

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205173

基于激光光电池供电的脉冲电场传感器设计*

李钦凯^{1,2} 张家洪^{1,2} 马超^{1,2} 李英娜^{1,2}

(1. 昆明理工大学信息工程与自动化学院 昆明 650500; 2. 昆明理工大学云南省计算机应用技术重点实验室 昆明 650500)

摘要:为了解决脉冲电场传感器电光调制部分的供电问题,设计研制了一种基于激光光电池供电的脉冲电场传感器,该传感器由激光光电池供电电路、电光调制电路和感应天线构成。设计制作了由供能激光器、锂电池、激光光电池、锂电池充电电路、锂电池保护电路、锂电池升压放电电路构成的激光光电池供电电路。测试结果表明,供电电路输出电压精度为1.04%,纹波系数为0.3%,并且48 h持续工作输出电压波动为 ± 0.035 V。设计制作了由单极子天线、场效应管型集成运放构成的传感器电光调制电路。实验结果表明,研制的脉冲电场传感器测量带宽在39.8 Hz~1 050 MHz,动态范围0.256 kV/m~13.79 kV/m。

关键词: 电场传感器; 电光调制; 光电池; 单极子天线; 脉冲电场测试

中图分类号: TN29 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

Design of an electro-optic (EO) pulsed electric field sensor powered by laser photocell

Li Qinkai^{1,2} Zhang Jiahong^{1,2} Ma Chao^{1,2} Li Yingna^{1,2}

(1. Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Yunnan Key Laboratory of Computer Technology Application, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to solve the problem that current electro-optic (EO) electric field sensor has no continuous power supply capability, a pulsed electric field sensor powered by laser photocell is designed and developed. The sensor consists of a laser photocell power supply circuit, an EO modulation circuit and a monopole antenna. The laser photocell power supply circuit which incorporated with a diode laser, a lithium battery, a photovoltaic power converter, a lithium battery charging, protection and discharge circuit are designed and fabricated. The experimental results show that the output voltage accuracy and ripple coefficient of the developed laser photovoltaic power supply circuit are 1.04% and 0.3% respectively. Besides, the output voltage fluctuation is ± 0.035 V after continuous work for 48 hours. The EO modulation circuit of the sensor incorporated with a monopole antenna and a FET type operational amplifier is designed and fabricated. The measurement results show that the dynamic range of the developed sensor is from 0.256 kV/m to 13.79 kV/m.

Keywords: electric field sensor; electro-optic (EO) modulation; photovoltaic power converter; monopole antenna; pulsed electric field measurement

0 引言

随着电子元件的不断微型集成化,电子设备的电磁兼容性要求也越来越高。特别是在核电电磁脉冲^[1]、静电放电脉冲^[2]、雷电电磁脉冲^[3]以及开关放电电磁脉冲^[4]等的高功率脉冲电磁场中,减少其对电子设备干扰和损

坏,从而对脉冲电场不间断的测量变得尤为重要^[5]。

近年来,随着国内外针对电磁脉冲电场测量技术的研发,目前常用脉冲电场传感器分成3类:天线感应式传感器、无源光学电场传感器和有源电光调制式传感器^[6]。天线感应式传感器和无源电光调制电场传感器具有无源的优点,但天线尺寸和后置积分器影响天线感应式传感器的带宽与波形直接时域测量^[7],而无源光学电场传感

器在不同温度下电场测量结果误差极大^[8-9]。

有源电光调制式传感器采用天线控制激光器产生光信号,解决了信号传输过程中衰减较大、易受干扰等问题,因此引起了国内外学者的大量研究。俄罗斯科学院 Fedorov 等^[10]采用紧凑型锂电池,研制了一种高功率带状电场传感器,能够不失真的测量 10 kV/m 的电场信号,在 100 kHz 以下具有较好的性能,传感器尺寸较大,不适用于高频电场测量。清华大学的张晓明等^[11]利用单极子天线感应外界电场信号,并设计高阻态电光转换电路,信号通过光纤进行传输,最后通过光电转换成电信号,传感器带宽为 10 kHz~500 MHz,未对传感器的灵敏度以及系统带宽进行深入研究,传感器选用体积小的 CR123A 锂电池,传感器持续工作仅为几个小时。西安交通大学的欧阳宏志等^[12]基于环形天线理论,研制了一种同时测量脉冲电场和磁场的传感器,探头部分采用高能量密度的锂电池供电,探头的带宽达到了 100 MHz,受限于环形天线结构,在电场测量方面带宽范围较低。陆军工程大学的赵敏等^[13]设计了一种用于电磁脉冲测量的指状微型光纤传感器,通过特殊的结构和纽扣电池供电电路设计,在与光纤相连的直接电光转换电路处焊接的导线作为电场传感器的天线,传感器在 100 kHz~1 GHz 范围内响应平坦,线性响应范围为 645 V/m~83 kV/m,纽扣电池虽然具有体积小优势,但维持传感器工作时间较短。以上几种电光调制式电场传感器在带宽测量和线性响应范围进行了提升,但均直接采用电池供电。受电池自身结构的影响,单纯电池供电存在如下缺点:1) 电池持续供

电能力不足,随着工作时间的增加,电池电压下降,造成电场测量误差;2) 在电场测量过程中更换电池需要关断信号源功放等设备,给实际操作带来不便。

为了解决脉冲电场传感器的供电问题,本文设计了一种基于激光光电池供电的脉冲电场传感器,该传感器主要由感应天线、激光光电池供电电路和电光调制电路构成。供能激光器输出激光经过多模光纤传输到激光光电池供电电路,实现了电-光-电的能量转换,解决了电光调制式脉冲电场传感器不能持续供电的问题。

1 传感器基本原理和电路设计

1.1 激光光电池供电的脉冲电场传感系统

为了实现传感器在电场测量环境中持续工作,选择以多模光纤为媒介传输能量,通过从外部供电到光电池的电-光-电转换,实现远距离的供电^[14-15]。基于激光光电池供电的脉冲电场传感系统结构如图 1 所示,传感系统由供能激光器、脉冲电场传感器和光电探测器组成。供能激光器和光电探测器分别用 980 nm 多模光纤和 1 550 nm 单模光纤,连接到脉冲电场传感器的光输入和光输出接口。供能激光器输出激光经过较大纤芯的多模光纤传输到光电池,将光能转化成电能,并通过激光光电池供电电路,给锂电池和电光调制电路供电。电光调制电路将单极子天线感应到的电场信号加载到调制激光器上,调制激光器输出的光信号包含了电场信号,经过 1 550 nm 单模光纤传输到光电探测器。

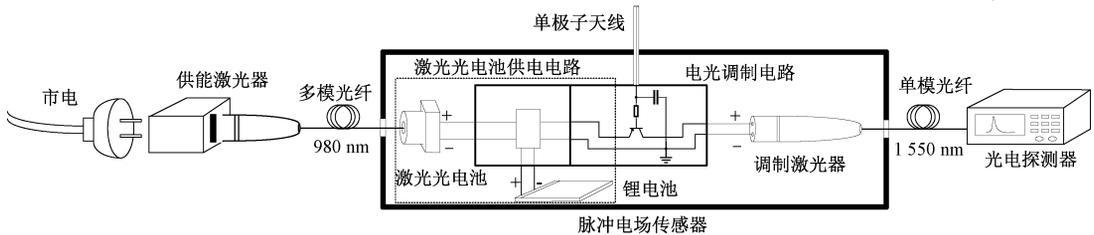


图 1 基于激光光电池供电的脉冲电场传感系统结构

Fig. 1 Structure of pulsed electric field sensing system powered by laser photocell

1.2 感应天线和电光调制电路

本文设计的感应单极子天线及其等效电路图 2 所示。图中单极子天线的长度为 h , 半径为 a , 入射电磁波场强为 E_i , 电场方向和天线的夹角为 θ , 则天线间感应电压 U_{ant} 为:

$$U_{ant} = E_i h_e \cos\theta \quad (1)$$

式中:单极子天线的有效长度 h_e 表示为:

$$h_e = \frac{h(\Omega - 1)}{\Omega - 2 + \ln 4} \quad (2)$$

式中: $\Omega = 2\ln(2h/a)$ 为天线厚度因子。

一般情况下,可通过经验公式计算得出 R_{ant} 取值一般不大于 10Ω , C_{ant} 取值一般不大于 10 pF 且与频率无关^[16-19]。在电场测量环境中,当被测电场方向平行于单极子天线方向时($\theta = 0^\circ$), $U_{ant} = E_i h_e$ 。

图 2 所示的等效电路中,天线的输入阻抗 Z_{ant} 为:

$$Z_{ant} = R_{ant} + \frac{1}{j\omega C_{ant}} \quad (3)$$

式中:天线的等效电容 C_{ant} 可以表示为:

$$C_{ant} = \frac{2\pi h \epsilon_0}{\Omega - 2 - \ln 4} \quad (4)$$

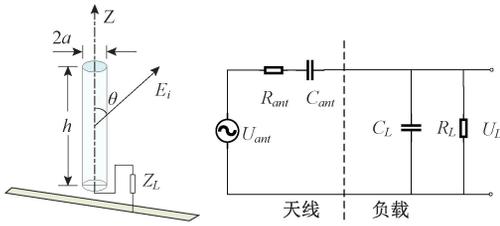


图 2 单极子天线及其等效电路图

Fig. 2 Monopole antenna and its equivalent circuit diagram

式中: ε_0 为自由空间介电常数。对图 2 所示等效电路进行频域分析, 将负载电压 U_L 表示为:

$$U_L(s) = \frac{Z_L(s)}{Z_{ant}(s) + Z_L(s)} U_{ant}(s) = \frac{sC_{ant} U_{ant}(s)}{\frac{1}{R_L} + s\left(\frac{R_{ant}}{R_L} C_{ant} + C_{ant} + C_L\right) + s^2 R_{ant} C_{ant} C_L} \quad (5)$$

由式(5)可得, 若 R_L 取值较大, 满足 $R_L \gg 1/s(C_L + C_{ant})$ 以及 $R_L \gg R_{ant}$ 时, 在低频段 $s \ll (R_{ant} R_L C_{ant} C_L)^{-1/2}$ 时, 式(5)可化简为:

$$U_L(s) = \frac{sC_{ant}}{\frac{1}{R_L} + s(C_{ant} + C_L)} U_{ant}(s) \quad (6)$$

由式(6)可得, 电路传递函数表示为一个高通滤波器, 下限截止频率为:

$$f_L = \frac{1}{2\pi R_L (C_{ant} + C_L)} \quad (7)$$

由式(7)可以看出, R_L 和 C_L 取值越大, 下限截止频率越低。

在高频段 $s \gg (R_{ant} R_L C_{ant} C_L)^{-1/2}$ 时, 式(5)可化简为:

$$U_L(s) = \frac{C_{ant}}{(C_{ant} + C_L) + sR_{ant} C_{ant} C_L} U_{ant}(s) \quad (8)$$

由式(8)可得, 电路传递函数表示为一个低通滤波器, 上限频率为:

$$f_H = \frac{C_{ant} + C_L}{2\pi R_{ant} C_{ant} C_L} = \frac{1}{2\pi R_{ant} C_{ant}} + \frac{1}{2\pi R_{ant} C_L} \quad (9)$$

由式(9)可以看出, C_L 取值越大, 上限频率越小, 并趋于 $1/(2\pi R_{ant} C_{ant})$ 。

当 $(C_{ant} + C_L) R_L \gg 1$ 时:

$$U_L = \frac{C_{ant}}{C_{ant} + C_L} U_{ant} \quad (10)$$

综上所述, 感应天线接输入电阻 R_L 远大于 R_{ant} 时, 电光调制响应电压 U_L 与被测电场中感应天线两端电压 U_{ant} 成正比。由式(7)、(9)可以看出, R_L 影响传感器的下限截止频率, 而 C_L 的取值同时影响传感器的上限和下限截止频率。因此, 本文选用具有单位增益稳定、超高速

电压反馈、超低噪声和极高输入阻抗的场效应管型集成运放来设计电光调制电路, 从而使传感器具有宽带响应的特性。

本文设计的电光调制电路如图 3 所示, 使用场效应管型集成运放构成电压跟随器, 具有输入电阻高、输入电容低和输出电阻低的特点, 提高了电路带负载能力同时具有较宽的带宽。将单极子天线同正相输入端相连, 再通过两个耦合电容 C_{co1} 和 C_{co2} 将天线感应的电压信号调制到 1 550 nm 半导体激光器 (laser diode) 上。设计时使用小电容 C_{co1} 与大电容 C_{co2} 并联构成耦合电容, 可以使电路具有较宽的带宽^[20-21]。设计合适的偏置电阻 R 控制驱动电流 I_0 ($I_0 > I_{th}$) 使 LD 工作在线性区, 则 LD 的输出光功率为:

$$P_{out} = K(I_0 - I_{th} + g\Delta u) \quad (11)$$

式中: I_{th} 为 LD 的阈值电流, K 为 LD 工作线性区时的斜率效率 ($I_0 > I_{th}$), g 为集成运放的互导, Δu 为天线感应电压。

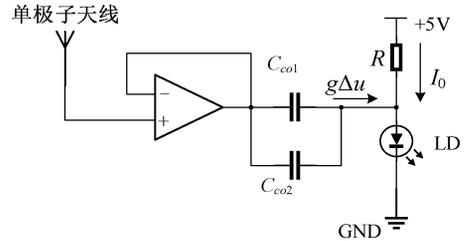


图 3 脉冲电场传感器电光调制电路原理

Fig. 3 Schematic diagram of electro-optic modulation circuit for pulse electric field sensor

因此, 由式(11)可知天线感应的电压信号即调制信号与 LD 的输出光强近似成线性关系。最后在传感器的输出端连接光电探测器, 将光信号转换成电信号, 从而获取到电场的信息。

1.3 激光光电池供电电路

光电池的输出功率受光电池的温度、输入光功率波动等系统因素影响。注意到只采用光电池供电时, 由于光电池输出电流和电压的不稳定, 会造成电光调制电路驱动电流波动, 从而使 LD 的输出光功率不稳定, 为此设计了“光电池+锂电池”的供电模式, 具体原理图如图 4 所示。

激光光电池供电电路主要包括光电池、锂电池、锂电池充电电路、锂电池保护电路和锂电池放电电路构成。通过锂电池放电电路将不稳定的输入电压即光电池的输出电压, 转换成稳定的输出电压, 并给电光调制电路供电。由此光电池输出电压的波动只会影响锂电池充电的速度, 不会影响激光光电池供电电路的输出。

如图 4 所示, 锂电池充电电路选用 PW4065 芯片,

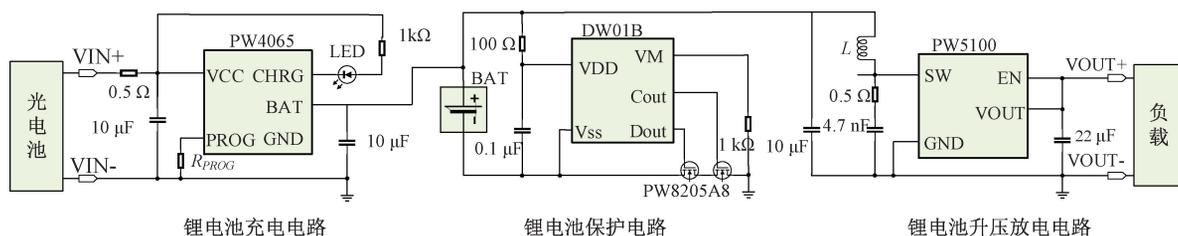


图 4 激光光电电池供电电路原理

Fig. 4 Schematic diagram of the supply circuit powered by laser photocell

VIN+端输入电压范围 0~12 V, 充电电流在 3~600 mA。为保证在光电池下可靠使用,防止尖峰和毛刺电压引起的芯片损坏,VIN+端和 BAT+端分别接 10 μ F 的陶瓷电容。电光调制电路最大工作电流约为 220 mA,芯片的输出即充电电流 I_{BAT} 由连接 PROG 引脚的电阻 R_{PROG} 来设定,根据公式 $R_{PROG} = 100/I_{BAT}$,设计充电电流为 220 mA 时,确定出 R_{PROG} 为 7.3 k Ω 。

锂电池放电电路选用 PW5100 芯片,最高工作频率 F_s 为 1.2 MHz,输入电压为 0.7~5.0 V,输出电压为 5.0 V。首先为了保证芯片在连续电流模式能够正常工作,电感的最小值 L_{MIN} 需要满足:

$$L_{MIN} \geq \frac{D \cdot (1 - D)^2 \cdot R_{LOAD}}{2 \cdot F_s} \quad (12)$$

式中: $D = 1 - (V_{IN}/V_{OUT})$ 为占空比, V_{IN} 为 4.2 V, V_{OUT} 为 5 V,等效负载电阻 R_{LOAD} 约为 130 Ω ,代入式(12)计算得出最小电感值 L_{MIN} 不小于 7.7 μ H,故选用 10 μ H 的贴片电感。

光电池选用 GaAs 光电池,工作波长为 980 nm,输入光功率在 1~3.8 W 之间时,转化效率为 24%~28%,输出电压为 0~8.5 V,输出电流最高可达 150 mA。考虑到工作波长 980 nm 的供能激光器在驱动电流 0.8~12 A 时,对应输出光功率范围 1~10 W,所以为了使输入光电池的光功率不超过 3.8 W,供能激光器驱动电流不能大于 6 A。供能激光器与光电池通过 62.5 μ m/125 μ m 直径纤芯的 980 nm 多模光纤连接。

如图 5 所示,将激光光电电池供电电路与电光调制电路集成在一起制作的电路实物图,尺寸为 53 mm \times 42 mm。为了验证输入光功率波动对激光光电电池供电电路影响,用不同的供能激光器驱动电流产生波动的光功率,在供能激光器 0.8~6 A 驱动电流下,光电池自身输出电压存在 ± 0.32 V 波动,而激光光电电池供电电路输出电压波动仅为 ± 0.035 V。同时,光电池自身给电光调制电路供电时,LD 输出光功率随供能激光器驱动电流增加约为 18 μ W/A,而供电电路供电下输出光功率稳定在 113 μ W $\pm 2\%$ 。由此看出,在供能激光器输出光功率不稳定时,采用设计的激光光电电池供电电路能够保证 LD 输

出光功率较为稳定。为了测试激光光电电池供电电路持续供电的情况,在 48 h 连续工作条件下对供电电路输出电压以及 LD 输出光功率的变化进行测试,结果如图 6(a) 所示。由图 6(a) 可知供电电路驱动 LD 持续工作 48 h 中,输出电压波动为 ± 0.035 V,LD 输出光功率波动为 ± 2 μ W。

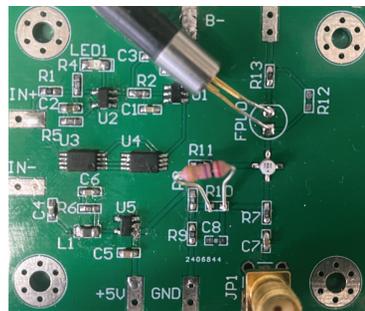


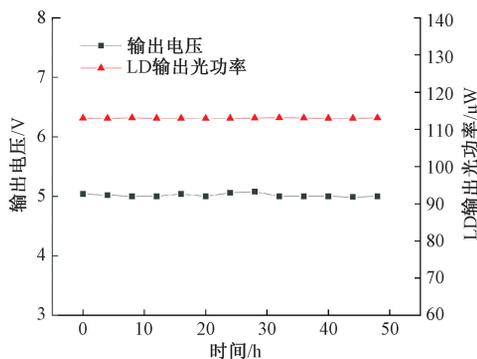
图 5 脉冲电场传感器电路实物图

Fig. 5 The photograph of pulse electric field sensor circuit

进一步测试了供电电路电压纹波,结果图 6(b) 所示,从图中可以看出电压纹波的峰值 U_{pp} 为 56 mV,有效值为 $U_{pp}/3.464 = 16.165$ mV。在不考虑电容的等效串联电阻时,根据输出电压的纹波系数 $r = \Delta U_{OUT}/U_{OUT} = D/(R_{LOAD} \cdot C_{OUT})$, (占空比 $D = 0.14$,等效负载电阻 $R_{LOAD} \approx 130$ Ω ,滤波电容 $C_{OUT} = 22$ μ F),计算得出电压纹波系数为 0.3%。

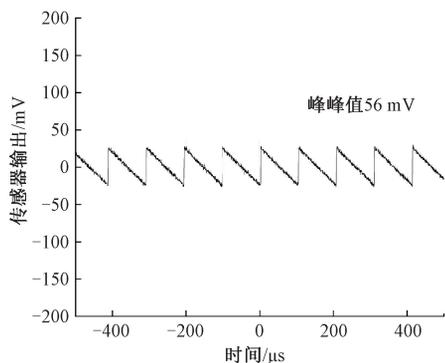
2 传感器制作与性能测试

设计单极子天线的长度 h 为 10 mm,直径 a 为 1 mm 时,根据式(3)、(4)可计算出单极子天线的等效电阻 R_{ant} 近似为 5.99 Ω , C_{ant} 等效电容近似为 10.64 pF。集成运放的 -3 dB 带宽为 1050 MHz,输入电阻高达 500 G Ω ,输入电容为 1.3 pF,根据式(7)、(9)可以计算得出传感器频率响应为 39.8 Hz~1 050 MHz。如图 7 所示,考虑传感器的体积和外型对电场的影响,金属屏蔽壳用 1 mm 厚的铝合金腔体,外型尺寸为 100 mm \times 71 mm \times 25.5 mm。单极子天线穿过屏蔽壳顶部半径为 2.5 mm 的孔,并通过



(a) 传感器持续工作48 h测试

(a) The continuous working time of the sensor is 48 hours



(b) 供电电路输出电压纹波

(b) Output voltage ripple of the power supply circuit

图 6 供电电路输出电压测试

Fig. 6 Output voltage test of the power supply circuit

SMA 接口与 PCB 电路相连。将 PCB 电路固定在金属屏蔽壳中,屏蔽壳与电路共地,可以防止电磁环境对 PCB 电路的干扰。供能激光器输出光通过 980 nm 多模光纤输入光电池转换成电能,作为供电电路的输入。LD 输出光信号即为传感器的输出信号。传感器输出光通过 1 550 nm 单模光纤传输到光电探测器,将光信号转化为电信号。光电探测器输出的电信号连接示波器观察。

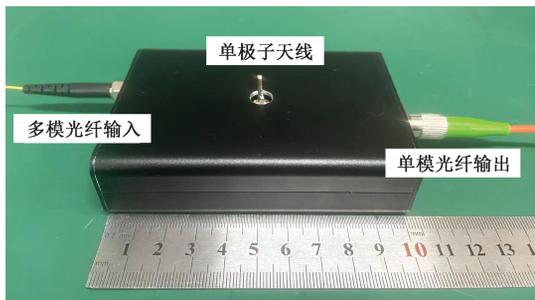
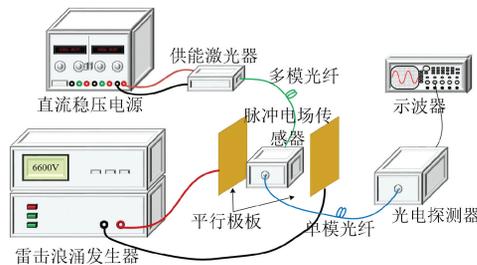


图 7 封装后的传感器实物图

Fig. 7 The photograph of the packaged sensor

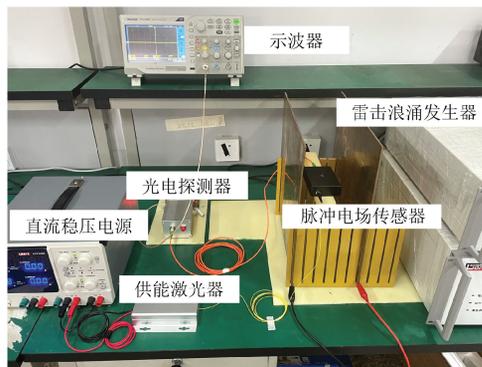
3 脉冲电场测量实验

如图 8 所示搭建了脉冲电场测量实验系统,对研制的基于激光光电池供电的脉冲电场传感器的性能进行了测试。雷击浪涌发生器 (LSG-506 CB) 可提供 1.2/50 μ s 脉冲电压,电压峰值范围在 100~6 600 V 之间。将雷击浪涌发生器输出通过铜线连接到两块平行极板上,极板长 35 cm,宽 35 cm,极板间距 14.5 cm。通过调节雷击浪涌发生器可输出不同峰值的脉冲电压,电压步长为 100 V,从最小可供电电压 100 V 逐渐递增至 6 600 V 时,对应在两极板间产生电场 0.690~45.517 kV/m ($E=U/d$, U 为两平行电极板间的电压, d 为两平行极板间的距离)。传感器的输出光信号连接到带宽为 200 MHz 的光电探测器进行光电转换,并将电信号输入带宽为 200 MHz、采样率为 2.0 GS/s 的示波器中观察脉冲电场的时域波形。



(a) 测量系统框图

(a) Block diagram of the measurement system



(b) 测量实物图

(b) Measurement photo

图 8 脉冲电场测量系统

Fig. 8 Pulse electric field measurement system

图 9 为雷击浪涌发生器输出为 1 000 V 时的开路电压波形,符合 IEC61000-4-5、GB/T17 626.5、ANSI (IEEE) C62.41 标准,电压波前时间 T_f 为 1.2 μ s,半峰值时间 T_h 为 45 μ s。

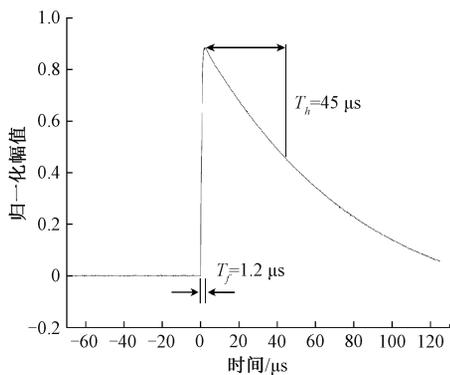


图 9 1 000 V 脉冲电压波形

Fig. 9 Pulse voltage waveform of 1 000 V

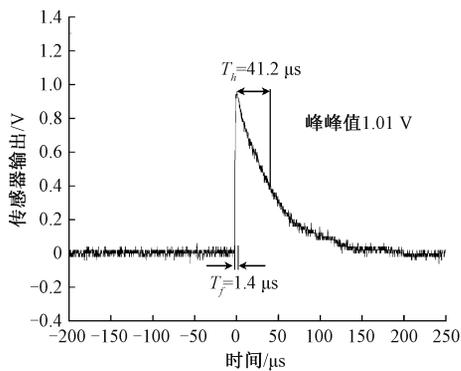
图 10 (a) 为平行极板间 6.897 kV/m 脉冲电场时传感器探测到的电场波形, 从图中可以看出传感系统输出信号峰值为 1010 mV, T_f 为 1.4 μ s, T_h 为 41.2 μ s。将传感器测量到的脉冲电场时域波形的 T_f 和 T_h 与雷击浪涌发生器开路电压波形的 T_f 和 T_h 进行对比得出, 在雷击浪涌发生器输出电压波形 $T_f \pm 30\%$, $T_h \pm 20\%$ 误差范围内, 传感器可以准确测量到脉冲电场的时域波形。如图 10 (b) 所示, 当两极板间产生电场为 14.482 kV/m 时, 传感器的输出波形顶部开始失真, 因此可以认为脉冲电场峰值 13.790 kV/m 为最大可测电场。

调节雷击浪涌发生器的输出电压在两平行极板间产生 0.690 ~ 45.517 kV/m 的脉冲电场, 步长为 0.690 kV/m, 对传感器的动态范围进行测试。如图 11 所示为传感器的输入输出特性曲线, 采用线性拟合 $y = 119.612x + 59.193$, 得出线性相关系数为 0.996 79。图 12 为传感器在不加电场下的噪声电压, 在不考虑光电探测器和示波器自身产生的噪声时, 噪声为 40 mV, 由此可得当信号幅度高于噪声 6 dB 时, 传感器输出电压为 80 mV, 代入拟合曲线计算得到传感器最小可测电场 E_{\min} 为 0.256 kV/m。

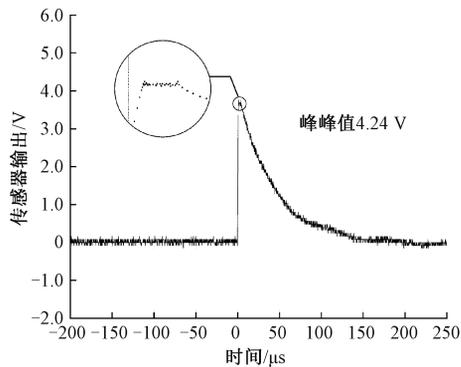
进一步根据图 11 得出传感器系统的输入输出特性曲线, 将传感系统的输出电压值代入特性曲线, 可求出各电压值对应的脉冲电场峰值。根据式 (13) 给出的均方根误差 σ 计算得出测量结果的均方根误差。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_{M,i} - E_{T,i})^2} \quad (13)$$

式中: $i=1, 2, \dots, n$ 为测试数据的次数, $E_{M,i}$ 为脉冲电场测量值, $E_{T,i}$ 为脉冲电场的真实值。将 $n=20$ 以及各脉冲电场的测量值和真实值代入式 (13) 中, 计算得出均方根误差 $\sigma=33.536\%$ 。分析误差产生的主要原因是在均方根误差计算中采用雷击浪涌发生器输出电压除以两极板间的距离计算得出的电场值为真值, 而发生器输出的电压存在 $\pm 10\%$ 的误差。另外传感系统的噪声也会影响



(a) 6.897 kV/m 时传感器输出波形
(a) Sensor output waveform at 6.897 kV/m



(b) 14.482 kV/m 时传感器输出波形
(b) Sensor output waveform at 14.482 kV/m

图 10 不同脉冲电场下传感器的输出波形
Fig. 10 Output waveforms of the sensor under different pulse electric fields

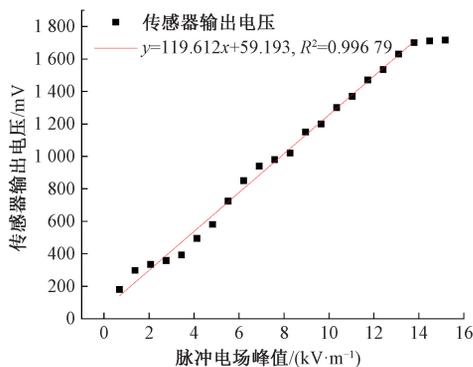


图 11 传感器的输入输出特性曲线

Fig. 11 Input output characteristic curves of the sensor

电场测量值。未来需要进一步减小传感系统的噪声, 改善系统的线性特性。

4 结 论

本文研制了一种电光调制式脉冲电场传感器, 解决了现有的电光调制式电场传感器在电场测量过程中不能

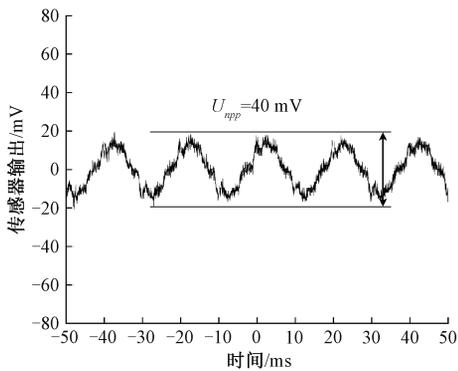


图 12 电场传感器噪声波形

Fig. 12 Noise waveform of electric field sensor

长时间持续工作的问题。基于激光光电池供电技术,光电池将供能激光器提供的光能转换成电能,经过激光光电池供电电路为电光调制电路和调制激光器稳定供电,使传感器具有持续工作的能力。传感器的输入输出端均采用光纤为传输介质,具备良好的抗电磁干扰能力。研制的供电电路能够使传感器在 48 h 内持续稳定的工作,输出电压精度和纹波系数仅为 1.04 % 和 0.3 %。搭建纳秒级脉冲实验平台,对研制的传感器进行了雷电脉冲实验,实验测试表明传感器能不失真地探测到雷电脉冲电场的时域波形,得到脉冲电压波形的波前时间 $T_f = 1.4 \mu\text{s}$,半峰值时间 $T_h = 41.2 \mu\text{s}$,与原始电压波形相吻合。传感器最大可测电场为 13.790 kV/m,最小可测电场为 0.256 kV/m。该传感器具有结构简单、体积小、抗电磁干扰性好以及不间断持续工作等优点。在后续的工作中将对提升传感器的时域线性动态范围进一步的研究。

参考文献

- [1] 同红海,褚恩义,周密,等. 高空核电磁脉冲对爆炸箔起爆器安全性的影响[J]. 装备环境工程, 2019, 16(9): 40-43.
TONG H H, CHU EN Y, ZHOU M, et al. Effects of HEMP on safety of exploding foil initiator [J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16 (9): 40-43.
- [2] 崔明,魏明,陈翔,等. 静电放电电磁脉冲激励下材料屏蔽效能研究[J]. 微波学报, 2014, 30(5): 27-34.
CUI M, WEI M, CHEN X, et al. Research on shielding effectiveness of materials against electrostatic discharge electromagnetic pulse [J]. Journal of Microwaves, 2014, 30(5): 27-34.
- [3] YANG B, ZHANG Q, JIANG Z D. Aperture coupling analysis on shielding enclosure excited by lightning electromagnetic pulse [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2015, 48(4):

- 399-408.
- [4] WU H T, JIAO C Q, CUI X, et al. Transient electromagnetic disturbance induced on the ports of intelligent component of electronic instrument transformer due to switching operations in 500 kV GIS substations [J]. IEEE Access, 2017, 5: 5104-5112.
- [5] NAVARATHNA S, UDAYAKUMAR K. Reliability indices evaluation of LV distribution system and inclusion of protective devices for reliability improvement [J]. Instrumentation, 2021, 8(2): 49-55.
- [6] 严雪飞,朱长青,王佳. 瞬态脉冲电场传感器研发现状与展望 [J]. 核电子学与探测技术, 2019, 39(3): 356-362.
YAN X F, ZHU CH Q, WANG J. Research and development of transient pulsed electric field sensor [J]. Nuclear Electronics and Detection Technology, 2019, 39(3): 356-362.
- [7] 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, et al. Electric field and magnetic field measuring system for EMP measurement based on fiber technology [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1): 339-345.
- [8] 杨杜兵,张家洪,陈福深,等. 铌酸锂集成 MZI 型光波导大电流传感器 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(11): 87-95.
YANG D B, ZHANG J H, CHEN F SH, et al. Lithium niobate integrated MZI optical waveguide high current sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(11): 87-95.
- [9] 张元英,张家洪,李英娜,等. 保偏光纤耦合性铌酸锂晶体高频强电场传感器 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(6): 271-277.
ZHANG Y Y, ZHANG J H, LI Y N, et al. Polarization-maintaining fiber coupling type LiNbO₃ intensive power frequency electric field sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(6): 271-277.
- [10] FEDOROV V M, OSTASHEV V Y, TARAKANOV V P, et al. High power radiators and E-Field sensors for sub-nanosecond electromagnetic pulses [J]. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2015, 1127-1132.
- [11] 张晓明,孟萃,魏明,等. 宽频带电磁脉冲电场传感器的研制与测试 [J]. 核技术, 2011, 34(4): 299-303.
ZHANG X M, MENG C, WEI M, et al. Development of a wideband transient electric field sensor [J]. Nuclear Techniques, 2011, 34(4): 299-303.
- [12] 欧阳宏志,姚学玲,陈景亮. 同时测量脉冲电场和磁场

- 的微型探头[J]. 高电压技术,2020,46(12):292-299.
- OUYANG H ZH, YAO X L, CHEN J L. Miniature probe for simultaneously measuring pulsed electromagnetic fields[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(12): 292-299.
- [13] ZHAO M, ZHOU X, CHEN Y Z. A highly sensitive and miniature optical fiber sensor for electromagnetic pulse fields[J]. Sensors, 2021, 21(23): 8137-8150.
- [14] 李巍, 吴凌远, 王伟平, 等. 半导体激光无线传能中光伏电池转换效率[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(11): 170-176.
- LI W, WU L Y, WANG W P, et al. Power conversion efficiency of photovoltaic cells in semiconductor laser wireless power transmission[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30(11): 170-176.
- [15] 严雪飞, 朱长青, 石科仁, 等. 脉冲电场测试中的激光供电技术[J]. 发光学报, 2019, 40(2): 264-271.
- YAN X F, ZHU CH Q, SHI K R, et al. Laser power supply technology in pulse electric field test[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2019, 40(2): 264-271.
- [16] 刘卫东, 刘尚合, 魏明, 等. 光纤传输式瞬态脉冲电场传感器分析与设计[J]. 微波学报, 2011, 27(1): 78-82.
- LIU W D, LIU SH H, WEI M, et al. Characteristics analysis and design of fiber-optical E-field sensor for transient electro magnetic field measurement[J]. Journal of Microwaves, 2011, 27(1): 78-82.
- [17] 王超, 董秀成, 张岷涛, 等. 基于 FPGA 的电磁脉冲电场测量系统[J]. 强激光与粒子束, 2015, 12: 262-267.
- WANG CH, DONG X CH, ZHANG M T, et al. Development of electromagnetic pulse measurement system based on FPGA[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 12: 262-267.
- [18] 王阳阳, 毕军建, 陈翔, 等. 有源电光调制式高功率瞬态电场传感器的研制[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(4): 1152-1154.
- WANG Y Y, BI J J, CHEN X, et al. Development of sensor for high power transient electric field based on active electro-optical modulation [J]. Computer Measurement and Control, 2012, 20(4): 1152-1154.
- [19] KONG X, XING W Q, XIE Y Z, et al. A broadband optical fiber transmission-based time domain measurement system for nanosecond-level transient electric field [J]. Review of Scientific Instruments, 2022, 93(1): 014701.
- [20] 谭超. 基于电容等效阻抗高频特性的滤波方法研究[J]. 现代信息科技, 2021, 5(14): 62-76.
- TAN CH. Research on filtering method based on high frequency characteristics of capacitor equivalent impedance[J]. Modern Information Technology, 2021, 5(14): 62-76.
- [21] 叶敏杰, 张玉龙, 吴次南, 等. 面向未来移动通信的可调谐双频 PIFA 天线[J]. 传感技术学报, 2019, 32(3): 328-331.
- YE M J, ZHANG Y L, WU C N, et al. Tunable dual-band planar inverted-f antenna for future mobile communication [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019, 32(3): 328-331.

作者简介



李钦凯, 2018 年与齐鲁工业大学获得工学学士学位, 现为昆明理工大学硕士研究生, 主要研究方向为脉冲电场传感器。

E-mail: 1157872443@qq.com

Li Qinkai received his B. Sc. degree in 2018 from Qilu University of Technology. Now he is a M. Sc. candidate at Kunming University of Science and Technology. His main research interest includes pulsed electric field sensor.



张家洪(通信作者), 2010 年于云南师范大学物理系获得理学学士学位, 2016 年于电子科技大学获得光学工程博士学位, 现为昆明理工大学信息工程与自动化学院副教授, 主要研究方向为集成光波导电磁场传感器、微波光子等。

E-mail: zjh_mit@163.com

Zhang Jiahong (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2010 from Department of Physics, Yunnan Normal University, received his Ph. D. degree in optical engineering in 2016 from University of Electronic Science and Technology of China. Now he is an associate professor in Kunming University of Science. His main research interests include integrated optical waveguide electromagnetic field sensor, and microwave photonic technology.