

# 半导体脉冲功率开关器件综述

梁琳, 颜小雪, 黄鑫远, 卿正恒, 杨泽伟, 尚海

(强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学电气与电子工程学院), 湖北省 武汉市 430074)

## Review on Semiconductor Pulsed Power Switching Devices

LIANG Lin, YAN Xiaoxue, HUANG Xinyuan, QING Zhengheng, YANG Zewei, SHANG Hai

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, Hubei Province, China)

**ABSTRACT:** The special types of semiconductor switching devices applied in the pulsed power area were reviewed in this paper, including reversely switched dynistor (RSD), drift step recovery diode (DSRD) and fast ionization dynistor (FID). They are microsecond, nanosecond and picosecond range in time scale, respectively, and Si-based and SiC-based in material. The operation principle, key technology and application of the devices as well as some research progress were introduced, and the future development trend was prospected.

**KEY WORDS:** semiconductor switch; pulsed power; reversely switched dynistor (RSD); drift step recovery diode (DSRD); fast ionization dynistor (FID)

**摘要:** 该文对应用于脉冲功率领域的特种半导体开关器件进行综述, 具体包括反向开关晶体管(reversely switched dynistor, RSD)、漂移阶跃恢复二极管(drift step recovery diode, DSRD)和快速离子化晶体管(fast ionization dynistor, FID)。上述半导体开关器件从时间尺度上分别对应微秒级、纳秒级和皮秒级, 研制材料包括硅基(Si)和碳化硅基(SiC)。该文介绍相关器件的工作机理、关键技术和应用情况, 以及部分研究进展, 并对未来的发展趋势进行展望。

**关键词:** 半导体开关; 脉冲功率; 反向开关晶体管; 漂移阶跃恢复二极管; 快速离子化晶体管

## 0 引言

脉冲功率技术诞生于20世纪60年代, 它是一种以较低的功率储存能量, 再以高得多的功率变换为脉冲电磁能量, 并释放到特定负载中的电物理技术<sup>[1]</sup>, 也是一种电能变换技术。现代脉冲功率技术

在电磁发射、核爆模拟等国防领域和光源、环保、材料、生物、医疗等民用领域都有着广泛应用。与一代电力电子器件决定一代电力电子电路相类似, 脉冲功率开关也是整个脉冲功率系统的瓶颈, 开关能达到的水平直接影响整个系统输出的脉冲幅值、上升时间、重复频率等关键指标<sup>[2]</sup>。

脉冲功率开关包括气态开关、液态开关和固态开关。其中, 气态开关的优势是功率容量大, 目前仍然有着广泛的应用; 液态开关进入应用领域的报道不多; 固态开关由于体积小、可靠性高、重复频率高等优势, 成功克服了气态开关电极容易烧蚀、使用寿命短、多数不可重频工作的原生缺陷, 被认为是脉冲功率开关未来的发展方向, 并已在各类固态源中应用。固态开关又可具体分为半导体开关、磁介质开关和电介质开关。与磁介质开关缺乏控制灵活性不同, 半导体开关具有高度的可控性, 且由于功率半导体技术的发展使其电流电压容量不断提升, 脉冲功率系统半导体化的趋势越来越明显<sup>[3]</sup>。

电力电子器件基本上不是专门为脉冲功率应用而开发的, 但是通过各种控制或连接方式, 例如串并联、组合、叠加等, 在一定程度上也可以适用于脉冲功率领域, 包括功率金属-氧化物半导体场效应晶体管(metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, MOSFET)、绝缘栅双极晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)、门极可关断晶闸管(gate-turn-off thyristor, GTO)、静电感应晶闸管(static induction thyristor, SITH)等, 都可以被有侧重地用在高峰值功率或高重复频率的脉冲功率系统。然而, 这些器件有的工作电压高, 但是频率低(如GTO); 有的工作频率高, 但耐压低(如MOSFET)。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51877092, 51377069); 装备预研重点实验室基金(6142605180104)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51877092, 51377069); Equipment Preliminary Research Key Laboratory Foundation (6142605180104).

通过将不同器件进行组合使用可以同时满足较高电压和较高频率,但电路相对复杂。另外,三端器件在工作时需要提供复杂的触发电路,以保证各器件的同步。因此,为了适应脉冲功率的应用工况,将功率半导体器件的性能最大限度地发挥出来,也有一些特种器件是专门为其开发的。

俄罗斯科学院约飞(Ioffe)物理技术研究所曾于20世纪80、90年代提出一系列这类特种的半导体脉冲功率开关器件,随后不少国家也开始研制或者应用这些器件。从“时间尺度”(试验时开关对电功率进行换流时所消耗的时间长短)而言,上述特种半导体脉冲功率开关器件可分为微秒级、纳秒级以及皮秒级开关。按时间尺度分类最典型的包括:微秒级的反向开关晶体管(reversely switched dynistor, RSD)、纳秒级的漂移阶跃恢复二极管(drift step recovery diode, DSRD)和皮秒级的快速离子晶体管(fast ionization dynistor, FID)。其中,RSD和FID是闭合型开关,对应电容储能型脉冲功率系统,电容储能脉冲功率系统对闭合型开关的要求是寿命长、结构紧凑、电感小、开关击穿时延短、易于维修等。此外,通常施加在开关两电极间的脉冲电压高达10kV及以上,通过的电流大至10kA及以上<sup>[4]</sup>;DSRD是断路型开关,对应电感储能型脉冲功率系统,电感储能脉冲功率系统对断路型开关的要求是寿命长、传导的电流值(流过断路开关的电流值)大、开关损耗尽量低、高阻断电压,且断路阻抗要快速上升到最大值以及能在高重频下工作<sup>[4]</sup>。上述3种器件均可由硅(silicon, Si)材料成功制备,并都在探索向宽禁带碳化硅(silicon carbide, SiC)材料的过渡。在几十年的时间里,人们对这些特种器件工作机理的认识在不断深入,器件研制水平也在不断提升。本文旨在对这些特种器件进行综述,介绍相关器件的工作机理、关键技术和应用情况,也包括部分笔者所在课题组的研究进展。

## 1 反向开关晶体管 RSD

### 1.1 工作原理

在时间尺度上,RSD是微秒级器件,其基本工作原理是基于可控等离子层换流。

RSD是一种类晶闸管的二端子器件,与传统晶闸管在门极附近先开通、再扩散到芯片全面积的工作过程不同,它利用电压的短时间反向在全面积上形成一层很薄的、浓度梯度很高的可控等离子层,

之后改变外加电压极性,RSD在整个芯片上实现全面积均匀同步导通。其独一无二的换流特性使残余电压在前沿只有很小的突升,导通时换流损耗与准静态损耗相比很小,因此拥有高 $di/dt$ 耐量。RSD器件的 $di/dt$ 耐受能力能够达到 $60\text{kA}/\mu\text{s}$ 以上<sup>[5]</sup>。常规器件中,ABB公司制造的4500V GTO的 $di/dt$ 耐受能力能够达到 $30\text{kA}/\mu\text{s}$ <sup>[6]</sup>,采用插指门极结构的脉冲晶闸管 $di/dt$ 耐受能力能够达到 $20\text{kA}/\mu\text{s}$ <sup>[7]</sup>。

### 1.2 Si RSD

#### 1.2.1 器件结构

图1所示为RSD器件结构图,它是二端器件,由很多 $p^+npn^+$ 晶闸管元胞和 $n^+npn^+$ 晶体管元胞交替排列而成。RSD的工作过程一般需要磁开关配合,在预充过程解耦主电容高压。在预充过程积累充足的预充电荷量,保证预充等离子体在器件导通初期不耗尽,是RSD正常工作的关键<sup>[8]</sup>。

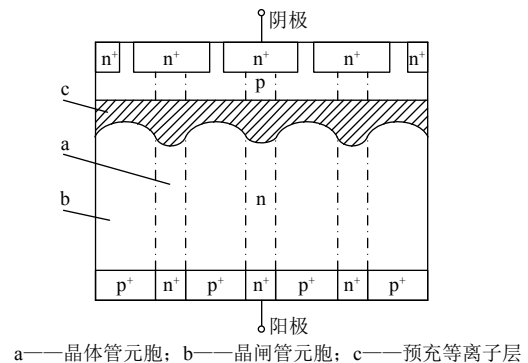


图1 RSD器件结构图

Fig. 1 RSD structure diagram

RSD通过短时反向电压开启。当施加低反向电压时,预充电流流过器件内含的 $n^+np$ 二极管,从而在集电极结附近形成了预充等离子层。在预充电流脉冲结束且电压极性反转后,等离子层的空穴注入p基极,并引起阴极侧发射区注入电子。在这个过程中,预充等离子层的等离子体受到阳极 $p^+$ 发射区注入空穴的补充而不耗尽,最终RSD全面积均匀导通。

#### 1.2.2 发展趋势

RSD从诞生至今,已经过30余年的发展,从近年来的报道看,其进一步的发展包括双向脉冲、高重频、亚微秒应用和集成模块化等。

2018年,约飞物理技术研究所对RSD的结构进行了优化改进<sup>[9]</sup>,采取了阴阳极短路点正对的方式,使得改进后的RSD在流过反向电流脉冲时比改进前的结构损耗低2倍,并且实现了流过脉宽为 $40\mu\text{s}$ ,正向电流和反向电流分别为 $90\text{kA}$ 和 $65\text{kA}$

的记录。这种新型结构的 RSD 为交流大功率电流脉冲应用场合提供了选择。

2019 年, 约飞物理技术研究所等单位开发了一种用于研究重复频率下 RSD 在有限散热条件和脉冲强度可控工况下开通过程的理论计算方法, 使得描述注入和传热子系统的非线性相互作用的多维问题得到简化, 基于此, 该单位提出了计算 RSD 最高频率工作的方法, 在改进后的耐压 2.5kV 的六层 n<sup>+</sup>p<sup>+</sup>pn<sub>0</sub>n<sup>+</sup>p<sup>+</sup>RSD 结构中, 面积为 1cm<sup>2</sup> 的 RSD 芯片能够开通数百 ns 电流脉冲, 单次脉冲传输能量为 0.25J, 重复频率达 30kHz<sup>[10]</sup>。

2011 年, 约飞物理技术研究所对 RSD 应用在亚微秒场合进行了研究<sup>[11]</sup>。结果表明, 当 RSD 应用在脉宽为 400ns 及以下的场合, 其损耗将会大幅增加, 并超过总能量的 20%; 当脉冲宽度为 600ns 及以上时, RSD 的损耗将降得很低, 并且展现出比常规晶闸管和 IGBT 更强的开关能力。随后, 约飞物理技术研究所提出了基于 RSD 的低触发阈值的触发方式, 并对 RSD 的结构进行了改进<sup>[12]</sup>。仿真结果表明: 通过在改进的 RSD 开关单元中实施这种新方法, 电流幅值可以实现(2~5)kA/cm<sup>2</sup>, 脉宽前沿时间为 100~200ns、电流上升率 dI/dt 约为(2~3)×10<sup>10</sup>A·cm<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 脉冲宽度约为 500ns。这些参数为 RSD 应用到亚微秒场合奠定了基础。

2020 年, 华中科技大学对 RSD 的时间抖动进行研究<sup>[13]</sup>, 这项工作的目的也是为了进一步探讨其在亚微秒窄脉冲中应用的可能性, 推广在高功率微波领域的应用。高功率微波为了实现更远的作用距离, 通常需要功率合成, 这对多路微波输出的一致性提出了要求, 通常, 可用开关时间抖动来评估这种一致性, 开关的时间抖动指多只开关的开通时延差的估计量。对于 RSD 而言, 单管的开通时延  $t_i$  由触发开关时延  $t_Q$ 、磁开关饱和时间  $t_{MS}$ 、固定时间  $T_1$  以及由 RSD 本身影响的时间  $t_R$  四部分构成。为了避免触发开关时延  $t_Q$  以及磁开关饱和时间  $t_{MS}$  影响单管 RSD 开通时延  $t_i$  的测量, 从而影响时间抖动的测量, 华中科技大学提出了 RSD 并联测试方案, 测试电路如图 2<sup>[13]</sup>所示。每次实验中, 同时检测 2 条 RSD 支路的电流波形, 得到 2 只 RSD 的开通时延差, 通过计算 2 只 RSD 开通时延差的估计量, 最终得到 RSD 开关的时间抖动。当主电容  $C_0$  从 2μF 到 5μF 变化, 主电压从 300V 到 700V 变化时, 测得 RSD 的时间抖动量级在 1ns 左右。

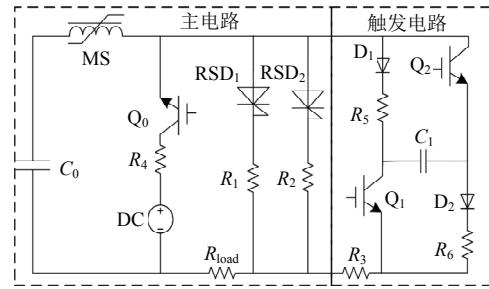
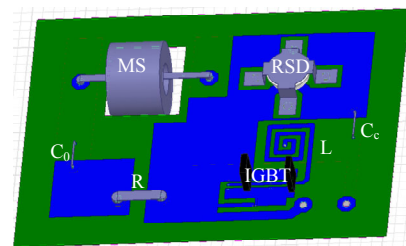


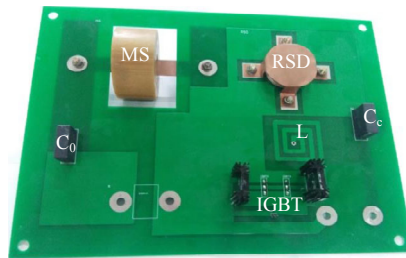
图 2 RSD 时间抖动测试电路图<sup>[13]</sup>

Fig. 2 Test circuit diagram of RSD time jitter<sup>[13]</sup>

2020 年, 华中科技大学展示了一个基于 RSD 的 PCB 板级集成脉冲功率模块<sup>[14]</sup>。现代脉冲功率技术对开关单元的功率密度、可靠性和可维护性提出了越来越高的要求。有些应用场合对体积限制严格, 希望装置尽量小型化; 有些应用场合需要获得极端参数, 如高 di/dt 输出, 这就要求尽量降低杂散参数。因此, 脉冲功率技术的发展也呈现出集成化、模块化的趋势。图 3 给出 RSD 的 PCB 板级集成模块有限元模型和对应实物照片<sup>[15]</sup>。采用谐振预充方式, 模块集成了 RSD 的主电路和预充电路, 具体包括 RSD、磁开关 MS、触发开关 IGBT、谐振电感 L、主电容 C<sub>0</sub> 和预充电容 C<sub>c</sub> 等元件。根据模块通流要求, 设计覆铜的面积。仿真结果显示, 主回路的等效电感为 155nH。为了明确模块的薄弱环节, 在不同主电压、频率等输入条件下检测了模块上的温度分布(主电压直接影响主电路电流和触发回路电流)。从图 4 的结果可以看到, 磁性元件的热稳定性较好, 塑封的 IGBT 器件具有最大的温升。



(a) 有限元模型



(b) 实物

图 3 基于 Si RSD 器件的 PCB 级集成模块<sup>[15]</sup>

Fig. 3 PCB-level integrated module based on Si RSD<sup>[15]</sup>

### 1.2.3 器件应用

俄罗斯基于 Si RSD 开发了各类脉冲发生器,

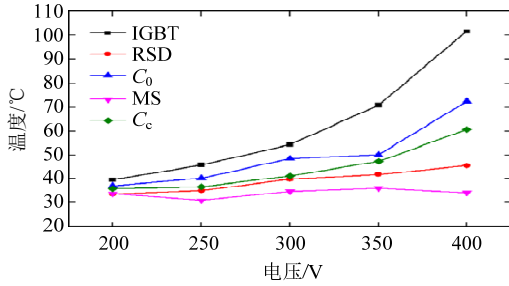


图4 不同放电电压下模块上的温度分布<sup>[15]</sup>

Fig. 4 Temperature distribution on the module under different discharge voltages<sup>[15]</sup>

应用在工业加热<sup>[20]</sup>、激光器泵浦<sup>[25]</sup>、废气净化<sup>[26]</sup>等系统中。表1列出了俄罗斯研究人员针对RSD设计的一系列装置。

表1 基于RSD装置参数

Table 1 Parameters of RSD-based devices

输出电压/kV	电流峰值/kA	脉冲宽度/ $\mu$ s	频率/kHz	参考文献
12	160	600	单次	[16]
12	250	300	单次	[17]
1.5	270	30	单次	[18]
25	300	600	单次	[19]
25	500	500	单次	[20]
16	150	25	单次	[21]
5	15	30	1	[18]
14	7	1.2	1	[22]
36	0.6	3	0.5	[23]
15	0.25	0.1	16	[24]
30	12	0.08	0.1	[25]
45	1.8	0.025	1.5	[26]
0.1	0.8	10	50	[20]
10	6	1.5	0.3	[27]
6	1	0.6	0.1	[28]

中国自主研发的Si RSD,也在国家的重大工程项目中达到32C的单次转移电荷量,在0.2Hz的重复频率下,寿命超过50 000次,总转移电荷量达到 $10^6$ C,能量转移达到5GJ<sup>[29-30]</sup>。

### 1.3 SiC RSD

#### 1.3.1 器件结构

华中科技大学率先提出宽禁带SiC RSD器件,并研制了芯片样品<sup>[114]</sup>。与Si RSD相比, SiC RSD有可预期的两方面优势:一是获得更高耐压的单只器件,在高放电电压等级下减少串联器件只数;二是利用SiC的高本征温度和高热导率,提升器件重复频率工作时的性能。

SiC RSD在设计之初,首先面临的是确定p、n型的问题,类似的SiC GTO、晶闸管器件均为p型,这是受衬底材料限制的。但是由于RSD是二端器件,有更多的自由度,考虑到SiC材料电子和空穴

迁移率相差7倍之多,比Si材料更甚,设计成n型在开关速度上更有优势,因此在2015年首次提出的SiC RSD结构具有n漂移区<sup>[31]</sup>。SiC RSD在制备上还存在深结结终端的问题,即主耐压结远离器件表面, SiC器件常用的平面终端在这里不适用,最后采用一种机械切割形成正斜角配合刻蚀修复的方法,即台面终端(如图5所示),完成了样片制备,这也是该器件比较有特色的地方<sup>[32]</sup>。

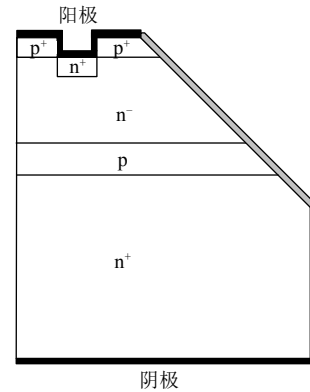


图5 台面终端的SiC RSD结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of SiC RSD with bevel edge termination

#### 1.3.2 重频建模

以固态脉冲发生器处理废气废水的工况为例<sup>[33]</sup>,华中科技大学通过建立器件的电热耦合模型来对比Si RSD和SiC RSD的重频特性<sup>[34]</sup>。器件和放电电路参数如下:最大放电电压3kV、器件阻断电压4.5kV、峰值电流2.5kA、脉宽1.5 $\mu$ s、最大di/dt 6kA/ $\mu$ s、重复频率1kHz。图6为单个周期中SiC RSD和Si RSD的电压电流仿真波形图,基本模拟了上述工况。图7给出二者晶格温度的仿真结果,图7(a)为最高温度变化情况,图7(b)为平均温度变化情况。当仿真运行10.542ms, Si RSD最高晶格温度相对初始值上升18K。对于SiC RSD,每一个脉冲之后温升很小且散热很快,因此这样的工况下晶格温度几乎没有变化。

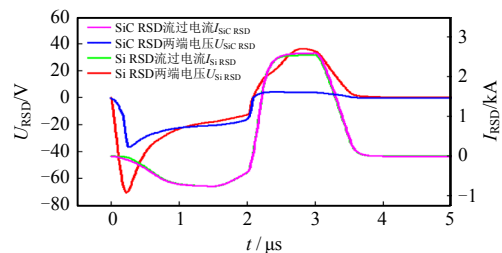


图6 单个周期内SiC RSD和Si RSD的电压电流仿真波形<sup>[34]</sup>

Fig. 6 Simulated waveforms of voltage and current of SiC RSD and Si RSD in a single cycle<sup>[34]</sup>

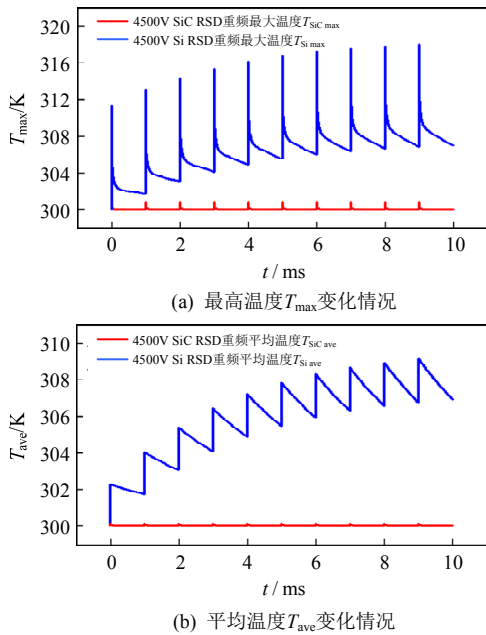


图 7 Si RSD 和 SiC RSD 的温升特性对比<sup>[34]</sup>  
 Fig. 7 Comparison of temperature rise between Si RSD and SiC RSD<sup>[34]</sup>

### 1.3.3 失效分析

由于 SiC 衬底材料的特点，在制备 SiC RSD 的过程中，无法如同 Si RSD 一样方便地在器件阴极引入短路点，因此 SiC RSD 的预充过程没有内含二极管通路，完全靠阴极发射结雪崩建立。在 SiC 外延和衬底材料还存在较多缺陷的情况下，这个雪崩过程容易造成芯片的失效。华中科技大学对失效的 SiC RSD 芯片进行了微观分析<sup>[34]</sup>。采用光子发射显微镜(poton emission microscopy, PEM)、扫描式电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)和聚焦离子束(focused ion beam, FIB)定位了芯片表面失效点，图 8 为失效点附近 SEM 局部放大照片，可以观察到一片熔融的退化区域，说明芯片局部曾经历高温过程，这可能是由雪崩引起的。进一步的，对芯片的纵向深度进行标示，在距离芯片表面 10~15 $\mu\text{m}$  处可清晰观察到一条晶格裂纹损伤，如图 9 所示。根据裂纹出现的位置，判断失效极有可

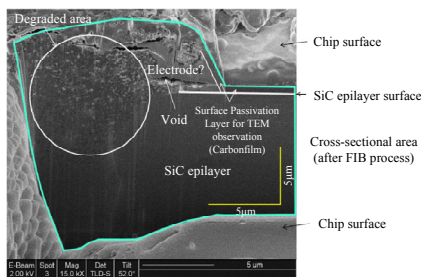


图 8 失效点附近 SEM 局部放大照片<sup>[34]</sup>  
 Fig. 8 Locally enlarged photos near failure point observed by SEM<sup>[34]</sup>

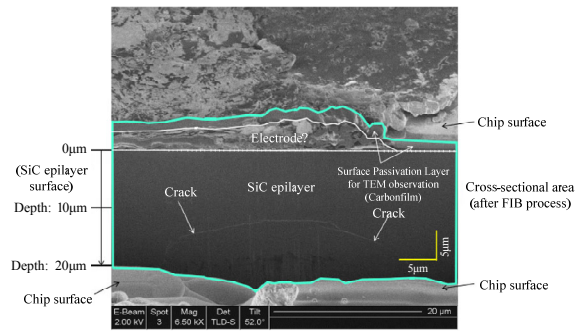


图 9 SEM 下晶格裂纹损伤<sup>[34]</sup>

能是因为在衬底和外延层之间存在界面缺陷。这些缺陷在快速开关时起到了泄漏点的作用，持续动作导致了结温的上升，最终外延层局部熔融，并和金属电极发生了反应。因此，高质量的 SiC 衬底和外延材料仍然是制备双极型器件的瓶颈。为了克服雪崩预充引起 SiC RSD 失效，一个可能的方案是减薄衬底，让阳极和阴极形成对称结构<sup>[35]</sup>。

## 2 漂移阶跃恢复二极管 DSRD

### 2.1 工作原理

在时间尺度上，DSRD 是纳秒级器件；其基本工作原理仍然是基于可控等离子层换流，不过 DSRD 是一种断路型开关，利用漂移阶跃恢复效应在纳秒时间内截断大电流。

由于电容储能密度与电场强度  $E$  的平方成正比，且电容充放电速度慢，导致介质长时间耐压，容易发生击穿；电感储能密度与磁感应强度  $B$  的平方成正比，且最高电场仅在向负载转移电流时的瞬间产生，电场强度对电感储能的限制不大，基本只需考虑  $B$  的影响。取合理的数值分别计算两者的储能密度发现，电感储能密度是电容的  $10^2 \sim 10^3$  倍<sup>[4]</sup>，一般可认为前者比后者高出 2 个数量级。电感储能的方式需要对应断路型开关，即利用开关的突然断路，将电感中储存的能量转移到负载上。这些断路开关需要满足大容量、开关动作快、高可靠性和高寿命等要求。DSRD 实质上与电力电子领域常用的软恢复二极管的反向恢复特性正好相反，是一种超硬恢复二极管。

国际上，研究 Si DSRD 的机构主要有：俄罗斯(约飞物理技术研究所和圣彼得堡电工大学)、以色列(索雷克核研究中心和特拉维夫大学)、伊朗(谢里夫理工大学)、美国(SLAC 国家加速器实验室)；研究 SiC DSRD 的机构主要有：俄罗斯(约飞物理技术研究所和圣彼得堡电工大学)、日本(筑波大学)。

### 2.2 Si DSRD

#### 2.2.1 器件结构

DSRD 具有较低浓度的施主掺杂区<sup>[36-37]</sup>。掺杂水平越低、迁移率越高，而迁移率决定漂移速度的大小。DSRD 的反向恢复过程载流子漂移速度很高，即实现了利用漂移机制恢复。

以一种典型的 p<sup>+</sup>-p-n-n<sup>+</sup>四层结构的 DSRD 为例，利用“双极漂移波”理论进行解释。当外加正向电流脉冲给二极管时，p 层和 n 层被充满电子空穴等离子体。之后改变电流方向，存储的等离子体被抽取，空穴朝 p<sup>+</sup>区移动，电子朝 n<sup>+</sup>区移动，即形成了“双极漂移波”——分别指 p 层靠近 p<sup>+</sup>区的等离子体前沿和 n 层靠近 n<sup>+</sup>区的等离子体前沿。双极漂移波分别朝两端移动，如图 10 所示。当正向存储电荷抽取完后，p 基区的多子(空穴)向阳极移动，n 基区的多子(电子)向阴极移动，两者的速度均为饱和载流子漂移速度 v<sub>s</sub>，同时空间电荷区开始形成，反向电流在纳秒时间内被截断。

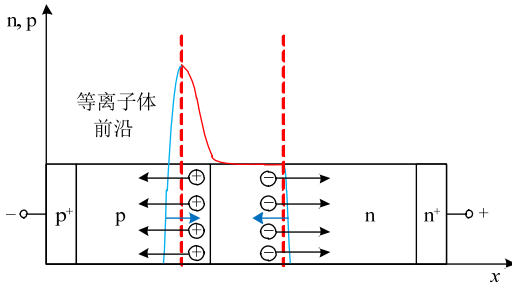


图 10 双极漂移波向两端运动

Fig. 10 Bipolar drift wave moving to both terminals

DSRD 获得纳秒恢复时间，主要需要 2 个条件：一是在恢复过程的初始阶段让在 p<sup>+</sup>-p 和 n-n<sup>+</sup>边界处形成的等离子体前沿的碰撞恰好发生在 p-n 结交界处；二是碰撞时的电流密度应该为

$$j_r \approx qN_d v_s \tag{1}$$

式中：q 为电子电荷；N<sub>d</sub> 为施主杂质浓度。

因此，电流中断时间约为

$$t_{off} \approx W_{SCR} / v_s \tag{2}$$

式中 W<sub>SCR</sub> 为空间电荷区 SCR 在正常工作电压下的宽度。

#### 2.2.2 器件特性

利用 DSRD 产生高压快速脉冲一般经历 3 个阶段，具体叙述如下。

第一阶段：正向预充阶段。该阶段 DSRD 通入正向电流，非平衡载流子注入，在 pn 结处积累大量电子空穴对，这段持续时间为 t<sub>+</sub>。控制正向预充

时间在百纳秒数量级，可以尽可能地减小载流子复合的影响。

第二阶段：预充电荷抽取阶段。在正向电荷预充阶段结束后，二极管外加电压由正向偏置变成反向偏置，器件流过一个反向电流，开始抽取正向预充的电荷。由于此时二极管体内仍有大量的自由电荷，因此器件仍然处于高导通状态，其两端电压不会急剧上升，而在负载上表现为输出一段上升率相对缓慢的电压，该阶段持续时间为 t<sub>-</sub>。实际中，可以通过控制基区掺杂分布来降低这段缓慢上升的电压大小，同时实现较高的反向电流密度<sup>[38]</sup>。这种电压上升的基座(pedestal)效应是由于深能级的俘获效应导致空穴浓度大于受主浓度和电子浓度，使得双极漂移波无法同时到达 pn 结处，造成器件两端承受一定电压，无法立刻关断。

第三阶段：反向恢复阶段。当注入的非平衡载流子被抽出后，开始抽取二极管本身基区的多数载流子，此时的抽取速率即为饱和漂移速率，空间电荷区形成，DSRD 快速关断，在负载上实现纳秒级上升沿的快脉冲。

图 11 是 DSRD 的典型开关过程，表 2 列出了 DSRD 的基本参数。

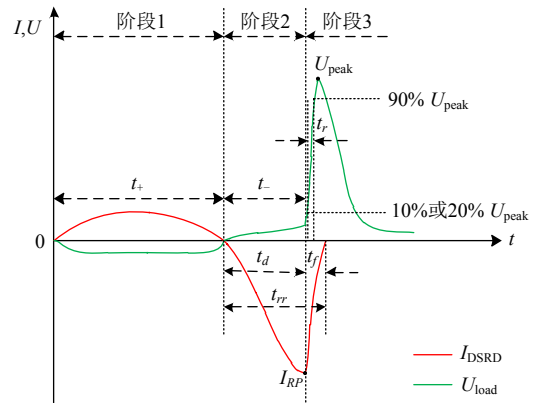


图 11 DSRD 的典型开关过程

Fig. 11 Typical switching process of DSRD

表 2 DSRD 的基本参数

Table 2 Basic parameters of DSRD

符号	参数含义
t <sub>d</sub>	延迟时间
t <sub>f</sub>	电流下降时间
t <sub>rr</sub>	反向恢复时间
I <sub>RP</sub>	反向电流峰值
t <sub>+</sub>	正向预充时间
t <sub>-</sub>	预充电荷抽取时间
t <sub>r</sub>	负载电压上升时间
U <sub>peak</sub>	负载电压峰值

图 12 所示的放电 LC 振荡电路是 DSRD 的典型电路，也是众多基于 DSRD 的脉冲发生器的原始拓扑。初始状态电容  $C_1$  和  $C_2$  先充电，极性如图所示，开关  $S_1$  闭合后， $C_1$  和  $L_1$  发生谐振，电流正向注入 DSRD，当谐振半周期后， $L_1$  反向对  $C_1$  充电，此时闭合  $S_2$ ， $C_2$  上的能量同样反向流过 DSRD，从而实现器件的快速关断，将电流全部转移到负载  $R$  上<sup>[2,37]</sup>。

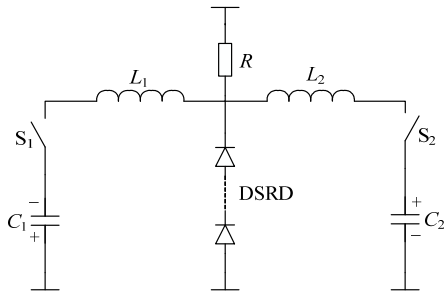


图 12 基于 DSRD 的放电 L-C 振荡电路  
Fig. 12 Discharging L-C oscillatory circuit based on DSRD

2.2.3 器件应用

图 13 所示为 DSRD 的一种典型应用电路<sup>[39]</sup>，其具体工作过程为首先闭合 MOSFET  $Q_1$ ， $V_{ff}$  通过  $L_2$ 、 $R_2$  为 DSRD 提供正向泵浦电流，同时  $V_{ee}$  给电感  $L_1$  充电，此阶段实现了 DSRD 的正向预充；随后断开  $Q_1$ ， $L_1$  中的电流通过二极管  $D$  和 DSRD 连续流动，DSRD 上流过反向电流并快速截断，负载  $R_1$  上形成一个陡前沿的高压脉冲。采用电感  $L_1$  充电，可将开关管个数减少 1 个，在实际设计中降低了开关器件延时的影响。

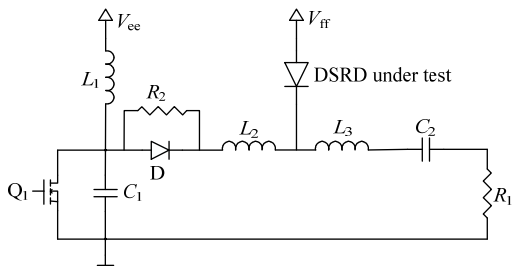


图 13 一种基于 DSRD 的典型应用电路<sup>[39]</sup>  
Fig. 13 A typical application circuit based on DSRD<sup>[39]</sup>  
(Copyright 2022 IEEE)

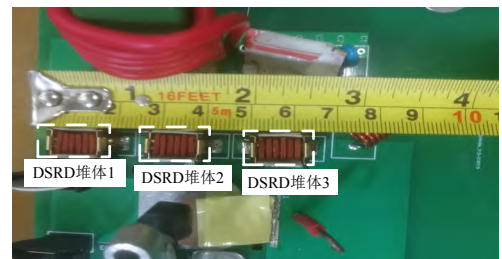
实际上，这种典型应用电路的本质是脉冲源，其中几个重要指标为脉冲电压峰值、上升时间和重复频率，国内外各研究机构高压脉冲源设计的主要指标如表 3 所示。

笔者所在研究团队自主研发了 DSRD 芯片，采用 6 只 DSRD 串联成为堆体。实验中，在串联的 3 个堆体上目前最高产生 9.92kV 峰值电压，上升沿

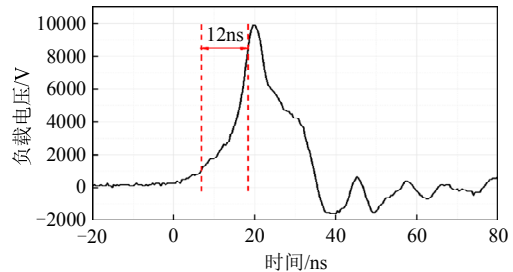
表 3 基于 Si DSRD 的脉冲源特性对比  
Table 3 Contrast of pulse generator characteristics based on Si DSRD

研究单位	脉冲电压峰值	脉冲电压上升时间	脉冲重复频率	发表时间
俄罗斯约飞物理技术研究所 <sup>[40-42]</sup>	80kV	0.9ns	1kHz	1997 年
	36kV	4ns	3.5kHz	2013 年
	17kV	4ns	8kHz	2016 年
韩国电子技术研究所 <sup>[43]</sup>	21kV	21ns	—	2005 年
以色列索雷克核研究所 <sup>[44]</sup>	10.3kV	1.85ns	—	2018 年
西安交通大学 <sup>[45-46]</sup>	38.2kV	7.1ns	400kHz	2020 年
	30kV	—	100kHz	2020 年
	140kV	—	25kHz	2020 年
中国工程物理研究院 <sup>[31]</sup>	8kV	4ns	—	2020 年
中科院高能物理研究所 <sup>[47-48]</sup>	7kV	4.2ns	—	2020 年

12ns。堆体和电压波形如图 14 所示。



(a) 堆体照片



(b) 输出电压波形

图 14 Si DSRD 堆体及其输出电压波形

Fig. 14 Si DSRD stack and its output voltage waveform

总的来说，DSRD 具有可靠性好、重复频率高、工作电流大、寿命长等系列优势，被广泛应用于电磁脉冲雷达<sup>[49-50]</sup>、探地雷达<sup>[51]</sup>、加速器<sup>[52]</sup>、超高速宽带光束偏转<sup>[53]</sup>、内燃机点火系统<sup>[54]</sup>、通信等领域。进一步地，这些从 DSRD 上输出的快速高压脉冲还可以作为一些对触发信号上升速度有较高要求的开关的触发，如硅雪崩器件 SAS<sup>[55-56]</sup>和下文将要介绍的快速离化晶体管 FID。除了脉冲领域，基于 DSRD 还可以制作高压直流电源，DSRD 触发模块代替了变压器和升压电路，该电源结构紧凑、重量轻、成本低<sup>[57]</sup>。

### 2.3 SiC DSRD

#### 2.3.1 器件结构

为了进一步突破 Si DSRD 的性能极限,文献[58]提出 SiC DSRD。SiC DSRD 的开关速度是 Si DSRD 的 2~4 倍(Si DSRD 的电压上升率  $dU/dt$  是 1V/ps, SiC DSRD 的电压上升率  $dU/dt$  是 2~4V/ps); 同等厚度的漂移区, SiC DSRD 可承受的击穿电压大约是 Si DSRD 的 10 倍; 相同功率损耗条件下, SiC DSRD 的平均脉冲重复频率可能比 Si DSRD 高 10 倍以上<sup>[59]</sup>。

SiC DSRD 主要有 2 种基本结构,如图 15 所示,一种是  $p^+-p_0-n^+$  三层结构<sup>[60]</sup>; 另一种是  $p^+-p-n_0-n^+$  四层结构<sup>[61]</sup>。与三层结构相比,四层结构的 SiC DSRD 恢复速度更快,即反向电流中断更快。这主要是因为  $p^+-p-n$ -结深的增加导致 DSRD 在经过正向泵浦后的反向恢复阶段中的高反向导通阶段时间增长,反向阻断恢复时间减小<sup>[61]</sup>。就器件结构中各层区域的功能而言,  $p^+-p-n_0-n^+$  四层结构的 DSRD 中,中等掺杂的 p 层作为“等离子体容器”(通过正向电流脉冲向该容器内注入载流子),轻掺杂的  $n_0$  层作为阻断层,而在  $p^+-p_0-n^+$  三层结构的 DSRD 中,  $p_0$  层要同时负责这 2 个任务<sup>[62]</sup>。此外,由于电子的迁移率高于空穴,因此以 n 型半导体作为漂移区的  $p^+-p-n_0-n^+$  四层结构有望实现更高的速度。

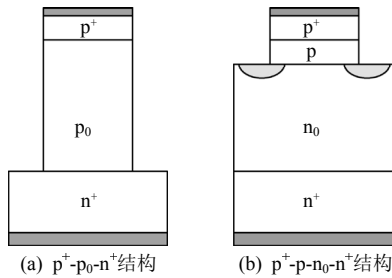


图 15  $p^+-p_0-n^+$ 和  $p^+-p-n_0-n^+$ 结构的 SiC DSRD<sup>[62]</sup>  
 Fig. 15 SiC DSRD of  $p^+-p_0-n^+$  and  $p^+-p-n_0-n^+$ <sup>[62]</sup>  
 (Copyright 2022 Springer Nature)

对于三层结构,2003 年, Grekhov 等人利用公式推算的方法设计出 100kV、1ns 的 SiC DSRD 堆体<sup>[60]</sup>。对于四层结构,2015 年,他们又提出了简单数学模型<sup>[62]</sup>。利用该模型,从理论上估算了围绕这些二极管构成的高压(2~10kV)脉冲发生器的极限电参数。需要注意的是,无论是三层还是四层结构的 SiC DSRD,都需要满足足够长的漂移区少子寿命要求(少子寿命应该至少比正向泵浦时间长 1 个数量级),以保证在正向泵浦阶段基区载流子复合可以忽略不计。具体地,对于 10kV SiC DSRD,漂移

区少子寿命应不小于 1 $\mu$ s。

华中科技大学首次提出将超结(super junction, SJ)结构引入 SiC DSRD,用 p、n 交替重复的柱形区替代低掺杂的 n 漂移区,以增强器件的硬恢复特性<sup>[63]</sup>。常规 DSRD 和 SJ DSRD 结构示意图如图 16 所示。

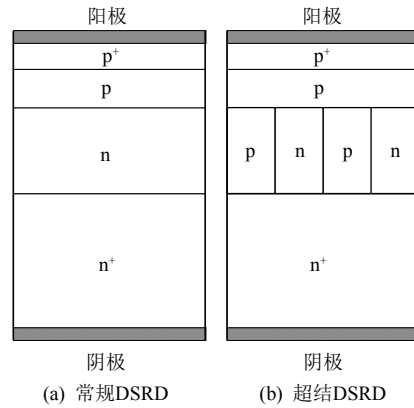


图 16 常规 DSRD 和超结 DSRD 的结构示意图<sup>[63]</sup>

Fig. 16 Schematic structures of conventional DSRD and SJ DSRD<sup>[63]</sup>

图 17 所示仿真结果表明,在外电路条件完全相同的条件下, SJ DSRD 可输出更大的反向电流峰值,反向电流下降时间更短,输出电压前沿上升率比常规 DSRD 增大 29%<sup>[63]</sup>。

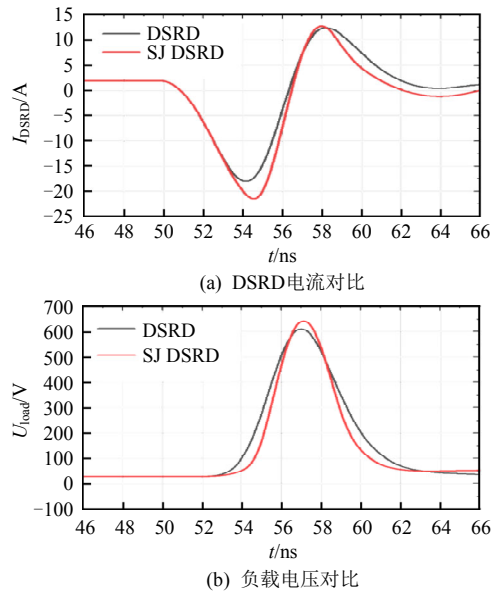


图 17 超结 DSRD 和常规 DSRD 的恢复过程对比<sup>[63]</sup>  
 Fig. 17 Comparison of recovery process between SJ DSRD and conventional DSRD<sup>[63]</sup>

#### 2.3.2 关键工艺

在终端结构方面,根据 SiC DSRD 具有一层中等掺杂 p 基区的结构特点,华中科技大学针对其提出 3 步刻蚀 JTE 终端<sup>[64-65]</sup>,如图 18 所示。JTE1、JTE2、JTE3 分别表示 3 个台阶。通过 TCAD 仿真



设计了具有较大刻蚀工艺窗口的多台阶终端。台阶结构通过等离子体刻蚀形成，刻蚀过程中成功克服了碳化硅的微沟槽(microtrench)问题，提高了终端的可靠性，具有 3 步刻蚀 JTE 终端结构的 SiC DSRD 的 SEM 下的照片如图 19 所示。

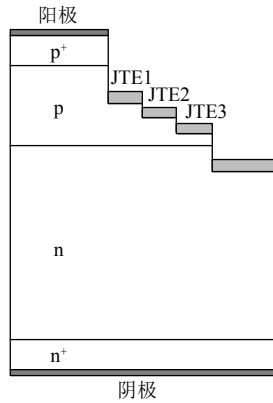


图 18 3 步刻蚀 JTE SiC DSRD 结构示意图  
Fig. 18 Schematic structure of SiC DSRD with 3-step etched JTE termination

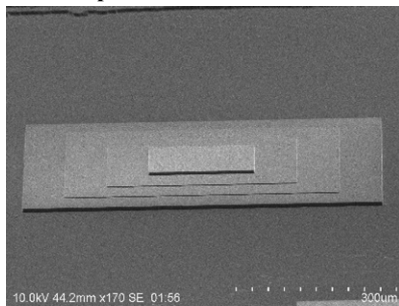


图 19 3 步刻蚀 JTE 的 SiC DSRD 的 SEM 照片  
Fig. 19 SEM photo of SiC DSRD with 3-step etched-JTE termination

### 2.3.3 器件特性

表 4 总结了文献报道的 SiC DSRD 阻断电压和通态压降。目前，单管阻断电压从 kV 级到 10kV 级都有，堆体最高可以达到 30kV，是通过 15 只管芯串联而成的。

表 4 文献报道的 SiC DSRD 阻断电压及通态压降总结  
Table 4 Summary of breakdown voltage and on-state voltage for reported SiC DSRD

器件类型	阻断电压	通态压降	参考文献
单管	1.5kV	2.6V	[66]
	2.1kV	2.4V	[67]
	2.8kV	2.8V	[68]
	6.2kV	2.6V	[65]
	10.9kV	—	[69]
4 只堆	6.0kV	10.8V	[66]
8 只堆	11.8kV	21.6V	[66]
5 只堆	14.0 kV	—	[68]
3 只堆	6.0 kV	7.2V	[67]
15 只堆	30.0 kV	36.0V	[67]

SiC DSRD 动态特性测试对正向泵浦时间的要求比 Si DSRD 更短，这是因为 SiC 材料的少数寿命比 Si 更短。正向泵浦时间过长会导致大量载流子复合。温度会影响载流子寿命，在 1kV 的 SiC DSRD 上进行实验，发现温度从 300K 增加到 673K，非平衡载流子寿命从 250ns 增加到 1.4 $\mu$ s<sup>[70]</sup>。研究表明，可以通过电致发光光谱技术进行非接触式的 SiC DSRD 温度测量，实验证明温度越高，注入越有效，非平衡载流子的积累越好<sup>[71-72]</sup>。此外，文献[73]提到通过提高杂质的电离度来提高 p<sup>+</sup>发射区的电子积累从而减少二极管结构中的电荷损失也是将来的一个研究方向。在 DSRD 的动态测试中，有 2 个重要的电气参数，分别是负载电压峰值  $U_{peak}$  和负载电压上升时间  $t_r$ ，目前国内外能做到的水平如表 5 所示。

表 5 文献报道的 SiC DSRD 动态特性总结<sup>[60,66-71,74-75]</sup>  
Table 5 Summary of dynamic characteristics for reported SiC DSRD<sup>[60,66-71,74-75]</sup>

研究单位	堆叠方式	负载电压峰值/V	负载电压上升时间/ns	年份
俄罗斯圣彼得堡电		400	4	2003
工大学和约飞研究		1440	0.5	2013
所 <sup>[60,70-71,74-75]</sup>	单管	1125	1.6	2015
		1810	0.49	2016
		1800	1.05	2016
电子科技大学 <sup>[69]</sup>		10560	1.75	2020
俄罗斯圣彼得堡电	8 只堆叠	10500	0.9	2016
大学和约飞研究	15 只堆叠	30500	1.6	2018
日本筑波大学 <sup>[68]</sup>	5 只堆叠	11000	2.3	2018

图 20 给出笔者所在团队制备的 2 只串 10kV 级 SiC DSRD 堆体的正向 I-V、反向 I-V 曲线，以及动态特性测试波形。捕获参数为：通态压降 5.2V，阻断电压在 10.44kV 时漏电流仅 1.28 $\mu$ A；堆体中的单只器件可在 0.82ns 快速上升沿下输出 2150V 高压。

## 3 快速离化晶体管 FID

### 3.1 工作原理

在讨论过微秒级、纳秒级时间尺度的器件以后，如果要更快，就进入到皮秒级。这里所说的皮秒级，并非真的快到几个 ps(至少目前的水平没有达到)，而是指的进入亚纳秒，一般在几百至几十 ps。到了这个时间尺度，从应用层面已经进入高功

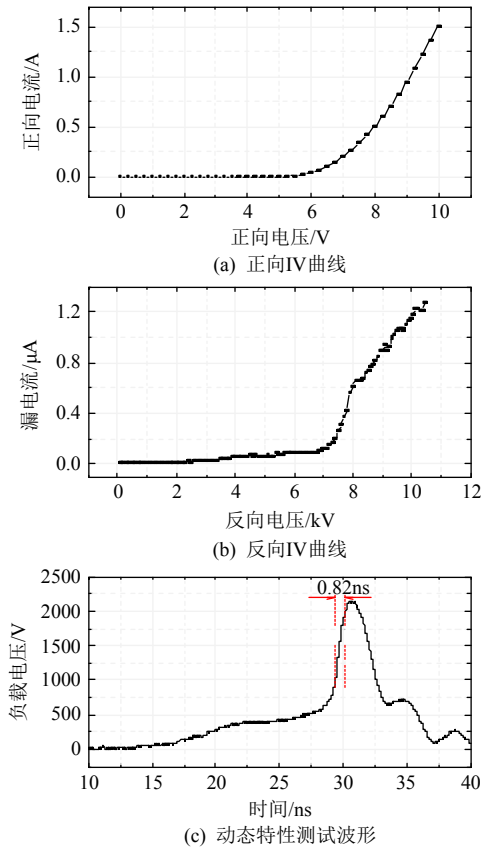


图 20 10kV 级 SiC DSRD 堆体的静态特性和动态特性  
 Fig. 20 Static and dynamic characteristics of 10kV SiC DSRD stack

率微波领域，从器件机理的角度，约飞物理技术研究所提出的是“借助延迟冲击电离波开通”，不同于微秒级和纳秒级器件的“借助预充可控等离子层开通”。FID 是可以实现上述功能的器件，同样为两端器件，是闭合型开关。

延迟冲击电离波理论最早由 I. V. Grekhov 等人提出<sup>[76]</sup>。在结构为  $p^+-n-n^+$  的二极管上施加电压变化率大于  $1kV/ns$  的反向电压脉冲时，当二极管两端电压达到静态击穿电压后，二极管不会立即击穿，而是会延迟一段时间，在器件两端承受 2~3 倍过压后，在数百 ps 内迅速导通，此即延迟冲击电离波现象。进一步地，他们提出延迟冲击电离波的触发机制以及物理过程<sup>[77]</sup>，类似于等离子体雪崩触发过障二极管 (trapped plasma avalanche triggered transit, TRAPATT) 中电离波的产生以及发展的过程<sup>[78]</sup>。这为延迟冲击电离波的物理机制研究提供了一个重要的方向。

延迟冲击电离波是半导体中非光控器件的最快导通机制。尽管其触发机制和物理过程已经有了一般性的解释，但是关于触发过程中的初始载流子来源以及随后的动态过程仍然没有确定的结论，因

此对其进行的理论分析以及仿真研究仍是当前热点。文献[79]建立了碰撞电离击穿模型，通过对  $p^+-n-n^+$  结构在电压上升率为  $2kV/ns$  的触发脉冲，以及无初始偏置电压情况下的仿真，解释了延迟雪崩击穿现象的前沿触发的延时原因，验证了器件内部类似 TRAPATT 二极管中前沿传播的物理过程。器件内部电场变化情况如图 21(a)—(c) 所示。在图 21(a) 中，随着器件两端电压的升高，器件内部电场升高至临界击穿电场以上，但由于没有初始载流子，并没有立即击穿。在图 21(b) 中，n 基区中性部分电离产生的空穴到达 pn 结附近，pn 结附近开始发生强烈的电离，电场强度迅速下降。在图 21(c) 中，电离区域周围电场强度增加，导致 n 基区中电离区域向左侧迅速扩展，器件内部产生大量电子-空穴等离子体。

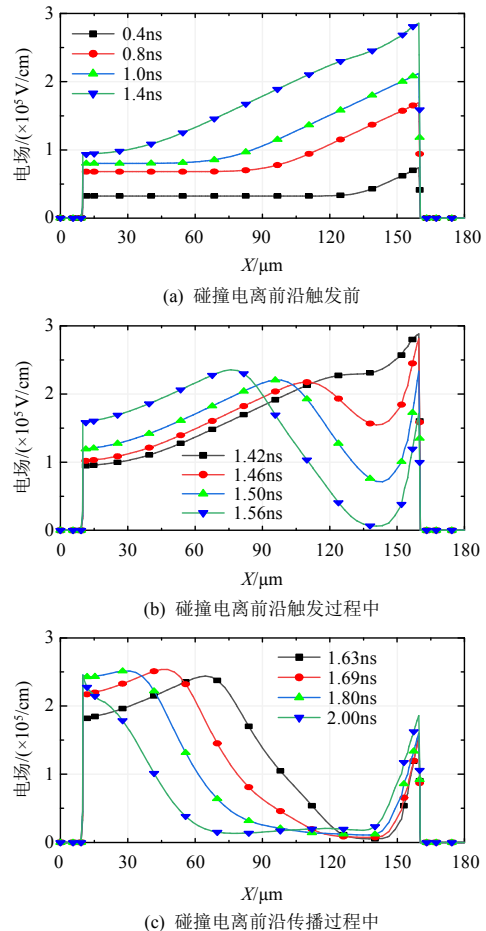


图 21  $p^+-n-n^+$  结构内部电场变化过程  
 Fig. 21 Changing process of internal electric field of  $p^+-n-n^+$  structure

但是以上模型并不能解释触发脉冲的电压上升率为  $1kV/ns$ 、初始偏置电压大于  $600V$  和 n 基区长度为  $220\mu m$  以上器件结构的实验结果。因此，文献[79]认为触发电离前沿的初始载流子除了可能

来自于中性 n 基区的电离，还可能来源于深能级陷阱。进一步的理论分析和仿真模拟验证了这个猜想<sup>[80-82]</sup>。在此基础上，基于深能级陷阱产生初始载流子的触发机制，通过特殊的工艺过程，制造出了 FID 器件的第二代结构——深能级晶体管(deep level dynistor, DLD)。相比于传统 FID，DLD 导通后的残余电压减小到 1/3 左右，改善了器件特性。

文献[83]通过对 2 组结构参数相同，但经过不同工艺处理的器件进行测试研究，结果表明不存在深能级陷阱的器件也能表现出同样的开关特性。因此，文献[83]认为除了深能级陷阱，初始载流子还有其他来源。此外，文献[84-89]对基于延迟雪崩电离器件的导通过程进行了仿真研究，针对 n 基区长度大于 220 $\mu\text{m}$ ，不适合用 TRAPATT 机理解释的情况，探讨了其他的亚纳秒导通机制。

### 3.2 器件结构

FID 的基本结构如图 22(d)所示<sup>[90]</sup>。初始时刻，FID 两端阻断正向电压，器件内部 pn 结附近建立起空间电荷区。随后，在器件两端施加电压变化率大于 1kV/ns 的触发脉冲，在这个过程中，器件内部电场强度迅速升高，如图 22(a)所示。pn 结附近电场强度超过临界击穿电场，由于空间电荷区没有自由载流子，因此 pn 结附近不会立即发生电离。碰撞电离的延迟条件为，位移电流( $\epsilon dE/dt$ )大于传导电流，如式(3)所示。

$$\frac{dE}{dt} > \frac{qv_s Q}{\epsilon} \quad (3)$$

式中： $Q$  为载流子浓度； $\epsilon$  为硅的相对介电常数。

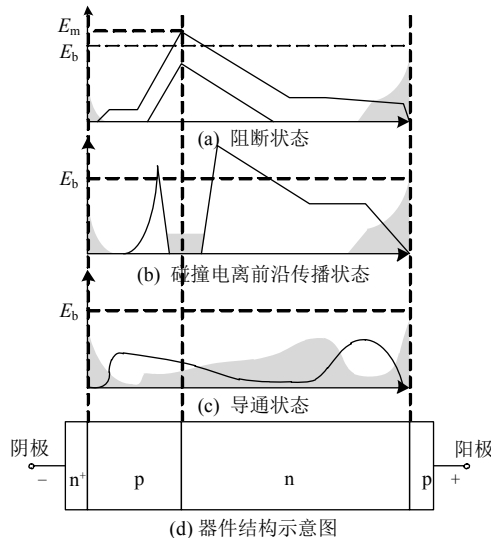


图 22 FID 开通过程电场分布

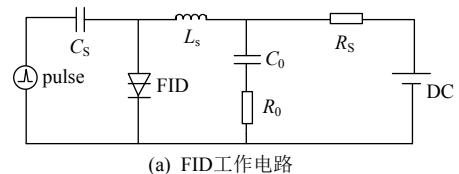
Fig. 22 Electric field distribution during FID turn-on process

在器件两端承受 2 倍到 3 倍过压时，如图 22(b)所示，从 n 基区中性部分电离的空穴达到 pn 结附近，引发强烈的碰撞电离，产生大量电子-空穴等离子体，电离区域的电场强度因此迅速下降，两侧未电离区域电场迅速增强，如图 22(c)所示，引发进一步的碰撞电离，从而推进电离区域向器件两端扩展，使器件从阻断转换为导通状态。器件导通后，两端最大压降  $U_{ms}$  可由式(4)表示。

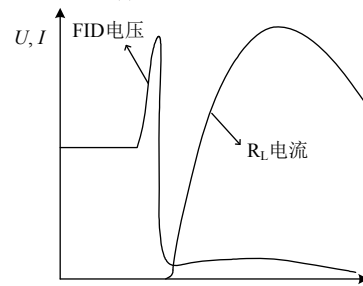
$$U_{ms} \approx E_0 W \approx \sqrt{\frac{2}{qn_0} \cdot \frac{dj}{dt} \frac{W^2}{\mu}} \quad (4)$$

式中： $j$  为流过器件的电流密度； $n_0$  为器件导通后平均等离子体浓度； $W$  为 n 基区和 p 基区总长度； $\mu$  为迁移率。

FID 器件工作电路的一般拓扑结构如图 23(a)所示。图中： $V_{pulse}$  为提供电压上升率大于 1kV/ns 的触发脉冲电源；DC 为供电的直流电源；电容  $C$  为储能电容；电容  $C_s$  为隔离电容；电感  $L_s$  为带饱和铁芯的非线性电感器； $R_L$  为负载电阻； $R_s$  为限流电阻<sup>[90]</sup>。在触发过程中，电感  $L_s$  将触发回路与主放电回路分隔开，提高触发效率。FID 触发导通后，电容  $C$  通过 FID 器件迅速放电，在负载上产生如图 23(b)中所示波形。



(a) FID 工作电路



(b) 负载波形图

图 23 FID 工作电路及负载波形图

Fig. 23 FID working circuit and load waveform

在 FID 导通过程中，电离前沿的传播速度大于载流子的饱和速度，从而突破了由于载流子存在最大饱和速度造成的器件开通时间限制。进一步的测试表明<sup>[91]</sup>，FID 有着其他半导体器件无法兼具的特性，即单个 FID 器件的工作电压超过 5kV，开通时间小于 1ns，重复频率可达 50kHz，抖动时间小于 20ps 等。

### 3.3 发展趋势

随着 FID 器件两端电压的增加，器件内部电场强度逐渐升高。当初始载流子出现在空间电荷区后，器件内部开始发生碰撞电离。因此，初始载流子的出现时刻决定了器件两端能够达到的最大电压，而器件两端达到的最大电压又决定了开关过程的特性参数，例如前沿速度、开通时间、等离子体浓度以及残余电压。FID 器件的初始载流子来源机制为 n 基区中性区域的碰撞电离，因此 FID 器件有着较厚的 n 基区，这导致了器件导通后有着较高的残余电压。

为了改善 FID 器件特性，约飞物理技术研究所基于新的载流子来源机制——深电子陷阱的场增强电离，提出了 FID 器件的第二代结构，即 DLD 器件。如图 24 所示，DLD 有着与 FID 类似的  $p^+ - n - p - n^+$  四层结构。当器件内部电场强度达到  $(2 \sim 3) \times 10^5 \text{ V/cm}$  时，深能级陷阱开始电离，随着电场强度的进一步升高，陷阱的发射率快速增加。因此，器件不再需要通过 n 基区的中性区域的碰撞电离来提供初始载流子，DLD 器件可以显著缩短 n 基区厚度，从而降低导通过程中的残余电压。静态阻断电压均为 2.3kV 的 FID 器件，以及 DLD 器件的导通过程对比情况如图 25 所示，可见导通后 FID 两端的残余电压大约为 200V，而 DLD 只有几十伏。因此，DLD 器件有着比相同电压等级的 FID 器件更好的导通特性。

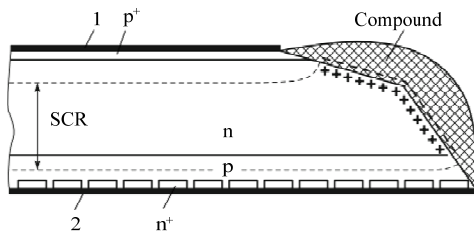
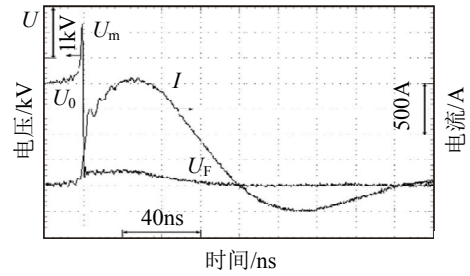


图 24 DLD 器件结构示意图<sup>[92]</sup>

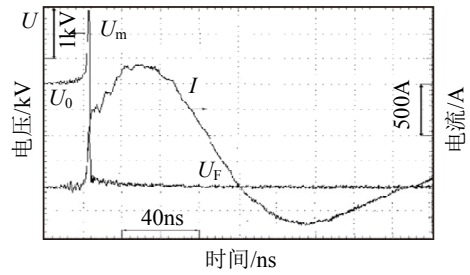
Fig. 24 Schematic diagram of DLD structure<sup>[92]</sup> (Copyright 2022 Springer Nature)

冲击离子晶体管(shock ionized dynistor, SID)可以看作是 FID 的第三代结构，其阳极和阴极都引入了短路点，如图 26 所示。这种结构的设计虽然牺牲了器件的反向阻断能力，但是相比于常规的 FID，器件 n 基区宽度可显著减小，从而降低开通损耗。静态阻断电压均为 3.5kV 的 FID 和 SID 器件的导通过程对比如图 27 所示，可以清楚地看到 SID 残余电压更低的优势。

应用商用 TCAD 工具对 FID 进行器件建模，部



(a) FID开通过程



(b) DLD开通过程

图 25 FID 和 DLD 开通过程对比<sup>[80]</sup>

Fig. 25 Comparison of turn-on process of FID and DLD<sup>[80]</sup> (Copyright 2022 IEEE)

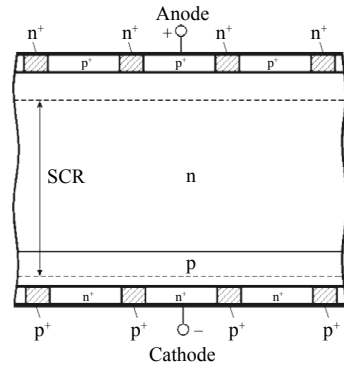


图 26 SID 器件结构示意图<sup>[93]</sup>

Fig. 26 Schematic diagram of SID structure<sup>[93]</sup> (Copyright 2022 Springer Nature)

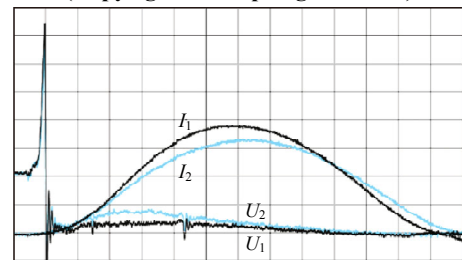


图 27 FID ( $I_2, U_2$ )与 SID ( $I_1, U_1$ )开通过程对比<sup>[93]</sup>

Fig. 27 Comparison of turn-on process between FID ( $I_2, U_2$ ) and SID ( $I_1, U_1$ )<sup>[93]</sup> (Copyright 2022 Springer Nature)

分特性无法有效模拟，而相关模型也没有修改的自由度。笔者所在研究团队针对这一问题对 FID 进行了更底层的物理建模，从基本的半导体物理方程出发，编写求解程序，搭建数值仿真环境。考虑的器件内部物理效应包括：重掺杂导致的禁带变窄、高电场强度下的迁移率饱和、SRH 复合、Auger 复合

以及碰撞电离。仿真器件元胞结构如图 28 所示。进行数值仿真时，对结构离散化，即网格划分。迭代求解的变量值即为每个网格点上的变量值。通过建立底层模型，获得的器件两端电压电流波形结果如图 29 所示，器件两端电压在 100ps 左右跌落，成功模拟了亚纳秒开通特性。该底层物理模型比 TCAD 模型显示了更快的仿真速度，并为 FID 进一步的机理研究提供手段。本团队还设计并制备了电压等级为 3kV 的 FID，器件样品如图 30 所示。采用同样是我们自主研制的 DSRD 器件对 FID 进行了触发测试，FID 的开通电压电流波形如图 31 所示。

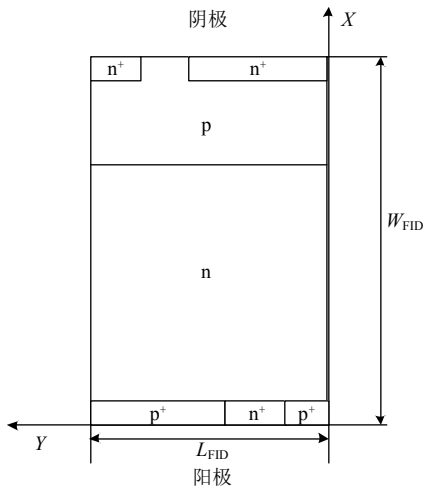


图 28 数值仿真的 FID 元胞结构

Fig. 28 FID cell structure of numerical simulation

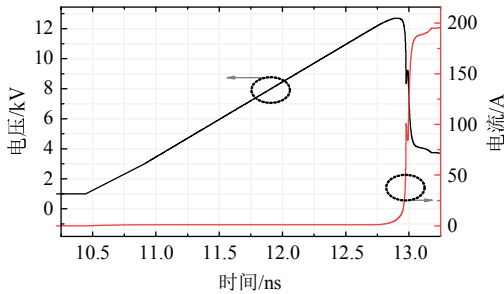


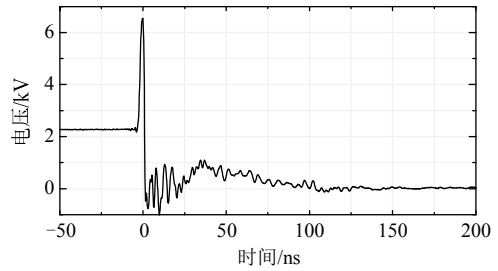
图 29 底层物理模型仿真得到的 FID 电压电流波形

Fig. 29 Voltage and current waveforms of FID obtained by numerical model simulation.

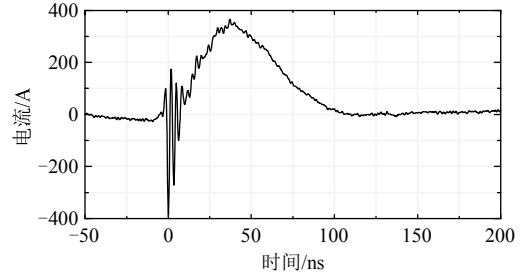


图 30 3kV FID 器件样品

Fig. 30 Sample of 3kV FID



(a) FID 开通电压波形



(b) FID 开通电流波形

图 31 FID 开通电压电流波形

Fig. 31 Voltage and current waveforms in turn-on experiment of FID

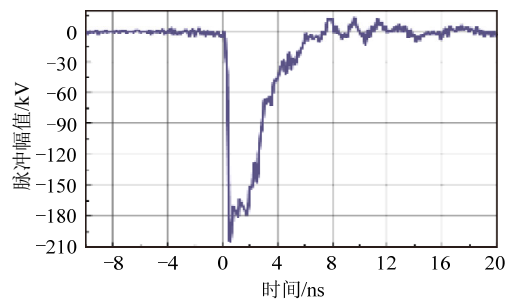
FID 器件导通时间为 554ps，通过峰值电流 366A。

### 3.4 器件应用

基于 FID 和 DSRD 器件，约飞物理技术研究所构建了一系列全固态脉冲发生器<sup>[94-100]</sup>，可兼具传统脉冲发生器不能同时获得的特性：产生的脉冲上升时间在数十至数百 ps，脉冲峰值功率可达数十 GW，重复频率达数 kHz。例如，如图 32 所示，型号为 FPG 200-1PN 的脉冲发生器，其尺寸为 480×500×160mm<sup>3</sup>，在 50Ω负载上输出的脉冲最大幅值可达 200kV，脉冲上升时间 200ps，脉冲持续时间 1ns，



(a) 脉冲发生器



(b) 输出脉冲

图 32 FPG 200-1PN 型脉冲发生器和输出脉冲<sup>[101]</sup>

Fig. 32 FPG 200-1PN pulse generator and output pulse<sup>[101]</sup> (Copyright 2022 Springer Nature)

最大重复频率 1kHz<sup>[101]</sup>。

文献[102]基于 DLD 和 DSRD 器件，构建了如下工作参数的脉冲发生电路：输出电压脉冲幅值 20kV，上升时间 0.3ns，脉冲持续时间 10ns，重复频率 100Hz。文献[103]提出使商业晶闸管工作在类似于 DLD 和 FID 的延迟雪崩击穿模式。文献[104-105]报道了利用工作在延迟雪崩击穿模式的晶闸管，完成了开关导通时间在 200~400ps、最大脉冲电流峰值 114kA、脉冲电流上升时间 5.2μs 的脉冲放电实验。

为了清晰呈现这一系列器件的特点，在表 6 中总结了现有实验报道中 RSD、DSRD、FID 的主要电气参数的上限及其典型应用。目前推广应用的主要是硅基器件，碳化硅基仍处于基础研究阶段。

表 6 半导体脉冲功率器件上限参数与应用总结 (依据文献中的实验报道)

Table 6 Summary of parameters and applications for semiconductor pulsed power devices (According to experiment report)

器件类型	时间尺度	最高阻断电压	最大单管电流	典型应用
RSD 闭合	微秒至亚微秒	单只 6.5kV; 堆体 90kV	500kA	水净化器 <sup>[106]</sup> 、静电除尘器 <sup>[107]</sup> 、功率换向器 <sup>[108]</sup> 、kHz 波段发生器 <sup>[109]</sup>
DSRD 断路	纳秒至亚纳秒	单只 3kV; 堆体—	600A	电磁脉冲雷达 <sup>[49-50]</sup> 、加速器 <sup>[52]</sup> 、内燃机点火系统 <sup>[54]</sup> 、污染处理 <sup>[43]</sup>
FID 闭合	几百至几十皮秒	单只 5kV; 堆体 40kV	10kA	高功率微波源、氮气激光器电源、RSD 器件的触发系统 <sup>[80]</sup>

### 4 脉冲功率器件封装方案

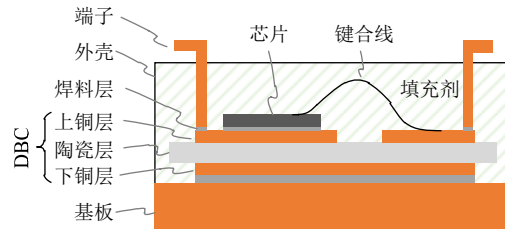
半导体脉冲功率器件工作在比较极端的条件下，除了芯片本身达到相关参数范围要求，要真正发挥出器件性能，封装技术同样重要。对封装的要求主要体现在绝缘耐压、寄生参数优化、重频时的散热能力、大电流能力和高可靠性。

#### 4.1 单只芯片封装

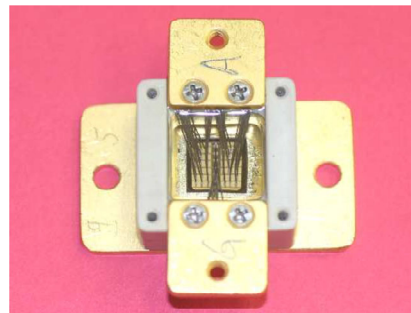
单只芯片的脉冲功率器件封装方案包括焊接型和压接型。

焊接型封装典型结构如图 33(a)所示，从上至下分别是芯片、上焊料层、DBC 上铜层、DBC 陶瓷层、DBC 下铜层、下焊料层、基板七层结构。

图 33(b)是美国军事研究实验室对 SiC SGTO 进行的焊接型封装，这里没有包含 DBC 结构，正面采用 36 根铝线键合互连，背面采用纳米银烧结(也属于焊接工艺)在基板上，塑料框架中填充硅胶环氧<sup>[110]</sup>。



(a) 焊接型封装结构

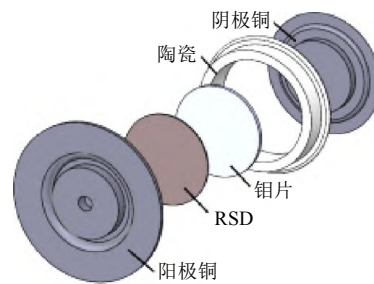


(b) 焊接型封装的 SiC SGTO<sup>[111]</sup>

图 33 焊接型封装结构与实物

Fig. 33 Soldered packaging structure and physical object (Copyright 2022 Springer Nature)

压接型封装一般具有更高的通流能力，且具有双面散热、寄生参数小等优势，在脉冲功率器件中应用更加广泛。华中科技大学研制的 RSD 器件采用了压接型封装<sup>[14,111]</sup>，其结构与实物图如图 34(a)、(b)所示。压接型封装结构包括阴极和阳极的铜块、功率芯片、钼片以及陶瓷件。



(a) 压接型 RSD 封装结构



(b) 压接型封装的 RSD

图 34 压接型封装结构与实物<sup>[14]</sup>

Fig. 34 Press-pack packaging structure and physical object<sup>[14]</sup>

相比于焊接型封装，压接型封装的散热性能存

在一定优势。焊接型封装中，硅凝胶、或环氧树脂等填充剂热导率很低，基本不传导热量，因此芯片产生的热量只能通过芯片下方路径传递并散出。而压接型封装中，存在芯片上下方两条传热路径，热阻相对较低，因此具备更优的散热性能，更有利于工作在对散热要求更高的重频工况下。

#### 4.2 串联堆体封装

脉冲功率领域的应用大多有较高电压等级，在单只器件耐压无法满足的情况下，多芯片串联组成堆体是很好的替代方案，即将多只芯片垂直放置，芯片间置有连接材料，通过压接或者焊接方式互连，如图 35 所示。串联堆体结构没有键合引线和端子，最大限度降低了寄生电感，有利于其动态性能的发挥和减小电磁干扰。

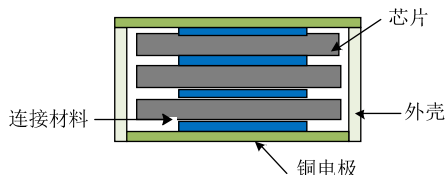


图 35 脉冲功率器件堆体结构示意图

Fig. 35 Schematic diagram of stack structure of pulsed power devices

堆体结构需要特别考虑电压不均衡、合理的芯片串联数目、电场集中、重频时中部芯片散热等问题。从电动力学的角度，电磁波沿堆体的传播时间  $\tau_{ws}$  应小于开关时间  $\tau_f$ ，即式(5)，以此限制堆体芯片的数目<sup>[66-67]</sup>。

$$\tau_{ws} = W_s / c_{EM} < \tau_f \quad (5)$$

式中： $W_s$  是堆体长度； $c_{EM}$  是电磁波在半导体中的传播速度。

俄罗斯研制 30kV SiC DSRD 堆体<sup>[67]</sup>，如图 36(a) 所示，它由 15 只 2kV SiC DSRD 芯片串联而成。为了提高堆体整体可靠性，引入“子堆体”结构，即将 3 只芯片先形成 6kV 的子堆体，如图 36(b) 所示。

除上述单只芯片和多只芯片串联封装外，近些年为应对工业领域对高重频和紧凑的需求，集成化和模块化也成为脉冲功率技术的发展趋势。针对脉冲功率领域的器件集成化研究，除如上述图 3 所示的基于 RSD 的 PCB 板级集成脉冲功率模块外<sup>[14]</sup>，中国工程物理研究院<sup>[112]</sup>、清华大学<sup>[113]</sup>等机构也进行了深入研究。2014 中国工程物理研究院研制出一种阻抗 6Ω、功率 2.5GW 的长脉冲功率模块；2015 年清华大学实现基于半导体开关的模块化的高重频 LTD 系统，其由多个模块共同组成，每个模块中是

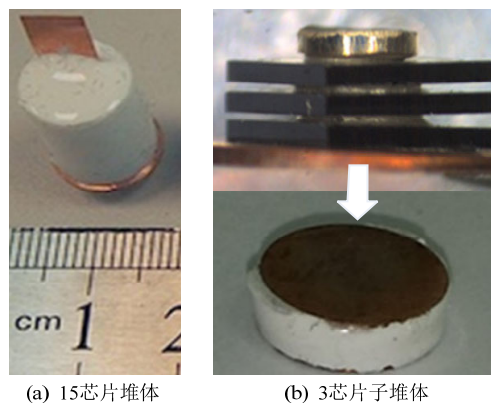


图 36 30kV SiC DSRD 实物图<sup>[67]</sup>

Fig. 36 Sample of 30kV SiC DSRD<sup>[67]</sup>

(Copyright 2022 Trans Tech Publications)

使用 MOSFET 作为开关，能够通过驱动信号的控制来产生所需求的输出波形。集成化和模块化技术虽然具备高功率密度、低寄生参数、通用性等优点，但是也对封装设计提出了新的挑战：1) 为实现高功率密度，器件体积会非常小，元件间距减小，这就会加剧电磁干扰问题，可能导致器件或装置固有性能受损，乃至影响邻近装置的工作；2) 由于体积小，使热管理技术也被提出了更高的要求，其将直接影响装置的性能以及可靠性。

综上，封装技术的优化对于脉冲功率器件完美发挥器件优势具有重要作用，比如重频工况对热管理技术提出了更高的要求；快速开关对脉冲功率模块寄生参数提出了更高的要求；高电压等级对模块的绝缘性能提出了更高的要求，等等。在宽禁带半导体脉冲功率器件上的体现尤为突出。因此，脉冲功率器件封装技术也是一个重要的研究方向。

## 5 结论

半导体脉冲功率开关器件 RSD、DSRD、FID 是专门为脉冲功率领域的应用研发的，它们都是二端器件，有各自特殊的结构和工作原理。它们在设计上都最大限度的适应了脉冲功率工况的特点。以 RSD 器件为例，虽然普通晶闸管的门阴极经过复杂设计之后，也能达到类似的参数，但付出的代价更大。至于 FID 器件能达到的性能，则很难找到替代者，几乎就是最好的选择。由于它们都是某些系统的核心器件，所以具有非常明确的研究价值。

对于 Si 基器件，RSD 追求的是进一步提升通流能力，满足数百 kA 级的大电流放电，并保证可靠性，这样可以更大范围的去取代气态开关；对于断路开关，应用者目前的态度仍然是“尽量绕开”，

即使电感储能型的能量密度是有优势的,说明DSRD仍有很大的改进空间;对于FID器件,俄罗斯对其机理、工艺、应用的研究一直在持续推进,他们对这类器件进行的不同命名可以理解为不同代系的FID,所以很多问题都还是开放状态。此外,如前文所述,小型化、集成化会成为一种趋势,并且在某些应用领域是刚需。

对于SiC基器件,根据SiC材料的特性,应用其制备脉冲功率器件可以预见到诸多好处,在器件上可以测到一些非常极端的情况,无论是从基础研究还是关键元器件研发的角度,都应该有很好的前景。

### 致 谢

本项目获得台达中达学者计划的奖励,在此表示衷心感谢!

### 参考文献

- [1] 曾正中. 实用脉冲功率技术引论[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2003.  
ZENG Zhengzhong. Introduction to practical pulse power technology[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2003(in Chinese).
- [2] 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. Pulse power devices and applications[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2010(in Chinese).
- [3] 江伟华. 高重复频率脉冲功率技术及其应用: (1)概述[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(1): 10-15.  
JIANG Weihua. Repetition rate pulsed power technology and its applications: (I) Introduction[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(1): 10-15(in Chinese).
- [4] 王莹, 孙元章, 阮江军, 等. 脉冲功率科学与技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.  
WANG Ying, SUN Yuanzhang, RUAN Jiangjun, et al. Science and technology on pulsed power[M]. Beijing: Beihang University Press, 2010(in Chinese).
- [5] GREKHOV I. Mega and gigawatts-ranges, repetitive mode semiconductor closing and opening switches[C]// Digest of Technical Papers. 11th IEEE International Pulsed Power Conference(Cat. No.97CH36127). Baltimore: IEEE, 1997: 425-429.
- [6] WELLEMAN A, FLEISCHMANN W. High voltage solid state crowbar and low repetition rate switches[C]//2005 the IEE Pulsed Power Symposium(Reg. No. 2005/11070). Basingstoke: IEEE, 2005: 31/1-31/5.
- [7] RAMEZANI E, WELLEMAN A, SIEFKEN J. High peak current, high di/dt thyristors for closing switch applications[C]//9th IEEE International Pulsed Power Conference. Albuquerque: IEEE, 1993: 680-683.
- [8] LIANG Lin, WEI Quan, YU Yuehui. Two-dimensional numerical model and turn-on performance simulation of reversely switched dynistor[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(1): 522-528.
- [9] KOROTKOV S V, KHAPUGIN A A, MARTYNENKO V A, et al. Investigation of reverse switch-on dynistors upgraded for reducing the energy loss when switching reverse-current pulses[J]. Instruments and Experimental Techniques, 2018, 61(3): 359-363.
- [10] GORBATYUK A V, IVANOV B V. Inhomogeneous injection and heat-transfer processes in reversely switched dynistors operating in the pulse-frequency repetition modes with a limited heat sink[J]. Semiconductors, 2019, 53(4): 524-529.
- [11] KOROTKOV S V, ZHMODIKOV A L. Prospects of using reverse switch-on dynistors in the modes of switching submicrosecond current pulses[J]. Instruments and Experimental Techniques, 2011, 54(1): 61-64.
- [12] GORBATYUK A V, IVANOV B V. Simulation of reversely switched dynistors in modes with a lowered primary-ignition threshold[J]. Semiconductors, 2017, 51(6): 803-811.
- [13] PI Yicheng, LIANG Lin, YAN Xiaoxue, et al. Measurement and analysis for time jitter of reversely switched dynistor[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2020, 67(11): 5012-5019.
- [14] LIANG Lin, LIU Lianghao, WANG Shilei, et al. PCB-level stress analysis of an integrated module based on reversely switched dynistor[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1604-1610.
- [15] 谈国强. 三种新型两端半导体开关的快速脉冲产生电路研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.  
TAN Guoqiang. Research on fast pulse generation circuits of three new types of two-terminal semiconductor switches[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019(in Chinese).
- [16] GREKHOV I V, KOROTKOV S V. Semiconductor switches and generators of microsecond pulses in the mega-and gigawatt[J]. Applied Energy, 1998, 36(1): 101-109.
- [17] KOROTKOV S V, ARISTOV Y V, ZHMODIKOV A L, et al. High-power switches based on reversely switched-on



- dynistors for high-voltage pulse technologies[J]. Instruments and Experimental Techniques, 2014, 57(3): 291-295.
- [18] GREKHOV I V. New principles of high power switching with semiconductor devices[J]. Solid-State Electronics, 1989, 32(11): 923-930.
- [19] ARISTOV Y V, GREKHOV I V, KOROTKOV S V, et al. Dynistor switches for micro- and nanosecond power pulse generators[C]//Proceedings of the 2nd Euro-Asian Pulsed Power Conference. Vilnius, 2008.
- [20] GREKHOV I V, KOZLOV A K, KOROTKOV S V, et al. A high-frequency reverse switch-on dynistor generator for high-power induction heating systems[J]. Instruments and Experimental Techniques, 2000, 43(1): 63-65.
- [21] ARISTOV Y V, VORONKOV V B, GREKHOV I V, et al. Reverse switch-on dynistor switches of gigawatt-power microsecond pulses[J]. Instruments and Experimental Techniques, 2007, 50(2): 228-232.
- [22] GREKHOV I V, KOROTKOV S V, KOZLOV A K, et al. High-voltage RSD commutator of high-power current pulses with a submicrosecond front duration[J]. Instruments and Experimental Techniques, 1997, 40(4): 484-486.
- [23] GREKHOV I V, KOZLOV A K, KOROTKOV S V, et al. A high-power generator of high-voltage quasi-rectangular pulses with submicrosecond rise time based on a reverse switch-on dynistor[J]. Instruments and Experimental Techniques, 1999, 42(6): 806-809.
- [24] GREKHOV I V, KOZLOV A K, KOROTKOV S V, et al. Reversibly switched-on generator of the submicrosecond range for pulse lasers[J]. Instruments and Experimental Techniques, 1996(3): 111-114.
- [25] GREKHOV I V, KOROTKOV S V, ANDREEV A G, et al. Power reversibly switched-on dynistor generator for a excimer laser[J]. Instruments and Experimental Techniques, 1996(3): 115-118.
- [26] GREKHOV I V, KOZLOV A K, KOROTKOV S V, et al. Formation of high-power pulses of nanosecond duration by generators on reverse switch-on dynistors with sharpening circuits based on diode opening switches[J]. Instruments and Experimental Techniques, 2002, 45(4): 530-534.
- [27] GREKHOV I V, KOZLOV A K, KOROTKOV S V, et al. A high-voltage reverse switch-on dynistor switch with a transistor control circuit[J]. Instruments and Experimental Techniques, 2002, 45(5): 679-681.
- [28] GREKHOV I V, KOZLOV A K, KOROTKOV S V, et al. A high-voltage reverse switch-on dynistor switch with a control circuit based on magnetic-compression sections[J]. Instruments and Experimental Techniques, 2002, 45(5): 668-670.
- [29] WANG Haiyang, ZENG Zhengzhong, HE Xiaoping, et al. Degraded switching characteristics of a high-current, high-action reversely switched dynistor[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(12): 6245-6248.
- [30] 梁琳, 余亮, 吴拥军, 等. 反向开关晶体管结构优化与特性测试[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(4): 876-880. LIANG Lin, YU Liang, WU Yongjun, et al. Structure optimization and performance test for reversely switched dynistor[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(4): 876-880(in Chinese).
- [31] LIANG Lin, HUANG A Q, LIU Cheng, et al. SiC reversely switched dynistor(RSD) for pulse power application[C]//Proceedings of the 2015 27th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's (ISPSD). Hong Kong, China: IEEE, 2015: 293-296.
- [32] LIANG Lin, PAN Ming, ZHANG Ludan, et al. Positive-bevel edge termination for SiC reversely switched dynistor[J]. Microelectronic Engineering, 2016, 161: 52-55.
- [33] POKRYVAILO A, YANKELEVICH Y, WOLF M, et al. A high-power pulsed corona source for pollution control applications[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2004, 32(5): 2045-2054.
- [34] 舒玉雄. 4H-SiC RSD 结构优化研究及特性测试分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017. SHU Yuxiong. The study on structural optimization and characteristic test of 4H-SiC RSD[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017(in Chinese).
- [35] 梁琳, 颜小雪. 一种基于碳化硅基的反向开关晶体管及其制备方法: 中国, 110896098B[P]. 2021-07-27. LIANG Lin, YAN Xiaoxue. Silicon carbide-based reverse switching transistor and preparation method thereof: CN, 110896098B[P]. 2021-07-27(in Chinese).
- [36] 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.
- [37] GREKHOV I V, MESYATS G A. Physical basis for high-power semiconductor nanosecond opening switches[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2000, 28(5): 1540-1544.
- [38] SHARABANI Y, ROSENWAKS Y, EGER D. Mechanism of fast current interruption in p- $\pi$ -n diodes

- for nanosecond opening switches in high-voltage-pulse applications[J]. *Physical Review Applied*, 2015, 4(1): 014015.
- [39] MERENSKY L M, SHAFIR I, SHARABANI Y, et al. Fast switching of drift step recovery diodes based on all epi-Si growth[C]//IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems. Tel Aviv: IEEE, 2009: 1-4.
- [40] EFANOV V M, KARDO-SYSOEV A F, LARIONOV M A, et al. Powerful semiconductor 80 kV nanosecond pulser[C]//Proceedings of the Digest of Technical Papers. 11th IEEE international Pulsed Power Conference(Cat. No.97CH36127). Baltimore: IEEE, 1997: 985-987.
- [41] LYUBLINSKY A G, KOROTKOV S V, ARISTOV Y V, et al. Pulse power nanosecond-range DSRD-based generators for electric discharge technologies[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2013, 41(10): 2625-2629.
- [42] KOROTKOV S V, ARISTOV Y V, ZHMODIKOV A L, et al. A modular drift step-recovery diode generator for nanosecond pulse technologies[J]. *Instruments and Experimental Techniques*, 2016, 59(3): 356-361.
- [43] MIN B D, KIM J H, PAVLOV E, et al. A compact inductive type pulse generator using diodes as opening switch[C]//2005 IEEE Pulsed Power Conference. Monterey: IEEE, 2005: 1364-1367.
- [44] KESAR A S. A compact, 10-kV, 2-ns risetime pulsed-power circuit based on off-the-shelf components [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2018, 46(3): 594-597.
- [45] 赖雨辰, 谢彦召, 王海洋, 等. 基于 DSRD 的高重频固态脉冲源的研制[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32(10): 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(10): 105002(in Chinese).
- [46] YANG Jie, XIE Yanzhao, LAI Yuchen, et al. Study on all-solid high repetition-rate pulse generator based on DSRD[J]. *IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications*, 2020, 2(4): 142-146.
- [47] 史晓蕾, 陈锦晖, 王冠文, 等. 一种基于磁饱和变压器的 DSRD 脉冲电源设计[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32(2): 025020.
- SHI Xiaolei, CHEN Jinhui, WANG Guanwen, et al. Design of drift step recovery diode pulse power generator based on magnetic saturation transformer[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32(2): 025020(in Chinese).
- [48] 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(2): 025014.
- WANG Ganping, LI Fei, JIN Xiao, et al. Study of ultrafast semiconductor opening switch[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32(2): 025014(in Chinese).
- [49] PROKHORENKO V P, IVASHCHUK V E, KORSUN S V. Electromagnetic impulse radiator[C]//2004 Second International Workshop Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals(IEEE Cat. No.04EX925). Sevastopol: IEEE, 2004: 243-245.
- [50] PROKHORENKO V, IVASHCHUK V, KORSUN S. Drift step recovery devices utilization for electromagnetic pulse radiation[C]//Proceedings of the 10th International Conference on Grounds Penetrating Radar, 2004. GPR 2004. Delft: IEEE, 2004: 195-198.
- [51] PROKHORENKO V, BORYSSENKO A. Drift step recovery diode transmitter for high-power GPR design [C]//Proceedings of SPIE 4084 8th International Conference on Ground Penetrating Radar. Gold Coast: SPIE, 2000.
- [52] ARNTZ F, KARDO-SYSOEV A, KRASNYKH A. SLIM, short-pulse technology for high gradient induction accelerators[C]//2009 IET European Pulsed Power Conference. Geneva: IEEE, 2009: 1-4.
- [53] BENWELL A, BURKHART C, KRASNYKH A, et al. A 5KV, 3MHz solid-state modulator based on the DSRD switch for an ultra-fast beam kicker[C]//2012 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference(IPMHVC). San Diego: IEEE, 2012: 328-331.
- [54] TROPINA A A, KUZMENKO A P, MARASOV S V, et al. Ignition system based on the nanosecond pulsed discharge[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2014, 42(12): 3881-3885.
- [55] MERENSKY L M, KARDO-SYSOEV A F, FLEROVA N, et al. A low-jitter 1.8-kV 100-ps rise-time 50-kHz repetition-rate pulsed-power generator[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2009, 37(9): 1855-1862.
- [56] MERENSKY L M, KARDO-SYSOEV A F, SHMILOVITZ D, et al. The driving conditions for obtaining subnanosecond high-voltage pulses from a silicon-avalanche-shaper diode[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2014, 42(12): 4015-4019.
- [57] NIKOO M S, HASHEMI S M A, VAKILIAN M. DSRD-based HVdc power supply[J]. *IEEE Transactions*

- on Plasma Science, 2018, 46(6): 2108-2113.
- [58] GREKHOV I V, IVANOV P A, KONSTANTINOV A O, et al. On the possibility of creating a superfast-recovery silicon carbide diode[J]. Technical Physics Letters, 2002, 28(7): 544-546.
- [59] KOZLOV V A, SMIRNOVA I A, MORYAKOVA S A, et al. New generation of drift step recovery diodes(DSRD) for subnanosecond switching and high repetition rate operation[C]//Conference Record of the Twenty-Fifth International Power Modulator Symposium, 2002 and 2002 High-Voltage Workshop. Hollywood: IEEE, 2002: 441-444.
- [60] GREKHOV I V, IVANOV P A, KHRISTYUK D V, et al. Sub-nanosecond semiconductor opening switches based on 4H-SiC p<sup>+</sup>pn<sup>+</sup>-Diodes[J]. Solid-State Electronics, 2003, 47(10): 1769-1774.
- [61] GREKHOV I V, MESYATS G A. Nanosecond semiconductor diodes for pulsed power switching[J]. Physics-Uspokhi, 2005, 48(7): 703-712.
- [62] IVANOV P A, GREKHOV I V. High-voltage sharp-recovery 4H: SiC drift diodes: theoretical estimation of limiting parameters[J]. Technical Physics, 2015, 60(6): 897-902.
- [63] YAN Xiaoxue, LIANG Lin, HUANG Xinyuan, et al. 4H-SiC drift step recovery diode with super junction for hard recovery[J]. Materials, 2021, 14(3): 684.
- [64] YAN Xiaoxue, LIANG Lin, WANG Ziyue, et al. Optimization design for SiC drift step recovery diode(DSRD)[C]//2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications(EPE'20 ECCE Europe). Lyon: IEEE, 2020: 1-7.
- [65] YAN Xiaoxue, LIANG Lin, HUANG Xinyuan. Design and fabrication for high-voltage silicon carbide drift step recovery diode[C]//2020 IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications in Asia(WiPDA Asia). Suita: IEEE, 2020: 1-4.
- [66] ILYIN V A, AFANASYEV A V, IVANOV B V, et al. High-voltage ultra-fast pulse diode stack based on 4H-SiC[J]. Materials Science Forum, 2016, 858: 786-789.
- [67] ILYIN V A, AFANASYEV A V, DEMIN Y S, et al. 30 kV pulse diode stack based on 4H-SiC[J]. Materials Science Forum, 2018, 924: 841-844.
- [68] GOTO T, IWAMURO N, TOKUCHI A, et al. Experimental demonstration on ultra high voltage and high speed 4H-SiC DSRD with smaller numbers of die stacks for pulse power[J]. Materials Science Forum, 2018, 924: 858-861.
- [69] SUN Ruize, ZHANG Kenan, CHEN Wanjun, et al. 10-kV 4H-SiC drift step recovery diodes(DSRDs) for compact high-repetition rate nanosecond HV pulse generator[C]//2020 32nd International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs(IPSVD). Vienna: IEEE, 2020: 62-65.
- [70] AFANASYEV A V, IVANOV B V, ILYIN V A, et al. Temperature dependence of minority carrier lifetime in epitaxially grown p<sup>+</sup>-p<sup>-</sup>-n<sup>+</sup> 4H-SiC drift step recovery diodes[J]. Materials Science Forum, 2015, 821-823: 632-635.
- [71] AFANASYEV A V, IVANOV B V, ILYIN V A, et al. Temperature dependence of silicon carbide drift step recovery diodes injection electroluminescence[C]//3rd International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures. St. Petersburg: IOP Publishing Ltd, 2016: 012175.
- [72] SMIRNOV A A, SHEVCHENKO S A, IVANOV B V, et al. Investigation of the temperature effect on the dynamic parameters of ultrafast silicon carbide current switches[C]//International Conference PhysicA. Saint-Petersburg: IOP Publishing Ltd, 2017: 012036.
- [73] SMIRNOV A A, SHEVCHENKO S A. A study of the influence of forward bias pulse duration on the switching process of a 4H-SiC drift step recovery diode[C]//19th Russian Youth Conference on Physics of Semiconductors and Nanostructures, Opto- and Nanoelectronics. St. Petersburg: IOP Publishing Ltd, 2017: 012033.
- [74] AFANASYEV A V, IVANOV B V, ILYIN V A, et al. Superfast drift step recovery diodes(DSRDs) and vacuum field emission diodes based on 4H-SiC[J]. Materials Science Forum, 2013, 740-742: 1010-1013.
- [75] IVANOV B V, SMIRNOV A A, SHEVCHENKO S A, et al. High voltage subnanosecond silicon carbide opening switch[C]//2016 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University(RTUCON). Riga: IEEE, 2016: 1-4.
- [76] GREKHOV I V, KARDO-SYSOEV A F. Formation of subnanosecond current drops due to the delayed avalanche breakdown of Si p-n junctions[J]. Sov. Tech. Phys. Lett., 1979, 5(8): 395-399.
- [77] GREKHOV I V, KARDO-SYSOEV A F, KOSTINA L S, et al. High-power subnanosecond switch[J]. Electronics Letters, 1981, 17(12): 422-423.
- [78] DELOACH B C, SCHARFETTER D L. Device physics of TRAPATT oscillators[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1970, 17(1): 9-21.

- [79] RODIN P, EBERT U, HUNSDORFER W, et al. Superfast fronts of impact ionization in initially unbiased layered semiconductor structures[J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 92(4): 1971-1980.
- [80] GREKHOV I V, KOROTKOV S V, RODIN P B. Novel closing switches based on propagation of fast ionization fronts in semiconductors[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2008, 36(2): 378-382.
- [81] RODIN P, GREKHOV I. Dynamic avalanche breakdown of a p-n junction: deterministic triggering of a plane streamer front[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(24): 243504.
- [82] GREKHOV I V, RODIN P B. Triggering of superfast ionization fronts in silicon diode structures by field-enhanced thermionic electron emission from deep centers[J]. *Technical Physics Letters*, 2011, 37(9): 849-853.
- [83] BRYLEVSKIY V, SMIRNOVA I, GUTKIN A, et al. Delayed avalanche breakdown of high-voltage silicon diodes: various structures exhibit different picosecond-range switching behavior[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 122(18): 185701.
- [84] KYUREGYAN A S. Effect of diffusion on the velocity of stationary impact ionization waves in semiconductors[J]. *JETP Letters*, 2007, 86(5): 308-312.
- [85] RODIN P, MINARSKY A, GREKHOV I. Impact ionization fronts in semiconductors: superfast propagation due to nonlocalized preionization[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(1): 013503.
- [86] RODIN P, MINARSKY A, GREKHOV I. Impact ionization fronts in semiconductors: numerical evidence of superfast propagation due to nonlocalized preionization [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108(3): 034501.
- [87] RODIN P B, MINARSKY A M, GREKHOV I V. Numerical simulation of spatially nonuniform switching in silicon avalanche sharpening diodes[J]. *Technical Physics Letters*, 2012, 38(6): 535-539.
- [88] IVANOV M S, PODOLSKA N I, RODIN P B. Quasi-streamer mode of delayed avalanche breakdown initiated by technological imperfections[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, 816: 012033.
- [89] RODIN P, IVANOV M. Spatiotemporal modes of fast avalanche switching of high-voltage layered semiconductor structures: from subnano to picosecond range[J]. *Journal of Applied Physics*, 2020, 127(4): 044504.
- [90] EFANOV V M, KARDO-SYSOEV A F, TCHASHNIKOV I G, et al. New superfast power closing switched-dynistors on delayed ionization[C]//*Proceedings of 1996 International Power Modulator Symposium*. Boca Raton: IEEE, 1996: 22-25.
- [91] EFANOV V M, KARAVAEV V V, KARDO-SYSOEV A F, et al. Fast ionization dynistor(FID)-a new semiconductor superpower closing switch[C]//*Digest of Technical Papers. 11th IEEE International Pulsed Power Conference(Cat. No.97CH36127)*. Baltimore: IEEE, 1997: 988-991.
- [92] KOROTKOV S V, ARISTOV Y V, VORONKOV V B, et al. Dynistors with nanosecond response times[J]. *Instruments and Experimental Techniques*, 2009, 52(5): 695-698.
- [93] KOROTKOV S V, ARISTOV Y V, VORONKOV V B. Investigations of shock-ionized dynistors[J]. *Instruments and Experimental Techniques*, 2019, 62(2): 161-164.
- [94] EFANOV V M, KRIKLENKO A V, YARIN P M, et al. 100 kV picosecond all solid state pulser[C]//*Conference Record of the 2000 Twenty-fourth International Power Modulator Symposium*. Norfolk: IEEE, 2000: 201-202.
- [95] EFANOV V M, KRIKLENKO A V, YARINE P M. Nano and picosecond pulsers on the basis of FED and DRD[C]//*IEEE Conference Record - Abstracts . PPPS-2001 Pulsed Power Plasma Science 2001. 28th IEEE International Conference on Plasma Science and 13th IEEE International Pulsed Power Conference(Cat. No.01CH37)*. Las Vegas: IEEE, 2001: 462.
- [96] EFANOV V M, EFANOV M V, ARBUZOV A, et al. Megavolt all-solid-state FID pulse generators for accelerator applications[C]//*2007 IEEE 34th International Conference on Plasma Science(ICOPS)*. Albuquerque: IEEE, 2007: 684-684.
- [97] EFANOV V M, KARDO-SYSOEV A F, LARIONOV M A, et al. Powerful semiconductor 80 kV nanosecond pulser[C]//*Proceedings of the Digest of Technical Papers. 11th IEEE International Pulsed Power Conference(Cat. No.97CH36127)*. Baltimore: IEEE, 1997: 985-987.
- [98] EFANOV V, EFANOV M. Gigawatt all solid state FID pulsers with nanosecond pulse duration[C]//*2008 IEEE International Power Modulators and High-Voltage Conference*. Las Vegas: IEEE, 2008: 381.
- [99] EFANOV V, EFANOV M. New possibilities of picosecond and nanosecond FID technology for medical applications[C]//*2008 IEEE International Power Modulators and High-Voltage Conference*. Las Vegas: IEEE, 2009: 334.

- [100] EFANOV V, KOMASHKO A, YARIN P, et al. High voltage and high PRF picosecond FID pulse generators [C]//2008 IEEE International Power Modulators and High-Voltage Conference. Las Vegas: IEEE, 2008: 382.
- [101] EFANOV V M, EFANOV M V, KOMASHKO A V, et al. High-voltage and high-PRF FID pulse generators[M]//SABATH F, GIRI D V, RACHIDI F, et al. Ultra-Wideband, Short Pulse Electromagnetics 9. New York: Springer, 2010: 301-305.
- [102] KOROTKOV S V, ARISTOV Y V, VORONKOV V B. A generator of high-voltage nanosecond pulses with a subnanosecond rise time[J]. Instruments and Experimental Techniques, 2010, 53(2): 230-232.
- [103] GUSEV A I, LYUBUTIN S K, RUKIN S N, et al. High power thyristors triggering providing a subnanosecond closing time[C]//2014 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference(IPMHVC). Santa Fe:IEEE, 2014: 31-34.
- [104] GUSEV A I, LYUBUTIN S K, RUKIN S N, et al. Superfast thyristor-based switches operating in impact-ionization wave mode[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2016, 44(10): 1888-1893.
- [105] GUSEV A I, LYUBUTIN S K, RUKIN S N, et al. A thyristor switch with a subnanosecond switching time[J]. Instruments and Experimental Techniques, 2015, 58(3): 376-380.
- [106] GREKHOV I V, KOROTKOV S V, ANDREEV A G, et al. High-power reverse switch-on dynistor-based generators for electric-discharge water purification[J]. Instruments and Experimental Techniques, 1997, 40(5): 705-707.
- [107] GREKHOV I V, KOROTKOV S V, KOZLOV A K, et al. A high-power high-voltage pulse generator based on reverse switch-on dynistors for an electrostatic precipitator power supply[J]. Instruments and Experimental Techniques, 1997, 40(5): 702-704.
- [108] GREKHOV I V, KOROTKOV S V, ANDREEV A G, et al. High-power microsecond commutators based on high-voltage reverse switch-on dynistor stacks[J]. Instruments and Experimental Techniques, 1997, 40(5): 632-635.
- [109] GREKHOV I V, KOROTKOV S V, KOZLOV A K, et al. A high-power kilohertz-band charging device based on a reverse switch-on dynistor[J]. Instruments and Experimental Techniques, 1997, 40(4): 498-500.
- [110] O'BRIEN H, OGUNNIYI A, ZHANG Q J, et al. Pulse performance and reliability analysis of a 1.0 cm<sup>2</sup> 4H-SiC GTO[J]. MRS Online Proceedings Library, 2010, 1246: 803.
- [111] SHANG Chao, YU Yuehui, LI Weibang. An all-solid-state pulsed power generator based on RSD and saturable transformer[C]//2010 International Conference on Electrical and Control Engineering. Wuhan: IEEE, 2010: 3275-3278.
- [112] 康强, 李名加, 罗敏, 等. 2.5GW 长脉冲功率模块优化设计与实验研究[J]. 微波学报, 2014, 30(S1): 472-474.  
KANG Qiang, LI Mingjia, LUO Min, et al. Designing and experiment of a 2.5GW long pulse power module[J]. Journal of Microwaves, 2014, 30(S1): 472-474(in Chinese).
- [113] 江伟华. 基于半导体开关的高重频 LTD[J]. 高电压技术, 2015, 41(6): 1776-1780.  
JIANG Weihua. High-frequency repetitive LTD based on semiconductor switches[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(6): 1776-1780(in Chinese).
- [114] LIANG Lin, HUANG Alex Q, LIU Cheng, et al. SiC reversely switched dynistor (RSD) for pulse power application[C]//2015 IEEE 27th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's. Hong Kong, China: IEEE, 2015: 293-296.



梁琳

在线出版日期: 2022-05-20。

收稿日期: 2021-08-31。

作者简介:

梁琳(1981), 女, 研究员, 博士生导师, 研究方向为功率半导体器件、封装、可靠性及其应用研究, lianglin@hust.edu.cn;

颜小雪(1994), 女, 博士研究生, 研究方向为碳化硅基功率器件芯片设计、工艺与可靠性。

(责任编辑 李婧妍)

## Review on Semiconductor Pulsed Power Switching Devices

LIANG Lin\*, YAN Xiaoxue, HUANG Xinyuan, QING Zhengheng, YANG Zewei, SHANG Hai

(Huazhong University of Science and Technology)

**KEY WORDS:** semiconductor switch; pulsed power; RSD (reversely switched dynistor); DSRD (drift step recovery diode); FID (fast ionization dynistor)

In order to adapt to the application of pulsed power and maximize the performance of power semiconductor devices, a series of special semiconductor pulse power switching devices have been proposed, including microsecond reverse switched dynistor (RSD), nanosecond drift step recovery diode (DSRD) and picosecond fast ionization dynistor (FID). The above three devices can be successfully prepared based on silicon (Si), and are transitioning to wide bandgap silicon carbide (SiC). This paper is a review in this area, which introduces the working mechanism, key technologies and applications of the above three devices, as well as the research progress in our group.

RSD is a microsecond closed switch based on controllable plasma layer commutation. It has high  $di/dt$  tolerance and can flow through high working current. RSD is often used in series to achieve higher working voltage. The parameters of a series of devices designed based on RSD in Russia are investigated and summarized in this paper. The working characteristics of time jitter and repetition frequency of RSD are studied. The Si RSD independently developed by our group reaches a single charge transfer of 32C, which is a record in China. In order to improve the device performance, the RSD based on SiC has been proposed by our group for the first time in the world.

DSRD is a nanosecond opening switch based on controllable plasma layer commutation. DSRD is commonly used in inductive energy storage circuits. It can cutoff the reverse current flowing through DSRD in

nanosecond. And a high-voltage pulse with a rapidly rising front can be obtained on the load. The parameter characteristics of pulse sources based on DSRD in various research institutions are investigated and summarized. The Si DSRD developed by our group can output a 9.92kV voltage pulse with a rise time of 12ns. In addition, a SiC DSRD with a 3-step etched-JTE termination is proposed, designed and prepared in our laboratory. The blocking voltage of the fabricated SiC DSRD stack composed of two dies exceeds 10.44kV. One of the dies can output a high voltage of 2150V with a rising time of 0.82ns.

FID is a picosecond closed switch based on the phenomenon of delayed breakdown. The electric field distribution inside the FID during the turn-on process and the possible sources of initial carriers are introduced. Some characteristics can not be effectively simulated by commercial TCAD tools in the simulation of the turn-on process of FID. The relevant models cannot be modified freely, neither. A two-dimensional numerical simulation model is established in our group, and it successfully simulates the subnanosecond turn-on characteristics. A 3kV FID is designed and prepared by us, and it can be triggered by our DSRD. The turn-on time of the FID is 554ps.

Table 1 summarizes the main electrical parameters of RSD, DSRD and FID in the existing experimental reports and their typical applications.

Finally, the packaging schemes of pulsed power devices are briefly introduced.

**Table 1 Summary of parameters and applications for semiconductor pulsed power devices (According to experiment report)**

Device	Type	Time scale	Maximum blocking voltage	Maximum single tube current	Typical application
RSD	Closed	$\mu\text{s}$ to sub- $\mu\text{s}$	Single 6.5kV; Stack 90kV	500kA	Water purification <sup>[106]</sup> , electrostatic precipitator <sup>[107]</sup> , commutator <sup>[108]</sup> , kHz-band generator <sup>[109]</sup>
DSRD	Open	ns to sub-ns	Single 3kV; Stack 140kV	600A	Electromagnetic pulse radiation <sup>[49-50]</sup> , accelerators <sup>[52]</sup> , ignition system for internal combustion engines <sup>[54]</sup> , pollution treatment <sup>[43]</sup>
FID	Closed	hundreds to tens of ps	Single 5kV; Stack 40kV	10kA	High power microwave source, power supply for nitrogen lasers, triggering system for RSD <sup>[80]</sup>