

大容量门极可关断晶闸管的研究* **

吕 征 宇
(浙 江 大 学)

摘要 本文分析了 GTO 的关断原理,研究了 GTO 的参数设计和制作工艺.测试了 GTO 的掺杂分布和工作特性.采用国产材料和设备试制成 500A 逆阻型大容量 GTO.其工艺可用于 GTO 的批量化生产.

关键词 晶闸管;门极可关断晶闸管,大容量门极可关断晶闸管

1. 引言

门极可关断晶闸管(GTO)是当前容量最大的一种新型自关断电力半导体器件,它比普通晶闸管复杂,在原理、设计和制造上还存在一些问题.我国已制造出 200A 的 GTO,更大容量的 GTO 仍然是电力电子器件领域的重点研究对象.

2. GTO 的一般理论

GTO 管芯的剖面结构如图 1 所示.在导通的 GTO 的门、阴极间加一负脉冲,可从门极区抽出空穴,使 J_3 结导通宽度逐渐收缩(参见图 2),直至 p_2 区有效电子扩散长度 x_0 的两倍为止(一般小于 $100\mu\text{m}^{[1]}$).这是个器件二维关断过程,关断贮存时间 t_s 为^[2]

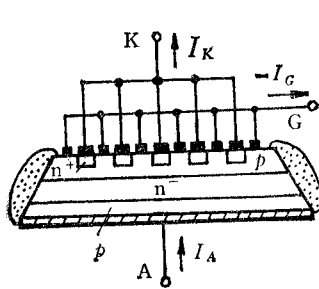


图 1

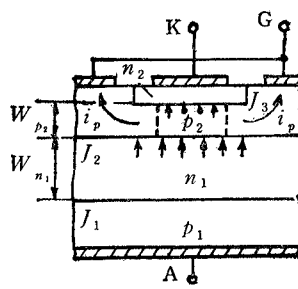


图 2

$$t_s = t_{p_2}(\beta_{\text{关}} - 1) \ln \frac{Sx_0/W_{p_2} + 2x_0^2/W_{p_2} - \beta_{\text{关}} + 1}{4x_0^2/W_{p_2}^2 - \beta_{\text{关}} + 1} \quad (1)$$

式中 t_{p_2} 为 p_2 区电子渡越时间, S 为阴极条宽度, $\beta_{\text{关}} = I_A/(-I_G)$. 最大关断增益为

$$\beta_{\text{关max}} = 1 + 4x_0^2/W_{p_2}^2 \quad (2)$$

* 1987年2月21日收到,1987年7月3日修改定稿.

** 国家自然科学基金资助项目

在 t_s 之后, GTO 进入一维关断^[3]. GTO 一维关断增益应满足

$$\beta_{\times} < \alpha_2 / (\alpha_1 + \alpha_2 - 1) \quad (3)$$

式中 α_1, α_2 分别为 pnp, npn 等效晶体管的共基极电流放大系统.

GTO 的最大可关断电流正比于关断增益和门极可抽出的负电流^[2],

$$I_{\text{ATO}} \propto \beta_{\times} V_{j_3} / R_{p_2} \quad (4)$$

式中 V_{j_3} 为 J_3 结反向击穿电压, R_{p_2} 为 GTO 单元的门极等效电阻.

3. 大容量 GTO 设计问题的探讨

GTO 由各单元并联构成, 要提高其 I_{ATO} , 可通过改善单元的可关断性能和各单元参数的一致性. 前者主要依靠结构、参数设计的合理, 后者则主要依靠制造工艺的改进.

由于两维关断结束后, GTO 须通过一维关断, 因此设计器件时, 常以其一维关断作为依据. 按照以往的观点, 为获得较大的 $\beta_{\times \text{max}}$, 以确保器件可靠关断, 根据(3)式, 要求 α_2 较大, 而 $\alpha_1 + \alpha_2 \rightarrow 1$. 然而依此来设计 GTO, 还存在一些问题, 如: (3)式没有说明 α 究竟该取多大; $\alpha_1 + \alpha_2 \rightarrow 1$ 时, GTO 的通态特性不好, 单元间特性分散性随之急剧增大.

经过对 GTO 物理模型的分析, 认为 GTO 关断的必要条件是^[4]

$$\beta_{\times} < \alpha_2 / (\alpha_2 - \alpha_2^*_{\text{max}}) \quad (5)$$

上式中

$$\alpha_2^*_{\text{max}} = f \cdot b / (b + 1) \quad (6)$$

其中 b 是 n_1 区电子、空穴迁移率之比, f 与 n_1 区少子寿命、 J_1 结空穴电流注射效率等有关, 在逆阻型器件中, 一般 $f \approx 1$. α_2 可以按接近 $\alpha_2^*_{\text{max}}$ 的数值来设计. 考虑到在应用线路中加大 β_{\times} 会使 t_s 延长, 应用中 β_{\times} 常取 3—5 倍. 因此, 在提高 I_{ATO} 的设计上, 应着眼于增强门极的电流抽取能力, 对 β_{\times} 则可放松要求.

按照(4)式, 要增大 I_{ATO} 应尽力降低 R_{p_2} , 其途径是优化器件的垂直参数设计和改进平面电极图形.

由于 R_{p_2} 随 p_2 区方块电阻减少而降低, 故可通过提高 p_2 区杂质浓度、增加 W_{p_2} 来降低 R_{p_2} . 为避免阳极电流限流效应^[5]的影响, p_2 区杂质浓度不应过高 ($< 1.5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$). W_{p_2} 的增加, 受 α_2 的限制(要求 $\alpha_2 > \alpha_2^*_{\text{max}}$), 尽可能提高 J_3 结电子电流注入效率, 使之充分接近于 1, 在同样的 α_2 下就可允许有较大的 W_{p_2} . 此外, 改善 p_2 区的杂质分布可以在确定的浓度和宽度范围内降低 R_{p_2} , 在这方面, 高斯分布比余误差分布优越.

在保持芯片导电总面积不变的条件下, 减小单元尺寸, 提高单元的集成度, 可使总的门极电阻下降, 对提高 I_{ATO} 十分有利, 但芯片在生产过程中会更容易遭受各种缺陷的危害. 提高集成度还受到光刻精度和封装工艺的限制.

4. GTO 的制作

试制的逆阻型大容量 GTO 如图 1 所示, 其中的门极、阴极采用了平面式结构. 芯片共有 66 个单元, 阴极条尺寸为 $5 \times 0.6 \text{mm}^2$, 阴极总面积约 2cm^2 , 阳极面积约 9cm^2 . 器件制作过程简述如下:

取中子嬗变掺杂的浮带区熔高阻 n 型硅片; 经单面抛光后用闭管充氩气扩镓, 形成 p_1, p_2 层; 通过氧化、光刻、扩磷, 形成各单元的 n_2 层; 芯片先与钼片烧结做成管芯, 然后制作门极、阴极, 再做台面造型和钝化保护; 最后, 从管芯引出门极, 采用独特的压接式结构

封装(引出阴、阳极),并通过总测试。

5. 测试结果和讨论

扩散后的芯片,用 ASR-100B 型自动扩展电阻测试仪进行测试。图 3 是扩镓后芯片的径向扩展电阻分布。图 4 是 GTO 单元的垂直方向剖面扩展电阻分布。扩展电阻与杂质浓度有一定关系,在同一探针、压力,温度等条件下,这一关系是确定的。对扩磷层的表面杂质浓度估计是按美国 ASMA F398-77 号标准“由测量等离子体最小谐振波长测定半导体中多数载流子浓度的方法”进行的。所用仪器是 FT-1R MX-1 红外波谱仪,测的是红外吸收反射光。结果如图 5 曲线 I 所示。计算得 $N_r = 2.84 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 。背面的测试结果如图 5 曲线 II 所示,表明测不到扩磷层,而在这段波谱上没有镓的吸收峰。

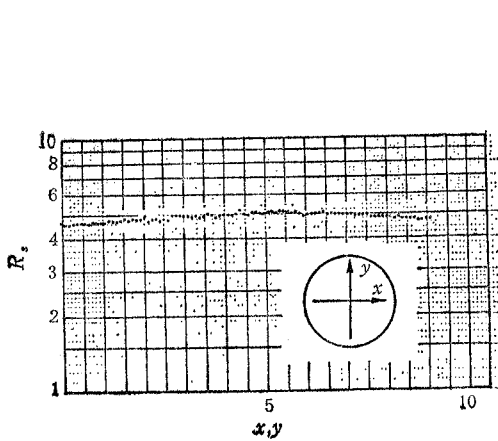


图 3

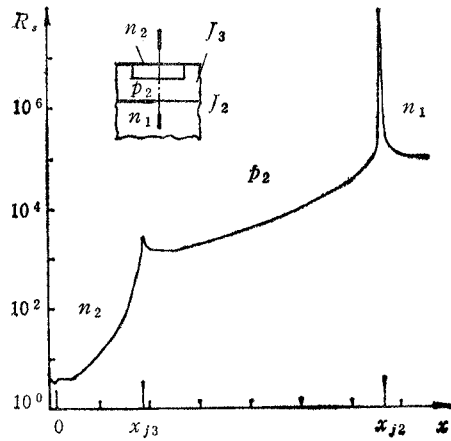


图 4

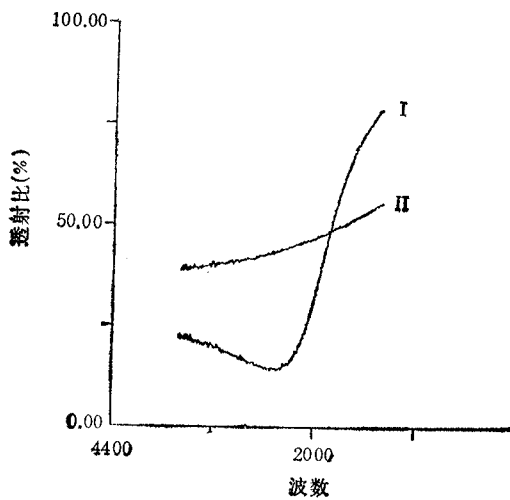


图 5

器件未封装前经初步测试,发现各单元关断参数的一致性,每个单元均有数十安以

上的关断能力, 峰值通态压降 $V_T \leq 1V$ (阳极电流 $I_A = 1A$)。器件的静态正反向阻断电压 $V_{DRM} = V_{RRM} \geq 1400V$ 。

器件封装后关断测试结果如图 6 所示, GTO 的电流关断能力已达 500A, 关断增益约为 5, 贮存时间为 $3\mu s$, 下降时间约 $1.5\mu s$, 这在逆阻型器件中是属相当快的

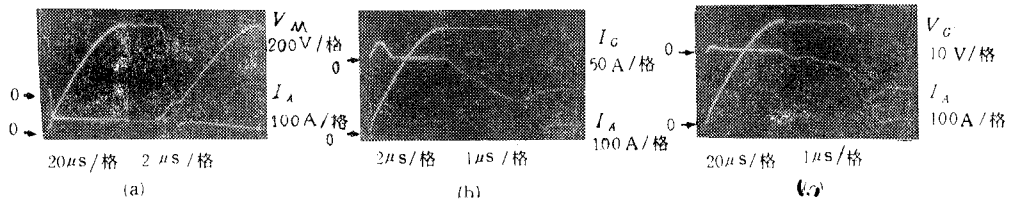


图 6 I_A 100A/格, I_G 50A/格, V_{AK} 200V/格, V_{GK} 10V/格

6. 结论

根据 GTO 的关断原理, 探讨了大容量 GTO 的设计问题, 设计制作了采用平面式门极、阴极结构的逆阻型大容量 GTO。

对扩散后的芯片用扩展电阻法测试了其杂质的平面均匀度和纵向剖面分布, 还用红外吸收法测定了扩磷层表面杂质浓度。结果表明, 扩散工艺基本满足 GTO 的设计要求。

经对 GTO 单元和多个单元并联的测试表明, GTO 单元参数符合设计要求, 其通态压降也较低。器件以压接式封装之后, 通过了 500A 的关断电流试验。

制造 GTO 所需的材料和设备均系国产, 其工艺可用于 GTO 的批量化生产。

本工作是在汪懋生教授指导下完成的, 样品制备等工作得到了我校太阳能电池科研组陈友法、赵丽娟、朱伯年等同志的大力协助, 其中的扩展电阻和红外吸收测试工作分别得到了我校半导体材料研究所的陈坚、林玉瓶同志的热情帮助, 在此一并表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] S. Asai, N. Sawaki, I. Akasaki, K. Iwata, *IEEE Trans. on ED*, **ED-32**(1985), 1894—1896.
- [2] [美] S. K. 格安迪著, 张光华, 钟士谦译, 功率半导体器件, 机械工业出版社, 1982, pp. 191—197
- [3] N. Akio, *Solid state Electron.*, **28**(1985), 677—687.
- [4] 吕征宇, 大容量门极可关断晶闸管 (GTO) 的研究及其应用于 10kHz, 100kW 中频电源的探讨, 浙江大学博士论文, 1987 年.
- [5] M. Azuma, K. Takigami, *IEEE Electron Device Letters*, **1**(1980), 203—205.

STUDY OF POWER GATE TURN-OFF THYRISTOR

Lu Zhengyu

(Zhejiang University, Hangzhou)

ABSTRACT Based on GTO's turn-off theory, parameter design and production technology are studied. Its performance characteristic and doping profile are measured. A 500 A reverse-blocked power GTO is made by using domestic material, equipment and installations. The technological process can be applied to the mass production of GTO.

KEY WORDS Thyristor; Gate turn-off thyristor; Power gate turn-off thyristor