

doi: 10.3788/gzxb20164504.0405002

闪耀角可调微型可编程光栅的优化设计与仿真模拟

李晓莹^{1,2}, 吴焱^{1,2}, 虞益挺^{1,2}, 刁金帅^{1,2}, 闫治晚^{1,2}

(1 西北工业大学 空天微纳系统教育部重点实验室, 西安 710072)

(2 西北工业大学 陕西省微纳机电系统重点实验室, 西安 710072)

摘 要: 基于体硅微加工技术, 设计了一种闪耀角可调的微型可编程光栅, 对该光栅进行优化设计, 并理论计算不同闪耀角、入射角条件下相对光强分布, 采用 COMSOL 有限元仿真软件模拟不同入射参量下远场相对光强分布. 结果表明: 设计的可编程光栅有效反射面积占光栅总面积的 83.63%, 比表面微加工技术设计的光栅提高 8% 以上, 最大工作闪耀角为 6.84°; 当 532 nm 波长垂直入射时, 0~10° 闪耀角调制范围内最大衍射效率为 96.67%.

关键词: 微型可编程光栅; 闪耀角可调; 硅微加工; 微机电系统; 衍射效率

中图分类号: TN36

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)04-0405002-5

Optimization Design and Numerical Simulation of Micro Programmable Gratings with Tunable Blazed Angle

LI Xiao-ying^{1,2}, WU Yan^{1,2}, YU Yi-ting^{1,2}, DIAO Jin-shuai^{1,2}, YAN Zhi-wan^{1,2}

(1 Key Laboratory of Micro/Nano Systems for Aerospace, Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University (NPU), Xi'an 710072, China)

(2 Shaanxi Province Key Laboratory of Micro and Nano Electro-Mechanical Systems, Northwestern Polytechnical University (NPU), Xi'an 710072, China)

Abstract: Based on the silicon bulk micromachining process, a micro programmable grating with tunable blazed angle was designed and optimized. The relative light intensity in the cases of different blazed angle and incident angle was theoretically calculated. Also, the far-field relative light intensity with the changing incident parameters was surveyed by adopting the COMSOL, a finite element simulation tool. The results show that: compared with the surface-micromachined gratings designed in our previous research, the efficient reflecting area is increased by more than 8%, reaching to 83.63%. The realized maximum blazed angle of the designed grating is 6.84°, and the maximum diffraction efficiency can be 96.67% under the condition of normal incidence with the wavelength of 532nm and the blazed angle with a tunable range of 0-10°.

Key words: Micro programmable gratings; Tunable blazed angle; Silicon micromachining; Microelectromechanical systems; Diffraction efficiency

OCIS Codes: 050.1950; 230.4685; 220.4000

0 引言

光栅作为一种重要的光学元件在测试计量、多光谱成像以及传感等领域有着广泛的应用^[1-5]. 传统的机械刻划光栅具有线密度高、表面质量好、+1 级衍射效

率达 80% 等优点, 然而该光栅一经制作完成, 其光栅周期、闪耀角等结构参量便无法改变, 无法实现实时、动态测量, 因此应用受到了一定限制. 近年来, 基于微机电系统 (Microelectromechanical Systems, MEMS) 技术的微型可编程光栅以其体积小、重量轻、成本低等优

基金项目: 航空科学基金 (No. 2013ZC53036)、国家自然科学基金 (No. 51375400)、教育部新世纪优秀人才支持计划、中央高校基本科研业务费重大项目培育基金 (No. 3102014JC02020504) 和全国优秀博士论文作者专项资金 (No. 201430) 资助

第一作者: 李晓莹 (1968-), 女, 副教授, 硕士, 主要研究方向为微机电系统及纳米技术. Email: xiaoy@nwpu.edu.cn

通讯作者: 虞益挺 (1980-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为微/纳光学及多光谱成像技术. Email: yyt@nwpu.edu.cn

收稿日期: 2015-10-30; **录用日期:** 2015-12-22

<http://www.photon.ac.cn>

点在光学领域获得了广泛应用^[6]。“可编程”的含义是指通过驱动电路的编程控制,光栅器件产生预期的变形,闪耀角、光栅周期等结构参量随之改变而引起衍射能量分布变化,实现预期的衍射能量分布特性。MEMS 技术的使用不仅实现了光栅的微型化、集成化,同时降低了制作成本、提高了器件的工作性能,在投影显示、光通信、光谱仪等领域显示出较好的应用前景^[7-10]。

闪耀角可调微型可编程光栅能将出射光的绝大部分能量汇聚到某一方向或某一能级上,使得衍射效率得到极大的提高,有着其他光栅无可比拟的优势。1997年,美国空军技术学院研制出第一款基于 MEMS 技术的闪耀角可调微型可编程光栅^[11],为实现对闪耀角的调制设计了复杂的支撑结构,然而其最大工作闪耀角不足 1.25° 。随后 Sony 公司与美国斯坦福大学分别研制出闪耀式 GxL 器件^[12]和可调谐闪耀光栅(Tunable Blazed Grating, TBG)^[13,14]。这两种光栅经制作完成后闪耀角固定,其“可编程性”主要体现在对相位以及光栅周期等参量的调制上,无法实现对闪耀角的调制。德国弗莱堡大学于 2012 年报道了一种闪耀角可调微型可编程光栅^[15],采用热驱动方式使聚合物产生变形从而控制闪耀角的改变,克服了静电驱动中电极间隙受限的缺点,但也存在最大工作闪耀角过小(1.37°)的问题。2008 年,本课题组成功研制出一种基于两层多晶硅表面微加工工艺的闪耀角可调微型可编程光栅,通过独特的版图设计及制造工艺,得到光栅的最大工作闪耀角为 5.19° ^[16]。然而,受制于现有的表面微加工工艺技术,光栅单元上周期性分布有诸多释放孔结构,同时金属反射面受腐蚀试剂影响具有较大的表面粗糙度,这些都导致实际光栅样件的衍射效率不足 15%,对于实际应用非常不利。本文针对因两层多晶硅表面微加工工艺缺陷引起的闪耀角可调微型可编程光栅衍射效率不高的问题,在采用体硅微加工工艺的基础上优化结构版图设计,并对光栅的光学性能进行研究,同时计算出器件最大工作闪耀角,为后续的器件应用提供了重要参考。

1 工作原理及结构优化设计

图 1 为第 I 代闪耀角可调微型可编程光栅的扫描电镜(Scanning Electron Microscope, SEM)照片,基本的光栅单元包括光栅微梁、支撑梁、锚点、下电极和 Dimple 结构,其中光栅微梁是其主体部分,由两边的支撑梁悬空连接在锚点上,并通过锚点固定于基底上;光栅微梁与下电极构成可变的平板电容器(光栅微梁作为上电极),在两者之间施加电压,产生的静电引力将使 Dimple 结构率先与基底接触,随后光栅微梁绕支撑梁扭转,扭转角 α 即为该微型可编程光栅的闪耀角。

光栅微梁的表面溅射一层金属铝以提高器件的反射率。

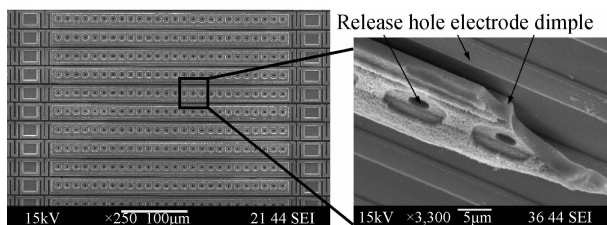


图 1 第 I 代闪耀角可调微型可编程光栅的扫描电镜照片
Fig. 1 SEM photos for the first-generation micro programmable grating with tunable blazed angle

图 2(a)为第 I 代光栅的局部结构示意图。该光栅采用两层多晶硅表面微加工工艺制作,释放孔设计以及大反射面粗糙度严重制约了光栅衍射效率的提高,使得应用受到了较大限制。为了克服这一问题,采用体硅微加工工艺并优化光栅结构设计,第 II 代光栅结构示意图如图 2(b)。该光栅包含五层光刻掩膜,其在 Y 方向上共有 120 行,每一行(X 方向)由 5 根光栅微梁组成,有效的光栅面积为 $2.8 \times 3.0 \text{ mm}^2$ 。经计算,第 I 代光栅的有效反射面积占总光栅面积的比率为 76.86%,第 II 代光栅提高至 83.63%,从有效反射面积来看,通过结构优化设计,光栅衍射性能提高了约 8%。此外,进一步考虑铝反射结构与释放孔的拓扑关系(如图 1 所示),第 II 代光栅的铝反射层为整体结构,对于提升器件的最终衍射效率将起到至关重要的作用。

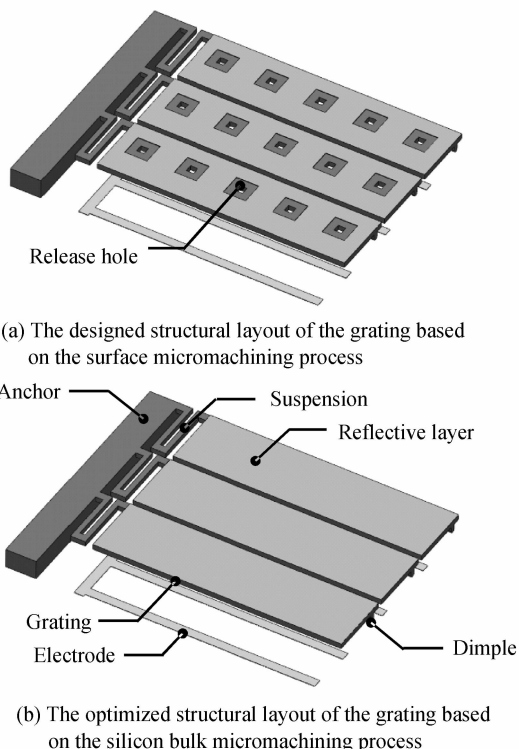


图 2 闪耀角可调微型可编程光栅结构示意图
Fig. 2 Structural layout of the micro programmable grating with tunable blazed angle

用.表1给出了第II代光栅器件参量,对于4μm空气间隙,设计的Dimple结构深度为3.8μm.

表1 优化设计后第II代光栅结构参量

Table 1 Main structural parameters of the optimized design of the second-generation grating

Parameter	Value/μm
Grating	
Length	250
Width	25
Thickness	2
Electrode	
Length	250
Width	10
Thickness	0.3
Width of suspension	2
Air gap	4
Dimple depth	3.8

2 衍射光强理论计算

由平面光栅的衍射理论可知:对于越高级次的光谱,其分辨和色散能力也越好,但是光强却随着级次的增大而显著降低.同时,在没有色散的零级,总是具有最大光强,而高级次上的光强较弱.闪耀光栅通过改变刻槽形状,将衍射主极大和干涉主极大分开,从而使大部分衍射光强集中在某个方向或特定衍射级上.

计算模型如图3,其相对光强分布表示为^[17]

$$I/I_0 = \text{sinc}^2\left(\frac{\Delta\phi}{\pi}\right) \left\{ \sum_{m=-\infty}^{\infty} \text{sinc}\left[N\left(\frac{\Delta\varphi}{2\pi} - m\right)\right] \right\} \quad (1)$$

其中

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}d(\sin\beta + \sin\theta)$$

$$\Delta\phi = \frac{\pi d}{\lambda}[\sin(\alpha - \theta) - \sin(\beta - \alpha)]$$

α, β, θ 分别为闪耀角、入射角和衍射角, d, λ 分别为光栅常数和入射光波长, N 为光栅刻线总数, m 为衍射级.衡量闪耀光栅性能的优劣,除了用光栅的分辨能力、色散本领外,还有闪耀级次的衍射效率.闪耀角 α 、入射角 β 、入射光波长 λ 、光栅的刻线总数 N 等都不同程度地影响器件的光学性能.

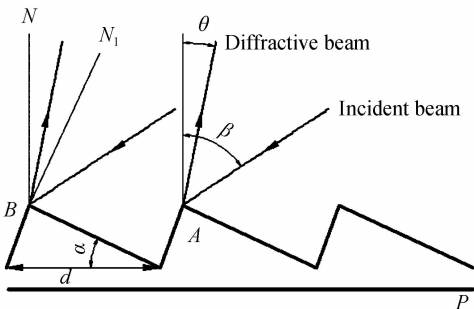


图3 闪耀光栅工作示意图

Fig. 3 Schematic diagram of a blazed grating

取 $d=27\mu\text{m}, \lambda=532\text{nm}, \beta=0^\circ, N=100$,当闪耀角 α 分别为 $1^\circ, 2^\circ, \dots, 10^\circ$ 时,根据式(1)计算 $-5\sim 25^\circ$ 衍射角 θ 范围内相对光强分布,计算结果如图4.表2为不同闪耀角下最大相对光强及其对应的衍射角.从中可以看出:对于特定的人射光波长且入射角为零的情况下,闪耀角变化不仅改变最大相对光强,而且引起闪耀级对应的衍射角变化,且变化值近似为闪耀角变化值的2倍.因此,闪耀角可调微型可编程光栅通过调节驱动电压使闪耀角产生变化,从而改变相对光强分布,实现对闪耀级的衍射效率及其对应的衍射角的调制.在 $1\sim 10^\circ$ 闪耀角调节范围内,相对衍射效率最高可达96.67%.

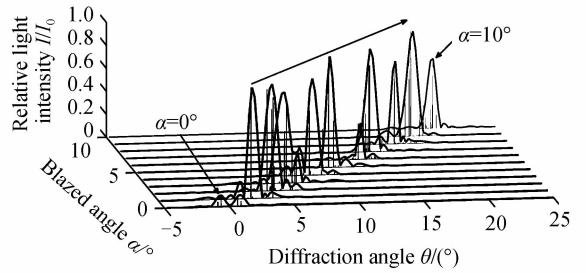


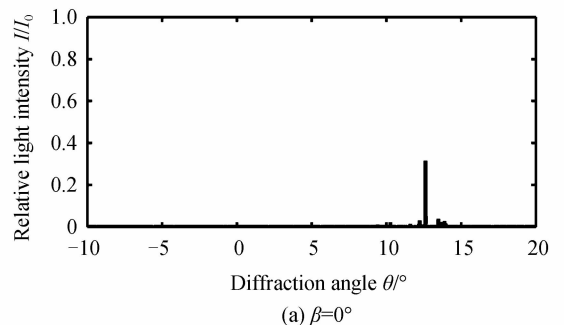
图4 相对光强在不同闪耀角 α 下的分布曲线

Fig. 4 Relative light intensity of diffraction at different blazed angle α

表2 不同闪耀角下最大相对光强及其对应的衍射角
Table 2 Maximum relative light intensity and its diffraction angle as the blazed angle varying

Blazed angle/($^\circ$)	Maximum relative light intensity/(a. u.)	Diffraction angle/($^\circ$)
1	0.9667	2.12
2	0.8847	3.81
3	0.6822	5.75
4	0.7438	7.97
5	0.9665	9.91
6	0.3145	12.63
7	0.8967	13.90
8	0.7200	16.31
9	0.9137	18.30
10	0.6088	20.18

图5为 $\beta=0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ 时相对光强分布.入射角 β 的变化引起闪耀级对应的衍射角的偏移,其偏移量大小等于入射角 β 的变化量;同时,入射角 β 对衍射光强



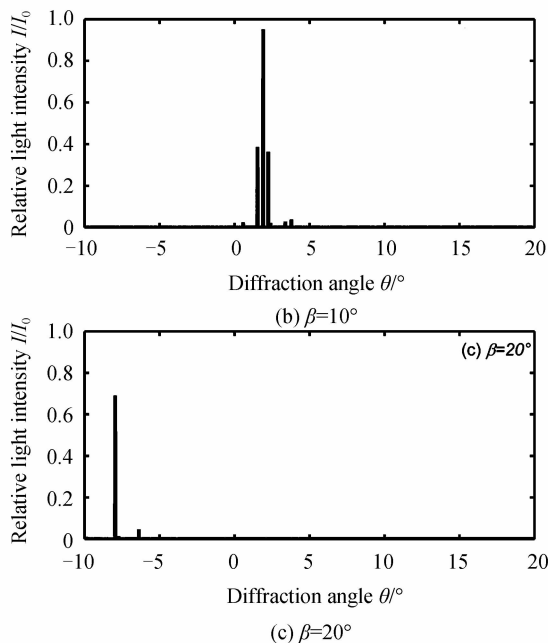


图 5 相对光强在不同入射角 β 下的分布曲线
Fig. 5 Relative light intensity of diffraction at different incident angle β

也具有一定的调制作用。

3 二维光学仿真

图 6 为采用 COMSOL 有限元仿真软件电磁波频域模块 (Electromagnetic Wave Frequency Domain, EWFD) 构建的二维光学仿真模型示意图。其中求解域包括空气层 (Air) 以及完美匹配层 (Perfect Matched Layer, PML); 定义 Port1 为入射波端口, Port2 为出射波端口。为了简化模型, 取相邻的三个光栅为一基本求解单元, 通过施加周期性边界条件 (periodic boundary) 将求解结果扩展至无限大光栅平面; 同时, 不考虑入射光波在光栅表面反射时的能量损耗。定义变量 ewfd.normEfar 为远场条件下的电场模, 采用 $|ewfd.normEfar|^2$ 表征远场相对光强, 研究远场相对光强分布随入射角及入射光波长的变化关系。根据图 7 所示模型, 结合表 1 的光栅结构参量可计算出理论上最大工作闪耀角为 6.84° 。表 3 给出了二维光学仿真模型的参量。

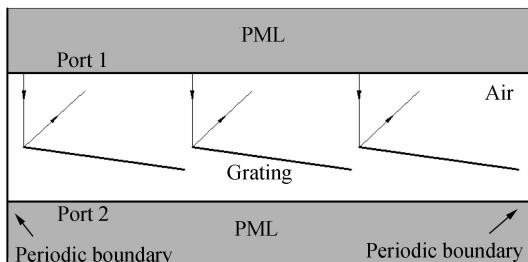


图 6 二维光学仿真模型

Fig. 6 Two-dimensional simulation model for the grating

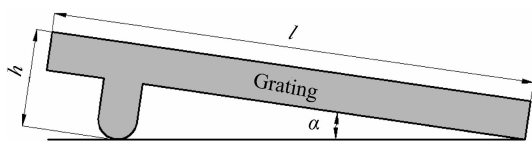


图 7 最大工作闪耀角计算模型

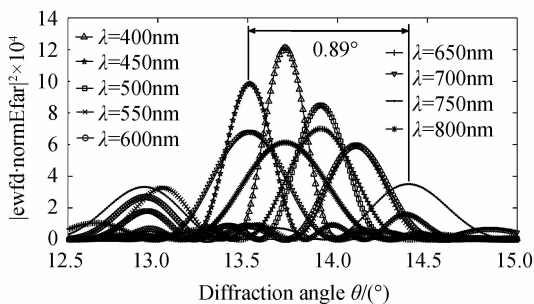
Fig. 7 Calculating model for the maximum blazed angle

表 3 二维光学仿真模型参量

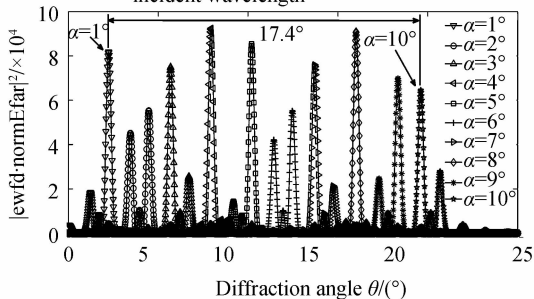
Table 3 Modeling parameters for the two-dimensional optical simulation of the designed grating

Structural parameter		Light source	
Width of grating	$25 \mu\text{m}$	Incident wave	Plane wave
Blazed angle	6.84°	Wavelength	532 nm
Thickness of PML	$5 \mu\text{m}$	Incident angle	0°

图 8(a) 为不同入射波长下远场相对光强分布。在可见光波段, 闪耀级对应的衍射角最小值为 13.51° , 最大值为 14.40° , 差值仅为 0.89° 。实际工程应用中, 由于该光栅工作在可见光波段时闪耀级对应的衍射角不会随入射光波长产生较大的偏移, 无需对光强探测器的位置进行实时校正, 不仅降低了光学系统的制造成本, 也为后续光学系统的设计提供了便捷。图 8(b) 为不同闪耀角下远场相对光强分布。闪耀级对应的衍射角会随着闪耀角的变化产生偏移, 其偏移量约为闪耀角变化值的 2 倍。



(a) Far-field relative light intensity for different incident wavelength



(b) Far-field relative light intensity for different blazed angle

图 8 远场相对光强分布

Fig. 8 Far-field relative light intensity distribution

4 结论

采用体硅微加工工艺, 设计了一种闪耀角可调微型可编程光栅, 并对器件的相对光强分布特性进行了理论计算与仿真模拟, 两者得到的结果非常吻合; 在垂

直入射条件下,调节闪耀角不仅改变最大相对光强值,而且使闪耀级对应的衍射角产生偏移,其偏移量大小为闪耀角变化值的2倍。最终实现的闪耀角可调微型可编程光栅最大工作闪耀角达到 6.84° ,能够满足实际应用需要。

参 考 文 献

- [1] KONG Peng, Bayanheshig, LI Wen-hao, *et al.* Optimization of double-grating flat-field holographic concave grating spectrograph[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 21-25.
孔鹏,巴音贺希格,李文昊,等. 双光栅平场全息凹面光栅光谱仪的优化设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 21-25.
- [2] GU Zheng-tian, ZHANG Jiang-tao. Metal-coated long-period fiber grating liquid sensor based on dual-peak resonance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 21-27.
顾争先,张江涛. 基于双峰谐振效应的镀金属长周期光纤光栅液体浓度传感器[J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 21-27.
- [3] FU Sheng-gui, LIU Xiao-juan, WEI Gong-xiang, *et al.* Polarization Ytterbium-doped fiber laser based on 45° titled fiber grating [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(8): 806003.
付圣贵,刘晓娟,魏功祥,等. 基于 45° 倾斜光纤光栅的线偏振输出掺镱光纤激光器[J]. *光子学报*, 2014, **43**(8): 806003.
- [4] GENG Hao-ke, SUN Xiao-hong, ZHANG Xu, *et al.* Structural design and optimization of absorption of thin film solar cells based on grating structure [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(12): 1223003.
耿浩珂,孙晓红,张旭,等. 基于光栅结构薄膜太阳能电池吸收层结构设计和优化[J]. *光子学报*, 2014, **43**(12): 1223003.
- [5] JIANG Qi, GAO Fang-fang. Simulation and experimental research of a novel sensor based on fiber bragggrating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **43**(2): 228001.
蒋奇,高芳芳. 一种新型光纤 Bragg 光栅流量传感器的仿真与实验研究[J]. *光子学报*, 2013, **43**(2): 228001.
- [6] YU Yi-ting, YUAN Wei-zheng. Review of MEMS-based programmable gratings: Part I [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, **29**(5): 1109-1114.
虞益挺,苑伟政. MEMS 微型可编程光栅的研究现状(上) [J]. *仪器仪表学报*, 2008, **29**(5): 1109-1114.
- [7] YU Yi-ting, YUAN Wei-zheng. Review of MEMS-based programmable gratings: Part II [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, **29**(6): 1339-1344.
虞益挺,苑伟政. MEMS 微型可编程光栅的研究现状(下) [J]. *仪器仪表学报*, 2008, **29**(6): 1339-1344.
- [8] HORNG C T, SUN H Y, HUANG S Y. Electrically tunable diffraction grating based on liquid crystal film[J]. *Life Science Journal*, 2013, **10**(4): 2029-2031.
- [9] MA T, LIANG H, CHEN G, *et al.* Micro-strain sensing using wrinkled stiff thin films on soft substrates as tunable optical grating[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(10): 11994-12001.
- [10] MONNAI Y, ALTMANN K, JANSEN C, *et al.* Terahertz beam steering and variable focusing using programmable diffraction gratings[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(2): 2347-2354.
- [11] BURNS D M, BRIGHT V M, GUSTAFSON S C, *et al.* Optical beam steering using surface micromachined gratings and optical phased arrays[C]. *Optical Science, Engineering and Instrumentation'97. International Society for Optics and Photonics*, 1997: 99-110.
- [12] ITO Y, SARUTA K, KASAI H, *et al.* High-performance blazed GxL™ device for large-area laser projector [C]. *MOEMS-MEMS 2006 Micro and Nanofabrication. International Society for Optics and Photonics*, 2006: 611401.
- [13] LI X, ANTOINE C, LEE D, *et al.* Tunable blazed gratings [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2006, **15**(3): 597-604.
- [14] ANTOINE C, LI X, WANG J S, *et al.* Reconfigurable optical wavelength multiplexer using a MEMS tunable blazed grating[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, **25**(10): 3100-3107.
- [15] PAULS M, BRUNNE J, WALLRABE U, *et al.* A reflective tunable blazed-grating for high energy femtosecond laser pulses [C]. *2012 International Symposium on Optomechatronic Technologies (ISOT 2012)*. 2012.
- [16] YU Yi-ting, YUAN Wei-zheng, WANG Lan-lan, *et al.* Theoretical analysis and experimental study on the maximum blazed angle for micro programmable gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2220-2224.
虞益挺,苑伟政,王兰兰,等. 微型可编程光栅最大闪耀角的理论分析与实验[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2220-2224.
- [17] 谢敬辉,赵达尊,阎吉祥,等. *物理光学教程*[M]. 北京:北京理工大学出版社,2005.