

光学参量太赫兹辐射源

李忠洋 著



科学出版社

光学参量太赫兹辐射源

李忠洋 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书研究基于光学参量方法产生高功率、可调谐、窄线宽、室温运转、小型化的相干太赫兹辐射源。全书共9章,内容包括:光学参量及差频效应太赫兹辐射源发展历史及研究现状;光学差频效应产生太赫兹波的理论分析;受激电磁耦合子散射产生太赫兹波的动力学分析,并分析光学参量效应中的相位匹配特性及光混频特性;理论推导外腔和内腔太赫兹波参量振荡器阈值表达式;实验上实现高功率、宽调谐、窄线宽、室温运转、小型化的相干太赫兹辐射源;研究闪锌矿结构晶体中参量振荡产生太赫兹波的相位匹配特性和增益特性;理论研究级联参量效应和级联差频效应产生高效太赫兹波;分析光学参量效应中太赫兹波的放大特性;基于电磁感应透明过程中非线性极化率增强理论,研究在紫翠宝石晶体中基于原子在禁戒跃迁能级间的最大相干性频率下转换产生太赫兹波的理论。

本书可供高等学校光电子等相关专业师生以及太赫兹技术研究人员、工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

光学参量太赫兹辐射源/李忠洋著. —北京:科学出版社,2016.8
ISBN 978-7-03-048225-9

I. ①光… II. ①李… III. ①电磁辐射-辐射源-研究 IV. ①O441.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第095280号

责任编辑:耿建业 陈构洪 赵微微 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟 / 封面设计:铭轩堂

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencecp.com>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年8月第 一 版 开本:720×1000 B5

2017年1月第二次印刷 印张:11 3/4

字数:236 000

定价:96.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

太赫兹波是指频率在 $0.1 \sim 10\text{THz}$ ($1\text{THz} = 10^{12}\text{Hz}$) 的电磁辐射, 它的波长介于毫米波与红外波之间。在频域上太赫兹波处于宏观向微观过渡区域; 在辐射机制上太赫兹波处于经典电磁辐射向量子跃迁过渡区域。相对于其他电磁波, 太赫兹波具有独特的性质: 太赫兹波波谱很宽, 覆盖 $0.1 \sim 10\text{THz}$, 适合对某些凝聚态体系进行吸收光谱研究; 太赫兹波的频率很高, 是微波的 1000 倍以上, 所以空间分辨率很高; 太赫兹波通常由相干电流驱动的偶极子振荡或由相干的激光脉冲通过非线性光学参量、差频过程产生, 因此太赫兹波具有很高的时间和空间相干性; 太赫兹波单光子能量低, 1THz 的太赫兹光子能量大约只有 4meV , 因此它不会对被检测的生物组织产生有害的电离, 在医学成像方面有很好的应用前景; 太赫兹波穿透性强, 除了金属和水对太赫兹波有较强吸收外, 太赫兹波对其他物质都有很好的穿透性, 因此太赫兹波在安全检查、反恐等领域有广阔的应用前景; 物质的太赫兹光谱包含丰富的物理和化学信息, 如凝聚态物质的声子频率、大分子的振动光谱均在太赫兹波段有很多特征峰, 凝聚态物质和液体中的载流子对太赫兹辐射也有非常灵敏的响应, 研究有关物质在这一波段的光谱响应对探索其结构性质具有重要意义。

长期以来由于缺乏有效的太赫兹波产生和检测方法, 人们对于物质在太赫兹波段的性质了解非常有限, 以致该波段被称为电磁波谱中的太赫兹空隙。近年来高性能激光器和非线性光学频率变换技术的发展, 为产生高功率太赫兹波提供了基础。目前产生太赫兹波的方法主要有电子学方法和光子学方法两大类。电子学方法主要有自由电子激光器、量子级联激光器、返波振荡器、耿氏振荡器、纳米速调管等。电子学方法是將电磁辐射的频率从毫米波延伸到太赫兹波段, 但是当频率高于 1THz 时会遇到很大的困难, 效率变得很低。同时电子学方法产生的太赫兹辐射源体积庞大, 限制了其在很多领域中的应用。光子学方法主要有光整流、光电导、光学差频、光学参量振荡、光泵气体等方法, 其主要原理是把可见光或者红外光向太赫兹波段转换。这种方法的优点是可以产生方向性和相干性很好的太赫兹辐射, 但是现阶段其功率和效率还有待提高。

基于光学参量效应产生的太赫兹波具有高功率、可调谐、窄线宽、相干、室温运转、小型化等特点。光学参量效应产生太赫兹辐射的原理是: 功率足够强的泵浦光

与晶体中同时具有红外活性和拉曼活性的晶格振动模耦合,激发出斯托克斯光子和电磁耦子,在电磁耦子色散曲线上小波矢处的受激电磁耦子散射就是太赫兹辐射。本书研究了基于光学参量效应产生太赫兹辐射,全书共9章。第1章概述了光学参量及差频效应太赫兹辐射源的发展历史及研究现状;第2章论述了光学差频效应产生太赫兹波的机理;第3章论述了受激电磁耦子散射产生太赫兹波的动力学过程,并分析了光学参量效应中的相位匹配特性及光混频特性;第4章理论推导了外腔和内腔太赫兹波参量振荡器阈值表达式;第5章论述了光学参量效应产生太赫兹波的实验结果;第6章理论研究了闪锌矿结构晶体中参量振荡产生太赫兹波的相位匹配特性和增益特性;第7章理论研究了级联参量效应和级联差频效应产生高效太赫兹波;第8章分析了光学参量效应中太赫兹波的放大特性;第9章论述了紫翠宝石晶体中基于原子在禁戒跃迁能级间的最大相干性频率下转换产生太赫兹波的理论。

本书是我在天津大学激光与光电子研究所读博期间及在华北水利水电大学工作期间的研究成果。在此要特别感谢我的导师姚建铨院士,在科研上给予我的指导;感谢徐德刚教授,在科研和工作上给予我的帮助。感谢华北水利水电大学,让我实现了当一名人民教师的梦想。

李忠洋

2016年4月26日

于华北水利水电大学

目 录

前言

第 1 章 太赫兹波简介	1
1.1 太赫兹波独特性质	1
1.2 太赫兹波应用	2
1.3 光学参量太赫兹辐射源发展概述	5
1.3.1 参量效应太赫兹辐射源	5
1.3.2 差频效应太赫兹辐射源	13
1.4 禁戒跃迁能级太赫兹辐射源	16
参考文献	21
第 2 章 光学差频过程基本理论	26
2.1 差频过程三波相互作用理论分析	26
2.2 差频过程相位匹配分析	32
参考文献	34
第 3 章 晶格振动场的太赫兹波参量过程动力学分析	35
3.1 晶体中晶格振动模与光波的耦合作用	35
3.1.1 极性晶格振动模	35
3.1.2 极性晶格振动模产生的电磁场与光波的相互耦合条件	35
3.2 电磁耦子	36
3.2.1 双离子立方晶体中电磁耦子的色散曲线	36
3.2.2 双离子单轴晶体中电磁耦子的色散曲线	38
3.2.3 多原子单轴晶体中电磁耦子的色散曲线	40
3.3 受激电磁耦子散射过程中三波相互作用动力学分析	42
3.4 太赫兹波参量过程相位匹配分析	46
3.4.1 非共线相位匹配	46
3.4.2 准相位匹配	48
3.5 KTP 晶体太赫兹波参量效应	51
3.6 周期反转 GaP 晶体太赫兹波参量效应	57
3.7 太赫兹波参量过程光混频效应	63
参考文献	69

第4章 太赫兹波参量振荡器阈值分析	71
4.1 外腔太赫兹波参量振荡器阈值分析	71
4.2 内腔太赫兹波参量振荡器阈值分析	78
参考文献	83
第5章 太赫兹波参量振荡器实验研究	84
5.1 硅棱镜耦合输出太赫兹波参量振荡器	85
5.1.1 硅棱镜耦合输出太赫兹波参量振荡器实验分析	85
5.1.2 硅棱镜耦合输出太赫兹波参量振荡器实验装置	86
5.1.3 硅棱镜耦合输出太赫兹波参量振荡器实验结果与分析	87
5.2 浅表垂直出射太赫兹波参量振荡器	91
5.2.1 双块铌酸锂晶体浅表垂直出射太赫兹波参量振荡器	91
5.2.2 单块铌酸锂晶体浅表垂直出射太赫兹波参量振荡器	97
第6章 闪锌矿结构晶体光学参量效应产生太赫兹波的研究	102
6.1 闪锌矿结构晶体简介	102
6.2 闪锌矿结构晶体中光波的传播特性	105
6.2.1 未考虑阻尼的情形	105
6.2.2 考虑阻尼的情形	106
6.3 闪锌矿结构晶体受激电磁耦子散射产生太赫兹波	110
6.3.1 相位匹配特性	110
6.3.2 闪锌矿结构晶体在太赫兹波段增益和吸收特性	114
6.4 闪锌矿结构晶体极化声子共振区差频产生太赫兹波	116
参考文献	123
第7章 级联光学参量过程产生太赫兹波的研究	124
7.1 级联光学参量效应	124
7.1.1 级联光学参量过程理论分析	124
7.1.2 级联光学参量过程模拟研究	125
7.2 级联光学差频效应	131
7.2.1 OH1 级联光学差频效应	131
7.2.2 GaP 脊形波导级联光学差频效应	136
7.2.3 PPKTP 晶体级联光学差频效应	141
参考文献	145
第8章 太赫兹波光学参量效应放大特性	147
8.1 前向太赫兹波光学参量效应	147
8.2 后向太赫兹波光学参量效应	152

第 9 章 禁戒跃迁能级产生太赫兹波·····	155
9.1 电磁感应透明现象中的非线性光学效应·····	155
9.1.1 缀饰态理论·····	155
9.1.2 电磁感应透明现象中的线性极化率·····	157
9.1.3 电磁感应透明现象中的非线性极化率·····	161
9.1.4 基于电磁感应透明效应的非线性光学频率变换·····	165
9.2 长寿命自旋相干固体介质中的原子相干现象·····	166
9.3 紫翠宝石中基于禁戒跃迁能级间原子最大相干性产生太赫兹波···	174
参考文献·····	179

第 1 章 太赫兹波简介

1.1 太赫兹波独特性质

太赫兹(THz)波是指频率在 $0.1\sim 10\text{THz}$ ($1\text{THz}=10^{12}\text{Hz}$) 的电磁辐射(波长约为 $30\sim 3000\mu\text{m}$), 它的波长介于微波与红外波之间^[1,2], 如图 1-1 所示。在频域上 THz 波处于宏观向微观过渡区域; 在辐射机制上 THz 波处于经典电磁辐射向量子跃迁过渡区域。长期以来, 由于缺乏有效的 THz 波产生和检测方法, 人们对于该波段电磁辐射性质的了解非常有限, 以致该波段被称为电磁波谱中的太赫兹空隙。近年来由于自由电子激光器和激光非线性光学技术的发展, 为 THz 波的产生提供了稳定、可靠的激发光源, 使 THz 辐射的产生机理、检测技术和应用技术的研究得到蓬勃的发展。

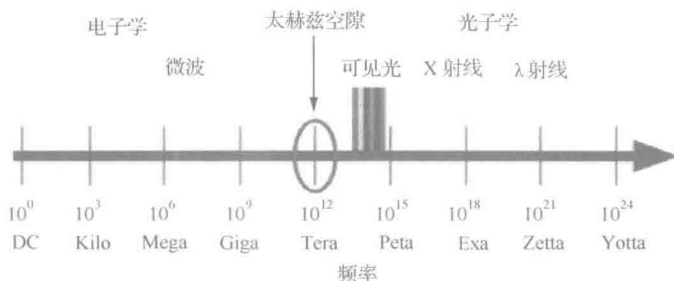


图 1-1 电磁波谱图

物质的 THz 光谱(包括发射、反射和透射)包含丰富的物理和化学信息, 如凝聚态物质的声子频率、大分子(包括蛋白质等生物分子)的振动光谱均在 THz 波段有很多特征峰, 凝聚态物质和液体中的载流子对 THz 辐射也有非常灵敏的响应。研究有关物质在这一波段的光谱响应, 探索其结构性质及其所揭示的新的物理内容已成为一个新的研究方向。此外, 作为一种新型超快相干脉冲光源, 与传统相干光源相比, 超快 THz 辐射具有其独特的性质。

(1) THz 波带很宽, 可以覆盖从 100GHz 到 10THz 的范围, 不仅非常适合对某些凝聚态体系进行吸收光谱的研究, 而且有望利用它进行无线电通信。

(2) THz 波的频率很高, 是微波的 1000 倍以上, 所以空间分辨率很高^[3]。

(3) THz 波通常由相干电流驱动的偶极子振荡或由相干的激光脉冲通过非

线性光学参量、差频过程产生,因此,THz 波具有很高的时间和空间相干性。

(4) THz 波能量低。当频率恰好为 1THz 时,光子能量只有大约 4meV,因此它不会对被检测的生物组织产生有害的电离,在医学成像方面有很好的应用前景^[4,5]。用它作为成像技术中的辐射源,可以避免以往用 X 射线医学成像技术带来的副作用,而且还具有图像更清晰和对比度更高的特点,在影像上表现非常出色,因此可大量应用到细胞及器官的鉴定或成像放射诊断和遗传基因研究。

(5) 穿透性强,除了金属和水对 THz 波有较强吸收,THz 波对其他物质都有很好的穿透性,因此,THz 波在安全检查、反恐领域的应用前景被人们普遍看好^[6-9]。另外,由于物质的 THz 光谱(包括发射、反射和透射)包含丰富的物理和化学信息,如凝聚态物质的声子频率、大分子(包括蛋白质等生物分子)的振动光谱均在 THz 波段有很多特征峰,凝聚态物质和液体中的载流子对 THz 辐射也有非常灵敏的响应。研究有关物质在这一波段的光谱响应对探索其结构性质具有重要意义。

1.2 太赫兹波应用

1. THz 成像技术

可见光、X 射线、电子束、中近红外光和超声波是医学诊断、材料分析以及在工业生产等诸多领域广泛应用的主要成像信号源。与以上的光源相比,THz 波辐射对于电介质材料具有类似的穿透效果,除了可测量由材料吸收而反映的空间密度分布外,还可通过位相测量得到折射率的空间分布,获得材料的更多信息,这是 THz 波时域光谱的独特优点。此外,THz 源的光子能量极低,没有 X 射线的电离性质,不会对材料造成破坏。因此,THz 成像技术有望在安全检查(图 1-2)和医学检查^[10](图 1-3)等方面成为 X 射线检测的补充手段。



图 1-2 安全检查

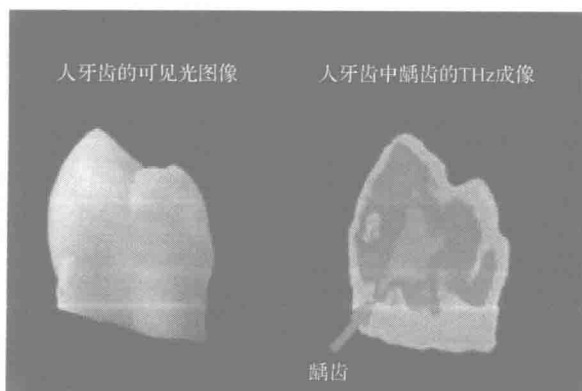


图 1-3 龋齿的 THz 成像

THz 成像所依据的基本原理是:透过成像样品(或从样品反射)的 THz 电磁波的强度和相位包含了样品复介电函数的空间分布。将透射 THz 电磁波的强度和相位的二维信息记录下来,并经过适当的处理和分析,就能得到样品的 THz 图像。

2. 医疗诊断

THz 电磁波在医疗诊断及生命科学研究中有重要价值。由于很多生物大分子及 DNA 的振动能级处于 THz 波段,其 THz 光谱(包括发射、反射和透射)包含丰富的物理和化学信息,所以 THz 辐射可用于生物体的探测和疾病诊断。利用 THz 辐射直接检测基因物质(如 DNA 和 RNA)的结合状态,可以实现在生物芯片技术中的基因分析的无标记工作方式。另外,由于 THz 波辐射对水分子很敏感,并且可能区分束缚水分子和自由水分子,所以通过探测含水量可以区别生物体的健康组织和病态组织。也可以通过测量生物组织对 THz 辐射的不同响应,得到生物组织的健康和病态特征标记图。THz 电磁波在生物和医学中的各种应用,被公认为最有可能首先取得重大突破,具有很大的应用潜力。

3. 天文学

在宇宙中,大量的物质在发出 THz 电磁波^[1]。碳、水、一氧化碳、氮、氧等大量分子可以在 THz 频段进行探测。而有些物质在应用 THz 技术以前一部分根本无法探测,而另一部分只能在海拔很高或者月球表面才可以探测到。

4. 通信与雷达

THz 电磁波是很好的宽带信息载体,THz 电磁波比微波能做到的信道数多得多,特别适合于卫星间及局域网的宽带移动通信。国际通信联盟已指定 200GHz 的频段为下一步卫星间通信之用,进一步的发展必定进入 300GHz 以上的范围,这实际上就是 THz 通信。THz 电磁波的光子能量约为可见光的光子能量的 1/40,因而利用 THz 波做信息载体比可见光或近中红外能量效率高得多。从技术特点上看,由于 THz 辐射具有比微波更短的波长以及更为精确的时间检测装置,THz“雷达”技术可以探测比微波雷达更小的目标和实现更精确的定位,因而 THz“雷达”技术有望在军事装备的实验室模拟研制、安全监测和医学检验上发挥其潜力。在实验室,已经利用 THz“雷达”技术对动物组织的烧伤进行了探测,并且可以对烧伤深度和程度作出标定,以辅助诊断皮肤的烧伤程度。

5. 用于材料特性的研究

THz 波能够与低维半导体直接耦合。因为低维半导体中大多数特征能量尺度都处于 THz 范围,如带宽、带隙、费米能级、等离子体振荡频率、光学声子频率、

低维半导体带间距离以及通常磁场下回旋共振频率等,因而低维半导体系统在 THz 辐射作用下显示出许多有趣的现象和丰富的物理内涵,如 THz 辐射引起的电流抑制、THz 辐射的非线性载流子吸收、THz 光子辅助的共振能弛豫、超晶格多光子 Bloch 共振、多光子磁声子共振、光子增强的霍尔效应、THz 增强的回旋共振以及多光子辅助的 THz 吸收等。THz 测量技术的高信噪比和单个 THz 脉冲所包含的宽频带,使得 THz 技术能够迅速地对材料组成的微细变化作出分析和鉴定。随着信息技术的发展,目前对光电子材料响应速率的要求已经达到了 GHz 甚至 THz 的范围。THz 时域光谱技术的非接触测量性质在这一方面具有独特的优势,能够对半导体和电介质薄膜及体材料的吸收率和折射率进行快速、准确的测量,得到吸收率和折射率在 GHz~THz 频段精确的分布。特别应该指出的是,THz 脉冲的相干测量技术在获得脉冲电场振幅的同时,也直接测量了脉冲各频率分量的位相,而不需要求助于 Kramers-Kronig 关系来间接得出。这一特性使 THz 技术尤其适用于材料折射率的检测,这往往是传统的光学方法所难以测量的。在传统的 THz 时域谱测量系统的基础上,加入对被测样品的调制,就形成了 THz 时域光谱技术。应用此技术可实现对微米乃至亚微米量级厚度的薄膜进行介电常量的测量。THz 时域光谱技术对材料的光学常数测量的精度可高于 1%。

尽管 THz 技术有广泛的应用前景,但是现阶段 THz 波的应用还是存在很多限制因素。首先是技术上的限制,虽然 THz 波辐射源在过去二十多年已有了快速发展,但是实际应用中还是缺乏高能量、高效率、可调谐、低成本、紧凑性、室温运转的 THz 波辐射源,而且 THz 波段有效的功能器件也有待研究开发。除了技术上的限制,THz 波本身的特点也限制了其应用范围。THz 波辐射无法穿透导电的物体,所以不能对金属等导体材料进行透视研究。另外水对 THz 波有强烈的吸收,所以远距离传输 THz 波受到了极大的限制。

人们最早对 THz 波的关注源于对红外光的兴趣。Langley 为了探测红外辐射的能量,发明了辐射热计(bolometer),它利用物体的电阻随温度的变化来测量热辐射的能量。直到现在,bolometer 仍然是 THz 波段最灵敏的探测器。最早期的人工 THz 波辐射源是白炽灯或碘钨灯等非相干光源。相比于低亮度非相干的辐射源,激光具有高亮度、高相干性、方向性好、单色性等优点。在激光器发明后不久,Mathias 等就发明了气体 THz 波激光器^[12]。当时采用的是一种称为发光放电模式的激发机制。1965 年,Zernike 等^[13]利用钽玻璃激光器产生的双波长在石英晶体中差频得到了 THz 波辐射。1970 年 Chang 等^[14]发明了第一台气体 THz 波激光器,由于能很好地控制激发态,它逐渐替代了发光放电激发机制。通过更换不同的激光介质,由二氧化碳激光泵浦的 THz 激光器可以发射 1200 条以上的激光谱线。1980 年,Nishizawa 等^[15]利用一台调 Q 脉冲 YAG 激光器在 GaP 晶体中观察到了远红外辐射,研究了参量振荡器的阈值特性,并把增益介质推广到

GaAs、CdTe、CdS 晶体中。到了近二十年,THz 波辐射源迅速发展,其输出功率和效率都有了极大的提升。

目前产生 THz 波的方法主要有电子学方法和光子学方法两大类。电子学方法主要有自由电子激光器、量子级联激光器、返波振荡器(BWO)、耿氏振荡器、纳米速调管。电子学方法是将电磁辐射的频率从毫米波延伸到 THz 波段,但是当频率高于 1THz 时会遇到很大的困难,效率变得很低。同时电子学方法产生的 THz 波辐射源体积庞大,限制了其在很多领域中的应用。光子学方法主要有光整流、光电导、光学差频、光学参量振荡、光泵气体等方法,其主要原理是把可见光或者红外光向 THz 波段转换。这种方法的优点是可以产生方向性和相干性很好的 THz 波辐射,但是现阶段其功率和效率都比较低。图 1-4 给出电子学方法和光子学方法产生的 THz 波辐射源频率和输出功率的比较。

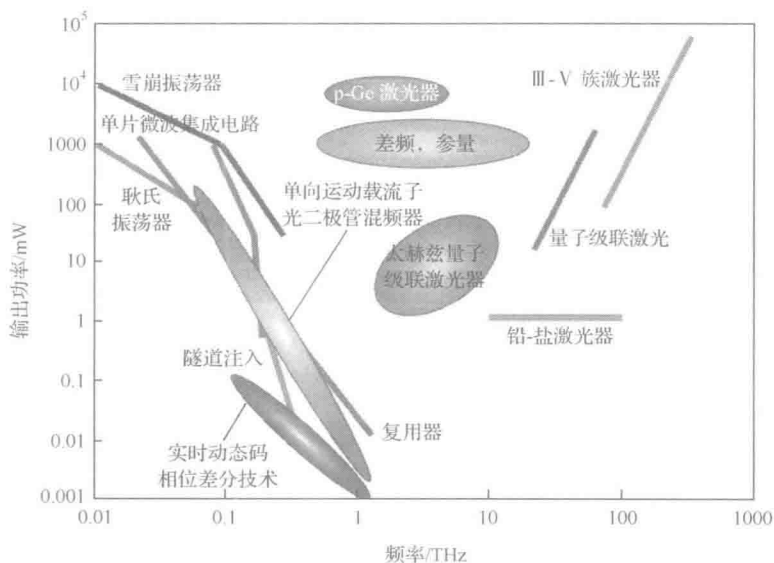


图 1-4 电子学方法和光子学方法 THz 波辐射源产生频率和输出功率的比较

本书主要研究基于光学参量方法产生高功率 THz 波辐射,所以重点综述基于光学参量方法的 THz 波辐射源。

1.3 光学参量太赫兹辐射源发展概述

1.3.1 参量效应太赫兹辐射源

光学参量振荡产生 THz 波辐射的原理是:功率足够强的泵浦光与晶体中同时

具有红外活性和拉曼活性的晶格振动模耦合,激发出 Stokes 光子和电磁耦子,在电磁耦子色散曲线上小波矢处的受激电磁耦子散射就是 THz 波辐射。

早在 20 世纪 60 年代,日本科学家 Nishizawa 就预言了在闪锌矿结构晶体中经受激电磁耦子散射可以产生 THz 波^[16,17]。1965 年,美国科学家 Henry 等计算了在 GaP 晶体中参量振荡产生 THz 波的角度调谐特性和相位匹配特性^[18]。1968 年,贝尔实验室的 Henry 等^[19]推导了立方晶体受激电磁耦子散射过程中 THz 波的参量增益表达式。同年,贝尔实验室的 Kurtz 等^[20]在 LiNbO₃ 晶体中观察到了 631cm⁻¹ 的远红外辐射。1969 年,斯坦福大学的 Yarborough 等^[21]利用调 Q 红宝石激光器泵浦 LiNbO₃ 晶体,利用光学参量效应产生了 THz 波辐射。1983 年日本科学家 Suto 等^[22]在 GaP 晶体中观察到了 Stokes 光和远红外辐射。

20 世纪 80 年代以后,由于没有性能优良的泵浦源和增益介质,THz 波参量振荡技术发展缓慢,一度陷入停滞。直到 90 年代中期,随着高性能增益介质的出现,日本的 Ito 和 Kawase 又开始对 THz 波参量技术进行深入研究,取得了一系列的成果,使太赫兹波参量振荡器(TPO)达到高效率、高功率、小型化、实用化。由于 THz 波在 LiNbO₃ 晶体中的折射率非常大($n_T > 5$),所以参量振荡产生的 THz 波会在晶体的出射面发生全反射。为了有效耦合出 THz 波,1996 年,Kawase 等^[23]在 LiNbO₃ 晶体表面刻光栅来耦合输出 THz 波,利用光学参量振荡技术使 THz 波的输出功率提高了 250 倍。1999 年,Shikata 等^[24]研究了 LiNbO₃ 晶体和 5%mol MgO 掺杂的 LiNbO₃ 晶体在 THz 波段的色散和增益特性。实验结果表明,LiNbO₃ 晶体和 MgO : LiNbO₃ 晶体在 THz 波段的色散特性没有很大区别,但是 MgO : LiNbO₃ 晶体的增益要比 LiNbO₃ 晶体大五倍,而且 MgO : LiNbO₃ 晶体的光损伤阈值要高很多,所以 MgO : LiNbO₃ 晶体更适合于参量振荡产生 THz 波。由于 MgO : LiNbO₃ 晶体对 THz 波吸收系数很大,所以极大地限制了 THz 波的输出功率。为了有效降低 MgO : LiNbO₃ 晶体对 THz 波的吸收,Shikata 等^[25]研究了在温度为 78K 时 MgO : LiNbO₃ 晶体在 TPO 中的表现。实验结果显示,TPO 振荡阈值降低了 32%,THz 波的输出功率提高了 125 倍,但是低温工作的 TPO 给实际应用带来了不便。2001 年,Imai 等^[26]实现了 THz 波频率调谐输出的 TPO,通过束流扫描器和一个望远镜系统改变泵浦光和 Stokes 光的夹角来实验 THz 波的调谐输出,调谐范围为 1~2THz,如图 1-5 所示。2001 年,Kawase 等^[27]利用一排设计好的硅棱镜,紧紧地贴在 LiNbO₃ 晶体的侧面耦合出 THz 波,耦合效率提高了 6 倍,从而实现了更宽调谐范围的 THz 波输出,调谐范围为 1~3THz。2001 年,Imai 等^[28]利用种子注入 Stokes 光实现了窄线宽的 THz 波输出,如图 1-6 所示。种子源波长为 1070nm,线宽小于 1MHz,注入种子有效地降低了 TPO 的阈值,压窄了 THz 波的线宽,输出 THz 波的线宽为 200MHz。2006 年,Ikari 等^[29]实现了 THz 波表面垂直输出 TPO,如图 1-7 所示。由于 LiNbO₃ 晶体

对 THz 波的吸收很大,所以在 THz 波的耦合输出过程中要尽量减小 THz 波在晶体中传播的距离。在 THz 波表面垂直输出 TPO 中,产生 THz 波最强的区域恰好在 Stokes 光的全反射点处,这样极大地减小了 THz 波在晶体中的传播距离,降低了阈值,使 THz 波的输出功率得到极大的提高。而且由于没有使用硅棱镜耦合输出 THz 波,THz 波的光束质量得到很好的改善,在水平方向上 THz 波的 M^2 因子为 1.15,在垂直方向上为 1.25。2010 年,Ikari 等^[30]利用一束能量为 465mJ、光斑直径为 8mm 的泵浦光,在浅表垂直输出 TPO 中实现了高能量高效率的 THz 波输出。在 1.46THz 处,THz 波的最大输出能量为 382nJ,能量转换效率为 0.9×10^{-6} 。由于采用的是非共线相位匹配,所以泵浦光、Stokes 光和 THz 波三者之间的有效相互作用体积的大小决定了 THz 波的输出功率。当泵浦光的光斑直径较大时,产生的 Stokes 光和 THz 波也具有较大的光斑直径,在相位匹配角一定的情况下,三者之间的相互作用体积会有效增大,从而有效提高 THz 波的输出功率。2011 年,Li 等^[31]在 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 晶体中参量振荡产生了高功率的 THz 波输出,THz 波的调谐范围为 0.79~2.84THz,最大输出能量为 193.2nJ/pulse,能量转换效率为 2.42×10^{-6} 。

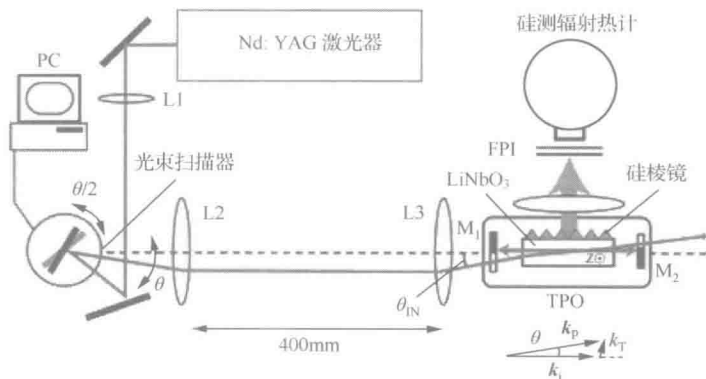


图 1-5 频率调谐输出 TPO

以上 TPO 增益介质都是 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 晶体。 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 晶体对 THz 波的吸收较大,产生的 THz 波大部分被晶体吸收,所以很难产生高功率的 THz 辐射。近年来,有科研小组通过 KTP、KTA 晶体产生 THz 波。2014 年,Wang 等^[32]用 KTP 晶体采用浅表垂直出射 TPO 实现了高功率、可调谐的 THz 波输出。THz 波的调谐范围为 3.17~3.44THz、4.19~5.19THz、5.55~6.13THz。在 5.72THz 处产生 336nJ 的单脉冲 THz 输出。Wang^[33]用 KTA 晶体采用浅表垂直出射 TPO 实现了高功率、可调谐的 THz 波输出。THz 波的调谐范围为 3.59~3.96THz、4.21~4.50THz、4.90~5.16THz、5.62~5.66THz、5.92~6.43THz。在 4.30THz 处产生 627nJ 的单脉冲 THz 输出。

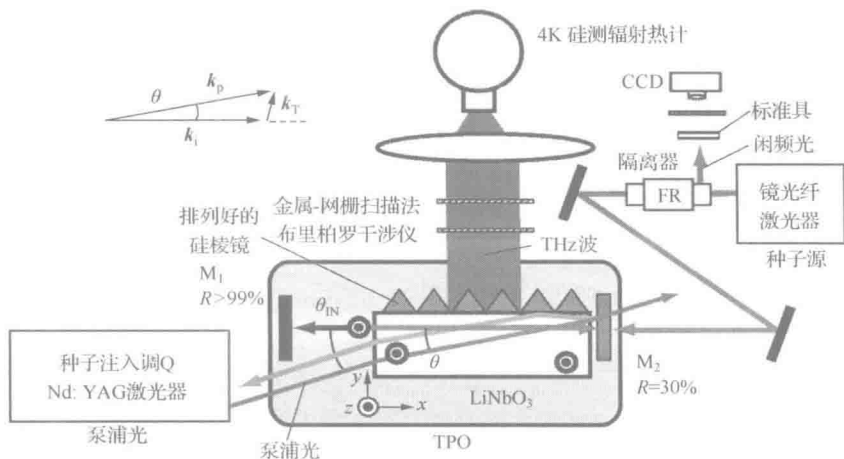


图 1-6 种子注入 TPO

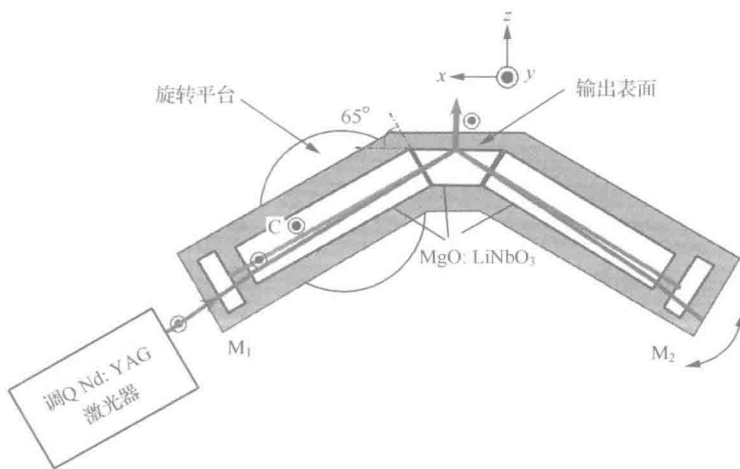


图 1-7 THz 波表面垂直输出 TPO

在 TPO 发展的同时,人们对 TPG 也产生了浓厚的兴趣。TPG 与 TPO 最大的区别是 TPG 中 Stokes 光没有谐振腔。由于没有经过选频装置,输出的 THz 波的线宽很宽。通常 TPG 输出的 THz 波线宽超过 500GHz,输出功率远低于 TPO。2001 年,Kawase 等^[34]实现了种子注入 TPG,如图 1-8 所示。在 1.58THz 处,THz 波的线宽小于 200MHz,输出 THz 波的能量为 900pJ/pulse,峰值功率大于 100mW,比普通 TPG 的输出功率提高 300 倍以上。2006 年,Guo 等^[35]实现了全固态、窄线宽、频率调谐输出的 TPG。THz 波的线宽为 50MHz,调谐范围为 0.6~2.4THz,整个调谐范围用时 70s,并且可以实现快速、平稳的调谐。2009 年,

Hayashi 等^[36]进一步提升了 TPG 的性能,实验装置如图 1-9 所示。利用一台性能优越的端面泵浦被动调 Q Nd:YAG 激光器,种子注入 LiNbO₃ 晶体实现了 THz 波的宽调谐输出,调谐范围为 0.9~3THz,峰值功率为 100mW,线宽低于 10GHz。

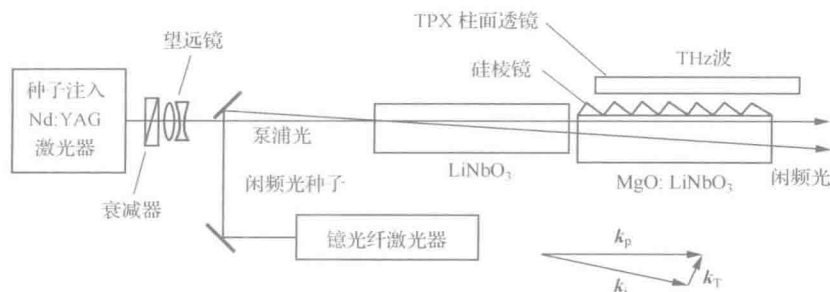


图 1-8 种子注入 TPG

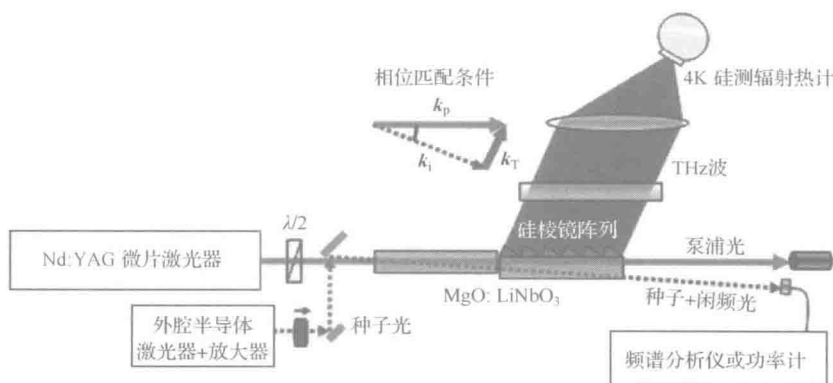


图 1-9 种子注入 TPG, 泵浦源为端面泵浦被动调 Q Nd:YAG 激光器

前面主要介绍了外腔 TPO 和 TPG 的发展情况。外腔 TPO 的优点是结构简单、调谐方便,但是相对于内腔 TPO,其转换效率较低,THz 波输出功率也较低。2006 年,英国圣安德鲁斯大学的 Edwards 等^[37]在 Nd:YAG 激光器基频光谐振腔内放置一块 MgO:LiNbO₃ 晶体,采用基频光谐振腔和 Stokes 光谐振腔交叉结构产生可调谐输出的 THz 波。由于 LiNbO₃ 晶体放置在基频光谐振腔内,所以受到高功率循环泵浦光的激励。而且泵浦光和 LiNbO₃ 晶体之间不需要其他的光学耦合装置。采用这套装置,TPO 阈值为 1mJ,获得了范围在 1.2~3.05THz 的 THz 波输出,其峰值功率为 1W,线宽小于 100GHz。2008 年,同一个科研小组的 Stothard 等^[38]改进了内腔 TPO,取得了更佳的性能。他们在基频光谐振腔和 Stokes 光谐振腔分别放置一块标准具,得到了线宽为 1GHz 的 THz 波输出,调谐范围为 1~3THz,峰值功率达到 3W。2009 年,同一个科研小组的 Walsh 等^[39]采