

可 关 断 晶 闸 管

——GTO的原理和应用——

〔日〕関 長隆・倉田 衛・竹内 南 编
袁维慈 商福崑 袁元豪 译
商福崑 审校

中 国 铁 道 出 版 社

1985年·北京

内 容 提 要

本书系统地介绍了可关断晶闸管 GTO 的原理和应用, 阐述了 GTO 的结构特点、基本特性及其测试方法, 并着重分析了 GTO 的门极电路和吸收电路, 以及串并联技术和应用技巧。最后介绍了 GTO 在交流调速、逆变电路、不停电电源及在铁道车辆中的应用实例。

ターンオフサイリスタ

——GTOの原理と応用——

関 長隆・倉田 衛・竹内 南編

電気書院 1983.4

※ ※ ※

可关断晶闸管

——GTO的原理和应用——

〔日〕関 長隆・倉田 衛・竹内 南編

袁维慈 商福崑 袁元豪 译

商福崑 审校

中国铁道出版社出版

责任编辑 张贵珍 封面设计 王毓平

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本: 787×1092毫米 1/32 印张: 8.875 字数: 200千

1985年9月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—3,000册 定价: 1.75元

目 录

第一章 序 论	1
1.1 何谓GTO	1
1.2 GTO的特点	1
1.3 GTO商品化的现状及其主要用途	5
1.4 GTO与电力晶体管 (PTR) 的比较	7
第二章 GTO 的基础	18
2.1 术语定义	18
2.2 工作原理	28
2.3 设计与结构	43
2.4 各种电特性间的相互关系及其 控制方法	62
第三章 GTO的额定值及特性	69
3.1 额定温度	69
3.2 额定电压	70
3.3 断态电压临界上升率	71
3.4 门极特性及额定值	73
3.5 维持电流	76
3.6 擎住电流	77
3.7 额定电流及特性	78
3.8 开通时间 (门极控制)	83
3.9 关断特性 (门极控制)	83
3.10 通态电流临界上升率	86
3.11 平均功率损耗	87

3.12	压装力	88
第四章 GTO的试验方法		89
4.1	断态电压及反向电压试验	89
4.2	通态电流临界上升率试验	90
4.3	可关断电流试验	92
4.4	通态浪涌电流试验	93
4.5	门极正向峰值电压、正向电流、 正向损耗试验	94
4.6	门极正向平均损耗试验	95
4.7	门极反向阻断峰值电压试验	95
4.8	通态电压试验	96
4.9	断态电流及反向电流试验	97
4.10	门极触发电流及门极触发电压试验	98
4.11	门极不触发电流及门极 不触发电压试验	98
4.12	维持电流试验	99
4.13	擎住电流试验	100
4.14	断态电压临界上升率试验	101
4.15	开通时间试验	102
4.16	门极关断时间试验	103
4.17	门极关断电流、门极关断电压试验	103
4.18	热阻试验	104
4.19	瞬态热阻抗试验	106
4.20	可靠性试验	107
第五章 GTO的基本电路		109
5.1	门极电路	109
5.2	吸收电路	123
5.3	GTO的并联连接	139

5.4	GTO的串联连接	142
5.5	基本电路及应用注意事项	144
第六章 GTO在电力和工业电气设备中的		
	应用 (应用 I)	150
6.1	驱动交流电动机用GTO逆变器	152
6.2	300kVA—1kHz逆变器	174
6.3	不停电电源装置 ⁽⁴⁾	184
第七章 GTO在铁道机车车辆电气设备中的		
	应用 (应用 II)	192
7.1	GTO在电力机车车辆辅助电源 逆变器中的应用	195
7.2	GTO在斩波调速装置中的应用	213
7.3	GTO在感应电动机变频调速中的应用	229
附	录 GTO及快速二极管的参数与特性曲线	243
一、	东芝公司的GTO及快速二极管	243
二、	日立公司的GTO及快速二极管	270
三、	富士公司的GTO	274

第一章 序 论

1.1 何谓GTO

在门极端子加上适当极性（正或负）的控制信号，从通态转换为断态，并可从断态转换为通态的晶闸管，在电气专门用语集No.9⁽¹⁾及IEC-Pub.147-OA1969两资料中，将这种晶闸管命名为可关断晶闸管，也称为GTO或者GCS。一般将可关断晶闸管叫做门极可关断晶闸管，简称GTO。

1.2 GTO的特点

人们将具有开关功能的电力半导体元件称为电力开关器件。在这种电力开关器件的分类中可以看到GTO的特点。这里我们先介绍分类，然后再概括论述GTO的结构特点及其应用特点。

1.2.1 电力开关器件的分类与GTO

电力开关器件的分类可有几种分类法，本书为了显示GTO的特点，以关断功能进行分类。晶闸管有三个以上的pn结，并备有阳极、阴极及门极三个端子，在正的阳极电压作用下可有通态与断态二个稳定状态，从断态向通态的转换是用门极电流控制的半导体元件。晶闸管根据关断功能可分为换流关断型及自关断型⁽²⁾两种。

换流关断型晶闸管就是通常所说的晶闸管。为了从通态向断态转换，利用所谓换流电路的外部电路时，需要使主电

路的电流为零，为了在短时间内关断晶闸管需要加上反偏电压。而自关断型晶闸管在关断时不需要这种换流电路。自关断型晶闸管中有称为GTO及静电感应型晶闸管（SI晶闸管）。关于SI晶闸管的详细情况可参阅参考文献⁽³⁾、⁽⁴⁾，这里仅就其功能加以介绍。SI晶闸管与其它晶闸管不同，在门极与阴极之间如不加反电压就不能保持断态，只有取消此反电压才可进行从断态向通态的转换。

SI晶闸管与GTO比较，其开关特性较好，这点受到人们的重视，可是由于制造技术上的困难，推迟了它进入商品化的时期。

另外，作为电力开关器件，最近特别普及的就是电力晶体管（PTR）。电力晶体管是以npn三层结构为基础的双极型晶体管，它有发射极、集电极和基极三个端子。电力晶体管是集电极与发射极间电压为正时，根据基极电流的通断来进行导通与关断的。它与GTO等同样不需要换流电路，所以可看做是自关断型的电力开关器件。

此外，作为几十安以下的电力开关器件还有绝缘门极型场效应晶体管（电力—MOSFET型）。

按电力开关器件的关断功能分类

表1·1

晶 闸 管	换流关断型	换流关断型晶闸管
		门极辅助可关断晶闸管（GATT）
晶 体 管	自 关 断 型	可关断晶闸管（GTO）
		静电感应型晶闸管（SI晶闸管）
		电力晶体管（PTR）
		MOS型场效应晶体管（MOSFET）
		静电感应型晶体管（SIT）

上述内容综合表示在表1·1中。在表1·1中还有门极辅助

可关断晶闸管 (GATT) 及静电感应型晶体管 (SIT)。
GATT晶闸管需要换流电路, 关断时在门极加有反电压可以缩短关断时间。SIT是用栅电压(栅—源间的电压)或主电压(漏—源间的电压)来控制主电流(漏电流)的晶体管。

在表1·1的分类中与GTO应用领域有差别的器件只有电力晶体管。有关这方面的内容将在第一章 1·4 部分叙述。

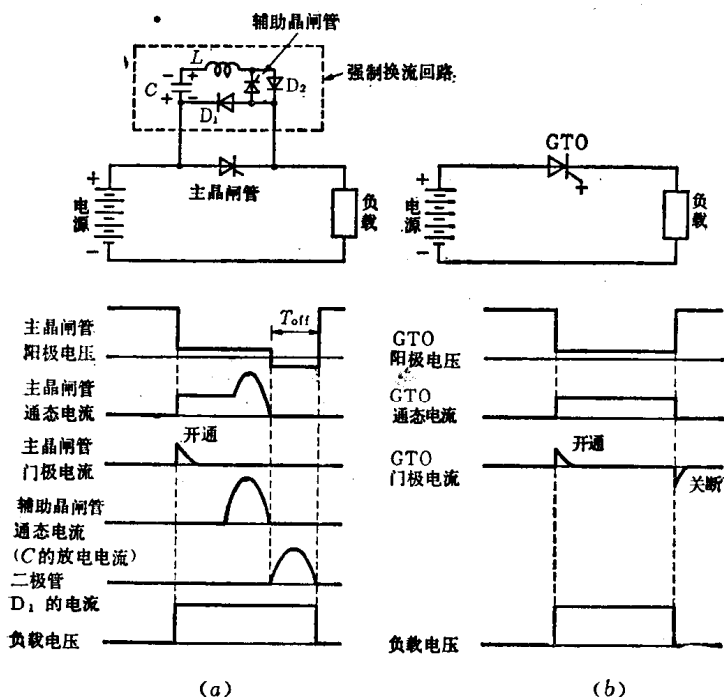


图1·1 普通晶闸管与GTO工作原理比较 (斩波电路)

(a) 普通的晶闸管时因有强制换流电路

(C, L, D₁, D₂辅助晶闸管)

(1) 强制使通态电流为零;

(2) 加反偏电压时间需大于元件固有的关断时间 (T_{off}).

(b) GTO斩波器

用GTO时, 由于门极有反向脉冲电流流通, 可使通态电流关断。

所以电路结构简单, 装置体积小、重量轻。

1.2.2 GTO的应用特点

GTO的特点如上所述,它不需要换流电路,具有晶闸管与晶体管两者的特点。图1.1是将通常的晶闸管与GTO用在斩波电路中的工作原理进行对比。(a)、(b)分别表示采用普通晶闸管及GTO的情况。(b)比(a)的电路结构简单,装置的体积小、重量轻。关于GTO的应用将在后面章节中叙述,采用GTO的装置比采用普通晶闸管的装置具有以下主要优点:

- (1) 电路元件少,结构简单;
- (2) 装置体积小,重量轻;
- (3) 没有因换流脉冲电流产生的噪音;
- (4) 因无换流损耗,装置的效率提高了;
- (5) 脉宽调制(PWM)比较容易,便于改善输出波形。

1.2.3 GTO的结构特点

为了关断GTO,在门极和阴极之间加一反向脉冲电压,可使通态元件内部电荷的一部分于瞬间从门极扫除。为此,GTO采用如下结构:

- (1) 采用台面型或平面型发射极结构,以提高门极和阴极间的反向电压;
- (2) 使用窄条形发射极以使门极电极包围发射极的结构。

GTO管芯断面结构如图2.17所示,阴极掩模图形的实例表示在图2.23上。在图2.23图形中短条网状部分突出的条形就是发射极,其它部分为门极区域。这么多的发射极各自独立地形成GTO区域。特别重要的是使每个GTO区域之间的特性分布要均匀。

图1.2所示的一般晶闸管,其发射区与基区采用阴极短

路结构。这样由断态电压临界上升率 dv/dt 产生的位移电流不通过发射区而只从基区直接流入阴极，因此，可以抑制来自发射区的载流子注入，提高 dv/dt 特性。在GTO的情况下，由于需要提高门极和阴极之间的反向电压，一般不采用这种

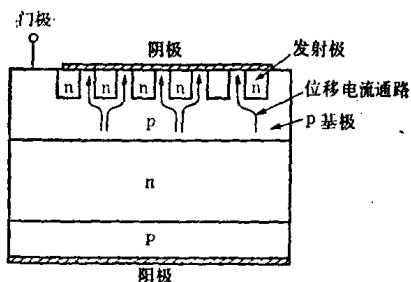


图1.2 采用短路发射极结构的晶闸管

短路发射极结构。为此，需要用GTO的门极和阴极之间施加适当的反电压等辅助方法来保证其 dv/dt 特性。

前面概述了GTO的结构特点，其详细情况在第二章中叙述。

1.3 GTO商品化的现状及其主要用途

在上一章节中已将GTO的主要特点作了介绍。为发挥这些特点，这里将介绍目前有哪些规格的GTO商品，并对它们的用途加以叙述。

GTO作为商品出现的历史已经很久了。1967年（昭和42年）东芝公司已生产了M8392D(SG₄G₁₁)型GTO商品，其断态电压为400V，可关断峰值电流为4A，有效通态电流为3A。它主要用于晶闸管触发电路。但是，GTO的设计及制造技术比一般的晶闸管难，比同规格额定电流晶闸管的成本也高，以致未能普及。后来，美国通用电气公司（GE）试制了600~900V、200A等级，美国西屋（WH）公司试制了1000V、200A等级的GTO，但也都未达到商品生产阶段。然而，随着GTO重要性的提高，积极开展了研制工作，于

1976年东芝和日本国际电气公司相继宣布关于大容量GTO

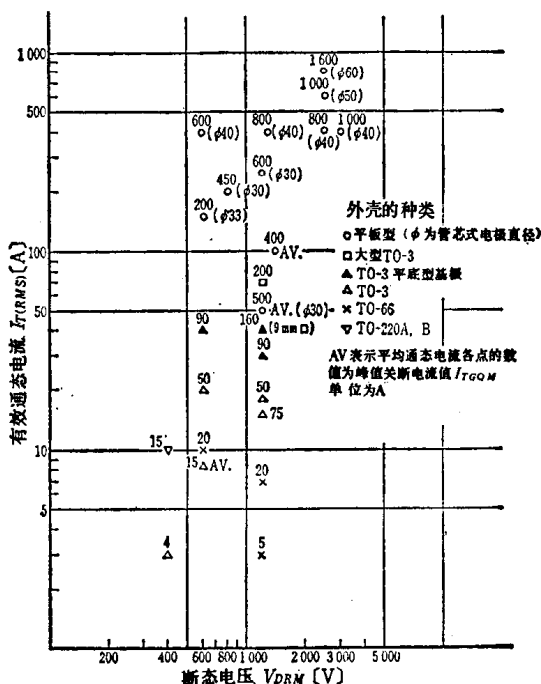


图1.3 GTO的断态电压与有效通态电流

研制成功的消息。当时的 GTO 其断态电压为 600~1300 V，可关断峰值电流为 200~600 A。以发表这些 GTO 研制成果为转折点，GTO 的商业化生产在日本国内特别活跃。图1.3示出了日本现有主要 GTO 产品的断态电压 V_{DRM} 和有效通态电流 $I_{T(RMS)}$ ⁽⁵⁾。此外图1.3也表示出可关断峰值电流与管壳结构的关系。GTO 断态电压为 600~800 V 的有 AC 220 V 系列，断态电压为 1200~1600 V 的有 AC 440 V 系列，断态为 2500 V 的主要用于电力机车、动车及其它的高压电源。虽然期待能有网压为 1500 V 电力机车、动车用的断态电压达 4000~5000 V 级的 GTO 问世，但需要克服通态电压与开

关特性配合等困难。有效通态电流为 100~200 A 级以下的 GTO 有与电力晶体管竞争的问题，可是它正向感应加热调节器、调压调频 (VVVF) 逆变器等应用方面发展。有效通态电流 200 A 级以上的 GTO 可代替逆导晶闸管用于恒压恒频 (CVCF) 逆变器及电力机车、动车的调压调频 (VVVF) 逆变器上。

1.4 GTO 与电力晶体管 (PTR) 的比较

如在 1.2.1 中所述，GTO 与电力晶体管两者具有竞争的一面，需要研究它们各自的适用领域。为此应对装置的整体性能及价格进行比较，但这将超越本书所涉及的范围。本书主要叙述两者在设计制造技术和作为器件性能上的差异，及对两者选择的一般标准。

1.4.1 结构及设计制造技术上的比较

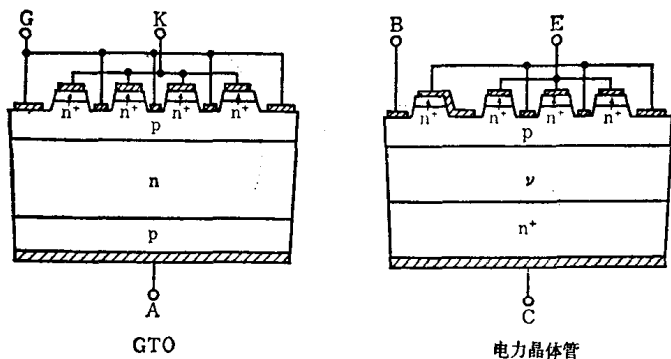


图 1.4 GTO 与电力晶体管的结部结构断面图

GTO 是在发展晶体管精密设计制造技术的基础上而出现的产物，而电力晶体管是引用晶闸管制造组装技术的产物。因此两者的结构相类似。图 1.4 为两种器件的结构断面

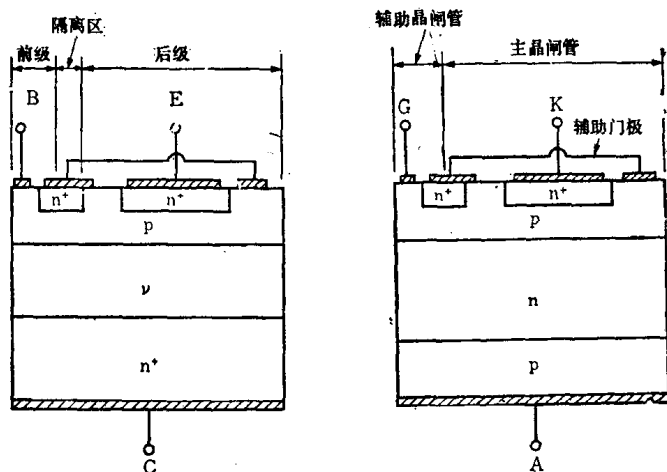


图1.5 达林顿型晶体管与放大门极晶闸管结的结构
(a) 达林顿型晶体管; (b) 放大门极晶闸管。

图。如将电力晶体管的集电极 n^+ 区用阳极发射极p区代替则可得GTO的结构。图1.5表示达林顿型晶体管结的结构及放大门极晶闸管结的结构。电力晶体管采用达林顿型结构较多，以便提高电流放大系数 h_{FE} ，容易触发基极。同样，为了便于GTO门极触发正在研究采用放大门极⁽⁶⁾。图1.6表示达林顿型电力晶体管2SD 1034A(450V—300A)的电极图形。它与GTO一样存在很多微细的发射极。同心圆的中心部分就是前级晶体管。

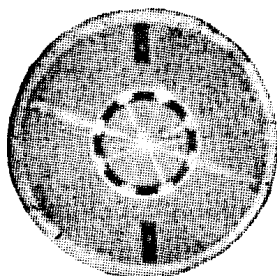


图1.6 2SD1034A (450V—300A电力晶体管)的电极图形

由于两者的结构相似，所以在制造技术上采取了类似的方法。不过，根据设计参数最优化的原则，在单位结片面积上产生的额定电压电流的极限值却各不相同。此问题将在下

发射极面积一定时, $V_{CEO(SUS)} = 450V$ (AC200V系列用) 和 $V_{CEO(SUS)} = 900V$ (AC440V系列用) 时的集电极电流 I_C 之比约为3:1。 $V_{CEO(SUS)}$ 从450V增加到900V时, 单位面积的容许功率约减少67%。 $V_{CEO(SUS)}$ 高于1000V时减少更为显著。因此, 按目前的情况, 电力晶体管的实用范围为 $V_{CEO(SUS)} = 900 \sim 1000V$ 。

设计GTO时, AC220V系列其断态电压是按600~800V, AC440V系列是按1200~1600V设计的。因此, 单位面积的允许功率应与 $V_{CEO(SUS)}$ 为450V和900V的电力晶体管进行比较。为正确比较各允许功率需要指定几个条件。但是, 为了详细地讨论这个问题还

要研究一下电力晶体管的特性, 此内容由于超越了本书的范围, 在这里只就器件的经济性(单位面积允许功率的大小)及控制电路等的经济性进行综合评价, 并对选择GTO与电力晶体管方面一些现有的想法进行介绍:

(1) 电力机车和动车等用的高压电源采用GTO最为合适。

(2) 在AC440V系列中, 装置的输出功率在高于75~100kW的领域内采用GTO比较合适。

(3) 输出定额为100kW以下, 电源电压在AC440V以下的装置, 采用GTO或电力晶体管都可以, 但从整个装置的经济性来看采用电力晶体管较好。不过, GTO比电力晶体管有用较小的发射极面积承担较大功率的优点, 今后, 随

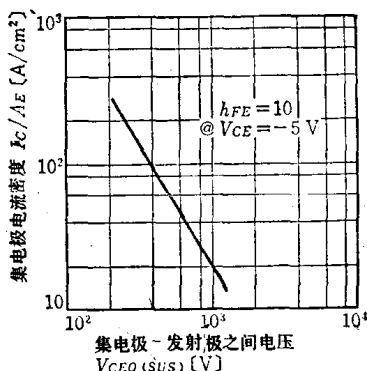


图1-8 晶体管集电极的允许电流密度同集电极和发射极之间耐压的关系

着特性的改进和应用技术的发展，GTO比电力晶体管更具有能发挥综合经济效果的优点。

从这些观点出发，本书内容将重点放在介绍电压电流定额比较大的GTO上。

1.4.3 安全工作区 (ASO)

GTO在关断时由于出现局部电流集中，所以产生类似于电力晶体管安全工作区的想法。可用所谓额定的可关断峰值电流 (I_{TGQM}) 表示GTO门极关断能力的界限，可是在通态电流减少的过程中，断态电压如何上升，将对门极关断能力的界限有影响，所以对此应特别注意。断态电压的上升率与主电路的电源电压、主电路电感、吸收电路的电容器容量、吸收电路的寄生电感等这些参数有关，故在应用时应选取最佳参数。在实际电路中正确观测关断过程中的电压电流波形是比较难的，因此，在实际安装时这些参数必须选定在 I_{TGQM} 规定的条件以内。选择这些最佳参数的方法将在第五章中叙述。

通常以反偏安全工作区来表示电力晶体管断态时的安全工作区。在电力晶体管的基极和发射极之间加反向电压可使关断时间缩短，但这时由于产生了电流集中，所以，显示的破坏限界就是这个反偏安全工作区。GTO在关断时同样要考虑这个安全工作区。这将在第五章中说明。

1.4.4 驱动条件的比较

GTO与通常的晶闸管一样具有所谓维持电流特性，利用供给数百毫安到数安的门极脉冲电流，可以使其导通，可是GTO与通常的晶闸管比较维持电流比较大，在负载电流变化比较大的情况下，需要在导通期间内连续地供给门极电流。

晶体管的基极电流不连续供给时，则不能维持其导通状

态。晶体管的电流放大系数通常为10左右，由于采用达林顿型结构，可以加大一倍数量级。因此就是数百安的电力晶体管也可用数安的基极电流驱动。

关于GTO门极关断时的门极驱动条件将在第五章中叙述。这里只作概略介绍。为了用门极关断GTO，需要采用具有能释放规定电荷量能力的门极电路。为了减少关断时的开关损耗，重要的是将规定的电荷迅速地释放，可按下述条件构成门极电路，即：门极关断电流的上升率采用 $-10\text{A}/\mu\text{s}$ 以上，门极关断电流的峰值为供给门极关断信号前通态电流值的 $1/3\sim 1/4$ 。从门极释放电荷的过程中，通态电流开始减少时由于阴极和门极间的阻抗迅速增大，需要加一门极反向电压以尽可能地释放电荷。此门极反向电压的峰值就是阴极和门极之间雪崩区的电压。

电力晶体管关断时在基极和发射极之间也加有反偏电压，可以缩短关断时间，这点在前面已经叙述了，但此时流过基极的反向峰值电流是基极开通时用的基极电流值。

从上述的GTO门极触发条件与电力晶体管的基极触发条件来看，对GTO门极关断电路的设计是特别重要的。

1.4.5 过电流能力

GTO与普通晶闸管一样具有很大的电流浪涌能力，当有高于可关断峰值电流流通，即使其值低于电流浪涌时，也应切除门极关断信号。

电力晶体管没有电流浪涌定额，但是可以耐受短时间内因负载短路等形成的故障电流。虽然在图形中没有给出通常的安全工作区(ASO)，但是，所谓过负载安全工作区是存在的。通常导电时间在 $30\sim 40\mu\text{s}$ 以下这已经明确。负载短路时，电力晶体管本身根据 h_{FE} 及基极电流所决定的电流值与限制主回路的电流相关，如果在电力晶体管内部的发热不平