

文章编号 1004-924X(2007)03-0315-06

蟹型悬臂梁对光栅平动式光调制器性能的影响

张 洁, 黄尚廉, 张智海, 孙吉勇, 付红桥

(重庆大学光电工程学院 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)

摘要:基于 MOEMS(Micro-opto-electro-mechanical Systems)的光栅平动式光调制器依靠结构中的蟹型悬臂梁在静电力作用下的上下运动来改变可动光栅和下反射面的距离,从而实现了对光能量的调制。本文依据傅里叶光学对光栅平动式光调制器(Grating Moving Light Modulator, GMLM)工作状态的光学特性进行了详细的理论分析和计算机仿真。分析了可动光栅的光栅周期数为偶数和奇数时,由于几何中心的不同,使得采用傅里叶光学分析时透过率函数不同的问题,并对 GMLM 衍射光能量的分布进行了详细的理论推导;重点讨论了 GMLM 结构中边框和蟹型悬臂梁对对比度的影响。结果表明,为了得到较高的对比度,应减小边框宽度、悬臂梁的宽度和长度,文章用图形给出了直观说明。

关键词:衍射光栅;傅里叶光学;MEMS;光栅平动式光调制器

中图分类号: TN761 **文献标识码:** A

Influence of crab-cantilever on performance of grating moving light modulator

ZHANG Jie, HUANG Shang-lian, ZHANG Zhi-hai, SUN Ji-yong, FU Hong-qiao

(Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems,
Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The light modulator based on Micro-opto-electro-mechanical System (MEMS) has already become a research focus in projection display field. The structure of Grating Moving Light Modulator (GMLM) supported by four crab-cantilevers is composed of reflection plate, address electrode, four crab-cantilevers and grating plate. In this paper, the influence of crab-cantilevers on GMLM performance was analyzed. The diffraction intensity of GMLM was discussed with Fourier optics, while the grating period number was odd and even integer. Especially, the influence of frame and four crab-cantilevers on GMLM performance was analyzed in detail. The result indicates that frame and crab-cantilever size should be reduced in design for obtaining a higher contrast ratio. Moreover, the relationship between contrast ratio and important structure parameter is shown in figures.

Key words: diffraction grating; Fourier optics; MEMS; grating moving light modulator

收稿日期:2007-01-22;修订日期:2007-02-18.

基金项目:重庆市院士基金(No. 8883);国家自然科学基金项目(No. 60578023)

1 引言

近年来,随着 MOMES(微光机电系统, Micro-opto- electro- mechanical Systems)技术的成熟^[1-4],基于 MOMES 的光调制器已成为当前研究的热点^[4-8],特别是在投影显示领域中的应用。比较典型的是德州仪器公司的利用反射原理的数字微镜(Digital Micromirror Device, DMD),但 DMD 是三层结构,加工比较困难^[6-8];硅光机械公司的光栅光阀(Grating Light Valve, GLV)基于衍射原理,结构简单,但它目前只能做到线阵,在面向显示应用时,需要增加一维机械扫描机构,增加了整个系统的复杂性^[6-8]。重庆大学提出的基于 MOEMS 的光栅平动式光调制器(Grating Moving Light Modulator, GMLM)^[8],加工工艺较 DMD 的三层结构简单;GMLM 可以实现面阵,优于 GLV^[8]。由于 GMLM 结构中,支撑可动光栅的边框和蟹型悬臂梁对光有调制作用,会对 GMLM 产生不可忽略的影响,本文利用傅里叶光学,考虑边框和蟹型悬臂梁的影响,建立了该光调制器的完善光学模型,并分析了边框和悬臂梁对 GMLM 性能的影响。

2 GMLM 结构

GMLM 如图 1 所示^[8],主要包括一个可动光栅,下面的反射面和支撑可动光栅作上下位移的蟹型悬臂梁。基本原理如图 2 所示,当不加激励的时候,可动光栅上表面和下反射面的距离为 $\lambda/4$ 的偶数倍,根据衍射原理,衍射能量集中在 0 级(暗态);当加上激励以后,可动光栅向反射面的方向平动,此时可动光栅上表面和下反射面的距离为 $\lambda/4$ 的奇数倍,入射光以一个特定的角度衍射(亮态),收集 ± 1 级衍射光,即可实现对光能量的调制。

3 GMLM 原理分析

器件对光的调制作用是理想矩形相位光栅和关于 x 方向对称的长 L ($L = md + a$, m 是光栅周期数),宽 w_0 的两个矩形上反射面以及蟹型悬臂

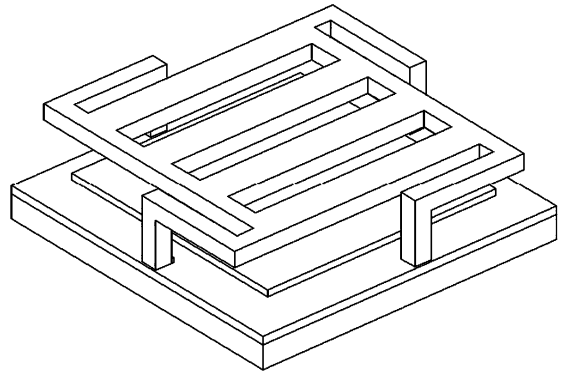


图 1 GMLM 结构

Fig. 1 One pixel of GMLM

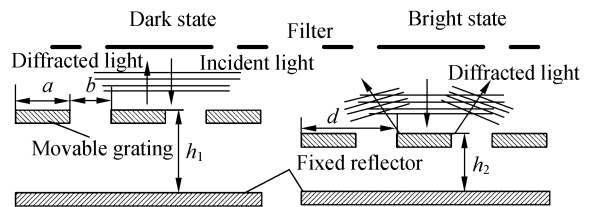


图 2 GMLM 光学原理

Fig. 2 GMLM operation theory

梁共同作用的结果。如图 3 所示,当 m 为偶数时,几何中心在可动光栅上;当 m 为奇数时,几何中心在下反射面上。可动光栅和下反射面的相位差 $\phi = 2\pi \times 2h/\lambda$,其中 h 为可动光栅上表面与反射镜的距离,可动光栅的光栅常数 $d = a + b$, a 为可动光栅栅条宽度, b 为可动光栅栅条之间的间隙(对应下反射面参与反射的宽度),单像素长度、宽度分别为 $L, \omega + 2\omega_0$,其中 ω, ω_0 分别为光栅宽度和边距, $l_a, l_b, \omega_a, \omega_b$ 分别为蟹型悬臂梁与光栅连接的宽度,长度。

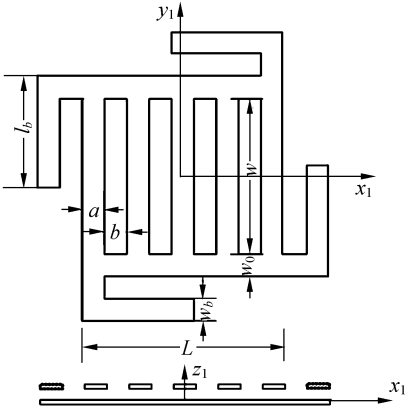
3.1 光栅周期数为偶数时的光学分析

光栅平动式光调制器的透过率函数 $t(x_1, y_1)$ 为可动光栅透过率 $t_{up}(x_1, y_1)$,间隙对应的下反射面透过率 $t_{down}(x_1, y_1)$,边框透过率 $t_b(x_1, y_1)$ 和蟹型悬臂梁透过率 $t_c(x_1, y_1)$ 之和,即

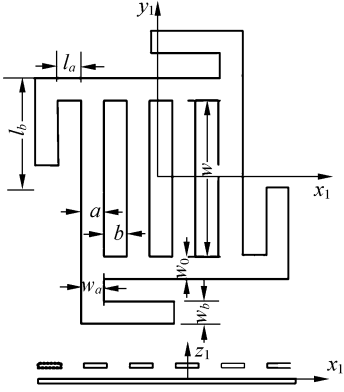
$$t(x_1, y_1) = t_{up}(x_1, y_1) + t_{down}(x_1, y_1) + t_b(x_1, y_1) + t_c(x_1, y_1), \quad (1)$$

当光栅周期数为偶数时,4 个透过率为

$$t_{up}(x_1, y_1) = \frac{1}{d} \text{comb}\left(\frac{x_1}{d}\right) \exp(j\phi) \otimes \text{rect}\left(\frac{x_1}{a}\right) \text{rect}\left(\frac{x_1}{L}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1}{\omega}\right)$$

(a) 周期数 m 为偶数(几何中心在可动光栅上)

(a) Grating period is even (geometry center on the movable grating)

(b) 周期数 m 为奇数(几何中心在下反射面上)

(b) Grating period is odd (geometry center on the fixed underlying reflector)

图3 GMLM 光学模型

Fig. 3 GMLM optical model

$$t_{\text{down}}(x_1, y_1) = \frac{1}{d} \text{comb}\left(\frac{x_1 + d/2}{d}\right) \otimes \text{rect}\left(\frac{x_1}{b}\right) \text{rect}\left(\frac{x_1}{L}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1}{w}\right)$$

$$t_b(x_1, y_1) = \exp(j\phi) \text{rect}\left(\frac{x_1}{L}\right)$$

$$\left[\text{rect}\left(\frac{y_1 + (\omega + \omega_0)/2}{\omega_0}\right) + \text{rect}\left(\frac{y_1 - (\omega + \omega_0)/2}{\omega_0}\right) \right]$$

$$t_c(x_1, y_1) = \left\{ \text{rect}\left(\frac{x_1 + (L - \omega_a)/2}{\omega_a}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1 - (L + l_a)/2}{l_a}\right) + \text{rect}\left(\frac{x_1 - (L + \omega_a)/2}{l_a}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1 - (L - l_a)/2}{\omega_a}\right) + \text{rect}\left(\frac{x_1 - (L - \omega_a)/2}{\omega_a}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1 + (L + l_a)/2}{l_a}\right) + \right.$$

$$\left. \text{rect}\left(\frac{x_1 + (L + \omega_a)/2}{l_a}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1 + (L - l_a)/2}{\omega_a}\right) + \text{rect}\left(\frac{x_1 + (L - l_b)/2}{l_b}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1 - [(L + l_b)/2 + l_a]}{\omega_b}\right) + \text{rect}\left(\frac{x_1 - [(L + l_b)/2 + l_a]}{\omega_b}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1 - (L - l_b)/2}{l_b}\right) + \text{rect}\left(\frac{x_1 - (L - l_b)/2}{l_b}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1 + [(L + l_b)/2 + l_a]}{\omega_b}\right) + \text{rect}\left(\frac{x_1 + [(L + l_b)/2 + l_a]}{\omega_b}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1 + (L - l_b)/2}{l_b}\right) \right\} \exp(j\phi)$$

对式(1)进行傅里叶变换^[9]可得衍射光能量为

$$I(f_x, f_y) = |F_{\text{up}}(f_x, f_y) + F_{\text{down}}(f_x, f_y) + F_b(f_x, f_y) + F_c(f_x, f_y)|^2, \quad (2)$$

其中

$$F_{\text{up}}(f_x, f_y) = \exp(j\phi) \frac{L\omega a}{d} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \text{sinc}\left(\frac{an}{d}\right) \text{sinc}\left[L\left(f_x - \frac{n}{d}\right)\right] \text{sinc}(\omega f_y)$$

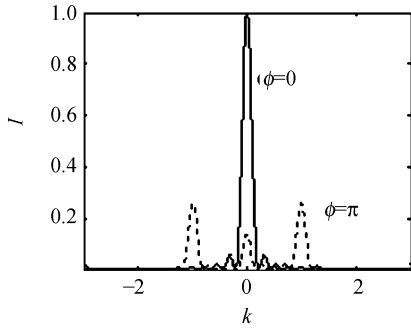
$$F_{\text{down}}(f_x, f_y) = \frac{L\omega b}{d} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \text{sinc}(jn\pi) \text{sinc}\left(\frac{bn}{d}\right) \text{sinc}\left[L\left(f_x - \frac{n}{d}\right)\right] \text{sinc}(\omega f_y)$$

$$F_b(f_x, f_y) = \exp(j\phi) 2\omega_0 L \text{sinc}(L f_x) \text{sinc}(\omega_0 f_y) \cdot \cos[\pi(\omega + \omega_0) f_y]$$

$$F_c(f_x, f_y) = \exp(j\phi) \left\{ +2l_a \omega_a \text{sinc}(\omega_a f_x) \text{sinc}(l_a f_y) (\cos[(L - \omega_a) f_x \pi/2 - (L + l_a) f_y \pi/2]) + 2l_a \omega_a \text{sinc}(\omega_a f_x) \text{sinc}(\omega_a f_y) (\cos[(L + l_a) f_x \pi/2 + (L - \omega_a) f_y \pi/2]) + 2l_b \omega_b \text{sinc}(l_b f_x) \text{sinc}(\omega_b f_y) (\cos[(L - l_b) f_x \pi/2 - (L + l_b + 2l_a) f_y \pi/2]) + 2l_b \omega_b \text{sinc}(\omega_b f_x) \text{sinc}(l_b f_y) (\cos[(L + l_b + 2l_a) f_x \pi/2 + (L - l_b) f_y \pi/2]) \right\}$$

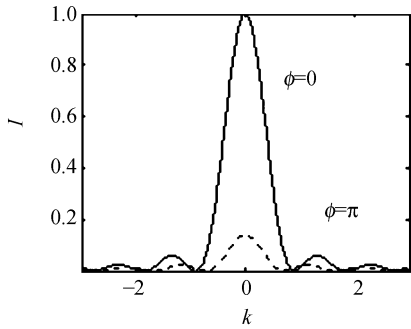
根据式(2),当相位差 $\phi = (2n+1)\pi, \phi = 2n\pi, n$ 为整数时,沿光栅周期方向与垂直周期方向衍射光强二维分布如图4(a),(b)所示(图中以 $n=0$ 为例,即 $\phi = \pi, \phi = 0$,以下类同)。

可见,通过改变可动光栅和下反射面之间的距离,即改变相位差 ϕ ,可以实现光能量的调制。从图4(a)可以看出,由于分析中考虑了边框和蟹型悬臂梁的影响,导致了GMLM在相位差 $\phi = \pi$ 时,仍然有能量集中在0级,降低了GMLM器件在此状态下 ± 1 级的衍射效率。



(a) 沿光栅周期方向

(a) Along direction of grating period



(b) 垂直光栅周期方向

(b) Vertical direction of grating period

图 4 GMLM 光强衍射二维分布图

Fig. 4 2D distribution of GMLM diffraction intensity in frequency spectrum plane

3.2 光栅周期数为奇数

对于如 3(b)所示光栅周期数为奇数情况下,其中与光栅周期数为偶数不同之处在于,奇数条件下,几何中心在下反射面上,所以可动光栅的透过率 $t_{up}(x_1, y_1)$ 和间隙对应的下反射面透过率 $t_{down}(x_1, y_1)$ 变为

$$t_{up}(x_1, y_1) = \frac{1}{d} \text{comb}\left(\frac{x_1}{d}\right) \exp(j\phi) \otimes \text{rect}\left(\frac{x_1}{a}\right) \text{rect}\left(\frac{x_1}{L}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1}{w}\right), \quad (3)$$

$$t_{down}(x_1, y_1) = \frac{1}{d} \text{comb}\left(\frac{x_1 + d/2}{d}\right) \otimes \text{rect}\left(\frac{x_1}{b}\right) \text{rect}\left(\frac{x_1}{L}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1}{w}\right), \quad (4)$$

$t_b(x_1, y_1)$ 和 $t_c(x_1, y_1)$ 与光栅周期数为偶数是相同的,经过同样分析,可以得到衍射光能量。通过计算机仿真,得到的衍射图样与光栅周期数

为偶数时衍射光能量的分布也如图 4 所示。

4 仿真分析

定义对比度为屏幕上亮态时的能量比上暗态时的能量,假设 GMLM 在频谱面后续光学系统中能量损失可以忽略,此时对比度可以看作频谱面上收集到的能量之比,即

$$V = \frac{I(f_x, f_y)_{\phi=\pi, k=1}}{I(f_x, f_y)_{\phi=0, k=1}}, \quad (5)$$

其中 k 为衍射级次。可动光栅栅条通过光栅边距 w_0 连接成光栅平面,因此光栅边距将对入射光起调制作用,仿真时选择 $d = 8 \mu\text{m}$, $a = 4 \mu\text{m}$, $b = 4 \mu\text{m}$, $m = 6$, $l_a = w_a = w_b = w_0 = 2 \mu\text{m}$,入射波长为 $0.53 \mu\text{m}$,光栅边距与对比度关系如图 5 所示。光栅边距对光学性能影响很大,会引起光学性能大幅度下降,因此光栅边距 w_0 设计值应较小,以提高器件光学性能。

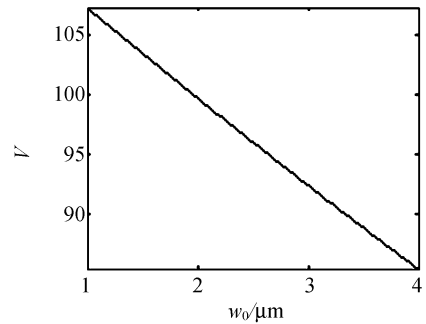
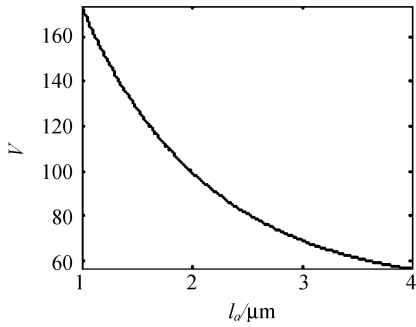
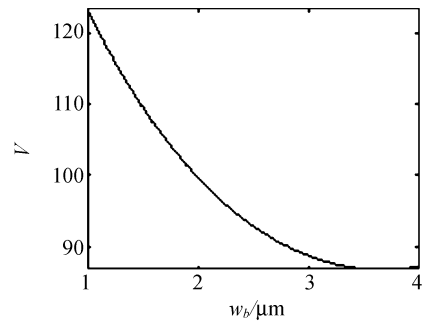
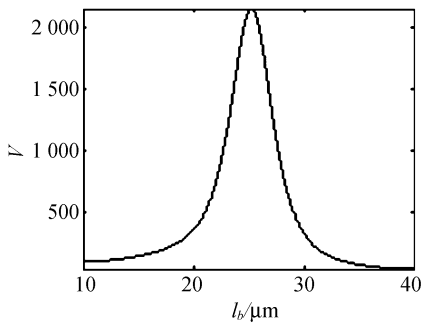
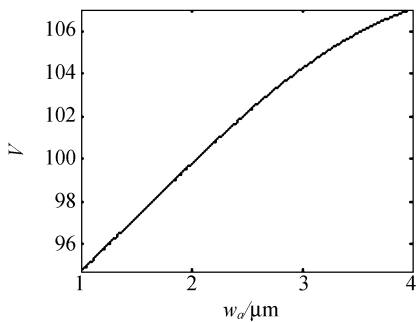


图 5 对比度随 w_0 的分布

Fig. 5 Contrast ratio V as a function of parameter w_0

蟹型悬臂梁起支撑可动光栅平面作用,并提供回复力使得可动光栅平面在静电力作用下下拉一定位移后保持该状态或恢复成最初状态,即器件通过可动光栅平面所受静电力和悬臂梁提供的回复力实现器件工作时光栅面与下反射面之间距离的精确定位。悬臂梁的结构参数影响着器件的光学特性。对比度与 l_a 的关系如图 6 所示,随着 l_a 的增加,对比度是降低的。对比度与 l_b 的关系如图 7 所示。对比度与 w_a 的关系如图 8 所示。对比度与 w_b 的关系如图 9 所示。

从图中可以看出,随着 l_a 、 w_b 的增加,对比度是降低的。根据前面分析, $F_b(f_x, f_y)$ 和 $F_c(f_x, f_y)$ 可以看出,由于 sinc 函数是急剧衰减

图6 对比度随 l_a 的分布Fig. 6 Contrast ratio V as a function of parameter l_a 图9 对比度随 w_b 的分布Fig. 9 Constrast ratio V as a function of parameter w_b 图7 对比度随 l_b 的分布图Fig. 7 Constrast ratio V as a function of parameter l_b 图8 对比度随 w_a 的分布Fig. 8 Constrast ratio V as a function of parameter w_a

的,导致 $F_b(f_x, f_y)$ 和 $F_c(f_x, f_y)$ 带来的能量集中在 0 级,降低了 ± 1 级的能量,根据式(5),对比度将降低。

5 结论

本文利用傅里叶光学对 GMLM 进行了详细的光学理论分析,特别是对蟹型悬臂梁对 GMLM 对比度的影响进行了分析和仿真,得到以下结论:

(1)当可动光栅的光栅周期数不同,利用傅里叶光学分析时,几何中心落在可动光栅或者下反射面上,GMLM 的透过率函数是不同的,但理论分析结果是一致的。

(2)由于分析中考虑了边框和蟹型悬臂梁的影响,导致了 GMLM 在间距 h 为 $(2n+1)\lambda/4$ 时 ($\phi=\pi$),仍然有能量集中在 0 级,降低了 GMLM 器件 ± 1 级的衍射效率和对比度。

(3)光栅边距每增加 $1 \mu\text{m}$,对比度下降近 10%,因此应减小光栅边距设计值,以提高器件光学性能;同时应尽量减小悬臂梁的长度和宽度,选择参数 l_b 为约整个 GMLM 象素尺寸的一半,以构成面阵并提高光学性能。

根据加工工艺的条件和此理论分析来确定最佳的结构尺寸。关于 GMLM 器件的加工工艺和测试将另文分析。

参考文献:

- [1] 肖素艳,车录锋,李昕欣,等.基于柔性 MEMS 皮肤技术温度传感器阵列的研究[J].光学精密工程,2005,13(6):674-680.

XIAO S Y, CHE L F, LI X X, *et al.*. A temperature sensor array based on flexible MEMS skin technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6): 674-680. (in Chinese)

- [2] 周连群,吴一辉,张平,等.一种采用微硅片狭缝的新型微小型光纤光谱仪[J].光学精密工程,2005,13(6):637-642.
ZHOU L Q, WU Y H, ZHANG P, *et al.*. A new mini-fiber-spectrometer adopting micro-silicon-slit[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6):637-642. (in Chinese)
- [3] 尤政,张高飞,林杨,等.MEMS 固体化学推进器设计与建模研究[J].光学精密工程,2005,13(2):117-125.
YOU ZH, ZHANG G F, LIN Y, *et al.*. Design and modeling of MEMS-based solid propellant propulsion[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2):117-125. (in Chinese)
- [4] 刘泽文,王晓红,黄庆安.微系统设计[M].北京:电子工业出版社,2004.
LIU Z W, WANG X H, HUANG Q A. *Micro Systems Design*[M]. Beijing: Electronic Industry Publishing Company, 2004. (in Chinese)
- [5] MEN W, MOHR J, PAUL O, 等.微系统技术[M].北京:化学工业出版社,2003.
MEN W, MOHR J, PAUL O, *et al.*. *Micro Systems Technology*[M]. Beijing: Chemistry Industry Publishing Company, 2003. (in Chinese)
- [6] 伍艺,黄尚廉,张洁,等.反射面平动式光栅光调制器的实现及机电特性分析[J].中国机械工程,2005,16(14):1251-1253.
WU Y, HUANG SH L, ZHANG J, *et al.*. Electromechanical characteristics analysis for the reflecto-movable grating light modulator[J]. *CHIN. MECH. ENG.*, 2005, 16(14):1251-1253. (in Chinese)
- [7] 张洁,黄尚廉,付红桥,等.光栅光阀的光学特性分析和仿真[J].光学学报,2005,25(11):1452-1456.
ZHANG J, HUANG SH L, FU H Q, *et al.*. Optical characteristics analysis and simulation of grating light valve [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(11):1452-1456. (in Chinese)
- [8] 张洁,黄尚廉,闫许,等.光栅平动式光调制器结构参数的优化分析[J].光学学报,2006,26(8):1121-1126.
ZHANG J, HUANG SH L, YAN X, *et al.*. Structural analysis and optimization of grating moving light modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(8):1121-1126. (in Chinese)
- [9] 吕乃光.傅里叶光学[M].北京:机械工业出版社,1988.
LU N G. *Fourier Optics*[M]. Beijing: Mechanical Industry Publishing Company, 1998. (in Chinese)

作者简介:张洁(1980—),女,重庆大学光电学院博士研究生,主要从事微光机械方面的研究。E-mail: zhangjie@cqu.edu.cn