

文章编号: 2095-4980(2013)04-0501-07

美国核武器实验室太赫兹技术与应用研究

朱礼国^{1a,1b}, 孟 坤^{1a,1b}, 彭龙瑶², 钟森城^{1a,1b}, 刘 乔^{1a,1b},
王德田^{1a}, 彭其先^{1a}, 赵剑衡^{1a,1b}, 李泽仁^{1a,1b}

(1.中国工程物理研究院 a.流体物理研究所; b.太赫兹科学技术研究中心, 四川 绵阳 621999;
2.四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610044)

摘 要: 超快激光技术、半导体技术以及电子技术的迅速发展为太赫兹波的产生提供了稳定、可靠的激发光源和探测器, 从而使太赫兹科学技术的研究和应用得到了蓬勃发展, 目前已成为国际上的研究热点。本文介绍了美国 3 大核武器实验室和美国重要国家实验室在太赫兹科学技术以及应用研究中开展的工作, 并对其太赫兹技术的发展态势进行了分析。简单分析了太赫兹技术对武器物理研究的促进作用及其研究方向, 例如: 极端条件下材料的太赫兹表征与调控研究、含能材料化学反应动力学研究、冲击波与爆轰物理瞬态诊断研究等。

关键词: 太赫兹源; 关键器件; 光谱成像; 发展态势; 武器物理

中图分类号: TN012; O433 **文献标识码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201304.0501

Investigation of Terahertz technologies and their applications in U.S. nuclear weapon labs

ZHU Li-guo^{1a,1b}, MENG Kun^{1a,1b}, PENG Long-yao², ZHONG Sen-cheng^{1a,1b}, LIU Qiao^{1a,1b},
WANG De-tian^{1a}, PENG Qi-xian^{1a}, ZHAO Jian-heng^{1a,1b}, LI Ze-ren^{1a,1b}

(1a.Institute of Fluid Physics; 1b.Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China;
2.College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610044, China)

Abstract: Due to the rapid development of ultrafast laser technology, semiconductor technology and electronics, stable and reliable THz sources and detectors become available, which leads to flourish for Terahertz science and technology. This article describes the work carried out by major U.S. nuclear weapons laboratories and other national laboratories. The development trends of terahertz science and technology are analyzed as well. The possible applications of THz technologies are discussed in the research of weapon physics, including the characterization and the tuning of materials under extreme conditions, energetic materials chemical kinetics, and ultrafast diagnosis of shock wave and detonation physics.

Key words: Terahertz sources; advanced devices; spectral imaging; development trend; weapon physics

由于太赫兹波的产生和探测比较困难, 长期以来成为电磁波段上最后一块未被揭示和研究的领域, 被人们称为“太赫兹空隙(Terahertz gap)”。20 世纪 80 年代以后, 超快激光技术和半导体技术的迅速发展提供了稳定、可靠的太赫兹波激发光源和探测器, 使太赫兹科学技术的研究和应用得到了蓬勃发展, 促成了一个新的研究领域——太赫兹科学技术的诞生。太赫兹科学技术是近二十年以来新开发的电磁波段, 是目前国际上研究的热点。2004 年美国能源部举办了“太赫兹科学的机遇”(Opportunities in Terahertz Science)研讨会, 我国也于 2005 年举行了主题为“太赫兹科学技术的新发展”的第 270 次香山科学会议, 这一系列的里程碑事件更是将太赫兹技术的发展推向了一个高点。经过多年的发展, 太赫兹技术在某些方面已经趋于成熟, 美国的核武器实验室以及许多重要国家实验室都已在太赫兹科学技术以及应用研究中开展了许多工作, 并且获得了许多有助于武器物理研究的成功。

收稿日期: 2012-12-29; 修回日期: 2013-02-27

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术发展基金重点资助项目(2012A0401016)

为了借鉴和学习美国核武器实验室在太赫兹技术和应用研究方面的研究,通过调研分析了它们的研究现状和发展态势。

1 美国 3 大核武器国家实验室太赫兹技术发展态势

美国 3 大核武器国家实验室已经在太赫兹光源研究、关键器件研发、系统的研制以及武器物理应用研究方面开展了大量工作。

1.1 洛斯阿拉莫斯国家实验室

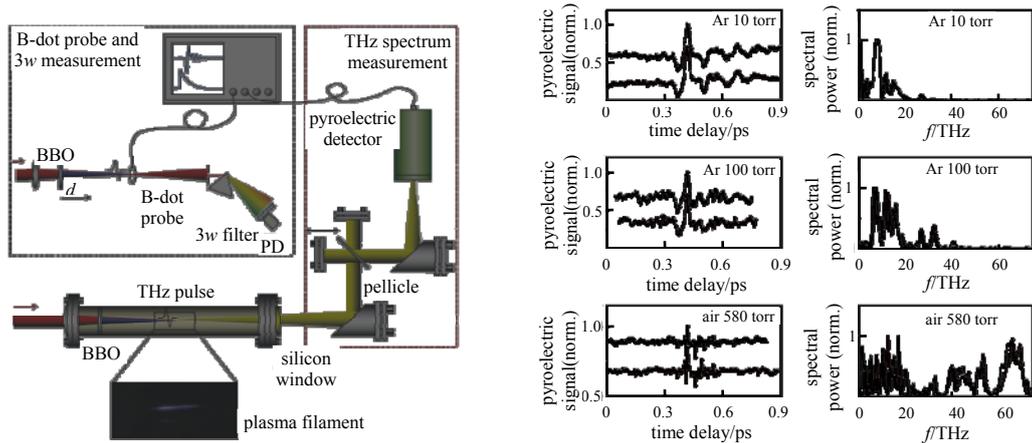


Fig.1 Setup and test results of ultra-broadband terahertz source
图 1 超宽谱太赫兹源原理图与测试结果

洛斯阿拉莫斯国家实验室(Los Alamos National Laboratory, LANL)隶属美国能源部,是美国设计核武器的 2 个机构之一。在太赫兹技术及应用研究方面,LANL 主要发展基于高强度飞秒激光系统的太赫兹时域光谱的光源、关键器件、探测技术以及应用的研究,其开展的工作在太赫兹光谱学与成像技术中门类多样,相对于其他 2 个核武器实验室研究方向更加全面。LANL 的工作主要在该实验室的材料物理及应用研究部(Materials Physics and Application Division)中开展,最终服务于 LANL 武器物理相关的材料研究。

在太赫兹光源研究方面,LANL 通过研究高强度飞秒激光(30 mJ,50 fs,10 Hz)与物质(电光晶体、半导体以及气体)相互作用以获取高功率超宽光谱超短脉冲的太赫兹脉冲光源;截止目前,LANL 所能获取的太赫兹脉冲光源具有以下性质:脉冲时间周期<1 ps、单脉冲能量>10 μJ、单脉冲内光谱范围 0 THz~30 THz(见图 1),最新结果发表于 2008 年的《Nature Photonics》^[1]杂志。

在太赫兹关键器件研发方面,LANL 主要研究基于超材料(Metamaterial)的固态太赫兹波调制器(见图 2),代表性论文发表于 2009 年的《Nature Photonics》^[2]杂志。

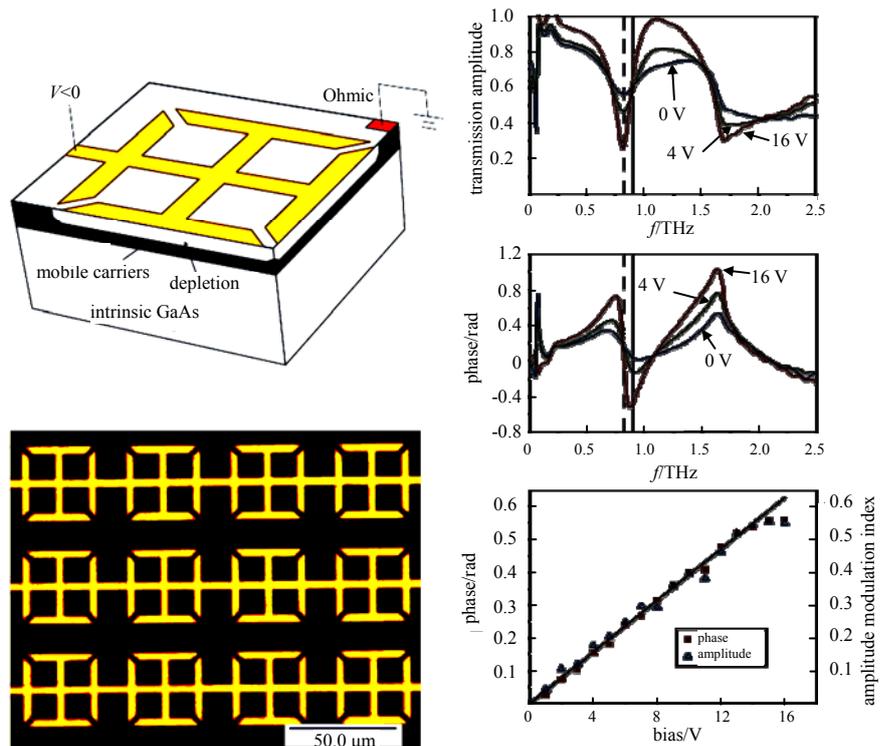


Fig.2 Structure and test results of solid-state terahertz wave modulator
图 2 固态太赫兹波调制器结构图和测试结果

在太赫兹波探测系统研制方面, LANL 主要围绕太赫兹时域光谱探测技术开展工作; 其中除了常规的基于光采样技术实现的时域光谱探测之外, 还在研制针对单太赫兹脉冲瞬态探测的时域光谱探测技术, 目前方案已经得到初步的实验验证, 为武器物理的瞬态过程诊断提供了可行性论证。

在太赫兹光谱应用研究方面, LANL 研究了强激光加载下武器物理相关材料——超强飞秒激光辐照下金属靶中超快温密物质的动力学过程, 该研究代表性工作发表于 2008 年的《Physical Review Letter》^[3](见图 3), 同时还在新型半导体量子材料和太赫兹生物效应方面完成了许多工作。LANL 在太赫兹光谱学与成像技术的研究门类齐全, 成果显著, 水平卓越。实验室正寻找和研究新的光谱和成像表征技术用来研究武器物理相关材料, 而这正是太赫兹光谱学与成像技术研究在该实验室蓬勃发展的主要原因。

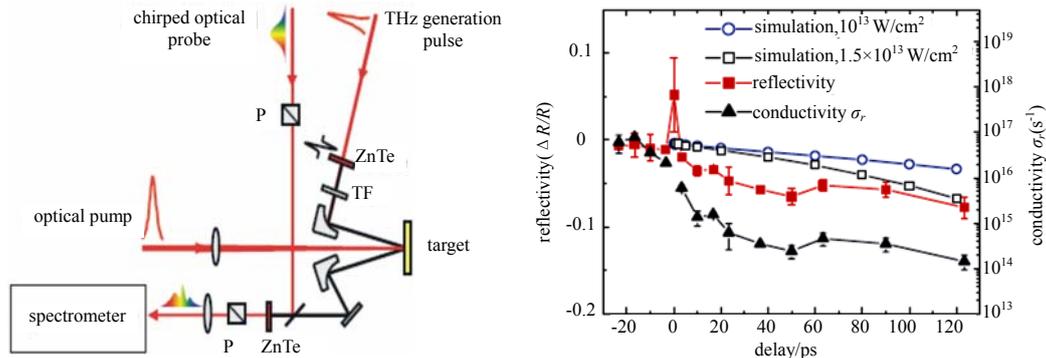


Fig.3 Experiment setup and results of investigating ultrafast warm dense matter dynamics
图 3 超强飞秒激光辐照下金属靶中超快温密物质研究的实验原理图和实验结果

1.2 劳伦斯利弗摩尔国家实验室

劳伦斯利弗摩尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)为美国能源部所属的国家研究机构, 与 LANL 是美国的 2 个为了核武设计而建立的部门。目前在太赫兹技术与应用研究方面, LLNL 主要利用现有的太赫兹光谱技术开展武器物理相关材料在冲击加载下和静态识别的研究。这些工作主要在化学材料及生命科学部(Chemistry, Materials, and Life Sciences Directorate)进行。研究内容分为 2 个大类: 冲击加载下晶体材料的物性研究和含能材料远距离光谱成像识别。LLNL 对于冲击加载下晶体物性的太赫兹辐射光谱研究水平在国际上领先。利用冲击波加载产生太赫兹波的性质, LLNL 实现了对超短超快(1 ps)冲击波波形的表征, 其代表工作分别发表在 2009 年的《Nature Physics》^[4]上(见图 4); 更重要的是他们利用冲击加载下晶格的太赫兹辐射光谱来研究晶格物性的变化, 为武器相关材料提供了新的表征技术, 代表性工作分别发表于 2006 年的《Physical Review Letter》^[5]上(图 5)。不难看出, LLNL 已经将太赫兹光谱技术用于武器物理研究; 同时, 该实验室的工作也为相关武器材料提供了太赫兹光谱研究的依据和可行性论证。

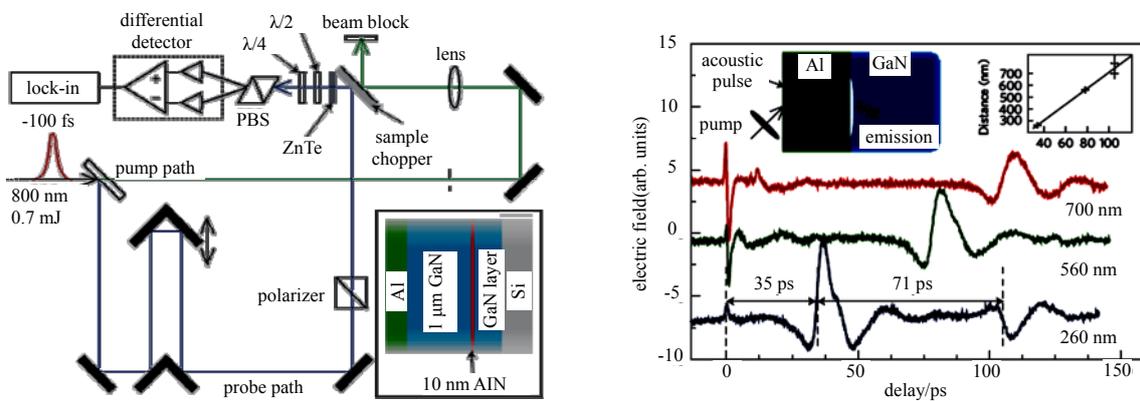


Fig.4 Experiment setup and results of terahertz emission by shock wave
图 4 冲击波加载产生太赫兹波的实验原理图和部分结果

1.3 圣地亚国家实验室

圣地亚国家实验室(Sandia National Laboratory, SNL)是美国能源部与美国电话电报公司子公司之一——桑迪公司联合管理的多计划实验室, 主要从事核武器系统中非核部分的研究开发。目前, 在太赫兹技术与应用研究

方面, SNL 主要从事基于半导体电子学的太赫兹关键器件的研制, 其中包括非相干太赫兹功率探测器、太赫兹晶体管以及太赫兹收发器等。SNL 利用其国际一流的半导体微电子微系统的加工能力和半导体光子学技术, 开展了大量的半导体太赫兹光子学器件的设计和制作工作。代表性工作包括利用新型半导体结构碳纳米管制太赫兹晶体管, 发表在 2009 年的《Physical Review Letter》^[6]上(见图 6); 利用分子束外延技术制作了集成化程度极高的全固态太赫兹收发器, 将太赫兹量子级联光源集成在一个芯片上, 发表在 2010 年的《Nature Photonics》^[7]上(见图 7)。虽然 SNL 在太赫兹科学技术研究方面, 特别是太赫兹光谱学与成像技术方面的工作开展较少, 但是在太赫兹半导体器件的研制能力上一直处于国际一流水平。同时从 SNL 对太赫兹器件研发的重视程度也可看出, 开展太赫兹关键器件研发将持续推动太赫兹光谱学与成像技术和应用技术的发展。

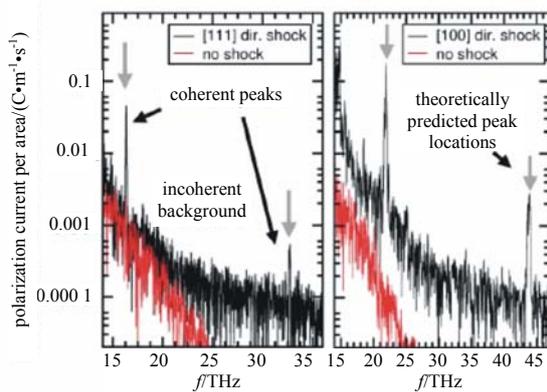


Fig.5 Spectrum of terahertz emission from crystal under shock wave compression
图 5 晶格在冲击加载下产生太赫兹辐射的频谱图

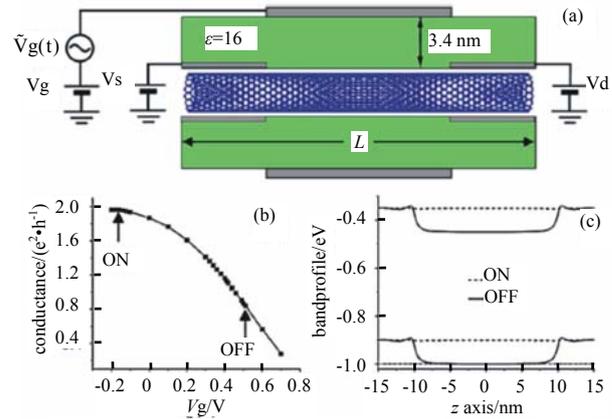


Fig.6 Terahertz transistor made from carbon nanotube
图 6 新型半导体结构碳纳米管制作的太赫兹晶体管结构图

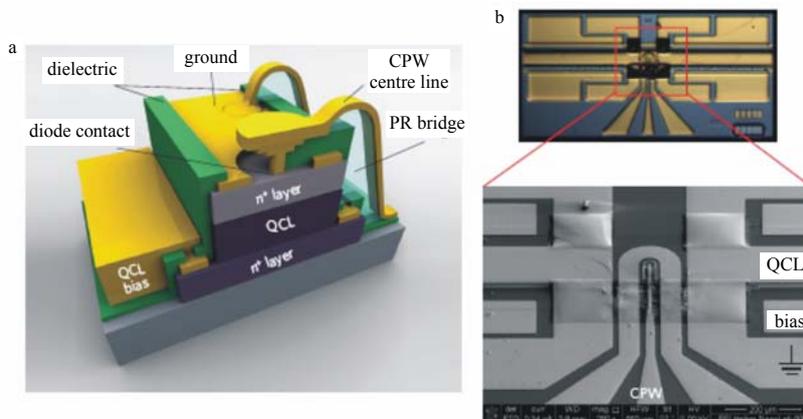


Fig.7 Structure of monolithically integrated solid-state terahertz transceivers
图 7 集成化极高的全固态太赫兹收发器结构图

以上分析了美国 3 大核武器国家实验室在太赫兹光谱学与成像技术的研究工作和发展趋势。可以看到 LANL 瞄准太赫兹光谱在武器相关材料表征的应用, 已经开展了比较全面的基于高功率飞秒激光系统的太赫兹光谱科学技术的研究; LLNL 更是直接将太赫兹光谱技术应用到了武器物理研究, 为今后的研究提出潜在的需求牵引; SNL 瞄准武器电子学集成系统的应用, 发展太赫兹半导体光子学器件。

2 美国重要国家实验室太赫兹技术发展态势

美国还有许多重要的国家实验室也在开展太赫兹光谱与成像技术方面的工作。例如: 美国劳伦斯伯克利国家实验室(Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL)在开展基于该实验室的先进光源(Advanced Light Source)、先进太赫兹光源、新型半导体材料以及基于新型半导体材料的太赫兹器件的研究等。美国斯坦福国家加速器实验室(Stanford Linear Accelerator Center, SLAC)在开展分别基于加速器和基于激光等离子体相互作用的超短高峰功率的太赫兹脉冲光源。与加州理工大学联合的美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)已经在太赫兹远距离成像、太赫兹光谱成像在生物医学中的应用等方面做出了突出工作。阿贡国家实验室(Argonne National Laboratory, ANL)利用太赫兹光谱开展国土安全方面的技术研究, 目前已经研制成功了被称为 Argonne's Terahertz

Test Facility 的仪器,该仪器可以通过太赫兹光谱的识别进行痕量爆炸物和毒气等的识别,所能探测的痕量分子极限可达十亿分之一(ppb)的级别;该技术在反恐维稳和战场侦毒等有巨大的应用前景。从以上分析,可以看出美国非核武器国家实验室同样瞄准太赫兹光谱在国土安全、生化威胁甄别等安全和军事领域的需求,发展高功率太赫兹脉冲光源、系统以及应用。

值得注意的是美国 ANL 和 SLAC 先后于 2012 年 7 月和 9 月分别主持召开了“用于对材料时间分辨研究的太赫兹源”(Terahertz Sources for Time Resolved Studies of Matter)和“太赫兹科学的前沿”(Frontiers of THz Science)国际研讨会。通过研讨会,美国这 2 大国家实验室也明确了在太赫兹方面一系列进一步的研究方向,例如:高功率太赫兹脉冲源、时间分辨的太赫兹光谱和成像技术、太赫兹波对材料的调控研究等。

3 国际发展态势分析

国际上对太赫兹光谱学与成像技术的研究可以分为 4 方面:太赫兹光谱和成像应用研究^[8-11]、太赫兹光源研究^[12-13]、太赫兹调制器以及探测器等关键器件^[14-15]的研究。

在太赫兹光谱应用方面,国际上已经开展了大量太赫兹光谱技术研究,正在发展多种用于不同材料和不同性质所需要的太赫兹光谱技术,其中包括太赫兹时域光谱技术、太赫兹傅里叶变换光谱技术、全反射式太赫兹光谱技术、时间分辨的超快太赫兹光谱技术、单脉冲探测式的瞬态太赫兹光谱技术。这些技术作为新型的光谱研究手段用于材料表征研究,例如针对半导体相关材料开展了大量研究工作,为半导体的基础研究和应用研究提供了不可替代的实验技术手段。在太赫兹成像技术方面,也在开展多种技术研究,实现基于层析技术的三维太赫兹成像技术是发展的趋势和研究热点。

围绕着太赫兹光谱成像应用所需要的太赫兹光源,国际上也开展了许多研究,包括基于飞秒激光与物质相互作用产生宽光谱短脉冲太赫兹光源、基于光差频技术的可调谐太赫兹光源等。其中前者是国际研究热点,许多国际著名研究机构都在从事该方面的研究,主要围绕 2 个方面开展工作:提高飞秒激光转化为太赫兹波的效率,增加单脉冲内太赫兹光谱的宽度。

在太赫兹关键器件方面,国际上主要从事调制器和探测技术的研究。太赫兹调制器研究方面,主要从事对宽太赫兹光谱范围内的太赫兹波进行相位和强度调制技术研究;在探测技术方面,电光采样技术是研究的主要内容,其中难点在于开展单次瞬态太赫兹脉冲的探测,这也是研究趋势之一。

4 太赫兹技术对核武器物理研究的促进作用

美国核武器实验室中的太赫兹技术及应用研究在促进其武器物理研究方面已经发挥了一些作用。把太赫兹技术在核武器物理研究中可能的研究方向进行了如下总结:a) 极端条件下材料的太赫兹表征与调控研究;b) 含能材料化学反应动力学研究;c) 冲击波与爆轰物理瞬态诊断研究;d) 高新技术武器与拓展领域的研究。

在极端条件下材料的表征与调控研究方面,太赫兹技术可成为现有技术(包括 X 射线、可见光、红外与拉曼)的互补并且不可替代。太赫兹波对材料表征的独特性来源于它与物质相互作用的 3 个机理,表现在太赫兹波可与电子的能带内跃迁、晶格的骨架振动以及分子间相互作用进行共振耦合。因此利用太赫兹波可开展极端条件下材料中电子集体运动、晶格构象的指纹特性、分子间氢键以及介观结构效应表征研究。又由于太赫兹波作用于材料中具有共振激发特性,因此它在材料的调控方面也是重要手段。

在含能材料化学反应动力学研究方面,太赫兹技术相对于现有的红外和拉曼技术有不可替代的作用。红外和拉曼光谱技术具有一些瓶颈,例如:主要观测分子的强化学键,不能在爆轰烟尘下工作以及红外光谱不容易实现瞬态测量。太赫兹光谱技术能观测含能材料分子的弱化学键和骨架振动,具有指纹特性好,穿透性好和瞬态测量的优点。可以看出,太赫兹光谱技术对含能材料化学反应动力学研究可能的推动作用表现在 3 个方面:a) 冲击加载下炸药化学反应初期动力学研究;b) 爆轰产物动态反应过程的瞬态分析;c) 炸药老化机理研究^[16]。

在冲击波与爆轰物理瞬态诊断方面,太赫兹诊断技术也有许多优点。例如:a) 利用冲击波在材料界面发生太赫兹脉冲辐射的机理,通过探测太赫兹脉冲即可实现超短冲击波(例如飞秒激光可获得皮秒脉冲宽度的冲击波)波形及传播过程的表征;b) 利用太赫兹波在烟尘等环境穿透性^[17]优于可见红外光、空间分辨率优于微波等优点,进行太赫兹诊断技术在烟尘等爆轰环境下武器动态过程的瞬态测量,由此可能产生一系列新的诊断技术,包括太赫兹高速干涉测速技术^[18]、太赫兹高速摄影技术、瞬态太赫兹三维层析成像技术等。

另外在国家重要的科技领域方面,太赫兹技术也具有许多独特优点。例如:绿色能源领域、物理与生物医学交叉领域等。太赫兹波通过非接触地对光子载流子的生产、转移和湮灭的超快过程的监控^[19],可获得太阳能电池中许多光学和电子学无法揭示的物理参数^[20],有助于提高认识太阳能电池光电转换瓶颈。物理学的前沿技术总是能推动生物医学研究的发展,增进人类的健康;太赫兹技术基于太赫兹波与生物分子独特的相互作用,已经表现出在生物医学研究中需要的优点和应用前景^[21-22]。

5 结论

本文介绍了美国 3 大核武器实验室以及重要国家实验室在太赫兹科学技术以及应用研究中开展的工作和取得的成果,并且对国际太赫兹技术发展趋势和方向进行了分析。简要分析了太赫兹技术对核武器物理研究的促进作用以及太赫兹技术在核武器物理研究中可能的研究方向。

参考文献:

- [1] Kim K Y, Taylor A J, Glowia J, et al. Coherent control of terahertz supercontinuum generation in ultrafast laser-gas interactions[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(10):605-609.
- [2] Chen Houtong, Willie J Padilla, Michael J Cich, et al. A metamaterial solid-state terahertz phase modulator[J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(3):148-151.
- [3] Kim K Y, Yellampalle B, Glowia J H, et al. Measurements of terahertz electrical conductivity of intense laser-heated dense aluminum plasmas[J]. *Physical Review Letter*, 2008, 100(13):135002.
- [4] Armstrong R Michael, Reed Evan J, Kim Ki-Yong, et al. Observation of terahertz radiation coherently generated by acoustic waves[J]. *Nature Physics*, 2009, 5(4):285-288.
- [5] Reed J Evan, Soljacic Marin, Gee Richard, et al. Coherent optical photons from shock waves in crystals[J]. *Physical Review Letter*, 2006, 96(1):013904.
- [6] Diego Kienle, François Léonard. Terahertz Response of Carbon Nanotube Transistors[J]. *Physical Review Letter*, 2009, 103(2):026601.
- [7] Michael C Wanke, Erik W Young, Christopher D Nordquist, et al. Monolithically integrated solid-state terahertz transceivers[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(8):565-569.
- [8] Chen Ho I, Guo Xiaoyu, Zhang X C. Design and performance of reflective terahertz air-biased-coherent-detection for time-domain spectroscopy[J]. *Optics Express*, 2010, 18(3):2872-2883.
- [9] Lee Kanghee, Jin Kyung Hwan, Ye Jong Chul, et al. Coherent optical computing for T-ray imaging[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(4):508-510.
- [10] Yukio Kawano, Koji Ishibashi. An on-chip near-dielectric terahertz probe and detector[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2:618-621.
- [11] Brun M A, Dormaneck F, Yasuda A, et al. Terahertz imaging applied to cancer diagnosis[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2010, 55(16):4615-4623.
- [12] Michael I Bakunov, Sergey B Bodrov, Eugene A Mashkovich. Terahertz generation with tilted-front laser pulses: dynamic theory for low-absorbing crystals[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2011, 28(7):1724.
- [13] Valavanis A, Dinh T V, Lever L J M, et al. Material configurations for n-type silicon-based terahertz quantum cascade lasers[J]. *Physical Review B*, 2011, 83:195321.
- [14] Ekmekeci E, Strikwerda A C, Fan K, et al. Frequency tunable terahertz metamaterials using broadside coupled split-ring resonators[J]. *Physical Review B*, 2011, 83:193103.
- [15] Dmitry Turchinovich, Jørn M Hvam, Matthias C Hoffmann. Self-phase modulation of a single-cycle terahertz pulse by nonlinear free-carrier response in a semiconductor[J]. *Physical Review B*, 2012, 85:201304.
- [16] 孟坤, 李泽仁, 刘乔. 太赫兹时域光谱技术用于老化炸药检测[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 5(4):1305-1308. (MENG Kun, LI Zeren, LIU Qiao. Aging Explosive Detection Using Terahertz Time-Domain Spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 5(4):1305-1308.)
- [17] 孟坤, 李泽仁, 刘乔. 太赫兹波在介质中传播的 FDTD 分析[J]. *信息与电子工程*, 2011, 9(3):277-279. (MENG Kun, LI Zeren, LIU Qiao. FDTD analysis of terahertz pulse traveling in media[J]. *Information and Electronic Engineering*, 2011, 9(3):277-279.)