

压控型脉冲功率半导体器件技术及应用

孙瑞泽 陈万军 刘超 刘红华 姚洪梅 张波

Technology and application of the voltage-controlled pulse power semiconductor devices

Sun Ruize, Chen Wanjun, Liu Chao, Liu Honghua, Yao Hongmei, Zhang Bo

引用本文:

孙瑞泽,陈万军,刘超,刘红华,姚洪梅,张波. 压控型脉冲功率半导体器件技术及应用[J]. 强激光与粒子束, 2024, 36: 095001. doi: 10.11884/HPLPB202436.240120

Sun Ruize, Chen Wanjun, Liu Chao, Liu Honghua, Yao Hongmei, Zhang Bo. Technology and application of the voltage-controlled pulse power semiconductor devices[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2024, 36: 095001. doi: 10.11884/HPLPB202436.240120

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11884/HPLPB202436.240120

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

紧凑小型脉冲功率源ARC-01/02及其应用

Compact small-sized pulsed power sources ARC-01/02 and their applications 强激光与粒子束. 2022, 34: 075016-1-075016-8 https://doi.org/10.11884/HPLPB202234.210534

多级XRAM型脉冲功率电源开关器件简化研究

Research on switching devices simplification of multistage XRAM pulse power supply 强激光与粒子束. 2024, 36: 025002-1-025002-7 https://doi.org/10.11884/HPLPB202436.230211

快速关断半导体开关工作特性及实验研究

Study of ultrafast semiconductor opening switch 强激光与粒子束. 2020, 32: 025014-1-025014-5 https://doi.org/10.11884/HPLPB202032.190298

双谐振拓扑高压脉冲电容器充电电源

High voltage pulse capacitor charging power supply based on double resonant topology 强激光与粒子束. 2019, 31: 040021-1-040021-6 https://doi.org/10.11884/HPLPB201931.180314

全固态高压脉冲电源在半导体光刻光源中的应用

Application of all-solid-state high-voltage pulse power supply in semiconductor lithography light source 强激光与粒子束. 2019, 31: 040019-1-040019-9 https://doi.org/10.11884/HPLPB201931.190001

正负双极性重复频率充电电源研制

Development of a bipolar repetitive high voltage power supply 强激光与粒子束. 2023, 35: 035001-1-035001-7 https://doi.org/10.11884/HPLPB202335.220301 ·脉冲功率技术·



压控型脉冲功率半导体器件技术及应用

孙瑞泽¹, 陈万军¹, 刘 超¹, 刘红华², 姚洪梅³, 张 波¹
 (1.电子科技大学集成电路科学与工程学院,成都 611731; 2. 湖北三江航天红林探控有限公司,湖北 孝感 432000;
 3. 成都智达和创信息科技有限公司,成都 610095)

摘 要: 近年来,采用新一代半导体开关替代传统气体或真空开关是脉冲功率系统的一种重要发展趋势。为了给脉冲功率半导体器件领域的技术发展提供参考,简要介绍了压控型脉冲功率半导体器件技术的发展历程,总结了 MOS 栅控晶闸管(MCT)在器件设计、工艺和可靠性等方面的研究进展,同时通过比较 MCT 与一般商业 IGBT 器件,阐述了 MCT 相比于其他功率脉冲半导体器件的优劣情况,并结合典型应用场景展示了 MCT 器件的优势,对压控型脉冲功率半导体器件的发展趋势进行了简要分析。

关键词:脉冲功率技术;脉冲功率半导体开关;MOS栅控晶闸管;电压控制;重复脉冲 中图分类号:TN386 文献标志码: A doi:10.11884/HPLPB202436.240120

Technology and application of the voltage-controlled pulse power semiconductor devices

Sun Ruize¹, Chen Wanjun¹, Liu Chao¹, Liu Honghua², Yao Hongmei³, Zhang Bo¹ (1. School of Integrated Circuits Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

Honglin Company of China Aerospace Sanjiang Group, Xiaogan 432000, China;
 Chengdu ZDHC Limited, Chengdu 610095, China)

Abstract: Pulse power technology compresses low-power energy in the time domain to achieve high-power output in extremely short durations. In recent years, the trend in pulse power technology has been replacing traditional gas or vacuum switches with a new generation of semiconductor switches. To promote the technical development in the field of pulse power semiconductor devices, this article briefly introduces the development history of voltage-controlled pulse power semiconductor devices and the structure of MOS-controlled thyristors (MCTs). By comparing the pulse performance of MCT with that of commercial IGBT, it illustrates the advantages of high pulse current peak and high *di/dt* pulse of MCT under the same conditions. However, the conventional MCT cannot be turned off at zero gate voltage, and the carrier injection efficiency and conduction speed need to be further improved. To solve the shortcomings of conventional MCT that can not be turned off under zero voltage, this article then summarizes the research progress in device design, technology, and reliability of MCT. It also demonstrates the advantages of MCT devices in typical application scenarios and provides a brief analysis of the development trends of voltage-controlled pulse power semiconductor devices.

Key words: pulse power technology, pulse power semiconductor switch, MOS-controlled thyristor, voltagecontrolled, repetitive pulse

脉冲功率技术的核心在于将低功率能量在时间上进行压缩,以实现极短时间内的高功率输出,完成这种功率 转换过程对系统所用开关的性能提出了特殊要求。自20世纪60年代以来,脉冲功率技术受到各国学术界和工业 界的普遍关注和深入研究,目前已在粒子加速、电磁弹射和污水净化等工业领域得到广泛应用。相比于传统脉冲

 ^{*} 收稿日期:2024-04-11; 修订日期:2024-07-18
 基金项目:国家自然科学基金项目 (62334003)
 联系方式:孙瑞泽,rzsun@uestc.edu.cn。
 通信作者:陈万军,wjchen@uestc.edu.cn。

功率系统使用的气体或真空开关,基于半导体技术的固态脉冲功率器件具有脉冲放电重复频率高、稳定性好及寿命长等优势,同时由于其开关可由电压控制而具有逻辑可编程特性^[1]。基于脉冲功率半导体开关的新型脉冲功率系统能够实现高功率下的脉冲放电,实现高达千安量级的脉冲电流峰值和 50 kA/µs 以上的电流上升率。在脉冲功率半导体开关器件产品方面,美国通用电气实验室于 1988 年首先掌握了脉冲功率晶闸管核心技术,后来由 Silicon Power 发展成为固态脉冲功率开关 Solidtron, 2020 年被 Excelitas Technologies 收购,成为美军智能武器全固态起爆器点火专用开关。目前,我国在这方面的研究与产品化已实现对美国的追赶与超越,电子科技大学作出了大量先驱性与创新性工作,研制了涵盖 1 200 V 至 4 500 V 耐压等级的系列脉冲功率半导体开关器件产品,在多种工业领域取得显著且广泛的应用。

1 脉冲功率半导体器件概要

脉冲功率系统的作用是将长时间、低功率的能量通过开关器件压缩为短时间、高功率的脉冲输出能量,如图1 所示。传统脉冲功率系统多采用气体或真空开关,得益于核心半导体功率开关器件的发展,如今越来越多的脉冲 功率系统开始采用半导体开关。

在电容储能型脉冲功率电路中,脉冲开关是控制能量储存或释放的核心器件,其导通后等效为电阻 R。对于 电容储能型脉冲功率电路,可以将其放电回路简化为图 2 中的 RLC 串联等效模型,其中 U₀ 为电容 C 两端电压, L 代表回路中电感,电路特征电阻 R₀ 可以表示为 2(L/C)^{0.5}, ω_d 可以表示为 [(R/2L)²-1/LC]^{0.5}。欠阻尼振荡条件下,即 R<R₀ 时,可以推导出脉冲电流随时间的变化关系



 $i(t) = \frac{U_0}{\omega_d L} e^{\frac{-R}{2L}t} \sin \omega_d t$ (1)



 Fig. 2
 Equivalent model of capacitor energy storage pulse power circuit

 图 2
 电容储能型脉冲功率电路放电回路等效模型

进一步考虑正弦波形的特点,可以推导出峰值电流 Ipeak 以及电流上升率 di/dt的表达式

$$I_{\text{peak}} = \frac{2U_0}{2\sqrt{R_0^2 - R^2}} \exp\left(\frac{-\pi U_0}{2\sqrt{R_0^2 - R^2}}\right)$$
(2)

$$\frac{di}{dt} = \frac{3U_0}{\pi L} \exp\left(\frac{-\pi U_0}{2\sqrt{R_0^2 - R^2}}\right)$$
(3)

从公式(1)至(3)可以发现,脉冲电流的两个核心指标都与回路中的电阻 R 及电感 L 关系密切,其中回路中的 电感是由焊接和封装引入的,在优化焊接方式、封装结构后已经达到 nH 量级,难以进一步降低;而回路中的电阻 主要是由脉冲功率半导体器件导通时的电阻构成,因此器件导通电阻对于电容储能型脉冲放电系统的性能起到决 定性作用。

常规脉冲功率半导体器件包括绝缘栅场效应晶体管(MOSFET)、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)和晶闸管(GTO)。 MOSFET 器件通过绝缘栅电极施加场效应来控制沟道,具有开关速度快、di/dr高等特点,但由于其导电沟道为电 子沟道,器件导通时不存在电导调制效应导致导通电阻较大,同时输出电流因沟道夹断而存在饱和现象,脉冲峰值 电流较低;IGBT 器件导通时存在电导调制效应,导通电阻较低,但是由于其导电通路中仍然存在电子沟道,器件输 出电流仍存在饱和现象;晶闸管类器件如 GTO 在导通时有强烈的电导调制效应,脉冲峰值电流高,但由于电导调 制建立速度慢,存在脉冲电流上升率di/dr较低的问题。同时,常规晶闸管类器件均为电流控制型,其复杂的驱动电 路要求增加了系统的体积和重量。新型脉冲功率技术需要同时具备高耐压、高峰值电流、高di/dr的电压控制型脉 冲功率半导体器件。

2 压控型脉冲功率半导体器件研究进展

MOS 栅控晶闸管(MCT)器件将 MOS 栅结构引入常规晶闸管器件,其结构示意图与等效电路如图 3 所示。该 类器件将 MOS 栅器件的压控特性和晶闸管类器件的高脉冲功率容量特性优势相结合,兼具 MOS 器件驱动简单、 高效与双极器件过流能力强的特点,是一种理想的高功率脉冲功率器件^[2]。MCT 集成 MOSFET 与 PNPN 晶闸管结 构。MCT 由上至下依次为 P⁺阴极区、N-well 区、P-well 区、N-drift 区和 P⁺阳极区,其中 N-well 区/P-well 区/N-drift 区/ P⁺阳极区在器件内部形成一个纵向的 PNPN 晶闸管结构;在器件顶部存在由 N-drift 区/P-well 区/N-well 区构成的 N-MOS 结构和由 P⁺阴极区/N-well 区/P-well 区构成的 P-MOS 结构。N-MOS 控制器件的开启,P-MOS 控制器件的关 断。当栅极电压为负时,P-MOS 开启,器件上方 NPN 晶体管的发射结被短路,器件处于阻断状态。当栅极电压为 正时,N-MOS 打开,此时器件进入晶闸管工作模式。



Fig. 3 Structure schematic and equivalent circuit of MCT device 图 3 MCT 器件结构示意图及其等效电路

MCT 器件内部的固有晶闸管结构是其实现强电导调制和低导通电阻的关键。与晶体管结构相比,晶闸管具 有更强的电导调制效应,这是其可再生正反馈工作模式带来的。MCT 器件具有 PNPN 四层结构,构成两个互补晶 体管(PNP 晶体管和 NPN 晶体管)。当器件工作在导通状态下,空穴注入 PNP 晶体管的 N 型基区,同时形成 NPN 晶体管的基极驱动电流,如图 3(b)中红色箭头所示。该驱动电流促进电子注入形成 PNP 晶体管的基极驱动 电流,如图 3(b)蓝色箭头所示,最终形成了晶闸管式正反馈过程。当 MCT 的 MOS 栅极开启晶闸管正反馈工作模 式后,器件内部电导调制将不再受到 MOS 沟道控制,阴极和阳极可几乎无限制地提供电子与空穴,器件具有极强 的电导调制效应。

图 4(a)展示了 MCT 和 IGBT 器件正向导通特性测试结果。作为对比组商业 IGBT 器件选用 FGL40N120AND, 耐压 1 200 V, 额定电流 40 A。如图所示, IGBT 器件在开启后, 阳极电流缓慢上升, 并在阳极电压达到 3 V 左右时 出现电流饱和效应。这是由于 IGBT 的电流受限于 MOS 沟道。对比而言, MCT 器件没有电流饱和特性且具有极 低的导通压降,在 25 A 下导通压降仅为 1.5 V, 此时 IGBT 导通压降大于 3 V。MCT 器件相对于 IGBT 具有更低的 导通压降, 且无电流饱和限制, 适用于产生高 di/dt 脉冲电流。MCT 和 IGBT 器件脉冲放电测试结果对比如图 4(b) 所示。器件工作电压 1 100 V, 储能电容大小为 2 μF, 回路电感估计为 70~100 nH。由于有限的电导调制程度, IGBT 脉冲电流仅为 460 A, di/dt仅 0.1 kA/μs, 同时, 器件存在电流饱和特性, IGBT 难以实现高的脉冲电流峰值。此 外, IGBT 在开通后阳极电压下降缓慢, 将产生很大的脉冲功耗。MCT 具有强电导调制效应和低导通电阻, 其脉冲 电流为正弦型, 说明放电回路工作在欠阻尼状态下。在栅极触发信号到来后, 其内部晶闸管立即被开启, 器件阳极 电压急速下降, 阳极电流在 800 ns 的时间内上升到 5 000 A 以上, 其峰值电流 *I*peak=5 050 A, di/dt为 15.8 kA/μs。MCT 器件工作在晶闸管正反馈工作模式下, 具有强电导调制, 可使放电回路工作在欠阻尼状态, 更便于脉冲功率



图 4 MCT 和 IGBT 性能测试对比

应用[3]。

MCT器件有着优异的脉冲功率输出特性,但是常规 MCT 无法零栅压关断^[4],存在载流子注入效率、导通速度 需进一步提高的问题,以及长期存在的器件结构、工艺、可靠性等方面的设计和应用难点。

2.1 器件结构

常规 MCT 器件内部 PNPN 结构引入的寄生 NPN 和 PNP 三极管如果发生同时导通则会导致器件进入闩锁状态,因此 MCT 在栅压为零时耐压能力低,必须通过外加负栅压使关断沟道 PMOS 开启,将 NPN 晶体管的基极与发射极短接,器件具有 PNP 晶体管的耐压能力。MCT 无法零栅压关断的缺点使常规 MCT 器件在实际应用中需要负压驱动,这无疑增加了驱动设计难度与功耗,也对系统的可靠运行带来了挑战。如图 5 所示,具有阴极短路结构的 MOS 栅控晶闸管^[5](CS-MCT)通过在阴极中间引入阴极短路接触区,人为的将 N-well 区断开,从而使得阴极金属和 P-well 区短路。阴极短路区的引入使得 CS-MCT 在零栅压情况下也具备耐压能力,大大降低了驱动设计与实现难度。如图 6 所示,CS-MCT 在栅压为零时具备与传统 MCT(con-MCT)栅压为负时一样的耐压能力以及相同的脉冲电流峰值和上升率。此外,实际脉冲应用中系统中往往存在着各类干扰信号,CS-MCT 的阴极短路结构除了带来零栅压耐压特性,还实现了更强的抗dv/dr误触发能力,有效提升了脉冲功率半导体开关器件的抗干扰能力,增强了器件可靠性。





2.2 器件工艺

对于高压 MCT 器件, 传统的非穿通(NPT)型耐压层设计已经无法满足应用需求, 此时必须采用场截止(FS)型 耐压层结构。FS 型耐压层使耐压时器件内部的电场由三角形分布变为梯形分布, 可以在较薄的漂移区上实现高 耐压。然而, 高浓度 FS 层的引入会显著降低阳极 PN 结浓度差, 从而降低器件阳极注入效率, 导致较弱的电导调 制效应。为了提高 FS 型 MCT 器件的电导调制效应, 人们提出了一种具有高效注入阳极的 FS 型 MCT⁶(HiA-MCT), 它采用高浓度、大结深 P⁺阳极工艺, 如图 7 所示。



图 7 高阳极注入效率的 FS 型 MCT 元胞结构与工作机理

高效阳极注入的工艺显著提高了阳极注入效率,大大增加了导通时非平衡载流子浓度,从而增强了器件的电导调制效应。图 8 给出了 HiA-MCT 与传统 MCT(con-MCT)脉冲能力的对比以及导通时器件内部载流子浓度分布^[7]。 在相同元胞结构与外延层厚度下, HiA-MCT 实现更高的脉冲峰值电流与di/dt, 具备更强的脉冲放电能力。

2.3 应用可靠性

阴极短路区的引入使 MCT 器件获得了零栅压关断的优势,但同时引发了器件不均匀开启的问题。在导通过 程中,由阳极注入的电流优先由阴极短路区流向阴极,这会导致靠近短路区的位置优先开启,而后开启区域逐渐向 栅极拓展。在实际应用中,脉冲前沿往往在数十纳秒,如此短的时间器件的开启区域无法完全拓展至整个元胞,从 而降低了有效导通面积。为了改善这一问题,在常规 CS-MCT 的阴极短路区处引入肖特基接触(Schottky contact) 形成一种具有高效阴极注入肖特基势垒型 MCT^[7](Schottky barrier MCT, SB-MCT),如图 9 所示。肖特基势垒起到 空穴阻挡的作用,在阴极短路区处形成空穴积累,从而抬高 P-well 处电势。凭借阴极短路区处抬高的 P-well 电势,



 Fig. 8
 Pulse output characteristics and carrier concentration distribution of HiA-MCT and con-MCT

 图 8
 HiA-MCT 与传统 MCT 脉冲特性对比及载流子浓度分布对比



 Fig. 9
 SB-MCT device structure schematic and equivalent circuit diagram

 图 9
 SB-MCT 器件结构示意图及其等效电路图

SB-MCT 中更大的 P-well 区域可以导通。仿真结果显示, SB-MCT 在脉冲过程中比常规 CS-MCT 具备更大的导通 面积,同时随着肖特基势垒的提升,导通面积会进一步增加,如图 10 所示。





3 压控型脉冲功率半导体器件典型应用

压控型脉冲功率半导体器件的应用包括雷达、激光器、微波源、粒子加速器等需要产生单次或周期性的高功 率脉冲的系统。一方面用于储能电容器或脉冲形成网络(PFN)的能量储存和释放,另一方面用于开关状态变化时 的电路控制和保护。由于其高效、可靠的性能,压控型脉冲功率半导体器件在这些应用中发挥着重要作用。

3.1 单次脉冲放电

单次脉冲放电通常用于需要单个高能量脉冲的场景^[8-9]。例如,在雷达系统中,单次脉冲用于发送信号并接收 目标返回的回波,从而确定目标的位置和速度。在激光器中,单次脉冲用于产生高能量的激光脉冲,用于科学研究 或材料加工等应用。压控型脉冲功率半导体器件在单次脉冲放电中有着重要的应用,图 11 给出了 MCT 器件在 1 100 V 电压下 0.47、1、2 μF 电容单次脉冲放电波形。

在雷达系统中,需要产生高能量、高功率的脉冲信号来探测目标。压控型脉冲功率半导体器件可以用于控制 雷达发射机中的脉冲放电系统,产生所需的脉冲信号。在医学成像领域,如 CT 扫描、MRI 等,需要使用脉冲放电 来产生 X 射线或磁场。压控型脉冲功率半导体器件可以用于控制这些成像设备中的脉冲放电系统,实现高效能 量转换和精确控制。在激光加工等材料加工领域,需要使用脉冲激光来进行精细加工。压控型脉冲功率半导体器 件可以用于控制激光器中的脉冲放电系统,实现对激光输出功率和脉冲频率的精确调节。在电力设备中,如高压 开关柜、雷电防护设备等,需要使用脉冲放电来实现设备的正常运行或保护。

3.2 重复脉冲放电

重复脉冲放电用于需要连续产生脉冲信号的场景^{[10-11}, 图 12 给出了 MCT 器件在 1 100 V电压下 0.2 μF 电容重 复脉冲放电波形, 重复频率 3 Hz, 峰值电流达 2 kA。在雷达系统中, 重复脉冲用于持续监测目标, 并提供连续的跟 踪信息。在激光器中, 重复脉冲用于连续产生激光束, 例如在激光雷达中用于测距或目标识别。在压控型脉冲功 率半导体器件的应用中, 对于单次脉冲放电, 其主要考虑因素包括脉冲能量的储存和释放控制, 以及对脉冲形状和 宽度的精确控制; 而对于重复脉冲放电, 除了上述因素外, 还需要考虑器件的稳定性和可靠性, 以及对脉冲重复频 率的要求, 主要体现在以下几个方面:



Fig. 11 MCT single pulse discharge waveform with voltage of 1 100 V 图 11 电压为 1 100 V 时 MCT 单次脉冲放电波形



Fig. 12 Repetitive pulse discharge waveform of MCT 图 12 MCT 器件重复脉冲放电波形图

高速重复性: 压控型脉冲功率半导体器件具有快速的开关速度和响应时间, 能够实现高速重复脉冲放电。这 种特性保证了脉冲放电系统能够在短时间内连续产生一系列脉冲信号。

稳定性和可靠性: 压控型脉冲功率半导体器件具有良好的稳定性和可靠性, 能够在长时间工作的情况下保持 稳定性。这种特性使得器件能够在重复脉冲放电过程中保持高效、稳定的工作状态。

能量转换效率: 压控型脉冲功率半导体器件能够高效地将电能转换为脉冲能量, 减少能量的浪费。这种高效 能量转换特性使得重复脉冲放电系统能够在能源有限的情况下实现高效能量输出。

精确控制: 压控型脉冲功率半导体器件具有良好的控制特性, 能够实现对脉冲放电参数的精确控制, 如脉冲能量、频率等。这种精确控制能力使得重复脉冲放电系统能够满足不同应用场景的需求。

3.3 脉冲形成网络(PFN)

脉冲形成网络(PFN)作为一种用于储存和释放高能量脉冲的关键装置,在粒子加速器、激光器、通信和雷达 系统等领域扮演着重要角色。在这些系统中, PFN 通常用作脉冲功率放大器中的能量存储和释放装置,其设计性 能直接影响着系统的整体性能和效率。图 13 给出了基于 MCT 的 PFN 电路脉冲放电波形^[12]。压控型脉冲功率半导体 器件负责控制 PFN 电容器的充放电过程,能够在极短的时间 内完成开关操作,从而确保脉冲能量能够在需要时迅速释 放;通过控制开关动作的时间和频率,还可以具有控制脉冲 输出、调节脉冲形状和宽度等重要功能,以满足不同脉冲形 状的应用需求。压控型脉冲功率器件的稳定性和可靠性,对 于减少 PFN 系统的维护成本和确保长期稳定运行至关重要。

3.4 高压直流断路器

直流输电系统中的高压直流断路器用于保护电网免受 故障和过载的影响,压控型脉冲功率半导体器件在其中扮演



Fig. 13 Pulse discharge waveform of Pulse Forming Network (PFN) circuit based on MCT
图 13 基于 MCT 的 PFN 电路脉冲放电波形

着关键角色^[13-15]。除了基本的可靠性要求,器件还应具有足够的耐压能力和开关速度,以承受数千伏甚至更高的 电压,确保系统的安全可靠运行,能够在故障发生时迅速断开电路,将故障能量快速释放,保护电网设备免受损 坏。图 14 给出了一款基于 MCT 的高压直流断路器原理图和原型照片,该断路器可工作在 4 00 V 直流电网中,可 靠短路电流超 300 A^[16]。



Fig. 14 Circuit schematic and prototype of high-voltage DC circuit breaker based on MCT 图 14 基于 MCT 的高压直流断路器电路原理图和原型电路

随着脉冲器件耐压等级的提升,耐压层厚度增加会导致导通时的电阻增加,这会对脉冲峰值和脉冲前沿的特性产生重要影响。为了优化导通电阻,可以采用FS电场截止层的结构,但随着器件耐压等级超过4500V,硅材料已接近其极限。碳化硅(SiC)材料是最适合高压领域的硅替代材料,具有10倍于硅的临界击穿电场和3倍于硅的热导率,意味着在高压SiC器件的导通电阻将远小于硅,并具有极高的热可靠性。SiC可关断晶闸管器件(GTO)受到广泛研究,制造出了10kV、15kV甚至22kV超高耐压等级的器件^[1617]。SiCGTO器件结构简单,避免了栅氧可靠性等问题,但其电流控制型特性导致驱动功耗较高,增加了驱动设计的复杂性。虽然当前广泛应用于硅材料的MCT结构工艺仍需进一步深入研究,但可以预见的是,随着SiC器件工艺的成熟,高压SiC器件将逐步扩大其影响力,成为更高效、更可靠的半导体开关新选择。

此外,在诸如电磁弹射等高压脉冲功率领域应用中,需要将多个 MCT 进行串并联以提高模块耐压与脉冲电流 能力。随着 MCT 性能一致性和稳定性不断提升,因其支持电压控制、易于大规模串并联的优势,以 MCT 为代表 的压控型脉冲功率半导体器件有望在更高功率容量脉冲功率系统中得到应用,从而推动脉冲功率技术进一步发展 创新。

4 结 论

本文综述了脉冲功率半导体器件的演进历程、研究进展及典型应用。阐述了目前广泛应用的压控型 MOS 栅控晶闸管脉冲功率器件,详细介绍了 MCT 器件在设计、工艺和可靠性等方面的研究进展,以及基于 MCT 器件的

PFN 和高压直流断路器的工业应用实例,分析了 MCT 在可靠性和新材料方面的发展趋势,为脉冲功率半导体器件 领域的技术发展提供参考。

参考文献:

- [1] 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)
- Baliga B J, Chang H R. The MOS depletion-mode thyristor: a new MOS-controlled bipolar power device [J]. IEEE Electron Device Letters, 1988, 9(8): 411-413.
- [3] Chen Wanjun, Liu Chao, Tang Xuefeng, et al. High peak current MOS gate-triggered thyristor with fast turn-on characteristics for solid-state closing switch applications [J]. IEEE Electron Device Letters, 2016, 37(2): 205-208.
- [4] Chen Wanjun, Liu Chao, Tang Xuefeng, et al. Experimentally demonstrate a cathode short MOS-controlled thyristor (CS-MCT) for single or repetitive pulse applications [C]//2016 28th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD). 2016: 311-314.
- [5] Chen Wanjun, Liu Chao, Shi Yijun, et al. Design and characterization of high di/dt CS-MCT for pulse power applications[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2017, 64(10): 4206-4212.
- [6] Liu Chao, Chen Wanjun, Sun Ruize, et al. High voltage insulated gate trigger thyristor with high-efficiency injection for fast turn-on and high current pulse[J]. IEEE Electron Device Letters, 2019, 40(12): 1965-1968.
- [7] Liu Chao, Chen Wanjun, Shi Yijun, et al. A novel insulated gate triggered thyristor with Schottky barrier for improved repetitive pulse life and high-di/dt characteristics [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2019, 66(2): 1018-1025.
- [8] Shinohe T, Nakagawa A, Minami Y, et al. Ultra-high di/dt 2500 V MOS assisted gate-triggered thyristors (MAGTs) for high repetition excimer laser system[C]//International Technical Digest on Electron Devices Meeting. 1989: 301-304.
- [9] Shinohe T, Minami Y, Sato S, et al. Device parameter analysis for direct replacement of thyratrons with MAGTs[C]//Proceedings of the 5th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs. 1993: 77-81.
- [10] Sakugawa T, Kouno K, Kawamoto K, et al. High repetition rate pulsed power generator using IGBTs and magnetic pulse compression circuit[C]//2009 IEEE Pulsed Power Conference. 2009: 394-398.
- [11] Bayne S B, Portnoy W M, Hefner A R. MOS-gated thyristors (MCTs) for repetitive high power switching [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2001, 16(1): 125-131.
- [12] 陈楠,陈万军,尚建蓉,等. 基于新型绝缘栅触发晶闸管的高功率准矩形脉冲源[J]. 电子与封装, 2021, 21: 120302. (Chen Nan, Chen Wanjun, Shang Jianrong, et al. High-power quasi-rectangular pulse generation based on a novel insulated gate trigger thyristor[J]. Electronics & Packaging, 2021, 21: 120302)
- [13] Xu Xiaorui, Chen Wanjun, Tao Hong, et al. Design and experimental verification of an efficient SSCB based on CS-MCT[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(11): 11682-11693.
- [14] Xu Xiaorui, Chen Wanjun, Zhang Shuyi, et al. Design of an isolated circuit breaker with robust interruption capability for DC microgrid protection[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(12): 12408-12417.
- [15] Xu Xiaorui, Chen Wanjun, Liu Chao, et al. An efficient and reliable solid-state circuit breaker based on mixture device[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(9): 9767-9771.
- [16] Song Xiaoqing, Cairoli P, Du Yu, et al. A review of thyristor based DC solid-state circuit breakers [J]. IEEE Open Journal of Power Electronics, 2021, 2: 659-672.
- [17] Song Xiaoqing, Huang A Q, Lee M, et al. 22 kV SiC Emitter turn-off (ETO) thyristor and its dynamic performance including SOA[C]//2015 IEEE 27th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's (ISPSD). 2015: 277-280.