

# 中心锥形槽状光敏门极的 200A, 1200V 光控双向晶闸管的研制\*

赵善麒 高鼎三

(吉林大学电子工程系 长春 130023)

王 正 元

(北京电力电子新技术研究开发中心 北京 100011)

**摘要** 本文具体描述了锥形槽状光敏门极结构光控双向晶闸管的设计思想，介绍了该新型结构器件的关键的生产工艺，并对器件的触发特性进行了较深入的理论研究。研制成功的直径为 30mm，电流容量为 200A，耐压为 1200V，的光控双向晶闸管的最小光触发功率小于 13mW，通态峰值压降小于 1.5V，换向  $dV/dt$  耐量大于 100V/ $\mu s$ ，换向  $di/dt$  耐量大于 50A/ $\mu s$ 。

**EEACC:** 4250, 2560L, 2550

## 1 引言

双向晶闸管是一种交流器件，可以用任何一种极性的门极电流触发开通。它的出现，是功率集成器件（PID）的起点。但是，普通双向晶闸管在交流工作状态下存在着换向失败问题，即器件不能可控地交替正反向导通、关断。这一缺点阻碍了双向晶闸管向大功率和高频率方向发展。光控双向晶闸管（LTTriac）可以从根本上解决这一问题。由于其触发信号是光信号，可以使门极回路与主回路完全绝缘开来。因此，这种新型的电力电子器件不仅具有很高的换向能力及良好的门极触发对称性，而且在应用上省去了普通双向晶闸管所必需的门极变压器等多种控制回路元件，使线路简单化。LTTriac 被广泛应用于光电耦合器<sup>[1]</sup>、固体继电器和固体接触器、电动机调速及调光、控温、焊接等工业领域，对那些要求高换向能力，较高频率特性的高可靠变流装置，光控双向晶闸管更有其它器件无可比拟的优点。

## 2 锥形槽状光敏门极结构的提出

国外大功率 LTTriac 多数采用 V 形槽光敏区结构<sup>[2-5]</sup>，如图 1 所示。这种结构的主要特点是器件的两个晶闸管  $p_{e1}n_{b1}p_{b1}n_{e1}$  和  $p_{e2}n_{b2}p_{b2}n_{e2}$  被一个断面为 V 形的沟槽分隔开，用一个 LED 在门极部位控制器件在两个方向上的开通。由于两个晶闸管部分彼此

\* 国家自然科学基金资助项目  
1992 年 9 月 28 日收到初稿，1993 年 1 月 5 日收到修改稿

分离, 避免了工作状态下的相互干扰, 因此, 这种光敏门极结构的器件能够获得很高的换向能力。但这种结构存在一个缺点, 即大面积挖槽不利于器件获得高耐压、大电流。而且这种工艺一致性差, 成品率低。用这种结构, 国外 LTTriac 电压、电流的最高水平为 1000V、100A。

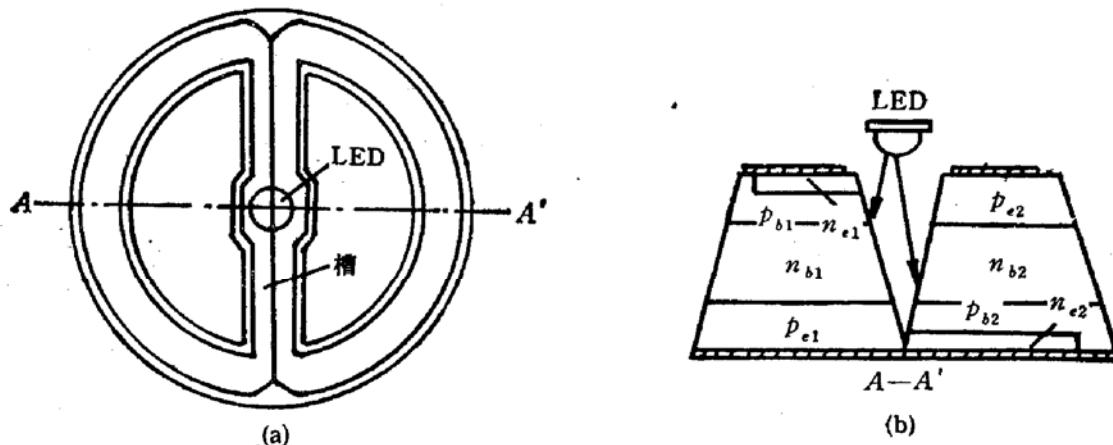


图 1 V型槽光敏区的 LTTriac 结构示意图  
(a) 俯视图 (b) 剖面图

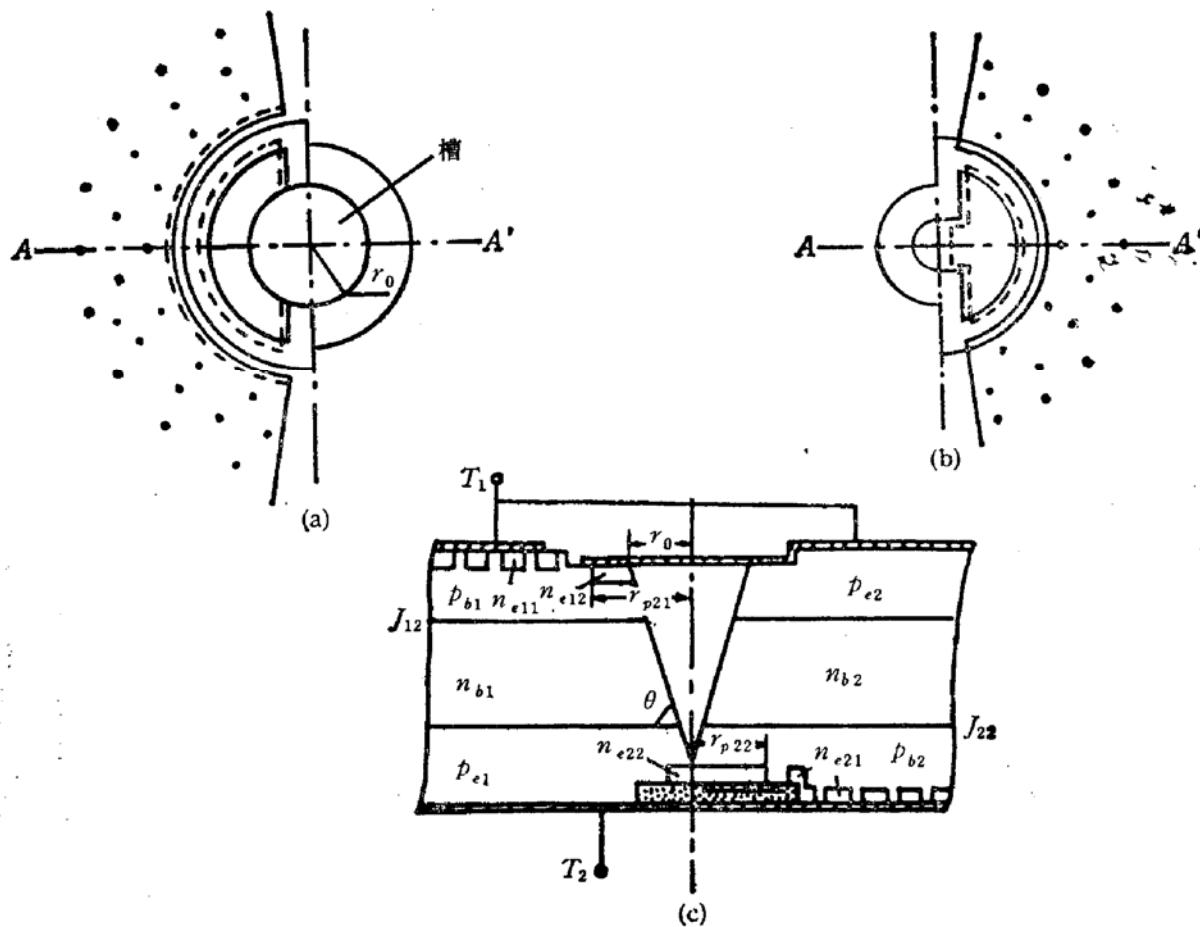


图 2 中心锥形槽光敏门极的 LTTriac 结构示意图  
(a)  $T_1$  端俯视图 (b)  $T_2$  端俯视图 (c) 剖面图

在普通双向晶闸管门极短路结构实验<sup>[3]</sup>和 12MeV 电子辐照实验<sup>[4]</sup>中, 我们发现, 对双向晶闸管换向能力影响最大的是门极区部位的隔离区宽度和少子寿命。根据这一观点, 在

LTTriac 的结构设计上, 我们没有贯穿整个隔离区挖槽, 而只在门极区挖槽, 这就形成了中心锥形槽状光敏门极的结构。具有这种新的光敏门极的 200A, 1200V 光控双向晶闸管的结构如图 2 所示。

对一个晶闸管, 光触发灵敏度最高的是 n 基区, 尤其是在正向阻断结的空间电荷区上<sup>[2]</sup>, 受光区采用锥形槽, 当锥体的顶角较大时, 器件就相当于有一个角度较小的内台面, 当第一晶闸管  $p_{e1}n_{b1}p_{b1}n_{e1}$  或第二晶闸管  $p_{e2}n_{b2}p_{b2}n_{e2}$  处在正向阻断时,  $J_{12}$  结或  $J_{22}$  结的空间电荷区将在这一小内台面上展宽。LED 发出的光通过照射到  $J_{12}$  结或  $J_{22}$  结的空间电荷区及其附近的 n 基区和 p 基区来发挥其效果, 从而达到触发器件的作用。因此, 若两个晶闸管采用类似的放大门极结构, 如图 2 中的第一晶闸管的放大门极  $n_{e12}$  和第二晶闸管的放大门极  $n_{e22}$ , 则这种中心锥形槽状光敏门极结构能保证两个晶闸管的光触发灵敏度大致相同。另一方面, 锥形槽处在中心门极位置, 可以在很大程度上“屏蔽”两个晶闸管间的相互干扰, 即当一个晶闸管处于开通状态, 另一个晶闸管处于阻断状态时, 由于锥形槽的存在, 在关断过程中, 阻挡了门极附近通态一侧的残余载流子向阻断一侧扩散, 而这一扩散电流正是造成器件换向失败的主要原因。综上所述, 锥形槽光敏门极结构不仅能使器件在两个方向上的光触发灵敏度相近, 而且还大大提高了器件的换向能力。

### 3 理论分析

由光电流与光触发功率间的关系及光电流与触发电流间的关系<sup>[3]</sup>, 不难得到光控晶闸管的最小光触发功率为

$$\phi^* = \frac{I_g^*(1 - \alpha_1)h\nu}{q(1 - R)\eta_e}, \quad (1)$$

式中  $I_g^*$  为最小触发电流,  $\alpha_1$  为  $p_{e1}n_{b1}p_{b1}n_{e1}$  晶体管共基极直流电流放大系数,  $R$  为反射系数,  $\eta_e$  为有效量子效应。

在计算 LTTriac 的最小光触发功率时, 假设光敏槽处的  $J_{12}, J_{22}$  结分别为第一、第二晶闸管光生电流的源区, 并将第一晶闸管放大门极的尺寸原点设在  $J_{12}$  结上, 如图 3 所示, 则放大门极  $n_{e12}$  的内、外半径分别记为

$$r_{01} = \frac{W_{p1}}{\tan \theta}, \quad (2)$$

$$r_{p21}^* = \left( r_{p21} - r_0 + \frac{x_{j1} - x_w}{\tan \theta} \right). \quad (3)$$

仍将第二晶闸管放大门极的尺寸原点设在锥形槽的轴线上, 并把放大门极  $n_{e22}$  的内半径记为

$$r_{02} = \frac{x_{j1} - x_{j2} - x_w}{\tan \theta}. \quad (4)$$

外半径仍为  $r_{p22}$ 。上面诸式中,  $W_{p1}$  为  $p_{b1}$  区的宽度,  $x_{j1}$  为 p 型扩散结深,  $x_{j2}$  为 n 型扩散结深,  $x_w$  为挖槽深度,  $\theta, r_0, r_{p21}, r_{p22}$  的意义见图 2 所示。

设触发电流为  $I_g$ , 流过第一引发晶闸管  $p_{e1}n_{b1}p_{b1}n_{e12}$  p 基区时所产生的电压为

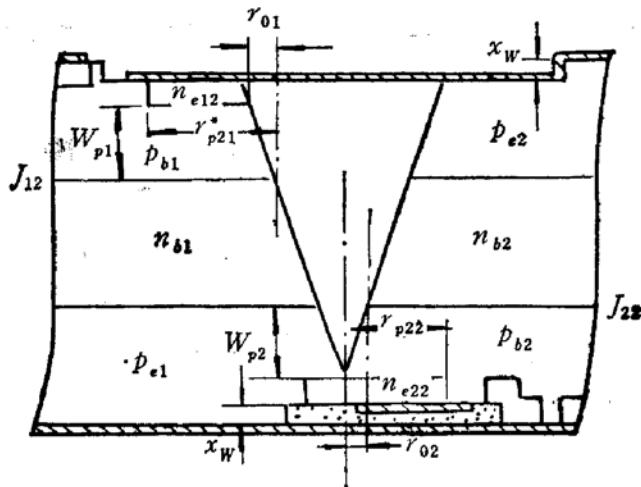


图3 光触发功率的计算模型

$$V_p = \frac{I_g \rho_{ps1}}{\pi} \ln \frac{r_{ps1}^*}{r_{01}}. \quad (5)$$

当  $V_p$  达到  $n_{e12}p_{b1}$  结的开启电压  $V_0$  时, 器件导通, 由(5)式得到最小光触发电流:

$$I_g^* = \frac{\pi V_0}{\rho_{ps1} \ln \frac{r_{ps1}^*}{r_{01}}}. \quad (6)$$

将(6)式代入(1)式中, 得到第一晶闸管最小光触发功率

$$\phi_1^* = \frac{k V_0}{\rho_{ps1} \ln \frac{r_{ps1}^*}{r_{01}}}. \quad (7)$$

同样, 可以得到第二晶闸管的最小光触发功率

$$\phi_2^* = \frac{k V_0}{\rho_{ps2} \ln \frac{r_{ps2}^*}{r_{02}}}, \quad (8)$$

式中  $k$  为常数, 其值为  $k = \pi h v (1 - \alpha_1) / q \eta_e (1 - R)$ ,  $\rho_{ps1}, \rho_{ps2}$  分别为第一、第二引发晶闸管 P 基区的方块电阻, 其值为  $\rho_{ps1} = \bar{\rho}_{p1} / W_{p1}$ ,  $\rho_{ps2} = \bar{\rho}_{p2} / W_{p2}$ ,  $\bar{\rho}_{p1}, \bar{\rho}_{p2}$  分别为 P 基区的平均电阻率,  $W_{p1}, W_{p2}$  分别为相应 P 基区的有效宽度。

应该指出, 由(7)、(8)两式得到的  $\phi^*$  值是指器件导通所必需的最小光触发功率, 这时, 所需要的 LED 最小发光功率(也称之为最小光触发功率)  $\phi_L^*$  与  $\phi^*$  之间有如下关系

$$\phi_L^* = \frac{\phi^*}{\xi}, \quad (9)$$

式中  $\xi$  为正向阻断结在锥形槽上的展宽面积与整个槽面积之比, 其大小主要由  $p_{tb}n_b$  结两端的电压及角度  $\theta$  决定。

在触发 LTTRiac 时, 器件两端偏置电压为 300V, 按表 1 给出的典型工艺条件, 用 CAD 可以计算出两个晶闸管 P 基区的方块电阻  $\rho_{ps} = 911.6 \Omega/\square$ <sup>③</sup>. 若取版图尺寸

表 1 LTTriac 典型工艺条件

P型杂质表面浓度	P型扩散结深 $x_{j1}$	n型扩散结深 $x_{j2}$	抛光深度	挖槽深度 $x_s$
$1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	85 μm	25 μm	5 μm	5 μm

$\theta = 10^\circ$ ,  $r_0 = 2\text{mm}$ ,  $r_{p21} = 3.2\text{mm}$ ,  $r_{p22} = 2.4\text{mm}$ , 则由(2)–(4)式及(7)–(9)式, 可以得到器件的最小光触发功率的理论计算值: 第一晶闸管  $\phi_L^* = 11.8\text{mW}$ , 第二晶闸管  $\phi_L^* = 11.7\text{mW}$ . 计算结果与实验结果<sup>[9]</sup>  $\phi_L^* = 10.4\text{--}12.7\text{mW}$  基本吻合, 而且器件两个晶闸管的光触发灵敏度基本一致.

## 4 光敏门极的制作技术

一只光控双向晶闸管从第一次扩散 (p型扩散) 到总测要经历近30道工序, 本节只对该器件特有的光敏门极的制作技术进行详细的介绍.

### 4.1 锥形槽的形成

作为我们所采用结构的一个主要特点是锥形槽状的光敏区, 如何获得这种锥形槽状结构呢? 对(111)单晶要获得槽深在 300μm 以上的锥形槽, 现有的技术水平, 不论是干法刻蚀还是湿法刻蚀, 都很难实现. 在实验中, 我们采用了研磨加腐蚀的方法, 很好地解决了这一难题<sup>[9]</sup>. 锥形槽的腐蚀和管芯台面的腐蚀一起进行, 腐蚀液在剥去硅表面薄薄一层的同时, 彻底去除了金属微粒和其它导电杂质, 以及吸附在表面的离子, 这是提高管芯耐压的重要一环. 用 HF:HNO<sub>3</sub>:H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>:CH<sub>3</sub>COOH = 2:2:1:1 的腐蚀液进行腐蚀, 可以得到平整、光亮的表面.

### 4.2 蒸镀 SiO 减反射膜

为了减小来自 LED 的光在锥形槽表面的反射损耗, 应用光学镀膜的方法, 在受光区表面蒸镀上一层 SiO 减反射膜. 为保证该膜具有较好的减反射效果, 在工艺上, 尽量控制 SiO 膜的光学厚度接近于入射光波长的四分之一, 折射率接近于空气折射率和硅折射率乘积的平方根<sup>[10]</sup>.

在实验中, 随意抽出 5 只 200 A 管芯, 测试其最小光触发功率, 然后, 在真空度为  $1.5 \times 10^{-4}\text{Pa}$  的光学镀膜台内蒸发上一层厚度为 1280 Å 的 SiO 膜. 在该真空度下, SiO 膜的折射率约为 1.8, 其光学厚度  $nh$  为 2304 Å 接近于入射光波长 9400 Å 的四分之一.

表 2 列出了上述 5 只管芯蒸膜前后最小光触发功率  $\phi_L^*$  的测试值及其变化率. 蒸镀 SiO 膜后, 要使器件的第一晶闸管导通所需要的光触发功率比蒸膜前减小 24—31%, 而第二晶闸管的光触发功率则减小 19—28%. 可见, SiO 膜的减反射效果相当显著.

最后指出, 因为所研制的 LTTriac 是大功率器件, 在阻断状态下器件的锥形光敏槽这一小内台面也要承受很高的电压. 显然, 几百纳米的 SiO 膜根本达不到要求, 还需用另外一层保护膜钝化小台面, 以保证器件的阻断特性和长期工作的稳定性. 我们选用了繁酯改性硅漆 (SP) 作为钝化膜, 该膜与 SiO 有良好的粘附性, 对使用的波长范围完全透明, 而且折射率与 SiO 膜的折射率相近. 另外, 还具有绝缘性能好, 涂敷简便, 易固化

等优点。

表 2 蒸镀 SiO 膜前后最小光触发功率的测试值

管号	方式 $\phi_{L(\text{air})}^*$	蒸膜前 $\phi_{L(\text{air})}^*$		蒸膜后 $\phi_{L(\text{SiO})}^*$		$\frac{\phi_{L(\text{air})}^* - \phi_{L(\text{SiO})}^*}{\phi_{L(\text{air})}^*}$	
		I	III	I	III	I	III
91-3-1-3	12.5	13.1	9.0	9.9	0.28	0.24	
91-3-1-7	14.7	14.4	10.7	10.7	0.27	0.26	
91-3-1-11	11.3	11.7	8.5	9.1	0.25	0.22	
91-3-1-20	12.1	12.5	9.2	10.1	0.24	0.19	
91-3-1-32	16.5	18.0	11.4	13.0	0.31	0.28	

## 5 特性参数

基于上述的结构, 理论及工艺水平, 用直径为 30mm 的中子照射单晶研制成功了 200A, 1200V 光直接触发双向晶闸管。图 4 是该器件的外观图。触发光源采用的是北京光电器件厂生产的掺 Si 的 GaAs 发光二极管, 其发光峰值波长为 9400 Å。LED 被镶在  $T_1$  端压块内, 黑电线是 LED 的正极, 白线是 LED 的负极。LED 外加正向偏压时, 器件可以在任何一个方向上被触发导通。

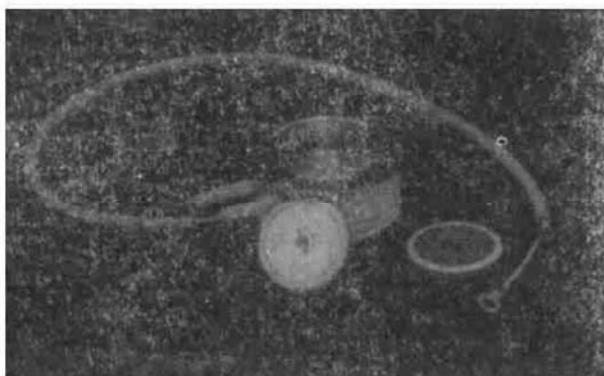


图4 200A LTTriac 外观图

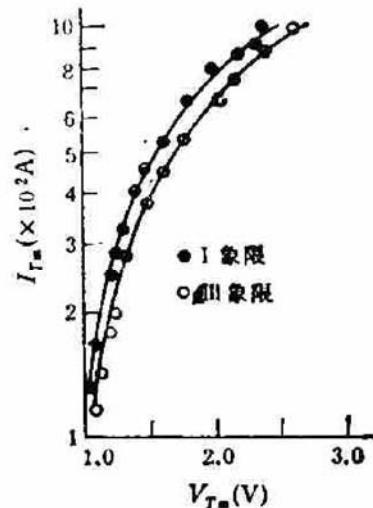


图5 200A LTTriac 的通态伏安特性曲线

图 5 是 LTTriac 室温下的通态伏安特性曲线, 其中, I 象限代表第一晶闸管的特性, III 象限代表第二晶闸管的特性。在峰值电流 280A 下, I、III 象限的通态峰值压降分别为 1.22V 和 1.28V, 两者之差  $\Delta V_{Tm}$  小于 0.1V。器件的通态伏安特性一致性较好。图 6 是器件 I → III、III → I 象限换向时的电流、电压波形。测试条件为结温  $T_j = 25^\circ\text{C}$ ,  $T_1$ 、 $T_2$  极间施加电压  $V_D = 400\text{V}$ , LED 的触发电流  $I_{Lgr} = 200\text{mA}$ 。从图中可以看出, 该器件 I → III 象限换向和 III → I 象限换向时, 换向  $dv/dt$  耐量 ( $dv/dt$ )<sub>c</sub> 的值分别为  $125\text{V}/\mu\text{s}$  和  $129\text{V}/\mu\text{s}$ , 换向  $di/dt$  耐量 ( $di/dt$ )<sub>c</sub> 的值分别为  $48.1\text{A}/\mu\text{s}$  和  $47.8\text{A}/\mu\text{s}$ , 换向能力远远超过普通双向晶闸管。

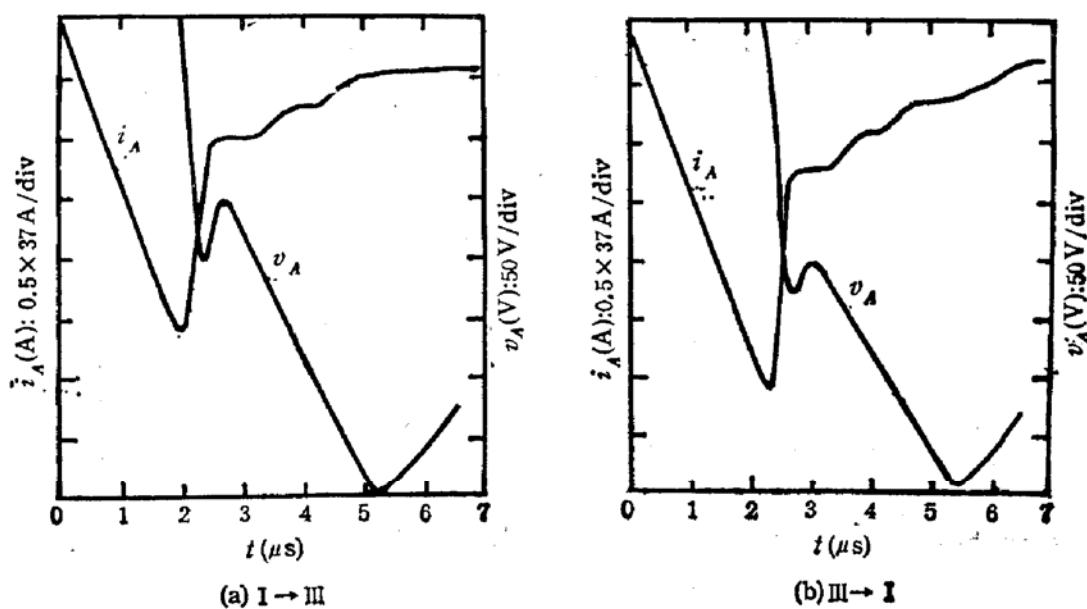


图 6 200A LTTRiac 换向时的电流、电压波形

表 3 列出了所研制器件的额定参数和特性参数的测试值。

表 3 200A LTTRiac 的电学参数汇总

参数名称	符号	单位	测试值
断态重复峰值电压	$V_{DRM}$	V	1100—1300
反向重复峰值电压	$V_{RRM}$	V	1100—1300
额定通态电流(有效值)	$I_{T(RMS)}$	A	200
最小光触发功率	$\phi_L^*$	mW	10—13
通态峰值压降	$V_{Trm}$	V	$\leq 1.5$
断态电压临界上升率	$dV/dt$	V/ $\mu$ s	$\geq 200$
通态电流临界上升率	$di/dt$	A/ $\mu$ s	$\geq 50$
换向电压临界上升率	$(dV/dt)_c$	V/ $\mu$ s	$\geq 100$
换向电流临界下降率	$(di/dt)_c$	A/ $\mu$ s	$\geq 50^*$
开通时间	$t_{on}$	$\mu$ s	6—9
门、阴极绝缘电压	$V_{g-m}$	V	2000

\* 因受测试条件的限制,  $(di/dt)_c$  的值最高只能测到  $50A/\mu$ s

## 6 结论

采用中心锥形槽状光敏门极结构研制成功了 200A, 1200V 光控双向晶闸管, 该器件不仅具有很高的换向能力, 而且具有良好的触发参数对称性。在光敏区表面蒸镀一层 SiO 减反射膜, 可以大大提高器件的光触发灵敏度。

**致谢** 潘福泉高级工程师, 顾廉楚、徐传骥教授对本实验工作提出了许多宝贵的意见, 国营第七七七厂二车间、高可靠所全体技术人员和工人师傅们在管芯制造方面给予了大力

协作, 特别是宋泽令、郑景春、夏吉夫、陈平工程师给予了许多具体的帮助。沈阳自动控制研究设计院测试中心、沈阳信达电力半导体所的曲盛才、赵艳玲、王永福工程师对所研制的器件进行了全面、详细的测试。在此一并表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] 中岛利广, 三菱电机技报, 1985, 59(8): 37.
- [2] T. Yatsuo, N. Konishi, Y. Sugawara and K. Wazima, PESC, 1976, 267.
- [3] 小西信武, 昭53—126877, 1978, 397.
- [4] 松田秀雄, 昭57—13761, 1982, 251.
- [5] 塚越恒男, 昭59—54266, 1984, 291.
- [6] 赵善麒, 实用新型专利, 1991, 91217587.7.
- [7] 赵善麒, 李天望, 郑景春, 高鼎三, 第七届 IC/Si 年会论文集, 1991.
- [8] 大橋弘通, 電氣計算, 1980, 48(8): 30.
- [9] 赵善麒, 吉林大学, 博士学位论文, 1991.
- [10] M. Born, Principle of Optics Pergamon Press, 1980, 61.

## Development of 200A, 1200V Light Triggered Triacs with a Center Cone-Shaped Groove Light Sensitive Gate

Zhao Shanqi and Gao Dingsan

(Electronics Science Department, Jilin University Changchun 130023)

Wang Zhengyuan

(Beijing Power Electronics R&D Center, Beijing 100011)

**Abstract** A design idea of a new light triggered triac structure with a center cone-shaped groove light sensitive gate is described, and some key manufacturing techniques of this device are presented. Theoretical studies on the light trigger characteristic have also been done. A 200A, 1200V, 30mm dia. light triggered triac has been developed. The device has a minimum light triggering power of less than 13mW, on-state voltage of less than 1.5V, commutating  $dv/dt$  capability of more than 100V/ $\mu$ s and commutating  $di/dt$  capability of more than 50A/ $\mu$ s.

**EEACC:** 4250, 2560L, 2550