

太赫兹波光谱传输在断路器真空度检测中的应用

杨永旭¹, 许鑫¹, 张慧媛², 吴振升²

(1. 云南电网有限公司玉溪供电局, 云南 玉溪 653100; 2. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044)

摘要: 真空断路器与其他类型断路器相比占用面积小, 具有利用高真空度灭弧的特点, 可以较频繁地开断短路电流且重量较轻, 在中压或者高压电力系统中具有明显的优势。目前对于真空断路器真空度的检测, 有观察法、交流耐压法和电磁法等, 且真空度带电检测可实施方法较少, 可靠性和准确度需要进一步提高。首先对太赫兹光谱技术进行理论分析, 然后仿真分析了太赫兹波在不同真空度下的光谱吸收与传输特性, 最后利用 ANL-127 连续波太赫兹装置与真空断路器进行了验证。仿真分析与实验验证结果一致, 表明太赫兹光谱技术可应用于检测真空断路器真空度。

关键词: 电力断路器; 真空灭弧室; 真空度; 太赫兹; 光谱

Application of terahertz wave spectral transmission in vacuum measurement of circuit breaker

YANG Yongxu¹, XU Xin¹, ZHANG Huiyuan², WU Zhensheng²

(1. Yuxi Power Supply Bureau of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Yuxi 653100, China;

2. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Vacuum circuit breaker compared with other types of circuit breakers occupy a small area, has the use of high vacuum interrupting characteristics, can be more frequent short-circuit current and lighter weight, in the medium-voltage or high-voltage power system has obvious advantages. At present, there are observation method, AC withstand voltage method and electromagnetic method for vacuum circuit breaker vacuum detection, and the vacuum degree charged detection can be implemented in fewer methods, and the reliability and accuracy need to be further improved. The article firstly analyzes theoretically the terahertz spectroscopy technology, after that simulates and analyzes the spectral absorption and transmission characteristics of terahertz waves under different vacuum degrees, and finally verifies with the vacuum circuit breaker using ANL-127 continuous wave terahertz device. The simulation analysis and experimental verification results are consistent, indicating that the terahertz spectroscopy technique can be applied to detect the vacuum degree of vacuum circuit breakers.

Key words: power circuit breaker; vacuum interrupter; vacuum degree; terahertz; spectroscopy

0 引言

在电力系统输电和配电系统领域常用到真空

断路器, 其核心部分为内部的真空灭弧室^[1-6], 是一个全封闭且内部高真空的结构体。正常投入

国家重点研发计划 (2018YFB2100104)

使用的断路器真空灭弧室内部压强在 $1.33 \times 10^{-5} \sim 1.33 \times 10^{-2} \text{Pa}$ 之间。国家标准规定了灭弧室真空度最低为 $6.6 \times 10^{-2} \text{Pa}$ ，而在现实中电力行业的生产检修时，常常在灭弧室的真空度小于 $1.33 \times 10^{-1} \text{Pa}$ 时进行灭弧室的换修工作^[7-10]。随着服役时间的推移或者储存年限的延长，由于内外部的高压强差，外部环境的气体会从结构的空隙慢慢渗透到内部，进而导致气体压强逐渐升高，此时，一定电场下场致作用会使得动触头和静触头中发射出的电子与灭弧室内游离的气体分子发生有效碰撞，最终导致灭弧室击穿，使断路器失去灭弧性能，因此对断路器真空度检测十分重要。目前市场上真空度检测技术大部分是离线检测，且现有的在线检测技术存在准确度较低、费用高、易受外部环境影响和测量稳定性差等问题。

太赫兹波（1 THz= 10^{12}Hz ）指的是频率在0.1~10 THz（波长在3 mm~30 μm ）之间的电磁波，近十几年来，随着太赫兹的探测手段以及硬件水平不断提高，其在检测领域内的应用越来越受到关注。

因此本文拟进行基于太赫兹光谱吸收的真空度检测技术研究，此研究对断路器内部真空度带电巡检有重要意义。

1 太赫兹光谱检测技术

1.1 朗伯-比尔（Lambert-Beer）定律

太赫兹波在电力断路器中的损耗包括在空气中的损耗、陶瓷外壳中的损耗、灭弧室内传输的损耗以及各种折反射损耗等，其中传输损耗是主要研究对象。传输损耗主要来自灭弧室内各种气体成分对电磁波的吸收，当真空断路器正常工作时，动静触头分离且由于场致发射作用触头间产生电弧，灭弧后电极间以及电极周围产生的金属蒸气快速扩散冷却，从而使得触头间恢复高真空状态。在上述过程中，灭弧室内会产生巨大热量，根据热胀冷缩原理，断路器陶瓷外壳在切断短路电流过程中分子间隙变大，因此外部空气会

通过空隙进入灭弧室内，随着断路器开断次数增加，灭弧室内真空度下降，气体压强逐渐上升。

空气的成分很复杂，不同的气体对不同频率、不同波段的电磁波吸收是不一样的，标准环境下空气主要由氮气、氧气以及一些稀有气体组成，在相对潮湿的环境中还会有较多含量的水蒸气。因此若要分析太赫兹波在灭弧室内的光谱，需要知道大气中对太赫兹波的频段有吸收作用的如水蒸气、氧气和氮气等光谱参数有气体吸收谱线中心频率、振幅的强度大小以及相应的压力展宽系数等。

利用气体光谱来研究其对光的吸收，这种研究方法的理论基础为朗伯-比尔（Lambert-Beer）定律^[17]，表示的是均匀气体介质对于单色光的吸收程度，当一束单色光经过介质后，假定出射光强为 I ，入射光强为 I_0 ，有

$$I = I_0 \exp[-\alpha(\nu)CL] \quad (1)$$

式中， $\alpha(\nu)$ 为气体的吸收系数，此参数表示介质对光的吸收能力，即在一定频率下气体分子捕获光子的能力，单位为 $\text{cm}^2/\text{molecule}$ ，其物理意义可分为微观和宏观，在微观上可表示为气体分子对应入射光中的投影面积，在宏观上可以理解为在1 cm长的空间内，某一波长的光垂直入射进该空间，空间内气体浓度为1 mol/L，此时对应衰减； L 为光通过介质的有效长度； C 为空间内气体浓度大小^[18-20]，具体为每百万体积空气中所含的要研究气体的含量，即用体积浓度来表示 C ，单位为 10^{-6} 。除了气体浓度外，也可用质量浓度来表示，每立方米空气中所含的要研究气体的含量，单位为 mg/m^3 。

通常条件下这两种表示方法可进行换算，二者之间的换算公式为

$$X = MC / 22.4 \quad (2)$$

式中， X 为质量浓度，单位为 mg/m^3 ； C 为体积浓度，单位为 10^{-6} ； M 为相对分子质量。

1.2 太赫兹时域光谱法

文献[21]采用THz-TDS装置测量气体腔内的空气太赫兹时域光谱，不同压强下太赫兹探测所

得空气的时域光谱如图1所示。

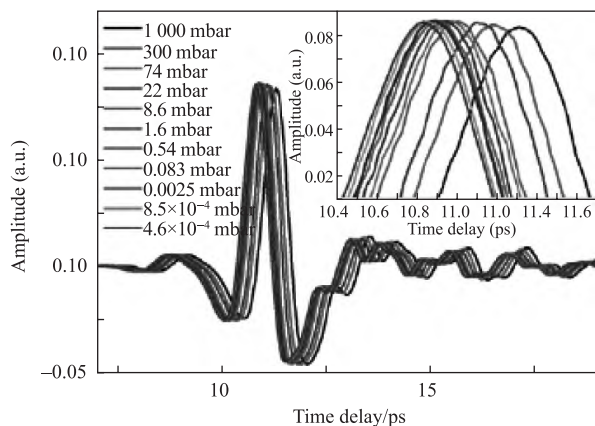


图1 不同压强下空气的太赫兹时域光谱

Fig. 1 Terahertz time-domain spectrum of air at different pressures

由图1可以看出,在不同的真空度下,透射气室后的太赫兹波与太赫兹波源相比均有时间上的延迟和振幅上的衰减,并且由这种延迟和幅值上的衰减可以看出,随气室中压强的变化呈现出一定的规律性趋势。

将得到的时域波形进行后处理,得到在0.2~1.5 THz波段范围内的折射系数。图2为在 $10^{-4} \sim 10^3$ mbar压强范围内获得的空气太赫兹折射率光谱。

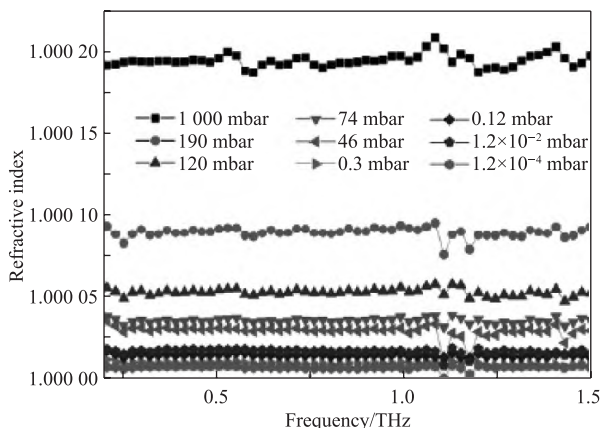


图2 不同压强下空气的太赫兹折射率光谱

Fig. 2 Terahertz refractive index spectrum of air at different pressures

通过图2可知,在所加频率逐渐提高的情况下,计算出的折射率基本在同一水平线上,偶尔出现上下波动,但总体保持不变。伴随着纵坐标

压强的减小,折射率呈现逐渐下降的趋势。这表明在不同的真空压强下,太赫兹波在传播过程中体现出不一样的色散特征,依据这个原理可对不同真空压强下的空气进行辨别,表明利用 THz-TDS 技术所得到的时域波形、吸收系数光谱和折射率光谱可以较迅速地辨别出不同真空环境中的压强是否发生改变,因此,太赫兹时域光谱法是一种可行的测量真空度的新方法。

图3为不同压强的气室中太赫兹波的回波光谱信号强度。

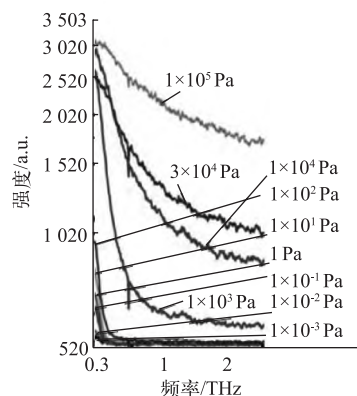


图3 回波光谱信号强度与真空度的关系

Fig. 3 Relationship between echo spectral signal strength and vacuum degree

从图3中可以看出,当气室中的压强减小,即真空度增加时,回波信号的强度逐渐增加,这是因为随着真空度的减小,气室中气体分子数量慢慢增加,光子与气体分子发生有效碰撞的几率增加,从而阻碍光线的传播,使光发生一定程度的反射,气室内压强越大,回波光谱信号的强度也越大,下面从仿真角度对该方法进行分析。

2 仿真分析

2.1 太赫兹波的光谱吸收仿真

下面从仿真层面研究太赫兹波在不同真空度下真空灭弧室中的光谱吸收特性,仿真采用 FDTD Solutions 软件和 CST STUDIO SUITE 2019,使用时域有限差分法进行建模仿真计算,时域有限差分法将麦克斯韦旋度方程等效转化为差分形式,在计算时将空间网格化一步步计算,

对场内的偏微分方程以及各种边界条件进行差分离散化处理,在时间域中求解最终获得信号的宽波段的稳态结果。首先仿真太赫兹波探测真空断路器的敏感频段,即寻找在不同的真空度下,光谱吸收的表征参量最明显的频段。在FDTD Solutions软件上搭建的探测如图4所示,太赫兹脉冲依次经外部空气、真空灭弧室陶瓷外壳、灭弧室内部真空和金属屏蔽罩入射真空灭弧室,太赫兹波最后经金属屏蔽罩反射后返回。

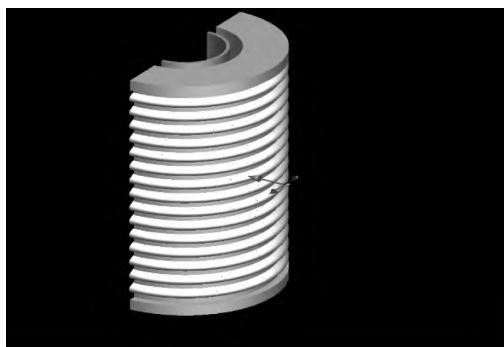
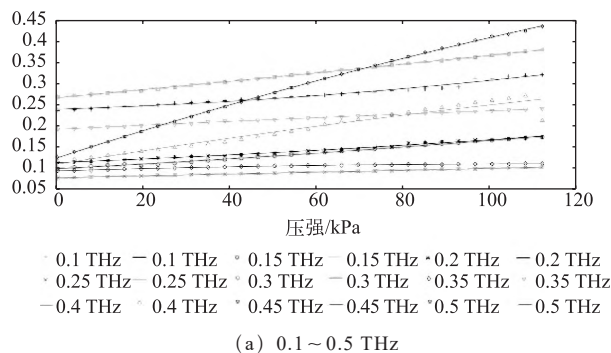


图4 脉冲入射真空灭弧室仿真模型图

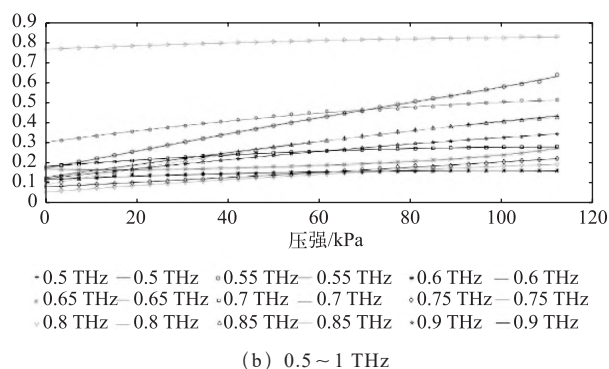
Fig. 4 Simulation model of pulse incident vacuum interrupter

将太赫兹整个频段0.1~10 THz分为四段仿真太赫兹波的光谱吸收随真空度的变化,分别为0.1~0.5 THz、0.5~1 THz、1~5 THz和5~10 THz,前两段以0.1 THz为间隔依次仿真,后两段由于波长跨度相对较小,以0.5 THz为间隔依次仿真,得到每个频段下信号的吸收率后再进行对比,如图5所示。

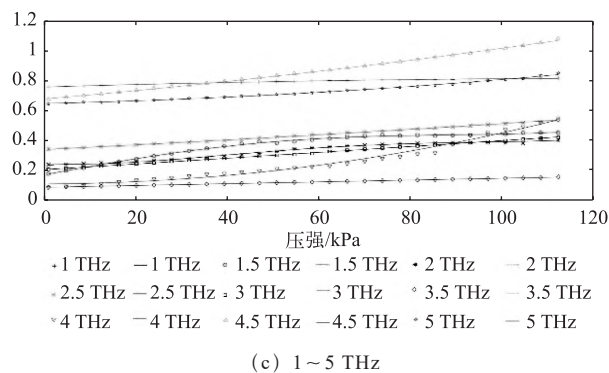
从图5中可看出,在不同的频段内,曲线斜率最大的为较敏感频段,考虑在实际情况下,若脉冲频率过大,会导致信号衰减严重,因此选择0.5 THz左右频段作为仿真频段。



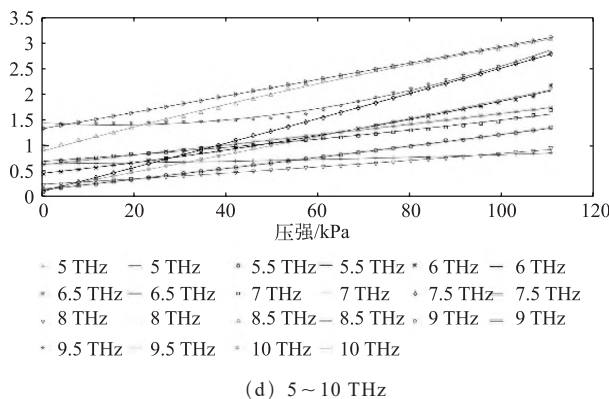
(a) 0.1~0.5 THz



(b) 0.5~1 THz



(c) 1~5 THz



(d) 5~10 THz

图5 0.1~10 THz下脉冲入射灭弧室的吸收率

Fig. 5 Absorption rate of 0.1~10 THz pulse into arc chamber

2.2 太赫兹波的光谱传输特性仿真

设定陶瓷外壳厚度1.5 cm,真空0.5 cm,太赫兹脉冲波从距离陶瓷外壳1 cm处入射,频率0.5 THz左右,波长599.585 μm ,波从y轴正方向入射,电场强度为x方向。在边界条件的选取上,z方向即波的入射方向采用PML边界条件,x和y方向采用周期边界条件,光源的初始电场强度为1 V/m。在光源处设置探针,运行仿真后,探针中获取到的脉冲波形如图6所示。

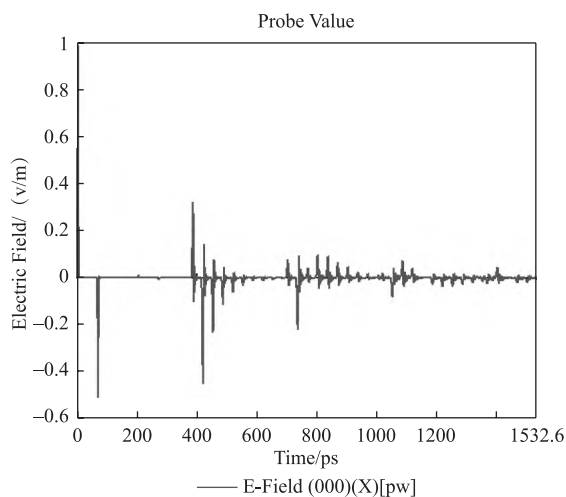


图6 探针中获取到的脉冲波形

Fig. 6 Pulse waveform obtained from probe

从图6中可以看出,波形最左端为脉冲光源波形,随后从左至右依次为第一次陶瓷外界面反射波、陶瓷外壳内界面反射波和在金属屏蔽罩上全反射回来的波形,其余在此后的脉冲波形均为波在界面上多次折反射的结果。

3 实验结果与分析

实验部分采用连续波太赫兹成像技术,获得真空断路器灭弧室内空气的太赫兹光谱。太赫兹装置使用ANL-127连续波太赫兹,频率为0.12 THz、单电源电压3.3 V、低功耗370 mW。使用从实际工作现场收集到的真空断路器,如图7所示。同时用在藤原富集购买的真空抽气泵进行抽气降低真空度。使用真空计确定断路器灭弧室内的真空度变化。



图7 真空断路器

Fig. 7 Vacuum circuit breaker

搭建实验系统如图8所示。

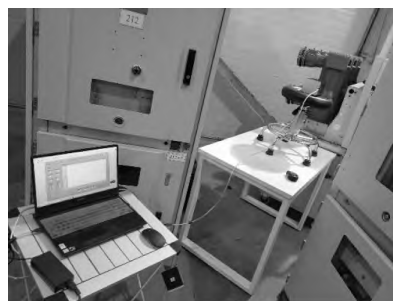
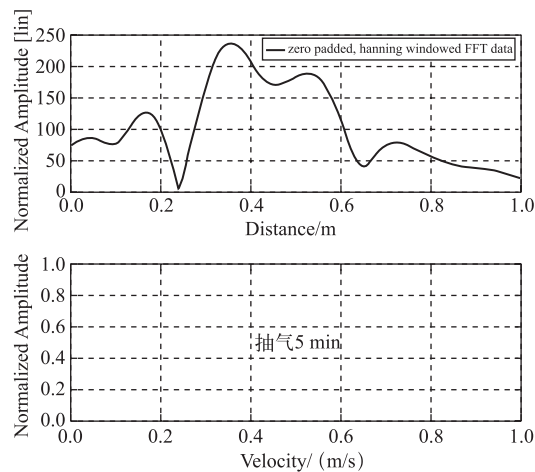


图8 太赫兹实验系统

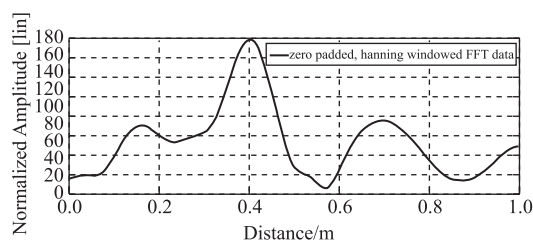
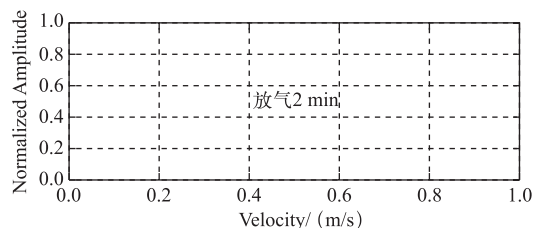
Fig. 8 Terahertz experimental system

本文采用反射式光路进行太赫兹光谱信号测量。通过控制真空泵对真空断路器进行抽气,同时连接真空计对真空度进行测量。本实验通过对抽气5 min、放气2 min、放气5 min以及放气10 min时的真空断路器的太赫兹反射光谱信号图进行记录并分析。图9分别为抽气5 min、放气2 min、放气5 min以及放气10 min的真空断路器太赫兹反射光谱信号图。

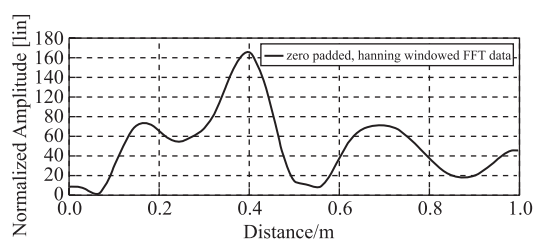
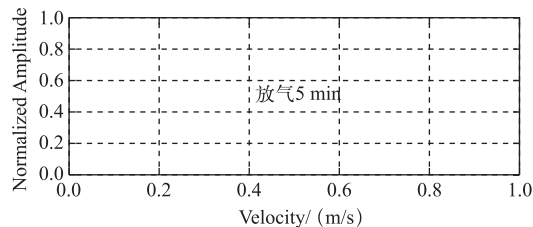
分析图9可以发现,每幅图中在0.17 m、0.4 m处都有信号反射强度波峰。发射器发射出太赫兹信号首先接触断路器外壁反射回波峰,经过断路器内部后,再从断路器后外壁反射回来,距离分别为0.2 m与0.4 m,与波峰位置正好重合。0.2 m之前的波峰是因为发射器前有金属外壳引起的误差,0.4 m后的波峰是真空断路器后的器材反射回来的,在此只研究0.2 m与0.4 m相邻处的信号强度波峰衰减变化,0.2 m与0.4 m相邻处的信号强度波峰变化见表1、表2。



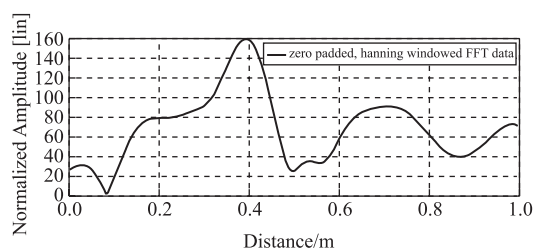
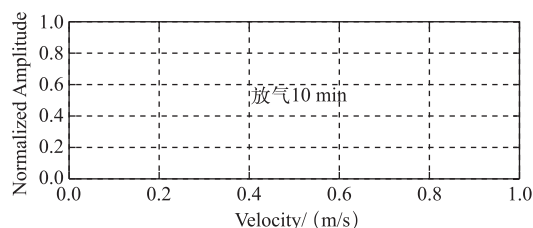
(a) 抽气5 min



(b) 放气2 min



(c) 放气5 min



(d) 放气10 min

图9 真空断路器太赫兹反射光谱信号图

Fig. 9 Terahertz reflection spectrum signal diagram of vacuum circuit breaker

表1 0.2 m 相邻处的信号强度波峰变化

Tab. 1 Change of signal intensity peaks adjacent to 0.2 m

抽放气情况	反射波峰位置 /m	信号强度振幅 /dB
抽气 5 min	0.169	126.935
放气 2 min	0.172	93.456
放气 5 min	0.177	91.543
放气 10 min	0.192	79.783

表2 0.4 m 相邻处的信号强度波峰变化

Tab. 2 Change of signal intensity peaks adjacent to 0.4 m

抽放气情况	反射波峰位置 /m	信号强度振幅 /dB
抽气 5 min	0.356	236.916
放气 2 min	0.401	178.333
放气 5 min	0.396	165.471
放气 10 min	0.396	158.691

通过对比分析表1和表2可以发现,当真空断路器内室真空度下降时,反射波峰信号光谱能量损耗会增加,且波峰位置会向后移动。这说明,当灭弧室内部压强升高时,气体分子增多,太赫兹波在反射过程中会碰到更多的分子,消耗更多的能量,而且会使反射波峰位置向后移动。这与前面的理论分析相符合。可以表明,太赫兹技术可以应用到灭弧室真空度的在线检测领域。

4 结束语

本文面向断路器真空度检测,研究了太赫兹光谱技术作为新型检测方法的可行性。最终得到如下结论:

1) 理论分析表明,回波光谱信号的强度与气室压强呈正相关。

2) 仿真分析了太赫兹波在灭弧室处于不同真空度时的光谱吸收特性,并确定了0.5 THz的太赫兹波可作为检测频段。

3) 实验采用连续波太赫兹成像技术,进一步验证了灭弧室压强升高(真空度下降)时,反射波峰信号光谱能量损耗会随之增加,且光谱信号波峰位置会向后移动。

理论仿真与实验结果一致,表明太赫兹光谱技术可应用于检测断路器灭弧室的真空度。

由于本文着重分析了太赫兹光谱技术应用于

真空断路器真空度检测的可行性, 因此具体的应用方案及不同真空度下的太赫兹光谱信号强度并未在文中给出, 后续将着重进行真空度与太赫兹光谱信号标度分析, 最终形成一套完整的太赫兹光谱技术检测体系。

参考文献

- [1] 王季梅. 真空开关理论及其应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1986: 15-18.
- [2] 王季梅. 真空灭弧室设计、制造及其应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1993: 20-25.
- [3] 毛慧勇. 真空开关真空度在线监测研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
- [4] 刘健. 快速开关技术应用现状与展望[J]. 供用电, 2017, 34(11): 2-6.
- [5] 董镒, 李恒真, 易林, 等. 基于形态小波和支持向量机的高压断路器状态监测和故障诊断[J]. 电测与仪表, 2017, 54(4): 92-99.
- [6] 吴梦泽, 朱建成, 高云广, 等. 真空断路器真空度检测方法研究现状与展望[J]. 工矿自动化, 2018, 44(6): 6-10.
- [7] 洪伟, 余超, 陈继新, 等. 毫米波与太赫兹技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2016, 46(8): 1086-1107.
- [8] 杨秀蔚, 张德海, 刘锬钰, 等. 多层介质中隐含层的太赫兹无损检测[J]. 光子学报, 2021, 50(3): 0312001.
- [9] 王鹤 赵国忠. 几种塑料的太赫兹光谱检测[J]. 光子学报, 2010, 39(7): 1185-1188.
- [10] 张丹丹, 任姣姣, 李丽娟, 等. 玻璃纤维蜂窝复合材料的太赫兹无损检测技术[J]. 光子学报, 2019, 48(2): 0212002.
- [11] 刘荣海, 唐法庆, 耿磊昭. 太赫兹技术在电力设备检测中的应用[J]. 云南电力技术, 2018, 46(4): 53-55, 59.
- [12] 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.
- [13] 王迎新, 康克军, 陈志强, 等. 利用太赫兹光谱定量分析固体混合物[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(2): 161-164.
- [14] THEOFANOPOULOS P C, SAKR M, TRICHOPOULOS G C. Multistatic terahertz imaging using the radon transform[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 199: 1-1.
- [15] HESS M, KOEPKE P, SCHULT I. Optical properties of aerosols and clouds: the software package OPAC[J]. Bull Am Met Soc, 1998, 79: 831-844.
- [16] 郑林. 基于近红外光谱吸收原理的气体传感研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [17] 谢科. 基于可调谐激光二极管吸收光谱技术的CO₂气体检测系统的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [18] 张雯, 雷银照. 太赫兹无损检测的进展[J]. 仪器仪表学报, 2008(7): 1563-1568.
- [19] 邸志刚, 姚建铨, 贾春荣, 等. 太赫兹成像技术在无损检测中的实验研究[J]. 激光与红外, 2011, 41(10): 1163-1166.
- [20] 谢维信, 裴继红. THz信号处理与分析的研究现状和发展展望[J]. 电子学报, 2007(10): 1973-1979.
- [21] 尼浩, 徐山森, 冷文秀, 等. 真空环境下空气的太赫兹光谱痕量检测[J]. 现代科学仪器, 2013(1): 118-121.

作者简介

杨永旭(1984—), 男, 高级工程师, 研究方向为变电设备维修。

(收稿日期: 2021-11-03)

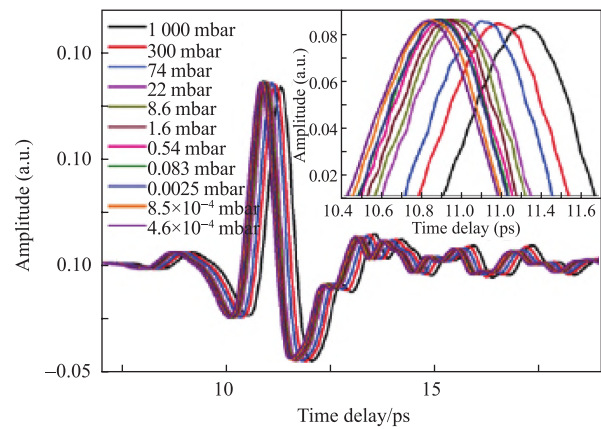


图 1 不同压强下空气的太赫兹时域光谱

Fig. 1 Terahertz time-domain spectrum of air at different pressures

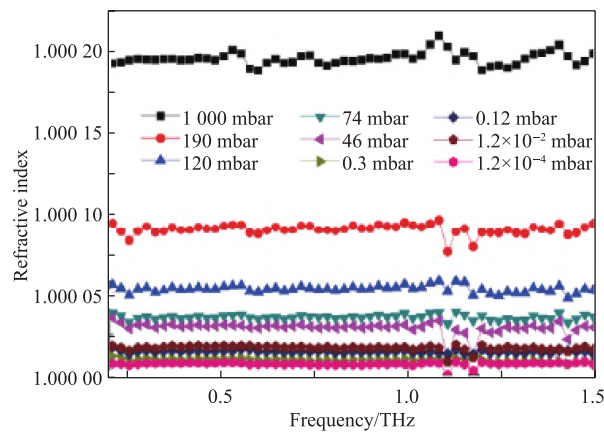


图 2 不同压强下空气的太赫兹折射率光谱

Fig. 2 Terahertz refractive index spectrum of air at different pressures

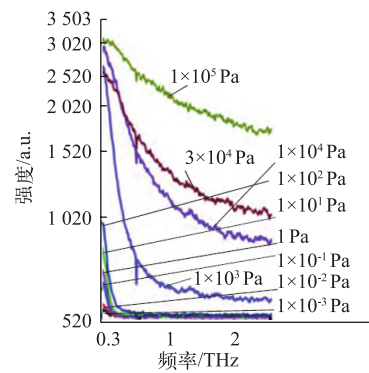
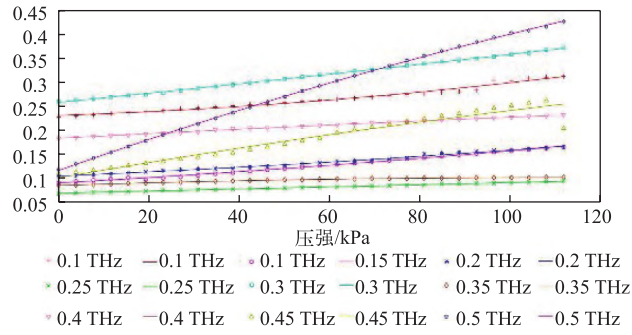
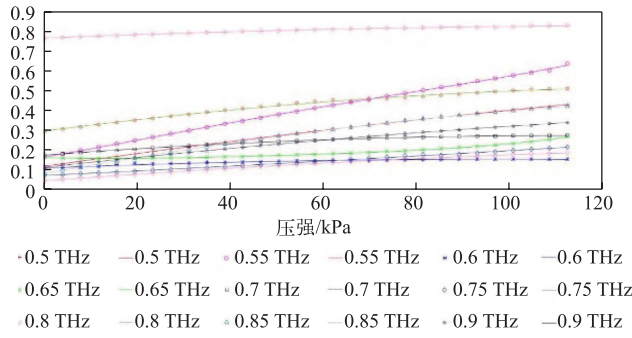


图 3 回波光谱信号强度与真空度的关系

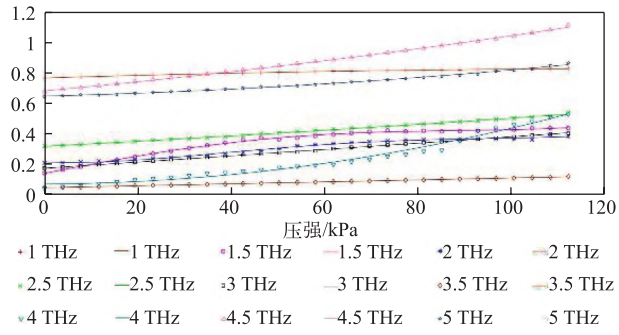
Fig. 3 Relationship between echo spectral signal strength and vacuum degree



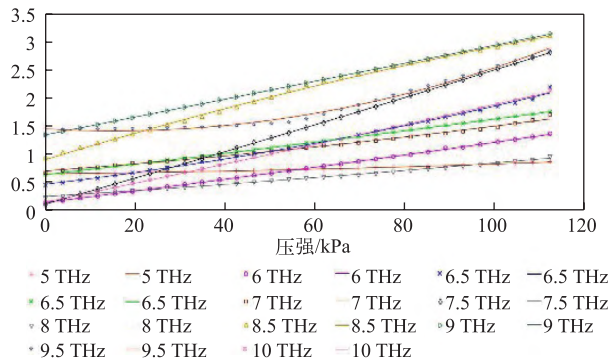
(a) 0.1 ~ 0.5 THz



(b) 0.5 ~ 1 THz



(c) 1 ~ 5 THz



(d) 5 ~ 10 THz

图 5 0.1 ~ 10 THz 下脉冲入射灭弧室

Fig. 5 Absorption rate of 0.1 ~ 10 Thz pulse into arc chamber