

# 光学学报

## 基于物镜耦合的波长-角度共同调制表面等离 激元共振传感器

王畅<sup>1,2</sup>, 王雪<sup>1,2</sup>, 孙旭晴<sup>1</sup>, 魏茹雪<sup>1,2</sup>, 刘虹遥<sup>1</sup>, 孙晓娟<sup>1,2</sup>, 王飞<sup>1,2</sup>, 路鑫超<sup>1\*</sup>, 黄成军<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院微电子研究所健康电子研发中心, 北京 100029;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 基于棱镜耦合的波长调制表面等离激元共振(SPR)传感器只能在长波段获得较高检测灵敏度, 无法兼顾检测范围与检测灵敏度。研究了一种基于物镜耦合激发表面等离激元的波长-角度共同调制的 SPR 传感装置, 使用物镜耦合使角度易于调节, 这提高了 SPR 传感器在短波处的检测灵敏度, 从而在较大检测范围内实现了高灵敏度折射率测量。通过理论仿真与实验, 使用波长-角度共同调制的 SPR 传感方法对不同浓度的葡萄糖溶液的折射率进行测量, 动态检测范围为  $4.4 \times 10^{-2}$  RIU, 检测灵敏度达到 5066.97 nm/RIU。相较于波长调制 SPR 传感方法, 使用波长-角度共同调制的 SPR 传感方法在检测范围不变的情况下, 检测灵敏度提高了 2.5 倍。该检测方法实现了对折射率高灵敏度、高动态检测范围的快速检测, 可广泛应用于生物医学及食品安全等领域。

**关键词** 表面光学; 表面等离激元共振; 折射率测量; 波长调制; 角度调制

中图分类号 O436.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1724001

## Objective-Coupled Wavelength and Angle Co-Modulated Surface Plasmon Resonance Sensor

Wang Chang<sup>1,2</sup>, Wang Xue<sup>1,2</sup>, Sun Xuqing<sup>1</sup>, Wei Ruxue<sup>1,2</sup>, Liu Hongyao<sup>1</sup>,  
Sun Xiaojuan<sup>1,2</sup>, Wang Fei<sup>1,2</sup>, Lu Xinchao<sup>1\*</sup>, Huang Chengjun<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Health Electronics Center, Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Wavelength-modulated surface plasmon resonance (SPR) sensors based on prism coupling can obtain high detection sensitivity only in the long-wavelength band but cannot take both detection range and detection sensitivity into account. In this work, we proposed a wavelength and angle co-modulated SPR sensor using the surface plasmons excited by objective-coupling. Through angle adjustment via objective coupling, the detection sensitivity of the SPR sensor in the short-wavelength band is improved, and the refractive index is measured with high sensitivity in a large detection range. Through simulations and experiments, the refractive indices of glucose solutions with different concentration were measured with the proposed method. The dynamic detection range is  $4.4 \times 10^{-2}$  RIU, and the detection sensitivity is 5066.97 nm/RIU. In comparison with the wavelength-modulated SPR sensing method, the detection sensitivity of the wavelength and angle co-modulated SPR sensing method is increased by 2.5 times in the same detection range. This method achieves the real-time and rapid detection of refractive indices with

收稿日期: 2021-01-11; 修回日期: 2021-03-01; 录用日期: 2021-03-19

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFC2004503, 2016YFC0900200, 2017YFF0107002)、国家自然科学基金(61604175)、北京市自然科学基金(4192063、4182073)、中国科学院科研装备研制项目(YJKYYQ20190056)、广州市科技计划项目(201604020005)、广东省科技计划项目(2016A040403086)、清华大学环境模拟与污染控制国家重点联合实验室开放课题(18K07ESPCT)

通信作者: \*luxinchao@ime.ac.cn

high sensitivity in a large dynamic detection range, and it can be widely applied to biomedicine, food safety, and other fields.

**Key words** optics at surfaces; surface plasmon resonance; refractive index measurement; wavelength modulation; angle modulation

**OCIS codes** 240.6680; 130.6010; 250.5403; 240.6490

## 1 引言

表面等离激元(SPs)是一种由金属表面自由电子集体振荡产生的沿金属-介质界面传播的倏逝波<sup>[1]</sup>。通过棱镜、光栅、波导等补偿入射光与表面等离激元间的波矢差,可产生表面等离激元共振(SPR)。SPR 传感技术具有无需标记、实时快速、对折射率变化具有高灵敏度等优点,广泛应用于生物检测、疾病诊断、化学分析、药品研发、食品安全与环境监测等领域<sup>[2-10]</sup>。

当激发表面等离激元的入射角度、入射光波长与金属界面处折射率满足波矢匹配条件时,可产生表面等离激元共振,该入射角度与入射光波长即表面等离激元共振的激发角度与共振波长。通过测量激发角度与共振波长的变化,可实现表面等离激元对折射率的传感<sup>[11]</sup>。基于上述原理,目前 SPR 折射率传感器主要分为 4 种类型,即强度、波长、角度和相位调制 SPR 传感器<sup>[12]</sup>。其中,强度调制 SPR 传感器可测量不同折射率引起的表面等离激元共振的反射光强度改变,实现介质折射率的测量<sup>[13]</sup>,相较于其他检测方法,强度调制 SPR 传感器的灵敏度较低<sup>[14]</sup>。波长调制 SPR 传感器使用宽光谱光源并以固定角度入射,通过扫描共振波长测量折射率的变化<sup>[15-16]</sup>,可以获得较高的检测灵敏度。角度调制 SPR 传感器通过扫描共振角度的变化实现折射率测量<sup>[17]</sup>,这种方法具有较高的检测灵敏度,但角度扫描涉及机械运动,使其装置复杂且稳定性较差<sup>[18-19]</sup>。相位调制 SPR 传感器通过检测入射光和反射光的相位差实现折射率测量<sup>[20]</sup>,这种传感器具有较高的检测灵敏度,但其复杂的装置和较小的动态检测范围限制了其广泛应用<sup>[21-22]</sup>。

近年来,波长调制 SPR 传感器由于其较高的检测灵敏度以及良好的稳定性,成为了 SPR 传感器领域的研究热点。为了获得更高的检测灵敏度,研究者们开展了相关研究。2016 年,Chen 等<sup>[11]</sup>利用 CCD 相机结合液晶可调谐滤波器的波长扫描装置对不同浓度氯化钠溶液进行了测量,动态检测范围为  $4.63 \times 10^{-2}$  RIU,在 600~700 nm 的共振波长范围内,检测灵敏度为 1620 nm/RIU。2018 年,Bak

等<sup>[23]</sup>提出了利用波长扫描激光光源实现 SPR 实时成像,对低浓度氯化钠溶液进行测量,动态检测范围为  $7.67 \times 10^{-3}$  RIU,当共振波长范围为 770~820 nm 时,检测灵敏度可达 6501 nm/RIU。由此可见,影响波长调制 SPR 传感器灵敏度的主要因素为共振波长,随着共振波长的红移,检测灵敏度迅速增大<sup>[24]</sup>,然而,相应的动态检测范围却变小。Huang 等<sup>[25-27]</sup>提出了一种基于棱镜耦合的波长和角度组合调制 SPR 传感器,仿真计算了金-银复合膜结构的传感性能。将 1.3~1.37 的折射率范围分为几个子区间,在单个子区间内采用固定激发角度,通过改变不同区间的激发角度,在多个子区间内获得高灵敏度传感。当共振波长范围为 900~1100 nm 时,每个子区间在 0.01 RIU 检测范围内的灵敏度达到 22000 nm/RIU,然而,这种方法在每个子区间内本质上还是波长调制的方法。由此可见,棱镜耦合激发表面等离激元的方式不易实现角度调节,难以从根本上解决动态检测范围与检测灵敏度无法兼顾的问题。

目前,使用高数值孔径显微物镜代替传统棱镜的耦合激发方式在表面等离激元成像中被广泛应用。使用显微物镜耦合方式,通过调节入射光与物镜光轴的间距,实现快速简单的角度调节<sup>[28-30]</sup>。因此,提出了基于物镜耦合方式激发表面等离激元的波长-角度共同调制 SPR 传感装置,利用角度调节提高了共振波长短波处的检测灵敏度,实现了在较大动态检测范围内的高检测灵敏度。首先通过仿真建立了样品折射率、激发角度以及共振波长的对应关系,确定不同样品折射率对应的激发角度与共振波长的关系,在较大的共振波长范围内获得了较高的检测灵敏度。利用不同浓度葡萄糖溶液作为待测物质进行实验,验证了波长-角度共同调制的 SPR 传感方法在 600~820 nm 的共振波长范围内实现的动态检测范围为  $4.4 \times 10^{-2}$  RIU,检测灵敏度为 5066.97 nm/RIU。该方法为气体、液体折射率的高灵敏度传感提供了一种新的检测手段。

## 2 理论仿真

使用物镜耦合激发表面等离激元的原理示意图

如图 1 所示,利用物镜耦合的 Kretschmann 装置在金膜表面激发表面等离激元,激发模型由高折射率基底、金膜与介质三层结构组成。当入射光以激发角度  $\theta$  入射到金膜表面时,沿  $x$  方向的波矢分量为  $k_x = k_0 n_1 \sin \theta$ ,其中  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$  为入射光波数,  $\lambda_0$  为入射光波长,  $n_1$  为基底折射率。根据波矢匹配条件,当  $x$  方向波矢分量  $k_x$  与表面等离激元波矢大小相等,即  $k_x = k_{SP}$  时,可在金-介质界面激发表面等离激元,其波矢大小为  $k_{SP} = k_0 \sqrt{\epsilon_m n_s^2 / (\epsilon_m + n_s^2)}$ ,其中,  $\epsilon_m = \text{Re}(n_2^2)$  为金膜介电常数实部,  $n_2$  为金的复折射率,  $n_s$  为待测介质折射率。通过调节激发角度  $\theta$  可实现表面等离激元共振,在反射光谱的共振波长  $\lambda_{SP} = \lambda_0 \sqrt{(\epsilon_m + n_s^2) / \epsilon_m n_s^2}$  处获得明显的吸收峰<sup>[11,30]</sup>,当金膜表面介质折射率  $n_s$  发生变化时,共振波长  $\lambda_{SP}$  也会发生变化。不同于棱镜耦合方式,对物镜耦合 Kretschmann 装置中表面等离激元激发角度  $\theta$  的调节可以通过调节入射光与物镜光轴的距离  $d = f \sin \theta$  实现,其中  $f$  为物镜焦距。

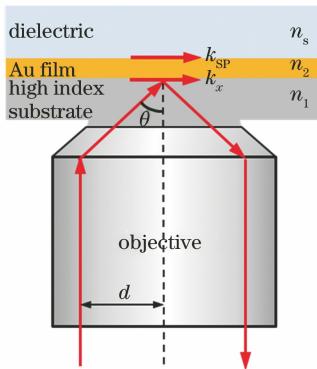


图 1 物镜耦合的 Kretschmann 装置激发 SPs 原理图

Fig. 1 Schematic diagram of SP excitation by objective-coupled Kretschmann configuration

使用 FDTD solutions 软件<sup>[31]</sup>进行理论仿真,计算波长-角度共同调制 SPR 传感的共振波长范围与最大检测灵敏度。仿真采用 Kretschmann 耦合方法激发表面等离激元,设置基底、金膜和介质三层结构,其中基底的折射率设为 1.78,金膜厚度为 50 nm,金膜介电常数采用软件自带材料库中的 Johnson and Christy 数据。使用 TFSF 平面波作为入射光源,设置入射光波长为 633 nm,网格设置为 5 nm × 5 nm × 5 nm,边界条件设为完美匹配层。先将介质折射率设为 1.33,得到 SPR 的最佳激发角为 54.2524°。随后,固定激发角度为 54.2524°,设置光源波长范围为 500~850 nm,选取介质折射率分别为 1.330, 1.344, 1.354, 1.364, 1.374, 得到如

图 2(a)所示的 SPR 反射光谱,从反射光谱中得到的反射光强最小处的波长值即为该折射率对应的共振波长。

随后仿真了不同激发角度时,不同介质折射率下的 SPR 反射光谱曲线。当激发角度分别为 53.1156°、53.4171°、53.5176°、53.9698°、54.2524° 与 55.9849° 时,得到了每个激发角度下的共振波长与折射率关系曲线,如图 2(b)所示。SPR 传感器的检测灵敏度为共振波长的变化量和待测样品折射率变化量的比值<sup>[6]</sup>,即  $S_\lambda = \frac{d\lambda_{SP}}{dn_s}$ ,  $S_\lambda$  表示检测灵敏度。研究发现激发角度越小,对应的共振波长红移越明显,检测灵敏度越大,例如,激发角度为 53.1156° 时,动态检测范围为  $4.4 \times 10^{-2}$  RIU, 在共振波长为 670 ~ 850 nm 范围内获得的检测灵敏度为 4123.48 nm/RIU。通过加入角度调节,可使共振波长短波处也具有高灵敏度,并可兼顾检测范围与检测灵敏度。当激发角度从 53.1156° 调节至 53.5176° 时,折射率从 1.33 变化至 1.374,在 600 nm 到 850 nm 的共振波长范围内实现的最大检测灵敏度为 5532.06 nm/RIU,如图 2(b)中拟合直线所示。

当满足最大检测灵敏度时,选取了几组折射率,得到激发角度与共振波长的对应关系如表 1 所示。通过使用 Winspall 仿真软件对表 1 中参数进行验证。设置激发 SPR 的金膜厚度为 50 nm,在不同激发波长下,设置的金膜介电常数与 FDTD solutions 软件一致。根据表 1 中的共振波长及不同介质折射率进行计算,得到反射光强度随角度变化的归一化曲线,如图 2(c)所示。反射光强最小值所对应的角度即为介质在特定的入射波长下所对应的最佳激发角度,得到的角度与表 1 中所列激发角度一致,从而验证了通过调节激发角度可以在较大动态检测范围内提高 SPR 传感器的检测灵敏度。

表 1 实现最大检测灵敏度时,介质折射率、激发角度与共振波长的对应关系

Table 1 Relationship among refractive index, excitation angle, and resonance wavelength under maximal detection sensitivity

Refractive index	Excitation angle / (°)	Resonance wavelength / nm
1.330	55.9849	600
1.344	53.9698	670
1.354	53.5176	720
1.364	53.4171	770
1.374	53.1156	850

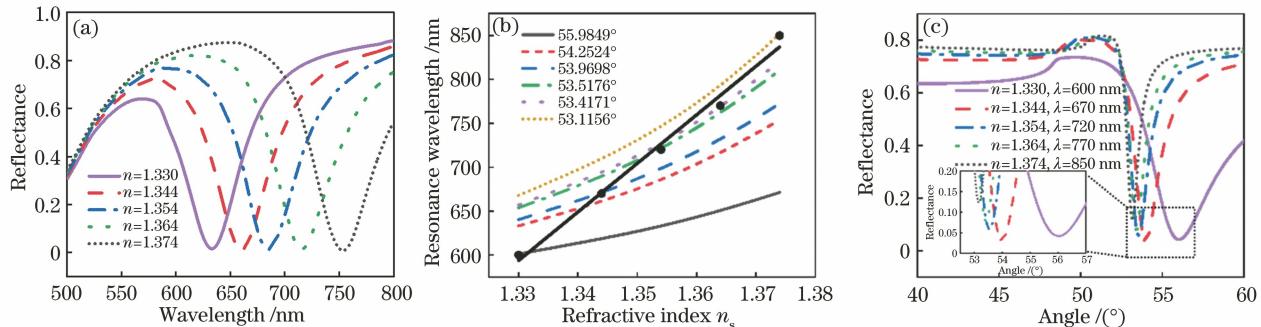


图 2 改变激发角度时,仿真得到的折射率与共振波长的关系曲线。(a)激发角度为  $54.2524^\circ$  时,不同介质折射率下的 SPR 反射光谱曲线;(b)不同激发角度下,共振波长随折射率的变化曲线,拟合直线为折射率传感的检测范围与最大灵敏度;(c)不同共振波长与不同折射率下,反射光强度随角度变化的归一化曲线

Fig. 2 Simulated relationship curves between refractive index and SPR wavelength when changing excitation angles.  
(a) SPR reflectance spectra of different dielectric refractive index for excitation angle of  $54.2524^\circ$ ; (b) relationship between resonance wavelength and refractive index of dielectric under different excitation angles (fitting line represents the maximum sensitivity and detection range); (c) normalized reflectance varying with angle under different resonance wavelengths and refractive indexes

### 3 样品制备及实验装置

为了验证波长-角度共同调制 SPR 传感器可兼顾动态检测范围与检测灵敏度,使用不同浓度的葡萄糖溶液进行折射率测量。葡萄糖溶液折射率随溶液浓度的变化而变化,折射率  $n_s$  和浓度  $c$  满足关系式:  $n_s = 1.334 + 0.001c$ <sup>[32]</sup>。在室温环境下,使用去离子水和葡萄糖晶体配制成浓度为 0%~40% 的葡萄糖溶液,浓度增量为 10%,对应的折射率分别为 1.330, 1.344, 1.354, 1.364, 1.374。

波长-角度共同调制 SPR 传感器的实验装置如

图 3(a)所示,基于 Kretschmann 结构的物镜耦合方式激发表面等离激元。采用超连续白光光源 (SuperK EXTREME EXU-6, NKT) 作为激发光源。光源输出准直的宽光谱光束,光源在 500~850 nm 波段范围内的光谱曲线如图 3(b) 所示。通过扩束镜和偏振片使入射光以 p 偏振态聚焦到物镜的后焦平面,通过一维线性电动平移台调节入射光在物镜后焦平面上的聚焦位置,从而改变 SPR 的激发角度,电动平移台的移动精度为 0.01 mm,相应角度改变量为  $0.2165^\circ$ 。在盖玻片上蒸镀厚度为 2 nm 的铬膜和厚度为 50 nm 的金膜,用于 SPR 激

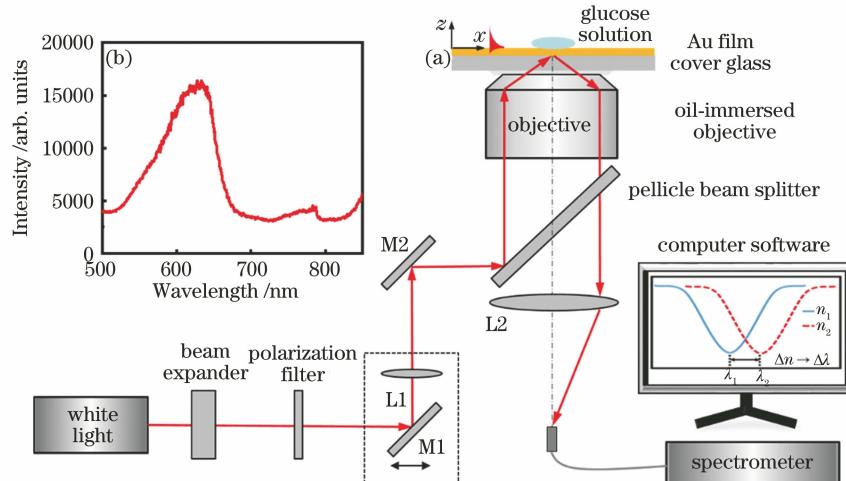


图 3 光路示意图和白光光源在 500~850 nm 范围内的光谱曲线。(a)基于波长-角度共同调制的表面等离激元传感装置示意图;(b)白光光源在 500~850 nm 范围内的光谱曲线

Fig. 3 Diagram of optical path and spectrum of white light source within the range of 500~850 nm. (a) Experimental setup of wavelength and angle co-modulated SPR sensor; (b) spectrum of white light source within the range of 500~850 nm

发。实验中使用移液枪将配制好的 20  $\mu\text{L}$  葡萄糖溶液滴加在金膜表面, 使用光谱仪(Ocean Optics, Maya 2000pro)探测反射光光谱。实验中分别采集样品光谱、参考光谱与暗光谱。样品光谱为激发 SPR 时所测量的反射光谱, 参考光谱为未激发 SPR 时收集的反射光谱。样品光谱和参考光谱均减去暗光谱以去除暗噪声的影响, 将减去暗光谱后的待测样品光谱除以参考光谱并通过多项式拟合和归一化处理, 得到待测样品的 SPR 反射谱曲线。

## 4 结果与分析

### 4.1 入射角度与共振波长的关系

为了验证激发角度对 SPR 共振波长的影响, 以

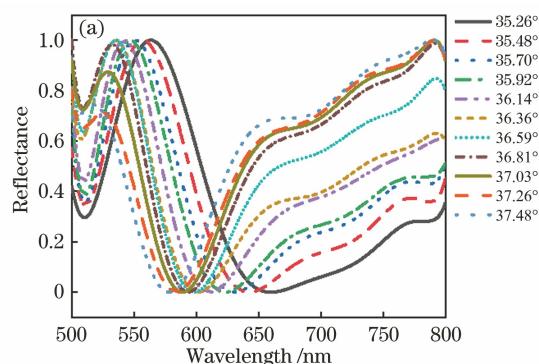


图 4 激发角度与共振波长的关系。(a)介质为空气时,不同激发角度下的 SPR 反射光谱曲线;(b)共振波长随激发角度的变化曲线,实线为二项式拟合结果

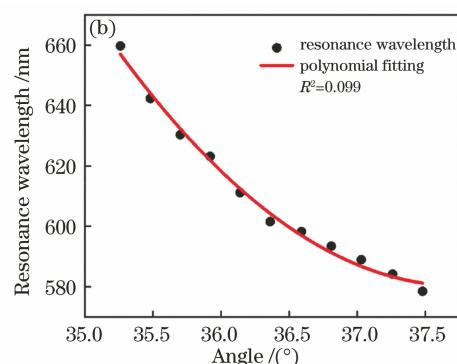
Fig. 4 Relationship between excitation angle and resonance wavelength. (a) SPR reflectance spectra for different excitation angles when dielectric is air; (b) curve of resonance wavelength varying with excitation angle (the solid curve represents the binomial fitting)

下的 SPR 反射光谱, 得到固定激发角度下不同折射率与共振波长的关系。在金膜表面滴加水溶液( $n_s=1.33$ ), 将激发角度调节至 SPR 激发角度 55.25°, 并将该角度设为固定激发角度, 测量不同浓度葡萄糖溶液的反射光谱, 得到如图 5(a)所示的不同浓度葡萄糖溶液的 SPR 反射光谱曲线。从图中可以看出, 随着样品溶液折射率的增加, SPR 共振波长向长波移动。通过提取不同浓度葡萄糖溶液 SPR 共振波长的位置, 建立其与折射率的关系并进行线性拟合, 得到了如图 5(b)所示的共振波长随样品折射率变化的拟合曲线, 拟合关系式为  $\lambda_{SP} = 2018.8881 \times n_s - 2108.9014$ , 其相关系数  $R^2$  为 0.936。根据灵敏度计算公式, 在固定激发角度下的波长调制 SPR 传感器的动态检测范围为  $4.4 \times 10^{-2}$  RIU, 在 580~680 nm 的共振波长范围内, 检测灵敏度为 2018.89 nm/RIU。SPR 传感器的分辨率也是评估传感器性能的重要指标<sup>[8]</sup>, 其计算公式

空气为待测介质, 通过调节激发角度, 得到了对应的 SPR 反射光谱曲线。图 4(a)为归一化的 SPR 光谱曲线, 激发角度  $\theta$  的变化范围为 35.26°~37.48°, 最小角度变化量为 0.22°。从光谱曲线中提取 SPR 共振波长, 得到了共振波长随激发角度变化的曲线, 如图 4(b)所示。可以看出, 随着激发角度的减小, 共振波长向长波移动, 且波长红移速度加快。因此, 当样品折射率不变时, 激发角度会影响 SPR 共振波长, 共振波长随着激发角度的减小而增加, 波长红移速度变快, 在长波段处具有高检测灵敏度, 该趋势与文献[24]结果一致。

### 4.2 固定入射角度下测量葡萄糖溶液折射率

测量了不同浓度的葡萄糖溶液在固定激发角度



为  $\sigma_{RI} = \frac{\sigma_{SD}}{S_\lambda}$ , 其中,  $\sigma_{SD}$  表示输出噪声的标准差, 由于输出噪声的影响, 共振波长的位置会有轻微的移动。以去离子水为样品进行了稳定性的测量, 得到 10 组共振波长位移的标准差为 0.09411 nm。基于分辨率公式, 得到固定激发角度下的波长调制 SPR 传感器的分辨率为  $4.66 \times 10^{-5}$  RIU。

### 4.3 波长-角度共同调制下测量葡萄糖溶液折射率

使用不同浓度葡萄糖溶液验证波长-角度共同调制的 SPR 传感方法可以兼顾动态检测范围与检测灵敏度。在金膜表面滴加不同浓度的葡萄糖溶液, 调节各溶液样品的激发角度至仿真得到的理论角度值(表 1), 测量不同浓度葡萄糖溶液的反射光谱。图 6(a)显示了不同浓度葡萄糖溶液在不同激发角度下的 SPR 反射光谱曲线, 从中可得到不同浓度葡萄糖溶液的 SPR 共振波长, 如图 6(b)所示。通过线性拟合得到了激发角度改变时, 共振波长随

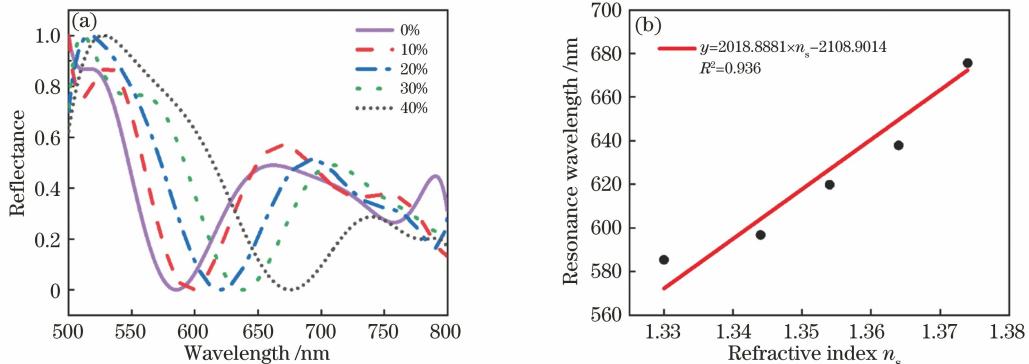


图 5 固定激发角度下折射率与共振波长的关系。(a)固定激发角度为 55.25°时,不同浓度葡萄糖溶液的 SPR 反射光谱曲线;(b) SPR 共振波长随折射率变化的曲线,实线为线性拟合结果

Fig. 5 Relationship between refractive index and resonance wavelength with fixed excitation angle. (a) SPR reflectance spectra of glucose solutions with different concentrations for fixed excitation angle of 55.25°; (b) curve of resonance wavelength varying with refractive index (the solid line represents the linear fitting result)

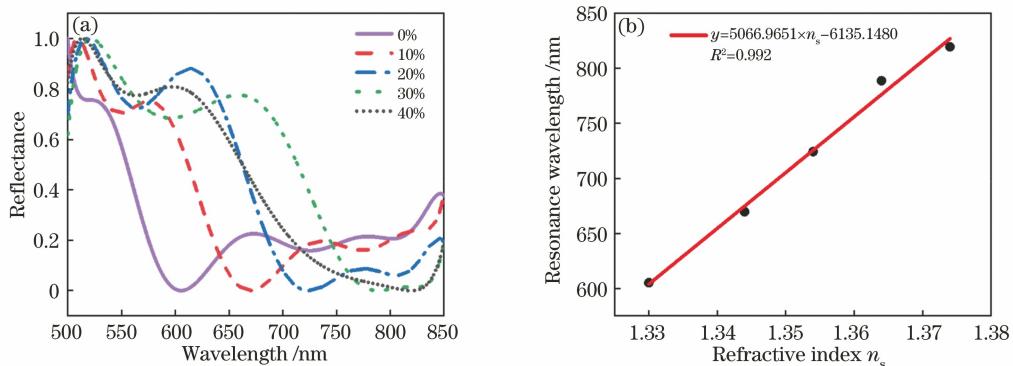


图 6 波长-角度共同调制下折射率与共振波长的关系。(a)不同激发角度下,不同浓度葡萄糖溶液的 SPR 反射光谱曲线;(b)激发角度改变时,共振波长随样品折射率变化的曲线,实线为拟合结果

Fig. 6 Relationship between refractive index and resonance wavelength with wavelength and angle co-modulation. (a) SPR reflectance spectra of glucose solutions with different concentrations for different excitation angles; (b) curve of resonance wavelength varying with refractive index under different excitation angles (the solid line represents the linear fitting result)

样品折射率变化的拟合曲线,拟合关系式为  $\lambda_{SP} = 5066.9651 \times n_s - 6135.1480$ ,其相关系数  $R^2 = 0.992$ 。从图中可以看出,波长-角度共同调制 SPR 传感器的动态检测范围为  $4.4 \times 10^{-2}$  RIU,在 600~820 nm 的共振波长范围内,检测灵敏度为 5066.97 nm/RIU,系统分辨率为  $1.86 \times 10^{-5}$  RIU,相较于固定激发角度为 55.25°的实验结果,在检测范围不变的情况下,灵敏度提高了 2.5 倍。

## 5 结 论

提出了一种基于物镜耦合激发表面等离激元的波长-角度共同调制 SPR 折射率传感装置,通过增加角度调节,提高了 SPR 共振波长短波处的检测灵敏度,从而在较大检测范围内实现了高灵敏度折射

率测量。首先通过仿真实现了高灵敏度的波长-角度共同调制 SPR 传感。然后,使用不同浓度的葡萄糖溶液进行了折射率测量,获得波长-角度共同调制 SPR 传感方法的动态检测范围为  $4.4 \times 10^{-2}$  RIU,检测灵敏度达到 5066.97 nm/RIU。与固定角度的波长调制 SPR 传感方法相比,波长-角度共同调制的 SPR 传感方法在检测范围相同的情况下,灵敏度提高了 2.5 倍,检测分辨率提高了 3 倍。由此可见,波长-角度共同调制 SPR 传感方法可在检测范围不变的情况下,获取更高检测灵敏度及分辨率,兼顾了动态检测范围与检测灵敏度,为快速分析、实时监测待测样品的折射率变化提供了新的实验装置与研究手段。

## 参 考 文 献

- [1] Tong L M, Xu H X. Surface plasmons:

- mechanisms, applications and perspectives [J]. Physics, 2012, 41(9): 582-588.
- 童廉明, 徐红星. 表面等离激元: 机理、应用与展望 [J]. 物理, 2012, 41(9): 582-588.
- [2] Wang S, Zhang H, Li W, et al. Construction and experimental study of a multi-channel localized surface plasmon resonance analysis device [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(2): 0228002.
- 王顺, 张浩, 李伟, 等. 多通道局域表面等离子体共振分析装置构建及实验研究 [J]. 光学学报, 2019, 39(2): 0228002.
- [3] Li G M, Li Z Y, Li Z R, et al. High-sensitivity optical-fiber microfluidic chip based on surface plasmon resonance [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(1): 0106002.
- 李钢敏, 李致远, 李正冉, 等. 基于表面等离子体共振的高灵敏度光纤微流控芯片 [J]. 中国激光, 2021, 48(1): 0106002.
- [4] Chen Q H, Han W Y, Kong X Y, et al. Detection of solution refractive index variation based on optical fiber surface plasmon resonance [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8): 0804003.
- 陈强华, 韩文远, 孔祥悦, 等. 基于光纤表面等离子体共振检测溶液折射率变化 [J]. 中国激光, 2020, 47(8): 0804003.
- [5] Wang Q, Liu R J, Yang X H, et al. Surface plasmon resonance biosensor for enzyme-free amplified microRNA detection based on gold nanoparticles and DNA supersandwich [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016, 223: 613-620.
- [6] Šípová H, Homola J. Surface plasmon resonance sensing of nucleic acids: a review [J]. Analytica Chimica Acta, 2013, 773: 9-23.
- [7] Minunni M, Mascini M. Detection of pesticide in drinking water using real-time biospecific interaction analysis (BIA) [J]. Analytical Letters, 1993, 26(7): 1441-1460.
- [8] Piliarik M, Homola J. Surface plasmon resonance (SPR) sensors: approaching their limits? [J]. Optics Express, 2009, 17(19): 16505-16517.
- [9] Homola J, Dostálk J, Chen S F, et al. Spectral surface plasmon resonance biosensor for detection of staphylococcal enterotoxin B in milk [J]. International Journal of Food Microbiology, 2002, 75(1/2): 61-69.
- [10] Hsieh S C, Chang C C, Lu C C, et al. Rapid identification of Mycobacterium tuberculosis infection by a new array format-based surface plasmon resonance method [J]. Nanoscale Research Letters, 2012, 7(1): 1-6.
- [11] Chen K Q, Zeng Y J, Wang L, et al. Fast spectral surface plasmon resonance imaging sensor for real-time high-throughput detection of biomolecular interactions [J]. Journal of Biomedical Optics, 2016, 21(12): 127003.
- [12] Zeng Y J, Hu R, Wang L, et al. Recent advances in surface plasmon resonance imaging: detection speed, sensitivity, and portability [J]. Nanophotonics, 2017, 6(5): 1017-1030.
- [13] Li C T, Yen T J, Chen H F. A generalized model of maximizing the sensitivity in intensity-interrogation surface plasmon resonance biosensors [J]. Optics Express, 2009, 17(23): 20771-20776.
- [14] Homola J, Yee S S, Gauglitz G. Surface plasmon resonance sensors: review [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 1999, 54(1/2): 3-15.
- [15] Yuk J S, Kim H S, Jung J W, et al. Analysis of protein interactions on protein arrays by a novel spectral surface plasmon resonance imaging [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2006, 21(8): 1521-1528.
- [16] Liu L, He Y H, Zhang Y, et al. Parallel scan spectral surface plasmon resonance imaging [J]. Applied Optics, 2008, 47(30): 5616-5621.
- [17] van Wiggeren G D, Bynum M A, Ertel J P, et al. A novel optical method providing for high-sensitivity and high-throughput biomolecular interaction analysis [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2007, 127(2): 341-349.
- [18] Homola J, Piliarik M. Surface plasmon resonance (SPR) sensors [M]//Homola J. Surface plasmon resonance based sensors. Springer series on chemical sensors and biosensors. Heidelberg: Springer, 2006, 4: 45-67.
- [19] Nguyen H, Park J, Kang S, et al. Surface plasmon resonance: a versatile technique for biosensor applications [J]. Sensors, 2015, 15(5): 10481-10510.
- [20] Kashif M, Bakar A A A, Arsal N, et al. Development of phase detection schemes based on surface plasmon resonance using interferometry [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2014, 14(9): 15914-15938.
- [21] Huang Y H, Ho H P, Wu S Y, et al. Detecting phase shifts in surface plasmon resonance: a review [J]. Advances in Optical Technologies, 2012, 2012: 1-12.
- [22] Nelson S G, Johnston K S, Yee S S. High sensitivity surface plasmon resonance sensor based on phase detection [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 1996, 35(1/2/3): 187-191.
- [23] Bak S, Kim G H, Jang H, et al. Real-time SPR

- imaging based on a large area beam from a wavelength-swept laser[J]. Optics Letters, 2018, 43(21): 5476-5479.
- [24] Li H B, Xu S P, Liu Y, et al. Studies on the sensitivity of a wavelength-dependent SPR sensor[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2010, 31(11): 2157-2161.  
李海波, 徐抒平, 刘颖, 等. 波长型 SPR 检测仪的灵敏度探讨[J]. 高等学校化学学报, 2010, 31(11): 2157-2161.
- [25] Huang Y, Gao L X, Li S Q, et al. Research on surface plasmon resonance sensor based on wavelength modulation by using theoretical simulation resonance sensor based on wavelength modulation by using theoretical simulation[C]//2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, January 6-7, 2011, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2011: 83-86.
- [26] Huang Y, Lan G Q, Luo Z W. Research on surface plasmon resonance sensor based on wavelength and angular combined modulations [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10964: 109641J.
- [27] Luo Z W, Huang Y. Sensitivity enhancement of surface plasmon resonance sensor based on wavelength and angular combined modulations [J].
- Optik, 2018, 168: 271-277.
- [28] Huang B, Yu F, Zare R N. Surface plasmon resonance imaging using a high numerical aperture microscope objective [J]. Analytical Chemistry, 2007, 79(7): 2979-2983.
- [29] Jiang L W, Sun X Q, Liu H Y, et al. Single nanoparticle label-free imaging based on evanescent wave in-plane scattering [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 0624001.  
江丽雯, 孙旭晴, 刘虹遥, 等. 基于倏逝波界面散射的单个纳米颗粒无标记成像[J]. 光学学报, 2018, 38(6): 0624001.
- [30] Wei R X, Wang Y W, Jiang L W, et al. Detection of chemical vapor deposition-prepared graphene by surface plasmon polariton imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1124002.  
魏茹雪, 王延伟, 江丽雯, 等. 利用表面等离激元成像检测化学气相沉积法生长石墨烯[J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1124002.
- [31] Lumerical Solutions Inc. Lumerical is now part of the Ansys family [EB/OL]. [2021-01-05]. <http://lumerical.com/>.
- [32] Fang Y L, Wang C T, Chiang C C. A small U-shaped bending-induced interference optical fiber sensor for the measurement of glucose solutions [J]. Sensors, 2016, 16(9): 1460.