

文章编号:1007-2780(2017)05-0402-08

基于色相算法的表面等离子体共振 成像传感器

范智博^{1,2}, 龚晓庆^{1,2}, 逯丹凤¹, 高 然¹, 邓耀华³, 祁志美^{1*}

(1. 中国科学院 电子学研究所 传感技术国家重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 广东工业大学 机电工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 本文报道了一种基于色相算法的彩色表面等离子体共振 (SPR) 成像传感器, 该传感器不仅能够对发生于 SPR 芯片表面的物理化学反应进行直观的图像观测, 还能基于色相算法对这些表面反应进行定量分析。利用自制的波长/图像同步检测型 SPR 传感器, 实验获得了不同共振波长对应的共振图像, 然后借助色相算法求得每一幅共振图像对应的二维色相分布及其平均色相, 建立了共振波长与图像平均色相的依赖关系, 用于优化基于色相参数的 SPR 折射率灵敏度。实验选择起始共振波长为 650 nm, 测得基于色相的折射率灵敏度为 3 338/RIU, 是基于共振波长的折射率灵敏度的 1.49 倍。利用彩色 SPR 成像技术能够直观地观测到金膜表面涂布的聚四氟乙烯薄膜的不均匀性, 再通过计算图像局部区间的平均色相, 可以定量获得不同薄膜厚度对应的折射率灵敏度。实验结果证明了基于色相算法的彩色 SPR 成像传感器明显优于常规 SPR 传感器。

关键词: 彩色表面等离子体共振成像; 共振波长; 色相; 厚度不均匀性; 折射率灵敏度

中图分类号: TP212.14 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20173205.0402

Surface plasmon resonance imaging sensor based on hue algorithm

FAN Zhi-bo^{1,2}, GONG Xiao-qing^{1,2}, LU Dan-feng¹, GAO Ran¹, DENG Yao-hua³, QI Zhi-mei^{1*}(1. *State Key Laboratory of Transducer Technology, Institute of Electronics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;**School of Electro-Mechanical Engineering,**Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)*

Abstract: A Surface Plasmon Resonance Imaging sensor based on hue algorithm has been presented.

收稿日期: 2016-10-12; **修订日期:** 2016-12-26.

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61377064, No. 61675203); 国家重点基础研究发展计划 (No. 2015CB352100); 中科院科研装备研制项目 (No. YZ201508); 广州市科技计划项目 (No. 201510010094); 广东省省级科技计划项目 (No. 2016B010112003)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61377064, 61675203); National Basic Research Program of China (No. 2015CB352100); Research Equipment Development Project of Chinese Academy of Sciences (No. YZ201508); Guangzhou Science and Technology Plan Project (No. 201510010094); Guangdong Provincial Science and Technology Program (No. 2016B010112003)

* 通信联系人, E-mail: zhimei-qi@mail.ie.ac.cn

The sensor can be used for observing the chemical or physical reactions on the surface of the SPR chip. What is more, the hue algorithm can be used to analyze these reactions on the surface of the SPR chip quantitatively. First of all, the wavelength/image synchronous detection SPR sensor was used to obtain the resonance spectra with different resonance wavelengths and the corresponding color images. And then, the hue algorithm was used to get the hue distribution of the image and determine the relationship between the resonance wavelengths and the average hue. Considering the relationship between the average hue and the resonance wavelengths, the initial resonance wavelength was set as 650 nm. Under this circumstance, the sensitivity of the hue is about 3 338/RIU, which is 1.49 times as the sensitivity of the resonance wavelength. The Teflon layer was fabricated on the gold film, and the thickness of the layer was analyzed by the color SPRI image. The hue of the local areas was calculated to determine the sensitivity of the different thicknesses of the Teflon layer quantitatively. The experimental results indicate that the SPRI sensor based on hue algorithm is better than the conventional SPR sensor distinctly.

Key words: color surface plasmon resonance imaging; resonance wavelength; hue; inhomogeneity of the thickness; RI sensitivity

1 引言

表面等离子体共振成像(Surface Plasmon Resonance Imaging, SPRI)技术是一种基于表面等离子体共振原理的光学成像技术,该技术最早由 Yeatman 于 1987 年提出^[1-2]。与其他成像技术相比,SPRI 技术具有免标记、可实时监测、灵敏度高等特点^[3-5],因此近年来被广泛应用于食品安全、药物筛选、临床诊断、生物研究等领域,是表界面物理化学反应分析中一种不可或缺的检测方法^[6-10]。

常规的 SPRI 技术主要使用单色光源和 CCD 相机对 SPR 灰度图像进行采集,并通过反射光强度或图像的灰度来定量分析外界样品折射率的变化^[11-17]。为了获得理想的对比度,基于单色光源的 SPRI 装置通常需要进行角度扫描检测^[18-20],装置稳定性相对较低,时间分辨率差。Knobloch 于 1996 年提出将白光作为 SPRI 的激发光源,采集彩色 SPR 图像^[21]。与灰度图像相比,彩色 SPR 图像不仅包含了更多的波长变化信息,且检测装置的稳定性更高,但研究者只通过图像颜色变化定性说明了外界折射率的变化信息,无法确定颜色与折射率的定量关系。

本文提出了一种基于色相算法的彩色 SPRI 传感器。利用自制的波长/图像同步检测型 SPR 传感器采集彩色 SPR 图像。在图像处理中,采用

色相算法对图像的颜色进行进一步分析,获得了仅与波长相关而与明度无关的色相值,以得到 SPR 图像颜色与外界折射率的定量关系。实验首先通过改变入射角度,获得不同共振波长对应的彩色 SPR 图像,然后借助色相算法求得每一幅共振图像对应的二维色相分布及其平均色相,建立共振波长与图像平均色相的依赖关系,随后通过该依赖关系对基于色相参数的 SPR 折射率灵敏度进行优化及测定。最后,在金膜上涂布聚四氟乙烯膜,利用 SPR 图像及其二维色相分布对膜厚度的不均匀性进行成像分析,并且测定了不同厚度区域对应的折射率灵敏度。

2 色相算法

本文采用将图像的 R、G、B 值转化为色相的方法,从而达到对所得 SPR 图像的颜色进行定量分析的目的,色相(Hue)是 HSV(色相 Hue、饱和度 Saturation、明度 Value)颜色空间中一个重要的参数,它将颜色分为 360°,且色相只与决定该颜色的光的波长有关^[22]。其具体计算方法如下:

首先提取一个像素的 R、G、B 中的最大值和最小值,如公式(1)、(2)所示:

$$\max = \max(R, G, B), \quad (1)$$

$$\min = \min(R, G, B), \quad (2)$$

当最大值为 R 时,色相 H 可用公式(3)来计算求得:

$$H = (G - B) / (\max - \min) \times 60, \quad (3)$$

当最大值为 G 时,色相 H 可用公式(4)来计算求得:

$$H = 120 + (B - R) / (\max - \min) \times 60, \quad (4)$$

当最大值为 B 时,色相 H 可用公式(5)来计算求得:

$$H = 240 + (R - G) / (\max - \min) \times 60. \quad (5)$$

通过对 SPR 图像的色相进行计算,可得到图像的二维色相分布,将图像中所有像素点的色相进行平均,即可建立平均色相与共振波长的对应关系,从而得到平均色相与外界折射率的关系;进而,由于共振光谱只能对反射光集体行为进行检测,无法获取局部区域的信息,而在 SPR 图像中可以对图像中某一局部区域的色相进行分析,从而克服了这一缺点。

3 实 验

3.1 仪器与试剂

LS-1 卤钨灯(美国 Ocean Optics 公司); USB2000+ 可见光波段光谱分析仪(美国 Ocean Optics 公司);玻璃片(厚度为 1 mm, 633 nm 波长处折射率为 1.522, 日本 Matsunami 株式会社); 45°/45°/90°棱镜(633 nm 波长处折射率为 1.799, 北京北东光电自动化开发公司);光纤准直器、线性偏振片(北京大恒光电技术公司);多模石英光纤(浙江雷畴科技有限公司);彩色 CCD 相机(深圳显盛仪器有限公司);箱式马弗炉(合肥科晶材料技术有限公司);数字阿贝折射仪(上海光学仪器研究所);蠕动泵(保定兰格恒流泵有限公司)。

氯化钠(分析纯, 国药集团化学有限公司);实验用水为去离子水(Milli-Q 纯净水机制备)。

3.2 实验装置

3.2.1 SPR 传感芯片制备

首先将玻璃基片依次用丙酮、乙醇、去离子水超声、清洗并烘干后待用。在洁净的玻璃基片上依次溅射 3 nm 铬和 50 nm 金,制作 SPR 芯片。在确定共振波长与平均色相对应关系和色相灵敏度测定的实验中,直接使用制得的 SPR 芯片。

在聚四氟乙烯膜厚度表征实验中,在金膜上涂覆 100 μL 聚四氟乙烯,并将该芯片置于马弗炉中进行煅烧,在 120 min 内,由室温加热到 200 $^{\circ}\text{C}$,

保持 240 min,以去除富集层中的溶剂,然后经 120 min 匀速降温至 100 $^{\circ}\text{C}$,最后自然冷却至室温。

3.2.2 实验装置搭建

实验装置示意图如图 1 所示,将制作好的传感芯片用高折射率耦合液与棱镜贴合,并将样品槽固定在芯片表面,使芯片的敏感部分暴露在槽内,卤钨灯发出的宽带白光经过传光光纤、光纤准直器、线性偏振片后变为一束准直性较好的 p-偏振平行光束。入射光经过高折射率棱镜入射到金/样品界面发生全反射,当入射光波矢的水平分量与金/样品界面等离子体波矢匹配时,即发生表面等离子体共振,从而产生能量耦合。反射光束进入彩色 CCD 相机镜筒,并经镜筒内的半透半反镜分为两部分,一部分反射光进入 CCD 相机进行成像,另一部分反射光通过汇聚透镜和传光光纤进入光谱仪,通过光谱仪可观察到光谱在共振波长处产生一个低谷,同时由于某一波长的光被吸收,所以彩色 CCD 相机所拍摄的 SPR 图像会呈现某种颜色,且该颜色是共振波长所对应颜色的补色。

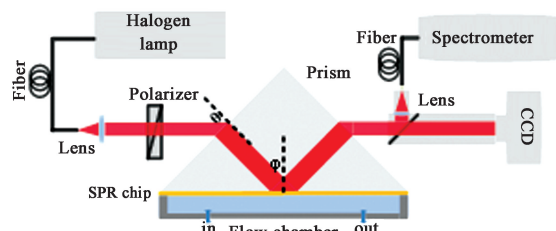


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

当样品折射率发生改变时,共振波长也随之发生改变;同时由于共振波长的改变,SPR 图像的颜色同样也会发生改变。通过对反射光斑进行成像并对其颜色进行分析,即可得到样品的折射率信息。

3.3 实验方法

在确定共振波长与平均色相对应关系的实验中,安装 SPR 芯片,设置光谱仪积分时间为 100 ms。通过旋转转台来调整入射角度,使得起始共振波长为 560 nm 左右,随后调整入射、接收角度,使共振波长每次红移 10 nm 左右,采集相应

的共振光谱及 SPR 图像。

在折射率灵敏度实验中,配制了 7 种不同浓度的氯化钠水溶液,其质量分数分别为 0%、1%、2%、3%、4%、6%、8%。用阿贝折射率仪测得溶液的相应折射率为 1.333 0、1.334 5、1.336 0、1.337 3、1.339 1、1.341 9、1.345 5。向样品槽中加入去离子水,调节入射角度,首先使得起始共振波长为 567 nm 左右,设置光谱仪积分时间为 100 ms,采集共振光谱及 SPR 图像,随后将去离子水泵出,将 2%、4%、6%、8% 的氯化钠水溶液由低浓度到高浓度用蠕动泵依次泵入样品槽,采集相应的共振光谱,同时对 SPR 图像进行采集。随后,向样品槽中加入去离子水,调节入射角度使得起始共振波长为 650 nm 左右,设置光谱仪积分时间为 100 ms,采集反射光谱及反射光图像,随后将去离子水泵出,将 1%、2%、3%、4% 的氯化钠水溶液由低浓度到高浓度用蠕动泵依次泵入样品槽,采集相应的共振光谱及 SPR 图像。

在聚四氟乙烯膜厚度表征实验中,调整入射角度,使得不同厚度的区域出现较为明显的颜色差,以得到较大的色相差。利用彩色 CCD 相机采集其 SPR 图像。然后用蠕动泵向样品槽中泵入去离子水,并采集其 SPR 图像。

4 结果与讨论

4.1 共振波长与色相对应关系

图 2(a)为在不同入射角下测得的共振光谱,随着入射角度的逐渐减小,共振波长从 555.96 nm 红移至 696.66 nm。图 2(b)为不同共振光谱所对应的 SPR 图像,随着共振波长的不断红移,图像颜色也发生改变,且图像颜色与共振波长所对应颜色为补色关系。利用上述色相算法对 SPR 图像的二维色相分布进行了计算,结果如图 2(c)所示,随着图像颜色的变化,其二维色相分布也发生相应的变化。

将所选 300 pixel×300 pixel 区域的所有像素点的色相进行平均,如图 3 所示,随着共振波长的不断红移,图像的平均色相先变大后变小,但由于各波长区间的平均色相变化量并不相同,所以应选择平均色相变化量较大的一个波长区间来获取较大的色相灵敏度。

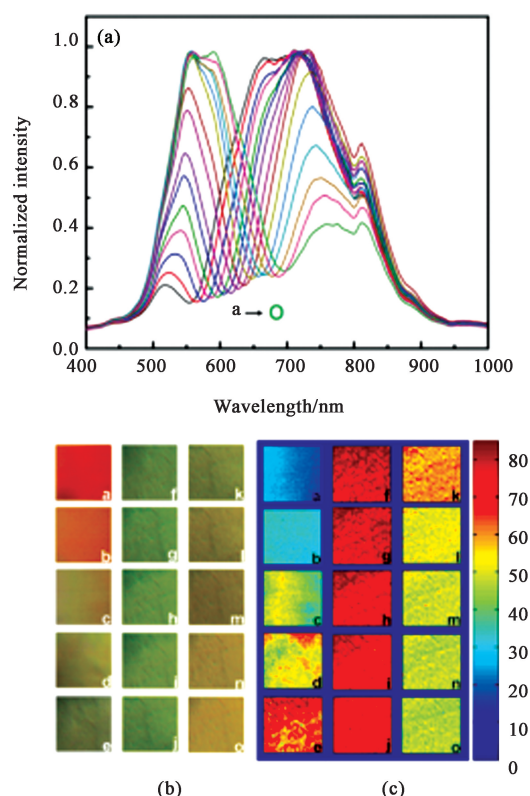


图 2 (a)不同入射角度下的共振光谱,(b)不同入射角度对应的 SPR 图像(300 pixel×300 pixel),(c)不同 SPR 图像对应的二维色相分布(300 pixel×300 pixel)

Fig.2 (a)Resonance spectra corresponding to different incident angles, (b) SPR images (300 pixel×300 pixel) corresponding to different incident angles, (c) 2D hue profiles corresponding to different SPR images

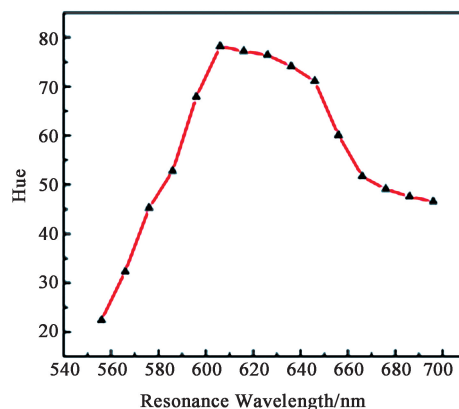


图 3 色相与共振波长的关系

Fig.3 Average hue versus resonance wavelengths

4.2 色相灵敏度的测定

图 4(a) 为起始共振波长为 567.46 nm 时, 不同浓度氯化钠溶液所对应的共振光谱, 随着氯化钠溶液浓度的升高, 共振波长由 567.46 nm 红移至 581.05 nm, 共变化了 13.59 nm。共振波长变化量与折射率线性关系如图 4(b) 所示, 其拟合方程为: $y = -1512.331 + 1134.679x$, 拟合度为 $R^2 = 0.995$ 。此时, 共振光谱的灵敏度约为 1 134 nm/RIU。实验结果表明, 当起始共振波长较小时, 共振光谱灵敏度较低, 不利于对外界折射率变化的探测。

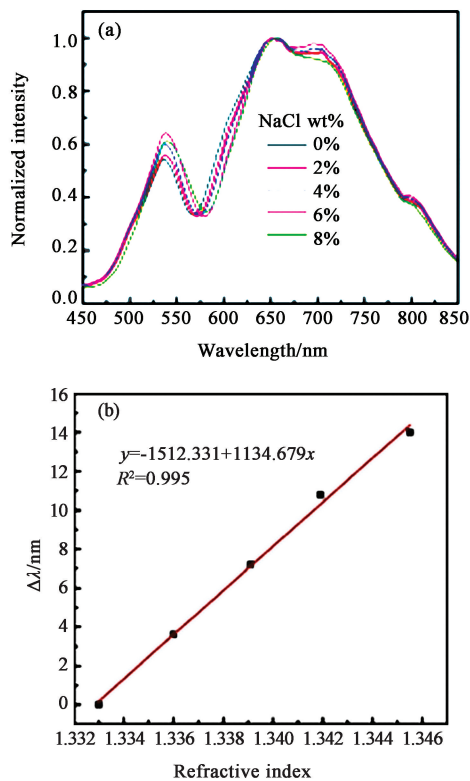


图 4 (a) 不同浓度氯化钠溶液对应的共振光谱, (b) 共振波长变化量与折射率的关系

Fig.4 (a) Resonance spectra corresponding to different NaCl concentrations, (b) $\Delta\lambda_R$ versus refractive index

图 5(a) 为起始共振波长为 567.46 nm 时, 不同浓度氯化钠溶液所对应的 SPR 图像及其二维色相分布, 随着氯化钠溶液浓度的升高, 图像的平均色相逐渐增大。平均色相和折射率的线性关系如图 5(b) 所示, 平均色相随着折射率的增大而增大, 其拟合方程为: $y = -1661.614 + 1272.014x$, 拟合度为 $R^2 = 0.998$, 色相灵敏度约为 1 272/RIU。与光

谱灵敏度相比, 色相灵敏度虽然有着一定的提高, 但同样不利于对外界折射率变化的探测。

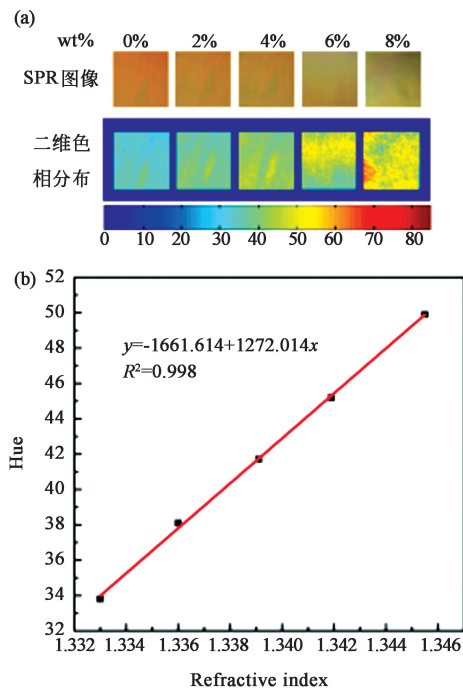


图 5 (a) 不同浓度氯化钠溶液所对应的 SPR 图像 (300 pixel $\times$ 300 pixel) 及其二维色相分布, (b) 平均色相与折射率的关系

Fig.5 (a) SPR images (300 pixel $\times$ 300 pixel) corresponding to different NaCl concentrations and the corresponding 2D hue profiles, (b) Average hue versus refractive index

综上所述, 在选择起始共振长时应同时考虑共振光谱灵敏度和平均色相与共振波长的关系, 对基于色相参数的 SPR 折射率灵敏度进行优化。所以, 取共振波长为大于 600 nm 的区间进行进一步讨论, 以得到较大的色相灵敏度。由上文 4.1 中的实验结果可知, 在共振波长由 605.92 nm 红移至 696.66 nm 的过程中, 平均色相由 78.2 下降至 45.6, 并且在 646.99 nm $\sim$ 666.42 nm 区间内其变化量最大。所以可选择 650 nm 作为起始共振波长, 以得到较大的色相灵敏度。

图 6(a) 为起始共振波长为 650.47 nm 时, 不同浓度氯化钠溶液所对应的共振光谱, 随着氯化钠溶液浓度的升高, 共振波长逐渐由 650.47 nm 红移至 664 nm, 改变量为 13.53 nm。共振波长偏移量与折射率的关系如图 6(b) 所示, 二者呈线性关系, 其拟合方程为: $y = -2987.792 + 2241.290x$, 拟合度为 $R^2 = 0.997$, 灵敏度约为 2 241 nm/RIU。与前文起

始共振波长在 567.46 nm 的灵敏度进行对比可知,共振光谱的灵敏度有了显著的提高。

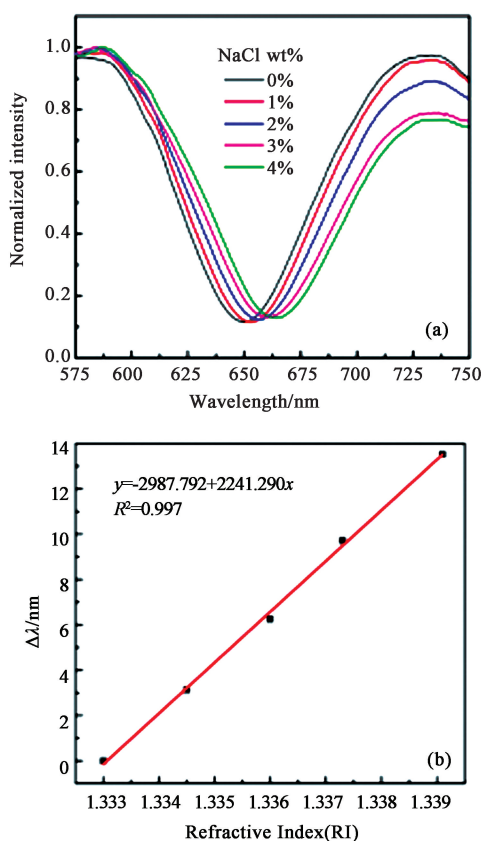


图6 (a)不同浓度氯化钠溶液对应的共振光谱 (b) 共振波长变化量与折射率的关系

Fig.6 (a) Resonance spectra measured for different NaCl concentrations, (b) $\Delta\lambda_R$ versus refractive index

图7(a)为起始共振波长为 650.47 nm 时,不同浓度氯化钠溶液所对应的 SPR 图像(300 pixel×300 pixel)及其二维色相分布结果,随着氯化钠溶液浓度的不断变大,SPR 图像颜色逐渐由绿色变为黄色,其色相逐渐下降。如图7(b)所示,为了进一步体现 SPR 图像的优势,将所取得的 300 pixel×300 pixel 的图像进一步细化为 100 pixel×100 pixel 的图像,并对其中的所有像素点的色相进行平均,以得到色相灵敏度。

不同大小图像的平均色相与折射率关系如图7(c)所示,300 pixel×300 pixel 的平均色相与折射率关系的拟合方程为: $y = 4517.784 - 3338.212x$, 拟合度为 $R^2 = 0.997$, 通过拟合方程可得色相灵敏度约为 3338/RIU。通过对比共振光谱灵敏度和 SPR 图像色相灵敏度可知,后者约

为前者的 1.49 倍。100×100 像素的平均色相与折射率关系的拟合方程为: $y = 4946.174 - 3658.329x$, 拟合度为 $R^2 = 0.992$, 通过拟合方程可得色相灵敏度约为 3658/RIU。此时,色相灵敏度约为共振光谱灵敏度的 1.63 倍,相比 300 pixel×300 pixel 有着较为明显的提高。

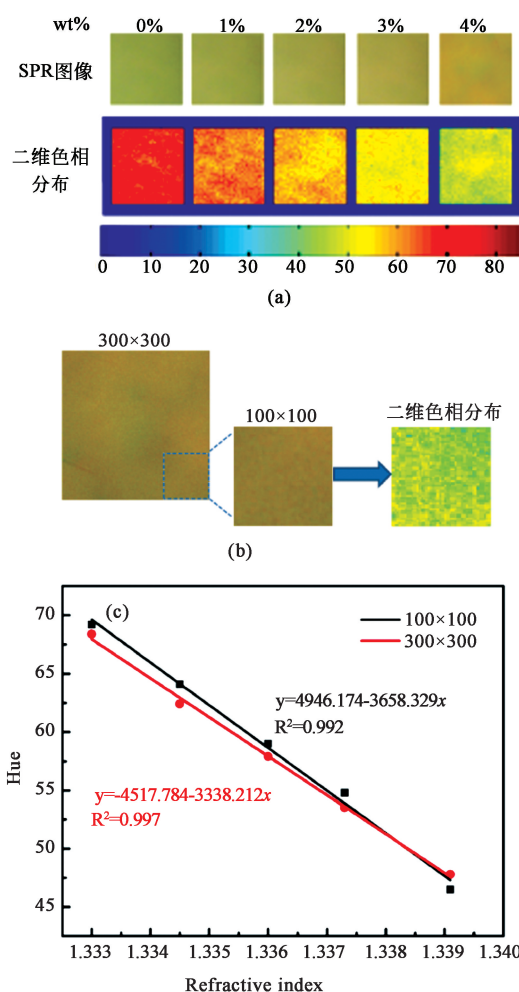


图7 (a)不同浓度氯化钠溶液所对应的 SPR 图像 (300 pixel×300 pixel) 及其二维色相分布, (b) SPR 图像细化示意图, (c) 不同大小的图像所对应的平均色相与折射率关系

Fig.7 (a) SPR images (300 pixel×300 pixel) corresponding to different NaCl concentrations and the corresponding 2D hue profiles, (b) Process of thinning the SPR image, (c) Average hue versus refractive index corresponding to different size of the image

综上所述,在起始共振波长为 650 nm 时,通过对比共振光谱灵敏度和 SPR 图像色相灵敏度

可知,使用图像平均色相来检测外界折射率可获得更高的灵敏度,并且通过对图像中某一区域的筛选,可以得到更高的色相灵敏度。

4.3 聚四氟乙烯膜厚度表征

图 8(a)为涂布有聚四氟乙烯膜的 SPR 芯片的 SPR 图像及其二维色相分布。由 SPR 图像可以清晰的看出,图像中的颜色呈绿色和黄色相间分布,这是由于聚四氟乙烯膜的厚度不均匀而导致的。通过对其二维色相分布进行计算,可知图像为绿色的区域,如图 8(a)中区域 1 所示,其平均色相较高,约为 70.7;而图像为黄色的区域,如图 8(a)中区域 2 所示,其平均色相相对较低,约为 52.4。通过与上文中折射率灵敏度实验中的结果进行综合可知,图像中色相较大的区域,代表此处的折射率较低,且由于聚四氟乙烯的折射率大于空气,所以证明该区域的膜厚度较小;反之,图像的色相较小的区域,则代表着该区域的聚四氟乙烯膜的厚度较大。

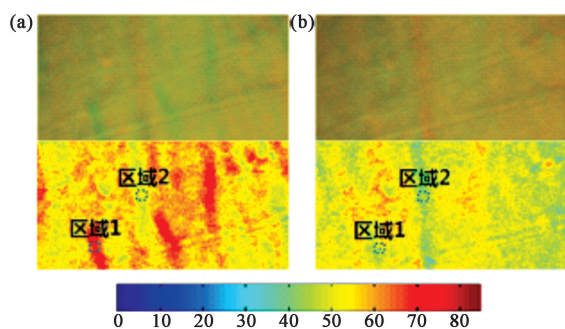


图 8 (a)外界环境为空气时所对应的 SPR 图像及其二维色相分布, (b)外界环境为水时所对应的 SPR 图像及其二维色相分布

Fig.8 (a)SPR image and the corresponding 2D hue profiles measured with air, (b) SPR image and the corresponding 2D hue profiles measured with water

进一步探究薄膜不同厚度区域对折射率的敏感特性,图 8(b)为外界环境为去离子水时的 SPR 图像,通过计算其色相并对比同一区域可知,区域

1 的色相由 70.7 变为 48.4,而区域 2 的色相由 52.4 变为 44.9。由此可得,区域 1 对折射率的敏感程度要大于区域 2,这是由于区域 1 的薄膜厚度较小引起的。

通过计算 SPR 图像的二维色相分布,可对聚四氟乙烯薄膜的厚度不均匀性进行表征,进一步改变外界折射率,可对不同厚度的局部区域对折射率的敏感程度进行测定。实验结果表明,薄膜厚度较小的区域,其色相对折射率的灵敏度更高。

5 结 论

本文报道的基于色相算法的彩色表面等离子体共振成像传感器,既可以通过彩色 SPR 图像对 SPR 芯片表面的物理化学反应进行直观观测,又可以通过色相算法对这些反应进行定量分析。实验首先通过改变入射角度,采集不同角度下的共振光谱和 SPR 图像,对图像的平均色相与共振波长的对应关系进行确定,随后根据该依赖关系选取起始共振波长,以优化其色相灵敏度。实验表明,在选取起始共振波长为 650 nm 左右时,色相灵敏度为 3 338/RIU,约为共振波长灵敏度的 1.49 倍。当把所选定的 300 pixel×300 pixel 区域缩小至 100 pixel×100 pixel 时,色相灵敏度提高为 3 658/RIU,约为共振波长灵敏度的 1.63 倍。因此可以通过对图像中某一区域的筛选,得到更大的色相灵敏度。最后,实验还对涂布聚四氟乙烯薄膜的 SPR 芯片进行成像,通过对图像的直接观测以及其二维色相分布的计算,可知薄膜的厚度并不均匀,并可获得局部区域的厚度信息。在此基础上,实验还探究了不同厚度区域对折射率的灵敏度,当外界环境由空气变为水时,厚度较小区域的色相由 70.7 变为 48.4,而较厚区域的色相仅由 52.4 变为 44.9,由此可知前者对折射率的灵敏度更高。实验结果有力地证明了基于色相算法的彩色 SPR 成像传感器明显优于常规 SPR 传感器。

参考文献:

- [1] YEATMAN E, ASH E A. Surface Plasmon microscopy[J]. *Electronics Letters*, 1987, 23(20): 1091-1092.
- [2] 申刚义,陈义,张铁鸣,等.表面等离子体共振成像[J].*化学进展*, 2010, 22(8): 1648-1655.
SHEN G Y, CHEN Y, ZHANG Y M, *et al.* Surface Plasmon resonance imaging [J]. *Progress in Chemistry*, 2010, 22(8): 1648-1655. (in Chinese)
- [3] AGNARSSON B, INGTHORSSON S, GUDJONSSON T, *et al.* Evanescent-wave fluorescence microscopy using

- symmetric planar waveguides[J]. *Optics Express*, 2009, 17(7): 5075-5082.
- [4] 王建平,李俊山,杨亚威,等.基于红外成像的乙烯气体泄漏检测[J].液晶与显示,2014,29(4):623-628.
WANG J P, LI J S, YANG Y W, *et al.* Ethylenegas leaking detection based on infrared imaging [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(4): 623-628. (in Chinese)
- [5] LIUZ, LI XX, TABAKMAN S M, *et al.* Multiplexed multicolor Raman imaging of live cells with isotopically modified single walled carbon nanotubes[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2008, 130(41): 13540-13541.
- [6] KODADEK T. Protein microarrays: prospects and problems[J]. *Chemistry & Biology*, 2001, 8(2): 105-115.
- [7] YUK J S, HA K S. Proteomic applications of surface Plasmon resonance biosensors: analysis of protein arrays[J]. *Experimental & Molecular Medicine*, 2005, 37(1): 1-10.
- [8] MARIANI S, MINUNNI M. Surface Plasmon resonance applications in clinical analysis[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2014, 406(9/10): 2303-2323.
- [9] LISBOA P, VALSESIA A, MANNELLI I, *et al.* Sensitivity enhancement of surface-Plasmon resonance imaging by nano array edorganothiols[J]. *Advanced Materials*, 2008, 20(12): 2352-2358.
- [10] CETIN A E, COSKUN A F, GALARRETA B C, *et al.* Handheld high-throughput Plasmon biosensor using computational on-chip imaging[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(1): e122.
- [11] PILIARIK M, HOMOLA J. Self-referencing SPR imaging for most demanding high-throughput screening applications[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2008, 134(2): 353-355.
- [12] 李莹,钟金钢,张永林.基于表面等离子体共振成像的指纹采集[J].中国激光,2006,33(8):1143-1147.
LI Y, ZHONG J G, ZHANG Y L. Fingerprint image acquisition based on surface Plasmon resonance imaging[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(8): 1143-1147. (in Chinese)
- [13] ZHANG H Y, YANG L Q, ZHOU B J, *et al.* Investigation of biological cell - protein interactions using SPR sensor through laser scanning confocal imaging - surface Plasmon resonance system[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2014, 121: 381-386.
- [14] YANASE Y, SAKAMOTO K, KOBAYASHI K, *et al.* Diagnosis of immediate-type allergy using surface Plasmon resonance[J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(4): 1339-1348.
- [15] 解飞,张莹,金伟,等.基于表面等离子体共振成像技术研究苏拉明和顺铂对肝癌细胞生长的抑制作用[J].高等学校化学学报,2014,35(1):30-36.
XIE F, ZHANG Y, JIN W, *et al.* Detection of inhibitory effects of Suramin and Cisplatin on hepatocellular carcinoma cells using surface Plasmon resonance imaging [J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2014, 35(1): 30-36. (in Chinese)
- [16] VANNAHME C, DUFVA M, KRISTENSEN A. High frame rate multi-resonance imaging refractometry with distributed feedback dye laser sensor[J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(4): e269.
- [17] LIU CC, CUI D F, LI H. A hard - soft microfluidic-based biosensor flow cell for SPR imaging application[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2010, 26(1): 255-261.
- [18] BEUSINK J B, LOKATE A M C, BESSELINK G A J, *et al.* Angle-scanning SPR imaging for detection of biomolecular interactions on microarrays[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2008, 23(6): 839-844.
- [19] ANDERSSON O, ULRICH C, BJÖREFORS F, *et al.* Imaging SPR for detection of local electrochemical processes on patterned surfaces[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2008, 134(2): 545-550.
- [20] ZHANG P F, LIU L, HE Y H, *et al.* Non-scan and real-time multichannel angular surface Plasmon resonance imaging method[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(26): 6037-6042.
- [21] KNOBLOCH H, VON SZADA-BORRYSZKOWSKI G, WOIGK S, *et al.* Dispersive surface Plasmon microscopy for the characterization of ultrathin organic films[J]. *Applied Physics Letters*, 1996, 69(16): 2336-2337.
- [22] SMITH A R. Color gamut transform pairs[J]. *ACM Siggraph Computer Graphics*, 1978, 12(3): 12-19.

作者简介:范智博(1992—),男,天津人,硕士研究生,2014年于南开大学获得学士学位,主要从事表面等离子体共振成像方面的研究。E-mail:zbfan_ucas@163.com

祁志美(1967—),男,内蒙古人,博士,中科院“百人计划”研究员,2001年于日本横滨国立大学获工学博士学位,主要从事纳米光电功能材料、光 MEMS 技术、集成光波导传感器与系统、表界面光谱分析技术与仪器方面的研究,光纤声传感器与声定位系统等。E-mail:zhimei-qi@mail.ie.ac.cn