



·高功率微波技术专辑·

基于碳化硅等离子体器件的功率脉冲锐化技术*

郭登耀¹, 汤晓燕¹, 宋庆文¹, 周 瑜^{1,2}, 郭京凯¹, 孙乐嘉¹,
袁 昊¹, 杜丰羽^{1,2}, 张玉明¹

(1. 西安电子科技大学 微电子学院, 西安 710071; 2. 西安电子科技大学 芜湖研究院, 安徽 芜湖 241002)

摘 要: 利用Sentaurus搭建了碳化硅漂移阶跃恢复二极管(DSRD)与雪崩整形二极管(DAS)全电路仿真模型,研究了碳化硅等离子体器件在脉冲锐化方面的能力,并且通过器件内部等离子浓度分布解释了这两种器件实现脉冲锐化的机制。借助碳化硅DSRD可以将峰值超过千伏的电压脉冲的前沿缩短到300 ps;碳化硅DSRD与DAS的组合可以输出脉冲前沿在35 ps、峰值超过2 kV的电压脉冲。仿真与实验发现当触发脉冲与碳化硅DAS匹配时,可以实现快速开启后快速关断,得益于碳化硅DAS这种神奇现象,可以将峰值在两千伏以上脉冲的半高宽缩小到百皮秒量级;通过频谱分析发现脉冲经过DAS整形后,其最高幅值-30 dB对应的频谱带宽扩大了37倍,达到7.4 GHz。

关键词: 碳化硅; 漂移阶跃恢复二极管; 雪崩整形二极管; 超宽带

中图分类号: TN31

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202436.230209

Power pulse sharpening technology based on silicon carbide plasma devices

Guo Dengyao¹, Tang Xiaoyan¹, Song Qingwen¹, Zhou Yu^{1,2}, Guo Jingkai¹,
Sun Lejia¹, Yuan Hao¹, Du Fengyu^{1,2}, Zhang Yuming¹

(1. School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. Xidian-Wuhu Research Institute, Wuhu 241002, China)

Abstract: A full-circuit simulation model of silicon carbide Drift Step Recovery Diode (DSRD) and Diode Avalanche Shaper (DAS) was built based on Sentaurus. By use of simulation, this paper investigates the capability of silicon carbide plasma devices in pulse sharpening and explains the mechanism of pulse sharpening achieved by these two devices through the plasma concentration distribution inside the devices. With the help of a silicon carbide DSRD, it is possible to reduce the pulse front of voltage pulses with peaks in excess of kilovolts to 300 ps. The combination of the silicon carbide DSRD and DAS can output voltage pulses with a pulse front of 35 ps and a peak of more than two kilovolts. Simulations and experiments show that when the trigger pulse is matched to the silicon carbide DAS, fast turn-on and turn-off can be achieved. Thanks to the magical phenomenon of silicon carbide DAS, it can reduce the half-height width of pulses with peak values above 2 kV to the order of 100 ps. Through spectrum analysis, it is found that after the pulse is sharpened by DAS, its -30 dB spectral width is expanded by a factor of 37 to 7.4 GHz.

Key words: silicon carbide, drift step recovery diode, diode avalanche shaper, ultra wide band

脉冲功率技术是近几十年来快速发展起来的新兴学科,早期主要是美国和前苏联在从事相关研究,研究目的是为了满足不同国防和科研的需求^[1]。随着技术研究的深入,该技术逐渐出现在工业生产中,目前脉冲功率技术已经被广泛应用于环境保护、航空航天、生物医药、资源开采、军工、国防等诸多领域。当前脉冲功率技术正朝着高频、模块化、阵列化、紧凑化、固态化和长寿命方向发展^[2],脉冲功率技术的核心是脉冲功率开关^[3],随着半导体理论研究的加深,以及半导体制造工艺的成熟,出现了一批半导体等离子体脉冲功率开关,其具有开关时间短、可靠性高等优势。脉冲功率开关有两类:一类为与电感储能相配合的断路开关,其可以快速关断;另一类为与电容储能

* 收稿日期:2023-07-04; 修订日期:2023-12-01
基金项目:国家自然科学基金项目(62174123)
联系方式:郭登耀, guodengyao@stu.xidian.edu.cn。
通信作者:宋庆文, qwsong@xidian.edu.cn。

相配合的闭合开关,其可以在短时间内导通。半导体等离子体断路开关的代表是漂移阶跃恢复二极管(DSRD),其基于漂移阶跃恢复原理可以在亚纳秒时间内关断,硅基 DSRD 最大电压上升率可达 2 kV/ns ^[4-5]; 半导体等离子体闭合开关的代表是雪崩整形二极管(DAS),其基于可逆延迟雪崩击穿效应可以在皮秒量级时间内导通^[6]。这些新型半导体脉冲功率开关的脉冲源,在超宽带探地雷达发射、高功率电磁环境模拟、脉冲驱动源主开关的低抖动触发以及超宽谱高功率微波等关键研究领域,具有重要应用价值^[7-9]。

2022 年底,美国国家点火装置首次实现了惯性约束核聚变的净能量增益^[10],这种增益未计算脉冲激光消耗的电网能量。实验中所用的脉冲激光效率不到 0.7%,另外产生脉冲激光的装置大概需要三个足球场大小。提高脉冲源效率以及减小脉冲激光源尺寸是惯性约束核聚变从实验走向应用需要解决的问题之一,在脉冲源中使用碳化硅脉冲器件是解决这些问题的方法之一。由于碳化硅材料具有高临界击穿场强、高载流子饱和速度、高热导率、高熔点,在等离子体脉冲功率开关领域具有天然优势^[11-14],碳化硅等离子体脉冲功率开关具有更高的效率、更小的体积和更快的开关速度。碳化硅脉冲功率开关可以实现脉冲源的高效率、高重频、小尺寸、固态化和长寿命。目前碳化硅 DSRD 研究从器件机理到脉冲源设计都有广泛覆盖^[15-16],而碳化硅 DAS 目前主要处在理论研究阶段,理论研究表明碳化硅 DAS 开启速度会比相同电压等级硅 DAS 快一倍,达到几十皮秒^[11,17]。文献 [17] 基于碳化硅 DSRD 与 DAS 研究了碳化硅基脉冲源的特性,但该文献有 4 个不足:其仅仅关注了脉冲前沿时间,未注意到碳化硅 DAS 的快速关断现象;未发现碳化硅 DAS 在超宽带窄脉冲应用领域的优势;未给出碳化硅脉冲功率器件工作过程中温升以及效率;未通过实验对仿真结果进行验证。为了更加准确地了解碳化硅等离子体器件在脉冲功率领域的潜能,本文在 Sentaurus 中搭建脉冲源全电路仿真模型,研究了碳化硅 DSRD 以及 DSRD 与 DAS 组合对脉冲的锐化能力,并通过实验对本课题组研制的 DAS 进行了触发,利用实验支撑了仿真结论的准确性。

1 器件结构及物理模型

1.1 器件结构

仿真使用的 DSRD 与 DAS 结构如图 1(a)所示,它们均采样 P⁺P⁻N⁺结构,a 和 b 对应器件基区边界。DSRD 与 DAS 对应的击穿特性如图 1(b)所示:为了减小 DSRD 输出脉冲的平台区,DSRD 基区比较短,其对应的静态击穿电压约 776 V^[18];为了 DAS 输出脉冲峰值高、前沿陡,DAS 基区设计比较长,其对应的击穿电压为 1486 V。碳化硅 DAS 发生延迟雪崩击穿时,动态击穿电压约为静态击穿电压的 1.4 倍^[13],为了能满足 DAS 触发时的电压要求,本文用三个碳化硅 DSRD 的串联完成对单个碳化硅 DAS 的触发。

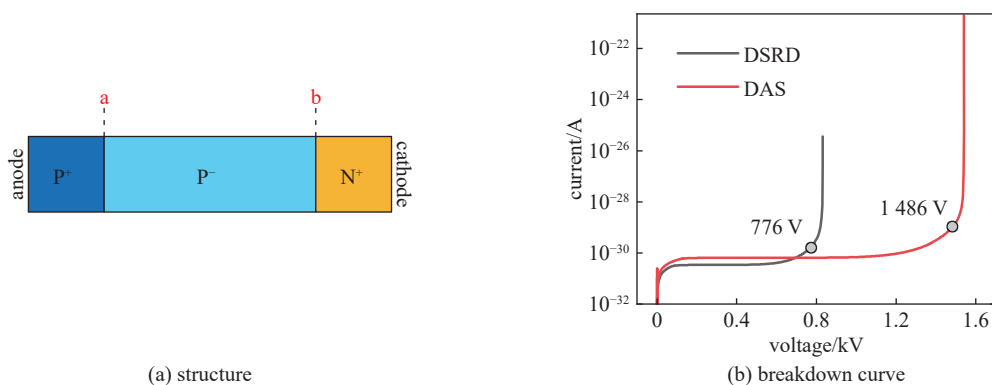


Fig. 1 Structure diagram and breakdown characteristics of DSRD and DAS in the simulation

图 1 仿真所用 DSRD 与 DAS 的结构示意图以及击穿特性

1.2 物理模型

仿真使用的软件为 Synopsys 旗下的 Sentaurus TCAD^[19],通过求解泊松方程,来计算器件内部电场;通过求解电流连续性方程,计算器件内部电流;为了更加准确地研究碳化硅等离子体器件开启过程中的器件发热状况,耦合求解了温度方程,同时激活热力学模型以及开启温度相关的热导热容模型。由于器件封装形式的不同,表面热阻也会有所差别,这里选用典型值 $0.3 \text{ cm}^2 \cdot \text{k} \cdot \text{W}^{-1}$,同时热极温度设为 300 K,加在器件正负极上;为了准确描述温度对载流子输运的影响开启了热力学模型;由于存在外围电路,求解了基尔霍夫方程。雪崩电离模型选用 OkutoCrowell,驱动力为准费米能级梯度;考虑掺杂及温度相关的 Shockley-Read-Hall (SRH) 复合及俄歇复合;迁移率模型中开启了掺杂相关和高场速度饱和;考虑了碳化硅材料的各项异性,器件阳极到阴极的方向为碳化硅材料 $\langle 0001 \rangle$ 方向;

加入了碳化硅材料不完全电离模型; 模型中涉及的碳化硅材料参数选用软件自带参数。

2 脉冲锐化电路

2.1 DSRD 整形电路

所使用的 DSRD 基脉冲源电路如图 2 所示(红框中元件保留), 其工作原理为^[20-21]: 开始时 Q_1 关断, V_1 、 V_2 给 C_2 充电, 稳定时 C_2 两端的电压为 $\Delta V=V_1-V_2$, 其中 V_1 大于 V_2 ; 当 Q_1 闭合时, V_1 经过 Q_1 给 L_1 充电, 同时, C_2 通过 L_2 、 Q_1 放电使 DSRD(为了满足后面触发碳化硅 DAS 的要求, 这里通过三个 DSRD 串联提高整体耐压)正向导通, 少数载流子注入 DSRD 基区; 当 Q_1 再次关断时, L_1 上的电流从 Q_1 转向 C_1 所属支路和 L_2 、DSRD 所属支路, 之前注入到 DSRD 的载流子被抽取, 当 DSRD 中的载流子被抽光时, DSRD 迅速关断 L_2 上的电流快速切换到负载 $R_{12}(50\ \Omega)$, 此时 R_{12} 上会输出一个前沿较陡的电脉冲。如果不使用 DSRD 只保留蓝框中元件, 由于没有利用 DSRD 快速关断效应, 负载 $R_{11}(50\ \Omega)$ 上只会输出一个类正弦脉冲。

2.2 DSRD 结合 DAS 整形电路

DAS 的触发电路如图 3 所示, 将红框中的负载 R_{12} 换为绿框中的元件。 V_b 提供 DAS 的初始偏置电压, 电容 C_4 用于储能, 可以避免 DAS 与负载上的电压突变以优化输出脉冲特性。

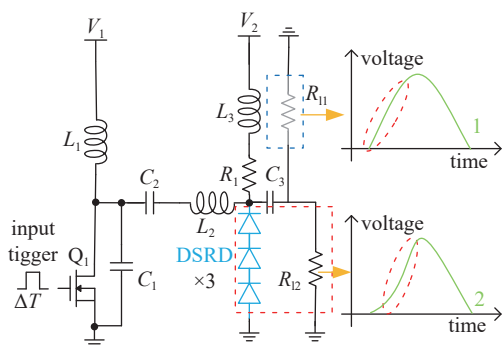


Fig. 2 DSRD based pulse sharpening circuit (red and blue frames are not connected simultaneously)

图 2 DSRD 基脉冲锐化电路(红框与蓝框不同时连接)

在 DAS 触发电路中原本流向 R_{12} 的电脉冲大部分会流向 DAS 与 $R_{13}(50\ \Omega)$ 构成的支路。DAS 内的电场会在电脉冲的作用下迅速建立, 当电场建立速度快于载流子的饱和和移动速度, DAS 会发生可逆延迟雪崩击穿, 此时器件上所承受电压会高于器件静态击穿电压, 载流子会在基区内积累形成等离子体(高浓度的载流子)^[22]。等离子体充满基区后 DAS 会迅速开启, 原本加在 DAS 上的电压会在皮秒量级时间内切换到 R_{13} , 会在其上输出一个前沿时间在皮秒量级的电脉冲。

在 Sentaurus 中搭建了如图 2 和图 3 所示电路, 电路中所包含元件参数见表 1, 其中 Q_1 为射频 MOSFET (DE475-102N21A) 在仿真中构建了其 SPICE 模型。仿真时 $V_1=210\ \text{V}$; $V_2=0\ \text{V}$; $V_b=600\ \text{V}$; Q_1 栅压加 $15\ \text{V}$, 开启时间 $40\ \text{ns}$ 。以上设置可能不是电路与器件匹配的最优条件, 但不影响展现碳化硅等离子体功率器件优异的脉冲锐化能力。

表 1 仿真所用电路元件参数

Table 1 Circuit component parameters used for simulation

R_1/Ω	R_2/Ω	C_1/nF	C_2/nF	C_3/nF	C_4/pF	L_1/nH	L_2/nH	$L_3/\mu\text{H}$	$L_4/\mu\text{H}$
50	1000	0.2	2	2	3	80	75	2	2

3 结果分析

3.1 DSRD 整形

在碳化硅 DSRD 基脉冲电路中, DSRD 关断时 DSRD 以及负载 R_{12} 上的电流如图 4(a) 所示: t_1 之前 DSRD 内充满正向注入的等离子体; t_1 到 t_2 等离子体被抽取, 器件基区内的载流子浓度降到平衡载流子浓度附近。如图 4(b) 所示, P⁺P⁺ 结(a 位置)处的等离子体先被抽取, 抽到 P⁻N⁺(b 位置) 结, 整个基区内的等离子体全被抽完; t_2 到 t_3 平衡载流子被抽取, 耗尽区建立, DSRD 关断, 电流流向 R_{12} 致使其电流迅速上升。由于相同耐压等级下碳化硅 DSRD 基区比硅短, 因此 t_2 到 t_3 过程通常比较快, 本次仿真中这段时间大约 $300\ \text{ps}$ 。 t_1 到 t_2 的时间可以通过调整 DSRD

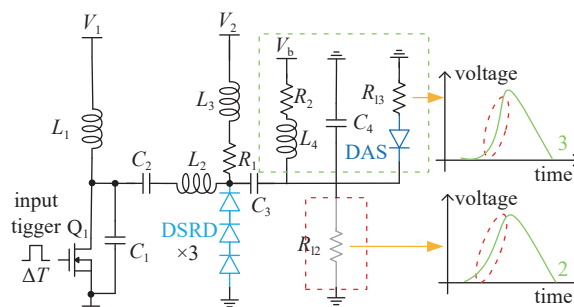


Fig. 3 Pulse sharpening circuit based on DSRD and DAS (red and green frames are not connected simultaneously)

图 3 基于 DSRD 与 DAS 的脉冲锐化电路(红框与绿框不同时连接)

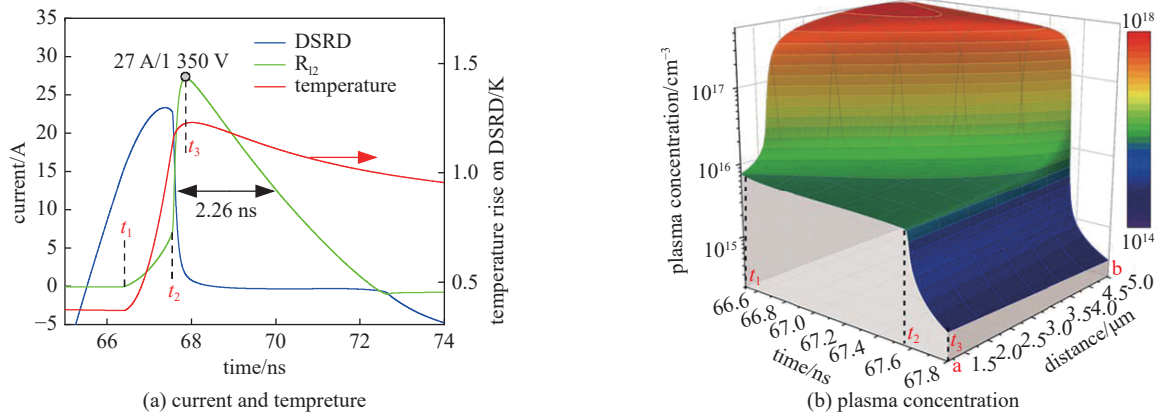


Fig. 4 Changes of some key physical quantities during DSRD shutdown, where $t_1=66.39$ ns; $t_2=67.54$ ns; $t_3=67.84$ ns

图 4 DSRD 关断过程中一些关键物理量的变化, 其中 $t_1=66.39$ ns; $t_2=67.54$ ns; $t_3=67.84$ ns

单元或电路参数压缩, 因此本文将脉冲前沿时间选为 t_2 到 t_3 的时间。 R_{12} 上输出电脉冲峰值为 1350 V, 脉冲半高宽 (脉冲最大值二分之一处的时间宽度)^[1] 为 2.26 ns。 当前散热条件下单次脉冲过后器件内的温度升高大约为 1 K。 单次触发后三个 DSRD 上消耗的总能量为 27 μ J, R_{12} 上消耗的总能量为 60 μ J 占比约 69%。

3.2 DSRD 结合 DAS 整形

使用碳化硅 DSRD 以及 DAS 两级锐化后的脉冲波形如图 5(a) 绿线所示, t_1 到 t_2 电压脉冲反向加到 DAS 上, DAS 基区内的电场迅速抬升, 促使器件内部发生碰撞电离产生载流子。 当电场移动速度快于载流子饱和移动速度, 基区内的载流子会积累形成等离子体^[22], 如图 5(b) 所示; t_2 到 t_3 等离子体形成, 器件从高阻抗状态迅速切换到低阻抗状态, DAS 上的电压转移到 R_{13} , 负载上形成一个前沿很陡的脉冲, t_2 到 t_3 的时间非常短约为 35 ps。 t_1 到 t_2 为 DAS 反向充电时间, 其可以通过调整 DAS 单元或电路参数压缩, 因此本文将脉冲前沿时间选为 t_2 到 t_3 的时间; t_3 到 t_4 等离子体被抽取器件向关断转变, 电压从 R_{13} 向 DAS 转移, 负载上脉冲后沿形成。 相同击穿电压下与硅 DAS 相比, 碳化硅 DAS 基区短、碳化硅载流子寿命低、复合快、以及载流子饱和速度高、碳化硅 DAS 等离子体消耗快, t_3 到 t_4 的过程非常短, 约 148 ps。 得益于碳化硅 DAS 内等离子体的快速形成以及消耗, 使得其输出脉冲半高宽只有 109 ps, 为文献 [17] 中的三分之一。 DAS 快速关断现象在实验中也有观测到^[14,23], 对现有碳化硅 DAS 进行了脉冲触发实验。 不同 V_1 电压下的触发结果如图 6 所示, 实验中碳化硅 DAS 输出脉冲存在“尖刺”, 这表明碳化硅 DAS 在快速导通后, 存在快速关断, 与仿真表现出的现象一致。 图 6(a) 中, 碳化硅 DAS 输出的半高宽为 250 ps, 大于仿真中的半高宽 109 ps, 这是由于此次设计的碳化硅 DAS 触发条件较苛刻, 目前只实现了半触发^[24]。 同时可以观察到随着 V_1 的增大, 输出脉冲峰值增大但脉冲“尖刺”变短, 出现这种现象的原因是 V_1 增大后触发脉冲能量增强, 导致碳化硅 DAS 在开始关断的过程中碰撞电离过程加剧, 出现了关断困难。 本文仿真中实现了触发脉冲与碳化硅 DAS 的匹配, 输出了峰值电压超过 2 kV, 半高宽在百皮秒左右的脉冲。 图 5 中 t_4 之后由于器件基区上的碰撞电离依然存在, 器件处于半阻断状态, 这个过程能耗比较大, 在这个阶段器件内最高温度上升 6 K 左右。 单次触

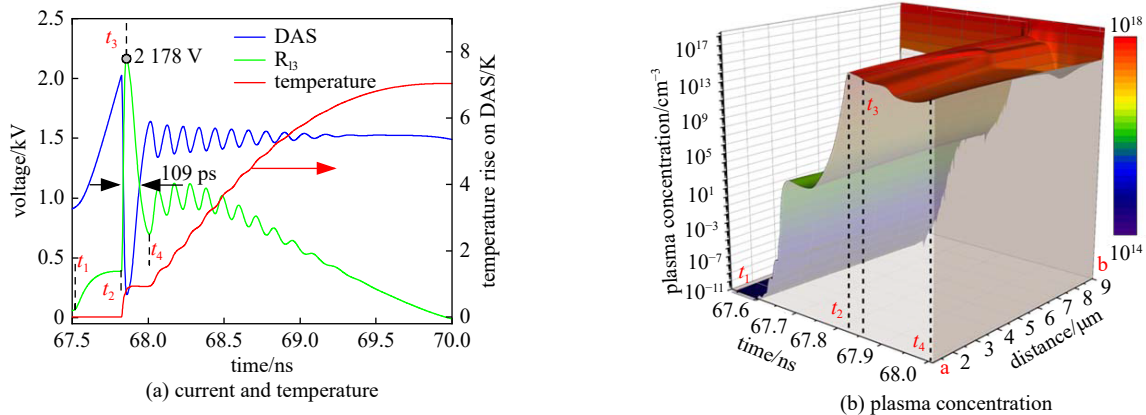


Fig. 5 Changes of some key physical quantities during DAS triggering, where $t_1=67.514$ ns; $t_2=67.823$ ns; $t_3=67.858$ ns; $t_4=68.006$ ns

图 5 DAS 触发过程中一些关键物理量的变化, 其中 $t_1=67.514$ ns; $t_2=67.823$ ns; $t_3=67.858$ ns; $t_4=68.006$ ns

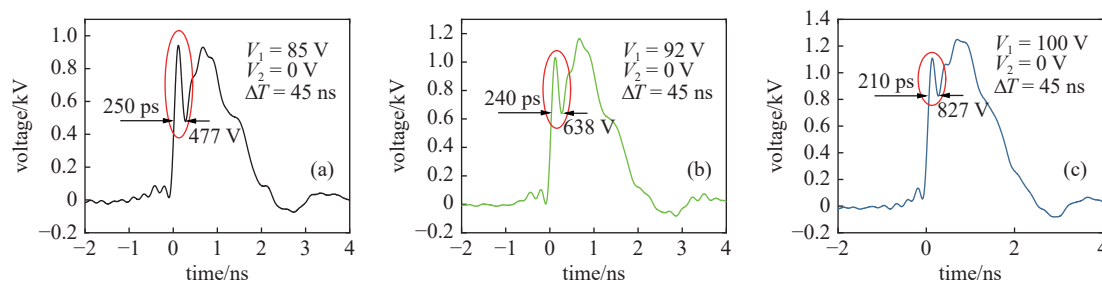


Fig. 6 Output pulse of silicon carbide DAS under different circuit conditions in the experiment

图 6 实验中不同电路条件下碳化硅 DAS 输出脉冲情况

发后三个 DSRD 上消耗的总能量为 $37 \mu\text{J}$, DAS 上消耗的能量为 $39 \mu\text{J}$, R_{13} 上消耗的能量为 $26 \mu\text{J}$, 占比约 25%。

3.3 脉冲频谱分析

图 7(a)展示了碳化硅等离子体功率器件对脉冲的锐化效果: 其中黑线曲线所示为锐化之前的脉冲波形; 红色曲线为碳化硅 DSRD 锐化之后的脉冲波形, 脉冲前沿时间由 7 ns 缩短到了 300 ps , 半高宽从 7 ns 缩短到了 2.26 ns ; 蓝色曲线为碳化硅 DSRD 与 DAS 组合锐化后的脉冲波形, 电压峰值高度从 1350 V 上升到了 2178 V , 半高宽也由 2.26 ns 缩短到了 109 ps 。

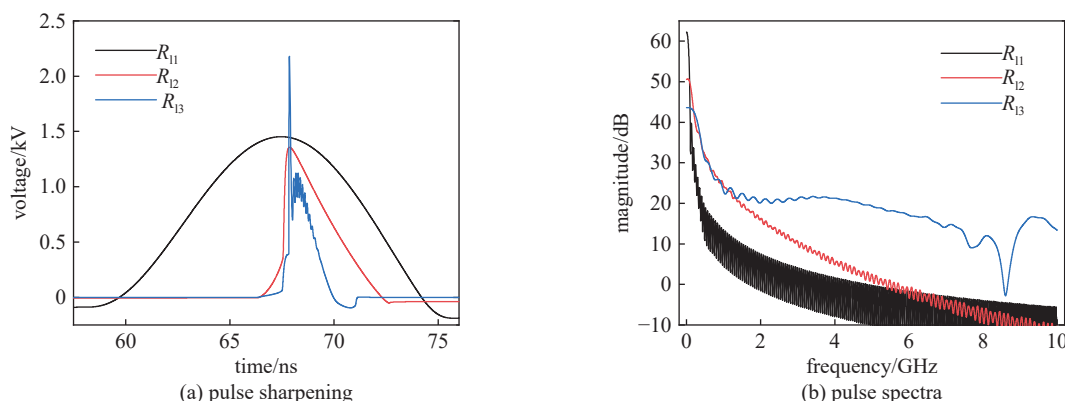


Fig. 7 Sharpening effect of silicon carbide plasma pulse power devices on electrical pulses

图 7 碳化硅等离子体脉冲功率器件对电脉冲的锐化情况

以上波形为 TCAD 仿真结果, 由于仿真过程中收敛性的差异会导致求解步长不同表现为这些脉冲波形的采样率不均匀。在 matlab 中使用非均匀快速傅里叶变换 (NUFFT) 对脉冲波形进行傅里叶变换。NUFFT 变换后的幅值与采用点数有关, 通过将变换后得到的幅值乘 2 并除以采用点数获得实际幅值。对实际幅值取 $20\lg$ 可以得到图 7(b) 对应的频谱, 这里取峰值 -30 dB 为脉冲的频谱带宽。初始脉冲带宽为 200 MHz 、DSRD 整形后的脉冲频谱带宽为 1.4 GHz 、DAS 锐化后脉冲的频谱带宽高达 7.4 GHz 。

4 结论

本文中, 我们借助 TCAD 软件研究了碳化硅 DSRD 与 DAS 对脉冲的锐化效果。碳化硅 DSRD 基脉冲源可以输出前沿 300 ps 、半高宽 2.26 ns 、峰值电压为 1350 V 、 -30 dB 频谱宽度为 1.4 GHz 的脉冲; 碳化硅 DAS 发生延迟雪崩击穿后等离子体快速形成, 后被快速抽取, 出现快速导通与快速关断这一神奇现象。通过实验复现了仿真中的这种现象。基于该现象, 实验中碳化硅 DAS 输出脉冲峰值为 940 V 时, 脉冲的半高宽可以缩小到 250 ps ; 仿真中基于这个现象, 利用三个碳化硅 DSRD 实现对碳化硅 DAS 的触发后, 可以输出前沿 35 ps 、半高宽 109 ps 、峰值电压为 2178 V 、 -30 dB 频谱宽 7.4 GHz 的脉冲。本文通过仿真与实验展现了碳化硅脉冲功率器件在超宽带窄脉冲领域应用的潜能。

参考文献:

- [1] Bluhm H. 脉冲功率系统的原理与应用[M]. 江伟华, 张弛, 译. 北京: 清华大学出版社, 2008. (Bluhm H. Pulsed power systems: principles and applications[M]. Jiang Weihua, Zhang Chi, trans. Beijing: Tsinghua University Press, 2008)
- [2] 丛培天. 中国脉冲功率科技进展简述[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32: 025002. (Cong Peitian. Review of Chinese pulsed power science and technology[J].

- [High Power Laser and Particle Beams](#), 2020, 32: 025002)
- [3] 余岳辉, 梁琳. 脉冲功率器件及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010. (Yu Yuehui, Liang Lin. Pulsed power devices and their applications[M]. Beijing: China Machine Press, 2010)
- [4] Grekhov I V, Efanov V M, Kardo-Sysoev A F, et al. Power drift step recovery diodes (DSRD)[J]. [Solid-State Electronics](#), 1985, 28(6): 597-599.
- [5] 王淦平, 李飞, 金晓, 等. 快速关断半导体开关工作特性及实验研究[J]. [强激光与粒子束](#), 2020, 32: 025014. (Wang Ganping, Li Fei, Jin Xiao, et al. Study of ultrafast semiconductor opening switch[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2020, 32: 025014)
- [6] Focia R J, Schamiloglu E, Fleddermann C B, et al. Silicon diodes in avalanche pulse-sharpening applications[J]. [IEEE Transactions on Plasma Science](#), 1997, 25(2): 138-144.
- [7] 张玲, 周斌, 谢义方, 等. 基于漂移阶跃恢复二极管的超宽带探地雷达发射技术[J]. [强激光与粒子束](#), 2009, 21(12): 1854-1858. (Zhang Ling, Zhou Bin, Xie Yifang, et al. Transmitter techniques for ultra-wideband ground penetrating radar based on drift step recovery diodes[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2009, 21(12): 1854-1858)
- [8] 赖雨辰, 谢彦召, 王海洋, 等. 基于 DSRD 的高重复频率固态脉冲源的研制[J]. [强激光与粒子束](#), 2020, 32: 105002. (Lai Yuchen, Xie Yanzhao, Wang Haiyang, et al. Development of the high repetitive frequency solid-state pulse generator based on DSRD[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2020, 32: 105002)
- [9] 王翔宇, 卢彦雷, 朱郁丰, 等. 紧凑型高功率亚纳秒脉冲压缩装置的设计研制[J]. [强激光与粒子束](#), 2023, 35: 025006. (Wang Xiangyu, Lu Yanlei, Zhu Yufeng, et al. Design and development of compact high power subnanosecond pulse compression device[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2023, 35: 025006)
- [10] Kramer D. National Ignition Facility surpasses long-awaited fusion milestone[Z]. 2022, doi: [10.1063/PT.6.2.20221213a](#).
- [11] Ivanov M S, Rodin P B, Ivanov P A, et al. Parameters of silicon carbide diode avalanche shapers for the picosecond range[J]. [Technical Physics Letters](#), 2016, 42(1): 43-46.
- [12] Ivanov P A, Kon'kov O I, Samsonova T P, et al. 4H-SiC based subnanosecond (150 ps) high-voltage (1600 V) current breakers[J]. [Technical Physics Letters](#), 2018, 44(2): 87-89.
- [13] Guo Dengyao, Zhou Yu, Tang Xiaoyan, et al. Direct comparison of silicon carbide and silicon diode avalanche shaper in multi-pulse applications[J]. [Journal of Crystal Growth](#), 2023, 603: 127007.
- [14] Zhou Yu, Tang Xiaoyan, Song Qingwen, et al. Demonstration of picosecond 4H-SiC diode avalanche shaper with voltage rise rate of 11.14 kV/ns and peak power density of 62 MW/cm²[J]. [IEEE Transactions on Power Electronics](#), 2022, 37(4): 3724-3727.
- [15] Grekhov I V, Ivanov P A, Khristyuk D V, et al. Sub-nanosecond semiconductor opening switches based on 4H-SiC p⁺p₀n⁺-diodes[J]. [Solid-State Electronics](#), 2003, 47(10): 1769-1774.
- [16] Yang Zewei, Liang Lin, Yan Xiaoxue. Dynamic electrical characteristics of 4H-SiC drift step recovery diodes of high voltage[J]. [IEEE Transactions on Plasma Science](#), 2022, 50(5): 1276-1281.
- [17] Afanasyev A V, Ivanov B V, Ilyin V A, et al. A study of 4H-SiC diode avalanche shaper[J]. [Journal of Physics:Conference Series](#), 2017, 917: 082002.
- [18] 周瑜. 4H-SiC 等离子体波开关器件研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022. (Zhou Yu. Research on 4H-SiC plasma wave switching devices[D]. Xi'an: Xidian University, 2022)
- [19] Synopsys. Sentaurus device user guide. Version O-201806[M]. Mountain View: Synopsys, 2018.
- [20] 王亚杰, 何鹏军, 荆晓鹏, 等. 基于漂移阶跃恢复二极管开关的脉冲源仿真计算[J]. [强激光与粒子束](#), 2018, 30: 095005. (Wang Yajie, He Pengjun, Jing Xiaopeng, et al. Simulation and calculation of pulsed power source based on drift step recovery diode switching[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2018, 30: 095005)
- [21] Merensky L M, Kardo-Sysoev A F, Shmilovitz D, et al. Efficiency study of a 2.2 kV, 1 ns, 1 MHz pulsed power generator based on a drift-step-recovery diode[J]. [IEEE Transactions on Plasma Science](#), 2013, 41(11): 3138-3142.
- [22] Minarskii A M, Rodin P B. Critical voltage growth rate when initiating the ultrafast impact ionization front in a diode structure[J]. [Semiconductors](#), 2000, 34(6): 665-667.
- [23] Guo Dengyao, Zhou Yu, Tang Xiaoyan, et al. Half trigger operation mode of 4H-SiC diode avalanche shaper[C]//Proceedings of the 2022 IEEE 16th International Conference on Solid-State & Integrated Circuit Technology. 2022: 1-3.
- [24] Guo Dengyao, Tang Xiaoyan, Song Qingwen, et al. Investigation on triggering mode and criterion of 4H-SiC diode avalanche shaper[J]. [IEEE Transactions on Electron Devices](#), 2023, 70(8): 4075-4080.