集成门极换流晶闸管开关自箝位模式下的鲁棒性*

杨武华† 沈思豪 贾丽萍 张超 张如亮 王彩琳

(西安理工大学电子工程系,西安 710048)

(2025年1月26日收到; 2025年3月8日收到修改稿)

基于多单元结构模型, 对集成门极换流晶闸管 (IGCT) 在过应力条件下的关断特性进行了仿真. 发现在 开关自箝位模式 (SSCM)下, 虽然器件的端电压被箝位, 但其内部产生了移动速度非常缓慢的电流丝, 从而使 得器件非常容易发生重触发、甚至热击穿. 并且, IGCT 静态雪崩击穿特性决定了器件在 SSCM 下电流丝的 性质. IGCT 寄生 pnp 晶体管的共基极电流增益 α_{pnp} 越大, SSCM 下雪崩诱发电流丝的强度越大, 移动速度越 慢, 从而大大降低器件的鲁棒性.

关键词:集成门极换流晶闸管 (IGCT),开关自箝位,雪崩,电流丝,鲁棒性
PACS: 85.30.Mn, 85.30.Pq, 85.30.Tv
CSTR: 32037.14.aps.74.20250120

1 引 言

随着功率器件电压等级的提升,器件耐压与功 耗之间的矛盾越来越突出.作为晶闸管类器件,集 成门极换流晶闸管 (IGCT)导通时的双侧载流子 注入使其具有较低的导通压降,同时,"硬驱动"技 术的采用大大增加了器件的开关速度和安全工作 区.近些年,随着国内对 IGCT 芯片制造与驱动技 术关键问题的攻克,IGCT 正在电力系统的某些领 域逐渐替代传统的晶闸管,比如高压直流输电与风 力发电的直流断路器、静止同步补偿器,以及多电 平转换器等^[1-4].当 IGCT 应用于以上场合时,负 载多为感性,且器件容易遭受高电压、大电流的冲 击.于是,器件出厂前需在过应力条件下对其反偏 安全工作区 (RBSOA)进行测试.

开关自箝位模式 (SSCM) 是指双极型功率器 件进行 RBSOA 测试时,由于施加给器件的关断应 力较大 (即高的电源电压、大的关断电流,以及高 的杂散电感), 在器件端电压上升至电源电压之前, 器件内部存储的等离子体被突然耗尽, 器件端电压 迅速爬升并被箝位至接近器件静态雪崩击穿电压 的现象. 之前关于功率二极管、IGBT,以及 IGCT 的 SSCM 研究表明 [5-8], 类似于 IGBT 固有的短路 特性是一种过流保护机制, SSCM 对于设计合理的 器件与系统是一种过压保护机制,由于器件的端电 压在 SSCM 下被箝位. 对于关断过程相当于基极 开路 pnp 晶体管的 IGBT 与 IGCT, 为了增强器件 在 SSCM 期间电压箝位的稳定性, 防止负阻效应 的发生 [5.7], 需将器件寄生 pnp 晶体管的电流增益 α_{pnp}设计地尽可能高.

然而,之前的研究仅仅关注了器件的端特性, 本文对于 IGCT 在 SSCM 期间器件内部物理效应 的研究发现,虽然从器件的端特性上考虑,端电压 被稳定箝位,但是器件内部发生了具有毁坏性的电 流聚集效应,并且这种效应随器件 α_{pnp} 的增加而

© 2025 中国物理学会 Chinese Physical Society

^{*} 西安理工大学教师博士科研启动经费 (批准号: 103-451121007)、陕西省科学技术厅自然科学基础研究计划 (批准号: 2023-JC-QN-0764) 和陕西省秦创原"科学家+工程师"队伍建设项目 (批准号: 2023KXJ-189) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: yangwuhua@xaut.edu.cn

愈发强烈.

2 RBSOA 的测试与仿真分析

本文以直径为 91 mm 的 4.5 kV/4.0 kA IGCT (器件实际雪崩击穿电压超过 5.0 kV)为研究对象, 如图 1 所示,首先对器件在过应力下的关断特性进行了测试与仿真,对 SSCM 的发生进行了初步分析.



图 1 IGCT 组件、管芯与结构剖面示意图 (a) IGCT 组件; (b) 直径为 91 mm 的 GCT 管芯; (c) GCT 单元的结构剖面 示意图

Fig. 1. IGCT module and chip: (a) IGCT module; (b) GCT chip with a diameter of 91 mm; (c) structural profile diagram of GCT unit.

GCT 管芯正面与门极可关断晶闸管 (GTO) 类似,采用了分立的门-阴极结构,其阴极呈指条 状,被门极所环绕,并且阴极无短路点,如图 1(b) 所示.与 GTO 不同的是,GCT 背面采用场阻止 层 (FS 层) 和透明阳极,大大提高了关断速度,如 图 1(c) 所示.IGCT 是将封装好的门极换流晶闸 管 (GCT) 通过印刷电路板与门极驱动器集成在一 起而形成的组件,从而大大降低了门极驱动电路上 的杂散电感,这使得"硬驱动"技术的使用成为可 能,如图 1(a) 所示.在IGCT 开关过程中,非常强 的门极电流脉冲可以使 J₃结在很短的时间内全面 触发或截止,使得器件更均与、更快速、更可靠地转换."硬驱动"技术的典型特征是可实现单位关断增益,使 J₃结在阳极电压上升之前就已截止,因此 GCT的关断实质上是一个基极开路的 pnp 晶体管的关断,避免了 GTO 那样在阳极电压上升过程中阴极下方的晶闸管部分仍处于导通的情况,大大提高了 dV/dt 耐量和最大可关断电流 (MCC).表1列出了 GCT 单元的主要结构参数.

	表	1 4.5	5 kV 非对秭	KGCT 的主	要结	皆构参数	
Гable	1.	Main	$\operatorname{structural}$	parameters	of	$4.5~{\rm kV}$	asym-
netry	GC	Т.					

	掺杂(峰值) 浓度/cm ⁻³	厚度/宽度/µm	
n-基区	$1{ imes}10^{13}$	厚度: 370	
n场阻止层	$2{ imes}10^{16}$	厚度: 47	
p+透明阳极区	1×10^{17} 5 $\times 10^{18}$	厚度: 3	
浅p基区	$5{ imes}10^{16}$	p基区整体厚度: 110	
深p基区	—		
n+阴极区	$1\! imes\!10^{20}$	厚度/宽度: 20/200	
单元宽度(阴极条宽度)	—	400	

2.1 测试分析

图 2 为 IGCT 关断测试电路示意图, $V_{\rm DC}$ 代 表电源电压, $L_{\rm i}$ 代表限流电感, L_{σ} 为杂散电感, $L_{\rm load}$ 为负载电感, FWD 为续流二极管.图 3 为 IGCT 在过应力条件 (电源电压 $V_{\rm DC} = 2900$ V, 关断电 流 $I_{\rm T} = 5600$ A, 杂散电感 $L_{\sigma} = 1$ µH) 下的关断 测试曲线. t = 0 µs, 很强的负电流脉冲被施加至 IGCT 的门极, 器件在"硬驱动"条件下开始关断; 门极换流过程大约在 0.5 µs 内完成, 随后阳阴极电 压 $V_{\rm AK}$ 开始上升, 当 $V_{\rm AK}$ 上升至大约 1500 V 时, 其上升率明显减小, 标志着动态雪崩效应开始发生; 直至 $V_{\rm AK}$ 上升至大约 3000 V, 器件经受住了动态



Fig. 2. Turn-off test circuit of IGCT.

雪崩效应的冲击,并未失效;随后, V_{AK} 迅速上升 至器件静态雪崩击穿电压附近,并被箝位,SSCM 发生,直至器件关断过程结束,即 $I_A = 0$ A,自箝 位模式结束.



图 3 4.5 kV IGCT 过应力关断测试中的 SSCM 现象 ($V_{\rm DC} = 2900$ V, $I_{\rm T} = 5600$ A, $L_{\sigma} = 1$ µH, 初始温度 T = 300 K)

Fig. 3. The occurrence of SSCM during the test of 4.5 kV IGCT turn-off ($V_{\rm DC} = 2900$ V, $I_{\rm T} = 5600$ A, $L_{\sigma} = 1 \ \mu\text{H}$, T = 300 K at the initial stage).

由图 3 可见, IGCT 在 SSCM 期间被较稳定地 箝位, 器件成功关断且并未出现失效现象. 这说明 在相应的测试应力条件下, 器件 α_{pnp} 的设计是足 够大的, 足够多的空穴注入会抑制器件背面高低 结 (nn-结) 处由雪崩产生电子引发的电场峰值, 从 而防止 pn-结与 nn-结相互增强的双侧雪崩效应而 使器件失效^[5,7]. 然而, 之前对 SSCM 发生时 IGCT 内部物理效应的研究只考虑了器件纵向方向, 而忽 略了横向效应.

2.2 仿真分析

实际的 IGCT 管芯是由数千个单元 (数千个 阴极条) 组成, 如图 1(b) 所示, 同时为了进一步揭 示 SSCM 发生时器件内部横向上的物理效应, 本 文采用 Sentaurus-TCAD 专业模拟软件建立了多 单元 IGCT 结构模型, 并搭建了如图 2 所示的关断 测试电路, 对器件在过应力条件下的关断特性进行 了仿真分析.

为了研究器件内部横向上的物理效应,所建立 的仿真结构模型需在横向方向上有一定的尺寸,然 而较大横向尺寸结构模型的仿真又会降低仿真效 率.因此,建立了如图4所示的5单元结构模型, 横向与纵向尺寸分别为2000μm与550μm,器件 的有效面积通过软件的面积因子 (area factor)被 调节为 56 cm² (相当于图 1(b) GCT 管芯有源区 的面积), n-基区的电子寿命与空穴寿命分别为 10 μs 与 3 μs. 为了便于抽取器件各个单元各自的电流,器件的阳极铝电极被分开,从左至右依次为 A1, A2, A3, A4, A5.



图 4 5 单元 IGCT 结构仿真模型

Fig. 4. Structural model of IGCT with 5 cells used for simulation.

特性仿真采用的主要物理模型包括禁带窄化 模型, 依赖于掺杂、温度、载流子-载流子散射, 以 及高电场造成的载流子漂移速度饱和的迁移率模 型, 依赖于掺杂和温度的 Shockley-Read-Hall(SRH) 体复合模型, 俄歇 (Auger) 复合模型, van Overstraeten 和 de Man 的雪崩产生模型.

首先对具有不同阳极区掺杂浓度 $(N_{A1} < N_{A2} < N_{A3} < N_{A4})$ 的 IGCT 在过应力 (关断应力与图 3 的测试应力相同)条件下的关断特性进行恒温仿 真 (温度 T = 300 K), 结果如图 5 所示.



图 5 不同阳极区掺杂下 IGCT 过应力下的关断特性曲线 ($V_{\rm DC} = 2900$ V, $I_{\rm T} = 5600$ A, $L_{\sigma} = 1$ µH, T = 300 K) Fig. 5. Turn-off curves of IGCT with different doping concentrations of anode region at over-stress ($V_{\rm DC} = 2900$ V, $I_{\rm T} = 5600$ A, $L_{\sigma} = 1$ µH, T = 300 K).

 $t = 500 \ \mu s$, 施加门极硬驱动关断信号, 门极 换流结束后, p基区中存储的载流子被完全抽取, pn-结开始反偏, 电场主要向 n-基区展宽, V_{AK} 开 始上升. 随着 IGCT 背面阳极区的掺杂浓度增加 (即 α_{pnp} 的增大), 器件导通状态下 n-基区的存储 载流子浓度越高, 导致在同样的关断电流 (I_{T})下 载流子的抽取速度变慢, 反偏 pn-结处电场在 n-基 区的展宽速度变慢, 导致关断时 V_{AK} 上升率随 α_{pnp} 的增大而减小.

随着 V_{AK} 的上升, 剩余等离子体被不断抽取, 等离子体边沿不断向阳极侧移动. 在等离子体边沿 处,受电场的作用,电子向阳极侧运动并快速通过 透明阳极区到达具有高复合速率的阳极,空穴通过 空间电荷区向 p 基区流动并最终通过门极流出器 件.由于流经空间电荷区的空穴带正电荷,其与空 间电荷区同样带正电的施主电荷相互叠加,造成 VAK 上升过程中 n-基区的电场梯度远高于器件阻 断状态下的电场梯度. 这就造成 VAK 还远小于器 件实际的雪崩击穿电压时, pn-结处的电场峰值就 已达到器件发生雪崩的临界击穿电场,动态雪崩开 始发生.由于动态雪崩的发生产生雪崩载流子,从 而减慢了剩余载流子的抽取与电场在 n-基区的展 宽速度,所以 V_{AK}上升率会明显变缓. 由图 5 可 见,随着 IGCT 的 α_{pnp} 增加,动态雪崩发生地更 早,根据对动态雪崩开启电压的理论推导⁹,这是 因为 α_{pnp} 的增加会放大雪崩倍增因子,并同时降 低临界击穿电场.

随着 V_{AK}的继续上升, pn-结处电场向 n-基区 的展宽不断增加, 同时电场强度也愈来愈强, 导致 器件的动态雪崩效应增强, V_{AK}上升率亦越来越 小.由于器件在过应力 (高的 V_{DC}, 大的关断电流 *I*_T, 大的杂散电感 *L*_o)下关断, 所以器件内部存储 的载流子被过快地抽取, 在 V_{AK} 到达电源电压 V_{DC}之前, n-基区存储的载流子就已完全被抽取, 电场穿通至 n 型场阻止层.由于 n 型场阻止层的 掺杂较 n-基区高, 其少子寿命较低, 所以存储的载 流子数量较少, 因此, 由图 5 可见, V_{AK}上升率有 一个陡然上升的过程, 这表示 pn-结处的电场已穿 通至 n 型场阻止层.

当 V_{AK} 上升至电源电压时,与 IGCT 反并联 的二极管 FWD (如图 2 中所示)开始续流,导致 IGCT 阳极电流 I_A 开始减小. 在杂散电感 L_σ 的作 用下, I_A 的下降会导致 IGCT 两端的 V_{AK} 进一步 快速上升,直至达到器件的雪崩击穿电压附近后被 箝位, SSCM 发生.

在 SSCM 期间,由于 V_{AK} 被箝位,所以 I_A 近 似线性减小.并且,随着器件 α_{pnp} 的增大,箝位电

压 V_{clamp} 降低, 根据

$$dI_{\rm A}/dt = (V_{\rm clamp} - V_{\rm DC})/L_{\sigma} , \qquad (1)$$

 V_{clamp} 降低会导致 I_A 在 SSCM 期间的下降率减小, 从而 SSCM 的持续时间增长.

与图 3 的测试结果一样,图 5 的仿真结果显示,四种不同 α_{pnp} 的 IGCT 的 SSCM 似乎也是稳定的,只是 SSCM 的箝位电压 V_{clamp} 随 α_{pnp} 增大而大大降低,同时箝位时间也增长.

3 电流丝的形成与性质

3.1 电流丝的形成

上述基于器件的端特性,对于 IGCT 在过应力下的关断特性进行了测试与仿真分析,下面将重点关注器件内部的物理效应,进一步研究器件在SSCM下的鲁棒性.

图 5 中不同阳极区掺杂浓度的 IGCT 在过应 力关断过程中,随着 V_{AK} 的上升与动态雪崩效应 的增强, V_{AK} 特性曲线上出现了电压突然下降的 "凹槽",这表明器件发生了负微分电阻效应,负微 分电阻效应的发生通常会诱发器件产生电流聚集 效应 (即电流丝效应)^[10].采用图 4 仿真结构模型中 分开的阳极电极将流过每个单元的电流单独抽取 出来,结果如图 6 所示.图 7 呈现了图 6(d) 中不同 时刻器件内部的电流密度分布.图 6 和图 7 对于器 件内部物理效应的呈现表明了雪崩诱发电流丝的 存在及其运动规律.

图 7 呈现了 IGCT 中由雪崩诱发的电流丝的形态不同于功率二极管^[11-13]. 虽然雪崩效应主要发生在 pn-结处的空间电荷区, 但电流丝却是纵向贯穿整个器件的. 当电流丝在某个区域产生后, 由于此处很高的电流密度, 导致此处的雪崩效应比其他区域更强, 且此处 pn-结产生的雪崩电子向阳极侧移动, 相当于给器件背面的 pnp 晶体管施加了一个基极驱动电流, 从而促使此处背面空穴的大量注入, 即 pn-结处的雪崩效应与 p+n 结处的空穴注入相互增强, 形成了 GCT 中的这种纵向贯穿器件的电流丝.

3.2 电流丝的性质

图 6 中 IGCT 在不同阳极区掺杂下的过应力 关断特性均表明,在 V_{AK}上升过程中由动态雪崩 诱发的电流丝在器件内部是频繁移动的,然而 一旦 V_{AK} 被箝位, SSCM 发生, 电流丝几乎不再运动, 停留在某个单元的位置直至 I_A 下降为 0 (即 SSCM 结束).

图 6 与图 7 是通过恒温模拟得到的, 而实际器 件工作过程中会因功耗的产生而使得晶格温度升 高, 尤其是当雪崩效应发生且产生电流丝后, 最高





Fig. 6. Turn-off characteristics of IGCT at different anode doping concentrations and current extraction of each cell: (a) N_{A1} ; (b) N_{A2} ; (c) N_{A3} ; (d) N_{A4} .





Fig. 7. Current density distribution inside the device at different times in Fig. 6(d).

晶格温度必定会明显升高.温度对载流子的碰撞电 离率及其他物理参量产生影响,因此,有必要对 IGCT 过应力下的关断特性进一步进行电热耦合 仿真. 图 8 为 IGCT 阳极区掺杂为 NA1 时器件的电 热耦合模拟结果,器件的关断应力与图 6(a)相同, 初始晶格温度为 300 K. 由图 8 可见, 随着 IGCT 换流结束, V_{AK} 开始上升,最高晶格温度 T_{max} 也 随之升高,一旦动态雪崩诱发的电流丝产生,T_{max} 随之会有明显的升高. 在 V_{AK} 上升阶段, T_{max} 较 初始温度变化并不是很大,这是因为电流丝是不断 移动的, 然而, 一旦 SSCM 发生, T_{max} 将迅速升高. 需要注意的是, 与图 6(a) 中相比, 图 8 中在 SSCM 期间,本来静止不动的电流丝又发生了移动,虽然 其移动速度远低于 VAK 上升阶段. 这说明晶格温 度的升高是驱动 SSCM 期间雪崩诱发电流丝移动 的决定性因素.



图 8 阳极区掺杂为 N_{A1} 时 IGCT 关断特性的电热耦合仿 真结果 ($V_{DC} = 2900$ V, $I_T = 5600$ A, $L_\sigma = 1 \mu$ H, 初始 T = 300 K)

Fig. 8. Electrothermal simulation results of IGCT turn-off characteristics at the $N_{\rm A1}$ of the anode region doping ($V_{\rm DC} = 2900$ V, $I_{\rm T} = 5600$ A, $L_{\sigma} = 1$ µH, T = 300 K at the initial stage).

图 9 呈现了图 8 中 SSCM 期间的三维电流密 度分布. 由图 9 可见, 空间电荷区中电流丝中心的 最高电流密度已接近 10³ A/cm², 电流丝中很高的 电流密度必须绕过 n+阴极区而流出器件, 导致在 n+ 阴极区下方 p 基区中的电流密度高达 10³ A/cm² 量级, 这极有可能造成门阴极 pn+结的重触发; 另 外, 电流丝引起的温升还会进一步降低门阴极 pn+ 结的开启电压. 一旦门阴极 pn+结开启, 电流丝所 在区域的晶闸管触发开通, 器件承受的电压在此区 域有下降的趋势, 导致电流进一步向此处的集中, 最终使器件在此区域因温升过高而被烧毁.

综上所述, IGCT 发生 SSCM 时, 虽然从器件 端特性的角度考虑, 器件的总损耗因电压箝位而被 限制, 然而, 在此期间器件内部产生了强度非常高的电流丝, 其会使整个器件所产生的功耗在电流丝 所在的局部区域通过发热进行释放, 极有可能导致器件失效. 因此, IGCT 在 SSCM 期间的鲁棒性取决于电流丝的强度与移动速度.



图 9 IGCT SSCM 期间雪崩产生电流丝在 n⁺阴极区下方 引起的强烈电流聚集效应 (对应图 8 中 $t = 501.6 \,\mu s$) Fig. 9. Strong current crowding caused by current filament of IGCT under n⁺ cathode region during SSCM (Corresponding to $t = 501.6 \,\mu s$ in Fig. 8).

需要强调的是, 雪崩产生的电流丝是电流在器件横向上的一种聚集效应^[14-16]. 虽然图 7 中的电流丝仅有 1 条, 其是通过图 4 的 5 单元二维结构模型仿真得到的, 但是实际器件是三维的, 并且是由数千个单元组成, 因此, 通过二维模拟得到的电流丝并不能反映实际器件中电流丝的强度和个数. 然而, 建立等同于实际器件数千个单元的三维器件结构模型进行仿真对于数值计算显然是不可能的. 可以预想, 当雪崩效应发生时, 实际器件中产生的电流丝不止 1 条, 但是可以肯定的是, 多条电流丝在V_{AK}上升阶段均是不断移动, 并可能相遇或分裂的, 这并不会造成太大的温升, 而一旦 SSCM 效应发生, 这些电流丝的移动将变得非常缓慢, 极有可能造成器件因局部重触发甚至过热而失效.

4 电流丝的形成机理与影响机理

IGCT 在过应力关断过程中由动态雪崩诱 发的电流丝是快速移动的,其形成机理与影响已 被详细研究.这部分主要研究 SSCM 期间产生的 极有可能造成器件失效的电流丝形成机理与影响 机理.

4.1 SSCM 的箝位机理

从上述 IGCT 的关断波形可以看出, IGCT 换 流过程结束后, 在感性负载的作用下, 器件并未因 流过其电流的突然消失而立即关断, 而此时支撑电 流流动的是器件中存储载流子的移除, 且当动态雪 崩发生后, 还有雪崩产生载流子的移动, 如图 10 中 $t = 501 \ \mu s$ 和 $t = 502 \ \mu s$ 器件内部的电场与载 流子分布. 然而, 一旦电压箝位发生, SSCM 开启, 由于器件中的存储载流子已被耗尽, 在器件中没有 可移动的被移除的载流子, 因此, 此时支撑电流流 动的只有雪崩产生的载流子, 如图 10 中 $t = 505 \ \mu s$ 和 $t = 508 \ \mu s$ 器件内部的电场与载流子分布. 由此 可见, 器件在 SSCM 期间实质上正工作在其静态 雪崩击穿模式下, 所以器件的静态雪崩击穿特性决 定了器件在 SSCM 期间的鲁棒性.



图 10 IGCT 过应力关断过程中电压上升阶段 (t = 501, 502 µs) 与电压箝位期间 (t = 505, 508 µs) 器件内部的空穴 浓度 p 与电场强度 E纵向分布曲线 (对应图 6(d)) Fig. 10. Vertical distribution curves of hole concentration p and electric field intensity E inside the device during the voltage rise stage (t = 501, 502 µs) and voltage clamp period (t = 505, 508 µs) during the IGCT over-stress turn-off (Corresponding to Fig. 6(d)).

图 11 模拟了不同阳极区掺杂浓度下 IGCT 在 过电压下的静态雪崩击穿特性曲线,当器件在相应 的击穿特性曲线上工作时,随着雪崩电流密度 J_A 的增加,器件的 α_{pnp} 被提取,如图 12 所示. IGCT 在阻断状态下,门阴极被短路,这相当于一个基区 开路的 pnp 晶体管的阻断.当器件发生雪崩击穿 时,根据 pnp 晶体管雪崩击穿理论:

$$M\left(V_{\rm AK}\right) \cdot \alpha_{\rm pnp} = 1,\tag{2}$$

式中, *M*代表雪崩倍增因子, 其由 *V*_{AK} 决定, *V*_{AK} 越大, 电场展宽越大, 强度越强, *M*越大.



图 11 不同阳极区掺杂浓度下, IGCT 在常温 (300 K) 与 高温 (400 K) 下的雪崩击穿特性曲线

Fig. 11. The avalanche breakdown curves of 4.5 kV AS-GCT with different anode doping at high (400 K) and room temperature (300 K).



图 12 IGCT 在雪崩击穿模式下,器件的 α_{pup} 与雪崩产生 电流密度 J_A 的关系曲线

Fig. 12. The relationship curves of $\alpha_{\rm pnp}$ and $J_{\rm A}$ under the avalanche breakdown of IGCT.

由图 12 可见, IGCT 阳极区的掺杂浓度越高, 器件发生雪崩击穿后的 α_{pnp} 越大,根据 (2) 式,器 件的雪崩击穿后的电压 V_{AK} 越低,如图 11 所示. 由于 IGCT 发生 SSCM 时,器件的端电压被箝位 在雪崩击穿电压下,因此,图 11 中器件发生雪崩 后在某一雪崩电流下的电压即为器件在 SSCM 期间相应关断电流下的箝位电压.这就是图 5 中 IGCT 发生 SSCM 时的箝位电压随器件阳极区掺 杂浓度增加而下降的原因.

4.2 电流丝的形成机理与影响机理

上述分析表明 IGCT 在 SSCM 期间实质上工作在其雪崩击穿特性曲线上.图 11 显示,当 IGCT 雪崩击穿发生后,随着雪崩电流的增大,其雪崩击穿曲线上首先出现一个负微分电阻 (NDR)分支 (NDR1 branch),当 *V*_{AK} 减小至一个谷值点 (图 11中的 *V*点或 *V*点)时,一个正微分电阻 (PDR)

分支出现,最后又呈现出第二个 NDR 分支 (NDR2 branch).由于 IGCT 的阻断和雪崩击穿相当于 pnp 的阻断和雪崩击穿,因此,其雪崩击穿曲线上 NDR 和 PDR 分支的形成机理与 IGBT的相同^[17],这里不再赘述.

IGCT 在 SSCM 期间因雪崩效应产生电流聚 集效应 (电流丝效应) 的原因是器件发生 SSCM 效 应时正好工作在其雪崩击穿曲线上的 NDR 分支 上. 由于在 NDR 分支上,随着雪崩电流的增大,器 件两端的电压减小,如果器件因某一因素 (结构或 工艺的不均匀性等因素)已经发生了电流在局部的 聚集效应,而器件此时正好工作在 NDR 分支上, 那么此区域由于电流密度的升高而电压也减小,即 此区域的微分电阻有比其他区域减小的趋势,这将 会导致电流进一步向此区域聚集,从而形成一个正 反馈,造成电流丝中心的电流密度越来越高.

如果器件工作在 PDR 分支上, 那么电流向某 个区域的聚集将导致此区域的微分电阻有比其他 区域增大的趋势, 从而不利于电流向此处的继续聚 集.这就是 NDR 分支和 PDR 分支对电流丝强度 的影响, 由此可见, 如果 NDR 分支越强烈, 即器件 雪崩击穿曲线上的端电压随电流密度的增大而减 小得更快, 那么器件的负微分电阻效应越强, 会导 致电流更快地向电流丝所处的区域聚集, 电流丝的 强度越来越大, 直至此区域的工作状态进入 PDR 分支.

图 9 显示 IGCT 在 SSCM 期间产生的电流丝 会在 n⁺ 阴极区下方形成非常强烈的电流聚集效应, 从而造成器件因重触发而失效.所以 SSCM 下电 流丝的强度决定着器件的鲁棒性.而理论上预估电 流丝的最大强度需要判断器件雪崩击穿曲线由 NDR 分支转换至 PDR 分支时对应的雪崩电流的 大小,即图 11 中 *V*_{AK} 谷值点 *V*或 *V*[']所对应的电 流.*V*点对应的电流密度越大,意味着此器件产生 的电流丝的强度越强.

图 8 的热电耦合仿真显示, IGCT 在电压上升 阶段由动态雪崩产生的电流丝是快速移动的, 这是 由于在电流丝所在区域剩余等离子体被快速抽 取^[18-20];在 SSCM 期间产生的电流丝受温升的影 响也是移动的, 但移动速度非常缓慢. 而 SSCM 下 电流丝的移动速度越慢, 意味着其在某个区域停留 的时间越长, 从而增大了器件在此局部区域关断失 效的风险. 所以 SSCM 下电流丝的移动速度也决 定着器件的鲁棒性. 在 SSCM 期间电流丝的移动 是由于随着温度升高, FS-IGBT 雪崩击穿曲线上 NDR1 branch 向 V_{AK} 更大的方向漂移. 电流丝在 某个区域产生, 将会导致此区域的温度升高, 并且 高于其他没有电流丝的区域, 于是, 在电流丝所在 区域的微分电阻有增大的趋势, 这就造成电流丝向 其他温度较低、微分电阻也较低的区域移动. 并且, 图 11 中可以看出, NDR1 branch 的偏移量 ΔV_{AK} 越大, 电流丝所在区域由温升导致的正微分电阻越 大, 越容易驱动电流丝向温度较低的地方移动. 由 图 11 可见, IGCT 阳极区掺杂浓度越高, α_{pup} 越 大, 随着温度的升高, ΔV_{AK} 越小, SSCM 下电流 丝的移动速度越缓慢.

5 结 论

IGCT 在过应力关断过程中, 在电压上升阶段 由动态雪崩效应诱发的电流丝是快速移动的, 不会 造成太大的温升, 不会对器件鲁棒性造成较大的影 响; 然而, 一旦电压上升至静态雪崩击穿电压附近 被箝位, SSCM 发生, 器件将工作在其静态雪崩击 穿模式下, 若器件工作在其静态雪崩击穿特性曲线 上的 NDR 分支上, 器件内部将诱发仅依靠温升驱 动、移动速度非常缓慢的电流丝, 这会使得本来需 要整个器件承受的功耗仅靠电流丝所在的区域来 承受, 从而造成非常高电流密度的电流丝与较大的 温升, 器件很容易发生重触发或热击穿.

IGCT 在 SSCM 下产生电流丝的强度与移动 速度取决于器件的 α_{pnp} . IGCT 静态雪崩击穿曲线 上由 NDR1 branch 向 PDR 分支转化的电压谷值 点 V 对应的电流密度决定了电流丝的强度, 温升 引起的雪崩击穿特性曲线的漂移量 ΔV_{AK} 决定了 电流丝的移动速度. 随着器件 α_{pnp} 的增加, V 点对 应的电流密度越高, ΔV_{AK} 越小, 这会使得电流丝 的强度越强, 电流丝的移动速度越慢, 同时, 由于 SSCM 箝位时间也随 α_{pnp} 的增加而增长, 从而大 大降低器件的鲁棒性.因此,在进行 GCT 芯片设 计时,为了提高器件在 SSCM 下的鲁棒性,对于 α_{pnp} 需较精确地控制,一方面防止 α_{pnp} 过小导致 SSCM 期间高低结处的电场过高而发生双侧雪崩增强效 应,另一方面防止 appp 过大造成 SSCM 期间雪崩 诱发电流丝的强度过大与移动速度过慢;同时在工 艺制造允许的条件下,尽可能地增加 p 基区的结

深,降低 n⁺阴极区下方的横向电阻以减小电流丝 流经此处时的横向压降,从而抑制重触发效应.

参考文献

- Stiasny T, Quittard O, Waltisberg C, Meier U 2018 Microelectron. Reliab. 88 510
- [2] Kang Z, Tang Y, Zhan C, Wang W, Zhu L, Sun H, Ji S 2024 CPSS & IEEE International Symposium on Energy Storage and Conversion Xi'an, China, November 8–11, 2024 p190
- [3] Wu J, Pan J, Ren C, J Liu, Zhao B, Yu Z, Zeng R 2025 *IEEE Trans. Power Electron.* 40 5223
- Wang J, Chen L, Zhang X, Liu J, Zhao B, Yu Z, Wu J, Zeng R 2025 *IEEE Trans. Power Electron* 40 5309
- Lutz J, Schlangenotto H 2020 Semiconductor Power Devices: Physics, Characteristic, Reliability (Vol. 1) (Switzerland: Springer International Publishing AG) p108
- [6] Rahimo M, Kopta A, Eicher S, Schlapbach, Linder 2004 Proceedings of the 16th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs Kitakyushu, Japan, May 24-27, 2004 p437
- [7] Rahimo M, Kopta A, Eicher S, Schlapbach U, Linder S 2005 Proceedings of the 16th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs Santa Barbara, CA, USA, May 23–26, 2005 p67
- [8] Stiasny T, Streit P 2005 Proceedings of the 16th International

Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs Santa Barbara, CA, USA, May 23–26, 2005 p203

- [9] Yang W H, Wang C L 2021 Microelectron. Reliab. 120 114111
- [10] Yang W H, Wang C L, Yang J 2019 Microelectron. Reliab. 92 34
- [11] Lutz J, Baburske R, Chen M, B Heinze, Domeij M, Felsl HP, Schulze HJ 2009 IEEE Trans. Electron Devices 56 2825
- [12] Schulze H J, Niedernostheide F J, Pfirsch F, Baburske R 2013 IEEE Trans. Electron Devices 60 551
- [13] Baburske R, Niedernostheide F J, Lutz J, Schulze HJ 2013 IEEE Trans. Electron Devices 60 2308
- [14] Lutz J, Baburske R 2012 Microelectron. Reliab. 52 475
- [15] Oetjen J, Jungblut R, Kuhlmann U, Arkenau J, Sittig R 2000 Solid State Electron. 44 117
- [16] Baburske R, Lutz J, Heinze B 2010 IEEE International Reliability Physics Symposium Proceedings Anaheim, CA, USA, 2010, p162
- [17] Yang W H, Wang C L, Zhang R L, Zhang C, Su L 2023 Acta Phys. Sin. 72 078501 (in Chinese) [杨武华, 王彩琳, 张如亮, 张 超, 苏乐 2023 物理学报 72 078501]
- [18] Yang W H, Wang C L, Zhang R L, Su L, Zhang Q 2021 IEEE Trans. Electron Devices 68 208
- [19] Dong M L, Yang W H 2024 2024 3rd International Symposium on Semiconductor and Electronic Technology Xi'an, China, August 23–25, 2024 p315
- [20] Yang W H, Wang C L, Yang J, Zhang Q, Su L 2021 Microelectron. Reliab. 118 114048

Robustness of integrated gate commutated thyristor in switching self-clamping mode^{*}

YANG Wuhua[†] SHEN Sihao JIA Liping ZHANG Chao ZHANG Ruliang WANG Cailin

(Department of Electronic and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

(Received 26 January 2025; revised manuscript received 8 March 2025)

Abstract

As a thyristor-like device, integrated gate commutated thyristor (IGCT) is more applicable to the high-voltage and high-power fields due to the lower on-state voltage drop, and a combination of transparent anode and hard drive enables IGCT to turn off faster and more reliably. However, with an increase in power capacity of IGCT, the reliability of IGCT is becoming an increasing concern.

Based on the multi-cell structure model, the turn-off characteristics and robustness of IGCT under overstress conditions are studied in this work. The results show that during GCT turning off, the modulation of free carriers to the electric field in the space charge region makes the dynamic avalanche effect occur at the anodecathode voltage much lower than the rated blocking voltage of the device, and the avalanche-induced current filament effect may occur due to the distortion of electric field, resulting in negative differential resistance effect at strong dynamic avalanche. In comparison, the behavioral characteristics of current filament at different stages of turn-off behave differently.

During the voltage rising period when IGCT turns off, the avalanche-induced current filament can move rapidly, which will not cause the temperature to rise too much and has little influence on the robustness of the device. In contrast, when the anode-cathode voltage rises close to the static avalanche breakdown voltage, the switching self-clamping mode (SSCM) will occur, and the device will operate in its static avalanche breakdown mode. If the device operates on the negative differential resistance (NDR) branch of its static avalanche breakdown characteristic curve, a very slow moving current filament driven only by temperature rise will appear. This makes the power consumption that is required to be borne by the entire device undertaken only by the area where the current filament is located, thus resulting in a very high local current density and a large local temperature rise, and the device is easy to re-trigger or thermally break down.

The static avalanche breakdown characteristics of IGCT determine the nature of the current filament under SSCM. The larger the common-base current gain α_{pnp} of the parasitic pnp transistor of IGCT, the stronger the avalanche-induced current filament under SSCM is and the slower its movement speed, thereby significantly reducing the robustness of the device. Therefore, in order to improve the robustness of the device under SSCM, more precise control of α_{pnp} is required during the designing of GCT chips.

Keywords: integrated gate commutated thyristor (IGCT), switching self-clamping, avalanche, current filament, robustness.

PACS: 85.30.Mn, 85.30.Pq, 85.30.Tv

DOI: 10.7498/aps.74.20250120

CSTR: 32037.14.aps.74.20250120

^{*} Project supported by the Teachers' Doctoral Research Funding of Xi'an University of Technology of China (Grant No. 103-451121007), the Natural Science Basic Research Program of Science and Technology Department of Shaanxi Province of China (Grant No. 2023-JC-QN-0764), and the Shaanxi Provincial Qin Chuangyuan "Scientist + Engineer" Team Construction Project, China (Grant No. 2023KXJ-189).

[†] Corresponding author. E-mail: yangwuhua@xaut.edu.cn

物理学报Acta Physica Sinica





Institute of Physics, CAS

集成门极换流晶闸管开关自箝位模式下的鲁棒性

杨武华 沈思豪 贾丽萍 张超 张如亮 王彩琳

Robustness of integrated gate commutated thyristor in switching self-clamping mode YANG Wuhua SHEN Sihao JIA Liping ZHANG Chao ZHANG Ruliang WANG Cailin 引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 74, 118501 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250120 CSTR: 32037.14.aps.74.20250120 在线阅读 View online: https://doi.org/10.7498/aps.74.20250120 当期内容 View table of contents: http://wulixb.iphy.ac.cn

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高压IGBT雪崩鲁棒性的研究

Study on avalanche ruggedness of high voltage IGBTs 物理学报. 2023, 72(7): 078501 https://doi.org/10.7498/aps.72.20222248

光控多门极晶闸管的多种工作模式

Various operating modes of optically controlled multi-gate thyristors 物理学报. 2025, 74(5): 058401 https://doi.org/10.7498/aps.74.20241608

相互依赖网络上级联故障鲁棒性悖论研究

Robustness paradox of cascading dynamics in interdependent networks 物理学报. 2024, 73(21): 218901 https://doi.org/10.7498/aps.73.20241002

连续变量Einstein-Podolsky-Rosen纠缠态光场在光纤信道中分发时纠缠的鲁棒性

Entanglement robustness of continuous variable Einstein-Podolsky-Rosen-entangled state distributed over optical fiber channel 物理学报. 2022, 71(9): 094202 https://doi.org/10.7498/aps.71.20212380

一种能够改善鲁棒性的新型4H-SiC ESD防护器件 A novel 4H-SiC ESD protection device with improved robustness 物理学报. 2022, 71(19): 198501 https://doi.org/10.7498/aps.71.20220879

非均匀波导中的最大声能流透射及鲁棒性分析

Maximal transmission of acoustic energy flux in inhomogeneous waveguides and robustness analyses 物理学报. 2021, 70(17): 174302 https://doi.org/10.7498/aps.70.20210495