

基于 RCWA 方法设计的甲醛传感器的研究

黄子吉^{1,2}, 白忠臣^{1,2}, 任哲毅^{1,2}, 王 宝^{1,2}, 陆安江¹

(1. 贵州大学 大数据与信息工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州省光电子技术及应用重点实验室, 贵州 贵阳 550025)

摘 要:针对日常生活中甲醛损害人们健康的问题,该文采用严格耦合波分析(RCWA)法设计了一种能快速、高精度实时检测甲醛溶液浓度的光学传感器。该传感器以多孔二氧化锆(ZrO_2)介孔材料作为甲醛的承载单元, TiO_2 和 SiO_2 光栅分别作为波导层和光耦合层构成的层状复合结构。利用 RCWA 法计算了该传感器的透射光谱,建立了透射共振峰波长与待测甲醛溶液浓度间的关系模型,并分析了其传感特性。结果表明,该传感器具有较高的灵敏度和良好的重复稳定性,品质因数 $Q=1\ 261$,灵敏度可达 $0.101\ \text{nm}/\%$,并可实现对待测甲醛溶液浓度的实时动态监测。

关键词:光学传感器;甲醛溶液;严格耦合波分析法(RCWA);透射光谱;传感特性

中图分类号:O439;TP212.14

文献标识码:A

DOI:10.11977/j.issn.1004-2474.2018.03.020

Study on Formaldehyde Sensor Based on RCWA Method

HUANG Ziji^{1,2}, BAI Zhongchen^{1,2}, REN Zheyi^{1,2}, WANG Bao^{1,2}, LU Anjiang¹

(1. College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Key Lab of Optoelectronic Technology and Application Guizhou Province, Guiyang 550025, China)

Abstract: Aiming at the problem that the formaldehyde damages human health in daily life, an optical sensor capable of detecting the concentration of formaldehyde solution rapidly and accurately in real time is designed by using the rigorous coupled wave analysis (RCWA) method. The sensor uses the porous zirconia (ZrO_2) mesoporous material as the bearing unit of formaldehyde, and the titanium dioxide (TiO_2) and silicon dioxide (SiO_2) gratings act as a layered composite structure composed of a waveguide layer and an optical coupling layer respectively. The transmission spectrum of the sensor is calculated by RCWA method. The relationship model between the wavelength of the transmission resonance peak and the concentration of the formaldehyde solution to be measured is established and its sensing characteristics are analyzed. The results show that the sensor has high sensitivity and good repeatability, the quality factor Q is 1 261, the sensitivity is up to $0.101\ \text{nm}/\%$, and the real-time dynamic monitoring of the concentration of formaldehyde solution can be realized.

Key words: optical sensor; formaldehyde solution; rigorous coupled wave analysis (RCWA) method; transmission spectrum; sensing characteristic

0 引言

甲醛是一种无色、有刺激性气味的气体,对眼、鼻子会产生刺激作用。甲醛常存在于白酒、饮料及食品等生活用品中。科学研究发现,甲醛会对人体的多个系统造成损害,诱使人体产生多种疾病。吸入过量的甲醛会有致癌的风险,从而引起人们的广泛关注^[1-3]。因此,对日常生活环境中甲醛含量的

检测很重要。常用的甲醛检测法有分光光度法、色谱法及电化学分析法等,但这些检测法需昂贵的设备和复杂的前处理过程,不能广泛应用。本文设计了一种简便易行,花费低,且具高灵敏度、快速实时高效的光谱学方法测定甲醛的含量,特别是微量含量的测试,已成为当前快速检测领域的研究热点^[4-7]。

收稿日期:2017-06-21

基金项目:国家科技支撑计划基金资助项目(2015BAK28B02);国家国际合作专项基金资助项目(2014DFA00670);贵州省科技重大专项基金资助项目(黔科合重字[2016]3022号)

作者简介:黄子吉(1991-),女,贵州都匀人,硕士,主要从事光电子技术应用方面的研究。E-mail:429561442@qq.com。通信作者:陆安江(1978-),男,副教授,博士,主要从事光电子技术应用方面的研究。E-mail:39146565@qq.com。

光学传感器是依据光学调制原理进行测量的,通过检测待测样本的折射率,研究其光谱信息变化来实现对待测样本浓度和组成成分的检测。因其具有测量精确度高,实时、受干扰小,高速度传输,可阵列化等优点,广泛应用于环境监测、食品安全和生物检测科技等领域^[8-12]。

波导耦合光栅是一种复合的结构,主要由基底层、波导层及光栅层组成^[13-14],且与传统的微加工工艺兼容,易于实现阵列化等。其基本原理是当一束光因光栅衍射调制后而进入到波导层,形成导模后在波导中传播,由于其基底层与光栅层的非对称性,经基底层后,携带了基底的折射率信息,又再一次被衍射产生多束衍射光而分别从光栅层和基底层反射和透射,在满足一定条件下实现反射或透射共振,而无损失地出射,即在透射光谱形成窄带消带信号。这解决了宽光谱检测中无法提高灵敏度的问题。由于波导耦合光栅优良的表面微结构及独特的角分辨光谱学响应特性,常用于生物传感、光学偏振、窄带滤波等领域^[15-19]。

本文采用具有良好的热稳定性和机械稳定性,以及良好吸附性的多孔二氧化锆(ZrO_2)作为传感器的基底待测样本的承载单元,使电磁波与待测物更充分地接触,来提高检测的灵敏度与精确性。因此,多孔 ZrO_2 和波导耦合光栅结合应用到光学传感器中,将是优化光学传感器性能的新方向。

1 光学传感器结构与理论分析

1.1 光学传感器结构

如图 1 所示,光学传感器的结构由下至上依次是多孔 ZrO_2 检测单元(基底层)、波导层和光栅层。基底层和波导层的折射率分别为 n_a 和 n_b ,其厚度均为 b 。光栅层的折射率为 n_c ,厚度为 b ,光栅周期为 μ ,对于光栅,占空比 f 是凸起部分与空着部分的长度比值,且基底层、波导层和光栅层的折射率满足 $n_b > n_c$, $n_b > n_a$ 。基底层采用的多孔 ZrO_2 可以将其近似看作一种 ZrO_2 与空气孔混合分布的介孔材料,不同孔隙率的多孔 ZrO_2 具有不同的折射率,当在多孔 ZrO_2 中加入待测甲醛溶液后,待测甲醛溶液取代了多孔 ZrO_2 中的空气,引起多孔 ZrO_2 层有效折射率的改变,所以,通过检测多孔 ZrO_2 等效折射率的变化,可高效、准确地检测甲醛溶液浓度。

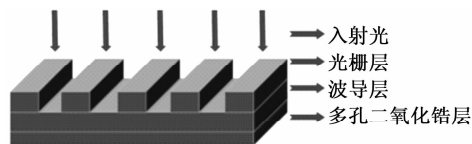


图 1 光学传感器的结构示意图

1.2 理论分析

1.2.1 严格耦合波的光学传输特性

如图 2 所示,当一束光(P)以一定角度 α 入射到光栅层,一部分光在入射媒介处直接反射和透射,形成反射光(R)和透射光(T),而一部分光因光栅的衍射效应在波导层多次发生衍射,如图中 M1、M2、M3 所示,即为光的次级衍射。当衍射光沿着反射光的方向射出时,刚好与直接发射光干涉相长,这会在该结构的反射光谱中出现一个波峰,在透射光谱中出现一个波谷,这种现象就是波导光栅结构的共振现象^[20],该传感器所得的光谱特性图如图 3 所示。

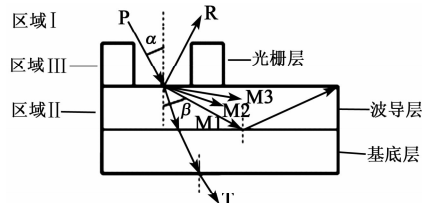


图 2 波导光栅传播光路图

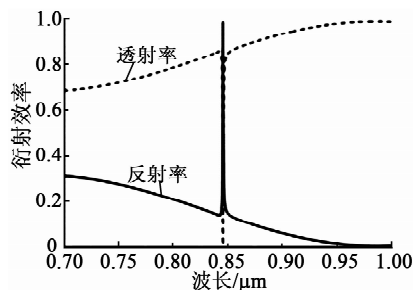


图 3 波导耦合光栅共振的光谱特性图

TE 波入射时,根据此传感器的透射电磁场分布,可求得传感器的各级衍射率。将其求和定义为该传感器的衍射率,在透射方向观察,则为透射率,反之为反射率。

首先,将光栅层材料的介电常数按傅里叶级数展开为

$$\epsilon(x) = \sum_h \epsilon_h \exp\left(j \frac{2\pi h x}{\mu}\right) \quad (1)$$

式中: j 为虚单位根; μ 为光栅的周期; ϵ_h 为第 h 级介电常数分量, $h=0, 1, 2, \dots$ 。

入射光束的电场矢量仅在 y 方向有分量,可写为

$$E_{\text{inc}} = E_{\text{incy}} = \exp[-j k_0 n (\sin \alpha x + \cos \alpha z)] \quad (2)$$

式中: k_0 为入射光束在真空中的波矢; n 为区域 I 均匀介质的折射率。

区域 I、II 中电场矢量也将只有 y 分量, 分别为

$$E_{\text{I},y} = E_{\text{incy}} + \sum_i R_i \exp[-j(k_{xi}x + k_{I,zi}z)] \quad (3)$$

$$E_{\text{II},y} = \sum_i T_i \exp\{-j[k_{xi}x + k_{\text{II},zi}(z-b)]\} \quad (4)$$

$$k_{xi} = -k_0 n \sin \theta - i \frac{2\pi}{\mu} \quad (5)$$

$$k_{l,zi} = \begin{cases} + (k_0^2 n^2 - k_x^2)^{\frac{1}{2}} & k_x^2 \leq k_l^2 \\ (-k_{xi}^2 - k_0^2 n^2)^{\frac{1}{2}} & k_{xi}^2 > k_l^2 \end{cases} \quad (6)$$

$l = \text{I}, \text{II}$

光栅区的电场矢量需要通过求解麦克斯韦方程来求得, 通过 Gauss 消去法求得反射系数 R 和透射系数 T , 最后衍射效率定义为

$$DE_{r1} = \text{Re}\left(\frac{k_{\text{I},zi}}{k \cos \theta}\right) |R_i|^2 \quad (7)$$

$$DE_{ti} = \text{Re}\left(\frac{k_{\text{II},zi}}{k \cos \theta}\right) |T_i|^2 \quad (8)$$

式中: R_i 、 T_i 分别为归一化的电场反射振幅和透射振幅; θ 为入射光与 z 轴的夹角, 即 $\theta = 1 - \alpha$ 。

1.2.2 折射率传感机理分析

当光入射到波导耦合光栅传感结构时, 由于光栅的存在, 部分入射光由于光栅的衍射会进入到波导中, 从而激发波导的传播模式, 光栅的衍射行为可通过光栅方程来描述:

$$\mu(n_e \sin \alpha \pm n_b \sin \beta) = m\lambda \quad (9)$$

$(m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$

式中: λ 为入射光波长; β 为衍射角; n_e 为空气折射率; m 为衍射级次。

以 TE 光入射到该结构, 当光波入射到波导和待测环境交界面处发生全反射时, 电磁场能量不会在界面处立即衰减为 0, 而是渗透到待测环境一定的深度, 同时沿着界面传播一定距离再返回到波导中沿着反射光方向射出, 从而导致实际的反射路径与几何光学路径相比有一定的偏移, 如图 4 所示。在波导和待测环境交界面处全反射产生的古斯汉森位移 D_s 为

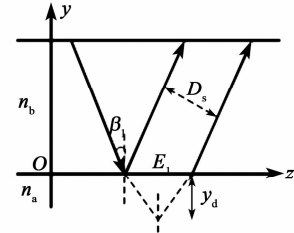


图4 古斯汉森位移示意图

$$D_s = \frac{\lambda n_b \sin \beta}{\pi \sqrt{n_b^2 \sin^2 \beta - n_a^2}} \quad (10)$$

根据光的折射定律, 光波沿 z 方向的位移量为

$$E_1 = \frac{D_s}{\cos \beta} = \frac{\lambda n_b \tan \beta}{\pi \sqrt{n_b^2 \sin^2 \beta - n_a^2}} \quad (11)$$

同理, 在波导和光栅交界面处全反射产生的沿 z 方向的位移量为

$$E_2 = \frac{D_s}{\cos \beta} = \frac{\lambda n_b \tan \beta}{\pi \sqrt{n_b^2 \sin^2 \beta - n_e^2}} \quad (12)$$

由于光波在波导层上、下界面往返一个周期的总相位差包括波导上界面处全反射的相位差、波导下界面处发生全反射的相位差和在波导内传输光程的相位差, 因此, 当波导耦合光栅发生共振时, 需满足相位条件:

$$2k_b d_2 + \varphi_1 + \varphi_2 = 2M\pi \quad (M = 0, 1, 2, \dots) \quad (13)$$

式中: $2k_b d_2 = 2\pi n_b d_2 \cos \beta / \lambda$ 为光波在波导层中传播一个周期光程的相位差; $\varphi_1 = E_1 \times 2\pi / \lambda$ 为在波导下界面全反射时引起的相位差; $\varphi_2 = E_2 \times 2\pi / \lambda$ 为在波导上界面全反射时引起的相位差; M 为波导层中所能传播的波导模式阶数。

因此, 当波导耦合光栅结构发生共振时相位条件满足:

$$\frac{2\pi n_b d_2 \cos \beta}{\lambda} + \frac{2n_b \tan \beta}{\sqrt{n_b^2 \sin^2 \beta - n_a^2}} + \frac{2n_b \tan \beta}{\sqrt{n_b^2 \sin^2 \beta - n_e^2}} = 2M\pi \quad (14)$$

综合式(9)、(14)可看出, 当待测环境折射率 n_e 增加时, 共振峰波长 λ 也随之增大, 从而可建立待测样本折射率和共振峰波长之间的关系模型。通过观测共振峰波长的漂移来实现对待测样本折射率的动态监测。

2 数值模拟与分析

2.1 传感器的结构分析

光学传感器(见图1)基底层等效折射率 $n_{\text{ksl}} = 2.17$ 。波导层的 $n_b = 2.01$, 光栅层的 $n_e = 1.45$ 。

选取材料不变、结构大小不同的 5 种光学传感器进行比较, $b=100\text{ nm}$ 、 120 nm 、 130 nm 、 140 nm 、 150 nm , 对应的 $\mu=400\text{ nm}$ 、 480 nm 、 520 nm 、 560 nm 、 600 nm , $f=0.5$ 。采用 TE 偏振光从空气垂直入射到该传感结构上, 通过仿真软件进行数值模拟, 得到 5 种结构大小不同的透射光谱图, 如图 5 所示。

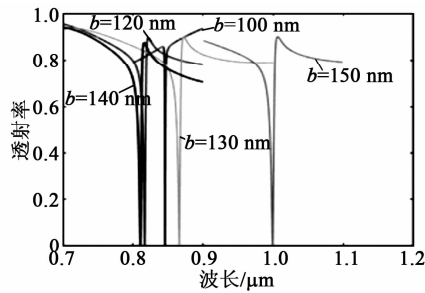


图 5 不同结构大小下的透射率对比图

2.2 传感器的品质因数 Q 值分析

多孔 ZrO_2 的光学特性由其物理参数和孔隙比决定。不同孔隙率的多孔 ZrO_2 具有不同的折射率, 高孔隙率对应低折射率, 低孔隙率对应高折射率。在其未受外界环境影响前, 由 Bruggeman 介电函数近似模型^[21] 可知, 单层多孔 ZrO_2 的 n_{ks1} 可表示为

$$(1-\rho)\frac{n_{\text{ZrO}_2}^2-n_{\text{ks1}}^2}{n_{\text{ZrO}_2}^2+2n_{\text{ks1}}^2}+\rho\frac{n_e^2-n_{\text{ks1}}^2}{n_e^2+2n_{\text{ks1}}^2}=0\quad(15)$$

式中: n_{ZrO_2} 为 ZrO_2 的折射率; ρ 为孔隙率。

上述结构中的多孔 ZrO_2 检测单元可通过溶液-凝胶法和聚合诱导胶体聚集法(PICA 法)制备^[22], 其 $\rho=63\%$, $n_{\text{ks1}}=2.17$ 。

对图 5 中 5 种结构大小不同的光学传感器的 Q 值计算如下:

传感器的品质因数 Q 值影响传感器的检测, 增大传感器的 Q 值可减小测试的电压信号的带宽, 有利于传感器的信号检测, 所以, 传感器的 Q 值越大, 则传感器的检测性能越好^[23-24]。

传感器的 Q 为

$$Q=\frac{\lambda}{F_h}\quad(16)$$

式中 F_h 为透射峰的半高全宽。

对图 5 中 5 种结构大小不同的光学传感器的 Q 值计算如表 1 所示。

表 1 不同结构大小下的品质因数对比

b/nm	μ/nm	λ/nm	F_h/nm	Q
100	400	845.0	0.67	1 261
120	480	702.5	2.97	237
130	520	866.1	4.20	206
140	560	810.5	4.60	176
150	600	999.3	5.00	199

由表 1 可看出, 当光学传感器的厚度 $b=100\text{ nm}$ 、周期 $\mu=400\text{ nm}$ 时, 该传感器的 $Q=1\,261$, 在 5 组 Q 值中最大, 所以, 本文选用厚度 $b=100\text{ nm}$ 的传感器结构, 且该结构的透射谱如图 6 所示。

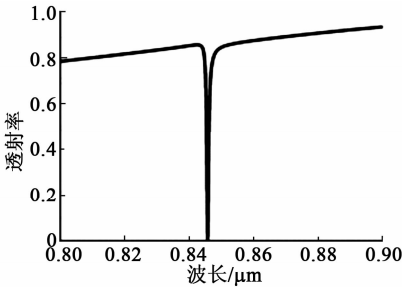


图 6 结构大小 $b=100\text{ nm}$ 透射光谱

2.3 折射率传感特性分析

将多孔 ZrO_2 置于一定浓度的待测甲醛溶液中, 由于多孔 ZrO_2 特有的量子海绵状微结构, 待测甲醛溶液可以通过扩散作用到达多孔 ZrO_2 内部, 当平衡压力达到饱和气压时, 会在多孔 ZrO_2 层发生毛细冷凝作用, 达到最终平衡。附着有机物折射率和体积分数的改变, 多孔 ZrO_2 的有效折射率也会发生相应的改变。由 Bruggeman 介电函数近似模型可得, 多孔 ZrO_2 的有效折射率 n_{ks2} 可表示为

$$(1-\rho)\frac{n_{\text{ZrO}_2}^2-n_{\text{ks2}}^2}{n_{\text{ZrO}_2}^2+2n_{\text{ks2}}^2}+(\rho-V)\frac{n_e^2-n_{\text{ks2}}^2}{n_e^2+2n_{\text{ks2}}^2}+V\frac{n^2-n_{\text{ks2}}^2}{n^2+2n_{\text{ks2}}^2}=0\quad(17)$$

式中: n 和 V 分别为待测甲醛溶液的折射率和多孔 ZrO_2 内凝聚待测甲醛溶液的体积分数。

选用不同体积浓度的甲醛溶液为待测样本对其进行模拟仿真, 由等效折射率模型可知, 不同体积浓度下的甲醛溶液所对应的折射率 n 满足以下关系:

$$\log_{10} n=\frac{V_1}{V_1+V_2}\times\log_{10} n_m+\frac{V_2}{V_1+V_2}\times\log_{10} n_w\quad(18)$$

式中: V_1 为甲醇溶液的体积; V_2 为水的体积; n_m 为甲醛溶液在不同浓度下所对应的折射率, $n_w=$

1.375 5;水的折射率 $n_w=1.333$ 。

选取体积浓度 $w=1\%$ 、 3% 、 5% 、 7% 、 9% 、 11% 和 13% 的甲醛溶液分别滴加到该传感器结构的多孔 ZrO_2 检测区域中,由于待测甲醛溶液进入到多孔 ZrO_2 检测区域后,取代了多孔 ZrO_2 中的空气,引起多孔 ZrO_2 层有效折射率的变化。根据理论分析可知,当多孔 ZrO_2 检测单元折射率增大时,共振峰波长也会随之增大。通过对数值进行分析,最终得到不同浓度下的甲醛溶液所对应的共振峰波长漂移情况,如图7所示。

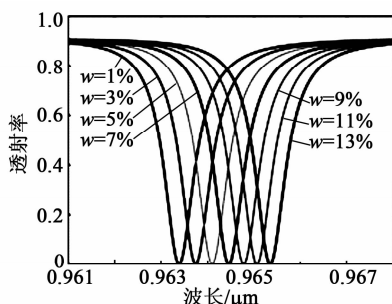


图7 不同浓度甲醛溶液共振峰波长漂移

由图7可知,通过观察甲醛浓度从 $w=1\%$ 到 $w=3\%$ 的变化,共振峰中心波长从 942.637 nm 漂移到了 942.42 nm ,由此可见,此结果与理论推导相吻合。

选取8组不同体积浓度的甲醛溶液与共振波长的关系数据进行拟合,结果如图8所示,拟合直线关系为 $\lambda=942.637-0.101w$,相关系数为 0.9979 。由图可看出,共振波长随着待测甲醛溶液浓度成线性变化,证明了该传感器结构的有效性。因此,该传感器的灵敏度为

$$S = \frac{\Delta\lambda}{\Delta w} = 0.101 (\text{nm}/\%) \quad (19)$$

式中: $\Delta\lambda$ 为所有波长的差值; Δw 为所有体积浓度的差值。

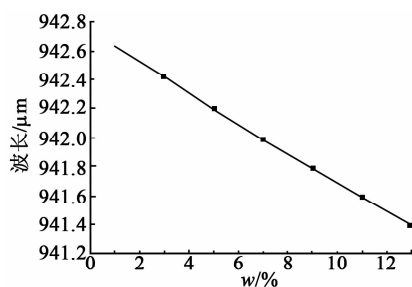


图8 浓度与波长线性拟合关系

综上所述,该传感器结构表现出了高灵敏度的优势,共振波长和待测甲醛溶液间呈良好的线性关

系,因此,该传感器结构具有良好的稳定性,通过观测共振波长的漂移即可实现对待测甲醛溶液浓度的实时动态监测。

3 结束语

本文设计了一种能快速、高精度地实时检测甲醛溶液浓度的光学传感器,采用严格耦合波分析(RCWA)法计算了该传感器的透射光谱,建立了透射共振峰波长与待测甲醛溶液浓度间的关系模型,并分析了其传感特性。结果表明,该传感器结构表现出了高灵敏度,灵敏度为 $0.101\text{ nm}/\%$ 。该传感器结构具有良好的稳定性,共振波长与待测甲醛溶液间成良好的线性关系。

通过观测共振波长的漂移可实现对待测甲醛溶液浓度的实时动态监测。

参考文献:

- [1] 钟义林,陈希尧,唐巍飏,等.一种简便取样甲醛测试仪测定室内空气中甲醛含量的可行性研究[J].中国建材科技,2017,26(2):1-3.
ZHONG Yilin, CHEN Xiyao, TANG Weibiao, et al. Feasibility study on the detection of formaldehyde content in indoor air with a kind of convenient-sampling formaldehyde tester[J]. China Building Materials Science & Technology, 2017, 26(2):1-3.
- [2] TUNSARINGKARNT, PRUEKSASIT T, KIT-WATTANAWONG M, et al. Cancer risk analysis of benzene, formaldehyde and acetaldehyde on gasoline station workers[J]. Journal of Environmental Engineering & Ecological Science, 2012, 5(2):757-766.
- [3] MILLER F J, KIMBELL J S, PRESTON R J, et al. The fractions of respiratory tract cells at risk in formaldehyde carcinogenesis[J]. Inhalation Toxicology, 2011, 23(12): 689-706.
- [4] 万才超,焦月,李正伟.室内空气中甲醛含量检测方法研究现状[J].当代化工,2014(2):310-312.
WAN Caichao, JIAO Yue, LI Zhengwei. Research progress in analysis methods for formaldehyde content in indoor air[J]. Contemporary Chemical Industry, 2014(2):310-312.
- [5] 贡雪芃,黄丽华,施春阳.分光光度法测定甲醛甲酚溶液中甲醛的含量[J].医药导报,2011,30(11):1493-1495.
GONG Xuepeng, HUANG Lihua, SHI Chunyang. Measurement of formaldehyde in formaldehyde and cresol solution by spectrophotometry[J]. Herald of

- Medicine, 2011, 30(11): 1493-1495.
- [6] SUN Y, YANG S, YANG B. Problems discussion in operation of acetylacetone spectrophotometric determination of free formaldehyde content of water-based paint[J]. Guangdong Chemical Industry, 2011, 38(224):133-135.
- [7] DAI Z R, LIN M F, ZHANG C X. Rapiddetection of formaldehyde content in fresh milk by gas chromatography[J]. Food Research & Development, 2015;136(24):154-156.
- [8] 于英. 传感器技术在环境检测中的应用研究进展[J]. 工程技术, 2016(3):152-152.
YU Ying. Application and research progress of sensor technology in environmental testing [J]. Engineering Technology, 2016(3):152-152.
- [9] 夏俊, 程诚. 传感器技术在环境检测中的应用研究进展[J]. 科研, 2017(3):24.
- [10] ABEL T, UNGERBÖCK B, KLIMANT I, et al. Fast responsive, optical trace level ammonia sensor for environmental monitoring[J]. Chemistry Central Journal, 2012, 6(1):124.
- [11] SINGH C B, JAYAS D S, CALDWELL D G. Optical sensors and online spectroscopy for automated quality and safety inspection of food products. [J]. Robotics & Automation in the Food Industry, 2013;111-129.
- [12] ANJIN L I U, HOFMANN W, BIMBERG D. Optical sensor for detecting chemical, biochemical or biological substances;9693715[P]. 2017-07-04.
- [13] 尤劭, 黄战华, 蔡怀宇. 基于严格耦合波理论的新型耦合光栅分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2014(3):262-266.
YOU Meng, HUANG Zhanhua, CAI Huaiyu. Numerical analysis of a novel coupling grating based on RCWA [J]. Journal of Tianjin University, 2014 (3): 262-266.
- [14] 陆安江, 白忠臣, 张正平, 等. 基于光栅波导共振耦合的传感器特性研究[J]. 压电与声光, 2016, 38(2): 195-198.
LU Anjiang, BAI Zhongchen, ZHANG Zhengping, et al. Research of biosensor characteristics based on grating waveguide coupling resonance angle[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2016, 38(2):195-198.
- [15] CHEN Z, HOOPER I R, SAMBLES J R. Photonic bandgaps for grating-coupled waveguide modes with a silver tunnel barrier [J]. New Journal of Physics, 2013, 9(9):251.
- [16] SANG T, WANG Y, LI J, et al. Bandwidth tunable guided-mode resonance filter using contact coupled gratings at oblique incidence[J]. Optics Communications, 2017, 382:138-143.
- [17] WEISS S M, WEI X. Guided mode biosensor based on grating coupled porous silicon waveguide[J]. Optics Express, 2011, 19(12):11330-9.
- [18] WEI X, WEISS S M. Gratingcoupled waveguide biosensor based on porous silicon [J]. Mater Res Soc Symp, 2011, 1301:219-224.
- [19] 陆安江, 白忠臣, 肖伟, 等. 基于 MEMS 微镜的光栅波导角度调制生物传感器设计与研究[J]. 中国激光, 2016(4):199-205.
LU Anjiang, BAI Zhongche, XIAO Wei, et al. Design and research of biosensor characteristics based on grating waveguide angle modulation with MEMS micro-mirror [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016 (4): 199-205.
- [20] 孔伟金, 郑併斌, 云茂金, 等. 基于导模共振效应三基色窄带滤光片的研究[J]. 光学学报, 2011, 31(10): 49-52.
KONG Weijin, ZHENG Bingbin, YUN Maojin, et al. Guided-mode resonance filter with narrow waveband for three primary colors[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(10):49-52.
- [21] ZHANG D, CHERKAEV E, LAMOUREUX M P. Stieltjes representation of the 3D Bruggeman effective medium and Padé approximation[J]. Applied Mathematics & Computation, 2011, 217(17):7092-7107.
- [22] 万才超, 焦月, 李正伟. 室内空气中甲醛含量检测方法研究现状[J]. 当代化工, 2014(2):310-312.
- [23] 杨芳, 梁庭, 李凯丽, 等. Q 值对无源压力传感器无线信号传输的影响[J]. 微纳电子技术, 2012, 49(3): 162-165.
YANG Fang, LIANG Ting, LI Kaili, et al. Influence of Q-factor on wireless signal transmission of passive pressure sensors[J]. Micronanoelectronic Technology, 2012, 49(3): 162-165.
- [24] SONG J, LIN J, TANG J, et al. Fabrication of an integrated high-quality-factor (high-Q) optofluidic sensor by femtosecond laser micromachining[J]. Optics Express, 2014, 22(12):14792.