

爆炸物太赫兹光谱探测技术研究进展

王 高^{1,2,3} 周汉昌³ 姚宝岱³ 徐德刚^{1,2} 姚建铨^{1,2}

¹天津大学精密仪器学院激光与光电子研究所, 天津 300072
²天津大学光信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072
³中北大学 仪器与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051

摘要 近年来,随着太赫兹 (THz) 技术的快速发展,它在安检、航空航天、生命科学、化学等领域展现了巨大的应用前景。在安检领域,由于许多炸药及其相关材料在太赫兹波段具有特征吸收谱,许多非金属、非极性材料对太赫兹波是透明的,因此爆炸物太赫兹光谱探测技术具有巨大的潜力,受到了国内外的高度重视。介绍了国内外利用太赫兹波进行爆炸物光谱探测技术的研究现状及太赫兹光谱探测技术的新进展,综述了在固态爆炸物和气态爆炸物的特征吸收光谱研究方向所取得的成果。最后总结了目前存在的技术难题,展望了未来的发展趋势。

关键词 太赫兹; 特征吸收光谱; 爆炸物检测

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP48.013001

Progress of Terahertz Spectroscopy Detection Technique of Explosives

Wang Gao^{1, 2, 3} Zhou Hanchang³ Yao Baodai³ Xu Degang^{1, 2} Yao Jianquan^{1, 2}

¹Institute of Laser and Optoelectronics, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China
²Key Laboratory of Opto-Electronics Information and Technical Science, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China
³Key Laboratory of Instrument Science and Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

Abstract With the rapid development of the terahertz spectroscopy technique, it has shown great application prospect in the field of safety inspection, aerospace, life science and chemistry. In inspection field, most explosives and related compounds have characteristic absorption and many nonmetal and nonplority materials are transparent to terahertz wave, so it has shown significant potential for the safety inspection and acquired great attention at home and aboard. The abroad and domestic research status of the explosives detection using terahertz spectroscopy technique and the progress of terahertz spectroscopy technique was introduced. Then the the achievements of the solid and gaseous explosives characteristic absorption spectrum were concluded. Finally the existing technique difficulties were summed up and the future development trend was outlooked.

Key words terahertz, characteristic absorption spectrum, explosive detection

OCIS codes 300.6495; 300.6170; 300.1030

1 引言

太赫兹波 (THz) 在电磁波谱中位于微波和远红外辐射之间,其频率范围为 0.1~10 THz。由于太赫兹波独特的性质,它在安检、航空航天、生命科学、化学等领域展现了巨大的应用前景,其中对炸药和其他危险物品的检测也越来越重要。多种爆炸性物质分子的振动和转动能级谱处于太赫兹频段,通过太赫兹光谱技

收稿日期: 2010-07-16; 收到修改稿日期: 2010-09-01

基金项目: 国家 973 计划 (2007CB310403)、国家自然科学基金面上项目 (60801017) 和中北大学校自然科学基金资助课题。

作者简介: 王 高 (1973-) 男, 博士, 副教授, 主要从事光电检测技术、非线性光学和太赫兹应用技术研究。

E-mail: wanggao1973@yahoo.com.cn

术可以测得爆炸物的特征吸收谱,由此识别爆炸物,进而分析物质的内部结构信息。太赫兹波的光子能量低于各种化学键,不会引起电离反应,同时太赫兹波对于大多数包装材料(衣物、塑料、陶瓷等)有很强的穿透力,因此可以实现对爆炸物的非电离和高灵敏探测。鉴于太赫兹波对包装材料的强穿透力和炸药的特征吸收谱,太赫兹光谱探测在人体携带或包装的隐蔽爆炸物方面上已成为一种极具竞争力的方法。

国内外有不到 30 个研究小组开展了应用太赫兹技术检测炸药及其相关材料的研究,它们主要集中在美国、欧洲和日本。代表性的大学和研究机构有:美国的新泽西理工学院、伦斯勒理工学院、约翰霍普金斯大学、雪山大学、俄克拉荷马州立大学、海军研究实验室、洛斯阿拉莫斯国家实验室和圣地亚国家实验室、SPARTA 公司等;英国的剑桥大学、利兹大学和 Teraview 公司等;日本的大阪大学等。主要研究方向包括:探测隐匿的爆炸物即探测包裹与各种材料之内的爆炸物;探测单质炸药的光谱;探测混合炸药的光谱;远距离探测爆炸物光谱;太赫兹波对爆炸物成像的研究;爆炸物特征吸收峰与分子振动模式和声子振动模式的关系等。

本文首先介绍了太赫兹光谱探测技术的进展及国外利用太赫兹波进行固态和气态爆炸物光谱探测技术的研究现状;然后总结了国内的研究现状,最后展望了该项技术的发展趋势。

2 太赫兹光谱探测技术的进展

随着太赫兹技术的不断进步,太赫兹器件也得到了快速发展。太赫兹时域光谱仪的频谱范围已经从 0.1~2.57 THz 发展到 0.1~20 THz,平均功率也从纳瓦、微瓦级,提高到毫瓦级,同时小型化的手持设备也出现在市场上。瑞士 Rainbow Photonics 公司生产的 Terakit-D 型太赫兹时域光谱仪其频谱范围达到了 20 THz,平均功率高达 180 mW,是目前频谱覆盖范围最广的太赫兹光谱仪。美国 Zomega 公司生产的 Mini-Z 型太赫兹时域光谱仪,其频谱范围为 0.1~4 THz,频率分辨率小于 50 GHz,动态范围大于 70 dB,尺寸仅为 10.5 cm×6.25 cm×2.75 cm(如图 1 所示),非常便于携带及在现场进行化学品的成分分析、毒品的检测等。



图 1 Mini-Z 型太赫兹时域光谱仪
Fig.1 Mini-Z terahertz time domain spectrometer

随着研究的深入,太赫兹光谱探测技术的应用领域也在不断地拓

宽。在无损检测领域,太赫兹光谱探测技术在航天飞机机体疲劳检测、隐患排查,复合树脂、陶瓷、塑料、自然材料和其他非金属材料的检测,汽车仪表盘、地板材料表面检测,印刷电路板的脱层问题、密封性检测、瓷砖和纸张等的生产检测领域具有广泛的应用前景;在安检领域,太赫兹光谱探测技术也被用于对包裹、信封及其他包装内的隐蔽物品排查和毒品的检测;在材料学领域,时间分辨率的超快光谱技术则被用于研究半导体内部的电子运动,如电子间的碰撞、散射以及电子与声子的碰撞、散射,电子迁移等效应;在生物学研究中,太赫兹光谱技术可用于蛋白质指纹谱的获取、分子反应的无标记测量、无标记生物芯片读出以及生物分子在实现其相应生理功能时所发生的构型和构像变化的探测^[1]。

3 爆炸物的太赫兹光谱研究现状

炸药是各种爆炸物的核心组分,分为单体炸药和混合炸药两类。单体炸药为有机化合物,主要是芳香族硝基化合物、硝胺类化合物、硝酸酯化合物、以及胺类和硝酸盐类化合物。混合炸药则是在单质炸药基础上添加其他组分如铝粉、木粉以及各种添加剂等,以此来提高和调节炸药的性能,但其主要成分仍然是一种或几种单质炸药。大多数炸药是以固态形式存在,并且军用炸药及恐怖分子使用的炸药也主要是固态爆炸物,因而固态爆炸物的探测是人们目前的研究重点。

3.1 固态爆炸物的太赫兹光谱

2003 年,SPARTA 公司的 Matthew. B. Campbell 等^[3]首次利用傅里叶变换红外(FTIR)和太赫兹光谱仪对 C4,PETN 和塞姆烃塑胶炸药的特征吸收谱进行检测,随后世界各地的一些研究小组也相继展开了爆炸物太赫兹特征吸收光谱的研究。

美国伦斯勒理工学院的张希成等从 2004 年开始在爆炸物太赫兹光谱检测领域进行深入地研究,取得了丰富的研究成果。近年来的主要成果包括:1)采用 FTIR 光谱法和太赫兹时域光谱(THz-TDS)法在 0.1~21 THz 频段内,对 TNT,RDX,HMX 和 PENT 等 15 炸药及相关化合物进行了探测,结果显示两种方法测得的特征吸收峰一致。2)采用 FTIR 光谱法和 THz-TDS 法在 0.2~1.8 THz 频段内,对 2,4-DNT,4-DNT 和 2,6-DNT 的太赫兹特征吸收谱进行了探测,同时使用 Gaussian03 软件模拟计算了 2,4-DNT,4-DNT 和 2,6-DNT 的振动频率,分析其特征吸收谱并与实验数据对比,结果表明两种方法测得的特征吸收峰与理论计算值一致。3)采用 FTIR 光谱法对 4-DNT,2,4-DNT,TNT 和 HMX 在 1.5~20 THz 频段进行了透射式和漫反射式探测,得到的特征吸收峰一致(如图 2 所示),实验结果表明漫反射式探测法的灵敏度更高。4)利用漫反射法对纸、聚乙烯、皮革和聚酯类材料遮盖下的 RDX 进行探测,由于空气中水蒸气对太赫兹波的吸收及其他材料的遮挡,许多特征吸收峰都无法识别,但在 0.82 THz 的特征吸收峰却清晰可见(如图 3 所示)。同时对 RDX 进行了远距离探测,在测试距离为 30 m 时,0.82 THz 特征吸收峰依然可以辨别,使远距离探测隐匿条件下的 RDX 成为可能^[4~6]。

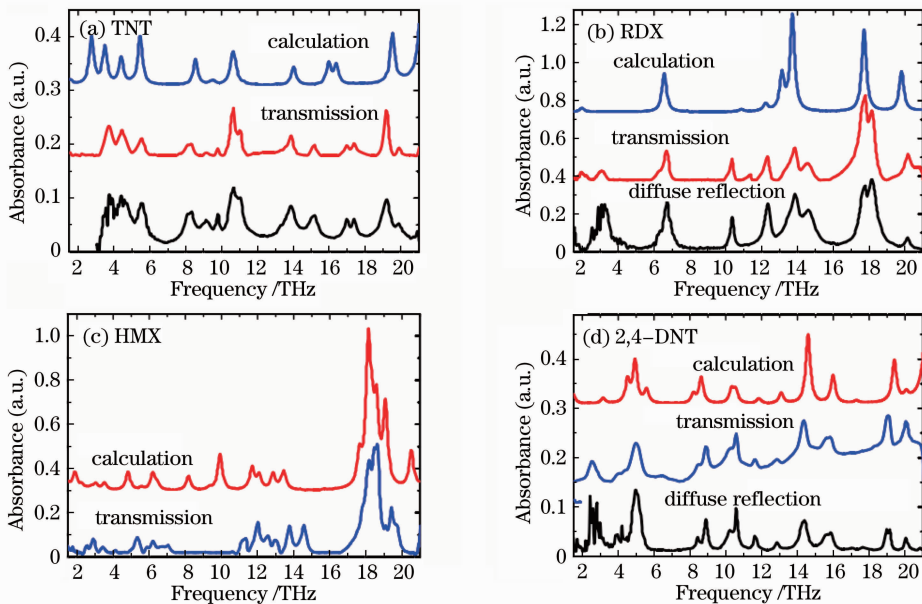


图 2 4 种爆炸物的透射、漫反射及理论计算光谱的比较

Fig. 2 Comparison of calculated results, transmission spectrum and diffuse reflectance spectrum of 4 kinds of explosives

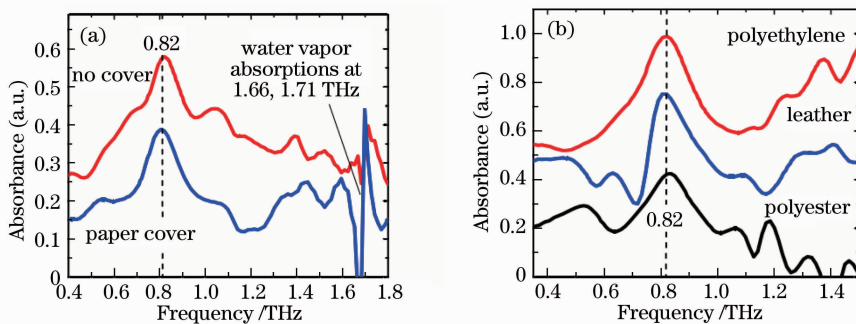


图 3 直接探测与各种材料遮盖下 RDX 吸收光谱的比较

Fig. 3 Comparison between the absorption spectrum of RDX when it was bare and was covered with various materials

2004 年,美国新泽西理工学院的 John F. Federici 等,采用 FTIR 光谱法在 0.1~3 THz 频段内探测了 RDX 的特征吸收谱,并与 THz-TDS 法测得的 0.1~1.6 THz 的特征吸收谱进行对比,结果表明两种方法测得的特征吸收峰一致。另外,他们通过仿真 RDX 的分子结构,分析得出了 0.8 THz 的吸收峰是由分子间振动产生的结论^[7~9]。

2006年,美国约翰霍普金斯大学的 Michael J. Fitch 等,采用 THz-TDS 法在 0.5~6 THz 频段内探测了 RDX, HMX, PETN, TNT 4 种炸药的太赫兹特征吸收谱,首次得到了这 4 种炸药在 3~6 THz 的太赫兹吸收谱。另一方面,他们提出了用于计算分子吸收横截面和绝对吸收值的算法,绝对吸收值可用于太赫兹谱的校准,以及信噪比的计算。对于太赫兹时域光谱法,算得的峰值信噪比最大在 10^4 数量级,对应的探测极限为 $10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ [2,10,11]。

2008年,美国海军研究实验室的 Joseph S. Melinger 和俄克拉荷马州立大学的 D. Grischkowsky 等,提出了太赫兹波导时域光谱法,即在 Al、Au 等金属表面形成待测材料的有序薄膜,太赫兹波经平行板波导后辐射到待测材料上(如图 4 所示)。这种方法的优点是可以使特征吸收峰变得很陡峭,可以提供十分准确的吸收峰,分辨率很高,灵敏度为常规方法的 100 倍,且待测材料的用量较小。观察到的吸收峰的宽度小于 15 GHz,仅为常规药柱法的 1/8。他们利用此方法在 0.5~3.5 THz,温度为 11 K~293 K,对 β -HMX, TNT 和 RDX 进行了探测。使用太赫兹波导时域光谱法在 0.5~2.5 THz,温度为 11 K 和 293 K 时,探测所得 2,4-DNT 的太赫兹特征吸收峰有 19 个,远大于常规药柱法的 7 个特征吸收峰(如图 5 所示)。另外,他们采用密度振动泛函理论计算了 β -HMX, TNT 和 RDX 的吸收系数和反射系数,并与实验值进行比较,结果表明计算值与实验值一致 [12~14]。

2008年,英国剑桥大学的 C. Baker 等,采用 Dmol 软件对 α -form 的 RDX 分子结构进行仿真并分析其低频振动。首次利用固态密度泛函理论计算分析了 α -form 的 RDX 在温度为 7 K 时, ($2\sim 133 \text{ cm}^{-1}$) 频段内的太赫兹特征吸收谱,并与实验数据进行对比。分析了吸收峰的归属,得出了吸收谱密度的 45% 是由分子间振动所产生的结论。另外,他们采用 TeraView 公司的 TPI spectral1000 Spectrometer 探测了 RDX, PETN, MX, TNT, SX 2, Semtex H 和 Metable 在 0.6~3.6 THz 内的特征吸收谱 [15,16]。

3.2 气态爆炸物的太赫兹光谱

人们在研究固态炸药的太赫兹光谱的过程中,也曾尝试利用太赫兹光谱技术检测炸药的蒸气。2006年,美国圣地亚国家实验室的 Robert J. Foltynowicz 等经过计算 2,4-DNT 的电子结构(如图 6 所示)发现它具有较强的偶极距及在 150 °C 时有较高的饱和蒸气压力,较容易蒸发。因此将 2,4-DNT 样品放置于密闭的气室内加热到 145 °C,在气室压力设置为 265.86~9674.6 Pa 时,在 0.05~2.7 THz 频段范围内检测气态 2,4-DNT 的太赫兹特征吸收谱。实验证明,可以利用 TDS 法检测气态爆炸物的太赫兹特征吸收谱(如图 7 所示),测得的光谱在 0.05~1.5 THz 内有较多的吸收峰 [16]。

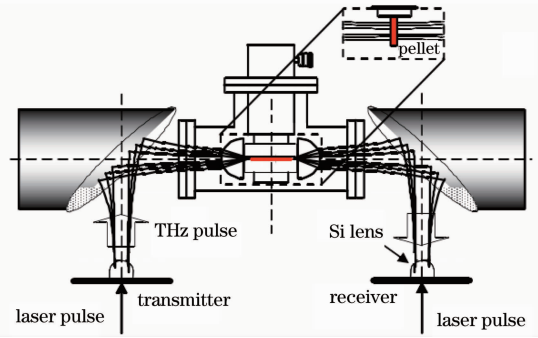


图 4 太赫兹波导时域光谱法原理图

Fig. 4 Schematic diagram of waveguide THz-TDS spectroscopy

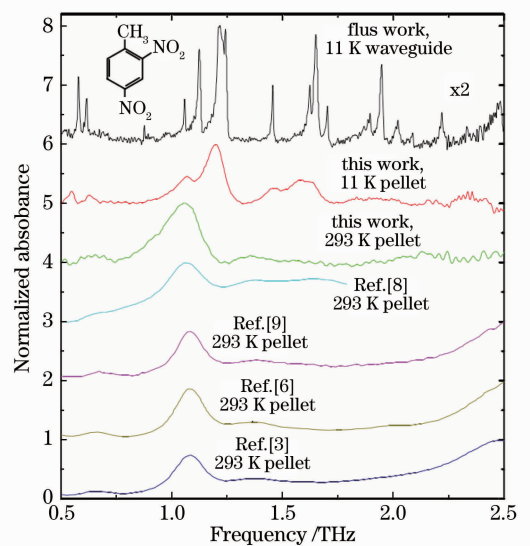


图 5 2,4-DNT 吸收光谱

Fig. 5 Absorption spectra of 2,4-DNT

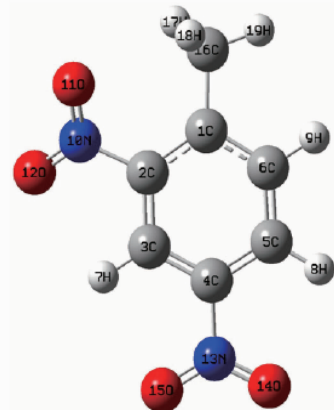


图 6 2,4-DNT 分子结构

Fig. 6 Molecule structure of 2,4-DNT

3.3 固态和气态爆炸物太赫兹探测技术的比较

近些年,固态爆炸物的太赫兹光谱探测技术一直是人们研究的重点,而针对气态爆炸物的研究则鲜有报道。究其原因,主要是由于大多数爆炸物的饱和蒸汽压力很低,在室温下较难蒸发,在实验时需要加热到 $100\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以产生爆炸物的蒸汽,但炸药在加热到一定温度时会发生分解,因此很难获得气态爆炸物。从技术发展及应用的角度来看,固态爆炸物的太赫兹光谱探测技术更具有研究价值及实用性。太赫兹光谱气体检测技术目前主要还是用于检测环境污染气体中的一些小的极性分子如硫化氢(H_2S)、甲醛(H_2CO)和氨气(NH_3),有机气体(甲醇、乙醇和丙酮);混合气体的区分和识别方面;区分各种气体分子的同素异形体等^[25]。从探测方式来看,固态检测技术可以使用透射式、反射式和漫反射式探测法而气态检测技术则主要使用透射式探测法。

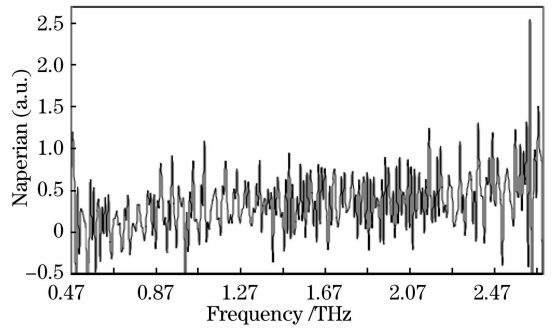


图7 2,4-DNT 太赫兹吸收谱 (0.47~2.7 THz)

Fig. 7 Absorption spectrum of 2,4-DNT
(0.47~2.7 THz)

4 国内研究现状

国内的天津大学、清华大学、中国科学院、首都师范大学、中国计量学院和上海微系统所等高校和研究机构对 THz 技术开展了不同层面的研究。但由于缺乏合适的太赫兹源及爆炸物样品等原因,对于炸药及其相关材料的 THz 光谱研究,还处在起步阶段。

2006年,首都师范大学的张存林等在 $0.2\sim 2.5\text{ THz}$ 波段利用 THz-TDS 法探测了 RDX, TNT, DNT, HMX 和 HNW 的透射光谱。2007年,他们对更多爆炸物的太赫兹特征吸收光谱进行了检测,得到了单质炸药 RDX, TNT, DNT, HMX, HNW 以及以 RDX 为主要成分的 8701, R852, R791, PW30, 塑一塑性炸药和 8702 炸药在 $0.2\sim 2.5\text{ THz}$ 频段内的太赫兹特征吸收光谱。同时使用 Gaussian03 和 DMol³ 软件对分子进行了建模、结构优化和频率计算,分析其特征吸收谱并与实验数据对比,结果表明测得的特征吸收峰与理论计算值一致。2008年,他们对单体炸药 TNPG, PETN, 及黑梯炸药在 $0.2\sim 2.5\text{ THz}$ 频段内的太赫兹特征吸收光谱进行了探测。利用 Gaussian03 和 DMol³ 软件对分子进行了建模、结构优化和频率计算,分析得出了 TNPG 的 THz 光谱是由分子内的振动模式导致的, PETN 的主吸收峰是由分子外振动模式引起的结论。2009年,他们又对 RDX, HMX, PETN, 塑 1 炸药在 $0.2\sim 2.5\text{ THz}$ 频段内,在不同湿度下的吸收谱进行了探测。实验结果表明在不同湿度下它们具有相同的特征吸收峰,不论湿度大小吸收谱都显示了相同的走向趋势,且湿度越大,吸收越大。同时,采用密度泛函理论 B3LYP 方法, 6-311G 基组和 6-31G 对 RDX, HMX, PETN 和 TNPG 这 4 种单质炸药进行了气相单分子理论模拟,模拟结果与实验结果有较好的吻合^[21~27]。

目前,国内仅探测了单质炸药 RDX, TNT, DNT, HMX, HNW, TNPG 以及以 RDX 为主要成分的 8701, R852, R791, PW30, 塑一塑性炸药和 8702 炸药的太赫兹光谱,但炸药的种类繁多,其组成也多种多样,仍有诸多炸药的太赫兹光谱有待探测。同时国内的理论研究如利用固体和气体密度泛函理论对于爆炸物分子结构建模和仿真其太赫兹吸收光谱,分析吸收峰归属等,需要更进一步深入研究。表 1 中对国内外研究机构的研究成果和研究方向进行了对比和分析。

5 结论

在过去的 15 年里,人们利用太赫兹光谱技术探测固态和气态爆炸物,测得了 20 余种爆炸物及其相关化合物的特征吸收谱,并且提出了透射式,漫反射式和反射式等探测方法,同时也对远距离探测爆炸物进行了大量的研究,得到了一定的光谱信息。但该项技术在实际应用中依然存在不少问题,如太赫兹源的功率较低,水蒸气对太赫兹的吸收和散射对吸收光谱的影响,远距离探测时空气中浮尘、烟雾等的影响及太赫兹设备的小型化等。尽管存在诸多问题,但太赫兹光谱检测技术仍在安检、国土安全、国防科技领域展现了巨大

的潜力。相信随着研究工作的不断深入,技术的不断进步,太赫兹光谱技术定会为人民的人身安全提供保障,为国防事业的发展做出巨大的贡献。

表1 国内外研究机构研究成果比较

Table 1 Comparison between the institutes and their researches in domestic and aboard

Research institute	Investigated explosives	Spectral range /THz	Main research achievements and direction
Rensselaer polytechnic institute	2,4-DNT,TNT,HMX, PENT,Tetry 1,1,3-DNB, 1,4-DNB,1,3,5-TNB, 2-nitro diphenyl anine,RDX, 3,5-dinitro aniline,4-NT, 4-amino-2,6-DNT, 2-amino-4,6-DNT,2,6-DNT	0.1~21	1) detect the absorption spectrums of 15 kinds of explosives with TH-TDS and FTIR 2) use Gaussian 03 to calculate the absorption spectrums and analyze the assignment of absorption peak 3) investigate the diffuse reflection and transmission spectroscopy, stand-off detection and spectrum under covering materials
New Jersey Institute of Technology	RDX	0.2~3	1) detect the absorption spectrums of RDX with TH-TDS and FTIR 2) simulate molecular simulation to analyze the collective motion and conformational status of molecules
Johns Hopkins University	TNT,RDX,HMX,PENT	0.5~6	1) detect the absorption spectrums of 4 kinds of explosives with TH-TDS 2) propose the absolute absorptivity and absorption cross-section theory
Naval Research Laboratory	β -HMX,TNT,RDX	0.1~3.6	1) propose the waveguide TH-TDS 2) calculate the absorption coefficient and real index of refraction
Sandia National Laboratories	2,4-DNT	0.05~2.7	1) detect the absorption spectra of gas-phase explosives with TH-TDS
Cambridge University	RDX,PETN,MX,TNT, SX 2,Semtex H,Metable	0.5~3.5	1) simulation of the structure and low-frequency vibrations of crystalline RDX 2) calculate the absorption spectrums of α form RDX and analyze the assignment of absorption peak 3) detect the absorption spectrums of 8 kinds of explosives with TPI spectra1000 Spectrometer
Capital Normal University	RDX,TNT,DNT,HMX, HNW,8701,8702,R852, R791,PW30,plastic explosive,TNPG,PETN	0.2~2.5	1) detect the absorption spectrums of 13 kinds of explosives with TH-TDS 2) use Gaussian 03 and DMol ³ to calculate the absorption spectrums 3) investigate the gas phase single-molecular theory

参 考 文 献

- Zhang Cunlin, Mu Kaijun. Terahertz spectroscopy and imaging[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(2): 023001
张存林, 牧凯军. 太赫兹波谱与成像[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(2): 023001
- Megan R. Leahy-Hoppa, Michael J. Fitch, Robert Osiander. Terahertz spectroscopy techniques for explosives detection[J]. *Anal. Bioanal. Chem.*, 2009, **395**: 247~257
- Matthew B. Campbell, Edwin J. Heilweil. Non-invasive detection of weapons of mass destruction using THz radiation[C]. *SPIE*, 2003, **5070**: 38~43
- Yunqing Chen, Haibo Liu, Yanqing Deng *et al.*. THz spectroscopic investigation of 2, 4-dinitrotoluene[J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2004, **400**: 357~361
- Yunqing Chen, Haibo Liu, X.-C. Zhang. Experiment and density function theory study on THz spectra of 4-NT and 2, 6-DNT[J]. *International J. High Speed Electronic and System*, 2007, **17**(2): 283~291
- Hua Zhong, Albert Redo-Sanchez, Xi-Cheng Zhang. Standoff sensing and imaging of explosive related chemical and bio-chemical materials using THz-TDS[J]. *International J. High Speed Electronic and System*, 2007, **17**(2): 239~249

- 7 Feng Huang, Brian Schulkin, Hakan Altan *et al.*. Terahertz study of 1,3,5-trinitro-s-triazine by time-domain and Fourier transform infrared spectroscopy[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(23): 5535~5537
- 8 John F. Federici, Dale Gary, Robert Barat *et al.*. THz standoff detection and imaging of explosives and weapons[C]. *SPIE*, 2005, **5781**: 75
- 9 Alexander Sinyukov, Ivan Zorych, Zoi-Heleni Michalopoulou *et al.*. Detection of explosives by Terahertz synthetic aperture imaging-focusing and spectral classification[J]. *C. R. Physique*, 2008, **9**(2): 248~261
- 10 M. R. Leahy-Hoppa, M. J. Fitch, X. Zheng *et al.*. Wideband terahertz spectroscopy of explosives[J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2007, **434**: 227~230
- 11 Michael J. Fitch, Megan R. Leahy-Hoppa, Edward W. Ott *et al.*. Molecular absorption cross-section and absolute absorptivity in the THz frequency range for the explosives TNT, RDX, HMX, and PETN[J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2007, **443**: 284~288
- 12 J. Hooper, E. Mitchel, C. Konek *et al.*. Terahertz optical properties of the high explosive b-HMX[J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2009, **467**: 309~312
- 13 Joseph S. Melinger, N. Laman, D. Grischkowsky. The underlying terahertz vibrational spectrum of explosives solids[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**:011102
- 14 N. Laman, S. Sree Harsha, D. Grischkowsky *et al.*. 7 GHz resolution waveguide THz spectroscopy of explosives related solids showing new features[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(6): 4094~4105
- 15 Damian G. Allis, J. Axel Zeitler, Philip F. Taday *et al.*. Theoretical analysis of the solid-state terahertz spectrum of the high explosive RDX[J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2008, **463**: 84~89
- 16 Robert J. Foltynowicz, Ronald E. Allman, Eric Zuckerman. Terahertz absorption measurement for gas-phase-2,4-dinitrotoluene from 0.05 THz to 2.7 THz[J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2006, **431**: 34~38
- 17 D. G. Allis, A. M. Fedor, T. M. Korter *et al.*. Assignment of the lowest-lying THz absorption signatures in biotinand lactose monohydrate by solid-state density functional theory[J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2007, **440**: 203~209
- 18 T. Lo, I. S. Gregory, C. Baker. The very far-infrared spectra of energetic materials and possible confusion materials using terahertz pulsed spectroscopy[J]. *Vibrational Spectroscopy*, 2006, **42**: 243~248
- 19 Robert Oslander. Signature and signal generation aspects of explosive detection using Terahertz time-domain spectroscopy[J]. *International J. High Speed Electronics and Systems*, 2008, **18**(2): 295~306
- 20 David S. Moore. Recent advances in trace explosive detection instrumentation[J]. *Sense Imaging*, 2007, **8**: 9~38
- 21 Shi Xiaoxi, Zhao Guozhong. Analysis of time-resolved terahertz spectroscopy of explosives[J]. *Modern Scientific Instruments*, 2006, **2**: 48~50
石小溪, 赵国忠. 爆炸性物质的太赫兹(THz)光谱分析[J]. 现代科学仪器, 2006, **2**: 48~50
- 22 Feng Ruishu, Meng Tianhua. Terahertz spectroscopic investigations of explosives[J]. *J. Shanxi Datong University (Natural Science)*, 2009, **25**(1): 25~27
冯瑞姝, 孟田华. 爆炸物太赫兹谱的研究[J]. 山西大同大学学报(自然版), 2009, **25**(1): 25~27
- 23 Tang Qianjin, Shao Jie. Investigation and application of stand-off detection technology[J]. *China Security & Protection*, 2009, **9**: 40~45
唐前进, 邵杰. 远距离爆炸物探测技术的研究与应用[J]. 中国安防, 2009, **9**: 40~45
- 24 Feng Ruishu, Xu Xu. Investigation of detection RDX and related composite explosive with THz time domain spectroscopy[J]. *J. Daqing Normal University*, 2009, **29**(3): 99~101
冯瑞姝, 徐栩. 利用太赫兹时域光谱对 RDX 及 RDX 相关混合炸药进行检测的实验研究[J]. 大庆师范学院学报, 2009, **29**(3): 99~101
- 25 Wu Liang, Ling Furi, Liu Jinsong *et al.*. Detection of gases with terahertz spectroscopy techniques[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(7): 29~35
吴亮, 凌福日, 刘劲松等. 太赫兹光谱技术在气体检测中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2009, **46**(7): 29~35
- 26 Mu Kaijun. Terahertz spectroscopic investigation of explosives[D]. Beijing: Capital Normal University, 2008
牧凯军. 爆炸物的太赫兹光谱研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2008
- 27 Feng Ruishu. Terahertz spectroscopic investigation of explosives[D]. Beijing: Capital Normal University, 2009
冯瑞姝. 爆炸性物质的 THz 光谱的研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2009