

一种新的 GCT 门-阴极图形的设计方法*

王彩琳[†] 高 勇

(西安理工大学电子工程系, 西安 710048)

摘要: 在分析门极可关断晶闸管(GTO)和门极换流晶闸管(GCT)门-阴极结构的基础上,依据 GCT 关断时的换流机理,提出了一种新的 GCT 门-阴极图形的设计方法.与现有的 GCT 门-阴极图形相比,用该方法设计的门-阴极图形,在保证开关过程中电流均匀分布的前提下,可增加 GCT 的有效阴极面积,减小热阻,并提高电流容量.

关键词: 电力半导体器件; 门极换流晶闸管; 门极可关断晶闸管; 门-阴极结构

EEACC: 2560; 2560P; 2560L

中图分类号: TN34 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2006)07-1300-05

1 引言

集成门极换流晶闸管(IGCT)^[1]是一种新型的电力半导体器件,它是在门极可关断晶闸管(GTO)的基础上开发出来的.IGCT 的管芯(GCT)是在现有的 GTO 结构中附加了透明阳极和缓冲层两项技术,并通过硬驱动来实现其开通和关断.这种特殊的结构决定了它具有通态压降低,开关速度快,驱动电路简单及安全工作区(SOA)较稳定等优点.特别是在大功率范围内,没有任何器件可以与其相媲美.由于 GCT 是由 GTO 派生的,它保留了 GTO 分立的门-阴极图形.因此,GCT 和 GTO 器件都能实现门极自关断,这也是它们区别于普通晶闸管的根本所在.门-阴极图形的优化对器件的关断特性很重要,尤其是大尺寸的器件.GTO 的设计关键就是要解决开关期间电流的均匀性问题.因为在开关的瞬态过

程中,电流集中会引发局部温升,导致二次击穿的热斑出现.为此,要求 GTO 采用国际上普遍流行的矩形指条状阴极单元按同心环径向排列的门-阴极结构.这种结构不仅能保证器件在开关过程中不会发生电流集中而损坏,而且会增加开通时的 di/dt 耐量.缺点是阴极区的有效面积较小,仅占器件总面积的 25%^[2],导致器件的热阻增大,电流容量受到限制.本文提出了一种新的门-阴极结构图形,在保证 GCT 器件开关过程中电流均匀分布的前提下,能增加 GCT 有效阴极面积,提高器件的电流容量.

2 现有的 GCT 门-阴极图形

GCT 的单元结构剖面 and 门-阴极结构^[3]及 GTO 门-阴极放大图形如图 1 所示.由图 1(a)可知,GCT 是由 $n^+pn^-np^+$ 构成的非对称结构,其中含有透明阳极 p^+ 区和缓冲层 n 区.它的门-阴极采用了

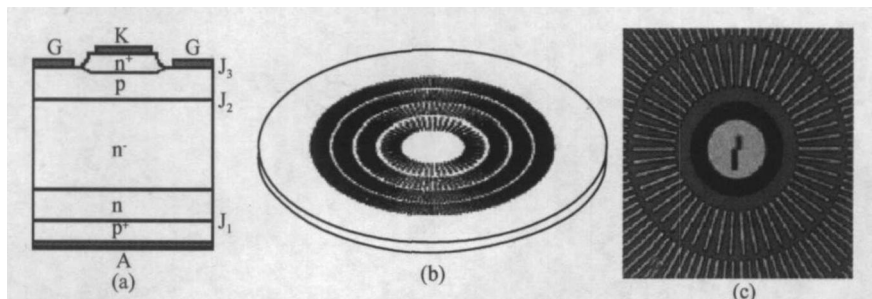


图 1 GCT 单元的结构剖面 and 门-阴极发射极图形及 GTO 门-阴极放大图形 (a) GCT 单元结构剖面;(b) GCT 门-阴极发射极图形;(c) 带铝层的 GTO 门-阴极放大图形

Fig. 1 Structure profile of GCT unit ,layout of gate-cathode of GCT and amplified layout of gate-cathode of GTO (a) Profile of GCT unit ;(b) Layout of gate-cathode of GCT ;(c) Amplified layout of GTO with aluminum

* 西安理工大学优秀博士生科研基金资助项目

[†] 通信作者. Email : wangcailin @xaut. edu. cn

2005-11-21 收到,2006-02-13 定稿

分立的阴极台面结构. 由图 1(b) 可见, 其矩形指条状阴极单元按同心环均匀地排列在芯片表面. 采用这种分立的门-阴极结构, 一个 GCT 器件相当于许多小单元的并联. 图 1(c) 为带铝层的 GTO 门-阴极放大图形 (其中心区域的白色部分为中心门极(G)上的铝层, 白色细长条为阴极(K)上的铝层, 其余部分是门-阴极间的钝化保护区域). 可见, 现有 GCT 的门-阴极图形与 GTO 的完全相同. 芯片表面除了所有阴极指条所占面积 (即阴极有效面积) 之外, 其他面积被门极区、门-阴极间的钝化层及预留的外围磨角台面所占有. 所以, 这种分立的门-阴极图形使得阴极有效面积较小, 不利于提高器件的电流容量, 需要改进.

3 设计依据

首先分析 GCT 和 GTO 工作原理的差异, 然后在此基础上提出 GCT 门-阴极图形的设计依据.

GCT 工作时, 导通和阻断与 GTO 完全相同, 主要区别在于关断机理. 图 2 给出了 GTO 和 GCT 在关断期间电流分布的比较. 由图 2(a) 可见, GTO 关断时, 主电流的一部分被门极抽走, 其余的完全经过

阴极流出, 导通区逐渐变窄, 最后 J3 结才完全形成耗尽层, 将 GTO 彻底关断. 这说明 GTO 的关断过程中存在一个“pnpn”过渡区, 在此期间阴极 npn 晶体管仍然工作, 随着过渡区的不断压缩会发生电流集中现象. 所以, GTO 阴极单元的形状和面积直接影响其关断性能. 由图 2(b) 可见, GCT 关断时, 由于采用了门极硬驱动技术, 当主结(J2 结)的阻断电压还未上升之前, 其 J3 结就已经停止注入, 阴极 npn 晶体管截止, 于是 GCT 的主电流瞬间全部换流到门极, 阴极并没有电流流过. 所以, GCT 的关断实质上是阳极 pnp 晶体管的关断, 阴极指条面积的大小并不会影响其关断的均匀性. 比较而言, GCT 与 GTO 在关断过程中对门-阴极图形的要求是不同的. 为了保证 GTO 开关过程中电流的均匀性, 要求每个单元都要有几乎相同的电流-电压特性^[4], 相同的载流子寿命和掺杂浓度, 所有单元都能同时开通和关断, 且通过的电流尽可能相等. 可见, GTO 开关时对其门-阴极图形要求很苛刻. 对 GCT 而言, 阴极单元的形状和面积并不重要, 但门极区的形状和面积会影响其关断的均匀性. 因此, 若对 GCT 也采用与 GTO 完全相同的门-阴极图形, 显然是不合适的.

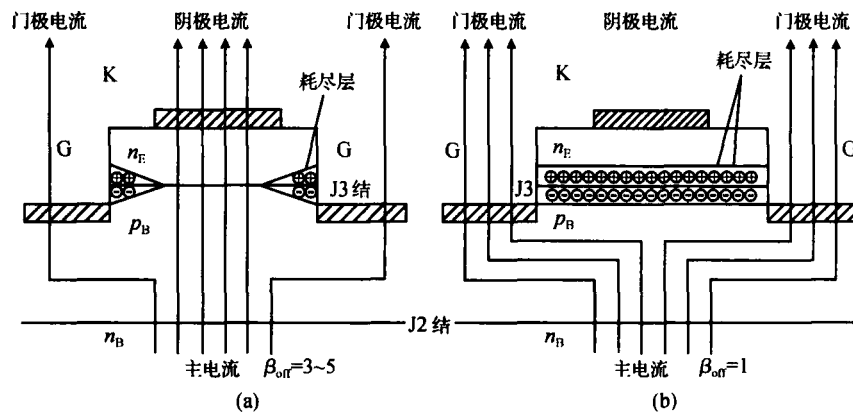


图 2 GTO(a) 和 GCT(b) 的关断期间电流分布的比较

Fig. 2 Comparison of the current distributions of GTO (a) and GCT (b) during turn off

正是考虑到 GCT 与 GTO 关断机理的差异, 我们认为: 在 GTO 的每个门-阴极单元中, 让阴极单元面积保持不变, 门极区面积随位置而变, 保证关断的均匀性; 在 GCT 的每个门-阴极单元中, 让门极区面积保持不变, 阴极单元面积随位置而变, 保证从门极区流过的电流尽可能相等. 为此, 可以对 GCT 阴极单元的形状进行改进, 采用梯形的阴极单元来代替现有的矩形阴极单元, 使这些梯形阴极单元按同心环均匀地排列在芯片表面上, 并保证每个梯形阴极单元外围的门极区面积相等. 按此设计依据, GCT 与 GTO 相比, 每个门-阴极单元的总面积不变, 只是阴极单元所占的面积增加, 门极区的面积相对减小,

且在各环内的单元中保持一致. 这样, 既可保证 GCT 关断时电流的均匀性, 又可增加阴极的有效面积, 提高电流容量.

4 设计考虑

设计 GCT 版图时, 可根据门极特性指标和最大可关断电流 I_{TQGM} 指标等来设计门-阴极尺寸. 门极特性和 I_{TQGM} 与 p 基区厚度和表面薄层电阻有关. 设计准则是: 首先, 在满足 GCT 阴极 npn 晶体管电流放大倍数 β_2 和 J3 结击穿电压 V_{BRJ3} 的情况下, 确定 p 基区厚度和表面薄层电阻. 其次, 根据门极特性

指标的要求来调整中心门极尺寸.最后,根据最大可关断电流指标来确定阴极单元的尺寸、个数和整个硅片尺寸.

为了使器件能正常、安全地工作,对阴极指条的尺寸和分布有严格的要求.在 GTO 的设计中,为了获得较高的 I_{TQGM} 和较好的开关特性及二次击穿特性,通常要对阴极指条的宽度 w 和长度 l 加以限制. w 与关断过程中的存储时间 t_s 有关. w 越窄, t_s 越短^[5],均匀性也越好.图 3 给出了 I_{TQGM} 与 w 和阴极指条数的关系 (l 为 3.5mm)^[6].由图可见, I_{TQGM} 越大,阴极指条的数就越多,同时 w 也越窄.比如,要满足 2000A 的 I_{TQGM} 指标,在一定的阴极条数目下,阴极指条的宽度最好取在 240~360 μ m 范围内.另外, l 与关断过程中载流子的收缩有关,考虑到关断的三维效应,在通态电流允许的条件下,应尽量减小阴极指条长度. l 可根据通态电流和 I_{TQGM} 的要求,即允许的电流密度 J 来控制,一般取在 2.6~4mm 的范围内.

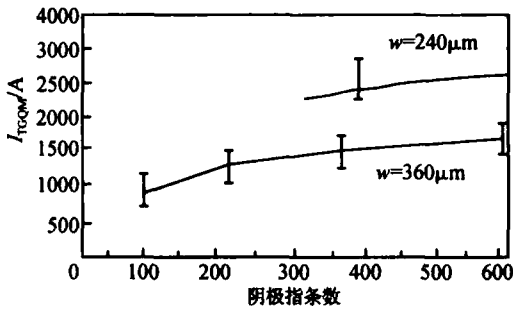


图 3 I_{TQGM} 与 w 和阴极指条数的关系

Fig. 3 Relation of I_{TQGM} , w and number of cathode units

通常阴极指条的长度 l 和宽度 w 对 I_{TQGM} 的影响可通过下列两式来表示^[7]:

$$I_{TQGM} = \frac{4V_{BRJ3}}{R_{kp}} \text{ 和 } R_{kp} = p_2 \frac{w}{W_{p2} l} \quad (1)$$

式中 V_{BRJ3} 为 J3 结的击穿电压,一般在为 20~23V 的范围内^[8]; R_{pk} 为 p 基区横向电阻; p_2 为 p 基区的平均电阻率; W_{p2} 为 p 基区的厚度.

4.1 单元图形的设计

图 4 给出了 GCT 现有的阴极单元图形与新设计的阴极单元图形尺寸的比较.由图 4(a) 可见,现有的阴极单元为矩形,其宽度为 w ,长度为 l .则矩形阴极单元图形的面积为: $S_{\text{矩形}} = wl$.

由图 4(b) 可见,新设计的阴极单元为梯形.令梯形阴极单元的内边宽度为 $w_{\text{内}}$,且 $w_{\text{内}} = w$;梯形阴极单元的高度为 h ,且 $h = l$;梯形阴极单元的外边宽度为 $w_{\text{外}}$,其值与阴极单元的高度 h 和间距等参数有关.则梯形阴极单元图形的面积为:

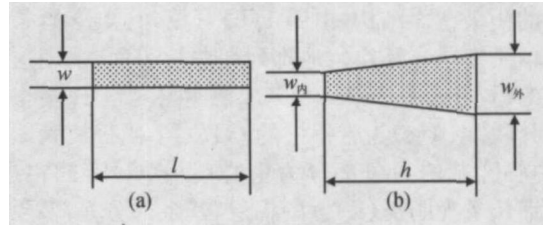


图 4 阴极单元图形尺寸的比较 (a) 现有的阴极单元图形; (b) 新设计的阴极单元图形

Fig. 4 Comparison of the size and shape of two cathode units (a) Existing shape of cathode unit; (b) New shape of cathode unit

$$S_{\text{梯形}} = \frac{1}{2} (w_{\text{内}} + w_{\text{外}}) h = \frac{1}{2} (w + w_{\text{外}}) l$$

图 5 给出了 GCT 现有的门-阴极单元图形与新设计的门-阴极单元图形外围尺寸的比较.由图可见,两者门-阴极单元图形的总面积不变,其内边宽度 $W_{\text{内}}$ 为 $w + 2d$ (d 为阴极条之间的半间距),外边宽 $W_{\text{外}}$ 为 $w_{\text{外}} + 2d$,高 H 为 $h + 2d$.由于两者阴极单元的面积不同而导致外围的门极区面积也不同.新的梯形阴极单元的面积明显比矩形阴极单元大,因而其外围的门极区面积则减小.

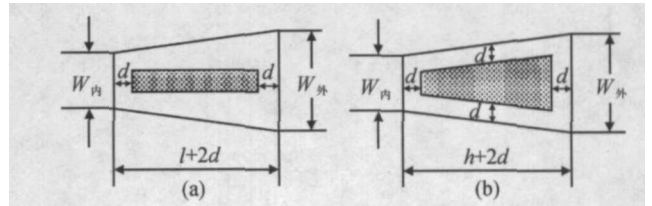


图 5 门-阴极单元图形尺寸的比较 (a) 现有的门-阴极单元图形; (b) 新设计的门-阴极单元图形

Fig. 5 Comparison of the size and shape of two gate-cathode units (a) Existing shape of gate-cathode unit; (b) New shape of gate-cathode unit

根据上述考虑,为了保证 GCT 中电流的均匀性,要求开关时从门极区流过的电流相同,即各环中梯形阴极单元外围的门极区面积必须相等.若梯形阴极单元的内边宽度和高度不变,则从内环到外环,梯形阴极单元的外边宽度逐渐减小,于是阴极单元的面积也逐渐减小.

4.2 整体图形的设计

根据上述设计方法,采用 L-edit 软件^[9]绘制的新的 GCT 门-阴极结构如图 6 所示.由图可见,梯形阴极单元按同心环径向均匀地排列形成新的 GCT 门-阴极图形,每个门-阴极单元中门极区的面积几乎相等.并且从内环到外环,梯形阴极单元的面积逐渐减小.与图 1(b) 所示的现有 GCT(或 GTO)的门-阴极图形相比,新的 GCT 门-阴极图形中阴极单元所占的总面积比现有门-阴极图形中阴极单元的总

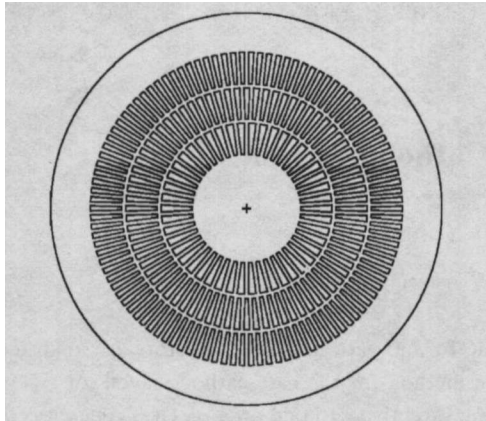


图 6 新设计的 GCT 门-阴极图形
Fig. 6 new layout of gate-cathode of GCT

面积明显增大。

5 性能评价与验证

为了评价新的 GCT 门-阴极图形的设计效果,以 2000A 的 GCT 为例,针对这两种图形的硅片有效利用率(即阴极有效面积占硅片总面积的比例)和门极区面积的均匀性分别进行了计算与比较。计算时,根据 GTO 的阴极单元的选择依据,兼顾最大可关断电流 I_{TGM} 和门极特性及阴极 npn 晶体管的电流放大系数,取梯形指条阴极单元的内边宽为 0.3mm,高度为 3mm,间距为 0.4mm。对于 2000A 的器件,在半径 R 为 29mm 的圆片上设计了 6 个同心环均匀地排列在其阴极表面,每环对应的阴极单元个数 N_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) 分别为 46, 76, 106, 136, 166 和 196。

5.1 硅片的有效利用率

现有的门-阴极图形的硅片有效利用率 η_1 为:

$$\eta_1 = \frac{\sum_{i=1}^6 N_i S_{\text{矩形}}}{R^2} = 24.73\%$$

新设计的门-阴极图形的硅片有效利用率 η_2 为:

$$\eta_2 = \frac{\sum_{i=1}^6 N_i S_{\text{梯形}}}{R^2} = 32.10\%$$

根据上述计算可知,对 2000A 的 GCT 器件,采用新的门-阴极图形后,硅片的有效利用率由原来的 24.73% 提高到 32.10%,有效面积相对放大约为 29.8%。

5.2 门极面积的均匀性分析

由于各环的门-阴极单元图形中,梯形阴极单元的面积不等,导致环绕在阴极外围的门极区的面积也有微小的差别。各环中门-阴极单元的门极面积 (S_{Gi}) 可通过其门-阴极单元面积 (S_i) 减去其梯形阴

极单元的面积 (S_{Ti}) 来确定,即 $S_{Gi} = S_i - S_{Ti}$ 。对 2000A 的 GCT 器件,计算得到各环中每单元的 S_{Gi} ($i = 1, 2, \dots, 6$) 分别为 1.566, 1.534, 1.526, 1.512, 1.507 和 1.504mm²。可见,各环中每个单元的门极区的面积非常接近。由此说明,GCT 关断时从每个单元的门极处流走的电流几乎是相等的,从而验证了设计图形的均匀性。

上述两项结果表明,将 GCT 原有的矩形指条状阴极单元用新的梯形状阴极单元代替后,不仅阴极有效面积明显增加,而且可以保证关断时电流的均匀性。

6 结束语

根据 GCT 与 GTO 的关断机理不同,提出了新的 GCT 门-阴极图形的设计方法。将阴极单元设计为梯形状,按同心环均匀地排列在整个芯片表面上,并且从内环到外环,外围门极区的面积保持不变,梯形阴极单元的面积逐渐减小。采用该方法不仅可以保证 GCT 开关时电流的均匀性,而且可显著增加阴极的有效面积。在实际应用中,针对器件使用的不同场合和用户的特殊要求,可根据门极特性和最大可关断电流等指标分别对门-阴极横向尺寸、阴极单元尺寸及其数目进行调整,从而设计出合理的门-阴极图形。

参考文献

- [1] Gruening H E, Zuckerberger A. Hard drive of high power GTOs: better switching capability obtained through improved Gate-units. IEEE IAS, San Diego, 1996
- [2] Taylor P D. Thyristor design and realization. Pang Yinsuo (translate). Beijing: China Railway Industry Press, 1996: 148 (in Chinese) [Taylor P D, 著. 庞银锁, 译. 晶闸管的设计与制造. 北京: 中国铁道出版社, 1992: 148]
- [3] Stillman H M. IGCTs-megawatt power switches for medium voltage applications. Reprint from ABB Review, 1997: 3
- [4] Vitezslav B. Power semiconductor device theory and application. John Wiley & Sons, 1999: 259
- [5] Satoh K, Morishita K, Hirano N, et al. New design approach for ultra high power GCT thyristor. Power Semiconductor Devices and ICs, ISPSD, Canada, 1999
- [6] Tada A, Miyajima T, et al. Electrical characteristic of a high voltage high power gate-off thyristor. Proceedings of IPEC, Japan, 1983
- [7] Nie Daizuo. Power semiconductor device. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1994: 185 (in Chinese) [聂代祚. 电力半导体器件. 北京: 电子工业出版社, 1994: 185]
- [8] Wang Cailin, Gao Yong, Zhang Changli. Analysis and design of blocking characteristic of reverse conducting GCT. Chinese Journal of Semiconductors, 2005, 26(9): 1833 (in Chinese) [王彩琳, 高勇, 张昌利. 逆导型 GCT 阻断特性的分析与设计. 半导体学报, 2005, 26(9): 1833]

[9] Sun Run. Design tutorial of integrated circuit. Beijing:Beijing Hope Electronic Press ,2002 (in Chinese) [孙润. TANNER 集

成电路设计教程. 北京:北京希望电子出版社,2002]

A New Design Method for the Gate-Cathode Layout of GCT*

Wang Cailin[†] and Gao Yong

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

Abstract: The gate-cathode structures of gate commutated thyristor (GCT) and gate turn-off thyristors are analyzed. Based on the commutation mechanism of a GCT during turn-off, a new design method for the gate-cathode layout of GCT is presented. Compared with the existing method, the new method increases the effective cathode area of GCT, decrease the thermal resistance, and improve the current capability under the precondition of uniform current distribution during turn-off.

Key words: power semiconductor devices; gate commutated thyristor; gate turn-off thyristor; gate-cathode structure

EEACC: 2560; 2560P; 2560L

Article ID: 0253-4177(2006)07-1300-05

*Project supported by the Research Foundation of Xi'an University of Technology for Outstanding Doctor

[†]Corresponding author. Email:wangcailin@xaut.edu.cn

Received 21 November 2005, revised manuscript received 13 February 2006

©2006 Chinese Institute of Electronics