

文章编号 1004-924X(2012)11-2365-08

用于阵列样品检测的扫描式表面等离子体 共振生物传感器

齐攀^{1,2}, 李莹³, 冯明创^{1,3}, 钟金钢^{1,3*}

- (1. 暨南大学 光电工程系, 广东 广州 510632;
2. 广东交通职业技术学院 电子工程系, 广东 广州 510650;
3. 暨南大学 光电信息与传感技术广东普通高校重点实验室, 广东 广州 510632)

摘要:针对阵列样品的定量检测,构建了一种用于阵列样品检测的扫描式表面等离子体共振生物传感器。首先,基于平面棱镜耦合下的最佳旋转轴位置和双棱镜探测光路搭建了阵列扫描式表面等离子体共振生物传感器。然后,计算了可探测阵列样品的点密度。最后,以蒸馏水和浓度分别为 5,10,15,20,25,30,35 mg/mL 的葡萄糖溶液作为待测阵列样品进行了多样品点的表面等离子体共振实验。实验测得阵列样品的共振角分别为 73.745,73.919,74.052,74.185,74.306,74.408,74.549,74.660°,显示葡萄糖溶液浓度与共振角线性关系良好,证明了该方法和装置的可行性。该装置对提高阵列样品点密度,实现高精度定量检测具有重要意义。

关键词:表面等离子体共振;生物传感器;阵列扫描;样品密度

中图分类号:TP212.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122011.2365

Scanning surface plasmon resonance biosensor for array sample detection

QI Pan^{1,2}, LI Ying³, FENG Ming-chuang^{1,3}, ZHONG Jin-gang^{1,3*}

- (1. Department of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China;
2. Department of Electronic Engineering, Guangdong Communication Polytechnic Institute, Guangzhou 510650, China;
3. Laboratory of Optoelectronic Information and Sensing Technologies of Guangdong Higher Education Institute, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

* Corresponding author, E-mail: tzjg@jnu.edu.cn

Abstract: An scanning surface plasmon resonance biosensor was constructed to quantitatively detect array samples. First, based on the optimal rotation position in plane prism-coupling mode and a double-prism detection optical path, the scanning surface plasmon resonance biosensor for array samples

收稿日期:2012-05-25;修订日期:2012-07-03.

基金项目:海洋赤潮灾害立体监测技术与应用国家海洋局重点实验室资助项目(No. MATHAB20120208);暨南大学优秀本科推免生科研创新培育计划资助项目;粤港关键领域重点突破招标资助项目(No. 2005A20501001)

was constructed. Then, the sample density of array samples was calculated. Finally, by taking the distilled water and glucose solution with different concentrations in 5, 10, 15, 20, 25, 30 and 35 mg/mL as array samples to be measured, the multi-sample spots were detected by surface plasmon resonance method. Experimental results show that the resonance angles of array samples are 73.745, 73.919, 74.052, 74.185, 74.306, 74.408, 74.549 and 74.660°, respectively, and the solution concentrations and their resonance angles show a good linear relation, which proves that the proposed method and device are feasibility. The device is significant for increasing the sample density of array samples and realizing the high precision detection.

Key words: surface plasmon resonance; biosensor; array scanning; sample density

1 引言

表面等离子体共振(Surface Plasmon Resonance, SPR)传感器具有免标记、实时动态检测、高灵敏等特点,被广泛应用于生物学、医学、化学、药物筛选以及环境监测、食品安全等领域^[1-4]。近年来,高通量、多通道、多样品点生化分析的需求非常迫切^[5-7],而多通道阵列样品检测主要通过 SPR 成像技术实现。在 SPR 成像技术中,探测平行光束只能以一个固定不变的角度入射,对该入射角度,阵列样品点中只有个别样品点满足共振条件,多数样品点处在非共振状态下。因此,只能通过阵列样品强度图像中不同样品点的强度差异,利用共振状态附近强度和折射率之间的关系来对不同样品点的折射率进行比较分析。由于信号光束强度的大小受到光源稳定性、温度、CCD 的电子噪声等许多因素的影响,强度和折射率的关系不是线性关系,导致其信噪比和探测灵敏度大为降低,通常只能做定性而非定量的分析^[1]。

为了实现阵列样品的定量检测,将单点定量检测扩展到单点二维扫描式定量检测是一种有效方式。但是,目前用于单点定量检测的角度扫描式表面等离子体共振传感器一般采用半圆柱镜耦合激励表面等离子体波的方式,检测样品置于半圆柱面的圆心处,目的是确保探测光束在做角度扫描时始终沿着半圆柱半径方向入射,光束在样品上的入射点不会漂移;而如果采用平面棱镜耦合激励方式,探测光束在做角度扫描时会由于光的折射使探测光束在样品上的入射点产生较大的

漂移,为了保证入射点不会漂移到样品点外面,样品点就必须足够大。对于阵列样品而言,所有样品点不可能同时置于半圆柱面的圆心,因此为了实现阵列样品检测只能采用平面棱镜耦合方式。但采用该方式,探测光束在样品上的入射点会产生较大的漂移,样品点就必须足够大。人们做了相关试验并发现在平面棱镜中存在一个最佳旋转轴位置,当棱镜以该旋转轴进行角度旋转扫描时,光束在样品上的入射点漂移最小^[8],由此可以大大减少样品点的尺寸,提高阵列样品点的密度。本文在此基础上,构建了一种基于平面棱镜耦合的用于阵列样品定量检测的扫描式表面等离子体共振生物传感器,研究了该传感器的双棱镜探测光路、阵列扫描方式、最小可探测阵列样品点的大小,并对葡萄糖溶液样品进行了实验检测,以验证该表面等离子体共振生物传感器的可行性。

2 表面等离子体共振生物传感器原理和阵列样品检测

表面等离子体共振效应是一种发生在电介质与贵金属薄层分界面上的物理光学现象。表面等离子体共振效应对附着在贵金属膜表面上的电介质的折射率变化非常敏感,从而使得基于表面等离子体共振效应的生化分析技术不需要对样品标记,就可通过探测样品折射率的微小变化,实现对样品的生化分析。表面等离子体共振传感器主要有两种工作方式^[1]:一种是检测共振波长,另一种是检测共振角。检测共振角方式相对检测共振波长方式结构简单、稳定可靠,应用较多。检测共振

角方式的单点角度扫描式表面等离子体共振传感器, 为了保证光束在样品上的入射点在角度旋转过程中不漂移, 一般采用半圆柱镜耦合方式, 如图 1(a) 所示。将单色 P 偏振光束进行角度扫描, 在角度扫描过程中通过光电探测器 (Photoelectricity Detector, PD) 实时检测出射光的光强, 从而得到光强随扫描角度变化的 SPR 曲线, 如图 1(b) 所示。曲线中光强最弱位置对应的入射角即为共振角度 (SPR angle), 再通过共振角值可计算出样品的折射率。

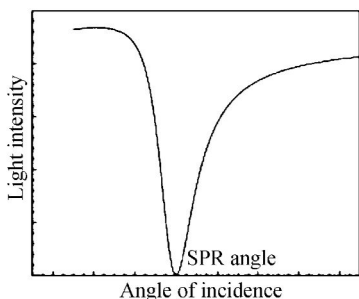
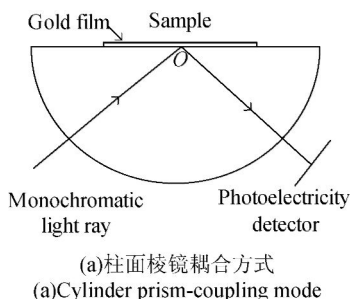


图 1 SPR 原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SPR

目前, 为了实现阵列样品检测通常采用 SPR 成像技术, 如图 2(a) 所示, 以平行光束为光源, 可对多样品点同时探测。但是 SPR 成像生物传感器在检测精度上远远比不上单光束单点检测 SPR 生物传感器, 因此 SPR 成像技术通常只能做定性分析。如果在平面棱镜耦合情况下采用探测光束做角度扫描对阵列样品检测, 会出现如图 2(b) 所示的入射点漂移问题, 只有样品点足够大, 才能实现阵列样品的检测。

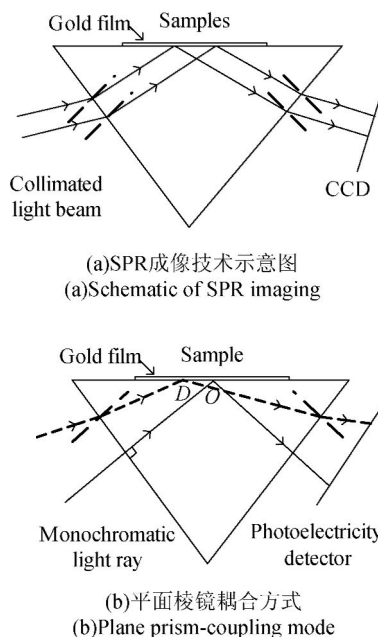


图 2 SPR 阵列检测方式示意图

Fig. 2 Schematic diagram of SPR for array sample detection

3 用于阵列样品检测的二维扫描方式和双棱镜探测光路

3.1 基于平面棱镜耦合的角度扫描式 SPR 的最佳旋转位置

研究发现, 基于平面棱镜耦合方式的角度扫描表面等离子体共振传感器, 在棱镜中存在一个最佳旋转轴位置, 当棱镜以该位置旋转轴进行角度旋转扫描时, 光束在样品上的入射点漂移最小^[8]。如图 3 所示, 设 ABC 为等腰棱镜的截面, 其中 $AB=AC=a$, θ 为棱镜旋转角度, n 为棱镜折

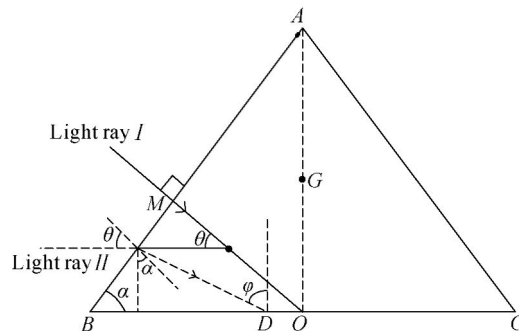


图 3 棱镜中最佳旋转中心位置示意图

Fig. 3 Schematic of optimal rotation center in prism

射率,初始入射光束 I 垂直于腰 AB ,入射到底边 BC 的中心 O 处,垂足为 M 。当棱镜以通过 W 点的旋转轴旋转 θ 角度后,入射光束与 AB 上的法线成 θ 角度,入射角为 θ 角度,用入射光线 II 表示。 φ 为光束对棱镜底边的入射角。 OD 为棱镜旋转后入射点在 BC 上的漂移量。

将旋转轴设置在入射光束 I 所在的直线上,通过保持棱镜底边样品上的入射点不动(即 $OD=0$),可由以下公式来确定最佳旋转轴的位置^[8]:

$$\frac{MW}{MO} \Big|_{\text{optimal}} = \frac{\cos^2 \alpha + \sin \alpha \cos \alpha \tan \varphi - 1}{\sin \alpha \tan \{ \arcsin [n \sin(\varphi - \alpha)] \} (\cos \alpha + \sin \alpha \tan \varphi)} \quad (1)$$

在公式(1)中,如果预先知道被测样品折射率的大约值,便可以估算样品的共振角大约值 φ_0 ,设 $\varphi = \varphi_0$;如果预先不知道被测样品折射率的大约值,由于产生表面等离子体共振效应时的共振角大于光束在棱镜底面的全反射角,全反射角为: $\arcsin(1/n)$,即共振角 φ 的范围为 $\arcsin(1/n) < \varphi \leq \pi/2$,则设 $\varphi = \pi/2$ 。

3.2 双棱镜探测光路

为了确定 SPR 共振角,在角度扫描过程中需要通过光电探测器实时检测在不同角度下的出射光光强。当棱镜旋转进行角度扫描时,虽然光源发出的光束方向保持不变,但出射光会随棱镜旋转而发生二倍于旋转角的方向改变,这给出射光的探测带来不便。因此,本文设计了双棱镜探测光路,使棱镜旋转过程中出射光的方向保持不变,和入射光方向一致。如图 4 所示,棱镜 ABC 和棱镜 DEF 构成一个双棱镜系统, $A'B'C'$ 和 $D'E'F'$ 为双棱镜系统以最佳旋转位置 W 为旋转中心顺时针旋转 θ 后所处的位置。设 P 偏振光激光束以

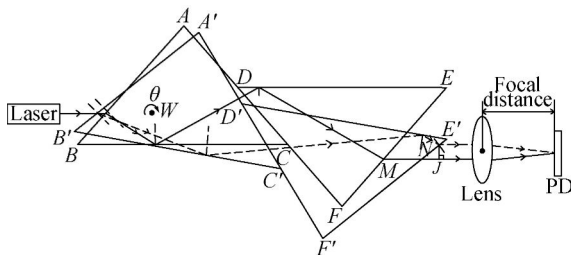


图 4 双棱镜探测光路示意图

Fig. 4 Schematic diagram of double-prism detection optical path

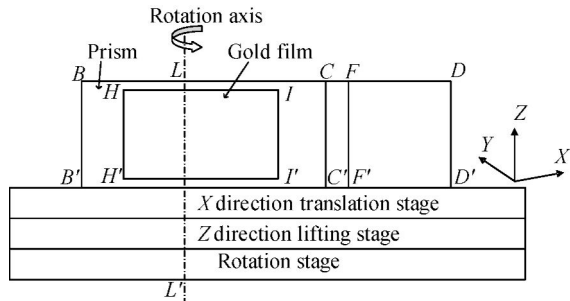
水平方向入射,入射光束 I (以实线表示) 经过 BC 和 DE 两次反射后在 M 点以水平方向出射。当棱镜以最佳旋转位置 W 为旋转中心顺时针旋转 θ 后,入射光束 II (以虚线表示) 经过 $B'C'$ 和 $D'E'$ 的反射后在 N 点同样以水平方向出射,从而保证了在棱镜旋转过程中出射光方向始终不变。

虽然在棱镜旋转时,光束的出射方向保持不变,但不会重合,并在垂直于光束方向上发生偏移,如图 4 所示,偏移量为 NJ 。本文估算了偏移量的大小:由于在 SPR 中待测样品的折射率大多和蒸馏水相似,一般扫描角度为 $0.73 \sim 0.88$ rad。选取和实验所用相同规格的等腰直角棱镜(参数: $n=1.5163$, $a=32.5$ mm, $\alpha=45^\circ$, $CD \approx 13$ mm) 进行分析,由几何关系计算出在该范围内扫描时出射光的偏移量 $NJ \approx 4.7$ mm。因此,在探测器前设置一个凸透镜,在角度扫描过程中,所有出射光将会聚到凸透镜的焦点处,在凸透镜的焦点处放置光电探测器即保证了在角度扫描过程中光电探测器不必移动,就可接收并准确测量出射光。

3.3 用于阵列样品检测的二维扫描方式

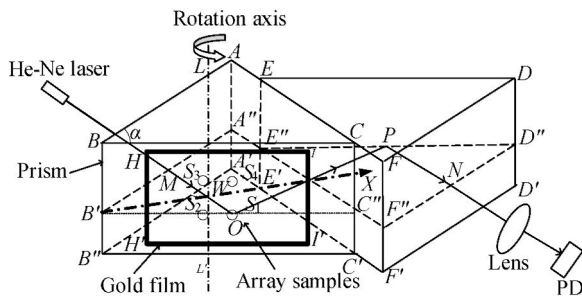
根据上文确定的最佳旋转位置和构建的双棱镜探测光路,自行设计的用于阵列样品检测的二维扫描检测方式如图 5 所示。 X, Y, Z 为直角坐标系的 3 个方向,将镀有金膜的双棱镜置于 X 方向平移台上,如图 5(a) 所示。 $BCFD'D'F'C'B'$ 面为双棱镜主视图的剖面。双棱镜下截面和 X 方向平移台的台面接触, X 方向平移台置于 Z 方向升降台上。 Z 方向升降台置于旋转台上,旋转台的转轴为 Z 方向,转轴为 LL' 。装置中的双棱镜由棱镜 ABC 和棱镜 DEF 构成,如图 5(b) (双棱镜立体图) 所示。棱镜入射侧面 $ABB'A'$ 与出射侧面 $DFD'D'$ 平行,前底面 $BCC'B'$ 与后底面 $DEE'D'$ 平行,上截面 $AEDFCB$ 与下截面 $A'E'D'F'C'B'$ 平行,前底面 $BCC'B'$ 与入射侧面 $ABB'A'$ 成锐角 (α 角),上截面 ($AEDFCB$ 面) 分别与入射侧面 $ABB'A'$ 、前底面 $BCC'B'$ 垂直。光源发出的光束经过入射侧面进入双棱镜,依次经过前底面和后底面的反射,然后经出射侧面出射,出射光经透镜聚焦后由光电探测器接收。入射光束在入射侧面上的入射点 M 、在前底面上的入射点 O 、在后底面上的入射点 P 、在出射侧面上的出射点 N 构成一个与双棱镜上截面平行的光束截面 $A'E'D'F'C'B'$ 。入射光束和旋转台转轴 LL' 垂直

相交于 W 点,在做二维扫描检测过程中,光源和旋转台转轴 LL'之间的相对空间位置始终不变。



(a)阵列检测方式平面示意图

(a)Schematic plan of array sample detection mode



(b)双棱镜探测光路立体图

(b)Stereogram of double-prism detection optical path

图 5 阵列检测方式示意图

Fig. 5 Schematic diagram of array sample detection mode

当入射光束从入射侧面垂直进入棱镜后,光束在入射侧面的入射点 M 点分别到 W 点和 O 点之间的距离之比为由公式(1)确定的最佳位置。B'点与 W 点之间的连线(B'W)方向为 X 方向,即 B'W 方向与 X 方向平移台的平移方向一致。Z 方向升降台带动棱镜升降实现 Z 方向的扫描检测,X 方向平移台带动棱镜平移实现 X 方向的扫描检测。棱镜随旋转台在检测需要的角度范围内旋转时,光束在 O 点漂移最小,通过合理设置样品点的大小,保证扫描过程中入射光点不会偏离出待测样品点。扫描检测阵列样品点时,通过 X 方向和 Z 方向调节,使入射光点落到不同的待测样品点上,通过旋转旋转台完成待测样品点的 SPR 检测。由几何关系可知,当棱镜作 X 方向或者 Z 方向扫描时,只要保持光源和旋转平台的相对空间位置不变,就可以保证棱镜的旋转轴位置

始终满足公式(1),即棱镜的旋转轴位置始终为最佳位置。

以待测阵列样品 $S_1 \sim S_n$ 为例,见图 5(b),SPR 扫描检测步骤如下:

(1)通过旋转旋转台使光束垂直入射到入射侧面,调节 X 方向平移台和 Z 方向升降台,使光束入射到待测阵列样品中的某一样品点;

(2)通过旋转旋转台,使该待测样品点产生表面等离子体共振,完成单一待测样品点的测定,然后旋转旋转台使光束垂直入射到入射侧面;

(3)调节 X 方向平移台和(或)Z 方向升降台,使光束入射到其它待测样品点;

(4)重复步骤(2)和(3),完成各待测样品点的检测。

4 阵列样品点大小的计算

采用上述最佳扫描方式对阵列样品进行检测,可减少探测光束在样品上入射点的漂移量,进而大大减少样品点的尺寸,提高阵列样品点的密度。本文精确计算了最佳扫描方式下准确探测所需样品点的大小。考虑到激光光束本身具有一定宽度,除垂直入射棱镜底边外,都会由于入射光束和棱镜底边的角度而引起光束发散。如图 6 所示,ABC 为棱镜截面,光源发出的入射光束 I (实线)的初始宽度为 P,入射光束 I 垂直于 AB 入射到底边 BC 时,光束宽度变为 P_1 。当棱镜以最佳旋转位置 W 为旋转中心顺时针旋转 θ 时,入射光束 II (虚线)在 BC 上的宽度变为 P_2 。

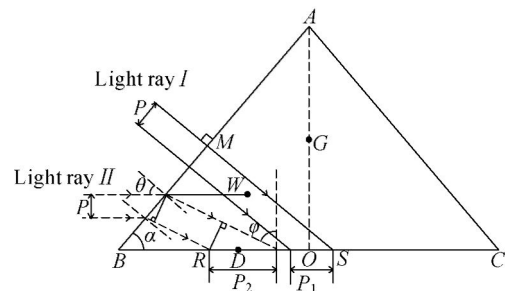


图 6 样品点大小计算示意图

Fig. 6 Schematic diagram of sample for size calculation

由几何关系可得:

$$P_1 = \frac{P}{\sin\left[\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{4}\right]}, \quad (2)$$

$$P_2 = \frac{P \cos\left[\arcsin\frac{\sin\theta}{n}\right]}{\sin\left[\frac{\pi}{2} - \alpha - \arcsin\frac{\sin\theta}{n}\right] \sin\left[\frac{\pi}{2} - \theta\right]}. \quad (3)$$

入射光在样品点上扫描时,光束在底边上覆盖过的宽度 RS 为:

$$RS = \begin{cases} |OD_{\text{optimal}}| + \frac{P_1}{2} + \frac{P_2}{2}, & \text{if } \frac{P_2}{2} - \frac{P_1}{2} < |OD_{\text{optimal}}| \\ P_2, & \text{if } \frac{P_2}{2} - \frac{P_1}{2} > |OD_{\text{optimal}}| \end{cases}, \quad (4)$$

其中: OD_{optimal} 为棱镜以最佳旋转位置 W 为旋转中心旋转扫描时入射光在底边 BC 上的漂移量;

$$OD_{\text{optimal}} = \alpha \cos \alpha - \cos \alpha (\alpha \cos^2 \alpha - MV_{\text{optimal}} \tan \theta) - \sin \alpha (\alpha \cos^2 \alpha - MV_{\text{optimal}} \tan \theta) \times \tan\left[\alpha + \arctan\frac{\sin\theta}{n}\right]. \quad (5)$$

因此,为了保证在检测范围内扫描时入射光点不偏离样品点,所需样品最小值为: $D_{\text{sample}} = \max\{RS\}$ 。选取和实验所用相同规格的等腰直角棱镜进行分析(参数: $n = 1.5163$, $\alpha = 32.5^\circ$, $\alpha = 45^\circ$)。光源为氦氖激光器,光束初始宽度 $P \approx 1 \text{ mm}$ 。由于一般被测样品的折射率与蒸馏水相似,蒸馏水的共振角约为 1.27 rad ,因此设 $\varphi_0 = 1.27 \text{ rad}$,代入式(1)可得 $\left.\frac{MV}{MO}\right|_{\text{optimal}} \approx 0.5246$ 。

根据式(2)、(3)、(4)和(5), D_{sample} 可以表示为:

$$D_{\text{sample}} = \max \left\{ \begin{array}{l} \left| \frac{3.25\sqrt{2}}{2} - \frac{3.25\sqrt{2}}{2} \left[\frac{1}{2} - \frac{0.525}{2} \tan \theta \right] \left[1 + \tan \left[\frac{\pi}{4} + \arcsin \frac{\sin \theta}{1.5163} \right] \right] \right| + \\ \frac{0.1\sqrt{2}}{2} + \frac{0.1 \cos \left[\arcsin \frac{\sin \theta}{1.5163} \right]}{2 \sin \left[\frac{\pi}{4} - \arcsin \frac{\sin \theta}{1.5163} \right] \sin \left[\frac{\pi}{2} - \theta \right]}, \text{if } \frac{P_2 - P_1}{2} < |OD_{\text{optimal}}| \\ \frac{0.1 \cos \left[\arcsin \frac{\sin \theta}{1.5163} \right]}{\sin \left[\frac{\pi}{4} - \arcsin \frac{\sin \theta}{1.5163} \right] \sin \left[\frac{\pi}{2} - \theta \right]}, \text{if } \frac{P_2 - P_1}{2} > |OD_{\text{optimal}}| \end{array} \right\}, \quad (6)$$

其中:

$$0.73 \text{ rad} \leq \theta \leq 0.88 \text{ rad}. \quad (7)$$

由式(6)和(7)计算可得,在此扫描范围内所需样品最小直径约为 5.8525 mm 。

为了证明阵列样品检测过程中使用最佳扫描方法所需的样品点最小,分别将旋转中心设置在底边中心 O、顶点 A 和底边高的中心 G(如图 6 所示)。在其它条件相同的情况下,计算出所需样品最小直径分别约为 37.8853 , 9.2199 和 20.0068 mm 。可见为了保证扫描过程中入射光点不偏离样品,当旋转中心设置在其它位置时所需样品大小比设置在最佳位置时明显大得多。因此,最佳扫描方法可以有效提高阵列样品的点密度。

5 实 验

本文建立的用于阵列样品检测的扫描式表面等离子体共振生物传感器装置如图 7 所示:光源为工作波长为 632.8 nm 的氦氖激光器;单棱镜的参数为: $n = 1.5163$ (K9 玻璃),腰长和厚度都为 32.5 mm , $\alpha = 45^\circ$; X 方向平移台和 Z 方向升降台为手动调节平台,分辨率为 0.2 mm ;旋转台由步进电机驱动,转台转角最大分辨率为 0.00125° ,实验时为了减少扫描时间,转角步长设置为 0.02° ;光电探测器采用 2CR91 型硅光电池,光谱响应为 $400 \sim 1100 \text{ nm}$;信号处理电路将光电流转换为电压信号并放大;采用美国 NI(National Instruments)公司的 PCI6220 数据采集卡进行光电池信号采集和旋转台控制。

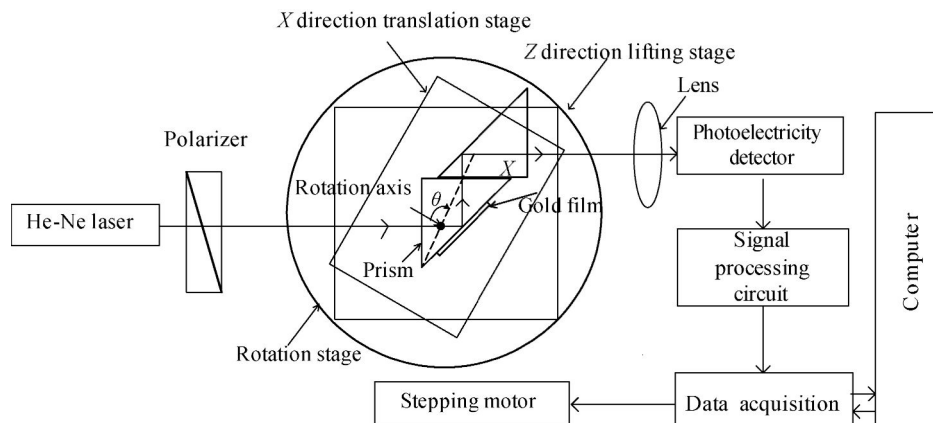


图 7 阵列检测系统示意图

Fig. 7 Schematic of array sample detection system

激光经偏振片后以 P 偏振光入射到棱镜,调节 X 方向平移台和 Z 方向升降台进行 X 和 Z 方向扫描,使入射光点落到待测样品点上。出射光经透镜聚焦到光电池进行光电转换,输出电信号到信号处理电路进行放大。上位机通过采集卡和步进电机驱动器控制旋转台旋转,带动棱镜进行角度扫描。在棱镜角度扫描过程中,采集卡实时采集放大输出光电信号,并传给上位机存储和处理。上位机软件部分采用美国 NI 公司的图形化编程环境 LabVIEW 开发。软件平台主要包括了角度扫描控制、数据采集、数据处理、数据管理及图形显示等 5 个子模块。系统扫描方式为:棱镜每旋转一个角度,对反射光强进行一次测量。为了减少噪声等干扰,对一个采样点进行多次重复采集,然后求平均值。软件设计中采用四阶巴特沃思低通滤波器对采集的信号进行处理,有效消除了高频干扰。

实验中,待测阵列样品 S_1 为蒸馏水, $S_2 \sim S_8$ 为质量浓度分别为 5, 10, 15, 20, 25, 30 和 35 mg/mL 的葡萄糖溶液。根据上文计算结果,待测样品直径约为 5.8 mm。角度 θ 扫描检测范围设置为 0.73 ~ 0.88 rad, 根据几何关系可得相应的 φ 角约为 71 ~ 75.5°。

图 8 为阵列样品中 S_1, S_2, S_4, S_6 和 S_8 的 SPR 检测结果。随着葡萄糖溶液的浓度增加,待测样品的折射率增大,测得的 SPR 角度也相应的增大, $S_1 \sim S_8$ 的 SPR 共振角分别为 73.745, 73.919, 74.052, 74.185, 74.306, 74.408, 74.549 和 74.660°, 葡萄糖溶液浓度与共振角的关系如图 9 所示。有研究者发现,浓度较低时葡萄糖溶液的折射率与浓度成近似线性关系^[9-10], 因此 SPR 共振角与葡萄糖浓度也为近似线性关系^[10]。图 9 显

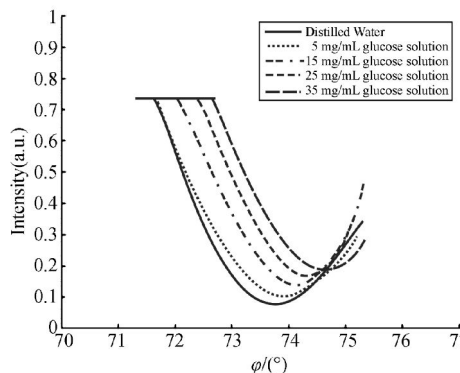


图 8 阵列样品的 SPR 检测曲线

Fig. 8 Reflection curves of array samples in SPR detection

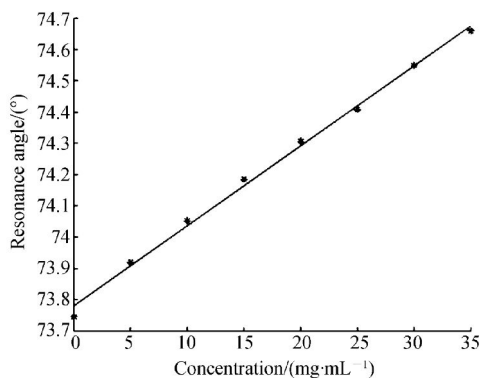


图 9 葡萄糖溶液浓度与共振角的关系曲线

Fig. 9 Curve of glucose solution concentration and SPR angle

示,利用本文构建的 SPR 传感器得到的葡萄糖溶液浓度与共振角线性关系良好,这表明检测结果准确可靠。

6 结 论

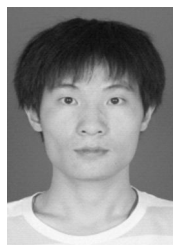
本文提出了一种基于平面棱镜耦合的扫描式表面等离子体共振生物传感器用于阵列样品的定量检测,详细介绍了双棱镜探测光路、阵列扫描方式,计算了可探测阵列样品的点密度。最后通过阵列样品检测实验证明了该方法和装置的可行性。实验采用蒸馏水和浓度分别为 5,10,15,20,25,30

和 35 mg/mL 的葡萄糖溶液作为阵列样品,测得相应的 SPR 共振角分别为 73.745,73.919,74.052,74.185,74.306,74.408,74.549 和 74.660°,结果显示葡萄糖溶液浓度与共振角线性关系良好。该装置可以有效解决扫描检测阵列样品时入射光点在样品上的漂移问题,提高了阵列样品的密度,并且非常便于出射光的收集和准确测量。该装置在表面等离子体共振二维阵列样品检测中具有很好的应用价值。

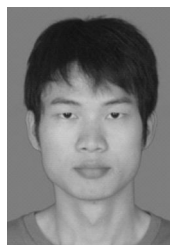
参考文献:

- [1] SCHASFOORT R B M, TUDOS A J. *Handbook of Surface Plasmon Resonance*[M]. Royal Society of Chemistry, 2008.
- [2] KABASHIN A V, NIKITIN P I. Surface plasmon resonance in-terferometer for bio-and chemical-sensors [J]. *Optics Communications*,1998,150(1-6):5-8.
- [3] MULLETT W M, LAI E P C, YEUNG J M. Surface plasmon resonance-based immunoassays [J]. *Methods*,2000,22(1):77-91.
- [4] MYSZKA D G, RICH R L. Implementing surface plasmon resonance biosensors in drug discovery [J]. *Pharmaceutical Science & Technology Today*, 2003, 3(9): 310-317.
- [5] HOMOLA J, LU H B, YEE S S. Dual-channel surface plasmon resonance sensor with spectral discrimination of sensing channels using dielectric overlayer [J]. *Electronics Letters*, 1999, 35(13): 1105-1106.
- [6] NELSON B P, GRIMSRUD T E, LILES M R, *et al.*. Surface plasmon resonance imaging measurements of DNA and RNA hybridization adsorption onto DNA microarrays [J]. *Analytical Chemistry*, 2001, 73(1): 1-7.
- [7] 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: 1521-1528.
- [8] QI P, LI Y, ZHONG J G. Optimized angle scanning method for array sample detection in surface plasmon resonance biosensor [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(9):1245-1250.
- [9] YEY LY. Real-time measurement of glucose concentration and average refractive index using a laser interferometer [J]. *Opt. Lasers in Eng.*, 2008,46(9): 666-670.
- [10] 刘畅, 邹正峰, 陈淑芬, 等. 基于光盘光栅的表面等离子体共振传感器[J]. *中国激光*, 2012, 39(3): 0314001-1-0314001-4.
LIU CH, ZOU ZH F, CHEN SH F, *et al.*. Surface plasmon resonance sensor based on compact disk grating [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(3): 0314001-1-0314001-4. (in Chinese)

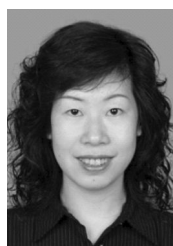
作者简介:



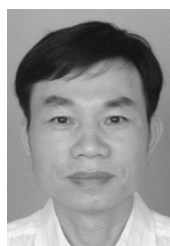
齐 攀(1982—),男,河北保定人,博士研究生,2005年、2007年于暨南大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光电检测技术方面的研究。E-mail:qiqipan@163.com



冯明创(1988—),男,广东高州人,硕士研究生,2011年于暨南大学获得学士学位,主要从事光电检测技术方面的研究。E-mail: mingchuangfeng@163.com



李 莹(1976—),女,广东梅州人,博士,副教授,1998年、2001年、2008年于暨南大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事生物医学信息技术方面的研究。E-mail: liying@hwy.jnu.edu.cn



钟金钢(1964—),男,江西新余人,博士,教授,博士生导师,主要从事光电检测技术、生物传感等方面的研究。E-mail: tzjg@jnu.edu.cn

导师简介: