

Terahertz Surface Plasmons and Its Applications

# 太赫兹表面等离子体 及其应用

陈麟 朱亦鸣 庄松林 / 编著

14

战略前沿新技术  
——太赫兹出版工程  
丛书总主编 / 曹俊诚



上海出版基金项目  
Shanghai Publishing Funds

 华东理工大学出版社  
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

· 上海 ·

Terahertz Surface Plasmons and Its Applications

# 太赫兹表面等离子体 及其应用

陈麟 朱亦鸣 庄松林 / 编著

14

战略前沿新技术  
——太赫兹出版工程  
丛书总主编 / 曹俊诚



上海出版资金项目  
Shanghai Publishing Funds

 华东理工大学出版社  
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

· 上海 ·

## 图书在版编目(CIP)数据

太赫兹表面等离子激元现象及其应用 / 陈麟, 朱亦鸣, 庄松林编著. —上海: 华东理工大学出版社, 2022. 3

战略前沿新技术: 太赫兹出版工程 / 曹俊诚总主编

ISBN 978-7-5628-6419-6

I. ①太… II. ①陈… ②朱… ③庄… III. ①电磁辐射—等离子体物理学—研究 IV. ①O441.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 022479 号

## 内 容 提 要

本书主要论述了太赫兹表面等离子激元现象的基本原理、调控方法、器件设计以及太赫兹超分辨成像应用等。全书共七章,包括第 1 章 THz 表面等离子激元产生的物理机理及膜表面等离子激元的概念引入;第 2 章激发 THz 表面等离子激元和膜表面等离子激元的方法及膜表面等离子激元的传输特性;第 3 章金属平板波导结构中的 THz 波的传输及膜表面等离子激元对 THz 的全反射;第 4 章半导体和金属光子晶体板结构中的表面等离子激元引起的 THz 的透射增强;第 5 章膜局域表面等离子激元的增强特性及在 THz 中的激发;第 6 章超表面中的等离子激元实现太赫兹偏振转换和完美吸收;第 7 章太赫兹远场超分辨聚焦和散射式近场扫描显微成像技术。

本书可作为太赫兹领域科研人员和相关学科研究生的参考书和工具书,亦可供有关工程技术人员参考。

项目统筹 / 马夫娇 韩 婷

责任编辑 / 赵子艳

责任校对 / 张 波

装帧设计 / 陈 楠

出版发行 / 华东理工大学出版社有限公司

地址: 上海市梅陇路 130 号, 200237

电话: 021-64250306

网址: [www.ecustpress.cn](http://www.ecustpress.cn)

邮箱: [zongbianban@ecustpress.cn](mailto:zongbianban@ecustpress.cn)

印 刷 / 上海雅昌艺术印刷有限公司

开 本 / 720mm×1000mm 1/16

印 张 / 13.5

字 数 / 352 千字

版 次 / 2022 年 3 月第 1 版

印 次 / 2022 年 3 月第 1 次

定 价 / 278.00 元

版权所有 侵权必究

战略前沿新技术——太赫兹出版工程

丛书编委会

顾 问 雷啸霖 中国科学院院士

庄松林 中国工程院院士

姚建铨 中国科学院院士

总主编 曹俊诚 中国科学院上海微系统与信息技术研究所,研究员

编 委 (按姓氏笔画排序)

马国宏 王与焯 邓贤进 石艺尉 史生才 冯志红 成彬彬

朱亦鸣 任 远 庄松林 江 舸 孙建东 李 婧 汪 力

张 文 张 健 陈 麟 范 飞 范文慧 林长星 金钻明

钟 凯 施 卫 姚建铨 秦 华 徐新龙 徐德刚 曹俊诚

常胜江 常 超 雷啸霖 谭智勇 缪 巍

太赫兹是频率在红外光与毫米波之间、尚有待全面深入研究与开发的电磁波段。沿用红外光和毫米波领域已有的技术,太赫兹频段电磁波的研究已获得较快发展。不过,现有的技术大多处于红外光或毫米波区域的末端,实现的过程相当困难。随着半导体、激光和能带工程的发展,人们开始寻找研究太赫兹频段电磁波的独特技术,掀起了太赫兹研究的热潮。美国、日本和欧洲等国家和地区已将太赫兹技术列为重点发展领域,资助了一系列重大研究计划。尽管如此,在太赫兹频段,仍然有许多瓶颈需要突破。

作为信息传输中的一种可用载波,太赫兹是未来超宽带无线通信应用的首选频段,其频带资源具有重要的战略意义。掌握太赫兹的关键核心技术,有利于我国抢占该频段的频带资源,形成自主可控的系统,并在未来6G和空-天-地-海一体化体系中发挥重要作用。此外,太赫兹成像的分辨率比毫米波更高,利用其良好的穿透性有望在安检成像和生物医学诊断等方面获得重大突破。总之,太赫兹频段的有效利用,将极大地促进我国信息技术、国防安全和人类健康等领域的发展。

目前,国内外对太赫兹频段的基础研究主要集中在高效辐射的产生、高灵敏度探测方法、功能性材料和器件等方面,应用研究则集中于安检成像、无线通信、生物效应、生物医学成像及光谱数据库建立等。总体说来,太赫兹技术是我国与世界发达国家差距相对较小的一个领域,某些方面我国还处于领先地位。因此,进一步发展太赫兹技术,掌握领先的关键核心技术具有重要的战略意义。

当前太赫兹产业发展还处于创新萌芽期向成熟期的过渡阶段,诸多技术正处于蓄势待发状态,需要国家和资本市场增加投入以加快其产业化进程,并在一些新兴战略性行业形成自主可控的核心技术、得到重要的系统应用。

“战略前沿新技术——太赫兹出版工程”是我国太赫兹领域第一套较为完整

的丛书。这套丛书内容丰富,涉及领域广泛。在理论研究层面,丛书包含太赫兹场与物质相互作用、自旋电子学、表面等离激元现象等基础研究以及太赫兹固态电子器件与电路、光导天线、二维电子气器件、微结构功能器件等核心器件研制;技术应用方面则包括太赫兹雷达技术、超导接收技术、成谱技术、光电测试技术、光纤技术、通信和成像以及天文探测等。丛书较全面地概括了我国在太赫兹领域的发展状况和最新研究成果。通过对这些内容的系统介绍,可以清晰地透视太赫兹领域研究与应用的全貌,把握太赫兹技术发展的来龙去脉,展望太赫兹领域未来的发展趋势。这套丛书的出版将为我国太赫兹领域的研究提供专业的发展视角与技术参考,提升我国在太赫兹领域的研究水平,进而推动太赫兹技术的发展与产业化。

我国在太赫兹领域的研究总体上仍处于发展中阶段。该领域的技术特性决定了其存在诸多的研究难点和发展瓶颈,在发展的过程中难免会遇到各种各样的困难,但只要我们以专业的态度和科学的精神去面对这些难点、突破这些瓶颈,就一定能将太赫兹技术的研究与应用推向新的高度。

中国科学院院士



2020年8月

太赫兹频段介于毫米波与红外光之间,频率覆盖  $0.1\sim 10$  THz,对应波长  $3\text{ mm}\sim 30\ \mu\text{m}$ 。长期以来,由于缺乏有效的太赫兹辐射源和探测手段,该频段被称为电磁波谱中的“太赫兹空隙”。早期人们对太赫兹辐射的研究主要集中在天文学和材料科学等。自 20 世纪 90 年代开始,随着半导体技术和能带工程的发展,人们对太赫兹频段的研究逐步深入。2004 年,美国将太赫兹技术评为“改变未来世界的十大技术”之一;2005 年,日本更是将太赫兹技术列为“国家支柱十大重点战略方向”之首。由此世界范围内掀起了对太赫兹科学与技术的研究热潮,展现出一片未来发展可期的宏伟图画。中国也较早地制定了太赫兹科学与技术的发展规划,并取得了长足的进步。同时,中国成功主办了国际红外毫米波-太赫兹会议(IRMMW-THz)、超快现象与太赫兹波国际研讨会(ISUPTW)等有重要影响力的国际会议。

太赫兹频段的研究融合了微波技术和光学技术,在公共安全、人类健康和信息技术等诸多领域有重要的应用前景。从时域光谱技术应用于航天飞机泡沫检测到太赫兹通信应用于多路高清实时视频的传输,太赫兹频段在众多非常成熟的技术应用面前不甘示弱。不过,随着研究的不断深入以及应用领域要求的不断提高,研究者发现,太赫兹频段还存在很多难点和瓶颈等待着后来者逐步去突破,尤其是在高效太赫兹辐射源和高灵敏度常温太赫兹探测手段等方面。

当前太赫兹频段的产业发展还处于初期阶段,诸多产业技术还需要不断革新和完善,尤其是在系统应用的核心器件方面,还需要进一步发展,以形成自主可控的关键技术。

这套丛书涉及的内容丰富、全面,覆盖的技术领域广泛,主要内容包括太赫兹半导体物理、固态电子器件与电路、太赫兹核心器件的研制、太赫兹雷达技术、超导接收技术、成谱技术以及光电测试技术等。丛书从理论计算、器件研制、系

统研发到实际应用等多方面、全方位地介绍了我国太赫兹领域的研究状况和最新成果,清晰地展现了太赫兹技术和系统应用的全景,并预测了太赫兹技术未来的发展趋势。总之,这套丛书的出版将为我国太赫兹领域的科研工作者和工程技术人员等从专业的技术视角提供知识参考,并推动我国太赫兹领域的蓬勃发展。

太赫兹领域的发展还有很多难点和瓶颈有待突破和解决,希望该领域的研究者们能继续发扬一鼓作气、精益求精的精神,在太赫兹领域展现我国科研工作者的良好风采,通过解决这些难点和瓶颈,实现我国太赫兹技术的跨越式发展。

中国工程院院士



2020年8月

太赫兹领域的发展经历了多个阶段,从最初为人们所知到现在部分技术服务于国民经济和国家战略,逐渐显现出其前沿性和战略性。作为电磁波谱中最后有待深入研究和发展的电磁波段,太赫兹技术给予了人们极大的愿景和期望。作为信息技术中的一种可用载波,太赫兹频段是未来超宽带无线通信应用的首选频段,是世界各国都在抢占的频带资源。未来 6G、空-天-地-海一体化应用、公共安全等重要领域,都将在很大程度上朝着太赫兹频段方向发展。该频段电磁波的有效利用,将极大地促进我国信息技术和国防安全等领域的发展。

与国际上太赫兹技术发展相比,我国在太赫兹领域的研究起步略晚。自 2005 年香山科学会议探讨太赫兹技术发展之后,我国的太赫兹科学与技术研究如火如荼,获得了国家、部委和地方政府的大力支持。当前我国的太赫兹基础研究主要集中在太赫兹物理、高性能辐射源、高灵敏探测手段及性能优异的功能器件等领域,应用研究则主要包括太赫兹安检成像、物质的太赫兹“指纹谱”分析、无线通信、生物医学诊断及天文学应用等。近几年,我国在太赫兹辐射与物质相互作用研究、大功率太赫兹激光源、高灵敏探测器、超宽带太赫兹无线通信技术、安检成像应用以及近场光学显微成像技术等方面取得了重要进展,部分技术已达到国际先进水平。

这套太赫兹战略前沿新技术丛书及时响应国家在信息技术领域的中长期规划,从基础理论、关键器件设计与制备、器件模块开发、系统集成与应用等方面,全方位系统地总结了我国在太赫兹源、探测器、功能器件、通信技术、成像技术等领域的研究进展和最新成果,给出了上述领域未来的发展前景和技术发展趋势,将为解决太赫兹领域面临的新问题和新技术提供参考依据,并将对太赫兹技术的产业发展提供有价值的参考。

本人很荣幸应邀主编这套我国太赫兹领域分量极大的战略前沿新技术丛书。丛书的出版离不开各位作者和出版社的辛勤劳动与付出,他们用实际行动表达了对太赫兹领域的热爱和对太赫兹产业蓬勃发展的追求。特别要说的是,三位丛书顾问在丛书架构、设计、编撰和出版等环节中给予了悉心指导和大力支持。

这套丛书的作者团队长期在太赫兹领域教学和科研第一线,他们身体力行、不断探索,将太赫兹领域的概念、理论和技术广泛传播于国内外主流期刊和媒体上;他们对在太赫兹领域遇到的难题和瓶颈大胆假设,提出可行的方案,并逐步实践和突破;他们以太赫兹技术应用为主线,在太赫兹领域默默耕耘、奋力摸索前行,提出了各种颇具新意的发展建议,有效促进了我国太赫兹领域的健康发展。感谢我们的丛书编委,一支非常有责任心且专业的太赫兹研究队伍。

丛书共分 14 册,包括太赫兹场与物质相互作用、自旋电子学、表面等离激元现象等基础研究,太赫兹固态电子器件与电路、光导天线、二维电子气器件、微结构功能器件等核心器件研制,以及太赫兹雷达技术、超导接收技术、成谱技术、光电测试技术、光纤技术及其在通信和成像领域的应用研究等。丛书从理论、器件、技术以及应用等四个方面,系统梳理和概括了太赫兹领域主流技术的发展状况和最新科研成果。通过这套丛书的编撰,我们希望能为太赫兹领域的科研人员提供一套完整的专业技术知识体系,促进太赫兹理论与实践的长足发展,为太赫兹领域的理论研究、技术突破及教学培训等提供参考资料,为进一步解决该领域的理论难点和技术瓶颈提供帮助。

中国太赫兹领域的研究仍然需要后来者加倍努力,围绕国家科技强国的战略,从“需求牵引”和“技术推动”两个方面推动太赫兹领域的创新发展。这套丛书的出版必将对我国太赫兹领域的基础和应用研究产生积极推动作用。



2020 年 8 月于上海

太赫兹表面等离子激元在太赫兹光学的实现和应用中发挥着重要作用,成为近年来科学界的研究热点。这项技术涉及半导体技术、波导技术等多个方面,对太赫兹表面等离子激元现象的研究还扩展到表面光刻、生物传感、超聚焦和近场扫描显微等领域,是一项理论和实际相结合的交叉学科技术。人们对太赫兹表面等离子激元的研究热潮始于 21 世纪初期发现的周期结构金属表面可支持低频波段表面等离子激元从而实现对太赫兹波的亚波长束缚这一重要现象,随着表面等离子频率被降低到太赫兹频段以后,太赫兹等离子光学(Terahertz Plasmonics)也应运而生,并在太赫兹集成、生物传感和表面近场等领域获得应用,显示了其强大的生命力。为此,有必要将散乱的研究成果加以分析、总结,编辑成一本学术著作。

本书从表面等离子激元的形成原因和物理图像出发,结合笔者课题组在太赫兹频段表面等离子激元现象的研究成果和经验,主要介绍太赫兹频段(赝)表面等离子激元和局域(赝)表面等离子激元的激发和传输所涉及的基本理论和物理机理、基于太赫兹表面等离子激元现象的重要功能器件以及太赫兹表面等离子激元现象在近场超分辨技术方面的重要应用。本书的主要目的的一方面是对太赫兹表面等离子现象及相关器件原理的介绍,另一方面是起到抛砖引玉的作用。东南大学崔铁军教授、天津大学张伟力教授、新加坡南洋理工大学 Ranjan Singh 教授、中国矿业大学沈晓鹏教授等在科学研究过程中给予了笔者长期的指导与帮助,笔者对他们表示衷心的感谢。

本书共包括七章内容,分别介绍了太赫兹频段(赝)表面等离子激元的产生原

理及束缚特性和传导特性、太赫兹金属波导功能器件、产生表面等离子激元共振的金属光子晶体、膜局域表面等离子激元、基于表面等离子激元共振的太赫兹功能器件以及太赫兹表面等离子激元远场和近场超分辨技术及其应用等。希望通过对太赫兹频段(膜)表面等离子波现象的归纳和总结,为太赫兹技术在信息科学、生物医学、集成芯片等领域的应用提供技术基础。

在本书撰写过程中,上海理工大学太赫兹技术创新研究院的臧小飞教授和游冠军教授为本书的第6、7章提供了很多的素材,同时,我的学生殷恒辉、葛一凡、廖登高、刘波、王丽霞、涂德骅、周吉、孙元宝、朱文泉、沈文玮、付文凤等为本书做了大量的文献收集、数据整理、图表绘制等工作,在此向他们表示衷心的感谢!

由于太赫兹表面等离子激元涉及的学科较广,加之目前处于多种技术交叉研究阶段,数据更新较快,同时限于笔者的知识、能力,书中难免存在疏漏与不足之处,敬请同行与读者批评指正。

陈 麟

2020年9月于上海

# Contents

目录

1	太赫兹表面等离子激元	001
1.1	引言	003
1.2	导体平板上的表面等离子波	004
1.2.1	金属在表面等离子波中的性质和介电常数	004
1.2.2	SPPs 及色散方程	006
1.3	周期结构界面中的赝表面等离子波	008
1.3.1	一维平板金属微结构表面的赝表面等离子波	010
1.3.2	周期圆柱金属微结构中的 SSPPs	012
1.4	小结	016
2	THz(赝)表面等离子波的激发和传导	017
2.1	概述	019
2.2	激发 THz 波段(S)SPPs 的方法	019
2.2.1	近场激发	019
2.2.2	光栅耦合	020
2.2.3	牛眼结构耦合	021
2.2.4	棱镜耦合	023
2.2.5	介质波导激发	025
2.2.6	共面波导激发	026
2.2.7	平行板波导激发	027
2.2.8	超表面耦合	029
2.3	THz 波段 SSPPs 的传导	031
2.3.1	THz 周期金属穿孔波导	032
2.3.2	多米诺 SSPPs 波导	035
2.3.3	超表面 SSPPs 波导	039
2.4	小结	043
3	金属平板波导中的等离子波效应	045
3.1	引言	047

3.2	金属平板波导结构对太赫兹的耦合和传输	047
3.2.1	耦合结构	047
3.2.2	TM波入射及谐振特性	048
3.2.3	TE波入射及谐振特性	053
3.3	金属平板波导端面的 SSPPs 反射特性	063
3.4	小结	067
<b>4</b>	<b>太赫兹光子晶体板中的表面等离子激元</b>	<b>069</b>
4.1	引言	071
4.2	SPPs 的异常透射增强：从可见光到 THz 波	071
4.3	二维半导体 PCS 的 SPPs 谐振特性	072
4.4	二维金属 PCS 传输特性	076
4.5	小结	083
<b>5</b>	<b>太赫兹膜局域表面等离子波</b>	<b>085</b>
5.1	引言	087
5.2	光波段 LSPs	087
5.3	低频段 SLSPs	089
5.3.1	太阳花结构 SLSPs	090
5.3.2	螺旋形结构 SLSPs	104
5.4	小结	109
<b>6</b>	<b>基于 THz 表面等离子激元超表面的器件</b>	<b>111</b>
6.1	引言	113
6.2	偏振转换器	113
6.2.1	电磁波的偏振	114
6.2.2	实现偏振转换的相关理论	115
6.2.3	基于等离子激元超表面的偏振转换理论	117
6.2.4	单层超表面的宽频 THz 波线偏振转换器	122

6.3	完美吸收器件	129
6.4	小结	143
<b>7</b>	<b>基于太赫兹表面等离子激元的近场超分辨技术</b>	<b>145</b>
7.1	引言	147
7.2	基于螺旋线阵列等离子激元的超分辨聚焦	148
7.2.1	螺旋线阵列等离子体透镜	148
7.2.2	偏振性设计	151
7.2.3	基于螺旋线阵列的高强度超聚焦等离子体棱镜设计	153
7.2.4	基于螺旋线形高强度太赫兹超聚焦棱镜的仿真与实验	156
7.3	太赫兹散射式近场扫描显微成像技术 (THz s-SNOM)	160
7.3.1	s-SNOM 系统及其工作原理	160
7.3.2	偶极子理论模型及计算	161
7.3.3	s-SNOM 系统及其成像特性研究	164
7.3.4	太赫兹近场显微系统	172
7.4	小结	176
	参考文献	177
	索引	196



## 太赫兹表面等离子激元

