

文章编号: 0253-2239(2007)12-2240-5

用于显示的透射型法布里-珀罗光调制器*

孙吉勇 黄尚廉 张 洁 张智海 史玲娜

(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 400044)

摘要: 提出了一种用于显示的, 基于透射型法布里-珀罗干涉的微机电系统(MEMS)光学调制器。基于多光束干涉原理分析了调制器的光学特性, 推导出了调制器结构的特征参量。分析表明, 当调制器的腔长为 $\lambda_c/4$ 时, 透射光可以实现暗态显示; 当调制器的腔长取为零或 $\lambda_c/2$ 时, 透射光可以实现亮态显示。通过控制法布里-珀罗腔长, 就可实现调制器的明暗调制。理论上证明了该调制器用于显示的可行性。设计了一种基于微机电系统的透射型法布里-珀罗光学调制器结构, 该调制器的理论衬比度达到 150。仿真结果表明, 该调制器具有 2.4 V 的低电压静电驱动性能。

关键词: 微机电系统; 法布里-珀罗光调制器; 干涉; 显示

中图分类号: TN256 文献标识码: A

Transmitting Fabry-Pérot Light Modulator for Display Application

Sun Jiyong Huang Shanglian Zhang Jie Zhang Zhihai Shi Lingna

(The Key Laboratory for Opto-Electronic Technology and System, Education Ministry,
Opto-Electronic Engineering Department, Chongqing University, Chongqing 400044)

Abstract: A transmitting Fabry-Pérot light modulator for display application is proposed. Its optical characteristics are analyzed with multiple beam interference theory. The typical parameters of the light modulator for display are deduced. When the Fabry-Pérot cavity length is $\lambda_c/4$, almost all transmitted light is cut off, the modulator is "off" state. While when the cavity length is 0 or $\lambda_c/2$, corresponding light can transmit the modulator, the modulator is "on" state. It is theoretically proved that this light modulator is capable for display. Finally, one light modulator structure based on micro-electro mechanical system (MEMS) is given. Contrast ratio of this device is 150 by theoretical calculation. Result of the software simulation shows that this structure has as low as 2.4 V actuating voltage.

Key words: micro-electromechanical system; Fabry-Pérot light modulator; interference; display

1 引 言

微机电系统(MEMS)技术的发展, 为显示技术的发展注入了新的技术活力^[1,2]。基于微机电系统技术的显示用光调制器, 最具有代表性的是利用反射镜原理的数字微镜(DMD)^[3], 它已在数字投影市场取得了巨大的成功。此外, 还有基于光衍射原理的光栅光调制器^[4~6]。但是这些基于微机电系统的光调制器, 都是对反射光进行调制, 增加了光路的复杂程度, 使得显示结构不能做得很薄, 限制了其在普

通平板显示领域的应用。本文提出了一种基于微机电系统技术的透射型法布里-珀罗(Fabry-Pérot)光调制器, 克服了反射式光调制器光路复杂的缺点, 同时继承了微机电系统的加工工艺单一、适合批量生产、与半导体工艺兼容^[7~9], 适合数字显示等优点, 有望在平板显示领域取得一定的应用。

2 原 理

当一束光入射到如图 1 所示的法布里-珀罗光

* 国家自然科学基金(60578023)和重庆市院士基金(8883)资助课题。

作者简介: 孙吉勇(1975—), 男, 江苏泰兴人, 博士研究生, 主要从事微光机电系统方面的研究。E-mail: stoiker@163.com

导师简介: 黄尚廉(1936—), 男, 四川乐山人, 教授, 中国工程院院士, 主要从事光电技术及系统、仪器科学与技术等方面的研究。E-mail: slhuang@cqu.edu.cn

收稿日期: 2007-01-18; 收到修改稿日期: 2007-06-04

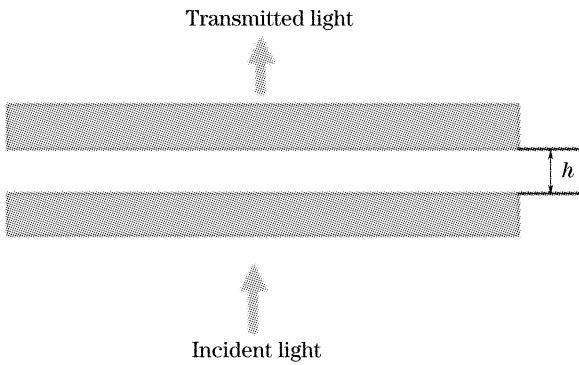


图1 法布里-珀罗光调制器

Fig. 1 Fabry-Pérot light modulator

调制器时,光在两个反射镜的表面发生多次反射和透射,反射光和透射光分别发生多光束干涉,其透射光的干涉光强分布为^[6]

$$I_t(\lambda) = \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R\sin^2(2\pi nh/\lambda)} I_i(\lambda), \quad (1)$$

式中 R 为反射镜的反射率, h 为法布里-珀罗腔的长度, $I_i(\lambda)$ 为入射光的光强分布, λ 为入射光的波长, n 为反射镜之间介质的折射率。当介质为空气时, $n = 1$, 此时(1)式可以简化为

$$I_t(\lambda) = \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R\sin^2(2\pi h/\lambda)} I_i(\lambda). \quad (2)$$

由(2)式可得,在入射光强分布一定时,法布里-珀罗光调制器的透射光强分布是反射率 R 和腔长 h 的函数。当 $h = (2k+1)\lambda/4$ 时,透射光取得干涉极小;当 $h = 2k\lambda/4$ 时,透射光取得干涉极大, k 为干涉级次,取值为整数。图2给出了当均匀分布的可见光入射到腔长为 $1\mu\text{m}$ 的法布里-珀罗光调制器时,透射光的干涉光强分布。两相邻干涉极大之间存在关系:

$$h = \frac{k+1}{2}\lambda_1, \quad (3)$$

$$h = \frac{k}{2}\lambda_2, \quad (4)$$

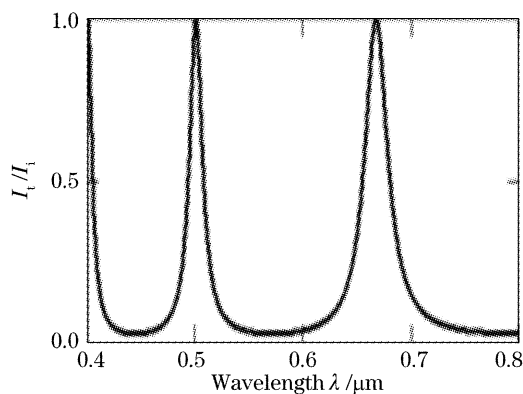


图2 透射光强分布

Fig. 2 Intensity distribution of transmitted light

式中 λ_1, λ_2 为任意两个相邻的干涉极大处的波长,假设 λ_s 为入射光的最短波长, $\lambda_s < \lambda_1$, 将 λ_s 代入(3)式,结合(4)式得:

$$\lambda_2 = \frac{k}{k+1}\lambda_s. \quad (5)$$

由于 $\lambda_s < \lambda_2 < \lambda_1$ (λ_1 为入射光的最长波长), 因此利用(5)式可以求得透射光出现两个干涉极大时的最小干涉级次 k_0 , 将 k_0 和 λ_s 代入(3)式可以求出对应的法布里-珀罗调制器的腔长值 h_0 。当 h 小于 h_0 时,在光谱范围内最多只可能有一个波长为 λ_c (λ_c 为调制器所要显示颜色的中心波长)的光满足公式 $h = k\lambda_c/2$, 只有以该波长 λ_c 为中心的一种颜色的光被透射。当调制器的腔长为 $(2k+1)\lambda_c/4$ 时,该波长的光被截止。在调制器的腔长 $h = 0$ 时,对所有波长的光 $h = k\lambda/2$ ($k = 0$) 恒成立,因此所有波长的光都会通过调制器。如果入射光用三色发光二极管(LED)发出的合成光作光源,则其光谱范围在 $0.4 \sim 0.7\mu\text{m}$ 之间,利用(3)式,(5)式可求得透射光只出现一个干涉极大的最大腔长 h_0 为 $0.6\mu\text{m}$, 对应的干涉级次为 2。图3(a)、图3(b)为当 $\lambda = 0.54\mu\text{m}$, 腔长分别等于 $k\lambda_c/2$ ($k = 0, 1, 2$), $(2k+1)\lambda_c/4$ ($k = 0, 1$) 情况下的透射光强分布。

由图3(b)可见,当腔长 $h = \lambda_c/4$ ($\lambda_c = 0.54\mu\text{m}$) 时,不但波长为 λ_c 的光被调制器截止,且几乎所有的光都被截止。因此可以用法布里-珀罗光调制器来实现显示的明暗调制。当腔长 $h = \lambda_c/4$ 时,调制器处于关态,对应于显示的暗态;当腔长 $h = k\lambda_c/2$ ($k = 0, 1, 2$) 时,调制器处于开态,对应于显示的亮态。例如,当调制器显示绿色时,波长 λ_c 取值为 $0.54\mu\text{m}$ 。调制器在亮态时的腔长可以分别设计为 $0, 0.27\mu\text{m}$ 和 $0.54\mu\text{m}$, 在暗态时的腔长应设计为 $0.135\mu\text{m}$ 。

根据上面的分析,对于透射型法布里-珀罗光调制器,其在暗态时的腔长取值为 $\lambda_c/4$, 而在亮态时的腔长可以为 $0, \lambda_c/2$ 和 λ_c 等不同的值。如果亮态时的腔长取 λ_c , 调制器进行明暗调制时,腔长需要从 λ_c 变化到 $\lambda_c/4$, 变化范围达到 $3\lambda_c/4$; 而如果亮态时的腔长值取 0 或 $\lambda_c/2$, 则调制器腔长的调制范围仅为 $\lambda_c/4$, 更有利于调制的实现。因此,调制器在暗态的腔长值为 $\lambda_c/4$, 而在亮态的腔长应选择 0 或 $\lambda_c/2$ 。下面以调制器工作在绿色显示为例($\lambda_c = 0.54\mu\text{m}$), 分别讨论其在亮态的腔长值为 $0, \lambda_c/2$ 情况下器件的光学特性。

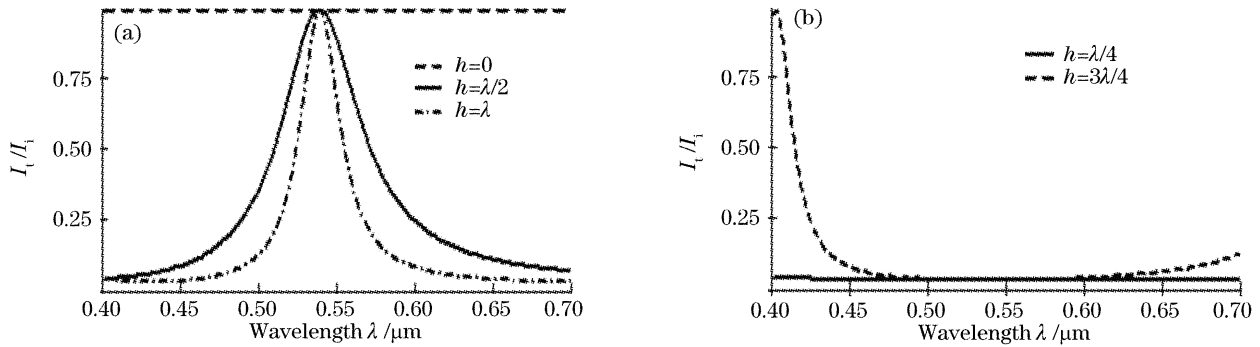


图 3 法布里-珀罗光调制器透射光强分布

Fig. 3 Intensity distribution of the transmitted light through Fabry-Pérot light modulator

3 光学特性

3.1 调制器在亮态时的腔长为零

由前面的分析可知,在开态时,所有的入射光都被均匀通过,对波长没有选择性;关态时几乎所有的光都被截止。因此该调制器本身只具有黑白显示的特性。如果来实现彩色显示的功能,需要在显示系统中添加色轮或者滤光片。

由(2)式可以看出,当腔长一定时,透射光的干涉光强分布是一定的,但是透射光的总能量大小是反射率 R 的函数。将公式(2)对波长 λ 积分,就可以分别求得腔长一定时透射光的总能量随反射率 R 的变化特性

$$I = \int_{0.4}^{0.7} \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R\sin(2\pi h/\lambda)} I_i(\lambda) d\lambda. \quad (6)$$

由(6)式知,当 h 取 $0, \lambda_c/4$ 时, I 分别对应于调制器

在亮态和暗态时透射光的总强度 I_{on} 和 I_{off} 。

定义衬比度 $v = I_{on}/I_{off}$,利用(6)式可以求得当调制器的腔长分别取 $0, \lambda_c/4$ 时,调制器的衬比度随反射镜的反射率 R 的变化。图 4(a) 给出了腔长为 $0, \lambda_c/4$ 时,调制器总的透射光强随反射率的变化曲线,其中假设入射光强为均匀分布的可见光。由图 4(a) 可以看出,开态时,透射光的总强度不随反射率的变化而变化,所有的透射光都被通过。如果定义总的透射光强与入射光强的比为调制器的转换效率,则调制器的转换效率为 1。关态时,通过调制器的光随反射率的增大而减小。但当 R 趋向于 1 时,透射光突然趋与零,这是由于当 R 等于 1 时,已经没有光通过反射镜进入法布里-珀罗腔,因此已经没有干涉现象发生,透射光必然为零。从图 4(b) 可看出,调制器的衬比度随反射率的增大而不断增大,当 R 为 0.95 时衬比度达到 1200 以上。

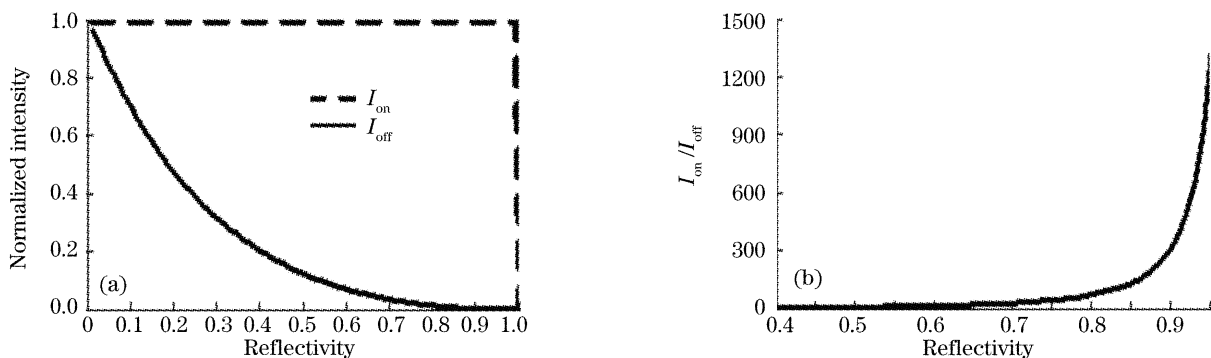


图 4 法布里-珀罗光调制器的光学特性。总的光强分布(a),衬比度(b)随反射率的变化

Fig. 4 Optical characteristic of Fabry-Pérot light modulator. Total intensity (a), contrast ratio (b) with reflectivity

3.2 调制器在亮态时的腔长为 $\lambda_c/2$

亮态时,只有波长 λ 为中心的一种颜色的光会被通过,其他颜色的光则被截止。如果用三个调制器组成一个像素,三个调制器在开态时的腔长分别取红、兰、绿三种颜色中心波长的一半,就可以使不同颜色的光通过,从而实现彩色显示的功能。

利用(6)式可求得调制器开态时光的转换效率和衬比度随反射率 R 的变化。图 5 为假设入射光为绿色发光二极管发出的光时,通过(6)式求出的结果,可以看出,开态时,调制器的转换效率随反射率 R 的增大而不断减小,当 R 为 0.9 时,转换效率为 0.4,衬比度为 150。

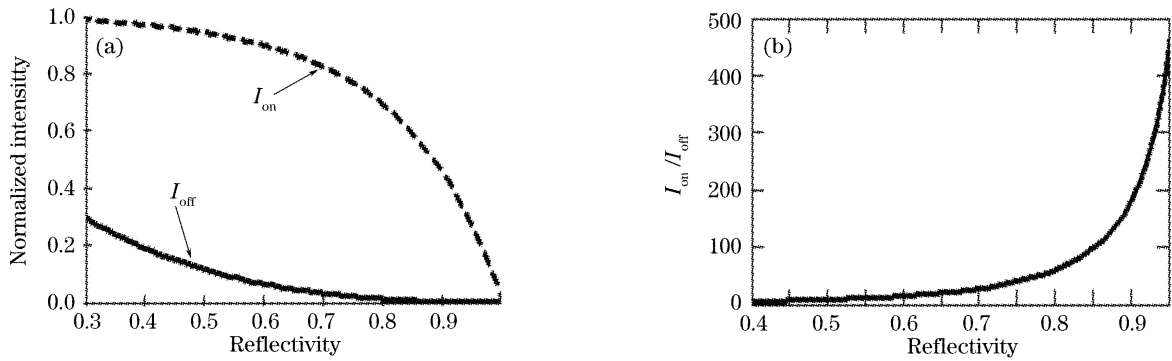


图 5 法布里-珀罗光调制器的光学特性。(a)总的光强分布,(b)衬比度随反射率的变化

Fig. 5 Optical characteristic of Fabry Pérot light modulator. Total intensity (a), contrast ratio (b) with reflectivity

4 器件的设计

反射率和腔长是调制器的两个关键参量,反射率由反射镜决定,腔长由调制器的结构决定。

4.1 反射镜的设计

反射镜通常由金属反射镜和介质反射镜两种。金属反射镜是通过利用蒸镀或溅射等方法在基板上镀 Al, Ag, Au 等金属而形成,其制作工艺简单,能得到比较高的反射率,但是金属对光的吸收会降低法布里-珀罗光调制器的转换效率。因此如果对光的转换效率要求不高时,可以考虑采用金属反射镜。

介质反射镜是由高低交替、厚度为 $\lambda/4$ 光程的薄膜组成。根据薄膜干涉的原理,在垂直入射情况下,多层介质反射膜的反射率可通过薄膜的特征矩阵方程求得^[7]

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \prod_{k=1}^m \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{2\pi\eta_k L_k}{\lambda}\right) & \frac{i}{\eta_k} \sin\left(\frac{2\pi\eta_k L_k}{\lambda}\right) \\ i\eta_k \sin\left(\frac{2\pi\eta_k L_k}{\lambda}\right) & \cos\left(\frac{2\pi\eta_k L_k}{\lambda}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_s \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$R = \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C}\right) \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C}\right)^*, \quad (11)$$

式中 η_s 为基板的折射率, η_0 为入射介质的折射率。

因此通过选择合适的参量就可以设计出需要的反射率 R 。图 6 给出了一个基于微机电系统工艺的多层介质反射膜(由多晶硅,氮化硅和二氧化硅组成)的反射率特性,其各层的光学厚度为 $\lambda_c/4$, λ_c 取 $0.54 \mu\text{m}$ 。

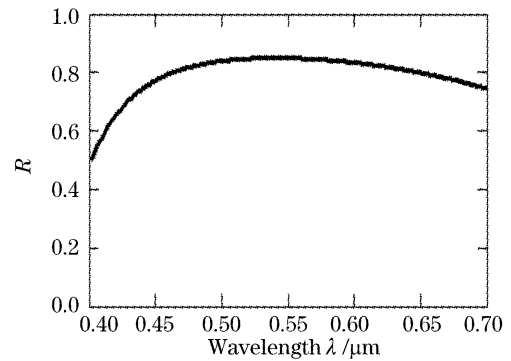


图 6 介质膜的反射率特性

Fig. 6 Reflectivity of multiple thin films

4.2 调制器结构的设计

本文设计了一种如图 7(a)的法布里-珀罗光调制器,图 7(b)是各层的详细结构。该调制器的工作颜色为绿色(中心波长 λ_c 为 $0.54 \mu\text{m}$),暗态时腔长为 $\lambda_c/4$,亮态时腔长为零。用这种单元形成面阵,就可以实现图像的显示。它主要由可动的上反射镜

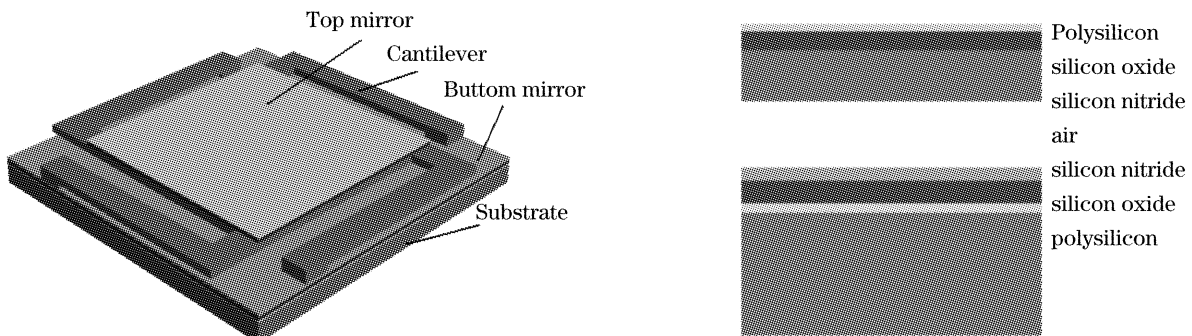


图 7 法布里-珀罗光调制器结构(a)和各层结构(b)

Fig. 7 Fabry-Pérot light modulator structure (a) and its layer structure (b)

和附着在透明石英基板上的下反射镜组成,上反射镜和下反射镜由多层介质反射镜组成,反射率特性由图 6 所描述。上反射镜的尺寸为 $50\ \mu\text{m}\times 50\ \mu\text{m}$ 。上反射镜中的氮化硅除了作为介质反射镜的一层外,还作为上反射镜的支撑层,其外围部分独立形成支撑梁,为了增加支撑梁的强度,将氮化硅的光学厚度由 $\lambda/4$ 改为 $3\lambda/4$,即由 $67\ \text{nm}$ 改为 $200\ \text{nm}$ (氮化硅的折射率取 2),梁的宽度为 $4\ \mu\text{m}$ 。上下两个反射镜中的多晶硅同时作为调制器的上电极和下电极;反射镜之间的初始腔长为 $0.135\ \mu\text{m}$,光从基板的下放入射。因此,在开始时调制器为暗态。通过上下两层多晶硅给调制器施加电压,上反射镜在静电力的作用下,向下运动,腔长变为零,调制器变为开态,实现明暗显示。将图 7 所描述的反射率代入(6)式,可以求得该调制器在开态和关态时的透射率分别为 1 和 0.0067,从而求得器件的衬比度为 150。图 8 为用 Coventor 仿真得到的调制器的静电驱动特性,可以看出,在 $2.4\ \text{V}$ 电压的驱动下,调制器的腔长由 $0.135\ \mu\text{m}$ 变为零。该结构具有良好的驱动特性。

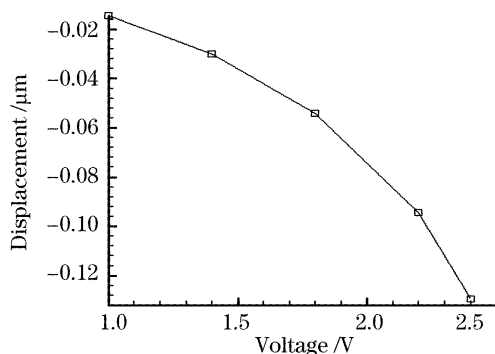


图 8 调制器的静电驱动仿真结果

Fig. 8 Simulation result of electro-static actuation of the modulator

5 结 论

利用多光束干涉原理分析了调制器的光学特性,表明在可见光范围内,当法布里-珀罗光调制器的腔长为 $\lambda_c/4$ 时,几乎所有的光都被调制器截止,而当调制器的腔长为零时,所有的光都会被通过。利用调制器的该特性,可以实现黑白显示。如果腔长取 $\lambda_c/2$,则中心波长为 λ_c 的光被调制器通过,从而可以实现彩色显示。提出了一种基于微机电系统

工艺的介质反射镜,设计了一种透射型法布里-珀罗光学调制器,利用 Coventor 软件仿真了它的静电驱动特性,仿真结果表明该调制器具有良好的驱动性能。从理论上证明了透射型法布里-珀罗光调制器的可行性。

参 考 文 献

- 1 Yusuke Taii, Akio Higo, Hiroyuki Fujita *et al.*. Electrostatically controlled transparent display pixels by PEN-films MEMS[C]. Optical MEMS and Their Applications, IEEE/LEOS International Conference, 2005. 13~14
- 2 Kerwin Wang. *Micro-Optical Components for a MEMS Integrated Display*[D]. Doctoral dissertation of University of Washington, 2004. 4~8
- 3 L. J. Hornbeck. Digital Light Processing TM for high brightness, high-resolution applications[C]. *Proc. SPIE*, 1997, **3013**: 27~40
- 4 D. M. Bloom. The grating light valve; revolutionizing display technology[C]. *Proc. SPIE*, 1997, **3013**: 165~171
- 5 Zhang Jie, Huang Shanglian, Yan Xu *et al.*. Optimization and analysis for structural parameters of grating moving light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1121~1126 (in Chinese)
张 洁,黄尚廉,闫 许等. 光栅平动式光调制器结构参量的优化分析[J]. 光学学报, 2006, **26**(8): 1121~1126
- 6 Zhang Jie, Huang Shanglian, Fu Hongqiao *et al.*. Optical characteristics analysis and simulation of grating light valve[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(11): 1452~1456 (in Chinese)
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
- 7 Shen Weidong, Zhu Yong, Huang Biqin *et al.*. Analysis of the micro-optical electro mechanical system filter's tunable property [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1125~1129 (in Chinese)
沈伟东,朱 勇,黄弼勤等. 微光机电系统滤波器可调谐特性分析[J]. 光学学报, 2004, **24**(8): 1125~1129
- 8 Feng Fei, Jiao Jiwei, Xiong Bin *et al.*. Design and fabrication of optically readable infrared thermal imaging device based on Fabry-Perot micro-cavity array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 1375~1380 (in Chinese)
冯 飞,焦继伟,熊 斌等. 基于法布里-珀罗微腔阵列的光读出红外热成像器件设计与制作[J]. 光学学报, 2004, **24**(10): 1375~1380
- 9 Xu Yang, Wu Jihong, Liu Litian *et al.*. Design and fabrication of a F-P optical switch based on MOEMS technology[J]. *Chin. J. Semiconductors*, 2002, **23**(8): 841~845 (in Chinese)
徐 杨,吴霁虹,刘理天等. 基于 MOEMS 技术的一种 F-P 光开关的设计与制作[J]. 半导体学报, 2002, **23**(8): 841~845
- 10 Sun Jiyong, Chen Weimin, Zhu Yong *et al.*. Influence of optical source spectrum on optical fiber F-P strain sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(5): 596~600 (in Chinese)
孙吉勇,陈伟民,朱 永等. 光源光谱对光纤法布里-珀罗应变传感系统的影响[J]. 光学学报, 2002, **22**(5): 596~600
- 11 Tang Jinfa, Zhen Quan. *Applied Film Optics* [M]. Shanghai, Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1984. 50~52 (in Chinese)
唐晋发,郑 权. 应用薄膜光学[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1984. 50~52