

# 逆导型 GCT 阻断特性的分析与设计 \*

王彩琳<sup>1</sup> 高 勇<sup>1</sup> 张昌利<sup>2</sup>

(1 西安理工大学电子工程系, 西安 710048)

(2 韩国电气研究院电力半导体研究室, 昌原 641-600, 韩国)

**摘要:** 在分析 pnp 隔离的逆导型 GCT(RC-GCT)特性的基础上,提出了沟槽隔离的 RC-GCT 新结构,并给出了其阻断特性的设计方法. 依此建立了 RC-GCT 的结构模型,利用 MEDICI 软件对其阻断特性进行了模拟,并与非对称 GCT 和 pnp 隔离的 RC-GCT 的阻断特性进行了比较和分析. 另外,通过对不同沟槽结构参数下 RC-GCT 的阻断特性和门极击穿特性的模拟,给出了沟槽区的优化参数. 实验结果证明了设计的合理性.

**关键词:** 电力电子器件; 门极换流晶闸管; 门极可关断晶闸管; pin 二极管; 击穿电压; 沟槽隔离

**EEACC:** 2560P; 2560L; 2560B

**中图分类号:** TN34      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0253-4177(2005)09-1833-05

## 1 引言

逆导型门极换流晶闸管(reverse conducting gate commutated thyristor, RC-GCT)<sup>[1]</sup>,是在逆导型门极可关断晶闸管(RC-GTO)基础上发展起来的一种新型电力电子器件. 它是将非对称的门极换流晶闸管(GCT)与 pin 二极管反并联地集成在同一个芯片上形成的,若将它与门极驱动器集成在一起则可形成集成门极换流晶闸管(IGCT). 与 GTO 和高压绝缘栅双极晶体管(HVIGBT)相比,IGCT 具有损耗低、速度快、内部机械部件少、成本低和结构紧凑等优点,能可靠、高效地应用于各种驱动控制、静态无功补偿器(SVC)、电力变流器及柔性交流输出系统(FACTS)<sup>[2,3]</sup>等领域. 目前,ABB 公司研制的 IGCT 的最高阻断电压已达 10kV<sup>[4]</sup>,而国内对 IGCT 的研究尚处于开发阶段. 因此开发国产化的 IGCT 制造技术迫在眉睫. 阻断特性作为衡量器件静态特性的一项关键指标,与器件的通态特性和关断特性密切相关,是设计时首要考虑的问题. 本文在分析传统的 RC-GCT 结构特点和特性的基础上,从

简化工艺的角度出发,提出了沟槽隔离的 RC-GCT 阻断特性的设计方法.

## 2 特性分析

传统的 RC-GCT 基本结构与 RC-GTO 相似,其剖面图如图 1(a)所示. RC-GCT 的结构特点及其关键参数的设计方法已在文献[5]中进行了分析说明. 为了提高 RC-GCT 的开关速度,在其中引入了透明阳极来控制阳极 pnp 晶体管的电流增益. 透明阳极可以很好地改善 GCT 的开关特性<sup>[6]</sup>;但同时又因少数数目的减少导致通态压降上升. 为此,在透明阳极和 n-基区间又附加了 n 缓冲层来减薄芯片的厚度,以降低通态压降. 于是 GCT 的耐压结构变成了穿通型击穿结构.

当 RC-GCT 正向工作( $U_{AK} > 0$ )时,若不加门极信号,则 J2 结反偏,承担正向阻断电压. 因而 RC-GCT 的正向阻断电压主要由 J2 结的雪崩击穿电压决定. 由图 1(a)可见,由于非对称 GCT 和 pin 二极管的 p 区是通过选择性扩散同时形成的,所以表面处都存在 J2 结的弯曲效应. 当  $U_{AK} > 0$  时,反偏 J2

\* 陕西省教育厅专项科研计划资助项目(批准号:04J K245)

王彩琳 女,1965 年出生,副教授,主要从事新型电力半导体器件设计与开发.

高 勇 男,1956 年出生,教授,主要从事新型电力半导体器件及集成电路 CAD 和半导体光电集成的研究.

张昌利 男,1959 年出生,高工,从事新型电力半导体器件研究.

2005-01-23 收到,2005-03-11 定稿

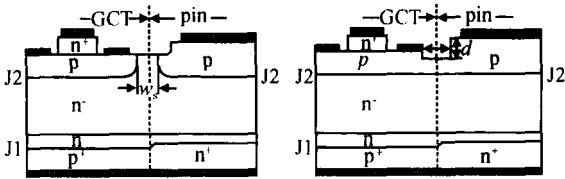


图 1 RC-GCT 的结构剖面 (a) pnp 隔离的 RC-GCT; (b) 沟槽隔离的 RC-GCT

Fig. 1 Section of RC-GCT structure (a) RC-GCT with pnp separation; (b) RC-GCT with trench separation

结弯曲处的电场强度较大,在较低的  $U_{AK}$  下就可达到临界击穿电场,使其比理想的平面结提前发生击穿,导致 RC-GCT 的正向阻断电压下降.而且,采用选择性的深扩散形成 p 区时,需要制作掩蔽膜,使得工艺难度大大增加.所以,要改善 RC-GCT 的阻断特性,就必须对隔离区结构加以改进.

基于上述分析,提出了沟槽隔离的 RC-GCT 结构,如图 1(b) 所示.它完全消除了 J2 结的弯曲,使其变成了一个平面 pn 结,于是非对称 GCT 与 pin 二极管共享同一个阻断结 J2.所以,RC-GCT 的正向阻断电压主要由该平面结的雪崩击穿电压来决定.同时采用沟槽隔离可以省去 pnp 隔离时 p 区的选择性深扩散所需掩蔽膜,从而降低工艺难度,并简化工艺.

### 3 设计考虑

由图 1(b) 可知,非对称 GCT 与 pin 二极管共享同一个 J2 结.为了使二者承受相同的阻断电压,二者的 n 基区必须具有相同的厚度和电阻率.而且由于透明阳极和 n 缓冲层的引入,使 RC-GCT 形成了穿透型 (PT) 的耐压结构.所以,RC-GCT 的阻断电压与 n 基区、p 基区和 n 缓冲层的结构参数有关,并且受沟槽隔离区参数的影响.其中 n 基区、p 基区和 n 缓冲层的设计方法已在文献 [7] 中作了详细说明.下面以 2800V (断态不重复峰值电压  $U_{DSM}$ ) RC-GCT 的设计为例,主要分析影响其阻断特性的沟槽隔离区结构参数.

沟槽隔离区的设计主要是协调阻断特性和换流特性及门极击穿特性.沟槽隔离区越深,则换流特性和门极击穿特性越好,但会影响 J2 结在 p 基区的展宽,导致阻断特性变差,沟槽隔离区越宽,换流特性和门极击穿特性越好,但会损失较大的阴极有效面积,使电流容量受到限制.所以,对沟槽区宽度 ( $w$ )

和深度 ( $d$ ) 的设计要进行折中考虑.设计时,可采用硼-铝 (B-Al) 扩散来实现 p 区的掺杂.将  $d$  限制在 B 扩散的深度范围内,并将 J2 结在 p 区的展宽限制在 Al 的扩散深度内,确保该展宽距沟槽底部有一定的余量,避免沟槽对阻断特性产生影响.因此,沟槽隔离区的设计准则是:在满足阻断特性要求的前提下,尽可能采用较浅的沟槽,以降低挖槽工艺难度;在满足换流特性和门极击穿特性的前提下,尽可能采用较窄的沟槽,以节省阴极面积.这样,既可以保证阻断电压不受沟槽的影响,又可以改善门极击穿特性和换流特性.

### 4 模拟结果及分析

根据上述分析与设计准则,以 2800V 的  $U_{DSM}$  为例,确立了沟槽隔离 RC-GCT 的结构模型 (图 1(b)),并假设缓冲层用扩散形成,其模型参数见表 1.根据该结构模型,利用 MEDICI 软件 [8] 对其正向阻断特性进行了模拟.模拟时所用的杂质分布如图 2 所示. p 基区的掺杂剖面由两部分组成,靠近表面附近是高浓度的 B 分布,浓度梯度较大;位于 J2 结处是低浓度的 Al 分布,浓度梯度较小.图中标出了 J3 结处的次表面浓度  $N_{PJ}$ .

表 1 RC-GCT 结构的模型参数

Table 1 Model parameters of RC-GCT structure

区域名称	参数名称	参数值
n 基区	掺杂浓度, $N_D$	$2.3 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$
	厚度, $W_n$	200 $\mu\text{m}$
p 基区	表面浓度, $N_{ps}$	$3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
	厚度, $W_p$	65 $\mu\text{m}$
n 缓冲层	表面浓度, $N_{ns}$	$5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$
	厚度, $W_n$	20 $\mu\text{m}$
沟槽隔离区	宽度, $W_n$	20 $\mu\text{m}$
	深度, $d$	35 $\mu\text{m}$

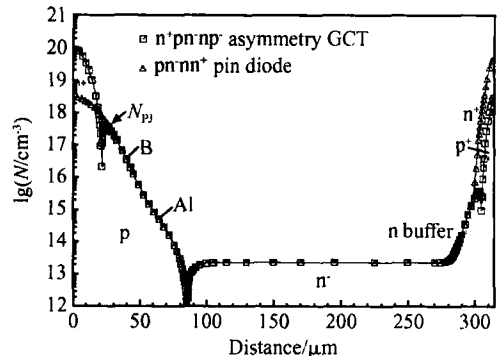


图 2 模拟时所用的掺杂分布

Fig. 2 Doping profile used in simulation

### 4.1 RC-GCT 的正向阻断特性

模拟得到的 RC-GCT 在门极电压  $U_G$  为零时的正向阻断特性曲线如图 3 所示. 为了便于比较, 图中还给出了在相同的模拟条件下非对称 GCT 及 pnp 隔离的 RC-GCT 的阻断特性曲线. 可见, 沟槽隔离的 RC-GCT 的阻断特性与非对称 GCT 基本一致, 只是漏电流较大; 而 pnp 隔离的 RC-GCT 的阻断电压明显低于前两者. 显然, 这是由于 pnp 隔离的 RC-GCT 中存在 J2 结的弯曲效应所致. 由图可知, 沟槽隔离的 RC-GCT 正向阻断电压约为 2860V, 满足 2800V 的  $U_{DSM}$  的设计指标要求, 说明 2800V RC-GCT 的设计参数是正确的.

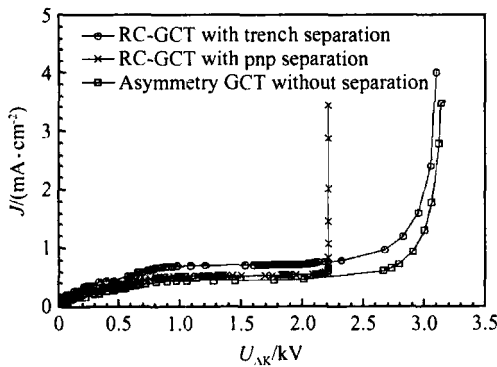


图 3 GCT 的阻断特性模拟曲线比较

Fig. 3 Comparison of the forward blocking characteristic of the RC-GCT with trench and pnp separation and asymmetry GCT

### 4.2 PIN 二极管的反向阻断特性

由于 RC-GCT 中存在 pin 二极管, 其反向特性会影响 RC-GCT 的正向阻断特性. 为此, 对 pin 结二极管的反向阻断特性进行了模拟, 结果如图 4 所示. 由图可知, pin 二极管可承受约 3100V 的反向阻断电压, 且漏电流很小. 比较而言, pin 二极管的反向阻断电压明显高于非对称 GCT 的正向阻断电压, 且反向漏电流比非对称 GCT 的正向漏电流更低. 这是因为 pin 二极管的反向阻断仅仅是单个 pn (J2) 结的阻断; 而非对称 GCT 正向阻断要受到阳极 pnp 晶体管和阴极 npn 晶体管 (即电流放大倍数  $\beta_1$  和  $\beta_2$ ) 的影响. 模拟结果表明, pin 二极管的设计参数完全满足 2800V 的  $U_{DSM}$  要求.

### 4.3 沟槽区结构参数的优化

为了优化沟槽区的结构参数, 对不同沟槽深度

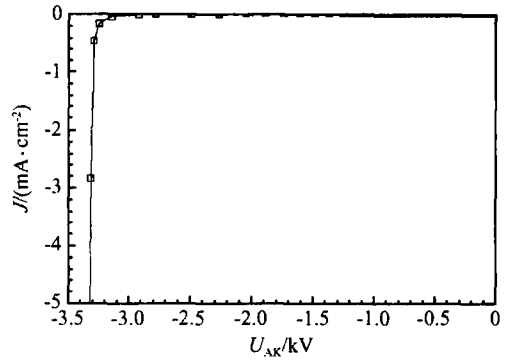


图 4 pin 二极管的反向特性模拟曲线

Fig. 4 Simulation curve of reverse characteristic of pin diode

下 RC-GCT 的阻断特性进行了模拟, 结果如图 5 所示. 由图可见, 当宽度  $w$  一定时, 随着深度  $d$  的增加, 阻断电压会下降, 且当  $d = 45\mu\text{m}$  时, 阻断特性几乎不受隔离区的影响. 由此可知, 沟槽区的最大深度应限定在  $45\mu\text{m}$  以下. 考虑到  $w$  对阴极有效面积的影响,  $d$  对阻断电压的影响以及挖槽工艺的实施难度和可靠性,  $w$  和  $d$  可分别取为  $2 \sim 3\text{mm}$  和  $35 \sim 40\mu\text{m}$ . 于是, 采用湿法刻蚀就可以实现如此浅而宽的沟槽. 与 pnp 隔离相比, 采用沟槽隔离, 不仅改善了 RC-GCT 的正向阻断特性, 同时又大大降低了工艺难度和成本.

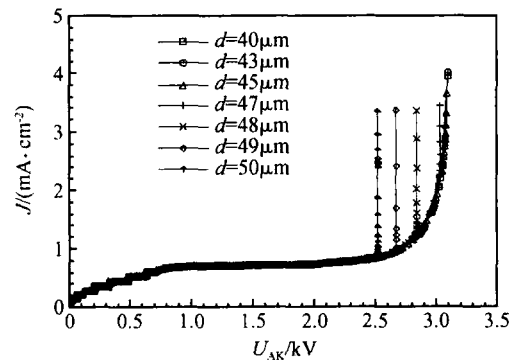


图 5 沟槽参数对 RC-GCT 的阻断特性影响

Fig. 5 Effect of  $d$  and  $w$  on blocking characteristic of the RC-GCT with trench separation

为了说明沟槽区参数选择的合理性, 对 J3 结的击穿特性进行了分析, 结果如图 6 所示. 为了便于比较, 图中还给出了相同模拟条件下非对称 GCT 和 pnp 隔离的 RC-GCT J3 结的击穿特性. 由图可见, 非对称 GCT 与 pnp 隔离的 RC-GCT 的 J3 结击穿特性曲线完全一致, 不受隔离区电阻的影响; 沟槽隔

离的 RC-GCT 的 J3 结击穿特性则表现出明显的电阻特性. 这说明沟槽隔离区存在一定的电阻, 它会导致 J3 结的漏电流增加, 但不会导致其击穿特性变软.

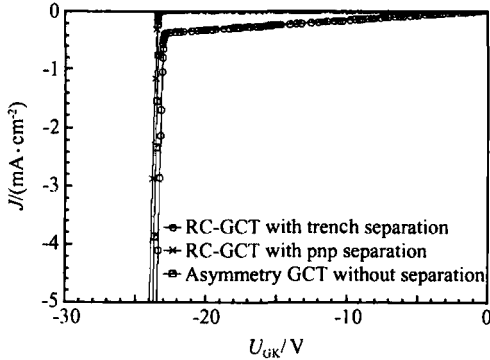


图 6 J3 结的击穿特性曲线比较

Fig. 6 Comparison of the gate reverse characteristic of the RC-GCT with trench and pnp separation and asymmetry GCT

### 5 实验结果及分析

对正向阻断设计电压为 2800V 的 RC-GCT 进行了实验研究. 采用电阻率为  $180 \Omega \cdot \text{cm}$  的 NTD 高阻单晶设计了具有沟槽隔离的带透明阳极和 n 缓冲层的 RC-GCT 器件. 采用低温  $1000^\circ\text{C}/1\text{h}$  的三氯氧磷沉积和  $1230^\circ\text{C}/20\text{h}$  高温推进后经腐蚀形成  $30\mu\text{m}$  的 n 缓冲层. 用  $120\text{keV}$  硼离子注入和  $1200^\circ\text{C}/2\text{h}$  的高温推进形成约  $10\mu\text{m}$  的  $\text{p}^+$  透明阳极区. 腐蚀形成的沟槽处方块电阻为  $300 \Omega/\square$ . 测得在门极电压为 0 时的正向  $I-V$  特性曲线如图 7 所示. 由图可见, 当阳极电压增加到 2900V 后曲线转折, 出现负阻现象, 所以该器件的正向阻断电压约为 2900V. 从而说明 2800V RC-GCT 的设计是符合指

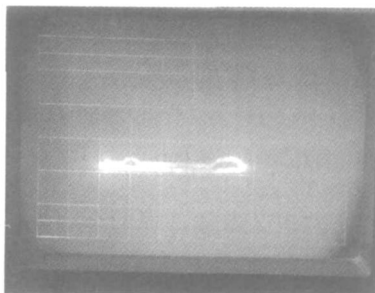


图 7 RC-GCT 的正向  $I-V$  特性测试曲线 横坐标表示  $V$ :  $600\text{V}/\text{div}$ ; 纵坐标表示  $I$ :  $10\text{mA}/\text{div}$

Fig. 7  $I-V$  characteristic test curve of the RC-GCT

标要求的.

### 6 结论

通过分析 pnp 隔离的 RC-GCT 结构特点和特性, 指出 pnp 隔离由于存在 J2 结的弯曲效应导致阻断电压下降, 而且形成 p 区时需要进行选择性的深扩散, 导致工艺难度大大增加. 提出了沟槽隔离的 RC-GCT 结构模型, 利用 MEDICI 软件对其阻断特性进行了模拟, 并与 pnp 隔离的 RC-GCT 和非对称 GCT 进行了比较, 结果表明设计参数完全符合设计指标要求. 另外, 通过不同沟槽深度下 RC-GCT 阻断特性和门-阴结击穿特性的模拟, 给出了优化的沟槽区结构参数. 最后, 根据 RC-GCT 的设计参数制作出具有沟槽隔离、带缓冲层和透明阳极的 RC-GCT 器件, 测试结果表明设计参数完全符合指标要求. 该设计为 IGCT 国产化提供了重要的技术依据.

### 参考文献

- [ 1 ] Linder S, Klaka S, Freckner M, et al. A new range of reverse conducting gate-commutated thyristors for high voltage medium power applications. EPE, Trondheim, Norway, 1997
- [ 2 ] Klaka S, Linder S, Frecker M. A family of reverse conducting gate commutated thyristors for medium voltage drive applications. PCIM, Hong Kong, 1997
- [ 3 ] Steimer P K, Gr ü ning H E, Werninger J, et al. IGCT —— a new emerging technology for high power, low cost inverters. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), New Orleans, Louisiana, 1997
- [ 4 ] Eicher S, Bernet S, Steimer P, et al. The 10kV IGCT —— a new device for medium power voltage drives. Conference Record of IEEE- IAS, Rome, 2000
- [ 5 ] Wang Cailin, Gao Yong. Design Concept for key parameters of reverse conducting GCT. Chinese Journal of Semiconductors, 2004, 25(10) : 1243
- [ 6 ] Wang Cailin, Gao Yong. Analysis of mechanism for transparent emitter. The 27th International Semiconductor Conference (CAS), Sinaia, Romania, 2004
- [ 7 ] Wang Cailin, Gao Yong, Zhang Xin. Design and optimization of blocking characteristic of asymmetry gate commutated thyristors. Journal of Xi 'an University of Technology, 2005, 21(2) : 129 (in Chinese) [王彩琳, 高勇, 张新. 非对称门极换流晶闸管阻断特性的设计与优化. 西安理工大学学报, 2005, 21(2) : 129]
- [ 8 ] Medici Two-Dimensional Device Simulation Program, Version 4.0 User 's Manual (AVANT), 2000

## Analysis and Design of Blocking Characteristic of Reverse Conducting GCT\*

Wang Cailin<sup>1</sup>, Gao Yong<sup>1</sup>, and Zhang Changli<sup>2</sup>

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

(2 Power Semiconductor Research Group, Korea Electrotechnology Research Institute, Changwon-City 641-600, South Korea)

**Abstract :** The blocking characteristic of a conventional RC-GCT with pnp separation region is analyzed. A new RC-GCT structure with trench separation region is presented and the design considerations of its blocking characteristic are given. Based on the results, the structural model of RC-GCT with trench separation region is set up, and its blocking characteristic is simulated using a MEDICI simulator and compared with that of the asymmetry GCT without separation region and RC-GCT with pnp separation region. In addition, the optimum parameters of trench separation region are given by simulating characteristics of the RC-GCT for various trench structural parameters. The experiment results show that the design for the RC-GCT is reasonable.

**Key words :** power electron devices; gate commutated thyristor; gate turn-off thyristor; pin diode; breakdown voltage; trench separation

**EEACC :** 2560P; 2560L; 2560B

**Article ID :** 0253-4177(2005)09-1833-05

---

\* Project supported by the Special Science and Technology Plan of Education Bureau of Shanxi Province in China (No.04J K245)

Wang Cailin female, was born in 1965, associate professor. She is engaged in research on design and development of new power semiconductor devices.

Gao Yong male, was born in 1956, professor. He is engaged in study of new power semiconductor devices, IC CAD, and semiconductor light-electronic integration.

Zhang Changli male, was born in 1959, senior engineer. He is engaged in study of new power semiconductor devices.

Received 23 January 2005, revised manuscript received 11 March 2005

© 2005 Chinese Institute of Electronics