

# 偏振控制光强调制型点阵 SPR 传感器研究

孙博书 黄子昊 王晓萍 刘玉玲 刘旭

(浙江大学光电系现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要** 介绍了一种偏振控制光强调制型点阵表面等离子体共振 (SPR) 传感器, 分析了入射角度、金膜厚度、起偏器设置、光源波长及数据处理方式对传感器灵敏度和线性范围的影响, 并对 632.8 nm 与 740 nm 两种光源传感器系统进行了实验测试与分析。结果表明, 偏振控制光强调制型点阵 SPR 传感器可将光经过表面等离子体共振所产生的偏振态变化转化为光强变化来测量, 选取适合的光源波长和入射角度, 采用简单的光学结构与机械结构, 就能使其获得较高的灵敏度, 且测量范围控制方便, 制作成本较低。偏振控制光强调制型点阵 SPR 传感器可广泛应用于生物分子相互作用分析和环境监测、食品安全、药物分析、生物医疗等领域的高通量检测。

**关键词** 光学传感器; 点阵表面等离子体共振 (SPR) 传感器; 偏振控制; 高通量检测

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0312003

## Intensity-Modulated Surface Plasmon Resonance Array Sensor Based on Polarization Control

Sun Boshu Huang Zihao Wang Xiaoping Liu Yuling Liu Xu

(State Key Laboratory for Modern Optical Instrumentation, Department of Optical Engineering and Information Science, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract** Intensity-modulated surface plasmon resonance (SPR) array sensor based on polarization control is introduced. The influence of incident angle, gold film thickness, polarizer angle, wavelength and data processing on its sensitivity and measuring range is analyzed and sensor systems with wavelength set at 632.8 nm and 740 nm are experimentally studied. It is concluded that intensity-modulated SPR array sensor turns the polarization state change of light wave during the excitation of surface plasmons into intensity change to detect in an easily controllable measurement range. Using an appropriate parameter selection, high sensitivity can be produced with a simple optical and mechanical structure and lower production costs. This scheme can be widely applied to the high-throughput detections of bimolecular interaction analysis, environmental monitoring, food safety, pharmaceutical analysis, biomedical engineering and other fields.

**Key words** optical sensor; lattice SPR sensor; polarization control; high-throughput detection

**OCIS codes** 120.2130; 240.6680

### 1 引 言

表面等离子体共振 (SPR) 传感技术与生物免疫技术相结合构建的 SPR 生物检测技术, 因其具有免标记、实时无损检测等优点在药物筛选、环境监测、生物化学等领域显示了巨大的应用潜力<sup>[1]</sup>。同时随着生命科学研究的发展, 基于 SPR 的高通量检测技

术已成为研究热点。SPR 传感器有四种不同的调制方法, 分别为角度调制, 波长调制, 光强调制及相位调制。对于高通量的点阵式 SPR 传感器, 若采用角度调制或波长调制, 则需要采用机械转角扫描<sup>[2]</sup>或窄带滤光器波长扫描<sup>[3]</sup>, 使得系统结构复杂、体积大, 同时由于可动部件的存在降低了系统可靠性和

收稿日期: 2010-08-02; 收到修改稿日期: 2010-09-27

基金项目: 国家 863 计划 (2007AA09Z114, 2009AA06Z406) 和浙江省科技计划优先主题项目 (2007C13066) 资助课题。

作者简介: 孙博书 (1985—), 女, 硕士研究生, 主要从事 SPR 生物传感器方面的研究。E-mail: sunboshu1206@gmail.com

导师简介: 王晓萍 (1962—), 女, 博士, 教授, 主要从事水环境的物理检测方法与监测仪器设计, SPR 生物光学传感技术与仪器设计, 电子石设计及其应用等方面的研究。E-mail: xpwang@zju.edu.cn (通信联系人)

稳定性;相位调制方法尽管有很高的灵敏度,但是要求能够实时高精度检测波面相位,故光路系统复杂,对机械部件精度要求高<sup>[4]</sup>,且算法复杂<sup>[5]</sup>;而单纯利用 p 光的普通光强调制方法,结构简单,测量算法简便,实时性好,但是其性能受环境因素影响大,测量灵敏度低<sup>[6]</sup>。

20 世纪 90 年代初期,欧美很多国家开始研究 SPR 的高通量检测技术,基于多种调制方式的 SPR 高通量检测仪器不断涌现,并在蛋白质组学、基因研究等领域得到了应用<sup>[7]</sup>。国内对该项技术的研究主要集中在角度调制法和利用 p 光的光强调制法上,且在仪器稳定性和测量精度等方面亟待提高<sup>[8]</sup>。

SPR 反射光中同时包含了 p 光和 s 光的相位差信息<sup>[9]</sup>及 p 光振幅的变化信息<sup>[10]</sup>,即反射光的偏振态变化信息。本文研究的偏振控制光强调制型点阵 SPR 传感器,将 SPR 反射光的偏振态信息转化为光强信号进行检测,与其他调制方式相比,无需引入角度或波长扫描,具有光路系统与机械结构简单,测量范围方便可调、灵敏度较高等特点。

## 2 传感器结构与偏振控制原理

图 1 给出了偏振控制光强调制型点阵 SPR 传感器的结构示意图,经过非直角起偏器后的平行光束作为 SPR 传感器的入射光,照射到传感器的金膜表面并产生表面等离子共振。当金膜表面不同点阵上样品的折射率不同时,相应点反射光的椭圆偏振光形态也不同。通常以某个折射率的样品为基准,进行传感器消光点的调试与设置;首先使该样品的反射光经 1/4 波片成为线偏振光,并要求 1/4 波片的快轴方向与出射椭圆偏振光长轴方向一致<sup>[11]</sup>,然后再经过与线偏振光正交放置的检偏器,在探测器对应位置上得到反射信号的消光点,这个折射率称为消光折射率<sup>[12]</sup>。

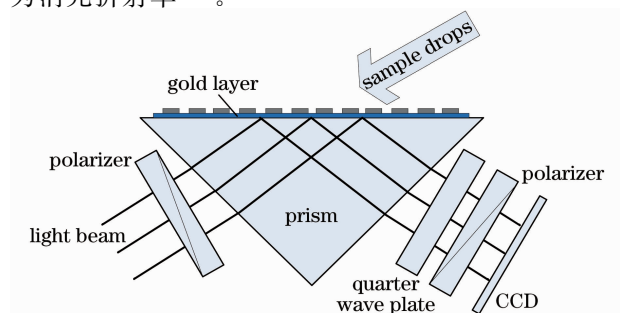


图 1 偏振控制光强调制型点阵 SPR 传感器结构示意图  
Fig. 1 Structure of the intensity-modulated SPR array sensor based on polarization control

消光点可以通过改变 1/4 波片及检偏器的旋向,即波片及检偏器相对于 s 光振动方向的旋转角度进行设置。调试依据为以下两式:

$$\theta_{\text{waveplate}} = \frac{1}{2} \arctan \left\{ \frac{2 |\mathbf{E}_{\text{extinction}_s}| \cdot |\mathbf{E}_{\text{extinction}_p}|}{|\mathbf{E}_{\text{extinction}_s}|^2 - |\mathbf{E}_{\text{extinction}_p}|^2} \times \cos \left[ \arg \left( \frac{\mathbf{E}'_{\text{extinction}_p}}{\mathbf{E}_{\text{extinction}_s}} \right) \right] \right\}, \quad (1)$$

$$\theta_{\text{polarizer}} = \arctan \left( \frac{\mathbf{E}'_{\text{extinction}_p}}{\mathbf{E}'_{\text{extinction}_s}} \right) + \frac{\pi}{2}, \quad (2)$$

式中  $\theta_{\text{waveplate}}$  及  $\theta_{\text{polarizer}}$  分别代表波片及检偏器相对于 s 光振动方向的旋转角度。 $\mathbf{E}_{\text{extinction}_p}$  及  $\mathbf{E}_{\text{extinction}_s}$  分别为金膜反射后对应于消光折射率的 p 光及 s 光光矢量, $\mathbf{E}'_{\text{extinction}_s}$  及  $\mathbf{E}'_{\text{extinction}_p}$  分别为经过波片后对应于消光折射率的 p 光及 s 光光矢量。

在点阵传感器中,对应于金膜表面其它折射率样品的反射光,由于偏振态不同,在经过上述设置的波片和检偏器后,将产生不同程度的消光,得到不同强度的反射光即可在成像系统中得到明暗不同的点。将消光点作为基准暗点,即可得出折射率-光强曲线,由此实现了 SPR 反射光偏振态的变化转化为光强的变化,方便进行测量。

偏振控制光强调制型 SPR 传感器的测量范围调整方便,如图 2 所示。其中波长 632.8 nm,入射角 74°,金膜 40 nm,起偏器 60°。在不改变入射光波长及入射角度的情况下,可以通过旋转波片及检偏器改变消光折射率,该折射率(RI)值即为相应传感器测量范围的下限,因此改变消光点即改变了传感器的测量范围。

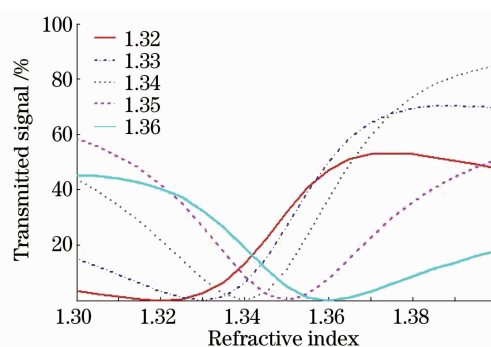


图 2 不同消光折射率的光强-折射率曲线  
Fig. 2 Light intensity-RI curves corresponding to different extinction RI

## 3 仿真与计算

在分析原理与结构的基础上,运用 MathCAD 软件进行了传感器性能指标的计算与仿真,分析了入射角度、金膜厚度、起偏器角度和波长等参数对灵

敏度和测量范围的影响,并讨论了对于一定波长的光源,相应传感器的合适参数组合。在仿真和分析中,将蒸馏水(折射率为 1.33)作为消光折射率。

### 3.1 入射角度对传感器性能的影响

固定光源波长为 632.8 nm,改变入射光的角度,仿真得到一组光强与折射率的关系曲线如图 3 所示。其中金膜厚度 40 nm,起偏角 60°。由图可知入射角为 73°时,曲线灵敏度最高。此外由图可看出,入射角度对曲线测量范围有略微影响。

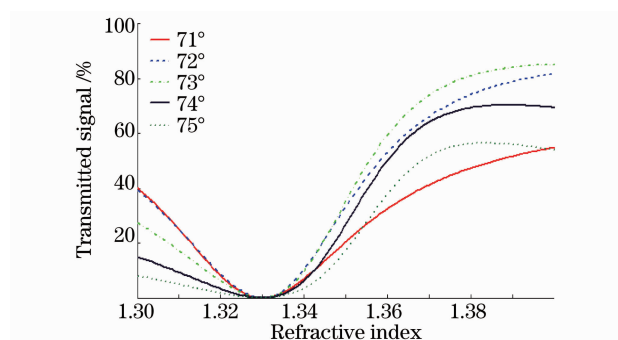


图 3 不同入射角所对应的光强-折射率曲线  
Fig. 3 Light intensity-RI curves corresponding to different incident angles

### 3.2 金膜厚度对传感器性能的影响

固定光源波长为 632.8 nm,改变金膜厚度,仿真得到一组光强与折射率的关系曲线如图 4 所示。其中入射角 73°,起偏器角度设置 60°。综合曲线灵敏度和测量范围,40 nm 为较为适合的金膜厚度。综合制作工艺以及仿真结果,金膜厚度可控制在  $40 \pm 5$  nm。经仿真分析,对于其他波长的光源,  $40 \pm 5$  nm 同样是较为合适的金膜厚度。同时对于高通量点阵式 SPR 传感器,为保证测量准确度,要求金膜具有良好的均匀性<sup>[13]</sup>。

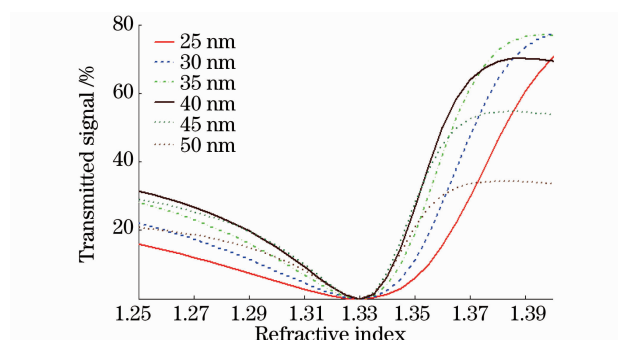


图 4 不同金膜厚度的光强-折射率曲线  
Fig. 4 Light intensity-RI curves corresponding to different gold film thicknesses

### 3.3 起偏器角度对传感器性能的影响

固定光源波长为 632.8 nm,改变起偏器角度,仿

真得到一组光强与折射率的关系曲线如图 5 所示。其中入射角 73°,金膜厚度 40 nm。当透光轴相对于 s 光振动方向成 55°~60°角时,得到的光强曲线灵敏度较好。对于其他波长的光源,最优起偏器角度可设置在 50°~60°之间,在此范围内,起偏器角度的变化对曲线的灵敏度有细微影响。

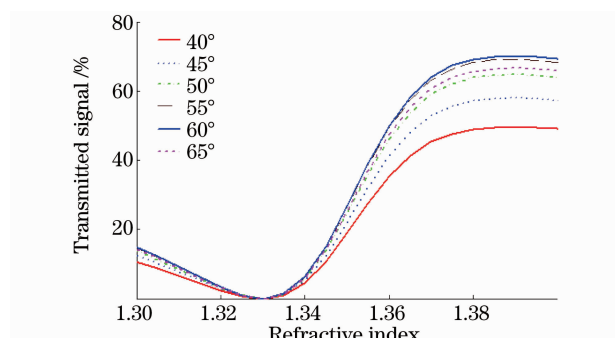


图 5 不同起偏器角度所对应光强-折射率曲线  
Fig. 5 Light intensity-RI curves corresponding to different input polarizer sets

### 3.4 不同光源波长对传感器性能的影响

由入射角度对传感器性能影响分析可知,对应于某种波长,入射角度可改变曲线的测量范围,故此仿真中入射角的设置,均使测量范围始于 1.33 附近。不同波长对应的入射角为 600 nm-76°,630 nm-72.5°,650 nm-71.5°,680 nm-70°,700 nm-69°,750 nm-67°。由图 6 所示的仿真结果可以得出,波长增大,灵敏度亦随之增大,而测量范围减小。即在测量范围允许的条件下,要得到更高的灵敏度和更好的线性度,可采用更高波长的光源。同时考虑到光路调试的简洁,在实际应用中尽可能采用可见光波段。从以上分析可知,在诸多因素中,光源波长对传感器灵敏度的影响最大。

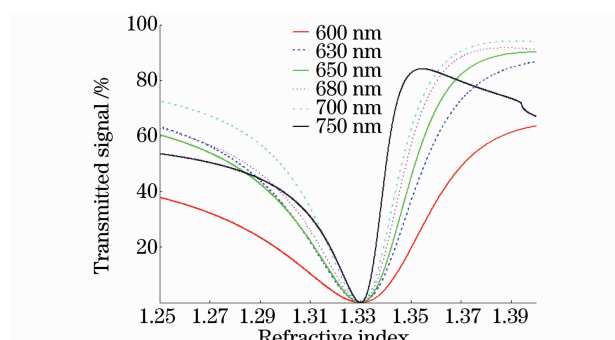


图 6 不同波长的光强-折射率曲线  
Fig. 6 Light intensity-RI curves corresponding to different wavelengths

### 3.5 数据处理与分析

为了消除光源、环境因素等对传感器性能的影响

响,需要对 CCD 所测得的原始数据进行处理<sup>[14]</sup>。由于在实际测量时,金膜表面为空气的全反射光强是较稳定且易获得的,故将此光强作为基准,对发射光强信号进行如下式所示的归一化处理,可降低光源波动的影响:

$$I_{\text{relative}} = \frac{I_{\text{signal}} - I_{\text{dark}}}{I_{\text{air}} - I_{\text{dark}}}, \quad (3)$$

式中  $I_{\text{relative}}$  为数据处理后的相对光强; $I_{\text{signal}}$  为样品的 SPR 反射光强, $I_{\text{air}}$  为经空气的 SPR 反射光强, $I_{\text{dark}}$  为探测器的暗信号。更进一步,可以得出传感器的灵敏度,定义为相对光强相对于传感器表面待测液体折射率的变化率,即

$$S = \frac{\partial I_{\text{relative}}}{\partial n}, \quad (4)$$

式中  $S$  为传感器的灵敏度; $I_{\text{relative}}$  为数据处理后的相对光强。由(3),(4)式可见, $I_{\text{air}}$  越小,归一化后得到的灵敏度越高。但受限于实际 CCD 能测到的最小光强值和动态范围, $I_{\text{air}}$  越小引入的噪声也将越严重,故归一化能达到的灵敏度也是有限制的。

根据以上对偏振控制光强调制型 SPR 传感器各参数的分析,可以选择合适的传感器参数组合,使偏振控制光强调制型 SPR 传感器得到较佳的性能指标。首先波长的选择要兼顾测量范围及灵敏度,根据 SPR 传感器的常用测量范围(1.33~1.37)<sup>[15]</sup> 选取 740 nm 波长光源,在此条件下,分析得到其它的参数分别为:入射角  $72^\circ$ 、金膜厚度 40 nm、起偏器相对于 s 光旋转  $50^\circ$ 。图 7 比较了光源波长为 740 nm 时,偏振控制光强调制 SPR 传感器与纯 p 光

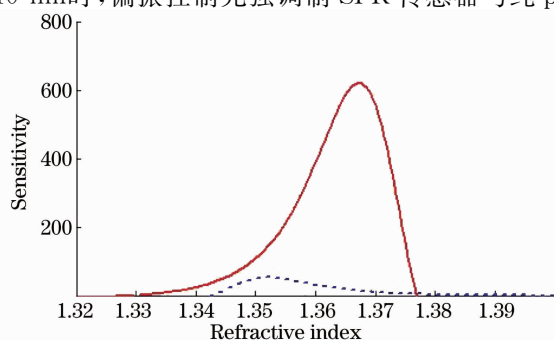


图 7 740 nm 波长下偏振控制光强调制(实线)及单纯使用 p 光进行光强调制(虚线)的 SPR 传感器的灵敏度曲线

Fig. 7 Sensitivity curves of intensity-modulated SPR sensor based on polarization control with 740 nm wavelength LED (solid line) and intensity-modulated SPR sensors using TM wave only (dashed line)

光强调制 SPR 传感器的灵敏度,可知偏振控制光强调制型 SPR 传感器的灵敏度远远高于纯 p 光光强调制型 SPR 传感器。

## 4 实验装置和实验分析

根据传感器结构,搭建了如图 8 所示的实验装置,为比较光源波长的影响,实验分别选取 632.8 nm 和 740 nm 的 LED,并根据仿真结果,分别选取合适的入射角、金膜厚度和起偏器角度进行实验研究。

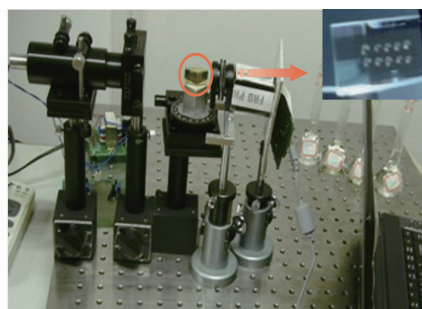


图 8 偏振控制光强调制点阵 SPR 传感器实验平台  
Fig. 8 Experimental platform of intensity-modulated SPR array sensor based on polarization control

### 4.1 实验结果 1(632.8 nm 光源)

在实验装置上,根据以上仿真结果调整传感器各组件参数。实验样品为不同质量分数的蔗糖溶液。用蒸馏水设置和调试消光点,波片及检偏器实际转角分别为  $33^\circ$  和  $111^\circ$ ,与理论计算存在一点偏差。实验数据经归一化处理,并依据蔗糖质量分数与折射率的转换关系<sup>[16]</sup>,将不同蔗糖质量分数转换为相应的折射率值,得到如图 9 所示折射率-相对光强曲线及线性拟合曲线。

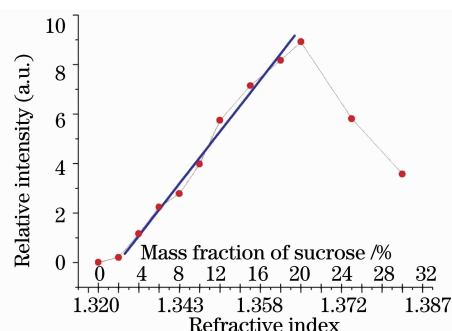


图 9 波长 632.8 nm 时,折射率和蔗糖质量分数-相对光强实验曲线及线性拟合曲线

Fig. 9 Experimental results and linear fitting curve of relative light intensity-RI and mass fraction of sucrose with wavelength of 632.8 nm

由图 9 可知,折射率在 1.335~1.365 范围内有



很好的线性,在线性范围内的相关系数为 0.996,测量灵敏度为 21.88 /RIU。

#### 4.2 实验结果 2(740 nm 光源)

由仿真分析可知,增大光源波长可以显著提高传感器灵敏度。因此采用波长为 740 nm 的 LED 光源进行实验,消光折射率 1.33,根据仿真分析,使其达到最佳灵敏度及测量范围的设置为:入射角  $72^\circ$ ,金膜厚度 40 nm,起偏器设置  $50^\circ$ ,仿真所得波片旋转角度  $-42.823^\circ$ ,检偏器旋转角度  $114.767^\circ$ 。

实验样品为不同质量分数的蔗糖溶液。当蒸馏水所对应折射率 1.33 消光时,波片及检偏器实际转角分别为  $-35^\circ$  和  $113^\circ$ 。实验数据经归一化处理,并将不同蔗糖质量分数转换为相应的折射率值,得到如图 10 所示折射率-相对光强曲线及线性拟合曲线。

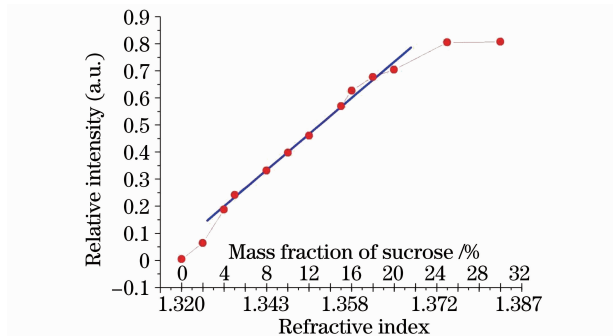


图 10 波长 740nm 下折射率和蔗糖质量分数-相对光强实验曲线及线性拟合曲线

Fig. 10 Experimental results and linear fitting curve of relative light intensity-RI and mass fraction of sucrose with wavelength of 740 nm

由图 10 可知,折射率在 1.335~1.365 范围内有较好的线性,在线性范围内的相关系数为 0.983,测量灵敏度为 290.02 /RIU。

比较光源波长 740 nm 与 632.8 nm 的两条蔗糖质量分数-相对光强实验曲线及线性拟合曲线,可知 740 nm 光源波长传感器的灵敏度明显高于 632.8 nm 波长,传感器的测量范围基本相同。由实验可知,适当选取传感器参数可以在一定的测量范围内大大提高传感器灵敏度。并且,光源波长的增加对传感器灵敏度的增强贡献最大。

## 5 结 论

通过偏振控制光强调制型点阵 SPR 传感器的仿真设计与实验研究,可以得出如下结论:

1) 偏振控制光强调制型点阵 SPR 传感器将反

射光的偏振态变化转化为光强变化进行测量,与纯 p 光光强调制型 SPR 传感器相比,同时利用了反射光信号中的相位和振幅信息,测量灵敏度得到显著提高,同时通过改变消光折射率就可方便地调整测量范围。

2) 偏振控制光强调制型点阵 SPR 传感器,避免了入射角扫描或波长扫描的复杂结构,具有光路系统与机械结构简单,系统稳定性好,成本低等特点。

3) 通过仿真和计算,分析了传感器参数对灵敏度、测量范围的影响,并得出了适合的传感器参数组合:光源波长应取 700~740 nm,金膜厚度应控制在  $40 \pm 5$  nm,起偏器角度可设置在  $50^\circ \sim 60^\circ$ ,入射角角度应根据光源波长的不同具体分析。

4) 偏振控制光强调制 SPR 点阵传感器结合生物免疫技术,可以构建进行样品多组分、高通量检测的 SPR 传感器,广泛应用于环境监测、食品安全、药物分析和生物医疗等领域,极具应用价值。

## 参 考 文 献

- 1 J. Homola. Surface plasmon resonance sensors for detection of chemical and biological species[J]. *Chem. Rev.*, 2008, **108**(2): 462~493
- 2 Chai Haoyuan. Research and Development of Surface Plasmon Resonance (SPR) Biochemical Analysis Instrument[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2003  
蔡浩原. 一种新型表面等离子体谐振 (SPR) 生化分析系统的研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2003
- 3 J. Dostálek, H. Vaisocherová, J. Homola. Multichannel surface plasmon resonance biosensor with wavelength division multiplexing [C]. 10th International Meeting on Chemical Sensors, Sensors and Actuators B, 2005, **108**(1): 758~764
- 4 H. P. HO, W. W. Lam. Application of differential phase measurement technique to surface plasmon resonance sensors[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2003, **96**(3): 554~559
- 5 Liang Shitong, Yang Jianfeng, Xue Bin. A new phase diversity wave-front error sensing method based on genetic algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1015~1019  
梁士通, 杨建峰, 薛彬. 基于遗传算法的改进相位差法波前误差传感技术研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1015~1019
- 6 Yu Xinglong, Wang Dongsheng, Wang Dingxin. Micro-array detection system for gene expression products based on surface plasmon resonance imaging [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2003, **91**(1-3): 133~137
- 7 S. Scarano, M. Mascini, A. P. F. Turne. Surface plasmon resonance imaging for affinity-based biosensors [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2010, **25**(5): 957~966
- 8 Cui Dafu, Zhang Lulu, Wang Yujie. Research and development of surface plasmon resonance biochemical analysis instrument [J]. *Modern Scientific Instruments*, 2007, **17**(2): 34~38  
崔大付, 张璐璐, 王于杰. 表面等离子体谐振 (SPR) 生化分析仪的研制与发展[J]. *现代科学仪器*, 2007, **17**(2): 34~38
- 9 J. Homola. Electromagnetic Theory of Surface Plasmons[M]. Berlin: Springer Series on Chemical Sensors and Biosensors, 2006. 3~44
- 10 Wan Yan, Liang Dakai, Zeng Jie. Prism surface plasmon wave sensor system based on polarizing beam splitter[J]. *Acta Optica*

- Sinica*, 2010, **30**(5): 1354~1357
- 万 艳, 梁大开, 曾 捷. 基于偏振分光棱镜的表面等离子体波传感系统[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1354~1357
- 11 Zhou Yu, Wan Lingyu, Zhi Yanan. Polarization-splitting  $2 \times 4$   $90^\circ$  free-space optical hybrid with phase compensation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3291~3294
- 周 煜, 万玲玉, 职亚楠. 相位补偿偏振分光  $2 \times 4$   $90^\circ$ 自由空间光学桥接器[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3291~3294
- 12 J. Homola, S. S. Yee. Novel polarization control scheme for spectral surface plasmon resonance sensors [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 1998, **51**(1-3): 331~339
- 13 Chu Fenghong, Cai Haiwen, Qu Ronghui. Applications of gold nanocomposite in optical and electronic sensor [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(11): 58~64
- 初凤红, 蔡海文, 瞿荣辉. 纳米金在光学和电化学传感器中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(11): 58~64
- 16 Zhang Zhiwei, Yin Weifeng, Wen Yandun. Study on the relational expression of solution concentration and its refractive index[J]. *Journal of North University of China*, 2009, **30**(3): 281~285
- 张志伟, 尹卫峰, 温廷敦. 溶液浓度与其折射率关系的理论和实验研究[J]. *中北大学学报*, 2009, **30**(3): 281~285
- 14 J. Homola. *Surface Plasmon Resonance Based Sensors* [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2006. 95~100
- 15 S. Löfåsa, M. Malmqvista, I. Rönnerberg. Bioanalysis with surface plasmon resonance [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 1991, **5**(1-4): 79~84