



中国石油大学（北京）学术专著系列

油气光学系列丛书

油气光学实验

赵 昆 苗昕扬 詹洪磊 著
祝 静 宋 艳 陈 儒

非外借



科学出版社

中国石油大学（北京）学术专著系列

油气光学系列丛书

油气光学实验

赵 昆 苗昕扬 詹洪磊 祝 静 宋 艳 陈 儒 著

科学出版社

内 容 简 介

本书是“油气光学系列丛书”之一,以油气光学技术——油气光学实验的形式来构架,涵盖了石油勘探、油气储运、石油化工及环境污染和安全的相关内容,列举了太赫兹光谱、斜入射光反射差、激光超声、激光感生电压检测等几种光学新技术的操作流程及油气资源光学表征评价的具体实施实验。

本书可作为理工科专业高年级本科生、研究生的实验学习教材,也可作为从事该领域研究的科技工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

油气光学实验 / 赵昆等著. —北京: 科学出版社, 2019.4

(中国石油大学(北京)学术专著系列. 油气光学系列丛书)

ISBN 978-7-03-060931-1

I. ①油… II. ①赵… III. ①油气资源评价—光学分析法 IV. ①TE155

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 053852 号

责任编辑: 万群霞 张晓云 田轶静 / 责任校对: 王萌萌

责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

河北鹏润印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 4 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2019 年 4 月第一次印刷 印张: 18 3/4 插页: 8

字数: 380 000

定价: 138.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

丛 书 序

大学是以追求和传播真理为目的，并为社会文明进步和人类素质提高产生重要影响力和推动力的教育机构和学术组织。1953年，为适应国民经济和石油工业发展需求，北京石油学院在清华大学石油系并吸收北京大学、天津大学等院校力量的基础上创立，成为新中国第一所石油高等院校。1960年成为全国重点大学。历经1969年迁校山东改称华东石油学院，1981年又在北京办学，数次搬迁，几易其名。在半个多世纪的历史征程中，几代石大人秉承追求真理、实事求是的科学精神，在曲折中奋进，在奋进中实现了一次次跨越。目前，学校已成为石油特色鲜明，以工为主，多学科协调发展的“211工程”建设的全国重点大学。2006年12月，学校进入“国家优势学科创新平台”高校行列。

学校在发展历程中，有着深厚的学术记忆。学术记忆是一种历史的责任，也是人类科学技术发展的坐标。许多专家学者把智慧的涓涓细流，汇聚到人类学术发展的历史长河之中。据学校的史料记载：1953年建校之初，在专业课中有90%的课程采用苏联等国的教材和学术研究成果。广大教师不断消化吸收国外先进技术，并深入石油厂矿进行学术探索。到1956年，编辑整理出学术研究成果和教学用书65种。1956年4月，北京石油学院第一次科学报告会成功召开，活跃了全院的学术气氛。1957~1966年，由于受到全国形势的影响，学校的学术研究在曲折中前进。然而许多教师继续深入石油生产第一线，进行技术革新和科学研究。到1964年，学院的科研物质条件逐渐改善，学术研究成果以及译著得到出版。党的十一届三中全会之后，科学研究被提到应有的中心位置，学术交流也日趋活跃，同时社会科学研究成果也在逐年增多。1986年起，学校设立科研基金，学术探索的氛围更加浓厚。学校始终以国家战略需求为使命，进入“十一五”之后，学校科学研究继续走“产学研相结合”的道路，尤其重视基础和应用基础研究。“十五”以来学校的科研实力和学术水平明显提高，成为石油与石化工业的应用基础理论研究和超前储备技术研究，以及科技信息和学术交流

的主要基地。

在追溯学校学术记忆的过程中，我们感受到了石大学者的学术风采。石大学者不但传道授业解惑，而且以人类进步和民族复兴为己任，做经世济时、关乎国家发展的大学问，写心存天下、裨益民生的大文章。在半个多世纪的发展历程中，石大学者历经磨难、不言放弃，发扬了石油人“实事求是、艰苦奋斗”的优良作风，创造了不凡的学术成就。

学术事业的发展犹如长江大河，前浪后浪，滔滔不绝，又如薪火传承，代代相继，火焰愈盛。后人做学问，总要了解前人已经做过的工作，继承前人的成就和经验，在此基础上继续前进。为了更好地反映学校科研与学术水平，凸显石油科技特色，弘扬科学精神，积淀学术财富，学校从2007年开始，建立“中国石油大学(北京)学术专著出版基金”，专款资助教师以科学研究成果为基础的优秀学术专著的出版，形成《中国石油大学(北京)学术专著系列》。受学校资助出版的每一部专著，均经过初审评议、校外同行评议、校学术委员会评审等程序，确保所出版专著的学术水平和学术价值。学术专著的出版覆盖学校所有的研究领域。可以说，学术专著的出版为科学研究的先行者提供了积淀、总结科学发现的平台，也为科学研究的后来者提供了传承科学成果和学术思想的重要文字载体。

石大一代代优秀的专家学者，在人类学术事业发展尤其是石油石化科学技术的发展中确立了一个个坐标，并且在不断产生着引领学术前沿的新军，他们形成了一道道亮丽的风景线。“莫道桑榆晚，为霞尚满天”。我们期待着更多优秀的学术著作，在园丁灯下伏案或电脑键盘的敲击声中诞生，展现在我们眼前的一定是石大寥廓邃远、星光灿烂的学术天地。

祝愿这套专著系列伴随新世纪的脚步，不断迈向新的高度！

中国石油大学(北京)校长

张来斌

2008年3月31日

前 言

以石油、天然气为典型代表的油气资源是世界各国现阶段最重要的能源，也是各国制造业、交通运输业、国防工业的基础，它是维持经济发展和社会秩序的物质前提，在国民经济中占据着非常重要的地位。全球油气资源种类丰富、储量巨大，但勘探、开发、加工自然界存在的各类油气资源都依赖先进的科学技术：首先对自然资源的分布、品位等储存状况进行探测；其次对开发过程中的资源状况进行有效监控，保证能源生产安全和环境友好；最后对能源产品的品质进行检测。我国油气资源具有地质条件复杂、地表条件多样、富集程度低、油气埋藏深和原油含水率高等特点，勘探开发和高效利用面临着许多困难和挑战。如何解决油气资源勘探开发过程中的技术难题、降低开采成本、提高经济效益，已经成为业内研究者关注的焦点，研究并推动油气资源勘探的新理论、新方法势在必行。

近年来，光学技术以其非接触、高灵敏度、不受电磁干扰等优势，在石油领域展现出重要的应用及科研价值，其中以遥感、电磁波等方法为代表的勘探测井技术是勘探油气资源的基础，各类质谱、色谱及以紫外、红外、可见光、荧光光谱方法为代表的光谱技术是液态、气态能源物质的分析基础。应该说，随着光学技术的不断发展，光学方法可以成为油气资源现有表征和评价方法的补充手段，也有可能为油气资源的评价提供新的数值指标，在未来有着光明的应用前景。

2011年，针对国家油气能源战略的重大需求，笔者提出油气光学(oil and gas optics)概念，开拓了油气光学工程的研究方向，将光学前沿技术与油气资源的勘探开发相结合，开展油气物质光学性质的应用基础研究及光学方法在油气领域应用的重大关键技术、前瞻性技术的研究。目前，中国石油大学(北京)“油气光学”科研创新团队已在油气资源光学探针表征与评价，油气资源光探测物理、材料及器件，流体光学，纳米岩石物理，大气环境光学等方面取得了重要进展。本书基于油气资源表征评价过程中对光学新方法的实际需求，列举了太赫兹光谱、斜入射光反射差、激光感生电压检测、激光超声等几种光学新技术的操作流程及油气资源光学表征评价的具体实施实验。作为“油气光学系列丛书”中的一

册, 本书将为建立更丰富有效的油气资源表征评价体系提供新的选择, 促进石油领域关键指标、关键问题的有效解决。

本书涵盖了石油勘探、油气储运、石油化工及环境污染和安全的相关表征评价实验内容, 以油气光学技术——油气光学实验的形式来构架, 根据苗昕扬、孙世宁、詹洪磊、王金、吕志清、杨肖、海晓泉、孙琦、管丽梅、金武军、杨晨、姜晨、付成、王伟、冯鑫、宋艳、赵卉、邬嫡波、冷文秀、戈立娜、王丹丹、李涛、宝日玛、李倩、李宁、吴成红等“油气光学”科研创新团队成员的学术成果, 由赵昆、苗昕扬、詹洪磊、祝静、宋艳、陈儒、赵卉、吕志清、冷文秀、吴成红、张善哲撰写完成。本书在写作上更贴近石油学科的思维和方法, 并强调光学方法的针对性和实用性。

本书得到了国家自然科学基金、国家重点基础研究发展计划、北京市自然科学基金、中国石油大学(北京)学术专著出版基金, 以及油气光学探测技术北京市重点实验室、石油和化工行业油气太赫兹波谱与光电检测重点实验室、中关村开放实验室、首都科技创新券开放实验室的专家学者及师生的大力支持。

由于作者水平有限, 书中不妥之处在所难免, 恳请广大读者批评指正。

赵 昆

油气光学探测技术北京市重点实验室

石油和化工行业油气太赫兹波谱与光电检测重点实验室

中国石油大学(北京)

2018年9月8日于北京

目 录

丛书序

前言

绪论 油气光学实验方法与技术	1
一、太赫兹光谱技术	1
(一) 太赫兹时域光谱技术	2
(二) 太赫兹成像技术	4
(三) 太赫兹光学参数的提取	5
二、斜入射光反射差技术	6
(一) 斜入射光反射差技术的探测原理	7
(二) 斜入射光反射差的装置组成	8
(三) 斜入射光反射差信号的数据处理	10
三、全光学激光超声技术	13
(一) 激光超声技术的探测原理	14
(二) 激光超声装置的组成	16
四、激光感生电压检测技术	19
(一) 光与物质的相互作用	19
(二) 激光感生电压检测装置	21
(三) 激光感生电压的测试指标	23
五、3D 打印技术	25
(一) 3D 打印技术的成型流程	25
(二) 3D 打印的相关设备简介	26
实验一 天然气水合物演化过程的太赫兹光谱表征	32
一、研究背景及进展	32

二、实验目的	34
三、实验设备及实验材料	34
四、实验内容	36
(一) 设计实验室用气体水合物合成装置	36
(二) 实验过程与测试	41
实验二 孔隙、裂缝的光谱检测与成像	42
一、研究背景及进展	42
(一) 模拟狭缝的太赫兹光谱检测	42
(二) 孔隙、裂缝的斜入射光反射差成像	46
二、实验目的	52
三、实验设备及实验材料	52
四、实验内容	52
(一) 模拟狭缝的太赫兹光谱检测	52
(二) 孔隙、裂缝的斜入射光反射差成像	53
实验三 页岩各向异性的激光探针表征	54
一、研究背景及进展	54
(一) 页岩岩心各向异性的激光感生电压表征	57
(二) 页岩岩心各向异性的全光学探测	63
二、实验目的	67
三、实验设备及实验材料	67
四、实验内容	68
(一) 页岩岩心各向异性的激光感生电压表征	68
(二) 页岩岩心各向异性的全光学探测	69
补充实验：激光超声实验仪的运行与优化	71
一、激光超声实验仪的运行	71
(一) 开启系统	71
(二) Tempo 2D 干涉仪开机及相关设置	74
(三) 关闭系统	75
二、基本测试	76
(一) 铝板厚度的测量	76
(二) 长方胶木厚度的测量	77

二、实验目的	34
三、实验设备及实验材料	34
四、实验内容	36
(一) 设计实验室用气体水合物合成装置	36
(二) 实验过程与测试	41
实验二 孔隙、裂缝的光谱检测与成像	42
一、研究背景及进展	42
(一) 模拟狭缝的太赫兹光谱检测	42
(二) 孔隙、裂缝的斜入射光反射差成像	46
二、实验目的	52
三、实验设备及实验材料	52
四、实验内容	52
(一) 模拟狭缝的太赫兹光谱检测	52
(二) 孔隙、裂缝的斜入射光反射差成像	53
实验三 页岩各向异性的激光探针表征	54
一、研究背景及进展	54
(一) 页岩岩心各向异性的激光感生电压表征	57
(二) 页岩岩心各向异性的全光学探测	63
二、实验目的	67
三、实验设备及实验材料	67
四、实验内容	68
(一) 页岩岩心各向异性的激光感生电压表征	68
(二) 页岩岩心各向异性的全光学探测	69
补充实验：激光超声实验仪的运行与优化	71
一、激光超声实验仪的运行	71
(一) 开启系统	71
(二) Tempo 2D 干涉仪开机及相关设置	74
(三) 关闭系统	75
二、基本测试	76
(一) 铝板厚度的测量	76
(二) 长方胶木厚度的测量	77

(三) 圆柱形粗布胶木各向异性的测量·····	77
(四) 圆柱形细布胶木各向异性的测量·····	78
三、实验内容·····	79
实验四 基于激光超声技术的油页岩热解过程检测 ·····	81
一、研究背景及进展·····	81
(一) 油页岩热解过程的检测·····	81
(二) 油页岩半焦样品的检测·····	86
二、实验目的·····	90
三、实验设备及实验材料·····	90
四、实验内容·····	91
(一) 油页岩热解过程的检测·····	91
(二) 油页岩半焦样品的检测·····	93
实验五 油页岩含油率的光学技术表征 ·····	95
一、研究背景及进展·····	95
(一) 基于半焦太赫兹光谱的油页岩含油率表征·····	96
(二) 非热解条件下油页岩含油率的太赫兹光谱表征·····	101
(三) 利用太赫兹光学参数的各向异性表征油页岩含油率·····	103
(四) 基于光伏/光电导的油页岩含油率表征·····	106
二、实验目的·····	109
三、实验设备及实验材料·····	110
四、实验内容·····	110
(一) 基于半焦太赫兹光谱的油页岩含油率表征·····	110
(二) 非热解条件下油页岩含油率的太赫兹光谱表征·····	113
(三) 利用太赫兹光学参数的各向异性表征油页岩含油率·····	113
(四) 基于光伏/光电导的油页岩含油率表征·····	114
实验六 高含水率原油的光学技术检测 ·····	117
一、研究背景及进展·····	117
(一) 原油含水率的激光超声表征·····	117
(二) 结合 3D 打印技术的高含水原油含水率的太赫兹光谱表征·····	120
二、实验目的·····	122

三、实验设备及实验材料	123
四、实验内容	123
(一) 原油含水率的激光超声表征	123
(二) 结合 3D 打印技术的高含水原油含水率的太赫兹光谱表征	124
补充实验 1: 设计适用于太赫兹光谱检测的 3D 打印样品池	124
一、三维模型设计及打印参数设置	124
二、3D 打印样品的制备方法	126
(一) 岩石各向异性模型的 3D 打印制备方法	126
(二) 可燃冰笼状结构模型的 3D 打印制作方法	127
(三) 适用于太赫兹光谱检测的样品池及其制作方法	129
补充实验 2: 3D 打印样品池精度的太赫兹光谱检测	133
实验七 原油乳状液的太赫兹光谱表征	138
一、研究背景及进展	138
(一) 原油乳状液稳定性的评价	139
(二) 原油乳状液类型的识别	142
(三) 低含水率原油的太赫兹光谱检测	144
二、实验目的	148
三、实验设备及实验材料	148
四、实验内容	148
(一) 演示原油乳状液的油水分层过程	148
(二) 原油乳状液稳定性的评价	149
(三) 原油乳状液类型的识别	150
(四) 低含水率原油的太赫兹光谱检测	151
实验八 原油蜡沉积与磁化降黏的太赫兹光谱表征	152
一、研究背景及进展	152
(一) 烷烃冷凝相变过程的太赫兹光谱表征	153
(二) 模拟油中蜡晶形态结构的太赫兹光谱检测	157
(三) 原油磁化降黏的太赫兹光谱表征	162
二、实验目的	167
三、实验设备及实验材料	167
四、实验内容	168

(一) 烷烃冷凝相变过程的太赫兹光谱表征	168
(二) 模拟油中蜡晶形态结构的太赫兹光谱检测	169
(三) 原油磁化降黏的太赫兹光谱表征	170
(四) SEM 图像的分形维数计算	170
实验九 流体的太赫兹光谱检测	174
一、研究背景及进展	174
(一) 水平方形管油水两相流	175
(二) 水平圆管油水两相流	178
(三) 方形微通道单相水流	182
二、实验目的	185
三、实验设备及实验材料	186
四、实验内容	186
(一) 水平方形管油水两相流	186
(二) 水平圆管油水两相流	187
(三) 方形微通道单相水流	188
实验十 金属腐蚀防护的太赫兹光谱检测	189
一、研究背景及进展	189
(一) 盐雾环境下铁片腐蚀的太赫兹光谱表征	190
(二) 涂层盐雾环境下铁片腐蚀的太赫兹光谱表征	192
(三) 铁化合物产物及其混合物的太赫兹光谱检测	199
二、实验目的	200
三、实验设备及实验材料	200
四、实验内容	201
(一) 盐雾环境下的样品制备与监测	201
(二) 涂层样品的制备与监测	202
(三) 铁化合物产物及其混合物的制备	203
实验十一 干馏气内烷烃成分的太赫兹光谱检测	204
一、研究背景及进展	204
二、实验目的	209
三、实验设备及实验材料	210

四、实验内容	210
(一) 气室、减压阀的组装和使用	210
(二) 气体样品的制备	213
(三) 实验测试	215
实验十二 油气水分界面的太赫兹光谱成像	216
一、研究背景及进展	216
(一) 工艺品样品中油气分界面的太赫兹光谱表征	218
(二) 石英样品池中油气水分界面的太赫兹光谱表征	220
(三) 3D 打印样品池中油气水分界面的太赫兹光谱表征	222
(四) 油气水分布的太赫兹光谱分析	225
(五) 油水混合物分离过程的太赫兹光谱表征	229
二、实验目的	232
三、实验设备及实验材料	232
四、实验内容	232
(一) 油气水分界面的太赫兹光谱表征	232
(二) 油气水分布的太赫兹光谱分析	233
(三) 油水混合物分离过程的太赫兹光谱表征	233
实验十三 催化反应的太赫兹光谱检测	236
一、研究背景及进展	236
二、实验目的	240
三、实验设备及实验材料	240
四、实验内容	240
(一) 催化剂 13X 分子筛的太赫兹光谱特性	240
(二) 设计适宜于太赫兹光谱检测的有机催化反应装置	241
(三) AlCl_3 催化下邻二甲苯异构化反应的太赫兹光谱特性	243
实验十四 成品油的太赫兹光谱分析	244
一、研究背景及进展	244
(一) 柴油硫含量的太赫兹光谱表征	244
(二) 生物柴油/石化柴油混合物的燃烧特性表征	248
(三) 汽油柴油牌号识别	251

二、实验目的	253
三、实验设备及实验材料	254
四、实验内容	254
(一) 实验样品池的制备	254
(二) 柴油硫含量的太赫兹光谱表征	254
(三) 生物柴油/石化柴油混合物的燃烧特性表征	255
(四) 汽油柴油牌号识别	256
实验十五 水污染痕量的太赫兹光谱检测	257
一、研究背景及进展	257
(一) 基于太赫兹光谱的不同浓度盐离子水溶液的表征	257
(二) 不同浓度硝酸盐溶液的太赫兹光谱表征	259
二、实验目的	262
三、实验设备及实验材料	262
四、实验内容	262
实验十六 细颗粒物监测及来源识别	264
一、研究背景及进展	264
(一) 不同地区大气环境中 $PM_{2.5}$ 的太赫兹光谱分析	265
(二) 煤炭燃烧排放的 $PM_{2.5}$ 的太赫兹光谱分析	269
二、实验目的	276
三、实验设备及实验材料	276
四、实验内容	276
(一) 熟悉 $PM_{2.5}$ 采集系统	276
(二) $PM_{2.5}$ 样品的收集与测试	278
(三) 空气采集器的维护	279
(四) 二维相关光谱技术简介	279
参考文献	282
彩图	

绪论 油气光学实验方法与技术

一、太赫兹光谱技术

太赫兹(terahertz, THz)波通常是指位于微波和红外线之间的电磁波辐射,这一频段的电磁波在历史上也常常被称为亚毫米波或远红外波。通常所说的太赫兹波的频率一般在 $0.1 \sim 10\text{THz}$ ^①。从长波方向看,它与微波、毫米波有重叠;从短波方向看,它与红外线有重叠。同时,太赫兹波段也是电磁波谱上由电子学领域向光子学领域过渡的区域,因此对太赫兹波段的研究具有重要的科学研究价值和实际应用价值。历史上,无论是从低频的微波往高频方向发展,还是从高频的可见光往低频方向发展,太赫兹波的辐射源和检测方法在原理上或技术上的困难而难以实现,所以很长一段时间内其的相关研究一度处于停滞不前的状态,被称为太赫兹空隙。

太赫兹技术有许多引人关注的特点,这些特点源于太赫兹辐射本身的特性和物质在这一频段独特的频率响应特征,从而使太赫兹技术在某些特定领域中具有不可替代的优势。与传统的电磁波相比,太赫兹辐射具有很多独特的性质。

(1) 穿透性:太赫兹波对于很多非极性介电材料和非极性液体具有良好的穿透性,其对如塑料袋、布料、纸箱等材料有很强的穿透能力,可以用来对包装的物品进行质量检测或者用于对危险品的安全检查。同时太赫兹波具有类似光波的方向性,因此它可以与 X 射线成像和超声波成像技术相互补充,在无损检测和质量检测方面具有非常好的应用前景。

(2) 安全性:太赫兹波的光子能量较低,频率为 1THz 的光子对应的能量大约只有 4meV 。这个数值约为 X 射线光子能量的 $1/10^6$,因此太赫兹辐射的能量不会对生物组织产生有害的光电离和破坏,非常适合对生物组织和生物活性物质(如蛋白质、DNA 等)进行检查。太赫兹辐射非常安全,不会对人体造成损害,

① $1\text{THz}=10^{12}\text{Hz}$ 。

可以应用于旅客安检的人体成像系统。

(3) 光谱特征吸收：太赫兹波段包含了丰富的光谱信息，大量的分子转动和振动(包括集体振动)的跃迁都发生在太赫兹波段。此外，凝聚态体系的声子吸收很多也位于太赫兹波段，自由电子对太赫兹波也有很强的吸收和散射。因此，可以根据分子在太赫兹波段特有的光谱信息识别不同的分子，从而达到对不同分子的指纹识别的目的。

对于宽带太赫兹脉冲辐射，特别是太赫兹时域光谱(THz-TDS)技术产生的太赫兹脉冲辐射不但具有以上所述的特点，还具有如下特点。

(1) 瞬态性：太赫兹波的典型脉宽在亚皮秒^①量级，可以实现亚皮秒、飞秒时间分辨率的研究，而且通过相关测量技术，能够有效地抑制背景辐射噪声的干扰。目前，太赫兹时域光谱技术的辐射强度测量的信噪比已经可以大于 10^4 ，远高于傅里叶变换红外光谱技术。

(2) 相干性：太赫兹时域光谱技术的相干测量机制使产生的太赫兹波具有相干性。基于相干测量技术的太赫兹时域光谱技术能够直接测量得到太赫兹波电场的振幅和相位，可以方便地提取待测对象复杂的物理和化学信息。

(3) 宽带性：一个太赫兹时域脉冲通常包含若干个周期的电磁振荡，典型的太赫兹脉冲的频带可以覆盖从吉赫兹至几十个太赫兹的范围，这样可以实现在大的频率范围内进行物质的太赫兹吸收光谱研究。

自 20 世纪 80 年代以来，由于超快光学、半导体、电子学和微加工等科技的发展，太赫兹波的产生和探测技术也逐渐成熟，其中太赫兹时域光谱技术和太赫兹成像技术得以快速发展，已经取得了很多有价值的研究成果。

(一) 太赫兹时域光谱技术

太赫兹时域光谱技术是 20 世纪 80 年代由 Bell 实验室和 IBM 公司 Watson 研究中心发展起来的，它是一种利用飞秒激光技术获得宽波段太赫兹脉冲的技术。这种脉冲是单周期的电磁辐射脉冲，周期小于 1ps，频谱为 0.1GHz~5THz。太赫兹时域电场波形包含太赫兹脉冲的强度、相位和时间等完整信息，通过傅里叶变换可同时得到被测样品的吸收和色散光谱。这种技术探测到的太赫兹脉冲峰值功率很高，脉宽在皮秒量级，能方便地进行时间分辨研究。同时，通过对测量频谱的分析和处理，还可以获得物质的折射率、介电常数、吸收系数和载流子浓度等参数。

^① 1ps= 10^{-12} s。