

## 基于 ICCD 的高压电晕放电紫外光谱检测

王彦<sup>1</sup>, 梁大开<sup>2</sup>, 赵光兴<sup>1</sup>, 胡兴柳<sup>1,2</sup>, 方挺<sup>1</sup>, 焦红灵<sup>1</sup>

- (1. 安徽工业大学 电气信息学院, 安徽 马鞍山 243000;  
2. 南京航空航天大学 飞行器结构力学与控制教育部重点实验室, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 对高压电器局部自持放电的光强谱系的强度分布进行了分析, 建立了高压电晕放电紫外光谱特征谱线下光强与探测距离的关系, 并采用紫外光谱功率法对高压电气设备的电晕放电进行了实验研究。实验系统包括针极放电装置及 ICCD 探测器, 通过光纤传输对日盲区紫外光谱进行探测。试验中调整光纤探头位置, 分别改变光纤探头垂直距离和光纤探头距中心点左右偏移距离, 采集相应的紫外光谱, 并对波长为 262.773 nm、265.456 nm 和 274.435 nm 处的光谱强度与偏移位置之间的关系进行数据拟合, 拟合后的指数函数形式与理论分析相吻合。对采集的紫外光谱数据采用 Burg 递推算法进行功率谱估计, 发现大约 350 Hz 的功率谱密度可作为特征参量, 表明了对电晕放电点识别的可行性。

**关键词:** 电晕放电; ICCD 探测器; 紫外光谱; 功率谱密度

**中图分类号:** TM835 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)09-2431-06

## Detection of ultraviolet spectrum based on ICCD in the high voltage corona discharge

Wang Yan<sup>1</sup>, Liang Dakai<sup>2</sup>, Zhao Guangxing<sup>1</sup>, Hu Xingliu<sup>1,2</sup>, Fang Ting<sup>1</sup>, Jiao Hongling<sup>1</sup>

- (1. School of Electrical Engineering and Information, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243000, China;  
2. Key Laboratory of Vehicle Structure and Control, Ministry of Education, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Through theory modeling, the mathematics model of the discharge intensity distribution in high voltage apparatus was studied in this paper, and the relationship of spectral line light intensity and detection distance was constructed. Then the intensity measurement of corona discharge ultraviolet spectrum in high voltage electric equipment experiment was studied. The whole detection system included needle discharge device and ICCD detector. Through the optical fiber transmission, the solar-blind ultraviolet spectrum was detected. In the experiment, optical fiber probe position was adjusted, the vertical distance of optical fiber probe and optical fiber probe about distance from the center of migration was changed respectively. Acquisition corresponding ultraviolet spectrum, and the relationship between intensity and location at 262.773 nm, 265.456 nm and 274.435 nm with different offset position wavelength, and

收稿日期: 2013-01-12; 修订日期: 2013-02-01

基金项目: 国家自然科学基金(51309001, 61201109, 51007002); 安徽省高校省级科学研究重点项目(KJ2013A055)

作者简介: 王彦(1975-), 女, 副教授, 博士, 主要从事光学检测、智能监测与控制方面的研究。Email: yanwxy@sina.cn

the track of the interaction between is an exponential curve. This discovery is consistent with the theoretical analysis. Using Burg recursion algorithm for power spectrum estimation to collect ultraviolet spectrum data, it is found that the power spectral density of 350 Hz can be used as characteristic parameter. It shows that the corona discharge point identification is feasible.

Key words: corona discharge; ICCD detection; ultraviolet spectrum; power spectrum density

## 0 引言

近年来,随着电力设备电压等级的不断提高以及对设备运行可靠性要求的提升,局部放电作为评价设备绝缘状态的一个重要指标被广大科研人员所采纳,高压电气设备出现绝缘缺陷时,一般会出现电晕放电,引起电晕功率损失、无线电干扰、电视干扰以及噪声干扰,加快有机绝缘材料的老化,逐渐破坏设备绝缘性能。当电晕放电发展到一定程度之后会出现闪络、沿面放电甚至接续电弧等有可能损坏电气设备的严重情况,通过对局部放电的检测和对绝缘缺陷准确定位,可以为高压电气设备的运行维护提供必要的档案资料。因此,研究电晕放电目前正受到广大学者的日益关注,并成为研究热点之一。

电晕放电(corona discharge)是气体介质在不均匀电场中的局部自持放电,是最常见的一种气体放电形式。在曲率半径很小的尖端电极附近,由于局部电场强度超过气体的电离场强,使气体发生电离,因而出现电晕放电,发生电晕时在电极周围可以看到光亮,并伴有滋滋声。电晕放电可以是相对稳定的放电形式,也可以是不均匀电场间隙击穿过程中的早期发展阶段。目前在线检测放电的手段有电测法、气象色谱法、超声波检测法和光效应检测法。宽带脉冲电流法<sup>[1-3]</sup>是通过检测放电电流及所发射的电磁波,但该方法受电晕放电自身所产生的电磁干扰比较严重。气象色谱法<sup>[4-6]</sup>可以确定变压器局部放电故障类型,方法简单,不受电磁干扰,但是不能反映突发故障,只能定性分析难以定量判断,检测准确度不高。超高频检测法<sup>[7-10]</sup>对局放产生的超高频电磁波信号进行检测,其原理简单但局部定位精度还有待进一步研究,而且如何使天线更有效地接收到电磁波是此方法的瓶颈。

ICCD 紫外光谱检测法利用 ICCD 检测电晕放电时特征光谱线下光强与探测距离之间的关系,并

对采集到的数据进行现代功率谱估计,后期可根据特征频段下的参量进一步判断电晕放电点的强度及位置。文中首先结合分子运动论分析推导了电晕放电光强与探测距离之间的关系,通过搭建实验系统,对高压电气设备的电晕放电光谱进行采集,并寻找特征波长为 262.773 nm、265.456 nm 等处的光谱强度与偏移位置之间的关系。由于在电晕放电过程中,电极的几何形状有重要影响,文中采用针-针电极,选取不同的极间距离、电压大小,以及不同的光纤探头位置,对电晕放电过程进行光谱探测,分析了设备附近紫外光辐射功率与电压大小、极间距离、探头位置之间的对应关系。通过数据的对比分析,验证了理论分析的准确性及实验方案的可行性。整个光谱检测系统全光纤化传输,方法简单,直观形象,不受电磁干扰,不影响设备运行,有望在电气设备缺陷和故障检测中提供有益的借鉴。

## 1 局部自持放电的光谱谱系与强度分布

### 1.1 电晕放电光谱分布

电晕层是电场的非均匀性把主电离过程局限于局部电场很高的电极附近,尤其是发生在曲率半径很小的电场附近的薄层中,而气体发光也只发生在这个区域内,称为电离区。电晕放电的紫外光谱段主要集中在 300~400 nm 的紫外线区域,也有小部分波长在 230~280 nm。典型的电晕放电光谱如图 1 所示<sup>[11-13]</sup>。

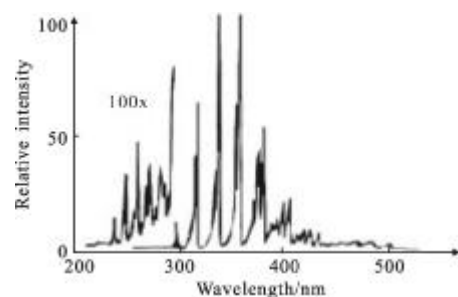


图 1 典型电晕放电光谱分布图

Fig.1 Typical corona discharge spectra

太阳光中含有紫外线,但波长小于 280 nm 的部分几乎完全被大气中的臭氧所吸收,能通过大气传输的只有 280~400 nm 的紫外信号,因此将低于 280 nm 的波长区间称为“日盲区”。由图 1 可见,电晕放电产生的紫外线有一小部分波长恰好处于日盲区范围内,因此,可利用这一段日盲区,在日照情况下,对高压电气设备的局部放电进行紫外光谱探测。

1.2 局部自持放电的光谱谱系与强度分布

为了方便讨论,假定局部自持放电的发光是由于存在绝缘缺陷的周围空间中电子和离子复合所致,不考虑电子或离子碰撞电极导致的复合释放出光子,以电子复合为例,假定绝缘缺陷的周围空间为负电场,令电子的平均自由程为  $\lambda$ ,则自由行程长度大于或等于  $x_1$  的概率为:

$$P_i = e^{-\frac{x_1}{\lambda}} \quad (1)$$

另一方面,电子离开负电极由于碰撞产生新的电子,最后抵达  $x_1$  处产生新的电子数应为:

$$n = n_0 e^{\alpha x_1} \quad (2)$$

式中: $\alpha$  为碰撞电离系数,与电子的平均自由程有关,可以写成:

$$\alpha = \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{x_1}{\lambda}} \quad (3)$$

将公式(3)代入公式(2)得:

$$n = n_0 e^{\frac{x_1}{\lambda} e^{-\frac{x_1}{\lambda}}} \quad (4)$$

经简单计算可知,公式(4)在  $x_1 = \lambda$  处有一极大值,可见,随着距离超出电子的平均自由程  $\lambda$ ,由于碰撞加剧,自由电子数量急剧减少。

在上述推导过程中,假定局部自持放电的发光是由于存在绝缘缺陷的周围空间中电子复合所致,假定所有正离子能级相同,很显然,由于电子复合的发光其谱系应该一致,即

$$\lambda = \frac{Vh}{E_n - E_i} \quad (5)$$

式中: $V$  为光在该介质中的传播速度; $h$  为普朗克常量; $E_n$ 、 $E_i$  是中性分子 2 个不同的能级。

电子复合的发光幅值  $A$  应与抵达  $x_1$  处的电子数量成正比,即

$$A \propto n_0 e^{\frac{x_1}{\lambda} e^{-\frac{x_1}{\lambda}}} \quad (6)$$

可见,电晕放电光谱强度与放电距离成指数函

数关系,以上推导假定存在绝缘缺陷的周围空间介质是各向同性的均匀介质,对于非各向同性的均匀介质,由于介质的物理特性不同,情况会有所区别。但所幸的是,实际工程中,由于制造工艺、环境相对稳定等因素的影响,介质的非均匀特性差别很小,因而公式(6)仍然适用。

实际应用中,电晕放电可看成点光源,因此,采用对点光源日盲区光谱采集的方法,研究电晕放电特征谱线的光强随光纤探头与放电端距离变化之间的规律,为放电端的准确定位提供理论与实验依据。

2 实验

2.1 ICCD 工作原理

ICCD 是增强型的电荷耦合器件。电晕放电发光经变焦物镜成像在微通道板(相当于一个光电倍增管)像增强器的光阴极上,透过输入窗口在像增强器光阴极上的光子由于光电效应转换成电子图像。电子透镜将电子图像耦合到微通道板上,在像增强器微通道板的每一个光纤通道内,电子经过不断地撞击,每个人射电子产生约 100 个电子,并保持图像的空间分布信息不丢失。从微通道板出射的电子撞击荧光屏,重新激发出光子图像,再经中继镜投射到 ICCD 上,数据经控制器采集到计算机里,由计算机进行处理。ICCD 是在光电阴极上加脉冲电压,可实现纳秒级的时间门控,做超快时间分辨的探测。同时,由于 ICCD 是利用电子轰击增益,信号放大能力很强,但空间分辨率会略有损失。

2.2 实验方案

电晕放电的电流强度取决于电极之间的电压大小、电极形状、极间距离、气体性质和密度。文中采用针-针极放电装置实现高压电晕放电,针极实验电路利用变压器经整流后的高电压加于针-针电极上,以 1kV/s 缓慢升压,直到产生电弧击穿,原理如图 2 所示。

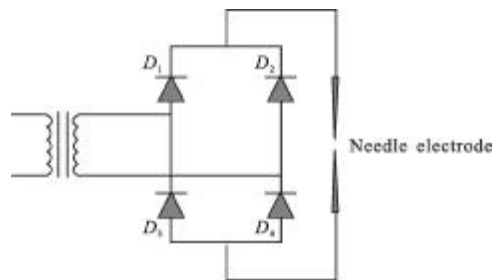


图 2 升压电路原理图  
Fig.2 Booster circuit

利用光纤传输,将光纤探头对准放电位置,并光纤耦合至 ICCD,光纤响应波长范围为190~1 100 nm,通过 ICCD 对小于 280 nm 的“日盲区”紫外光谱探测。测试中,放电点与光纤探头垂直距离可调,针-针间距可调,光纤探头与放电点左右距离可调。辐射功率与放电电压相关,实验设定放电端电压均为 14.5 kV。整个实验系统如图 3 所示。

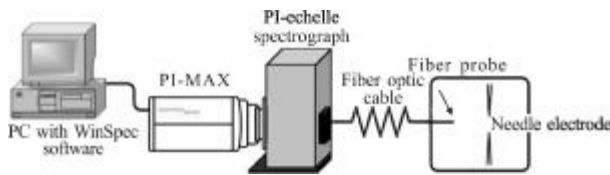


图 3 实验装置图

Fig.3 Experiment device figure

试验中针电极为锥形,长 4.5 cm,针-针电极间距离为 0.5 cm。所加交流电压范围为 10~14.5 kV,以对应电晕放电的不同阶段。光纤探头距电晕放电点垂直距离分别为 8 cm 与 19 cm,逐步改变光纤探头位置,分别对应放电中心及偏离放电中心左右距离依次为 0.5 cm、1.0 cm、1.5 cm 和 2.0 cm。

### 2.3 实验结果与分析

实验时采用 PIMAX ICCD 器件,PMT 控制时间为 2 ns,曝光时间为 30 ms,模式为 shutter,增益为 8,AD 采样速率为 1 M/s,精度为 16 位。

图 4 为采集到的紫外光谱信号,选取的波长范围为 250~290 nm 的日盲区,分别为对应于针-针电极中心点光谱图及偏离针极中心点右边 0.5 cm 光谱图(垂直距离均为 8 cm)。由图可见,随着光纤探头对应于中心点的偏离位置不同,光谱峰值位置不变,但谱峰处光强度减小,谱线主要集中在 262.773 nm、265.456 nm、274.435 nm、276.079 nm 和 277.475 nm 处。

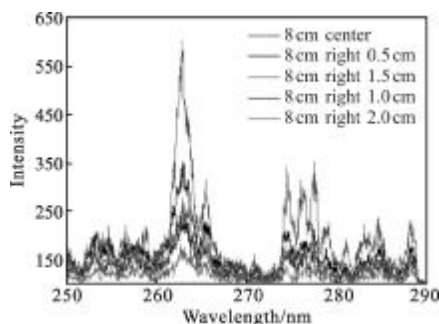


图 4 垂直距离为 8 cm 偏移不同位置光谱图

Fig.4 Different position spectra with vertical distance of 8 cm

电晕放电时,电离区仅限于电晕电极附近的强场范围。该区域中存在粒子的电离中激励,同时也存在粒子的复合及从激发态跃迁到低能态或基态,后一过程会产生大量的光辐射。空气中含有多种成分,主要有  $N_2$ 、 $O_2$  及少量的  $CO_2$ 、 $H_2O$  和惰性气体。空气中放电使空气电离而产生臭氧及氮的氧化物,故放电过程中可能的气体成分主要有:  $N_2$ 、 $O_2$ 、 $NO$ 、 $NO_2$ 、 $N_2O_4$ 、 $CO_2$  等,所测光谱应为所有这些气体成分及其电离产物的混合光谱。

由图可见,紫外光谱检测可以清晰地反应电晕放电产生情况,具有固定特征谱线。并且随着距离不同,其强度也随之变化,因此可根据此变化趋势对放电点进行准确定位。

图 5 为采集到的紫外光谱信号,选取的波长范围为 250~290 nm 的日盲区,分别为对应于距离电极中心点 8 cm 处光谱图及距离中心点 19 cm 处光谱图。由图可见,随着光纤探头距离针极电极中心点的距离不同,光谱峰值位置不变,但谱峰处光强度减小,主要谱线仍然集中在 262.773 nm、265.456 nm、274.435 nm、276.079 nm 及 277.475 nm 处。由此可见,采用紫外光特征谱线的光强探测,可以很好地判断电晕放电强度,由此可进一步对采集到的数据进行处理。

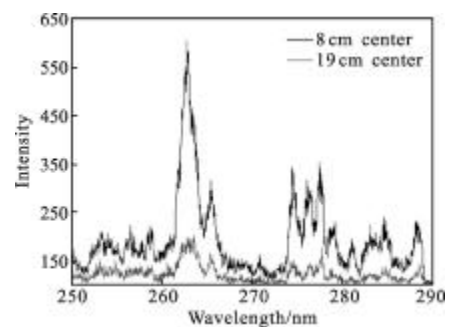


图 5 垂直距离不同的放电中心点光谱图

Fig.5 Discharge center spectra with different vertical distance

距离电极中心点 8 cm 时,向右移动偏移位置,对波长为 262.773 nm、265.456 nm 和 274.435 nm 处的光谱强度与偏移位置之间的关系进行数据拟合,如图 6 所示。可见,拟合出的指数函数曲线均能很好地反映放电距离与光谱强度之间的关系,而对于每一不同波长,其指数函数的具体数值略有不同,但均与之前的理论分析结果公式(6)相吻合,这也进一步佐

证了电晕紫外光谱分析中强度与距离之间的关系。

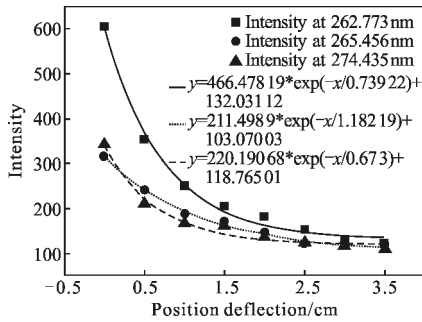


图 6 光谱强度与偏移位置的关系图

Fig.6 Spectral intensity vs position deflection

### 3 Burg 递推算法的功率谱估计

采用 Burg 递推算法, 功率谱估计阶数为 10, 对电晕放电信号进行特征量的提取, 上述实验数据为 1024 个点的离散信号, 图 7 分别为距离电极中心点 8 cm、向右偏移 0.5 cm、1 cm 及 2 cm 这 4 个位置时采集到的紫外光谱数据的功率谱密度图。从功率谱曲线可见, 随着采集点的右移, 各频段下的功率谱幅值也在减小, 总体幅值呈下降趋势。

图 7 的功率谱密度图中, 在 0-500 频段中选取 11 个特征频段, 将右偏 0.5 cm、1 cm 及 2 cm 的 3 个位置处的功率谱密度与垂直距离中心点的功率谱密度相除, 得到这 11 个特征频段下的功率谱密度变化对比图, 如图 8 所示。由图可见, 在 350 Hz 的频段附近, 3 个位置的功率谱密度变化均达到最大, 具有一致性。

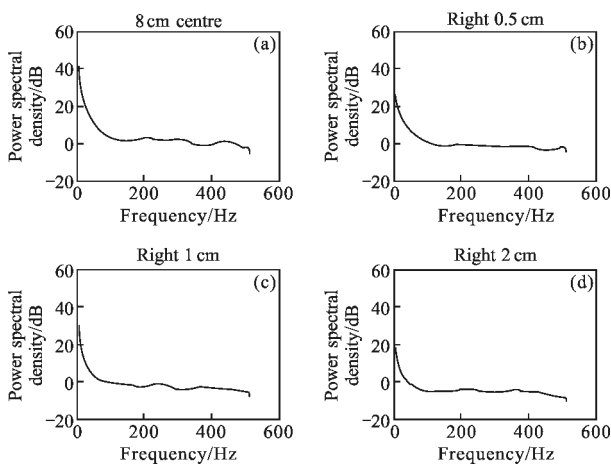


图 7 各位置点的功率谱密度图

Fig.7 Power spectral density at different position

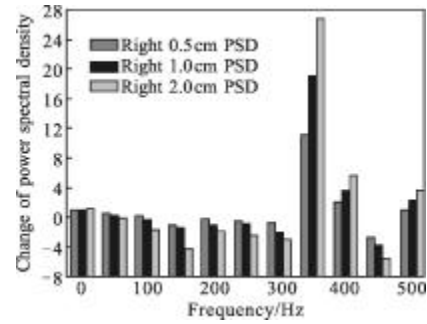


图 8 各位置点的功率谱密度变化对比图

Fig.8 Change of power spectral density at different position

可见, 对紫外光谱信号进行功率谱密度估计时, 350 Hz 附近的中高频段功率谱密度值随着位置偏移的增加, 其值变化也越大。因此, 在后续的定位实验中, 可将此频段下的功率谱密度作为电晕放电损伤识别的特征参量。

### 4 结论

文中对局部自持放电的光谱谱系与强度分布进行理论建模, 并基于 ICCD 的紫外光谱技术, 对高压电晕放电的“日盲”区光谱进行了电晕放电模拟检测试验。通过针-针极放电试验结果可知, 采用 ICCD 能对电晕放电紫外光谱进行探测, 且其特征谱线下的紫外光功率强度不仅与针-针极间距离有关, 还与光纤探头与放电端的距离及方向有关。实际应用时, 检测误差来源于监测点位置的微小变化、放电端外加电压大小的差异、放电端形状及大小随放电程度的加深及时间的延长会发生变化、沿面气体的温度、湿度、气压等诸多因素。同时, 实验结果与理论分析结果均表明, 特征谱线下的光谱强度与偏移位置成指数函数关系, 且可将 350 Hz 中高频段范围内的功率谱密度值作为特征参量, 为后期采用紫外光谱检测方法实现对电晕放电点的定位提供了理论与实验依据。

### 参考文献:

[1] Ruan Ling, Gao Shengyou, Zheng Zhong. Pulse quantitative determination in partial discharge detection using wide bandwidth pulse current method[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5): 80-82. (in Chinese)

阮玲, 高胜友, 郑重. 宽带脉冲电流法局部放电检测中的脉冲定量[J]. 高压电器, 2009, 45(5): 80-82.

- [2] Zhu Jie, Ma Peng, Bai Yun, et al. Design of image processing system for UV solar blind focal plane detector. [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(4): 690-695. (in Chinese)  
朱杰, 麻芑, 白云, 等. 紫外日盲焦平面探测器成像处理系统研制[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(4): 690-695.
- [3] Bai Lianfa, Zhang Yi, Gu Guohua, et al. Analysis of influence parameters of aero-optical effects based on turbulence vortex model[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 113-117. (in Chinese)  
柏连发, 张毅, 顾国华, 等. 激光图像和紫外图像分析与融合方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(1): 113-117.
- [4] Tang Panlong, Zhou Yusheng, Ma Shiyong, et al. Chromatographic analysis of transformer oil and its application[J]. *Insulating Materials*, 2008, 41(5): 65-68. (in Chinese)  
唐攀龙, 周羽生, 马士英, 等. 变压器油色谱分析及其应用的研究[J]. *绝缘材料*, 2008, 41(5): 65-68.
- [5] Chen Junhong, Yang Xiaoli. Research on detectors in UV communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S): 86-88.  
陈君洪, 杨小丽. 紫外通信中探测器的研究 [J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(S): 86-88.
- [6] Zheng Shusheng, Li Chengrong, Zhou Bing. Newton's method in complex field for locating partial discharge in transformers [J]. *High Voltage Engineering*, 2011, 37(8): 2017-2023. (in Chinese)  
郑书生, 李成榕, 周冰. 用于变压器局部放电定位的复数域牛顿迭代算法[J]. *高电压技术*, 2011, 37(8): 2017-2023.
- [7] Tang Ju, Hu Jingjing, Xu Zhongrong, et al. Factors of influence on partial discharge ultra-high frequency detection in transformer [J]. *Journal of Chongqing University*, 2008, 16(2): 150-154. (in Chinese)  
唐炬, 胡晶晶, 许中荣, 等. 变压器局部放电超高频检测影响因素分析[J]. *重庆大学学报*, 2008, 16(2): 150-154.
- [8] Meng Yanhui, Tang Ju, Xu Zhongrong, et al. Simulation Propagation of partial discharge UHF signals in transformer [J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2007, 30(5): 70-74. (in Chinese)  
孟延辉, 唐炬, 许中荣, 等. 变压器局部放电超高频信号传播特性仿真分析[J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 2007, 30(5): 70-74.
- [9] Joao Batista Rosolem, Claudio Florida, Jacques Philippe Marcel Sanz. Field and laboratory demonstration of a fiber-optic/RF partial discharges monitoring system for hydrogenerators applications [J]. *IEEE Transactions on Energy Conersion*, 2010, 25(3): 884-890.
- [10] Posada Julio E, Rubio-Serrano Jesus, Garcia-Souto Jose A. All-fiber interferometric sensor of 150 kHz acoustic emission for the detection of partial discharges within power transformers[C]//SPIE, 7753, DOI: 10.1117/12.885511.
- [11] Fu Zhong, Chen Shixiu, Chen Wei, et al. Analysis of spectral characteristic in the corona discharge and experimental software design [J]. *High Voltage Engineering*, 2007, 33(7): 92-95. (in Chinese)  
傅中, 陈仕修, 陈伟, 等. 电晕放电中光谱特性的分析及实验程序设计[J]. *高电压技术*, 2007, 33(7): 92-95.
- [12] Wang Jingang, Lin Wei, Peng Hu, et al. Study on ultraviolet sensor and detection to high-voltage discharge [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2010, 29(8): 56-59. (in Chinese)  
汪金刚, 林伟, 彭鹤, 等. 高压放电紫外传感器与检测装置研究[J]. *传感器与微系统*, 2010, 29(8): 56-59.
- [13] Lin Yancheng, Xiao Gonghai, Yuan Liying, et al. Design of UV camera based on solar-blinded AlGaIn [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1879-1884. (in Chinese)  
林言成, 肖功海, 袁立银, 等. 基于日盲型 AlGaIn 的紫外相机设计[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(7): 1879-1884.