

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学 号: 19820111152822

UDC_____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

表面等离激元增益介质的初步探索及金属光栅表面
TE 偏振光谐振效应

**Preliminary Exploration of Surface-Plasmon Gain Medium and
the Resonance of TE-Polarized Light
on Metal Grating Surface**

陈 炜

指导教师姓名: 孙志军 教授

专 业 名 称: 光 学

论文提交日期: 2015 年 月

论文答辩时间: 2015 年 月

学位授予日期: 2015 年 月

答辩委员会主席：_____

评 阅 人：_____

2015 年 月

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

摘要

表面等离激元 (Surface Plasmon, SP) 是金属-介质界面处的自由电子在高频电磁波 (如光波) 耦合作用下集体谐振的一种电子密度波。它具有强烈的局域电磁场增强、突破衍射极限、亚波长局域化等一系列出色的特点, 引起了研究者对它的高度关注。但是由于金属本征吸收的存在和激发方式的限制, 阻碍了表面等离激元器件的发展。针对于此, 本文主要对以下两个方面进行了一些探索和研究。

首先, 我们通过溶胶凝胶方法探索制备掺铟二氧化硅薄膜的工艺, 以期将其作为补偿等离激元器件损耗的一种增益材料。针对加入不同量比的异丙醇 (IPA) 溶液, 我们分别对成膜质量, 成膜厚度和简单的光致发光效率进行了研究, 同时对不同衬底下掺铟二氧化硅薄膜的发光进行了比较。发现加入异丙醇的量对最后的成膜厚度有一定影响, 加入量越多, 成膜厚度越薄。同时加入量过少, 成膜质量较差 (可能出现裂痕), 发光效率也会受到影响。同时我们借鉴反射谱测量薄膜厚度的方法, 利用程序法实现了对掺铟二氧化硅薄膜厚度和折射率的测量, 具有一定的信服力。最后我们还探索了制备光波导中的光刻工艺和热氧化工艺, 探索了 $1\ \mu\text{m}$ 线条的最佳光刻条件, 同时探究了热氧化厚度和时间的关系。

其次, 针对 TE 偏振光即横向电场偏振光无法与金属表面发生相互作用的限制, 我们在金属光栅表面引入一层介质, 让 TE 偏振光在改造表面两边的磁场分量不连续, 从而 TE 偏振光可以与金属光栅结构相互作用。我们通过研究金属光栅表面的共振效应, 发现它的共振符合布洛赫波的特性并且受耦合相位匹配的限制只存在偶数阶的模式, 同时通过调整光栅尺寸, 发现在槽尺寸较大的情况下, 除了布洛赫波共振还会激发局域腔模式共振, 导致出现一个新的吸收峰。

关键词: 表面等离激元; 增益介质; 掺铟二氧化硅

Abstract

The surface plasmon (SP) wave is a special surface electromagnetic wave associated with the collective oscillation of free electrons in metals when coupled with high frequency electromagnetic wave (eg. optic wave). It possesses a series of peculiar properties, such as very high spatial localization enhancement of the field near the surface, overcoming of the diffraction limit and spatial localization within subwavelength, that attracted highly focused of many researchers. However, the development of surface plasmon devices is restricted to the intrinsic absorption of metal and the limit of excited ways. For the situation, we mainly aim the following two aspects work at studying and exploring in the thesis.

Firstly, we explore the techniques of preparing the silica film doped with erbium to make it as gain material to compensate the loss of surface plasmon devices. For different levels of isopropyl alcohol (IPA) in the solution, we respectively study the film quality, film thickness, the luminescence properties of films together with the luminescence properties of films for different substrate. We find that the more magnitude of IPA, the thinner the film thickness is. However, the quality and luminous efficiency of the film may be terrible for too less IPA in the solution. By the way, we utilize software program to realize the measurement of the thickness and index of the film, which are credible in our opinion. The last we also explore the photolithography and thermal oxidation techniques of preparing a waveguide, getting the best process conditions of lithography to do one micron line and studying the relation of the thermal oxide thickness and the time.

Secondly, for the limit of unable interacting between transverse electric (TE) polarized light and the surface of metal, we introduce a dielectric layer on the surface of metal grating, there will be a discontinuity of the tangential magnetic field components on both sides of the transformed surface, which make it possible that the TE-polarized light interact with the metal grating. Through the research of resonance on the surface of metal grating, we find that the resonance is identified to have a Bloch wave nature and existing only for its even-order modes because of restricted by

the coupling phase matching conditions. Then we adjust the dimensions of metal grating and find that when the grooves have a larger size (deeper or wider), localized cavity modes will be excited in the grooves, resulting in another type of resonant absorption peaks.

Key words: Surface plasmon; Gain medium; Erbium doped silica

厦门大学博硕士论文摘要库

摘要.....	I
Abstract.....	II
目录.....	IV
Contents.....	VI
第1章 绪论.....	1
1.1表面等离子激元概述.....	1
1.2 表面等离子激元基本性质.....	2
1.2.1 表面等离子激元.....	2
1.2.2 表面等离子激元的基本性质.....	2
1.3表面等离子激元损耗补偿研究现状.....	5
1.4 本论文的研究内容和安排.....	8
1.4.1 论文的研究内容.....	8
1.4.2 本论文结构.....	9
参考文献.....	10
第2章 硅表面掺铒氧化硅薄膜的制备及相关波导的工艺探索.....	13
2.1硅表面掺铒氧化硅薄膜的制备工艺及光学性质.....	13
2.1.1 研究背景.....	13
2.1.2 铒元素的光谱理论.....	13
2.1.2.1 铒元素的电子层结构.....	13
2.1.2.2 增益放大的基本原理.....	14
2.1.2.3 影响 Er^{3+} 离子发光强度的能量转移.....	16
2.1.3 掺铒氧化硅薄膜的溶胶凝胶法制备工艺.....	18
2.1.3.1 背景介绍.....	18
2.1.3.2 溶胶凝胶法.....	19
2.1.3.3 氧化硅掺铒薄膜制备工艺探索.....	21

2.1.4 掺铟二氧化硅薄膜工艺和光学性质的初步研究和探索.....	23
2.1.4.1 设计对比实验.....	23
2.1.4.2 加入不同异丙醇对成膜质量的影响.....	24
2.1.4.3 加入不同异丙醇对成膜厚度的影响.....	26
2.1.4.4 加入不同异丙醇对光致发光谱的影响.....	28
2.1.4.5 研究不同衬底对光致发光谱的影响.....	30
2.1.5 通过反射谱方法测量薄膜厚度和折射率.....	31
2.1.5.1 测量方法说明.....	31
2.1.5.2 反射谱的测量.....	31
2.1.5.3 程序法测量对比.....	32
2.2 等离子光波导工艺的探索.....	33
2.2.1 微纳加工工艺简介.....	33
2.2.2 微纳加工工艺的探索.....	34
2.2.2.1 光刻工艺.....	34
2.2.2.2 热氧化.....	38
2.3 后续工作研究.....	40
2.4 本章小结.....	40
参考文献.....	44
第3章 镀有介质层的金属光栅对TE偏振光的共振吸收.....	46
3.1 背景介绍.....	46
3.2 研究结构和现象.....	46
3.3 分析和讨论.....	47
3.3.1 MDA 层的基模.....	48
3.3.2 共振模式的特性和它的激发条件.....	48
3.3.3 结构尺寸和入射角度的影响.....	50
3.4 光栅结构的影响.....	52
3.5 本章小结.....	53
参考文献.....	54
第4章 总结和展望.....	56

附录攻读学位期间发表的论文.....58

致谢.....59

厦门大学博硕士论文摘要库

Contents

Chinese Abstract.....	I
English Abstract.....	II
Chinese Contents.....	IV
English	
Contents.....	VII
Chapter 1 Introduction.....	1
1.1 Review of Surface-Plasmon.....	1
1.2 Surface-Plasmon and properties.....	2
1.2.1 Surface-Plasmon.....	2
1.2.2 Properties of Surface-Plasmon.....	2
1.3 Loss compensation and research situation of Surface-Plasmon.....	5
1.4 Main work and arrangement of this paper.....	8
1.4.1 Main work of the paper.....	8
1.4.2 Arrangement of the paper.....	9
References.....	10
Chapter 2 Preparation of erbium doped silica film on silicon and	
technology exploration of waveguide.....	13
2.1 Preparing technology of erbium doped silica film on silicon and its optical	
properties.....	13
2.1.1 Background.....	13
2.1.2 Spectrun theory of the erbium.....	13
2.1.2.1 The electronic structure of the erbium.....	13
2.1.2.2 The basic principle of gain amplification.....	14
2.1.2.3 Energy transfer influence erbium ions luminous intensity.....	16
2.1.3 Preparing technology of erbium doped silica film.....	18
2.1.3.1 Background.....	18

2.1.3.2 Sol-gel method.....	19
2.1.3.3 Technology exploration of erbium doped silica film.....	21
2.1.4 Exploration of preparing technology and optical properties for erbium doped silica film.....	23
2.1.4.1 Design experiments.....	23
2.1.4.2 The quality of film for different IPA.....	24
2.1.4.3 The thickness of film for different IPA.....	26
2.1.4.4 PL spectrum for different IPA.....	28
2.1.4.5 PL spectrum for different substrates.....	30
2.1.5 Reflection spectrum method to measure film thickness and index.....	31
2.1.5.1 Measurement method.....	31
2.1.5.2 The measurement of Reflection spectrum.....	31
2.1.5.3 The comparison of program method.....	32
2.2 Technology exploration of surface plasmons waveguide.....	33
2.2.1 Introduction of micro-nano processing technology.....	33
2.2.2 Exploration of micro-nano processing technology.....	34
2.2.2.1 Lithography process.....	34
2.2.2.2 Thermal oxidation.....	38
2.3 The following study.....	40
2.4 The Summary.....	40
References.....	44
Chapter 3 Resonance absorption of the metal grating coated with a dielectric layer for TE-polarized light	46
3.1 Background.....	46
3.2 The research structure and phenomenon.....	46
3.3 Analysis and discussion.....	47
3.3.1 Fundamental Mode in the MDA Layer.....	48
3.3.2 Nature of the resonance mode and its Excitation Conditions.....	48
3.3.3 Effects of structure dimensions and incidence angle.....	50
3.4 Effects of the grating surface profile.....	52

3.5 The Summary.....	53
References.....	54
Chapter 4 Summary and outlook.....	56
Appendix Publications.....	58
Acknowledgements.....	59

厦门大学博硕士论文摘要库

第1章 绪论

1.1 表面等离子激元概述

表面等离子激元 (Surface Plasmon, SP) 是金属-介质界面处的自由电子在高频电磁波 (如光波) 耦合作用下集体谐振的一种电子密度波, 其振幅沿着垂直于界面的方向呈指数式衰减。它具有强烈的局域电磁场增强、突破衍射极限、亚波长局域化、以及对边缘介质环境的高度敏感性等一系列出色的特点^[1]。在超颖材料、成像、生物探测、亚波长波导、高密度存储等方面都有比较良好的应用前景^[2-5]。

与电磁表面波相关的最早发现是牛顿 (I. Newton, 1643-1727) 于 1704 年用棱镜观测到的全反射现象, 它与后来被定义为倏逝波 (evanescent wave) 的概念相关。早在 20 世纪初 Sommerfeld 和 Zenneck 确立了射频电磁波沿导体表面传播的表面波数学形式。而 Wood 于 1902 年在可见光波段的金属光栅上观察到了光强的异常衰减现象, 一直到 1941 年 Fano 才把该现象和前者的理论联系起来, 用金属与空气界面的表面波模型解释了这种异常衰减现象。然后 Ritchie 于 1957 年在金属薄膜上的电子束衍射实验和 1968 年在光学波段的光栅衍射实验、Kretschmann 和 Raether 于 1968 年用棱镜耦合激发可见光波段的表面波等研究, 将上述相似的现象用表面等离子激元的形式作了一个统一描述^[6]。金属微纳结构中的表面等离子激元的应用可以上溯到罗马时代的玻璃染色技术, Mie 于 1908 年讨论金属球散射问题时建立其数学形式^[7], 可严格求解亚波长孔径衍射问题的数学模型^[8]由 Bethe 于 1944 年提出。而且随着扫描隧道显微镜^[9] (Scanning Tunneling Microscope, STM, 1982) 和近场扫描光学显微镜^[10] (Near-Field Scanning Optical Microscope, NSOM, 1984) 等等技术发明的涌现, 以表面等离子激元为研究核心的近场光学迅速发展^[11]。表面等离子激元在微纳米尺寸的金属复合结构中的非线性光学增强效应研究得非常广泛, 例如表面增强拉曼散射 (SERS)^[12], 二次谐波产生 (SHG)^[13] 和多光子光致发光^[14] 等研究。特别是自 1998 年 Ebbesen 等人^[15] 发现亚波长金属孔径阵列的异常透射现象以来, 极大推动了在一维和二维亚波长金属狭缝和孔洞结构^[16]、金属微腔^[17]、金属纳米粒子^[18] 和粗糙金属表面等金属微纳结构

[19]的理论和应用研究。

近年来,表面等离激元光学渐渐引领了纳米光子学研究的前沿^[20]。随着纳米加工技术的不断创新以及高性能计算机的不断进步,等离激元的理论和应用研究不断取得突破,从微波^[21]、太赫兹^[22]到可见、近红外^[23]直至紫外波段^[24]极大的光谱范围内不断地把对等离激元现象的理论和应用研究推向深入,极大拓展了等离激元学的内涵和外延。等离激元拥有很多醒目的特征,如表面上的场强极大、谐振特性等在集成光学、生物传感、太阳电池、纳米光刻和近场显微镜等应用领域获得研究者的极大关注。

1.2 表面等离激元基本性质

1.2.1 表面等离激元

金属可以被看成是一个正离子构成的固定正电背景和该背景上的自由电子组成。自由电子的密度高达 10^{23} cm^{-3} 。如果给金属加上一个交变电场,金属中的电子的密度就会相应的产生交变起伏,形成自由电子密度振荡,我们把这种集体振荡现象用准粒子模型进行描述^[25],对于频率为 ω_p ,波矢为 p 的等离激元集体振荡量子。假设金属中的电子密度为 n ,我们可以求得等离激元的本征振荡圆频率为 $\omega_p = \sqrt{4\pi n e^2 / m_0}$,其中的 m_0 为电子质量,该频率对应的光子能量约为 $5 \sim 30 \text{ eV}$,处于紫外和深紫外波段,而通常的可见光和近红外区域的光频率均低于金属本征振荡频率 ω_p 。而且等离激元只能沿金属表面传播,所以被称为表面等离激元。

1.2.2 表面等离激元的基本性质

在金属与电介质界面上的表面等离激元同时具有电磁波和表面电荷的特征,以及场在远离界面时会以指数形式衰减。说明表面等离激元是受到限制和具有非辐射的特点。

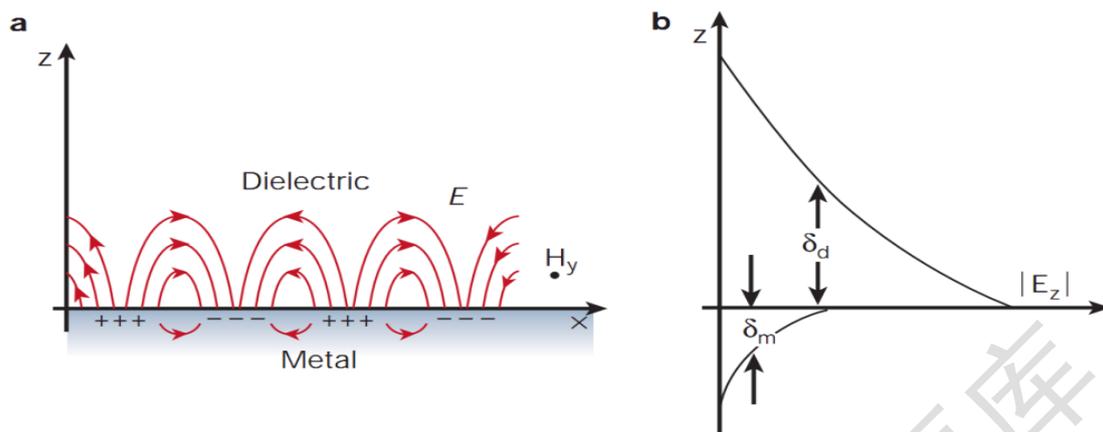


图 1.1 (a) 表面等离子激元的电场示意图及空间电荷分布。
(b) 界面处电场强度分布情况^[26]

1) 以图 1.1(a)为模型，从 Maxwell 方程可以推导出表面等离子激元的一些基本性质：

$$k_{sp} = \frac{\omega}{c} \left(\frac{\epsilon_d \epsilon_m}{\epsilon_d + \epsilon_m} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.1)$$

$$k_{zd} = -\frac{2\pi}{\lambda_0} \frac{\epsilon_d}{\sqrt{\epsilon_d + \epsilon_m}}, \quad k_{zm} = -\frac{2\pi}{\lambda_0} \frac{\epsilon_m}{\sqrt{\epsilon_d + \epsilon_m}} \quad (1.2)$$

k_{zd} 、 k_{zm} 分别表示等离子激元在 Z 方向两种介质中的波矢，我们知道金属的介电常数为复数，由前式可知 k_{sp} 、 k_{zd} 、 k_{zm} 都应该为复数。当 k_{zm} 虚部为负数， k_{sp} 、 k_{zd} 虚部为正数时，该模式在 X 方向和 Z 轴远离界面方向都是衰减的，只局限于金属与电介质的分界面，如图 1.1(b) 所示。同时在电介质中，场的衰减长度 δ_d 大概为半个波长，而在金属中的衰减长度 δ_m 则取决于金属的趋肤深度^[27]。又根据波矢的定义 $k = 2\pi / \lambda$ ，则表面等离子激元的波长 λ_{sp} 满足：

$$\lambda_{sp} = \frac{2\pi}{k_z} = \lambda \left(\frac{\epsilon_m' \epsilon_d}{\epsilon_m' + \epsilon_d} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.3)$$

式中的 λ 为等离子激元波频率所对应的光波的真空波长。

图 1.2 为金属/介质表面产生的等离子激元波和光波色散关系对比图，由图中我们可以看出在相同频率下光波的波矢 k_0 总是小于表面等离子激元的波矢 k_{sp} ，因

此, 在光滑金属平面上通过直接的光照射是无法激发等离激元波的, 而要实现激发, 必须给光波提供波矢补偿, 使二者的波矢相匹配, 就目前来说, 实现波矢补偿的方法有: 棱镜全反射法(ATR)、光栅衍射补偿法、使用亚波长的金属纳米小孔(缝)、颗粒或者探针^[28]。

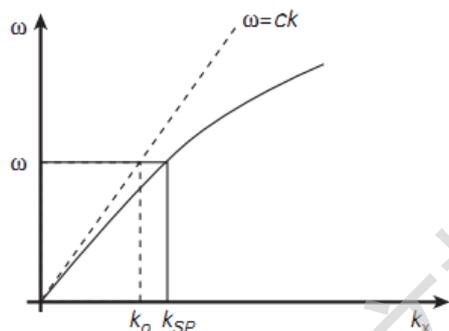


图 1.2 金属/介质表面产生的等离激元和光波色散关系对比图

对于金属纳米颗粒而言, 场会被局域在金属纳米颗粒表面或体内(纳米颗粒尺寸很小), 在一定的条件下, 就会形成等离激元共振。研究者把金属纳米结构中的等离激元共振模式称作为局域表面等激元(localized surface plasmon resonance, LSPR)。如图 1.3 所示^[29], 由于入射光场的激发, 自由电子从正离子点阵的位置发生整体位移。

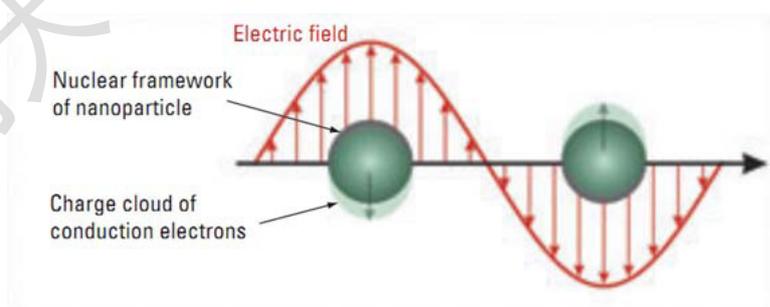


图 1.3 金属纳米颗粒的 LSPR 示意图^[29]

2) 从结构上来说, 对于表面等离激元波, 必须要求金属相对介电常数实部的符号和电介质的实部符号相反^[30]。在一定的频率范围内, 贵金属(Ag, Au)介电常数的实部为负数, 如图 1.4 所示, 同时作为电介质的材料(Si 为 11.9, 石

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 for delivery details.