

太赫兹科学技术的研究和应用新进展^{*}

杜勇^{1,2}, 马中华¹, 陈朝阳¹, 林月美¹

(1. 集美大学信息工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 厦门大学电子工程系, 福建 厦门 361005)

摘要: 太赫兹波技术在物理、化学、生命科学等基础研究学科, 以及医学成像、安全检查、产品检测、空间通信、武器制导等应用学科都具有重要的研究价值和应用前景。从 THz 辐射源、THz 波的检测及标定、THz 波与物质相互作用和 THz 波的应用 4 个方面概述了太赫兹科学技术的研究和应用新进展。

关键词: THz 波的产生; THz 波的检测; THz 器件

中图分类号: O441.4

太赫兹(Terahertz, 简称 THz)波^[1]是指频率在 0.1~10THz (1THz=10¹²Hz, 或波长为 30 μm~3 mm)范围内的电磁波。它在长波段与毫米波有重叠, 而在短波段, 它与红外线有重叠。THz 波在频域上处于宏观经典理论向微量量子理论的过渡区, 处于电子学向光子学的过渡区域; THz 波的光子能量很低, 不会对物质产生破坏作用; 频谱极宽, 覆盖了各种包括凝聚态物质和生物大分子在内的转动和集体振动频率。THz 科学技术有很重要的学术研究价值, 在国民经济和国防建设领域有着极其重要的应用前景。THz 科学技术包含 4 个方面的工作, (1)THz 辐射源; (2)THz 波的检测及标定; (3)THz 波与物质相互作用; (4)THz 波的应用。其中 THz 源是最基础的研究工作, 需要通过不同的途径发展相干的 THz 辐射源。

1 太赫兹辐射源

常见的 THz 波的产生方法有 4 种: 半导体 THz 源(包括 THz 量子级联激光器等)、基于光子学的 THz 发生器、利用自由电子的 THz 辐射源(包括 THz 真空器件, 电子回旋脉塞和自由电子激光)和基于高能加速器的 THz 辐射源。重点介绍前两种。

1.1 半导体太赫兹辐射源

固态 THz 源具有小巧、价格低廉和频率可调的特点, 是人们希望的一种 THz 源。但半导体器件的工作频率难于达到 1THz 以上, 而半导体 THz 激光器, 特别是 THz 量子级联激光器是目前的发展重点之一。量子级联激光器(QCL)是以异结构半导体(GaAs/AlGaAs)的导带中的次能级间的跃迁为基

础的一种激光器。利用纵向光学声子的谐振产生粒子数反转。2002 年的结果是频率 4.4 THz, 温度 50 K, 脉冲功率 20 mW。到 2004 年, 美国 MIT 最新的结果是: 2.1 THz, CW 功率 1 mW (温度 93 K), 脉冲功率为 20 mW (温度 137 K)。到 2005 年, MIT QCL 已经用于 THz 成像。在我国, 中国电子集团南京 55 所, 渡越雪崩二极管可以做到 0.1 THz。中国科学院上海微系统研究所和中国科学院半导体研究所, 已开展 QCL 的研究工作并已作出一定的成果。

1.2 基于光子学的太赫兹辐射源

飞秒激光脉冲的发展给 THz 源带来了很大的机遇。已经发展了很多基于飞秒激光脉冲和非线性光学晶体的 THz 激光源。如 THz 光导天线、光整流、非线性差频、THz 参量振荡器和放大器(TPG, TPO, TPA)和光学 Cherenkov 辐射等。这种方法产生的 THz 辐射, 可以是脉冲的, 也可以是连续波的。光脉冲通过非线性光学晶体可产生 THz 辐射。差频发生器(DEG), 是一个三波混频非线性过程, 可产生 THz 辐射。天津大学姚建铨院士的课题组在这方面开展了研究工作, 并取得了一定的成果。

2 太赫兹波段信号的检测

在 THz 波段的开发和利用中, 信号的检测具有重要意义。与较短波长相比, THz 波段光子能量低, 背景噪声常常占据显著的地位。为了充分发挥 THz 系统的作用(例如, 发现更微弱的目标、在更远的距离上通讯等等), 不断提高接收的灵敏度也是必然的追求。在不同的频率应选择不同的检测器。在

* 基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2006G0410)

THz 的低端,一般倾向于外差式的检测器,而在 THz 的高端,直接检测器的灵敏度更好一些。中国科学院上海微系统与信息技术研究所曹俊诚研究员的课题组^[2]在这方面开展了研究工作。常见的探测分类方法如表 1 所示。

表 1 探测方法分类

THz wave detectors	Character and application
1. Bolometer	It can be used to detect the wavelength of THz and incoherent radiation It can detect the energy of the signal more than 1Nj and can only be used to detect incoherent radiation
2. Pyroelectric detector	
3. Electro-optic crystal with	Large aperture femtosecond
4. Laser	Broad bandwidth
5. Electronic detector	Low cost and compact
6. Photoconductive dipole and array	Low dark current, low noise

3 太赫兹功能器件

为了组成 THz 系统,例如 THz 成像和 THz 波谱等,除了 THz 源和检测系统外,其内部连接也是非常重要的,所以需要一些功能器件,如传输系统、谐振系统等。因此,以波导为基础的太赫兹器件就成了太赫兹传输的重要基础,也是太赫兹波能否广泛应用的关键。近年越来越多的科学家投入到该领域的研究中,因而出现了诸如太赫兹金属波导、光子晶体波导、光子晶体光纤、聚合物波导、塑料带状波导和蓝宝石光纤等不同类型的太赫兹波导器件,它们不但在传输性能方面愈显其优越性,而且体积越来越小,便于制成集成器件。

3.1 用于太赫兹功能器件制作的光子晶体

光子晶体是折射率在空间周期性变化,存在一定光学能带间隙的介质结构,具有一定的光学禁带和通带,对于某些波长是不能透射过。光子晶体的折射率在空间排列的周期是波长量级。光子晶体的材料对工作波段的光的吸收很小。与固体能带理论类似,在完美的光子晶体中也可以引入杂质和缺陷,使严格的周期结构破坏,这些缺陷能够束缚一定频率的光子,产生局域化的能级,这部分局域态位于光学禁带之中。在光子晶体中也可以引入不同类型的缺陷,点缺陷,线缺陷和面缺陷等,这些缺陷的控制是光子晶体实现各种功能的基础。利用光子晶体的局域态可以制备光子晶体的波导,微腔,环形谐振

腔,分束器,耦合器等波导器件,可以制备出微型平面光学回路(PLC),也可能实现三维光学回路模块。光子晶体具有某些独特的光学特性,如微腔的高 Q 值性,超棱镜,大群折射率和负折射率等,使制备无阈值激光器,高效光放大器或其他功能器件成为可能。

利用光子晶体的非线性光学效应,使制造出光开关、光二极管,光三极管,光逻辑回路等器件成为可能,是制造全光集成芯片的基础。

3.2 光子晶体在太赫兹科技中的应用

光子晶体在 THz 技术中,主要可以用来制作以下各种功能器件^[3]:光子晶体 THz 传输线、波导,光子晶体 THz 谐振腔,光子晶体 THz 滤波器,光子晶体 THz 波偏振器,光子晶体 THz 波开关,光子晶体 THz 波混频器,光子晶体 THz 波天线等。德国半导体研究所研究了 THz 波在光子晶体中的传播,结果表明,THz 波在硅二维光子晶体中能很好的传播,理论和实验相符;德国 Freiburg 大学 Sherwin Group 使用了激光化学蒸汽沉积技术,用 Al₂O₃ 陶瓷材料研究制作了 THz 波光子晶体;美国 UCSB (圣芭芭拉大学) Sherwin Group 研究制作了 THz 波光子晶体谐振腔,用硅材料使用离子蚀刻技术制成了三维光子晶体;日本 Osaka University 用彩色打印机制作 THz 金属光子晶体;日本物理化学研究所最近用多层约瑟夫结制作 THz 光子晶体滤波器、光子晶体 THz 谐振腔。美国 University of Delaware 用硅光子晶体制成微盘结构(microdisk)光子晶体微谐振腔。

4 结论

THz 科学技术是重要的发展极其迅速的交叉学科前沿,世界各国都给予极大的重视。由于 THz 处于电磁波谱的特殊位置,它具有极重要的学术价值和独特的性质,从而使它具有非常重要的多方面的应用,应进一步进行深入研究。

参考文献:

- [1] 许景周,张希成.太赫兹科学技术和应用[M].北京:北京大学出版社,2007:1-20.
- [2] 曹俊诚.太赫兹辐射源与探测器研究进展[J].功能材料与器件学报,2003,9(2):111-117.
- [3] 黄婉文,李宝军.太赫兹波导器件研究进展[J].激光与光电子学进展,2006,43(7):9-15.