

文章编号: 0258-7025(2001)04-0369-03

64 × 64 点阵达曼光栅的设计与实现^{*}

席 鹏 周常河 赵 帅 王淮生 刘立人

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

提要 分析了偶数点阵达曼光栅的设计原理与特性。利用数值优化方法,获得了一组 64 × 64 点阵达曼光栅解。光栅模版用电子束制版法制成,其最细线宽为 2.5 μm。用光刻法实现了这一位相光栅,并比较了不同位相光栅制作法的优缺点。原子力显微镜测得的光栅深度曲线与 64 × 64 点阵实验结果表明,此光栅结果接近理论值。

关键词 达曼光栅,光互连,光刻法

中图分类号 O 438.2 文献标识码 A

Design and Fabrication of 64 × 64 Spot Array Dammann Grating

XI Peng ZHOU Chang-he ZHAO Shuai WANG Huai-sheng LIU Li-ren

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract The design method and features of even-numbered Dammann gratings are presented in this paper. With numerical optimization method, 64 × 64 Dammann grating solution is obtained. The mask pattern is fabricated with electro-beam facilities with the feature size of 2.5 μm. The phase grating is realized with photolithographic IC technique. Three different methods to realize phase gratings are discussed. The depth of binary-phase grating measured with an atomic force microscope and the measurements of the 64 × 64 spot array show that the experiment is in good agreement with the theoretical result.

Key words Dammann grating, optical interconnection, photolithography

1 引 言

达曼光栅是一种可以将入射单色光在傅里叶变换的远场处高效率地生成均匀光强点阵的位相光栅。最初在 70 年代, Dammann 等在研究多个像复制时提出了达曼光栅^[1]。他首次把大规模集成电路工艺引入光学领域,为微光学的发展奠定了基础。在 80 年代,达曼光栅被运用于光耦合领域。从 80 年代末至今,由于光计算与光互连的迅速发展,达曼光栅受到了普遍的重视。在理论上, Morrison 提出了偶数点阵达曼光栅^[2], Vasara 提出了非正交二维结构达曼光栅^[3]。实际应用中,高效率、大规模点阵达曼光栅是发展的主要趋势^[4]。特别是正交二值位相光栅,由于其具有设计简单、制作工艺成熟、无需精确套准等优点,因而被广泛使用。应用此类光栅, Tooley 等实现了光学细胞逻辑图像处理器^[5],

McCormick 等实现了基于自电光效应的光计算机件^[6]。

由于偶数点阵达曼光栅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容易高于奇数点阵^[4]。本文从偶数点阵达曼光栅的理论出发,得出了此类光栅具有相移性、平移性与反转性等特性。利用数值优化方法,我们得到了一组 64 × 64 点阵达曼光栅解。利用电子束制版法,得到了最细线宽为 2.5 μm 的振幅光栅模版,并用光刻法将其翻拍为位相光栅。用原子力显微镜测出的光栅深度曲线直观地给出了光栅剖面面貌。对点阵实验结果的分析表明,这一光栅比较接近理论值。

2 偶数达曼光栅及其特性分析

在一维情况下,当偶数点阵(0, π)型二值位相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^[2]

^{*} 中国科学院百人计划、国家自然科学基金(69837020)和上海市启明星计划 98QD14023 资助项目。

收稿日期 2000-02-14;收到修改稿日期 2000-03-17

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

式中 n 为衍射级次, N 为一个周期内拐点 x_k 的个数。

相对光强 $I(n) = |A(n)|^2$ 。易得 $I(-n) = I(n)$ 。当 n 为偶数时, $I(n) = 0$ 。令 $I(1) = I(3) = \dots = I(2L - 1)$, 可以得到一组 $1 \times 2L$ 的达曼光栅解。将此解分别应用于 x, y 轴, 即可得到一组 $2L \times 2L$ 的光栅解。

2.1 特性分析

2.1.1 相移性

如果 $A(n') = A(n) \exp(i\theta)$, 其中 θ 为一恒定位相调制, 则有 $I(n') = I(n)$ 。特别是, 当 $\theta = \pi$ 时, 上式代表了二值光栅 $(0, \pi)$ 位相的反转, 它表明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。

2.1.2 平移性

令 $x'_k = x_k + \Delta t$, 其中 Δt 代表一个周期内拐点的相对位移, 代入式(1)则 $A(n') = A(n) \exp(-2\pi i n \Delta t)$, 可得 $I(n') = I(n)$ 。平移性说明在单色平面光照射下, 平移光栅并不改变衍射光强分布。

2.1.3 反转性

令 $x'_k = T - x_k$, 其中 T 为坐标轴上任意一点, 则 $A(n') = A^*(n) \exp(-2\pi i n T)$, 同样地有 $I(n') = I(n)$ 。即光栅以轴上任意一点为中心反转, 衍射光强分布不变。

平移性和反转性说明, 光栅优化解不能通过平移或反转操作得到。

2.2 目标函数

通常达曼光栅解可以通过数值优化方法得到。

以下函数通常被用于优化光栅解:

光栅效率函数

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

式中光强为归一化后的光强值。一维位相型达曼光栅的衍射效率上限为 85% 左右^[7]。

评价函数

$$\phi = \frac{\sum_{i=-L}^L (I_{2i-1} - I_{av})^2}{\sum_{i=-L}^L I_{2i-1}} \quad (3)$$

式中 $I_{av} = \frac{1}{2L} \sum_{i=-L}^L I_{2i-1}$ 。通常评价函数的光强取归一化后的光强值。

最小尺寸函数

$$\Delta = \min(x_{k+1} - x_k) \quad (4)$$

式中 $k = 1, 2, \dots, N$ 。制作工艺要求 Δ 尽可能地大。均匀度函数

$$\text{uni} = \frac{\max(I_n) - \min(I_n)}{\max(I_n) + \min(I_n)} \quad (5)$$

利用牛顿法与梯度法, 得到了一组 1×64 点阵达曼光栅解^[4]。将解分别应用于 x, y 两个轴向, 即为 64×64 点阵达曼光栅解。上述函数均可扩展至二维情况。

3 制作过程与结果

在实验中, 光栅周期 $d = 500 \mu\text{m}$, 最细线宽为 $2.5 \mu\text{m}$ 。我们将 20×20 个周期的光栅解进行振幅编码, 利用电子束制版法, 在一块石英基片上得到了 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的母版图案。采用大规模集成电路工艺中的光刻法, 利用光刻胶的浮雕特性实现了这一光栅结构。在光刻法中, 光刻胶厚度的控制一般通过控制涂胶厚度来实现, 也可以采用控制曝光量实现。我们通过控制显影时间来实现, 也得到了较好的结果。实验采用的光刻胶为 Shipley AZ1350。显影过程中采用逐次逼近法, 通过一台干涉显微镜来观测显影后光刻胶的深度。由于达曼光栅具有像复制特性^[1]以及零级敏感性^[4], 使得我们可以以极简单的方法判断制作的偶数达曼光栅的质量: 直接把光栅放在一个光斑直径大于一个光栅周期的激光器前, 在光栅后可直接得到激光光斑的多个像。如果没有“十字线”, 则光栅图案质量较高, 如果零点对应的像同时消失, 则光栅深度也满足要求。

位相光栅的制备还可以利用反应离子刻蚀法或湿化学法。我们同时采用这两种方法制作了这一光栅。由于这两种方法的光栅制作在基片上, 使得所制光栅具有高透射率、可工作于较高功率环境、表面易清洁等优点。湿化学法工艺简单, 成本低廉, 但其刻蚀深度难以精确控制, 且侧蚀严重, 很难实现较高精度。利用反应离子刻蚀法可以实现很高的刻蚀精度, 但它需要专门仪器, 工艺较为复杂, 因而成本较高。与它们相比, 光刻法图案精度最高而成本最低, 且光刻法可以用于制备连续位相光栅^[8]。但由于其光栅是在光刻胶中实现的, 很难用于多位相光栅制备。光刻法作为一种高精度、低成本的光栅制备法, 有必要对其进行深入研究。

实验中用 He-Ne 激光器作为光源, 衰减后经过显微物镜扩束及针孔滤波, 用平行光管得到单色平面光。从光栅出射的衍射光通过透镜在焦面上成

像,用一台 512×512 像素的 CCD 摄像机将结果导入计算机。经过衰减,各衍射级次的光强可由计算机以灰度值读出并作数值处理。刻蚀深度通过 DI 公司的原子力显微镜 Dimension 3100 测出(图 1)。表 1 给出了 64×64 点阵测量结果(图 2)与理论值的对比。在测量光栅效率时,使用一个广角短焦透

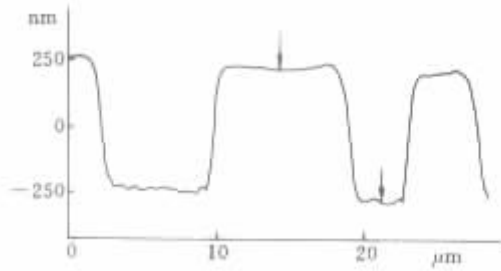


图 1 利用原子力显微镜测得的光栅深度曲线
(光刻法结果)

Fig.1 Grating-depth curve measured with an atomic force microscope (photolithography result)

镜成像,计算点阵光强与总光强的比值(分裂比),各衍射级次的光强可用一长焦透镜得到。利用光栅效率与衍射级次光强灰度值,得到归一化后的光强,并将其用于计算评价函数与均匀度函数。可以看出,实验结果是令人满意的。

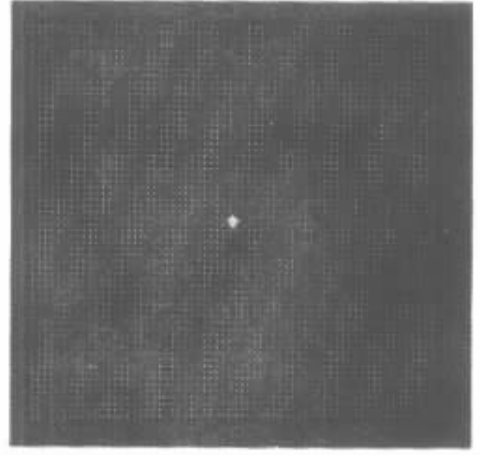


图 2 64×64 达曼光栅点阵图(光刻法结果)

Fig.2 64×64 Dammann grating spot array
(photolithography result)

表 1 实验结果分析(二维情况)

Table 1 Measurement of the experimental results (two-dimensional case)

	Grating efficiency (splitting ratio)	Evaluation function	Uniformity	The depth of π radians out of phase($\lambda = 633 \text{ nm}$)
Theoretical value	65%	1.9×10^{-8}	0.039	492.8 nm
Photolithography	64%	9.7×10^{-7}	0.288	500.4 nm

4 结 论

达曼光栅作为高效率、高均匀度阵列照明器已被成功应用于多个实用场合。本文所给出的偶数点阵达曼光栅的特性将有助于达曼光栅的设计与应用。实验中,采用了三种不同位相光栅制备法,并比较了它们的优缺点。在设计与制作过程中,利用计算机进行了数值计算,并利用了大规模集成电路工艺。这些方法和技术完全不同于传统的光学设计与加工方法,已成为现代信息光学发展的一个主要研究方向。

致谢 感谢中国科学院上海光机所高密度光存储实验室的孙洁林协助测量光栅表面形貌。

参 考 文 献

1 H. Dammann, K. Görtler. High-efficiency in-line multiple imaging by means of multiple phase holograms. *Opt. Comm.*, 1971, **3**(5) 312 ~ 315

2 R. L. Morrison. Symmetries that simplify the design of spot array phase gratings. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1992, **9**(3) 464 ~ 471

3 A. Vasara, M. R. Taghizadeh, J. Turunen *et al.*. Binary surface-relief gratings for array illumination in digital optics. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(17) 3320 ~ 3336

4 C. Zhou, L. Liu. Numerical study of Dammann array illuminators. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(26) 5961 ~ 5969

5 F. A. P. Tooley, S. Wakelin, M. R. Taghizadeh. Interconnects for symmetric-self-electro-optic-effect-device cellular logic image processor. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(8) 1398 ~ 1403

6 F. B. McCormick, T. J. Cloonan, A. L. Lentine *et al.*. Five stage free-space optical switching network with field-effect transistor self-electro-optic-effect-device smart pixel arrays. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(8) 1601 ~ 1618

7 U. Krackhardt, J. N. Mait, N. Streibl. Upper bound on the diffraction efficiency of phase-only fanout elements. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(1) 27 ~ 37

8 T. J. Suleski, D. C. O'Shea. Gray-scale masks for diffractive-optics fabrication: I. Commercial slide imagers. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(32) 7507 ~ 7517