

学校编码: 10384  
学号: 19920121152720

分类号\_\_密级\_\_  
UDC\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

转臂式角分辨光谱测量系统及其关键技术研究

Research on Angle-resolved spectral measuring system

based on rotational stages and its key technology

张良

指导教师姓名: 王磊 副教授

专 业 名 称: 机械电子工程

论文提交日期: 2015 年 4 月

论文答辩时间: 2015 年 5 月

学位授予日期:

答辩委员会主席: \_\_

评阅人: \_\_

2015 年 4 月

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 摘要

金属表面的自由电子在入射电磁场作用下发生振荡，从而产生一种沿着金属表面传播的电磁波，被称为表面等离子体（Surface Plasmons,SPs）。SPs 是一些重要的表面现象的物理基础，如表面增强拉曼、表面增强荧光、表面等离子体传感等。由 SPs 的耦合条件可知，SPs 的激发与发射具有方向性，因此角分辨光谱是表征金属微纳结构及其表面等离子体的一种必要的研究手段。

本文基于国家自然科学基金（21373173），设计了一套基于转臂的通用角分辨光谱测量系统，并研究了其相关关键技术。本文主要研究工作如下：

1.分析了角分辨光谱测量系统的光路结构，主要由光源、发射光学系统、接收光学系统和光谱仪四部分组成；对元器件进行了选型及设计，并对光路耦合效率进行了分析。

2.分析了角分辨光谱测量系统的机械结构，主要包括传动机构、回转机构、转臂模块和样品台等；对各部零件进行了选型、设计、加工，并选择了合适的加工工艺；仪器装配和校正后的结果表明仪器精度满足实验需求。

3.分析了角分辨光谱测量系统的软件结构，将软件分为三个子系统，包括光谱仪子系统、运动控制子系统和人机界面子系统；划分了每个子系统的功能模块，设计了每个模块的运行流程；在 VS2010 平台上，用 C#语言编程实现了仪器控制软件。

4.分析了基于光栅方程和成像原理的公式标定方法，利用非线性曲线拟合求解公式参数，对光谱仪器进行波长标定；标定后均值误差为 0.043nm，标准差为 0.0225nm；提出了一种基于反向传播神经网络的光谱仪波长标定方法，该方法以中心波长和像素位置作为网络输入向量，输出即为经标定的光谱波长。标定的均值误差下降至 0.0191nm，标准差下降至 0.011nm

5.运用上述系统对一维金属光栅进行角分辨光谱测量，实验结果中等离子体共振（SPR）吸收峰位置与仿真结果一致，表明建立的角分辨光谱测量系统是有效可靠；系统也可应用于二维金属纳米结构的角分辨光谱测量。

**关键词：**表面等离子体；角分辨；光谱测量；光电仪器

厦门大学博硕士学位论文摘要库



## Abstract

Surface Plasmons (SPs) is electromagnetic waves existing on the metal surface and propagated along the metal surface, which generated by the interaction of the free vibration electrons and photons. It is the physical foundation of some important surface phenomena, such as surface-enhanced Raman, surface enhanced fluorescence and surface plasmon sensors. The coupling of SPs and light wave is usually directional, thus the emission direction of light could be tuned by SPs. Therefore, using angle-resolved spectral to characterize the SPs or metal nanostructures is need.

Based on National Natural Science Foundation(21373173), an universal angle-resolved spectral measuring system based on rotational stages is designed in this paper and its key technologies are studied. The main research work is as follows:

1. The optical structure of angle-resolved spectral system is analyzed, and the main components of optical structure system are designed, including a light source, emitting optical system, receiving optical system and spectrometer. Based on a reasonable selection and design for components, the coupling efficiency is analyzed.

2. The mechanical structure of angle-resolved spectral system is analyzed, and the main components of mechanical structure is designed, including transmission mechanism, Rotary, rotational stages and the sample stage, etc. According to the overall design, the parts are designed and processed. Based on a reasonable rational process, instrument assembly and corrected results show that the instrument accuracy accord with the needs of experiment.

3. The software features of angle-resolved spectral system are analyzed, which are divided into three sub-systems, including the spectrometer subsystem, motion control subsystem, and human-machine interface subsystem. Module design is performed for each subsystem, and implementation process for each subsystem carried out a detailed operational process. Based on platform of VS2010 and C # programming language, all of the functions are achieved.

4. A method of formula calibration in this paper is analyzed, which based on grating equations and imaging principle. Wavelength calibration is based on formula parameters, which are solved by nonlinear curve fitting. The calibration mean error is 0.043nm and the standard deviation is 0.0225nm. A method calibration based on BP neural network is proposed. In this method, input vector of the network involves the center wavelength of the spectrometer and the pixel location, output vector of the network is the spectral wavelength that has been corrected. The calibration mean error is 0.0191nm and the standard deviation is 0.011nm

5. The one-dimensional metal grating is used to angle-resolved experiments by the system above. According to the experimental results compared with simulation results, angle-resolved spectral system is efficient and reliable. The system can also be applied to two-dimensional metal nanostructures for angle-resolved spectral measurement.

**Keywords:** Surface Plasmon; Angle-resolved; Spectral Measurement; photoelectric instrument;

目录

摘要.....	I
Abstract.....	III
<b>第一章 绪论 .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 背景和意义 .....</b>	<b>1</b>
1.1.1 引言.....	1
1.1.2 表面等离子体基本特性.....	2
1.1.3 表面等离子体激发.....	4
<b>1.2 国内外研究现状 .....</b>	<b>7</b>
1.2.1 表面等离子体的应用及研究现状.....	7
1.2.2 角分辨光谱仪器研究现状.....	9
<b>1.3 本文主要研究内容 .....</b>	<b>11</b>
<b>第二章 角分辨光谱测量系统总体方案设计 .....</b>	<b>13</b>
2.1 角分辨光谱测量系统研制要求达到的技术指标 .....	13
2.2 角分辨光谱测量系统设计流程图 .....	14
2.3 角分辨光谱测量系统研制的关键技术 .....	15
2.4 本章小结 .....	16
<b>第三章 角分辨光谱测量系统硬件设计 .....</b>	<b>17</b>
<b>3.1 光学系统设计 .....</b>	<b>17</b>
3.1.1 光学系统构成.....	17
3.1.2 光学元件选型.....	18
3.1.3 光路耦合性分析.....	21
<b>3.2 机械结构设计 .....</b>	<b>22</b>
3.2.1 总体设计.....	22
3.2.2 机构设计.....	22
3.2.3 各零件装配与校正.....	29
<b>3.3 本章小结 .....</b>	<b>33</b>

<b>第四章 角分辨光谱测量系统软件设计与实现</b> .....	<b>35</b>
<b>4.1 软件设计</b> .....	<b>36</b>
4.1.1 概要设计 .....	36
4.1.2 子系统详细设计 .....	37
<b>4.2 软件实现</b> .....	<b>41</b>
4.2.1 开发环境和语言选择 .....	41
4.2.2 软件编写 .....	41
<b>4.3 本章小结</b> .....	<b>47</b>
<b>第五章 光谱仪标定及角分辨光谱测试与应用</b> .....	<b>49</b>
<b>5.1 光谱仪标定</b> .....	<b>49</b>
5.1.1 光谱仪标定原理 .....	49
5.1.2 基于公式标定方法 .....	50
5.1.3 基于 BP 神经网络的波长标定方法 .....	54
5.1.4 公式标定与 BP 神经网络标定结果对比 .....	57
<b>5.2 角分辨光谱测量系统测试与应用</b> .....	<b>58</b>
5.2.1 一维金属光栅的角分辨光谱实验 .....	58
5.2.2 二维周期性金属纳米结构的角分辨光谱测量 .....	63
<b>5.3 本章小结</b> .....	<b>64</b>
<b>第六章 总结与展望</b> .....	<b>65</b>
6.1 总结 .....	65
6.2 展望 .....	65
参考文献 .....	67
攻读硕士学位期间取得的科研成果 .....	71
致谢 .....	73

## Contents

<b>Abstract in Chinese</b> .....	<b>I</b>
<b>Abstract in English</b> .....	<b>III</b>
<b>Chapter 1 Interoduction</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Research purpose and significance</b> .....	<b>1</b>
1.1.1 Introduction.....	1
1.1.2 The basic characteristics of surface plasmon .....	2
1.1.3 Surface plasmon excitation .....	4
<b>1.2 Research status at home and abroad</b> .....	<b>7</b>
1.2.1 Some applications and research status of surface plasmon .....	7
1.2.2 Research status of angle-resolved spectral measuring system.....	9
<b>1.3 Main research contents</b> .....	<b>11</b>
<b>Chapter 2 The overall system design</b> .....	<b>13</b>
<b>2.1 Technical specifications of system</b> .....	<b>13</b>
<b>2.2 Design flow chart of system</b> .....	<b>14</b>
<b>2.3 Technical Difficulties and solutions of system</b> .....	<b>15</b>
<b>2.4 Conclusions</b> .....	<b>16</b>
<b>Chapter 3 Hardware design</b> .....	<b>17</b>
<b>3.1 Optical system design</b> .....	<b>17</b>
3.1.1 Optical system.....	17
3.1.2 Optical components .....	18
3.1.3 Optical coupling analysis .....	21
<b>3.2 Mechanical design</b> .....	<b>22</b>
3.2.1 Overall design .....	22
3.2.2 Part Design.....	22
3.2.3 Parts assembly and calibration.....	29
<b>3.3 Conclusions</b> .....	<b>33</b>
<b>Chapter 4 Software design and implementation</b> .....	<b>35</b>

<b>4.1 Software design .....</b>	<b>36</b>
4.1.1 Summary of design .....	36
4.1.2 Subsystem design.....	37
<b>4.2 Software Implementation .....</b>	<b>41</b>
4.2.1 Development environment and language.....	41
4.2.2 Coding.....	41
<b>4.3 Conclusions.....</b>	<b>47</b>
<b>Chapter 5 Wavelength carlibration and angle-resolved mearing system experiment.....</b>	<b>49</b>
<b>5.1 Wavelength carlibration .....</b>	<b>49</b>
5.1.1 Calibration principle .....	49
5.1.2 Calibration based on formula.....	50
5.1.3 Calibration based on BP neural network.....	54
5.1.4 Comparison between formula and BP neural network .....	57
<b>5.2 Angle-resolved measuring system testing and application.....</b>	<b>58</b>
5.2.1 Angle-resolved experiment of one-dimensional metal grating .....	58
5.2.2 Angle-resolved experiment of two-dimensional metal grating.....	63
<b>5.3 Conclusions.....</b>	<b>64</b>
<b>Chapter 6 Summary and Outlook.....</b>	<b>65</b>
<b>6.1 Summary.....</b>	<b>65</b>
<b>6.2 Outlook .....</b>	<b>65</b>
<b>References .....</b>	<b>67</b>
<b>Research results during mater education.....</b>	<b>71</b>
<b>Acknowledgement .....</b>	<b>73</b>

## 第一章 绪论

### 1.1 背景和意义

#### 1.1.1 引言

经过近几十年的飞速发展，与表面等离子体（surface plasmons, SPs）有关的研究取得了飞速的发展，而且迅速向其它领域交叉渗透，已经发展成一个涉及到物理、化学和生物等多个研究领域的学科<sup>[1][2][3][4]</sup>。由于表面等离子体具有出色的控制光的能力，可以突破光的衍射极限理论的限制在纳米尺度下对光进行调控和聚焦，实现全光集成<sup>[5][6][7]</sup>。随着光通讯和纳米制备技术等技术的迅速发展，表面等离子体应用将会在微纳光学、光电子等领域发挥越来越大的作用<sup>[9][10][11][12]</sup>。通过金属纳米结构上的表面等离子体，光照射到金属结构表面的电磁场能量会被束缚，并形成一個极强的局域性的电磁场，因此出现了很多新奇的现象，如拉曼光谱的定向激发和发射、表面等离子体传感器等<sup>[13][14]</sup>。

表面等离子体是指在金属表面存在的自由振动的电子与光子相互作用产生的沿着金属表面传播的电磁波，它在表面处场强最大，在垂直于界面方向指数衰减<sup>[15][16]</sup>。现在一般是用光波来激发表面等离子体，并且光波可以和表面等离子体相互耦合转换。由于入射光子能量与表面等离子体振荡能量不匹配，因此需要选用一定的耦合手段才能使表面等离子体被激发，如衰减全发射法（ATR）耦合、衍射补偿法等。因此 SPs 的激发与发射过程具有方向性，如图 1.1 所示：

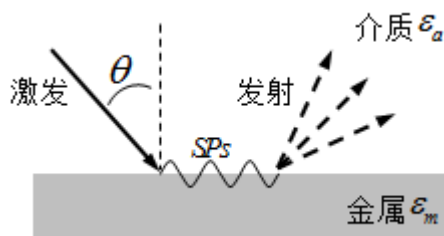


图 1.1 表面等离子体（SPs）激发与发射

由于 SPs 具有在亚波长尺度下调控光的能力，可应用于小于光的衍射极限尺寸的器件上，因此 SPs 耦合光的定向激发与发射在微纳光学领域有重要的意义，如可以显著提高光的收集效率，对研究单光子光源有重要的价值；此外利

用 SPs 表面局域及近场增强的物理现象, SPs 被广泛应用于表面增强光谱、表面等离子体传感器、太阳能电池、表面等离子体光波导等领域<sup>[17][18]</sup>。这些领域的应用都对表面等离子体的定向激发与发射提出要求, 因此角分辨光谱是表征表面等离子体的一种很好研究手段。本文根据这一需求, 设计了一套角分辨光谱测量系统, 研究表面等离子体定向激发、发射与角度之间的关系。

### 1.1.2 表面等离子体基本特性

1902 年, Wood 采用连续光谱的偏振光波照射金属光栅时, 在反射光谱上观测到一种反常衍射现象, 即“伍德异常衍射现象(Wood Anomalies)”<sup>[21]</sup>。1941 年, Fano 将金属光栅的反常衍射现象与之前相关理论联系起来提出了表面等离子体的概念<sup>[22]</sup>。1958 年, Turbader 采用金属薄膜的全反射激励的方法观测到表面等离子共振(Surface Plasmonic Resonance, 简称 SPR)现象<sup>[23]</sup>。在 1968 年, 德国物理学家 Otto 和 Kretschman 各自采用衰减全反射(Attenuated Total Reflection, ATR)的方法在实验中实现了光频段表面等离子体的激发<sup>[24][25]</sup>。至此, 一个较为完整的表面等离子体理论就建立起来了, 从而对上述现象的理论解释进行了统一。

根据经典 Drude 模型, 在金属中存在着大量的“自由电子”。所谓自由电子, 是指可脱离原来的原子核束缚并在原子间运动的电子<sup>[19][20]</sup>。自由电子实际上为整个金属晶格所共有, 并不是完全自由, 而金属中大部分电子还是束缚在原子核周围的。这些束缚在原子核周围的电子和金属晶格上的正离子对自由电子形成一个势场, 相当于施加了一个阻尼力。该阻尼力的大小与自由电子群的速度成正比, 方向与自由电子群的速度方向相反。当金属表面的自由电子在无外力作用时, 呈现出一种平衡态。

假设研究的是一个半无限大的块状金属体系, 金属的介电常数为  $\epsilon_m$ , 与金属表面相邻的介质的介电常数为  $\epsilon_d$ , 金属内自由电子的密度为  $n$ , 如图 1.2 所示。

如果金属中的自由电子群由于入射光子的作用而偏离其平衡位置, 则在阻尼力的作用下它们将会返回平衡位置。当回到平衡位置时, 它们的势能为零,



Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.