**DOI**：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.6.11 **中图分类号**：TM8,TN6 **文献标志码**：A

# 基于寿命控制技术的逆阻型 IGCT 性能提升研究

马俊杰[1]，王蓉东[1]，胡天生[1]，王来冉[1]，胡剑生[1]，
杨武华[2](中国电源学会会员)
(1.许继电气股份有限公司，许昌 461000；2.西安理工大学电子工程系，西安 710048)

**摘要**：针对逆阻型集成门极换流晶闸管 RB-IGCT(reverse blocking-integrated gate commutated thyristor)器件设计时各项特性无法较好折中的问题，在研究电子辐照对器件性能影响的基础上，提出了一种双侧质子辐照方法，并通过器件仿真进行了验证。结果表明，电子辐照会显著缩短器件的整体寿命，降低器件导通状态下内部的载流子浓度，对器件关断特性的改善效果较好，但会使器件其他特性恶化；而双侧质子辐照可局部调节器件导通状态下的载流子浓度分布，从而保证器件的导通特性与抗浪涌电流能力，且该辐照方法将器件在高温(400 K)下的漏电流减小近 50%，是一种处理器件各项性能之间折中关系的有效方法。

**关键词**：逆阻型集成门极换流晶闸管；寿命控制；电子辐照；质子辐照

# Research on Performance Improvement of Reverse Blocking IGCT Based on Lifetime Control Technology

MA Junjie[1], WANG Rongdong[1], HU Tiansheng[1], WANG Lairan[1], HU Jiansheng[1],
YANG Wuhua[2], *Member*, *CPSS*
(1. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 2. Department of Electronic Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Aimed at the problem that various characteristics cannot be well compromised in the design of reverse blocking integrated gate commutated thyristor (RB-IGCT) devices, based on the research on the effect of electron irradiation on the device performance, a double-sided proton irradiation method is proposed, which is further verified by simulations. Results show that electron irradiation will significantly shorten the overall lifetime of the device, and greatly decreasing the internal carrier concentration in its on-state. Therefore, electron irradiation has a positive effect on the turn-off characteristics of the device at the cost of deteriorating all of its other characteristics. In contrast, double-sided proton irradiation can locally modulate the carrier concentration distribution in the on-state of the device, thus ensuring its on-state characteristics and surge current withstand capability. Meanwhile, this irradiation method reduces the leakage current of the device at high temperature (400 K) by nearly 50%, indicating that it is an effective method for handling the trade-off relationship between various performance parameters of the device.

**Keywords:** Reverse blocking-integrated gate commutated thyristor (RB-IGCT); lifetime control; electron irradiation; proton irradiation

集成门极换流晶闸管 IGCT(integrated gate commutated thyristor)导通状态下的双侧载流子注入使其作为高压器件时具备较小的导通压降，同时，“硬驱动”技术的采用又显著扩大了该器件开关时的安全工作区 SOA(safe operating area)。在电力系统的某些领域，如高压直流输电与风力发电的

**收稿日期**：2025-10-28；**修回日期**：2025-12-09，2026-01-04；
**录用日期**：2026-01-26；**网络首发日期**：2026-02-26
**基金项目**：陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设资助项目(2023KXJ-189)
This work is supported by Shaanxi Qinchuangyuan “Scientist + Engineer” Team Construction Project under the grant 2023KXJ-189

直流断路器、静止同步补偿器及多电平转换器等[1-4]，IGCT 正逐渐替代高压 IGBT 模块与传统的高压晶闸管。

近年来，基于 8 000 V 逆阻型 RB-IGCT(reverse blocking-IGCT)的混合换相换流阀技术研制成功，该技术显著提高了高压直流输电系统的输电效率与换流可靠性[5-8]。然而，相比于非对称 AS-IGCT (asymmetric IGCT)，具有对称型耐压结构的 RB-IGCT 的芯片厚度显著增加，从而导致器件的漏电流较大，通态压降与开关损耗等特性参数较差，故 RB-IGCT 仍有较大的提升空间。RB-IGCT 在具有较大 d$i$/d$t$ 下开通时，由于芯片较厚会发生非正常的误关断现象，因此需要提高器件正面(阴极侧)与背面(阳极侧)的载流子发射效率[6]；同时，厚度的增加又使得 RB-IGCT 阻断状态下的漏电流较大，故而提出了通过降低阳极空穴注入效率的阳极发射区隔离 EI(emitter isolation)结构来抑制器件的高温漏电流[9]，但这无疑会减缓器件的开通速度，并增加通态损耗。其中，器件正面的注入效率需考虑与硬驱动电路匹配的特性，背面的注入效率则需兼顾器件的关断损耗与最大关断电流能力等因素[10-13]。因此，仅依靠器件结构参数的优化已无法有效解决 RB-IGCT 各项性能折中时的矛盾问题。

鉴于此，本研究提出可通过载流子寿命控制技术来优化、提升 RB-IGCT 的器件性能。首先，研究了电子辐照对 RB-IGCT 器件特性的影响；然后，在此基础上提出了可有效解决 RB-IGCT 器件性能折中的双侧质子辐照方法；最后，通过器件仿真进行了验证。

## 1 器件结构与仿真建模方法

图 1 为 8 000 V RB-IGCT 的器件结构。图中：$J_1$ 结表示 p 阳极区与 $n^-$基区形成的 PN 结；$J_2$ 结表示深 p 基区与 $n^-$基区形成的 PN 结；$J_3$ 结表示浅 p 基区与 $n^+$阴极区形成的 PN 结。器件正面需挖槽形成门极、阴极台面，便于压接式封装，同时保证器件的关断能力。其中，p 基区通过硼与铝共同扩散形成，由于硼的扩散系数较小，故其主要形成峰值浓度较高的浅 p 基区，以调节正面的电子注入效率；而铝的扩散系数较大，故其主要形成深 p 基区，以保证器件阻断状态下，电场在 p 基区的扩展。由于器件需承受相同的正、反向耐压，因此必须采用对称型的耐压结构，即在 $n^-$基区的阳极侧无缓冲层，这就造成器件具有比 AS-IGCT 更厚的 $n^-$基区。RB-IGCT 采用阶梯掺杂的阳极区，具有较低掺杂浓度的 p 阳极区，主要需满足器件反向阻断时电场在其中的扩展；而较高掺杂浓度的 $p^+$阳极区需保证背面的空穴注入效率。

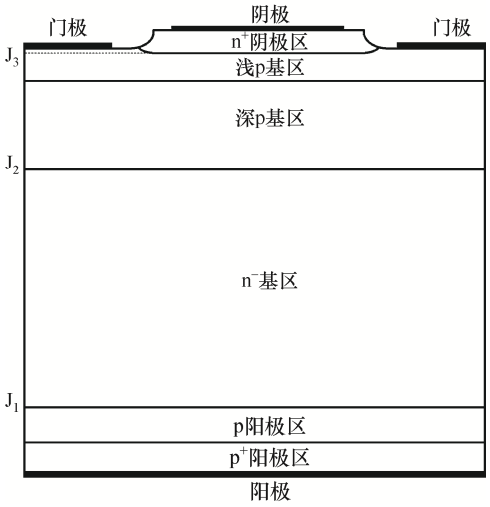



**图 1 8 000 V RB-IGCT 器件结构**

**Fig. 1 Structure of 8 000 V RB-IGCT device**

本研究通过 Sentaurus 技术的计算机辅助设计 TCAD(technology compute-aided design)模拟 RB-IGCT 的各项电学特性。采用的物理模型包括禁带窄化模型，依赖于掺杂、温度、载流子-载流子散射及高电场造成的载流子漂移速度饱和的迁移率模型，俄歇 Auger 复合模型，van Overstraeten 和 de Man 的雪崩产生模型。为了研究辐照引起的载流子寿命变化对器件性能的影响，本文采用经典的依赖于掺杂和温度的肖克利-里德-霍尔 SRH (Shockley-Read-Hall)复合模型，其中，SRH 模型中依赖于温度的寿命模型[14-15]为

$$\tau(T)=\tau_0\left(\frac{T}{300\ \mathrm{K}}\right)^{T_a} \tag{1}$$

式中：$\tau$ 为器件工作状态下的载流子寿命；$\tau_0$ 为器件

n⁻基区在平衡状态与 300 K 下的载流子寿命；$T$ 为晶格温度；$T_\alpha$ 为载流子寿命对温度的依赖系数。通过仿真器的面积因子将器件的有效面积扩大为 120 $cm^2$ (相当于 6 寸晶圆 RB-IGCT 芯片有源区的面积)。

电子的质量较小，高能电子可纵向贯穿整个芯片，在整个芯片纵方向上形成均匀的缺陷浓度分布，故在经过电子辐照的芯片纵方向上，载流子寿命随着辐照剂量的增大均匀缩短，如图 2 所示；然而质子的质量较大，高能质子无法纵向贯穿整个芯片，而是停留在芯片纵方向的某处，在此形成缺陷浓度较高的区域，从而缩短此处局部区域的载流子寿命。局部寿命控制区的位置与载流子寿命长短分别取决于辐照的能量与剂量，在进行器件仿真结构建模时，通过设置调节低寿命区的位置与寿命长短可分别反映辐照的位置与剂量。

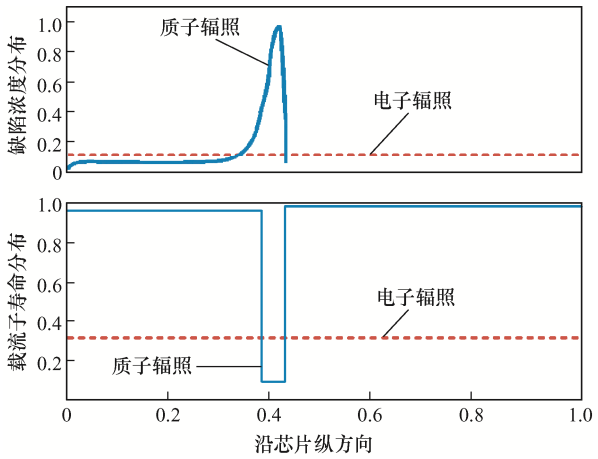
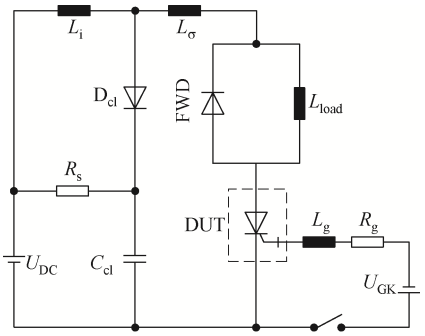


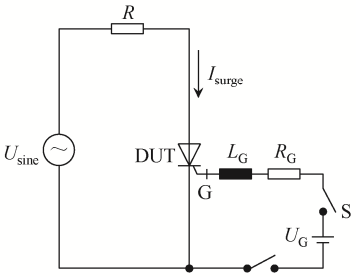

**图 2　电子辐照与质子辐照在硅片中形成的缺陷浓度分布与相应的载流子寿命分布**

**Fig. 2 Defect concentration distribution and corresponding carrier lifetime distribution in silicon wafer formed by electron irradiation and proton irradiation**

图 3(a)为 RB-IGCT 开关特性测试电路。图中：$U_{DC}$ 为电源电压；$L_i$ 为器件开通时的限流电感；$L_\sigma$ 为器件管壳和测试电路上的杂散电感；$L_{load}$ 为感性负载，其被反并联的续流二极管 FWD(freewheeling diode)钳位；DUT 为被测器件；$L_g$ 和 $R_g$ 分别为门极驱动回路上的电感和电阻；$U_{GK}$ 为门极驱动电源。图 3(b)为 RB-IGCT 的浪涌电流测试电路。其中，浪涌电流 $I_{surge}$ 通过标准正弦波电压 $U_{sine}$ 与电阻 $R$ 串联产生，由于电阻 $R$ 远大于 RB-IGCT 的导通电阻，故产生的 $I_{surge}$ 也为标准的正弦波电流。RB-IGCT 为压接式的金属管壳封装，器件阳极与阴极电极处的热阻均设置为 4.1 K/kW，模拟时的环境温度为 365 K。




(a) RB-IGCT的开关测试电路




(b) RB-IGCT的浪涌电流测试电路

**图 3　RB-IGCT 的开关与浪涌电流测试电路**

**Fig. 3 Switching and surge current test circuit for RB-IGCT**

## 2　电子辐照对 RB-IGCT 特性的影响

为了揭示电子辐照对 RB-IGCT 各项特性的影响，对器件在其整体载流子寿命不断缩短的 4 种情况下的各项特性分别仿真。这 4 种分别为器件不进行任何辐照与电子辐照剂量逐步增大为 $\Phi_{e1}$、$\Phi_{e2}$、$\Phi_{e3}$($\Phi_{e1}$<$\Phi_{e2}$<$\Phi_{e3}$)，如图 4 所示。高温 $T$= 365 K 下，4 种情况对应的器件 n⁻基区空穴寿命 $\tau_{p0}$ 分别为 35.0 μs(不进行辐照)、17.3 μs(辐照剂量为 $\Phi_{e1}$)、8.7 μs(辐照剂量为 $\Phi_{e2}$)、13.8 μs(辐照剂量为 $\Phi_{e3}$)；电子寿命 $\tau_{n0}$ 为空穴寿命 $\tau_{p0}$ 的 3 倍。

RB-IGCT 在阻断状态下，门极上电(即门阴极短路)，因此无论是在正向阻断，还是反向阻断状

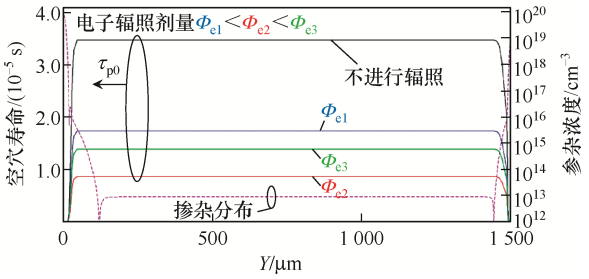



**图 4 不同剂量电子辐照下器件内部空穴寿命分布**

**Fig. 4 Hole lifetime distribution inside the device under different electron irradiation doses**

态下，器件均相当于处在基极开路的 PNP 晶体管的阻断状态，只是在正向阻断状态下，p 阳极区相当于 PNP 晶体管的发射区，而在反向阻断状态下，p 基区充当 PNP 晶体管的发射区。正、反向阻断状态下的漏电流 $I_L$ 的表达式为

$$I_L=\frac{I_{SC}}{1-\alpha_{PNP}} \tag{2}$$

式中：$I_{SC}$ 为空间电荷区中产生载流子形成的产生电流；$\alpha_{PNP}$ 为 PNP 晶体管的共基极电流增益。其中，$I_{SC}$ 的大小受空间电荷区的宽度 $W_{SC}$、本征载流子浓度 $n_i$ 及空间电荷区的产生寿命 $\tau_{SC}$ 的影响，即

$$I_{SC}=qW_{SC}n_i/\tau_{SC} \tag{3}$$

$\alpha_{PNP}$ 的表达式为

$$\begin{cases}\alpha_{PNP}=\gamma_p\alpha_T\\ \alpha_T=\dfrac{1}{\cosh[(W_{n^-}-W_{SC})/L_{p,n^-}]}\\ L_{p,n^-}=\sqrt{D_{p,n^-}\tau_{p0}}\end{cases} \tag{4}$$

式中：$\gamma_p$ 为阳极区的空穴注入效率，主要受阳极区掺杂浓度与厚度的影响；$\alpha_T$ 为少子在 $n^-$ 基区中未耗尽区的传输系数；$W_{n^-}$ 为 $n^-$ 基区的宽度；$W_{n^-}-W_{SC}$ 为 $n^-$ 基区中未耗尽区的宽度；$L_{p,n^-}$ 为少子在 $n^-$ 基区中未耗尽区的扩散长度，取决于少子在此处的扩散系数 $D_{p,n^-}$ 与寿命 $\tau_{p0}$。

随着电子辐照剂量的逐步增加，沿器件纵方向的载流子寿命不断缩短，这会造成空间电荷区中的 $\tau_{SC}$ 缩短，从而增大 $I_{SC}$，使得 RB-IGBT 的 $I_L$ 有增大的趋势；同时，$n^-$ 基区未耗尽区中 $\tau_{p0}$ 也在不断减小，从而减小 $\alpha_{PNP}$，使得 RB-IGBT 的 $I_L$ 有减小的趋势。图 5 呈现了电子辐照对 RB-IGCT 阻断特性的影响，电子辐照对 $\tau_{SC}$ 的影响显著大于 $\tau_{p0}$，最终造成器件 $I_L$ 的明显增大。

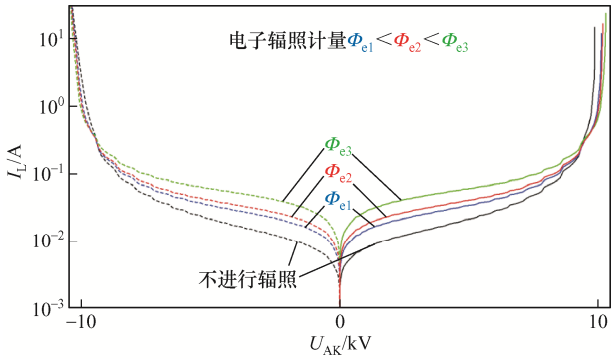



**图 5 电子辐照对 RB-IGCT 阻断特性的影响**

**Fig. 5 Effect of electron irradiation on blocking characteristics of RB-IGCT**

考虑到结终端的耐压效率，器件有源区的雪崩击穿电压设计值接近 10 kV。RB-IGCT 的正向与反向阻断均相当于基极开路的 PNP 晶体管的阻断，故器件的正向耐压 $U_{DRM}$ 与反向耐压 $U_{RRM}$ 的表达式分别为

$$U_{DRM}=U_{BR,J_2}\cdot(1-\alpha_{PNP,F})^{\frac{1}{n}} \tag{5}$$

$$U_{RRM}=U_{BR,J_1}\cdot(1-\alpha_{PNP,R})^{\frac{1}{n}} \tag{6}$$

式中：$U_{BR,J_2}$ 和 $\alpha_{PNP,F}$ 分别为正向阻断状态下独立 $J_2$ 结的雪崩击穿电压与 PNP 晶体管的共基极电流增益；$n$ 为 1 个常数因子，通常取值为 6；$U_{BR,J_1}$ 和 $\alpha_{PNP,R}$ 分别为反向阻断状态下独立 $J_1$ 结的雪崩击穿电压与 PNP 晶体管的共基极电流增益。在 RB-IGCT 结构参数不变的情况下，仅通过辐照对寿命进行的控制，主要通过影响器件阻断状态下的 $\alpha_{PNP}$ 对 $U_{DRM}$ 与 $U_{RRM}$ 造成影响。由图 5 可见，随着辐照剂量的增加，$\alpha_{PNP}$ 减小，器件在更大的阳阴极电压 $U_{AK}$ 下才发生雪崩击穿。

图 6 为电子辐照与质子辐照对 RB-IGCT 导通特性的影响。由图可见，电子辐照剂量的增加造成器件整体寿命的缩短，并降低器件导通状态同等电流下其内部的载流子浓度，从而显著增大器件的导通压降，继而导致器件的导通损耗显著增加；然而，这反过来会使得器件的关断速度加快，拖尾电流减小，从而明显减少器件的关断损耗，如图 7 所示。

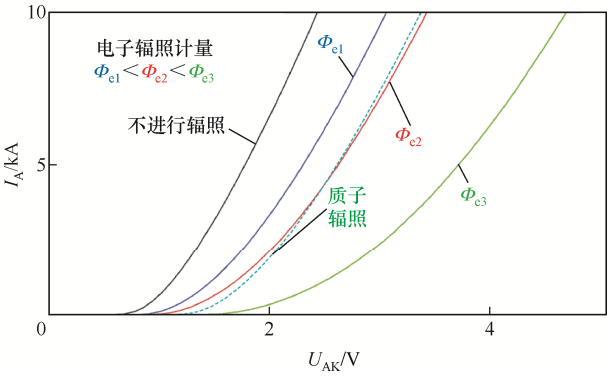



**图 6　电子辐照与质子辐照对 RB-IGCT 导通特性的影响**

**Fig. 6 Effect of electron irradiation and proton irradiation on on-state characteristics of RB-IGCT**

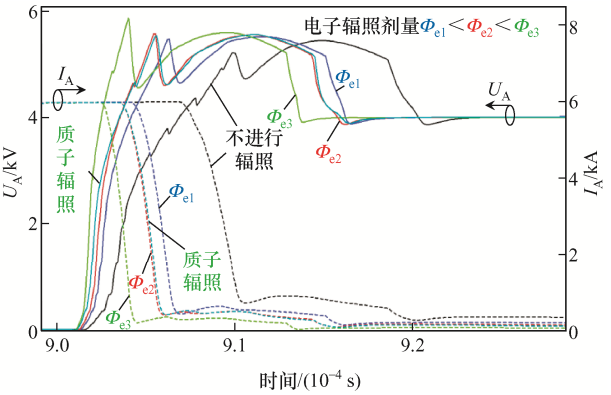



**图 7　电子辐照与质子辐照对 RB-IGCT 关断特性的影响**

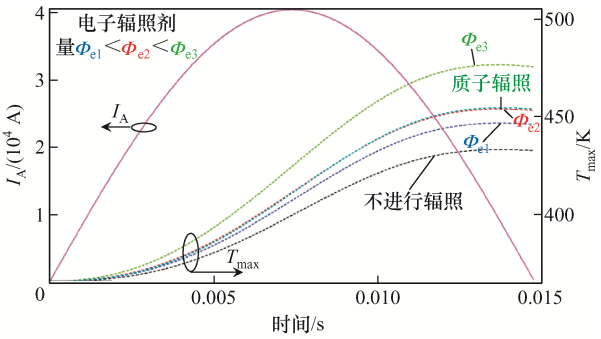
($T$=365 K, $I_{A(on)}$=6.0 kA, $U_{DC}$=4.0 kV)

**Fig. 7 Effect of electron irradiation and proton irradiation on turn-off characteristics of RB-IGCT**

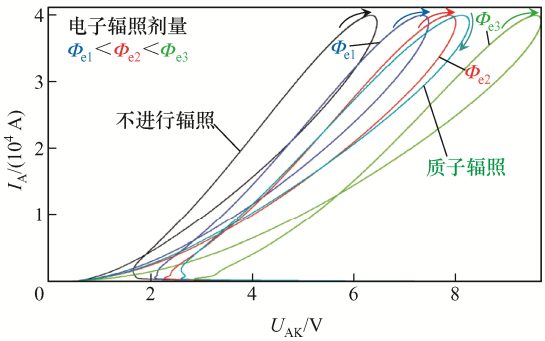
($T$=365 K, $I_{A(on)}$=6.0 kA, $U_{DC}$=4.0 kV)

由图 7 可见，当阳极电压 $U_A$ 增大超过 2 kV 时，不进行任何辐照的器件的 $U_A$ 增大速率明显减缓。这是由于器件的耐压较高，$n^-$基区的掺杂浓度较低。器件关断过程中，在 $U_A$ 增大至 $U_{DC}$ 之前，阳极电流 $I_A$ 在感性负载的作用下仍保持在通态电流的水平，致使剩余等离子体区被移除的带正电的空穴，在流经空间电荷区时会提高其中的电场梯度和电场峰值，从而极易诱发动态雪崩效应及雪崩注入[16]，导致电场向 $n^-$基区一侧的展宽及相应 $U_A$ 的增大速率减缓。随着 $U_A$ 的继续增大，$U_A$ 曲线上出现明显的电压“凹槽”，这说明随着动态雪崩效应的增强，器件发生了负微分电阻效应，这通常在器件内部诱发电流丝效应[17]，极易导致器件关断失效。而经过辐照控制寿命后，器件关断过程中 $n^-$基区存储的载流子浓度会相应降低，与不进行辐照的情况相比，动态雪崩及雪崩注入发生时，剩余等离子体可以被更快地抽取，使得电场得以快速展宽，从而抑制峰值电场的增强及其诱发的雪崩效应；并且剩余等离子体浓度的降低可以加快雪崩诱发电流丝的移动速度，降低器件发生关断失效的风险[18-19]。

图 8 为 RB-IGCT 在 40 kA 浪涌电流下的特性影响。由图 8(a)可见，随着器件整体寿命的缩短，器件在导通状态下的导通压降显著增加，因此，随着电子辐照剂量的逐步增加，器件在浪涌电流下的功耗显著增加，造成器件的最高结温 $T_{max}$ 也显著升高；由图 8(b)可见，随着电子辐照剂量的逐步增加，器件导通压降的零温度系数 ZTC(zero temperature coefficient)点所对应的电流密度越来越大，意味




(a) 不同辐照下的RB-IGCT在浪涌电流下的温升




(b) 不同辐照下的浪涌$I$-$U$特性轨迹

**图 8　电子辐照与质子辐照对 RB-IGCT 浪涌特性的影响**

**Fig. 8 Effect of electron irradiation and proton irradiation on surge characteristics of RB-IGCT**

着器件在浪涌电流下导通压降的负温度效应越来越强[20]，这对于由众多阴极条单元并联组成的 RB-IGCT 器件是不利的，容易造成局部区域阴极单元的电流过大而烧毁器件。

综上所述，电子辐照除了对 RB-IGCT 的关断特性与关断能力有利，对器件其他的特性参数与鲁棒性均会造成不利影响。折中考虑后可得，电子辐照剂量为 $\Phi_{e2}$ 时，器件的综合性能最优，但高温下的阻断漏电流仍然过大。

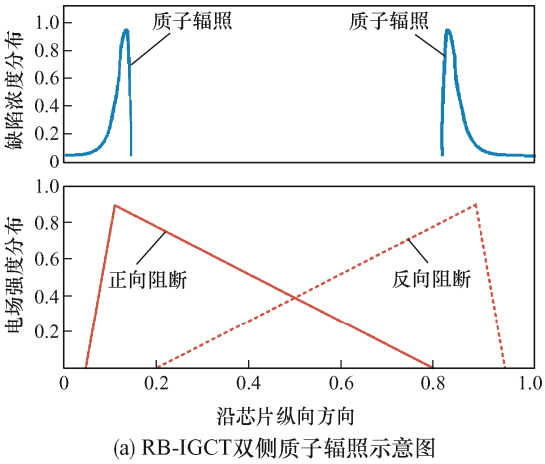
## 3 双侧质子辐照

基于第 2 节中电子辐照的不足，本文提出了双侧质子辐照的方法，具体示意如图 9(a)所示。在器件的正面与背面同时进行质子辐照，从而在 RB-IGCT 的 $n^-$基区中分别靠近阳极侧与阴极侧的局部区域进行载流子寿命的局部控制。需要强调的是：①质子辐照的缺陷峰值区域分别位于正向阻断情况下的未耗尽区与反向阻断情况下的未耗尽区，从而减小阻断状态下未耗尽区的 $\tau_{p0}$ 与 $\alpha_{PNP}$，以减小 $I_L$，如式(2)、式(4)所示；②质子辐照的缺陷峰值区域应尽可能避开器件的空间电荷区，从而最大程度地避免空间电荷区中 $\tau_{SC}$ 减小导致的 $I_L$ 增大，如式(2)和式(3)所示。

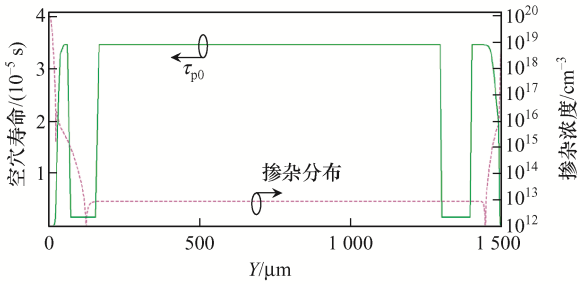
通过仿真优化质子辐照的能量与剂量，即优化局部寿命控制区的位置与寿命长短，使其与剂量为 $\Phi_{e2}$ 的电子辐照器件具有大致相等的导通压降(如图 6 所示)，接着比较 2 种辐照方法对器件特性的影响。高温 $T$=365 K 下，优化后的质子辐照对应的器件内部空穴寿命分布如图 9(b)所示。

电子辐照与质子辐照下器件内部的载流子浓度分布如图 10 所示。由图可见，双侧质子辐照可以降低缺陷峰附近的载流子浓度，且在 $n^-$基区中部的大部分区域仍保持较高的载流子浓度，从而保证了器件的导通压降。同时，由图 6 和图 7 可见，质子辐照下器件的关断特性和浪涌电流能力与剂量为 $\Phi_{e2}$ 的电子辐照相当，关断时间也得到了较好的控制，浪涌电流下器件 ZTC 点也保持在较低水平。

图 11 比较了 $T$=365 K 与 $T$=400 K 下，剂量为 $\Phi_{e2}$ 的电子辐照与优化后的质子辐照对器件阻断特性的影响。由图可见，相比于电子辐照，质子辐照仅通过对 RB-IGCT 阻断状态下非耗尽区的载流子寿命进行局部控制，即显著减小了器件阻断状态下的 $\alpha_{PNP}$，同时尽可能减小了对空间电荷区 $\tau_{SC}$ 的影响，使器件在高温下的 $I_L$ 明显减小；并且随着温度的升高，质子辐照对器件 $I_L$ 的抑制越来越明显。




(a) RB-IGCT双侧质子辐照示意图




(b) 质子辐照后的空穴寿命分布

**图 9 双侧质子辐照示意与辐照后寿命分布**

**Fig. 9 Schematic of double-sided proton irradiation, and post-irradiation lifetime distribution**

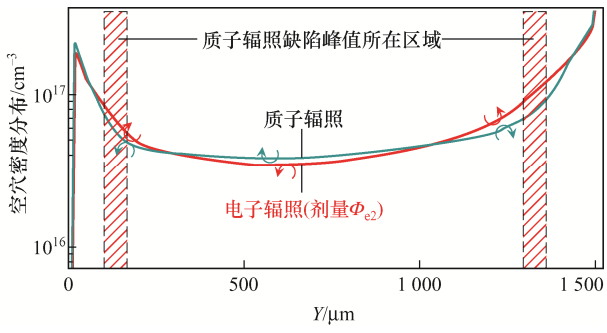



**图 10 优化后的质子辐照与剂量为 $\Phi_{e2}$ 的电子辐照下 RB-IGCT 内部载流子浓度的对比**

**Fig. 10 Comparison of internal carrier concentration in RB-IGCT under optimized proton irradiation and electron irradiation with dose $\Phi_{e2}$**

当温度 $T$=400 K 时，相比于电子辐照，本文提出的双侧质子辐照方法经仿真验证将 RB-IGCT 的 $I_L$

减小了近 50%，如图 12 所示。需要注意的是，图 11 中质子辐照在较低 $U_{AK}$ 下的 $I_L$ 是大于电子辐照的，这是由于双侧质子辐照下，器件阻断状态下的空间电荷区也存在 1 个局部寿命控制区域，然而，随着 $U_{AK}$ 的增加，$\alpha_{PNP}$ 对器件 $I_L$ 的影响占主导地位。

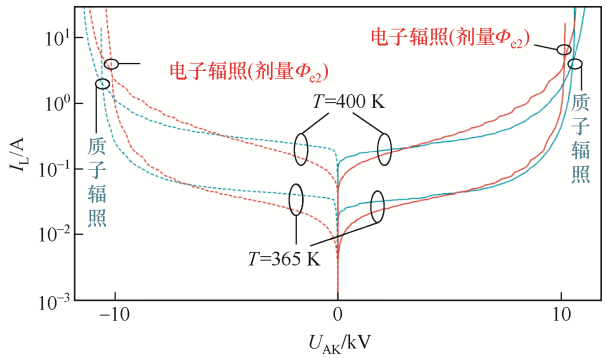



**图 11　RB-IGCT 电子辐照与质子辐照阻断特性的仿真结果对比**

**Fig. 11 Comparison of simulated results blocking characteristics of RB-IGCT under electron irradiation and proton irradiation**

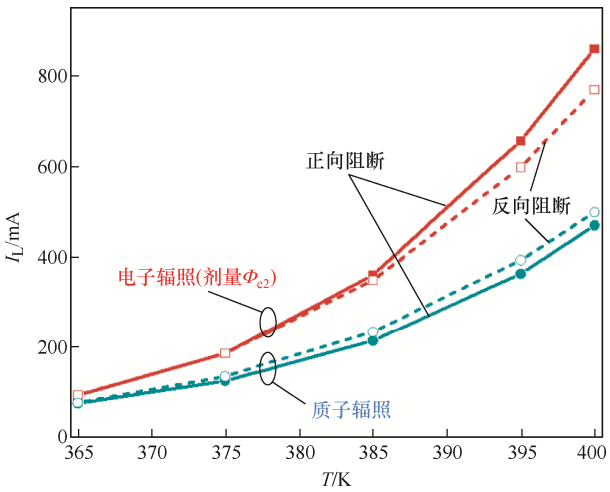



**图 12　RB-IGCT 在电子辐照与质子辐照下的阻断漏电流仿真结果对比 ($U_{AK}$=8 kV)**

**Fig. 12 Comparison of simulated results blocking leakage current of RB-IGCT under electron irradiation and proton irradiation ($U_{AK}$=8 kV)**

## 4　结语

本文首先分析了电子辐照对 RB-IGCT 性能的影响，结果表明，随着辐照剂量的增加，器件的关断时间与关断时的动态雪崩效应得到了较好的抑制；然而，器件的导通特性与抗浪涌电流能力明显变差，尤其是高温下的漏电流显著增大。基于此，本文进一步提出了双侧质子辐照方法，该方法可分别对器件导通状态下阳极侧与阴极侧局部区域的载流子寿命与浓度进行控制，使得在 n⁻基区的大部分区域仍然保持较高的载流子浓度，从而保证器件的导通特性与抗浪涌能力，且关断时间与关断能力保持在可接受的范围。此外，该方法显著减小了器件在高温下的漏电流。相比于电子辐照，质子辐照最大可将器件在高温(400 K)下的漏电流减小近 50%。因此，本文提出的双侧质子辐照将是解决 RB-IGCT 各项性能折中关系的有效方法。

**参考文献：**

[1] Chen Zhengyu, Yu Zhanqing, Liu Xuan, et al. Stray impedance measurement and improvement of high-power IGCT gate driver units [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(7): 6639-6647.

[2] Lyu Gang, Zhuang Chijie, Zeng Rong, et al. Physics-based compact model of integrated gate-commutated thyristor with multiple effects for high-power application [J]. IET Power Electronics, 2018, 11(7): 1239-1247.

[3] Stiasny T, Quittard O, Waltisberg C, et al. Reliability evaluation of IGCT from accelerated testing, quality monitoring and field return analysis [J]. Microelectronics Reliability, 2018, 88-90: 510-513.

[4] 郭文花, 沈顺群, 刘凯. 用于 DR-HVDC 系统连接的海上风电场电网形成控制方法[J]. 电源学报, 2024, 22(1): 179-188.
Guo Wenhua, Shen Shunqun, Liu Kai. Offshore wind farm grid-formation control method for connection of DR-HVDC system [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(1): 179-188. (in Chinese)

[5] Xu Chaoqun, Yu Zhanqing, Chen Zhengyu, et al. Comprehensive analysis and experiments of RB-IGCT, IGCT with fast recovery diode and standard recovery diode in hybrid line-commutated converter for commutation failure mitigation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(2): 1126-1139.

[6] Yu Zhanqing, Wang Zongze, Xu Chaoqun, et al. Comprehensive physical commutation characteristic analysis and test of hybrid line commutated converter based on

physics compact model of IGCT [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(2): 1924-1934.

[7] 薛云涛, 任百群, 谢剑翔, 等. 柔性直流输电系统接入非理想电网的改进 DSOGI 同步方案[J]. 电源学报, 2024, 22(4): 200-208.
Xue Yuntao, Ren Baiqun, Xie Jianxiang, et al. Improved DSOGI synchronization scheme for flexible DC transmission system connected to non-ideal power grid [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(4): 200-208. (in Chinese)

[8] 饶宏, 周月宾, 陈煜坤, 等. 高压大容量柔性直流换流阀关键设计和发展趋势[J]. 电源学报, 2024, 22(3): 1-14.
Rao Hong, Zhou Yuebin, Chen Yukun, et al. Key design and development trend of high-voltage large-capacity VSC valves for HVDC [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(3): 1-14. (in Chinese)

[9] Ren Chunpin, Liu Jiapeng, Wu Jinpeng, et al. Abnormal turn-ON phenomenon of large-size and high-voltage reverse blocking IGCT [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(10): 12337-12341.

[10] Ren Chunpin, Liu Jiapeng, Li Xiaozhao, et al. Optimal design of reverse blocking IGCT for hybrid line commutated converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(11): 13957-13965.

[11] Ren Chunpin, Pan Jianhong, Liu Jiapeng, et al. Improving d*v*/d*t* immunity of reverse blocking IGCT for hybrid line-commutated converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(4): 4001-4005.

[12] Ren Chunpin, Liu Jiapeng, Wu Jinpeng, et al. Deciphering the effect of corrugated p-base on reverse blocking IGCT [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2022, 69(9): 5059-5067.

[13] Liu Jiapeng, Pan Jianhong, Wu Jinpeng, et al. Experimental investigation on the turn-off failure mechanism of IGCT [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(10): 13062-13070.

[14] Tyagi M S, van Overstraeten R. Minority carrier recombination in heavily-doped silicon [J]. Solid-State Electronics, 1983, 26(6): 577-597.

[15] Goebel H, Hoffmann K. Full dynamic power diode model including temperature behavior for use in circuit simulators [C]// Proceedings of the 4th International Symposium on Power Semiconductor Devices and Ics. Tokyo, Japan, 2002: 130-135.

[16] Yang Wuhua, Wang Cailin. Analytical model for the inductive turn-off process of GCT with dynamic avalanche [J]. Microelectronics Reliability, 2021, 120: 114111.

[17] Yang Wuhua, Wang Cailin, Yang Jing. Study on the destruction mechanism caused by dynamic avalanche in GCTs [J]. Microelectronics Reliability, 2019, 92: 34-41.

[18] 姚德贵, 董曼玲, 宋伟, 等. 大面积 IGCT 的关断失效机理研究[J]. 固体电子学研究与进展, 2023, 43(6): 514-518, 551.
Yao Degui, Dong Manling, Song Wei, et al. Study on turn-off failure mechanism of large-area IGCT [J]. Research & Progress of SSE, 2023, 43(6): 514-518, 551. (in Chinese)

[19] 董曼玲, 姚德贵, 宋伟, 等. IGCT 过应力关断下动态雪崩诱发的电压自箝位效应[J]. 半导体技术, 2024, 49(10): 879-884.
Dong Manling, Yao Degui, Song Wei, et al. Voltage self-clamping effect induced by dynamic avalanche at over-stress turn-off of IGCT [J]. Semiconductor Technology, 2024, 49(10): 879-884. (in Chinese)

[20] 鲁一苇, 姚德贵, 董曼玲, 等. 双芯 IGCT 浪涌电流鲁棒性研究[J]. 半导体技术, 2024, 49(3): 234-239, 245.
Lu Yiwei, Yao Degui, Dong Manling, et al. Study on surge current robustness of dual IGCT [J]. Semiconductor Technology, 2024, 49(3): 234-239, 245. (in Chinese)



马俊杰

**作者简介：**

马俊杰(1986— )，男，硕士，高级工程师。研究方向：特高压换流阀控制。E-mail：majunjie@xj.cee-group.cn。

王蓉东(1993— )，男，本科，工程师。研究方向：特高压换流阀控制。E-mail：wangrongdong@xj.cee-group.cn。

胡天生(1999— )，男，硕士，工程师。研究方向：特高压换流阀控制。E-mail：hutiansheng@xj.cee-group.cn。

王来冉(1999— )，男，硕士，工程师。研究方向：特高压换流阀控制。E-mail：wanglairan@xj.cee-group.cn。

胡剑生(1979— )，男，本科，高级工程师。研究方向：大功率器件驱动控制。E-mail：hujiansheng@xj.cee-group.cn。

杨武华(1991— )，男，中国电源学会会员，通信作者，博士，讲师。研究方向：功率半导体器件。E-mail：yangwuhua@xaut.edu.cn。

(责任编辑：孙美菊)