

# 电场传感器研究综述

王 颖

上海建科检验有限公司, 上海  
Email: oliviacrystal@qq.com

收稿日期: 2020年12月25日; 录用日期: 2021年1月19日; 发布日期: 2021年1月27日

---

## 摘 要

电场测量在地球物理勘探、电气工程、气象学和航空航天等诸多领域都具有重要的应用。本文综述了几类传统和新型电场传感器的测量原理和结构, 指出了目前电场传感器存在的问题和今后的发展趋势。

## 关键词

电场测量, 电场传感器, 光电效应, 量子物理

---

# Review of Electric Field Sensors

Ying Wang

Shanghai Jianke Technical Assessment of Construction Co., Ltd., Shanghai  
Email: oliviacrystal@qq.com

Received: Dec. 25<sup>th</sup>, 2020; accepted: Jan. 19<sup>th</sup>, 2021; published: Jan. 27<sup>th</sup>, 2021

---

## Abstract

The wide application in the fields of geophysical prospecting, electrical engineering, meteorology and aerospace has put forward higher requirements for electric field sensors. The paper briefly described the measuring principle and structure of kinds of traditional and new electric field sensors. Finally, the existing problems and the future development trend are pointed out.

## Keywords

Electric Field Measurement, Electric Field Sensor, Photoelectric Effect, Quantum Physics

---

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

电场测量在地球物理勘探、电气工程、气象学和航空航天等诸多领域都具有重要的应用。在地球物理电法勘探中, 电场传感器测量导电媒质中的电场, 用于寻找煤田、油气藏、地下水、金属和非金属矿产[1]。在电气工程领域, 输电线路下方或绝缘子表面的工频电场、换流站阀厅内的直流电场测量以及高电压试验、电晕放电现象的研究都离不开电场传感器[2] [3]。气象学领域中, 通过对大气电场的监测可实现雷电预警[4], 避免引发人身财产安全问题。航空航天领域中, 卫星、导弹等飞行器对着陆点的大气电场有严格的阈值要求, 对空间电场传感器的性能提出了更高的要求。

本文旨在通过对国内外电场传感器的研究综述, 包括各类传感器的原理、性能及优缺点分析, 主要涉及对传统光电式和新型原子量级的电场传感器研究现状进行分析, 指出近年来电场传感器的主要研究方向, 为后续研究工作提供借鉴和参考。

## 2. 传统电场传感器

自 1837 年, 英国物理学家法拉第提出电场以来, 电场通常被分为瞬态电场、交变电场和静电场三大类。传统电场传感器多为光电式, 根据是否基于电光效应分为两大类, 其中基于电光效应的电场传感器主要运用 Pockels 晶体和 Kerr 液体对电场的敏感特性, 另一类主要利用材料的压电效应和电致伸缩效应等。

### 2.1. 基于电光效应

#### 1) Pockels 效应

Pockels 效应是指当铌酸锂和锆酸钡等 Pockels 晶体暴露在外电场中, 其折射率变化与施加电场成线性关系的现象。晶体折射率的温度敏感特性以及晶体表面沉积自由电荷形成的电场是 Pockels 效应应用于电场测量的主要影响因素。

1985 年, S R M Robertson 等人[5]利用 Pockels 晶体的物理旋转(如图 1 所示), 通过光调制信号的频谱分析区分被测电场与干扰信号, 有效地削弱了空间自由电荷对电场测量的影响。铌酸锂和锆酸钡晶体的电场测量精度分别达到 1%和 3%。该传感器受到光调制频率的限制, 只适用于测量一维高频电场。

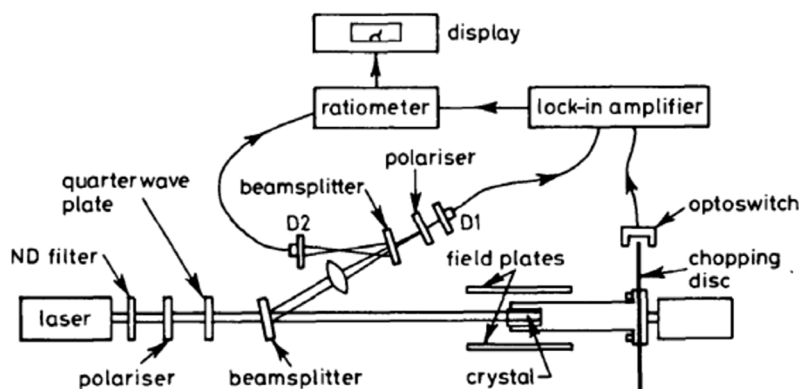


Figure 1. Electric field sensor based on the physical rotation of pockel crystal [5]

图 1. 基于 Pockels 晶体物理旋转的电场传感器[5]

2001年, Franjo Cecelja 等人[6]认为通过 Pockels 晶体的物理旋转消除空间自由电荷的方法增加了传感器结构的复杂性, 容易引入机械运动误差, 测量精度不高。从铌酸锂晶体的形状、介电特性等角度出发, 提出了一种不依赖于空间自由电荷的电场测量原理以及温度补偿模型, 传感器在 80 dB 动态范围内的电场测量分辨率为 100 V/m, 20℃时的温度稳定性为 0.1%。

利用 Pockels 效应实现二维电场测量的研究开始于 1989 年, Hidaka K 等人[7]改进了 Pockels 效应电场传感器的光路结构, 通过对锗酸铋晶体调制后的椭圆偏振光沿 90° 夹角方向的两个检偏器透光强度的分析, 实现被测电场正交分量的二维电场测量, 传感器组成如图 2 所示。

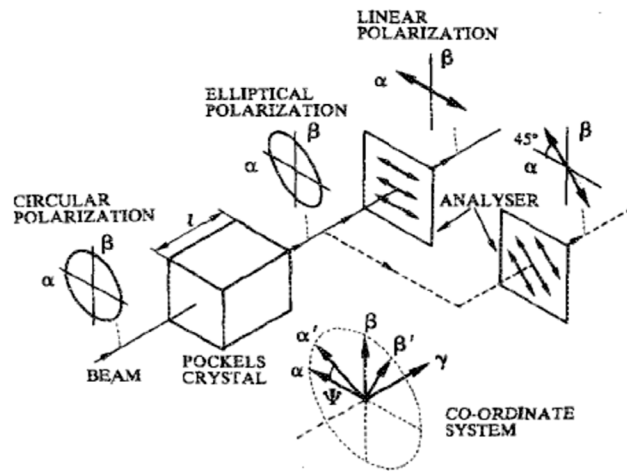


Figure 2. Principle of measuring two orthogonal components of electric fields using Pockels effect [7]  
图 2. 基于锗酸铋 Pockels 效应的二维电场传感器[7]

## 2) Kerr 效应

Kerr 效应是指当变压器油、硝基苯等 Kerr 液体暴露在外电场中, 其折射率变化与施加电场的平方成正比的现象。这类液体的 Kerr 系数都很小, 无法直接从传统光谱图上的黑白干涉条纹读出电场信息。自 20 世纪 90 年代, 陆续有学者给出了利用 Kerr 效应实现电场测量的方案。

1990 年, Takashi Maeno 等人[8]运用交流电压调制被测直流电场(如图 3 所示)来扩展电场测量范围, 被测直流电场强度与透射光的调制频率成正比, 同时采用椭圆偏振入射光消除双折射对测量的影响, 最小可测电场强度为 10 V/cm。

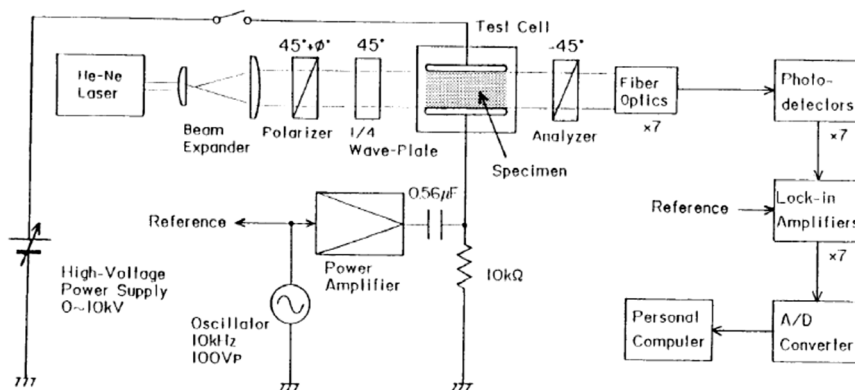


Figure 3. Electric field measurement using the Kerr electrooptic effect of transformer oils [8]  
图 3. 基于变压器油 Kerr 效应的电场传感器[8]

1996年, R Shimizu 等人[9]在前人利用交流电场调制直流电场的研究基础上, 推导了当入射光束沿 Y 轴方向时, 检偏器输出透射光强度与直流、交流电场分量的关系(如图 4 所示), 进而推算出电场沿 X、Z 轴的合成分量, 转换入射光束的方向, 同理获得电场的 Y 轴分量, 最后通过分量合成实现三维电场测量。该传感器只适用于被测电场为轴对称的情况, 无法进行非轴对称三维电场测量。

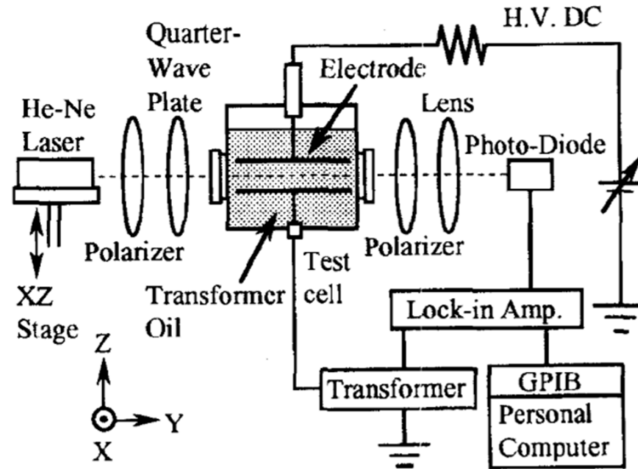


Figure 4. Kerr electrooptic 3D electric field sensor [9]

图 4. 基于 Kerr 效应的三维电场传感器[9]

针对非轴对称电场的三维测量方案是 Haruo Ithori 等人[10]在 1999 年提出的。针对球形-球形电极电容器形成的非均匀非轴对称电场, 利用硝基苯液体的 Kerr 效应, 结合 CT 技术和重构技术(如图 5 所示), 分别测量被测面内各位置点的投光强度分析, 通过光强与位置的映射实现被测面电场分布测量。

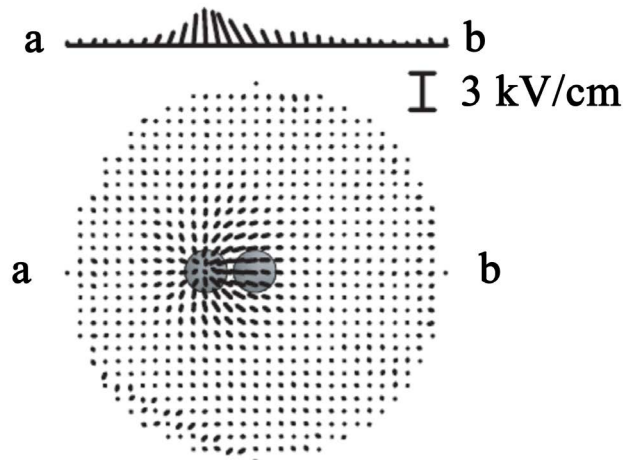
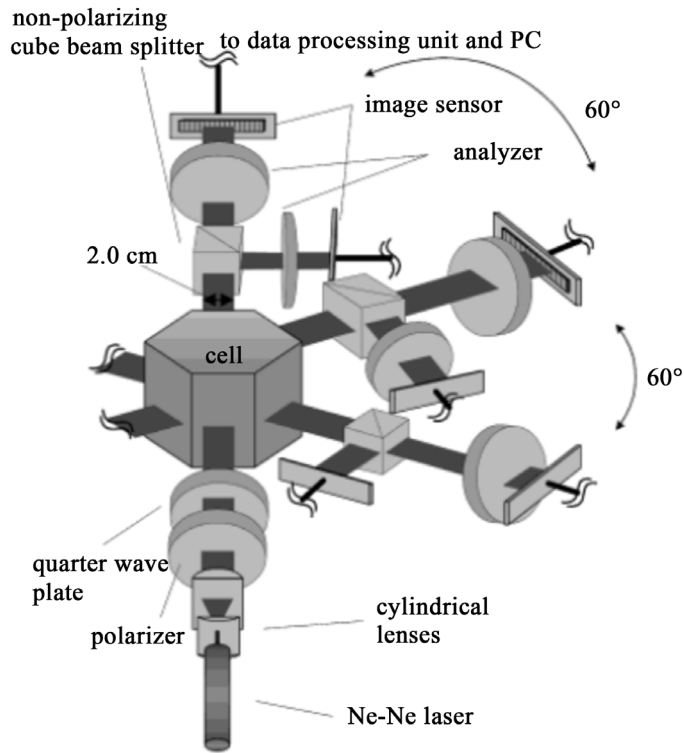


Figure 5. The measurement schematic diagram of electric field distribution through the mapping of light intensity and position [10]

图 5. 通过光强与位置的映射实现被测面电场分布测量原理图[10]

2002 年, Haruo Ithori 等人[11]又利用平行处理技术, 通过三个光学装置进行 X、Y、Z 三个方向上透射光强度的同时测量和分析(如图 6 所示), 将电场分布的测量时间缩短到 0.1 分钟内, 极大地提高了测量效率。缺点是硝基苯液体具有毒性, 存在安全性问题, 液体物性稳定度低, 同时需要多个部件配合实现测量, 结构复杂, 体积大。

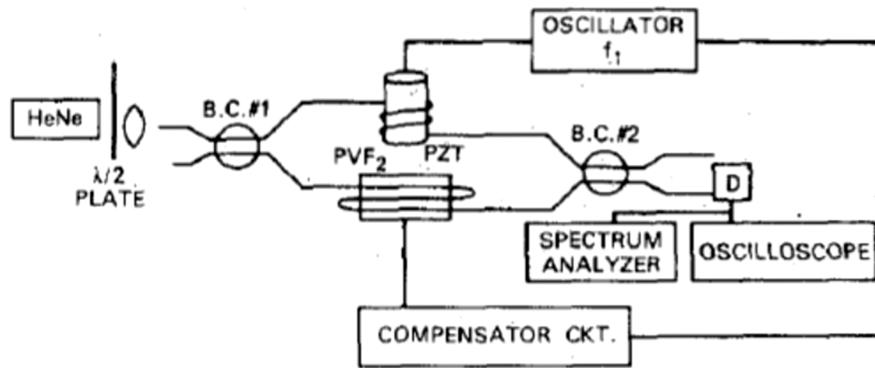


**Figure 6.** The modified three-dimensional electric field sensor based on the electrooptic effect of Nitrobenzene [11]  
**图 6.** 改进型的基于硝基苯 Kerr 效应的三维电场传感器[11]

## 2.2. 非光电效应

### 1) 压电效应

自 1969 年, H Wawai 发现聚偏二氟乙烯(PVF<sub>2</sub>)在高温高压极化后具有明显的压电效应, 国内外研究者便开始尝试将压电效应应用于传感器的研究开发。1982 年, K P Koo 等人[12]首次利用 PVF<sub>2</sub> 压电材料并结合 Mach-Zehnder 光纤干涉仪, 将电场转换为光路相移(如图 7 所示), 相位补偿后最小可探测相位变化达  $10^{-5}$  rad 量级。但是压电材料的线性特性使传感器受  $1/f$  噪声影响严重, 对低频和直流电场的分辨率低。同年, L J Donalds 等人[13]将包裹 PVF<sub>2</sub> 压电材料的光纤在 110°C、直流高压电场的环境下退火, 以此提高压电材料对电场的敏感性, 传感器的灵敏度为  $2.3 \times 10^{-5}$  rad/(V/m)。



**Figure 7.** Electric field sensor utilizing Piezoelectric (PVF<sub>2</sub>) film [12]  
**图 7.** 基于 PVF<sub>2</sub> 压电材料的电场传感器[12]

## 2) 电致伸缩效应

1991年, S T Vohra 等人[14]基于电致伸缩陶瓷在电场作用下产生应变的特性, 提出了一种光纤直流低频电场传感器, 其基本组成如图8所示。电致伸缩陶瓷(Ba:PZT)位于 Mach-Zehnder 光纤干涉仪的一个支路中, 由电致伸缩陶瓷感受被测电场并转换为应变, 进而通过光路相移的分析获得被测电场值。传感器在 5 Hz 处的最小可探测电场为  $0.35 \text{ (V/m)/Hz}^{1/2}$ 。对传感器性能分析认为, 采用非线性的电致伸缩材料作为电场敏感元件可以有效克服  $1/f$  噪声问题。

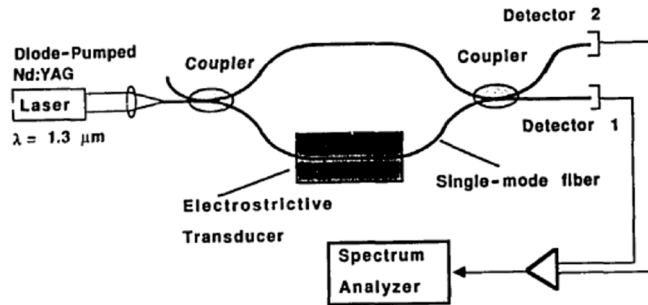


Figure 8. Fiber-optic dc and low-frequency electric-field sensor [14]  
图8. 光纤直流低频电场传感器[14]

2010年, 王晓扬等人[15]研制了一套基于非线性电致伸缩材料 PLZT 和改进的“工”字型全光纤 Michelson 干涉仪的微弱电场探测系统, 较好地解决了  $1/f$  噪声问题, 灵敏度达到  $1.9 \text{ mV/(V/m)}$ , 在 1 Hz、5 Hz 和 10 Hz 处的最小可探测电场分别为  $0.11 \text{ (V/m)/Hz}^{1/2}$ ,  $0.022 \text{ (V/m)/Hz}^{1/2}$  和  $0.020 \text{ (V/m)/Hz}^{1/2}$ 。不足在于电致伸缩引起的应变容易引入机械误差, 影响系统结构稳定性, 同时应变转换为光相位延迟存在转换效率问题。

## 3) 光波导

基于光波导电场传感器的基本原理是利用各种形式的天线感受被测电场, 并传导至光子晶体波导中, 电场对光波导中的电光敏感材料进行相位调制, 通过对出射光相位的解调获得被测电场信息。

2011年, Mathews S 等人[16]提出了一种以向列型液晶为电光敏感元件的光子晶体光纤传感器, 由液晶材料感受被测电场, 通过双折射率的改变, 将电场量转换为光信号的相位延迟(如图9所示)。该传感器通过改变不同液晶材料的光纤渗透长度可以满足不同量程范围的电场测量, 但是没有具体给出此类传感器能够达到的电场测量精度。

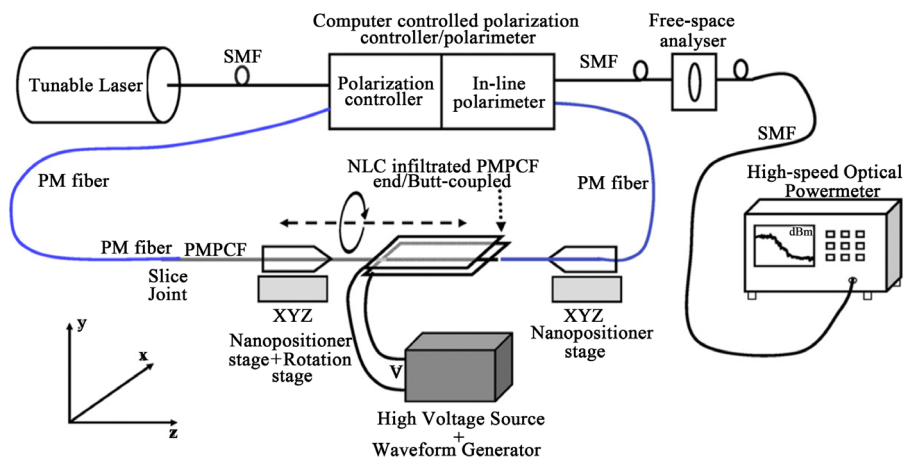
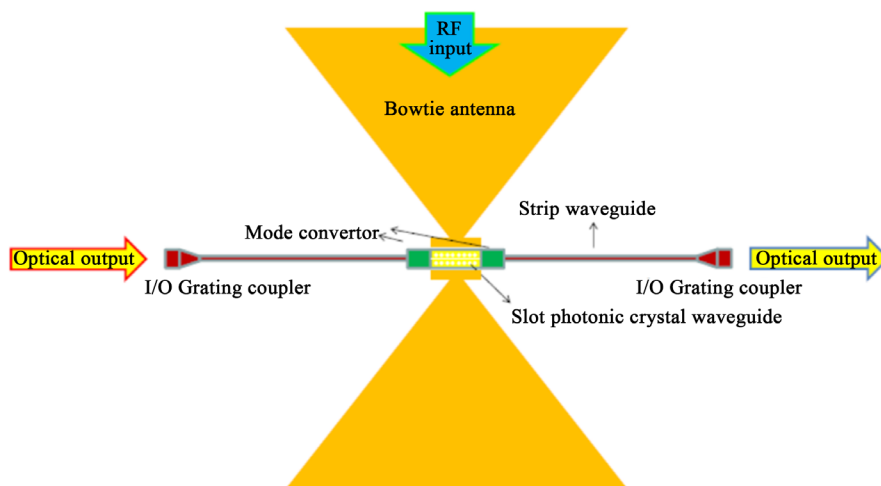


Figure 9. Electric field sensing using liquid crystal infiltrated photonic crystal fibers [16]  
图9. 基于液晶材料的光子晶体光纤电场传感器[16]

2013年, Xingyu Zhang 等人[17]提出了一种具有蝶形天线的光子晶体波导电场传感器(如图10所示), 光子晶体波导的低色散、慢光传播的特性, 使器件内的电光效率高达  $1000 \text{ pm/V}$ 。蝶形天线同时起到感应电极和接收无线电频率的作用, 传感器对电场的高灵敏度特性只局限于  $10 \text{ GHz}$  的频率环境下, 对低频和静电场不灵敏。



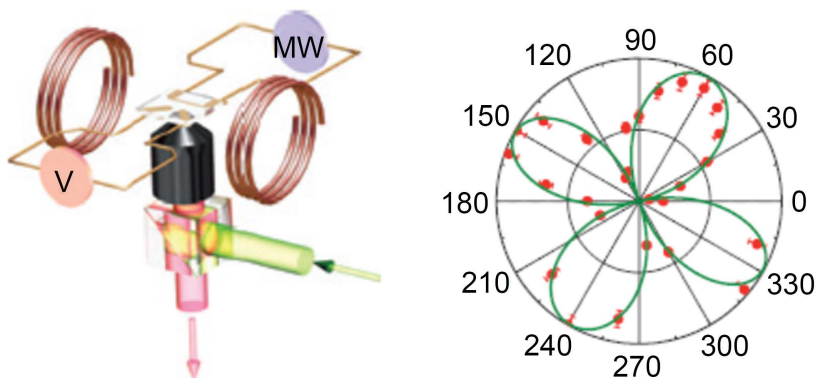
**Figure 10.** Electric field sensor based on photonic crystal waveguide coupled with bowtie antenna [17]  
**图 10.** 蝶形天线的光子晶体波导电场传感器[17]

综上所述, 光电式电场传感器体积小、响应速度快、不干扰被测电场、灵敏度高, 但是存在光路复杂, 激光源功耗大、成本高、温度稳定性差以及频率响应窄等局限性。

### 3. 新型电场传感器

近年来, 国内外也出现了一些运用量子物理等原理研制的新型电场传感器。

2011年, Dolde F 等人[18]基于金刚石单个氮空位缺陷中心自旋的塞曼效应、局部应变效应和斯塔克频移之间相互作用, 提出了一种三维高精度电场测量方法(如图11所示)。磁场驱动自旋从基态转变为激发态, 微波源和磁共振技术测量磁过渡频移, 继而通过分析磁过渡频移的大小及其与极坐标夹角分别实现被测电场的强度和方向的测量。对交流和直流电场的测量灵敏度分别为  $202 \pm 6 \text{ (V/cm)/Hz}^{1/2}$  和  $891 \pm 21 \text{ (V/cm)/Hz}^{1/2}$ , 分辨率分别为  $7.5 \text{ V/cm}$  和  $173 \text{ V/cm}$ 。



**Figure 11.** Three-dimensional electric-field measurement using a single nitrogen-vacancy defect centre spin in diamond [18]  
**图 11.** 基于金刚石单个氮空位缺陷中心自旋的三维电场方法[18]

该方法创新性地利用金刚石晶体中的氮缺陷缺陷中心自旋，实现原子量级的探针设计，可以同时测量电场强度和方向。但是该方法需要同时施加磁场，不排除对被测电场的电磁干扰。

2012年, J D Carter 等人[19]提出了一种利用里德伯冷原子进行原子芯片微结构表面电场的测量方法。通过对气态原子的俘获、释放和里德伯激发获得里德伯冷原子，选择性电离场电离里德伯冷原子，由微通道平面探测器获得里德伯原子光谱图(如图 12 所示)，通过分析远离原子芯片不同距离时的光谱图，实现原子芯片表面电场强度测量。

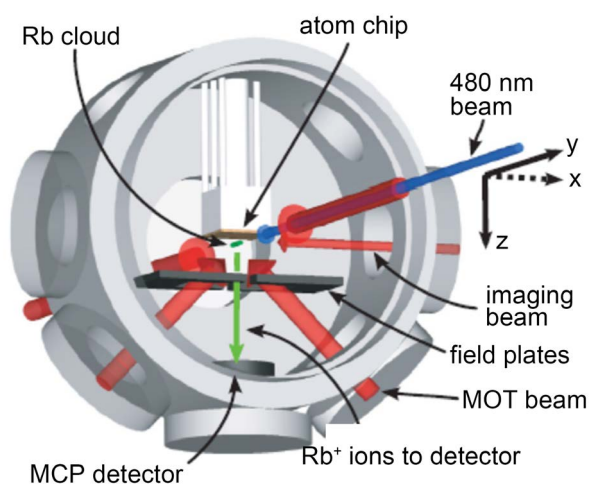


Figure 12. Method for measuring electric field strength using cold Rydberg atoms [19]

图 12. 基于里德伯冷原子的电场强度测量方法[19]

2018年, Benjamin M Goldberg 等人[20]提出了一种基于等离子体放电的电场测量方法(如图 13 所示)。外电场激发气态介质产生等离子体，皮秒激光器发出的入射光经过充满等离子体的放电结构，产生二次谐波，二次谐波强度与被测电场之间的平方成正比，从而通过测量出射光的二次谐波强度推算被测电场强度。该测量方法的缺点是存在基底等离子体发射干扰，影响二次谐波信号的提取和测量。

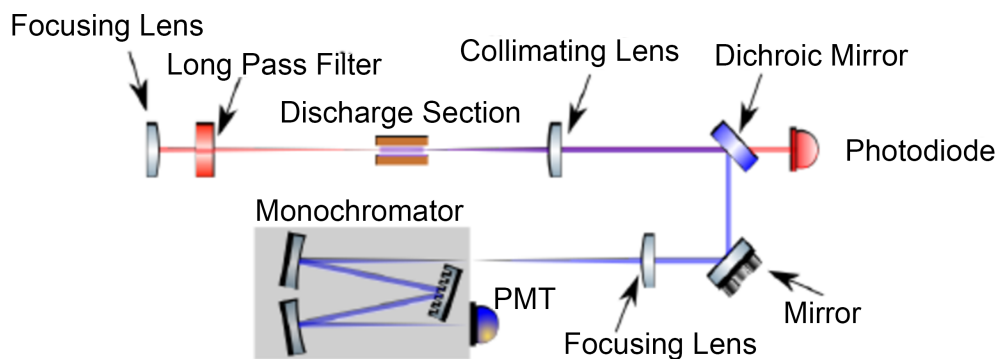


Figure 13. Electric field measurement based on plasma discharge [20]

图 13. 基于等离子体放电的电场测量方法[20]

新型电场传感器将新兴的电场敏感机理与传统的信号探测方法巧妙结合，探究了在原子量级上进行电场测量的可能性，为电场传感器的研究和开发提供了新的思路。同时，新原理和特性的应用，也会出现新的电场干扰源(例如磁场和基底等离子体发射)，需要进一步研究干扰机制，完善和提高新型电场传感器性能。



## 4. 结论

通过对几类传统和新型电场传感器的文献研读发现, 现有的电场传感器大多基于特定材料物理性能对电场的敏感性, 越来越多的新兴材料和新技术被用于新型电场传感器的研发, 国内外的电场传感器逐渐向多维度、宽频带和微型化发展, 但目前对电场信号的读取方法涉及多个环节和部件, 结构复杂, 特别是新技术的引入对电场测量的影响机制有待进一步研究, 以更好地提高传感器的抗干扰能力和测量精度。

## 参考文献

- [1] 王志宇, 王顺, 张群英, 等. 一种新型地球物理电容性电场传感器研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(12): 2678-2685.
- [2] 李长胜, 崔翔. 光学电场传感器研究综述[J]. 电气应用, 2008, 27(16): 8-13.
- [3] 曾嵘, 俞俊杰, 牛犇, 等. 用于宽频带时域电场测量的光电集成电场传感器[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5234-5243.
- [4] Zeng, Q., Wang, Z., Guo, F., *et al.* (2013) The Application of Lightning Fore-Casting Based on Surface Electrostatic Field Observations and Radar Data. *Journal of Electrostatics*, **71**, 6-13. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2012.10.007>
- [5] Robertson, S.R.M. and Rogers, A.J. (1985) Measurement of DC Electric Fields Using the Electro-Optic Effect. *IEE Proceedings J-Optoelectronics*, **132**, 195-198. <https://doi.org/10.1049/ip-j.1985.0041>
- [6] Cecelja, F., Bordovsky, M. and Balachandran, W. (2001) Lithium Niobate Sensor for Measurement of DC Electric Fields. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **50**, 465-469. <https://doi.org/10.1109/19.918167>
- [7] Hidaka, K., Kouno, T. and Hayashi, I. (1989) Simultaneous Measurement of Two Orthogonal Components of Electric Field Using a Pockels Device. *Review of Scientific Instruments*, **60**, 1252-1257. <https://doi.org/10.1063/1.1140299>
- [8] Maeno, T., Nonaka, Y. and Takada, T. (1990) Determination of Electric Field Distribution in Oil Using the Kerr-Effect Technique after Application of DC Voltage. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, **25**, 475-480. <https://doi.org/10.1109/14.55719>
- [9] Shimizu, R., Matsuoka, M., Kato, K., *et al.* (1996) Development of Kerr Electro-Optic 3-d Electric Field Measuring Technique and Its Experimental Verification. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **3**, 191-196. <https://doi.org/10.1109/94.486769>
- [10] Ihori, H., Fujii, M. and Arii, K. (1999) Measurement of Nonsymmetrical Electric Field Vector Distribution in Nitrobenzene Using Electrooptic Method. *Japanese Journal of Applied Physics*, **38**, 6170. <https://doi.org/10.1143/JJAP.38.6170>
- [11] Ihori, H., Ujike, M., Hiromoto, K., *et al.* (2002) Time Series Measurements of Electric Field Vector Mapping in a Dielectric Liquid. *Japanese Journal of Applied Physics*, **41**, L861. <https://doi.org/10.1143/JJAP.41.L861>
- [12] Koo, K. and Sigel, G. (1982) An Electric Field Sensor Utilizing a Piezoelectric Polyvinylidene Fluoride (PVF 2) Film in a Single-Mode Fiber Interferometer. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **18**, 670-675. <https://doi.org/10.1109/JQE.1982.1071604>
- [13] Donalds, L.J., French, W.G., Mitchell, W.C., *et al.* (1982) Electric Field Sensitive Optical Fibre Using Piezoelectric Polymer Coating. *Electronics Letters*, **18**, 327-328. <https://doi.org/10.1049/el:19820223>
- [14] Vohra, S.T., Bucholtz, F. and Kersey, A.D. (1991) Fiber-Optic DC and Low-Frequency Electric-Field Sensor. *Optics Letters*, **16**, 1445-1447. <https://doi.org/10.1364/OL.16.001445>
- [15] 王晓扬. 干涉型光纤微弱电场传感器研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [16] Mathews, S., Farrell, G. and Semenova, Y. (2011) All-Fiber Polarimetric Electric Field Sensing Using Liquid Crystal Infiltrated Photonic Crystal Fibers. *Sensors and Actuators A: Physical*, **167**, 54-59. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2011.01.008>
- [17] Zhang, X., Hosseini, A., Xu, X., *et al.* (2013) Electric Field Sensor Based on Electro-Optic Polymer Refilled Silicon Slot Photonic Crystal Waveguide Coupled with Bowtie Antenna. *Millimeter, and Submillimeter-Wave Technology and Applications VI*, San Francisco, 5-8 February 2013, Vol. 8624, 862418. <https://doi.org/10.1117/12.2005925>
- [18] Dolde, F., Fedder, H., Doherty, M.W., *et al.* (2011) Electric-Field Sensing Using Single Diamond Spins. *Nature Physics*, **7**, 459. <https://doi.org/10.1038/nphys1969>
- [19] Carter, J.D., Cherry, O. and Martin, J.D.D. (2012) Electric-Field Sensing near the Surface Microstructure of an Atom

---

Chip Using Cold Rydberg Atoms. *Physical Review A*, **86**, Article ID: 053401.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.86.053401>

- [20] Goldberg, B.M., Chng, T.L., Dogariu, A. and Miles, R.B. (2018) Picosecond Laser Electric Field Induced Second Harmonic Generation for Measurement of Arbitrarily Applied Electric Fields. *56th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, Kissimmee, 8-12 January 2018, 1432.