

金属膜衬底上亚波长介质光栅结构的特性及传感应用

马伟涛¹ 周 骏¹ 黄水平¹ 苑红伟²

(¹ 宁波大学理学院, 浙江 宁波 315211
² 江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 提出亚波长介质光栅-金属膜-石英玻璃衬底结构,根据等效介质理论该结构可等效为由金属-光栅-包覆层构成的单面金属包覆波导,在入射波长和入射角满足一定条件时,发生导模共振(GMR)从而产生光波全吸收现象。根据严格耦合波分析(RCWA)理论进行数值分析发现,等效波导中的 TM_1 GMR 峰尖锐,并且对光栅包覆层的折射率变化非常敏感,角度灵敏度为 $127.87^\circ/\text{RIU}$ (RIU 为折射率单位),波长灵敏度为 $409.35 \text{ nm}/\text{RIU}$,在很大的折射率范围内线性度良好。与全介质 GMR 传感器和光栅型表面等离子体共振(SPR)传感器相比,该结构通过 GMR 实现较高灵敏度的同时,其较窄的共振峰使得检测精度更高。

关键词 传感器;导模共振;亚波长光栅;严格耦合波分析

中图分类号 TP212.14 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.0905008

Characteristic of Subwavelength Dielectric Grating with Metal Layer and Its Sensing Applications

Ma Weitao¹ Zhou Jun¹ Huang Shuiping¹ Yuan Hongwei²

(¹ School of Science, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China
² School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract The subwavelength dielectric grating-metal structure with a quartz glass substrate is proposed. It can be seen as a waveguide which is composed of metal layer, grating and superstrata according to the equivalent medium theory. With proper incident angles and light wavelengths, the total resonance absorption occurs. The resonance spectra of total absorption are analyzed using rigorous coupled-wave analysis (RCWA) method. The results show that the peak of TM_1 mode of the waveguide is very sharp and sensitive to variation of refractivity of the superstrata. The angle sensitivity and wavelength sensitivity are $127.87^\circ/\text{RIU}$ and $409.35 \text{ nm}/\text{RIU}$, respectively, and the linearity between the resonance peaks and the refractivity of superstrata is good in a large range of refractive index of superstrata. Compared with guide-mode sensors of all dielectric and grating-type surface plasmon resonance sensors, the proposed structure can realize high sensitivity and the narrow resonance peaks can provide high detection precision.

Key words sensors; guided-mode resonance; subwavelength grating; rigorous coupled-wave analysis

OCIS codes 130.6010; 050.1950; 280.4788; 130.3120

1 引言

导模共振(GMR)是指外部传播的衍射场与受

调制波导的泄漏模之间产生耦合,在入射波长、入射角或介质参数做很小改变时,光栅衍射波能量发生

收稿日期: 2011-03-28; 收到修改稿日期: 2011-05-24

基金项目: 国家自然科学基金(60977048)、宁波市国际科技合作计划(2010D10018)和宁波市自然科学基金(2009A610043)资助课题。

作者简介: 马伟涛(1985—),男,硕士研究生,主要从事导波光学和光通信器件设计与制备技术等方面的研究。

E-mail: maweitao1017@163.com

导师简介: 周 骏(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事非线性光学、光电子材料与器件制备技术等方面的研究。

E-mail: ejzhou@yahoo.com.cn

剧烈变化的现象^[1~3]。由于 GMR 效应的高衍射效率和窄带性质,并且在共振时波导区内存在较高光强的消逝波等特性,被大量应用于设计窄带滤波器、光调制器、光开关和传感器等光学器件^[4~10]。对于由介质光栅与其他介质层组成的全介质光栅波导结构,当 GMR 发生时,在共振波长或者共振角附近较小的范围内,反射率接近于 1,是一种高效的反射型光器件^[11]。然而,带有吸收衬底(如金属材料)的光栅波导结构的特性和全介质结构不同,在 GMR 发生时具有强烈的吸收特性^[12,13],例如带有光栅的硅光二极管多层结构^[14],在共振情况下光的吸收率达到 81%。对于金属衬底上直接沉积介质光栅的结构,当入射波和光栅参量满足一定条件时,TE 波或者 TM 波的能量被全部吸收,在光栅区光场形成共振,并且光栅脊附近的光场强度被剧烈地加强,可作为真空阻抗和平面金属阻抗的匹配源,用于高方向性和高敏感性微波天线的设计^[15]。

本文提出一种亚波长介质光栅-金属膜-石英玻璃衬底结构,该结构在 GMR 发生时光波只能在很薄的波导层内传播,形成光场沿垂直于光栅表面距离呈指数衰减的消逝波,而且对包覆层的折射率变化非常敏感,在高精度传感方面有重要应用。

2 理论与模型

图 1 为亚波长介质光栅-金属膜-石英玻璃衬底结构的示意图。入射波长为 λ 的 TM 或者 TE 偏振光以一定的入射角 θ 入射到光栅上, R_0 和 R_{-1} 分别为 0 和 -1 级反射光,介质光栅的周期为 Λ ,高度为 h ,脊宽和沟道宽度分别为 b 和 g ,光栅占空比为 $f = b/\Lambda$,金属膜的厚度为 d 且大于入射光在金属中的穿透深度。包覆层的折射率为 n_1 ,光栅脊和光栅沟道的折射率分别为 n_b 和 n_g ,金属材料选择为银,其介电常数由洛伦兹-德鲁德(Lorentz-Drude)模型描述^[16]。

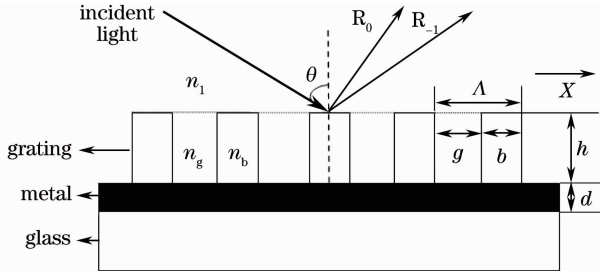


图 1 金属膜衬底上亚波长介质光栅示意图

Fig. 1 Schematic of subwavelength dielectric grating on metal layer

由于亚波长介质光栅的周期小于入射光波的波长,标量衍射理论不再适用,可以采用等效介质理论将光栅层等效为一定折射率的均匀介质层,直观地分析亚波长光栅结构的衍射特性,而且,光栅周期与入射光波长之比越小,等效介质理论处理的结果越精确。将图 1 所示结构中的亚波长介质光栅等效为一介质层,则不同偏振状态的 TM 或 TE 偏振光在光栅界面上的等效折射率为^[17]

$$n_{TE} = \sqrt{fn_b^2 + (1-f)n_g^2}, \quad (1)$$

$$n_{TM} = 1/\sqrt{fn_b^{-2} + (1-f)n_g^{-2}}, \quad (2)$$

因此,图 1 中的亚波长介质光栅-金属膜-石英玻璃衬底结构可以看作由空气包覆层、导波层和金属膜构成的等效单面金属包覆波导,导波层是介质光栅,根据平面波导本征方程可以求出其导波模式沿传播方向 X 的波矢分量,即传播常数 β 。

此外,根据模理论^[18],对于亚波长介质光栅,一定波长的 TM 或 TE 偏振光入射时,光栅中的传播模式最多只有两个,对应的光栅衍射级次分别为 0 和 -1 级,即存在 0 级反射光 R_0 和 0 级透射光 T_0 以及 -1 级反射光 R_{-1} 和 -1 级透射光 T_{-1} 。由于结构中金属衬底的存在,光不可能透过金属,所以最多只有 R_0 和 R_{-1} 存在,如图 1 所示。光栅衍射级次较少避免了入射光波能量在衍射级次上的分散,使得入射光更多地耦合到波导模式中。若第 m 级反射光的波矢在 X 方向上的分量 κ_{Xm} 与光栅波导所支持的某一导波模式传播常数 β 接近,将出现光栅的 GMR 效应,即

$$\kappa_{Xm} \approx \beta, \quad (3)$$

式中 $\kappa_{Xm} = \kappa_0 \left(\sin \theta - \frac{\lambda}{\Lambda} m \right)$, $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, $\kappa_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ 。(3) 式把光栅参数与波导参数联系起来,通过求解波导方程,确定 κ_{Xm} 与导波模式之间的关系,可以近似获得 GMR 发生的条件。

由单面金属包覆波导理论可知,波导基模 TM_0 没有截止厚度,从而对于任意厚度的亚波长光栅,即使光栅厚度只有几十纳米,在入射角和入射波长满足一定条件时,可以激发波导基模 TM_0 ,此时入射波能量转化为波导模式能量,并且传输一段距离后,被金属吸收。然而,对于 TE 导波模式,只有光栅厚度超过其截止厚度,波导中才有波导基模 TE_0 存在。因此,根据单面金属包覆波导的导波模式特点,为了减小对光栅厚度的限制,只考虑 TM 导波模式的耦合共振吸收现象。

3 共振吸收特性及传感应用

为了精确地研究光栅的衍射特性,采用严格耦合波分析(RCWA)理论^[19]对光栅的衍射特性进行数值模拟,选取入射波 $\lambda=780\text{ nm}$,光栅介质材料为ZnS,其折射率为2.365, $\Lambda=300\text{ nm}$, $h=380\text{ nm}$, $f=0.5$, $d=150\text{ nm}$, $n_g=n_1$ 。图2为TM偏振光入射到该光栅波导结构的衍射效率与入射角的关系。由图2可见只有 R_0 和 R_{-1} 存在,并且入射角在 $0\sim 72.71^\circ$ 范围内时只有 R_0 存在,而在 $72.71\sim 90^\circ$ 范围内才出现 R_{-1} 。在 R_0 的角度谱中,入射角为 23.98° 和 59.81° 处分别有一个共振吸收峰,它们是由于入射光分别与波导中的 TM_0 和 TM_1 导波模式发生共振耦合引起的,而且 59.81° 处的共振峰比 23.98° 处的共振峰尖锐,很高的共振吸收峰值表明耦合非常强,能量被金属完全吸收。

图3(a)为 R_0 在入射角为 59.81° 处的共振峰的精细图,共振角处的反射率为0,即总吸收达到1,此共振峰具有洛伦兹形状,半峰全宽(FWHM)只有 1.47° 。图3(b)是入射角为 59.81° 时,宽谱光入射到光栅波导结构上的光谱图,共振波长为 $0.78\text{ }\mu\text{m}$,

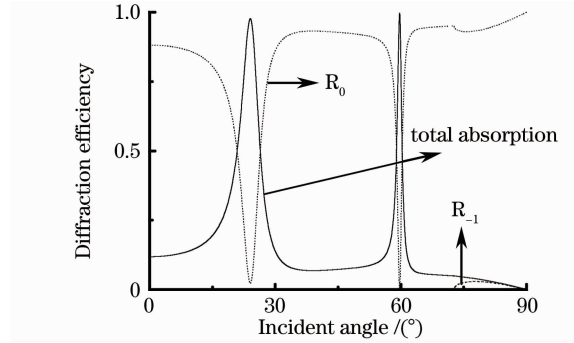
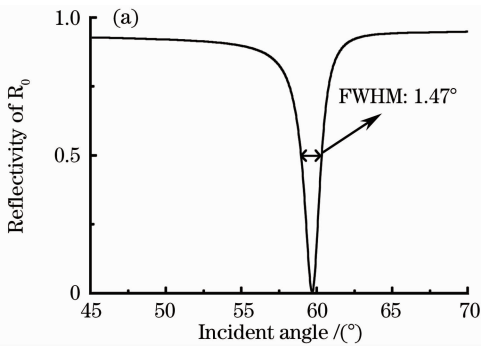


图2 在TM偏振入射光下,衍射效率与入射角的关系
Fig.2 Diffraction efficiency versus incident angle for TM polarization

FWHM为 4.63 nm ,共振波长处的反射率为0。可见入射光与波导中的 TM_1 模式耦合而产生的共振峰很尖锐,说明此共振峰对包覆层折射率变化具有良好的响应特性。包覆层折射率的变化将引起共振耦合条件发生变化,表现为共振角或者共振波长的位置发生改变,从而可以根据共振角或共振波长的移动,探测包覆层或者光栅表面环境的变化。因此,根据检测信号的不同,光栅波导结构传感分为角度检测和波长检测两种情况。

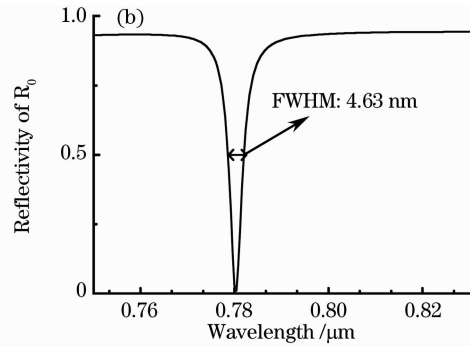


图3 入射角为 59.81° 处的共振峰(a)和光谱(b)

Fig.3 (a) Resonance peak and (b) the spectrum at incident angle of 59.81°

3.1 角度检测型

为考虑光栅结构的角检测型传感性能,选取入射波长为 780 nm 的TM偏振光,入射角度扫描,并以入射光与波导中的 TM_1 模式产生共振时的共振角作为检测信号。图4(a)为包覆层分别为甲醇、水、乙醇、丁醇和环己烷液体时, R_0 对入射角的角度谱图, 780 nm 波长下,上述液体的折射率分别为1.3155,1.33,1.3577,1.3929和1.4216。从图中可知,随着包覆层材料折射率的增大,角度谱图向较小入射角方向移动,共振角处的反射率很小,耦合强度大,并且共振峰仍然保持洛伦兹形状。图4(b)为共振角与包覆层折射率的关系,可以看出在较大的折射率变化范围内,共振角和折射率具有良好的线性

关系,设立RIU为折射率单位,则从拟合曲线可知共振角对折射率的灵敏度为 $127.87^\circ/\text{RIU}$ 。

3.2 波长检测型

考虑光栅结构的波长检测型传感性能,选取入射角为 59.81° ,TM偏振光入射,对波长扫描,并以入射光与波导的 TM_1 模式产生共振时的共振波长作为检测信号。图5(a)为包覆层分别为甲醇、水、乙醇、丁醇和环己烷液体时 R_0 反射率的光谱图。从图中可知,随着包覆层材料折射率的增大,光谱向波长较长的方向移动,共振波长处的反射率逐渐降低,表明耦合强度降低,特别是包覆层折射率较大时,共振吸收较弱。图5(b)为共振波长与包覆层折射率的关系,可见在较大的折射率变化范围内,共振

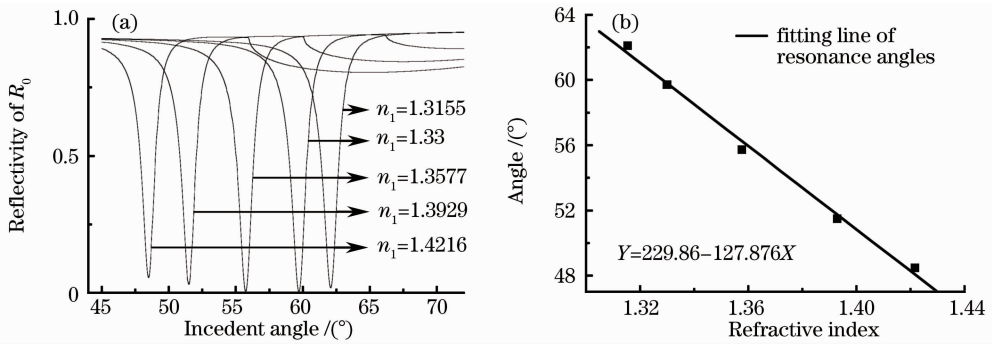


图 4 一定入射波长下对应不同包覆层材料的角度谱图(a)和共振角随折射率变化的拟合曲线(b)

Fig. 4 (a) Angle spectrum and (b) fitting line of resonance angle versus refractive index for different superstrata at fixed incident wavelength

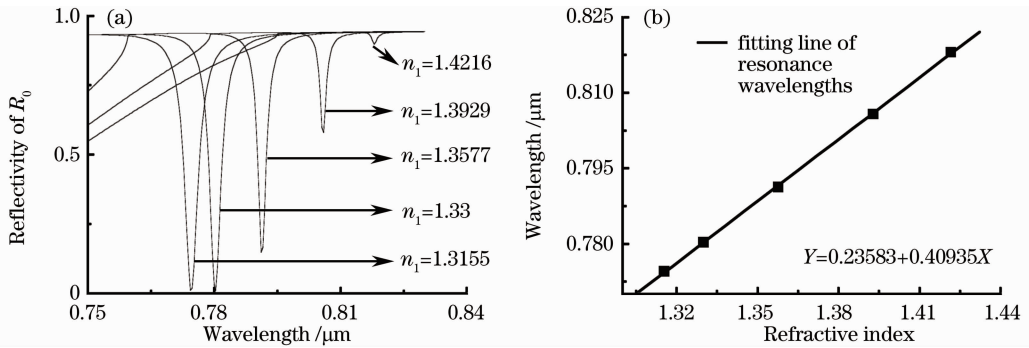


图 5 一定入射角下对应不同包覆层的光谱图(a)和共振波长随折射率变化的拟合曲线(b)

Fig. 5 (a) Spectrum and (b) fitting line of resonance wavelength versus refractive index for different superstrata at fixed incident angle

波长与折射率具有良好的线性关系,从拟合曲线可知共振波长对折射率的灵敏度为 409.35 nm/RIU。

因此对于本文提出的亚波长介质光栅-金属膜-石英玻璃衬底结构,入射光与波导中的 TM_1 模式共振耦合产生的光波吸收现象对包覆层的折射率变化非常敏感。对比图 4(a)和图 5(a)可知,包覆层折射率较大时,角度检测型的共振峰比波长检测型的共振峰变化小,当包覆层折射率为 1.4216 时,波长检测时的共振峰很不明显,然而角度检测型传感需要精密的角度控制设备,而波长检测型的光学装置相对简单。这两种检测方式下的灵敏度都较高,相应的共振峰尖锐,并且在较大的折射率变化范围内线性度良好。

为了体现金属衬底 GMR 传感器的优越特性,与 Szeghalmi 等^[8]提出的全介质 GMR 传感器结构对比,在包覆层折射率为 1.33 左右时,其灵敏度为 200 nm/RIU,低于本文的研究结果。另外,虽然基于亚波长金属光栅的表面等离子体共振 (SPR) 传感器具有较高的灵敏度,如金属狭缝阵列型、金属孔阵列型和三角形金属光栅型的 SPR 传感器^[20~22],在可见光谱范围内达到 400 nm/RIU 以上,但是它们的共振

峰 FWHM 较大,甚至达到 100 nm,不利于信号的检测与共振峰位置的确定。而上述亚波长介质光栅-金属膜-石英玻璃衬底结构的传感器的灵敏度可以与亚波长金属光栅 SPR 传感器的相媲美(超过 400 nm/RIU),同时具有很窄的 GMR 峰的 FWHM。

4 结 论

对亚波长介质光栅-金属膜-石英玻璃衬底结构的 GMR 吸收现象进行的数值模拟和分析表明,采用亚波长介质光栅可以抑制光栅高阶模式的出现,在满足一定光栅参数和入射条件时,入射光和波导模式发生强烈耦合,由于吸收衬底的存在,入射光被全部吸收。通过研究入射光与波导中的 TM_1 模式耦合而产生的共振峰特性得知其与包覆层折射率的变化关系密切,以共振角度为检测信号时,共振峰的 FWHM 为 1.47° ,对折射率的灵敏度为 $127.87^\circ/\text{RIU}$;以共振波长为检测信号时,共振峰的 FWHM 为 4.63 nm,对折射率的灵敏度为 409.35 nm/RIU。可见,此结构具有灵敏的传感特性,信号检测精度高,具有重要的应用价值。

参 考 文 献

- 1 A. Sharon, D. Rosenblatt, A. A. Friesem. Resonant grating-waveguide structures for visible and near-infrared radiation[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(11): 2985~2993
- 2 S. S. Wang, R. Magnusson. Theory and applications of guided-mode resonance filters [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32** (14): 2606~2613
- 3 Zhou Chuanhong, Wang Lei, Nie Ya *et al.*. The rigorous coupled-wave analysis of guided-mode resonance in dielectric gratings[J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(1): 68~73
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
- 4 W. Liu, Z. Lai, H. Guo *et al.*. Guided-mode resonance filters with shallow grating[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(6): 865~867
- 5 Wang Zhenhua, Wu Yonggang, Sang Tian *et al.*. Reflection spectra properties of guided-mode resonance filters with buffer layer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1425~1428
王振华, 吴永刚, 桑田等. 带缓冲层的导模共振滤光片反射光谱特性[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1425~1428
- 6 I. Abdulhalim. Optimized guided mode resonant structure as thermo-optic sensor and liquid crystal tunable filter[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(8): 667~670
- 7 Zhang Dawei, Wang Qi, Zhu Yiming *et al.*. Design of guided mode resonant filters tuned by azimuthal angle[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 950~953
张大伟, 王琦, 朱亦鸣等. 方位角调谐的反射窄带导模共振滤光片设计[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 950~953
- 8 A. Szeghalmi, E. B. Kley, M. Knez. Theoretical and experimental analysis of the sensitivity of guided mode resonance sensors[J]. *J. Phys. Chem. C*, 2010, **114**(49): 21150~21157
- 9 A. Sharon, D. Rosenblatt, A. A. Friesem *et al.*. Light modulation with resonant grating-waveguide structures[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1564~1566
- 10 Zhang Dawei, Yuan Limeng, Huang Yuanshen *et al.*. Influence of film on the characteristics of sub-wave grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 3060~3063
张大伟, 袁丽萌, 黄元申等. 导模共振滤光片表面镀膜对其物理特性的影响[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 3060~3063
- 11 J. Wang, Y. Jin, J. Ma *et al.*. Study on guided-mode resonance characteristic of multilayer dielectric grating with broadband and wide using-angle[J]. *Chin. Phys. B*, 2010, **19**(5): 054202
- 12 H. Libardi, H. P. Grieneisen. Guided-mode resonance absorption in partly oxidized thin silver films [J]. *Thin Solid Films*, 1998, **333**(1-2): 82~87
- 13 A. Sharon, S. Glasberg, D. Rosenblatt *et al.*. Metal-based resonant grating waveguide structures[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(3): 588~595
- 14 B. Choi, Y. Kanamori, K. Hane. Phase sensitive photodiode based on guided resonant absorption[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(24): 11141~11143
- 15 V. M. Fitiyo, Y. V. Bobitski. Resonance effects in a dielectric grating; total absorption of electromagnetic waves by a dielectric grating on metal system[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2004, **6**(10): 943~951
- 16 A. D. Rakic, A. B. Djurisić, J. M. Elazar *et al.*. Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(22): 5271~5283
- 17 D. L. Brundrett, E. N. Glytsis, T. K. Gaylord. Homogeneous layer models for high-spatial-frequency dielectric surface-relief gratings: conical diffraction and antireflection designs[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(13): 2695~2706
- 18 M. Foresti, L. Menez, A. V. Tishchenko. Modal method in deep metal-dielectric gratings: the decisive role of hidden modes [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2006, **23**(10): 2501~2508
- 19 M. G. Moharam, E. B. Grann, D. A. Pommet. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(5): 1068~1076
- 20 A. V. Whitney, J. W. Elam, S. Zou *et al.*. Localized surface plasmon resonance nanosensor: a high-resolution distance-dependence study using atomic layer deposition [J]. *J. Phys. Chem. B*, 2005, **109**(43): 20522~20528
- 21 A. Karabchevsky, O. Krasnykov, I. Abdulhalim *et al.*. Metal grating on a substrate nanostructure for sensor applications[J]. *Photon. Nanostruct.: Fundam. Appl.*, 2009, **7**(4): 170~175
- 22 A. de Leebeeck, L. K. S. Kumar, V. de Lange *et al.*. On-chip surface-based detection with nanohole arrays[J]. *Anal. Chem.*, 2007, **79**(11): 4094~4100