

光互连模块中偶数大点阵 64×64 位相计算 全息光栅的简化设计和分析*

罗风光 曹明翠 李洪谱 徐 军 万安君 李再光
(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘 要 采用简化的综合设计方法, 对偶数大点阵位相计算全息光栅进行了优化设计和分析, 实验上研制出用于光互连模块的 64×64 大点阵位相计算全息光栅分束器, 优化设计一维衍射效率为 80.1%, 光强不均匀性小于 0.3%。

关键词 位相光栅, 光互连, 优化设计, 计算全息。

1 引 言

位相计算全息光栅是一种重要的光学分束元件, 由于它可以将一束激光束分为一维和二维多束等光强的光点列阵, 使用方便, 因而在光通讯、光计算、光互连、光交换、光盘存贮、图像处理等领域具有广泛的应用前景。尤其是在光计算、光互连领域, 随着自由空间光交换网络的飞速发展, 光学信道越来越密, 互连数越来越多, 而且随着光逻辑器件的发展, 如自电光效应(SEED)、对称自电光效应(S-SEED)、大规模集成 CMOS-自由光效应混合集成(CMOS-SEED)和场效晶体管-自由光效应单片集成(FET-SEED)灵巧象元器件的出现^[1-3], 对位相光栅的要求越来越高, 由于信号通道数及光逻辑器件接收窗口呈偶数分布, 用传统方法设计制作的奇数点阵分束光栅已不能满足光互连网络的要求, 必须研制具有偶数点阵且具有大的点阵分束能力的光栅分束器件。利用位相计算全息光栅的分束能力, 其每一束光都可作为一个光信号的载体, 实现大容量、高密度信息的并行传输, 并可给光逻辑器件提供泵浦光功率, 完成特定的互连函数的功能, 使光互连网络模块朝着小型集成化、实用化的方向发展, 为研制光互连并行处理高性能计算机系统和大容量宽带综合业务数字光学通讯网络系统提供重要的大点阵数信号光束分束器件。国外目前由美国 AT&T BELL 实验室研制了 64×32 偶数点阵的位相计算全息光栅, 对 64 分布的一维衍射效率的优化计算结果为 80%, 不均匀性为 4% 左右, 已用于他们设计的自由空间光交换网络中^[4]。作者在研制了 65×65 奇数点阵位相计算全息光栅的基础上^[5], 开展了偶数点阵位相计算全息光栅的研究, 设计制作出国内最大偶数点阵数的 64×64 位相计算全息光栅分束器。其优化设计的一维衍射效率为 80.1%、光强不均匀性为 0.3%, 实测二维衍射效率为 61%, 不均匀性小于 15%。

* 国家科委 863 高科技项目、电子工业部电子科学研究所预研基金资助课题。

收稿日期: 1996 年 7 月 29 日; 收到修改稿日期: 1996 年 11 月 6 日

2 位相计算全息光栅结构设计理论

位相计算全息光栅是一种可将一束入射的单色平行光分为一维或二维等间距(或非等间距)、等光强的光束列阵,它是一种具有不等间距、周期重复结构的傅里叶型分束器件^[6, 7],其原理图如图 1 所示,当平行入射的激光束经过位相计算全息光栅时,通过光栅厚度的周期性变化对入射的单色平面波进行空间位相调制,经傅里叶透镜变换,在后焦面成像产生夫朗和费衍射图形,形成光点的周期性分布。

位相计算全息光栅单个周期内的位相跳变结构如图 2 所示。其中 x_1, x_2, \dots, x_L 为位相

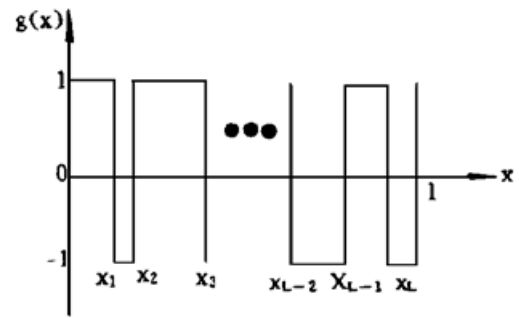
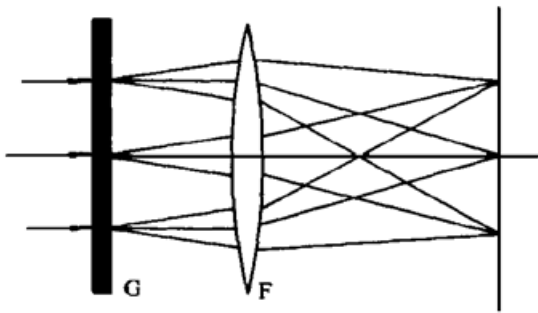


Fig. 1 The principle scheme of computer generated holographic phase grating

Fig. 2 The phase structure of phase grating

跳变点, $g(x)$ 为振幅分别为 + 1、- 1 的二值周期函数, 令光栅位相分布为:

$$\theta(x) = \frac{\pi}{F2} + \theta g(x) \tag{1}$$

对理想的二元位相光栅, $\theta = \pi/2$, 经傅里叶变换后, 光栅各衍射级次 m 的相对光强 I_m 为^[8]:

$$I_0 = [2F(0) - 1]^2 \sin^2 \theta + \cos^2 \theta \tag{2}$$

$$I_m = 4 \sin^2 \theta [F_R^2(m) + F_I^2(m)], \quad m \neq 0 \tag{3}$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} F(0) &= \sum_{k=0}^L (-1)^{k+1} x_k \\ F_R(m) &= \frac{1}{2\pi m} \sum_{k=0}^L (-1)^{k+1} \sin(2\pi m x_k) \\ F_I(m) &= \frac{1}{2\pi m} \sum_{k=0}^L (-1)^{k+1} \cos(2\pi m x_k) \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

L 为位相跳变点数, 位相计算全息光栅的结构设计要解决的问题就是: 如何找到一组 $\{x_k\} (k = 0, 1, \dots, L)$, 使得所需各衍射级次的光强相等, 且衍射效率最高。对一光点数为 $N = 2n + 1$ 的一维光栅, 其衍射效率可表示为:

$$\eta = \sum_{m=-n}^n I_m \tag{5}$$

这里有 $\sum_{m=-\infty}^{+\infty} I_m = 1$ 。

3 偶数点阵位相计算全息光栅的简化设计和分析

由于位相计算全息光栅结构设计是一个非线性、多极值的优化问题, 其解的个数随着光点数的增加呈指数增加。如对 65 列阵的光栅, 其解的数目可达 $2^{32} = 4 \times 10^9$ 个之多, 要在如此之多的解中找出衍射效率最高且误差最小的解是十分困难的, 为了解决大点阵位相光栅结构的优化设计问题, 作者在分析光栅结构的基础上, 提出了一种综合优化设计方法: 模拟退

火-回火-广义简约梯度算法。在光栅优化设计过程中, 选取的优化目标函数为:

$$\text{Merit} = \sum_{m=-n}^n \left[I_m - \frac{\eta_0}{N} \right]^2 \quad (6)$$

由于位相光栅结构的对称性, 产生 0 级、±1 级、±2 级、…、±n 级衍射光点, 由于中心 0 级的存在, 因而一般情况下, 它产生的光点数总是奇数, 为了产生点阵数为 64 的偶数光栅, 在优化设计时有意将 0 级及所有偶数衍射级次的光点光强设计为 0, 即:

$$I(0) = I(\pm 2) = I(\pm 4) = \dots = 0 \quad (7)$$

而使所需奇数级次的衍射光强相等:

$$I(\pm 1) = I(\pm 3) = \dots = I(\pm n) \quad (8)$$

这样就可满足等间距、等光强的偶数光栅的要求, 从偶数光栅的设计要求可以看出, 要设计点阵数为 N 的偶数光栅, 实际设计的是 $2N - 1$ 的点阵, 而其中的 0 级和偶数级次的光强为 0, 如对点阵数为 64 的光栅结构进行设计, 则需要按 $2 \times 64 - 1 = 127$ 的点阵进行计算, 如果这 127 个点都是独立的, 则对大点阵的优化设计将变得十分繁杂, 因此可以根据偶数光栅的特点, 在结构上保证偶数级次的光强为 0, 考虑到一个光栅周期的结构内应对偶数级次相干相消, 因此, 可以将位相分布函数设计为反相对称, 即:

$$\theta(x) = \theta(x + 0.5) + \pi \quad (9)$$

也即在光栅周期(0, 0.5)范围内的位相分布与(0.5, 1)范围内的位相分布相差 π 位相, 则在结构上保证了偶数级次光强为 0, 而独立的光点数减少到 N 个。

由于等间距偶数点阵的中心对称性, 偶数光栅还满足[0, 0.5]区间内关于 0.25 中心对称, 即:

$$\theta(x) = \theta(0.5 - x) \quad (10)$$

这些条件限制, 大大简化了偶数点阵位相计算全息光栅设计的工作量, 通过对 64×64 大点阵的位相计算全息光栅结构进行优化计算, 其位相光栅一维位相结构的计算结果如表 1 所示, 一维衍射效率可达 80.1%, 光强不均匀性小于 0.3%。0 级和其它偶数级次的衍射光强得到了很好的抑制。图 3 为 64×64 位相计算全息光栅光刻模版照片。

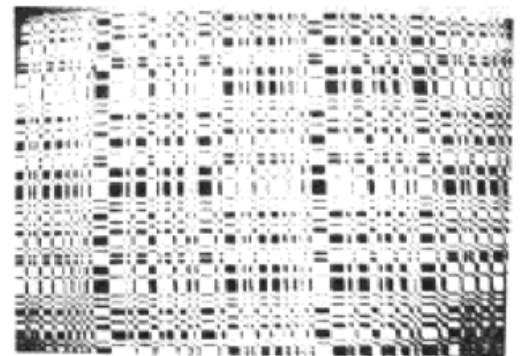


Fig. 3 The photograph of mask for 64×64 phase grating

Table 1. Computing results of phase structure of the phase grating with one demension

No.	x_k	No.	x_k	No.	x_k	No.	x_k
1	.194500×10 ⁻¹	2	.546991×10 ⁻¹	3	.684741×10 ⁻¹	4	.100490
5	.114689	6	.134403	7	.141316	8	.152330
9	.156744	10	.167340	11	.181672	12	.193551
13	.213491	14	.223066	15	.231691	16	.237911
17	.249628	18	.255201	19	.266079	20	.272854
21	.283105	22	.290043	23	.301600	24	.309216
25	.324897	26	.336155	27	.344557	28	.354645
29	.362487	30	.371682	31	.424368	32	.461150
33	.473175	34	.485598	35	.500000	36	.519450

No.	x_k	No.	x_k	No.	x_k	No.	x_k
37	.554699	38	.568474	39	.600490	40	.614689
41	.634403	42	.641316	43	.652330	44	.656744
45	.667340	46	.681672	47	.693551	48	.713491
49	.723066	50	.731691	51	.737911	52	.749628
53	.755201	54	.766079	55	.772854	56	.783105
57	.790043	58	.801600	59	.809216	60	.824897
61	.836155	62	.844557	63	.854645	64	.862487
65	.871682	66	.924368	67	.961150	68	.973175
69	.985598						

4 64×64 大点阵位相计算全息光栅性能分析

位相计算全息光栅是一种具有表面位相浮雕结构图形的光栅,对透射型的位相计算全息光栅,可以采用大规模集成电路工艺的光刻技术和反应离子刻蚀技术来制作,作者采用了在石英玻璃基片上直接刻蚀光栅图形的方法,并较好地解决了用反应离子刻蚀设备难于在石英玻璃基片上刻蚀较深厚度槽沟(1000 nm 左右)及刻蚀深度的控制问题,位相刻蚀深度误差小于 8%,成功制作出用于 $0.85 \mu\text{m}$ 波长的 64×64 偶数大点阵位相计算全息光栅。光点间距为 $50 \mu\text{m}$ 。

4.1 相对光强分布的测试

随着位相计算全息光栅分束器分出的光点越来越多,对光栅各分束光点光强的均匀性等性能参数的测试显得越来越重要。而传统的检测方法是用光功率计对各光点进行逐点测量,但在列阵光点数很大,且光点间距致密的情况下,这种逐点测量法是不太实用的。为此,作者采用计算机辅助测试技术,基于 CCD 摄像机,设计了一套光点列阵性能检测系统^[9],可对超大光点列阵光点的相对光强及均匀性等特性进行有效地测试。图 4 为大型光点列阵性能检测系统结构图。

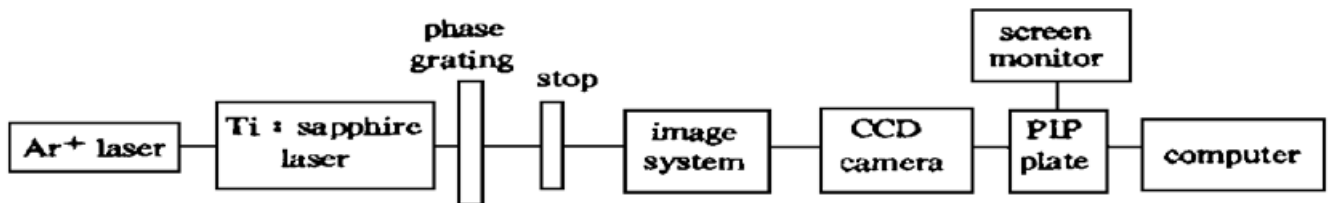


Fig. 4 The scheme of diagnostic system for large spot arrays

该光路系统由成像系统、CCD 摄像机、PIP 图像板、扫描显示器、计算机、 Ar^+ 离子激光器及掺钛蓝宝石激光器组成,光源由 Ar^+ 离子激光器泵浦掺钛蓝宝石激光器产生 $0.85 \mu\text{m}$ 波长的单色光经准直后照射到 64×64 位相光栅上,由位相光栅产生各级次的衍射光束经成像系统,成像于 CCD 摄像靶上,光点列阵显示在监视器的屏幕上。由于 64×64 位相计算全息光栅产生 4096 个光点,每行有 64 个光点,点阵数大,光点太密,不易直接测量,因此采用计算机辅助测试方法,将分束点阵的局部放大图形成像在监视器屏幕上,图 5(a)、图 5(b) 为 64×64 位相计算全息光栅点阵局部放大照片。

用扫描线对各行光点相对光强进行逐行扫描,其结果如图 6(a)、图 6(b) 所示。图 6(a)

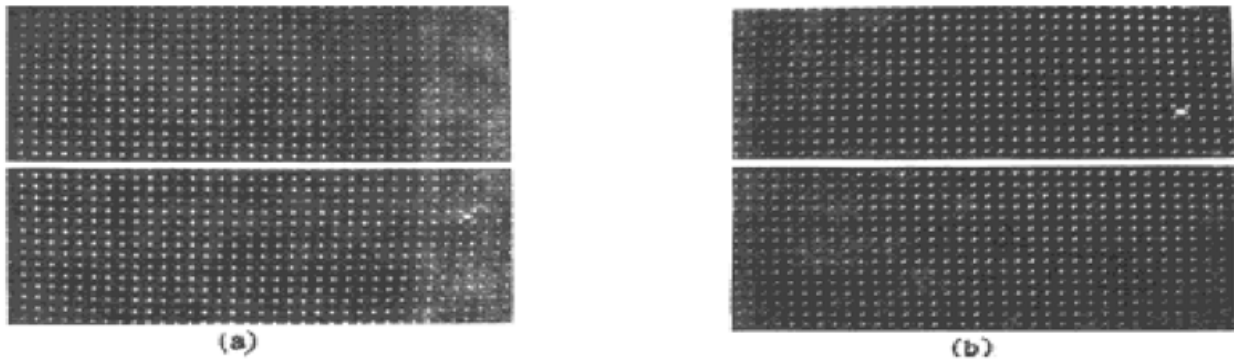


Fig. 5 The photograph of part spot arrays

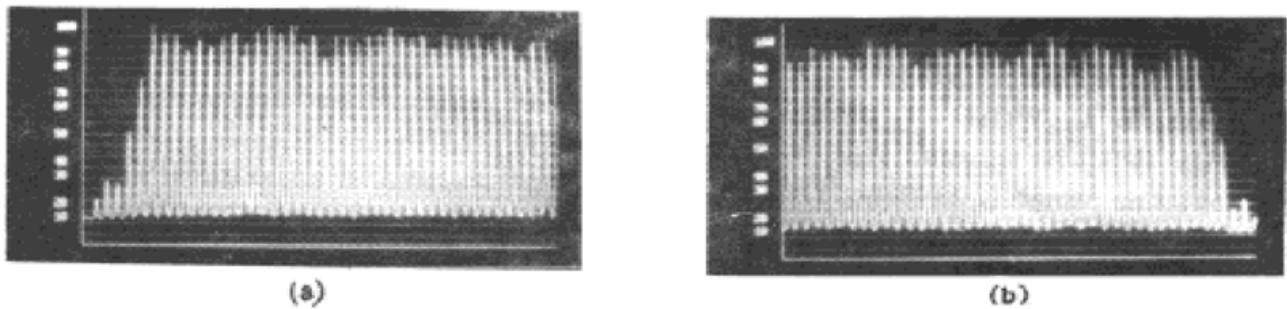


Fig. 6 The scan results of relative light intensities of the spot arrays

为—行光束左半部分光点相对光强分布扫描测试结果,图 6(b)为同一行光束右半部分光点相对光强分布的扫描结果。从图中可以看出,相对光强分布的均匀性较好。通过对 64×64 位相计算全息光栅分束点阵逐行扫描测试结果进行综合分析,得到相对光强不均匀性小于 15%。

4.2 64×64 位相计算全息光栅衍射效率的测试

二维位相光栅的衍射效率定义为:

$$\eta = \frac{\sum_{m=-k}^k \sum_{n=-k}^k I_{mn}}{\sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} I_{mn}} \quad (11)$$

I_{mn} 为第 mn 衍射级的光强, k 为 x 、 y 方向光栅所需最高衍射级次,对偶数点阵, k 只取奇数。由上式测量位相光栅衍射效率时,首先测出入射光的总光强,再求出全部所需光束点阵的光强之和,即可得到衍射效率。实际测试时,在测试光路中先用一块与位相光栅材料相同的平板石英玻璃来测试总的入射光功率 I_i ,再换上待测光栅样片,并在测试光路中在焦平面上用光栏将 64×64 点阵以外的高级次衍射光滤掉,测出一个光功率值 I' ,再测出 0 级光功率值 I_0 ,则衍射效率为 $\eta_0 = (I' - I_0) / I_i$ 。经测试得到的 64×64 位相计算全息光栅的二维衍射效率为 61%。

从实际制作的 64×64 光栅点阵来看,尽管在优化设计时 0 级衍射级次的衍射光强得到了抑制,但仍存在 0 级光点,这主要是因为受工艺条件的限制,存在刻线误差和刻蚀深度误差,不能完全满足优化设计的要求。不过在光互连模块的实际应用中,由于仅有偶数光点打在光窗上,0 级光点并不作为信号光源,从而避免了 0 级光点照成的影响^[4]。

结 论 用一种简化的综合设计方法,对偶数大点阵位相计算全息光栅进行了优化设计和分析,计算结果表明,优化设计的 64×64 大点阵位相计算全息光栅衍射效率高,光强均匀性好,实验上研制出的 64×64 大点阵位相计算全息光栅分束器,二维衍射效率为 61%,光强不

均匀性小于 15%，可以满足光互连模块的要求。因此， 64×64 大点阵位相计算全息光栅的研制与应用必将促进光互连光交换等技术的发展，极大提高光通信、光电混合计算机的容量和速度，加快“信息高速通讯网络”的建立和发展。

参 考 文 献

- [1] D. A. B. Miller, Quantum well self-electro-optic effect devices. *Opt. and Quantum. Electron.*, 1990, **22**(1) : S61~ S98
- [2] F. B. McCormick, T. J. Cloonan, F. A. P. Tooley *et al.*, Six-stage digital free-space optical switching network using symmetric self-electro-optic-effect devices. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(26) : 1553~ 1571
- [3] A. V. Krishnamoorthy, H. L. Lentime, K. W. Goossen *et al.*, 3-D integration of MQW modulators over active submicron CMOS circuits: 375 Mb/s transimpedance receiver-transmitter circuit. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(11) : 1288~ 1290
- [4] R. L. Morrison, S. L. Walker, T. J. Cloonan, Beam array generation and holographic interconnections in a free-space optical switching network. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(14) : 2512~ 2518
- [5] Luo Fengguang, Cao Mingcui, Li Hongpu, *et al.*, Optical implementation of crossover an optical interconnect network using a Dammann grating with 65×65 spot arrays. *Inst. Phys. Conf. Ser.*, 1994, **139** (Part 2) : 212~ 215
- [6] H. Dammann, K. Gortier, High-efficiency in-line multiple imaging by means of phase holograms. *Opt. Commun.*, 1971, **3**(5) : 312~ 315
- [7] 罗风光, 曹明翠, 李洪谱, 大点阵数二维 Dammann 光栅的制作与研究. 半导体光电, 1994, **15**(1) : 55 ~ 58
- [8] M. R. Taghizadeh, J. I. B. Wilson, J. Turunen *et al.*, Optimization and fabrication of grating beam-splitters in silicon nitride. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **54**(16) : 1492~ 1494
- [9] 罗风光, 曹明翠, 赵向军等, 菲涅尔微透镜列阵衍射效率的测试. 中国激光, 1995, **22**(5) : 343~ 346

Simplify Design and Analysis of 64×64 Computer Generated Holographic Phase Grating with Even Spot Arrays in Optical Interconnection Module

Luo Fengguang Cao Mingcui Li Hongpu Xu Jun

Wan Anjun Li Zaiguang

(The National Laboratory of Laser Technology,

Huazhong University of Sciences and Technology, Wuhan 430074)

(Received 29 July 1996; revised 6 November 1996)

Abstract Optimization and analysis of computer generated holographic phase grating with large even spot arrays are made using a novel simplify synthetic optimization method. Diffraction efficiency with one demension is 80.1%, and non-uniformity is less than 0.3% in theory. A 64×64 computer generated holographic phase grating splitter used in optical interconnect module is fabricated.

Key words phase grating, optical interconnection, optimization, computer generated holographic.