

文章编号: 0253-2239(2010)s100305

# 介质隔层金属光栅气体传感器研究

赵华君 袁代蓉

(重庆文理学院电子电气工程学院, 重庆 402160)

**摘要** 设计了一种基于表面等离子体(SP)效应的新型气体传感器及传感系统,该传感器由介质隔层金属光栅(MGS)构成,在气体折射率 1.000~1.001 的变化范围内,传感器平均折射率检测灵敏度高达 3050 nm/RIU,是普通金属光栅型 SP 气体传感器的两倍多,而共振峰反射率和共振峰半峰全宽(FWHM)值分别为 0.25%和 4.2 nm。具有高灵敏度、高分辨率、使用安全、便于集成、可实现远程检测的特点,在气体折射率的检测中有重要的应用价值。

**关键词** 光栅;气体传感器;严格耦合波法;表面等离子体;折射率

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201030.s100305

## A Gas Sensor Based on Metal Gratings with a Spacer between the Periodic Strips and a Metal Film

Zhao Huajun Yuan Dairong

(Department of Electronic and Electrical Engineering, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160, China)

**Abstract** A novel surface plasmons (SP) sensor system for gas with high-refractive index resolution is designed. The method of reflective wavelength detection is used in the system of gas sensor that works in wavelength of optical fiber communications. The sensor is based on a metal grating with a spacer between the periodic strips and a metal film (MGS). The SP excited by gratings, is constrained in the waveguide layer between the metal grating and the metal coatings, which enhances the SP effect, makes the SP resonance peak sensitive to the change of gas index. This gas sensor has higher sensitivity compared with metal grating sensor. The computation demonstrates that the average wavelength resolution over the range of 1.000~1.001 is approximately 3050 nm/RIU, which is twice more than metal grating-based gas sensors. The minimum resonance peak reflectivity and the full width at half maximum (FWHM) values are only 0.25% and 4.2 nm, respectively. The gas sensor based on MGS has the characteristics of high sensitivity and resolution, safe, ease of integration, enabling real-time detection and remote monitoring. It has very important application value for gas refractive index detection.

**Key words** gratings; gas sensor; rigorous coupled wave analysis; surface plasmons; refractive index

**OCIS codes** 050.1950; 120.0280; 240.6680

## 1 引 言

自 1998 年 Ebbesen 等<sup>[1]</sup>发现透过金属膜的纳米孔具有增强透射现象以来,增强透射的物理机理及相关应用成为微纳光子学领域的研究热点<sup>[2~4]</sup>。研究表明,增强透射与表面等离子体(SP)效应有关,SP 是入射光场在适当的条件下,在金属和介质

界面处引发自由电子相干振荡而产生的一种表面电磁波<sup>[5]</sup>。SP 对周围环境非常敏感,界面介质折射率的微小变化将影响表面等离子体共振(SPR)的耦合条件<sup>[6]</sup>,进而引起共振峰的偏移,这使 SP 在传感器的设计中具有极大的应用价值。对气体折射率的检测,传统的方法主要有迈克耳孙干涉法<sup>[7]</sup>和马赫-曾

**收稿日期**: 2010-05-17; **收到修改稿日期**: 2010-07-02

**基金项目**: 重庆市教育委员会资助项目(KJ101203),重庆市科委自然科学基金(CSTC,2010BB2352)和重庆文理学院重点科研资助项目(Z2010DQ19)资助课题。

**作者简介**: 赵华君(1974—),男,副教授,主要从事微纳光子学与衍射光学等方面的研究。E-mail: zhaohjcu@163.com

德尔干涉仪法<sup>[8]</sup>,两种检测方法均存在体积大、不易集成、不能自动检测和远程传输的局限。目前,随着工业生产、环境监测和卫生安全等领域对气体传感器的精度、性能、稳定性方面的要求越来越高,气体传感器正向微型化、智能化和多功能化的趋势发展,传统的气体检测传感技术已不能满足以上要求。基于SP的传感技术具有无需标定、实时检测、非接触、无损伤等突出特点,可用于气体、液体和生物膜等的分析检测,具有巨大的应用前景,有望发展为超高检测灵敏度的新型表面等离子体和表面增强光谱传感器。

从检测方式来看,SP传感器可分为波长检测、角度检测、强度检测和相位检测4种<sup>[9]</sup>。波长检测的基本原理是固定入射角,以宽带光源入射,探测反射或者透射光谱的变化,获得共振波长随待测物折射率变化的关系。波长检测方式不需要转动的机械装置,易于实现传感器的小型化和集成化,常应用于测量局域表面等离子共振消光谱。灵敏度和分辨率是衡量SP传感器性能的重要参数指标,灵敏度是SP共振信号的变化(角度或波长)与外界折射率变化量之比,SP传感器的灵敏度除了与传感器本身的特性有关外,还受到波长的影响<sup>[10]</sup>。对于波长调制方式,检测灵敏度表示为 $\Delta\lambda/\Delta n$ ,通常检测灵敏度随波长增加逐渐增大。SP传感器的分辨力是指传感系统能分辨待测样品折射率最小变化量的能力,分辨力主要与共振峰的特征参数,如:共振峰反射率、共振峰半峰全宽(FWHM)值,光源及测量仪器的性能相关。

目前,基于SP的传感器主要采用衰减全反射棱镜耦合法激发表面等离子体<sup>[11,12]</sup>,虽然该方法可以提高检测的灵敏度,但也存在体积大,不易集成的缺陷。1988年Cullen等<sup>[13]</sup>提出基于衍射光栅激发SP设计传感器的新方法,自此以光栅为基础的SP传感技术受到研究人员的重视<sup>[14,15]</sup>。

本文通过介质隔层金属光栅激发SP效应设计气体传感器,所设计的气体传感器具有灵敏度高、便于集成、安全高效、可实现实时检测和远程监控的特点,在气体的生产使用及安全检测中具有重要的应用价值。本文中的分析计算均采用严格耦合波法(RCWA),计算程序与文献<sup>[16]</sup>和<sup>[17]</sup>的计算结果吻合,证明了本文所使用程序的正确性。

## 2 设计原理

本文采用反射式波长检测法,利用介质隔层金

属光栅(MGS)激发SP检测气体折射率值,如图1所示。波长为 $\lambda$ 的TM偏振光以 $\theta$ 角入射到周期金属条阵列,金属条阵列的周期为 $\Lambda$ ,脊宽为 $w$ ,厚度为 $h$ ,占空比为 $f(f = w/\Lambda)$ 。金属光栅位于金属膜上方,金属膜与光栅之间为间距 $d$ 的空隙层,金属光栅和金属膜均为银,其折射率采用文献<sup>[18]</sup>中的值,注意金属膜需足够厚,防止入射光透过金属膜传输。由于被测气体填充于金属光栅四周,金属光栅和金属膜之间形成一个波导层,由光栅激发SP并约束于波导层中,增强了SP效应,使SP的激发对气体折射率变化更加敏感,因此MGS激发SP的气体传感器相对传统的金属光栅传感器灵敏度更高。

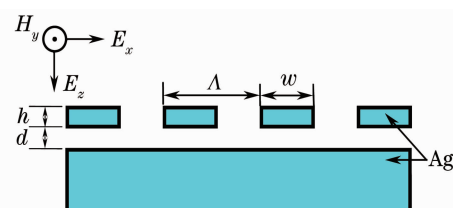


图1 MGS气体传感器结构图

Fig. 1 Schematic of the gas sensor based on MGS

MGS气体传感系统设计中采用光纤通信波段,利用光纤传导光信号,金属光栅激发SP,这样的设计可使传感器系统更加紧凑,易于实现远程在线检测,该传感系统相较其他非光纤传导的传感系统更具优势。图2是介质隔层金属光栅气体传感器系统示意图,其中入射光为可调谐的宽谱光源,通过光纤将入射光导入待测气体腔,扩束后以 $\theta$ 角入射到MGS传感器上,由光纤收集反射光,并导入光谱分析仪。当入射角固定时,SP共振峰波长随气体折射率的变化而变化,通过光谱仪测定共振峰波长,据此可以确定所测气体的折射率。

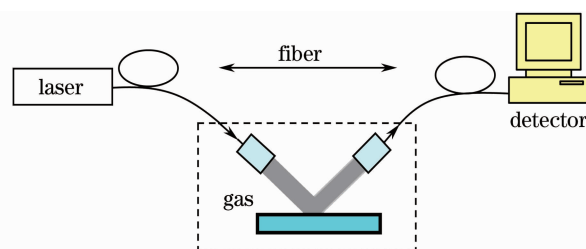


图2 MGS气体传感系统示意图

Fig. 2 System diagram of the gas sensor based on MGS

TM偏振光入射时,金属光栅激发SP必须满足波矢匹配条件,即<sup>[1]</sup>

$$\pm k_{sp} = k_0 \sqrt{\epsilon_d} \sin \theta_{sp} + m \frac{2\pi}{\Lambda}, \quad (1)$$

式中 $k_{sp} = k_0 \sqrt{\epsilon_m \epsilon_d / (\epsilon_m + \epsilon_d)}$ 为表面等离子体波

矢,  $k_0 = 2\pi/\lambda$  为真空中的波矢,  $\epsilon_m$  为金属膜和周期金属条的介电常数,  $\epsilon_d$  为气体介质的介电常数,  $\lambda$  为入射光波长,  $\Lambda$  为金属条阵列的周期,  $\theta_{sp}$  为 SP 共振入射角,  $m$  为是激发 SP 共振时的光栅衍射级次。由(1)式可得出激发 SP 时的入射波长为

$$\lambda_0 = \Lambda \left[ \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d}} + \sqrt{\epsilon_d} \sin \theta_{sp} \right]. \quad (2)$$

从(2)式可以看出,当金属条周期,共振入射角一定时,激发 SP 所需的入射光波长与气体介质的介电常数存在对应关系。气体折射率改变,激发 SP 所对应的入射光波长也随之变化。通过测量 SP 激发时的入射光波长,可以计算出对应气体的折射率值。

### 3 传感性能分析

图 3 为入射波长分别为 850, 1300 和 1550 nm 时, MGS 的反射率与入射角变化的关系, 注意金属光栅的占空比  $f=0.5$ , 并假定待测气体为氢气 ( $n=1.000132$ )。TM 偏振光入射时, 由于 SP 共振入射角处激发 SP 效应, 入射光转化为表面等离子体波 (SPW), 并耦合进入介质隔层波导中, 使反射谱急

剧减小到趋于零, 此时不同入射波长激发 SP 时所对应 MGS 的结构参数与传感器的性能参数如表 1 所示。从表 1 中可以看出, 随着入射波长的增加, 传感器的分辨率 (即 FWHM 值) 减小, 而气体的检测灵敏度增加。入射光波长为 1550 nm 时, 共振峰最小反射率仅为 0.26%, FWHM 为 0.25°, 而平均灵敏度高达 3050 nm/RIU, 因此选择中心波长为 1550 nm 的入射光设计 MGS 气体传感器具有最佳的性能。

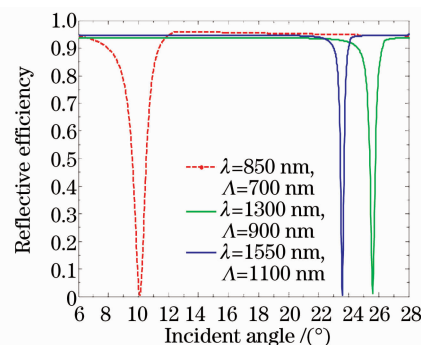


图 3 反射率与入射角变化的关系  
( $f=0.5, h=20 \text{ nm}, d=30 \text{ nm}$ )

Fig. 3 Relationship of the reflective efficiency and incident angle ( $f=0.5, h=20 \text{ nm}, d=30 \text{ nm}$ )

表 1 MGS SP 气体传感器的结构与相关性能参数

Table 1 Structure and performance parameters of SP gas sensor based on MGS

$\lambda_0 / \text{nm}$	$\Lambda / \text{nm}$	$w / \text{nm}$	$\theta_{sp} / (^\circ)$	Resonance peak reflectivity / %	FWHM / (°)	Wavelength resolution / (nm/RIU)
850	700	350	10.10	0.57	0.94	1550
1300	900	450	25.61	0.91	0.37	2525
1550	1100	550	23.58	0.26	0.25	3050

当 TM 偏振光入射时, 如果入射光与金属光栅的周期结构波矢匹配, SP 将被激发。当入射波长为 1550 nm 时, 激发产生 SP 效应时由 RCWA 法模拟计算得出的光栅参数如表 1 所示, 同样采用该结构参数由(2)式可计算出激发 SP 效应时所需的入射光波长约为 1545 nm, 这与 RCWA 法模拟计算的结果基本吻合。当 SP 被激发时, 光栅表面产生 SP 波, 入射光被耦合于介质波导中, 如图 4(a) 所示。SP 波的存在是由于金属光栅两侧边缘的累积产生的大量正负交替的表面电荷, 如图 4(b) 所示, 表面电荷相互耦合 (如图 5 所示) 的结果。而当入射光波长不能与金属光栅周期形成波矢匹配时, SP 不能被激发, 入射光被金属光栅反射, 反射光与入射光相互干涉形成驻波, 如图 4(c)~(d) 所示。

本文设计气体传感器时采用固定入射角, 通过

测定 SP 波长确定待测气体折射率值, 传感器为介质隔层金属光栅, 其结构参数为  $\Lambda=1100 \text{ nm}, w=550 \text{ nm}, h=20 \text{ nm}, d=30 \text{ nm}, \theta_{sp}=23.58^\circ$ 。图 6 为采用 RCWA 法计算的气体折射率变化与 SP 共振波长的关系, 可以看出 MGS 激发的 SP 波长随待测气体折射率的增加而线性增加, 气体折射率在 1.000~1.001 的变化范围内保持了很好的线性度, 其平均检测灵敏度高达 3050 nm/RIU, 是金属光栅型气体传感器检测灵敏度的 2 倍多 (约 1500 nm/RIU)。

图 7 是不同折射率值的待测气体激发 SP 效应时的反射谱。从图中可以看出当气体折射率相差  $\Delta n=0.0002$  时, 光谱移动约为  $\Delta \lambda \approx 0.6 \text{ nm}$ , 而反射率最小值和 FWHM 值分别约为 0.25% 和 4.2 nm, 可见, MGS 气体传感器在检测气体折射率时具有很高的分辨力。

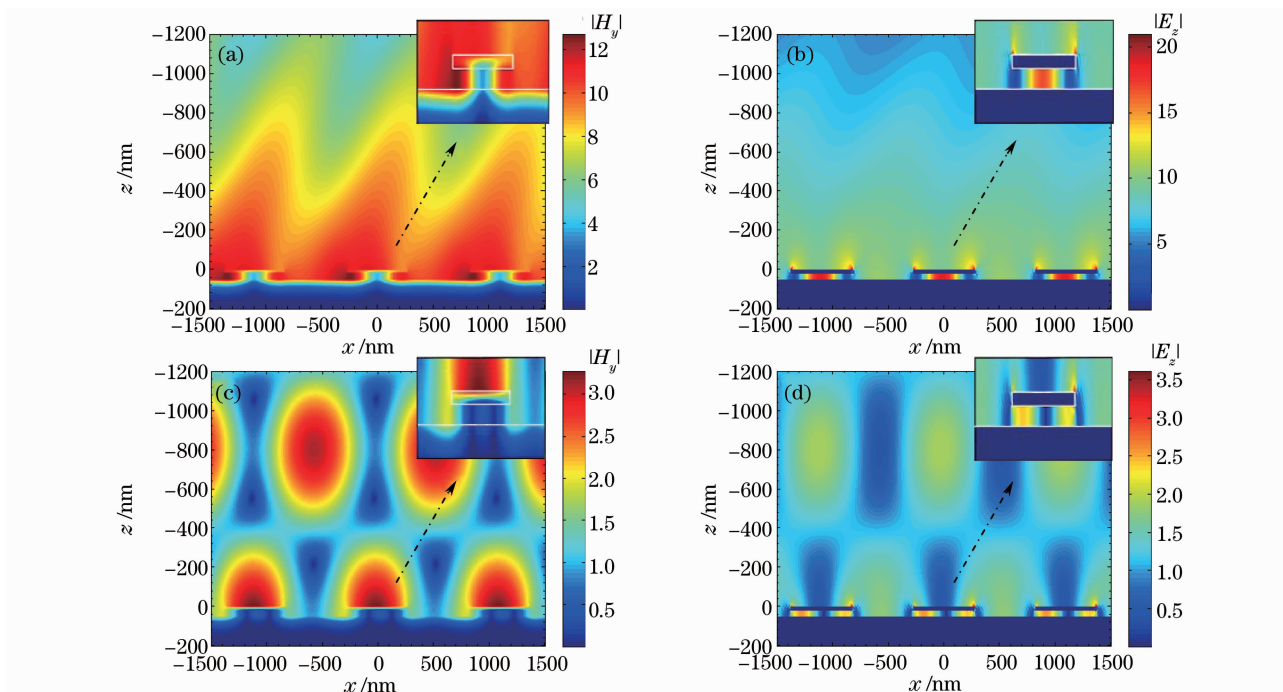


图 4 SP 激发和未激发时的  $|H_y|$  和  $|E_z|$  分布。(a)  $|H_y|$ ,  $\lambda_0=1550$  nm, (b)  $|E_z|$ ,  $\lambda_0=1550$  nm, (c)  $|H_y|$ ,  $\lambda_0=1540$  nm, (d)  $|E_z|$ ,  $\lambda_0=1540$  nm ( $\Lambda=1100$  nm,  $w=550$  nm,  $h=20$  nm,  $d=30$  nm,  $\theta=23.58^\circ$ )

Fig. 4 Distribution of the  $|H_y|$  and  $|E_z|$  for exciting the SP with (a)  $|H_y|$ ,  $\lambda_0=1550$  nm, (b)  $|E_z|$ ,  $\lambda_0=1550$  nm, and not exciting the SP with (c)  $|H_y|$ ,  $\lambda_0=1540$  nm, (d)  $|E_z|$ ,  $\lambda_0=1540$  nm ( $\Lambda=1100$  nm,  $w=550$  nm,  $h=20$  nm,  $d=30$  nm,  $\theta=23.58^\circ$ )

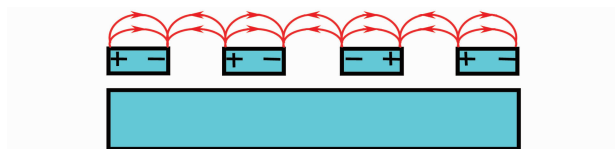


图 5 MGS 激发 SP 共振时金属表面电荷及电场分布情况  
Fig. 5 Charge distribution at metal/dielectric interfaces and associated electric fields when SPR is excited by MGS

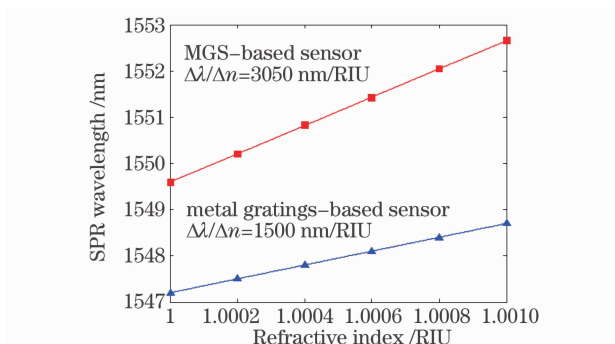


图 6 气体折射率变化与 SP 共振波长的关系 ( $\lambda=1550$  nm,  $\Lambda=1100$  nm,  $f=0.5$ ,  $h=20$  nm,  $d=30$  nm,  $\theta=23.58^\circ$ )

Fig. 6 Relationship of the gas refractive index and the SPR wavelength for MGS-based sensor and metal gratings-based sensor ( $\lambda=1550$  nm,  $\Lambda=1100$  nm,  $f=0.5$ ,  $h=20$  nm,  $d=30$  nm,  $\theta=23.58^\circ$ )

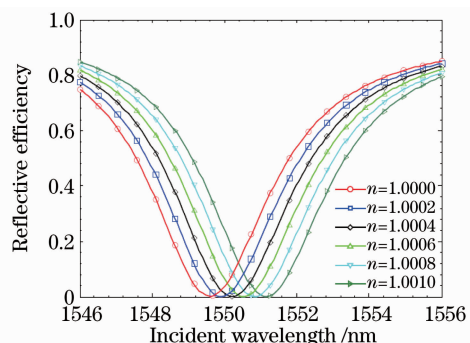


图 7 不同折射率值的待测气体激发 SP 效应时的反射谱 ( $\Lambda=1100$  nm,  $f=0.5$ ,  $h=20$  nm,  $d=30$  nm,  $\theta_{sp}=23.58^\circ$ )

Fig. 7 Reflective spectra for gases with different refractive index values exciting SP ( $\Lambda=1100$  nm,  $f=0.5$ ,  $h=20$  nm,  $d=30$  nm,  $\theta_{sp}=23.58^\circ$ )

## 4 结 论

本文利用介质隔层金属光栅激发的 SP 效应, 设计了基于介质隔层金属光栅的 SP 气体传感器。设计中将光纤传导与介质隔层金属光栅相结合, 所设计的气体传感器中心波长为 1550 nm, 采用反射式波长检测法, 对气体折射率的平均检测灵敏度高达 3050 nm/RIU, 共振峰反射率最小值和 FWHM

值分别约为 0.25% 和 4.2 nm。具有高的灵敏度和分辨力、使用安全可靠、易于集成、可实现实时检测和远程监控的特点,在气体的生产使用及安全检测中具有重要的应用价值。

### 参 考 文 献

- 1 T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi *et al.*. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays[J]. *Nature*, 1998, **391**: 667~669
- 2 H. J. Lezec, A. Degiron, E. Devaux *et al.*. Beaming light from a subwavelength aperture [J]. *Science*, 2002, **297** (5582): 820~822
- 3 William L. Barnes, Alain Dereux, Thomas W. Ebbesen. Surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, **424**: 824~830
- 4 C. Genet, T. W. Ebbesen. Light in tiny holes[J]. *Nature*, 2007, **445**: 39~46
- 5 O. T. A. Janssen, H. P. Urbach, G. W. Hooft. Giant optical transmission of a subwavelength slit optimized using the magnetic field phase[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, **99**(4): 043902
- 6 Kyung Min Byun, Sung June Kim, Donghyun Kim. Grating-coupled transmission-type surface Plasmon resonance sensors based on dielectric and metallic gratings[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(23): 5703~5708
- 7 Xing Jinhua. Influence of temperature on the refractive index nonlinearity of gas[J]. *Physics Experimentation*, 2005, **25**(4): 35~36,39  
邢进华. 温度对气体折射率的非线性影响[J]. *物理实验*, 2005, **25**(4): 35~36,39
- 8 Th. Schubert, N. Haase, H. Kück *et al.*. Refractive-index measurements using an integrated Mach-Zehnder interferometer [J]. *Sens. Actuators A*, 1997, **60**(1~3): 108~112
- 9 Ji Homola, Sinclair S. Yee, G. Gauglitz. Surface plasmon resonance sensors: review[J]. *Sensors and Actuators B*, 1999, **54**: 3~15
- 10 Lin Kaiqun. Reserch on new phenomenon, new method and temperature characteristic of surface plasmon resonance sensing [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009  
林开群. 表面等离子体共振传感的新现象、新方法及其温度特性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009
- 11 E. Kretschmann. The determination of the optical constants of metals by excitation of surface plasmons[J]. *Z. Phys.*, 241, **1971**: 313~324
- 12 A. Otto. Excitation of nonradiative surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection[J]. *Zeitschrift für Phys*, 1968, **216**(4): 398~410
- 13 D. C. Cullen, R. G. W. Brown, C. R. Lowe. Detection of immuno-complex formation via surface plasmon resonance on gold-coated diffraction gratings[J]. *Biosensors*, 1987-1988, **3**(4): 211~225
- 14 K. Lin, Y. Lu, J. Chen *et al.*. Surface plasmon resonance hydrogen sensor based on metallic grating with high sensitivity [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(23): 18599~18604
- 15 M. J. Jory, P. S. Vukusic, J. R. Sambles. Development of a prototype gas sensor using surface plasmon resonance on gratings [J]. *Sens. Actuators B*, 1994, **17**(3): 203~209
- 16 B. J. Lee, L. P. Wang, Z. M. Zhang. Coherent thermal emission by excitation of magnetic polaritons between periodic strips and a metallic film [J]. *Opt. Express*, 2008, **16** (15): 11328~11336
- 17 Yanxia Cui, Sailing He. Enhancing extraordinary transmission of light through a metallic nanoslit with a nanocavity antenna[J]. *Opt. Lett.* 2009, **34**(1): 16~18
- 18 E. D. Palik. Handbook of Optical Constants of Solids [M]. London: Academic Press, 1998