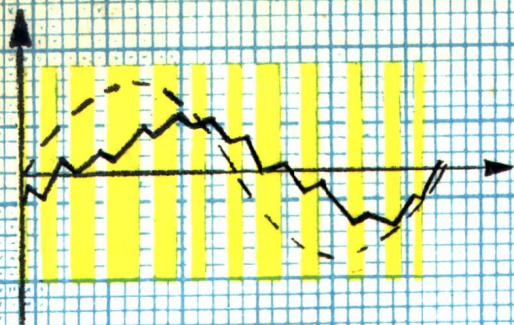


现代电力电子器件——

大功率晶体管的原理和应用

叶家金 编著

中国铁道出版社



现代电力电子器件—— 大功率晶体管的原理和应用

叶 家 金 编著

中 国 铁 道 出 版 社

1 9 9 2 年 · 北 京

(京) 新登字063号

内 容 简 介

本书系统地介绍了新型大功率晶体管——GTR (包括达林顿管和GTR模块)的原理、结构、参数、特性和工况,分析了GTR的吸收电路和基极驱动电路。最后阐述了GTR在电气传动和其他领域中的应用电路。

本书可供电力电子技术以及电气自动化领域中从事科研、设计、生产及运行的工程技术人员、科技人员和工人阅读与参考,亦可供有关院校教学参考。

现代电力电子器件—— 大功率晶体管的原理和应用

叶家金 编著

★

中国铁道出版社出版、发行
(北京市东单三条14号)

责任编辑 朱长顺 封面设计 川 叶
北京西三旗印刷厂印

开本: 787×1092毫米1/32印张: 6.5 字数: 146 千

1992年2月 第1版 第1次印刷

印数: 1—1000册

ISBN7-113-01263-9/TN·53 定价: 3.65元

前 言

七十年代中期问世的大功率晶体管（简称GTR）和门极可关断晶闸管（GTO）以及功率场效应晶体管（Power MOSFET）统称为第二代电力电子器件或功率集成器件，是既能控制其导通，又能控制其关断的全控型、自关断开关器件。它们的诞生使直流斩波、静止变频电源和交流变频传动进入了崭新的历史阶段。

由于GTR具有工作频率高、开关控制方便、反应速度快、效率高、成本低等显著优点，因此它在中、小容量斩波器、逆变器、变频器及各种开关电路中得到了广泛的应用。

经过十几年的发展，国外的大功率晶体管（GTR）从制造到应用业已成熟，走向产业化，并已广泛普及。目前，国外数百千瓦级以下的中、小容量的功率变流装置均以GTR为主，并使GTR器件正沿着大电流、高电压、快通断、低损耗、好保护、小体积、集成化、模块化等方面发展。

我国在GTR器件的研制、开发和应用技术与国外相比，还有很大差距。要使我们在GTR应用方面赶上国际八十年代末水平，必须在器件和电路上下功夫。由于国内尚无一本比较系统地介绍GTR的原理、特性及其应用技术的专著，特编写了这本书，以供电力电子技术（包括电气传动）领域中大力开展GTR应用技术研究的工程技术人员、科研人员和工人参考。作者在介绍这种新技术的同时，力求结合我国实际情况，以便于推广应用。

由于作者理论水平和实践经验有限，接触的资料也不全面，书中的缺点、错误在所难免。欢迎读者批评指正。

编 者

1991年5月

目 录

绪 论	1
第一章 GTR的结构与特性参数	5
第一节 GTR的结构特点	5
第二节 GTR的参数和性能指标	7
第三节 GTR的二次击穿和安全工作区	15
第二章 GTR的吸收电路	21
第一节 吸收电路的提出	21
第二节 GTR吸收电路的研究	24
第三节 GTR桥式逆变器的吸收电路	34
第三章 GTR的基极驱动技术	44
第一节 GTR基极驱动电路的要求	44
第二节 驱动电路的保护功能	46
第三节 GTR的基极驱动电路	55
第四章 GTR的串并联	91
第一节 GTR的串联连接	91
第二节 GTR的并联连接	98
第五章 达林顿晶体管	107
第一节 达林顿晶体管工作状态的分析	108
第二节 达林顿晶体管的电气特性	118
第三节 达林顿晶体管的驱动和保护	122
第四节 三级达林顿晶体管	125
第六章 功率晶体管模块 (GTR模块) 电路	127

第一节	GTR模块	127
第二节	GTR模块的集成驱动电路	130
第七章	大功率晶体管 (GTR) 的应用电路	138
第一节	GTR在直流调速系统中的应用	138
第二节	GTR逆变器及其在交流调速系统中的应 用	156
第三节	GTR在其它领域中的应用	183
第四节	GTR桥式变流器在电机调速应用中的特 殊现象	192
附 件	北京椿树整流器厂生产的GTR管及其模块 的型号和参数	197
参考文献		199

绪 论

自五十年代末晶闸管问世以来,电力电子器件便登上了现代科技的历史舞台。然而晶闸管却是一种只能控制其导通而不能控制关断的半控型开关器件,在直流斩波、交流传动和变频电源的应用中,要想关断晶闸管必须设置比较复杂的强迫换流电路。为此,增加了整机的体积、重量,而且提高了成本,降低了效率。

为了改进晶闸管的这一缺点,七十年以后陆续发明了大功率晶体管(GTR)、门极可关断晶 闸 管(GTO)、功率MOS场效应管(Power MOSFET)等等,这些新型器件统称为第二代电力电子器件或功率集成器件,是既能控制其导通、又能控制其关断的全控型开关器件。它们的诞生出现了结构简单、高效的电力电子逆变器,使电力电子技术进入了崭新的历史阶段。

由于大功率晶体管(GTR)具有工作频率高、开关时间短、开关方便、容易实现换流等显著优良性能。因此它一出现,立即引起世界各国电力电子技术领域内的行家们的重视,并将它广泛用于中、小容量的电力变流装置中。为什么GTR能向晶闸管挑战并在中、小容量的变流装置中能取代晶闸管呢?这可从对GTR和晶闸管组成的变流器性能的比较中很容易看得出。

一、GTR和晶闸管组成的交流—直流变流器 性能的比较

晶闸管交流—直流变流器可以利用电源电压的交变来形成反压而换流，控制电路比较简单，主电路可以达到的容量大。不但在目前，而且今后也将占据主导地位。

但是在中小容量交流—直流变流器中，GTR斩波器却崭露头角。它只有一个控制对象，电路简单，功率因数好，开关频率高，电流脉动纹波小，反应速度快。因此在要求快速反应和脉动纹波小的电源装置和直流传动系统中，它的优越性比较突出。但是由于GTR承受浪涌电流的能力差，必须采取保护措施，防止器件性能不一致和控制失灵造成的短路事故。表0—1是晶闸管和GTR交流—直流变流器作为直流传动供电装置的性能比较。

**GTR和晶闸管交流—直流变流器在直流
传动中应用比较**

表0—1

主 电 路	晶 闸 管 三 相 全 控 桥 式 电 路	GTR斩波器
控制电路	六个控制对象，复杂	一个控制对象，简单
输出容量	<5000 kVA	<100 kVA
电流纹波	大(100%)	小(< 5%)
反应速度	慢(100%)	快(< 5%)
效 率	60%~85%	80%~90%
成 本	高(100%)	低(60%~80%)

二、GTR和晶闸管组成的直流—交流变流器

性能的比较

GTR直流—交流变流器不需要强迫换流电路，主电路结构简单，不会因为突然停电而引起换流失败，工作可靠。还可以采用脉宽调制控制（PWM），减少高次谐波，如果作为交流传动装置也可以减少电动机转矩脉动和温升，反应速度快。因此在中小容量的直流—交流变流器中今后将占据主导地位。表0—2是GTR和晶闸管直流—交流变流器作为交流传动供电装置的性能比较。

**GTR和晶闸管直流—交流变流器在交流
传动中应用比较**

表0—2

主 电 路	带强迫换流的三相晶闸管逆变器	三相GTR逆变器
控 制 电 路	PWM，载频小于2kHz	PWM，载频小于10~20kHz
输 出 容 量	<3000 kVA	<500 kVA
频率控制范围	1 : 10 ~ 1 : 20	1 : 40 ~ 1 : 100
反 应 速 度	慢(100%)	快(<10%)
效 率	60%~85%	80%~90%
成 本	高(100%)	低(60%~85%)

GTR的应用经历了三个发展阶段：

第一阶段是60年代至70年代初，是直流线性控制阶段。GTR水平是200V、10A，作为线性放大器件，主要用于直流稳压电源和功率放大器。

第二阶段是70年代中期至后期,是直流单脉宽调制阶段。GTR的水平是500V、50A,作为开关器件,主要用于直流伺服传动、数控机床和开关稳压电源。

第三阶段是80年代以后,是交流多脉宽调制阶段。GTR现在水平是1200V、800A(模块),作为高频开关器件,主要用于交流传动、高频斩波直流传动、高频开关稳压电源、高频电源及多脉宽调制正弦波恒压恒频电源(不停电电源)。现在国外数百千瓦级的中功率变流装置均以GTR为主。

我国现在GTR器件的生产水平为1300V、200A,研制水平为1800V、600A(西安电力电子技术研究所),北京椿树整流器厂引进了英国马可尼公司的技术和设备,现已生产出1000A、400V的GTR和360A、1000V的GTR模块。总之,我国在GTR生产和应用距世界水平还有一段距离,特别是应用技术。要使我国在GTR应用方面赶上国外先进水平,必须在器件和电路上下功夫。在器件方面要达到耐高压、容量大、速度快、安全工作区域大;在电路方面要解决增益提高,容量扩展,高频逆变,干扰和尖峰浪涌抑制,过压、过流保护等问题。同时还要有快速恢复二极管,非晶态材料和软磁铁气体,高频电容器等有关配套器件和材料的配合发展,才有可能解决GTR作为高频开关器件在应用方面的困难,真正在电力变流器和电气传动装置中大量推广。

实践证明,只要正确掌握GTR的应用技术,合理设计电路,GTR不但能够可靠工作,而且还具有理想开关的优良性能。随着我国科学技术的不断发展和广大科技人员的努力,相信在我国GTR的推广应用一定会得到较快的发展,在90年代我们也一定能够赶上世界的先进水平。

第一章 GTR的结构与特性参数

第一节 GTR的结构特点

大功率晶体管 (GTR) 和门极可关断晶闸管 (GTO) 一样, 是既能控制其导通, 又能控制其关断的全控型开关器件, 是属于70年代以后出现的第二代电力电子器件。因此, 在电力电子技术领域内, GTR几乎全部工作于开关模式。为了懂得GTR的开关性能, 了解GTR的结构是很重要的。

NPN三重扩散台面型结构是GTR的典型结构, 如图1—1所示。共分成四个主要区域: 发射极N区; 基极P区; 集电极N⁻区; 集电极N⁺区 (10到20 μm);

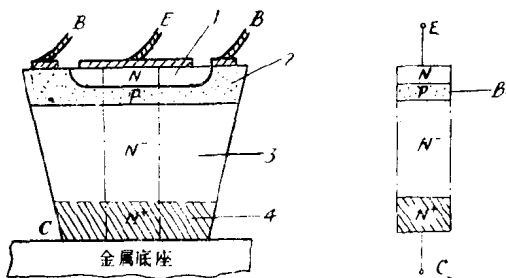


图1—1 GTR的典型结构图

- 1——发射极 N 区; 2——基极 P 区;
3——集电极 N⁻ 区; 4——集电极 N⁺ 区。

集电极N⁻区(20到100 μm);集电极N⁺区。该结构的特点如下:

(1) 发射区N层为高掺杂, 基区P层为中掺杂, 集电区N⁻层为低掺杂, 集电区N⁺层为高掺杂。N⁻层为原始单晶材料, 其余层均由三次扩散分别形成的。

(2) 管芯表面有一层二氧化硅膜保护层, 因此该结构的可靠性较高。

(3) 高阻集电区 N^- 层为单晶材料, 掺杂均匀, 质量比外延材料好, 有利于确保电性能一致性, 提高抗二次击穿能力。这种复合结构的集电区, 当外加反偏压时, 集电结空间电荷区主要扩展在 N^- 层中, 有效基区宽度随外加偏压变化不大, 基区可以做的较窄, 而且电流放大系数随集电极电流变化不显著。另一方面, 只要恰当控制 N^- 层的厚度和它的掺杂浓度, 就能兼顾提高耐压和减小饱和压降的要求。

(4) 组合集电区的低阻集电区 N^+ 层, 有利于减小集电区串联电阻, 因而饱和压降小, 功率损耗小。

(5) 集电结和发射结的面积都比较大, 电极图形常采用圆环形等图案, 故发射结电流分布较均匀, 有利于减弱大电流效应和改善二次击穿特性。

(6) 集电区 N^+ 层和金属管座连成一体, 而且使用时金属管座又和散热器连成一体, 这样既减小了GTR的内部热阻, 又减小了它的外部热阻, 大大地提高了GTR的耗散功率 P_{CM} 。

图1—2为具有内设加速二极管和续流二极管的达林

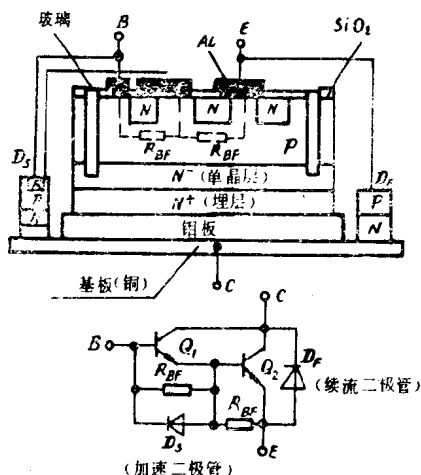


图 1—2 达林顿联接的GTR三重扩散工艺结构图

顿联接的GTR三重扩散工艺结构。该结构具有耐压高,安全工作区宽,工作电流大,电流放大系数高,开关时间短,饱和压降低和可靠性高等特性。为提高开关速度,采用金扩散来控制寿命时间,从而减小存贮时间 t_s ,并可借助加速二极管来减小下降时间 t_f 。由于工作在大电流(高功耗)状态,芯片尺寸较大,因而硅基片和金属基板之间的热膨胀差必须妥善解决。为此采用了热膨胀特性与硅相似的钼板作为缓冲材料。由于内设加速和续流二极管,则外壳制成平底板状结构,因此使用非常方便。

第二节 GTR的参数和性能指标

要设计和制造高性能的电力电子设备,必须选用高可靠性的电力电子器件,同时对选定电力电子器件的特性参数应作全面了解,合理使用,这样才能确保设计产品的可靠性。下面将介绍GTR的主要参数和性能指标。表1—1为GTR各种状态下的代表参数。

GTR 的主要参数

表1—1

项 目	参 数 描 述		符 号	单位
GTR在 开 路	基 极	集电极与发射极间电压	$V_{CE0} (V_{CE})$	V
	开 路	集电极与发射极间漏电流	I_{CE0}	A
截止状态	基 极	集电极与发射极间电压	V_{CEX}	V
	反 偏	集电极与发射极间漏电流	I_{CEX}	A
GTP在 导通状态	在规定的 I_B 和 I_C 时集电极与发射极间饱和压降		$V_{CE(sat)}$	V
	最大集电极电流		I_{CM}	A

续上表

目 项	参 数 描 述	符 号	单 位
GTP导通时	集电极电流延迟时间	t_d	μs
瞬间状态	集电极电流上升时间	t_r	μs
GTR关断时	集电极电流存贮时间	t_s	μs
瞬间状态	集电极电流下降时间	t_f	μs
基 极	基极与发射极间饱和压降	$V_{BE(sat)}$	V
控 制	基极饱和电流	$I_B(sat)$	A
使 用	结最大温度	T_{jmax}	$^{\circ}C$
热 极 限	结与外壳间热电阻	$R_{thj-case}$	Ω

一、GTR在截止状态的参数

GTR在截止时主要由下述两个参数来表征:

1. 集电极—发射极雪崩电压 $V_{CE0(sus)}$

$V_{CE0(sus)}$ 的含意是指当基极开路 ($V_{BE}=0$), 集电极电流达到规定值时的集电极—发射极的雪崩击穿电压。

当基射结反偏时(V_{BE} 为负值), 集电极—发射极的雪崩电压 V_{CEX} 是另一个重要参数。

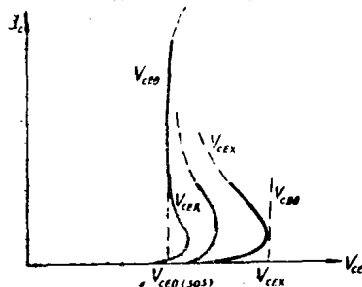


图1—3 GTR的集电极—发射极雪崩击穿电压特性曲线

图1—3表示GTR的集电极—发射极雪崩击穿电压特性曲线, $|V_{CEX}| > |V_{CE0(sus)}|$ 。

由于GTR工作在各种负载(例如感性负载)的情况下, 所以对GTR的额定电压常用 $V_{CE0(sus)}$ 来表示, 并且

在应用中一般不准超过该额定值。必须指出图1—2所示的具有达林顿结构的GTR, 因基—射间内部存在电阻 R_{BF} , 则 V_{CE} 自然等效于 V_{CER} , 所以在工作电流范围内, 其 $V_{CE(sus)}$ 值常与内部电阻值有关。

2. 漏电流 I_{CE0}

I_{CE0} 表示基极开路时, 集电极与发射极之间的漏电流(又称反向截止电流)。它的存在, 不但白白地消耗了一部分电源的能量, 而且影响着GTR工作的稳定性。因此, 要求 I_{CE0} 愈小愈好, 它是检验GTR质量的一个重要参数。

二、GTR在导通状态的参数

GTR有两种工作方式: 线性工作方式和开关工作方式。在需要放大时, 采用线性工作方式, 而在开通和关断时, 采用开关工作方式。图1—4表示GTR的 $V_{CE}-I_C$ 特性曲线, 它代表管子的集电极—发射极电压 V_{CE} 和集电极电流 I_C 的关系, 基极电流 I_B 是参变量。该特性曲线有三个不同区域:

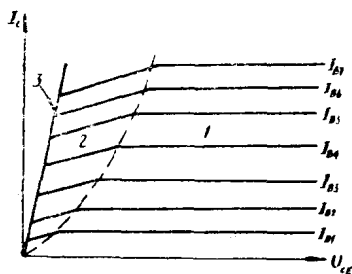


图1—4 GTR的 $V_{CE}-I_C$ 特性曲线

(1) 线性工作区 (或称

放大区)。特性曲线成水平。

(2) 临界饱和区 (或称准饱和区)。在该区内 V_{CE} 的值较弱, 根据GTR的电源电压, 一般从几伏到几十伏。对同一个基极电流, 可证明: 当集—射极电压 V_{CE} 减小时, 集电极电流 I_C 亦降低, 电流放大系数 $\beta = I_C/I_B$ 亦减小。表征临界

饱和状态的这种现象是由于基极变宽的结果（在集电极 N^- 区内集—基有效结的移动）。

（3）饱和区。其特点是集—射极电压 V_{CE} 值很弱，且低于某一特定值。这时的GTR实际上是等效于一个很弱值的电阻。

对于工作在开关方式下的GTR，使用的是 $V_{CE}-I_C$ 曲线中的饱和区和临界饱和区（大的 I_C 和弱的 V_{CE} ），表征这种情况的参数是集电极—发射极饱和电压 $V_{CE(sat)}$ 。

1. 集电极—发射极饱和电压 $V_{CE(sat)}$

在基极饱和电流 $I_{B(sat)}$ 作用下，产生对应的集电极饱和电流 $I_{C(sat)}$ 时，集—射极间的压降称为集电极—发射极饱和电压 $V_{CE(sat)}$ 。因此，只有 $I_{B(sat)}$ 和 $I_{C(sat)}$ 同时存在时， $V_{CE(sat)}$ 才是一个有意义的参数。所以 $I_{B(sat)}$ 、 $I_{C(sat)}$ 、 $V_{CE(sat)}$ 这三个参数是互相联系，且又不可分离。 $I_{B(sat)}$ 和基极—发射极电压 $V_{BE(sat)}$ 均是基极控制电路的两个重要参数。

这时的电流放大系数

$$\beta = \frac{I_{C(sat)}}{I_{B(sat)}}$$

对于一个给定型号的GTR，若工作的集电极电流 I_C 小于或等于所规定的 $I_{C(sat)}$ 时，强迫基极电流 $I_B \geq I_C/\beta$ ，则集—射极电压 V_{CE} 将总是小于或等于 $V_{CE(sat)}$ 。在 β 一定时， $V_{CE(sat)}$ 随 I_C 的变化如图1—5所示。

为了减小导通时所存贮的电荷和关断时的存贮时间，总是希望GTR工作在临界饱和状态，即 V_{CE} 要大于 $V_{CE(sat)}$ ，采用一个抗饱和电路（图1—6）即可实现这一目的。由图1—6可知：

$$V_{CE} = 2V_D + V_{BE} - V_{DAS} \approx V_D + V_{BE} > V_{CE(sat)}$$