



一种新型的微型可编程闪耀光栅及其多光谱成像应用

虞益挺, 苑伟政*, 燕斌, 李太平, 姜澄宇

西北工业大学微/纳米系统实验室, 西安 710072

* 联系人, E-mail: yuanwz@nwpu.edu.cn

2009-02-26 收稿, 2009-05-08 接受

国家自然科学基金(批准号: 50775189)和西北工业大学博士论文创新基金(编号: CX200611)资助项目

摘要 采用两层多晶硅表面微加工工艺, 研制开发了一种新型的微型可编程闪耀光栅. 该光栅具有结构简单、工作谱段宽、光谱连续可调等特点. 为了实现可工作闪耀角的最大化, 有效利用 Dimple 结构作为栅条的核心功能组件, 其高度接近空气间隙. 由实验测得, 研制的微型可编程闪耀光栅在驱动电压 112 V 作用下能达到的最大可工作闪耀角约 5.19° , 对应的最大闪耀波长达到中红外 $4.88\ \mu\text{m}$. 在此基础上, 以该微型可编程闪耀光栅为核心的分光元件, 研究了其在多光谱成像领域应用的可行性, 并搭建了多光谱成像系统的原型样机, 得到了较好的实验结果. 最后, 讨论了该成像系统的优点, 并提出了进一步研究的建议.

关键词

微型可编程闪耀光栅
表面微加工
光谱调制
多光谱成像

多光谱成像技术能够在获取目标空间景像信息的同时还得到其光谱信息, 因此, 与传统的目标彩色图像或灰度图像相比, 多光谱图像包含更多的目标体信息, 在目标识别、监控等方面具有较大优势. 该技术已广泛应用于天文学^[1,2]、遥感遥测^[3,4]等领域. 近几年, 多光谱成像技术开始与显微成像技术相结合, 在生物医学领域拓展其应用空间^[5~7].

光学滤波器作为多光谱成像系统中的核心组件, 用于选取离散的窄带波长. 迄今为止, 已开发出各种不同类型的光学滤波器, 如光栅^[8]、棱镜^[9]、滤波轮^[10]、声光可调谐滤波器(acousto-optic tunable filters, AOTF)^[11]以及液晶可调谐滤波器(liquid crystal tunable filters, LCTF)^[12]等, 其中前3种光学滤波器在技术上相对成熟, 占据了绝大多数的应用. 然而, 在它们基础上所研制的多光谱成像系统也要相对复杂, 体积大, 成本高, 并且可实现的光谱波段数非常有限. 而声光可调谐滤波器以及液晶可调谐滤波器在技术上要先进得多, 两者均能够在外加激励作用下实现光谱的连续

动态调制, 因此可以极大简化整个多光谱成像系统. 但是, 由于材料原因, 单一的声光可调谐滤波器或者液晶可调谐滤波器只能工作于较窄的波长范围, 如通常情况下的近紫外到近红外, 这在一定程度上限制了系统的应用领域.

微型可编程闪耀光栅(micro programmable blazed grating, μPBG)利用微机电系统(microelectro-mechanical systems, MEMS)技术, 能实现光栅闪耀角的动态调制, 其最先是由 Burns 和 Bright 等人报导的, 采用商品化的三层多晶硅表面微加工工艺(MUMPs[®])制作而成^[10]. 为了实现可工作闪耀角的最大化, 他们设计了复杂的支撑梁系统, 而最终实验得到的光栅最大可工作闪耀角仍然小于 1° . 随后, Li 等人^[11]利用湿法腐蚀技术结合深反应离子刻蚀技术报道了另一种微型可编程闪耀光栅, 然而, 光栅的闪耀角在加工完成以后是不可改变的, 而只能对光栅栅条的横向位置进行调制. 本文研制了一种新型的微型可编程闪耀光栅, 该光栅采用表面工艺制作, 其闪耀角具有

引用格式: 虞益挺, 苑伟政, 燕斌, 等. 一种新型的微型可编程闪耀光栅及其多光谱成像应用. 科学通报, 2009, 54: 2993~2997

Yu Y T, Yuan W Z, Yan B, et al. A new micro programmable blazed grating (μPBG) and its application to multispectral imaging. Chinese Sci Bull, 2009, 54, doi: 10.1007/s11434-009-0494-7

大的连续可调范围;同时,基于该微型可编程闪耀光栅,介绍了一种多光谱成像的方法,并搭建了实验原型系统来验证该方法的可行性及有效性.

1 微型可编程闪耀光栅

1.1 工作原理、设计及加工

图1是设计的微型可编程闪耀光栅的基本工作原理图,其中只给出了单个光栅栅条的工作过程,而整个光栅由成百上千根这种光栅栅条构成.该光栅采用两层多晶硅表面微加工工艺制作而成,第一层多晶硅(Poly0)用于形成下电极和电气引线,第二层多晶硅(Poly1)用于得到 dimple 结构和光栅微梁.与MUMPs[®]工艺相比,本研究所用的制作工艺要相对简单.利用静电驱动来提供所需的驱动力.由于下电极位于光栅微梁的一侧,因此,当在下电极和光栅微梁之间施加驱动电压时,将在光栅微梁上产生一扭转力矩,导致光栅微梁绕支撑梁扭转,形成闪耀角 θ .图2给出了用于制作微型可编程闪耀光栅的两层多晶硅表面微加工工艺流程图示意图.

为了实现光栅可工作闪耀角的最大化,并提高器件的衍射效率,对 dimple 结构进行了专门设计.此处, dimple 结构具有两大功能:第一,用于减少工艺过程以及使用中的黏附,该功能是表面工艺中设计 dimple 结构的主要目的^[12],第二,提供机械支撑,将

dimple 结构作为光栅微梁的有效组成,其深度设计得与空气间隙尽可能接近.因此,当施加一定的驱动电压 V_1 时,如图1(b)所示, dimple 结构的底部即开始与基底接触;随着电压的进一步增加(图1(c)), dimple 结构将有效阻止光栅微梁在垂直基底方向上的位移,而同时,扭转力矩将使光栅微梁以接触部位为支点绕支撑梁扭转,从而实现光栅的闪耀.该结构设计方法在维持原有工艺流程的基础上,巧妙且最大限度地利用了表面工艺中有限的空气间隙.

图3给出了制作得到的微型可编程闪耀光栅.整个光栅在图3(a)所示的箭头方向上有120行,其中每一行又包括8根光栅微梁,因此总共有960根光栅微梁.有效的光栅面积为 $3.2\text{ mm} \times 3.2\text{ mm}$.由图3(b)的局部放大图可以清楚地看到光栅微梁底部的 dimple 结构以及下电极.对于制作的第一代微型可编程闪耀光栅而言,空气间隙为 $2\text{ }\mu\text{m}$,而设计得到的 dimple 结构的深度约为 $1.75\text{ }\mu\text{m}$.光栅微梁的上表面覆盖一层金属铝膜,从而提高器件的光学反射率并提供引线焊盘.另外,在所有光栅微梁上设计了释放孔结构,它主要有两个目的:第一,节省释放工艺时间,减小腐蚀液对金属铝膜的刻蚀;第二,有效减小空气阻尼的不利影响,尤其是结构工作在高频情况下.图3(c)是封装好的光栅芯片,玻璃窗口提供了光栅与外界环境交互的通道,其对于可见光是透明的.

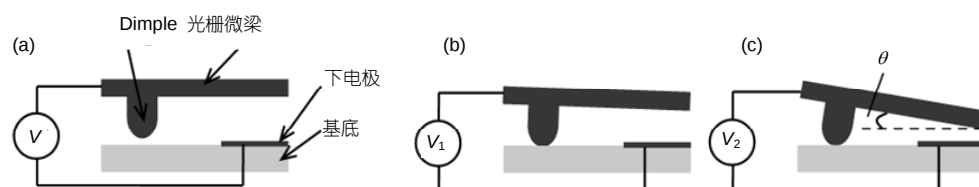


图1 设计的微型可编程闪耀光栅的工作原理

(a) 初始状态下,光栅栅条在宽度方向上的截面;(b) 当驱动电压达到 V_1 时, dimple 结构的底部开始与基底接触;(c) 当驱动电压达到 V_2 时($V_2 > V_1$), 光栅微梁以接触部位为支点开始绕支撑梁扭转,从而实现闪耀角 θ

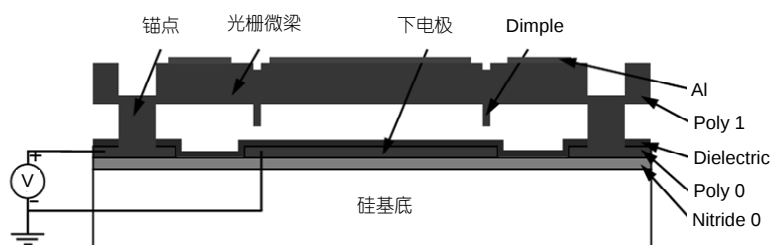


图2 两层多晶硅表面微加工工艺流程图示意图

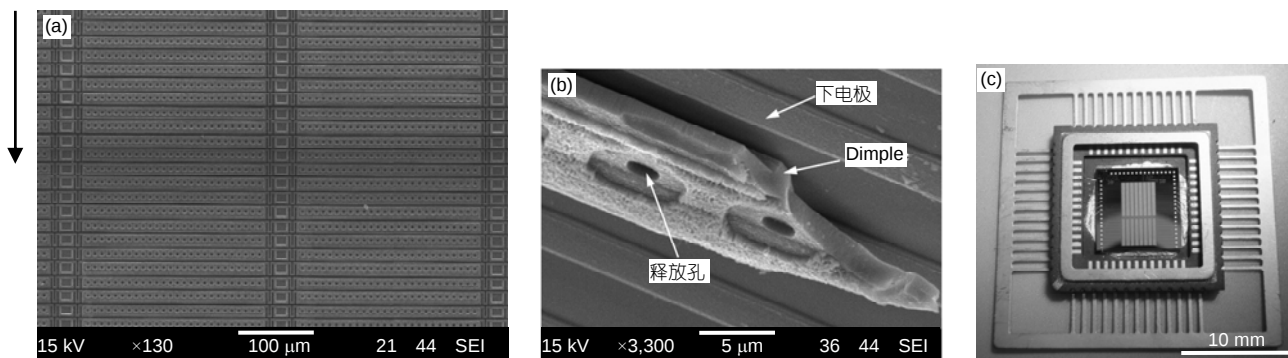


图3 制作的微型可编程闪耀光栅照片

(a) 部分光栅微梁的扫描电子显微镜照片; (b) 光栅微梁的局部放大图, 从中可以清楚地看到 dimple 结构与下电极; (c) 由透明玻璃窗口封装的光栅芯片

1.2 性能测试

为了测得制作的微型可编程闪耀光栅的闪耀角与驱动电压之间的关系, 需要借助激光多普勒测振仪(laser Doppler vibrometry, LDV, MLD-221D, 日本 Neoark 公司). 首先, 在任一光栅微梁的宽度方向上, 测量已知位置处两点的位移与驱动电压的对应关系; 随后, 利用这两点之间的几何位置偏差以及测得的位移差, 就可以计算出光栅微梁的闪耀角大小. 所有的测量在常温常压下进行, 图4给出了测试用实验装置系统的原理图. 然而受仪器限制, 目前的 LDV 测试系统只能提供最大 100 V 的交流驱动电压. 因此, 只有在该电压以下, 才能获得一系列连续的闪耀角数值. 而对于光栅的最大可工作闪耀角而言, 所需的驱动电压将超过 100 V, 此时项目中设计了一个简单的光学实验, 由高压直流电源来提供驱动电压(详见文献[13]).

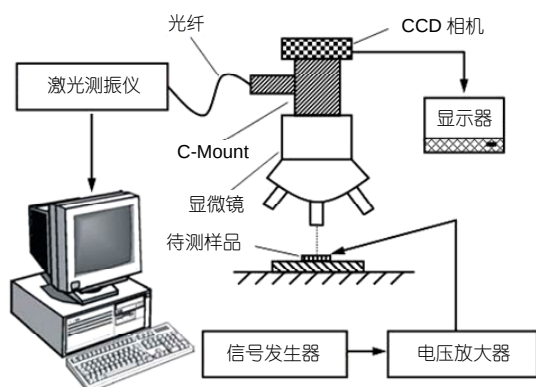


图4 用来测试微型可编程闪耀光栅的实验装置系统原理图

图5给出了由实验测得的闪耀角与驱动电压之间的对应关系, 相应曲线用方框/黑线表示. 可以看出, 制作的微型可编程闪耀光栅具有的最大可工作闪耀角约为 5.19° , 此时所需的驱动电压为 112 V. 同时, 图5还给出了闪耀波长与驱动电压之间的对应关系, 相应曲线用三角形/红线表示. 可以看出, 112 V 驱动电压作用下所对应的闪耀波长为中红外 $4.88 \mu\text{m}$. 这里提到的闪耀波长主要针对光栅在 Littrow 工作模式下的第一级衍射而言, 可以由(1)式计算得到

$$\lambda_{B(\text{Litt})} = 2 \sin \theta_B / N, \quad (1)$$

其中 λ_B , θ_B , N 分别表示闪耀波长、闪耀角以及 1 mm 长度范围内的光栅微梁总数(由设计可知, 制作的微型可编程闪耀光栅的周期为 $27 \mu\text{m}$, 因此, 1 mm 长度范围内的光栅微梁总数取 37).

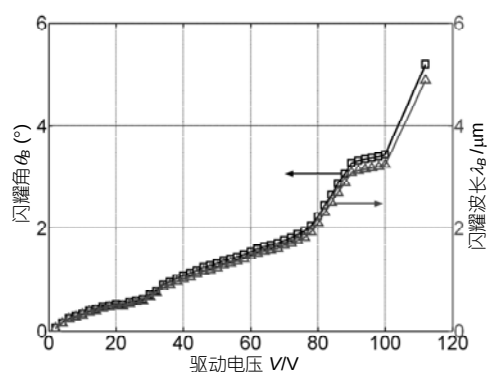


图5 不同驱动电压作用下的闪耀角及闪耀波长

对于驱动电压 $\leq 100 \text{ V}$ 的情形, 闪耀角是通过激光多普勒测振系统得到的, 而 112 V 驱动电压下的最大闪耀角由另外的光学实验测得, 具体可参见

文献[13]

2 多光谱成像

本项目研制的微型可编程闪耀光栅主要面向多光谱成像应用领域,其基本原理如图 6 所示.对于闪耀光栅而言,在闪耀波长处通常具有最大的衍射效率,该值一般情况下能超过 70%.闪耀光栅的这一特性使其对目标体所成像的颜色主要反映闪耀波长附近的颜色信息.对于传统的闪耀光栅,其闪耀角在光栅制作完成以后是不可变的,导致器件只具有单一的闪耀波长.然而,对于微型可编程闪耀光栅而言,其闪耀角能够通过驱动电压进行动态调制,因此其闪耀波长也是可调的,从而导致光栅的最大衍射效率在不同闪耀波长之间产生偏移,使目标体成像颜色发生变化.微型可编程闪耀光栅的这种独特工作方式使其在多光谱成像领域的应用成为可能,对于不同光谱段的调制只需要施加驱动电压即可以实现.

为了验证上述方法的可行性及有效性,采用研制的微型可编程闪耀光栅,设计并搭建了一个简单的多光谱成像实验装置,如图 7(a)所示.为了简化系统的调试、提高演示效果,主要针对可见光波段进行实验.多光谱成像的目标体是白光光纤光源,用彩色 CCD 相机记录光栅第一级衍射上的多光谱像.另外,对微型可编程闪耀光栅及其驱动与控制电路进行了模块化集成,如图 7(b)所示,从而使整个系统更加紧凑.

图 8 给出了由实验得到的不同驱动电压作用下目标体(白光光纤光源)的多光谱像.根据图 5,可以得到在 40 V 驱动电压下,光栅的闪耀波长约为 1.02 μm ,

已基本达到 CCD 相机的可探测波长极限.因此,图 8 中只有当驱动电压小于 40 V 时得到的多光谱像,其颜色才反映目标体的真实信息,从中可以看出:随着驱动电压的不断增大,目标体多光谱像的颜色从淡绿色逐渐变成深红色.然而,对于驱动电压为 0 V 和 5 V 的情形,实验观察到的结果与理论推导(图 5 中的闪耀波长)存在较大差异,这主要由光栅微梁之间的间隙引起.因为根据理论设计,忽略了该间隙的存在,从而认为光栅在没有驱动电压作用下完全为反射平面.而实际上,初始状态下的光栅微梁仍然构成一个反射式光栅.对于驱动电压大于 40 V 的情形,得到的目标体多光谱像的颜色被认为是虚假的,要获得全谱段的真实像需要借助宽波段响应(至少能到中远红外波长)的成像元件.

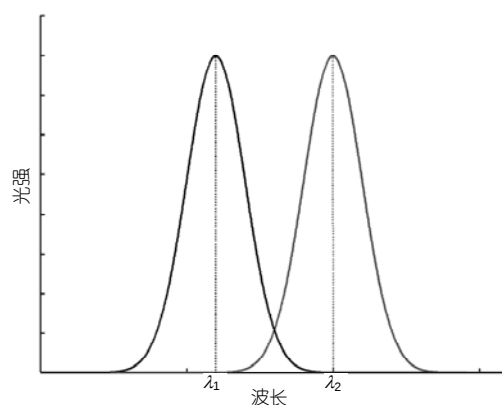


图 6 将微型可编程闪耀光栅用于多光谱成像的基本原理
驱动电压 V_1 和 V_2 对应的闪耀波长分别为 λ_1 和 λ_2 ($V_2 > V_1$)

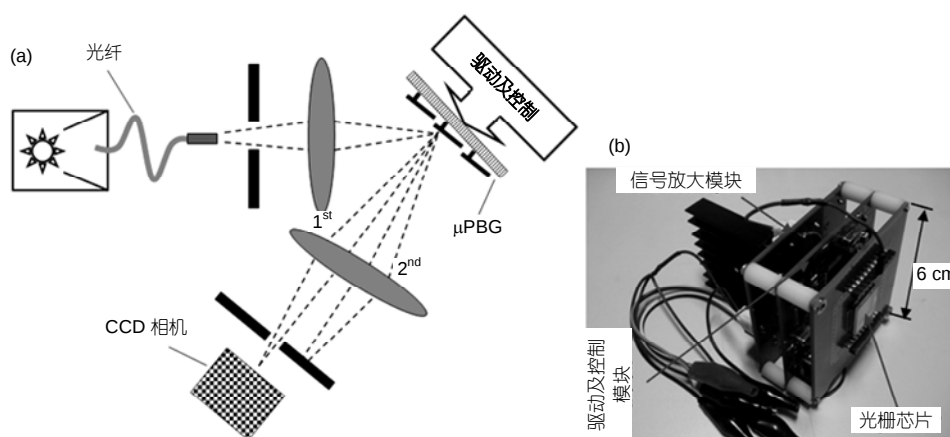


图 7 (a) 采用微型可编程闪耀光栅搭建的多光谱成像实验系统原理图(a)和集成化光栅模块(b)

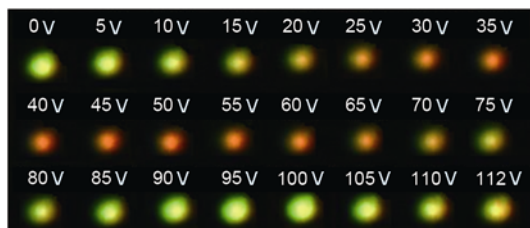


图8 多光谱成像实验结果

目标体为白光光纤光源,所成的像由彩色 CCD 相机记录光栅的第一级衍射得到

3 结论

研制了一种新型的微型可编程闪耀光栅。在其基础上,提出了一种多光谱成像方法。前期的实验结果证明了该方法的可行性及有效性。该方法具有以下优点:

(1) 所用的核心分光元件——微型可编程闪耀光栅在较宽波长范围内可实现光谱的连续可调,从而

极大简化多光谱成像系统。由实验可知,研制的微型可编程闪耀光栅能覆盖从可见光至中红外 $4.88\ \mu\text{m}$ 波长。同时,对光栅微梁结构的进一步优化设计,增加其最大可工作闪耀角,将使器件的工作波长延伸至远红外波段。

(2) 研制的微型可编程闪耀光栅甚至还能应用于高光谱成像领域,这主要取决于对光栅闪耀角更加精确的控制,而这又与光栅微梁的优化设计及器件的驱动和控制电路有极大关系。

(3) 使芯片级多光谱成像系统成为可能。在 MEMS 技术以及微电子技术的基础上,微型可编程闪耀光栅及其驱动与控制电路、关键的光学组件、成像元件等都能同时制作于一个基底上,从而使整个系统的体积和成本得到显著降低。

项目的后续研究将重点在于测定研制的微型可编程闪耀光栅各个衍射级的衍射效率,并测量获取的目标体多光谱像的实际光谱信息。

参考文献

- Geissler P E, Greenberg R, Hoppa G, et al. Evolution of lineaments on Europa: Clues from Galileo multispectral imaging observations. *Icarus*, 1998, 135: 107—126[doi]
- Colarusso P, Kidder L H, Levein I W, et al. Infrared spectroscopic imaging: From planetary to cellular systems. *Appl Spectrosc A*, 1998, 52: 106—120[doi]
- Romier J, Selves J, Gastellu-Etchegorry J. Imaging spectrometer based on an acousto-optic tunable filter. *Rev Sci Instrum*, 1998, 69: 2859—2867[doi]
- Zhang L, Small G W. Automated detection of chemical vapors by pattern recognition analysis of passive multispectral infrared remote sensing imaging data. *Appl Spectrosc*, 2002, 56: 1082—1093[doi]
- Hiraoka Y, Shimi T, Haraguchi T. Multispectral imaging fluorescence microscopy for living cells. *Cell Struct Funct*, 2002, 27: 367—374[doi]
- Levenson R M, Mansfield J R. Multispectral imaging in biology and medicine: Slices of life. *Cytom A*, 2006, 69: 748—758[doi]
- Shi T, DiMarzio C A. Multispectral method for skin imaging: development and validation. *Appl Opt*, 2007, 46: 8619—8626[doi]
- Rouse A R, Gmitro A F. Multispectral imaging with a confocal microendoscope. *Opt Lett*, 2000, 25: 1708—1710[doi]
- Lu R. Multispectral imaging for predicting firmness and soluble solids content of apple fruit. *Postharvest Biol Tec*, 2004, 31: 147—157[doi]
- Burns D M, Bright V M. Development of microelectromechanical variable blaze gratings. *Sensor Actuat A*, 1998, 64: 7—15[doi]
- Li X, Antoine C, Lee D, et al. Tunable blazed gratings. *J Microelectromech Syst*, 2006, 15: 597—604[doi]
- Mastrangelo C H. Suppression of stiction in MEMS. *Mat Res Soc Symp Proc*, 2000, 605: 105—116
- Yu Y T, Yuan W Z, Yan B, et al. Characterization of a new micro programmable blazed grating. In: *Proceeding of the 1st International Conference of the Chinese Society of Micro/Nano Technology (CSMNT)*, Nov.20-22, 2008, Beijing, China, Paper.38