

文章编号 1004-924X(2014)11-2945-05

## 微机电可调硅基三族氮化物光栅

李欣<sup>1\*</sup>, 施政<sup>1</sup>, 贺树敏<sup>1</sup>, 高绪敏<sup>1</sup>, 张苗<sup>2</sup>, 王永进<sup>1</sup>

(1. 南京邮电大学 格林贝格尔研究中心, 江苏 南京 210003;

2. 中国科学院 上海微系统与信息技术研究所 信息功能材料实验室, 上海 200050)

**摘要:**将静电梳齿微驱动器与三族氮化物光栅集成, 获得了利用静电梳齿微驱动器调节光栅周期的硅基三族氮化物光栅。首先, 以硅基三族氮化物基片为基础, 设计了微机电可调光栅, 光栅的设计周期为  $1.1 \mu\text{m}$ , 设计线宽为  $0.8 \mu\text{m}$ 。然后, 利用严格耦合波分析法研究了横向磁场模式下可调光栅的光学响应特性; 研究显示改变光栅周期和占空比, 光栅的谐振波峰出现了明显偏移。最后, 介绍了结合电子束光刻、三族氮化物干法刻蚀和深硅刻蚀技术制备微机电可调三族氮化物光栅的方法。严格耦合波分析和实验表明: 制备的微机电可调三族氮化物光栅具有良好的质量; 在静电驱动器上施加电压, 可将光栅的谐振波峰由  $1.345 \mu\text{m}$  调节至  $1.40 \mu\text{m}$ , 满足了利用微机电技术调节三族氮化物光栅光学响应特性的要求。

**关键词:**可调光栅; 氮化物光栅; 静电驱动器; 微机电系统

**中图分类号:** TN304.2; TN256 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142211.2945

## MEMS-tunable III-nitride grating on silicon substrate

LI Xin<sup>1\*</sup>, SHI Zheng<sup>1</sup>, HE Shu-min<sup>1</sup>, GAO Xu-min<sup>1</sup>, ZHANG Miao<sup>2</sup>, WANG Yong-jin<sup>1</sup>

(1. *Grüenberg Research Centre, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;*

2. *State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: lixin1984@njupt.edu.cn*

**Abstract:** By integrating an electrostatic comb drive actuator with a III-nitride grating, a Micro-electric-mechanic System (MEMS) tunable III-nitride grating was obtained on a silicon substrate to modulate the grating period. Firstly, the MEMS-tunable III-nitride grating was designed on the basis of the III-nitride-on-silicon substrate, in which the design values of grating period and the grating width are  $1.1 \mu\text{m}$  and  $0.8 \mu\text{m}$ , respectively. Then the Rigorous Coupled-wave Analysis (RCWA) method was used to analyze the optical responses of the III-nitride grating under transverse magnetic modes. It shows that the resonance peak of the III-nitride grating has a serious shift by changing the

收稿日期: 2013-11-01; 修订日期: 2013-12-27.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 11104147, No. 61322112); 南京邮电大学科研基金资助项目 (No. NY211001); 上海微系统与信息技术研究所开放课题资助项目 (No. BJ211026); 江苏省自然科学基金资助项目 (No. BK20130870)

grating period and duty cycle. Finally, the MEMS-tunable III-nitride grating was fabricated by combining an electron beam lithography, a III-nitride dry etching and a deep silicon etching. Experimental results and rigorous coupled-wave analysis indicate that the fabricated MEMS-tunable III-nitride grating has good quality and the shift of the resonant peaks is observed from  $1.345 \mu\text{m}$  to  $1.40 \mu\text{m}$  by applying a voltage on the electrostatic actuator. These results satisfy the requirement of modulating the optical responses of III-nitride gratings by using MEMS technology.

**Key words:** tunable grating; nitride grating; electro-static actuator; Micro-electrical-mechanical System(MEMS)

## 1 引言

作为第三代半导体材料的代表,三族氮化物材料的化学性质非常稳定,禁带宽度大,能在高温高压环境下工作,并且具有优良的光电特性和机械特性<sup>[1]</sup>。国际上已经开展了很多关于三族氮化物材料在表面发光光电子器件和可调光学器件方面的应用研究工作<sup>[2-4]</sup>。由于三族氮化物材料和空气之间有很高的折射率差异,在光垂直入射的情况下,三族氮化物光栅表现出良好的光学响应特性<sup>[5-6]</sup>,并且可以与微机电系统集成,获得周期可调的光栅器件。用于外延生长三族氮化物材料的衬底材料主要有蓝宝石衬底、碳化硅衬底和硅衬底。蓝宝石衬底和碳化硅衬底虽然比硅衬底的成本高,但是由于它们与三族氮化物材料晶格适配度低,因此被广泛应用于商业化的三族氮化物的外延生长。然而蓝宝石衬底和碳化硅衬底难以加工,因此很难在生长于蓝宝石衬底和碳化硅衬底的三族氮化物材料上制得微机电结构<sup>[1]</sup>。

近年来,在硅衬底上制备高质量三族氮化物材料的技术已取得突破性进展<sup>[7-8]</sup>。使用 AlGa<sub>x</sub>N 和 AlN 作为缓冲层,可以有效减少在硅衬底上制备的三族氮化物材料的缺陷。由于硅微加工技术已经发展得非常成熟,因此,人们开始尝试利用硅基微加工技术和三族氮化物刻蚀技术制备集成微机电系统的三族氮化物光栅<sup>[9-10]</sup>。将质量好且具有良好光学特性的三族氮化物材料生长技术与低成本、高效率的硅微加工技术结合,可以开发许多新型高性能的光电子器件。

本文基于商用硅衬底的微机电可调三族氮化物光栅的制造方法,使用静电梳齿微驱动器调节光栅的周期和占空比,电子束光刻技术和三族氮化物干法刻蚀技术制备静电微驱动器和光栅的图形结构。然后,采用深硅刻蚀技术刻蚀掉三族氮

化物静电微驱动器和光栅结构下方的硅材料,将器件释放在空气中,使它进行工作。最后,利用严格耦合波分析方法研究了横向磁场模式下可调光栅的光学响应特性,发现在改变光栅周期和占空比的情况下,光栅的谐振波峰出现了明显的偏移。

## 2 微机电可调光栅结构设计

本文中,用于制备微机电可调的硅基三族氮化物光栅采购于德国 AZZURRO Semiconductors 公司。该基片包括 200 nm 厚的 GaN 层、450 nm 厚的 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N 层(Al 的摩尔分数在 0.2~0.7)和 200 nm 厚的 AlN 缓冲层和 200  $\mu\text{m}$  厚的硅衬底。首先在 GaN 顶层上沉积一层 200 nm 厚的 HfO<sub>2</sub> 膜作为硬质掩模。图 1 为本文设计的微机电可调三族氮化物光栅的示意图。静电微驱动器和光栅都制备在三族氮化物层上,并悬空在空气中。由于器件结构是自由悬空的,并且硅衬底具有很高的电阻率,故可通过施加外电压来驱动静电梳齿微驱动器,进而改变三族氮化物光栅的周期和占空比,并最终改变光栅的光学响应特性。

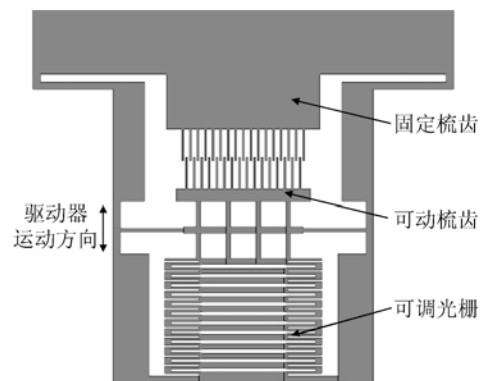


图 1 微机电可调三族氮化物光栅示意图

Fig. 1 Schematic diagram of MEMS-tunable III-nitride grating

三族氮化物光栅的光栅线数为 17, 每条光栅线的长度为  $14\ \mu\text{m}$ , 宽度为  $0.8\ \mu\text{m}$ , 相邻光栅线间距为  $0.3\ \mu\text{m}$ , 因此光栅的设计周期为  $1.1\ \mu\text{m}$ 。光栅线之间由光栅线末端的弹簧连接, 弹簧长度为  $5.5\ \mu\text{m}$ , 宽度为  $0.9\ \mu\text{m}$ 。可调光栅的一端固定, 另一端连接至静电微驱动器。静电微驱动器包括一个固定的梳齿和一个连接至可调光栅的可动梳齿。可动梳齿是自由悬空的, 由两个一端固定的弹簧连接并支撑。静电梳齿驱动器的梳齿长  $2.9\ \mu\text{m}$ , 宽  $0.3\ \mu\text{m}$ 。梳齿的周期为  $0.9\ \mu\text{m}$ , 共有 16 组梳齿。

图 2 为微机电可调三族氮化物光栅的横截面示意图。图中硅衬底被刻蚀掉, 以释放可调光栅, 使光栅自由悬空。光栅的厚度 ( $h$ ) 为  $1.05\ \mu\text{m}$ , 为  $\text{HfO}_2$  层和三族氮化物层的厚度之和。波长在近红外波段的光从垂直方向射入光栅表面。 $\text{HfO}_2$  的折射率为 1.8,  $\text{GaN}$  的折射率为 2.31,  $\text{AlN}$  的折射率为 2.12。可调光栅的周期和宽度在图 2 中分别为  $P$  和  $W$ 。占空比 ( $D$ ) 为:

$$D = \frac{W}{P} = \frac{0.8\ \mu\text{m}}{1.1\ \mu\text{m}} = 0.73. \quad (1)$$

如式(1)所示, 占空比的设计值为 0.73。

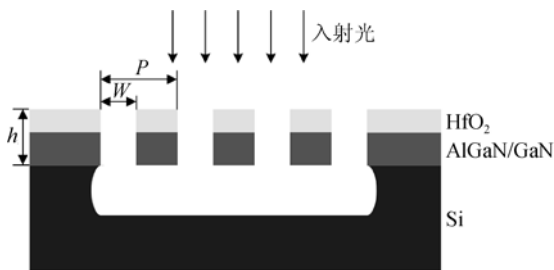
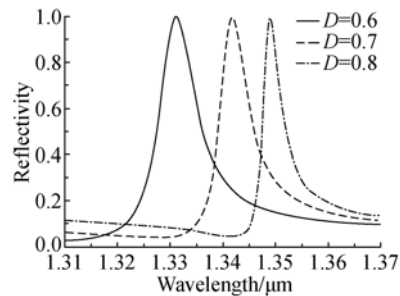


图 2 微机电可调三族氮化物光栅的横截面示意图  
Fig. 2 Cross-section of MEMS-tunable III-nitride grating

### 3 微机电可调光栅谐振波峰仿真分析

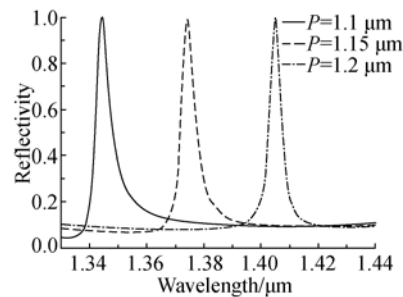
本文使用严格耦合波分析法 (Rigidrous Coupled Wave Analysis, RCWA) 进行仿真分析, 研究了可调光栅的光学响应特性。RCWA 利用矩阵形式化法分析得出平面光栅的反射谱、透射谱和衍射谱。本文中的仿真结果基于横向磁场模式 (入射光的磁场分量始终垂直于入射光的传播方向)。图 3(a) 为数值仿真分析获得的可调光栅在不同占空比下的反射谱。设定光栅周期为  $1.1\ \mu\text{m}$ 。当光栅的占空比由 0.6 增加至 0.8 时, 光栅的谐振波峰由  $1.33\ \mu\text{m}$  偏移至  $1.35\ \mu\text{m}$ 。当

占空比为 0.6, 0.7, 0.8 时, 对应的品质因数  $Q$  分别为 151.3, 197.3, 306.6。图 3(b) 为数值仿真分析获得的可调光栅在不同周期下的反射谱。当光栅周期由  $1.1\ \mu\text{m}$  增加至  $1.2\ \mu\text{m}$  时, 光栅的谐振波峰由  $1.345\ \mu\text{m}$  偏移至  $1.405\ \mu\text{m}$ 。图 3(c) 为数值仿真分析获得的静电梳齿微驱动器驱动下可调光栅的反射谱。光栅线宽的设计值为  $0.8\ \mu\text{m}$ 。当静电梳齿微驱动器在外电压驱动下开始工作时, 可调光栅的周期会增加。由仿真分析可知, 在此情况下光栅的谐振波峰由  $1.345\ \mu\text{m}$  偏移至  $1.40\ \mu\text{m}$ 。当周期为  $1.1, 1.15, 1.2\ \mu\text{m}$  时, 对应的品质因数  $Q$  分别为 220.4, 249.8, 255.4。



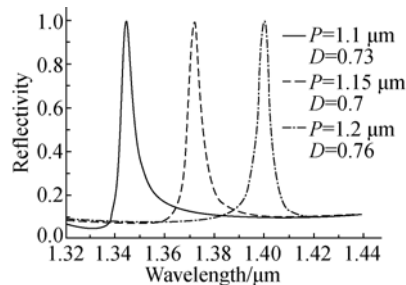
(a) 可调光栅在不同占空比下的反射谱

(a) Reflect spectra with different duty cycles



(b) 可调光栅在不同周期下的反射谱

(b) Reflect spectra with different periods



(c) 可调光栅在驱动器驱动下的反射谱

(c) Reflect spectra of grating under driving

图 3 使用严格耦合波法分析获得的微机电三族氮化物可调光栅的反射谱

Fig. 3 Reflect spectra of MEMS-tunable III-nitride grating by RCMA

#### 4 微机电可调光栅制备

图 4 为微机电可调三族氮化物光栅的制备流程。首先使用电子束蒸发技术在三族氮化物层的表面蒸镀一层 200 nm 厚的  $\text{HfO}_2$  薄膜作为硬质掩模,并在  $800\text{ }^\circ\text{C}$  下退火,使  $\text{HfO}_2$  薄膜结晶。然后在  $\text{HfO}_2$  薄膜表面旋涂一层 300 nm 厚的正性电子束光刻胶 PMMA(聚甲基丙烯酸甲酯)。使用电子束光刻设备(JBX-5500ZA)在 PMMA 表面制备静电梳齿驱动器和可调光栅的图形结构,再使用离子束刻蚀设备(IBE-A-150)刻蚀  $\text{HfO}_2$  薄膜,将静电梳齿驱动器和可调光栅的图形结构转移至  $\text{HfO}_2$  薄膜上。由于  $\text{HfO}_2$  薄膜的化学特性稳定、硬度高,难以采用化学反应刻蚀法进行加工,因此本课题组采用北京创世威纳科技有限公司生产的离子束刻蚀设备 IBE-A-150 来进行刻蚀加工。离子束刻蚀是一种使用 Ar 离子加速的物理刻蚀技术,用于刻蚀难以进行化学反应刻蚀的高稳定性、高硬度材料。刻蚀参数如下:离子能量为 350 eV,离子速流为 100 mA,中和电流为 120 mA,刻蚀时间为 6 min。离子束刻蚀设备 IBE-A-150 对  $\text{HfO}_2$  的刻蚀速度约为 35 nm/min,6 min 即可刻穿厚度为 200 nm 的  $\text{HfO}_2$  层。以  $\text{HfO}_2$  薄膜为硬质掩模,使用感应耦合等离子体刻蚀设备(ICP180),用  $\text{BCl}_3$  气体将三族氮化物层完全刻蚀穿透,在三族氮化物层上制备静电梳齿驱动器和可调光栅。最后结合使用各向同性深硅干法刻蚀技术和各向异性深硅干法刻蚀技术,刻蚀静电梳齿驱动器和可调光栅下方的硅衬底材料,将微机电可调三族氮化物光栅释放至空气中。

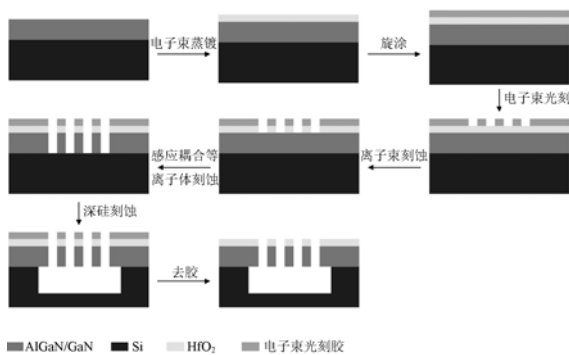
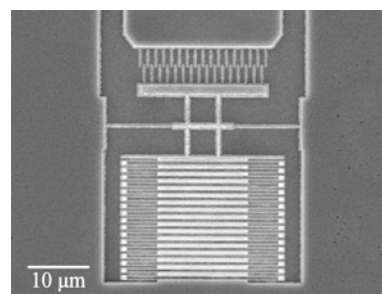


图 4 微机电可调三族氮化物光栅制备流程图

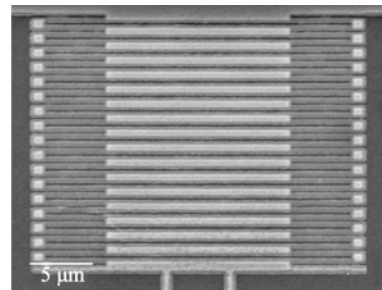
Fig. 4 Fabrication process of MEMS-tunable III-nitride grating

图 5(a)为制得的微机电可调三族氮化物光栅的扫描电子显微镜图片。由图可见,本文制得了没有缺陷、质量良好的集成静电梳齿微驱动器的可调光栅。图 5(b)为光栅的局部放大图片,图中光栅的周期和线宽分别为  $1.1\text{ }\mu\text{m}$  和  $0.8\text{ }\mu\text{m}$ ,均与设计值一致。图 5(c)为静电梳齿驱动器中梳齿的局部放大图片,图中梳齿的末端为圆弧形,与设计图中的方形梳齿末端不完全一致。这是由于使用等离子束刻蚀技术刻蚀  $\text{HfO}_2$  薄膜时,刻蚀时间略长,产生过刻蚀造成的。



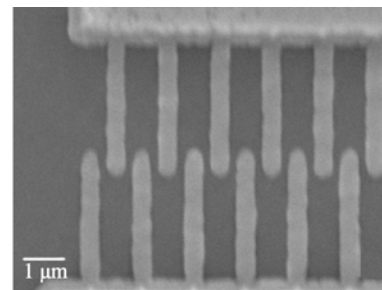
(a) 器件整体图

(a) Overall view



(b) 光栅局部放大图

(b) Local enlargement of grating



(c) 静电驱动器梳齿局部放大图

(c) Local enlargement of electro-static actuator

图 5 微机电可调三族氮化物光栅扫描电子显微镜图片

Fig. 5 Scanning Electron Microscopy(SEM) images of MEMS-tunable III-nitride grating

## 5 结 论

本文将静电梳齿微驱动器与三族氮化物光栅集成制成了微机电可调硅基三族氮化物光栅,使用 RCWA 法,通过数值仿真分析,研究了可调光栅的光学响应特性。然后结合电子束光刻、三族

氮化物干法刻蚀和深硅刻蚀技术制备了质量良好的微机电可调三族氮化物光栅。RCWA 分析和实验表明,制备的微机电可调三族氮化物光栅的质量良好,在静电驱动器上施加电压可将光栅的谐振波峰由  $1.345 \mu\text{m}$  调节至  $1.40 \mu\text{m}$ ,能够满足利用微机电技术调节三族氮化物光栅光学响应特性的要求。

### 参考文献:

- [1] CIMALLA V, PEZOLDT J, AMBACHER O. Group III nitride and SiC based MEMS and NEMS: materials properties, technology and applications [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2007, 40(20): 6386-6434.
- [2] NAKAMURA S, FASOL G. *The Blue Laser Diode* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1997.
- [3] CHUNG I S, MØRK J. Silicon-photonics light source realized by III-V/Si-grating-mirror laser [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(15): 151113-151113-3.
- [4] HUANG M C Y, ZHOU Y, CHANG-HASNAIN C J. A surface-emitting laser incorporating a high-index-contrast subwavelength grating [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(2): 119-122.
- [5] WANG Y, KANAMORI Y, YE J, *et al.*. Fabrication and characterization of nanoscale resonant gratings on thin silicon membrane [J]. *Optics Express*, 2009, 17(7): 4938-4943.
- [6] ROSENBLATT D, SHARON A, FRIESEM A A. Resonant grating waveguide structures [J]. *Quantum Electronics*, *IEEE Journal of*, 1997, 33(11): 2038-2059.
- [7] EGAWA T, MOKU T, ISHIKAWA H, *et al.*. Improved characteristics of blue and green InGaN-based light-emitting diodes on Si grown by metalorganic chemical vapor deposition [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2002, 41: 663-665.
- [8] EGAWA T, NAKADA N, ISHIKAWA H, *et al.*. GaN MESFETs on (111) Si substrate grown by MOCVD [J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(21), 1816-1818.
- [9] WANG Y, WU T, TANAE T, *et al.*. The resonant III-nitride grating reflector [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2011, 21(10): 105025.
- [10] SAMESHIMA H, TANAE T, HANE K. A GaN electromechanical tunable grating on Si substrate [J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2011, 23(5): 281-283.
- [11] MOHARAM M G, GAYLORD T K. Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction [J]. *JOSA*, 1981, 71(7): 811-818.

### 作者简介:



李 欣(1984—),女,山东青岛人,讲师,2006年于长安大学获得学士学位,2013年于西安交通大学获得博士学位,主要从事光电微器件和微纳制造技术的研究。E-mail: lixin1984@njupt.edu.cn



施 政(1987—),男,江苏如东人,博士研究生,2010年于南京邮电大学获得学士学位,主要从事微纳光电器件的设计和制造的研究。E-mail: shizheng\_1214@139.com