

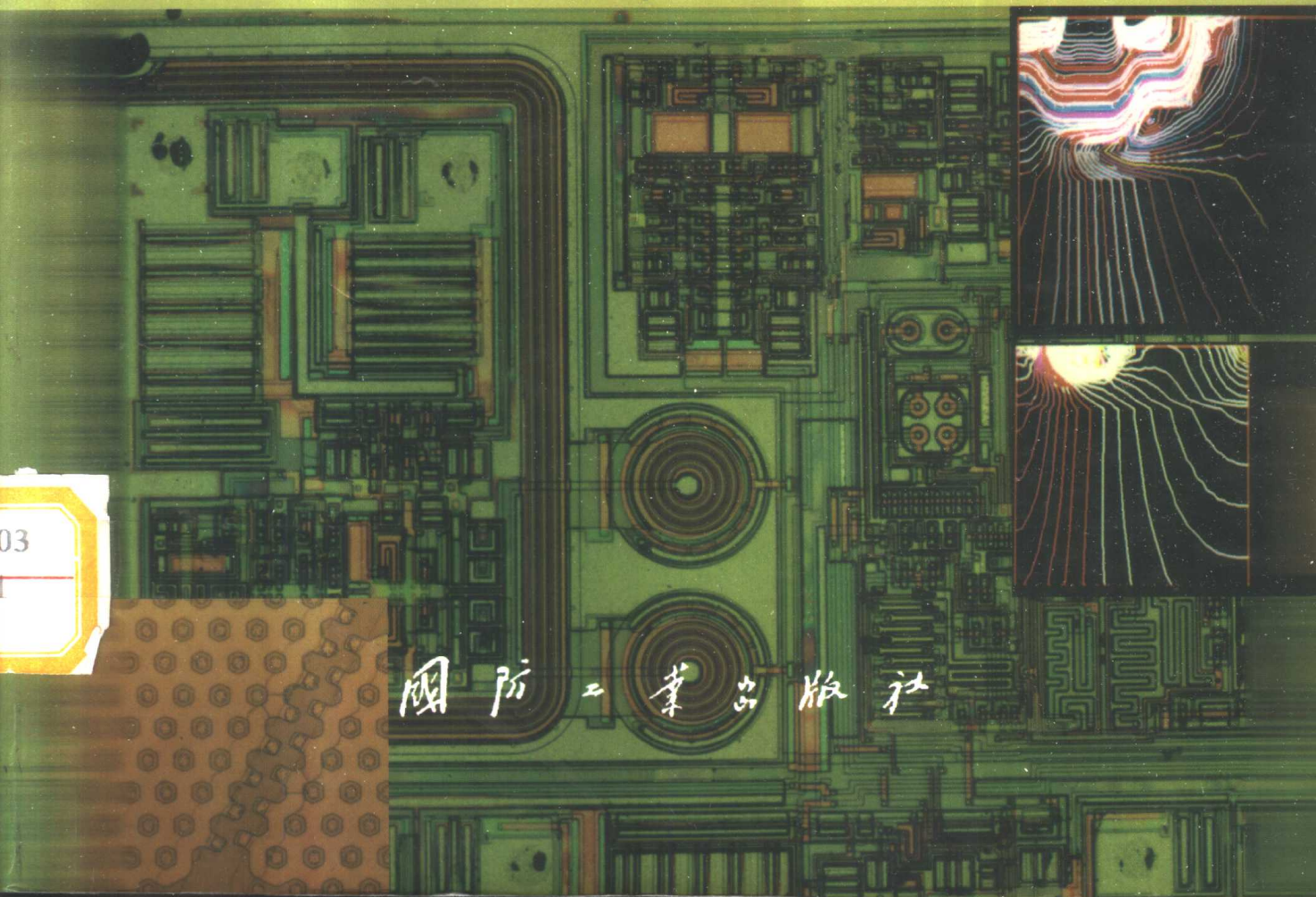


高等学校  
电子信息类

规划教材

# 电力电子器件 原理与设计

杨晶琦 编著



03

国防工业出版社

# 电力电子器件原理与设计

杨晶琦 编著

国防工业出版社

·北京·

### 图书在版编目(CIP)数据

电力电子器件原理与设计/杨晶琦编著. —北京: 国防工业出版社, 1999. 9

ISBN 7-118-02158-X

I. 电… II. 杨… III. ①电力系统-电子器件-理论②电力系统-电子器件-设计 IV. TN103

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 16172 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 17½ 394 千字

1999 年 9 月第 1 版 1999 年 9 月北京第 1 次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 24.00 元

---

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

# 前 言

近年来,电力电子技术飞速发展,成为目前电工学科中一个活跃的分支。然而每一项新技术的出现和新装置的诞生都是以一代新器件的问世为契机。因此,电力电子器件是电力电子技术的基础和使其发展的强大动力。由于电力电子器件对国防建设、工业、交通、家用电器等国民经济产生了重大影响,所以高等院校微电子技术和电力电子技术等相关专业的高年级本科生、研究生以及从事电力电子技术和电力电子器件研究的有关技术人员,都迫切需要较全面、系统地掌握这些新型器件的原理与设计方法。为此,我们编写了这本书。

本书以国际上新型电力电子器件的结构、原理、设计方法及特性仿真为主线,力求内容系统、新颖,具有实用性。书中除了列出国内外的有关实例外,也给出了作者在科研工作中的一些设计实例,可供读者参考。

全书共分十章。第一章介绍了电力电子器件的目前水平和发展趋势。第二章至第三章分别介绍了达林顿晶体管、GTR、SCR 和 GTO 等基础器件的工作原理、设计方法、参数分析、工艺制造及派生器件。第四章至第九章分别介绍了 MOS 控制晶闸管(MCT)、功率 MOSFET、绝缘栅双极晶体管(IGBT)、静电感应晶体管(SIT)、双极静电感应晶体管(BSIT)、静电感应晶闸管(SITH)以及智能功率集成电路(Smart Power IC)和高压集成电路(HVIC)等目前国际上先进的新型电力电子器件的主要结构、工作机理、参数设计、版图设计、工艺设计及相关技术;介绍了它们的主要设计技巧、关键参数的折衷考虑、性能分析、纵向结构、终端形式及派生器件;介绍了它们的基本组成、保护电路及设计实例。第十章较详细地介绍了电力电子器件的计算机模拟方法及其部分模拟软件、实例与结果分析。为使学生和读者能掌握相应的基础理论及必要的设计方法,除第一章外,各章均配有适量的习题与思考题。

书中第三章、第四章及全部图稿主要由王培林编写和绘制;其余各章的编著及全书的统编工作由杨晶琦完成。

清华大学贾松良教授主审了全部书稿,对书稿从文字到图稿都作了认真的修改,还提出了许多有价值的建设性意见,贾老师悉心的指导使作者受益匪浅。本书的完成还得到了哈尔滨工业大学刘振茂教授、兰州大学李思渊教授的指导和帮助。此外,赵善麒教授在器件模拟工作中给予了大力支持,清华大学张蓬老师在第十章的修改中提出了有益的见解。同时贾林、刘辉同学在器件模拟方面作了许多工作。对此,作者一并表示深深的谢意。

由于作者水平有限,书中的错误及不完善之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

作 者

于哈尔滨工业大学

## 主要符号表

|              |    |             |                 |    |                |
|--------------|----|-------------|-----------------|----|----------------|
| $A_{em}$     | —— | 发射极面积       | $k$             | —— | 玻尔兹曼常数         |
| $A_{eff}$    | —— | 有效沟道宽度      | $L$             | —— | 沟道长度           |
| $BV_{DS}$    | —— | 漏源击穿电压      | $l$             | —— | 电阻条长度          |
| $C_{ox}$     | —— | 栅极氧化层单位面积电容 | $L_G$           | —— | 胞距、栅间距         |
| $D$          | —— | 双极型器件扩散系数   | $N$             | —— | 掺杂浓度           |
| $E_c$        | —— | 临界电场、导带底能量  | $m^*$           | —— | 电子有效质量         |
| $E_v$        | —— | 价带顶能量       | $N_c$           | —— | 导带底有效状态密度      |
| $E_g$        | —— | 半导体禁带宽度     | $N_d$           | —— | 半导体内离化杂质浓度     |
| $E_{on}$     | —— | 开启能量        | $N_v$           | —— | 价带顶有效状态密度      |
| $E_{off}$    | —— | 关断能量        | $N_{epi}$       | —— | 外延层杂质浓度        |
| $G_v$        | —— | 正向阻断增益      | $N_{sub}$       | —— | 衬底杂质浓度         |
| $G_T$        | —— | 关断电流增益      | $N_A(x)$        | —— | N 沟基区杂质浓度      |
| $g_m$        | —— | 跨导          | $N_D(x)$        | —— | P 沟基区杂质浓度      |
| $h_{FE}$     | —— | 电流增益        | $N_{eff}$       | —— | 有效掺杂浓度         |
| $I_A$        | —— | 阳极电流        | $P_F$           | —— | 通态损耗           |
| $I_b$        | —— | 基极电流        | $P_T$           | —— | 最大耗散功率         |
| $I_c$        | —— | 集电极电流       | $Q_{ox}$        | —— | 氧化层电荷密度        |
| $I_{DS}$     | —— | 漏源电流        | $Q_{ss}$        | —— | 栅极氧化层的表面等效电荷密度 |
| $I_e$        | —— | 发射极电流       | $q$             | —— | 电子电荷           |
| $I_K$        | —— | 阴极电流        | $R$             | —— | 电阻             |
| $I_G$        | —— | 门极电流        | $R_{ef}$        | —— | 整个电流通路的等效电阻    |
| $I_{off}$    | —— | 关断电流        | $R_{on}$        | —— | 开启电阻           |
| $I_{A(tot)}$ | —— | 阳极总电流       | $R_{on(cell)}$  | —— | 单元开启电阻         |
| $I_{DSS}$    | —— | 饱和漏电流       | $R_{ch}$        | —— | 沟道电阻           |
| $I_{ATO}$    | —— | 最大可关断阳极电流   | $R_T$           | —— | 热阻             |
| $I_{TM}$     | —— | 可关断峰值电流     | $R_N, R_P$      | —— | 电子、空穴复合率       |
| $I_{dis}$    | —— | 位移电流        | $R_{geom}$      | —— | 芯片面积比值         |
| $I'_{BB}$    | —— | 反向抽取电流      | $R_{\square b}$ | —— | 发射区下面的基区方块电阻   |
| $J$          | —— | 电流密度        | $S_T$           | —— | 芯片面积           |
| $J^*$        | —— | 沟道区电流密度     | $S_J$           | —— | 关断能力           |
| $J_{cr}$     | —— | 临界电流密度      | $t_r$           | —— | 上升时间           |
| $K$          | —— | 损伤因子        |                 |    |                |

|           |    |              |                        |    |              |
|-----------|----|--------------|------------------------|----|--------------|
| $t_f$     | —— | 下降时间         | $\alpha_1$             | —— | 寄生 PNP 管放大系数 |
| $t_{ox}$  | —— | 栅氧化层厚度       | $\alpha_2$             | —— | 寄生 NPN 管放大系数 |
| $V$       | —— | 晶体管          | $\alpha_{PNP}$         | —— | PNP 管直流放大系数  |
| $V_B$     | —— | 单边突变结击穿电压    | $\alpha_{NPN}$         | —— | NPN 管直流放大系数  |
| $V_j$     | —— | P 基区与阴极之间的压降 | $\beta$                | —— | 电流增益         |
| $V_T$     | —— | 阈值电压         | $\beta_{2(sum)}$       | —— | 二级达林顿总电流增益   |
| $V_t$     | —— | 热电压          | $\beta^*$              | —— | 基区输运系数       |
| $V_{GA}$  | —— | 栅极 - 阳极间电压   | $\beta_{off}$          | —— | 关断增益         |
| $V_{La}$  | —— | P 基区横向压降     | $\gamma$               | —— | 注入效率         |
| $V_{PT}$  | —— | 穿通电压         | $\gamma_{epi}$         | —— | 几何因子         |
| $V_{BR}$  | —— | 集电结击穿电压      | $\Delta p$             | —— | 非平衡载流子浓度     |
| $V_{th}$  | —— | 开启电压         | $\epsilon_0$           | —— | 自由空间介电常数     |
| $V_{GS}$  | —— | 栅源电压         | $\epsilon_s$           | —— | 相对介电常数       |
| $V_{FB}$  | —— | 平带电压         | $\eta$                 | —— | 电场因子         |
| $V_{AK}$  | —— | 阳极 - 阴极间电压   | $\lambda$              | —— | 修正因子         |
| $V_{CBO}$ | —— | CB 结击穿电压     | $\mu^*$                | —— | 阻断电压放大系数     |
| $V_{CEO}$ | —— | CE 结击穿电压     | $\mu_p$                | —— | 空穴迁移率        |
| $v_{sat}$ | —— | 电子饱和速度       | $\mu_n$                | —— | 电子迁移率        |
| $V_{DSm}$ | —— | 最大饱和压降       | $\mu_{eff}$            | —— | 有效迁移率        |
| $W$       | —— | 电子条宽         | $\rho$                 | —— | 电阻率          |
| $W_B$     | —— | 基区宽度         | $\bar{\sigma}$         | —— | 平均电导率        |
| $W_c$     | —— | 集电区高阻层厚度     | $\tau$                 | —— | 载流子寿命        |
| $W_{ch}$  | —— | 沟道宽度         | $\Phi$                 | —— | 电子辐照剂量       |
| $W_{epi}$ | —— | 外延层厚度        | $\Phi_B$               | —— | 自建电势         |
| $x_m$     | —— | 耗尽层宽度        | $\Phi_F$               | —— | 硅的费米势        |
| $X_{je}$  | —— | 发射区结深        | $\Phi_{ms}$            | —— | 金属 - 半导体功函数差 |
| $X_{jc}$  | —— | 基区结深         | $\Phi_{SS}$            | —— | 硅栅 - 硅功函数差   |
| $x_{jn}$  | —— | N 扩散结深       | $\Phi_{min}$           | —— | 鞍点势垒高度       |
| $x_{jp}$  | —— | P 扩散结深       | $\varphi_N, \varphi_P$ | —— | 电子、空穴准费米势    |
| $\alpha$  | —— | 拐角电阻修正因子     | $\Psi$                 | —— | 静电势          |

# 目 录

|                                            |    |
|--------------------------------------------|----|
| 主要符号表 .....                                | XI |
| 第一章 电力电子器件的发展概况 .....                      | 1  |
| 1.1 双极功率晶体管 .....                          | 2  |
| 1.2 晶闸管与可关断晶闸管(GTO) .....                  | 2  |
| 1.3 MOS 控制晶闸管(MCT) .....                   | 3  |
| 1.4 功率 MOSFET .....                        | 4  |
| 1.5 绝缘栅双极晶体管(IGBT) .....                   | 5  |
| 1.6 静电感应晶体管(SIT)与静电感应晶闸管(SITH) .....       | 7  |
| 1.7 功率集成电路(PIC) .....                      | 8  |
| 1.7.1 高压集成电路(HVIC) .....                   | 8  |
| 1.7.2 智能功率集成电路(SPIC) .....                 | 8  |
| 参考文献 .....                                 | 11 |
| 第二章 巨型晶体管(GTR) .....                       | 12 |
| 2.1 达林顿晶体管 .....                           | 12 |
| 2.1.1 简单级连达林顿晶体管 .....                     | 12 |
| 2.1.2 实用功率达林顿晶体管 .....                     | 13 |
| 2.1.3 功率达林顿晶体管中的电阻 .....                   | 14 |
| 2.1.4 $R_1$ 阻值与 $I_b$ 、 $I_{cm}$ 的关系 ..... | 15 |
| 2.1.5 $R_1$ 、 $R_2$ 电阻阻值对器件开关特性的影响 .....   | 16 |
| 2.2 功率达林顿器件的版图设计方法 .....                   | 17 |
| 2.3 功率达林顿器件的纵向结构与参数设计 .....                | 19 |
| 2.3.1 高阻层厚度及电阻率的确定 .....                   | 19 |
| 2.3.2 结深的控制原则 .....                        | 20 |
| 2.3.3 基区表面浓度与次表面浓度对器件性能的影响 .....           | 20 |
| 2.4 功率达林顿晶体管的特性曲线 .....                    | 21 |
| 2.5 GTR 模块及其特点 .....                       | 22 |
| 2.6 GTR 的芯片设计 .....                        | 24 |
| 2.6.1 发射区图形的设计 .....                       | 24 |
| 2.6.2 GTR 芯片内部各管面积的分配及布局 .....             | 25 |
| 2.6.3 GTR 芯片内部电阻 $R_1 \sim R_3$ 的设计 .....  | 26 |
| 2.6.4 芯片设计中电阻对 GTR 性能影响的定量分析 .....         | 27 |
| 2.7 GTR 的结构设计 .....                        | 27 |



|                                         |           |
|-----------------------------------------|-----------|
| 2.7.1 GTR 的内部结构 .....                   | 28        |
| 2.7.2 GTR 的外部结构 .....                   | 29        |
| 2.7.3 GTR 的电路结构 .....                   | 30        |
| 2.7.4 GTR 模块的热阻 .....                   | 32        |
| 2.8 GTR 模块的并联使用 .....                   | 33        |
| 2.8.1 均流 .....                          | 33        |
| 2.8.2 并联使用 GTR .....                    | 34        |
| 习题与思考题 .....                            | 36        |
| 参考文献 .....                              | 37        |
| <b>第三章 晶闸管与 GTO</b> .....               | <b>38</b> |
| 3.1 晶闸管的结构及工作原理 .....                   | 38        |
| 3.2 晶闸管的主要参数及性能 .....                   | 40        |
| 3.2.1 晶闸管的主要参数及意义 .....                 | 40        |
| 3.2.2 晶闸管的 $di/dt$ 、 $dv/dt$ 耐量 .....   | 41        |
| 3.2.3 晶闸管的功率损耗 .....                    | 42        |
| 3.3 晶闸管的派生器件 .....                      | 42        |
| 3.3.1 几种主要派生器件简介 .....                  | 42        |
| 3.3.2 双向晶闸管 .....                       | 43        |
| 3.3.3 光控晶闸管 .....                       | 44        |
| 3.4 GTO 的结构及最新技术概况 .....                | 46        |
| 3.5 GTO 的电特性与基本工作原理 .....               | 48        |
| 3.5.1 GTO 的导通特性 .....                   | 48        |
| 3.5.2 GTO 的关断特性 .....                   | 49        |
| 3.5.3 GTO 的主要参数 .....                   | 50        |
| 3.6 门极关断能力及再导通机理的分析 .....               | 51        |
| 3.6.1 影响 $I_{TM}$ 的主要因素 .....           | 52        |
| 3.6.2 GTO 再导通机理的分析 .....                | 54        |
| 3.7 大容量 GTO 的设计与制造 .....                | 56        |
| 3.7.1 耐压设计 .....                        | 56        |
| 3.7.2 $\alpha_1$ 与 $\alpha_2$ 的设计 ..... | 57        |
| 3.7.3 电流集中现象与阴极图形 .....                 | 58        |
| 3.8 GTO 的改进 .....                       | 59        |
| 3.8.1 高频双栅 GTO .....                    | 59        |
| 3.8.2 高频逆导 GTO .....                    | 60        |
| 习题与思考题 .....                            | 62        |
| 参考文献 .....                              | 63        |
| <b>第四章 MOS 控制晶闸管(MCT)</b> .....         | <b>64</b> |
| 4.1 MCT 的结构及工作原理 .....                  | 64        |
| 4.2 MCT 关断能力的分析 .....                   | 66        |



|                                    |            |
|------------------------------------|------------|
| 4.2.1 三种自关断器件的比较 .....             | 66         |
| 4.2.2 MCT 的关断机理 .....              | 67         |
| 4.2.3 MCT 的关断条件 .....              | 67         |
| 4.3 MCT 的设计方法 .....                | 69         |
| 4.3.1 主要电学参数的设计 .....              | 69         |
| 4.3.2 元胞和器件的结构设计 .....             | 70         |
| 4.3.3 工艺设计 .....                   | 71         |
| 4.4 MCT 器件的改进与发展 .....             | 72         |
| 4.4.1 双横向 MOS 控制晶闸管(BMCT) .....    | 72         |
| 4.4.2 耗尽型 MOS 控制晶闸管(DMT) .....     | 75         |
| 4.4.3 发射极开关晶闸管(EST) .....          | 77         |
| 4.4.4 基区电阻可控晶闸管(BRT) .....         | 79         |
| 习题与思考题 .....                       | 80         |
| 参考文献 .....                         | 81         |
| <b>第五章 功率 MOSFET</b> .....         | <b>82</b>  |
| 5.1 功率 MOSFET 的种类 .....            | 82         |
| 5.1.1 高压 LDMOSFET .....            | 82         |
| 5.1.2 VVMOSFET .....               | 84         |
| 5.2 高压 VDMOS 器件的结构及工作原理 .....      | 88         |
| 5.2.1 器件结构及原理 .....                | 88         |
| 5.2.2 VDMOS 器件的特点 .....            | 89         |
| 5.3 高压 VDMOS 器件的主要电学参数 .....       | 91         |
| 5.3.1 导通电阻 $R_{on}$ .....          | 91         |
| 5.3.2 漏源电流 $I_{DS}$ .....          | 93         |
| 5.3.3 漏源击穿电压 $BV_{DS}$ .....       | 94         |
| 5.3.4 阈值电压 $V_{th}$ .....          | 95         |
| 5.4 高压 VDMOS 器件的设计方法 .....         | 95         |
| 5.4.1 高压 VDMOSFET 的版图设计 .....      | 95         |
| 5.4.2 功率 VDMOSFET 的纵向结构及工艺设计 ..... | 99         |
| 5.5 功率 VDMOSFET 的设计考虑 .....        | 103        |
| 5.5.1 寄生电容的设计考虑 .....              | 103        |
| 5.5.2 大面积化的设计考虑 .....              | 104        |
| 5.5.3 功率 VDMOSFET 的安全工作区 .....     | 105        |
| 习题与思考题 .....                       | 107        |
| 参考文献 .....                         | 108        |
| <b>第六章 绝缘栅双极晶体管(IGBT)</b> .....    | <b>109</b> |
| 6.1 IGBT 器件的结构及工作原理 .....          | 109        |
| 6.2 IGBT 器件的特性 .....               | 112        |
| 6.2.1 IGBT 器件的开关特性 .....           | 112        |

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| 6.2.2 IGBT 器件的功率损耗特性        | 113        |
| 6.3 IGBT 器件的闭锁效应            | 115        |
| 6.3.1 产生闭锁的条件               | 115        |
| 6.3.2 闭锁特性的理论分析             | 116        |
| 6.4 提高抗闭锁能力的具体措施            | 120        |
| 6.4.1 减小短路电阻 $R_{Si}$       | 121        |
| 6.4.2 背面定域 $P^+$ 扩散法与阳极短路法  | 121        |
| 6.4.3 加一薄的 $N^+$ 缓冲层        | 121        |
| 6.4.4 控制少数载流子寿命             | 123        |
| 6.4.5 选择合理的栅源结构             | 123        |
| 6.5 几个关键参数之间的折衷方案           | 123        |
| 6.5.1 开关速度和正向压降的最佳化         | 123        |
| 6.5.2 正向压降分别与阻断电压和闭锁电流的折衷关系 | 125        |
| 6.5.3 阻断电压和开关速度的折衷关系        | 125        |
| 6.6 IGBT 器件的版图形式及优化设计       | 126        |
| 6.6.1 元胞的种类                 | 126        |
| 6.6.2 元胞图形的优化设计             | 127        |
| 6.7 IGBT 器件的纵向结构及相关工艺       | 129        |
| 6.7.1 IGBT 器件的纵向结构及终端形式     | 129        |
| 6.7.2 IGBT 器件的相关技术及工艺       | 130        |
| 6.8 IGBT 的派生器件              | 133        |
| 6.8.1 VDMOS-LIGBT           | 134        |
| 6.8.2 CMDMOS 器件             | 135        |
| 6.8.3 IGBT 器件的开发技术          | 138        |
| 习题与思考题                      | 140        |
| 参考文献                        | 142        |
| <b>第七章 静电感应晶体管(SIT)</b>     | <b>144</b> |
| 7.1 SIT 的结构及工作原理            | 144        |
| 7.1.1 SIT 的结构               | 144        |
| 7.1.2 SIT 的 $I-V$ 特性和电流传输机理 | 144        |
| 7.2 SIT 特性的理论分析             | 147        |
| 7.2.1 SIT 直流特性分析            | 147        |
| 7.2.2 二维电势函数                | 148        |
| 7.2.3 电流分析                  | 149        |
| 7.3 影响 SIT 器件 $I-V$ 特性的主要参数 | 151        |
| 7.3.1 结构参数的影响               | 151        |
| 7.3.2 沟道串联电阻及温度的影响          | 153        |
| 7.4 SIT 的制造技术及工艺            | 154        |
| 7.4.1 表面栅结构 SIT 的制造         | 154        |
| 7.4.2 埋栅结构 SIT 的制造          | 155        |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 7.5 双极静电感应晶体管(BSIT)的基本结构 .....   | 157 |
| 7.6 BSIT 主要电参数分析 .....           | 159 |
| 7.6.1 阻断电压 $V_{DS}$ .....        | 159 |
| 7.6.2 电流增益 $h_{FS}$ .....        | 160 |
| 7.6.3 动态饱和压降 .....               | 161 |
| 7.6.4 导通电阻 .....                 | 162 |
| 习题与思考题 .....                     | 163 |
| 参考文献 .....                       | 164 |
| <b>第八章 静电感应晶闸管(SITH)</b> .....   | 165 |
| 8.1 SITH 器件的基本结构 .....           | 165 |
| 8.1.1 埋栅型 SITH .....             | 165 |
| 8.1.2 平面型 SITH 与垂直沟道型 SITH ..... | 166 |
| 8.1.3 带 N 缓冲层的 SITH .....        | 167 |
| 8.1.4 阳极短路型 SITH .....           | 167 |
| 8.1.5 DTT 型 SITH .....           | 168 |
| 8.2 SITH 的基本特性和作用机制 .....        | 169 |
| 8.2.1 SITH 的正向导通特性 .....         | 169 |
| 8.2.2 SITH 的正向阻断特性 .....         | 169 |
| 8.2.3 SITH 的反向阻断特性 .....         | 170 |
| 8.3 SITH 的动态特性 .....             | 170 |
| 8.3.1 反向恢复特性与关断时间 .....          | 171 |
| 8.3.2 $di/dt$ 容量 .....           | 172 |
| 8.3.3 $dv/dt$ 容量 .....           | 173 |
| 8.4 SITH 的高温特性 .....             | 175 |
| 8.4.1 高温反向阻断容量 .....             | 175 |
| 8.4.2 高温正向阻断特性 .....             | 175 |
| 8.5 SITH 的设计与制造 .....            | 176 |
| 8.5.1 设计与制造中需要考虑的几个问题 .....      | 176 |
| 8.5.2 SITH 制造的工艺过程 .....         | 177 |
| 习题与思考题 .....                     | 179 |
| 参考文献 .....                       | 180 |
| <b>第九章 功率集成电路(PIC)</b> .....     | 181 |
| 9.1 SPIC 的相关技术 .....             | 182 |
| 9.1.1 隔离技术 .....                 | 182 |
| 9.1.2 SDB 技术 .....               | 187 |
| 9.1.3 结的终端技术 .....               | 189 |
| 9.2 高压 IC - HVIC 的设计 .....       | 192 |
| 9.2.1 高压 IC 的组成 .....            | 192 |
| 9.2.2 高压 IC 的设计举例 .....          | 195 |

|                                            |            |
|--------------------------------------------|------------|
| 9.2.3 高压 IC 工艺 .....                       | 198        |
| 9.2.4 高压功率 IC 的设计考虑 .....                  | 200        |
| 9.3 Smart 功率 IC 的设计 .....                  | 201        |
| 9.3.1 SPIC 的基本组成 .....                     | 201        |
| 9.3.2 SPIC 的保护电路 .....                     | 202        |
| 9.3.3 SPIC 的参数设计 .....                     | 205        |
| 9.3.4 SPIC 的设计举例 .....                     | 206        |
| 习题与思考题 .....                               | 212        |
| 参考文献 .....                                 | 213        |
| <b>第十章 电力电子器件的计算机模拟 .....</b>              | <b>214</b> |
| 10.1 器件模拟的基础知识 .....                       | 214        |
| 10.1.1 有限元方法 .....                         | 214        |
| 10.1.2 有限差分法 .....                         | 218        |
| 10.2 电力电子器件数值分析程序简介 .....                  | 220        |
| 10.2.1 二维半导体器件模拟器 PISCES - II .....        | 220        |
| 10.2.2 高压与功率器件数值分析程序 GEDS .....            | 227        |
| 10.2.3 半导体器件模拟程序 SEDAN .....               | 234        |
| 10.3 电力电子器件的二维模拟实例 .....                   | 236        |
| 10.3.1 IGBT 器件的 PISCES 模拟过程分析 .....        | 236        |
| 10.3.2 GTR 的二维数值模拟 .....                   | 248        |
| 10.4 通用电路模拟程序在电力电子器件仿真中的应用 .....           | 251        |
| 10.4.1 SPICE 及 PSPICE 中电力电子器件的仿真模型 .....   | 252        |
| 10.4.2 模型参数的提取 .....                       | 257        |
| 10.4.3 几种电力电子器件的 SPICE 和 PSPICE 仿真实例 ..... | 260        |
| 习题与思考题 .....                               | 264        |
| 参考文献 .....                                 | 265        |

# 第一章 电力电子器件的发展概况

电力电子学诞生以后,人们常把相对应的半导体学科分为两个分支<sup>[1]</sup>:一个是以集成电路为核心的微电子学;另一个则是以大功率半导体器件为代表的电力电子学。前者单元器件的功率越来越小;后者单元器件的功率越来越大。80 年代以来,电力电子技术取得了飞速发展,它作为一门非常重要的基础技术,成为目前电工学科中一个活跃分支。

电力电子技术不仅与我们今天的工业、交通及日常生活息息相关,而且,在 21 世纪,它仍将作为一门非常活跃的学科持续迅速发展,并将继续推动人类社会的信息化<sup>[2]</sup>。

电力电子器件,既是电力电子技术的基础,也是电力电子技术发展的强大动力。近年来,随着应用领域的不断扩大,要求集成电路功率化,功率器件集成化,这又把半导体学科的两个分支有机地结合起来,于是就出现了功率集成电路(Power IC)简称 PIC,它使微电子技术和电力电子技术相辅相成,把“信息”与“功率”合为一体。可以说电力电子技术的每一次飞跃都是以新器件的出现为契机的。图 1-1 给出了电力电子器件的种类及发展趋势<sup>[2]</sup>。近年来,美国、日本等工业发达国家对电力电子技术的发展和应用都极为重视。在日本,门极可关断晶闸管(Gate turn-off thyristors)简称 GTO,功率 MOS 场效应管(MOSFET)以及绝缘栅双极晶体管(Insulate Gate Bipolar Transistor)简称 IGBT 等器件不

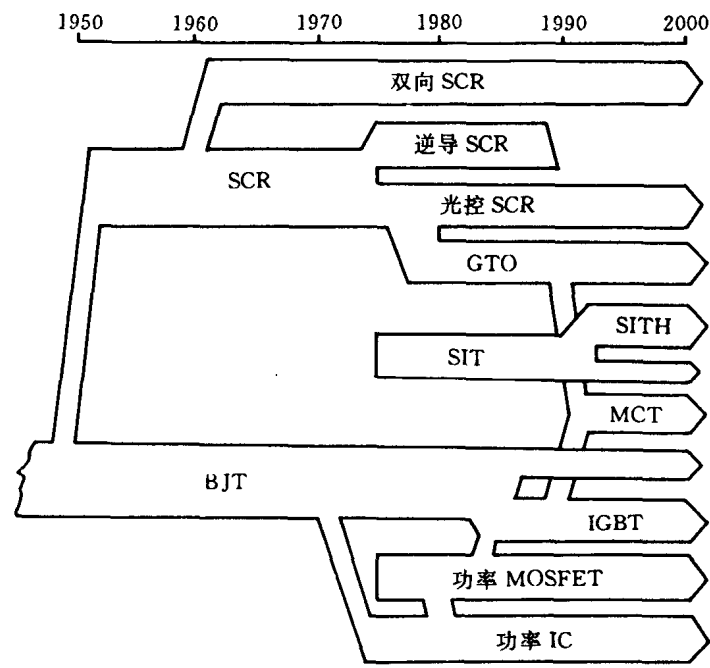


图 1-1 电力电子器件的发展历史及趋势

断得到改进,静电感应晶体管(Static Induction Transistor)简称 SIT 和静电感应晶闸管(Static Induction Thyristor)简称 SITH 等器件应用领域也不断扩大。而在美国则把器件发展重点放在他们认为最有希望的高压垂直场效应管 VDMOSFET 和 MOS 控制晶闸管(MOS Controlled Thyristor)上。

本章概略介绍国内外先进的电力电子器件的发展动向、器件特点和目前水平。

## 1.1 双极功率晶体管

最近几年来,双极功率晶体管的发展主要集中在高速开关反相应用器件方面。由于双扩散工艺的成熟,使器件的电压、电流、频率等额定值达到很高水平并已出现了许多具有较快开关速度和较低开关损耗的新器件,其性能远远超过晶闸管。随着模块化技术的进步,巨型晶体管(Giant Transistor)简称 GTR,已向高耐压、大容量方向发展。90 年代初期 400A,1 400V 的器件就已产品化。

双极功率晶体管应用的主要局限性是随着阻断电压的增加,器件增益降低。由于双极晶体管是电流控制型器件,增益减小导致了控制信号的增加,这就需要分立电路来实现,从而增加了成本。随着功率达林顿器件和模块的产业化,虽已大幅度提高了器件性能,但工作中仍然需要较大的驱动功率。另外,由于受安全工作区所限,双极功率晶体管的应用需要缓冲电路,这也会提高应用中的系统成本。近几年来在电机控制、不停电电源等领域中,为了实现低噪声、小型化、高精度等目标,对能在高频下工作的大容量器件的需求量日趋扩大。为了适应这些要求,GTR、IGBT 等多种功率复合器件应运而生。图 1-1 仅列出了近 50 年间发展起来的有代表性的、生命力较强的电力电子器件。

总之,目前双极功率器件发展的主要目标仍是高速晶体管、达林顿晶体管、功率模块以及混合集成器件的制造。

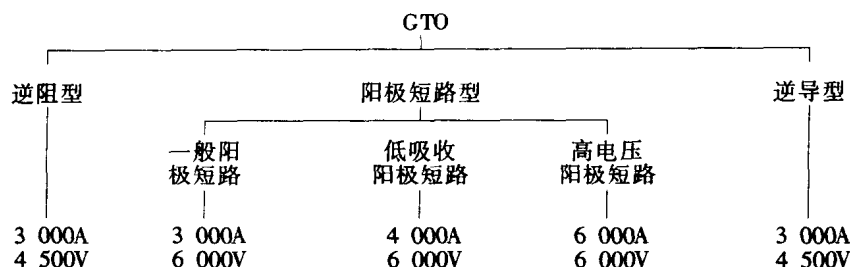
## 1.2 晶闸管与可关断晶闸管(GTO)

自从 1957 年晶闸管问世以来,其功率容量大约增加了 3 000 倍。现在已能稳定生产出  $\phi 100\text{mm}$ ,4 000A,8 000V 的晶闸管<sup>[3]</sup>。今后的发展方向仍是高压、大电流。目前最高科研水平为 1 000A,12 000V。光触发晶闸管的稳定生产水平已是 4 000A,8 000V,而且具有过电压自保护功能。由于它在直流输电、无功补偿、大功率直流电源、超大功率和高压变频调速等方面仍有广阔的应用领域,所以在今后若干年内晶闸管仍能继续发展。

众所周知,分立电力电子器件的发展与硅单晶质量和直径以及器件的设计理论和制造技术有关。在大容量晶闸管制造技术中,首要问题是硅单晶片的直径。近几年来由于硅材料得到了迅猛的发展,因此晶闸管的功率水平将会达到 10 000A/10 000V<sup>[4]</sup>。

GTO 近年来在牵引、高压、大容量调速、无功补偿等方面获得广泛使用。1995 年日本三菱公司已研制出 8 000V,8 000A 的 GTO<sup>[3]</sup>。这种 GTO 采用了大直径均匀结技术和全压接式管壳封装,并通过控制少子寿命协调了导通电压与关断损耗两者之间的折衷关系,并已将此 GTO 用于逆变器。

下面给出当前国外几种 GTO 的生产水平概况。目前最高水平为 6 英寸芯片、6 000V、6 000A<sup>[3]</sup>。



GTO 的主要技术方向,仍是大电流、高耐压。这就需要改善元胞特性,并改善每个元胞及结构的一致性、均匀性。这要从改善元胞的微细化和少子寿命控制的最佳化入手,控制扩散杂质分布的同时提高导通特性,从而使门极电路小型化。

由于大容量 GTO 多是采用压接结构。因此,需要使每个元胞特性均匀一致的工艺以及均匀一致的压接,一致的接触电阻。这在工艺上可采取离子注入法和压接式结构。压接式结构容易保证接触一致性,避免由合金烧结产生的受热不均匀以及应力等问题。

GTO 因为利用了电导调制效应,在关断后有拖尾电流流过。这样,关断损耗将成为限制其高压下应用的一个主要原因。与晶闸管相比,GTO 具有快的关断速度,高的关断电流容量和大的关断安全工作区。它代表了晶闸管发展的主要方向。

### 1.3 MOS 控制晶闸管(MCT)

MCT 是利用 MOS 门来控制晶闸管开通和关断的功率器件。它具有晶闸管的低通态压降特性,但其工作电流密度远高于 IGBT 和 GTR。其导通  $di/dt$  和阻断  $dv/dt$  能力非常高,可分别达到  $2\,000\text{A}/\mu\text{s}$  和  $20\,000\text{V}/\mu\text{s}$ <sup>[5]</sup>,其工作结温可达  $150\sim 200^\circ\text{C}$ 。目前已研制出 3 000V 的高压 MCT,并有很低的通态压降。MCT 器件分为 P-MCT 和 N-MCT 两种。其中在大电流的应用中,通常使用 P-MCT,而 N-MCT 则具有更大的安全工作区。与 IGBT 相比,MCT 具有更明显的电导调制效应,在相同工作频率下具有更大的功率处理能力。但其关断过程的控制难度要比 IGBT 大,制作工艺也比 IGBT 复杂。

MCT 家族中还有工作原理相同、结构略有不同的基区电阻可控晶闸管(BRT),以及在结构和关断方式上都略有差异的发射极自关断晶闸管(EST)和耗尽型 MOS 可控晶闸管(DMT)。BRT 是利用 MOS 管沟道电阻的可控性来改变晶闸管的基区电阻;EST 是靠 MOS 管的开关来改变晶闸管 N 发射区与阴极的连接状态;而 DMT 则是利用制作在晶闸管 N 基区的 MOS 结构在负栅压下产生的耗尽层来夹断电流。这些器件的潜力和发展前景,在于其通态压降比 IGBT 还要低。表 1-1 给出了 MCT、BRT、EST 及碳化硅场效应器件(SiCFET)在额定耐压均为 600V 条件下的有关数据<sup>[6]</sup>。它们的开关损耗与开关频率之间的关系如图 1-2 所示<sup>[6]</sup>。



表 1-1 几种功率器件的特性参数

| 器件名称    | 正向压降/V | 电流密度/(A/cm <sup>2</sup> ) | 关断时间/ $\mu$ s |
|---------|--------|---------------------------|---------------|
| IGBT    | 3.0    | 100                       | 0.3           |
| BRT/MCT | 1.1    | 100                       | 0.3           |
| EST     | 1.5    | 100                       | 0.3           |
| SiCFET  | 0.1    | 100                       | 0.05          |

目前美国 Harris 公司将推出第二代“P-MCT”、“N-MCT”等新型 MCT 结构。第二代“P-MCT”改善了正向压降与开关速度的折衷关系,并使关断损耗降低了  $1/2 \sim 1/3$ 。而“N-MCT”将以比“P-MCT”开关损耗降低 50%、安全工作区高 3% 的优势取代“P-MCT”和部分 IGBT 的应用领域<sup>[7]</sup>。为改善 MCT 的关断 SOA,人们又研制了沟槽 MCT-TMCT(Trench MCT),如图 1-3 所示。它的开启能力比平面 MCT 更强。然而在此基础上发展起来的双栅沟槽 MCT(DTMCT)则是通过制作第二栅极和在 P 阳极上扩散高浓度  $N^+$  区形成一个附加的 MOSFET,利用这个 MOSFET 结构来控制普通 MCT 的阳极结注入(结构图见第四章)。这样,就使器件在感应关断时的尾部电流能迅速地下降到零,其关断损耗可降低到单栅 TMCT 的  $\frac{1}{10}$  左右<sup>[8]</sup>。对于 MCT 的研究,目前最高击穿电压已达  $5\text{kV}$ <sup>[9]</sup>。可以预言,它将是促进下一世纪初电力电子技术发展的主要器件。

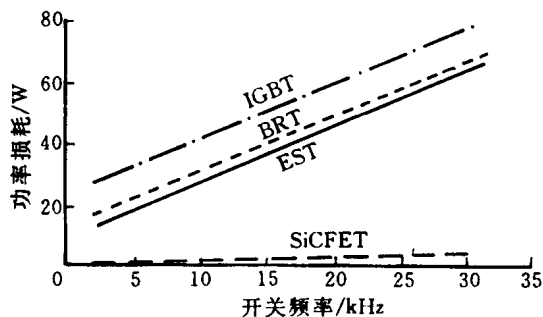
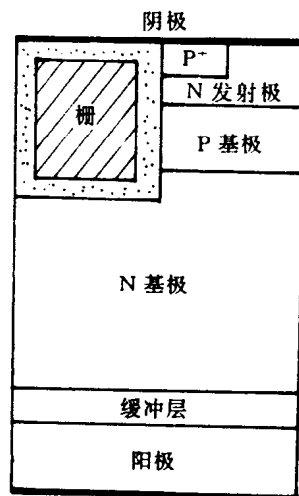


图 1-2 几种功率器件的开关功率损耗与开关频率之间的关系

图 1-3 沟槽 MCT 的结构剖面图<sup>[8]</sup>

## 1.4 功率 MOSFET

由于功率 MOSFET 的开关速度快,安全工作区稳定,其应用领域十分广泛,首先是开关电源领域。随着电子仪器向小型、轻便及高效率发展,系统要求电源小型、轻便、高效率。目前用 IC 直接驱动功率 MOSFET 的开关频率均高于  $100\text{kHz}$ ,在  $1\text{MHz}$  左右高频下工作的 DC/DC 转换器已经问世。在市售功率器件中,功率 MOSFET 的比率约高于

30%<sup>[10]</sup>。第二是办公自动化领域。用 CMOS、TTL 等 5V 电源系列直接驱动的高速、低功耗的功率 MOSFET 正取代达林顿晶体管。带有外围驱动电路或保护电路的功率 MOSFET, 也开始在软盘和打印机等小型步进电机驱动系统中使用; 第三是汽车电子领域。在汽车电气化迅速发展过程中, 具有低功耗、高速度等优点的功率 MOSFET 已经代替了简单机械式的继电器; 第四是家电领域。为提高荧光灯的亮度, 通常采用转换开关电路, 若使开关频率达到 50~60kHz, 最适合的开关器件是功率 MOSFET<sup>[10]</sup>。

为满足电子镇流器和汽车电子点火器等需要, 已研制出能吸收电压高于额定稳定值雪崩能量的功率 MOSFET, 目前市场上已有出售带驱动器、电流限制器、过流、过热和欠压保护的智能功率 MOSFET。

MBMT(MOS Controlled Bipolar Mode Transistor)是一种新型 MOS 控制功率器件, 其等效电路与纵向结构剖面图如图 1-4 所示<sup>[11]</sup>。MBMT 可由 VDMOS 的栅结构构成, 是一个三层结构的器件, 两边的  $N^+$  区和 P 区通过双扩散形成功率 MOS 的沟道,  $P^+$  区用于连接功率 MOS 和双极器件, 以实现两者的结合。该器件可由许多器件单元并联而成, 以形成大的电流输出。器件的导通电流密度和开关速度介于功率 MOSFET 和 IGBT 之间。

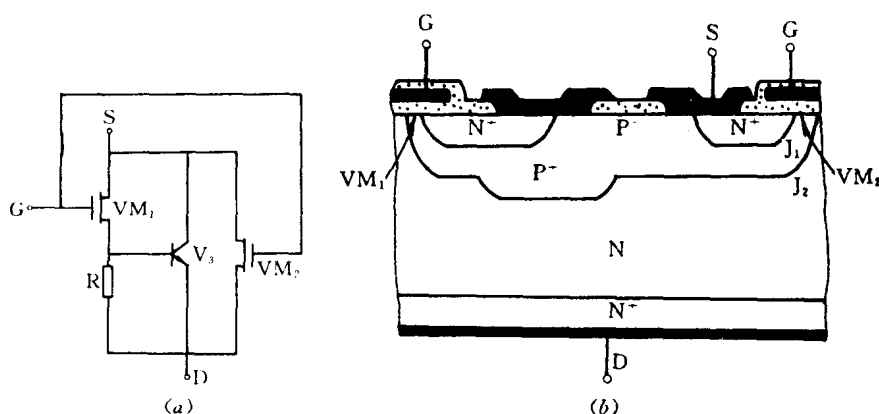


图 1-4 MBMT 的等效电路和结构剖面图<sup>[11]</sup>

(a) 等效电路; (b) 结构剖面图。

MBMT 表现出饱和型的电流、电压特性, 其曲线类似于 VDMOS 的  $I-V$  特性曲线。正向导通时, 电流特性接近于 VDMOS 器件, 它可通过 MOS 栅开通和关断, 使得器件具有较高的输入阻抗。MBMT 的导通电流密度和导通电阻性能均优于功率 MOSFET 和 BJT 器件, 但要比 IGBT 的导通电流密度小。

## 1.5 绝缘栅双极晶体管(IGBT)

由于集电极的正偏置使 IGBT 器件结构中的  $P^+$  区向  $N^-$  漂移区中注入高浓度少数载流子而产生电导调制效应, 减小了开启电阻, 使它能工作在与 GTO 等效的高电流密度下。同时, IGBT 中的电流可以用所加的栅偏置电压来控制。这不仅使 IGBT 器件具备了栅关断能力, 而且对限制集电极电流也有重要的意义。因此, IGBT 集功率 MOSFET 和