

# 基于电致发光效应的光学电压传感器

李长胜\*, 王伟岐

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院 光电工程系, 北京 100191)

**摘要:** 本文综述了基于电致发光效应的光学电压传感器机理、分类及其主要特性, 分析总结了此类传感器的研究现状及其存在的主要问题, 同时提出未来研究课题的建议。电致发光型电压传感器的主要优点在于不需要载波光源, 因而可以有效避免以往光学电压器中工作光源性能不稳定所引起的传感器性能变化; 此外, 此类电压传感器结构简单、体积小、重量轻、成本低, 可以实现较高的性能价格比。今后研究的主要问题包括合理选择电压传感材料与器件、提高传感器的温度和湿度稳定性等。电致发光型电压传感器在电力工业和航空航天等领域的科学研究与实验中将具有广泛的应用前景。

**关键词:** 光学电压传感器; 电致发光效应; 电致发光材料; 发光二极管

中图分类号: TN383+.1; TM835.1; TM930.12+6; TP212 文献标识码: A doi:10.3788/CO.20160901.0030

## Review of optical voltage sensor based on electroluminescent effect

LI Chang-sheng\*, WANG Wei-qi

(Department of Optoelectronic Engineering, School of Instrumentation Science and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

\* Corresponding author, E-mail: cli@buaa.edu.cn

**Abstract:** Sensing principle, classification, and main properties of the optical voltage sensor based on electroluminescent effect are reviewed and summarized. Current research status and important problems to be solved for this type of voltage sensor are analyzed, and some future research topics are also proposed. The electroluminescent voltage sensor is no need of interrogation light source thus it is free from sensing performance degradation caused by the unstable light source. Additionally, it has simple configuration, small size, low weight, and low cost, and thus it is easy to achieve higher cost performance. Future research topics mainly include how to properly select the voltage sensing materials and devices, how to improve temperature and humidity stabilities of the voltage sensor, etc. This type of voltage sensor has potential application to scientific research and experiment in the fields of electric power industry, aviation, and spacecraft, etc.

**Key words:** optical voltage sensor; electroluminescence effect; electroluminescent material; light-emitting diode

## 1 引言

在科学研究与实验以及工业技术领域经常需要测量直流、交流电压(或电场),例如,高电压实验室、静电实验室、电力系统中各电压等级的发电厂、变电站、输电以及配电系统等,此外,在航空航天领域,也需要对飞行器内发电与供电系统的电压进行监测与测量。目前,在上述各领域实际普遍采用的是电气、电子测量方法,例如,在低电压等级(例如1 kV以内)的电压测量中,一般采用数字电压表或数字万用表即可满足要求。但是在高电压等级的电压测量中(例如10 kV以上的电压),通常需要考虑电气绝缘问题。在电力系统中,高电压输电线路(例如35 kV、220 kV、500 kV等)的电压测量仍然采用传统的电磁感应式电压互感器,或者阻容式分压器,将工频高电压通过分压的方式成比例地转换为低电压(一般为100 V)再进行测量,这种测量系统的高、低压测量端是电气连接的,当电力系统中出现雷电脉冲电压或操作过电压时,会存在安全隐患。此外,电压互感器的频率响应特性较差,存在磁饱和现象,电功率损耗较大且变压器油也具有潜在的安全隐患(例如,运行温度过高时易于引起爆炸等)。

光学电压(或电场)传感器具有电气绝缘能力强、响应频带宽、体积小、重量轻、不存在磁饱和问题、无爆炸危险、易于实现与电气通信网络的连接等优点。自20世纪70年代以来,人们开始研究光学电压(或电场)传感器用以取代上述高电压测量领域的传统电压互感器<sup>[1-6]</sup>。文献[1]综述了各种光学电压传感器的主要类型、特征及其存在问题,例如直流电压(电场)测量问题、电荷漂移问题、传感器的温度及振动稳定性问题、长期运行稳定性和可靠性问题等。尽管人们已经在此领域做了大量的研究开发工作,但到目前为止,还有许多实际问题没有解决,尚未获得完全成熟、可靠的光学电压传感器。除了文献[1]中提及的问题以外,这种光学电压(或电场)传感器还存在载波光源的工作寿命有限及其长期性能稳定性等问题。为了保证电网供电长期不间断,电力系统中的电力设备(包括电压互感器)必须能够保证长

期可靠运行(例如10年以上),因此,对于应用于电力系统的光学电压传感器,光源正常工作的寿命也应不少于10年,但目前传感器所用发光二极管(LED)光源的连续工作寿命一般约50 000 h(约5.7年),而半导体激光源(LD)的正常工作寿命通常小于LED,一般不超过25 000 h(约2.9年)。为了解决传感器光源工作寿命较短的问题,有人提出采用备份光源的方案,通过检测工作光源的状态,当发现该工作光源退化到不能正常工作时,自动切换到备份光源。即使解决了载波光源寿命问题,光源性能的长期稳定性仍然不能满足实用化的要求,例如:光源输出功率、光谱分布随环境温度变化而产生的漂移等,一直是影响传感器输出稳定性的重要因素。

国内外已有文献报道了一种不需要载波光源的电压传感器<sup>[7-14]</sup>,其基本传感机理是被测电压作用于电致发光材料使其发光,通过观测发光强度获知被测电压。这种基于电致发光效应的电压传感器不需要载波光源,具有一定实用价值和发展前景,但也存在许多问题。本文将综述这种基于电致发光效应的光学电压传感器的传感机理、主要类型、研究现状,并分析总结存在的问题,探索研究方向,为后续相关研究提供有益的参考。

## 2 电致发光型电压传感机理

电(或场)致发光效应是指某些材料在外加电压(或电场)的作用下产生光辐射的现象,一般可分为低场致发光和高场致发光两大类。低场致发光主要是指半导体p-n结发光;高场致发光主要是指某些材料不能形成和利用p-n结,而是借助于M-S结(指金属-半导体结)或MIS结(指金属-绝缘层-半导体结)产生的场致发光<sup>[15]</sup>。高场致发光材料主要包括无机材料、有机材料以及无机和有机复合型材料。文献[7-13]中利用了无机高场致发光材料来实现电压(或电场)的测量及显示。利用固体电致发光材料的发光亮度与外加电压之间的相关性,通过测量材料出射光强度即可实现电压的测量。例如,交流粉末电致发光器件的亮度( $L$ )-电压( $U$ )关系一般可表示为<sup>[11-12]</sup>:

$$L = L_0 e^{-\sqrt{U_0/U}}, \quad (1)$$

式中,  $L_0$  和  $U_0$  均为与材料特性相关的系数, 其中  $L_0$  为电压  $U$  最大时的发光亮度, 即饱和亮度。由式(1)可见, 亮度与电压之间一般为非线性关系, 故此类电压传感器输出信号一般为被测电压的非线性函数。但文献[12]通过合理利用光伏电压对光强度的非线性响应特性, 在一定范围内实现了电压的线性测量。

图1为文献[9]中的一种典型电致发光型电场传感单元结构示意图, 将光纤埋入固体 ZnS: Mn 电致发光材料中, 被测外加电场直接作用于发光材料, 当电场强度大于材料的发光阈值电场时, 发光材料发光, 并经过光纤传输到光电探测器。

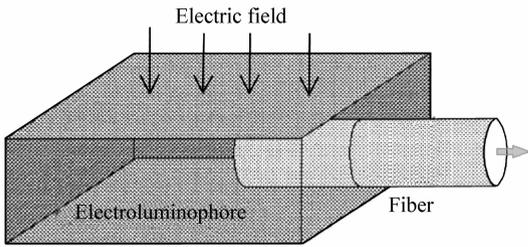


图1 高场致发光型电场传感单元结构示意图<sup>[9]</sup>

Fig. 1 Schematic of electric field sensing unit based on high field-induced electroluminescent effect<sup>[9]</sup>

基于低场致发光材料或器件的电压传感机理主要是将被测电压  $U$  施加于高阻值限流电阻  $R$  和发光二极管(LED)的串联电路, 获得与被测电压成线性关系并能够驱动LED发光的微弱电流

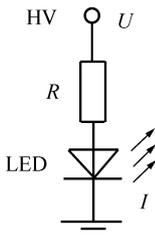


图2 利用LED的电压传感单元示意图

Fig. 2 Schematic of voltage sensing unit using a light emitting diode(LED)

(例如  $\sim \mu\text{A}$  量级), 通过测量LED的发光强度即可获知被测电压信号<sup>[14]</sup>, 一种典型的电压传感单元结构示意图如图2所示。当LED的分压值大于其导通阈值电压时, 其发光强度  $I$  将与被测电

压  $U$  成正比, 即:

$$I = kU/R, \quad (2)$$

式中,  $k$  为比例系数。

### 3 电致发光型电压传感器研究现状

目前, 关于电致发光型电压传感器的文献报道很少, 且大部分文献的研究内容主要是利用无机材料的高场致发光效应实现交流电压的测量与显示; 还有一些文献报道了基于LED低场致发光效应的电压传感器, 现将典型传感方案分类介绍如下。

#### 3.1 基于高场致发光效应的电压传感器

1974年, 前苏联学者利用高场致发光材料实验测量了交流高电压<sup>[7]</sup>, 其实验装置如图3所示, 将 ZnS: Cu 电致发光材料2置于一个位置固定且透明的电极1与一个可动电极3之间, 与电压相关的电致发光强度由光电探测器5测量。该装置可以实现110 kV高电压的测量, 在室温下其测量误差小于0.1%。此外, 1976年, 文献[8]报道了一种利用场致发光屏检测高压输电线上发生故障的零值绝缘子的电压传感方案。

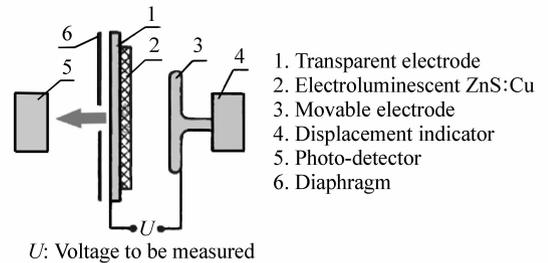


图3 基于高场致发光材料的高电压测量实验装置图<sup>[7]</sup>

Fig. 3 Experimental setup of high voltage measurement using high electric field-induced electroluminescent material<sup>[7]</sup>

2001年, 文献[9]报道了一种利用 ZnS: Mn 粉末电致发光材料测量工频电场的传感器, 其电场传感实验装置如图4所示, 其中的电场传感单元结构示意图如图1所示, 为由 ZnS: Mn 粉末材料制成的小薄片, 其长、宽尺寸约为几毫米、厚度不足1 mm, 已知 ZnS 晶体的密度约为  $4 \text{ g/cm}^3$ , ZnS 粉末的密度将小于 ZnS 晶体的密度, 故传感

头的重量很轻(小于 1 g);埋入材料中的光纤纤芯直径为 0.4 mm。被测工频电场由一对平行板电容器产生,可调电压源由一个自耦调压器(ATR)和一个升压变压器组成,ZnS:Mn 材料的发光强度将随外加电场而变化,并由光纤传输到光电探测与放大电路、以及光谱仪,从而获得被测电场信号。图 5 为该传感器在不同电场强度(4.5 ~ 12 kV/mm)条件下,由光谱仪记录的电致发光强度谱线随被测电场强度变化的发光强度谱线。该论文总结了此类电场传感器的主要优点,包括结构简单、不需要额外光源、传感单元无金属部件且为高电阻率材料等。此外,与文献[9]类似,2002 年,文献[10]报道了一种利用 ZnS:Mn 电致发光薄膜显示交流电压数值等级的电压传感器。

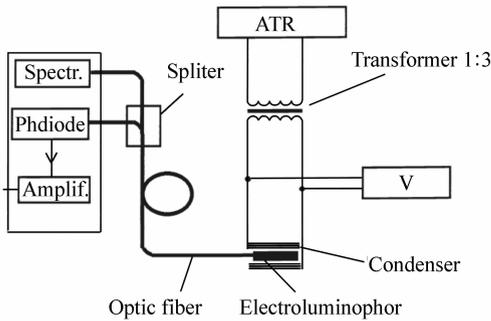


图 4 电致发光式电场传感实验装置示意图<sup>[9]</sup>

Fig. 4 Experimental setup for the optical electric field sensor based on electroluminescent effect<sup>[9]</sup>

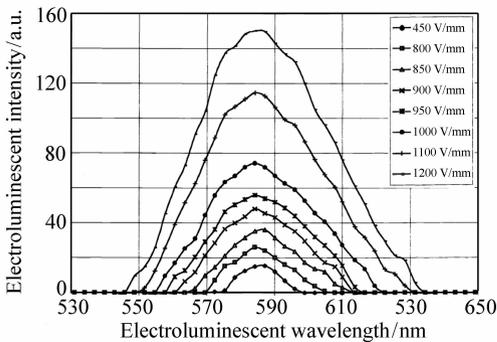


图 5 在不同电场强度下 ZnS:Mn 材料的电致发光强度谱<sup>[9]</sup>

Fig. 5 Spectrums of electroluminescent ZnS:Mn under various electric field intensity<sup>[9]</sup>

2006 年,文献[11]报道了一种利用 SiC 的电致发光效应测量发电机定子线圈端部 SiC 防晕涂

层表面电场分布的方法,其 SiC 防晕涂层发出的光信号经塑料光纤耦合并传输到光电探测电路,避免了以往电场传感器的金属探头引起的电场畸变。作者实验研究了传感器输出电压峰的峰值( $V_{p-p}$ )随被测电场变化的关系,对应于不同 SiC 防晕涂层样品(LF、3#、YX 等)的一组典型实验数据及其非线性拟合曲线如图 6 所示。

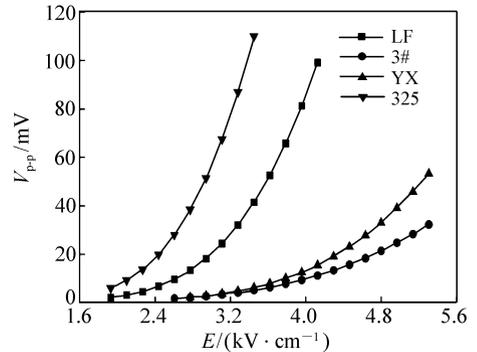


图 6 利用不同 SiC 防晕涂层样品的电场传感器输出电压峰-峰值随被测电场强度变化的典型实验数据<sup>[11]</sup>

Fig. 6 Experimental data of the output peak-to-peak voltage versus electric field intensity for various SiC stress grading coatings<sup>[11]</sup>

2013 年,文献[12]报道了一种基于电致发光的电压传感器,其电压传感元件为利用 ZnS:Cu 粉末材料制成的电致发光线,如图 7 所示,当选用的发光线长度约为 2 cm 时,其工频交流输入阻抗

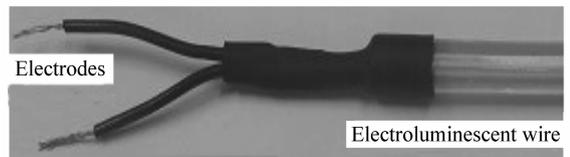


图 7 基于电致发光的电压传感头照片

Fig. 7 Photograph of voltage sensor based on electroluminescent wire

约为 35 MΩ。通过合理利用电致发光亮度与被测电压的非线性关系、以及光电探测器开路电压与其入射光强度之间的非线性关系,实现了 100 ~ 500 V 工频电压有效值的近似线性测量,一组典型实验数据及其线性拟合直线如图 8 所示,其发光起始电压约为 80 V,发光谱线的峰值波长约为 525 nm。此外,文献[13]设计了一种能够分段发

光显示不同等级电压的新型电压传感与显示器,该器件通过改变发光层和绝缘层的厚度来发光显示不同范围的被测电压,可以用于大型电力变压器、以及输电线路工作状态的实时监测。

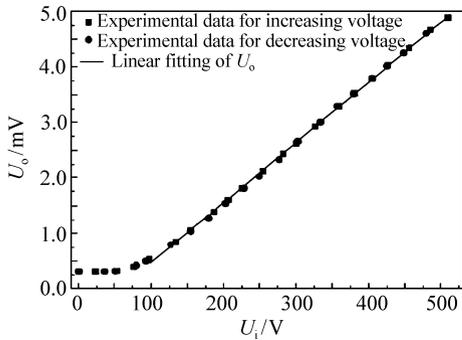


图8 基于电致发光线的电压传感实验数据及其拟合直线<sup>[12]</sup>

Fig. 8 Experimental data of voltage sensor based on electroluminescent wire and their linear fitting line<sup>[12]</sup>

### 3.2 基于发光二极管(LED)的电压传感器

LED是一种典型的低场致发光器件。1972年,日本学者研究报道了利用LED和高阻值限流电阻串联实现脉冲电压测量的实验方案和结果,可以用于测量污秽绝缘子串的分布电压<sup>[14]</sup>,其电压传感器实物照片如图9所示。此外,国内文献报道了利用光耦合器(含有LED)的电压传感器,可以用于电机电压和电池组电压的测量<sup>[16-17]</sup>。

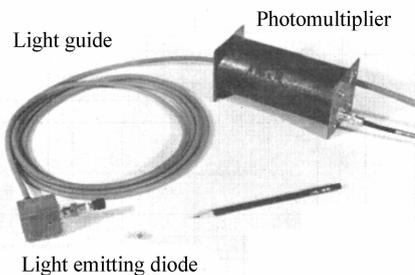


图9 基于LED的电压传感器照片<sup>[14]</sup>

Fig. 9 Photograph of voltage sensor based on LED<sup>[14]</sup>

2004年,文献[18]报道了一种直流高电压测量方案,刘杰等人利用集成电路7555将被测直流电压 $U$ 转换为脉冲宽度信号并驱动LED发光,通过光纤将脉冲光信号传送到光电检测电路和单片机,最后通过测量脉冲宽度实现电压的测量。该

传感方案的优点是传感输出信号不受光强度波动的影响,其缺点是集成电路7555需要一个工作电压源。

### 3.3 概述

由上述文献可知,目前已经用于电压(或电场)传感的电致发光材料主要包括ZnS:Mn、ZnS:Cu和SiC粉末等无机、高场致发光材料,此外还有典型的低场致发光器件LED;尚未见到其它种类的无机材料、以及有机电致发光材料用于电压(或电场)测量或显示的相关研究报道。

从应用角度而言,电致发光型电压(或电场)传感器主要用于两方面,一是用于显示电气设备上是否存在电压(或电场)并粗略显示其数值的高低,例如文献[8]、[10]和[13];另一方面是用于电压(或电场)的定量测量,例如文献[7]、[9]、[11]、[12]。无论是用于电压显示还是电压测量,均有许多问题尚待解决。其中,用于电压显示的传感器研制相对容易,因为它一般不需要严格的电压数值标定;但是用于电压定量测量的传感器研制尚存在一系列问题,需要开展大量的研究工作。

区别于以往电光晶体型光学电压传感器,电致发光型电压传感器主要特性可概括为:

(1)不需要载波光源,从而可以避免以往光学电压传感器因光源光强度、光谱等性能不稳定而引起的输出信号温度漂移等问题,同时使得传感器的正常工作寿命不受载波光源寿命的限制,也节省了光源器件及其维护成本,并有效降低了传感器的电功率损耗。

(2)传感器结构简单、体积小、重量轻、成本低、电功率损耗低等,从而有利于提高传感器的整体可靠性和性能价格比,因为任何传感系统的可靠性与其组成单元的个数成反比。此外,上述特点有利于此类电压(或电场)传感器在航空航天领域中的应用。

(3)利用高场致发光材料的电压传感输出信号通常是被测电压的非线性函数,且一般存在相对较高的发光阈值电压;但基于LED的电压传感器一般具有线性响应特性,且其发光阈值电压一般较低,例如波长为650 nm的红色LED的发光阈值电压可低至约为1.8 V。该

(4)传感器可以在发光亮度较低的情况下实现电压的测量,从而有利于实现电压传感器的长期稳定运行。用于电压传感器的发光器件的工作电流和电功率损耗明显低于用于照明和显示器件的电流和电功耗,使得此类电压传感器具有比照明和显示器件更长的正常工作寿命和更好的长期运行稳定性。例如:基于LED的电压传感器的正向工作电流可以只有几十 $\mu\text{A}$ ,远小于其作为照明元件时的正常工作电流(一般至少几十mA),从而可以极大提高LED及传感器的正常工作寿命。此外,文献[10]中报道的ZnS:Mn薄膜平板显示器在60 Hz工频电压下的正常工作寿命可以达到100 000 h(约11年)。

总之,基于电致发光效应的电压传感器研究在国内外均处于起始阶段,相关研究报道很少;在国外,自20世纪70年代开始,主要有前苏联、波兰、日本和法国等国学者的相继研究报道<sup>[7,9-10,14]</sup>;在国内,西安交通大学早在1975年即开展了此类传感器的研究,利用电致发光效应实现了故障绝缘子的监测<sup>[8]</sup>,之后到2006年,该单位又报道了基于SiC粉末的电机电场测量方案<sup>[11]</sup>。本课题组自2010年开始研究电致发光型电压传感器,实验研究了一种利用电致发光线的电压有效值传感器<sup>[12]</sup>。总体而言,基于电致发光效应的电压传感器具有许多独特的优点,自20世纪70年代以来,国内外已有初步研究结果,但也存在许多问题需要进一步研究和解决。

## 4 存在问题及研究方向

### 4.1 传感材料的选择

电致发光材料种类很多,其主要应用领域是信息显示和照明。根据材料的化学成分和结构的不同,电致发光材料可以分为三大类:即无机材料、有机材料、无机与有机复合型材料。这三类材料各有优缺点,例如,固体无机电致发光材料的物理化学性能相对稳定,发光亮度和发光效率相对较高;有机电致发光器件的发光起始电压较低,可弯曲折叠。根据材料形态不同,无机电致发光材料又可分为粉末、薄膜和单晶3种。目前,粉末型和薄膜型电致发光材料的研究与发展已经较为成

熟,已有很多产品应用,例如显示器和冷光源等。根据驱动电压种类不同,粉末型电致发光材料可分为交流驱动型和直流驱动型两类<sup>[19]</sup>。交流型电致发光材料一般是利用II-VI族化合物基质材料(如ZnS、ZnSe和CdS等)掺杂不同的金属元素(如Cu、Ag等)来获得的;直流型电致发光材料的典型例子是ZnS:Mn。其它新型电致发光材料主要包括硅基、多孔硅基、纳米硅结构的氮化硅基、半绝缘Si/SiO<sub>2</sub>超晶格结构等无机电致发光材料,以及有机电致发光材料等<sup>[20-25]</sup>。

现有文献对电致发光材料的研究报道主要侧重于材料化学成分、合成方法、结构、形态及其与发光特性之间的关系,以及在信息显示和照明等领域中的应用;但目前未见有文献系统研究电压传感器对所需电致发光材料的具体要求。

根据上述现有电致发光材料的类型及其基本特性,并考虑电压传感对电致发光材料的要求,传感器的材料选择应考虑以下几方面:

(1)材料具有稳定的物理、化学性能,一般应为固体,具有一定的抗振动强度,在 $-40 \sim +65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度以及30~80% RH的相对湿度条件下,其物理、化学性质和电致发光性能基本不退化。

(2)发光材料或器件具有较长的正常工作寿命。一般无机材料具有较长的正常发光寿命,例如可以达到10年以上<sup>[10]</sup>。文献[26]介绍了有机电致发光器件的稳定性和寿命。

(3)具有较低的电致发光起始电压和较高的电致发光效率,且其最小电致发光亮度能够满足电压测量灵敏度的要求;发光亮度随被测电压幅值变化的函数关系具有稳定性,且其随温度变化的规律具有可重复性。

(4)材料自身具有较高的电阻率,使得电压传感单元具有较高的输入阻抗(例如100 M $\Omega$ 以上);而且,其输入阻抗具有一定温度稳定性,或输入阻抗随温度变化的规律具有可重复性,以便于实现传感器输出信号的温度标定和补偿。

(5)根据被测电压的相关参数,包括电压幅值和频率范围、以及对传感单元绝缘能力(或输入阻抗)、测量灵敏度等方面的要求,合理选择、设计传感材料及器件的特性参数、形状和尺寸。

很难找到完全符合上述所有要求的电致发光材料;可以根据被测电压对传感单元及其材料的要求,以及不同的测量场合,寻找尽可能多地符合上述要求的材料。因而,对于不同被测电压及其不同测量环境,所选择的电压传感材料可能不同。例如,高场致发光型固体无机材料的电致发光一般具有较好的长期稳定性,在正常条件下不易于退化,但其发光起始电压一般较高;而有机电致发光材料的发光起始电压一般较低,但其发光的长期稳定性一般不如无机材料。根据现有各种电致发光材料和器件,综合考虑被测电压及其应用环境对传感材料的要求,选择出合适的电压传感材料和器件,是此类电压传感器研究方向之一。

#### 4.2 传感器的温度和湿度稳定性

现有各种无机和有机电致发光材料的物理性能均受环境温度和湿度的影响,因而,需要研究电致发光型电压传感器在不同环境温度和湿度条件下如何能够保持输出信号稳定。温度变化对材料发光特性的影响主要包括发光亮度、发光效率以及有机材料的发光光谱(及颜色)等随温度的变化<sup>[27-28]</sup>。图10为文献[28]中报道的一种一体化封装的LED的发光通量、发光效率随其PN结温度的增大而下降的实验数据。

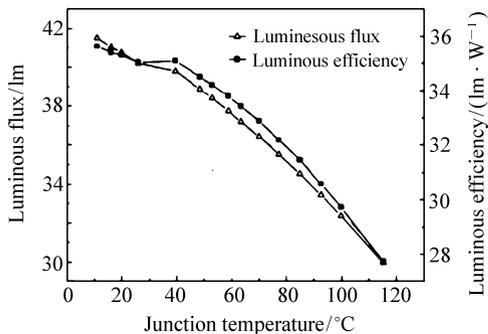


图10 一种LED发光通量/发光效率随其结温变化关系实验数据图<sup>[28]</sup>

Fig. 10 Experimental data of luminous flux and efficiency versus junction temperature of LED<sup>[28]</sup>

根据文献调研和分析可知,一般要求光学电压传感器在 $-40 \sim +65$  °C温度范围内其电压变比能够保持不变;提高此类电压传感器温度稳定性的方法主要包括:

(1)选取、研制电致发光特性的温度稳定性

较好的发光材料与器件。

(2)在测量电压的同时,实时测量传感单元的温度,从而获得电压传感器的温度标定曲线。

(3)采取实时温度补偿措施,即通过对传感信号的数据处理来实时补偿传感器输出的温度漂移。例如,我们最近研究了基于两个不同发光波长的LED的电压传感器,通过数据采集和Lab-view软件算法实现了输出信号的温度漂移补偿<sup>[29]</sup>。

环境湿度将影响器件的正常发光性能及其工作寿命,例如,有机材料型LED对水分和氧气都非常敏感,进入到器件内部的水分和氧气会严重影响电致发光器件的正常工作 and 使用寿命。目前,人们普遍采用严格密封发光材料与器件的方法来避免湿度的影响<sup>[30]</sup>。

#### 4.3 其它关键问题

由于传感机理完全不同于以往电光晶体型光学电压传感器,电致发光型电压传感器研究中还需要考虑以下关键问题:

(1)传感器的输入阻抗和击穿电压。一般无机高场致发光材料为绝缘体,自身具有较高的电阻率和耐压值,可以使电压传感器具有较高的输入阻抗和击穿电压,例如几十MΩ至GΩ量级的输入阻抗,而其击穿电压一般与发光材料的种类和电极间材料的厚度有关;但这些材料的电阻率会随温度和外加电压的变化而变化<sup>[12]</sup>,因而,在传感器设计和研制过程中必须设法补偿或排除这些不利因素的影响。对基于LED的电压传感器,其输入阻抗和击穿电压主要取决于串联的限流电阻,因为LED自身的发光亮度发光以后主要由其驱动电流来确定。

(2)传感器的电压测量灵敏度。各种电致发光材料和器件一般存在发光起亮电压<sup>[11]</sup>,此电压确定了电压传感器的最小可测电压值及其测量灵敏度。例如:文献[12]中的电压传感器可以测量最小80V的工频电压;文献[31]研究出一种低电压驱动的ZnS:Mn薄膜电致发光器件,其发光阈值电压为工频有效值40V。需要注意的是,材料或器件的发光起亮电压不但与材料种类有关,还与被测电压的频率有关,例如,一种电致发光线的发光起亮电压随着电压频率的增大而减小<sup>[12]</sup>,

因而,传感器设计时应根据被测电压测量灵敏度的要求,合理选择和设计发光器件种类、形状和尺寸等参数,例如,可以通过合理设计光路、添加聚光透镜等方式提高电压测量灵敏度。此外,电压测量灵敏度也与传感器对光传感信号的探测、识别与放大能力成正比,选择和利用高灵敏度、高信噪比(SNR)的光电探测器和信号放大电路也可以有效提高电压测量灵敏度。例如,可选用雪崩光电二极管(APD)作为光电探测器,一般Si-APD的响应度可达 $40 \sim 130 \text{ A/W}$ ,而Si-PIN或Si-PN结型光电二极管的响应度一般只有 $0.5 \sim 0.6 \text{ A/W}$ <sup>[32]</sup>。

(3)电磁干扰问题。外加磁场会影响电致发光性能,例如,外加磁场作用可以使一种有机材料的电致发光效率提高<sup>[33]</sup>,因而,电压传感器设计中需要考虑环境磁场等电磁干扰问题。但此类材料磁效应的存在也为利用一种材料同时传感电压(场)、电流(磁场)的新型传感器设计提供了可能性。

(4)长期稳定性。随着正常工作时间的延长,任何电致发光器件在长期运行过程中均会出现发光性能老化的问题<sup>[34]</sup>,因而电致发光型电压传感器的长期稳定性能会因器件老化而退化,需要在今后研究工作中研究材料与器件的老化机理,并在传感器设计及其使用过程中采取一定的补偿措施。

## 5 结束语

电致发光型电压传感器的主要优点在于不需

要载波工作光源,因而可以有效避免以往光学电压传感器中光源性能不稳定所引起的传感器性能退化问题;此外,此类电压传感器结构简单、体积小、重量轻、成本低,可以实现较高的性能价格比。电致发光型电压传感器研究尚存许多问题,例如:传感材料和器件的合理选择;传感器的温度和湿度稳定性;传感器的输入阻抗、击穿电压、以及长期可靠性等关键问题。这些问题的研究和解决,将促进此类电压传感器的实用化。

电致发光型电压传感器研制中应选择具有较高的发光效率、较长的发光寿命、较好的温度稳定性和长期工作稳定性,且具有高输入阻抗和击穿电压的各种场致发光材料作为电压传感材料;随着发光材料科学与技术的发展,将不断出现各种新型材料可用于电压传感器的研制与实验。LED是一种综合性能优良的低场致发光器件,除了用于上述电压传感器以外,还被用于测量脉冲电流和检测高电压输电线上绝缘子的泄漏电流等<sup>[35-36]</sup>;将高阻值电阻器与LED结合实现高电压传感的方案具有一定的实用价值和发展前景。

随着未来智能电网技术的发展,电力系统对用于电磁测量、电能质量监测、继电保护等方面的光学和电子式、以及无源型电压(电场)、电流(磁场)传感器的需求将日益增加,许多与高电压相关的科学研究与实验需要高电压(电场)的绝缘性测量<sup>[37-39]</sup>。此外,在航空航天领域,也经常需要测量飞行器内外各种数值和频带等级的电压或电场<sup>[40-41]</sup>。总之,电致发光型电压传感器将在许多科学研究和工业领域具有广泛的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 李长胜,崔翔,李宝树,等. 光纤电压传感器研究综述[J]. 高电压技术,2000,26(2):40-43.  
LI CH SH, CUI X, LI B SH, *et al.*. A review of optical potential transducers[J]. *High Voltage Engineering*, 2000, 26(2): 40-43. (in Chinese)
- [2] LI C, ZENG R. Optical voltage sensor using single Fresnel Rhomb  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  crystal[J]. *IEEE Sensors J.*, 2014, 14(1): 79-84.
- [3] ORR P, FUSIEK G, NIEWCZAS P, *et al.*. Distributed photonic instrumentation for power system protection and control [J]. *IEEE Trans. Instrum. & Meas.*, 2015, 64(1): 19-26.
- [4] LIN C Y, WANG A X, LEE B S, *et al.*. High dynamic range electric field sensor for electromagnetic pulse detection[J]. *Optics Express*, 2011, 19(18): 17372-17377.
- [5] SAVCHENKOV A A, LIANG W, IICHENKO V S, *et al.*. Photonic E-field sensor[J]. *AIP Advances*, 2014, 4: 122901-1 ~

- 23.
- [6] ZHANG X, HOSSEINI A, SUBBARAMAN H, *et al.*. Integrated photonic electromagnetic field sensor based on broadband bowtie antenna coupled silicon organic hybrid modulator[J]. *J. Lightwave Technology*, 2014, 32(20): 3774-3784.
- [7] 郑会颂, 译. 高电压测量法[J]. 国外计量, 1975(2): 42-44.  
ZHENG H S (translator). High voltage measurement method[J]. *Foreign Metrology*, 1975(2): 42-44. (in Chinese)
- [8] 西安交通大学高压专业75届. 利用场致发光屏检测零值绝缘子[J]. 高压技术, 1976, 2(2): 34-41.  
Graduates of 1975, majoring in high voltage, Xi'an Jiaotong University. Monitoring faulty insulator by use of electroluminescent screen[J]. *High Voltage Engineering*, 1976, 2(2): 34-41. (in Chinese)
- [9] PUSTELNY T, PUSTELNY B. Optical fiber electric field intensity sensor[J]. *SPIE*, 2001, 4516: 208-213.
- [10] ARNAUD A, MINIER V. Voltage presence indicator using ZnS: Mn ac thin film electroluminescent device[J]. *IEEE*, 2002: 415-418.
- [11] 宁叔帆, 于昕哲, 徐阳, 等. 利用 SiC 电致发光特性在线测量防晕层表面电场分布[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(10): 1120-1124.  
NING SH F, YU X ZH, XU Y, *et al.* Online measurement of surface electric field distribution of SiC stress grading coating based on electroluminescence[J]. *J. Xi'an Jiao Tong University*, 2006, 40(10): 1120-1124. (in Chinese)
- [12] 姚健, 李长胜. 利用电致发光线的电压有效值传感器[J]. 光电子·激光, 2013, 24(1): 34-38.  
YAO J, LI CH SH. Optical measurement of effective ac voltage using the electroluminescent wire[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2013, 24(1): 34-38. (in Chinese)
- [13] 郑岩, 李长胜, 姚健, 等. 一种电致发光电压传感器. 中国专利: CN201210233439. X[P]. 2012-09-26.  
ZHENG Y, LI CH SH, YAO J, *et al.*. An electroluminescent voltage sensor, Chinese Patent: CN201210233439. X[P]. 2012-09-26. (in Chinese)
- [14] HARADA T, KAWAMURA T, KISHI K, *et al.*. A high quality voltage divider using optoelectronics for impulse voltage measurements[J]. *IEEE Trans. PAS*, 1972, 91(2): 494-500.
- [15] 徐叙蓉. 高场下的电致发光[J]. 发光学报, 1981, 2(2): 1-11.  
XU X R. Electroluminescence under high electric field[J]. *Chin. J. Luminescence*, 1981, 2(2): 1-11. (in Chinese)
- [16] 冷惠文, 于晓光. 一种新颖的电机电压测量电路[J]. 自动化与仪表, 2000, 15(6): 64-66.  
LENG H W, YU X G. A novel circuit used for voltage measuring of motors[J]. *Automation & Instrument*, 2000, 15(6): 64-66. (in Chinese)
- [17] 郝迎吉, 彭斌, 赵大帅. 便携式串联电池组电压检测系统[J]. 电子设计工程, 2009, 17(8): 113-114.  
HAO Y J, PENG B, ZHAO D SH. A portable voltage measuring system of series battery[J]. *Electronic Design Engineering*, 2009, 17(8): 113-114. (in Chinese)
- [18] 刘杰, 赵永林, 王旭光. 一种光纤隔离型直流高压测量装置[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4s): 281-282.  
LIU J, ZHAO Y L, WANG X G. Optical-fiber insulated d. c. high voltage measurement device[J]. *Chin. J. Scientific Instrument*, 2004, 25(4s): 281-282. (in Chinese)
- [19] 罗晔. II-VI族粉末发光材料之进展[J]. 发光学报, 1987, 8(4): 279-290.  
LUO X. Development in II-VI compound powder luminescent material[J]. *Chin. J. Luminescence*, 1987, 8(4): 279-290. (in Chinese)
- [20] 周成瑶, 李东升, 杨德仁, 等. 多孔硅基电致发光研究进展[J]. 材料导报, 2004, 18(1): 80-82.  
ZHOU C Y, LI D SH, YANG D R, *et al.*. Research of electroluminescence based on porous silicon[J]. *Materials Review*, 2004, 18(1): 80-82. (in Chinese)
- [21] 张新霞, 孙甲明, 张俊杰, 等. 半绝缘 Si/SiO<sub>2</sub> 超晶格结构在交流电场下的电致发光特性[J]. 材料科学与工程学报, 2009, 27(1): 129-131.  
ZHANG X X, SUN J M, ZHANG J J, *et al.*. ACEL Properties of semi-insulating Si/SiO<sub>2</sub> superlattices[J]. *J. Materials Science & Engineering*, 2009, 27(1): 129-131. (in Chinese)
- [22] 王兴军, 周治平. 硅基光电集成用钼硅酸盐化合物光源材料和器件的研究进展[J]. 中国光学, 2014, 7(2): 274-

280.

WANG X J,ZHOU ZH P. Research progress of Er silicate compound light source materials and devices for silicon photonics application[J]. *Chinese Optics*,2014,7(2):274-280. (in Chinese)

- [23] 林圳旭,林泽文,张毅,等. 基于纳米硅结构的氮化硅基发光器件电致发光特性研究[J]. *物理学报*,2014,63(3):037801.
- LIN ZH X,LIN Z W,ZHANG Y,*et al.*. Electroluminescence from Si nanostructure-based silicon nitride light-emitting devices[J]. *Acta Phys. Sin.*,2014,63(3):037801. (in Chinese)
- [24] 刘式塘,赵毅,李峰,等. 有机电致发光研究与应用进展[J]. *物理*,2003,32(5):315-318.
- LIU SH Y,ZHAO Y,LI F,*et al.*. Advances in organic light-emission[J]. *Physics*,2003,32(5):315-318. (in Chinese)
- [25] 何超,张旭,刘智,等. Si 基 IV 族异质结构发光器件的研究进展[J]. *物理学报*,2015,64(20):206102.
- HE CH,ZHANG X,LIU ZH,*et al.*. Recent progress in Ge and GeSn light emission on Si[J]. *Acta Phys. Sin.*,2015,64(20):206102. (in Chinese)
- [26] 李文连. 有机 EL 的稳定性和寿命[J]. *液晶与显示*,1998,13(2):136-140.
- LI W L. Stability and lifetime on organic electroluminescence[J]. *Chin. J. Liquid Crystals and Displays*,1998,13(2):136-140. (in Chinese)
- [27] 罗小兵,杨江辉,刘胜. 温度和湿度对 LED 可靠性的影响及其机制分析[J]. *半导体光电*,2009,30(3):366-370.
- LUO X B,YANG J H,LIU SH. Effect of temperature and moisture on LED reliability and its mechanism analysis[J]. *Semiconductor & Optoelectronics*,2009,30(3):366-370. (in Chinese)
- [28] 邱西振,张方辉,李艳菲. 一体化封装 LED 结温测量与发光特性研究[J]. *光电子·激光*,2012,23(9):1691-1695.
- QIU X ZH,ZHANG F H,LI Y F. Junction temperature measurement and luminous properties research of the integrated packaged LED[J]. *J. Optoelectronics · Laser*,2012,23(9):1691-1695. (in Chinese)
- [29] 王伟岐,李长胜. 一种光电式电压传感器及其温度漂移补偿方法[J]. *光电子·激光*,2015,26(9):1671-1677.
- WANG W Q,LI CH SH. An optoelectronic voltage sensor and its compensation method for temperature drift[J]. *J. Optoelectronics · Laser*,2015,26(9):1671-1677. (in Chinese)
- [30] 黄大勇,牛萍娟,李晓云. 有机电致发光器件封装技术的研究进展[J]. *微电子学*,2010,40(6):875-879.
- HUANG D Y,NIU P J,LI X Y. Advancement in research of encapsulation technology for OLED[J]. *Microelectronics*,2010,40(6):875-879. (in Chinese)
- [31] 张家雨,顾培夫,刘旭,等. 低压驱动薄膜电致发光特性及其机理的研究[J]. *光学学报*,1996,16(4):551-555.
- ZHANG J Y,GU P F,LIU X,*et al.*. Low-voltage-driven thin film electroluminescent devices and mechanism[J]. *Acta Optica Sinica*,1996,16(4):551-555. (in Chinese)
- [32] 余金中著. 半导体光子学[M]. 北京:科学出版社,2015:299.
- YU J ZH. *Semiconductor Photonics*[M]. Beijing:Science Press,2015:299. (in Chinese)
- [33] 汪津,华杰,丁桂英,等. 磁场作用下的有机电致发光[J]. *物理学报*,2009,58(10):7272-7277.
- WANG J,HUA J,DING G Y,*et al.*. Effects of magnetic field on organic electroluminescence[J]. *Acta Physica Sinica*,2009,58(10):7272-7277. (in Chinese)
- [34] 周连祥. ACEL ZnS:Cu 发光体内的 Cu<sup>+</sup> 迁移与发光的老化[J]. *发光学报*,2007,28(1):49-52.
- ZHOU L X. Cu<sup>+</sup> migration and luminescence aging in ACEL ZnS:Cu phosphor grains[J]. *Chin. J. Luminescence*,2007,28(1):49-52. (in Chinese)
- [35] 李长胜,姚健,张春熹,等. 基于场效应管的光电式电流传感器[J]. *光电子·激光*,2012,23(6):1086-1092.
- LI CH SH,YAO J,ZHANG CH X,*et al.*. Optoelectronic current sensor based on field-effect transistor[J]. *J. Optoelectronics · Laser*,2012,23(6):1086-1092. (in Chinese)
- [36] WERNECK M M,DOS SANTOS D M,DE CARVALHO C C,*et al.*. Detection and monitoring of leakage currents in power transmission insulators[J]. *IEEE Sensors J.*,2015,15(3):1338-1346.
- [37] 祝志祥,陈新,马光. 无源传感器的研究与应用进展[J]. *智能电网*,2015,3(3):191-195.
- ZHU ZH X,CHEN X,MA G,*et al.*. Research and application progress of passive sensors[J]. *Smart Grid*,2015,3(3):

191-195. (in Chinese)

- [38] 曾嵘,耿屹楠,牛霖,等. 空气隙放电物理参数测量研究进展[J]. 高电压技术,2011,37(3):528-536.  
ZENG R,GENG Y N,NIU B,*et al.* Research progress on parameters measurement of air gap discharge [J]. *High Voltage Engineering*,2011,37(3):528-536. (in Chinese)
- [39] 孔旭,谢彦召. 基于光纤技术的电磁脉冲3维电磁场测量系统[J]. 高电压技术,2015,41(1):339-345.  
KONG X,XIE Y ZH. Electric field and magnetic field measuring system for EMP measurement based on fiber technology [J]. *High Voltage Engineering*,2015,41(1):339-345. (in Chinese)
- [40] 王立,冯伟泉,李凯. 我国航天器带电技术研究进展[J]. 航天器环境工程,2012,29(5):473-478.  
WANG L,FENG W Q,LI K. Review of spacecraft charging technology studies in China[J]. *Spacecraft Environment Engineering*,2012,29(5):473-478. (in Chinese)
- [41] 杜照恒,刘尚合,魏明,等. 飞行器静电起电与放电模型及仿真分析[J]. 高电压技术,2014,40(9):2806-2812.  
DU ZH H,LIU SH H,WEI M,*et al.* Modeling and simulation analysis of aerial vehicle charging and discharging process [J]. *High Voltage Engineering*,2014,40(9):2806-2812. (in Chinese)

#### 作者简介:



李长胜(1967—),男,河北青龙人,博士,副教授,2003年于日本群马大学获得博士学位,2004年为香港理工大学博士后研究员,主要从事物理光学、光学传感与光学器件、光通信等方面的研究。E-mail: cli@buee.edu.cn