

亚毫米波激光的应用领域及应用前景*

冉 勇^{a, b} 李太全^a 秦家银^{b, c}

(^a荆州师范学院物理系, 荆州 434104)

(^b中山大学超快速激光光谱国家重点实验室, 广州 510275)

(^c中山大学电子系, 广州 510275)

摘要: 阐述了亚毫米波研究、开拓的重大意义, 重点介绍和分析了亚毫米波激光在基础学科、天文物理、医学生物学研究以及军事、通信、工程等领域的应用及应用前景。

关键词: 亚毫米波 亚毫米波激光 亚毫米波激光的应用

The application field and forecast of submillimeter wave laser

Ran Yong^{a, b}, Li Taiquan^a, Qin Jiayin^{b, c}

(^a Department of Physics, Jingzhou Teacher College, Jingzhou 434104)

(^b State Key Laboratory of Ultrafast Laser Spectroscopy, Zhongshan University, Guangzhou 510275)

(^c Department of Electronics, Zhongshan University, Guangzhou, 510275)

Abstract: The importance of study on submillimeter wave (SMMW) is introduced. The applications of SMMW laser on basic disciplines, astronomy, physics, medicine, biology, military affairs, communication, engineering etc are reviewed and forecasted.

Key words: submillimeter wave SMMW laser application of SMMW laser

引 言

亚毫米波(SMMW)是介于微波与红外之间,波长约为0.03~1mm,相应频率约为300~10000GHz的电磁波,光学工作者又习惯称为远红外(FIR),是正处于开拓和发展之中的研究领域。在整个电磁波谱中,长波、中波、短波和超短波是最早发展并付诸广泛应用的波段,微波和光波段,其理论和技术已相当成熟,在国防、国民经济和科学研究等方面的应用是人们熟知的;红外波段的发展历史虽短(光量子振荡器在1960年以后问世),但由于优质红外探测器的解决,推动其迅猛发展,当今红外技术已在军事、工农业、医学和科研事业中有了广泛应用,而毫米波和亚毫米波,特别是亚毫米波还是正在开拓与发展中的波段,亚毫米波的开拓处于微波与红外科学研究的前沿领域。

这一领域的研究意义,首先在于它填补了电磁波谱中微波与红外之间的过渡区,进一步完善了人们对电磁辐射现象的深刻认识;其次,由于许多物质的转动和振动波谱均落在这一波段,因而深入研究亚毫米波的产生、探测以及它和其它物质的相互作用规律,必然会推动科学技术的发展;第三,它有着广泛的应用领域和美好的应用前景,与其它电磁波段相比较有其独特的优点和长处,在很多方面甚至是其它波段不可取代的,所以,对亚毫米波频谱资源的开发应用必将造福于人类,促进社会的文明与进步。

* 国家自然科学基金和高等学校重点实验室访问学者基金以及湖北省教委自然科学重点项目资助。

1 亚毫米波信号源

亚毫米波激光技术是正在开拓中的一个新的研究领域。过去,由于这一波段缺乏有效的信号源,阻碍了人们对这一频谱资源的开发应用。随着光泵亚毫米波激光器等多种有效信号源的问世,推动了亚毫米波激光技术及应用迅猛发展。常用的亚毫米波信号源主要有以下几种。

光泵亚毫米波激光器,即光泵远红外激光器是最常用的比较成熟的信号源之一。它是以 CO_2 激光器作泵浦源产生的中红外谱线去泵浦亚毫米波激光器样品管中的工作物质(如 NH_3 , CH_2F_2 , CH_3F , CH_3OH , HCN 等)而获得频率可调谐的亚毫米波激光^[1]。目前,光泵亚毫米波激光器的小型化、工作参数优化等方面的研究已取得重大进展^[2,3],向实现设计制作结构紧凑灵巧、小型高效、大功率输出、大范围频率可调的光泵亚毫米波激光器的目标迈进了一大步。

此外,比较流行的亚毫米波信号源还有热辐射源(高压水银灯、硅碳棒等),亚毫米波振荡器(如反波管振荡器、雪崩管振荡器和体效应振荡器),亚毫米波倍频器,非线性混频器(肖特基二极管混频器、约瑟夫逊结混频器),大功率回旋管,自由电子激光器等高能电子束器件。它们都能产生功率不同、用途各异的亚毫米波激光。从其发展的历史来看,它们主要分为两大类,一类是可见光与红外技术通过非线性光学方法向长波方向发展而成;另一类是微波技术向高频方向发展的电空器件。

2 亚毫米波激光的应用领域及应用前景

由于亚毫米波激光具有频率复盖面宽、谱线丰富、频率可调、方向性好、穿透能力强、能量集中等独特的优点,因此,亚毫米波激光的应用研究极为活跃,应用领域正不断开拓。根据有关文献报道,其应用领域归纳起来大致有如下几个方面。

2.1 基础学科研究

由于亚毫米波刚好落在分子振动能谱和转动能级跃迁的能谱上,因此,亚毫米波激光成为高精度确定极性分子激发振动态光谱学常数的有力工具^[4]。同时被大量用于研究液体、气体的振动波谱和确定高纯半导体中杂质能谱、杂质浓度及空穴和电子的有效数量^[5]以及固体、流体介电常数^[6]等物理特性;用于研究半导体的亚毫米波吸收特性^[7]和激活高度透明的压电晶体中的相干 THz 光子^[8];也可用于高温超导中的铜氧化物的电子自旋共振研究^[9]和约瑟夫逊结混频过程的测量以及确定晶体中的稀有物质;还可用于光频测量和频率标准等方面。在等离子体诊断方面,亚毫米波诊断技术是测量等离子体参数和性能的最重要最有效的手段。例如,利用亚毫米波激光的聚焦散射,研究托卡马克(Tokamak)等离子体的微观不稳定性是目前最好的方法^[10],常用的激光谱线有 $^{13}\text{CH}_3\text{F}$ 的1.22mm谱线、 CH_3I 的477 μm 谱线和 HCN 的337 μm 谱线等;利用大功率亚毫米波激光束的汤姆逊(Thomson)散射,仍然是目前受控核聚变反应实验中测定等离子体温度和杂质离子的定向分布及其有效电荷的唯一途径^[11];还可利用干涉法测量等离子体中电子的密度 N_e 和温度 T_e 。在等离子体加热方面,利用毫米波、亚毫米波的回旋共振吸收原理,对等离子体加热,具有效率高、可防止对托卡马克装置的污染及从未发现有加热饱和现象等独特的优点而倍受重视。例如,苏联的T-10装置,以3个脉冲功率为200kW、波长为3.3mm的回旋管并用,加热效率达90%;美国在ISX-B装置上,用脉冲功率为100kW、频率为35GHz、脉宽为10ms的回旋管加热,使电子温度 T_e 从850eV上升到1250eV,加

热效率达 80%。同时,还可利用大功率的光泵亚毫米波激光器对托卡马克受控热核反应装置进行瞬时局部加热,利用聚焦强度为 $40\text{kW}/\text{cm}^2$ 的光泵 CH_3F 分子亚毫米波激光器,研究气体回旋共振引起的雪崩电离和等离子体加热增强作用。

2.2 天体物理研究

随着亚毫米波技术的发展,天文学家和天体物理学家对亚毫米波段观测的兴趣日益增长。稳定的亚毫米波激光可以作为外差接收技术的本振源,而采用外差技术建造的亚毫米波射电天文望远镜可用于观测和研究天体及星际辐射,研究星际形成过程和星际介质化学性质等^[12]。实际上全世界已经建造了多座亚毫米波射电望远镜用于研究银河系星际云中复杂的物理状态及结构。德国马·普射电所和美国亚利桑那州天文台合作研制了一台 10m 长的亚毫米波射电望远镜,工作波长为 $3\text{mm} \sim 35\mu\text{m}$,总反射面精度高达 $15\mu\text{m}$,指向精度 $1''$ 。英国和荷兰合作研制的 15m 长的亚毫米波射电望远镜,工作波长最短 0.4 mm,总反射面精度高达 $35\mu\text{m}$,指向精度 $1''$ 。

2.3 医学生物学研究

如同微波能用于医学生物学一样,亚毫米波在生物及医学研究中的应用已开始引起注意。有些学者认为亚毫米波辐射在治癌方面可能会有很好的作用,其中,日本、德国和英国均开展了一些亚毫米波辐射与生物体相互作用的研究^[13]。英国国家物理实验室开展了测量氨基酸、溶菌酸、丙氨酸、白蛋白及血红蛋白等构成生物体的基础物质的亚毫米波物理常数^[14],这是研究亚毫米波与生物体相互作用以及生物分子结构鉴定的基础工作。在医学方面,乌克兰学者研究了亚毫米波辐射对人体的影响,在临床上亚毫米波辐射被用于免疫系统紊乱的处理、胃及十二指肠溃疡的治疗以及痛风的治疗。另外,还可利用微波-亚毫米波共振原理治疗骨髓炎。在我国也报道研制成功了毫米波亚毫米波治疗仪,在临床上均取得了较好的效果。

2.4 空间通信和军事应用

有关亚毫米波大气透射的测量表明,亚毫米波在 $350\mu\text{m}$, $450\mu\text{m}$, $620\mu\text{m}$, $735\mu\text{m}$ 和 $870\mu\text{m}$ 波长附近存在着相对透明的大气窗口^[15]。与微波通信相比,远红外波束较窄,波束方向性好,可实现外差接收,可以作定点保密通信或作宽频带、大容量的通信系统,因此,是将来用于多媒体传输大容量无线通信的希望。在外层空间,亚毫米波可以无损耗的传输,用很小的功率就可实现远距离通信,而且相对于光谱通信,其波束较宽,容易对准,量子噪声较低,天线系统可以实现小型化平面化^[16]。另外,亚毫米波在空间技术上的另一个重要应用是与重返大气层的飞行器(如导弹、人造卫星、宇宙飞船等)进行通信和遥测。当飞行器重返大气层时,由于空气摩擦产生高温,飞行器周围的空气被电离形成等离子体,使通信遥测信号迅速衰减,造成信号中断。此时,亚毫米波是唯一有效的通信工具。因为等离子体中的电子在其平衡位置上以一个特征频率 f_p 作振动,它随电子数密度 N_e 的增加而增大。当工作频率 $f > f_p$ 时,等离子体可看作是低耗介质,电磁波可以透过它。当飞行器重返大气层,其周围浓密的等离子体的特征频率 f_p 迅速增大到光谱信号频率 $f < f_p$,信号被等离子体的谐振吸收而迅速衰减,造成常规通信中断。若以亚毫米波作为通信信号,其频率 f 始终大于 f_p ,其信号可以透过等离子体,使通信畅通无阻。因此,亚毫米波可以广泛应用在太空基地雷达和太空通信中^[17]。

亚毫米波穿透云层、浓雾及伪装物的能力比红外线强。这一特性在军事和国防上是很有价值的。利用它可以制作高分辨率全天候的导航系统,在浓雾中导航,指挥飞机着陆。利用亚

毫米波方向性强、能量集中的特点,可制作高分辨率的战场雷达和低仰角跟踪雷达。利用强流相对论电子束,能产生千兆瓦级的亚毫米波激光脉冲功率,这种超大功率的激光波束武器,能穿透等离子体,使进入大气层的导弹引爆或干扰其内部的电子设备使之失灵。利用亚毫米波能穿透伪装物成像的特点,用于对隐蔽物的探测,如探测衣服里层、包装箱等伪装物中的武器或违禁品。这一技术可用于公安侦破、民航安全检查或海关检查。前不久,在中央电视台新闻联播中,报道了清华大学利用亚毫米波激光技术研制成功了对集装箱的快速检查仪器,并已在海关应用。20 世纪 80 年代,美国的星球大战计划在发展太空通讯和雷达时,就选用了亚毫米波段。1992 年,美国航空航天部等联合提出,从 1995 年到 2010 年,要全面占领亚毫米波领域。

2.5 工程应用

亚毫米波激光在工业上的应用尚处于初始阶段,一些塑料,如聚乙烯、聚丙烯以及聚四氟乙烯等对亚毫米波是透明的,应用光学散射原理,可以用亚毫米波检查塑料中的气泡、杂质等。据此,美国联邦技术中心已经成功地用光泵亚毫米波激光器研制成无损伤连续检查海底电缆的样机,并投入使用^[18]。在能源工程方面,原子能、原子核能将是人类社会的主要能源。受控热核聚变反应的主要条件是产生高温,而大功率的光泵亚毫米波激光器和回旋管是对热核聚变装置中的等离子体进行加热或瞬时局部加热的最有效方法。

2.6 遥感与环保监测

遥感是一门新兴的技术,它成功地应用于农作物的估产、绘制地貌图、寻找矿藏、石油、天然气等地球资源、探明军事设施等方面。但通常所用的波段仅限于红外区的 $4 \sim 8 \mu\text{m}$,显然过窄,信息量小,而宽广的亚毫米波段一旦被广泛应用,将会使遥感技术发挥更大作用。亚毫米波辐射与大气分子之间的相互作用,为大气遥感应用提供了丰富的信息^[19]。例如,工作于 4100GHz (波长为 $42 \mu\text{m}$)的亚毫米波准光辐射计,可用于监测大气同温层中具有较高谐振频率的分子组成及行星、慧星间的大气,可在离地球 $3.6 \times 10^4 \text{km}$ 的同步轨道上监测地球周围快速变化的现象。利用波谱分析方法,亚毫米波可用于工业分析和环保监测^[20]。

3 结束语

目前,亚毫米波激光的应用正在不断开拓和发展之中,随着对亚毫米波激光研究的深入,它将进一步促进固体物理、半导体物理、等离子体物理、超导电子学、无线电波谱学、空间电子学、生物电子学等基础学科和边缘学科的发展。同时将在雷达、通信、国防、工业等方面得到前所未有的广泛应用和产生革命性变化。

参 考 文 献

- 1 冉 勇,秦家银.光电子·激光,1999,10(6):495
- 2 冉 勇,魏立生,秦家银.原子与分子物理学报,1998,15(1):34
- 3 秦家银,罗锡璋,郑兴世 *et al.*光学学报,1998,10(3):262
- 4 Chang T Y, McGee J D. A P L, 1971, 19: 103
- 5 Fetterman M R, Schlossberg H R, Parker C D. A P L, 1972, 21: 434
- 6 Qiu B, Qiu R. Int J IR&MMW, 1994, 15: 2069
- 7 Cohn D R. Phys Rev A, 1972, 26: 1367
- 8 Grill W, Weis O. Phys Rev Lett, 1972, 25: 588

-
- 9 Motokawa M. 3rd Int Conf on MMW&FIR&Scien&Tech ,1994 85
 - 10 Kawahta K , Tetsuka T , Fujita J *et al* . Int J IR&MMW ,1988 9 655
 - 11 Jassby D L. Nucl Fusion ,1974 ,14 :745
 - 12 Matsumoto T. 9th Int Conf IR&MMW , Digest ,1984 :119
 - 13 Taki T. 9th Int Conf IR&MMW , Digest ,1984 24
 - 14 Husain S K. 7th Int Conf IR&MMW , Digest ,1983 :1
 - 15 Bohlander T A , Mcmillan R W. Proc of IEEE ,1985 ,73 :49
 - 16 Rebeiz G M. Int J IR&MMW ,1987 8 :1249
 - 17 Freking M A. Int J IR&MMW ,1987 8 :1211
 - 18 Contor A J ,Cheo P K. IEEE J Q E ,1981 ,17 :477
 - 19 Hartwick J S. Appl Opt , 1976 ,15 :1919
 - 20 Koepf G A. Int J IR&MMW ,1980 ,1 :597

*

*

*

作者简介 :冉 勇 ,男 ,1946 年 6 月出生。副教授。长期从事物理教学及相关基础理论研究和激光物理研究。