

电力电子技术

——电子学在工业中的应用

李致浩

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

本文从半导体器件的结构原理出发讨论了电子学在工业领域中应用的进展。随着电子学工艺技术的飞速发展, 半导体器件的功率容量成量级提高, 半导体器件已成为电力电子学的主力军, 给电子学进入传统工业领域打下了坚实基础。近年来, 电力电子技术与微电子技术的结合产生了新一代的器件: 功率集成器件和智能化的斯玛特功率集成电路。它们显示的广阔应用前景, 必然对工业产生巨大的影响。

一、什么是电力电子学

今天, 电子技术已深入到科学技术的各个领域, 甚至进入到大多数家庭。电子学是研究电子或离子的运动规律及其应用的科学技术, 其内容包括: 电子或离子在真空、气体、液体或固体中的运动; 电子器件(如真空管、半导体器件和无源元件等)的性质和它们在电子线路中的行为及它们的设计和制造技术; 电子线路的结构、功能和应用等。从马克尼、波波夫发现无线电波到今天, 电子学已发展成为一个大家族, 包含许多分支, 如无线电电子学、微电子学、光电子学、高频电子学、传感电子学及计算机技术等。

一提到电子学, 人们脑子里会首先出现收音机、电视机和程控电话等, 认为这是电子学应用的主要领域。它们的共同点是所谓“弱电”, 即在较小的电功率下运行, 也输出较小的电功率。它们的主要功能是信息(数据、声音、图象和文字)的获取、传递、处理、管理和存贮。但除此而外, 还有一个分支、研究大功率电能的转换和控制, 70年代以前叫做工业电子学。由于电力电子器件的功率容量和应用范围的限制, 工业电子学并不象无线电电子学那样普及和应用广

泛。

随着电子技术的发展, 尤其是半导体功率器件技术的进步, 许多电力电子器件相继诞生, 功率控制能力进入到几十、几百万瓦量级。1971年国际电工委员会提出了电力电子学的概念, 正式定义它为“以电力为对象的电子学”。1973年第四届国际电力电子专家会议又提出了一个以倒三角形表示的电力电子学定义: 电力电子学是融合电力、控制和电子三种技术为一体的交叉学科, 是通过电力半导体器件及其集成电路实现电能转换和控制, 以工业应用为主要对象的电子技术。

二、电力电子器件

1. 电力电子器件的发展

人类最早转换电能的尝试应追溯到1882年^[1]。Jamin发现了汞弧整流效应, 可将交流电转换成直流。后来发展了不少真空整流器, 但转换效率和功率远远不能满足工业需要。1883年第一个半导体整流器——硒整流器诞生了, 效率较高, 但只能工作在较低的电压下, 功率问题也没有解决。尽管如此, 在60年代仍可以看到硒整流器产品。

20世纪30年代, Davydov 和 Mott 等人

发展了金属与半导体的整流接触理论^[2]。50年代,面结型工艺出现,大大提高了半导体整流器的功率输出。1956年,Moll等人发表了四层二极管,这就是人们熟知的硅可控整流器(SCR)^[3],给半导体器件进入大功率领域开辟了道路。现今人们叫它晶体闸流管,可以输出3000 A以上的电流,承受5000 V以上的电压。

晶闸管一旦导通,其闸门就失去了控制能力,不能将其关断。这种特性大大限制了SCR的应用。1960年提出了改进型的原理,但直到1970年才出现50 A的由闸门脉冲可关断的晶闸管,取名为闸门可关断晶闸管(GTO)^[4],七年后,市场上有了GTO商品,电流200 A,电压1300 V。今天市场上的GTO,可以输出3000 A的峰值电流,耐压4500 V以上。

近十年来,电力半导体器件如雨后春笋发展很快,新的器件结构不断出现。达林顿结构的双极功率晶体管——巨型晶体管(GTR)已达到耐压1200 V,输出电流200 A,有很低的导通电阻。由功率金属氧化物场效应晶体管(MOSFET)发展出的一种具有优异性能的器件叫双扩散MOSFET,简称DMOS,它不仅开关速度快,输入阻抗高,而且具有极好的温度稳定性^[5]。国际市场已有1000 V,100 A的DMOS功率管出售。

在电力电子器件的研究领域里,对绝缘栅晶体管(IGBT)和静电感应晶体管(SIT)的研究很活跃。IGBT是DMOS的改进型,除保持了DMOS的优点外,还克服了DMOS通导压降高的缺点^[6]。SIT在高频大功率方面是有前途的器件,如双面栅结构已达到1800 V,100 A^[7]。

在我们叙述电力电子器件的发展时,总是用电压和电流来标志水平。这两个参数与可控的功率 P_n 的关系可用下式近似表示:

$$P_n = \frac{1}{3} V_{PFV} I_{AV}, \quad (1)$$

式中 V_{PFV} 表示器件可工作的最高电压, I_{AV} 表示可输出的平均最大电流。

回顾电力电子器件的发展史,我们可以看

到,多年来电力半导体器件停留在以SCR为代表的产品阶段,直到70年代电力半导体技术也都是以双极型工艺为基础。70年代中期功率MOSFET的出现翻开了电力半导体技术新的一页。随着硅集成电路工艺的日臻完善和成熟,电力电子技术开始引入微电子技术。这两种技术的结合使电力电子学产生了一个飞跃。首先,改变了半导体功率器件的传统结构,器件由几千乃至几万个同样的小器件单元集合而成,其结果大大提高了电力电子器件的性能^[8]。有人把这种器件结构方式叫做超大面积集成(VLAI)^[9],集成的结果是一个电力器件(PID)。其次,这两种技术的结合还可以把电力半导体器件与小信号逻辑电路集成在一个半导体芯片上,这不仅可以把控制电路放在电力器件内,而且可以把保护电路放在器件内^[10]。人们把这种器件叫做斯玛特功率集成电路。

2. 电力电子器件的功率界限

电力电子器件与信息电子器件的很重要的分水岭在于功率控制能力上。Gottlieb提出了一个电力电子器件的功率电平判别原则^[11]:在半导体器件或集成电路的设计和制造中,一旦必须认真考虑它们在运行中自身产生的热量对器件本身性能的影响和系统的安全时,就可以认为这样的器件或集成电路属于电力电子范畴。换句话说,对电力电子器件在运行中产生的热量如果不做任何设计上、工艺上和使用上的处理时,这些热量将导致器件变劣或失效。习惯上把器件本身的功耗在3 W以上作为电力电子器件的标准。在实践上,有人也把可以输出1 A以上电流或可以工作在100 V以上电压作为功率电平标准^[12]。这些数字看起来都不大,考虑到半导体器件的效率都在90%以上,这些数值就不是一个很低的标准。现代的电力电子器件的功率控制能力已高达5000 kW以上。

3. 几种典型的电力电子器件

电力电子技术是以电力半导体器件为基础,电力半导体装置为载体。下面我们讨论几种典型的电力电子器件。

(1) SCR 和 GTO

图 1 示出了晶闸管和闸门可关断晶闸管的结构示意图。它们都是四层结构,都有三个PN结。我们先看图 1(a),夹在 J_1 结和 J_2 结之间的N区是个高阻区。器件关断时,若阳极加正的高压, J_2 结承受绝大部分电压;若阴极加正的高压, J_1 结承受绝大部分电压。下面我们用双三极管模型来说明一下它的工作原理,如图 2 所示,晶闸管可以看作是由一个 PNP 三极管与一个 NPN 三极管组合而成。在闸门没有信号时,两个三极管均不导通,整个晶闸管处于阻断状态。向闸门加一个正的信号, NPN 管导通,随即其集电极电流驱动 PNP 管导通,两管均进入饱和,晶闸管输出很低电平,处于导通状态。由于两个三极管的集电极电流分别流向另一管的基极,只要两管的放大系数合适,晶闸管在被闸门信号触发导通后自己本身就可以维持通导,而不再需要闸门信号继续存在。如要关断器件,必须把阳极电压降到零。

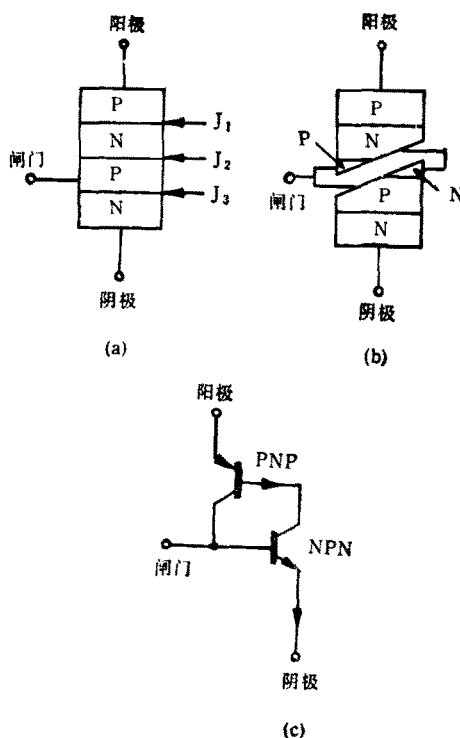


图 2 晶闸管的双三极管模型

(a) 晶闸管的原理结构图; (b) 分解成两个三极管; (c) 双三极管模型

GTO 的工作原理与 SCR 基本相似,其不同点是可以通过闸门关断器件。为实现此点,除适当设计 PNP 和 NPN 两管的电流增益比、减少 NPN 管基区的少子寿命外,还要尽量减小闸门区的寄生电阻,这就产生了图 1(b)所示的多闸门结构。一个闸门和一个阴极构成一个 GTO 的元胞,整个 GTO 由许多这样的小元胞并联集合而成。元胞数可达 20 万个^[13],这已是一个超大面积集成了。

(2) DMOS 和 IGBT

图 3 示出了 DMOS 和 IGBT 的断面示意图,两者的区别仅在于衬底的导电类型不同。我们先来看 DMOS 管,它的电流控制机构是由漏-源电压和栅-源电压产生的电场效应实现的,其特性主要取决于沟道性质。制造 DMOS 时,向同一窗口扩散 P 型和 N 型杂质,用其横向扩散结之差形成沟道。这不仅可以做到精确控制,而且可以获得短至 1—2 μm 的沟道,这是用通常的光刻工艺很难做到的。

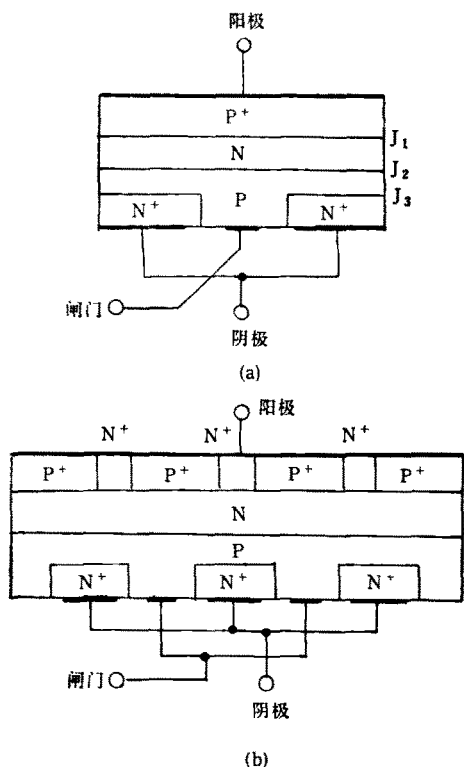


图 1 晶闸管 (a) 和闸门可关断晶闸管; (b) 的结构示意图

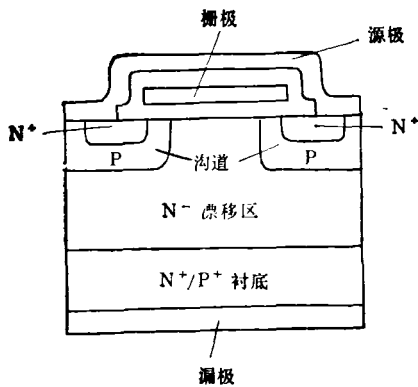


图3 DMOS 和 IGBT 断面结构示意图

图3所示的N沟道DMOS在工作时漏端加高电位,源端接低电位,当栅极电位高于源极电位到一定程度时,由于感应扩散P沟道区形成一个N型层,电子便从N⁺源区通过沟道平行于表面流向N⁻衬底,继而往下流向N⁺漏区。栅极电位的高低控制了漏极电流的大小。一般说来,一个功率DMOS是由十几万至几十万个小DMOS并联而成,图3示出的仅是一个元胞。

DMOS比GTR的通电阻大,因为电流要流过一个N⁻区和N⁺区。1982年,提出了DMOS的改进型,叫IGBT,用P⁺衬底代替了漏区的N⁺衬底^[6],形成了一个纵向PNP晶体管。在IGBT通导时,这个PNP管进入饱和,饱和压降很低,使得整个器件表现出相当低的通电阻。

(3) SIT

图4示出了一个典型的SIT结构,它又叫隐栅晶体管,因其控制栅是隐埋在器件内部的。从原理上说,其工作原理很类似于结型场效应晶体管,当改变栅极对阴极的电位时,P型栅区与本底N区的PN结的耗尽层随之改变,从而控制了阳极电流的大小。图4所示的是器件的断面,如从顶部看,隐埋的栅区(图中的P⁺区小圆圈)是一长条并通过端点连在一起。

通过前面的讨论可以看到,电力电子器件应有大的功率控制能力,但从应用的角度,还应具备高输入阻抗、低通电阻、高的工作频率等性能。特别是高的工作频率,我们将在后面的讨

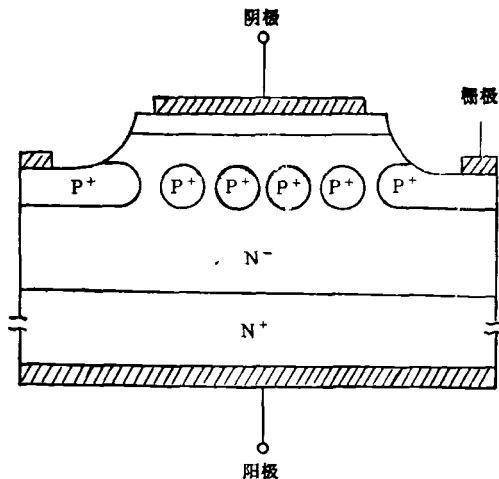


图4 SIT 结构示意图

论中看到它的特殊意义。比较一下我们谈到过的器件的频率特性,可以看到不同器件结构在频率方面的改进。SCR是个低频器件,一般可工作在几百赫芝至2kHz的频率下,GTO可工作在3kHz下,而GTR和IGBT的工作频率可达15kHz,DMOS和SIT是频率上的娇娇者,工作频率可为500kHz。

4. 热设计考虑

电力电子器件本身的功率耗散是由于部分电能被转化为无用功引起的,大致由下列几种原因引起:

- (1) 器件导通时由通导压降和电流引起的损耗;
- (2) 器件在阻断态由漏电流引起的损耗;
- (3) 器件在通导和阻断两状态转换时的开关损耗,其大小与开关频率成正比。

这些损耗全转变为热量。导致器件本身温度上升,电力电子器件的温升是不可避免的,问题是不能太高。过高的温升不仅说明器件的工作效率低,更主要的是会使器件性能变劣,并大大降低可靠性。器件的结构和设计应使器件内部有均匀的热场分布,不要有过热点,同时要使芯片产生的热量能尽量多和快地传导出。设热传导为P,则有

$$T_{vj} = T_s + PR_h, \quad (2)$$

式中 T_{vj} 为管芯的温度, T_s 为器件外壳附近

的温度, R_{θ} 为器件的总热阻。为了使用时的安全, 一般应保证 T_{vj} 不超过 150°C 。从 (2) 式可见, 器件的封装材料要有尽可能小的热阻, 同时, 使用时的环境温度应尽量低。

5. 安全工作区 (SOA)

电力电子器件的额定最高电压和最大电流并不能完全限定器件的安全工作区。由于温升的限制, 安全工作区要比额定电压和电流所限定的区域小。作为一个例子我们来看图 5 所示的 GTR 的正向安全工作区。这是一个双对数直角坐标系, 纵轴表示器件电流, 横轴表示器件上的压降。AB 为额定最大电流线, DE 为额定最高电压线。器件不能工作在 $BB'C'$ 这个三角区内, 因为超过了器件最大允许功耗; 也不能工作在 $CC'D$ 这个三角区内, 因为 GTR 存在二次击穿。GTR 只能工作在 OABCDE 这个多边形里, 这就是 GTR 的安全工作区。DMOS 不存在二次击穿效应, 安全工作区为 $OABC'E$ 。

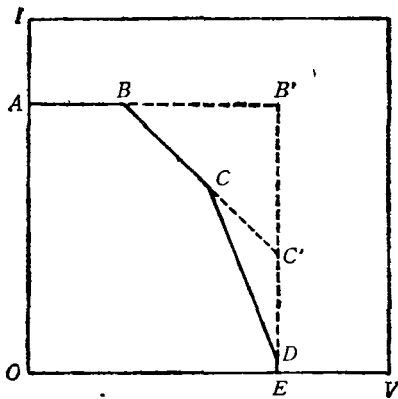


图 5 GTR 的安全工作区 (SOA)

三、斯玛特功率集成电路 (SPIC)

SPIC 是电力电子技术与微电子技术结合的产物, 是用微电子技术把保护电路、逻辑电路甚至传感器与电力电子器件制作在一起^[4]。图 6 给出了一个 SPIC 芯片的电路结构框图的例子。SPIC 不仅可以对器件的过压、过流和过温进行限制, 还可在短路或开路状态下对器件进行保护以防止损坏。这对于电子系统

物理

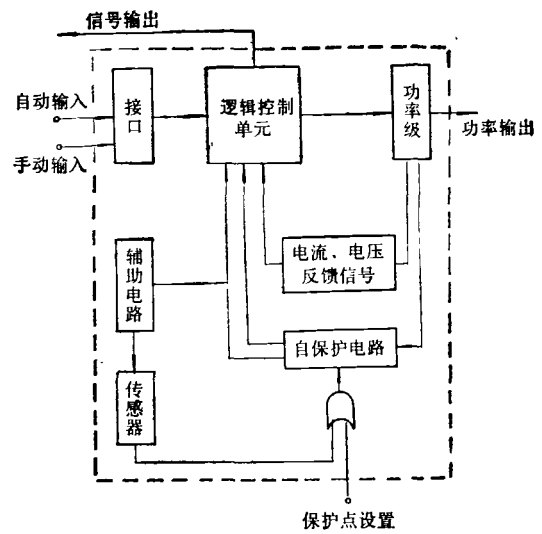


图 6 SPIC 的一种可能结构框图

是非常可贵的。除此而外, 由于内部有逻辑电路, 可以进行信息处理, 可以把一些运行参数传递出来或指示出呈现不正常状态的部位。当系统的某部分运行不正常时, SPIC 可以切换系统的工作模式或切换电流, 此时运行的性能可能有所下降, 但却能保持继续运行。

SPIC 与通常的集成电路有所不同。集成电路的发展目标是扩大集成规模, 其标志是一个芯片上的元件总数, 现在可达每片 10^8 个元件; 而 SPIC 的目标是增强电功率的控制能力, 并尽可能增加诸如保护、检测和诊断等功能。在工艺技术上, 集成电路需要发展细线条和浅结技术, 以达到扩大集成规模和提高速度的目的; 而 SPIC 主要需解决功率技术与微电子技术的相容工艺, 高低电压的隔离, 电压和电流的承受能力等。因而, 从学科的角度, SPIC 与微电子技术属于不同分支。

综上所述, SPIC 的出现使得有可能把目前电力电子系统的一些功能集中到功率集成电路内部, 并且易于与计算机或微处理器相连。可以预见, SPIC 的出现必然引起电力电子系统的质的飞跃。

四、电力电子技术的应用领域和意义

电力电子技术已大大超越了昔日仅仅作为

电功率整流的范畴,已经并将更深入地进入工业的各个领域。从物理的角度,电力电子技术应用在三个方面:运动的控制,能量形式的转换和传递,频率转换。

电力电子技术是通过电机调速实现对运动的控制,如风机、水泵、升降机、电磨、电气车辆及机车之类。在能量的转换和传递方面,电解、电镀、电焊、感应加热、电热炉以及照明等都是很好的例子。在这些应用中,电力电子技术将电能转化为化学能、热能和光能。在频率转换方面,如交直流变换,电能的频率变换等,大型计算机需用 400 Hz 电源,就可以用电力电子技术转换 50 Hz 电源而获得。

电力电子技术应用在传统的工业领域的意义在于节约能源,减少原材料消耗,改进工业产品的结构和形式,提高生产效率。下面让我们以电机驱动为例来进行讨论。

法拉第电磁感应定律说:感生电压正比于闭合回路中磁通量随时间的变化率。于是,感生电压可表为

$$V = - \frac{d}{dt} \int BN dS. \quad (3)$$

工业用电源均为正弦波,故(3)式可写为

$$V = 4.44NSB_m f, \quad (4)$$

式中 N 为回路的线圈匝数, S 为闭合线圈的面积, B_m 为最大磁通量密度, f 为工作频率。从(4)式可见,同一输出功率的电机或变压器的体积(进而重量)与频率成反比。如果我们能够用电力电子技术把电源频率升高后再加到电机或变压器上,在同样输出功率的条件下,它们的体积就会大大减少,就会节省很多金属材料,节省一些驱动能量。例如,逆变式电焊机在采用常规硅整流器时,重量为 320 kg;采用工作在 2 kHz 的 SCR 时,重量为 37 kg;采用工作在 20 kHz 的 DMOS 时,则重量可减到 24 kg。输出 80 kW 的高频感应加热炉是另外一个例子,应用电力电子技术后,输入功率可由 150 kW 减到 110 kW,而体积和重量可减少三分之二。

长期以来,电机的调速都靠变换传动齿轮,

但电机输出的轴功率是恒定的。采用电力电子变频调速技术就可以使电机的轴功率随着负荷的变化而改变。想象一下全国有多少电机在工作,如果全部采用电力电子技术,节省的能源和材料将会是多么可观。

电力电子技术在消费类产品中也大有用武之地。变频节能灯是例子之一。白炽灯的发光效率约为 10lm/W,普通的荧光灯为 20lm/W,而 DMOS 变频稀土荧光灯的发光效率为 50 lm/W,它在同样的照度下比白炽照明灯节电五倍。

电力电子技术在工业中的应用是不可能在一篇短文里叙述全面的。它的生命力,它的巨大的意义是显而易见的。目前,世界上各发达国家如美国、日本和意大利都相继投入大量人力、物力发展包括 GTO, DMOS, IGBT, SPIC 在内的新一代电力电子器件。我国目前能源和原材料的利用效率不高,在我国加速发展电力电子技术迫在眉睫。

- [1] O. K. Marti and H. Winogard, Mercury Arc Power Rectifiers, McGraw-Hill, New York, (1930).
- [2] Milan Kubat, Power Semiconductors Springer-Verlag, Berlin, (1984).
- [3] S. K. Ghandhi, Semiconductor Power Devices, Wiley, New York, (1977).
- [4] T. C. New et al., IEEE Trans. Electron Devices, ED-17-5 (1970), 760—771.
- [5] V. A. K. Temple and P. V. Gray, Tech. Dig, IEDM Washington D. C. IEEE Inc., N. Y., (1979), 88—92.
- [6] B. J. Baliga et al., Tech Dig., IEDM San Francisco Calif, IEEE Inc., N. Y., (1982), 264—267.
- [7] J. Nishizawa and T. Tamamushi, IEE 3rd Int. Conf. on Power Electronics & Variable-Speed Drives, (1988), 21—24.
- [8] J. M. Peter and B. C. Nadd in Proc. IEEE IAS Annual Meet, IEEE Inc., N. Y., (1987), 512—514.
- [9] P. Antognetti, Power Integrated Circuits, McGraw Hill, New York, (1986).
- [10] H. Abramowitz et al., Electronic Design, 35-14(1987), 93—100.
- [11] I. M. Gottlieb, Power Control with Solid State Devices, Reston Publishing, Virginia, (1985).
- [12] A. Fury, Electronics, 61-8 (1988), 135—146.
- [13] B. J. Baliga, Tech. Dig., IEDM Los Angeles, IEEE Inc., N. Y., (1986), 102—105.
- [14] H. Abramowitz et al., Electronic Design, 35-14, (1987), 93—100.