

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107858

同时测量脉冲磁场和电场的仿真研究*

宋海声 李兴华 王萱轩 刘涛 王珂 杨程凯

(西北师范大学物理与电子工程学院 兰州 730070)

摘要: 针对脉冲电磁场的时间短、稳定性差,分别测量电场和磁场会造成准确率降低的问题,设计了一个同时测量脉冲磁场和电场的方案。首先利用理论知识对电场和磁场的关系进行推导,然后通过 CST2020 对半波对称天线进行建模,并且对天线的负载效应和尺寸效应做了仿真,来确定天线的外形。最后利用电荷灵敏放大电路对信号进行处理。仿真结果为半波对称天线的长度为 15 mm,负载电容为 1 pF 和负载电阻为 1 M Ω 是最佳长度。电荷灵敏放大电路对信号进行处理,脉冲电流信号范围为 0.1~10 μ A,电磁场的测量范围为线性误差在 0.822% 左右。仿真表明半波对称振子天线的外形参数以及电荷灵敏放大电路测试脉冲电磁场的波形能够满足要求。

关键词: 脉冲电磁场;半波对称振子天线;电荷灵敏放大电路;线性误差

中图分类号: TM937.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4

Study on simultaneous measurement of pulsed magnetic field and electric field

Song Haisheng Li Xinghua Wang Xuanxuan Liu Tao Wang Ke Yang Chengkai

(College of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In view of the short time and poor stability of pulsed electromagnetic field, measuring electric field and magnetic field respectively will reduce the accuracy. In this paper, a scheme for measuring pulsed magnetic field and electric field at the same time is designed. Firstly, the relationship between electric field and magnetic field is deduced by using theoretical knowledge, then the half wave symmetrical antenna is modeled by CST2020, and the load effect and size effect of the antenna are simulated to determine the shape of the antenna. Finally, the signal is processed by charge sensitive amplification circuit. The simulation results show that the length of half wave symmetrical antenna is 15 mm, the load capacitance is 1 pF and the load resistance is 1 M Ω , which is the best length. The charge sensitive amplification circuit processes the signal, the pulse current signal range is 0.1 μ A~10 μ A, the measurement range of electromagnetic field is linear, and the error is about 0.822%. The simulation results show that the shape parameters of half wave symmetrical dipole antenna and the waveform of pulsed electromagnetic field measured by charge sensitive amplification circuit can meet the requirements.

Keywords: pulsed electromagnetic field; half wave symmetric dipole antenna; charge sensitive amplifier circuit; linear error

0 引 言

脉冲电磁场的特点是一个低频、高场强的窄脉冲场。在电网中,雷电天气是不可避免,通过有效地测量雷电天气的脉冲波形进行防护^[1-2];在焊接方面,脉冲电磁焊接技术非常受欢迎^[3];在医学方面,利用电磁场驱动胶囊机器人来检查身体^[4];在军事方面,电磁炮的电源部分就是测量和控制脉冲电磁场^[5]。所以测量脉冲电磁场技术在电力系统、通信领域、自动控制越来越重要。

文献[6]提出基于光电效应的光纤传感器测量电磁场,一般分为有源电光调制法和无源电光调制法。有源电光调制法中探头含有电源会造成很大的电磁干扰;无源电光调制法的光路不易控制,易受干扰,系统稳定性较差。文献[7]指出电场和磁场分开测量,但是由于脉冲电磁场的重复性差,不适合反复测量,会使准确性降低。文献[8]指出同时测量电场和磁场的方法,就是把测量电场的仪器和测量电磁的仪器安装到一块测量,它的缺点是不仅体积大,而且还会产生较大的电磁干扰。文献[9]研究了三维电场

收稿日期:2021-09-13

* 基金项目:国家自然科学基金(11747030)、甘肃省科技计划(20JR10RA080)项目资助

传感器,它的不足之处是体积大,容易导致电场产生较大的畸变。

为了能够同时测量电场和磁场的目的,本文介绍了一种同时测量电场和磁场的方法。首先利用理论知识推导出电场和磁场的关系,通过 CST 微波工作室 2020 仿真出对称振子天线模型作为传感器以及确定其参数,最后电荷灵敏放大电路对其信号的放大和整形。利用本方法可以解决分别测量电场和磁场的不准确性。而且电路结构简单,并且能达到预期的设想。

1 对称振子天线的分析

1.1 电场与磁场的关系

本文为半波对称振子天线,由文献[10]可知:

$$E_0 = j \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{I_0 e^{jkr}}{2\pi R} \left[\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right)}{\sin\theta} \right] \quad (1)$$

$$E_\varphi = j \frac{e^{jkr} I_0}{2\pi R} \left[\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right)}{\sin\theta} \right] \quad (2)$$

式(1)、(2)中得出电场和磁场幅度之比为本征阻抗,如式(3)所示。

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (3)$$

在自由空间中 $\eta = \eta_0 = 120\pi \approx 377 \Omega$ 。所以已知天线的电场和磁场其中一个值,即可求解另外的一个值。

1.2 对称振子天线的等效电路图

如图1所示,一个长度为 $2l$ 的对称振子天线,远区的电磁波可看作均匀平面波,来波方向与振子夹角为 θ ,电基本振子远场区的电场、磁场与波传播方向三者相互垂直,在天线导体上激发起的感应电动势,如式(4)所示。

$$e = 2El = 2El \sin\theta \quad (4)$$

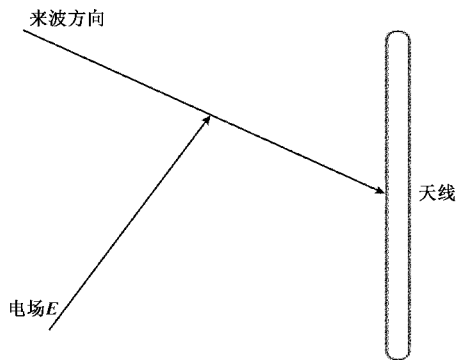


图1 入射电场方向图

对称振子天线的输入阻抗由文献[11]可知:

$$Z_{in} = \frac{R_r}{\sin^2(\beta l)} - jZ_0 \cot(\beta l) \quad (5)$$

如图2所示为天线的等效电路图^[12-13]。

输出电压如式(6)所示。

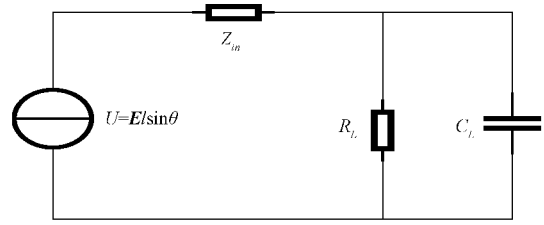


图2 等效电路图

$$U_L(f) = \frac{(R_L // C_L)}{R_a + X_a + (R_L // C_L)} El \sin\theta \quad (6)$$

式中: R_a 为输入阻抗的电阻值, X_a 为输入阻抗的电容值, R_L 为负载电阻, C_L 为负载电容。

因为负载电阻远远大于负载电容,所以当负载电阻与负载电容并联时,近似等于负载电容,如式(7)所示。

$$U_L(f) = \frac{X_L}{R_a + X_a + X_L} El \sin\theta \quad (7)$$

式中: X_L ($X_L = R_L // C_L$) 为负载阻抗。

通过推倒可知,输出增益为式(8):

$$G = \frac{X_L}{\sqrt{(R_a)^2 + (X_A)^2}} \quad (8)$$

其中, X_L 为负载电容的容抗值, R_a 为天线的输入电阻, $X_A = X_a + X_L$ 。

由于 $(R_a)^2 \ll (X_A)^2$, 输出增益可化简为式(9):

$$G = \frac{X_L}{X_A} \quad (9)$$

式(9)中得出负载端的电压与电场成正比关系。

2 天线的建模和仿真

在 CST 微波工作室 2020 里,对天线建模与仿真。主要是从天线的尺寸、负载电阻和负载电容对天线输出性能的影响^[14-15]。如图3所示,本文所设计的天线为半波对称振子天线,天线的半径为 1 mm,天线的长度为 15 mm,材料为纯铜,底座的形状为 16 mm×16 mm×2 mm 的长方体,材料为 FR-4 环氧玻璃纤维板。平面激励源选择矩形脉冲,它的脉宽为 13 ns,上升时间和下降时间都为 0.5 ns,持续时间为 14 ns。时间范围为 20 ns,频率设置为 0~1 GHz。

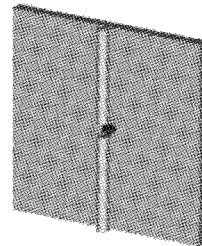


图3 天线建模图

2.1 电磁场的分布

通过 CST 微波工作室 2020 仿真,电场和磁场的分布如图4(a)、(b)所示。天线的电场和磁场的强度分布基本均匀。

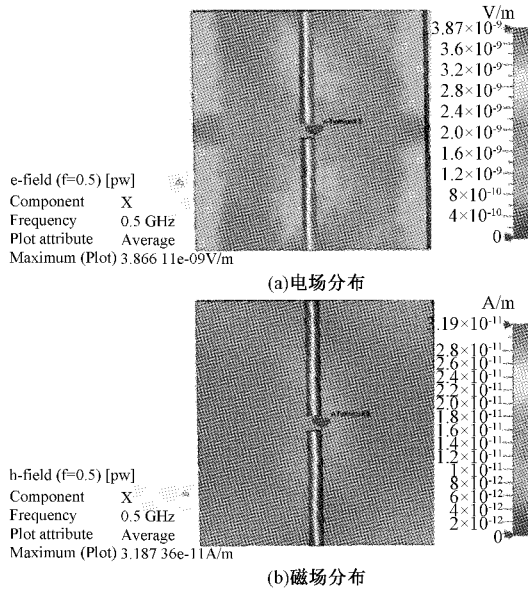


图 4 电场和磁场分布

2.2 负载电容对天线的影

本文设置的负载电阻和负载电容为并联,观察负载电容的变化对端电压的影响,如图 5 所示。保持 $R_L = 1\text{ M}\Omega$ 不变, C_L 分别取 0.1、1、10、100 pF 4 个值,4 个波形基本相等。由式(8)可知,负载电容仅影响输出信号的比例关系。通过适中考虑,负载电容选择 1 pF。

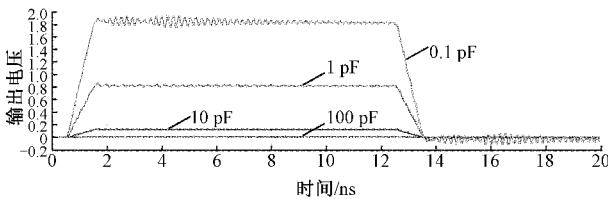


图 5 不同负载电容对于端口电压的影响

2.3 负载电阻对天线的影

保持 $C_L = 1\text{ pF}$ 不变, R_L 分别取 10 k Ω 、100 k Ω 、1 M Ω 、10 M Ω 4 个值,如图 6 所示,负载电阻对输出的波形影响很大,影响矩形波的顶部降落。电阻越小,顶部降落越大,意味着天线的低频特性越差,当负载电阻大于 1 M Ω ,对端电压的影响基本没有变化,所以选择电阻值为 $R_L = 1\text{ M}\Omega$ 。

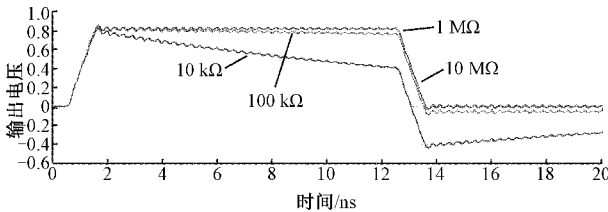


图 6 不同电阻对负载端电压的影响

2.4 不同天线长度对天线的影

当天线的长度为无线电信号波长的 1/4 时,天线的发射和接受转换效率最高。天线的长度由波长来决定。频率

与波长的换算公式为: $\lambda f = 3 \times 10^8\text{ m/s}$ 。本文设置的频率为 0.5 GHz,算出的波长 $\lambda (\lambda = 0.06\text{ m})$ 。根据设置的频率算出天线的长度: $l (l = 0.06 \times 0.25 = 0.015\text{ m})$ 。与如下仿真对比,理论计算与仿真效果基本相同。

保持 $R_L = 10^6\ \Omega$ 和 $C_L = 1\text{ pF}$ 不变,改变的长度为 10、15、20 mm,内径不变,如图 7 所示,端电压与天线长度大小近似为是正比例关系,长度越小,高频振荡越小。通过适中考虑,天线选择的长度为 15 mm。

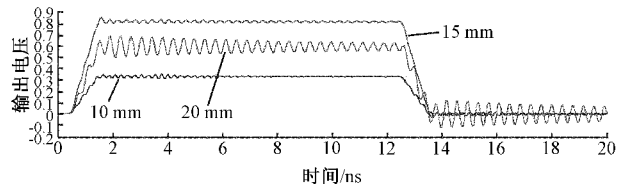


图 7 不同长度对负载端电压的输出

通过建模与仿真得出结论:天线传感器的低频特性由 R_L 决定, R_L 数值越小,低频特性越差;天线传感器的高频特性由天线的长度决定,天线长度越大,高频振荡越小。

2.5 天线带宽的测试

图 8(a) 为 0~1 GHz 的幅频特性曲线,图 8(b) 为局部放大的幅频特性曲线。如图 8(b) 所示,端电压的带宽在 100 MHz 之前比较平滑,而在大约 100 MHz 之后域波形由很多波纹,波动比较大,随着频率的增加幅值在不断的减小。虽然本文设置的电荷灵敏前置放大电路的带宽较低,但是脉冲电磁场的频带都集中在中低频。

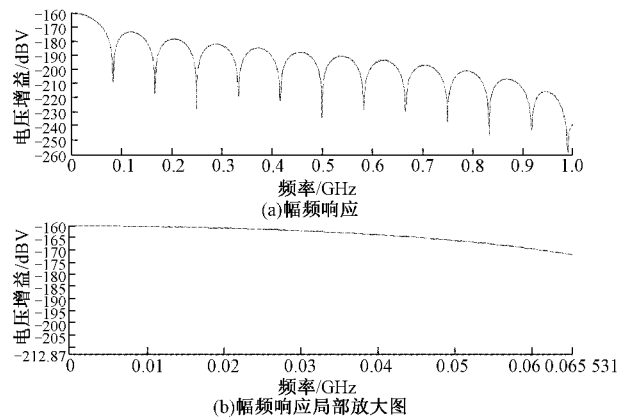


图 8 端电压的幅频特性曲线

3 电路的设计

上述所仿真的天线,把电磁场转换为电压信号,然后运用电荷灵敏前置放大电路分析电压信号。通过利用 NI Multisim 电路仿真软件中对所设计的电路进行仿真。

3.1 电荷灵敏放大器的介绍

在核电子学中,当离子撞击时,产生的是脉冲信号。而核电子学中使用电荷灵敏放大器,电流灵敏放大器和电压灵敏放大器来处理脉冲信号。通过对表 1 比较,本文选用电荷灵敏放大器。

表1 放大器种类比较

放大器种类	特点
电压灵敏放大器	电压幅度稳定性低,电路简单,噪声比电荷灵敏放大器大。 $(V_{OM} = \frac{Q}{C_i})$
电荷灵敏放大器	电压幅度稳定性较好,增益高,噪声低,性能优良。 $(V_{OM} = \frac{Q}{C_f})$
电流灵敏放大器	电流信号非常快,输入电流信号被积分成宽度较大的电压信号,堆积效应会使放大器过载,其放大器的反馈电阻较小,所以产生噪声线宽比电荷灵敏放大器宽。 $(i_{OM} = Ai_{in})$

电荷灵敏放大器的输出增益稳定、噪声低、性能优良^[16]。如图9所示为电荷灵敏放大器,它的前提条件是 $A_o C_f \gg C_i$ 。它的输出脉冲的幅度为^[17]:

$$V_{OH} = V_{IM} A_o = \frac{Q A_o}{C_i + (1 + A) C_f} \approx \frac{Q}{C_f} = \frac{C V}{C_f} \quad (10)$$

式中: V_{IM} 为输入电压的幅度, A_o 为运算放大器的开环增益, C_i 为输入电容, C_f 为回馈电容, Q 为传感器上产生的总电荷量。

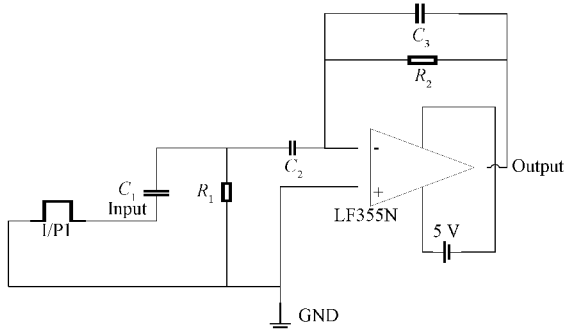


图9 电荷灵敏前置放大电路

式(10)中前置放大器的增益仅仅由 Q 和 C_f 决定。在原理图中,设置的 C 为60 pF, C_f 为2 pF。通过式(10)的计算,输入电压与输出电压的放大倍数在30倍。

电荷灵敏放大器中的反馈电容和负载电阻对电路的上升时间的影响,如表2和3所示,随着电容值的增加,上升时间越来越短;随着电阻值的增加,上升时间越来越长。但是电容值的增加会导致增益减小。所以根据适中原则选择电容为2 pF,电阻为10 MΩ。

表2 不同电容值对上升时间的影响

电容值/pF	上升时间/ μs
1.0	2.628
1.5	2.131
2.0	1.634
2.5	1.491

表3 不同电阻值对上升时间的影响

电阻值/MΩ	上升时间/ μs
5	1.562
10	1.634
15	1.847
20	3.267

3.2 电荷灵敏放大器的线性误差

如图10所示,使用电流脉冲波对其激励,脉冲电流信号范围为0.1~10 μA ,随着不同的输入电压对输出电压呈线性关系,并且放大倍数为27.494倍,与理论值为30倍相近。如表4所示,输入曲线和输出曲线呈线性关系,在0.5 mV以上线性度要优于0.5 mV以下,并且误差在0.822%之内。如表5所示,与文献[18]的线性误差在1%之内相比,本文线性误差在0.822%之内,线性误差得到了减小。

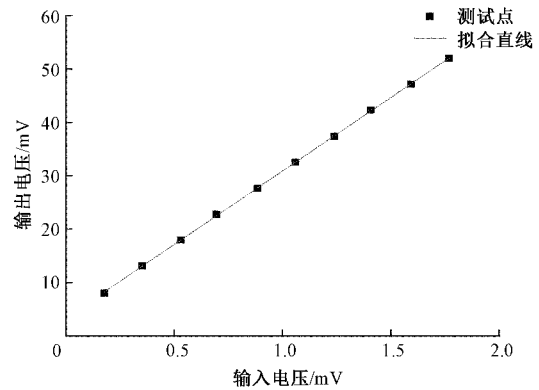


图10 电荷灵敏放大器的线性放大

表4 线性误差

输入信号/mV	输出信号/mV	拟合值/mV	误差/%
0.176	8.150	8.217	0.822
0.352	13.121	13.207	0.655
0.531	17.962	17.978	0.089
0.695	22.776	22.798	0.057
0.885	27.625	27.710	0.307
1.060	32.522	32.530	0.024
1.240	37.368	37.471	0.276
1.408	42.289	42.090	0.471
1.594	47.135	47.204	0.146
1.770	51.960	52.043	0.160

表5 对比

对比	本文	文献[18]
线性误差/%	0.822	1.000

3.3 仿真结果

在式(3)中可知,在自由空间中电场为磁场的 120π 倍(大约在 377 倍),通过电压放大电路,使其放大 120π 倍。如图 11 所示,设置电流脉冲为 $0.5 \mu\text{A}$,为电场和磁场的波形,电场的上升时间为 $1.634 \mu\text{s}$,磁场上升时间为 $1.657 \mu\text{s}$,输入电压为 0.885 mV ,磁场输出电压为 $72.296 \mu\text{V}$,电场输出电压为 27.625 mV ,线性误差为 0.307% 。

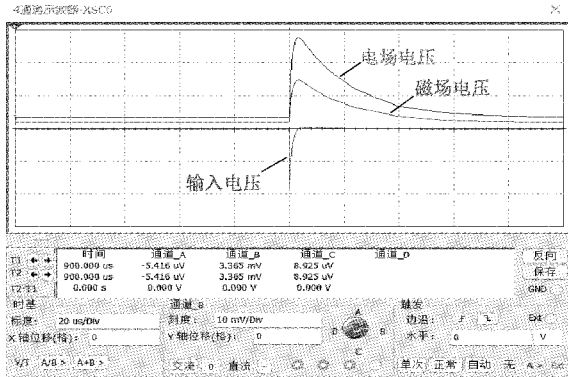


图 11 电场和磁场波形

4 结 论

本文仿真了半波对称天线以及电荷灵敏放大电路测量电场和磁场,通过电荷灵敏放大电路,减小了线性误差,提高了准确性。首先通过 CST2020 对半波对称天线外形进行了分析,得到了合适的外形参数。其次为了线性误差减小,提高准确性,提出了通常在核电子学中运用电荷灵敏放大电路测量来测试脉冲电磁场。通过仿真研究,电荷灵敏放大电路也可以用在其他有关脉冲信号的领域。利用电流脉冲波激励,发现在脉冲电流波的范围在 $0.1 \sim 10 \mu\text{A}$ 的范围内,线性误差在 0.822% 之内,线性误差得到了优化。

参考文献

- [1] 黄军玲,高强. 27.5 kV 电缆金属护层雷击特性的建模与仿真[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(7): 210-217.
- [2] 杨楨,葛非,李鑫. 高压直流接地极对管道电磁阀的干扰影响研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(7): 81-88.
- [3] 李成祥,杜建,周言,等. 电磁脉冲板件焊接设备研制及镁/铝合金板焊接实验研究[J]. 电工技术学报, 2021, 36(10): 2018-2027.
- [4] 郭志明,梁亮,彭正乔. 胶囊机器人驱动磁场的建模与测量[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 216-223.
- [5] 李捷,罗红娥,顾金良. 脉冲功率源控制及在线电流检测技术研究[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(5): 73-77.

- [6] 程奇峰,倪建平,孟萃,等. 强脉冲电场技术研究[J]. 电子测试, 2008, 9(9): 6-11, 24.
- [7] KANDA M. Standard probes for electromagnetic field measurements[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2002, 41(10): 1349-1364.
- [8] HASSE R, HUNSICKER W, NAISHADHAM K, et al. Analysis and design of a partitioned circular loop antenna for omni-directional radiation [C]. IEEE International Symposium on Antennas & Propagation, IEEE, 2011: 1379-1382.
- [9] 徐远哲,高成,李炎新,等. 平行板三维脉冲电场传感器的研制[J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 81-83.
- [10] 王伟,石跃武,裴鑫,等. 快前沿脉冲磁场测量系统研制[J]. 高电压技术, 2020, 46(6): 2209-2218.
- [11] 刘建厂,张秀强. 对称振子阻抗特性分析[J]. 电波科学学报, 2013, 28(6): 1205-1211.
- [12] KONG X, XIE Y Z, LI Q, et al. Development of one-dimensional norm detector for nanosecond-level transient electric field measurement [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2017, 59(4): 1035-1040.
- [13] 严雪飞,朱长青. 三维脉冲电场传感器的建模仿真与设计[J]. 高电压技术, 2018, 44(1): 275-281.
- [14] 石立华,司荣仁,李炎新,等. 微型化光纤传输电磁脉冲传感器研究[J]. 电波科学学报, 2012, 27(6): 1152-1171.
- [15] 贾圣钰,赵争鸣,施博辰,等. 电力电子系统电磁干扰数值建模分析[J]. 电工技术学报, 2021, 36(11): 2383-2393, 2423.
- [16] VADAS J, VARINDERJIT S, VISSER G, et al. High-rate axial-field ionization chamber for particle identification of radioactive beams [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2016, 837(21): 28-33.
- [17] 安忙忙. 高能物理实验中低噪声顶层金属 CMOS 像素传感器设计[D]. 武汉: 华中师范大学, 2017.
- [18] 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): 4383-4390.

作者简介

宋海声,副教授,硕士生导师,主要研究方向为电路与系统、计算机测量与控制。

E-mail: 653526491@qq.com

李兴华(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为电路与系统。

E-mail: 1064640070@qq.com