



波长调制型SPR 传感器原理及应用

黄妍 著



波长调制型SPR 传感器原理及应用

黄



 黑龙江大学出版社
HEILONGJIANG UNIVERSITY PRESS
哈尔滨

图书在版编目 (CIP) 数据

波长调制型 SPR 传感器原理及应用 / 黄妍著. — 哈尔滨 : 黑龙江大学出版社, 2018. 11
ISBN 978-7-5686-0292-1

I. ①波… II. ①黄… III. ①光电传感器—研究
IV. ① TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 274743 号

波长调制型 SPR 传感器原理及应用

BOCHANG TIAOZHIXING SPR CHUAN' GANQI YUANLI JI YINGYONG

黄妍著

责任编辑 肖嘉慧 王选宇 李丽
出版发行 黑龙江大学出版社
地 址 哈尔滨市南岗区学府三道街 36 号
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 787 毫米 × 1092 毫米 1/16
印 张 11.75
字 数 181 千
版 次 2018 年 11 月第 1 版
印 次 2018 年 11 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5686-0292-1
定 价 35.00 元

本书如有印装错误请与本社联系更换。

版权所有 侵权必究

前 言

表面等离子激元共振(Surface Plasmon Resonance, SPR)现象是一种发生在金属薄层与电介质分界面上的物理光学现象,对于与产生表面等离子激元的金属薄膜相接触的介质(或膜层)的折射率极其灵敏。基于这种特性,SPR 传感检测技术受到国内外研究者的广泛关注,并且得到快速发展,已在生物传感、化学分析、药品研发、食品安全、环境监测、医学诊断等领域得到广泛应用。

目前国内外关于 SPR 传感器的几部著作主要是介绍 SPR 成像技术、SPR 生物传感器、局域 SPR 传感器等,较少有关于波长调制型 SPR 传感器原理及应用的著作。本书旨在弥补这一空白,针对波长调制型 SPR 传感器的原理及应用展开介绍。笔者结合自己在博士期间的研究工作经验,重点介绍波长调制型 SPR 传感器在金属薄膜色散特性的准确测定、有效解决折射率测量过程中量程与灵敏度及分辨率相互制约的问题、气体敏感膜波长敏感特性的快速分析等方面的应用研究。

本书系统地介绍了波长调制型 SPR 传感器的原理及应用,全书共分为五章,主要内容可以归纳如下:

1. 本书从光的基本性质出发,阐述了表面等离子激元共振的传感原理,介绍了三种表面等离子激元的光激发方法,按照调制方式的不同,对 SPR 传感器进行分类,并仿真分析了角度调制 SPR 反射功率谱的影响因素。

2. 本书详细介绍了波长调制型 SPR 传感器中所用金膜的制备方法,并通过原子力显微镜观察金膜表征特性;介绍了利用角度调制型 SPR 传感器测量金属薄膜光学常数和厚度的几种常用方法,并分析了每种测量方法的优缺点;重点介绍了采用波长调制型 SPR 传感器测量金属薄膜色散特性和厚度的新方法,与已报道的角度调制方法相比较,提高了测量准确度,并且极大地简化了测量过程,是目前采用 SPR 技术测量金属薄膜色

散特性的最佳方法。读者可以利用这种方便快捷的方法,测量其他金属薄膜及沉积在金属薄膜上的敏感膜的色散特性和厚度。

3. 本书分析了波长调制型 SPR 传感特性,了解了带光源的带宽范围可直接影响到 SPR 传感装置可测量的介质折射率范围。由于检测光谱所用的光谱仪中 CCD 像元数是一定的,对于相对较宽的带宽,其分辨率较低。为了获得高分辨率和高检测灵敏度,笔者采用处于长波长处且带宽相对较窄的宽带光源(700 nm ~ 900 nm),利用表面等离子激元的反射功率谱来测量周围介质的折射率。由波长调制型 SPR 测量原理可知,光源带宽的减小,必然使可测量折射率的量程缩小。为了解决量程与灵敏度及分辨率之间相互制约的问题,笔者采取了分段测量方法:将入射光调变到几个不同的入射角,每个入射角对应于不同的折射率测量范围,通过波长与角度共同调制的方法,既覆盖了整个折射率的测量范围,又提高了检测灵敏度和分辨率。本书着重介绍了通过波长与角度共同调制的方法,在检测灵敏度高的长波长区间,使用带宽相对较窄的宽带光源,可以有效解决折射率测量量程与灵敏度及分辨率之间相互制约的问题。

4. 本书以乙醇气体敏感膜(Cr - Au - TiO₂ 三层膜系)为例,利用表面等离子激元的频谱特性,给出敏感膜系的波长 - 折射率变化关系,进而获得 SPR 敏感膜的波长灵敏度特性,为敏感膜的设计、优化和制备提供了方便、有效的实验检测手段。

本书的部分工作是笔者在攻读博士学位期间完成的,特别感谢导师叶红安教授的悉心指导,由衷地感谢刘书钢教授对我的指导和帮助。笔者在撰写本书的过程中,查阅并参考了国内外的专家著作和期刊论文,在此表示衷心感谢,并在参考文献中一一列出了这些专著和文献。感谢黑龙江大学的鼎力支持和资助,使得本书能够顺利出版。最后还要感谢黑龙江大学出版社的编辑,感谢他们为本书的出版所付的辛勤劳动以及提供的指导。

本书内容涉及面较广,由于笔者知识有限,书中难免有疏漏、不当或错误之处,恳请广大读者和同行批评指正。

黄妍

2018年6月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 引言	3
1.2 SPR 传感技术研究现状	3
1.2.1 SPR 传感技术国外研究现状	4
1.2.2 SPR 传感技术国内研究现状	5
1.3 金属薄膜色散特性研究现状	6
1.3.1 金属薄膜色散特性国外研究现状	7
1.3.2 金属薄膜色散特性国内研究现状	8
1.4 SPR 气体传感器研究现状	9
1.4.1 SPR 气体传感器国外研究现状	10
1.4.2 SPR 气体传感器国内研究现状	14
1.5 研究的目的是和意义	14
1.6 研究的主要内容	16
第2章 SPR 传感原理与调制方法	17
2.1 引言	19
2.2 光的基本性质	19
2.2.1 光的传播	19
2.2.2 光的偏振态	23
2.2.3 光的反射和折射	25
2.3 SPR 传感理论	32
2.3.1 衰减全反射与消逝波	32
2.3.2 金属复折射率	33

2.3.3	金属表面等离子激元振荡	34
2.3.4	SPR 产生条件	35
2.3.5	反射光强计算方法	40
2.4	SPs 的光激发方法	41
2.4.1	棱镜耦合方法	41
2.4.2	光栅耦合方法	42
2.4.3	波导耦合方法	43
2.5	SPR 传感器调制方法	44
2.5.1	角度调制型 SPR 传感器	44
2.5.2	波长调制型 SPR 传感器	45
2.5.3	强度调制型 SPR 传感器	46
2.5.4	相位调制型 SPR 传感器	46
2.6	角度调制 SPR 反射功率谱的影响因素	47
2.6.1	光源波长对 SPR 反射功率谱的影响	47
2.6.2	棱镜材料对 SPR 反射功率谱的影响	49
2.6.3	金属复介电常数和厚度对 SPR 反射功率谱的影响	50
2.7	本章小结	53
第3章	金膜制备及利用 SPR 技术测量金膜色散特性研究	55
3.1	引言	57
3.2	金膜制备及表征	57
3.2.1	金膜制备方法	58
3.2.2	金膜表征	63
3.3	利用角度调制 SPR 方法测量金属薄膜光学常数和厚度	71
3.3.1	双波长法	71
3.3.2	双介质法	75
3.3.3	双共振峰法	75
3.3.4	扩展式 SPR 光谱法	76
3.4	利用波长调制 SPR 方法测量金膜色散特性和厚度	78
3.4.1	实验装置	78
3.4.2	重要参数	84
3.4.3	金膜光学常数和厚度的测量原理及方法	89

3.4.4	金膜光学常数和厚度的测量结果及误差分析	90
3.5	本章小结	98
第4章	波长与角度共同调制型 SPR 传感测量研究	101
4.1	引言	103
4.2	波长调制型 SPR 折射率测量研究	104
4.2.1	工作原理	104
4.2.2	实验装置	104
4.2.3	波长调制型 SPR 传感性能分析	106
4.3	光源为窄带宽情况下波长与角度共同调制 SPR 传感 测量研究	127
4.3.1	气体被测介质测量研究	129
4.3.2	液体被测介质测量研究	132
4.4	本章小结	139
第5章	利用 SPs 频谱特性分析 SPR 敏感膜波长敏感特性	141
5.1	引言	143
5.2	TiO ₂ 气体敏感膜的选取及制备	143
5.2.1	TiO ₂ 气体敏感膜的选取	143
5.2.2	TiO ₂ 气体敏感膜的制备	144
5.3	Cr - Au - TiO ₂ 三层膜系敏感膜波长敏感特性分析	146
5.3.1	实验装置及原理	146
5.3.2	实验结果及分析	148
5.4	本章小结	157
结 论	159
参考文献	163

第 1 章



绪 论

1.1 引言

表面等离子激元共振现象对于与产生表面等离子激元(Surface Plasmons, SPs)的金属薄膜相接触的介质(或膜层)的折射率极其灵敏,基于这种特性,SPR 传感检测技术备受关注,并且得到快速发展,已在生物传感、化学分析、药品研发、食品安全、环境监测、医学诊断等领域得到广泛应用。SPR 传感器有四种调制方式,即角度调制、波长调制、强度调制和相位调制。本书将开展基于波长调制的 SPR 折射率测量系统研究,拟解决以下几方面问题:金属薄膜色散特性的准确测定;折射率测量过程中量程与灵敏度及分辨率相互制约的问题;气体敏感膜的波长敏感特性的快速分析等。

本章分别从 SPR 传感技术、金属薄膜色散特性和 SPR 气体传感器三个方面,对相关的国内外研究现状进行介绍。

1.2 SPR 传感技术研究现状

表面等离子激元共振是一种发生在金属薄层与电介质分界面上的物理光学现象,其对附着在金属薄膜表面的电介质折射率的微小变化十分敏感。自从 Liedberg 等将 SPR 技术首先用于化学传感器研究领域以来,SPR 传感器逐渐成为传感器领域的研究热点。本节将对 SPR 传感技术的国内外研究现状进行介绍。

1.2.1 SPR 传感技术国外研究现状

国外对表面等离子激元共振技术的研究较早,可以追溯到 1902 年。Wood 等用连续光谱的偏振光照射金属光栅时,观测到了衍射光栅的反常衍射现象,意识到表面等离子体波(Surface Plasmon Wave, SPW)的存在,并且首次对这种现象做了公开描述。1909 年,索末菲(Sommerfeld)从麦克斯韦的电磁理论出发,引入了复介电常数的概念,求出了局限在表面的电磁波的波动解,并指出表面等离子体波是一种在表面和界面上传播的横磁波(Transverse Magnetic, TM),其振幅随入射深度的增加而按指数衰减,其磁矢量与 SPW 的传播方向垂直,与表面平行,波矢与入射光波矢沿表面的分量是一致的。

1941 年,Fano 利用金属与空气界面的表面电磁波激发模型,对这一现象做出了解释。1957 年,Ritchie 发现当电子穿过金属薄片时,存在能量消失峰,并将这种消失峰称为“能量降低的”等离子体模式,给出了这种模式与薄膜边界的关系,首次提出了用于描述金属内部电子密度纵向波动的“金属等离子体”的概念。1959 年,Powell 和 Swan 通过实验证实了 Ritchie 理论的正确性。1960 年,Stern 和 Farrell 研究了这种等离子体模式的共振条件,并将其称作“表面等离子激元共振”。1968 年,Kretschmann 和 Otto 各自利用衰减全反射(Attenuated Total Reflection, ATR)的方法,证实了光激发表面等离子激元共振现象的存在。

20 世纪 70 年代末以来,SPR 技术在检测金属薄膜特性及实时检测金属表面反应的潜能方面越来越受到重视。1982 年,Nylander 和 Leidberg 将 SPR 原理应用于气体检测和生物传感领域中。1983 年,Liedberg 等将 SPR 传感技术应用于 IgG 蛋白质与其抗原的相互反应的测定,并由 Biacore AB 公司开发生产出 SPR 仪器。

与传统的传感分析方法相比,SPR 传感器具有可实时监测动态反应过程、分析样品无须纯化、生物样品无须标记、灵敏度高、无背景干扰、测量准确度高、响应速度快、体积小、机械强度大、抗电磁干扰能力强、与光纤相连可实现数据的远程采集和连续在线监控等优点。基于以上诸多优点,SPR 传感器被广泛应用于生物检测、药品研发、食品安全、环境监测、

医学诊断等领域。其巨大的应用前景,使得 SPR 的研究工作迅速开展,世界上许多公司成立相应的研究中心和实验室来开展 SPR 传感器的研发工作。SPR 传感器已经仪器化和商业化,但目前的 SPR 传感器主要来自于国外的仪器生产公司,如瑞典的 Biacore AB 公司、英国的 Windsor Scientific 公司和美国 Johnson & Johnson Ortho Clinical Diagnostics 公司、Quantech 公司和 Texas Instruments 公司、荷兰的 Autolab 公司、日本的 Nippon Laser and Electronics Laboratory 以及德国的 BioTul Bio Instruments GmbH 公司和 Xantec Analysensysteme GbR 公司等。这些公司研制生产的 SPR 传感器各有特点,但这些产品价格同样不菲。

1.2.2 SPR 传感技术国内研究现状

我国开展 SPR 传感器的研究较晚,尚处于起步阶段。1992 年,清华大学隋森芳教授率先开展 SPR 生物传感器应用的研究,将 SPR 技术用于研究蛋白质之间的相互作用。随后,国内多所高校和科研机构纷纷开展了表面等离子激元共振传感的相关研究。

中国科学院电子学研究所传感技术国家重点实验室是国内最早开展 SPR 生化分析仪研究的单位之一,1990 年就开始了 SPR 课题的研究,1992 年研制出手动、立式 SPR 生化分析样机,1994 年研制出自控、卧式 SPR 锥形样机,并发表多篇文章。基于以上工作,中国科学院电子学研究所于 1999 年 9 月开始开展“九五”国家重点科技攻关项目——“表面等离子体谐振(SPR)生化分析仪的研制与开发”,自行研制了新型 SPR-2000 型生化分析仪,该仪器不仅性能优良,而且有良好的商品化性能。同年,中科院电子所的赵杰等提出了一种用表面等离子激元谐振间接测量物质折射率的新方法。2001 年中国科学院电子学研究所的崔大付等利用自行研制的 SPR-2000 型生化分析系统,对 IgG-GAH IgG 的动态反应过程进行实时测试。

吉林大学的张寒琦等自行设计并组装 SPR 装置,定性、定量地测试了多种物质,取得了很好的结果。2001 年,清华大学精密仪器与机械学系的余兴龙等利用横向塞曼激光器作为光源,设计了一种 SPR 光学外差相位检测装置,该装置具有极高的分辨率和稳定性。2003 年,南京航空航天大

学的曹振新等进行了光纤表面等离子体波传感器的温度特性研究。2004年,东南大学的王艳霞等提出分布式 SPR 传感器的设计方案,并对其进行模拟研究。2005年,南开大学的刘国华等自行研制了一套完整的光、机、电一体化的 SPR 生物传感系统,实现了数据采集与分析的智能化和自动化。2006年,暨南大学的张峰等利用虚拟仪器技术,自行设计了一套基于角度调制的 Kretschmann 结构 SPR 测试系统。同年4月,南京航空航天大学的曾捷等分析了表面等离子激元共振 (SPR) 光谱中共振波长与液体介质折射率之间的对应关系。2007年,中科院的林开群等分别仿真研究了温度效应对角度调制型和波长调制型 SPR 传感器的影响。

2009年5月,中科院的林开群等从理论和实验两个方面,分析了温度效应对表面等离子激元共振传感器的影响研究。2010年,吉林大学的王健等对二氧化钛溶胶-凝胶中的 Au 纳米粒子的表面等离子激元生物传感器进行波长调制研究。国家纳米科技中心的马鑫等介绍了一种应用电光调制光强检测原理的波导耦合型 SPR 传感器,此装置可有效提高信噪比。同年3月,华东师范大学的包明等介绍了 ZnO 敏感层厚度对角度调制型 SPR 传感器灵敏度的影响研究。

北京中龙益诚科技有限公司从2011年起与中科院电子所深度合作,获得了“便携式表面等离子体共振 (SPR) 生化分析仪”的专利独占许可,成为国内少数几家拥有 SPR 技术自主知识产权的企业之一,其生产的 YC-SPR 系列生物分子互作仪采用小型化、一体化的设计方案,通过微流控进样、机械驱动控制、光检测、信号/图像采集、SPR 芯片修饰等关键技术,自主研发了 SPR 生物分子相互作用检测系统。目前,国内越来越多的研究所、高等院校了解和认识到 SPR 检测技术的优点和重要性,都在积极进行 SPR 课题的研究。

1.3 金属薄膜色散特性研究现状

表面等离子激元共振是一种发生在金属薄膜与电介质分界面上的物理光学现象,设计 SPR 传感装置及优化 SPR 传感器性能的一个重要环节是确定金属薄膜的色散特性和厚度。此外,沉积在金属膜上的敏感膜参数通常需要被精确确定,前提是应首先确定金属薄膜的光学特性及参数。

为了更好地研发 SPR 传感器,确定金属薄膜的色散特性尤为重要。同时,金属薄膜的介电常数与薄膜厚度之间也存在着一定关系,因此,在分析金属薄膜色散关系的同时,应考虑薄膜厚度的影响。本小节着重介绍金属薄膜色散特性和薄膜厚度测定方法的国内外研究现状。

1.3.1 金属薄膜色散特性国外研究现状

作为一项重要的 SPR 传感应用,早期的 SPR 研究已经致力于测量金属薄膜的光学常数和几何常数,并已证明 SPR 技术是一项可以准确且简单测量金属薄膜特性的方法,且非常适合于测量厚度为几百埃的金属薄膜的特征参数。在所有应用 SPR 方法测量金属薄膜光学和几何参数的研究中,衰减全反射(ATR)棱镜耦合的 Kretschmann - Raether 结构被广泛用于激发 SPs,在四种调制方法(包括波长调制、角度调制、强度调制和相位调制)中,角度调制方法是唯一被使用的调制方法。通常情况下,单层膜模型被用于分析金属薄膜的光学和几何常数,当使用单层膜模型时,金属膜被认为是各向同性的且为非常平坦的,可以完全由三个参数(复介电常数的实部 ε_r 、虚部 ε_i 和厚度 d)表征。通过曲线拟合的方法,从实验数据点计算 ε_r 、 ε_i 和 d 的过程中,需要通过数学运算过程,求解一组非线性方程组。为了计算方便,提出通过 SPR 曲线的三个特征参数(半宽度 W_θ 、共振角 θ 和反射率最小值 R_{\min}),来模拟 Lorentzian 曲线中的 SPR 吸收峰,即可同时求出金属薄膜的 ε_r 、 ε_i 和 d 的方法。但是在通过 Lorentzian 曲线模拟反射率数据确定金属薄膜的光学常数和厚度过程中,将引起多值性。为了去除多值性,必须通过引入附加条件使厚度 d 可以唯一地被确定,随后即可确定出唯一的一组 ε_r 、 ε_i 和 d 解,这些方法包括“双波长法”“扩展 ATR 光谱法”。

真实的金属膜不可能是非常平坦的,其表面和分界面粗糙度对 SPR 曲线的影响已经被深入研究。研究结果表明当存在表面粗糙度时,SPs 的衰减可分为两种情况:真空中的辐射衰减,或散射进入其他 SPs 态。前者将引起共振曲线角度半宽度增加,后者将引起共振曲线漂移。实验结果同时也表明,当粗糙度增加时,金属膜的有效介电方程和表面等离子体波矢会发生急剧变化。如果我们使用单层膜模型去表征金属薄膜,通过

SPR 测量求出的介电常数虚部的幅值将会大于仅由吸收过程引起的虚部幅值,因为粗糙表面等离子激元散射引起的 SPs 衰减将不会在计算 ε_i 的过程中被去除,将导致实部比真实值偏小。为了描述各层粗糙度的影响,在每个分界面上将引入中间层用于分析粗糙度,通过有效介质近似理论对中间层的光学特性进行模拟。为了验证通过 SPR 测量方法测得的金属薄膜的光学常数和厚度的准确性,SPs 系统(包括衬底、Cr 膜、Au 膜)中各膜层粗糙度的影响被完整地分析研究,得出结论:中间层模型更真实,且通过这种模型获得的结果更合理。但是,单层膜模型更简单,且其有效介电方程可以很好地描述 SPs 系统。有些实验同样也表明,使用单层膜模型,通过 SPR 方法测量的金属薄膜厚度,与通过 X 射线方法、原子力显微镜和椭偏仪法测量的厚度吻合非常好。

到目前为止,运用 SPs 确定金属薄膜的光学常数或厚度,引起越来越广泛的关注,在很大程度上,也起因于发展 SPR 技术的需求。金属薄膜是 SPR 装置的重要组成部分,金属薄膜的光学特性和几何特性将直接影响到这些 SPR 装置的性能。此外,沉积在金属膜上的敏感层参数通常也需要被准确确定,很显然需要首先准确确定金属薄膜的相关光学和几何常数。金属薄膜的有效光学常数也与膜厚有关,即与薄膜内部结构密切相关,这主要起因于薄膜密度和电阻系数的变化。

1.3.2 金属薄膜色散特性国内研究现状

1983 年,徐子民等基于 Kretschmann 结构的 ATR 原理,在室温环境下,通过测量银膜的 SPR 反射功率谱,得到光谱范围为 1.5 eV ~ 3.0 eV 的银膜色散关系。1986 年,上海交通大学的杨傅子等利用金属薄膜厚度与被测介质折射率无关的性质,基于角度调制型 ATR 方法,提出在单一光频率入射情况下,通过改变与金属薄膜接触的被测介质折射率,可以获得两个不同的表面等离子激元共振吸收峰,通过比较实验结果,可以同时确定银膜的厚度和色散关系,这种方法被称为“双介质法”。同年,暨南大学的谭福进等通过内、外偏振测量法,同时测定了通过真空蒸镀方法制备的金属薄膜的厚度和介电常数,并给出铝膜和铜膜的复折射率实部、虚部随厚度变化的实验结果,发现当入射光波长为 632.8 nm 时,对于铝膜和铜

膜不透光的厚度分别为大于 30 nm 和大于 50 nm。1987 年,黑龙江大学的赵恩来从菲涅耳公式出发,结合金属复折射率公式,在原理上讨论了应用偏光法测量金属的折射率和消光系数的可行性。

1994 年,中国科技大学的谢建平等提出了通过激光衍射测量方法,可求得金属折射率虚部,其精度约为 0.06。1996 年,上海交通大学的周骏等采用双波长法激发待测金属薄膜的 SPR 吸收峰,使用非线性最小二乘曲线拟合方法,同时确定了金属薄膜的厚度和介电常数。同年,该课题组采用单一波长激光,激发被测金属薄膜的表面等离子体波共振吸收峰,并考虑金属薄膜表面粗糙度的影响,采用非线性最小二乘曲线拟合方法,同时确定出了金属薄膜的厚度和介电常数。

2003 年,河北科技大学的薛建华等基于椭偏测光法,采用内外反射法测量透明衬底上金属薄膜的复折射率和厚度,并利用单纯形法,计算得出金属薄膜的厚度和复折射率的实部、虚部。同年,上海交通大学的 Ding 等通过改进型 SPR 传感装置,采用单波长单次扫描激发出两类表面等离子激元共振,即一个表面等离子激元共振和一个修饰的长程表面等离子激元共振(Long-Range Surface Plasmon Resonance, LRSPR),同时确定银膜的厚度和介电常数,后将这种方法称为“双共振峰法”。2008 年,Gu 等报道了在给定频率下,通过 SPR 吸收峰可获得两组金属薄膜的光学常数和厚度,出现了多值性,可通过 SPR 光谱中的全内反射(Total Internal Reflection, TIR)台阶作为限制条件,在两组解中找到唯一的一组真解,将这种由一个 SPR 吸收峰和一个 TIR 台阶构成的光谱称为“扩展式 SPR 光谱”,后将此方法命名为“扩展式 SPR 光谱法”。

1.4 SPR 气体传感器研究现状

SPR 传感器首先在生命科学和制药领域获得广泛应用。随着相关学科和技术的发展进步,SPR 传感技术在分子间相互作用研究上的特殊优势日益突出,使得 SPR 传感器的应用已开始向其他领域扩展,目前已逐渐渗透到化学、化工、材料、食品、环境和国防等研究领域,特别是在免疫检测、环境监测、材料界面的吸附和电化学聚合等方面得到了应用。

表面等离子激元共振传感技术作为一种新型气体检测技术,与常规