

晶闸管变流技术题例及电路设计

栗书贤 石玉 编



晶闸管变流技术 题例及电路设计

机械工业出版社



TN34

L34

晶 闸 管 变 流 技 术 题 例 及 电 路 设 计

栗书贤 石 玉 编



机 械 工 业 出 版 社

(京)新登字 054 号

本书系配合大中专院校“晶闸管(或半导体)变流技术课程的教学,便于学生加深理解和灵活运用所学理论的一本教学参考书。第一篇精选了有关晶闸管、可控整流、开关保护、交流调压、斩波逆变等典型题例 217 个。章末还附有练习题。第二篇主要讲述一般小型功率晶闸管电路系统设计的基本知识和方法步骤并联系实际附有设计举例。书后收录了设计和制作晶闸管装置的常用资料。全书图形符号和文字代号均采用现行国家标准。

本书可作为大中专院校和电大职大等各类职业技术学校电气化专业师生进行课程设计、实验实习和课后练习的参考书,对于从事变流技术工作的技术人员也有较大的实用价值。

DY18/21

晶闸管变流技术 题例及电路设计

栗书贤 石 玉 编

责任编辑:贡克勤 版式设计:冉晓华

封面设计:肖 晴

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码:100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

华都印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 $\frac{1}{16}$ ·印张 18 $\frac{1}{8}$ ·字数 440 千字

1992 年 9 月北京第 1 版·1992 年 9 月北京第 1 次印刷

印数 0 001—4 000 定价:8.90 元

*

ISBN 7-111-03395-7/TN·63(X)

前 言

近年来,电力电子技术发展异常迅速。新型器件层出不穷,应用领域不断扩大,电力电子技术在生产自动化、节能降耗、日用电器等多方面越来越产生着举足轻重的影响。作为电力电子技术的基础器件晶闸管(原称可控硅)及其应用已成为十分普及的实用技术。

在大学本科、专科和中专电气自动化专业以及电大、职大、业大等各类成人学校的相关专业中,“晶闸管变流技术”(或“电力电子技术”)已成为一门实践性很强的专业课程。各校普遍安排了课程设计或综合实践环节。在毕业设计中变流技术课题也占有相当比重。本书的编写以进一步促进理论联系实际,有效培养学生灵活运用基础知识提高分析、设计能力为宗旨。全书主要内容分为两大部分:一部分为晶闸管变流技术题例并附有练习题;另一部分为晶闸管电路设计指导。对于在相关教材中已有详细叙述的基础理论知识,本书尽力避免过分重复,只做了概要提示。本书重点放在题目的分析解答和电路设计的方法步骤上。在内容深广度方面,掌握在中、小功率电路和中、小容量晶闸管的应用上。题例仍以紧密联系基础知识为主,精选了各类大中专教材典型题目,部分题例和练习选自国外教材。电路设计主要围绕小功率应用电路,按一般设计步骤的顺序介绍了设计原则、要求和方法。为便于读者联系实际,还举出了5个设计实例。此外,在设计电气原理图的基础上还附有关于结构设计、印制电路板的简易制作及调试、故障排除等内容,并附有设计参考资料,以便进一步为教学实践活动服务。

本书的编写意图在于为任课教师提供一份补充性的教学参考资料;为大中专有关专业的学生提供一本较实用的参考书;对电大、职大等自修性学员提供一个自我选题、自我批阅的方便工具。也希望实际从事晶闸管变流技术工作的同志从中获得启发和帮助。

本书第一篇由石玉同志主持编写;第二篇和附录由栗书贤同志编写。王文郁同志担任主审。袁忠长同志对本书提出了一些宝贵意见。编者对积极提出建议和提供资料的单位和个人一并表示衷心感谢。

作为一门新技术课程的辅助性教学参考资料,我们做了一次冒然尝试,缺点、错误在所难免。如能起到一点抛砖引玉的作用,获得广大师生的批评指正,作者将不胜感激。

编 者

1991. 11

本书主要符号说明

u 电压瞬时值	U_{DSM} 晶闸管断态不重复峰值电压
u_1 整流变压器一次侧电压瞬时值	U_{DRM} 晶闸管断态重复峰值电压
u_2 整流变压器二次侧电压瞬时值	U_{RSM} 晶闸管反向不重复峰值电压
u_d 整流输出电压瞬时值	U_{RRM} 晶闸管反向重复峰值电压
u_i 可逆系统环流电压瞬时值	i 电流瞬时值
u_L 电感两端电压瞬时值	i_1 变压器一次侧电流瞬时值
u_s 同步电压	i_2 变压器二次侧电流瞬时值
u_o 输出电压瞬时值	i_d 整流电流瞬时值
u_i 输入电压瞬时值	i_T 流过晶闸管电流的瞬时值
u_T 晶闸管两端电压瞬时值	i_D 流过二极管电流的瞬时值
u_D 二极管两端电压瞬时值	i_V 可逆电路环流瞬时值
U_d 整流输出直流电压平均值	I 电流有效值、整流输出电流有效值
$U_{d\alpha}$ $\alpha=0^\circ$ 时整流输出直流电压平均值	I_d 整流电路的直流输出平均电流
U 电压有效值,整流输出电压有效值	I_{dT} 流过晶闸管的平均电流
U_2 变压器二次侧相电压有效值	I_T 流过晶闸管的电流有效值
U_{TN} 晶闸管额定电压	I_{TM} 流过晶闸管的电流最大有效值
$U_{T(AV)}$ 晶闸管通态平均电压	I_{dD} 流过二极管的平均电流
U_G 或 u_g 晶闸管门极触发电压	I_D 流过二极管的电流有效值
U_{TM} 晶闸管承受的最大正反向电压	I_1 变压器一次侧电流有效值
U_c 直流控制电压	I_2 变压器二次侧电流有效值
U_b 直流偏移电压	I_{TN} 晶闸管的额定有效值电流
U_p 单结晶体管峰点电压	$I_{T(AV)}$ 晶闸管的通态平均电流,即额定电流
U_v 单结晶体管谷点电压	I_N 额定电流
U_e 晶体管、单结晶体管发射极电压	I_P 单结晶体管的峰点电流
U_{bb} 单结晶体管 b_1 与 b_2 之间电压	I_V 单结晶体管的谷点电流
U_n 整流输出电压 n 次谐波分量有效值	I_H 晶闸管的维持电流
U_R 电阻上电压有效值	I_L 晶闸管的擎住电流
ΔU_V 变压器漏感引起的换相压降平均值	I_{ak} 负载电流连续的临界平均电流
ΔU_T 晶闸管导通压降	I_e 单结晶体管发射极电流
U_{Δ} 变压器阻抗电压百分数	I_{GT} 晶闸管门极触发电流
E 电动机电动势、直流电源	I_{GD} 晶闸管门极不触发电流
U_{Bo} 晶闸管正向转折电压	I_{em} 变压器空载电流百分数
U_{Ro} 晶闸管反向击穿电压	I_{om} 触发电流的幅值

α	晶闸管的控制角、晶体管共基电流放大系数	P_d	整流输出的直流功率
β	晶闸管电路的逆变角、晶体管共发射极电流放大系数	P_D	直流电动机的功率
θ	晶闸管的导通角	P_R	电阻上消耗的功率
θ_D	整流管的导通角	P_L	感性负载消耗的功率
γ	换相重叠角	P_{R_L}	感性负载电阻上消耗的功率
δ	晶闸管关断时间所对应的电角度,停止导电角	S	视在功率,变压器容量
η	单结晶体管的分压比,效率	R_T	从二次侧计算变压器的线圈电阻
ω	角频率	R_d	直流负载电阻
t	时间	R_L	负载电阻
t_q	晶闸管的关断时间	R_i	整流装置等效内阻
t_{gr}	晶闸管的开通时间	R_a	直流电动机电枢电阻
L_d	直流平波电抗器	R_E	回路总电阻
X	电抗器的电抗值	K_f	波形系数
X_T	从二次侧计算变压器的漏抗	f	频率
X_0	平衡电抗器的电抗值	T	周期,电磁转矩
L_0	平衡电抗器	Φ	磁通
m	相数、一周期的脉波数	ϕ	阻抗角

目 录

前言

本书主要符号说明

第一篇 晶闸管变流技术题例

第一章 电力半导体器件.....	1
练习题	15
第二章 基础练习	17
练习题	23
第三章 整流电路	24
练习题	69
第四章 触发电路	71
练习题	83
第五章 同步	85
练习题	92
第六章 斩波电路	95
练习题.....	106
第七章 交流调压.....	107
练习题.....	122
第八章 逆变电路.....	123
练习题.....	138
第九章 保护电路.....	139
练习题.....	143

第二篇 小功率晶闸管电路设计

第一章 设计方案的确定.....	145
第二章 晶闸管整流主电路计算.....	152
第三章 触发电路的参数选择与校验.....	162
第四章 直流调速控制系统的选择与计算.....	168
第五章 继电器—接触器控制线路电器的选择与接线图的绘制.....	183
第六章 电气控制装置的结构设计.....	187
第七章 设计举例.....	191
附录 A 变压器、电抗器、脉冲变压器结构参数计算.....	219
附录 B 集成触发器应用举例	231
附录 C 变压器、导线参数表	236

附录 D 直流电动机、电器参数表	247
附录 E 晶闸管、三端稳压器、二极管、压敏电阻及光电耦合器技术数据	264
附录 F 实验装置介绍	275
(一)JZB-1 型晶闸管变流技术实验装置	275
(二)DSC-1 型直流调速系统实验装置	277
部分练习题答案	280
参考文献	282

第一篇 晶闸管变流技术题例

第一章 电力半导体器件

一、普通晶闸管

反向阻断型晶闸管是四层(PNPN)、三端(A、G、K)半导体器件,外形有螺栓形和平板形两种,如图 1-1-1 所示。小功率晶闸管外形有的类似晶体管,塑封式多种,如图 1-1-2a~h 所示。

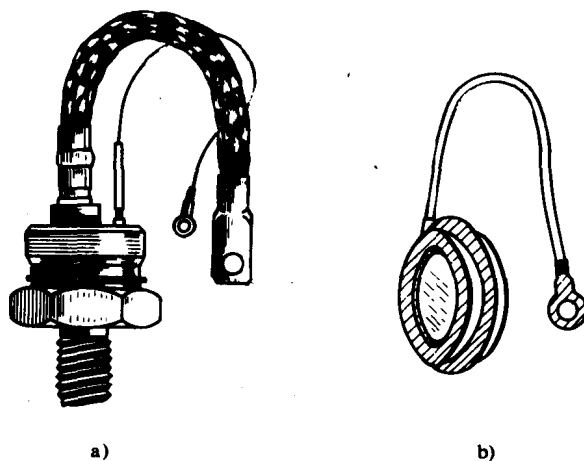


图 1-1-1 普通晶闸管外形

a)螺栓式 b)平板式

普通晶闸管等效电路和图形符号如图 1-1-3 所示,型号用 KP 表示。

加正向阳极电压和足够大的正向门极电压可使晶闸管导通,晶闸管导通后,门极就失去控制作用,因此门极只需加足够大的脉冲电压即可。要使已导通的晶闸管关断,可将阳极电流降至维持电流以下即可实现。

二、可关断晶闸管(GTO)

可关断晶闸管也是一个四层三端半导体器件,其结构与伏安特性均与普通晶闸管相同,图形符号如图 1-1-4 所示,型号用 KG 表示。

由于采用了特殊工艺,使晶闸管工作时处于接近临界饱和状态。这样当门极加正触发脉冲时可使晶闸管导通,当门极加上足够的负脉冲时又能使导通着的晶闸管关断。因此,可关断晶闸管是一种较理想的无触点直流开关元件,特别适用于各种高速直流开关电路与逆变电路。

三、双向晶闸管(TRIAC)

双向晶闸管是一种五层(NPNPN)半导体器件,它有两个主电极 A_1 、 A_2 和一个门极,从特性

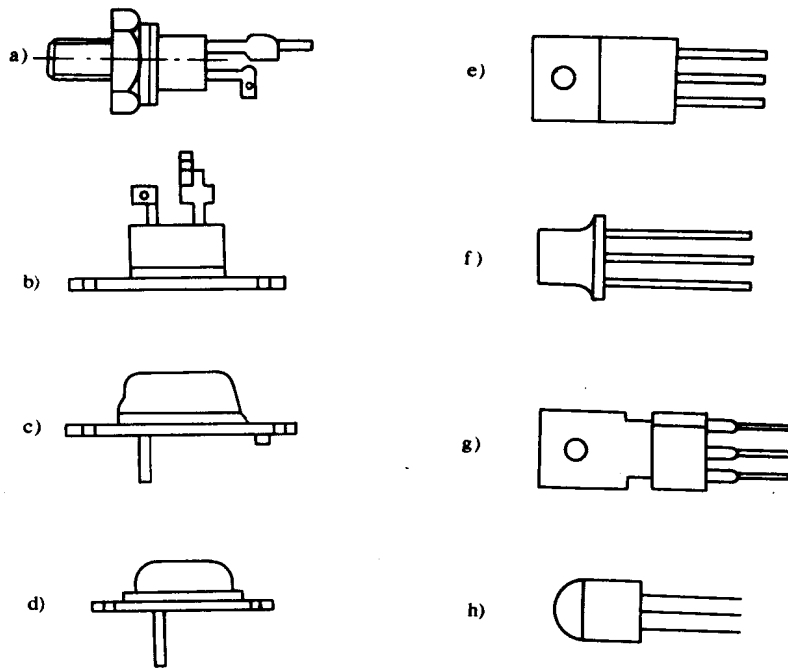


图 1-1-2 小功率晶闸管外形

a) 栓形 b) 扁平形 c) 晶体管形 d) TO-66CAN
e) 塑封形 TO-66 f) TO-5CAN g) 塑封形, TO-5 h) 塑料形, TO-92

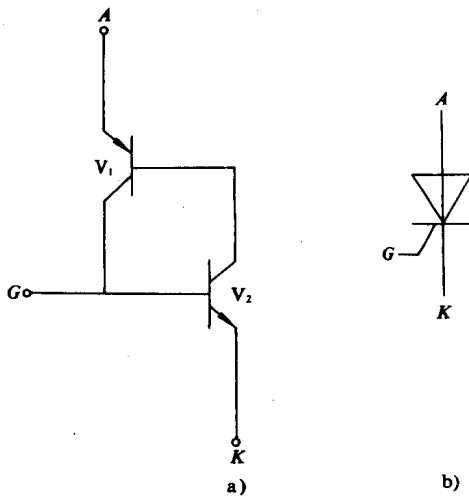


图 1-1-3 普通晶闸管的等效电路及图形符号

a) 等效电路 b) 图形符号

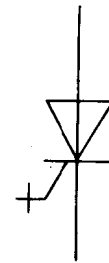


图 1-1-4 GTO 的图形符号

上看,可以等效为一对反并联的普通晶闸管,其内部结构、等效电路和图形符号如图 1-1-5 所示,型号用 KS 表示。

双向晶闸管加正负触发脉冲都能使其导通,但用负脉冲触发灵敏度高,故多采用 G 接负, A_2 接正的脉冲触发。双向晶闸管工作时,由于正反两个方向的灵敏度不同,可能会出现正负电

流波形不对称,存在直流分量,解决的方法是采用强触发,通常触发电流的幅值(最大触发电流) $I_{cm} > (2 \sim 4)I_G$ 。

用双向晶闸管来代替两只反并联的晶闸管可使主电路大大简化,触发电路设计也比较灵活,在交流电路中得到广泛的应用。

四、光控晶闸管

光控晶闸管也是一种PNPN四层半导体器件,利用光激发使之导通,其图形符号、内部结构及等效电路如图1-1-6a、b、c、d所示。器件有两端的,也有三端的,三端器件也可用电流触发代替光激发,使得使用更加灵活,型号用GK表示。

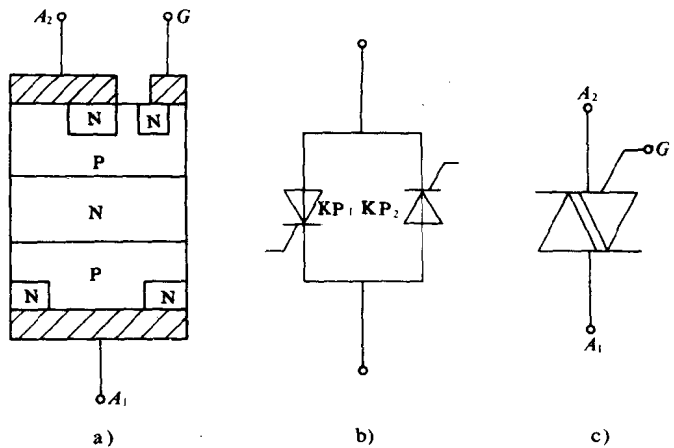


图 1-1-5 双向晶闸管的内部结构、等效电路及图形符号

a)内部结构 b)等效电路 c)图形符号

器件有两端的,也有三端的,三端器件也可用电流触发代替光激发,使得使用更加灵活,型号用GK表示。

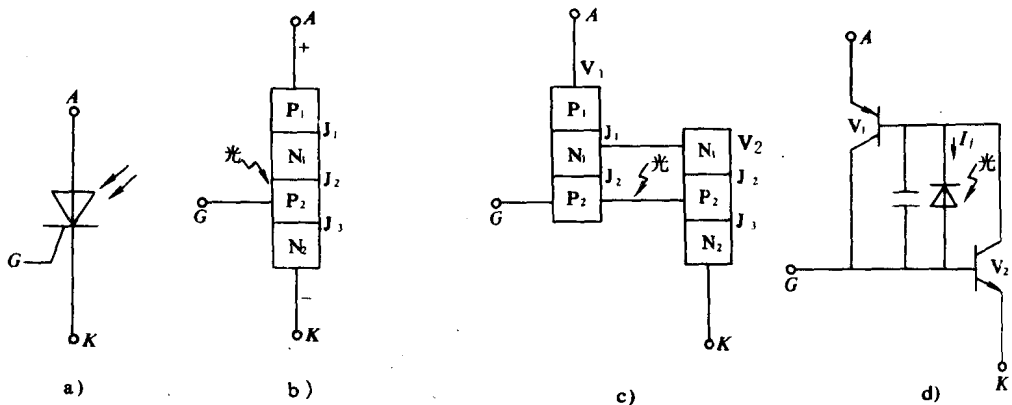


图 1-1-6 光控晶闸管

使用时,通过负载加上正向阳极电压,由于 J_2 结反向偏置,阻止了电流流动。然而,射入光控晶闸管的光将在 J_2 结附近产生电子空穴对,随之有电流通过 J_2 结。如图1-1-6d所示,有光照时,等效光敏二极管电流 I_1 将增加,使等效的两晶体管 V_1 、 V_2 的基极电流增大,互联电路将产生很强的正反馈,从而使光控晶闸管导通。

光控晶闸管灵敏度与入射光的波长和阳极电压有关,一般来说,用红外线激发灵敏度较高。阳极电压高时,可使触发所需的辐照减小。

光控晶闸管的优点是响应速度快(一般约几个 μs),主电路与控制电路在电气上完全绝缘,这在高压直流输电线路中,使主电路与控制电路之间的绝缘问题变得简单。

五、逆导晶闸管(RCT)

逆导晶闸管是由一个晶闸管和一个反并联的二极管集成在同一硅片内的电力半导体复合器件,因此,正向特性与普通晶闸管相同,反向特性如同一个二极管的正向特性,其内部结构、等效电路、伏安特性及图形符号如图 1-1-7 所示,型号用 KN 表示。与普通晶闸管相比具有容量大、电压高、快速性好等优点,适用于反向不需要承受电压的场合。

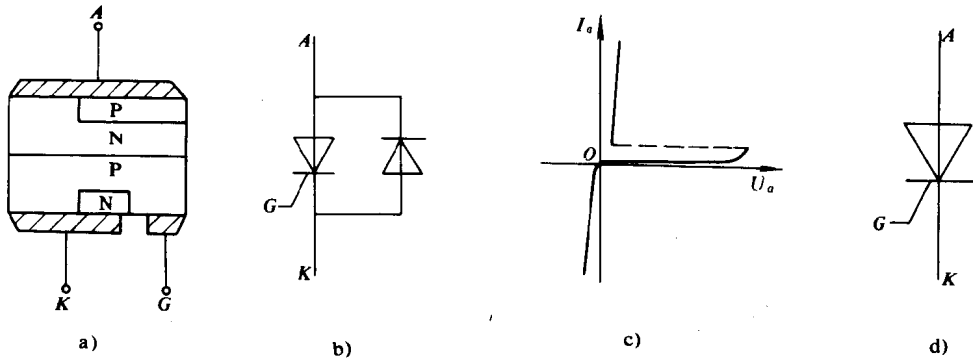


图 1-1-7 逆导晶闸管

a)内部结构 b)等效电路 c)伏安特性 d)图形符号

六、功率晶体管(GTR)

通常将耗散功率(或输出功率)为 1W 以上的晶体管称为功率晶体管,其基本结构和图形符号均与普通晶体管相同,如图 1-1-8 所示。

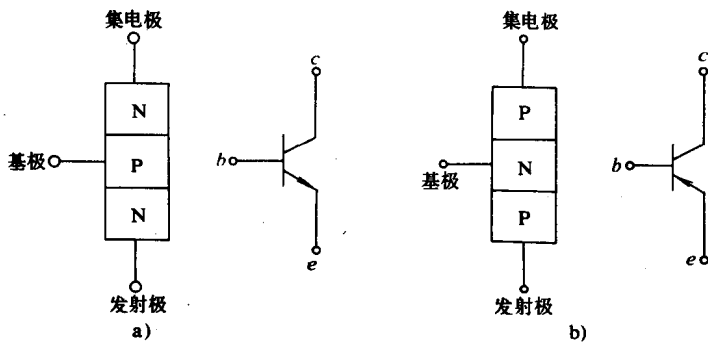


图 1-1-8 功率晶体管的结构和图形符号

a)NPN 管 b)PNP 管

随着电流和电压的增大,一些新的物理效应越来越显著,影响着功率晶体管的电特性及稳定性,为此设计制造出多种结构形式的功率晶体管。NPN 三重扩散台面型结构功率晶体管的典型结构,如图 1-1-9 所示。这里以该结构为例,介绍功率晶体管的结构特点。

①它的管芯是由高掺杂的发射区 N^+ 层、中掺杂的基区 P 层、低掺杂的集电区 N^- 层及高掺

杂的集电区 N^+ 层所组成。 N^- 层为原始单晶材料,其它两个 N^+ 层和 P 层是由三次扩散分别形成。

②管芯表面有一层二氧化硅膜或钝化膜保护层,因此该结构的可靠性较高。

③管芯外形为台面结构,集电结是平坦的平面结,它消除了平面管集电结边缘局部弯曲的结面,因而避免了电场集中效应。台面的表面造型是适当角度的正斜角,使集电结空间电荷区的暴露部分的宽度 L 大于体内部分的宽度 δ 。这样,结的击穿电压将由体内击穿电压决定。

④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。

⑤高阻集电区 N^- 层为单晶材料,掺杂均匀,质量比外延材料好,有利于保持电性能一致,提高抗二次击穿能力。另一方面,只要适当控制 N^- 层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,故可作成大电流和高电压的晶体管。

⑥集电区 N^+ 层和金属管座连成一体,金属管座又和散热器连成一体,这样既减小了晶体管的内部热阻,又减小了它的外部热阻,大大提高了晶体管的耗散功率 P_{CM} 。

功率晶体管的一个缺点是它的饱和状态中比较低的电流增益,在整个导通周期需要相当大的基极驱动电流。如集电极电流为 100A 的功率晶体管在饱和模式中需要 10A 的连续基极电流。然而,两个单个晶体管可以互连以使输入晶体管驱动另一个晶体管的基极,这样合成的达林顿结构可提高直流电流增益。图 1-1-10a 表示串级的达林顿连接,这里对于输出晶体管中 100A 的集电极电流,驱动晶体管的输入基极电流一般需要 300~500mA。在新单块功率达林顿中两个晶体管被制造在单一硅片上,可以附加漏电流稳定电阻,如图 1-1-10b 所示,合成的三端器件具有大电流、高增益晶体管特性。

达林顿连接的一个缺点是集电极至发射极饱和电压比起相同定额的单个晶体管稍高,因而通态功率损耗较大,但与其它电力半导体器件相比也并不算高。

在基本的达林顿连接中,驱动晶体管必须在输出晶体管开始导通或关断之前导通或关断,致使器件开关缓慢,为此引入加速二极管 VD,如图 1-1-10b 所示,为 V_2 反向基极电流提供一条通路,因而加速了关断过程。在新型单块达林顿中,输出晶体管的基极经常制成一个可以使用的外部端子,如图 1-1-10b

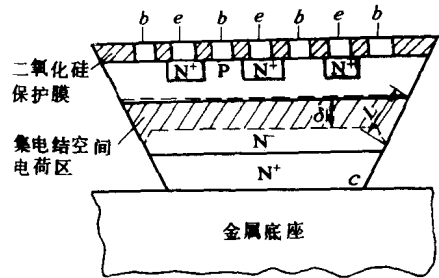


图 1-1-9 功率晶体管的典型结构

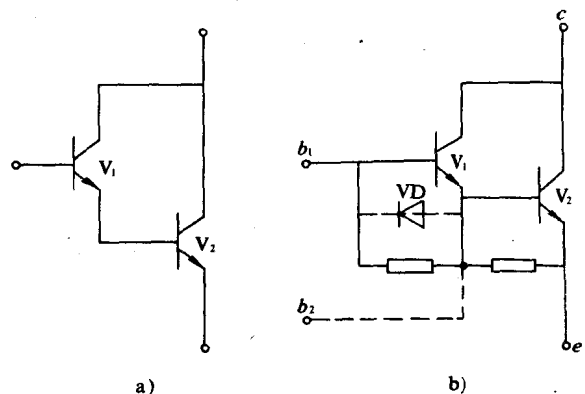


图 1-1-10 功率达林顿管

a) 基本达林顿连接 b) 单块达林顿晶体管的典型结构

所示那样,以优化开关性能。

功率晶体管既可作开关器件,也可作放大器件用,在与晶闸管竞争中,它更适用于开关领域。由于功率晶体管具有自关断能力和较高的工作频率,从而在斩波器、逆变器中得到了日益广泛的应用。

七、功率场效应晶体管(MOSFET)

MOSFET 器件内部结构及图形符号如图 1-1-11 所示,它有漏极、源极和门极三个端子,分别相应于晶体管的集电极、发射极和基极。在没有门极偏置的情况下,由于两个背对背的 PN 结使源和漏极之间电流不能流动。但是,当绝缘的门极相对于源极为正时,电场吸引自由电子到 P 基片表面,形成 N 型通道,使电子从源极流向漏极形成电流。图 1-1-11a 是 N 通道增强型平面 MOSFET,是电压控制的电流器件,其导通完全是由于电子的移动。相反地,P 通道 MOSFET,其导通完全是空穴的移动。

通常,MOSFET 导通只靠多数载流子,因此,消除了少数载流子的移动和延迟,故工作频率高。但图 1-1-11a 结构的特点是漏极和源极之间的导电通道距离长,通态电阻大,功率损耗大,一般仅用于 1W 以下。

新型功率 MOSFET 保留有平面 MOSFET 的高输入阻抗和高开关速度,但让电流从漏极垂直流动,而后横向通过通道区,如图 1-1-12 所示。这种垂直式 DMOS(双扩散 MOS)通道长度取决于扩散过程,并且可以准确地控制,获得短的长度和低的通态电阻。

功率 MOSFET 的开关特性很大程度上取决于由器件的输入电容和门极驱动电路的原阻抗组成的串联 RC 电路的时间常数。导通时,当输入电容充电到阈值电压有一个初始的延迟,并且在门极电压达到完全导通所需要的值之前有进一步延迟,为了减小导通时间,必须采用低阻抗驱动源增加电容的充电电流,要求几安培的充电电流峰值。

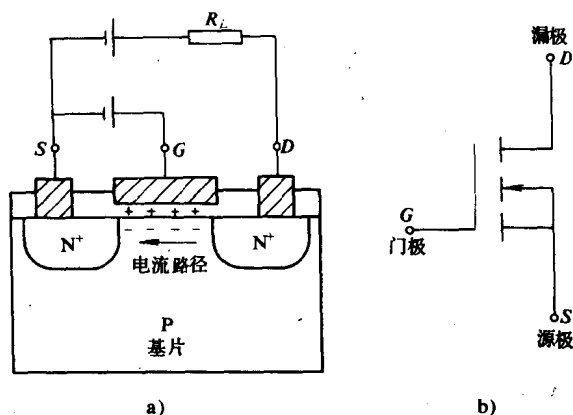


图 1-1-11 MOSFET 内部结构和图形符号

a) 内部结构 b) 图形符号

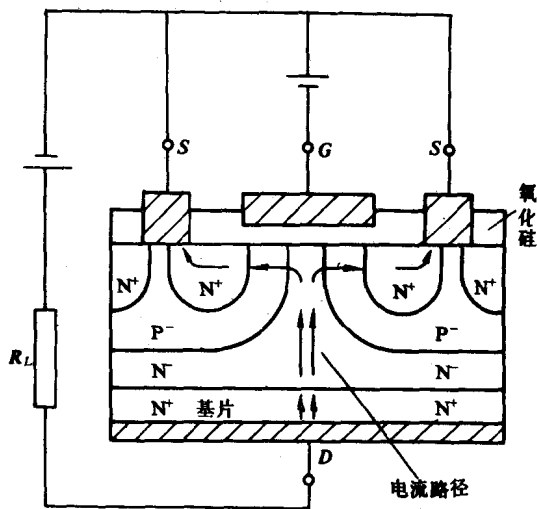


图 1-1-12 垂直通道 DMOS 功率 MOSFET 内部结构

由于 MOSFET 是多数载流子晶体管,当除去门极电压时,它立刻开始关断,但是开关速度是受输入电容通过驱动电路放电速率的限制,直到输入电容放电到门极阈值电压关断才完成。

尽管这种电容效应,在大电流器件中 10ns 级开关时间的 MOSFET 是可能的,并且门极需要的功率是这样的小,以致能直接地从 CMOS 或 TTL 集成电路逻辑驱动功率 MOSFET。

与功率晶体管相比,通态压降大于功率晶体管,因此,通态损耗比功率晶体管大。但由于功率 MOSFET 是一个电压控制的多数载流子器件,驱动功率可以忽略不计,而且驱动电路简单,开关时间短,在高频时具有较高的效率,从而在低功率高频电路应用中,已获得了牢固的立足点。

八、复合电力半导体器件

1. 绝缘门极晶体管 (IGT) 功率 MOS 工艺中的新发展是绝缘门极晶体管 (IGT) 或导电率可调整的场效应晶体管 (COMFET)。这种器件保留了 MOSFET 的高输入阻抗并且又有和功率晶体管相差不多的低的通态电压降。然而,IGT 的关断时间却远大于功率 MOSFET。IGT 的内部结构和图形符号如图 1-1-13 所示。当施加正的门极—发射极电压时器件导通,减小这个电压到零时器件关断。

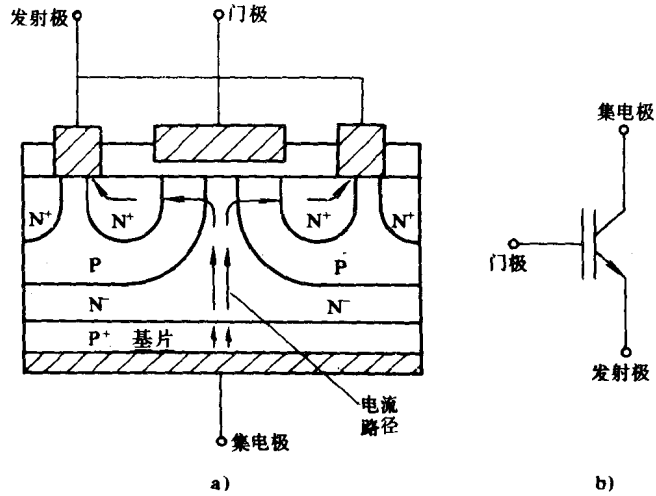


图 1-1-13 IGT 的内部结构和图形符号

a) 内部结构 b) 图形符号

从目前情况看 100V 以下的阻断电压,功率 MOSFET 有较低的导通损耗,优于 IGT。在较高的阻断电压时,MOSFET 的通态电阻急剧增长,详细计算表明,对于运行电压在 200V 以上和开关频率在 50kHz 以下的电动机驱动应用 IGT 占优势。

IGT 有功率 MOSFET 的高输入阻抗和电压控制特性,但是在高集电极电流等级下门极关断能力降低。目前的发展状态,IGT 还不能达到 GTO 的电压阻断能力。

2. MOS 控制晶闸管 (MCT) MOS 控制晶闸管的等效电路如图 1-1-14a 所示,实际上这种器件是由 MOSFET 和晶闸管并联集成的。当门极电压超过阈值电压时,在分路电阻中电流流通并且接通晶闸管。器件的内部结构如图 1-1-14b 所示。这种器件具有 MOSFET 的高输入阻抗,而且又有晶闸管的低导通压降。

3. 功率模块 为了增加经济性、可靠性和用户使用方便,1970 年后半导体器件开始朝向模块装配发展。

在这些集成化的功率模块中,两个或更多的半导体芯片被安装在一个公共的金属基板上。芯片与基片之间的电绝缘是用例如氧化铍的材料实现的,它电气上是绝缘的,但是导热的,所以热量被有效地从芯片传到金属基极上。密封的或玻璃钝化的硅片被用来改善长期电压阻断

流比 G_K 门极触发时要大得多。

在 SCS 已经开通时,若在门极 G_A 施加正脉冲电压,使 V_1 晶体管的基极与发射极间为反向偏压,则可使 V_1 截止,故 V_2 也截止,SCS 关断。

十、触发器件

常用的触发器件有单结晶体管(UJT)、程控单结晶体管(PUT)、双向触发二极管(DIAC)、硅单向开关(SUS)以及集成触发器等。

1. 单结晶体管(UJT)

单结晶体管的内部结构,等效电路及图形符号如图 1-1-16a、b、c 所示。

工作时,在 b_2b_1 间加上一定直流电压,只要发射极电压 U_e (eb_1 间电压)大于单结晶体管峰点电压 U_p ,则单结晶体管导通,小于谷点电压 U_v ,单结晶体管关断,利用这种特性可以组成各种电路。

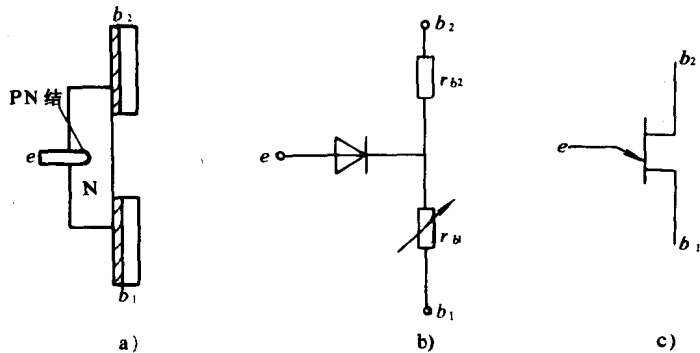


图 1-1-16 单结晶体管

a)内部结构 b)等效电路 c)图形符号

2. 程控单结晶体管(PUT) 程控单结晶体管与普通晶闸管的内部结构基本相同,也是 PNPN 四层半导体器件,也有三个电极,即阳极、阴极和门极。所不同的是,程控单结晶体管的门极是从靠近阳极的 N 型半导体层引出的,其内部结构、等效电路及图形符号如图 1-1-17 所示。当阳极 A 的电压低于门极 G 的电压时,等效晶闸管 V_1 、 V_2 截止,即程控单结管关断。如果升高阳极电压,当它高于门极电压时,等效晶体管 V_1 导通,由于互联电路中产生很强的正反馈,所以两只晶体管(即程控单结管)迅速饱和导通。

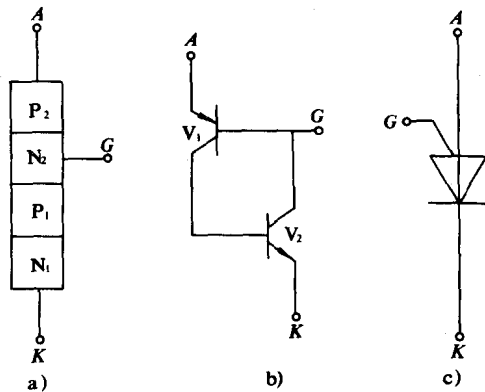


图 1-1-17 程控单结晶体管

a)内部结构 b)等效电路 c)图形符号

程控单结管(PUT)与单结晶体管(UJT)一样,主要用于张弛振荡器,如图 1-1-18 所示。 E 经 R_1 和 R_2 给 PUT 加入适当的门极电压,另一方面通 R_3 对电容 C 充电,当 C 两端的电压(即 PUT 的阳极电压)高于门极电压时,PUT 导通,电容 C 通过 PUT 和 R_4 放电, R_4 两端的脉冲电压即可作为晶闸管的门极触发电压。当电容 C 的放电电流(即 PUT 的阳极电流)小于一定数值后,PUT 关断。电容又开始充电,重复上述过程。这样, R_4 两端即可得到具有一定频率的脉冲电