

21世纪理论物理及其交叉学科前沿丛书

固体等离子体 理论及应用

夏建白 宗易昕 编著



科学出版社



国家自然科学基金
理论物理专款资助

21 世纪理论物理及其交叉学科前沿丛书

固体等离子体理论及应用

夏建白 宗易昕 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

1998年,法国 Ebbesen 等发表了关于金属表面亚波长小孔阵列增强远场透射的著名论文,引发了国际上对表面等离子体深入而广泛的研究,促使了表面等离子体学的形成.本书是作者参加2011年973项目“固态微结构中光诱导集体激发、光电耦合效应及其原型器件研究(2011CB922200)”的产物,内容包括固体等离子体的基础理论以及应用:平面波展开方法计算光子晶体能带结构、表面等离子体放大的受激发射理论、二维电子气的等离子体激发及太赫兹器件、电子气的等离子体激发、表面增强拉曼散射等.国内外关于该领域的书籍较少,本书有助于为相关领域的研究者提供一本入门参考书.

本书适合等离子体物理、凝聚态物理以及广大基础物理领域的研究生、科研工作者学习与参考.

图书在版编目(CIP)数据

固体等离子体理论及应用/夏建白,宗易昕编著. —北京:科学出版社, 2018.6

(21世纪理论物理及其交叉学科前沿丛书)

ISBN 978-7-03-057354-4

I. ①固… II. ①夏… ②宗… III. ①固体等离子体-研究 IV. ①O53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018) 第 093277 号

责任编辑:钱 俊 / 责任校对:杨 然
责任印制:张 伟 / 封面设计:无极书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年6月第 一 版 开本:720×1000 B5

2018年6月第一次印刷 印张:13

字数:241 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《21 世纪理论物理及其交叉学科前沿丛书》编委会
(第二届)

主 编: 孙昌璞

执行主编: 常 凯

编 委: (按姓氏拼音排序)

蔡荣根	段文晖	方 忠	冯世平
李 定	李树深	梁作堂	刘玉鑫
卢建新	罗民兴	马余刚	任中洲
王 炜	王建国	王玉鹏	向 涛
谢心澄	邢志忠	许甫荣	尤 力
张伟平	郑 杭	朱少平	朱世琳
庄鹏飞	邹冰松		

《21 世纪理论物理及其交叉学科前沿丛书》

出版前言

物理学是研究物质及其运动规律的基础科学. 其研究内容可以概括为两个方面: 第一, 在更高的能量标度和更小的时空尺度上, 探索物质世界的深层次结构及其相互作用规律; 第二, 面对由大量个体组元构成的复杂体系, 探索超越个体特性“演生”出来的有序和合作现象. 这两个方面代表了两种基本的科学观——还原论(reductionism)和演生论(emergence). 前者把物质性质归结为其微观组元间的相互作用, 旨在建立从微观出发的终极统一理论, 是一代又一代物理学家的科学梦想; 后者强调多体系统的整体有序和合作效应, 把不同层次“演生”出来的规律当成自然界的基本规律加以探索. 它涉及从固体系统到生命软凝聚态等各种多体系统, 直接联系关乎日常生活的实际应用.

现代物理学通常从理论和实验两个角度探索以上的重大科学问题. 利用科学实验方法, 通过对自然界的主动观测, 辅以理论模型或哲学上思考, 先提出初步的科学理论假设, 然后借助进一步的实验对此进行判定性检验. 最后, 据此用严格的数学语言精确、定量表达一般的科学规律, 并由此预言更多新的、可以被实验再检验的物理效应. 当现有的理论无法解释一批新的实验发现时, 物理学就要面临前所未有的挑战, 有可能产生重大突破, 诞生新理论. 新的理论在解释已有实验结果的同时, 还将给出更一般的理论预言, 引发新的实验研究. 物理学研究这些内禀特征, 决定了理论物理学作为一门独立学科存在的必要性以及在当代自然科学中的核心地位.

理论物理学立足于科学实验和观察, 借助数学工具、逻辑推理和观念思辨, 研究物质的时空存在形式及其相互作用规律, 从中概括和归纳出具有普遍意义的基本理论. 由此不仅可以描述和解释自然界已知的各种物理现象, 而且还能够预言此前未知的物理效应. 需要指出, 理论物理学通过当代数学语言和思想框架, 使得物理定律得到更为准确的描述. 沿循这个规律, 作为理论物理学最基础的部分, 20 世纪初诞生的相对论和量子力学今天已成为当代自然科学的两大支柱, 奠定了理论物理学在现代科学中的核心地位. 统计物理学基于概率统计和随机性的思想处理多粒子体系的运动, 是二者的必要补充. 量子规范场论从对称性的角度描述微观粒子的基本相互作用, 为自然界四种基本相互作用的统一提供坚实的基础.

关于理论物理的重要作用和学科发展趋势, 我们分六点简述.

1. 理论物理研究纵深且广泛, 其理论立足于全部实验的总和之上. 由于物质结构是分层次的, 每个层次上都有自己的基本规律, 不同层次上的规律又是互相联系的. 物质层次结构及其运动规律的基础性、多样性和复杂性不仅为理论物理学提供了丰富的研究对象, 而且对理论物理学家提出巨大的智力挑战, 激发出人类探索自然的强大动力. 因此, 理论物理这种高度概括的综合性研究, 具有显著的多学科交叉与知识原创的特点. 在理论物理中, 有的学科 (诸如粒子物理、凝聚态物理等) 与实验研究关系十分密切, 但还有一些更加基础的领域 (如统计物理、引力理论和量子基础理论), 它们一时并不直接涉及实验. 虽然物理学本身是一门实验科学, 但物理理论是立足于长时间全部实验总和之上, 而不是只针对个别实验. 虽然理论正确与否必须落实到实验检验上, 但在物理学发展过程中, 有的阶段性理论研究和纯理论探索性研究, 开始不必过分强调具体的实验检验. 其实, 产生重大科学突破甚至科学革命的广义相对论、规范场论和玻色-爱因斯坦凝聚就是这方面的典型例证, 它们从纯理论出发, 实验验证却等待了几十年, 甚至近百年. 近百年前爱因斯坦广义相对论预言了一种以光速传播的时空波动——引力波. 直到 2016 年 2 月, 美国科学家才宣布人类首次直接探测到引力波. 引力波的预言是理论物理发展的里程碑, 它的观察发现将开创一个崭新的引力波天文学研究领域, 更深刻地揭示宇宙奥秘.

2. 面对当代实验科学日趋复杂的技术挑战和巨大经费需求, 理论物理对物理学的引领作用必不可少. 第二次世界大战后, 基于大型加速器的粒子物理学开创了大科学工程的新时代, 也使得物理学发展面临经费需求的巨大挑战. 因此, 伴随着实验和理论对物理学发展发挥的作用有了明显的差异变化, 理论物理高屋建瓴的指导作用日趋重要. 在高能物理领域, 轻子和夸克只能有三代是纯理论的结果, 顶夸克和最近在大型强子对撞机 (LHC) 发现的 Higgs 粒子首先来自理论预言. 当今高能物理实验基本上都是在理论指导下设计进行的, 没有理论上的动机和指导, 高能物理实验如同大海捞针, 无从下手. 可以说, 每一个大型粒子对撞机和其他大型实验装置, 都与一个具体理论密切相关. 天体宇宙学的观测更是如此. 天文观测只会给出一些初步的宇宙信息, 但其物理解释必依赖于具体的理论模型. 宇宙的演化只有一次, 其初态和末态迄今都是未知的. 宇宙学的研究不能像通常的物理实验那样, 不可能为获得其演化的信息任意调整其初末态. 因此, 仅仅基于观测, 不可能构造完全合理的宇宙模型. 要对宇宙的演化有真正的了解, 建立自洽的宇宙学模型和理论, 就必须立足于粒子物理和广义相对论等物理理论.

3. 理论物理学本质上是一门交叉综合科学. 大家知道, 量子力学作为 20 世纪的奠基性科学理论之一, 是人们理解微观世界运动规律的现代物理基础. 它的建立, 带来了以激光、半导体和核能为代表的新技术革命, 深刻地影响了人类的物质、精神生活, 已成为社会经济发展的原动力之一. 然而, 量子力学基础却存在诸多的

争议,哥本哈根学派对量子力学的“标准”诠释遭遇诸多挑战。不过这些学术争论不仅促进了量子理论自身发展,而且促使量子力学走向交叉科学领域,使得量子物理从观测解释阶段进入自主调控的新时代,从此量子世界从自在之物变成为我之物。近二十年来,理论物理学在综合交叉方面的重要进展是量子物理与信息计算科学的交叉,由此形成了以量子计算、量子通信和量子精密测量为主体的量子信息科学。它充分利用量子力学基本原理,基于独特的量子相干进行计算、编码、信息传输和精密测量,探索突破芯片极限、保证信息安全的新概念和新思路。统计物理学为理论物理研究开拓了跨度更大的交叉综合领域,如生物物理和软凝聚态物理。统计物理的思想和方法不断地被应用到各种新的领域,对其基本理论和自身发展提出了更高的要求。由于软物质是在自然界中存在的最广泛的复杂凝聚态物质,它处于固体和理想流体之间,与人们的日常生活及工业技术密切相关。例如,水是一种软凝聚态物质,其研究涉及的基础科学问题关乎人类社会今天面对的水资源危机。

4. 理论物理学在具体系统应用中实现创新发展,并在基本层次上回馈自身。从量子力学和统计物理对固体系统的具体应用开始,近半个世纪以来凝聚态物理学已发展成当代物理学最大的一个分支。它不仅是材料、信息和能源科学的基础,也与化学和生物等学科交叉与融合,而其中发现的新现象、新效应,都有可能引导凝聚态物理一个新的学科方向或领域的诞生,为理论物理研究展现了更加广阔的前景。一方面,凝聚态物理自身理论发展异常迅猛和广泛,描述半导体和金属的能带论和费米液体理论为电子学、计算机和信息等学科的发展奠定了理论基础;另一方面,从凝聚态理论研究提炼出来的普适的概念和方法,对包括高能物理在内的其他物理学科的发展也起到了重要的推动作用。BCS 超导理论中的自发对称破缺概念,被应用到描述电弱相互作用统一的 Yang-Mills 规范场论,导致了中间玻色子质量演生的 Higgs 机制,这是理论物理学发展的又一个重要里程碑。近二十年来,在凝聚态物理领域,有大量新型低维材料的合成和发现,有特殊功能的量子器件的设计和实现,有高温超导和拓扑绝缘体等大量新奇量子现象的展示。这些现象不能在以单体近似为前提的费米液体理论框架下得到解释,新的理论框架建立已迫在眉睫,如果成功将使凝聚态物理的基础及应用研究跨上一个新的历史台阶,也将理论物理的引领作用发挥到极致。

5. 理论物理的一个重要发展趋势是理论模型与强大的现代计算手段相结合。面对纷繁复杂的物质世界(如强关联物质和复杂系统),简单可解析求解的理论物理模型不足以涵盖复杂物质结构的全部特征,如非微扰和高度非线性。现代计算机的发明和快速发展提供了解决这些复杂问题的强大工具。辅以面向对象的科学计算方法(如第一原理计算、蒙特卡罗方法和精确对角化技术),复杂理论模型的近似求解将达到极高的精度,可以逐渐逼近真实的物质运动规律。因此,在解析手段无法胜任解决复杂问题任务时,理论物理必须通过数值分析和模拟的办法,使得理

论预言进一步定量化和精密化。这方面的研究导致了计算物理这一重要学科分支的形成,成为连接物理实验和理论模型必不可少的纽带。

6. 理论物理学将在国防安全等国家重大需求上发挥更多作用。大家知道,无论决胜第二次世界大战、冷战时代的战略平衡,还是中国国家战略地位提升,理论物理学在满足国家重大战略需求方面发挥了不可替代的作用。爱因斯坦、奥本海默、费米、彭桓武、于敏、周光召等理论物理学家也因此彪炳史册。与战略武器发展息息相关,第二次世界大战后开启了物理学大科学工程的新时代,基于大型加速器的重大科学发现反过来为理论物理学提供广阔的用武之地,如标准模型的建立。国防安全方面等国家重大需求往往会提出自由探索不易提出的基础科学问题,在对理论物理提出新挑战的同时,也为理论物理研究提供了源头创新的平台。因此,理论物理也要针对国民经济发展和国防安全方面等国家重大需求,凝练和发掘自己能够发挥关键作用的科学问题,在实践应用和理论原始创新方面取得重大突破。

为了全方位支持我国理论物理事业长足发展,1993 年国家自然科学基金委员会设立“理论物理专款”,并成立学术领导小组(首届组长是我国著名理论物理学家彭桓武先生)。多年来,这个学术领导小组凝聚了我国理论物理学家集体智慧,不断探索符合理论物理特点和发展规律的资助模式,培养理论物理优秀创新人才做出杰出的研究成果,对国民经济和科技战略决策提供指导和咨询。为了更全面地支持我国的理论物理事业,“理论物理专款”持续资助我们编辑出版这套《21 世纪理论物理及其交叉学科前沿丛书》,目的是要系统全面介绍现代理论物理及其交叉领域的基本内容及其学科前沿发展,以及中国理论物理学家科学贡献和所取得的主要进展。希望这套丛书能帮助大学生、研究生、博士后、青年教师和研究人员全面了解理论物理学研究进展,培养对物理学研究的兴趣,迅速进入理论物理前沿研究领域,同时吸引更多的年轻人献身理论物理学事业,为我国的科学研究在国际上占有一席之地作出自己的贡献。

孙昌璞

中国科学院院士,发展中国家科学院院士

国家自然科学基金委员会“理论物理专款”学术领导小组组长

前 言

1902 年 R. W. Wood 等在实验上首次发现金属光栅中的异常衍射现象, 他们观察到在角分布吸收谱中除了正常衍射峰以外又出现了额外的吸收峰. 在此后的 40 多年时间里人们对该异常衍射现象给出过不同的解释, 但没有一致认同的结论. 直到 1941 年人们将其与表面波联系到一起, 并由 Fano 等首次提出衍射吸收峰的峰值实际是衍射级与表面等离子激元耦合的结果. 1984 年世界上第一台近场扫描光学显微镜 (near-field scanning optical microscope, NSOM) 在苏黎世 IBM 研究中心诞生, 使得近场探测超衍射极限金属结构表面能量分布成为可能, 促使了表面等离子体实验研究进入了一个新的时期. 1998 年法国 Ebbesen 等发表了关于金属表面亚波长小孔阵列增强远场透射的著名论文, 引发了国际上对表面等离子体深入而广泛的研究, 促使了表面等离子体学的形成.

表面等离子体主要应用于制造光学元器件, 使得光子集成芯片的尺寸小于光的衍射极限. 同时由于等离子体元器件是用光传输信号的, 与传统的电子元器件相比, 表面等离子体元器件具有更高的传输速率.

表面等离子体的应用主要分三大类, 一类是金属/介质光子晶体的等离子体波, 第二类是平面金属与介质界面的等离子体波, 第三类是金属纳米结构, 如纳米金属球和纳米金属线与周围介质界面的等离子体波.

(1) 金属/介质光子晶体的等离子体波. 一般的介质/介质光子晶体已经研究得很多, 利用光子晶体产生的光子带隙, 可以实现光子的局域化. 但是介质/介质光子晶体的光子带隙很小, 而金属/介质光子晶体的光子带隙相对较大, 为光子晶体的应用开辟了新的方向.

(2) 平面金属与介质界面的等离子体波. 这方面的等离子体元器件包括: 表面等离子体耦合器、表面等离子体波导、表面等离子体分束器、偏振选择器、光开关等.

(3) 金属纳米结构, 如纳米金属球和纳米金属线与周围介质界面的等离子体波. 包括: 金属纳米粒子、纳米线. 金属纳米粒子的应用主要源于等离子体共振条件下产生的局域场增强效应, 从而在纳米尺寸上提升了纳米粒子周围介质中的各种光诱导产生的线性和非线性过程. 值得注意的是金属/介质核壳结构, 在生物医学上有很大的应用.

另一类固体等离子体是半导体二维电子气的等离子体激发及其在 THz 器件中的应用. 在三维半导体结构中等离子体不稳定性受到电子与杂质和声子的碰撞而压制, 而在二维电子气中由于电子与杂质空间分离, 电子具有高迁移率, 有望克服这一障碍. 在实际的二维电子气中电子等离子体波的特征频率正好落在 THz 范围, 这使得有可能实现等离子体波弱碰撞阻尼的条件. 在这种情况下, 2DEG 系统能产生与等离子体波的高品质因子相联系的显著的共振响应, 所以就能用作不同 THz 器件中的共振腔 (resonator). 目前不同的实验组已经观察到由等离子体不稳定性 and 等离子体辅助的光电混频器 (photomixing) 产生的 THz 辐射.

实验发现将两组交叉排列的栅极和一个垂直腔集成在一个半导体异质结 HEMT 中, 使得这个在亚微米至纳米尺度内人工构造的与结构有关的高度色散的等离子体系统能完成在 THz 频率范围内发射、检测和高功能的信号处理, 如强度调制、混频等. 试验样品已经由 InGaP/InGaAs/GaAs 材料系统制造出来了, 成功地首次观察到室温下 THz 的受激发射. 这件事情在 2008~2010 年引起很大的关注, 又开国际会议, 又出文集, 人们普遍认为这是制造 THz 源的一个新方向. 但后来似乎也无声无息了. 原因可能是用几微米大小的半导体器件发出的 THz 波功率太小.

最近, 2017 年 8 月 28 日《科技日报》登载了一条消息: “液态水产生太赫兹波被证实”. 张希成教授和北京师范大学团队利用自由流动的一层超薄水膜 (不到 $200\mu\text{m}$ 厚), 成功让液态水产生太赫兹波. 他们向水膜内聚焦飞秒激光脉冲, 将水分子离子化, 产生自由电子, 最终发射出太赫兹波. 他们的结果发表在最近一期《应用物理快报》上. 这个结果有点像在二维电子气中的 Dyakonov-Shur 的“水波”模型, 不过面积比二维电子气大多了.

半导体中的调制掺杂结构, 将杂质和载流子空间分开, 能得到迁移率很高的二维电子气. 从基础研究的角度, 国际上研究二维电子气中自由电子的等离子体振荡已经有几十年历史了. 实验上在掺杂半导体中有两类等离子体模: 高频振荡, 包含所有的价电子; 低频模, 只有导带电子参与. 高频模类似于金属中的等离子体模, 可以由能量损失谱研究. 例如, Si 的能量损失谱测量的是所有 4 个价电子的等离子体模 $\hbar\omega_p$. 这时 $\hbar\omega_p$ 远大于 E_g , 价电子基本是自由的, 感觉不到周期势的效应.

另一方面, 半导体导带中的电子是由杂质产生的, 它的密度远小于价电子密度. 低频等离子体模的能量 $\hbar\omega_p \leq 0.01\text{eV}$, 这时用电子散射就不合适, 需要用光散射. 光散射实验要求等离子体能透射光, 而没有强的散射和吸收. 这时 Nd:YAG 和 CO_2 激光器产生的红外光是探测导带电子等离子体的有力工具.

在等离子体散射实验中有两个不同的区域, 一是多体系统中不同粒子的散射波相互之间不干涉. 每个粒子散射子是相互独立的, 这种散射谱称为单粒子散射谱,

它反映了单个粒子的运动。二是不同粒子散射的波之间有干涉,总的散射波振幅对粒子之间的相对位置非常敏感,也就是对多体系统的关联 (correlation) 敏感。这个极限称为集体振荡区。

实验上单粒子的光散射谱,纵坐标是散射强度,横坐标是频率。散射强度峰在 $\omega=0$ 处,具有一定的宽度 kv_{th} , v_{th} 是电子的热速度。宽度的测量确定了电子的温度。集体等离子体振荡谱由集体效应决定。由于相干涉,单粒子散射被抑制。代替在 $\omega=0$ 处的宽的多普勒峰,集体振荡谱包含了两个尖锐的峰,对应于从等离子体的斯托克斯和反斯托克斯拉曼散射。线的位置确定了动量为 k 的等离子体频率 $\omega(k)$ 。所以这两种谱反映了两种完全不同的物理内容。

表面增强拉曼散射 (SERS) 是金属表面等离子体效应的一个重大发现,它在测量单分子的振动谱方面,特别是在生物医学研究方面具有重要的应用前景。后来发现在表面增强共振拉曼散射 (SERRS) 中染料分子增强因子可以达到 $10^{10}\sim 10^{11}$ 。SERS 发现的 20 年以后,新的测量方法确定了增强因子为通常非共振 RS 的 14 个数量级,足以与荧光截面相比,这使得 SERS 成为测量单分子的有力工具,特别是在生物医学方面。

它利用在金属纳米结构附近的高度局域的强场来增强有关分子的自发拉曼散射。利用化学粗糙化的银表面,首次观察到了单个分子的拉曼散射事件,估计散射截面的增长因子达到 10^{14} 量级。增强的主要原因是在金属纳米结构附近局域的表面等离子体共振产生的高增强场。这些高增强场称为热点 (hot spots),它还能增加荧光发射。

SERS 另一个有意义的方面是高的空间分辨能力。利用金属纳米结构特殊的局域光场, SERS 能提供好于 10nm 的横向分辨率,它比衍射极限低两个数量级,甚至低于通常的近场显微针尖的分辨率。至今 SERS 已广泛被用于生物物理和生物化学,有以下几个原因: ① 由于 SERS 能提供高的结构选择性和测量非常小的物体的拉曼光谱,和荧光光谱一样,所以能作为测量生物中单分子的工具,特别是快速 DNA 序列分析。② 共振表面增强拉曼散射可以用于测量大的生物分子,因为它能选择与大分子的振动模共振,它特别适用于生色团系统。③ SERS 提供了研究分子吸附在金属表面以及表面和界面过程的信息,例如“SERS 激活”的 Ag 或 Au 电极能用来作为研究生物有关过程的模型环境,如细胞色素 (cytochrome C) 中的电荷转移跃迁。目前已经提出多种机制来解释 SERS,这些机制都在某个方面反映了 SERS 的性质,现在看来它是由多种因素产生。

本书是作者参加 2011 年 973 计划“固态微结构中光诱导集体激发、光电耦合效应及其原型器件研究”(2011CB922200) 的产物。我以前没做过这方面的工作。所

以从固态微结构中的等离子体激发,特别是表面等离子体模的激发等从头学起和做起.从2012年至2016年,我读了一些有关文章、书籍,也和博士生一起做了很多工作.这本书就是973计划执行过程中学习和工作的总结.目前国际和国内有关这方面系统介绍的书籍还不多,希望此书能成为年轻人的入门指导.因为时间仓促,这方面做的工作也不多,有些理解可能不够深入,不妥之处请广大读者批评指正.这方面的理论比较多,为了使读者容易理解,对有些公式做了仔细推导.

夏建白

2018年4月

目 录

第 1 章 金属中的电磁学	1
1.1 麦克斯韦方程和电磁波在介质中的传播	1
1.2 金属介电函数	3
参考文献	6
第 2 章 金属/介电介质界面的等离子体模	7
2.1 波动方程	7
2.2 单界面的等离子体界面模	8
2.3 多层膜的等离子体界面模	12
2.4 等离子体模的激发	17
2.5 表面等离子体波导	19
2.6 等离子体表面波激光器	21
2.7 波导中增益介质辅助的等离子体表面波的传播	22
参考文献	24
第 3 章 金属线的等离子体模	25
3.1 圆线和圆柱孔的等离子体模的色散关系	25
3.2 用平面波激发纳米线的表面等离子体模	28
3.2.1 产生函数	29
3.2.2 用产生函数计算金属纳米线的本征模	30
3.2.3 入射电场平行于 x - z 平面	31
3.3 散射和吸收系数	33
3.4 纳米金属线中表面等离子体模的激发	36
3.5 等离子体波在金属纳米线中的传播	39
3.6 等离子体波在金属纳米线中传播的衰减	42
3.7 金属纳米线上 SP 传播的电场显示	45
参考文献	49
第 4 章 金属球的等离子体模	51
4.1 金属圆球的等离子体模	51
4.2 散射和消光截面	57
4.3 Mie 理论	62

4.4 金属纳米球的光学性质	66
4.5 金属纳米球等离子体模的阻尼	69
4.6 粒子等离子体模共振频率与周围介质的关系	72
4.7 核壳结构的纳米粒子	74
4.8 核/壳结构纳米粒子激光器	75
参考文献	78
第 5 章 平面波展开方法计算光子晶体能带和等离子体模色散关系	80
5.1 一维介质/介质 (D/D) 超晶格 TM 模的色散关系	80
5.2 一维 D/D 超晶格 TE 模的色散关系	82
5.3 金属/介质 (M/D) 超晶格 TE 模的色散关系	83
5.4 金属/介质 (M/D) 超晶格 TM 模的色散关系	84
5.5 超晶格中电磁波能量分布	85
5.5.1 TM 模的电磁能量分布	85
5.5.2 TE 模的电磁能量分布	86
5.6 二维 D/D 超晶格, TM 模	87
5.6.1 锯齿状二维超晶格	87
5.6.2 圆柱或圆孔状二维超晶格, TM 模	90
5.7 二维 D/D 超晶格, TE 模	91
5.7.1 锯齿状二维超晶格	91
5.7.2 圆柱或圆孔状二维 D/D 超晶格, TE 模	92
5.8 二维 M/D 超晶格, TE 模	93
5.8.1 锯齿状二维超晶格	93
5.8.2 圆柱或圆孔状二维 M/D 超晶格, TE 模	94
5.9 二维 M/D 超晶格, TM 模	95
5.9.1 二维锯齿状超晶格	95
5.9.2 二维圆柱超晶格	96
参考文献	96
第 6 章 表面等离子体放大的受激发射理论	98
6.1 Spaser 的引言	98
6.2 局域等离子体模的一般理论	100
6.3 Spaser 理论	103
6.3.1 Spaser 系统的哈密顿量	103
6.3.2 密度矩阵	105
6.3.3 二能级系统 Spaser 的方程	106

6.3.4 连续工作时的 Spaser 方程	107
6.4 纳米线等离子体激光器	110
参考文献	112
第 7 章 二维电子气的等离子体激发和太赫兹器件	113
7.1 研究背景	113
7.2 二维电子气等离子体模的激发的新机制	115
7.3 基于周期栅的 HEMT 等离子体振荡器件	121
7.3.1 太赫兹辐射器	121
7.3.2 连续激光激发的太赫兹辐射	125
7.3.3 基于 HEMT 的太赫兹辐射的探测器和混合器	126
7.4 不用周期栅的等离子体器件	131
7.4.1 2DEG 通道中的等离子体波和振荡	131
7.4.2 等离子体振荡器	132
7.4.3 太赫兹辐射的检测和倍频	133
7.4.4 利用等离子体振荡的光电混频器	134
7.5 石墨烯基异质结中的等离子体波	137
参考文献	138
第 8 章 电子气的等离子体激发	139
8.1 基本原理	139
8.2 介电函数	141
8.3 等离子体实验和理论	142
8.3.1 等离子体散射实验	142
8.3.2 电子散射实验理论	145
8.3.3 非相互作用电子系统的散射理论	146
8.3.4 光散射理论	147
8.4 单二维层半导体的元激发	147
8.5 耦合量子阱等离子体理论	153
8.6 磁场下耦合量子线的集体和单量子激发模	156
参考文献	159
第 9 章 表面增强拉曼散射	160
9.1 引言	160
9.2 表面增强拉曼散射的基本原理	160
9.3 表面增强拉曼散射的偶极相互作用理论	163
9.4 分子与金属球体系	165

9.5 光柱效应	168
参考文献	176
第 10 章 在频率有关的介电常数介质中的传播计算 (FDTD 方法)	177
10.1 一维模拟	177
10.1.1 自由空间	177
10.1.2 在介电介质中的传播	179
10.1.3 在有损耗介电介质中的传播	180
10.2 频率有关介质的一维模拟	181
10.2.1 利用流密度的表述	181
10.2.2 Debye 介质	183
10.3 Z 变换	186
10.3.1 Z 变换的定义	186
10.3.2 Z 变换应用于 Debye 介质	188
10.3.3 无磁场的等离子体介质	189
参考文献	191

第1章 金属中的电磁学

1.1 麦克斯韦方程和电磁波在介质中的传播

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho_{\text{ext}}, \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0, \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J}_{\text{ext}} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}.\end{aligned}\tag{1.1}$$

上述 4 个宏观方程进一步通过极化率 (polarization) $\mathbf{P}$ 和磁化强度 (magnetization) $\mathbf{M}$ 相联系

$$\begin{aligned}\mathbf{D} &= \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}, \\ \mathbf{H} &= \frac{1}{\mu_0} \mathbf{B} - \mathbf{M}.\end{aligned}\tag{1.2}$$

对于非磁介质, $M=0$, 所以只考虑极化效应. $\mathbf{P}$ 是材料内部单位体积的电极化矩, 由微观偶极矩沿电场的排列而产生. 它与内电荷密度的关系为

$$\nabla \cdot \mathbf{P} = -\rho.\tag{1.3}$$

由电荷守恒得出电流密度与极化率的关系

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{J} &= -\frac{\partial \rho}{\partial t}, \\ \mathbf{J} &= \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t}.\end{aligned}\tag{1.4}$$

利用方程 (1.2), 方程 (1.1) 还可以进一步简化, 将内电场和外电场合并成一个宏观电场,

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho_{\text{tot}}}{\varepsilon_0}.\tag{1.5}$$

对一个线性的、各向同性介质,

$$\begin{aligned}\mathbf{D} &= \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E}, \\ \mathbf{B} &= \mu_0 \mu \mathbf{H}.\end{aligned}\tag{1.6}$$