

文章编号: 0253-2239(2007)07-1255-6

# 数字微镜器件的相位调制性质<sup>\*</sup>

王大鹏 韦 穗

(安徽大学计算智能与信号处理教育部重点实验室, 合肥 230039)

**摘要:** 为了提高数字微镜器件(DMD)的空间光调制性能, 发挥其在光信息处理中的作用, 研究了数字微镜器件相位调制性质。通过分析数字微镜器件的微观物理结构, 考察了数字微镜器件的光栅特性; 从计算的角度研究了其对相干光波的相位调制, 并给出数学描述和实验结果。重点研究了数字微镜器件的衍射光栅特性, 分析了其工作原理及微镜偏转导致的镜片空间相对位置的改变, 利用闪耀光栅理论计算了偏转微镜间的相位差, 得出了数字微镜器件光栅的闪耀规律, 实现了闪耀状态。提出了利用不同方向的微镜列状态研究数字微镜器件相位调制性质的方法, 推导和模拟了关于数字微镜器件的微结构和工作原理, 在数字微镜器件光调制研究方面提供了一些结果, 对数字微镜器件在信息光学中的更广泛应用有一定意义。

**关键词:** 信息光学; 数字微镜器件; 相位调制; 可控闪耀光栅

中图分类号: O438 文献标识码: A

## Phase Modulation Properties of Digital Micromirror Device

Wang Dapeng Wei Sui

(Key Laboratory of Intelligent Computing & Signal Processing, Ministry of Education, Anhui University, Hefei 230039)

**Abstract:** To improve the spatial light modulation properties of digital micromirror device (DMD), and exert its performance in optical information processing, the phase modulation properties of digital micromirror device have been investigated. Based on digital micromirror device microstructure, its grating properties is investigated, its effect of phase modulation on coherent light is calculated, and the mathematic description and experimental results are presented. The diffraction grating properties digital micromirror devices are mainly investigated, analyzes its working principle and the change of position between micromirrors by micromirror rotation is analyzed. With the theory of blazed diffraction grating, the phase difference between rotated mirrors has been calculated, the blazed rule of DMD gratings is found and blazed condition is realized. Methods of analyzing digital micromirror device phase modulation by mirrors on different directions have been proposed. The microstructure and working principle of digital micromirror device are deduced and simulated. Results on digital micromirror device light modulation are presented, which are meaningful for broad application of digital micromirror device in information optics.

**Key words:** information optics; digital micromirror device; phase modulation; switched blazed grating

## 1 引言

数字微镜器件(Digital micromirror device, DMD)是美国 TEXAS 仪器公司微电子机械系统(Micro Electromechanical System, MEMS)技术的核心产品, 其对于非相干光的灰度调制已经成功应用于全数字

视频显示<sup>[1~4]</sup>。

与液晶器件相比, 数字微镜器件具有高分辨率、高响应速度、高占空比等特点, 已成为光信息处理业界关注的一种空间光调制器(Spatial light modulator, SLM)。特别是其相干光调制性质的研究正被全息

\* 国家自然科学基金(60473102)资助课题。

作者简介: 王大鹏(1978—), 男, 安徽太和人, 博士研究生, 主要从事计算全息、全息编码方面的研究。

E-mail: wangdapeng@customs.gov.cn

导师简介: 韦 穗(1946—), 女, 壮族, 广西桂林人, 教授, 博士生导师, 主要从事计算机视觉和图像处理方面的研究。

E-mail: swei@ahu.edu.cn

收稿日期: 2006-09-04; 收到修改稿日期: 2007-01-04

学<sup>[5~9]</sup>、波谱学领域的科学家关注<sup>[10~12]</sup>。

目前关于数字微镜器件光学特性的研究结果多不够完备,有些研究没有深入到数字微镜器件的微观结构,有些虽然得出了实验结果,却没有作出合理的解释。

数字微镜器件的相位调制及衍射性质对其在光信息处理,特别是计算全息编码方面有着关键的作用。本文从数字微镜器件的微观结构出发,着重考虑微镜像素间的相位干扰;研究了数字微镜器件的光栅结构及其相应的相位调制性质;利用数学模型说明了数字微镜器件的光栅特性,描述了其闪耀规律,实现了闪耀状态。文章给出数字微镜器件在不同微镜开闭状态下,调整相干光入射角对衍射光能分布的影响。据我们所知,目前还没有关于数字微镜器件闪耀光栅性质的更准确的阐述。

## 2 数字微镜器件的可控闪耀光栅性质

数字微镜器件是由镶嵌于其下对角铰链上的可偏转微小铝镜片构成的阵列,微镜间隔  $17 \mu\text{m}$ ,镜片长宽均  $16 \mu\text{m}$ ,微镜沿其对角铰链产生  $-10^\circ$  或  $+10^\circ$  的倾斜态(目前有产品微镜间隔  $11 \mu\text{m}$ ,长宽均为  $10 \mu\text{m}$ ,可产生  $9^\circ$  或  $12^\circ$  的倾斜)。图 1 所示对角铰链的方向为数字微镜器件俯视图斜率为 1 的方向。

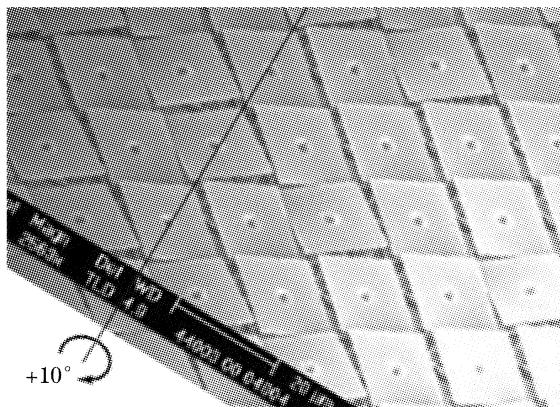


图 1 加载偏转信号微镜的俯视照片

Fig. 1 Top view of rotation signal loaded micromirrors

目前关于数字微镜器件衍射性质存在两种认识:第一,建立在数字微镜器件视频投影应用的基础上,认为其是二维反射型空间光调制器,即两块正交密接的反射光栅,忽略了像素间衍射光波的相位差异<sup>[5]</sup>;第二,考虑到数字微镜器件的微镜倾斜,认为数字微镜器件是光栅常量为微镜间隔、闪耀角为倾斜角的闪耀光栅,当闪耀状态时,88%的衍射光能将集中到某一单独的衍射级上<sup>[8]</sup>。Kearney 等<sup>[7]</sup>的实验结果已经推翻了第二种认识,他们测量了数字微

镜器件在相干光照射下的衍射能量分布,得出并非有 88% 的衍射光能集中于单独的衍射级,而是在靠近零级的几个衍射极强上集中的 70% 左右的衍射能量。

从数字微镜器件的微观结构及微镜倾斜机制出发,考虑其相位调制,从计算的角度解释了 Kearney 等的结果,进一步得出,通过调整入射光角度对衍射结果的周期性影响,并给出实验结果,澄清了有关数字微镜器件衍射特性的认识。

定义倾斜角  $\gamma$  等于  $+10^\circ$  的微镜为开态,  $-10^\circ$  的为闭态。微镜的分布形式多变,在不同的空间位置上开态的微镜将导致迥异的光栅分布。欲考察数字微镜器件对相干光的调制,需综合考虑微镜宽度  $w$ 、间距  $w_0$ 、倾斜角  $\gamma$  以及相干光入射角  $\theta_i$ 、波长  $\lambda$  等多方面因素。

### 2.1 主对角线方向一列 $M$ 元微镜为开态的情形

令  $M$  个在同一主对角线方向上的微镜组成一条  $M$  元主对角线微镜列。如图 2,仅有一条主对角线方向微镜列加载开态信号,其余所有微镜均为闭态,这是一种特殊情形;由于微镜偏转的旋转轴恰与主对角线方向一致,不难发现,此  $M$  个开态微镜片均在同一平面上,在相干平行光照射下,各微镜的反射光波间并不存在相位差。

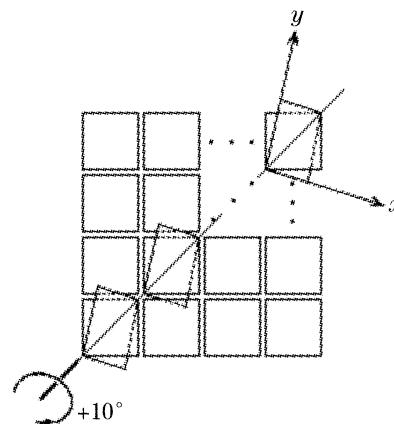


图 2 主对角线微镜列加载偏转信号微镜的俯视结构

Fig. 2 Top view of rotation signal loaded miromirrors on diagonal

定义偏转后微镜相邻两边所在的方向分别为  $x-y$  轴的方向,  $M$  元主对角线微镜列的反射屏函数为

$$\tilde{\tau}(x, y) = \sum_{m=-M/2}^{M/2-1} \text{rect}\left(\frac{x + mw_0}{w}\right) \text{rect}\left(\frac{y + mw_0}{w}\right), \quad (1)$$

于是,在波长  $\lambda$  的平行相干光照射下,在焦距为  $f$  的傅里叶频谱面上的夫琅禾费衍射场为

$$\widetilde{U}_M(x', y') = F\{\widetilde{T}(x, y)\} = w^2 \sum_{m=-M/2}^{N/2-1} \exp[j2\pi m w_0(\xi_x + \xi_y)] \operatorname{sinc}(w\xi_x) \operatorname{sinc}(w\xi_y) = \\ w^2 \cdot \frac{\sin[M\pi w_0(\xi_x + \xi_y)]}{\sin[\pi w_0(\xi_x + \xi_y)]} \cdot \operatorname{sinc}(w\xi_x) \operatorname{sinc}(w\xi_y),$$

其中  $\xi_x = x' / (\lambda f)$ ,  $\xi_y = y' / (\lambda f)$ 。

## 2.2 副对角线方向一列 N 元微镜为开态的情形

对于副主角线方向上微镜偏转的研究,可发现数字微镜器件特殊的可控闪耀光栅性质。

如图 3(a),此方向上一列 N 元微镜组在开态时具有以下特征:所有过 N 个微镜中心的法线均在同一平面内,且此平面垂直于主对角线方向,记之为平面 P;所有 N 个微镜片两两异面,如图 3(b)为沿旋转轴方向的侧视图,显然此 N 个微镜片构成了一个闪耀光栅结构。

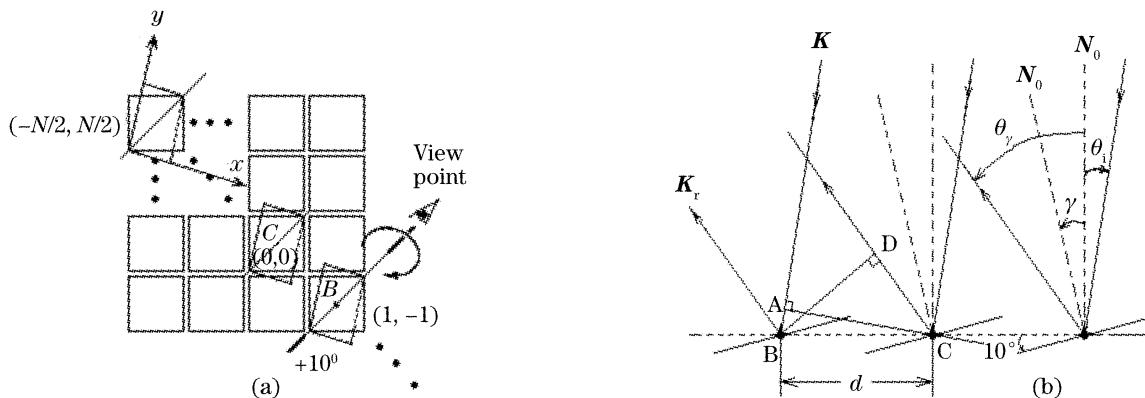


图 3 副对角线微镜列加载偏转信号微镜的照片。(a)俯视结构,(b)闪耀光栅结构

Fig. 3 View of rotation signal loaded micromirrors on sub-diagonal. (a) Top view, (b) as a blazed diffraction grating

虽然各衍射光栅单元的间距  $d = \sqrt{2}w_0$ , 即光栅常量  $d$  恒定,但光栅单元为旋转 45°的正方形,其宽度  $a$  在  $(0, \sqrt{2}w]$  范围内连续变化,并非定值。衍射光栅槽间干涉因子除第  $k$  级之外的其它极强与光栅单元衍射暗线重合的前提条件  $a \approx d$  无法实现。于是,虽然通过调整入射光波长和入射角可以改变衍射光波的能量分布,但却无法实现 80%以上衍射光能集中于某一级的闪耀状态。

衍射光能可以实现相对集中,但并非集中于某一级,而是集中在衍射零级方向左右的 0、±1 和 ±2 级。随着入射角  $\theta_i$  的调整,衍射光将在两种边界能量分布状态之间周期性连续变化,此周期性源于光栅单元宽度  $a$  和相邻开态微镜反射光波光程差  $\Delta L$  的连续周期性变化。

如图 3(b),记数字微镜器件芯片所在平面的法

向量为  $N_0$ ,记开态微镜片所在平面的法向量为  $N'_0$ ,记入射光波矢量为  $K$ ,不妨设  $K \parallel P$ 。定义入射角  $\theta_i$  为数字微镜器件法向量  $N_0$  到入射光波矢量  $K$  的夹角,反射角  $\theta_r$  为到反射光波矢量  $K_r$  的夹角,逆时针方向为正,则  $\theta_r = 2\gamma - \theta_i$ 。定义相邻两开态微镜反射光波光程差为  $\Delta L$ ,即图 3(a)中(0,0)元微镜反射光波的光程比(1,-1)元微镜的多  $\Delta L$ ,

$$\Delta L = \overrightarrow{CD} - \overrightarrow{AB} = \\ d \sin \theta_r - d \sin(-\theta_i) = d(\sin \theta_i + \sin \theta_r) = \\ \sqrt{2}w_0 [\sin \theta_i + \sin(2\gamma - \theta_i)], \quad (2)$$

于是,反射光波相位差为

$$\delta = \frac{2\sqrt{2}\pi w_0}{\lambda} [\sin \theta_i + \sin(2\gamma - \theta_i)], \quad (3)$$

则在焦距为  $f$  的傅里叶频谱面上的夫琅禾费衍射场为

$$\widetilde{U}_N(x', y') = w^2 \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} \exp[j2\pi n w_0 \left( \xi_x + \xi_y + \frac{\delta}{2\pi w_0} \right)] \operatorname{sinc}(w\xi_x) \operatorname{sinc}(w\xi_y) = \\ w^2 \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} \exp \left\{ j2\pi n w_0 \left[ \left( \xi_x + \frac{\Delta L}{2\lambda w_0} \right) + \left( \xi_y + \frac{\Delta L}{2\lambda w_0} \right) \right] \right\} \operatorname{sinc}(w\xi_x) \operatorname{sinc}(w\xi_y). \quad (4)$$

光波光程差为  $\Delta L$  的变化导致了相位差  $\delta$  的变化,使得  $\delta$  除以  $2\pi$  后余数  $\operatorname{mod}(\delta, 2\pi)$  的周期性连续变化,如表 1。其中列出了入射角  $\theta_i$  从 12°到 -20°,  $\Delta L/\delta/2\pi$  和  $\operatorname{mod}(\delta, 2\pi)$  的数据。

表 1 光程差、相位差与入射角度对照表

Table 1 Relationship of optical path difference, phase difference and incident angle

$\theta_i$	$\Delta L / 10^{-6}$	$\delta/2\pi$	$\text{mod}(\delta, 2\pi)$
-20	7.231	11.4269	0.4269
-19	7.303	11.5403	0.5403
-18	7.372	11.6502	0.6502
-17	7.440	11.7565	0.7565
-16	7.505	11.8593	0.8593
-15	7.567	11.9584	0.9584
-14	7.628	12.0539	0.0539
-13	7.686	12.1457	0.1457
-12	7.742	12.2339	0.2339
-11	7.795	12.3183	0.3183
-10	7.846	12.3989	0.3989
-9	7.895	12.4758	0.4758
-8	7.941	12.5489	0.5489
-7	7.985	12.6181	0.6181
-6	8.026	12.6835	0.6835
-5	8.065	12.7450	0.7450
-4	8.102	12.8027	0.8027
-3	8.136	12.8565	0.8565
-2	8.167	12.9063	0.9063
-1	8.196	12.9522	0.9522
0	8.223	12.9942	0.9942
1	8.247	13.0322	0.0322
2	8.268	13.0662	0.0662
3	8.287	13.0963	0.0963
4	8.304	13.1224	0.1224
5	8.318	13.1444	0.1444
6	8.329	13.1625	0.1625
7	8.338	13.1766	0.1766
8	8.344	13.1866	0.1866
9	8.348	13.1926	0.1926
10	8.350	13.1946	0.1946
11	8.348	13.1926	0.1926
12	8.344	13.1866	0.1866

由(2)式中的 $[\sin\theta_i + \sin(2\gamma - \theta_i)]$ ,从表中不难计算,光程差的变化关于入射角 $\theta_i = \gamma$ 对称。且表1中的数据也给出了相同的结论。随着 $\theta_i$ 从 $10^\circ$ 向 $-20^\circ$ 的渐变,单位入射角度的调整对光程差 $\Delta L$ 和相位差 $\delta$ 化的影响愈加显著,即入射光波矢量 $\mathbf{K}$ 偏离数字微镜器件微镜法线 $\mathbf{N}'_0$ 越远。调整 $1^\circ$ 入射角所导致微镜间光程、相位差的变化越大,衍射条纹的渐变周期越短。

考虑副对角线方向8个开态微镜,令 $w=16\ \mu\text{m}$ 、 $w_0=17\ \mu\text{m}$ 、 $\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$ 、 $f=0.5\ \text{m}$ ,由(4)式,在不同入射角度的计算衍射结果如图4(b)至图4(f)所示。

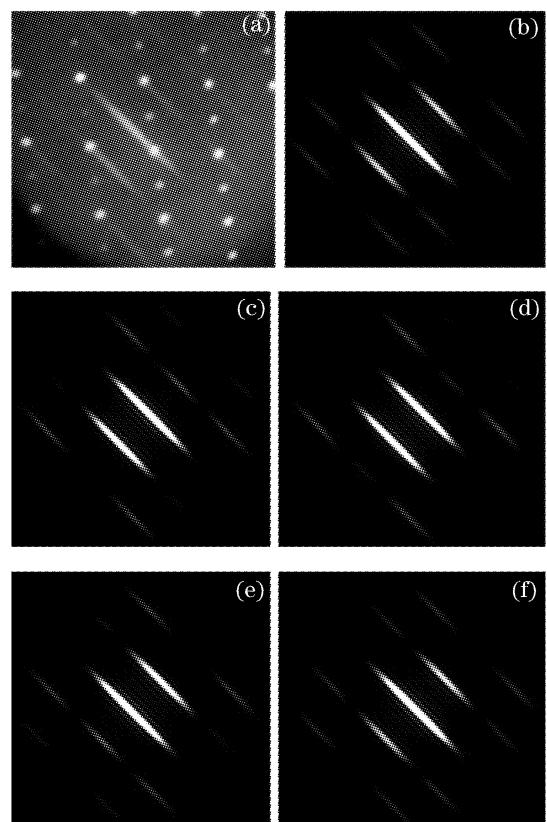


图4 傅里叶透镜频谱面上的衍射光能分布。(a)入射角 $-5^\circ$ 时的实验灰度照片;(b)~(f)为计算衍射结果图:(b)入射角 $0^\circ$ , (c)入射角 $-5^\circ$ , (d)入射角 $-9^\circ$ , (e)入射角 $-11^\circ$ , (f)入射角 $-15^\circ$

Fig. 4 Diffraction energy distribution on the frequency plane of Fourier lens. (a) Experimental gray scale photograph when incident angle is  $-11^\circ$ , (b)~(f) synthesized images, with incident angle (b)  $0^\circ$ , (c)  $-5^\circ$ , (d)  $-9^\circ$ , (e)  $11^\circ$ , (f)  $15^\circ$ , respectively

结合表1, $\theta_i$ 从 $0^\circ$ 变化到 $-15^\circ$ ,导致 $\text{mod}(\delta, 2\pi)$ 从 $0.9584 \sim 0.9942$ 的变化,即反射光波相位差从 $26\pi$ 减少至 $24\pi$ ,这是相位差 $\delta$ 变化的一个 $2\pi$ 周期。图4(b)和图4(f)分别是 $\theta_i$ 为 $-15^\circ$ 和 $0^\circ$ 时的衍射光能分布,两者近乎相同。这是衍射光能分布的一种边界状态,此时副对角线方向相邻开态微镜的相位差为 $\pi$ 的偶数倍,对应一种光能分布相对集中的闪耀状态。

考虑 $\theta_i$ 从 $-9^\circ$ 变化到 $-19^\circ$ , $\text{mod}(\delta, 2\pi)$ 从 $0.4758 \sim 0.5403$ 的变化,即反射光波相位差 $\delta$ 从 $25\pi$ 减少至 $23\pi$ ,这也是相位差 $\delta$ 变化的一个 $2\pi$ 周期。不同的是,此两个入射角度对应的副对角线方向相邻开态微镜的相位差为 $\pi$ 的奇数倍,相应的衍射光能分布与相位差为 $\pi$ 偶数倍时有着最显著的区别。图4(d)对应的入射角 $\theta_i$ 为 $-9^\circ$ ,此时的相位差 $\delta$ 模 $2\pi$ 后余 $0.4758$ ,近似为半个周期,相应衍射光能分布为另一种边界的状态,对应另一个闪耀状态。

使用分辨力为  $800 \times 600$ 、间距  $1 \mu\text{m}$ 、 $16 \mu\text{m} \times 16 \mu\text{m}$  微镜组成的数字微镜器件,仅副主对角线方向  $N=8$  个微镜为开态,在波长  $\lambda=0.6328 \mu\text{m}$  的平行光入射角  $\theta_i=-5^\circ$  的照射下,焦距  $f=0.5 \text{ m}$  的傅里叶透镜频谱面上衍射光强分布的灰度照片如图 4(a)。

图 4(c)和图 4(e)分别是入射角  $\theta_i$  为  $-5^\circ$  和  $-11^\circ$  时的计算衍射光能分布。当入射角  $\theta_i$  从  $0^\circ$  逐渐变化至  $-15^\circ$ ,衍射光强分布会从图 4(b)逐渐变化到图 4(c)、图 4(d)、图 4(e),最终循环回到和图 4(b)相似的图 4(f)状态。 $\theta_i$  再度从  $-15^\circ$  变化至  $-23^\circ$ ,衍射结果会重复上述循环,总在图 4(b)和图 4(d)两种边界闪耀状态之间周期性循环变化。

$$\widetilde{U}_N(x', y') = w^2 \operatorname{sinc}(w\xi_x) \operatorname{sinc}(w\xi_y) \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} \sum_{m=-M/2}^{M/2-1} \exp \left\{ j2\pi w_0 \left[ m \left( \xi_x + \frac{\delta}{4\pi w_0} \right) + n \left( \xi_y - \frac{\delta}{4\pi w_0} \right) \right] \right\}.$$

图 5 为  $N=81$  条  $M=5$  元微镜列为开态的数字微镜器件在波长  $\lambda=0.6328 \mu\text{m}$  的平行光的照射下,焦距  $f=0.5 \text{ m}$  的傅里叶透镜频谱面上衍射光强分布的灰度照片。其中如图 5(a)的光波入射角  $\theta_i=-9^\circ$ ,图 5(b)的  $\theta_i=-15^\circ$ 。

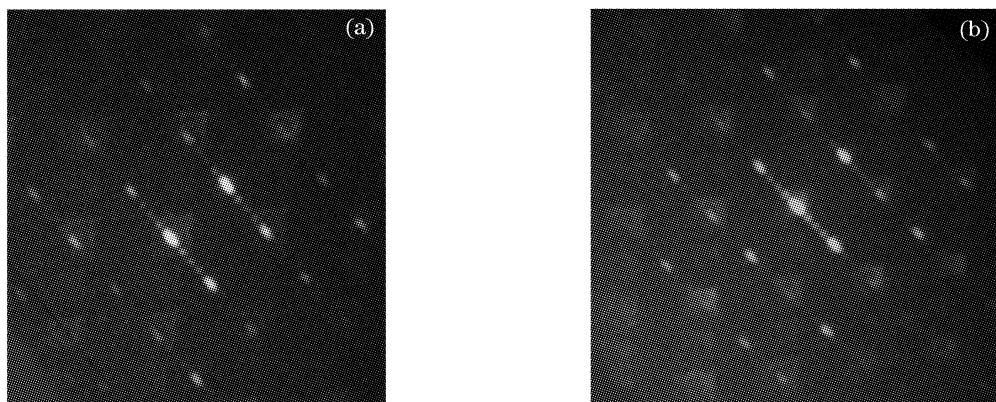


图 5 81 条 5 元主对角线方向开态微镜阵列的衍射光强分布。(a)入射角  $-9^\circ$ , (b)入射角  $-15^\circ$

Fig. 5 Diffraction fringe of 81 columns of 5 “on” diagonal micromirrors array, with incident angle of (a)  $-9^\circ$ , (b)  $-15^\circ$ , respectively

由于相邻微镜列间的反射光波相位差随着入射角的调整周期改变,同样导致了衍射光强分布的周期性变化。实验证明,当入射角  $\theta_i$  逐渐变化时,衍射光强分布总在图 5(a)和图 5(b)两种边界闪耀状态之间周期性循环变化。

随着入射光角度的调整,这种衍射光能的相对集中和周期变化,为基于数字微镜器件的计算全息重构中获取更加清晰的衍射像提供了一定的支持。

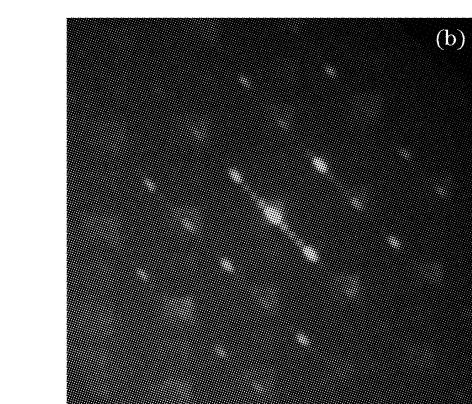
### 3 结 论

通过分析数字微镜器件的微观物理结构,利用闪耀光栅原理,研究了其相干光相位调制,给出了其闪耀光栅性质的数学描述和实验结果。描述了数字微镜器件光栅的多种闪耀状态,分析了相干光入射

### 2.3 $N$ 条 $M$ 元主对角线微镜列为开态的情形

$N$  条主对角线方向微镜列为开态,是 2.2 节的扩展情形。所不同的是在此时数字微镜器件闪耀光栅的衍射单元是由主对角线方向各  $M$  元微镜列组成。考察等间隔  $d=\sqrt{2}w_0$  的  $N$  条主对角线方向  $M$  元微镜列为开态的情形。至于其它情形,如  $d=n\sqrt{2}w_0$ ,  $n=1/2, 1, 3/2, 2, \dots$  的光栅结构,甚至非等间隔的情形,可做类似分析。

当微镜列间隔  $d$  均为  $\sqrt{2}w_0$  时,  $(0, 0)$  元微镜和  $(m, n)$  元的反射光波相位差为  $(m-n)\delta/2$ ,则在焦距为  $f$  的傅里叶透镜频谱面上的夫琅禾费衍射场为



角的调整对衍射结果的影响。

提出利用主、副对角线方向上微镜列的开闭状态以及不同开态微镜间距的方法,为更加灵活的利用数字微镜器件进行全息编码、充分发挥其可控闪耀光栅性能,使其在信息光学中更广泛地应用。

### 参 考 文 献

- 1 Larry J. Hornbeck. Digital light processing: A new MEMS-based display technology [EB/OL]. [http://www.dlp.com/dlp\\_technology/images/dynamic/white\\_papers/117\\_Digital\\_Light\\_Processing\\_MEMS\\_display\\_technology.pdf](http://www.dlp.com/dlp_technology/images/dynamic/white_papers/117_Digital_Light_Processing_MEMS_display_technology.pdf), 2003
- 2 Dana Dudley, Walter Duncan, John Slaughter. Emerging digital micromirror device (DMD) applications [EB/OL]. [http://www.dlp.com/dlp\\_technology/images/dynamic/white\\_papers/152\\_NewApps\\_paper\\_copyright.pdf](http://www.dlp.com/dlp_technology/images/dynamic/white_papers/152_NewApps_paper_copyright.pdf), 2003
- 3 Robert J. Gove, Vishal Markandey, Stephen W. Marshall et al.. High definition display system based on digital micromirror device

- [EB/OL]. [http://www.dlp.com/dlp\\_technology/images/dynamic/white\\_papers/111\\_High\\_Definition\\_Display\\_DMD.pdf](http://www.dlp.com/dlp_technology/images/dynamic/white_papers/111_High_Definition_Display_DMD.pdf), 2003
- 4 Larry J. Hornbeck. Digital light processing for high-brightness, high-resolution applications [EB/OL]. [http://www.dlp.com/dlp\\_technology/images/dynamic/white\\_papers/141\\_hornbeck.pdf](http://www.dlp.com/dlp_technology/images/dynamic/white_papers/141_hornbeck.pdf), 2003
- 5 Thomas Kreis, Petra Aswendt, Roland Hofling. Hologram reconstruction using a digital micromirror device [J]. *Opt. Engng.*, 2001, **40**(6): 926~933
- 6 Michael L. Huebschman, Bala Munjuluri, Harold R. Garner. Dynamic holographic 3-D image projection[J]. *Optics Express*, 2003, **11**(5): 437~445
- 7 Kevin J. Kearney, Zoran Ninkov. Characterization of a digital micromirror device for use as an optical mask in imaging and spectroscopy[C]. *Proc. SPIE*, 1998, **3292**: 81~92
- 8 Walter Duncan, Benjamin Lee, Paul Rancuret et al.. DLP switched blaze grating: the heart of optical signal processing[EB/OL]. [http://www.dlp.com/dlp\\_technology/images/dynamic/white\\_papers/147\\_DLP\\_opticalnetworking\\_2003.pdf](http://www.dlp.com/dlp_technology/images/dynamic/white_papers/147_DLP_opticalnetworking_2003.pdf), 2003
- 9 Chai Xiaodong, Wei sui. Bandwidth compression of holographic grating based on discrete diffraction light [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 304~308 (in Chinese)
- 柴晓冬, 韦 穗. 基于离散衍射光的全息光栅的带宽压缩[J]. 光学学报, 2004, **24**(3): 304~308
- 10 Yan Aimin, Liu Liren, Liu Dean et al.. Diffraction characteristics of local volume holographic gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1203~1208 (in Chinese)
- 闫爱民, 刘立人, 刘德安等. 局域体全息光栅的衍射特性[J]. 光学学报, 2004, **24**(9): 1203~1208
- 11 Yan Aimin, Liu Liren, Liu Dean et al.. The diffraction properties of volume holographic gratings in photorefractive crystal in the discretionary direction of optical axis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 321~325 (in Chinese)
- 闫爱民, 刘立人, 刘德安等. 光轴方向任意时光折变晶体中体全息光栅的衍射性质[J]. 光学学报, 2006, **26**(3): 321~325
- 12 Ye Biqing, Kiyofumi Matsuda, Norihiro Fukuchi et al.. Vibration measurements of rough surfaces using an liquid crystal spatial light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4): 557~561 (in Chinese)
- 叶必卿, 松田清史, 福智曼央等. 在粗糙表面上用液晶空间光调制器进行振动测量[J]. 光学学报, 2006, **26**(4): 557~561