

基于自混合干涉效应的超声波光纤传感实验研究

吴春旭^{1,2} 王陆唐^{1,2} 方 捻^{1,2*} 秦海娟^{1,2}

(¹ 上海大学特种光纤与光接入网省部共建重点实验室, 上海 200072; ² 上海大学通信与信息工程学院, 上海 200072)

摘要 针对电力变压器内部局部放电产生的超声波信号的检测需求,利用半导体激光器的自混合干涉效应,结合 Sagnac 干涉技术,提出一种结构简单、构思新颖的光纤超声波传感系统。在弱反馈的条件下,通过 Sagnac 干涉仪对放电超声波扰动传感光纤所引起的激光器振荡频率变化的测量,可以检测出局部放电。探讨了该系统的工作原理,并开展了实验研究。对铅笔芯折断或金属针自由掉落以及压电陶瓷片等多种方式产生的超声波信号进行检测,检验了该实验系统的传感性能。用平行电极的高压放电模拟电力系统的放电现象,包括电晕放电和局部放电。分别在不同的湿度和高压条件下对其进行检测,均获得了良好的效果。实验结果表明,这种传感方式具有检测灵敏度高和响应特性好等优点,能够检测高达 300 kHz 的超声波信号,可满足电力系统对局部放电检测的需求。

关键词 光纤光学;光纤传感;自混合干涉效应;Sagnac 干涉;局部放电;超声波检测

中图分类号 TN29; TN248.4 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.s106005

Experimental Study of Fiber-Optic Ultrasonic Wave Sensing Based on Self-Mixing Interference Effect

Wu Chunxu^{1,2} Wang Lutang^{1,2} Fang Nian^{1,2} Qin Haijuan^{1,2}

(¹ Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China)
² School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract Aiming at the detection requirements for ultrasonic waves resulted from partial discharges in power transformers, a fiber-optic ultrasonic wave sensor system with a simple and novel structure utilizing the self-mixing interference effect in a semiconductor laser combined with Sagnac interferometric techniques is proposed. Under the condition of weak external optical feedback, the partial discharges can be determined by measuring the changes of oscillating frequency of the laser diode induced by the disturbances of sensing fiber by discharge-induced ultrasonic waves with the Sagnac interferometer. The operation principles of the system are explored and experimental researches are carried out. The ultrasonic waves produced by various ways such as pencil broken, metal pin free falling and piezoelectric ceramics are detected. The sensing performances of the experimental system are tested. The discharge phenomena in a power system are simulated with high-voltage discharges occurring between two parallel copper wires, including the corona discharges and partial discharges. They are detected under different humidity levels and voltages. The satisfied results are obtained. All the experimental results show that the proposed sensor system has high sensitivities and good high frequency responses as well as a capacity to detect weak ultrasonic waves up to 300 kHz. It can be concluded that the proposed system can meet the requirements for partial discharge detection in the power industry.

Key words fiber optics; fiber-optic sensing; self-mixing interference effect; Sagnac interference; partial discharge; ultrasonic detection

OCIS codes 060.2370; 190.7070; 120.0280

1 引 言

电力变压器是电力系统中重要的设备之一,其

安全运行意义重大。在现场运行中,局部放电(简称局放)是引起电力变压器绝缘劣化、导致事故发生的

收稿日期: 2013-11-06; 收到修改稿日期: 2014-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(61108004,61377082)、上海市科学技术委员会(11ZR1413300)、上海市重点学科(S30108)

作者简介: 吴春旭(1990—),女,硕士研究生,主要从事光纤传感和超声波检测等方面的研究。

E-mail: wuchunxu-1580@163.com

导师简介: 王陆唐(1956—),男,博士,副研究员,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: ltwang@mail.shu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: nfang@staff.shu.edu.cn

重要原因之一。局部放电是指导体绝缘层间的放电现象,在高电压下,随着绝缘特性的老化,局部放电会不断地出现。由局部放电所产生的电火花会不断腐蚀导体绝缘层,并使局部缺陷迅速扩大,最后导致整个绝缘层被击穿,出现电气短路等严重事故。因此对局部放电的检测是对电力变压器内部运行状态施行实时监测的手段之一^[1]。局部放电通常会产电、光、声、热等物理化学现象,根据这些现象,目前已有相应的检测方法,其中包括电脉冲法、光检测法、超声波法、超高频法、气相色谱法和红外热相法等^[1]。电力变压器内通常注入绝缘油,局部放电产生的高频超声波信号通过介质,包括绝缘油和金属外壳,向四周传播。通常由局部放电所产生的超声波信号频率大约分布在 20~300 kHz 之间^[2-3]。

光纤传感技术是 20 世纪 70 年代伴随光纤通信技术的发展而迅速发展起来的新型传感技术,它具有一系列其他载体和媒质难以相比的优点,特别适合于强电磁干扰、易燃、易爆等恶劣环境下使用。因此,采用光纤传感技术实现对电力变压器内局部放电信号的超声波检测一直受到国家电力测量部门和各国科研机构的青睐,近几年来不断有新的检测方法推出^[2-6]。

激光自混合干涉(SMI)效应是指当激光照射到物体表面时,一部分光被反射或散射反馈到激光器内并与谐振腔内光束相混合产生干涉的效应^[7]。自混合干涉会改变激光器的输出光强度、谐振频率与光谱特性。在激光自混合干涉信号中,相位和振幅的变化与外腔的光程及外反射表面有关。与传统的双光束干涉技术相比,基于自混合干涉效应的光纤传感技术具有不依赖光源的相干长度,不依赖于光纤类型与激光器类型,能够用于识别目标靶的运动方向等特点,是当前具有良好发展前景的光纤传感技术之一^[8-9]。目前该传感技术主要应用在对反射物体的速度、加速度、距离、位移、角度以及低频振动等

物理参数的测量^[10-14]。但在超声波信号传感方面,目前尚未见报道。因此开拓激光自混合干涉效应在超声波信号检测方面的应用具有非常重要的意义。

本文结合光纤 Sagnac 干涉技术,设计出一种基于激光自混合干涉效应的超声波传感系统,实现了对电力变压器内部局部放电产生的超声波信号的声/光学检测。从传感系统的工作原理出发,建立超声波传感系统的光路模型,对传感系统的灵敏度、频率响应以及方向性进行了评估,进而对高压电晕放电和局部放电所产生的超声波信号进行实际检测,验证了该传感技术的可行性。

2 系统工作原理

超声波传感系统的结构如图 1 所示,由分布反馈(DFB)半导体激光器、光纤耦合器(OC)、光环形器、反射镜和宽带光电探测器(PD)等部件构成。光源是工作波长为 1553 nm、不带光隔离器的 DFB 激光器,耦合器的耦合比为 80:20,传感光纤和延时光纤均为单模光纤,延时光纤的长度约为 1 km。为了降低延时光纤对外部环境噪声的敏感度,预先对延时光纤做了声隔离处理(图 1 中的虚线表示)。采用 1 km 延时光纤的主要目的是使传感系统的最佳响应频率定在 200 kHz 处,这有利于对局部放电高频超声波(20~300 kHz)信号的检测。传感系统中光纤 L1, L2, L3 的长度分别为 $l_1=1$ m, $l_2=0.5$ m, $l_3=1182$ m, 光纤 L3 包括传感光纤和延迟光纤。利用光纤耦合器一端(20%处)输出光纤的端面反射(反射率 $r_m=4\%$)构成部分反射镜,将入射到光纤端面的光束反馈到激光器内形成激光自混合干涉。当放电超声波信号作用在传感光纤上时,声波施加在光纤上的应力会引起其中往返传播光束的相位发生变化,在部分反射镜处一部分光反馈至激光器谐振腔内发生自混合干涉,使得激光器振荡频率和输

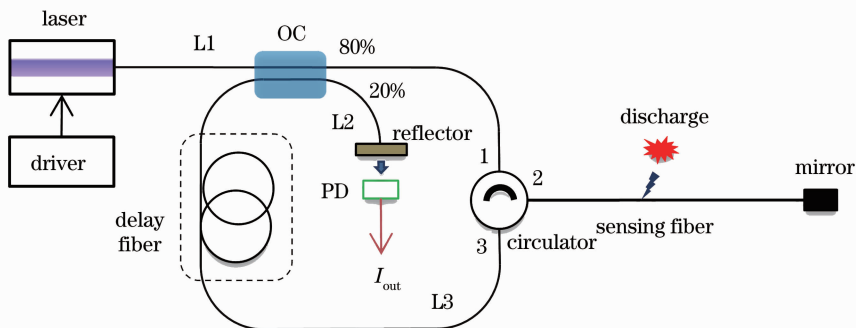


图 1 基于自混合干涉效应的光纤超声波传感系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SMI-based fiber-optic ultrasonic wave sensing system

出光功率发生变化。

在弱光反馈条件下,根据自混合干涉理论,激光器振荡频率与输出光功率分别表示为^[7]

$$\nu - \nu_0 + \frac{C}{2\pi\tau} \sin(\Phi + \arctan \alpha) = 0, \quad (1)$$

$$p = p_0(1 + m \cos \Phi), \quad (2)$$

式中 C 为光反馈强度系数, α 为激光器线展宽因子, ν 与 ν_0 分别为有、无光反馈时激光器的振荡频率, p 与 p_0 分别为有、无光反馈时激光器的输出光功率, Φ 为反馈光相位, $\Phi = 2\pi\nu\tau$, τ 为激光在外腔往返一周的时间, m 是纹波系数, 与部分反射镜的反射率 r_m 和光纤耦合器的耦合比有关。

图 2 为传感系统的光路模型, 传感光纤和延时光纤包括在光纤环路里。此处的传感系统可以看成是一个修正的、有源的 Sagnac 干涉仪, 两束传感光在相同光纤中同方向传播具有相同的光程, 但传播路径的顺序不同。从激光器发出、最终到达光探测器的光束包含两部分, 第一部分光(点划线所示)的传播路径为 $L1 \rightarrow L3 \rightarrow L2 \rightarrow L2 \rightarrow L1 \rightarrow L1 \rightarrow L2$, 相对应的光电场为 E_1 , 第二部分光(短线所示)的传播路径为 $L1 \rightarrow L2 \rightarrow L2 \rightarrow L1 \rightarrow L1 \rightarrow L3 \rightarrow L2$, 相对应的光电场为 E_2 , 两束光间的光程差实际为零。由于传播路径的顺序不同, 两束光重新进入到激光器的时间也不同。因此, 当存在外界扰动时, 通过激光器的自混合干涉效应, 到达光探测器的两光束的光频率会有差异, 从而产生时变的干涉信号。通过对干涉信号的检测, 就可以获取放电超声波信号的各种物理特征。传感系统将激光器自混合干涉技术和 Sagnac 干涉技术相结合, 利用自混合干涉效应放大了由外部扰动所引起的传播光相位的变化, 因此比普通类型的 Sagnac 干涉仪具有更高的相位检测灵敏度。基于这个优点, 传感系统非常适合于对高频放电超

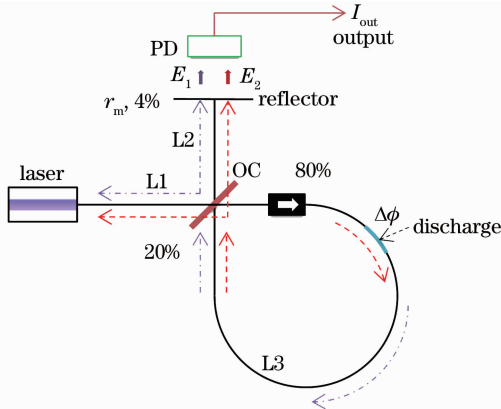


图 2 系统光路模型

Fig. 2 Optical model of the system

声波信号, 如电晕放电等微弱信号的检测。忽略自混合干涉效应对激光器输出功率的影响以及不考虑光纤和光器件的光损耗、色散等因素的影响, 光探测器处的干涉信号 I_{out} 可以近似地表示为

$$I_{out} = \text{Re}\langle (E_1 + E_2)(E_1^* + E_2^*) \rangle = |E_1|^2 + |E_2|^2 + 2|E_1||E_2|\cos(\Delta\theta), \quad (3)$$

式中 Re 为取实部操作, $\Delta\theta$ 为 E_1 和 E_2 的传播相位差, 是两束光的光频率差的函数, 即有 $\Delta\theta$ 近似于 $\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1$, 其中 ν_2 和 ν_1 分别为两束反馈光进入激光器后激光器的振荡频率。当没有外部扰动时, 反馈光的相位不会发生变化, 因此自混合干涉效应也不发生变化, 即有 $\nu_2 = \nu_1$, $\Delta\nu = 0$, $\Delta\theta = 0$, 此时干涉信号强度保持不变。当有外部扰动时, 作用在传感光纤上的应力变化会引起反馈光的相位发生瞬时改变, 根据(1)式, 激光器光频率将发生改变, 此时 $\Delta\nu \neq 0$, 即 $\Delta\theta \neq 0$, 根据(3)式 I_{out} 将发生改变。通过对干涉信号 I_{out} 的测量, 可以获取外部扰动信号的各种物理特征, 如振动幅度和频率分布等。

3 实验与结果分析

首先对 DFB 激光器的基本特性进行测量。将一个光衰减器插入到光纤环中, 调节光衰减器, 改变反馈光功率的大小, 得到激光器输出功率与反馈光功率衰减的关系, 如图 3 所示。此时, 光功率的变化是通过测量部分反射镜处的透射光功率来获得的。从图 3 看出, 随着光衰减量的减小(光反馈量的增加), 激光器输出功率会增加, 这意味着激光器的起振阈值会随着输入反馈光的增强而减小。

图 4 为激光器在有/无光反馈时的输出光谱, 从图 4 可以看出, 当有光反馈时, 激光器光谱变得更加狭窄, 中心波长 λ_c 也朝着长波长方向移动, 振荡频

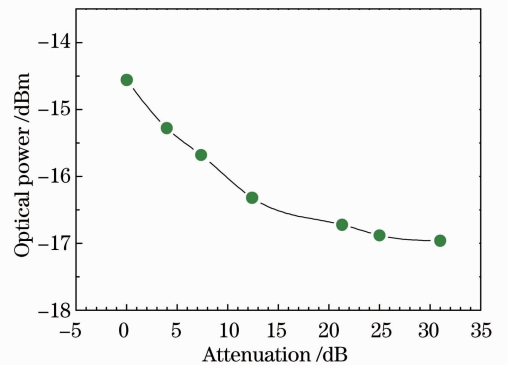


图 3 激光器输出功率与反馈光衰减的关系

Fig. 3 Relationship of laser output power and attenuation of optical feedback

率也减小了,这些都符合(1)式的描述。同时由于激光器输出功率受到反馈光的调制,光谱曲线出现小幅度的起伏。

图 5 为用来测量系统的基本传感特性,如灵敏度、频率响应以及方向性等的实验装置。采用光纤环作为传感头,光纤环的内径为 80 mm,总长度为 90 m,将其竖直固定在测试平台的一端,光纤环底端涂有声耦合剂,用来提高声波耦合效率。在平台另一端,距离传感光纤环大约 30 cm 处,利用金属小针自由掉落和 HB 铅笔轻触平台并折断来产生微弱的声波信号,对实验系统的灵敏度进行测试。这两

种方法都是国际上检测光纤超声波传感系统灵敏度的惯用测试方法。图 6 为实验测试结果,波形 a 为铅笔折断时的测量结果,波形 b 为长 2 cm、直径 1 mm 的金属小针从 10 cm 的高处垂直自由下落触碰平台时的测量结果。由于铅笔芯折断仅有一次,所以上波形中呈现出单个反射峰,而金属针落下碰及平台后会产生多次的回弹与落下,所以下波形中出现了多个波峰。针对不同的实验对象,实验系统检测出来的波形完全符合实际的物理过程,真实地反映出实验系统的传感性能。另外,从实验结果中也可以看出该实验系统具有极高的传感灵敏度。

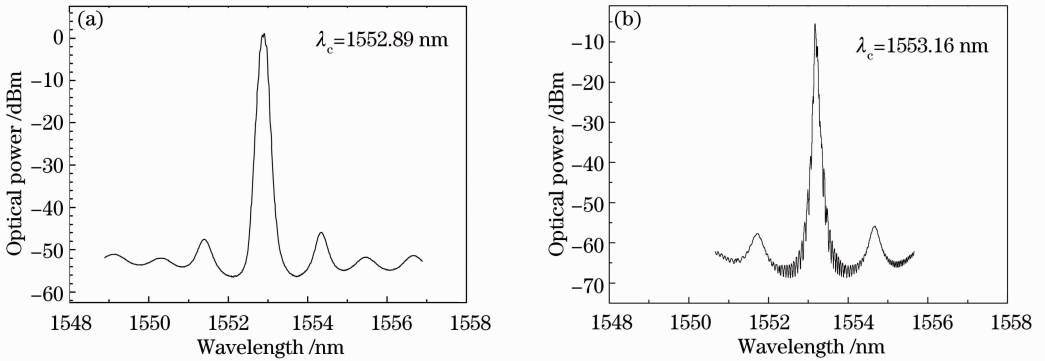


图 4 激光器输出光谱。(a)无反馈;(b)有反馈

Fig. 4 Output spectra of laser. (a) Without optical feedback; (b) with optical feedback

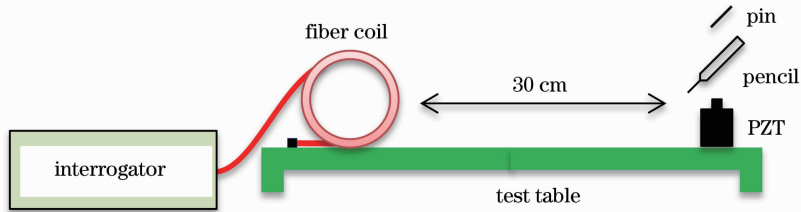


图 5 系统性能评价用的实验装置图

Fig. 5 Experimental setup for evaluating system performances

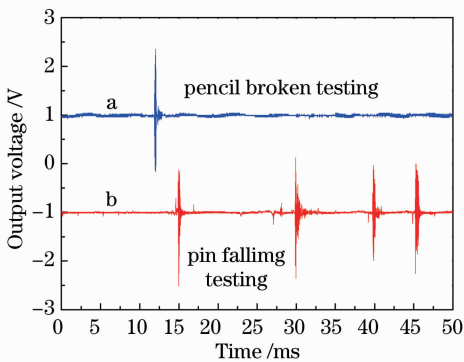


图 6 铅笔芯折断与金属针高处自由落下时的实验测试结果

Fig. 6 Testing results of pencil broken as well as pin free falling

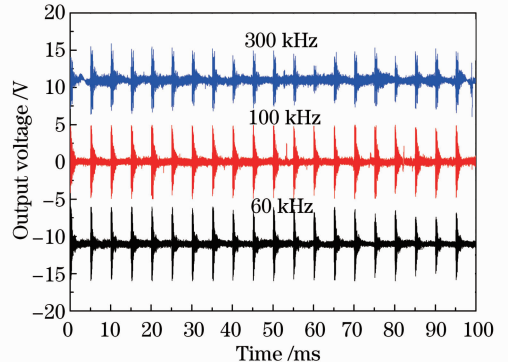


图 7 采用 PZT 产生不同频率超声波信号时检测到的波形

Fig. 7 Measured waveforms of ultrasonic signals generated by PZT with different frequencies

用不同频率的电信号驱动压电陶瓷片(PZT),产生不同频率的超声波信号,测量实验系统对高频超声波信号的响应特性。实验时 PZT 由一个信号发生器驱动,工作模式为突发模式,驱动方波信号频率分别设定在 60、100、150、200、250、300 kHz,图 7 为频率为 60、100、300 kHz 的测量波形。PZT 器件的最佳共振频率在 60kHz 左右,在高频超声波范围,PZT 电声转换效率会明显降低。为补偿这个不利因素,在高频驱动时,适当提高了 PZT 的驱动电压幅值,以提高检测信号的强度。图 8 为系统频率响应曲线,在不同 PZT 驱动频率下,测量检测信号幅度的均方根值(RMS)。此次实验中,各频率点处的 PZT 驱动电压幅值保持不变。从图 7 和图 8 可以看出,该传感系统具有良好的高频响应特性,能够检测出频率高达 300 kHz 的超声波信号。

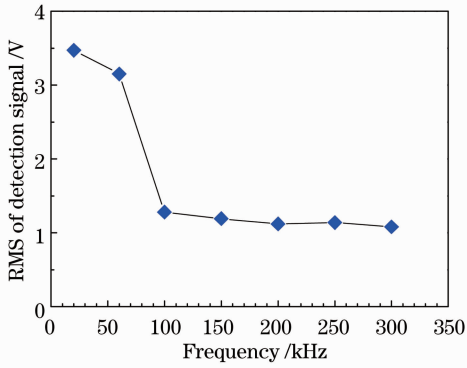


图 8 传感系统频率响应特性测量结果

Fig. 8 Measured results of frequency response property of sensor system

图 9 为调查传感光纤环方向特性的实验结果,插图具体的实验安排。PZT 的驱动信号频率为 60 kHz,距离光纤环 10 cm,实验时 PZT 围绕光纤环中心点分别向左和向右等角度(10°)地移动,获取各位置点处测量波形的 RMS 值,归一化后绘制在图 9 中。由图 9 可以看出,检测信号的有效值具有不对称分布的特性,当声源偏离光纤环中心点时,检

AC: alternating current
DC: direct current

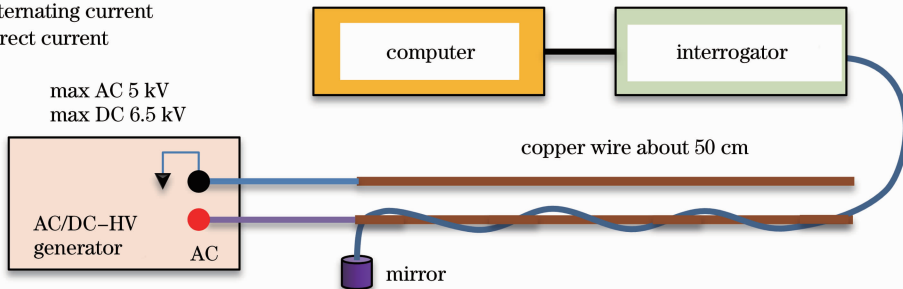


图 10 放电检测实验装置示意图

Fig. 10 Schematic diagram of experimental setup for discharge detection

测信号的有效值会有所降低。这些特性反映了光纤环结构对声源响应具有一定的方向特性;光纤环接触平板受压会出现变形扭曲,从而导致传感器检测灵敏度发生变化。

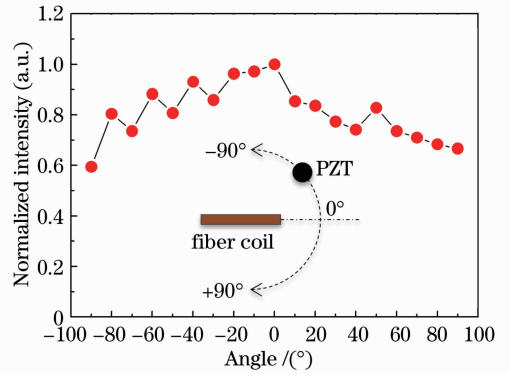


图 9 传感光纤环的方向性测量结果

Fig. 9 Measured results of directivity of sensing fiber ring

图 10 为高压放电检测实验装置示意图。实验采用两根长约 50 cm 的铜线作为放电电极,平行架空并固定在绝缘平板上,两根铜线的间距约为 1 cm,传感光纤缠绕在其中一根铜线上。两根铜线分别与一台交直流高压发生器的高压输出端和接地端相连。图 11(a)和(b)为不同湿度环境下所测得的电晕放电波形图,此时高电压的有效值选定在 4000 V。实验时,通过吹拂水蒸气的方式来增加平行电极附近的相对湿度(RH)。图 11 中 50 Hz 的工频信号是通过高压发生器输出电缆的交流耦合来获取的,这里仅作为相位参考信号。从两个测量结果可以看出,在较高湿度环境下,电晕放电发生的频度会有所增加。

当高压升至接近 5000 V 时,两平行电极间的空气被击穿发生局部放电,如图 12 所示。从图 12 中可以看出,局部放电的检测结果是多样化的,放电的频度和强度各不相同,其间还夹杂着电晕放电;随着放电的出现,输出信号底噪明显增强。以上实验结果反

映出传感系统对高压放电具有良好的检测能力。

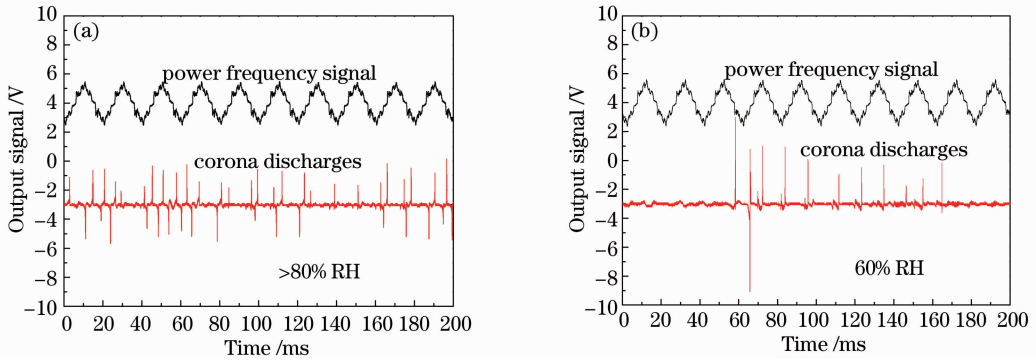


图 11 电晕放电测量结果。(a)高湿度；(b)低湿度

Fig. 11 Measured results of corona discharges. (a) High humidity; (b) low humidity

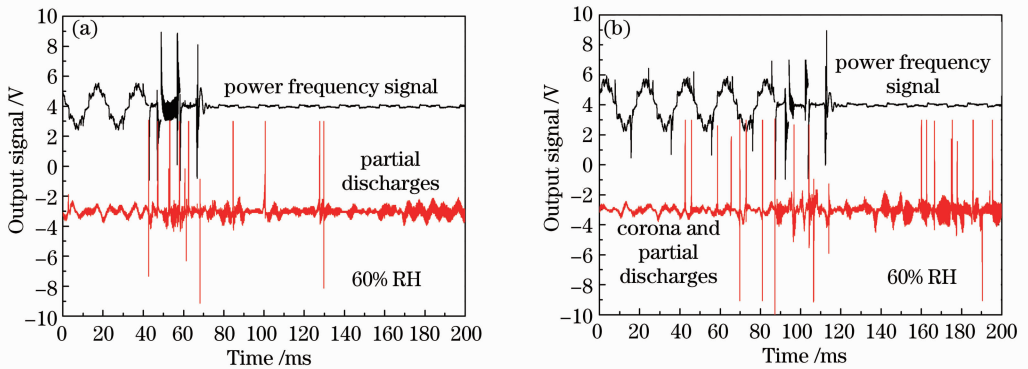


图 12 局部放电测量结果

Fig. 12 Measured results of partial discharges

4 结 论

将激光自混合干涉技术和 Sagnac 干涉技术相结合,提出一种结构简单、构思新颖的光纤超声波传感系统方案。从理论上简要地分析和介绍了系统工作原理,通过实验证明该传感系统具有高检测灵敏度和高频响应特性好等优点,能够满足频率高达 300 kHz 的局部放电超声波信号的检测要求。对平行电极的高压放电,包括电晕放电和局部放电进行了实际检测,证明该系统具有检测局部放电的能力,可以满足电力系统对高压设备内局部放电进行实时监测的需求。

参 考 文 献

- 1 Liang Zhao, Yang Yewen, Ye Yanjie. Discussion of PD detecting methods in power transformers [J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(1): 85-89.
梁 钊, 杨晔闻, 叶彦杰. 电力变压器局部放电检测方法探讨 [J]. 南方电网技术, 2011, 5(1): 85-89.
- 2 T Y Kim, K S Suh, J H Nam, *et al.*. Acoustic monitoring of HV equipment with optical fiber sensors [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(2): 266-270.
- 3 J E Posada, J Rubio-Serrano, J A Garcia-Souto. All-fiber

- interferometric sensor of 150 kHz acoustic emission for the detection of partial discharges within power transformers [C]. 21st International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS21), International Society for Optics and Photonics, 2011, 7753: 77531S.
- 4 C Macià-Sanahuja, J A García-Souto, H Lamela. Characterization of an ultrasonic low frequency fibre optic interferometric sensor for partial discharges detection in transformers [C]. Proceedings of OSAV 2004, International Topical Meeting on Optical Sensing and Artificial Vision, 2004, 157-163.
- 5 T Fink, Q Zhang, W Ahrens, *et al.*. Study of π -phase-shifted, fiber Bragg gratings for ultrasonic detection [C]. SPIE, 2012, 8370: 83700M.
- 6 A Zargari, T R Blackburn. Modified optical fibre sensor for PD detection in high-voltage power equipment [C]. Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 1996, 1: 424-427.
- 7 T Bosch. An overview of self-mixing sensing applications [C]. IEEE 2004 Conference on Optoelectronic and Microelectronic Materials and Devices, 2004, 385-392.
- 8 Wang Ming, Nie Shouping, Li Dacheng. Optical feedback interferometry of semiconductor laser for sensing application [J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(12): 1122-1126.
王 鸣, 聂守平, 李达成. 半导体激光器的光学反馈干涉及传感应用 [J]. 中国激光, 2002, 29(12): 1122-1126.
- 9 Zhang Shulian. Laser feedback technique and progress [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44(11): 65-71.
张书练. 激光回馈技术及发展 [J]. 激光与光电子学进展, 2007,

- 44(11): 65-71.
- 10 Yang Ying, Li Xingfei, Li Hongyu, *et al.*. Acceleration sensor based on laser self-mixing interference [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0228003.
杨颖, 李醒飞, 李洪宇, 等. 基于激光自混合效应的加速度传感器[J]. *光学学报*, 2013, 33(2): 0228003.
- 11 Yang Zhenyu, Wang Ming, Xia Wei, *et al.*. Testing and analysis of large-range displacement measurement precision in sinusoidal phase-modulating self-mixing interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0412007.
杨振宇, 王鸣, 夏巍, 等. 正弦相位调制自混合干涉大范围位移测量精度测试与分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0412007.
- 12 Hu Xianfeng. Attenuation of self-mixing interference signal of laser diode with external-cavity length [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0514002.
胡险锋. 激光二极管自混合干涉信号随外腔长度衰减[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0514002.
- 13 Chen Shijia, Han Daofu, Ma Li. Autocorrelation-based velocity measurement of self-mixing speckle in fiber ring laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(3): 030601.
陈世佳, 韩道福, 马力. 环形激光器自混合散斑自相关测速的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(3): 030601.
- 14 Lü Liang, Huang Yang, Yu Benli. Cantilever vibration characteristics based on laser self-mixing interference effect [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(2): 0208008.
吕亮, 黄样, 俞本立. 基于激光自混合干涉效应的悬臂梁振动特性[J]. *中国激光*, 2012, 39(2): 0208008.

栏目编辑: 王晓球