

文章编号: 0258-7025(2006)08-1143-05

基于表面等离子体共振成像的指纹采集

李 莹^{1,2}, 钟金钢^{1*}, 张永林¹

(¹ 暨南大学光电工程系, 广东 广州 510632; ² 暨南大学华文学院预科部, 广东 广州 510610)

摘要 指纹识别技术是方便、可靠、非侵害和价格低廉的生物识别技术。为提高图像的质量,根据表面等离子体共振(SPR)的原理,提出采用表面等离子体共振成像(SPRI)采集指纹图像的方法。介绍了表面等离子体共振成像采集指纹图像的原理、自行组建的表面等离子体共振成像指纹采集系统的结构。采用 Kretschmann 型棱镜耦合结构激励表面等离子体共振,偏振的平面光经棱镜投射到传感片,发生表面等离子体共振现象。由 CCD 摄像机采集反射光指纹图像。分别用表面等离子体共振成像方法和传统光学方法采集了同一指纹的图像。两图中主要区域指纹脊和谷的对比度分别为 0.2014 和 0.0516。表面等离子体共振成像方法采集的指纹图像的对比度和清晰度显著提高。

关键词 医用光学与生物技术;生物识别技术;指纹采集;表面等离子体共振成像;图像质量

中图分类号 TN 247;Q 819 文献标识码 A

Fingerprint Image Acquisition Based on Surface Plasmon Resonance Imaging

LI Ying^{1,2}, ZHONG Jin-gang¹, ZHANG Yong-lin¹

¹*Institute of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China*
²*Pre-University Department, College of Chinese Language and Culture, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510610, China*

Abstract The technology of fingerprint identification is a convenient, reliable, noninvasive and cheap scheme for biometrics. A method that adopts surface plasmon resonance imaging (SPRI) to collect fingerprints utilizing surface plasmon resonance (SPR) phenomenon is put forward to improve the quality of images in this paper. The principles and the structure of SPRI system are introduced. SPR is stimulated by a Kretschmann prism couple configuration. The cover glass coated with a 50 nm gold film serves as a sensor chip. The fingerprint is then imprinted on the gold film. Polarized monochromatic light is projected on the sensor through the prism, where the SPR phenomenon occurs. The reflected fingerprint image is collected by CCD. The images are collected by SPRI and conventional optic method for the same fingerprint, two different contrast gradients in which the fingerprint ridges are compared with the valleys of the main parts of the two images are 0.2014 and 0.0516 respectively. The contrast and clarity of the image collected by SPRI are much improved.

Key words medical optics and biotechnology; biometric identification technology; fingerprint acquisition; surface plasmon resonance imaging; quality of images

1 引 言

生物识别技术是通过人体的生理或行为特征进

行身份验证的技术,包括指纹、掌纹、面部、发音、虹膜、视网膜及 DNA 等。指纹识别是生物识别领域中使用最早的,也是最为成熟的生物鉴定技术。由

收稿日期:2006-01-10;收到修改稿日期:2006-02-28

基金项目:广东省自然科学基金(05006063)资助项目。

作者简介:李 莹(1976—),女,广东梅县人,暨南大学讲师,博士研究生,主要从事生物医学信息技术的研究。E-mail: li-ying2000@tom.com

导师简介:张永林(1946—),女,西安人,暨南大学教授,博士生导师,主要从事生物医学信息技术研究。E-mail: yonglinzhang@21cn.com

* 通信联系人。E-mail: tzjg@jnu.edu.cn

于指纹识别具有唯一性、稳定性和易采集性,有望在有关个人身份认证的各个领域得到广泛的应用。指纹图像经指纹采集器采集后,才能被计算机处理和识别。指纹图像的质量会直接影响到识别的精度、准确度和指纹识别系统的处理速度,因此,指纹采集技术是指纹识别系统的关键技术之一。

目前指纹图像的采集设备一般分为光学采集器、半导体采集器和超声采集器。光学采集技术是最古老也是目前应用最广泛的指纹采集技术,优点是能承受一定程度的温度变化,稳定性好,成本较低;缺点主要是对于多汗的和稍胀的手指成像模糊且强光(自然光)下采集效果差。半导体类采集器的优点是分辨率高,敏感性好,封装尺寸小,功耗小;缺点是取像区域小(小于 645 mm^2),易受静电干扰,易磨损。超声波取像技术的优点是成像能力高,不受皮肤上的杂物影响;缺点是价格较高。

本文介绍了基于表面等离子体共振成像(SPRI)的指纹采集方法。表面等离子体共振(SPR)是一种发生在金属与电介质分界面上的物理光学现象,由于灵敏度高、生物样品无需标记、分析样品不需要纯化、能实时检测反应动态过程等特点,已经在蛋白质分子相互作用分析^[1], DNA 杂交^[2], 配体-受体相互作用分析^[3]等方面得到日益广泛的应用^[4,5]。基于表面等离子体共振成像的指纹采集系统是对传统光学采集方法的改进,图像质量好,对比度、清晰度等都很高,自然光环境下采集效果好。

2 原 理

2.1 传统光学采集方法

传统的光学指纹采集方法的基本原理是光的全反射(FTIR),如图 1(a)所示。光线照到印有指纹的玻璃(棱镜)表面,反射光线由 CCD 探测。反射光的量依赖于印在玻璃表面上指纹的脊和谷(接触不到玻璃的位置)的深度和皮肤与玻璃间的油脂和水分。光线经玻璃射到谷处时,在玻璃与空气的界面发生全反射,CCD 接收反射光。射向脊的光线不发生全反射,被脊与玻璃的接触面吸收或者漫反射到他处,因此在 CCD 上拍摄到了指纹的图像,如图 1(b)所示,图像中脊为黑色条纹。20 世纪 90 年代中后期,指纹采集设备有了一些更新,可以利用纤维光束或微型三棱镜矩阵获取指纹图像,但光学方法获取的指纹图像的对比度和清晰度有时不能令人满

意,获取的指纹图像必须经图像增强等图像处理技术加工才能用于指纹的比对和识别。

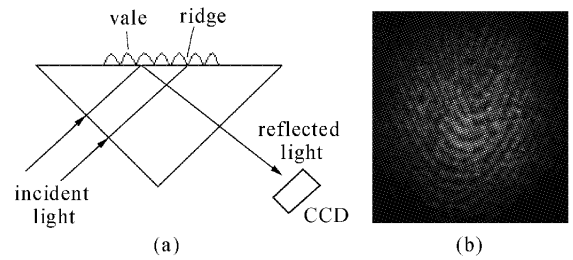


图 1 传统光学方法采集指纹的设备示意图(a)和指纹图样(b)

Fig. 1 Configuration of fingerprinting (a) and fingerprint image (b) with conventional optical method

2.2 表面等离子体共振成像采集方法

在光频范围内形成表面等离子体共振的必要条件之一是金属(电介质 ϵ 为负)与介质(电介质 ϵ 为正)界面的存在^[6~9]。按照麦克斯韦方程组,在一定的条件下,可以出现沿着金属与电介质分界面上传播的平面电磁波,其振幅随离开分界面的距离按指数衰减。Stern 和 Farrell 将此电子疏密波定义为表面等离子体波(SPW)。表面等离子体波的传播常数 β 可表示为

$$\beta = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}}, \quad (1)$$

式中 ω 为角频率; c 为真空中的光速; ϵ_1 为金属的介电常数; ϵ_2 为介质的介电常数。(1)式就是表面等离子体波的色散关系式。

如图 2 所示,水平偏振的入射光在 z 轴方向上与表面平行的波矢 k_z 为

$$k_z = \sqrt{\epsilon_0} \frac{\omega}{c} \sin\theta, \quad (2)$$

式中 ϵ_0 为入射光所在介质(本文的系统中为棱镜)的介电常数; θ 为入射角。可见,此波矢是入射角 θ 和入射光所在介质的介电常数 ϵ_0 的函数。

当入射光在表面等离子体波传播方向(z 方向)的波矢与表面等离子体波波矢相等时,可以激发表面等离子体共振,入射光的大部分能量被表面等离子体波吸收,转化为热量,因此反射光强最弱,在反射谱上出现共振峰。当紧靠在金属薄膜表面的介质折射率不同时,共振峰位置将不同。共振条件为

$$k_z = \text{Re}(\beta), \quad (3)$$

即

$$\sqrt{\epsilon_0} \frac{\omega}{c} \sin\theta = \text{Re}\left(\frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}}\right). \quad (4)$$

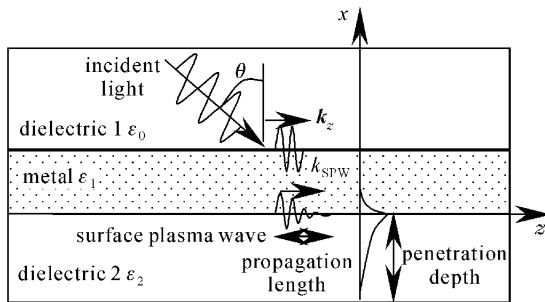


图 2 入射光与表面等离子体波矢的耦合原理

Fig. 2 Wave vector matching between incident light and surface plasma wave

由(1)式可以看出, $\text{Re}(\beta)$ 存在的必要条件是 $-\text{Re}(\epsilon_1) > \text{Re}(\epsilon_2)$, 在可见光范围内符合条件的金属只有金、银、铜、铝等少数几种, 因为金的化学性质稳定(惰性), 表面等离子体共振实际应用中常用的是金膜。

利用衰减全反射(ATR)棱镜、光波导或衍射光栅都能够产生表面等离子体共振现象。衰减全反射棱镜耦合装置可分为 Otto 型和 Kretschmann 型。在 Otto 型结构中, 棱镜底部与金属薄膜之间有一段空隙, 待测物质放在这个间隙中。但这种结构在制作时不容易, 使用时也不方便, 在表面等离子体共振传感器中很少采用。Kretschmann 型的衰减全反射棱镜耦合方式是普遍采用的结构。可采用的棱镜通常有两种形状, 等边直角三角形和半球形。半球形棱镜比直角棱镜的光学性能更优越, 任何角度的入射光均与界面垂直, 反射光损失小, 入射光进入棱镜后的角度不变, 但难于加工。实际应用中, 大多使用等腰直角棱镜。

图 3 是 Kretschmann 型直角棱镜耦合方式的光路。将一介电常数为 ϵ_1 的金属薄膜置于介电常数为 ϵ_0 的石英棱镜底部。采用电容率 ϵ_0 较大的棱镜, 调整入射角 θ 和入射光波长 λ , 就可以满足(4)式的表面等离子体共振的条件, 激发表面等离子体波。调整薄膜的厚度, 就可以使大部分入射光的能量耦合到表面等离子体波中, 使棱镜底面全反射的光强显著下降, 这种激发方式称为衰减全反射技术。

如图 3 所示, 当光线从光密介质(棱镜)向光疏介质(金属)传播, 且入射角 θ 大于全反射角 θ_c 时, 在两种物质的界面将发生全内反射, 光波进入光疏介质, 形成倏逝波(evanescent wave), 倏逝波的有效深度一般为 $100 \sim 200 \text{ nm}$ 。若金属膜的厚度在 50 nm 左右, 则倏逝波在金属与待测物的界面仍起作用。

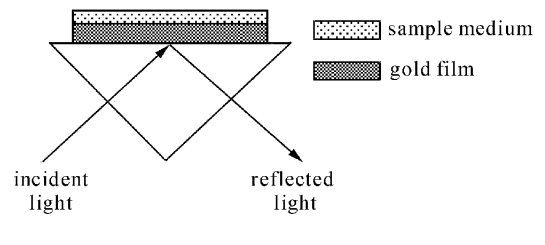


图 3 Kretschmann 型棱镜耦合结构

Fig. 3 Configuration for Kretschmann prism coupler

共振角 θ 随金属膜表面的折射率 n 的变化而变化, 这一变化又与金属表面结合的分子质量成正比。在实验时, 测量出因衰减全反射而形成的吸收峰, 可以测定复电容率、金属薄膜的厚度、金属薄膜表面附着物质的折射率等。

表面等离子体共振成像的原理图与图 3 相似。将图 3 中点光源发出的入射光经一系列光学系统转变为均匀的 P 偏振的平行光, 经棱镜投射到金膜上, 在入射角合适时, 与表面等离子体波共振, 产生共振吸收现象。吸收的位置与金膜表面附近介质的折射率 n 及其变化有关, 反射光束由 CCD 摄像机接收, 传输到计算机进行处理。

由于表面等离子体共振现象对金属膜上电介质的折射率变化有很高的响应度, 只要指纹谷和指纹脊处的介质折射率稍有不同, 就可分辨出指纹谷和脊的位置和形状。因此汗液对该方法的影响比传统全反射光学方法要小得多。表面等离子体共振成像方法采集的指纹图像的图像质量(对比度、清晰度)远远高于传统光学方法采集的指纹图像。并且由于棱镜底面覆盖了金膜, 环境光不能从采集窗口透过金膜而进入图像传感器, 指纹采集不受环境光的影响, 在自然环境下, 也能获得很好的采集效果。

3 指纹采集系统

表面等离子体共振成像的指纹采集方法的总体结构简图如图 4 所示。

采用固定入射光波长改变入射角度的表面等离子体共振成像方式, He-Ne 激光器作为光源(实际应用中可采用半导体激光器), 波长为 632.8 nm 。该光源单色性好, 强度高, 输出稳定。工作时, 光源固定不动, 通过承载棱镜的精密转盘的旋转来改变入射角 θ 。

采用 Kretschmann 型的等腰直角棱镜耦合结构激发表面等离子体共振时, 具有较强化学惰性的

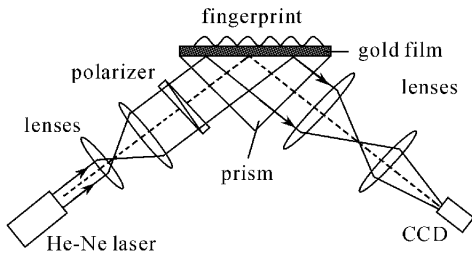


图 4 基于表面等离子体共振成像的指纹采集系统的结构图

Fig. 4 Experimental setup of fingerprint imaging acquisition system based on SPRI

金膜作传感片,以20 mm×20 mm×0.1 mm的盖玻片作为基片,将金膜均匀镀在基片上。用折射率与棱镜相似的香柏油将传感片耦合到 K9 玻璃等腰直角棱镜的底部。也可以不用盖玻片,直接将金膜镀在直角棱镜的底部。K9 玻璃的折射率为1.51680,盖玻片的折射率为1.52,香柏油的折射率为1.5148~1.5152,三者折射率接近,对光路及实验结果影响不大。传感片由香柏油耦合在棱镜上,方便更换。如果将金直接镀在棱镜底部,更换传感片时要同时更换棱镜。

指纹印在金膜上,调整入射角 θ ,使金膜发生表面等离子体共振现象,指纹的谷不与金膜接触,也发生表面等离子体共振现象。金膜和指纹谷处的反射光很弱,在 CCD 摄像机上成像时为黑色的背景,此时的入射角等于空气的共振角。指纹的脊与金膜接触,不发生表面等离子体共振现象,光线发生全反射,在 CCD 摄像机上成像时为明亮的条纹。由于表面等离子体共振现象灵敏度很高,指纹脊和谷的共振角差别很大,则采集的指纹图像对比度、清晰度非常高。采集到的指纹图像传输至计算机,实现对指纹图像的实时采集、处理和识别。

4 实验结果

图 5 是利用表面等离子体共振效应,用表面等离子体共振成像方法在自然光环境下采集的指纹图像。图 1(b)是传统光学方法采集的同一指纹的图像。两图未经任何图像处理技术加工,图 5 的图像质量远高于图 1(b)。由于激光器发出的光在截面上呈高斯分布,投射到传感片上的光束出现中间明亮的均匀现象,对指纹识别影响不大,而且可以用图像处理的方法加以修正。

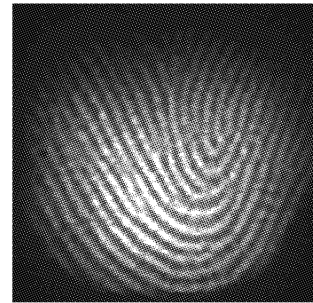


图 5 表面等离子体共振成像方法采集的指纹图样

Fig. 5 Fingerprint collected with SPRI method

由于指纹谷和指纹脊处产生表面等离子体共振的条件不同(即发生共振时的共振角不同),指纹的谷和脊处不会同时出现表面等离子体共振效应。当指纹谷处出现表面等离子体效应时,该处的反射光变暗。而此时指纹脊处不出现表面等离子体共振效应,因此图像传感器(CCD 摄像机)接收到一幅以指纹脊为亮显示的指纹图像,背景和指纹谷为暗场,如图 5 所示。反之,当指纹脊处出现表面等离子体效应时,图像传感器接收到一幅以指纹谷和背景为亮显示,谷明脊暗的指纹图像。指纹识别算法体系大致由指纹增强、指纹分类、特征提取和指纹比对四个部分组成。由于表面等离子体共振成像方法采集的指纹图像质量好,图像增强过程可以省略。这样可提高指纹识别系统的运行速度和识别的准确性。

在图 5 和图 1(b)中截取主要的指纹区域,可分别算出对比度,两图中指纹脊和谷的对比度分别为 0.2014 和 0.0516,图 5 的对比度明显优于图 1(b),利于简化指纹处理和识别算法。

5 结 论

传统光学方法采集指纹图像的优点是稳定性好,成本低。表面等离子体共振成像方法的指纹采集系统是在传统光学方法的指纹采集系统的基础上进行的改进,即在棱镜表面增加镀 50 nm 金的 20 mm×20 mm 的盖玻片作为传感片,该方法简便易行。传感片批量生产的成本每片不超过几元人民币,系统改进费用低。实验证明,表面等离子体共振成像的指纹采集方法能够大幅度提高采集的指纹图像的对比度和清晰度,可提高整个指纹识别系统的运行速度和识别的准确性,系统的性价比高,有很好的市场推广价值,有望在有关个人身份认证的各个领域得到广泛应用。

参 考 文 献

- 1 Min-Gon Kim, Yong-Beom Shin, Jin-Mi Jung *et al.*. Enhanced sensitivity of surface plasmon resonance (SPR) immunoassays using a peroxidase-catalyzed precipitation reaction and its application to a protein microarray [J]. *Journal of Immunological Methods*, 2005, **297**:125~132
- 2 Aya Okumura, Yasunobu Sato, Motoki Kyo *et al.*. Point mutation detection with the sandwich method employing hydrogel nanospheres by the surface plasmon resonance imaging technique [J]. *Analytical Biochemistry*, 2005, **339**:328~337
- 3 K. Vengatajalabathy Gobi, Hiroyuki Tanaka, Yukihiko Shoyama *et al.*. Continuous flow immunosensor for highly selective and real-time detection of sub-ppb levels of 2-hydroxybiphenyl by using surface plasmon resonance imaging [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2004, **20**:350~357
- 4 Cao Zhenxin, Liang Dakai, Guo Mingjiang. Experimental study on the relationship between film thickness and resonant wavelength based on the optic fiber SPW sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1):125~128
曹振新, 梁大开, 郭明江. 光纤表面等离子体波传感器中膜厚与共振波长关系的实验研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(1):125~128
- 5 Wu Jian, Lin Dejiao, Yin Chunyong *et al.*. Interferometer and nanometer positioning integration system used for drift reduction [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(8):707~710
吴 健, 林德教, 殷纯永 等. 用于减少漂移的纳米定位干涉仪集成系统[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(8):707~710
- 6 She Shou-xian. *Fundamentals of Optical Waveguide* [M]. Beijing: North Jiaotong University Publishing House, 2002. 99~111
余守宪 编著. 导波光学物理基础[M]. 北京: 北方交通大学出版社, 2002. 99~111
- 7 Zeng Jie, Liang Dakai, Cao Zhenxin. Study on a novel optical fiber temperature sensor based on surface plasmon resonance [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(7):838~842
曾 捷, 梁大开, 曹振新. 光纤表面等离子体波共振温度传感器的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(7):838~842
- 8 Gerald Steiner. Surface plasmon resonance imaging [J]. *Anal Bioanal Chem.*, 2004, **379**:328~331
- 9 Chen Yi. High throughput microanalysis [J]. *Progress in Chemistry*, 2005, **17**(4):573~580
陈 义. 高通微量分析[J]. *化学进展*, 2005, **17**(4):573~580