

脉冲开关用6英寸高 di/dt 晶闸管的研制

王政英, 姚震洋, 操国宏, 唐智慧, 唐 革

(株洲南车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 421001)

摘要: 针对脉冲开关用晶闸管对 di/dt 耐量的高要求, 阐述了晶闸管的导通过程和 di/dt 的失效机理。通过选用适当的硅单晶参数, 调整P基区浓度分布, 优化门极图形, 采用双负角造型工艺, 设计并试制出6英寸脉冲开关用晶闸管。该晶闸管的脉冲峰值电流可达300 kA, di/dt 耐量超过3 000 A/ μ s, 试验表明其具有良好的稳定性和可靠性。

关键词: 6英寸晶闸管; 脉冲开关; di/dt ; P基区; 门极图形

中图分类号: TN34

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2014)02-0023-04

Development of 6-inch High di/dt Thyristor for Pulse Switch

WANG Zheng-ying, YAO Zhen-yang, CAO Guo-hong, TANG Zhi-hui, TANG Ge

(Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: For the high requirements of the thyristor for pulse switch on di/dt tolerance, the turn-on process and di/dt failure mechanism of thyristor are described. The 6-inch thyristor for pulse switch has been developed by choosing appropriate parameters of silicon wafer, adjusting P-base impurity profile, optimizing gate graph, and using double negative angle bevel. The experiment verifies that the pulse peak current can reach 300 kA, the di/dt rating is more than 3 000 A/ μ s, and the thyristor has good stability and reliability.

Keywords: 6-inch thyristor; pulse switch; di/dt ; P-base; gate graph

0 引言

脉冲功率技术是将相对较长时间内存储的能量在极短时间内迅速释放的一门科学技术^[1], 它广泛应用于国防科研、高新技术和民用工业等领域。脉冲功率系统一般由高压电源单元、能量存储单元、脉冲压缩单元、主开关和负载等部分构成。主开关的作用是将压缩后的脉冲传递给负载, 在装置中占有重要地位。脉冲功率技术采用的传统开关元件有火花隙、引燃管、气体开关、闸流管等。电力半导体器件以其体积小、寿命长、可靠性高等优点, 逐渐成为脉冲功率开关的发展方向。而在大功率半导体开关器件中, 晶闸管具有功率等级高、

控制特性好、配套简单、成本较低等特点, 已呈现出替代传统开关的趋势^[2]。

与其他应用工况相比, 脉冲开关用晶闸管要考虑能承受在几微秒的时间内上升至百千安培级的峰值电流, 以及其 di/dt 的耐量, 以免器件损坏。为提高晶闸管的开通速度和 di/dt 的耐量, 具有国际领先水平的瑞士ABB公司研制出2种供脉冲开关用的特殊晶闸管, 分别是门极可关断晶闸管(GTO)和集成门极换流晶闸管(IGCT)。它们由于一般只能承受较低的反向电压, 仅用在特定的脉冲电源中^[3]; 同时其门极区域占面积较大, 阴极有效面积较小, 与传统晶闸管相比, 通流能力小。

脉冲功率领域中应用的开关器件还要承受十千伏甚至上百千伏电压^[4], 期望器件耐压能力越高越好, 但耐压能力的提高又会制约其通流能力和 di/dt 耐量的提高^[5]。本文介绍一种专门为大电流工况设计的脉冲开关

收稿日期: 2013-11-10

作者简介: 王政英(1980-), 女, 工程师, 主要从事大功率半导体器件设计及工艺技术研究。

用晶闸管,它兼顾高电压、大电流和较高 di/dt 耐量。

1 脉冲开关用晶闸管的设计难点

为满足脉冲功率的应用要求,脉冲开关用晶闸管需具有较高电压等级、较大通流能力、快开通速度和高 di/dt 耐量。提高器件的耐压需选用高电阻率、片厚更厚的硅单晶,优化杂质分布并采用合理的表面造型。提高晶闸管的通流能力需加大芯片尺寸和减薄其厚度等。株洲南车时代电气股份有限公司(以下简称:南车时代电气公司)已经研制出6英寸高压晶闸管^[6],并成功应用于 ± 800 kV特高压直流输电工程。但现有6英寸晶闸管的 di/dt 耐量还达不到脉冲功率的应用要求,为解决这一难点,需对晶闸管的导通及 di/dt 失效机理深入研究。

1.1 晶闸管 di/dt 失效机理

晶闸管的 di/dt 是指在规定条件下,其能承受的最大通态电流上升率。对晶闸管施加触发信号后,晶闸管从断态到通态有一个电流扩展过程,最初只有紧靠门极很小一部分的阴极区域开通,随后以 $0.1 \text{ mm}/\mu\text{s}$ 速度扩展到整个阴极面。如果外部电路的电流上升率太大,而此时晶闸管又没有充分导通,就可能导致器件因局部温度过高而损坏。这种损坏由两个因素造成:在导通区与非导通区之间存在很高的温度梯度,使硅片的局部受到应力作用而损坏;或者硅铝合金层达到 600°C 以上,发生融化,致使器件短路^[7]。

1.2 晶闸管的导通过程

晶闸管导通过程分为延迟、上升和扩展3个阶段。

6英寸晶闸管采用了放大门极结构(图1)。设计放大门极是为了将辅助晶闸管的导通电流转变为主晶闸

管的触发电流。对于有放大门极的晶闸管,延迟阶段包括从施加门极信号、辅助晶闸管导通,直至主晶闸管的 $\alpha_1+\alpha_2=1$ 。辅助晶闸管在该过程中起到放大门极信号的作用。辅助晶闸管导通后,电流迅速增大,其阴极 k 的电位接近阳极电位。因此,主晶闸管阴极 K 与辅助晶闸管阴极 k 间电压接近于主晶闸管阴—阳极间的电压,这样就对主晶闸管施加了一个控制极强触发。在该过程中,如果主晶闸管所需要的开通电流很大,而辅助晶闸管的电流上升速度缓慢,此时阳极电压又比较高,在延迟阶段辅助晶闸管将会产生比较大的功耗。设计时必须提高辅助晶闸管的开通速度。

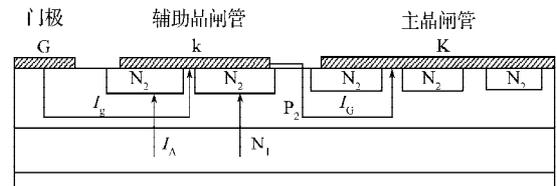


图1 具有放大门极的晶闸管

Fig. 1 Thyristor with amplifying gate

在上阶段,晶闸管靠近放大门极附近的局部阴极区域已经开始导通,晶闸管两端电压快速下降,电流迅速上升,产生了开通阶段的最大瞬时功耗^[8]。为降低初始导通区的电流密度,需增加初始导通面积。

在扩展阶段,电压缓慢下降,电流维持在相对稳定值。此时的瞬时功率相比上升阶段要小很多。

图2给出晶闸管导通过程中3个阶段所对应的芯片热功率分布,可以明显看到,器件的热损耗主要发生在上升阶段(最大热功率为 $2.36 \times 10^6 \text{ W}/\text{cm}^3$),因此增加初始导通面积、降低初始导通区电流密度是提高 di/dt 耐量的重要措施。

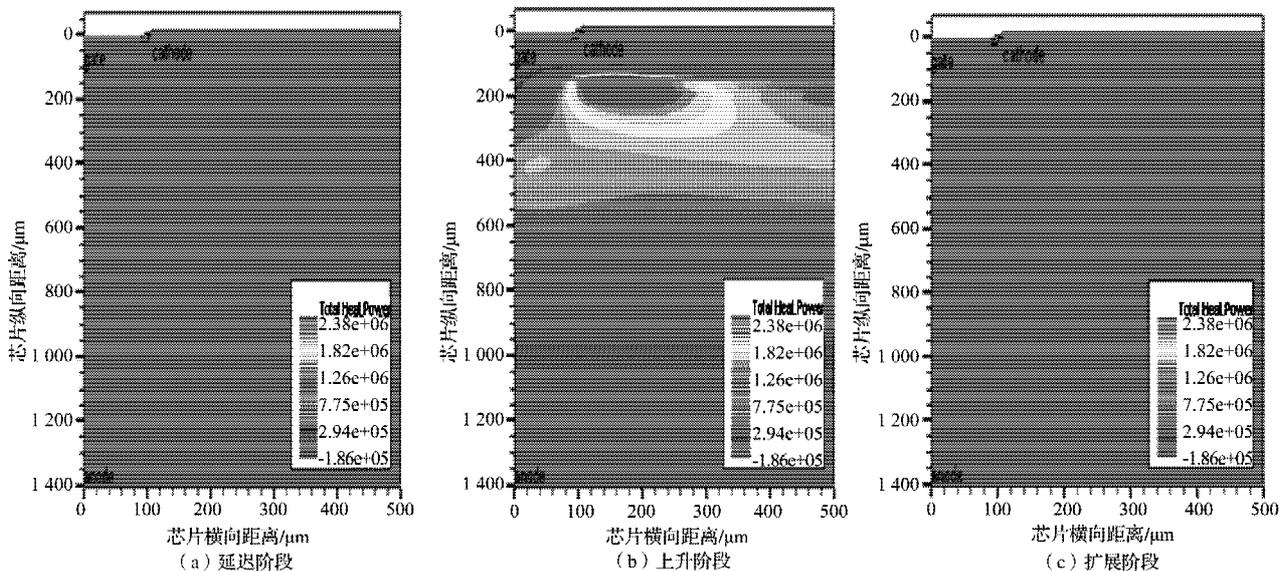


图2 开通过程中晶闸管的热功率分布

Fig. 2 Total heat power distributions of thyristor during turn-on process

2 脉冲开关用6英寸晶闸管的设计

2.1 单晶的选型

PN结雪崩击穿电压主要由衬底掺杂浓度决定,要制作大直径高电压等级的晶闸管,必须选用衬底掺杂浓度低、电阻率均匀的单晶。与此同时,高电阻率单晶必须配有较厚的N基区,否则会造成高电压下空间电荷区的穿通。但N基区若太厚,又会影响到器件的 di/dt 、关断时间等动态参数。因此,脉冲开关用晶闸管需协调其电压与动态参数间的关系,折中单晶的片厚与电阻率。

2.2 P基区的设计

P基区的参数主要是其杂质浓度分布、宽度和少子寿命。因发射极短路结构,门极、放大门极都位于P基区上,所以P基区的参数几乎影响到晶闸管的所有电气特性^[9]。

晶闸管的阻断电压与P基区杂质浓度分布密切相关。晶闸管处于阻断状态时,空间电荷区除在N基区展宽外,在浓度较高的P基区也有一定的展宽。P基区浓度分布越缓,空间电荷区展宽越宽,PN结的体内雪崩击穿电压值也越高。P基区的浓度分布和结深对台面造型影响很大,尤其对于负斜角来说,磨角后的表面电场强度与杂质浓度分布的关系更紧密。在负斜角相同的情况下,表面浓度低、结较深、浓度分布缓,晶闸管就会有较高的表面耐压。

P基区的设计对动态参数 di/dt 的影响很大。为减小晶闸管开通期间的功率损耗,提高晶闸管的 di/dt 能力,需缩短开通时间,尤其是上升时间。上升时间 t_r 的表达式^[10]为:

$$t_r = 2\sqrt{\frac{t_{nc}t_{pc}}{\alpha_1 + \alpha_2 - 1}} \quad (1)$$

式中: t_{nc} 、 t_{pc} ——分别为空穴在N1基区、电子在P2基区中的平均渡越时间; α_1 、 α_2 ——分别为 $P_1N_1P_2$ 和 $N_1P_2N_2$ 晶体管的共基极电流放大系数。

由式(1)可见, t_{nc} 、 t_{pc} 越小和晶闸管的电流放大系数越大,则上升时间越短。电流放大系数 α 为:

$$\alpha = \gamma\beta \quad (2)$$

其中, $\beta = 1 - \frac{1}{2}\left(\frac{We}{L}\right)^2$, $L = \sqrt{D\tau}$ 。

式中: γ ——注入比; β ——输运系数; We ——有效基区宽度; L ——扩散长度; D ——扩散系数; τ ——少子寿命。

为提高电流放大系数,需要提高注入比、减小有效基区宽度、增大扩散长度,所以P基区不能太宽,扩散

结深不能太深。另一方面,P基区太宽,会增大基区渡越时间,同样也会使开通时间变长。因此,用作脉冲开关时,晶闸管阻断电压的设计裕量不能太大。为增大扩散长度,则需要提高基区少子寿命。

2.3 门极图形的设计

合理设计门极图形能提高晶闸管的 di/dt 耐量。具体设计方法有:

(1)增加初始导通区的面积,降低电流上升阶段初始导通区的电流密度。初始导通面积可以看成是导通线的长度与扩散长度的乘积,通过增加门阴极延长线的长度可以显著提高器件 di/dt 耐量。

(2)设计适当短路点并减少阴极边缘靠近门极的短路点,或者使短路点远离门极。开通过程中,短路点阻挡电流的扩展,门极附近的短路点影响尤甚。优化短路点的设计,减小开通时间,加快电流的上升速度,从而提高 di/dt 耐量。

(3)设计合理的辅助晶闸管。6英寸晶闸管由于芯片面积比较大,从施加门极信号到芯片全面积导通需较长时间。此过程中要协调和发挥好辅助晶闸管的作用,为主晶闸管提供强触发电流。辅助晶闸管的面积要足够大,但过大又会损失阴极面积,无益于缩短开通时间和提高 di/dt 耐量^[11]。同时,辅助晶闸管的导通速度要快,否则在电流增大至主晶闸管所需的触发电流前,辅助晶闸管将产生很高的功耗,甚至烧毁。设计时,要在兼顾 dv/dt 耐量的前提下,适当减少辅助晶闸管内短路点的个数或者增加短路点距中心门极的距离。

2.4 表面造型的设计

由于高压半导体器件的表面击穿电场低于体内,需降低表面的电场强度。PN结的电场主要是在空间电荷区里,要使表面电场减弱,可将PN结表面做成一定的斜角,使表面处的空间电荷区拉宽。斜角分为正斜角与负斜角,目前双向阻断高压晶闸管的表面结构主要有3种^[12]:

(1)正负角结构。这种结构的缺点是:为使正反向电压对称,需要在体内设计的基础上增加长基区的厚度,以避免反向阻断状态时空间电荷区上翘,表面电场受 j_2 结的影响;另外,正负角结构的造型会损失更多阴极面积。

(2)双正角结构(也叫燕尾槽造型)。其优点是损失阴极面积较少;但对机械加工技术要求较高。另外,晶闸管在承受电压时,会在长基区中部边缘出现电场集中的现象,使表面电场高于单正角造型的晶闸管,因此给表面钝化带来较大问题。

(3)双负角结构。在正反向阻断下,其空间电荷区

边界的翘变都有远离正偏结、减小 α_{pnp} 的趋势,使表面耐压更加接近于体内耐压(图3)。双负角结构可以通过机械研磨的方式简单获得,表面电场较低,便于后续台面的腐蚀和钝化,器件可靠性高。高压晶闸管的负斜角一般取 $1^\circ \sim 3^\circ$ 。

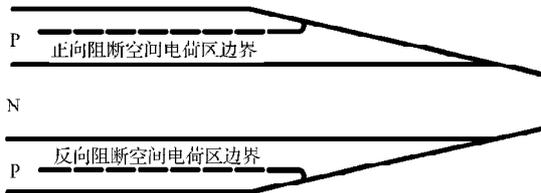


图3 双负角造型及正反向耐压下空间电荷区的展宽
Fig. 3 Double negative angle bevel and distribution of the space charge region under forward and backward blocking voltage

3 脉冲开关用6英寸晶闸管的试制

南车时代电气公司已具备6英寸高压大电流晶闸管的制造能力,因此,脉冲开关用6英寸晶闸管的试制过程相对来说比较顺利。通过选取适当电阻率和片厚的单晶,调整扩散结深及杂质浓度分布,使晶闸管在临界片厚下获得了理想的电压阻断特性。为提高少子寿命,采用RCA自动清洗工艺,减少金属离子的污染;扩散时采用磷吸收与硼吸收的方法,利用金属杂质在玻璃体中的溶解度比在硅中的高的特点去除金属杂质。台面采用双负角造型,使芯片边缘电场低于体内,并配以特殊的腐蚀和钝化工艺,保证了器件电压的长期稳定性。

为精确调整晶闸管的电参数,并提高其均匀性,采用电子辐照技术。通过电子辐照,在晶闸管芯片晶格中引入深能级复合中心,将少子寿命降低到合理的水平。少子寿命的降低,改善了晶闸管的 dv/dt 、关断时间等参数;但同时又会使压降变大、开通时间变长,增加晶闸管的开通损耗。相对普通晶闸管,考虑到脉冲开关用晶闸管对 di/dt 的要求较高,可以适当减少辐照剂量,以获取较高的少子寿命。

对门极图形,设计了3种不同的光刻版。表1列出同一批芯片、不同光刻版图晶闸管的动态参数。

表1 3种门极图形参数及动态测试参数

Tab. 1 Configuration parameters and dynamic testing parameters of thyristor with 3 types of gate

项目	图形1	图形2	图形3
门阴极延长线的长度/mm	360	760	540
辅助晶闸管内短路点个数	24	24	18
辅助晶闸管内短路点距中心门极的距离/mm	0.1	0.1	0.2
I_p /kA	220	250	300
$\frac{di}{dt}/(A \cdot \mu s^{-1})$	$\geq 1\ 200$	$\geq 2\ 200$	$\geq 3\ 000$
$\frac{dv}{dt}/(V \cdot \mu s^{-1})$	$\geq 2\ 000$	$\geq 2\ 000$	$\geq 2\ 000$

从表1可看出,与图形1相比,图形2只对放大门极图形进行了修改, di/dt 耐量从1 200 A/ μs 提高到2 000 A/ μs ,可见增加门阴极延长线的长度对 di/dt 影响较大。图形1的晶闸管继续增大 di/dt 时,均在主阴极附近出现了烧伤点。与图形2相比,图形3尽管其门阴极延长线较短,但由于辅助晶闸管内短路点数较少,同时短路点距中心门极的距离较大,而图形1与图形2短路点距中心门极的距离较小,因此图形3的辅助晶闸管能迅速对主阴极提供所需的触发电流,其晶闸管的 di/dt 耐量最高,单脉冲峰值电流达300 kA, di/dt 超过3 000 A/ μs 。由于晶闸管的 di/dt 耐量均取决于门极图形,所以改变辅助晶闸管的短路点排布后,晶闸管 dv/dt 仍可以满足要求。

4 结语

针对脉冲开关用晶闸管的特殊要求,南车时代电气公司研发了6英寸脉冲开关用晶闸管,其脉冲峰值电流达300 kA, di/dt 耐量超过3 000 A/ μs 。经过重复多次试验验证,其具有良好的稳定性及可靠性,能够满足大电流、高 di/dt 脉冲功率领域的应用需求。

参考文献:

- [1] 余岳辉,梁琳.脉冲功率器件及其应用[M].北京:机械工业出版社,2010:5-8.
- [2] 任亚东,李世平.半导体脉冲功率开关的最新进展[J].强激光与粒子束,2012,24(4):772-775.
- [3] 薄鲁海.晶闸管在脉冲功率电源中的应用研究[D].武汉:华中科技大学,2009.
- [4] 颜骥,雷云.一种应用于脉冲功率领域的IGCT[J].大功率变流技术,2012(6):5-9.
- [5] 李世平,任亚东. $\phi 150$ mm高压脉冲功率晶闸管的研制与应用[J].大功率变流技术,2012(1):9-12.
- [6] 刘国友,黄建伟.6英寸高压晶闸管的研制[J].电网技术,2007,31(2):90-92.
- [7] Paylor P D,庞银锁.晶闸管的设计与制造[M].北京:中国铁道出版社,1992:67-68.
- [8] 王富珍.晶闸管 di/dt 失效分析[J].电力电子技术,2007,41(12):129-130.
- [9] 清华大学.大功率可控硅元件原理与设计[M].北京:人民教育出版社,1975:249-251.
- [10] 王晓彬,王培清,张斌.提高高频晶闸管 di/dt 耐量的研究[J].清华大学学报:自然科学版,1997,37(1):106-109.
- [11] 王晓彬,王培清,张斌.阴极图形对高频晶闸管 di/dt 的影响[J].电力电子技术,1996(4):97-104.
- [12] 王正鸣,高建峰,高山城,等.双向阻断晶闸管正反向对称P型径向变掺杂结构:中国:200920245474[P].2010-11-24.