵浦以及达曼编码纳米光栅调制技术等。第 5 章为总结与展望。

本书适合作为大专院校的老师和学生了解达曼光栅的教材,也可供从事达曼光栅研究与应用的科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

达曼光栅原理及应用/周常河等著. —北京: 科学出版社, 2017.8

ISBN 978-7-03-053797-3

I. ①达… II. ①周… III. ①信息光学—光栅—研究 IV. ①O438

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 140276 号

责任编辑: 许 健 王 威 / 责任校对: 杜子昂

责任印制: 谭宏宇 / 封面设计: 殷 靓

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

苏州越洋印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 8 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2017 年 8 月第一次印刷 印张: 13 1/4

字数: 267 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

光栅是一种基本的光学器件，在物理、化学、生物、天文等众多领域得到了重要应用。近年来，随着半导体工艺飞速进步，一种新型的二元光学元件——达曼光栅（Dammann grating, DG）也随之发展起来。达曼光栅表面由一系列位置编码的二元相位结构所组成，它能够轻易将一束激光分成等强度的多束光，具有衍射效率高、体积小、重量轻、分数比高等独特优点，可应用于飞秒激光技术、激光探测、激光直写、三维测量、粒子操控、光纤通信等领域。达曼光栅分束的方便性与简易性，极大地降低了光学系统的分束成本，简化了光学系统的结构。因此，达曼光栅成为解决实际问题的一个有效技术手段，在许多领域有重要的应用价值。

达曼光栅最早由达曼（Dammann）等于 20 世纪 70 年代提出，达曼最早提出的对称相位结构由于相位转折点多、效率低，后来已经放弃。20 世纪 80 年代，考虑到探测器往往仅对光场强度敏感，有人提出了改进的达曼光栅结构，使得一个周期内相位转折点大幅减少，降低了达曼光栅制作难度。通过计算机优化，本书作者也给出达曼光栅从 2 到 32 的全部数值解，包括 64 分束的数值解。最近几年，又发展出达曼波带片、三维达曼光栅、扭曲达曼光栅的一系列新型光栅器件，可以产生轴向多焦点、三维等光强焦斑阵列，以及实现多个物面同时成像在一个像面等新功能，为实际应用提供了新的技术手段。同时，简化模式方法应用于解释光栅周期接近波长的矢量达曼光栅，得到了矢量达曼光栅的解析公式，成为设计矢量达曼光栅的有力工具。

本书系统介绍了达曼光栅的基本原理、实验技术以及它的最新进展和发展趋势。第 1 章介绍达曼光栅的原理，系统总结了包括达曼光栅、达曼波带片、三维达曼光栅、扭曲达曼光栅等一系列新型达曼光栅器件；第 2 章介绍光栅周期接近波长的矢量达曼光栅，主要介绍最近发展的简化模式方法分析矢量达曼光栅，得到了偏振分束、偏振选择，以及 1×2 、 1×3 分束器的解析公式；第 3 章介绍达曼光栅在飞秒激光技术中的应用，包括达曼光栅的飞秒分束、测量、双脉冲、多脉冲产生等技术；第 4 章介绍达曼光栅在光纤通信、三维测量和激光直写等技术中的应用；第 5 章对全书进行总结，并对达曼光栅的其他应用进行展望。

感谢国家杰出青年科学基金、中国科学院百人计划、上海市青年科技启明星计划、上海市优秀学科带头人计划、国家自然科学基金仪器研制专项、面上项目

以及中国科学院仪器专项等科研项目的支持，使作者能够组建一支团队，在达曼光栅及应用领域连续开展工作。特别感谢刘立人先生对作者在达曼光栅研究领域的长期支持。第 1 章感谢余俊杰博士的贡献，他本人也获得了中国科学院百篇优秀博士学位论文奖。第 1 章由余俊杰博士执笔。第 2 章感谢郑将军博士、冯吉军博士的工作，他们都获得了中国科学院有关奖励，包括中国科学院院长优秀奖、中国科学院必和必拓奖等。第 2 章由冯吉军博士执笔。第 3 章感谢李国炜硕士、戴恩文博士、贾伟博士、武腾飞博士、周倩硕士等的工作。第 3 章由贾伟博士执笔。第 4 章感谢底彩惠博士、张军硕士、王晓鑫硕士、韦盛斌博士、刘昆博士、朱锋博士、黄巍硕士等的工作。感谢席鹏博士早在 10 多年前，就做出了 64×64 达曼光栅。其中，4.3 节由麻健勇博士执笔；4.2 节由王少卿博士执笔，其余由周常河完成。第 5 章由周常河执笔。

由于作者水平有限，书中难免有不足之处，敬请读者批评指正。

周常河

2017 年 4 月 11 日

目 录

前言

第 1 章 达曼光栅原理	1
1.1 达曼光栅基本类型	3
1.1.1 奇数型达曼光栅	3
1.1.2 偶数型达曼光栅	5
1.1.3 达曼光栅的制作	8
1.2 圆环达曼光栅	12
1.2.1 德拜标量圆环达曼光栅	12
1.2.2 德拜矢量圆环达曼光栅	16
1.3 逆达曼光栅及相干组束	22
1.3.1 共轭逆达曼光栅及相干组束	22
1.3.2 相位控制达曼光栅	24
1.4 三维达曼阵列	26
1.4.1 达曼波带片	26
1.4.2 三维达曼光栅	34
1.4.3 三维达曼涡旋阵列	42
1.5 达曼编码光栅	48
1.5.1 达曼涡旋光栅	48
1.5.2 复合达曼涡旋光栅	50
1.5.3 扭曲达曼光栅	52
1.6 小结	59
参考文献	61
第 2 章 矢量达曼光栅	65
2.1 严格耦合波分析	66
2.1.1 平面衍射: TE 偏振	67
2.1.2 平面衍射: TM 偏振	70
2.1.3 TM 偏振下的收敛问题	72
2.2 模式理论	73
2.3 矢量达曼光栅的简化模式理论	77

2.3.1 石英偏振无关 1×2 分束器	77
2.3.2 石英偏振选择分束器	87
2.3.3 石英 1×3 分束器	92
2.4 严格耦合波分析在集成光学中的应用	101
2.4.1 多层光栅的严格耦合波分析	101
2.4.2 严格耦合波分析在集成波导中的应用	104
2.5 小结	106
参考文献	107
第 3 章 达曼光栅飞秒激光技术	110
3.1 达曼光栅飞秒激光分束技术	110
3.1.1 达曼光栅并行分束技术	111
3.1.2 达曼光栅色散及补偿技术	115
3.1.3 达曼光栅与半透半反镜分束特性的比较	120
3.2 达曼光栅飞秒测量技术	122
3.2.1 飞秒激光测量技术	123
3.2.2 基于达曼光栅分束的飞秒测量技术	125
3.3 达曼光栅多脉冲产生技术	134
3.3.1 基于达曼光栅分束的多脉冲产生技术	134
3.3.2 倍密度达曼光栅对结构	137
3.4 高密度光栅多脉冲产生技术	143
3.5 小结	153
参考文献	154
第 4 章 达曼光栅应用	155
4.1 达曼光栅光纤分束技术	155
4.1.1 偶数型达曼动态耦合器	155
4.1.2 实验装置	157
4.2 达曼光栅三维测量技术	159
4.2.1 单目测量装置	160
4.2.2 双目测量装置	163
4.3 采用达曼光栅的并行激光直写技术	170
4.3.1 自动调焦模块及像散检测原理	173
4.3.2 光学刻写模块	178
4.3.3 旋转达曼光栅激光直写技术	179
4.3.4 延长焦深的并行激光直写技术	180
4.3.5 实验结果	183

4.4 达曼光栅其他应用	185
4.4.1 逆达曼光栅	185
4.4.2 达曼光栅光纤阵列耦合技术	187
4.4.3 达曼光栅激光器	187
4.4.4 圆环达曼光栅激光器	188
4.4.5 采用达曼光栅的光学元件测量技术	189
4.4.6 涡旋达曼光栅应用	189
4.4.7 强激光涡旋光栅	190
4.4.8 达曼编码纳米光栅	193
4.4.9 达曼光栅在飞秒时空变换系统中的应用	195
4.4.10 达曼光栅激光雷达技术	196
4.5 小结	197
参考文献	198
第 5 章 总结与展望	201

第1章 达曼光栅原理

达曼光栅 (Dammann grating, DG) 是一种典型的二元光学元件 (binary optical elements, BOE)。“二元光学”的概念是由美国麻省理工学院林肯实验室的研究人员于 20 世纪 80 年代率先提出的^[1]。狭义上的二元光学元件特指只有两个相位台阶的微光学器件。由于二元光学元件具有微米甚至亚微米量级的最小线宽,传统的光学冷加工技术完全不能胜任,因而通常由微电子光刻工艺来制备。其制备工艺主要包括匀胶、曝光、显影和刻蚀等工艺步骤。通过不同掩模版之间的套刻工艺,也可以加工四台阶或更高台阶数微光学元件。虽然更高台阶数的微光学元件也称为二元光学元件,但达曼光栅往往特指具有两个相位台阶的二元光学元件。由于二台阶结构一般只需采用一个掩模版经过单次光刻工艺就可以加工出来,工艺比较简单。一般情况下,我们所指的达曼光栅往往并不是通过相位台阶数的变化实现激光远场衍射级次光强度的调制,而是通过二台阶相位转折点的位置变化来实现的。达曼等最早提出这个物理思想^[2,3],并提出了中心对称性的相位结构的相位板,将达曼光栅放置在 $4f$ 光学结构的焦点处,实现了将一个输入物体并行复制出多个物体的实验。

由此,我们可以理解达曼光栅的核心物理思想:达曼光栅通过二元光学相位变化点的横向位置的调制来实现激光远场多级谱点等强度的光点阵列。由于目前光探测器件都对光场强度敏感,仅仅为了达到多级谱点的光强度相等这个要求,达曼最早采用的中心对称结构就不一定有必要。也就是说,不需要采用对称的二元相位结构,同样可以实现激光远场多级谱点光强度相等。Killat 等^[4]很早就指出,采用二元相位位置点的变化,就可以实现多级谱点光强度的相等,与最早达曼提出中心对称结构相比较,相位转折点更少,效率更高。也就是说,从实用的角度来说,由于达曼给出的中心对称结构效率低、相位变化点多,没有必要采用。因此,以后所指的达曼光栅都不是达曼原始对称结构的达曼光栅,而是改进后的、通过优化相位转折点位置的二元光学光栅。因为发现这个优化结构需要通过计算机来得到,所以当时仅报道了个别情况下的优化数值解,对于不同的分束比,有不同的优化数值解^[5-8]。因此,对于使用者,最好能够知道不同分束比的优化数值解,便于加工制作。从便于加工制造的角度来讲,希望达曼光栅的最小线宽能够尽可能大。从使用的角度来讲,希望衍射效率尽可能高,各级谱点尽可能相等。因此,在计算优化时,就需要综合考虑最小线宽、衍射效率和光强均匀度这三项

指标。因此,这三项指标成为了寻找达曼光栅优化解的三个重要参考指标,而寻找优化解的过程,只能通过计算机来完成。不通过计算机优化,仅通过解析公式,是不可能得到大分束比情况下的优化解的。达曼光栅计算优化过程的复杂性也可以这样来理解:从理论上讲,任何相位转折点的轻微移动,都可能导致衍射效率以及光点阵列之间均匀度的改变。由于达曼光栅内部可以有多个相位转折点,最优解是确定所有相位转折点的位置,这就是多参数优化过程。如果没有采用正确的方法,很容易陷入局部死循环,浪费大量的计算时间也得不到全局最优解。当然,这里可以考虑采用模拟退火等多参数优化算法。但是以作者个人的经验,由于模拟退火算法本身并没有利用达曼光栅的基本特性,这个优化过程是非常慢的,而且找到的不一定就是全局优化解。虽然有些理论试图用于估算达曼光栅的最大衍射效率,笼统的理论分析对于找到具体达曼优化数值解帮助并不大。事实上,在寻找优化计算解的过程中,必须依靠计算机,也要相信计算机的优化数值解。由于作者认为模拟退火算法在达曼光栅优化解的寻找过程中速度太慢,不是一个好算法,因此并没有采用模拟退火算法寻找达曼光栅优化解,而是从优化时间角度考虑,采用全局梯度法,也可以称为牛顿法。该方法首先要计算目标函数对所有相位转折点位置的微分。目标函数可以是衍射效率或者光点阵列的均匀度,所有相位转折点的微分构成一个位移矢量,下一步相位转折点的大小取决于这个位移矢量与预先设定步长的乘积,每一步优化的目的都是使目标函数变得更好。逐渐地减少预先设定的步长,由于该方法的本质是梯度算法,可以快速得到一次优化的数值解。由于梯度算法的速度很快,即使假设找到的是局部优化解,也可以通过设置不同的初始点(认为可以摆脱局部优化解的范围),得到更大范围内的优化解。

作者通过大量计算,找到了2~32以及64分束比的达曼光栅数值优化解^[9]。从达曼光栅的数值解可以得到很多有用的信息。例如,相位转折点的数量和分束比之间呈正相关,也就是分束比越少,所需相位转折点的数量就越少;分束比越多,所需相位转折点就越多。但是这两者之间也不是简单的线性关系。对于较少的相位转折点,梯度算法很快就能得到优化数值解;当相位变化点较多时,梯度算法所需的时间就很长,会找到较多的数值解。但我们关心的是衍射效率高、点阵之间均匀度好,同时最细线宽较大的优化数值解,只有这样的优化数值解对于实际应用才是最有意义的。

下面将介绍达曼光栅、圆环达曼光栅、达曼波带片、三维达曼光栅以及扭曲达曼光栅等原理,这些器件在诸多场合具有广泛的应用前景。有必要指出的是,圆环达曼光栅的物理思想和达曼光栅完全一致,都是通过控制相位变化点的横向位置来实现激光远场各级衍射级次光强度的相等。在圆环情况下,圆环可以看做不同半径圆孔的相位叠加,因为圆孔函数的傅里叶变换是一阶贝塞尔

函数, 所以圆环达曼光栅可以看做不同半径一阶贝塞尔函数的相位叠加, 通过计算机优化, 可以找到圆环达曼光栅的优化半径解。达曼波带片、三维达曼光栅以及扭曲达曼光栅用到的编码数据均是作者于 1995 年在 *Applied Optics* 上发表的达曼光栅优化解, 并不是达曼最早提出的对称相位结构数据。具体过程将在下面进行详细讲述。

1.1 达曼光栅基本类型

达曼光栅实现等间距光点阵列的原理如图 1-1 所示。图中, DG 代表达曼光栅; f 代表透镜焦距。将二值型达曼光栅 (包含振幅型和相位型) 置于傅里叶变换透镜前, 经单位振幅的平面波照射, 在透镜后焦面 (即频谱面) 上得到具有一定分束比、等间距、等光强的光点阵列分布。

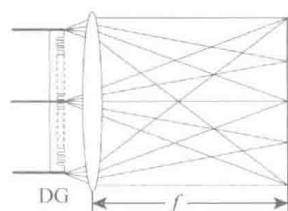


图 1-1 达曼光栅分束原理

通常设定调制相位是二值的, 即 0 和 π , 并将光栅的周期归一化为 1 。为了得到 $2M+1$ 级等光强的光束分布, 必须对光栅每一个周期内的相位转折点坐标 (即刻槽数目及槽宽) 进行调制。为了简化设计过程, 往往先设计其一维结构, 然后在正交方向展开, 可得到二维达曼光栅。

1.1.1 奇数型达曼光栅

首先考虑奇数型达曼光栅, 如图 1-2 所示。图中, φ 表示相位延迟; $\{x_k\}$ 表示归一化周期内相位转折点, 其中 $k=1, 2, \dots, K$, 且 $x_0=0$, $x_K=1.0$ 。对于一个矩形单元, 其透过率分布为

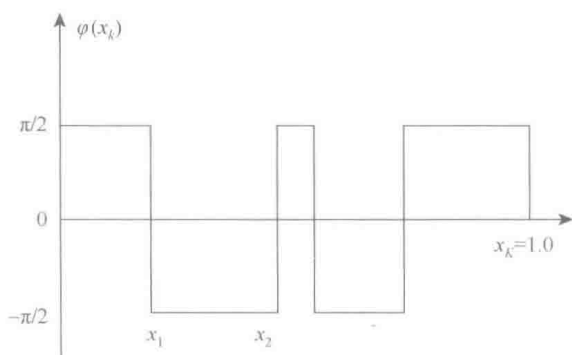


图 1-2 典型奇数型达曼光栅

$$t_k(x) = \text{rect} \left[\frac{x - (x_{k+1} + x_k) / 2}{x_{k+1} - x_k} \right] \quad (1.1)$$

其中, x 为相位转折点的距离; x_k 为第 k 个相位转折点的距离; x_{k+1} 为第 $k+1$ 个相位转折点的距离。其傅里叶变换为

$$\mathfrak{F}\{t_k(x)\} = \frac{1}{2n\pi} [(\sin \alpha_{k+1} - \sin \alpha_k) + i(\cos \alpha_{k+1} - \cos \alpha_k)] \quad (1.2)$$

其中, α_k 为第 k 个相位转折点在第 n 级衍射级次上对应的相位角, $\alpha_k = 2n\pi x_k$, n 为达曼光栅的衍射级次。总的谱点强度可表示为

$$I_n = \left(\frac{1}{2n\pi} \right) ((P_n)_R^2 + (P_n)_I^2) \quad (1.3)$$

其中, I_n 为达曼光栅第 n 级衍射级次上的光强度, 且

$$\begin{aligned} (P_n)_R &= \sum_{k=0}^K (-1)^k (\sin \alpha_{k+1} - \sin \alpha_k) \\ &= 2 \sum_{k=1}^K (-1)^{k+1} \sin \alpha_k - \sin 2n\pi \end{aligned} \quad (1.4)$$

$$\begin{aligned} (P_n)_I &= 2 \sum_{k=1}^K (-1)^{k+1} (\cos \alpha_{k+1} - \cos \alpha_k) \\ &= 2 \sum_{k=1}^K (-1)^{k+1} \cos \alpha_k - \cos 2n\pi - 1 \end{aligned} \quad (1.5)$$

其中, $(P_n)_R$ 为所有相位转折点在第 n 级衍射级次上实数部分强度的总和; $(P_n)_I$ 为所有相位转折点在第 n 级次上虚数部分强度的总和。对式 (1.3) 进行简化, 对于零级谱点, 其强度为

$$I_0 = \left[1 + 2 \sum_{k=1}^K (-1)^k x_k \right]^2 \quad (1.6)$$

其中, I_0 为零级谱点上的光强度。

对于非零级, 其谱点强度为

$$I_n = \left(\frac{1}{n\pi} \right)^2 \left\{ \left[\sum_{k=1}^K (-1)^k \sin \alpha_k \right]^2 + \left[1 + \sum_{k=1}^K (-1)^k \cos \alpha_k \right]^2 \right\} \quad (1.7)$$

根据衍射点阵的分束数目, 达曼光栅分为奇数型和偶数型两种。利用计算机进行数值计算光栅解时, 需考虑的目标函数有光栅效率函数、评价函数、最小线宽函数、均匀度函数等。

最小线宽函数定义为

$$\Delta = \min(x_{k+1} - x_k) \quad (1.8)$$

其中, $k = 1, 2, \dots, K$ 。由于制作工艺限制, 要求 Δ 应尽可能大。

均匀度函数定义为

$$\text{uni} = \frac{\max(I_n) - \min(I_n)}{\max(I_n) + \min(I_n)} \quad (1.9)$$

对于奇数型 $(2N+1)$ 达曼阵列照明器, 价值函数定义为

$$\phi = \frac{(I_0 - I_{av})^2 + 2 \sum_{i=1}^N (I_i - I_{av})^2}{I_0 + 2 \sum_{i=1}^N I_i} \quad (1.10)$$

其中

$$I_{av} = \frac{1}{2N+1} \left(I_0 + 2 \sum_{i=1}^N I_i \right) \quad (1.11)$$

衍射效率则定义为

$$\eta = I_0 + 2 \sum_{i=1}^N I_i \quad (1.12)$$

对于偶数型 $(2N)$ 达曼阵列照明器, 评价函数定义为

$$\phi = \frac{\sum_{i=1}^N (I_{2i-1} - I_{av})^2}{\sum_{i=1}^N I_{2i-1}} \quad (1.13)$$

其中

$$I_{av} = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N I_{2i-1} \quad (1.14)$$

衍射效率则定义为

$$\eta = 2 \sum_{i=1}^N I_{2i-1} \quad (1.15)$$

1.1.2 偶数型达曼光栅

偶数型达曼光栅的结构特点为, 前半周期的相位分布精确地等于后半周期的相位分布的 π 相位反转, 可表示为

$$\varphi(x_k + d/2) = \varphi(x_k) + \pi \quad (1.16)$$

其中, d 为光栅的一个周期。图 1-3 为了显示半周期 π 相位反转的方便, 将相位值分布标为 $(\pi/2, -\pi/2)$, 这完全等效于邻域相位差 $(0, \pi)$ 。

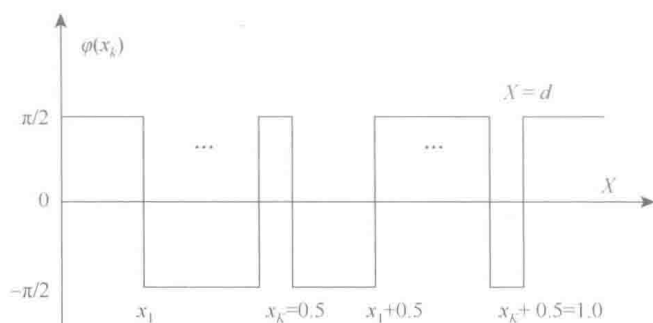


图 1-3 偶数型达曼光栅的相位分布示意图

由于偶数型达曼光栅的结构排除了零级衍射光对制作误差的敏感性，使实际制作的偶数点阵的均匀性高于奇数点阵。

在一维情况下，当偶数点阵 $(0, \pi)$ 二值型达曼光栅的一个周期受单色光照射时，其衍射级次的相对振幅可表示为

$$A(n) = \frac{1 - (-1)^n}{\pi n} \sum_{k=1}^{N/2} (-1)^k \exp(-2\pi n x_k) \quad (1.17)$$

其中， n 为衍射级次； N 为一个周期内转折点的个数。 n 取偶数时， $A(n) = 0$ 。每一级次的衍射光强为 $I(n) = |A(n)|^2$ ，则有 $I(-n) = I(n)$ 。

达曼光栅是一个相位型光栅，可得到较高的衍射效率。因为相位是二值结构，便于大规模集成电路技术进行制备加工。达曼光栅属于夫琅禾费型器件，光束分布均匀性不受入射光强分布的影响。达曼光栅有下面三种类型：

- (1) 一个周期内相位分布中心翻转对称（早期达曼光栅结构）；
- (2) 一个周期内没有对称性（奇数型达曼光栅）；
- (3) 一个周期内半周期平移翻转对称（偶数型达曼光栅）。

由以上分析可知，达曼光栅具有以下特性。

(1) 相移性。若 $A(n') = A(n) \exp(i\theta)$ 成立，其中 θ 为一恒定相位调制，则有 $I(n') = I(n)$ 。特别是 $\theta = \pi$ 时，上式表示二值光栅 π 相位反转，表明达曼光栅无论用正胶还是负胶、生长还是刻蚀来制备，都能得到等效的点阵。

(2) 平移性。令 $x'_k = x_k \pm \Delta t$ ，其中 Δt 代表一个周期内转折点的相对位移，代入式 (1.17)，则 $A(n') = A(n) \exp(-i2\pi n \Delta t)$ ，可得 $I(n') = I(n)$ 。表明在单色平面光照射下，平移达曼光栅并不改变衍射光强分布。

(3) 反转性。令 $x'_k = T - x_k$ ，其中 T 为坐标轴上任意一点，则 $A(n') = A^*(n) \exp(-i2\pi n T)$ ，“*”表示取复共轭。同样地，有 $I(n') = I(n)$ ，表明将偶数型达曼光栅以轴上任意一点为中心反转，衍射光强分布不变。

达曼光栅是一种二元光学元件，它通过一个周期内二元相位转折点的位置控

制, 实现激光远场的多极谱点的等光强。同样可以这样来理解达曼光栅特性:

- (1) 平移性: 在单色平面光照射下, 平移光栅并不改变衍射光强分布;
- (2) 反转不变性: 光栅以轴上任意一点为中心反转, 衍射光强分布不变;
- (3) 高阶谱点光强的均匀性随相位深度的变化不变。

如前所述, 达曼最早采用的中心对称相位结构是没有必要的。如果仅仅考虑光强度, Killat 等采用改进的达曼结构需要更少的相位变化点^[4], 这将显著降低光栅制作的难度, 更有实际意义, 因此 Killat 等的结果有利于设计奇数型达曼光栅。Morrison 提出的半周期反转相位结构更有利于实现偶数型达曼光栅^[5]。采用快速梯度法优化得到的达曼光栅数值解如表 1-1 所示。有必要指出的是, 表 1-1 中偶数的数值解仅仅给出半个周期, 主要是为了节省空间, 后半周期的相位转折点可以通过前半周期加上 0.5 而得到。

表 1-1 达曼光栅数值解

阵列数	转折点	效率/%	均匀度	特征尺寸
2	0.5	81.06	0.00001	0.5
3	0.73526	66.42	0.00002	0.265
4	0.22057, 0.44563	70.63	0.00001	0.054
5	0.03863, 0.39084, 0.65552	77.38	0.00001	0.039
6	0.11444, 0.20897	84.52	0.00001	0.095
7	0.23191, 0.42520, 0.52571	78.63	0.00001	0.101
8	0.06185, 0.17654, 0.20858, 0.31797	76.15	0.00004	0.032
9	0.06668, 0.12871, 0.28589, 0.45666, 0.59090	72.49	0.00004	0.062
10	0.10838, 0.11857, 0.19679, 0.23559, 0.31524, 0.37300	75.90	0.00044	0.010
11	0.15015, 0.36389, 0.54103, 0.55344, 0.71318, 0.76612, 0.91107	76.64	0.00067	0.012
12	0.01969, 0.08713, 0.12696, 0.18922, 0.24877, 0.35609	79.97	0.00030	0.020
13	0.17765, 0.31352, 0.41244, 0.49846, 0.57633, 0.70857, 0.73041	79.62	0.00045	0.022
14	0.05199, 0.12988, 0.19138, 0.24210, 0.27299, 0.31191, 0.35922, 0.49499	80.08	0.00127	0.005
15	0.18240, 0.27424, 0.58581, 0.67967, 0.71917, 0.82217, 0.90642	83.18	0.00033	0.039
16	0.14083, 0.17569, 0.22147, 0.26700, 0.35651, 0.39536, 0.43934, 0.45235	81.52	0.00007	0.013
17	0.12271, 0.36812, 0.38508, 0.46844, 0.56010, 0.72061, 0.80310, 0.86000, 0.93712	80.85	0.00037	0.017
18	0.03713, 0.06531, 0.11324, 0.11804, 0.13544, 0.18221, 0.25235, 0.39999, 0.42891, 0.46460	81.24	0.00039	0.005
19	0.08570, 0.14057, 0.35809, 0.44535, 0.50140, 0.50781, 0.61168, 0.65143, 0.74179, 0.89057, 0.93947	79.66	0.00080	0.006
20	0.04610, 0.15487, 0.17904, 0.21314, 0.24548, 0.27122, 0.30407, 0.38182, 0.39422, 0.44093	81.93	0.00204	0.012

续表

阵列数	转折点	效率/%	均匀度	特征尺寸
21	0.07505, 0.22656, 0.47886, 0.53661, 0.61683, 0.63009, 0.68194, 0.73870, 0.80083, 0.84469, 0.92196	82.01	0.00078	0.013
22	0.05594, 0.15405, 0.19038, 0.21583, 0.24074, 0.27138, 0.30809, 0.31684, 0.35007, 0.36146, 0.43254, 0.46241	79.87	0.00097	0.009
23	0.10435, 0.15704, 0.21912, 0.25653, 0.26153, 0.27828, 0.31707, 0.36536, 0.42446, 0.55744, 0.65260, 0.89953, 0.94099	81.34	0.00076	0.005
24	0.02429, 0.05414, 0.06357, 0.09289, 0.11691, 0.14255, 0.16572, 0.20359, 0.23521, 0.34309, 0.41865, 0.44707	82.26	0.00427	0.009
25	0.15387, 0.16452, 0.27298, 0.33211, 0.38120, 0.44909, 0.52349, 0.64396, 0.76823, 0.82082, 0.85980, 0.91639, 0.95832	82.83	0.00030	0.011
26	0.02297, 0.04900, 0.06575, 0.09419, 0.10844, 0.21426, 0.27527, 0.30298, 0.30778, 0.33468, 0.36283, 0.41160, 0.43772, 0.47229	81.05	0.00277	0.005
27	0.02859, 0.08692, 0.13812, 0.24035, 0.36942, 0.43961, 0.48655, 0.53940, 0.59754, 0.76160, 0.76925, 0.84337, 0.88257, 0.92116, 0.97417	80.35	0.00179	0.008
28	0.01644, 0.04317, 0.06095, 0.11648, 0.14444, 0.21911, 0.23895, 0.26930, 0.28823, 0.32389, 0.38798, 0.39853, 0.42512, 0.47821	82.38	0.00183	0.011
29	0.01582, 0.11494, 0.23203, 0.26929, 0.36868, 0.40786, 0.43497, 0.44045, 0.47031, 0.52654, 0.68721, 0.74326, 0.79553, 0.82470, 0.86563, 0.90709, 0.94619	78.46	0.00046	0.005
30	0.01771, 0.04688, 0.07217, 0.07782, 0.08859, 0.13849, 0.18676, 0.21026, 0.22839, 0.24944, 0.27177, 0.28582, 0.31038, 0.35288, 0.37314, 0.39557	81.01	0.00249	0.006
31	0.09241, 0.14299, 0.19031, 0.23982, 0.34695, 0.45454, 0.48263, 0.63078, 0.67371, 0.71256, 0.75291, 0.79316, 0.82855, 0.85338, 0.85886, 0.92831, 0.94824	81.84	0.00805	0.005
32	0.05540, 0.08900, 0.11010, 0.13340, 0.17320, 0.19580, 0.21090, 0.23060, 0.24870, 0.33010, 0.34820, 0.40100, 0.43320, 0.44110, 0.46530, 0.48400	83.03	0.00707	0.008
64	0.01041, 0.01743, 0.02951, 0.04058, 0.04768, 0.06088, 0.07056, 0.08398, 0.09737, 0.10275, 0.12850, 0.14324, 0.21278, 0.24661, 0.26268, 0.28020, 0.28895, 0.29665, 0.31767, 0.32416, 0.33771, 0.36176, 0.38281, 0.39622, 0.41280, 0.42374, 0.43336, 0.43816, 0.44859, 0.45944, 0.4669, 0.47427, 0.48392, 0.48935	80.72	0.00534	0.005

1.1.3 达曼光栅的制作

达曼光栅经过二元光学光刻工艺加工而成。二元光学的加工技术就是大规模集成电路的基本制造技术。达曼光栅的制作工艺根据所用掩模版及加工表面浮雕结构的特点可分成以下三类：①标准的二元光学制作方法，由二元掩模版经多次图形转印、套刻形成台阶式浮雕表面；②直写法，无需掩模版，仅通过改变曝光强度直接在器件表面形成连续浮雕轮廓；③灰阶掩模图形转印法，所用掩模版透射率分布是

多层次渐变的,经一次图形转印即形成连续或台阶表面结构。达曼光栅的加工流程主要有掩模版制备、光刻、显影、刻蚀等步骤,以下详细论述各个基本流程。

1) 掩模版制备

达曼光栅掩模版可用绘图机绘制成红膜图再精缩而成,也可以用光学或电子束图形发生器直接曝光得到。首先在计算机内绘制掩模图形,并按一定的数据格式存入数据文件,然后由图形发生器转换成控制电子束偏转和位移的量,并驱动电子束对铬和抗蚀层基片表面曝光,经显影后在抗蚀层上形成掩模图案,再用溶液去掉未被抗蚀层保护的铬层及残留抗蚀层,最后形成黑(有铬区)、白(无铬区)图案的掩模版^[10]。

光学图形发生器是用光束代替电子束完成光刻胶曝光;由于光的波长较电子束波长长得多,其分辨率就比电子束方法低,但其设备较电子束设备便宜很多,仍是一种常用的制版方法。

达曼光栅也可以通过绘制红膜图制版加工而成,这是利用绘图机将图形直接绘制在红膜上,再经过粗缩和精缩将红膜图缩小转印在干版上,这种制版方法最简单,分辨率约为 $1\mu\text{m}$ 。

2) 光刻

光刻是达曼光栅制造的关键工艺。光刻可分为接触式、接近式和投影式三种。

接触式光刻是将掩模版和涂有光刻胶的基片接触曝光。这种方法的最大缺点是基片与掩模版的直接接触引起光刻胶面损伤及掩模版变形,影响光刻精度。

接近式光刻是对接触式光刻方式一个比较简单的改进方案,即在掩模版与基片间留有一定的间隙(一般间距在 $20\sim 50\mu\text{m}$ 范围内),可避免光刻胶胶面的损伤并延长光刻掩模的使用寿命。但是由于衍射效应,接近式光刻会使线条有所加宽,且因掩模版与基片本身的不平整还会影响图形的一致性,分辨率低于接触式光刻和投影式光刻。

投影式光刻是把掩模版上的图形投影到距离掩模版几厘米处的涂有光刻胶的基片上,为了提高分辨率,每次只曝光掩模版的一小部分。然后用扫描或分步重复的方法将小面积图形布满整个基片。投影式光刻的缩小倍数为 $M:1$ (表示基片上的图形缩小 M 倍)和 $1:1$ 。缩小倍数和投影曝光中所用透镜及掩模版的能力有密切关系。

3) 显影

显影是将已经通过掩模版曝光的光刻胶基片通过与显影液化学反应,生成需要的光刻胶掩模图案。这里以正胶为例,通过浸没或喷淋显影的方式,没有掩模遮挡的光刻胶部分由于发生光化学反应,能够与显影液发生化学反应被溶解掉;而被掩模版挡住的部分没有曝光也就没有发生光化学反应,不能与显影液反应而被保留。于是,通过光刻显影之后,基片上就生成了与掩模版相对应的光刻胶掩模。

4) 刻蚀

刻蚀技术分湿法刻蚀和干法刻蚀两种。湿法刻蚀实际上是化学腐蚀,属于各