光电器件

DOI: 10.16818/j.issn1001－5868.20250414005

平面型光导器件高压、高频响应测试链路研究

王日品，刘福印，王朗宁，姚金妹，易木俣，荀　涛*

（国防科技大学 前沿交叉学科学院，长沙 410073）

摘　要： 针对平面型SiC，GaN光导器件，设计了一种用于高压、高频响应测试链路。根据宽禁带半导体器件的不同特性阻抗，利用PSpice软件对测试链路进行电路仿真，同时利用CST软件在0.5～5 GHz频率下进行高频响应仿真，最后分别采用SiC和GaN光导器件测试了链路的高压导通能力和高频响应能力。实验结果表明：所设计的高压、高频响应测试链路具有耐高压、全固态、可快速拆卸的优势，能满足平面型SiC，GaN光导器件在0～30 kV偏置电压和DC～1 GHz工作频段下的光电导测试需求。该研究成果为宽禁带半导体光电导器件的耐高压工作能力和高频响应能力提供一定的设计参考和实验借鉴。

关键词： 高压、高频响应；测试链路；平面型宽禁带半导体；光导开关；SiC；GaN

中图分类号： TN707；TN385　**文章编号：** 1001－5868(2025)03－0396－07

Study on High-Voltage and High-Frequency Response Testing Link of Planar Wide Bandgap Semiconductor

WANG Ripin, LIU Fuyin, WANG Langning, YAO Jinmei, YI Muyu, XUN Tao

(College of Advanced Interdisciplinary Studies, Nationnal University of Defense Technology, Changsha 410073, CHN)

Abstract: A high-voltage and high-frequency test link has been designed for planar SiC and GaN photoconductive devices. Considering the differing characteristic impedances of wide-bandgap semiconductor devices, PSpice software was used to simulate the circuit design of the test link, while CST software was employed to simulate the high-frequency response within the 0.5～5 GHz range. The high-voltage conductivity and high-frequency response of the link were then tested using SiC and GaN photoconductive devices, respectively. Experimental results demonstrate that the proposed test link offers high voltage resistance, a fully solid-state design, and ease of disassembly. It meets the photoconductivity testing requirements of planar SiC and GaN photoconductive devices under bias voltage of 0～30 kV and within a DC～1 GHz operating frequency range. These findings provide valuable design and experimental references for evaluating the high-voltage tolerance and high-frequency response characteristics of wide-bandgap semiconductor photoconductive devices.

Key words: high-voltage and high-frequency response; test link; planar wide-bandgap semiconductor; photoconductive semiconductor switches; SiC; GaN

0　引言

宽禁带半导体材料具有禁带宽度大、击穿电场高、热稳定性好、高电子迁移率、高饱和漂移速度和高电子浓度等优势，被广泛应用于射频功率放大器、微波器件、雷达系统以及光电子、量子信息等领域[1-5]。近年来，平面型宽禁带半导体器件[6-12]凭借

收稿日期：2025－04－14.

基金项目：国家自然科学基金重点项目(62434010).

*通信作者：荀　涛

其体积小、重频高（兆赫兹级）、闭合时间短（亚纳秒级）、时间抖动小（亚纳秒级）、功率容量大、电磁兼容性好等优势，已成为研制新型射频功率放大器、微波光子辐射源及固态紧凑脉冲功率源的核心器件[13-24]。然而，随着应用需求不断提升，对平面型宽禁带半导体器件在高功率、高频率、长寿命等方面的综合性能要求日益严苛[25-27]。当前面临的关键挑战在于缺乏一种能够同时满足超高功率和超高频测试需求的链路方案。现有测试方法或受限于耐压能力不足，或受制于杂散参数过大导致的高频响应失真，难以准确表征器件在极端条件下的真实光电特性。此外，复杂的电路连接、欧姆接触问题以及低耐压能力也限制了传统测试链路在高压高频场景下的应用。

本文根据平面型 SiC，GaN 宽禁带半导体器件的结构属性，设计一种高压、高频响应测试链路。利用 PSpice 软件、CST 软件对测试链路进行电路仿真、场-路仿真、高频响应仿真，并分别基于单脉冲激光器、调制脉冲激光器进行高压、高频响应测试验证。实验结果表明：所设计的测试链路稳定可靠，可实现平面型宽禁带半导体器件 0～30 kV 下的高压测试，主频 0.5～1 GHz 以内的光电响应测试，且具有高耐压稳定、电路集成度高、杂散参数小等特点。该研究成果为平面型宽禁带半导体器件的光电特性研究提供一定的设计参考和实验借鉴。

1　测试链路及集成结构

测试链路电路图如图 1 所示，其中图中虚线框架部分为宽禁带半导体器件等效电路[28-29]，链路设计中 R 为 1 MΩ 限流电阻，电容 C 为 500 pF，电压源 V 为直流高压电源，宽禁带半导体器件可选用 SiC 或 GaN 等。

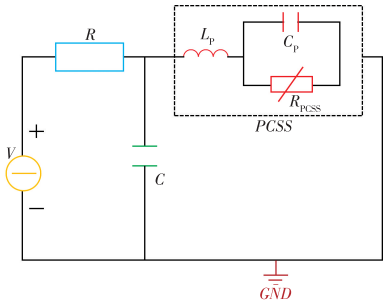


图 1　测试链路电路图

图 2 为测试链路集成结构图，主要由无感限流电阻、高压脉冲电容器、宽禁带半导体器件、高压高频输出端口、五维调整基座等组成。测试链路的基本原理是：高压直流电源通过限流电阻给高压脉冲电容器充电储存电能，与之同时给宽禁带半导体器件提供偏置电压，当激光能量辐照在宽禁带半导体器件上时，宽禁带半导体器件由截止状态变成导通状态，从而将直流信号转化为射频信号。

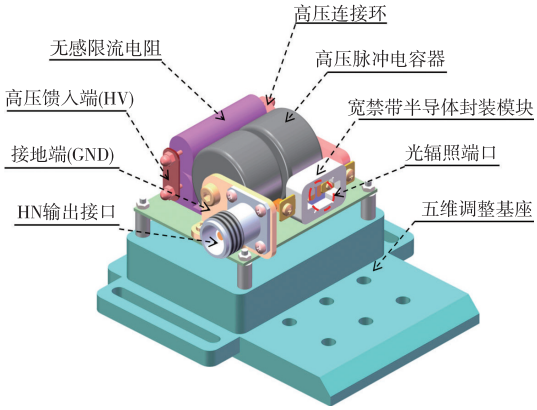


图 2　测试链路集成结构

2　测试链路场-路协同仿真

根据测试链路结构，基于宽禁带半导体器件特性，利用 Pspice、CST 软件建立电路模型，对测试链路进行场-路协同仿真，仿真原理图如图 3 所示。图中黄色方框为外部接口阶跃电压 10 kV，P1，P2 为电流探头，白色方框为测试链路模型（1 为馈入端，2 为输出端，宽禁带半导体设置为动态电导率：0～1 S/m），负载电阻为 50 Ω，电容器电容为 500 pF。

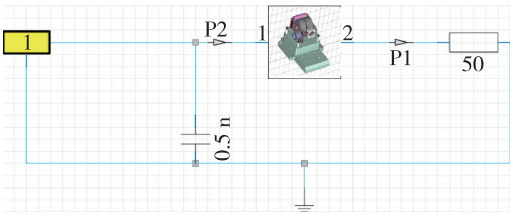


图 3　场-路仿真原理图

利用 CST 仿真软件对测试链路电路进行强场仿真，仿真中设置馈入电压为 10 kV，电极介电常数为 8，封装板介电常数为 3，传输介质为空气，仿真结果如图 4 所示。经过匀化设计后最大场强约为 1×10^5 V/m，从图中可以看出最大场强区域分布在电极处。

根据图 3 中场-路原理进行仿真，得到测试链路在 0.5，1，2，3，4 和 5 GHz 频率下的高频响应仿真结果如图 5 所示。

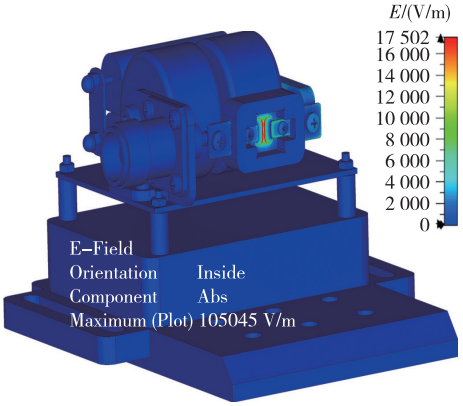
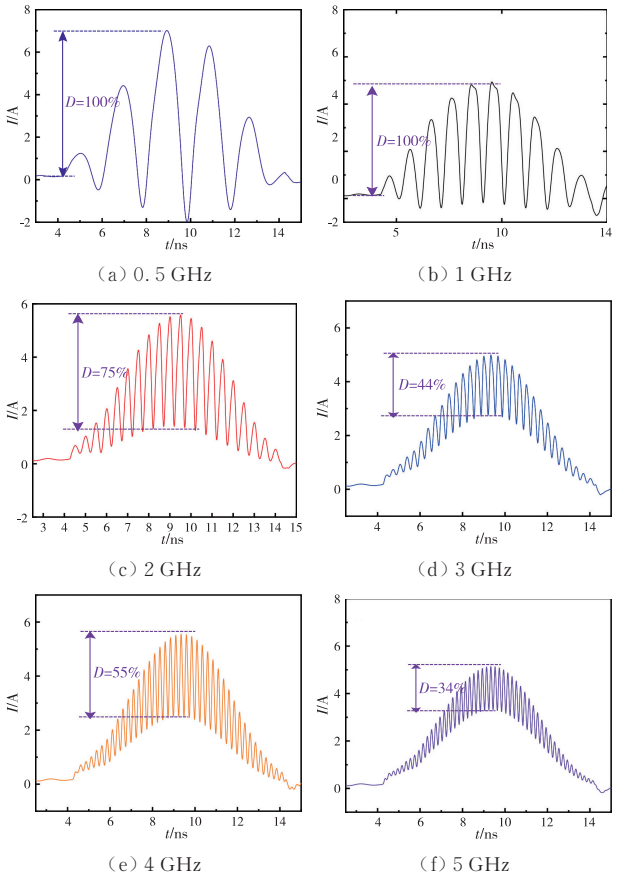


图4 静电场分布



(a) 0.5 GHz (b) 1 GHz (c) 2 GHz (d) 3 GHz (e) 4 GHz (f) 5 GHz

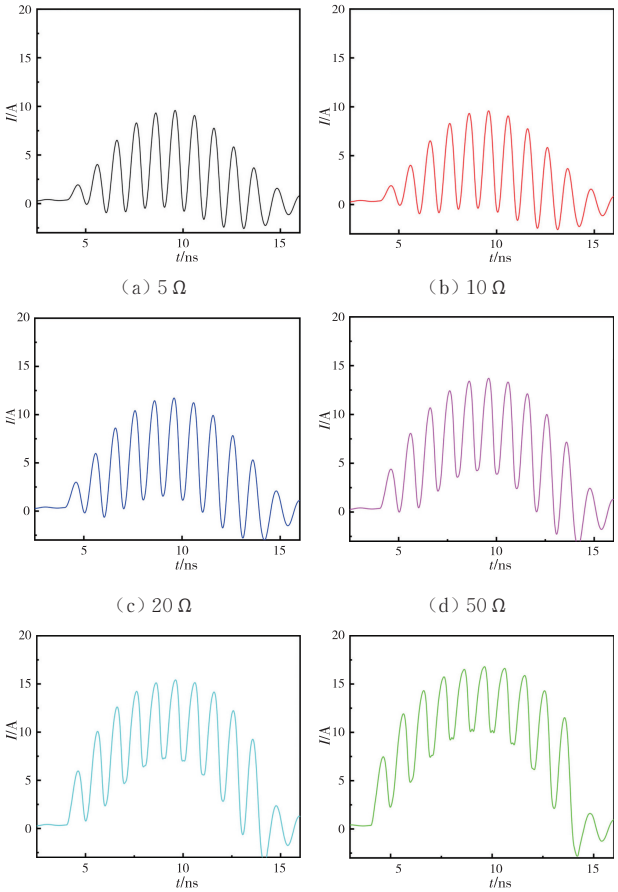
图5 高频响应仿真结果

根据仿真结果可以看出,本设计的链路测试系统在0.5~1 GHz频率下,高频响应较好,调制深度可以达到100%满调制,调制深度可定义为:

$$Modulation\ Depth = \frac{I_1 - I_2}{I_1} \quad (1)$$

式中,I_1为射频电流波峰的最大值,I_2为射频电流波谷的最大值。在2~5 GHz频率下,高频响应良好,调制深度可以达到34%~75%。

在不同能量辐照下,宽禁带半导体器件的电阻阻抗会发生变化。当固定1 GHz工作频率时,通过改变宽禁带半导体器件的电阻值,并依据图3中的仿真电路图,对测试链路进行仿真,得到高频响应仿真结果如图6所示。根据仿真结果可以看出,随着器件的阻抗逐渐变大即与电路阻抗不匹配时,响应逐渐变差。



(a) 5 Ω (b) 10 Ω (c) 20 Ω (d) 50 Ω (e) 100 Ω (f) 200 Ω

图6 阻抗变化时高频响应仿真结果

3 基于单脉冲激光器高压测试

基于脉宽为20 ns,光能量为毫焦耳量级,光波长为355 nm的单脉冲激光器,采用宽禁带半导体器件SiC和GaN分别对测试链路进行高压光电导测试,测试现场如图7所示。测试中,在未加光辐照下,测试链路静态耐压大于30 kV。在直流20 kV电压偏置下,施加光辐照后,得到典型电压输出波形如图8所示。根据实验结果可以看出,测试链路能够实现对宽禁带半导体器件在高压下的光电导测试,且波形干净、无振荡现象。

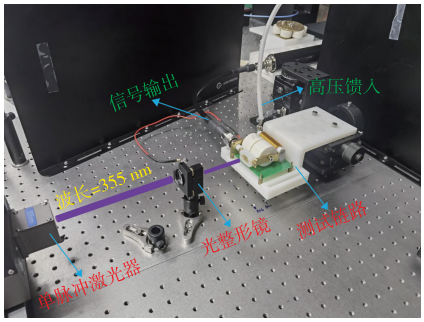


图 7　高压测试现场图

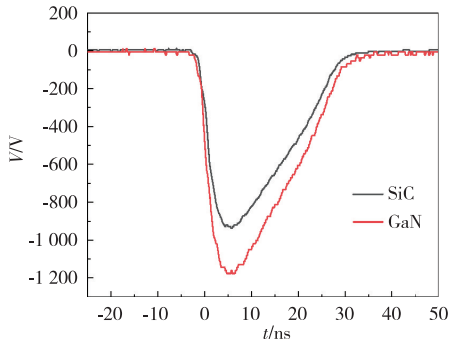


图 8　典型高压输出波形

4　基于调制脉冲激光器高频响应测试

基于调制脉冲激光器，采用 SiC，GaN 器件，分别对测试链路进行高频响应测试。测试链路中激励光波长为 355 nm，光能量为毫焦耳量级，直流高压偏置为 0.5 kV，光入射宽禁带半导体器件时对光束质量进行整形，测试现场如图 9 所示。

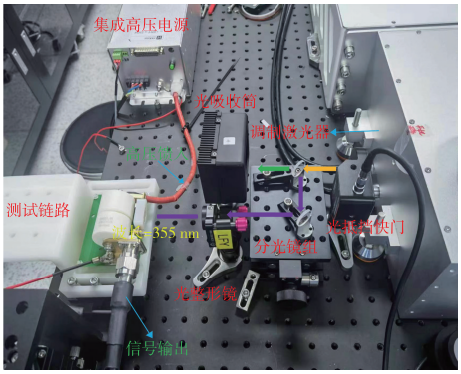
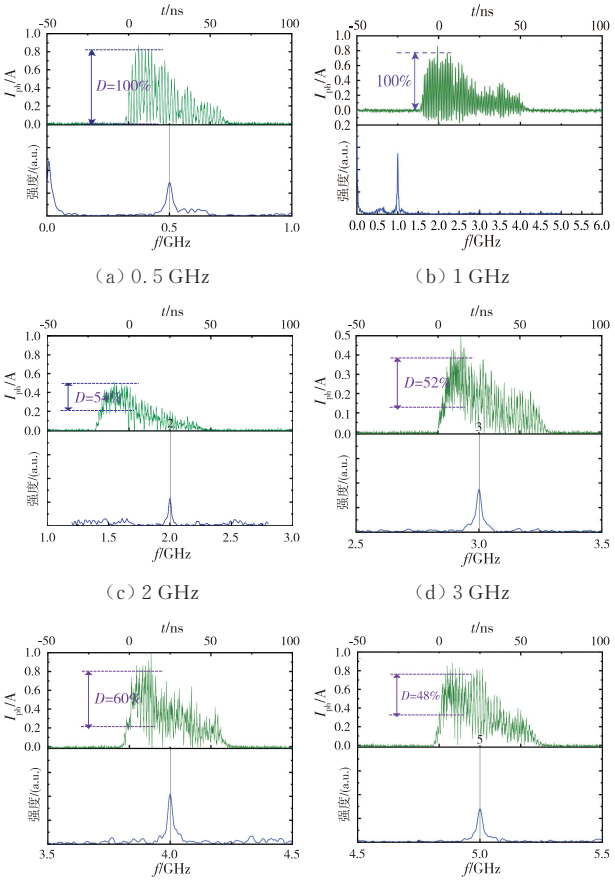


图 9　高频响应测试现场图

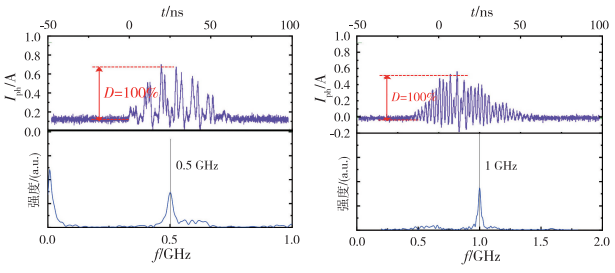
基于上述条件，首先采用 GaN 宽禁带半导体器件，在频率为 0.5，1，2，3，4 和 5 GHz 条件下对测试链路进行光电响应测试，测试结果如图 10 所示。可以看出，在频率 0～1 GHz 下调制深度为满调制，2～5 GHz 下调制深度在 48%～60% 范围内。综合数据分析，在 0.5～1 GHz 下，设计的测试链路高频响应较好，在 2～5 GHz 时存在调制深度较差和杂频含量较高的问题。



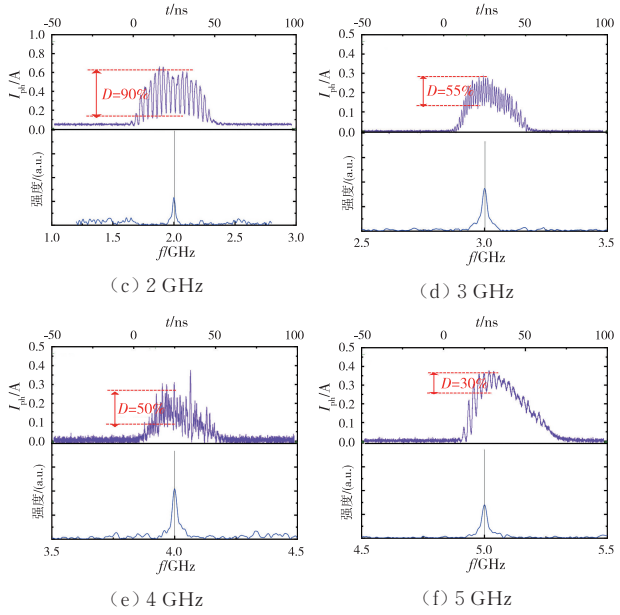
（a）0.5 GHz　（b）1 GHz　（c）2 GHz　（d）3 GHz　（e）4 GHz　（f）5 GHz

图 10　高频响应测试结果（GaN）

其次采用 SiC 宽禁带半导体器件，在频率为 0.5，1，2，3，4 和 5 GHz 条件下也对测试链路进行光电响应测试，测试结果如图 11 所示。可以看出，在频率 0～1 GHz 下调制深度为满调制，2～5 GHz 下调制深度在 30%～90% 范围内。综合数据分析，在 0.5～1 GHz 下，设计的测试链路高频响应较好，在 2～5 GHz 时也存在调制深度较差和杂频含量较高的问题。



（a）0.5 GHz　（b）1 GHz



（c）2 GHz （d）3 GHz

（e）4 GHz （f）5 GHz

图 11 高频响应测试结果（SiC）

仿真与实际测试结果存在差异的原因有两个：一方面，仿真中采用材料的介电常数是恒定的，而在实际测试中，高频场景会导致电路部分材料的介电常数发生变化；另一方面，仿真中默认器件的电导率与光能的变化是同步无延迟的，但是采用的器件内部深能级的问题可能在下降沿的末端存在小拖尾，这会导致调制深度发生变化。因此，仿真仅在理想情况进行计算，而现实中的上述因素会使实测结果与仿真存在偏差。

5 分析与讨论

高频响应较差是由于测试链路搭建与器件封装过程中引入的杂散电感与杂散电容。杂散电感主要由电路连接中的导线、外引电极引入，杂散电容主要由电极间的电容引入。在纳秒或百皮秒的时间尺度下，测试电路与封装中引入的杂散电感与杂散电容对输出的影响不容忽视。宽禁带半导体器件等效电路如图 12 所示，图中 R_L 为负载电阻，L_1 为杂散电感，R_{pcss} 为宽禁带半导体器件内阻，C_p 为极间杂散电容。

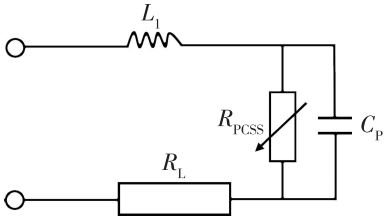


图 12 等效电路

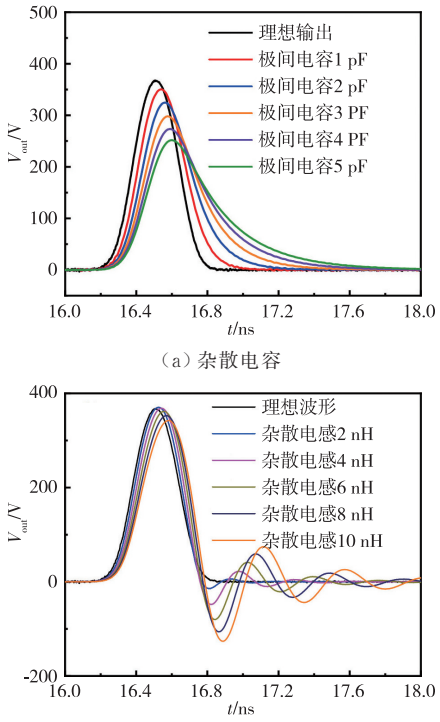
当电路中仅存在电容或电感时，电路可被视为一阶响应电路，此时负载 R_L 两端电压 V_L 可被表示为公式（2），式中 $V(t)$ 为 t 时刻负载两端电压，τ 为放电时间常数。当电路中存在的储能元件分别为电感或电容时，时间常数如公式（3）和（4）所示，式中 R_{eq} 为瞬态电路等效电阻，杂散电容与电感的存在会显著影响放电的时间常数。

$$V(t)=V(\infty)+[V(0_+)-V(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2)$$

$$\tau=\frac{L_1}{R_{eq}} \quad (3)$$

$$\tau=R_{eq}C_p \quad (4)$$

当电路中的杂散电感与杂散电容变大时，单脉冲激光触发下的仿真结果如图 13 所示，杂散电容的存在使得脉宽展宽幅值变小，电感的存在使得前沿变缓，从而产生波形振荡。当杂散电感与电容共同作用时，造成光电流的长拖尾和波形失真，这一现象会随着光脉宽的变小而加重。当调制激光的子脉冲脉宽较小时，光电流会受到电感与电容的显著影响，进而发生波形畸变、调制深度变差等现象。



（a）杂散电容

（b）杂散电感

图 13 不同杂散参数下的仿真结果

综上所述，根据仿真结果、实验测试以及理论分析，可以验证所设计的测试链路可实现主频 0.5～1 GHz 以内的光电响应测试，能够满足一定条件下的平面型宽禁带半导体器件的光电响应测试。

仿真结果表明高频响应存在问题是电路中杂散电容与杂散电感过大所致，当前的电路能够实现1 GHz主频下的射频电流测试，而当主频进一步增加时，则当前较大的杂散参数使得电路无法正确采集射频电流。因此，后续应进一步对电路杂散参数进行优化，以实现对更高主频的光电流进行采集。

由于平面型宽禁带半导体器件的特殊构型，常用的测试链路是采用PCB板或平面型陶瓷板，但它们公共的问题是复杂的电路连接、欧姆接触及低耐高压能力。因此本设计的测试链路具有耐高压、稳定可靠、成本低且具备一定的快响应测试能力等兼顾的优势。

6　结论

针对平面型SiC，GaN宽禁带半导体器件构型，设计一种高压、高频响应测试链路。根据设计链路，先基于相关软件和数据分析进行场-路协同仿真，再通过高压、高频光电响应测试验证，最后对实验结果进行理论分析，从而验证链路的可行性。研究结果表明：所设计的测试链路稳定可靠，可实现平面型宽禁带半导体器件0～30 kV下的高压测试，主频DC～1 GHz以内的光电响应测试，研究成果可以为平面型宽禁带半导体器件的光电特性研究提供一定的设计参考和实验借鉴。

参考文献：

[1] Wu M, Shi W, Ma C, et al. Pulse width control based on blumlein pulse forming line and SI-GaAs PCSS [J]. Photonics, 2023, 10(2): 156.

[2] Glover S F, Zutavern F J, Swalby M E, et al. Pulsed- and DC-charged PCSS-based trigger generators [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2010, 38(10): 2701-2707.

[3] 袁建强，谢卫平，周良骥，等. 光导开关研究进展及其在脉冲功率技术中的应用[J]. 强激光与粒子束，2008，20(1)：171-176.
Yuan Jianqiang, Xie Weiping, Zhou Liangji, et al. Developments and applications of photoconductive semiconductor switches in pulsed power technology[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(1): 171-176.

[4] 肖龙飞，徐现刚. 宽禁带碳化硅单晶衬底及器件研究进展[J]. 强激光与粒子束，2019，31(4)：40003.
Xiao Longfei, Xu Xiangang. Recent development of wide bandgap semiconductor SiC substrates and device [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019, 31(4): 40003.

[5] 来定国，谢霖燊. Pspice子模块在脉冲功率装置电路模拟中的应用[J]. 强激光与粒子束，2012，24(3)：689-692.
Lai Dingguo, Xie Linshen. Application of Pspice subcircuit to circuit simulation of pulsed power device [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(3): 689-692.

[6] Levinshtein M E, Rumyantsev S L, Shur M S. Properties of advanced semiconductor materials: GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe[M]. Hoboken: Wiley, 2001.

[7] Majda-Zdancewicz E, Suproniuk M, Pawłowski M, et al. Current state of photoconductive semiconductor switch engineering [J]. Opto-Electronics Review, 2018, 26(2): 92-102.

[8] Huang J, Hu L, Yang X, et al. Modeling and simulation of Fe-doped GaN PCSS in high-power microwave [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2023, 70(7): 3489-3495.

[9] O'Connell R, Huang C J, Karabegovic A, et al. Optoelectronic microwave power amplifiers [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(4): 994-1001.

[10] Karabegovic A, O'Connell R M, Nunnally W C. Photoconductive switch design for microwave applications[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(4): 1011-1019.

[11] Tsao J Y, Chowdhury S, Hollis M A, et al. Ultrawide-bandgap semiconductors: research opportunities and challenges [J]. Advanced Electronic Materials, 2018, 4(1): 1600501.

[12] Choi P H, Kim Y P, Kim M S, et al. Side-illuminated photoconductive semiconductor switch based on high purity semi-insulating 4H-SiC [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2021, 68(12): 6216-6221.

[13] 黄　维，常少辉，陈之战，等. 11 kV大功率SiC光电导开关导通特性[J]. 强激光与粒子束，2010，22(3)：511-514.
Huang Wei, Chang Shaohui, Chen Zhizhan, et al. On-state characteristics of an 11 kV high-power SiC photoconductive semiconductor switch [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(3): 511-514.

[14] He X, Zhang B, Liu S, et al. High-power linear-polarization burst-mode all-fibre laser and generation of frequency-adjustable microwave signal [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2021, 9: e13.

[15] Hu L, Su J, Qiu R, et al. Ultra-wideband microwave generation using a low-energy-triggered bulk gallium arsenide avalanche semiconductor switch with ultrafast switching [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2018, 65(4): 1308-1313.

[16] Jose M, Philippe G, Xavier P, et al. A survey of wide bandgap power semiconductor devices[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(5): 2155- 2163.

[17] Tamulaitis G, Yilmaz I, Shur M S, et al. Carrier lifetime in conductive and vanadium-doped 6H-SiC substrates [J]. Applied Physics Letters, 2004, 84(3): 335-337.

[18] Mauch D, Sullivan W, Bullick A, et al. High power lateral silicon carbide photoconductive semiconductor switches and

investigation of degradation mechanisms [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43(6): 2021-2031.

[19] Wu Q, Xun T, Zhao Y, et al. The test of a high-power, semi-insulating, linear-mode, vertical 6H-SiC PCSS [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2019, 66(4): 1837-1842.

[20] Wu Q, Zhao Y, Xun T, et al. Initial test of optoelectronic high power microwave generation from 6H-SiC photoconductive switch [J]. IEEE Electron Device Letters, 2019, 40(7): 1167-1170.

[21] Xiao L, Yang X, Duan P, et al. Effect of electron avalanche breakdown on a high-purity semi-insulating 4H-SiC photoconductive semiconductor switch under intrinsic absorption[J]. Applied Optics, 2018, 57(11): 2804-2808.

[22] Wang L, Chu X, Wu Q, et al. Effects of high-field velocity saturation on the performance of V-doped 6H silicon-carbide photoconductive switches[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(4): 4879-4886.

[23] Chu X, Xun T, Wang L, et al. Breakdown behavior of GaAs PCSS with a backside-light-triggered coplanar electrode structure[J]. Electronics, 2021, 10(3): 357.

[24] Niu X, Wang R, Zeng L, et al. A photo-controlled, all-solid, and frequency-tunable ultra-wideband pulse generator [J]. Review of Scientific Instruments, 2023, 94(10): 103101.

[25] Sun X, Xiao L, Luan C, et al. Low ON-resistance and high peak voltage transmission efficiency based on high-purity 4H-SiC photoconductive semiconductor switch [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(2): 2013-2019.

[26] Qin Y, Luan C, Xiao L, et al. Investigating the performance of a lateral 4H-SiC photoconductive switch with a sinking-electrode structure [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2024, 71(1): 727-732.

[27] Yang X, Hu L, Yang Y, et al. Improved photocurrent for gallium nitride photoconductive semiconductor switch by SiO_2 anti-reflection and $(SiO_2|Ta_2O_5)_6$ high-reflection dielectric films [J]. IEEE Electron Device Letters, 2023, 44(10): 1696-1699.

[28] 王朗宁, 荀 涛, 杨汉武. 正对电极结构碳化硅光导开关的电路模型[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(9): 2471-2476.
Wang Langning, Xun Tao, Yang Hanwu. Circuit modeling of vertical geometry SiC photoconductive semiconductor switches[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(9): 2471-2476.

[29] 楚 旭, 王朗宁, 朱效庆, 等. 基于光导半导体的MHz高重频可调谐脉冲产生技术研究[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34(7): 60-65.
Chu Xu, Wang Langning, Zhu Xiaoqing, et al. Research on tunable pulse generation with MHz repetition rate based on compensated 4H-SiC photoconductive semiconductor [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34(7): 60-65.

作者简介：

王日品(1989—)，男，湖南省道县人，高级工程师，主要从事高功率微波源系统硬管化设计、保真空技术研究和光导半导体微波器件封测；

荀 涛(1982—)，男，陕西省渭南市人，研究员，博士，主要从事强流真空电子和强场微波光子研究。