

基于带吸收介质表面缺陷光子晶体的高通量检测

陈 颖 卢 波 范卉青

(燕山大学电气工程学院, 测试计量技术及仪器河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 提出了一种带有吸收介质的表面缺陷光子晶体结构, 将表面波谐振原理和微孔板技术相结合, 实现了样本溶液信息的高通量检测。根据分层传输矩阵法和 Goos-Hänchen 理论分析其折射率传感机理, 建立谐振角度与样本折射率变化的理论模型。结合微孔板和角度调制, 在同一扫描周期中分别对不同传感区域的待测物实现光谱特性分析。结果表明, 待测样本浓度变化将引起谐振角度的变化, 进而使反射谱中的缺陷峰值波长产生漂移, 并且单个周期角度扫描就可实现多个待测样本溶液信息的同时监测。该方法对高通量检测系统的设计具有一定的理论和技术参考价值。

关键词 传感器; 表面缺陷光子晶体; 吸收介质; 表面波谐振; 高通量检测

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1014002

High Throughput Detection Based on Surface Defect Photonic Crystal with Absorbing Medium

Chen Ying Lu Bo Fan Huiqing

(Hebei Province Key Laboratory of Test/Measurement Technology and Instrument, School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract A surface defect photonic crystal with absorbing medium is proposed to achieve the high throughput detection of sample solution information combining the surface wave resonance theory and microwell plate technique. According to the layered transmission matrix method and the Goos-Hänchen theory, the refractive index sensing mechanism is analyzed and the theoretical model between the resonance angle and the refractive index change of the detected sample is proposed. Combining the microwell plate technique and the angle modulation method, the spectrum analysis for different detected samples in different sensing areas can be performed respectively in the same scanning period. The simulation results show that the change of the concentration for the detected sample can vary the resonant angle, which makes the shift of the resonant defect peak wavelength in the reflective spectrum. In addition, the simultaneous detection of multiple sample resolution information can be obtained by angle scanning in single period. The method can provide certain theoretical and technical references for the design of high throughput detection system.

Key words sensors; surface defect photonic crystal; absorbing medium; surface wave resonance; high throughput detection

OCIS codes 280.4788; 160.5298; 240.6690; 310.3915; 120.1880

1 引 言

近年来, 光学生物传感技术在生命科学、污染防治、医疗诊断、药物开发和食品安全等领域得到了广泛的研究和关注。目前的研究工作主要集中在

表面等离子体共振 (SPR) 传感器^[1-3] 和光子晶体传感器^[4-7] 上, 以上两类传感器皆是通过光学折射率调制的方法来实现样本溶液信息的检测。其中, SPR 传感器具有特异性好和响应速度快等优点, 利

收稿日期: 2014-04-24; **收到修改稿日期**: 2014-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(61201112, 61172044)、河北省自然科学基金(F2013203250, F2012203169)、中国博士后科学基金(2012M510765)

作者简介: 陈 颖(1980—), 女, 博士, 副教授, 主要从事光子晶体应用技术方面的研究。E-mail: chenying@ysu.edu.cn

用 SPR 效应可分析表面层与生物分子间的相互作用,从而得到了广泛应用。然而,由于 SPR 传感器表层金属膜具有较大的光吸收系数,其品质因数(Q 值)较低^[8],使得传感器成像分辨率较低,这就需要多次测量分析才能提高测量精度,增加了检测过程的复杂性。同时,目前的一些 SPR 传感器仅能完成单通道检测,从而检测通量有限。因此,设计出高灵敏度和高 Q 值的传感器进而实现高通量检测,已成为国内外相关研究的热点和难点。

针对上述问题,国内外研究学者已经开展了卓有成效的研究工作。Wong 等^[9]提出了一种基于偏振方向引起色对比度变化的表面等离子体成像生物传感阵列,在激发表面等离子时,p 偏振和 s 偏振光之间产生相位差,通过研究相位差值引起的光谱特性变化,来达到测量多个溶液浓度的目的。Song 等^[10]提出了一种基于波导耦合型的 SPR 生物传感器,对传感器结构进行优化设计,并对蛋白质分子间相互作用进行高通量的检测分析。Derbali 等^[11]设计了一个复合缺陷结构的光子晶体折射率传感,并用时域有限差分法对结构参数进行优化,提高了传感器的灵敏度特性。Yamada 等^[12]设计了全自动的自校准 pH 值检测系统,采用 pH 传感器场效应的晶体微孔板技术,能够连续测量 96 个样本。

基于以上分析,本文提出了一种带吸收介质的表面缺陷光子晶体结构,通过在其缺陷层内引入吸收介质,在反射谱中得到谐振缺陷峰;将表面波谐振原理与光子晶体的光学特性相结合,基于电磁波的全反射及其倏逝波传播形式,分析了其结构的传感机理,建立了 Goos-Hänchen 位移与样本折射率变化的关系模型。设计基于微孔板技术和角度调制原理的高通量检测平台,分析了其 CCD 成像过程,从而实现单个扫描周期内对多个不同传感区域的样本溶液的同时监测。

2 传感器芯片结构及传感器检测原理

传感器芯片是传感器的检测界面,待测样本在芯片上的变化信息可以转换成可检测的光信号,通过缺陷腔的设计,由某一特征频率的光信号及其变化来反映待测样本的变化信息。若在传感器芯片表面加入缺陷层,当电磁波通过光子晶体的周期部分入射到缺陷层后,将光波在其中发生多次反射而形成的光子晶体谐振腔称为光子晶体表面缺陷态^[13-14]。

当入射光波长和入射角满足一定条件时,光波在缺陷层与样液层界面处发生全反射,并在缺陷层

内发生谐振,但是在谐振腔内经过多次反射后最终仍将回到入射的介质当中,在反射谱中观测不到这个特征波长,从而无法有效地反映待测样本的变化信息。为了能够观测到这个特征波长及其变化,考虑在谐振腔内加入一层吸收介质,将这个特征波长经过多次反射后吸收。因此,在生物传感器芯片的设计中,提出了一种带吸收介质的表面缺陷光子晶体结构,如图 1 所示。

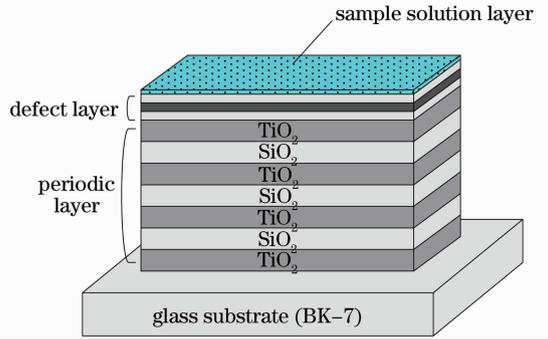


图 1 光子晶体传感器芯片结构

Fig. 1 Photonic crystal sensitive chip structure

结构设计中采用 Al_2O_3 作为吸收介质,构成由 $SiO_2-Al_2O_3-SiO_2$ 三层介质组成的缺陷腔,周期层由 TiO_2 和 SiO_2 三个周期排列组成。若选择吸收系数较大的材料(如金、银等金属膜)作为吸收介质,光波在缺陷层内经过几次反射就会被吸收介质全部吸收掉,故而无法与样液层充分接触。因此,选用吸收系数较小的 Al_2O_3 ,其吸收系数在 $0\sim 2\ \mu m$ 波长范围内约为 0.07,光波在缺陷层内实现多次反射,形成的表面波可以与样液充分作用。光波在缺陷层内产生谐振,每次反射都会有一小部分光被 Al_2O_3 吸收,从而在反射谱线的禁带中就会出现缺陷峰,如图 2 所示,其缺陷峰所对应的波长为 1414.02 nm。

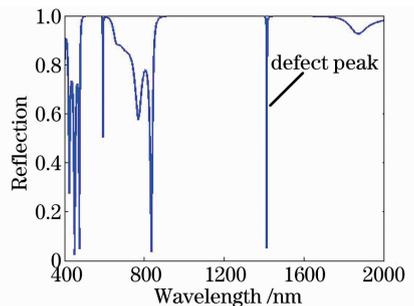


图 2 样液折射率为 1.40 时的反射光谱

Fig. 2 Reflection spectrum when the refractive index of sample is 1.40

如图 3 所示,当入射光(以 TE 波为例)以某一固定波长 λ_0 扫描入射到上述表面缺陷光子晶体时,将在缺陷层与溶液界面处发生全反射,由于电磁场

在两介质界面上满足边界连续性条件,光波会沿 z 轴方向透入到样液层波长量级的深度,并沿着界面(图3中为 x 轴方向)经过波长量级的距离后再重新返回到缺陷层,从而产生了倏逝波,其波函数方程为

$$\mathbf{E} = \mathbf{A} \exp[i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)], \quad (1)$$

而倏逝波的振幅衰减到其最大值的 $1/e$ 时的穿透深度 z_d 为

$$z_d = \left[k_c \sqrt{\sin^2 \theta_c - \left(\frac{n}{n_c} \right)^2} \right]^{-1}, \quad (2)$$

式中 k_c, θ_c, n_c 分别为入射光在缺陷层内的波数、角度和有效折射率, n 为溶液层的折射率。根据折射定律可得

$$\theta_c = \arcsin[(n_g \cdot \sin \theta) / n_c], \quad (3)$$

式中 n_g 为棱镜的折射率, θ 为入射角度。

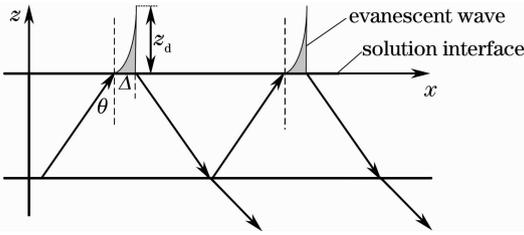


图3 全反射波相对于入射波的 Goos-Hänchen 位移
Fig. 3 Goos-Hänchen shift of the total reflection wave relative to the incident wave

由于倏逝波的作用,全反射波相对于入射波在 x 轴方向产生了位移,即为 Goos-Hänchen 位移,并伴随着入射波的相位变化。由(1)、(2)式可得,由于全反射而产生的 Goos-Hänchen 位移 Δ 为

$$\Delta = \frac{\lambda_0 \tan \theta_c}{\pi (\sin^2 \theta_c - \sin^2 \theta_i)^{1/2}}, \quad (4)$$

式中 θ_i 为界面全反射的临界角, $\theta_i = \arcsin(n/n_c)$ 。结合(3)、(4)式可得 Goos-Hänchen 相位移为

$$\Delta \varphi = \frac{\Delta \cdot 2\pi}{\lambda_0} = \frac{2n_c \tan[\arcsin(n_g \cdot \sin \theta / n_c)]}{(n_g^2 \sin^2 \theta - n^2)^{1/2}}. \quad (5)$$

光波在光子晶体的表面缺陷层传播时,把缺陷层看成一个法布里-珀罗(F-P)谐振腔,光波经多次反射产生干涉,其干涉条件为

$$2 \cdot \frac{2\pi}{\lambda_0} n_c d_c \cos \theta_c + \Delta \varphi = (2k + 1)\pi, \quad (6)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots,$$

式中 d_c 为缺陷层厚度。将(5)式代入到(6)式中即可得到谐振角度 θ 与样液折射率 n 之间的关系。由此可知,样液折射率 n 与谐振角 θ 呈正比关系。利用分层传输矩阵法分析该结构传感器角度对应的反射谱,如图4所示。可以看出,当入射光波长不变而

样液折射率分别为 1.35、1.38、1.41、1.44 时,对应的谐振角为 50.972° 、 52.669° 、 54.459° 、 56.352° 。且随着折射率的增大,缺陷峰发生明显红移,与理论推导相吻合。

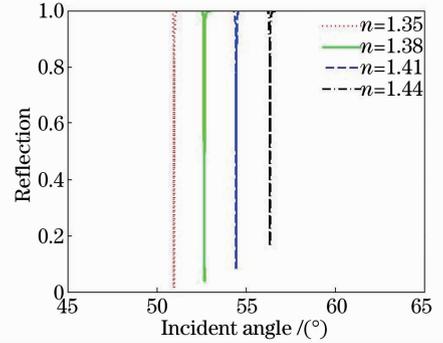


图4 样液折射率变化导致的谐振角度漂移
Fig. 4 Resonant angle shift with the change of refractive index for the samples

3 传感器高通量检测系统

3.1 系统装置

基于上述对表面缺陷光子晶体传感器的理论分析,设计了基于角度调制的检测系统,系统装置图如图5所示。系统主要包括光源部分、传感头部分和成像装置三个部分。其中,光源部分包括激光器(TSL-210V 光源,波长调节范围为 1260 ~ 1630 nm)、扩束器和起偏器(TE);传感部分包括光子晶体传感器芯片和耦合棱镜(BK-7);而成像部分则包括检偏器、成像透镜以及 CCD 检测阵列。系统设计中,分别将以上三部分固定在大转盘、固定托盘和小转盘上。

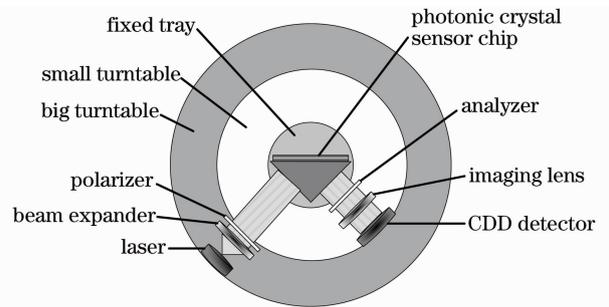


图5 高通量检测系统结构图
Fig. 5 Schematic layout chart of high throughput detection system

中心波长为 1414 nm 的激光器发出的入射光信号经过扩束器和起偏器,可以得到一束 TE 偏振模的平行光,经耦合棱镜入射到光子晶体传感器芯片上,在表面缺陷腔处与样本溶液作用后反射回来,经过检偏器和成像透镜投射到 CCD 面阵上,然后将

采集的信息传送到计算机上。通过大小转盘的转动来改变入射角度,大转盘顺时针转动的同时将小转盘逆时针转动,并且两者转速相同,从而可以保证 CCD 检测器可以在指定位置及其附近区域捕获到反射光信号。用计算机控制步进电机转动,对转盘转动角度精确控制,在其中加入一个细分驱动,可使单一脉冲角达到 0.001° ,同时使转动更加平稳,提高测量精度。通过记录步进电机转动的角度变化,以及 CCD 检测器探测到的对应角度的反射光谱信息,可以对样本溶液进行实时同步的扫描检测。

3.2 高通量检测

为了实现高通量检测,在光子晶体传感器芯片上覆盖一层微孔板,从而将检测表面划分为多个传感区域。微孔板采用 16×6 孔的 Eppendorf 条形码 U-PP 型聚丙烯微孔板,具有易于辨识、耐腐蚀、表面光泽性好等特点,易于进行滴定检测。如图 6 所示,用取样点针将不同浓度的待测样本注入不同传感区。入射光透过棱镜,在传感器芯片处与样液发生相互作用后,反射回来投射到具有 2048 pixel 的面阵 CCD 上,CCD 上也被划分成对应的多个区域,分别对应着不同的传感区,记录面阵 CCD 上接收到的光强,进行归一化处理。

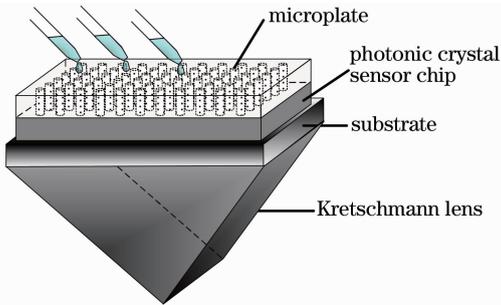


图 6 对不同传感区域的多个样本进行滴定
Fig. 6 Titration procedure for the multiple samples in different sensing areas

当入射光经过扩束器和起偏器入射到传感器芯片时,传感区域和非传感区域都会接收到入射光信号。如图 7 所示,当转盘转动到一定位置时,入射到传感区域的光信号将在传感器芯片内部产生谐振,由于吸收介质的作用,光信号在谐振腔中发生衰荡,最终只有极少部分光投射到对应的面阵 CCD 上。而入射到非传感区域的光信号不会产生谐振,大部分光波将在光子晶体传感器芯片表面层发生全反射后投射到面阵 CCD 上。因此,在 CCD 图像中,相对于光强较大的背景,将出现一个个较暗的圆点区域,便于观测其位置随样本信息变化而发生的改变。不

同浓度的样本溶液所对应的谐振角也不同,因此经过一个扫描的周期,就可以记录下各个传感区域所对应的 CCD 成像区域中光强值最小(即亮度最暗)时的入射角,从而实现了高通量检测。

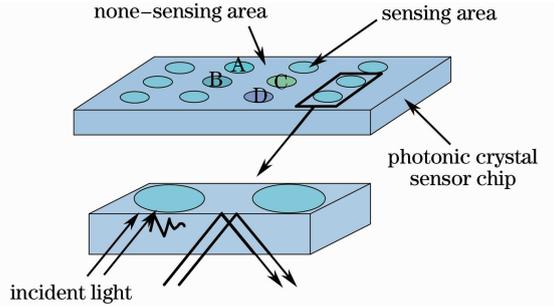


图 7 入射光分别入射到传感区域和非传感区域后的变化过程示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the changing process for the incident signal in the sensing areas and the non-sensing areas

3.3 结果分析

通过数据采集卡,记录同一扫描周期内,入射光以不同角度入射时各个 CCD 检测区域上的光强值变化,进行归一化处理后,对这些传感点分别绘制角度调制的谱线图。如图 7 所示,在传感器芯片上选取 A、B、C 和 D 四个传感区域,分别滴定不同浓度的乙二醇溶液,进行角度扫描,从而得到多通道的谱线图,如图 8 所示。当溶液体积分数分别为 40%、50%、60%、70% 时,谐振角分别为 52.334° 、 52.902° 、 53.486° 、 54.086° 。当谐振角 $\theta_r = 54.086^\circ$ 时,其半峰全宽(FWHM, θ_{FWHM})为 0.026° ,可以得到 Q 值, $Q = \theta_r / \theta_{FWHM} = 2080.23$,然后选取多个不同浓度的乙二醇溶液进行多次检测,将得到的数据进行线性拟合,如图 9 所示,得出溶液体积分数 C 与谐振角 θ 之间的关系为 $C = 0.1693 \times \theta - 8.4626$,相关系数 $R = 0.9996$ 。可以看出,乙二醇溶液浓度(即

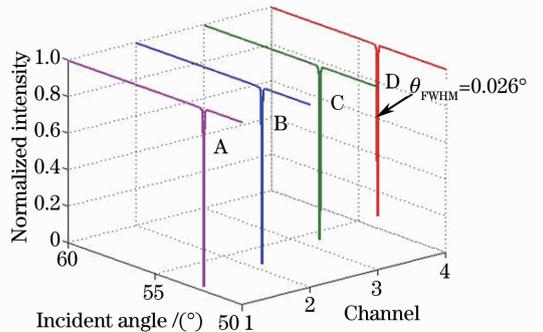


图 8 A、B、C、D 四个传感区域的多通道谱线图
Fig. 8 Multi-channel spectrum for the four sensing areas of A, B, C and D

溶液体积分数)与谐振角具有很好的线性关系,故而易于实现检测和信号解调。

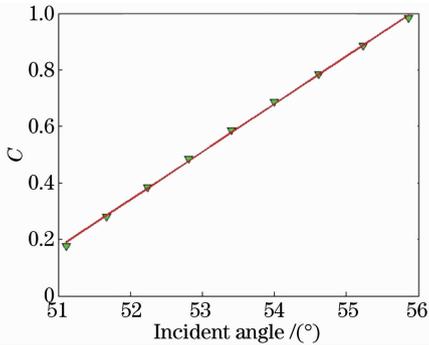


图9 样本溶液浓度与谐振角拟合关系曲线

Fig.9 Fitting curve between the sample solution concentration and the resonant angle

4 结 论

研究了一种带有吸收介质的表面缺陷光子晶体结构,表面缺陷腔可使电磁波以表面波的形式在其中传播,当入射光波长和入射角度满足一定条件时,将发生多次全反射而产生表面波谐振,腔内吸收介质的引入可使电磁波在全反射过程中发生衰荡,从而在反射谱中得到缺陷峰,其谐振角的 FWHM 仅为 0.026° ,因此该结构可获得高达 2080.23 的 Q 值,同时又避免了传统 SPR 传感器中由于激发表面等离子体而造成的能量损耗。利用微孔板技术和角度调制原理,在同一扫描周期内即可实现多个待测样本信息的同时获取,实现了高通量检测的目的。该结构可为高通量生物样本信息监测提供有效的理论和技术参考。

参 考 文 献

- 1 L S Goh, N Kumekawa, K Watanabe, *et al.*. Hetero-core spliced optical fiber SPR sensor system for soil gravity water monitoring in agricultural environments[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2014, 101: 110–117.
- 2 Wu Yingcai, Gu Zhengtian. Research on the thermo-characteristics of surface plasmon resonance spectrum[J]. *Chin Opt Lett*, 2012, 10(8) : 081301.

- 3 Wu Pinghui, Gu Juguan, Liu Bin, *et al.*. Experimental research on wavelength modulation surface plasmon resonance sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(2): 022501.
吴平辉, 顾菊观, 刘彬, 等. 波长检测型表面等离子体共振传感器的实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(2): 022501.
- 4 M Rahmat, W Maulina, E Rustami, *et al.*. Performance in real condition of photonic crystal sensor based NO_2 gas monitoring system[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 79(48): 480–485.
- 5 Chen Ying, Wang Wenyue, Bi Weihong. Sensitivity property analysis of biosensors based on particle swarm optimization[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(6): 0614002.
陈颖, 王文跃, 毕卫红. 基于粒子群优化的生物传感器灵敏度特性分析[J]. *中国激光*, 2014, 41(6): 0614002.
- 6 Y Zhang, Y Zhao, Q Wang, *et al.*. Liquid refractive index sensor based on slow light in slotted photonic crystal waveguide[J]. *Optik*, 2013, 124(22): 5443–5446.
- 7 Chen Ying, Lu Bo, Fan Huiqing. Refractive index sensing property of $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ photonic crystal defect cavity[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(6): 0605003.
陈颖, 卢波, 范卉青. $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 光子晶体缺陷腔的折射率传感特性[J]. *中国激光*, 2014, 41(6): 0605003.
- 8 V Paeder, V Musi, L Hvozdar, *et al.*. Detection of protein aggregation with a Bloch surface wave based sensor[J]. *Sensors and Actuators B*, 2011, 157(1): 260–264.
- 9 C L Wong, G C K Chen, X Li, *et al.*. Colorimetric surface plasmon resonance imaging (SPRI) biosensor array based on polarization orientation[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2013, 47: 545–552.
- 10 L Song, Z Wang, D Zhou, *et al.*. Waveguide coupled surface plasmon resonance imaging measurement and high-throughput analysis of bio-interaction[J]. *Sensors and Actuator B*, 2013, 181: 652–660.
- 11 J Derbali, F AbdelMalek, H Bouchriha. A novel design of a photonic crystal sensor with improved sensitivity[J]. *Optik*, 2013, 124(19): 3936–3939.
- 12 A Yamada, S Mohri, M Nakamura, *et al.*. A fully automated pH measurement system for 96-well microplates using a semiconductor-based pH sensor[J]. *Sensors and Actuators B*, 2010, 143(2): 464–469.
- 13 Feng Chen, Feng Guoying, Zhou Hao, *et al.*. Characteristic analysis on photonic crystal laser cavity with one-dimensional photonic bandgap[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(8): 0802009.
冯琛, 冯国英, 周昊, 等. 一维光子带隙光子晶体激光腔的特性分析[J]. *中国激光*, 2012, 39(8): 0802009.
- 14 Chen Yuanhao, Liu Guiqiang, Gong Lixia, *et al.*. Optical properties and fluorescence modification of the sandwich structure composed of ultra-thin gold films light-emitting layers and photonic crystals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1016001.
陈元浩, 刘桂强, 龚丽霞, 等. 超薄金膜-发光层-光子晶体三明治结构的光学特性及荧光调制[J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1016001.

栏目编辑:王晓琰