

现代光子学系列译丛

Plasmonics

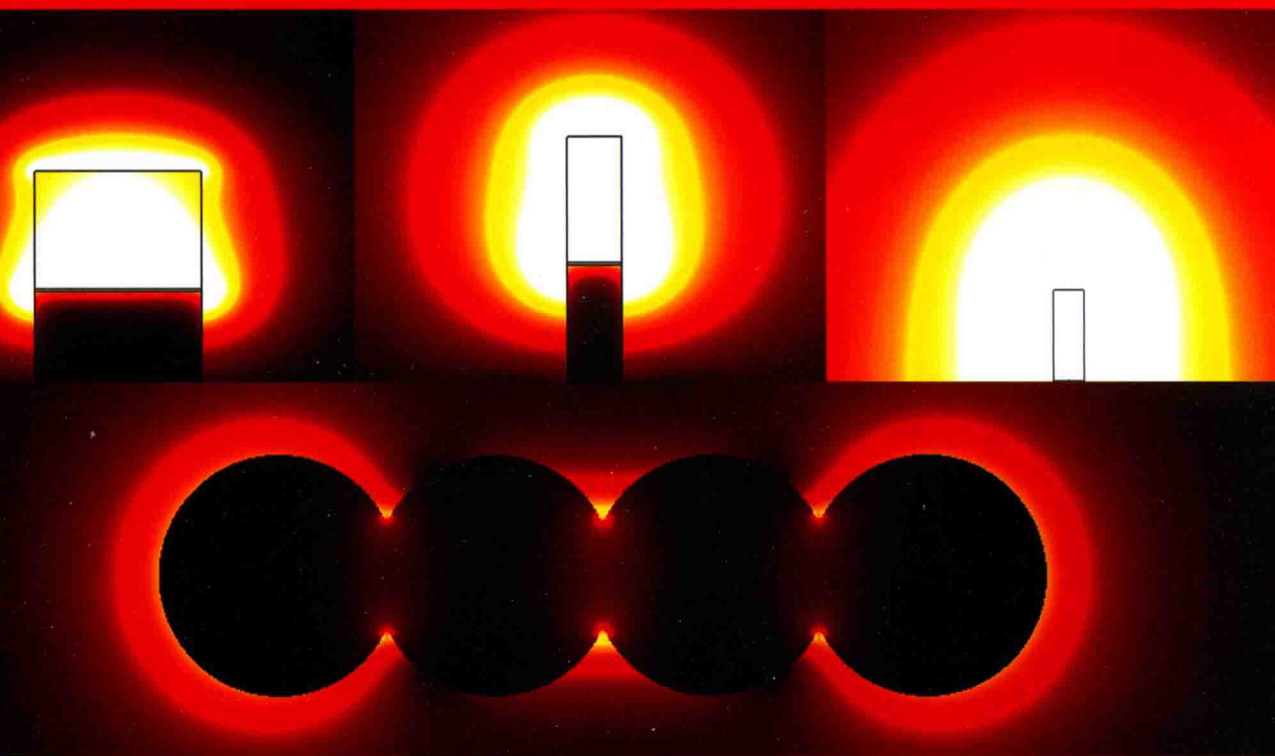
Fundamentals and Applications

Stefan Alexander Maier

等离激元学

——基础与应用

张彤 王琦龙 张晓阳 李晨◎译



现代光子学系列译丛

等离激元学

——基础与应用

麦尔(Maier, S. A.) 编著

张 彤 王琦龙 译
张晓阳 李 晨

 东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

· 南京 ·

内容简介

等离激元学作为纳米光子学的重要组成部分,是目前极具发展前景的研究领域之一。它主要研究限制在光波长量级(或小于光波长)的电磁场,以及在金属界面或微纳金属结构中电磁辐射和传导电子的相互作用过程,这种相互作用将导致亚波长尺寸的光学近场增强。本书涵盖了等离激元学科的基本理论 and 应用方向,分为两个部分:第一部分从经典电磁场理论的基本描述开始,讨论了导电材料的特性,详细描述了可见光区域的表面等离极化激元和局域表面等离激元,以及低频下的表面电磁波模式;第二部分主要介绍了该学科的应用方向,包括等离激元波导,用于光透射增强的小孔阵列,以及各种几何形状的表面增强传感结构,最后,对金属超材料进行了简要的描述。

本书可供高等院校光学、物理电子学、凝聚态物理学和微纳光子学等方向的理工科研究生阅读或作为教材使用,也可供相关领域的科技工作者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

等离激元学:基础与应用/(英)麦尔(Maier, S. A.)编著;
张彤等译. —南京:东南大学出版社,2014.12
书名原文:Plasmonics Fundamentals and Applications
ISBN 978-7-5641-5464-6

I. ①等… II. ①麦… ②张… III. ①等离子体物理学—
研究 IV. ①O53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 004855 号

江苏省版权局著作权合同登记
图字 10-2014-135

Translation from English language edition:
Plasmonics: Fundamentals and Applications
By Stefan Alexander Maier
Copyright © 2007 Springer
Springer US is a part of Springer Science+Business Media
All Rights Reserved



等离激元学——基础与应用

出版发行 东南大学出版社
出 版 人 江建中
责任编辑 张 煦
社 址 南京市四牌楼 2 号
邮 编 210096
经 销 各地新华书店
印 刷 江苏凤凰数码印务有限公司
开 本 787 mm×1092 mm 1/16
印 张 10.75
字 数 268 千字
版 次 2014 年 12 月第 1 版
印 次 2014 年 12 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5641-5464-6
定 价 42.00 元

译者序

近十多年来,基于表面等离激元(Surface Plasmon, SP)的研究取得了重大进展,SP在纳米光电集成、光学成像、生物传感、数据存储等领域得到了广泛应用,获得了国内外学者的极大关注。由于表面等离激元领域在国内研究时间较短,发展迅猛,目前国内在该领域十分缺乏全面的中文专著和教材供研究人员参考。这次翻译的译著共两本,一本是《Surface Plasmon Photonics》,由 Mark L. Brongersma 和 Pieter G. Kik 主编,这本书的每一章节都由相关领域的研究学者结合自己的最新研究成果编辑而成;另一本是《Plasmonics: Fundamentals and applications》,其作者是 Stefan A. Maier,这本书是目前国际上最早系统地论述表面等离激元的著作之一。因此,这两本译著不仅涵盖了表面等离激元学科的基本理论和应用方向,深入讲解了其基本原理和关键技术,而且从广度上结合目前的研究热点,对表面等离激元进行了详细论述,建立起了基于表面等离激元的不同研究方向之间的联系。原著的每一位作者均是世界范围内这一研究领域的杰出研究者,他们对等离激元学的发展状况的概述和总结,能够使国内相关专业的科研工作者、研究生以及感兴趣的读者更加深入地了解该领域,使他们不仅能够系统地学习和理解这个新兴学科,还能够与其他研究领域相结合,进一步拓宽研究思路,促进等离激元学在中国的发展。

本人接触到这两本著作,都是在原著刚刚出版之时。由于原著一经出版就在该领域产生了很大的影响力,我当时就萌生了要将它们翻译成中文的想法,但由于琐事缠身,一拖几年过去了,竟到今日方才完成初稿。

虽然目前 SP 已成为国内研究人员关注的焦点之一,然而相关物理学名词,如 SP, SPP(Surface Plasmon Polariton), SPR(Surface Plasmon Resonance)的中文翻译尚未完全统一,存在着不同译法。因此,这里将结合这些名词的由来及国际上对这些名词的物理解释,对目前国内的不同译法做简单介绍,并据此给出我们认为最符合其物理含义的中文译法,供读者参考。

Plasma 一词最早于 1839 年作为生物学名词(proto plasma)出现,1928 年由美国科学家 Langmuir 和 Tonks 首次将其引入物理学^[1],描述气体放电管中的一种物质形态,由于它是一种电中性电离气体,所以大部分中文译法为“等离子体”,而台湾学者和北京大学的赵凯华教授将其译为“电离浆”^[2]。我们这里采用主流的第一种翻译方法。

科学研究中第一次观察到表面等离激元是在 20 世纪^[3],1902 年 Robert W. Wood 在金属光栅上进行光学反射测量时观察到了这一当时还不能解释的现象,直到 50 多年后的 1956 年,David Pines 才首次从理论上对这种现象进行了解释^[4],将快速电子穿透金属之后的能量损失特性归因于金属内的自由电子集体振荡。类比于早期研究的气体放

电等离子体振荡(plasma),他将这种金属内的自由电子集体振荡命名为 plasmon。徐龙道教授等人编著的《物理学词典》中对 plasmon 的解释为“A collective excitation for quantized oscillations of the electrons in a metal”^[5],从量子观点看它是一种准粒子,是一种元激发,因此国内研究人员在早期翻译时引入了“激元”这一概念^[6]。上世纪八九十年代的中文文献以及词典^[7]通常将其翻译为“等离激元”、“等离子激元”或“等离子体激元”,这些译法与被译为“等离子体”的 plasma 也有所区分。

1958年,Turbader 首先对金属薄膜采用光的全反射激励方法^[8],观察到 SPR 现象,尤其是1968年 Otto 及 Kretschmann 分别发表了里程碑性质的文章^[9,10],激发了人们将 SPR 应用于传感领域的热情。SPR 的物理解释是“an optical phenomenon arising from the collective oscillation of conduction electrons in a metal when the electrons are disturbed from their equilibrium positions. Such a disturbance can be induced by an electromagnetic wave (light), in which the free electrons of a metal are driven by the alternating electric field to coherently oscillate at a resonant frequency relative to the lattice of positive ions.”^[11]。由此可以看出,SPR 是 SP 受到光的激发产生的。目前通过检索文献可知它的中文译法通常为“表面等离子体共振”或“表面等离子共振”^[12,13],而较少翻译为“表面等离激元共振”,这与 SP 的中文译名是有一定矛盾的,这可能是由于 SPR 早在 SP 被深入研究之前已广泛应用在生物传感及检测等领域,因此由于历史习惯原因,大部分中文文献中仍将其称为“表面等离子体共振”或“表面等离子共振”。

美国伊利诺伊大学的 Ralph G. Nuzz 教授在论文中写道,“Two types of surface plasmon resonances (SPRs) are used in surface-based sensing: (i) propagating surface plasmon polaritons (SPPs) and (ii) nonpropagating localized SPRs(LSPRs)”^[14]。因此,SPR 可以分为传导的 SPP 模式和局域的 LSPR 模式。LSPR 通常翻译为“局域表面等离子共振”,而 SPP 的译法一直并未统一。为了找到最准确的中文译法,我们首先要理解 SPP 中的 polariton 一词的含义。黄昆院士在上世纪五十年代创造性地提出了极性晶体振动模式和宏观电场的耦合产生声子极化激元,虽然这一名称不是黄昆给出的,但科学界公认他是这一概念的创始人。他在文献^[16]中写道,“晶体中电磁波的推迟效应对长波光学波的影响是什么?我注意到这可能是应用这对唯象方程的另一个理想的问题。但是要解决这个问题意味着要将这对方程与所有的麦克斯韦方程联立,而不仅仅是与静电学方程联立。我得到了非常有趣的结果,它们不再像通常电磁波的传播,结果引入了一种新的运动模式,它包含了电磁波和极化晶体的晶格声子,具有许多新的特性”。由此,黄昆院士的理论可以延伸到更普遍的物理问题,北京大学的甘子钊院士在纪念黄昆先生 90 诞辰的文章^[17]中写道“从量子理论的观念来看,介质中传播的激发态的波,常常可作简谐近似,可以看作准粒子(或者叫元激发),这种元激发是玻色子。电磁场和这种波的相互作用可以看作光子(光子是玻色子)和这种玻色子的相互作用。耦合的结果是产生新的准粒子(元激发),是光子和这种玻色子的杂化,是一种新的玻色子。”“polariton”这个英文概念源于 1958 年 Hopfield 的研究激子在晶体中的传播的论文,他在文章中写道“It is shown that excitons are approximate bosons, and, in interaction with the electromagnetic field, the exciton field plays the role of the classical polarization field. The eigenstates of the system of crystal and radiation field are mixtures of photons and

excitons.”“The polarization field ‘particles’ analogous to photons will be called ‘polaritons’.”“Optical phonons are another example of polaritons.”可以看出, Hopfield 的论文中所说的激子极化激元与黄昆院士提出的声子极化激元均为极化激元中的一类。1974 年 Stephen Cunningham 和他的同事提出了 surface plasmon polariton 的概念^[18], 其物理解释是“A surface plasmon polariton (SPP) is an electromagnetic excitation existing on the surface of a good metal. It is an intrinsically two-dimensional excitation whose electromagnetic field decays exponentially with distance from the surface”^[19]。根据上述理论, 沿着导体和真空或介质的界面传导的等离极化激元也是极化激元中的重要一类。目前很多中文论文都将其与 SP 的中文译法相混淆, 均翻译为“表面等离激元”、“表面等离激元”或“表面等离激元”, 这显然并不合适。北京大学的甘子钊院士和南京大学的王振林教授都将 SPP 译为“表面等离极化激元”^[20], 此外, 由李景镇教授主编的《光学手册》写道“当前学界已将由电磁场共振激发的金属/电介质界面表面等离激元定义为表面等离极化激元。”^[21]根据上述的物理解释和含义, 我们认为将 SPP 翻译为“表面等离极化激元”是目前最准确的一种译法。

因此, 我们在对正文中物理名词进行翻译时均依据以上理论解释, 并通过参考大量文献, 力求避免因译者的理解局限所带来的错误。另外, 参与本书的编译及校对的还有部分博士生及硕士生, 此处不一一介绍, 对他们一并表示感谢。

张 彤

2014 年 9 月

参考文献

- [1] Langmuir I. *Oscillations in ionized gases*. PNAS, 1928, 14: 627.
- [2] 赵凯华. 再论 plasma 的译名. 物理, 2007(11).
- [3] Wood R. W. *On a remarkable case of uneven distribution of light in a diffraction grating spectrum*. Phil. Mag. Lett., 1902, 4: 396.
- [4] D. Pines. *Collective energy losses in solids*. Rev. Mod. Phys., 1956, 28: 184-198.
- [5] 徐龙道. 物理学词典. 北京: 科学出版社, 2004.
- [6] G. Hincelin, A. Septier, 杨铎. 在表面等离激元的激发作用下光电阴极电子发射产额的选择性增强. 红外技术, 1981(03).
- [7] 冯端. 固体物理学大辞典. 北京: 高等教育出版社, 1995.
- [8] Lofas S., Malmqvist M., Ronnberg I., et al. *Bioanalysis with surface plasmon resonance*. Sensors & Actuators, 1991, 5: 79-84.
- [9] A. Otto. *Excitation of nonradiative surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection*. Z. Phys., 1968: 216, 398.
- [10] Kretschmann E., Raether H. *Radiative decay of non-radiative surface plasmons excited by light*. Z. Naturf., 1968, 23A: 2135.
- [11] Lu X., Rycenga M., Skrabalak S. E., et al. *Chemical synthesis of novel plasmonic nanoparticles*. Annual review of physical chemistry, 2009, 60: 167-192.
- [12] 吴英才, 袁一方, 徐艳平. 表面等离共振传感器的研究进展. 传感器技术, 2004(05).
- [13] 郑荣升, 鲁拥华, 林开群, 等. 表面等离激元共振传感器研究的新进展. 量子电子学报, 2008

(06).

- [14] Stewart, M. E. , et al. *Nanostructured Plasmonic Sensors*. Chemical Reviews, 2008, 108(2): 494-521.
- [15] Hopfield J. J. . *Theory of the Contribution of Excitons to the Complex Dielectric Constant of Crystals*. Phys. Rev. , 1958, 112:1555.
- [16] 黄昆. 中国科学进展. 北京:科学出版社, 2003.
- [17] 秦国刚. 黄昆文集. 北京:北京大学出版社, 2004.
- [18] 甘子钊. 极化激元研究的进展——纪念黄昆先生 90 诞辰. 物理, 2009(08).
- [19] Fleischmann, M. , P. J. Hendra, A. J. McQuillan. . *Raman spectra of pyridine adsorbed at a silver electrode*. Chem. Phys. Lett. , 1974, 26:163.
- [20] Zayats A. V. , Smolyaninov I. I. , Maradudin A. A. . *Nano-optics of surface plasmon polaritons*. Physics reports, 2005, 408(3):131-314.
- [21] 王振林. 表面等离激元研究新进展. 物理学进展, 2009(03).
- [22] 李景镇. 光学手册(下卷). 西安:陕西科学技术出版社, 2010:1622-1627.

前言

1982 年秋天,我正在进行大学本科最后一年的课题:基于表面等离激元的研究。时光荏苒,转眼间 20 多年已过去,我发现这个研究课题依旧让我无法忘却,更不用说我将其作为我一生的事业。这次受邀为此书撰写前言并包含一个历史回顾,使我想起第一次接触表面等离激元研究的情形。我的课题导师是 Roy Sambles——我现在才意识到我有多么得幸运。不知不觉中我已沉迷于等离激元物理学中:不仅仅是学习,而且是研究——让我陷入其中。在这 20 多年间表面等离激元领域已经发生了巨大的改变,就像等离激元的新外观一样,人们对它的研究兴趣日益高涨,并且越来越多的人加入到这一领域的研究。

但是对于等离激元这个主题出现的新知识,从哪里开始入手学习和研究呢?一本好的著作可以充当指导和指南——它将使得一切的一切那么的不一样!1982 年我开始学习等离激元物理学的时候,那时最新版本的著作庞大而繁琐,书名叫做《Electromagnetic Surface Waves》(《电磁表面波》),由 Alan Boardman 编著。我和 Kevin Welford 一起在 Roy Sambles 的指导下攻读博士学位,作为入门者,我们发现《Electromagnetic Surface Waves》是一本令人生畏却十分有用的资源。于是我们便开始争先抢阅该书,不久之后这本书便被我们翻看得折痕累累而且封面也开始脱落。我在 1986 年离开等离激元研究领域,直到 1992 年才重新回到该研究领域。与此同时,Hans Raether 出版了《Surface Plasmons》(《表面等离激元》)一书。由于他把对等离激元物理的简洁朴素描述及深入研究进行了精彩绝伦的结合,特别是介绍部分——一本经典之作自此诞生。现在将近 20 年过去了,这本书仍然非常有用,但不可避免的是,在这个领域持续的飞速发展过程中它已经渐渐地过时了。在这个过程中有几卷专业的书籍出现,我们强烈地意识到我们需要一本更加与时俱进的关于等离激元的导论及可以在短时间整体了解本领域的概述。现在我们终于迎来了这样一本著作,这一切都该感谢 Stefan。

什么是等离激元学呢?“如果你知道麦克斯韦方程,一些物质特性以及边界条件,所有的都是经典因素——有什么新意在里面?”是的,你是否可以仅通过在金属上加上适当的结构,就能使这种合成材料具有斯涅耳定律相反的性质?或者你能否将光束束缚在尺寸小于 100 倍光波长的区域?没有新的基本颗粒,没有新的宇宙理论,但是我们拥有好奇、冒险、对知识的追求以及其他有助于我们探索的资源。

四个基本要素构成了当今等离激元研究的基础。第一个要素是随时可利用的最先进的制备方法,特别是纳米结构的制备。第二个要素是,拥有大量高灵敏度的光学表征技术(很大一部分是现成可以直接购买的)。第三个要素是计算能力及计算速度的迅速发展,使得我们可以仅仅在笔记本电脑上执行强大的数值计算及建模。大部分研究者可

以接触到等离子激元领域的这一事实使得等离子激元学领域迅速扩张,但是是什么推动该领域的扩张呢?

愤世嫉俗者指责研究者们是跟风盲从。然而,第四个要素,上述中所没有列出的,便是其广泛的潜在应用领域——太阳能电池、高分辨率显微镜、药物设计等。等离子激元研究的应用事实上是强有力的推动因素,但是我想推动因素不仅仅只是它的应用。我知道我是带有偏见的,但是对于我而言,以及我揣测其他人都是认为它是一种冒险、想象的角色,希望能够找到新的东西,用于解释未知的世界,简而言之这就是科学,仅此而已。也许令人惊讶的还有很多主题,一个人可以做所有这些事情,而不需要观察重力波,建立粒子加速器,甚至解释喜欢做这样事情的大脑是如何工作的。等离子激元是这些小规模主题中的一项,在这个领域优秀的人们可以在有限的资源条件下做自己感兴趣的事,这正是它的魅力所在。

概略地说,等离子激元研究领域已经具有一百多年的历史了。大约在上世纪之交,基于某些应用,已经通过另一种方式对那四个要素进行了描述。相关的最新的制造工艺有规则的衍射光栅制备,并通过此光栅得到的光谱进行光学表征。计算,特别是基于 Rayleigh 在衍射方面的工作以及 Zenneck 和 Sommerfeld 在表面波方面的工作——都是解析的,但是直到今天仍然具有利用价值。此外还有便是对金属特性的进一步理解,特别是从 Drude 实验中获得的认知。那么什么不见了?可能最重要的是这些行为没有被真正认同作为一个表面等离子激元的普遍性概念。现在我们处于一个颇不寻常的境地,相关潜在的科学可以更好地被理解,但是当我们不断观察它时,仍能发现更多的惊喜。

回顾历史,我们可以更加清楚地认识到这一点。Thomas Ebbesen 及其同事 1998 年发表在《自然》杂志上的论文——光线通过金属孔洞阵列的异常光透射引发了大量研究者进入该领域。伴随着微波领域进入到光谱领域雪崩式的发展,通过太赫兹、红外光谱、可见光到紫外光谱需要有一个入口点变得更加迫切。正如现在一样,它也许不是很全面,但是 Stefan Maier 的加入提供了一个与时俱进的引论以及一个伟大的当前发展概述。谁知道下一个崭新的概念可能在什么时候涌现?谁知道下一个重要的应用什么时候将会发生?也许没人知道,也许那份绚丽属于你。

Bill Barnes,
School of Physics, University of Exeter,
June 2006

序 言

等离激元学是具有深刻影响力的纳米光子学的主要组成部分,它主要研究被限制在光波长量级(或小于光波长)的电磁场的问题。它主要基于金属界面或者小的金属结构中电磁辐射和传导电子的相互作用过程,这种相互作用将导致亚波长尺寸的光学近场增强。

如果在这一领域的研究中考虑不连续的或亚波长尺寸的结构,往往将产生一些独特的令人意想不到的结果(即使是在现代光学研究领域看似无意义的材料,如金属材料!)。这个领域的另一个亮点在于其牢牢扎根于经典物理,因而在电磁学方面具有坚实的背景知识的本科生能够充分地理解这一方向的主要内容。

然而历史表明,尽管早在 1900 年人们已经完整地描述了表面等离激元学的两个主要组成部分(表面等离极化激元和局域表面等离激元),但是人们仍很难理解这一领域中许多现象及相关应用之间的内在联系。这是由于在整个 20 世纪内,表面等离激元是在一系列不同的实验条件下发现的,而到目前为止,我们并没有找到这些条件之间的内在关联。

20 世纪初,在无线电波可以沿着具有一定电导率的导体表面传播的大背景下,人们建立了有关表面波的数学描述方法[Sommerfeld, 1899, Zenneck, 1907]。在可见光区域,直到 20 世纪中期,人们在光谱中观测到异常的光强减少后才将可见光在金属光栅[Wood, 1902]的反射与早期的理论工作结合在一起[Fano, 1941]。在这段时间内,光与金属表面相互作用发生的光强衰减的现象是通过电子束在薄金属箔[Ritchie, 1957]的衍射来记录的,在 20 世纪 60 年代,这种方法就用于光学中有关衍射光栅的早期工作[Ritchie et al., 1968]。在那个时候,Sommerfeld 已经实现了可见光耦合棱镜的表面波的激发[Kretschmann 和 Raether, 1968],并且用表面等离激元对这些现象作出了统一的描述。

从那时起,人们在这个领域的研究工作主要集中于可见光光谱区域,而 21 世纪初在

微波和太赫兹领域的新发现则与早在 100 多年前的工作相类似。金属纳米结构的局域表面等离激元的研究历史很清晰,有关玻璃染色的金属纳米颗粒的应用可以追溯到罗马时代。在 1900 年,人们已经建立了明确的数学基础 [Mie, 1908]。

这本书包含了这个领域的悠久历史,它不仅适用于那些只具备基本的电磁学或应用光学知识的想要探索此领域的本科生,还可作为此方向研究人员的颇具价值的参考资料。当然读者若想要更深入地学习,参考大量的文献也是很有必要的。在这本书中,我们挑选了一些原始的研究案例描述和引用,有些提供了作者对表面等离激元新的性质或者应用的首次描述,有些则在某些问题上给了我们启发性的指导。在许多情况下,考虑到研究工作的相似性,我们只选取了一小部分的研究结果进行介绍,许多没有列举的工作同样是很优秀的。

本书的第一部分将对这个领域做出充分的介绍,从经典电磁场理论的基本描述开始,特别将重点放在对导电材料的描述上。随后的章节将描述可见光区域的表面等离极化激元和局域表面等离激元以及低频下的表面电磁波模式。第二部分将描述有关此方向上的应用,如等离激元波导,用于光透射增强的小孔阵列,和各种几何形状的表面增强传感结构。最后,本书将对金属超材料进行简要的描述。

我希望本书能够实现它的作用,给现在以及未来从事这个领域的研究人员提供一个有用的工具,并加强不同衍生领域之间的联系。敬请各位读者批评指正。

Stefan Maier

致 谢

我要感谢我的同事 Tim Birks 对本书的所有校对工作,他曾参与过本书的底稿工作并提出了一些合理的建议,感谢 David Bird 对该项目的鼓励与支持。也要感谢我的学生 Charles de Nobriga 对本书版本的更新,最后感谢我的妻子 Mag,在我写作过程中给予我快乐……

目 录

第一部分 等离子激元学基础

第 1 章 金属电磁学	3
1.1 麦克斯韦方程组与电磁波传播理论	3
1.2 自由电子气的介电函数	6
1.3 气态自由电子的色散特性和体等离子激元	9
1.4 实际金属和带间跃迁	11
1.5 金属中电磁场能量	12
第 2 章 金属/绝缘体界面上的表面等离子极化激元	14
2.1 波动方程	14
2.2 金属/介质单界面上的表面等离子极化激元	16
2.3 多层体系中的表面等离子极化激元	20
2.4 能量约束和有效模式长度	24
第 3 章 二维界面上表面等离子极化激元的激发方式	26
3.1 带电粒子轰击下的表面等离子极化激元激发	26
3.2 棱镜耦合	28
3.3 光栅耦合	30
3.4 利用强聚焦光束实现激发	32
3.5 近场激发	33
3.6 适用于与传统光子元件集成的耦合方案	34
第 4 章 表面等离子极化激元传输成像技术	36
4.1 近场光学显微技术	36
4.2 荧光成像	38
4.3 泄漏辐射	40
4.4 散射光成像	42
第 5 章 局域表面等离子激元	44
5.1 亚波长金属颗粒的标准模型	44
5.2 米氏理论	49
5.3 超越准静态近似和等离子激元寿命	49
5.4 实际颗粒:颗粒等离子激元成像	52
5.5 局域等离子激元间的耦合	54

5.6	空洞等离激元和金属纳米壳	57
5.7	局域等离激元与增益介质	58
第6章	低频电磁表面模式	60
6.1	太赫兹频段的表面等离极化激元	60
6.2	波纹表面上的人工表面等离极化激元	63
6.3	表面声子极化激元	68

第二部分 等离激元学应用

第7章	等离激元波导	73
7.1	用于表面等离极化激元传输的平面元件	73
7.2	表面等离极化激元带隙结构	77
7.3	沿金属条带的表面等离极化激元传播	78
7.4	用于强束缚条件下导波和聚焦的金属纳米线及纳米锥	84
7.5	狭缝与凹槽中的局域模式	87
7.6	纳米金属颗粒波导	89
7.7	增益介质的损耗补偿	94
第8章	小孔与薄膜的光辐射透射	96
8.1	亚波长小孔的衍射理论	96
8.2	亚波长小孔中的异常透射	98
8.3	基于输出端表面图形化的定向出射	102
8.4	单孔的局域表面等离激元和光透射	105
8.5	异常透射的新兴应用	108
8.6	无孔薄膜中的光透射	108
第9章	发射过程和非线性增强	110
9.1	表面增强拉曼散射基本原理	110
9.2	基于微腔场增强的表面增强拉曼散射	112
9.3	用于表面增强拉曼散射的结构	114
9.4	荧光增强效应	118
9.5	纳米金属结构的发光	120
9.6	非线性增强过程	121
第10章	光谱学与传感	122
10.1	单颗粒光谱	122
10.2	基于表面等离极化激元的传感器	130
第11章	超材料和表面等离极化激元成像	133
11.1	超材料和光频下的负折射率	134
11.2	理想透镜、成像和光刻	135
第12章	结论	139
参考文献		140

第一部分

等离激元学基础

等离激元学研究目前正以惊人的速度发展,我们可预计在不远的将来将会有更多的人进入这个领域中。但对于一个入门者,应该从哪里开始学习呢?在进入特殊的分支领域、原理及应用的深入学习前,十分有必要从更专业的文献中学习理解坚实的理论基础。本部分旨在帮助读者建立这样的核心知识体系。第1章描述了金属的光学特性,首先介绍了麦克斯韦方程组,然后推导了自由电子气的介电函数。接下来的3章介绍了单界面和多层结构中的表面等离极化激元,并描述了用于激发和观察的实验方法。第5章增加介绍了等离激元学领域的第二个重要部分,即金属纳米结构中的局域等离激元。本书第一部分最后描述了低频下的电磁模式,其中基于金属的表面等离极化激元变得高度非定域化,必须利用表面结构实现更多的限制模式。

第 1 章 金属电磁学

几乎所有凝聚态物理方面的书籍都会涉及金属材料的光学特性,本书不再赘述,本章仅从研究表面等离子激元理论的角度出发,引述一些最重要的事实和现象,作为理论基础。结合对麦克斯韦方程组(Maxwell's equations)的简要回顾,我们在较宽的频带范围内描述了理想和实际金属的电磁场响应,引入了在金属体材料中海量传导电子的基本激励:体等离子激元。本章结尾讨论了在色散介质中的电磁场能量密度相关知识。

1.1 麦克斯韦方程组与电磁波传播理论

经典的麦克斯韦方程组完全可以描述金属材料和电磁场的相互作用。高浓度的自由载流子分散在一个较小的能级范围,与室温下的热激发能量 $k_B T$ 相当,因而即使针对数个纳米量级的金属结构都没有必要纳入量子力学的描述范畴。本书中描述的有关金属的光学知识属于经典理论领域。然而,这并不是回避各种出人意料的光学现象,因为光学性质有很强的频率依赖性。

根据我们的日常经验可知,对于频率达到可见光范围的电磁波,金属具有高反射率,不会让可见光透过。因此,金属通常用于制造微波和远红外频段的波导、谐振腔等器件结构的反射层。在上述的频段,由于入射电磁波中只有很少且可忽略的一部分透入到金属内部,因而金属材料可以用理想导体或良导体近似。而在近红外和可见光频段,由于频率较高,场的穿透程度明显地增大,导致损耗增大,这使得在微波或远红外波段能够正常工作的简单光子器件在可见光或近红外波段无法应用。最后,在紫外波段,金属具有介质特性,并能传输电磁波,虽然伴有不同程度的衰减,衰减幅度由材料的电子能带结构决定。碱金属,比如 Na,具有准类自由电子响应,呈现出对紫外光透明(ultraviolet transparency)的特性。另一方面,对于贵金属,比如 Au 或 Ag,电子能带跃迁会导致该频段很强的电磁吸收。

这些色散特性可以通过一个复介电函数 $\epsilon(\omega)$ 来描述,该函数是本书一切论述的基础。这种光学响应的强频率相关性背后的物理本质是感生电流的相位变化,电流与周边电场有关,而电场的频率近似金属中电子弛豫时间 τ 的倒数(详见 1.2 节)。

在对金属的光学特性进行基本的描述之前,我们回到描述电磁响应的最基本方程,宏观麦克斯韦方程组。这种唯像研究优势在于介质中带电粒子与电磁场的基本相互作用不需要被考虑,因为那些快速变化的微观场所均匀散布的距离远远大于微观结构的尺寸。有关连续介质的电磁响应从微观到宏观的描述可以在大多数有关电磁场的教材中找到,如[Jackson, 1999]。