



光电子科学与技术前沿

太赫兹光学差频源

黄志明 著



科学出版社

光电子科学与技术前沿

太赫兹光学差频源

黄志明 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

太赫兹波具有不同于其他电磁波段的独特性质,被认为是未来可改变世界的十大关键技术之一。然而广泛存在于自然界和宇宙空间的太赫兹辐射强度非常弱,为实现高灵敏度太赫兹光电探测应用前景,需要人为产生高功率太赫兹辐射源。

本书首先对现有的众多原理实现的太赫兹源及探测器进行了简单介绍,然后选择了发展输出功率高、频率调节范围宽、单色性好、可室温工作的基于非线性光学差频产生太赫兹源。本书重点介绍了作者近些年来在太赫兹光学差频产生方面开展的多种高功率、可调谐太赫兹源的实验研究结果,主要包括基于掺铈铌酸锂晶体参量效应的太赫兹可调谐参量辐射源,基于各向同性晶体的太赫兹无角度调谐源和基于硒化镓及掺硫硒化镓晶体双折射效应的太赫兹共线差频源。

本书的主要读者对象是从事太赫兹科学与技术、红外物理、非线性光学材料等相关研究与应用领域的科技人员以及在读研究生。

图书在版编目(CIP)数据

太赫兹光学差频源 / 黄志明著. —北京: 科学出版社, 2016. 5

(光电子科学与技术前沿)

ISBN 978-7-03-047559-6

I. ①太… II. ①黄… III. ①光电子—研究 IV. ①0462.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 042924 号

责任编辑: 郭建宇

责任印制: 谭宏宇 / 封面设计: 殷 靓

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>

南京展望文化发展有限公司排版

上海叶大印务发展有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年5月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2016年5月第一次印刷 印张: 10

字数: 201 000

定价: 85.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

光电子科学与技术前沿丛书

专家委员会

主任委员 褚君浩

副主任委员 黄 维 李树深

委 员(按姓氏汉语拼音排序)

龚旗煌 郝 跃 胡志高 黄志明
李儒新 罗 毅 杨德仁 张 荣
朱自强

咨询委员会

主任委员 姚建年

副主任委员 高瑞平

委 员(按姓氏汉语拼音排序)

何 杰 潘 庆 秦玉文 张守著

Preface | 丛书序

“光电子科学与技术前沿”丛书主要围绕近年来光电子科学与技术发展的前沿领域,阐述国内外学者以及作者本人在该前沿领域的理论和实验方面的研究进展。经过几十年的发展,中国光电子科学与技术水平有了很大程度提高,光电子材料、光电子器件和各种应用已发展到一定高度,逐步在若干方面赶上世界水平,并在一些领域走在前头。当前,光电子科学与技术方面研究工作科学规律的发现和学科体系的建设,已经具备系列著书立说的条件。这套丛书的出版将推动光电子科学与技术研究的深入,促进学科理论体系的建设,激发科学发现、技术发明向现实生产力转化。

光电子科学与技术是研究光与物质相互作用的科学,是光学光子学和电子科学的交叉学科,涉及经典光学、电磁波理论、光量子理论,和材料学科、物理学科、化学学科,以及微纳技术、工程技术等,对于科学技术的整体发展和信息技术与物质科学技术的深度融合发展都具有重要意义。光电子科学技术从本质上是描述物质运动形态转换规律的科学,从光电转换的经典描述到量子理论,从宏观光电转换材料到微纳结构材料,人们对光电激动力学的认识越来越深入。随着人们对光电转换规律的发现和应用日益进入自由王国,发明了多种功能先进的光电转换器件以及智能化光电功能系统,开辟了光电功能技术广泛应用的前景。

本丛书将结合当代光电子科学技术的前沿领域,诸如太阳电池、红外光电子、LED 光电子、硅基光电子、激光晶体光电子、半导体低维结构光电子、氧化物薄膜

光电子、铁电和多铁材料光器件、纳米光电子、太赫兹光效应、超快光学、自旋光电子、有机光电子、光电子新技术和新方法、飞秒激光微纳加工、新型光电子材料、光纤光电子等领域,阐述基本理论、方法、规律和发现及其应用。丛书有清晰的基本理论体系的线条,有深入的前沿研究成果的描述,特别是包括了作者团队、以及国内国际同行的科研成果,并且与高新技术结合紧密。本丛书将在光电科学技术诸多领域建立光电转换过程的理论体系和研究方法框架,提供光电转换的基本理论和技术应用知识,使读者能够通过认识和理解光电转换过程的规律,用于了解人们已经掌握的光电转换材料器件和应用,同时又能通过现有知识和研究方法的掌握,具备探索新规律、发明新器件、开拓应用新领域的能力。

我和丛书专家委员会的所有委员们共同期待这套丛书能在涉及光电子科学与技术知识的深度和广度上达到一个新的高度。让我们共同努力,为广大读者提供一套高质量、高水平的光电子科学与技术前沿系列著作,作为对中国光电子科学与技术事业发展的贡献。



2015 年 8 月

Preface | 序 言

太赫兹波是指电磁波中波长在 3 毫米到 30 微米、频率在 0.1~10 THz 波段,因波长介于毫米波与红外光波之间,所以它具有比微波探测更高的空间分辨率和比红外光波更好的透射能力,除能直接确定分子的振动和转动光谱特性外,在大气遥感、天文探测、医学成像、环境检测、保密通信、食品检测和基础研究等方面有着广泛的应用前景。

太赫兹辐射在自然界中无处不在。根据黑体辐射理论,物体的辐射强度分布与物体温度及波长有关,温度 1~100 K 的物体的辐射峰值波长虽位于太赫兹波段,但由于温度低辐射强度小,低温目标的太赫兹波探测变得困难。对常温目标而言,虽然辐射总量随温度升高而增加,但由于太赫兹波段远离辐射的峰值,常温目标的太赫兹辐射强度随波长增加迅速下降,辐射直接探测也变得困难。因此,研制能照射目标或作为信息传输载体的高功率太赫兹辐射源以及高灵敏度探测器成为当今太赫兹技术和应用发展的关键之一。

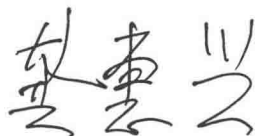
在当前产生强太赫兹辐射的多种光学和电子学方法中,光学差频技术是产生频率连续可调、功率高和线宽窄的太赫兹辐射源的最有效方法之一。差频太赫兹的产生是一种基于二阶非线性光学的参量过程,它通过强光与非线性晶体相互作用,由两个不同频率的输入光子同时湮灭来产生频率为两者差频的第三个光子。因为现有激光器可调谐、频率稳定、功率高以及非线性晶体材料损伤阈值高,因此采用差频方法能建立宽波段可调、单色性好、功率高和相对稳定的室温相干太赫兹

辐射源,推动了太赫兹技术在通信、雷达、遥感、成像等方面的应用,显现良好的前景。

黄志明教授总结了现阶段使用不同方法产生的太赫兹源及其相关技术,介绍了他所研究的光学差频产生太赫兹辐射的方法,实现的多种高功率、可调谐太赫兹源及其实际应用。

这本《太赫兹光学差频源》较全面综述了有关研究成果,包括原理方法及实现技术,据本人所知,这是国际上关于太赫兹差频技术源的第一本专著。相信本书的出版有助于太赫兹技术的进步并能推动我国太赫兹技术的应用发展。

期望本书对从事光电子学、特别是太赫兹光电子学科研和工程技术人员有所帮助,也可供相关专业研究生及高年级本科生作为学习参考。

A handwritten signature in black ink, consisting of three stylized Chinese characters: '黄', '志', and '明'.

2016年3月

Foreword | 前 言

太赫兹(THz)是介于红外与毫米波之间的一个特殊电磁波波段,也就是早期的远红外和亚毫米波波段,该波段是电磁波谱中人类认识最不成熟的一个波段。自从 20 世纪 80 年代早期太赫兹相干探测技术取得突破后,THz 无论是在基础研究还是在技术应用上均已成为研究的热点和焦点。这是因为 THz 技术在物理学、材料科学、医学成像、大气观测、射电天文、通信方面等军事和民用领域表现出巨大的应用前景和优势。但在 THz 波段自然界辐射的平均功率只有纳瓦量级,同时空气中水分子等极性分子对 THz 信号吸收衰减,到达 THz 探测器的信号通常会更弱。因此,太赫兹发展所面临的最大挑战是高灵敏度探测,其存在的根本问题是高功率 THz 源的产生和高灵敏度 THz 探测技术。

本书主要涉及太赫兹源的研究,作者综合考虑比较各种太赫兹源的现状并判断未来发展趋势后,总结了太赫兹参量产生和太赫兹共线差频方法实现多种高功率可调谐太赫兹源的研究结果。其中第 1 章概括性阐述了太赫兹的特点、应用、国内外现状以及太赫兹源和探测的主要方法;第 2 章介绍了非线性光学差频的基本理论;第 3 章对掺铈酸锂晶体太赫兹参量产生实验进行了系统的理论分析以及实验研究;第 4 章对各向同性晶体共线差频产生太赫兹波进行了研究,同时进行了晶体变温太赫兹共线差频辐射源研究;第 5 章研究了在具体实验过程中对高功率

源产生重要影响的相位失配与晶体材料吸收系数;第6章采用硒化镓及掺硫硒化镓晶体实现高功率太赫兹差频源;最后第7章给出多种其他非线性晶体实现太赫兹差频特性分析。

作者衷心感谢褚君浩院士和沈学民教授长期以来的指导与支持,感谢课题组的黄敬国、陆金星、王兵兵以及访问学者 Yury Andreev 教授在太赫兹源实验方面的辛苦研究工作。同时感谢课题组的周炜、童劲超、吴敬、高艳卿、柏玲仙、孙雷、姚娘娟、江林、曲越、欧阳程、张飞等的帮助。感谢中科院重大科研装备研制、科工局重大预研、国家自然科学基金等项目对本书工作内容的支持。

本书的工作是作者近些年来研究工作的总结。在研究工作中涉及高功率激光、非线性光学、深低温制冷、固体物理、电子线路等知识,作者希望通过介绍太赫兹非线性光学差频方面的研究成果及经验,为需要了解太赫兹差频技术的读者或者将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提出批评与建议。

黄志明

2015年12月于上海

Contents | 目 录

丛书序
序言
前言

第 1 章 概述	001
1.1 太赫兹波	001
1.2 太赫兹辐射特性	003
1.2.1 极性分子指纹识别性	003
1.2.2 非极性分子透视性	003
1.2.3 人体的安全性	003
1.2.4 频带与波长双优势性	003
1.3 太赫兹技术应用	004
1.3.1 太赫兹天文探测	004
1.3.2 太赫兹遥感	004
1.3.3 太赫兹成像	006
1.3.4 太赫兹光谱	007
1.3.5 太赫兹通信	007
1.3.6 太赫兹雷达	008
1.4 国内外研究发展状况	008
1.5 太赫兹的产生	010

1.5.1	光学产生方法	011
1.5.2	电子学产生方法	018
1.6	太赫兹探测技术	020
1.6.1	直接探测	021
1.6.2	外差探测	024
1.7	太赫兹产生和探测方法比较	027
	参考文献	028
第2章	非线性光学差频及参量产生理论	033
2.1	非线性差频的三波耦合方程	033
2.1.1	介质中的非线性波动方程	034
2.1.2	太赫兹差频辐射的耦合波方程	035
2.1.3	太赫兹差频辐射功率及 Manley - Rowe 关系	036
2.2	相位匹配	038
2.2.1	双折射效应相位匹配	039
2.2.2	准相位匹配	041
2.2.3	非共线相位匹配	043
2.2.4	部分各向同性晶体共线相位匹配	043
2.3	太赫兹参量产生作用原理	044
	参考文献	047
第3章	掺镁铌酸锂晶体太赫兹参量产生源	049
3.1	太赫兹参量源研究背景	049
3.2	铌酸锂晶体光学性质	051
3.3	铌酸锂晶体参量辐射产生原理	052
3.4	铌酸锂晶体参量辐射产生数值计算	053
3.5	掺镁铌酸锂晶体太赫兹参量产生源实验研究	056
3.5.1	太赫兹参量产生源实验配置	056
3.5.2	太赫兹参量产生实验结果与分析	058
	参考文献	060
第4章	各向同性晶体太赫兹共线差频源	062
4.1	各向同性半导体共线差频理论分析	062

4.2	各向同性晶体室温共线太赫兹共线差频实验	063
4.2.1	差频泵浦源介绍	063
4.2.2	各向同性晶体太赫兹共线差频实验光路图	065
4.3	基于碲化镉晶体室温太赫兹共线差频研究	066
4.3.1	碲化镉晶体太赫兹共线差频辐射理论分析	066
4.3.2	碲化镉晶体太赫兹共线差频辐射实验结果及分析	068
4.4	基于磷化镓晶体室温共线太赫兹差频实验研究	069
4.4.1	本征磷化镓晶体太赫兹共线差频辐射理论分析	069
4.4.2	磷化镓晶体太赫兹共线差频辐射实验结果及分析	071
4.5	基于 n 型磷化镓晶体变温共线太赫兹差频实验	072
4.5.1	n 型磷化镓晶体变温太赫兹共线差频实验光学系统	072
4.5.2	n 型磷化镓晶体变温太赫兹共线差频实验结果及分析	072
	参考文献	075

第 5 章 相位失配与材料吸收对太赫兹差频功率的影响

5.1	实验模型	078
5.2	相位匹配且无晶体吸收条件下的情形	078
5.3	相位匹配但有晶体吸收条件下的情形	079
5.4	相位失配但无晶体吸收条件下的情形	081
5.5	相位失配并有晶体吸收条件下的情形	084
	参考文献	086

第 6 章 硒化镓及掺硫硒化镓晶体太赫兹差频源

6.1	硒化镓及掺杂晶体光学性质	089
6.1.1	硒化镓晶体性质	089
6.1.2	掺硫硒化镓晶体性质	091
6.2	硒化镓差频产生中红外的实验研究	095
6.2.1	差频参数理论分析	095
6.2.2	差频实验结果	098
6.3	硒化镓差频产生太赫兹波的实验研究	102
6.3.1	实验配置	102
6.3.2	实验结果与分析	105
6.4	掺硫硒化镓晶体太赫兹共线差频实验研究	111
6.4.1	掺硫硒化镓晶体差频理论分析	111

6.4.2	掺硫硒化镓晶体太赫兹共线差频实验	112
6.4.3	太赫兹共线差频实验结果及分析	113
6.5	太赫兹传输特性研究	116
6.5.1	太赫兹差频源远距离探测	116
6.5.2	太赫兹目标特性研究	119
6.6	基于外部级联二次差频提高太赫兹波转换效率的分析	120
	参考文献	123
第7章	多种其他晶体太赫兹差频特性	126
7.1	材料基本特性	126
7.1.1	ZnGeP ₂ 晶体	126
7.1.2	CdSe 晶体	127
7.1.3	AgGaS ₂ 晶体	128
7.1.4	AgGaSe ₂ 晶体	129
7.2	太赫兹差频特性	129
7.2.1	相位匹配角	130
7.2.2	有效非线性系数	132
7.2.3	走离角	132
7.2.4	允许角	134
7.3	晶体品质因数比较	136
	参考文献	137
	索引	139
	后记	144

第 1 章

概 述

太赫兹科学技术被誉为本世纪的一场前沿革命,它已经成为本世纪科学研究的热门领域,将给科学及应用带来极大地促进作用。因为太赫兹波本身的独特性质,它具有其他波段的电磁波不可替代的应用前景。然而限制太赫兹技术发展的瓶颈主要在两方面:一是高功率、高效率的紧凑型太赫兹辐射源,二是高灵敏度、实用化的太赫兹探测器。如何突破这两个瓶颈,仍是太赫兹领域科研人员研究的重点方向。本章将主要介绍太赫兹的基本概念、特点及应用,同时回顾到目前为止国内外在太赫兹领域的总体研究状况,概括介绍太赫兹波产生与探测的主要方法,并对各种太赫兹源产生和探测方法进行简单比较。

1.1 太赫兹波

太赫兹波(Terahertz,简称 THz)是指频率从 100 GHz 到 10 THz ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$),波长从 3 mm 到 $30 \mu\text{m}$ 之间的电磁波谱,该波段介于毫米波与红外光之间(如图 1.1 所示),被认为是最后一个尚未被人类充分认识及开发利用的电磁光谱波段。从 2002 年 *Nature* 杂志提出“Terahertz Gap”的概念后^[1],太赫兹最近十多年发展非常迅速。太赫兹已经是当今世界科学发展中极为活跃的研究热点之一,已涉及非线性光学、瞬态光学、超短脉冲激光、超快半导体材料、激光等离子体产生技术、太赫兹频段波谱探测与分析,以及太赫兹成像应用等众多学科专业,被誉为“未来改变世界的十大关键技术之一”^[2]。太赫兹电磁波辐射广泛存在于自然界和宇宙空间中,根据黑体辐射理论,太赫兹电磁辐射所对应的背景辐射温度为 0.97~97 K,占有宇宙背景温度(2.7 K)微波辐射中约一半的光子能量。尽管自然界广泛存在太赫兹辐射,但是在 20 世纪 80 年代中期之前,由于缺乏相应紧凑型太赫兹高功率辐射源以及室温高灵敏性探测器,这一波段的电磁辐射并没有得到深

入的研究,主要研究基本局限于外太空天文领域。此外,空气中的水汽对太赫兹具有强烈的吸收,图 1.2 给出了不同天气对太赫兹波的吸收频谱图^[3]。由图可知,为实现自由空间的应用,我们必须研制出高功率的太赫兹辐射源。虽然大气中存在水汽等的强吸收,幸运的是,对于宽谱段的太赫兹波依然存在一些太赫兹透明窗口(如 0.15, 0.23, 0.34, 0.5, 0.65, 0.87 THz 等),我们可以利用这些大气窗口实现太赫兹的广泛应用。



图 1.1 太赫兹波在电磁波谱中的位置分布

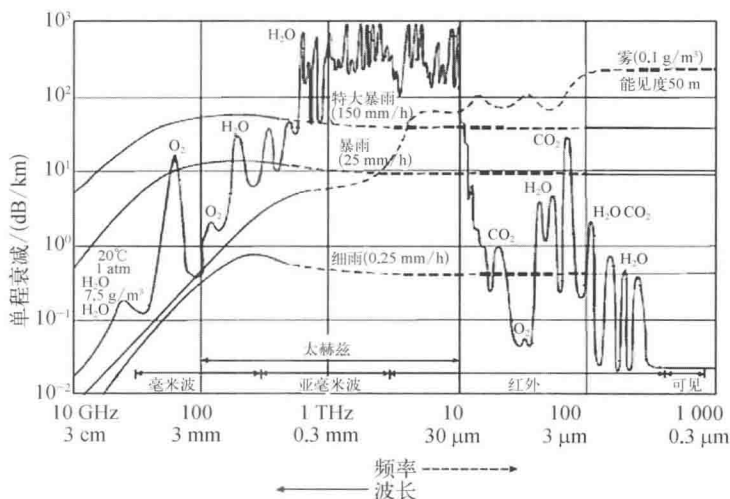


图 1.2 大气对太赫兹波的强烈吸收^[3]

太赫兹也就是原来的亚毫米波或者远红外波,人们早在 19 世纪末就认识到该电磁波段。但其发展一直受到物理技术方面的制约。直到最近 20 多年来,得益于超短脉冲光电导产生及相干探测技术的突破,太赫兹科学领域得到快速的发展,吸引了众多科研人员以及各国政府的关注与重视。目前,高功率、宽波段、可连续调谐的室温太赫兹源以及高性能的太赫兹探测器技术是研究的重点与热点,它将对整个太赫兹技术的进一步推广起到关键性作用。一份来自 BCC Research 的市场调研报告表明,“2011 年太赫兹系统的全球市场价值为 8 370 万美元,十年后将达 5 亿 6 500 万美元”^[4],2011 年,全球知名 IT 咨询公司 Gartner 公司也将太赫兹技术列为 2011 年六大电子类创新技术之一^[5]。

1.2 太赫兹辐射特性

太赫兹之所以引起人们浓厚的研究兴趣,并不仅仅因为它是一类虽然广泛存在但还不为人所熟知的电磁波辐射,更重要的是它具有很多独特的光学性质。太赫兹波处于宏观经典理论向微观量子理论的过渡区,为电子学向光子学趋近的过渡区间,它在长波方向与毫米波有重叠,在短波方向又与红外线有重叠。由于所处位置特殊,太赫兹波表现出不同于其他波段的独特光学性质。

1.2.1 极性分子指纹识别性

水等极性分子对太赫兹吸收特别敏感,利用太赫兹研究与水有关的物质具有独特性。另外,许多物质大分子如生物大分子的振动(包括集体振动)和转动频率都在太赫兹波段,在太赫兹波段表现出非常强的吸收和谐振效应。不同分子对于太赫兹波的吸收和散射特性与分子振动和转动能级有关的偶极跃迁相联系,而分子的偶极跃迁犹如人的指纹千差万别。因此物质的太赫兹光谱包含丰富的物理和化学信息,使得太赫兹波具有类似指纹的唯一性。太赫兹成像光谱,不但能够辨别物体的形貌,而且能够鉴别物体的组成成分。

1.2.2 非极性分子透视性

太赫兹波是具有量子特性的电磁辐射,它既具有类似微波的穿透能力,也具有类似光波的方向性。对于很多介电材料和非极性材料(例如陶瓷、脂肪、布料、木材、纸张等),它具有良好的穿透性,可以对可见光不透明物体进行太赫兹透视成像。此外,由于它的波长远大于空气中悬浮的灰尘或烟尘颗粒尺度(从亚微米到几十微米),这些悬浮颗粒对太赫兹波的散射要远小于对光频和红外波段电磁辐射的影响。因此,太赫兹波可以在浓烟、风尘环境中进行低损耗传播。

1.2.3 人体的安全性

太赫兹波技术的一个显著特点是安全性,它具有非常低的光子能量(1 THz 对应 4.2 meV 能量),比 X 射线光子能量低 7~8 个数量级。它的光子能量低于各种化学键的键能,不会对人体以及生物组织等造成光损伤以及光化电离反应。另外,由于水对太赫兹波有强烈的吸收,太赫兹波辐射不能穿透人体皮肤,因此即使高功率的太赫兹辐射,对人体的影响也只能停留在皮肤表层,而不像微波可以穿透到人体内部。

1.2.4 频带与波长双优势性

就频率而言,太赫兹波频率相当于当前无线通信载波的数百至一千倍,太赫兹