

丛书总主编 曹俊诚

战略前沿新技术——太赫兹出版工程

TERAHERTZ

The Optical Terahertz Radiation Sources and Biomedical Applications

4

光学太赫兹辐射源及其 生物学应用

徐德刚 王与焱 钟凯 姚建铨 / 编著

The Optical Terahertz Radiation Sources and Biomedical Applications

光学太赫兹辐射源及其 生物医学应用

徐德刚 王与焱 钟凯 姚建铨 / 编著



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

光学太赫兹辐射源及其生物医学应用 / 徐德刚等编
著. —上海: 华东理工大学出版社, 2021. 4

战略前沿新技术: 太赫兹出版工程 / 曹俊诚总主编
ISBN 978-7-5628-6404-2

I. ①光… II. ①徐… III. ①电磁辐射—应用—生物
医学工程—研究 IV. ①O441.4②R318

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2021)第 035730 号

内 容 提 要

本书内容从光学太赫兹辐射源器件到生物医学应用,覆盖了各种光学太赫兹辐射源器件以及太赫兹生物光谱应用研究现状。全书共七章,第1章介绍光学太赫兹与物质相互作用;第2章介绍太赫兹波段非线性晶体;第3章介绍宽带光学太赫兹脉冲辐射源;第4章介绍基于参量振荡技术的窄带可调谐脉冲太赫兹辐射源;第5章介绍基于差频技术的可调谐脉冲太赫兹辐射源;第6章介绍连续太赫兹辐射源;第7章介绍太赫兹生物医学应用。希望通过介绍光学太赫兹辐射源的研究及其在生物医学应用方面的研究成果及经验,为需要了解太赫兹辐射源及其生物医学应用方面的读者或将要从事该研究的科研工作者提供一定的参考和借鉴。

项目统筹 / 马夫娇 韩 婷

责任编辑 / 马夫娇

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

邮箱: zongbianban@ecustpress.cn

印 刷 / 上海雅昌艺术印刷有限公司

开 本 / 710mm×1000mm 1/16

印 张 / 18.5

字 数 / 306 千字

版 次 / 2021 年 4 月第 1 版

印 次 / 2021 年 4 月第 1 次

定 价 / 298.00 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。

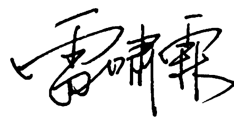
当前太赫兹产业发展还处于创新萌芽期向成熟期的过渡阶段,诸多技术正处于在蓄势待发状态,需要国家和资本市场增加投入以加快其产业化进程,并在一些新兴战略性行业形成自主可控的核心技术、得到重要的系统应用。

“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 $0.1\sim 10\text{ THz}$,对应波长 $3\text{ mm}\sim 30\text{ }\mu\text{m}$ 。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

太赫兹波是指频率为 $0.1\sim 10$ THz、位于红外和微波之间的电磁波,是电子学向光子学过渡的波段。太赫兹辐射源是太赫兹科学技术领域中核心关键技术之一,根据太赫兹波处于电磁波谱中的位置,太赫兹辐射源可以分为电子学太赫兹辐射源、光学太赫兹辐射源以及半导体太赫兹辐射源三大类。光学太赫兹辐射源主要是基于激光与光电子技术产生太赫兹波的辐射源,其优势在于能够产生整个太赫兹波谱范围内的太赫兹辐射,同时具有频谱宽、常温下工作等特点,这是目前除了自由电子激光器外唯一能够获得整个太赫兹波段辐射源的技术方法。光学太赫兹辐射源由于其宽带输出、常温工作、结构简单等优点,在波谱、成像以及检测等太赫兹科学技术应用领域得到了广泛的应用。太赫兹辐射的能级与生物分子低频运动如分子的振动、转动以及分子骨架扭动的能量有很大的交界,太赫兹技术可通过“指纹谱”识别实现生物分子表征;太赫兹光谱表征的是分子内、分子间的弱相互作用,可用于实现生物分子相互作用的动态探测;太赫兹波的光子能量相对较低,具有生物安全性;太赫兹辐射对水特别敏感,有利于生物体的在体检测。因此,太赫兹技术可作为一种全新独特的生物检测技术。

本书内容从光学太赫兹辐射源器件到生物医学应用,覆盖了各种光学太赫兹辐射源器件以及太赫兹生物光谱应用研究现状。本书共有七章内容。第1章光学太赫兹与物质相互作用;第2章太赫兹波段非线性晶体;第3章宽带光学太赫兹脉冲辐射源;第4章基于参量振荡技术的窄带可调谐脉冲太赫兹辐射源;第5章基于差频技术的可调谐脉冲太赫兹辐射源;第6章连续太赫兹辐射源;第7章太赫兹生物医学应用。

本书的工作是作者所在的姚建铨院士团队近年来研究工作的总结。在研究工作中涉及激光与光电子技术、非线性光学频率变换技术、光谱与成像技术等知识,作者希望通过介绍光学太赫兹辐射源的研究及其在生物医学应用方面的研究成果和经验,为需要了解太赫兹辐射源及其生物医学应用方面的读者或将要从事该研究的科研工作者提供一定的参考和借鉴。由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请广大师生和读者批评、指正。

徐德刚

2020年5月

Contents

目
录

1	光学太赫兹与物质相互作用	001
1.1	激光与非线性光学基本原理	003
1.1.1	激光基本原理	003
1.1.2	非线性频率变换技术	004
1.1.3	太赫兹技术	005
1.2	太赫兹与物质相互作用特性	007
1.2.1	弱场太赫兹与物质的相互作用	007
1.2.2	强场太赫兹与物质的相互作用	012
1.3	太赫兹在空间中的准光传输特性	017
	参考文献	020
2	太赫兹波段非线性晶体	023
2.1	无机非线性光学晶体	025
2.1.1	LiNbO ₃ 晶体	025
2.1.2	MgO : LiNbO ₃ 晶体	029
2.1.3	KTP 晶体	030
2.1.4	KTA 晶体	032
2.1.5	KDP 晶体	033
2.1.6	GaAs 晶体	035
2.1.7	GaSe 晶体	037
2.1.8	ZnGeP ₂ 晶体	040
2.2	有机非线性晶体	041
2.2.1	DAST 晶体	042
2.2.2	DSTMS 晶体	045
2.2.3	DASC 晶体	047
2.2.4	DASB 晶体	048
2.2.5	HMQ - T 和 HMQ - TMS 晶体	048
2.2.6	HMB - TMS 和 HMB - T 晶体	050
2.2.7	OH1 晶体	051
2.2.8	BNA 晶体	053

参考文献	054
3 宽带光学太赫兹脉冲辐射源	061
3.1 超快光学	063
3.1.1 飞秒激光器	063
3.1.2 太赫兹时域光谱学	065
3.2 基于光电导的超宽带太赫兹脉冲辐射源	067
3.3 基于光整流的超宽带太赫兹脉冲辐射源	070
3.3.1 光整流产生太赫兹波的基本过程	070
3.3.2 光整流产生太赫兹波的机理分析	070
3.3.3 光整流产生太赫兹波的转换效率	073
3.4 强场超宽带太赫兹脉冲辐射源	073
参考文献	075
4 基于参量振荡技术的窄带可调谐脉冲太赫兹辐射源	077
4.1 非线性参量过程	079
4.1.1 拉曼散射过程	081
4.1.2 电磁耦子散射过程	082
4.2 基于受激电磁耦子散射过程产生太赫兹波的理论研究	084
4.2.1 光学晶格振动模的色散	084
4.2.2 与晶格振动模有关的三波耦合作用的理论研究	087
4.2.3 散射过程中增益与损耗的理论计算	090
4.3 适合参量振荡技术的太赫兹波段非线性晶体	093
4.3.1 铌酸锂晶体和钽酸锂晶体光学特性简介	093
4.3.2 铌酸锂晶体和钽酸锂晶体色散与吸收特性的研究	095
4.4 电磁耦子散射过程中角度相位匹配的数值模拟	101
4.5 电磁耦子散射过程中太赫兹波增益、吸收特性的数值模拟	104
4.6 基于外腔参量振荡的脉冲太赫兹波辐射源	110
4.6.1 太赫兹波参量源耦合技术的发展	111
4.6.2 新晶体在太赫兹参量振荡器中的应用	115

4.6.3	太赫兹参量振荡器腔型结构的优化设计	117
4.6.4	基于内腔参量振荡的脉冲太赫兹辐射源	122
4.6.5	其他新型参量振荡的脉冲太赫兹辐射源	127
	参考文献	128

5	基于差频技术的可调谐脉冲太赫兹辐射源	135
5.1	太赫兹差频技术基本原理	137
5.2	适合差频技术的太赫兹波段非线性晶体	149
5.2.1	GaSe 晶体	149
5.2.2	ZnGeP ₂ 晶体	150
5.2.3	GaAs 晶体	151
5.2.4	DAST 晶体	153
5.3	基于差频技术的可调谐脉冲太赫兹辐射源	154
5.4	超宽带可调谐脉冲太赫兹辐射源	165
5.5	高重频太赫兹脉冲辐射源	176
	参考文献	186

6	连续太赫兹辐射源	189
6.1	基于光混频的连续太赫兹辐射源	191
6.1.1	优化天线设计	192
6.1.2	提高泵浦激光功率	197
6.1.3	采用其他衬底材料	197
6.2	光泵浦高功率连续太赫兹辐射源	200
	参考文献	212

7	太赫兹生物医学应用	217
7.1	太赫兹与物质相互作用	219
7.1.1	太赫兹波与生物组织的相互作用分析	219
7.1.2	太赫兹波与生物组织相互作用的介电模型	220

7.2 太赫兹波生物光谱与成像特性	222
7.2.1 生物组织太赫兹波指纹谱特性	222
7.2.2 生物组织太赫兹波段的吸收系数与折射率	225
7.2.3 太赫兹波成像系统	229
7.2.4 太赫兹波生物水分含量检测原理以及误差分析	234
7.2.5 不同状态生物组织太赫兹波成像特性	238
7.2.6 环境参数对生物组织太赫兹波检测的影响	241
7.3 太赫兹在脑外科精准医学检测技术方面的应用	242
7.3.1 脑胶质瘤的太赫兹检测	242
7.3.2 击打性脑创伤的太赫兹检测	247
7.3.3 脑缺血的太赫兹检测	254
7.4 太赫兹在细胞、组织等方面的医学检测应用	255
7.4.1 太赫兹波细胞检测	255
7.4.2 太赫兹波生物组织检测	261
参考文献	265
索引	274