

文章编号 1004-924X(2017)12-3020-07

## 面向可见光波段的非周期悬空 GaN 薄膜光栅

王永进\*, 张锋华, 高绪敏, 施政

(南京邮电大学 Peter Grünberg 研究中心, 江苏 南京 210003)

**摘要:** 基于严格耦合波理论, 提出了一种在可见光波段能调控入射光相位的非周期悬空氮化镓(GaN)薄膜光栅。首先, 采用有限差分时段(FDTD)方法, 通过改变光栅的周期、占空比等参数仿真计算非周期悬空 GaN 薄膜光栅的光响应。然后, 采用双面加工工艺和氮化物背后减薄技术在硅基 GaN 晶圆上制备非周期悬空 GaN 薄膜光栅, 控制入射光束的相移。最后, 通过角分辨微反射谱实验和光致发光测量实验表征了该薄膜光栅的光学性能。角分辨微反射谱实验结果显示非周期悬空 GaN 薄膜光栅的光学性能与 FDTD 的理论分析一致; 光致发光测量实验显示其光致发光(PL)强度比硅衬底 GaN 光栅大大增强, 峰值从 364.3 nm 转移到 378.7 nm。另外, 在可见光波段内, 该悬空非周期 GaN 光栅有较大的入射角容忍度, 为 $-25^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 。得到的结果表明, 研制的悬空非周期 GaN 光栅有助于提高光提取效率。

**关键词:** 非周期 GaN 光栅; 薄膜光栅; 悬空薄膜; 角分辨微反射谱; 光致发光谱

**中图分类号:** TN303; TN304.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172512.3020

## Freestanding non-periodic GaN gratings in visible wavelength region

WANG Yong-jin\*, ZHANG Feng-hua, GAO Xu-min, SHI Zheng

(Peter Grünberg Research Centre, Nanjing University of Posts and  
Telecommunications, Nanjing 210003, China)

\* Corresponding author, E-mail: wangyj@njut.edu.cn

**Abstract:** On the basis of Rigorous Coupled Wave Analysis(RCWA), an array of freestanding non-periodic GaN gratings were proposed to control the phase of an incident beam in the visible wavelength region. Firstly, the Finite Difference Time Domain(FDTD) method was used to calculate the optical responses of non-periodic GaN gratings based on the parameters such as period and duty cycle. Then, a double-sided process and nitride back thinning technology were developed to fabricate freestanding non-periodic GaN gratings on a GaN-on-silicon platform to control the different phase shifts of incident light. Finally, the optical performance of non-periodic GaN gratings was experimentally demonstrated by angular resolved micro-reflectance spectra and photoluminescence spectra. The angular resolved micro-reflectance spectra show that the optical performance of the freestanding non-periodic GaN gratings is in good agreement with that of the theoretical simulations by the FDTD method. The photoluminescence spectra indicate that photoluminescence (PL) intensities of the GaN gratings are greatly improved as compared to that of the GaN-on-silicon, and their emission peaks are from 364.3nm to 378.7nm. Moreover, experimental results give that the incident angular tolerance of the GaN

收稿日期: 2017-05-23; 修订日期: 2017-06-26.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61322112, No. 61531166004); 国家重点研究发展计划资助项目(No. 2016YFE0118400); 南京邮电大学科研基金资助项目(No. KYZZ16-0256)

gratings is  $-25^{\circ}-25^{\circ}$  in the visible wavelength region. In conclusion, the gratings are helpful for the improvement of the light extraction efficiency.

**Key words:** non-periodic GaN gratings; membrane grating; freestanding membrane; angular resolved micro-reflectance; photoluminescence

## 1 引 言

当入射光和波导模式之间的相位匹配时,会发生导模共振(Guided-Mode Resonance, GMR)<sup>[1]</sup>。通过改变光栅结构的物理参数(波长、入射角、周期性介质层的厚度等)能够显著调节波传播的衍射效率。导模共振通常与包含周期性亚波长图案的介电薄膜结构有关,因此了解 GMR 光栅的光谱特性对光栅器件的设计和 optimization 非常重要,其光谱特征与入射角和偏振模式两个因素有关。

目前,基于导模共振效应的光学器件已得到了广泛的研究和应用,比如垂直腔表面发射激光器、可调滤波器<sup>[2]</sup>、光开关<sup>[3]</sup>和高灵敏度传感器等<sup>[4-6]</sup>。随着先进微纳加工技术的发展,具有非周期性结构的谐振光子器件被提出<sup>[7]</sup>,并且聚焦效果显著。Fattal 等人研究出一种非周期性平面介质结构的一维透射聚焦光栅<sup>[8]</sup>。这种结构通过光栅占空比的空间调制将光聚焦成圆柱形或球面镜。丹麦科技大学 Carletti 等人使用位于两个不同周期高折射率对比度光栅之间的非周期性高折射率对比光栅(HCG)获得了 $\sim 6^{\circ}$ 的光束偏转<sup>[9]</sup>。德州大学阿灵顿分校陆明宇教授等人已经证实抛物面共振反射器具有聚焦能力<sup>[10]</sup>。在智能集成光学系统的发展中,这些简单的光学元件有望取代传统的大容量光学器件。

氮化镓(GaN)禁带宽度大,是制备可见光波段光电器件的优良半导体材料。有关 GaN 基共振光子器件制备和应用的研究已有很多<sup>[11-16]</sup>。在此之前,本课题组结合硅制造工艺<sup>[17]</sup>已经在硅基 GaN 晶元上实现了 GaN 基导模共振光栅。本文基于严格耦合波理论(Rigorous Coupled-Wave Analysis, RCWA)对比不同周期的光栅条,提出了一种面向可见光波段的非周期悬空 GaN 薄膜光栅。该光栅利用空气作为上下层的低折射率材料,由于空气和 GaN 具有较大的折射率差异, GaN 谐振光子器件可以有效控制入射光束的相

位,同时对环境介质折射率具有高度灵敏性。然后通过 Rsoft 软件对该非周期悬空 GaN 光栅进行设计和优化,采用时域有限差分(Finite Difference Time Domain, FDTD)方法计算非周期 GaN 光栅的光响应。最后通过角分辨微反射率和光致发光实验对该非周期性悬空 GaN 光栅进行表征。同时,本文还提出了一种先进的双面加工工艺和氮化物背后减薄技术。

## 2 设计与仿真

本文提出了一种非周期悬空 GaN 薄膜光栅来实现对可见光波段内入射光束相位的控制。通过改变光栅的周期或占空比(定义为光栅宽度与光栅周期的比值)可以改变反射光和透射光的相位。光栅尺寸不同会产生不同的相移,因此通过改变光栅参数可以获得任何相移<sup>[8-9]</sup>。GaN 和空气之间的折射率对比度较大,从而会对光场产生限制作用。非周期悬空 GaN 薄膜光栅作为光学谐振器,能产生取决于入射光波长的相移。这些光学谐振器的阵列可以产生不同的相移以控制入射光的波阵面。

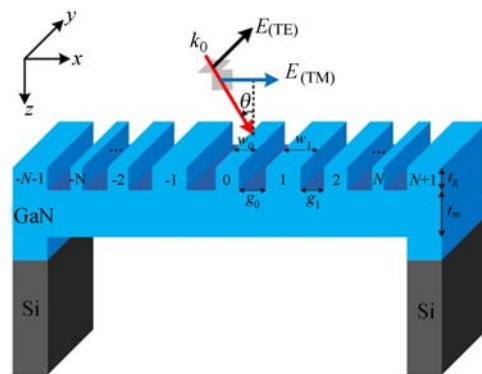


图 1 非周期悬空 GaN 薄膜光栅示意图

Fig. 1 Schematic view of freestanding non-periodic GaN gratings

图 1 所示是非周期悬空 GaN 薄膜光栅的示意图,由具有不同宽度的光栅条组成。主要结构参数包括光栅宽度  $w$ ,空气间隔  $g$ ,光栅高度  $t_g$  和

膜厚  $t_m$ 。光栅条编号为 0, 1, 2 等, 其中 0 表示中间的光栅条。该非周期悬空 GaN 薄膜光栅的相位分布满足抛物线型, 如下式:

$$\Psi(x) = k_0(x^2/2f_x) \quad (1)$$

其中:  $k_0 = 2\pi/\lambda_c$ ,  $f_x$  是等效焦距。改变光栅条的结构参数, 使它产生  $0 \sim 2\pi$  的突变相移, 从而改变由光栅反射光和透射光的相位。光栅条的具体结构参数如表 1 所示。

表 1 光栅条参数

Tab. 1 Parameters of grating bar

(nm)

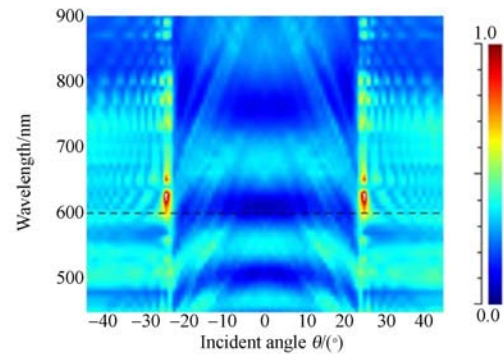
	0 <sup>th</sup>	1 <sup>th</sup>	2 <sup>h</sup>	3 <sup>th</sup>	4 <sup>th</sup>	5 <sup>th</sup>	6 <sup>th</sup>	7 <sup>th</sup>	8 <sup>th</sup>	9 <sup>th</sup>	10 <sup>th</sup>	11 <sup>th</sup>	12 <sup>th</sup>	13 <sup>th</sup>	14 <sup>th</sup>	15 <sup>th</sup>	16 <sup>th</sup>
$w$	680	660	620	580	500	460	380	260	540	350	690	520	420	590	530	630	550
$g$	410	400	380	350	300	280	230	370	320	220	420	320	260	360	320	370	

非周期悬空 GaN 薄膜光栅具有对称结构, 这意味着第  $n$  个光栅条与第  $n$  个光栅条 ( $n=1, 2$  等) 的属性相同。由于光栅是线型结构, 其光学性能对入射光偏振敏感。光垂直表面入射时, TM 偏振表示偏振光在光栅平面内, 电场  $E$  垂直于光栅线; 而对于 TE 偏振, 电场  $E$  平行于光栅线。

非周期悬空 GaN 薄膜光栅作为相位控制谐振器能调控入射光束。入射光经过非周期悬空 GaN 薄膜光栅发生衍射并激发导波模式。在 GaN 薄膜中传播的光与 GaN 光栅相互作用产生光学谐振。基于 FDTD 法分析 GaN 光栅的反射光谱。为了简单起见, 本文将 GaN 的折射率设定为常数 (2.45), 光栅高度  $t_g$  为 130 nm, 膜厚  $t_m$  为 500 nm。图 2(a) 为 TM 偏振下角分辨反射谱的模拟结果 (彩图见期刊电子版)。图中蓝色区域对应低反射率区域, 红色区域对应高反射率区域。入射光在顶部和底部 GaN 和空气交界处发生多次反射, 产生干涉条纹, 光学谐振叠加在干涉条纹上。从图中可以看出, 反射光谱对入射角敏感, 并且相对于入射角存在两个不同的光学响应区域。图 2(b) 所示为入射波长  $\lambda$  为 600 nm 时不同入射角的反射光谱, 对应于图 2(a) 中黑色虚线区域。当入射角超过临界角 ( $\pm 25^\circ$ ) 时, 反射率响应会发生突变。在临界角以外的区域, 反射率响应相对平稳, 能抑制由于非垂直入射而引起的光谱分裂。研究表明: 基于双周期结构<sup>[18]</sup>、T 形亚波长光栅<sup>[19-20]</sup> 和附加层叠<sup>[21]</sup>, 可以实现具有大角度容忍度的导模共振器件。本文结果表明, 非周期性光栅同样可以实现较大角度容忍度的谐振光子器件。

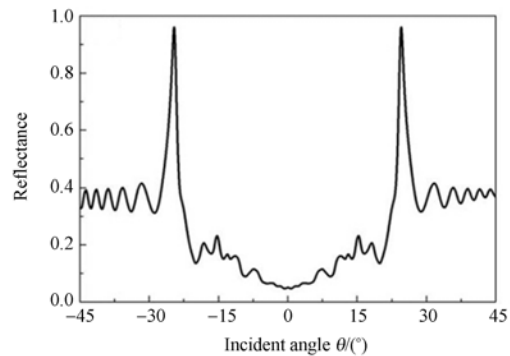
图 2(c) 所示为 TE 偏振下入射光的角分辨反射谱。由于线性光栅结构的反射率响应对偏振敏

感, 这种非周期性光栅可用于具有大角度容忍度的光学谐振器件。在可见光波段, 由于 GaN 和空气之间的折射率对比度较大, 厚 GaN 膜可以支持许多受限制的光学模式。光学谐振依赖于薄膜厚度, 如图 2(d) 所示, 在 TM 偏振光垂直入射时, 随



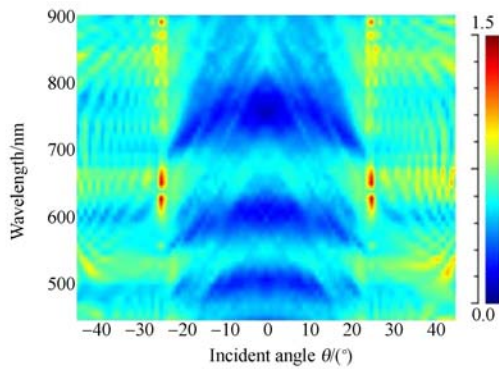
(a) TM 偏振时非周期悬空 GaN 薄膜光栅的角分辨反射谱

(a) Angular-resolved reflectance contour-plot of free-standing non-periodic GaN gratings under TM mode



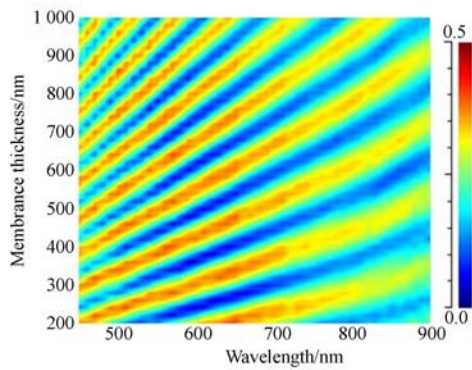
(b) TM 偏振波长 600 nm 时, 光垂直入射的反射谱

(b) Reflectance spectra versus incident angle under TM mode at wavelength of 600 nm



(c) TE 偏振时非周期悬空 GaN 薄膜光栅的角分辨反射谱

(c) Angular-resolved reflectance contour-plot of free-standing non-periodic GaN gratings under TE mode



(d) TM 偏振光垂直入射时,不同薄膜厚度的反射谱

(d) Reflectance spectra versus membrane thickness under surface-normal TM-polarized incident

图 2 仿真结果

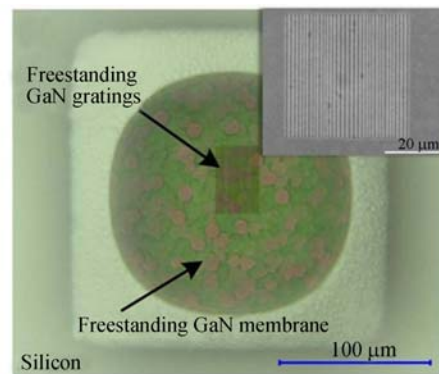
Fig. 2 Simulation results

着薄膜厚度的减小,谐振模式和干涉条纹的数量也减少。采用氮化物背后减薄技术可以控制 GaN 薄膜厚度,从而调整光学谐振,有效克服了可见光波段内高质量光学谐振器的膜厚问题。

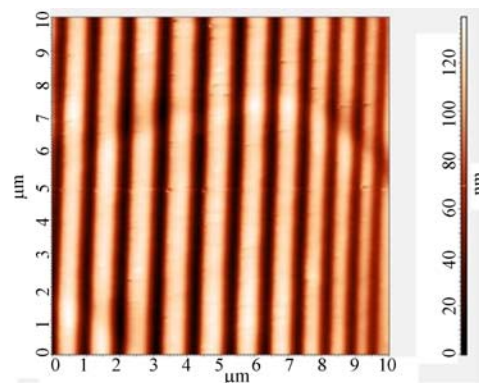
### 3 结果和分析

本文研发了一种双面加工工艺,结合氮化物背后减薄技术来制备非周期悬空 GaN 薄膜光栅<sup>[22-23]</sup>。在硅衬底 GaN 晶元上,首先通过电子束光刻定义纳米级光栅结构,并通过离子束刻蚀转移至 GaN 层。然后通过背后深硅刻蚀技术剥离去除光栅区域下面的硅衬底。最后通过氮化物背后减薄技术控制薄膜厚度,得到悬空 GaN 薄膜光

栅。通过氮化物背后减薄技术改变薄膜厚度来调整光学响应是一种可行的方法。图 3(a)所示为从背面观察到的非周期悬空 GaN 薄膜光栅的光学显微图像,其中薄膜直径为 160 μm。图 3(a)中的插图是所制备的非周期性光栅的扫描电子显微镜(SEM)图像。光栅阵列由 33 个不同周期的光栅条构成,每个光栅条的结构参数如表 1 所示,光栅长 45 μm。图 3(b)所示为非周期性悬空 GaN 薄膜光栅的原子力显微镜(AFM)图,测得光栅高度  $t_g$  约为 130 nm。



(a)



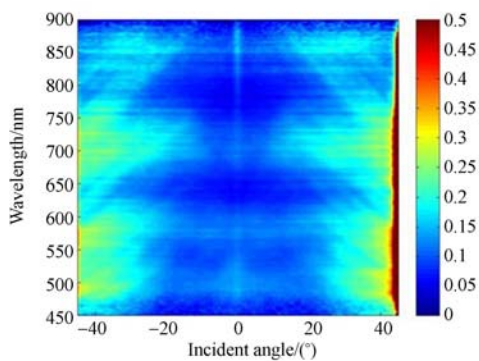
(b)

图 3 (a)非周期悬空 GaN 薄膜光栅背后的光学显微图,插图为光栅区的 SEM 图;(b)光栅 AFM 图

Fig. 3 (a) Optical microscope image of fabricated non-periodic GaN membrane gratings observed from backside, inset is SEM image of grating region; (b) AFM image of fabricated grating

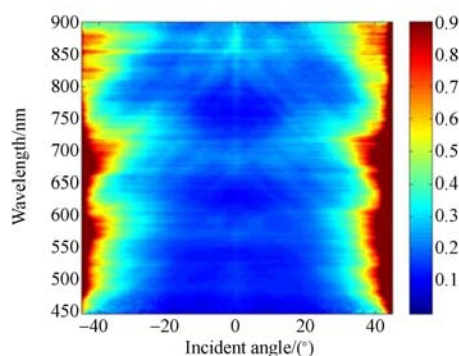
本文通过角分辨微反射谱实验表征非周期悬空 GaN 薄膜光栅的光学性能<sup>[24]</sup>。将白光光源(Bentham WLS 100)准直并聚焦在光栅上,光斑直径为 10 μm,然后使用分束器拾取反射光束,银

镜用于获取参考数据。图 4(a) 和 4(b) 分别为 TM 和 TE 偏振下, 非周期性悬空 GaN 薄膜光栅的反射谱图, 其反射率与入射光的波长和入射角有关。由于波长和入射角不同, 谐振模式也不同。由于非周期性设计, 所制备的 GaN 光栅具有较大的入射角容忍度, 从图中可以看到两个不同的反射区域。当入射角在  $-25^{\circ} \sim 25^{\circ}$  时, 光栅的反射率较低, 同时可以看到比较清晰的反射干涉条纹; 但是随着入射角的增加, 反射率响应会产生突变。实验结果与 FDTD 法分析的理论预期基本一致, 但仍存在差异。造成差异的原因主要有两点: 一是加工工艺的局限, 虽然光栅制备时参数和仿真是一致的, 但仿真时光栅是规则的长方体结构并且表面是光滑的, 实际加工时光栅并不是垂直往下刻蚀, 而是呈梯形结构, 并且表面粗糙, 导致光栅条的实际参数与仿真也存在差异, 因此对实验结果产生较大影响; 二是测试设备和一些人为因素的影响, 会使实验结果产生误差。



(a) TM 偏振

(a) Under TM mode



(b) TE 偏振

(b) Under TE mode

图 4 非周期 GaN 光栅的角分辨反射谱

Fig. 4 Measured angular-resolved reflectance contours of fabricated non-periodic GaN gratings

光致发光(Photoluminescence, PL)指的是半导体材料在受到光激励以后, 由本征吸收产生大量的额外电子-空穴对, 使样品处于非平衡状态。额外载流子对在复合过程中会发射光子, 实现发光, 因此会产生发射峰。采用微型 PL 系统在室温条件下表征所制备的非周期悬空 GaN 薄膜光栅的 PL 光谱, 如图 5 所示。其中激发源是波长为 325 nm 的 He-Cd 激光源。从图中可以看出, 对于具有硅衬底的 GaN, 其发射峰峰值约为 364.3 nm。在去除硅衬底和 GaN 薄膜减薄之后, 悬空 GaN 薄膜的发射峰移动到 377.3 nm, 这是由于在剥离硅衬底和 GaN 背后减薄之后, 应力的释放使 GaN 薄膜发生形变, 改变了光的传播路径, 使发射峰产生红移。此外, 由缺陷激发引起的较长波长的 PL 强度也得到提高, 提高了光效率。其原因主要在于剥离硅衬底消除了硅对光的吸收, 同时减小 GaN 薄膜厚度能减少 GaN 膜中的光损耗。随着非周期性 GaN 光栅的引入, 界面态发生变化。随着 PL 强度的进一步增强, 悬空 GaN 光栅对光的调制作用使发射峰值转移到 378.7 nm。图 5 的插图显示了从悬空非周期 GaN 薄膜光栅获得的光斑的光学图像。实验结果表明, 非周期悬空 GaN 薄膜光栅可以采用背后深硅刻蚀和氮化物背后减薄技术来提高 GaN 基表面发射器件的光效率。

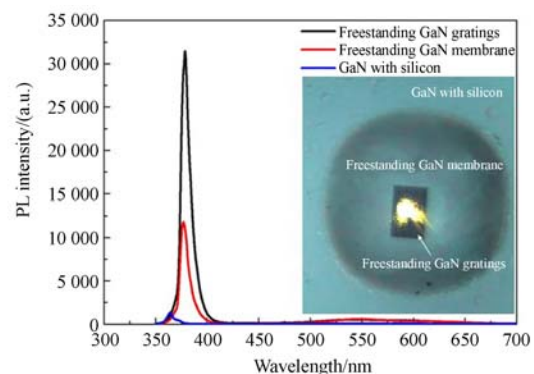


图 5 非周期悬空 GaN 光栅光致发光光谱, 插图为从悬空 GaN 薄膜光栅获得的光斑图像

Fig. 5 Photoluminescence (PL) spectra of fabricated GaN gratings, inset is optical image of light spot obtained from freestanding GaN gratings

## 4 结 论

本文利用双面加工工艺和氮化物背后减薄技术在硅基 GaN 晶片上实现了非周期悬空 GaN 薄膜光栅。然后基于 RCWA 和 FDTD 法对非周期性光栅的光学特性进行了数值模拟。最后通过角

分辨微反射谱实验和 PL 实验表征了所制备的非周期悬空 GaN 薄膜光栅的光学性能。实验结果与理论预期一致,在可见光波段内,非周期悬空 GaN 薄膜光栅具有大的入射角容忍度( $-25^{\circ} \sim 25^{\circ}$ );相较于硅衬底 GaN,PL 强度大大提高,发射峰值由 364.3 nm 转移至 378.7 nm,有效提高了光效率。

## 参考文献:

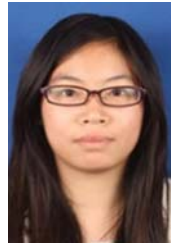
- [1] 周传宏,王磊,聂娅,等. 介质光栅导模共振耦合波分析[J]. 物理学报, 2002, 51(1): 68-73.  
ZHOU CH H, WANG L, NIE Y, *et al.*. The rigorous coupled-wave analysis of guided-mode resonance in dielectric gratings[J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, 51(1): 68-73. (in Chinese)
- [2] 黄萍,赵紫娟,雒倩男,等. 角度可调谐硅氮化镓导模共振滤波器[J]. 光通信研究, 2016(5): 50-54.  
HUANG P, ZHAO Z J, LUO Q N, *et al.*. The angle adjustable Si-based GaN guided-mode resonance filters [J]. *Study on Optical Communications*, 2016(5): 50-54. (in Chinese)
- [3] MIZUTANI A, KIKUTA H, IWATA K. Numerical study on an asymmetric guided-mode resonant grating with a Kerr medium for optical switching [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2005, 22(2): 355-360.
- [4] WAWRO D D, TIBULEAC S, MAGNUSSON R, *et al.*. Optical fiber endface biosensor based on resonances in dielectric waveguide gratings[J]. *SPIE*, 2000, 3911: 86-94.
- [5] FOLAND S, CHOI K H, LEE J B. Pressure-tunable guided-mode resonance sensor for single-wavelength characterization[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(23): 3871-3887.
- [6] 郭永兴,熊丽,孔建益,等. 滑动式光纤布拉格光栅位移传感器[J]. 光学精密工程, 2017, 25(1): 50-58.  
GUO Y X, XIONG L, KONG J Y, *et al.*. Sliding type fiber Bragg grating displacement sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(1): 50-58. (in Chinese)
- [7] 田赫,掌蕴东,白岩. 单光学谐振器感应透明现象的窄带透射峰[J]. 光学精密工程, 2017, 25(1): 59-64.  
TIAN H, ZHANG Y D, BAI Y. Transmission peak with narrow bandwidth in single optical resonator induced-transparency [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(1): 59-64. (in Chinese)
- [8] FATTAL D, LI J J, PENG ZH, *et al.*. Flat dielectric grating reflectors with focusing abilities[J]. *Optics and Photonics News*, 2010, 21(12): 42.
- [9] CARLETTI L, MALUREANU R, MØRK J, *et al.*. High-index-contrast grating reflector with beam steering ability for the transmitted beam[J]. *Optics Express*, 2011, 19(23): 23567-23572.
- [10] LU M Y, ZHAI H Q, MAGNUSSON R. Focusing light with curved guided-mode resonance reflectors[J]. *Micromachines*, 2011, 2(2): 150-156.
- [11] 李林青,吕燕伍. GaN-based LED 基础光栅结构实现光的表面等离极化增强[J]. 半导体学报, 2014, 35(4): 043003.  
LI L Q, LÜ Y W. Surface-plasmon-enhanced light transmission intensity with a basic grating in GaN-based LED[J]. *Journal of Semiconductors*, 2014, 35(4): 043003. (in Chinese)
- [12] 顾新宇. GaN-LED 出射光束整形和出光效率提高 [D]. 苏州: 苏州大学, 2016.  
GU X Y. *Beam Shaping and Light Extraction Efficiency Enhancement of GaN-LED* [D]. Suzhou: Soochow University, 2016. (in Chinese)
- [13] 吕凡敏. 基于图形化 SOI 衬底的氮化镓微驱动器的研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2016.  
LÜ F M. *Study of GaN Electrostatic Comb Actuators on Patterned-SOI* [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2016. (in Chinese)
- [14] WU T T, SYU Y C, WU S H, *et al.*. Sub-wavelength GaN-based membrane high contrast grating reflectors[J]. *Optics Express*, 2012, 20(18): 20551-20557.
- [15] WANG W, GAO X M, FANG X J, *et al.*

- Transmission properties of Fabry-Pérot filter consisting of silicon-based high-contrast gratings[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(1): 6800614.
- [16] WANG W, ZHU G Y, LIU Q F, *et al.*. Angle- and polarization-dependent spectral characteristics of circular grating filters [J]. *Optics Express*, 2016, 24(10): 11033-11042.
- [17] 吴娜, 谭鑫, 于海利, 等. 宽波段全息-离子束刻蚀光栅的设计及工艺[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(7): 1978-1983.
- WU N, TAN X, YU H L, *et al.*. Design and fabrication of broadband holographic ion beam etching gratings[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7): 1978-1983. (in Chinese)
- [18] 公民, 戴晔, 宋娟, 等. 单光束飞秒激光诱导的电子态密度分布对双周期纳米光栅的影响[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0514001.
- GONG M, DAI Y, SONG J, *et al.*. Influence of electron density distribution induced by single beam femtosecond laser on double-periodic nanogratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0514001. (in Chinese)
- [19] LIU A J, HOFMANN W, BIMBERG D. Two dimensional analysis of finite size high-contrast gratings for applications in VCSELs[J]. *Optics Express*, 2014, 22(10): 11804-11811.
- [20] MAGNUSSON R. Wideband resonant reflectors with zero-contrast gratings: USA, US2015369976A1[P]. 2015-12-24.
- [21] WANG CH, ZHUANG W, TANG W CH. Novel three-dimensional frequency selective surface with incident angle and polarization independence[C]. *Proceedings of 2015 International Symposium on Antennas and Propagation, IEEE*, 2015: 1-3.
- [22] BAI D, WU T, LI X, *et al.*. Suspended GaN-based nanostructure for integrated optics[J]. *Applied Physics B*, 2016, 122: 9.
- [23] TAKASHIMA Y, TANABE M, HARAGUCHI M, *et al.*. Highly polarized emission from a GaN-based ultraviolet light-emitting diode using a Si-subwavelength grating on a SiO<sub>2</sub> underlayer[J]. *Optics Communications*, 2016, 369: 38-43.
- [24] LÓPEZ-GARCÍA M, GALISTEO-LÓPEZ J F, LÓPEZ C, *et al.*. Light confinement by two-dimensional arrays of dielectric spheres[J]. *Physical Review B*, 2012, 85(23): 235145.

#### 作者简介:



王永进(1977—),男,江苏徐州人,博士,教授,2005年于中科院上海微系统与信息技术研究所获得博士学位,先后在德国弗莱堡大学、日本东北大学和德国于利希研究中心从事科研工作,主要从事可见光通信和光传感方面的研究。  
E-mail: wangyj@njupt.edu.cn



张锋华(1994—),女,江苏南通人,硕士研究生,2016年于南京师范大学获得学士学位,主要研究方向为可见光通信和光传感。E-mail: 1016010313@njupt.edu.cn