

复合金属光栅模式分离与高性能气体传感器应用

孙小亮 陈长虹 孟德佳 冯士高 于洪浩

Split modes of composite metal grating and its application for high performance gas sensor

Sun Xiao-Liang Chen Chang-Hong Meng De-Jia Feng Shi-Gao Yu Hong-Hao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 147302 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.147302

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.147302>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I14>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

**Au 纳米颗粒和 CdTe 量子点复合体系发光增强和猝灭效应**

Enhancement and quenching of photoluminescence from Au nanoparticles and CdTe quantum dot composite system

物理学报.2015, 64(16): 167301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.167301>

**径向偏振光下的长焦、紧聚焦表面等离子体激元透镜**

Plasmonic lens with long focal length and tight focusing under illumination of a radially polarized light

物理学报.2015, 64(9): 097301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.097301>

**十字结构银纳米线的表面等离极化激元分束特性**

Surface plasmon polaritons splitting properties of silver cross nanowires

物理学报.2015, 64(9): 097303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.097303>

**金属光栅对表面等离子体波的辐射抑制研究**

Suppression of metal grating to surface plasma radiation

物理学报.2015, 64(8): 087301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.087301>

**基于含时密度泛函理论的表面等离激元研究进展**

Progress of surface plasmon research based on time-dependent density functional theory

物理学报.2015, 64(7): 077303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.077303>

## 复合金属光栅模式分离与高性能气体传感器应用\*

孙小亮 陈长虹<sup>†</sup> 孟德佳 冯士高 于洪浩

(华中科技大学, 光电国家实验室, 武汉 430074)

(2014年12月16日收到; 2015年3月4日收到修改稿)

为实现近红外波段表面等离子体共振 (SPR) 模式的分裂和移动, 同时提高光栅基 SPR 传感器的品质因数, 提出了一种由双金属光栅构成的新型复合结构光栅, 并研究了其气体传感特性. 运用有限时域差分算法对该结构进行了数值模拟, 发现由复合金属光栅激发的 SPR 出现模式分裂的现象. 通过增大双金属光栅阵列间的相对位移改变原结构的对称性, 导致复合金属光栅分裂的 SPR 模式朝相反方向移动. 当相对位移量进一步增大到双光栅合并成新的单一光栅时, 随光栅结构对称性的恢复, 分裂的两共振模式最后又重新合并为一个模式. 如果待测物的折射率为  $1.01 \leq n_a \leq 1.05$ , 当相对位移量为 0 时, 基于复合光栅结构气体传感器的折射率灵敏度为 1207.5 nm/RIU, 且品质因数达到 1290.7; 当相对位移量为 100 nm 时, 与双共振模式对应的折射率灵敏度分别为 1205.0 nm/RIU 和 1210.0 nm/RIU, 品质因数分别为 1295.4 和 762.3. 因此, 复合光栅 SPR 传感器具有超高品质因数的性能, 使得它在生物化学传感领域中有巨大的应用潜力.

**关键词:** 表面等离子体共振, 复合光栅, 模式分裂, 气体传感器

**PACS:** 73.20.Mf, 07.85.Fv, 78.20.Ci, 42.81.Pa

**DOI:** 10.7498/aps.64.147302

## 1 引言

在过去的几十年间, 表面等离子体共振 (surface plasmon resonance, SPR) 技术被广泛地应用于生物化学传感、薄膜光学和膜厚测量、光学天线等领域<sup>[1-3]</sup>. 基于 SPR 的传感器因为具备高灵敏度、自由标签、快速响应、实时监测等优点<sup>[4-10]</sup>, 在世界范围内持续受到关注. 作为最常见的一种用来激发表面等离子体波 (surface plasmon wave, SPW) 的模型, 金属纳米光栅结构一直备受瞩目<sup>[11-15]</sup>. 最近 Guo 和 Leong<sup>[16]</sup> 利用横电磁波激发超周期纳米孔阵列光栅结构, 在透射方向实现 SPR 模式分裂, 并用实验证明了理论结果. Xu 等<sup>[17]</sup> 则基于周期金属光栅阵列和周期纳米孔阵列的复合结构, 在可见光范围内实现了 SPR 模式的分裂, 而且也被实验证实. 这项技术具有在光子探测和生物化学传感方面的应用前景, 但这种器件制作依然较复杂, 而且其共振峰的耦合程度也较低, 模式分裂现象并

不是很明显, 在可见光波段内应用的范围也较小. 因此, 采用更简单的结构、在红外波段实现模式分裂显得更有意义.

此外, 提高光栅基传感器的性能也是一个重要的研究方向, 品质因数作为评价传感器性能的综合指标, 其数值越高代表传感器性能越好. Yoon 等<sup>[11]</sup> 采用纳米金属光栅结构制作的 SPR 传感器, 其品质因数约为 60. Hong 等<sup>[18]</sup> 提出了基于金属介质光栅的气体传感器, 品质因数达到 357. 但是, 目前光栅基 SPR 气体传感器具备的品质因数仍不太高. 因此, 提高光栅基 SPR 传感器的品质因数是急需解决的问题.

本文基于常用的金属光栅模型, 设计了一种新型复合结构光栅, 并采用有限时域差分 (finite difference time domain, FDTD) 算法模拟仿真了复合光栅的光学反射特性曲线, 通过改变双金属光栅阵列间的相对位移, 在近红外波段实现了共振模式的分裂和移动. 同时也研究了复合光栅的气体传感特

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61176064) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: [ch\\_chen@hust.edu.cn](mailto:ch_chen@hust.edu.cn)

性, 结果表明该设计具备超高品质因数的性能.

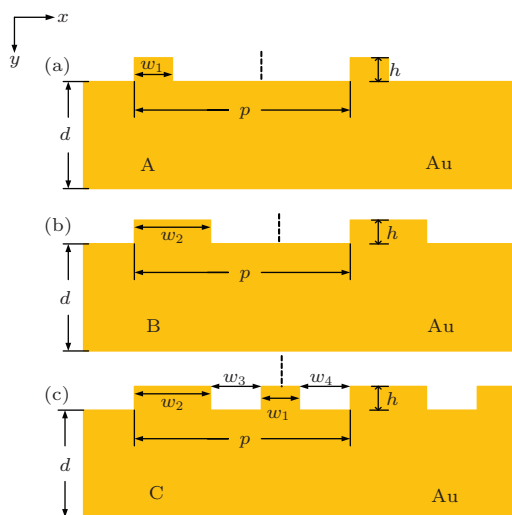
## 2 理论分析

SPW 是一种在金属和介质分界面上存在的自由振荡电子与光子相互作用而沿着金属表面传播的电子疏密波. 在光栅基系统中, 其波矢量满足动量匹配方程

$$\kappa_0 n_a \sin \theta + m \frac{2\pi}{p} = \pm \kappa_0 \left( \frac{\epsilon_M n_a^2}{\epsilon_M + n_a^2} \right)^{1/2},$$

其中  $\kappa_0$  代表自由空间光波波矢量;  $\epsilon_M$  代表金属的介电常数;  $n_a$  代表待测物的折射率,  $\theta$  代表入射光的角度;  $m$  代表衍射级次,  $\pm$  分别代表正负衍射级次,  $m > 0$  时取正号,  $m < 0$  时取负号;  $p$  代表光栅周期. 为有效激发 SPW, 通常要求  $|\epsilon_M| \geq n_a^2$ , 根据动量匹配方程, 可以得到共振波长 ( $\lambda_{\text{res}}$ ) 的表达式  $\lambda_{\text{res}} = (\pm 1 - \sin \theta) p n_a / m$ , 对应正衍射级次,  $\lambda_{\text{res}}$  随  $n_a$  增大而增大, 对应负衍射级次,  $\lambda_{\text{res}}$  也随  $n_a$  增大而增大. 在正入射的情况下,  $\lambda_{\text{res}} = p n_a / |m|$ , 波长灵敏度 ( $S$ ) 的表达式为  $S = |d\lambda_{\text{res}} / dn_a| = p / |m|$ . 而传感器的综合评价指标品质因数被定义为

$$\text{FOM} = S(1 - \text{MRR}) / \text{FWHM},$$



其中, FWHM 为共振曲线的半高峰宽, MRR 为反射曲线在共振波长处的反射率.

## 3 复合光栅结构的光学特性

单金属光栅 A, B 和复合光栅 C 的横截面图如图 1(a)—图 1(c) 所示, 其中, 光栅周期  $p = 2400 \text{ nm}$ ; 光栅深度  $h = 20 \text{ nm}$ , 光栅宽度  $w_1 = 300 \text{ nm}$ ,  $w_2 = 800 \text{ nm}$ ; 凹槽宽度  $w_3 = w_4$ ; 金属衬底厚度  $d = 1 \mu\text{m}$ , 大于该频率处入射光波的趋肤深度, 因此不考虑光波的透射. 我们运用 FDTD 算法对光栅模型进行模拟仿真. 光栅金属为 Au, 在近红外波段 Au 的光学常数用 Drude 模型来描述, 其等离子体频率  $\omega_p = 2\pi(2.175 \times 10^{15}) \text{ s}^{-1}$ , 碰撞频率  $\omega_c = 2\pi(6.5 \times 10^{12}) \text{ s}^{-1}$  [19]. 垂直入射 TM 偏振光, 电场方向与光栅凹槽垂直, 即沿着  $x$  方向. 边界条件设置为:  $x$  方向为周期性边界条件,  $y$  方向为完美匹配层边界条件. 图 1(d) 展示了单金属光栅和复合光栅的反射特性曲线, 对应的共振波长分别为 1205.2, 1209.7 和 1207.7 nm, 共振波长约为光栅周期的一半, 根据共振波长的表达式, 此共振为对应的正二级衍射共振模式. 相比单金属光栅结构激发的 SPR 模式, 复合金属光栅激发的共振波长正好在两单一光栅共振波长的中间, 且光波与 SPW 耦合的程度明显增大, 其原因是单金属光栅凹槽宽度

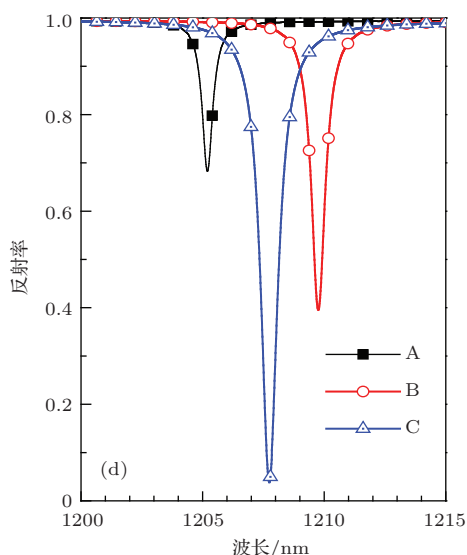


图 1 (网刊彩色) 一维矩形金属光栅横截面图 (a) 宽度为  $w_1$  的金属光栅结构记作 A 光栅; (b) 宽度为  $w_2$  的金属光栅结构记作 B 光栅; (c) 复合金属光栅结构记作 C 光栅; (d) 基于三种不同光栅的反射特性曲线

Fig. 1. (color online) Structure of 1 D rectangular grating: (a) the metal grating with width ( $w_1$ ) is marked "A"; (b) the metal grating with width ( $w_2$ ) is marked "B"; (c) the composite metal grating is marked "C"; (d) reflection spectrum of three gratings for TM light.

较大,大部分光被散射掉,只有小部分光与SPW发生耦合,而复合光栅凹槽宽度较小,耦合程度较大,同时双光栅间存在一定耦合效应,在反射曲线上表现为共振深度更大.

定义双光栅的相对位移量为 $\Delta X$ ,当 $w_3 = w_4$ 时,标记 $\Delta X = 0$ ,当 $w_3 > w_4$ 时,标记 $\Delta X = 2(w_3 - w_4)$ ,即A光栅从光栅脊中心向右移动的距离,如图2(a)所示.当 $\Delta X$ 变化时,我们模拟研究了复合结构光栅不同 $\Delta X$ 时的光学反射特性曲线.

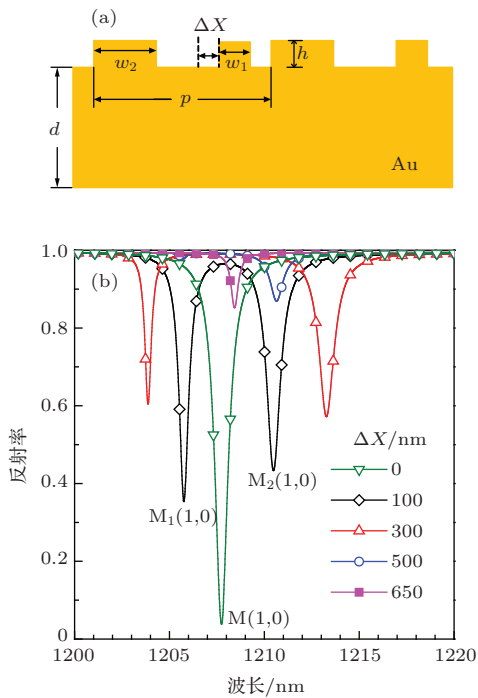


图2 (网刊彩色) (a) A, B光栅的相对位移量为 $\Delta X$ 时的截面图; (b) 对应不同 $\Delta X$ , 复合光栅的反射率随波长变化的特性曲线

Fig. 2. (color online) (a) The schematic of composite grating with relative displacement  $\Delta X$ ; (b) reflection spectra of the composite grating with different  $\Delta X$ .

在TM偏振光垂直照射下,对应不同 $\Delta X$ 复合光栅的反射特性曲线如图2(b)所示.当 $\Delta X = 0$ 时,在此光谱范围内复合光栅只激发了一个共振模式,标记为M(1, 0);当 $\Delta X = 100$  nm时,在反射曲线上突然出现了两个共振模式,我们认为这两个共振模式是由M(1, 0)分裂后形成的,标记左边的模式为 $M_1(1, 0)$ ,右边的模式为 $M_2(1, 0)$ .当 $\Delta X$ 从100 nm增大到300 nm时, $M_1(1, 0)$ 发生明显的蓝移, $M_2(1, 0)$ 发生明显红移,且共振深度逐渐减小.当 $\Delta X$ 从300 nm增大到650 nm时, $M_1(1, 0)$ 又发生红移, $M_2(1, 0)$ 发生蓝移,且共振深度进一步减

小,最后当 $\Delta X = 650$  nm,两个共振模式合并为一个共振模式,其原因是A, B光栅重新构成了一个宽度为1100 nm的单金属光栅.在此光谱范围内,单光栅只能激发一个共振峰.

为了更深入地研究复合光栅激发SPW的共振模式,我们运用FDTD算法计算了光栅横截面在共振波长处的电场强度分布.图3(a)显示了A光栅结构在 $\lambda_{res} = 1205.2$  nm处对应的电场强度分布.从图3(a)中可知,电场主要局域在凹槽中,但电场强度较弱,其原因是光栅宽度较小,光波主要在凹槽中耦合SPW,且大部分光被散射掉.图3(b)显示了B光栅结构在 $\lambda_{res} = 1209.7$  nm处对应的电场强度分布,电场主要局域在光栅凹槽和光栅脊上,且在光栅脊上的电场强度稍大于凹槽中的电场强度,同时在y方向上,电场逐渐衰减.图3(c)—图3(e)显示了在两个光栅周期内复合光栅横截面的电场强度分布,其中图3(c)显示了复合光栅C在 $\lambda_{res} = 1207.7$  nm处对应的电场强度分布,电场主要局域在光栅脊上和光栅与凹槽交界处.同A, B单光栅横截面电场强度分布图相比, C光栅在共振波长处的电场强度最大, A光栅在共振波长处的电场强度最小.由于A, B, C光栅结构关于光栅脊中心处是对称分布的,所以其电场分布也是关于脊中心点对称,在反射曲线上也只有一个共振模式出现.当 $\Delta X = 100$  nm时,如图2(b)所示,模式M(1, 0)分裂为两个共振模式 $M_1(1, 0)$ 和 $M_2(1, 0)$ .在对应的两个共振波长 $\lambda_{res} = 1205.7$  nm和 $\lambda_{res} = 1210.5$  nm处,其电场分布分别如图3(d)和图3(e)所示.比较图3(d)和图3(e),发现模式 $M_2(1, 0)$ 对应共振波长处的电场强度稍大于模式 $M_1(1, 0)$ 对应共振波长处的电场强度.而图3(c),图3(d)和图3(e)中局部位置 $A_1, A_2, A_3$ 的电场强度分布如图3(f)所示.以 $A_1$ 中虚线处电场为参考点,比较 $A_1, A_2, A_3$ 处的电场分布图,发现 $A_2$ 处的电场强度分布在 $A_1$ 的基础上向右移动,而 $A_3$ 处的电场强度分布在 $A_1$ 的基础上向左移动.在这个复合光栅结构中,当 $\Delta X$ 从0变化到300 nm,光栅结构的对称性遭到破坏,在A, B光栅间存在两个不同程度的耦合效应,因此,单共振模式逐渐分裂为两个共振模式,基于此非对称结构,在近红外波段,实现了SPR模式的分裂和迁移.通过改变光栅结构的参数,我们预见在中红外甚至太赫兹波段,都可以实现共振模式的分裂和迁移.

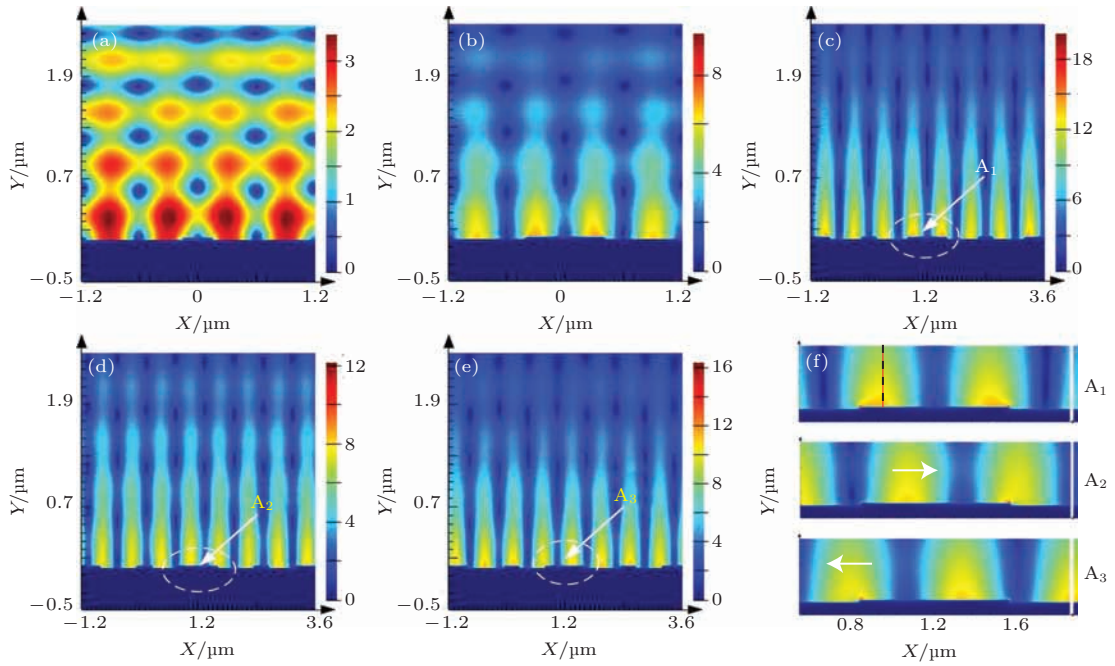


图3 (网刊彩色) 不同共振波长处光栅横截面的电场强度分布 (a)  $\lambda_{\text{res}} = 1205.2 \text{ nm}$ ; (b)  $\lambda_{\text{res}} = 1209.7 \text{ nm}$ ; (c)  $\lambda_{\text{res}} = 1207.7 \text{ nm}$ ; (d)  $\lambda_{\text{res}} = 1205.7 \text{ nm}$ ; (e)  $\lambda_{\text{res}} = 1210.5 \text{ nm}$ ; (f) (c)—(e) 中  $A_1$ — $A_3$  处对应的局部电场强度分布, 三个位置的横坐标范围均为  $0.475 \mu\text{m} \leq X \leq 1.925 \mu\text{m}$

Fig. 3. (color online) Electric field intensity distributions on the grating cross section at different resonant wavelength: (a)  $\lambda_{\text{res}} = 1205.2 \text{ nm}$ ; (b)  $\lambda_{\text{res}} = 1209.7 \text{ nm}$ ; (c)  $\lambda_{\text{res}} = 1207.7 \text{ nm}$ ; (d)  $\lambda_{\text{res}} = 1205.7 \text{ nm}$ ; (e)  $\lambda_{\text{res}} = 1210.5 \text{ nm}$ ; (f) the local electric field intensity distributions at the locations of  $A_1$ — $A_3$  corresponding to the figures (c)—(e), and the three locations have a same range ( $0.475 \mu\text{m} \leq X \leq 1.925 \mu\text{m}$ ) in  $X$  axis direction.

#### 4 基于复合光栅结构的传感特性分析

图4(a)和图4(b)分别为+2级衍射光波对应的SPR曲线以及不同待测物折射率对应的共振

波长曲线. 在图4(a)中, 当待测物折射率从1.01增大到1.05时, 共振波长也从1219.8 nm增大到1268.1 nm, 平均半高峰宽为0.9 nm, 传感器的折射率灵敏度为1207.5 nm/RIU, 品质因数高达1290.7.

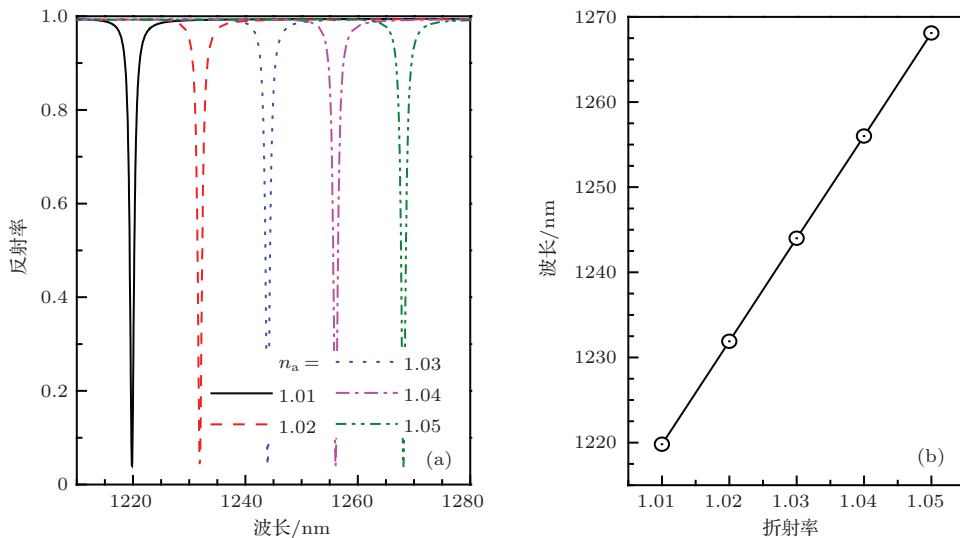


图4 (网刊彩色) (a) 不同待测物折射率, 复合光栅的反射曲线, 对应的光栅结构参数  $p = 2400 \text{ nm}$ ,  $w_1 = 300 \text{ nm}$ ,  $w_2 = 800 \text{ nm}$ ,  $\Delta X=0$ ,  $h = 20 \text{ nm}$ ; (b) 待测物折射率与共振波长的线性曲线

Fig. 4. (color online) (a) Reflection spectrum of the composite grating with different refractive indexes of annlyte, the corresponding structure parameters  $p = 2400 \text{ nm}$ ,  $w_1 = 300 \text{ nm}$ ,  $w_2 = 800 \text{ nm}$ ,  $\Delta X=0$ ,  $h = 20 \text{ nm}$ ; (b) linear regression analysis between resonant wavelengths and refractive index of analyte.

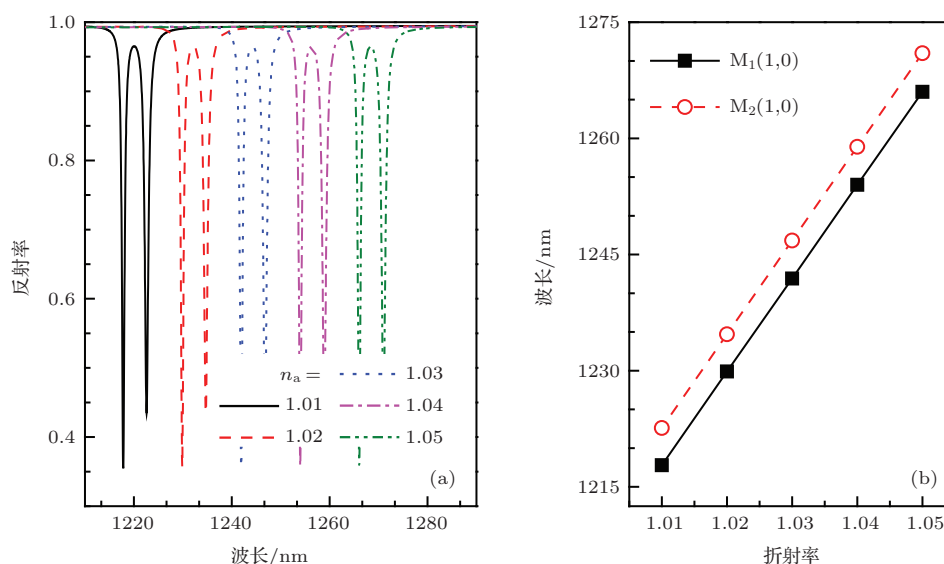


图5 (网刊彩色) (a) 不同待测物折射率, 复合光栅的反射曲线, 对应的光栅结构参数  $p = 2400$  nm,  $w_1 = 300$  nm,  $w_2 = 800$  nm,  $\Delta X = 100$  nm,  $h = 20$  nm; (b) 待测物折射率与  $M_1(1, 0)$  和  $M_2(1, 0)$  对应共振波长的变化曲线

Fig. 5. (color online) (a) Reflection spectrum of the composite grating with different refractive indexes of annlyte, the corresponding structure parameters  $p = 2400$  nm,  $w_1 = 300$  nm,  $w_2 = 800$  nm,  $\Delta X = 100$  nm,  $h = 20$  nm; (b) linear regression analysis between resonant wavelengths and refractive index of analyte.

如图 4(b) 所示, 共振波长与待测物折射率具有良好的线性关系, 线性相关系数为 1. 因此, 在气体传感领域, 此复合光栅结构具有优异的性能.

当双光栅的相对位移量  $\Delta X = 100$  nm 时, 复合光栅激发的 SPR 曲线和待测物折射率的变化如图 5(a) 所示, 待测物折射率从 1 增大到 1.05 时, 两个共振模式  $M_1(1, 0)$  和  $M_2(1, 0)$  对应的共振波长分别向长波长方向移动了 48.2 nm 和 48.4 nm, 对应的折射率灵敏度分别为 1205.0 nm/RIU 和 1210.0 nm/RIU, 平均半高峰宽分别为 0.6 nm 和 0.9 nm, 品质因数分别为 1295.4 和 762.3. 如图 5(b) 所示, 两共振模式对应的共振波长与待测物折射率同样具有良好的线性关系, 线性相关系数为 1. 因此, 当双光栅相对位移量为 100 nm 时, 复合光栅也具备优异的传感特性.

## 5 结 论

在单金属光栅的基础上构建了一种复金属材料光栅, 通过破坏光栅结构的对称性, 实现了共振模式的分裂. 当双光栅的相对位移量逐渐增大时, 分裂的两个模式共振深度逐渐减小且共振模式向相反的方向移动; 最后当双光栅合并为单光栅时, 恢复了光栅的对称性, 两个共振模式重新合为一个共振模式. 因此, 破坏器件结构

原有的对称性, 可以获得一种异常的现象. 基于复合结构光栅的 SPR 传感器具有优越的性能, 当  $\Delta X = 0$  时, 在给定光栅结构参数下, 折射率灵敏度为 1207.5 nm/RIU, 品质因数高达 1290.7; 当  $\Delta X = 100$  nm 时, 在相同的光栅结构参数下, 两共振模式  $M_1(1, 0)$  和  $M_2(1, 0)$  对应的折射率灵敏度分别为 1205.0 nm/RIU 和 1210.0 nm/RIU, 品质因数分别为 1295.4 和 762.3. 后续的工作将基于此复合光栅研究结构参数对传感器性能的影响以及在红外、太赫兹波段实现共振模式的分裂.

## 参考文献

- [1] Zhang T H, Yin M R, Fang Z Y 2005 *Physics* **34** 909 (in Chinese) [张天浩, 尹美荣, 方哲宇 2005 物理 **34** 909]
- [2] Liu J, Zhong X L, Li Z Y 2014 *Chin. Phys. B* **23** 047306
- [3] Li S Q, Ye H A, Liu C Y, Dou Y F, Huang Y 2013 *Chin. Phys. B* **22** 077302
- [4] Jindal K, Tomar M, Katiyar R S, Gupta V 2013 *Opt. Lett.* **38** 3542
- [5] Lin K Q, Lu Y H, Chen J X, Zheng R S, Wang P, Ming H 2008 *Opt. Express* **16** 18599
- [6] Perrotton C, Westerwaal R J, Javahiraly N, Slaman M, Schreuders H, Dam B, Meyrueis P 2013 *Opt. Express* **21** 382
- [7] Hong X, Du D D, Qiu Z R, Zhang G X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 7219 (in Chinese) [洪昕, 杜丹丹, 裘祖荣, 张国雄 2007 物理学报 **56** 7219]

- [8] Wu Y H, Hao P, Zhang P 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6532 (in Chinese) [吴一辉, 郝鹏, 张平 2010 物理学报 **59** 6532]
- [9] Qi Z M, Zhang Z, Liu Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 060703 (in Chinese) [祁志美, 张喆, 柳倩 2013 物理学报 **62** 060703]
- [10] Zhang H Y, Yang L Q, Meng L, Nie J C, Ning T Y, Liu W M, Sun J Y, Wang P F 2012 *Chin. Phys. B* **21** 020601
- [11] Yoon K H, Shuler M L, Kim S J 2006 *Opt. Express* **14** 4842
- [12] Cai D B, Lu Y H, Lin K Q, Wang P, Ming H 2008 *Opt. Express* **16** 14597
- [13] Dhawan A, Canva M, Vo-Dinh T 2011 *Opt. Express* **19** 787
- [14] Leong H S, Guo J P 2011 *Opt. Lett.* **36** 4764
- [15] Alleyne C J, Kirk A G, McPhedran R C, Nicorovici N A P, Maystre D 2007 *Opt. Express* **15** 8163
- [16] Guo J P, Leong H S 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 241115
- [17] Xu D H, Zhang K, Shao M R, Wu H W, Fan R H, Peng R W, Wang M 2014 *Opt. Express* **22** 25700
- [18] Hong M H, Shi L N, Li H L, Du Y C, Wang Z Q, Weng Y C, Li D M 2012 *Opt. Commun.* **285** 5480
- [19] Ordal M A, Long L L, Bell R J, Bell S E, Bell R R, Alexander Jr R W, Ward C A 1983 *Appl. Opt.* **22** 1099

## Split modes of composite metal grating and its application for high performance gas sensor\*

Sun Xiao-Liang Chen Chang-Hong<sup>†</sup> Meng De-Jia Feng Shi-Gao Yu Hong-Hao

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

( Received 16 December 2014; revised manuscript received 4 March 2015 )

### Abstract

To achieve the surface plasmon resonance (SPR) mode splitting in infrared wavelength band, and to improve the figure-of-merit (FOM) of grating based SPR sensor, in this article we present a new composite grating structure, which consists of double metal gratings, and study the gas sensing performance. Split modes of SPR in composite metal grating are observed by using the finite difference time domain method. The original structure symmetry is broken and changed with increasing relative displacement between the double gratings, as a result, the resonant modes move to opposite directions. Calculated electric field distribution of the two separate resonant modes displays two different degrees of coupling effect between the double gratings. When the relative displacement is further increased till the double gratings are connected to form a new symmetrical single grating, the separate resonant modes will merge into another single resonant mode. If the refractive index of analyte ( $n_a$ ) is in a range  $1.01 \leq n_a \leq 1.05$  and the relative displacement of double gratings is zero, the wavelength sensitivity based on composite metal grating gas sensor reaches 1207.5 nm/RIU (per refractive index of unit) and the FOM is obtained to be 1290.7, while the relative displacement of the double gratings is 100 nm, for the double split modes the wavelength sensitivities are 1205.0 nm/RIU and 1210.0 nm/RIU, respectively, and the corresponding FOMs are 1295.4 and 762.3. Therefore, the high FOM of the composite grating based on SPR sensor possesses great potential applications in biochemical sensing.

**Keywords:** surface plasmon resonance, composite grating, mode splitting, gas sensor

**PACS:** 73.20.Mf, 07.85.Fv, 78.20.Ci, 42.81.Pa

**DOI:** 10.7498/aps.64.147302

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61176064).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [ch\\_chen@hust.edu.cn](mailto:ch_chen@hust.edu.cn)