

目前我国兆瓦级新型电力半导体器件

张 明

(南车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 介绍了大型相控晶闸管、IGBT 及 IGCT 三种兆瓦级新型电力半导体器件的发展、技术特征和应用领域, 初步探讨了器件的物理极限和未来的发展方向。

关键词: 大型相控晶闸管 (PCT); 绝缘栅双极晶体管 (IGBT); 集成门极换流晶闸管 (IGCT); 兆瓦级

中图分类号: TN303

文献标识码: A

文章编号: 1671-8410(2012)01-0001-08

Current Novel Power Semiconductor Devices with Megawatts Level of China

ZHANG Ming

(CSR Zhuzhou Institute Co.,Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: It is introduced the development, technique performance and the application field of megawatts grade new power semiconductor devices such as large PCT, IGBT and IGCT. The physical limitation and future development of the devices are primarily discussed.

Key words: PCT; IGBT; IGCT; megawatt grade

0 引言

半导体器件种类繁多, 应用领域十分广泛, 是一个十分庞大的家族, 其工作机理涉及到电、光、声、磁、热、力等各类物理效应。

电力半导体器件是器件的一个分支, 它的成员众多, 在电路中作为开关用于控制与变换电能。电力半导体器件按工作方式可分成: 不控型、半控型、全控型。当今各种功率电路变流器均是应用这三类基本方式及其组合来实现的。

电力半导体器件通常按其容量分为大、中、小三种, 大型器件若按兆瓦级划分则具有重要意义。

当前, 兆瓦级新型电力半导体器件具有如下特征:

(1) 各国制造商大致以兆瓦级为界限选择其业务方向或进行区别性产品开发;

(2) 产品的设计、制造、测试和试验全程成本高、难

度大、风险高和周期长;

(3) 产品的测试及应用面临对材料、结构及方法的终极性探索和考验;

(4) 适用于能源、电力、交通、工矿、军工等领域重要技术装备中的电力电子开关;

(5) 应用中对电网的影响大, 但又适合于对电网污染进行综合治理;

(6) 属于发达国家半导体尖端技术, 其技术转让受到严格限制。

因此, 兆瓦级新型电力半导体器件是一种高科技产品, 对国民经济发展和相关行业的技术进步能产生深刻的影响。

当今, 兆瓦级新型电力半导体器件的主流产品有三种^[1]: (1) 大型相控晶闸管 (PCT)^[2]; (2) 绝缘栅双极晶体管 (IGBT)^[3]; (3) 集成门极换流晶闸管 (IGCT)^[4]。

该三种产品称之为主流, 一方面是因为它们在技术上发展很稳健; 另一方面是由于它们与其应用领域的结合很密切, 基本能满足电力电子技术中各种兆瓦级装备的需求。

收稿日期: 2011-09-15

作者简介: 张明 (1955-), 男, 高级工程师 (教授级), 长期从事 GTO 及 IGCT 等全控型电力半导体器件的理论研究及产品研发工作。

为此 ,当前我国电力半导体产业应明确发展方向 ,优先发展这三种兆瓦级器件 ,用它们来支撑我国电力电子技术及装备的全面提升 ,促使国民经济沿着低碳、节能、绿色的方向健康发展。

1 三种新型器件的发展水平

本文在讨论新型器件发展的主流方向之前 ,先确定几个概念 :

- (1)器件转换功率。 P_z (MW) = 器件额定阻断电压 (kV) × 器件额定特征电流 (kA)。
- (2)兆瓦级器件。特指转换功率 $P_z \geq 1$ MW 以上的器件。
- (3)大型晶闸管。一种电流触发的半控型晶闸管 ,

特指单芯片直径接近 5 英寸或 6 英寸的相控型器件 ,其转换功率 $P_z =$ 额定阻断电压 (kV) × 通态平均电流 (kA)。

(4)IGBT。一种电压触发的全控型晶体管 ,特指阻断电压在 3 300 V 以上的 HV IGBT ,转换功率 $P_z =$ 正向阻断电压 (kV) × 集电极峰值电流 (kA)。

(5)IGCT。一种电流触发的全控型晶闸管 ,特指阻断电压在 4 500 V 以上的器件 ,转换功率 $P_z =$ 正向阻断电压 (kV) × 可关断峰值电流 (kA)。

国际上排名前三位的电力半导体厂商非常关注三类器件的发展 ,其典型高端产品以及我国一家厂商的产品见表 1 ,其中 ABB 公司的三种器件的综合发展程度最高。

表1 国内外4家公司的电力半导体器件
Tab.1 Power semiconductors of domestic and abroad 4 companies

公 司	P C T	I G B T	I G C T
Infineon	3.9 kA/5.35 kV (20.9 MW) ; 1.85 kA/7 kV (13 MW) ; 2.74 kA/8 kV (22 MW)	1.2 kA/3.3 kV (3.96 MW) ; 1.5 kA/3.3 kV (4.95 MW) ; 0.6 kA/6.5 kV (3.9 MW)	无
Mitsubishi	0.8 kA/4.5 kV (3.6 MW) ; 1.5 kA/12 kV (18 MW)	1.2 kA/3.3 kV (3.96 MW) ; 0.9 kA/4.5 kV (4.05 MW) ; 0.6 kA/6.5 kV (3.9 MW)	0.4 kA/6.5 kV (2.6 MW) ; 0.8 kA/6.5 kV (5.2 MW) ; 1.5 kA/6.5 kV (9.8 MW)
A B B	2.81 kA/6.5 kV (18.3 MW) ; 3.46 kA/6.5 kV (22.5 MW) ; 1.2 kA/8.5 kV (10.2 MW)	1.2 kA/3.3 kV (3.96 MW) ; 0.8 kA/4.5 kV (3.6 MW) ; 0.6 kA/6.5 kV (3.9 MW)	4 kA/4.5 kV (18 MW) ; 3 kA/6 kV (18 MW)
株洲南车时代电气股份有限公司	1.9 kA/7.5 kV (14.3 MW) ; 5 kA/7.2 kV (36.0 MW) ; 5 kA/8 kV (40 MW)	0.8 kA/3.3 kV (2.64 MW) ; 1.2 kA/3.3 kV (3.96 MW) ; 0.6 kA/6.5 kV (3.9 MW)	4 kA/4.5 kV (18 MW) ; 3 kA/6 kV (18 MW)

株洲南车时代电气股份有限公司根据国家建设的需要 ,结合自身从事轨道交通牵引电气化及铁路电气化的特点 ,选取了大型 PCT、IGBT 和 IGCT 这三种兆瓦级新型电力半导体器件作为公司半导体板块的重点发展方向^[5]。

该公司的大型晶闸管产品已在国内 3 条高压直流 (HVDC) 输电线路中得到成功应用 ,800 A/3 300 V IGBT 模块已用于上海地铁 1MW 牵引变流器 ,4 000 A/4 500 V IGCT 器件正试用于 9 MW 工业变频器。

2 三种新型器件的技术特征

器件的技术特征涉及其工作模式、结构分类、工艺方法、性能参数及应用范围等方面 ,下面简述三种新型器件的技术特征。

2.1 大型 PCT

PCT 是应用最早和最广的半导体器件 ,而大型 PCT 晶闸管则是近 10 年随着 HVDC 迅速发展起来的 ,其主要

技术特征如下 :

器件类别	三端半控型晶闸管开关
控制方式	门极电流控制器件开通
扩散结构	PNPN 4 层结构 ,阴极设短路点 (图 1)
图形结构	阴极端放大门极 ,圆形芯片 (图 2)
封装结构	压按式封装 ,双面冷却 (图 3)
驱动单元	通常由变流器制造方提供
新型技术	全压接芯片封装技术 ; 双负角台面造型技术 ; 恢复电荷控制技术 ; 芯片变形补偿技术
等效电路	双晶体管模型 (图 4)
产品类型	对称型 (主流) ; 非对称型
电压等级	6 500 V ; 7 500 V ; 8 500 V ; 12 000 V
电流等级	1 500 ~ 5 000 A
转换功率	20 ~ 24 MW (5 英寸) ; 36 ~ 40 MW (6 英寸)
开关频率	约 100 Hz

门极功率 约20 W
应用方式 门控开通 过零关断的低频开关
单体功率 8~10 MW(5英寸) ;14~16 MW(6英寸)
串并联工作 可串宜并(电荷控制 ,正温度系数)
应用领域 相控整流器、有源逆变器

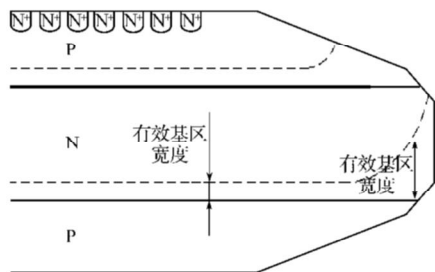


图1 晶闸管纵向结构
Fig.1 Vertical structure of PCT

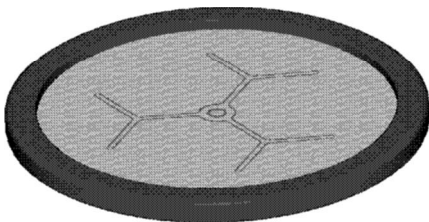


图2 晶闸管芯片图
Fig.2 Wafer of thyristor

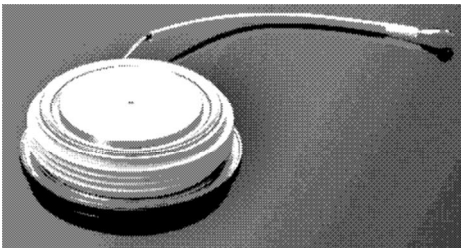


图3 晶闸管元件
Fig.3 Thyristor component

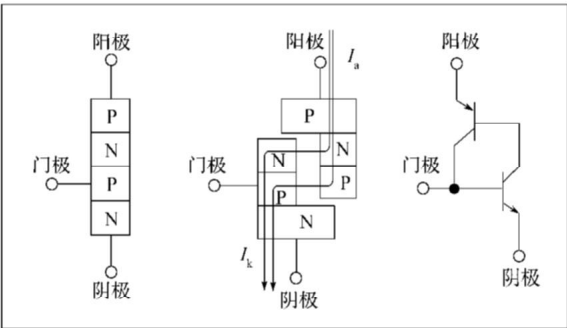


图4 晶闸管双晶体管模型
Fig.4 Model of PCT

PCT是为工频(50~60 Hz)而设计的 ,要求其通态压降要低 ,其阻断电压则视具体应用而定。PCT通常适用于大功率直流电源、直流传动、交流电机软启动、静止无功补偿器、交流电机软启动、交 - 交变频系统、有源逆变系统以及HVDC输电系统。

大型PCT主要应用于HVDC输电系统。在HVDC输电系统中 ,国际上普遍采用5英寸以下的PCT元件。近5年来 ,中国在上世界上首次使用6英寸PCT替代5英寸器件 ,使HVDC输电走廊的传输能力提高60%左右。

2.2 IGBT

IGBT^[6]是当今最热门的全控型半导体开关器件 ,在应用上覆盖相当广泛的功率及频率范围。中低端的IGBT有几百kHz的开关频率 ,但高端的HV IGBT的工作频率随着其开关损耗增大而大幅下降 ,其主要技术特征^[7]如下 :

器件类别	三端全控型晶体管开关
控制方式	门极电压控制器件开通与关断
扩散结构	PNPN 4层结构+p沟MOS栅控(图5)
图形结构	集电极多原胞分布 ,方形单元芯片(图6)
封装结构	多片并联式模块封装 ,多焊丝引线连接 ,单面冷却(图7)
驱动单元	通常由变流器制造厂商提供
新型技术	原胞设计(条、方、正六边形) ; 栅极设计(平面栅或沟槽栅) ; 终端设计(场限环或场板结构) ; 纵向设计(穿通、非穿、场阻)
等效电路	双晶体管+p沟MOS栅控(图8) ^[8]
产品类型	斩波器模块 ;双开关模块 ; 半桥模块 ;单开关模块
电压等级	3 300 V ;4 500 V ;6 500 V
电流等级	600~1 500 A
转换功率	2.5~4 MW
开关频率	500~1 000 Hz(高端器件)
门极功率	约10 W
应用方式	PWM控制的中高频开关
单体功率	0.6~1 MW(二电平) ;1.2~2 MW(三电平)
串并联工作	宜串宜并(低存储电荷 ,正温度系数)
应用领域	电压源变流器(VSC)

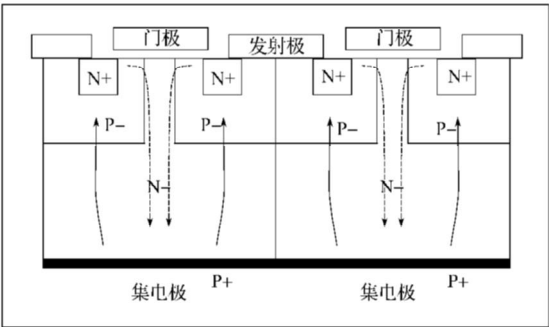


图5 IGBT纵向结构图
Fig.5 Vertical structure of IGBT

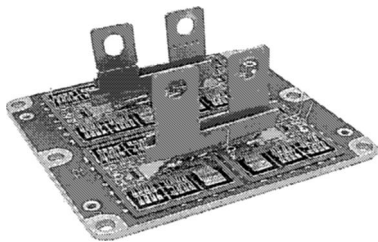


图6 IGBT 芯片布置图
Fig.6 Layout of IGBT wafer

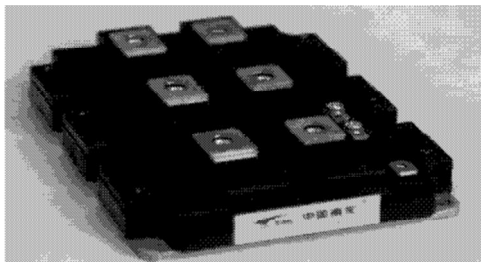


图7 IGBT 模块样图
Fig.7 Outline of IGBT module

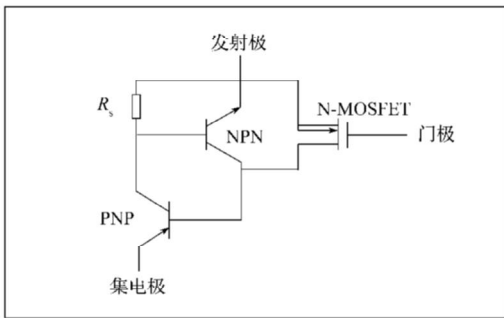


图8 IGBT 等效电路图
Fig.8 Equivalent circuit of IGBT cell

同IGCT相比,IGBT的最大优势是通过栅极控制器件工作区的转移,对器件进行过流及 di/dt 保护。

IGBT的设计与制造技术汇集了当代微电子科技有限公司的最高成就。目前世界上只有少数几家大公司掌握该相关的先进技术,中国当前在这一领域还有相当大的差距。2008年,株洲南车时代电气股份公司通过并购英国DYNEX半导体公司,大大缩小了这种差距。

2.3 IGCT

IGCT是通过对传统GTO实施硬开关技术变革而产生的一种新型全控式半导体开关器件,它吸取了GTO功率大和IGBT频率高的优点,成为当前功率最大的全控器件。IGCT的主要技术特征如下:

器件类别	三端全控型晶闸管开关
控制方式	门极电流控制器件开通与关断
扩散结构	PNPN 4层结构 阴极无短路点 (图9)
图形结构	阴极多梳条分布 圆形芯片 (图10)
封装结构	压按式封装 双面冷却

驱动单元	器件厂特配的低感化门驱单元 (图11);单脉冲测试波形 图12)
新型技术	低感门阴回路实现硬开关;阳极透明发射结构,优化开关;阳极缓冲层结构,减小硅片厚度;集成二极管,减小体积(可选)
等效电路	双晶体管模型 图4)
产品类型	非对称型(外并二极管 主流); 逆导型(内并二极管);逆阻型(内串二极管)
电压等级	4 500 V ;5 500~6 500 V
电流等级	4 000 A 3 000 A(非对称型); 1 100 A 2 200 A(其他类型)
转换功率	15~20 MW(非对称型); 5~10MW(其他类型)
开关频率	500~1 000 Hz
门极功率	约100 W
应用方式	PWM控制的中高频开关
单体功率	3~5 MW(二电平);6~10 MW(三电平)
串并联工作	宜串宜并 (低存储电荷,正温度系数)
应用领域	电压源变流器(VSC); 电流源变流器(ISC)

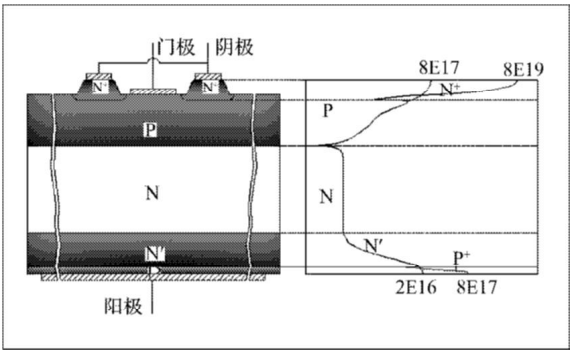


图9 IGCT 芯片纵向分布图
Fig.9 Vertical structure of IGCT's wafer

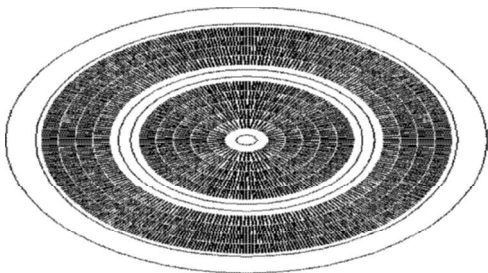


图10 IGCT 芯片梳条示意图
Fig.10 Layout of IGCT's fingers

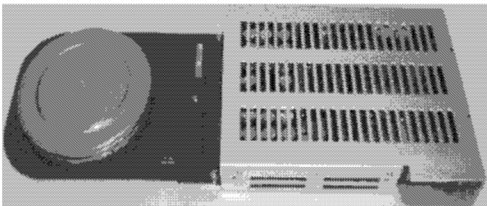


图 11 国产 4045IGCT 器件外观图
Fig.11 Outline of domestic 4045IGCT

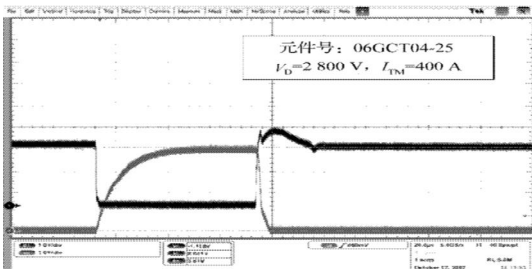


图 12 国产 4045IGCT 单脉冲开关波形
Fig.12 Single pulse switch waveforms of domestic 4045IGCT

同 IGBT 相比,IGCT 的最大优势是在同等的工作频率下,具有 4 倍以上的转换功率,且其电流浪涌能力及散热结构要优于 IGBT。但 IGCT 只能执行单纯的开关,没有从门极控制工作区转移的能力,因此对过流及 di/dt 的控制,IGCT 只能采取其他的办法,这是其弱项。

IGCT 和 IGBT 各有其优缺点,这是因为它们分别源于晶闸管和晶体管。真正十全十美的理想器件目前并不存在,我们应当认识到这种情况,区别对待,合理开发利用各自的优势,让它们共同来完成电力电子技术赋予的各项任务,造福于人类。

2.4 三种器件的重要参数
三种器件的重要参数及试验见表 2。

表 2 三种器件重要参数与试验
Tab.2 Major parameters of three devices and their tests

	PCT	IGBT	IGCT
静态	通态平均电流 I_{TAV} (A) ; 正 / 反向阻断峰值电压 V_{DRM} / V_{RRM} (V) ; 通态峰值电压 V_{TM} (V) ; 正向浪涌电流 I_{TSM} (A)	集电极电流 I_C (A) ; 集发阻断电压 V_{CES} (V) ; 集发饱和电压 $V_{CE(sat)}$ (V) ; 集电极峰值电流 $I_{C(pk)}$ (A)	门极可关断峰值电流 I_{TGM} (A) ; 正向阻断峰值电压 V_{DRM} (V) ; 通态峰值电压 V_{TM} (V) ; 正向浪涌电流 I_{TSM} (V)
动态	反向恢复电荷 Q_{rr} (μ C) (均匀性)	总开关能量 E_{sw} (J 或 mJ)	开通 / 关断能量 E_{ON} / E_{OFF} (J)
试验	高温阻断试验 ; di/dt 试验 ; dv/dt 试验 ; 动态雪崩试验	频率试验 ; 短路电流试验	驱动单元专项试验 ; 频率试验

3 三种新型器件的应用领域^[9]

电力半导体器件是电力电子技术的三大基础之一,更是电力电子装置的核心部件,故成为电力电子技术发展的源动力。新型器件的出现往往导致电力电子技术革命性的发展,事实上电力电子技术的每一次飞跃都是以新器件的出现为契机。作为源头的器件发展,首先直接带动了电力变流器水平的整体提升,由此直接或间接地关联到所有的工业部门。

以上三种电力半导体器件经过物竞天择式的进化已成为当今的主流器件,它们对当今各工业领域中电力电子技术产业链的形成、发展、壮大和普及举足轻重,对缓解当今世界纷呈的各类社会经济矛盾与冲突至关重要,受到各国的深度关注。

3.1 电力电子技术产业链

电力电子技术产业链如图 13 所示,电力半导体器件的发展将以 5 倍的比例带动电力变流器行业的发展,并以 10 倍以上的比例推动相关工业领域的发展。

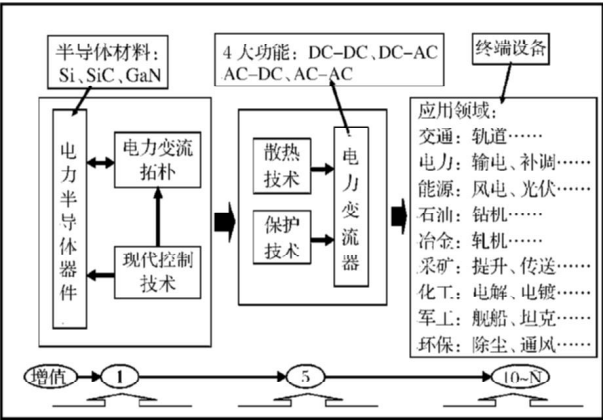


图 13 电力电子产业链
Fig.13 Industrial chain of power electronics

3.2 电力系统应用领域

中国有一个庞大的电力网络,为国民经济高速发展和人民群众日常生活提供了主要能源保障。电网从发电、输变电、到用户端的供应等环节均涉及到供电系统的能力、效率、安全和质量。

电力行业可归结为“输变电”和“电能质量管理”两

类应用,其中包括:

(1) 高压直流输电^[10]。20 MW以上的大型晶闸管主要用于HVDC输电,采用6英寸器件能够提高输电的能力,开关型器件可以消除有源逆变引起的无功与谐波,未来的SiC器件可以提高输变电系统的效率。

(2) 轻型直流输电。它使用以开关型电力半导体器件为基础构成的电压型逆变器,具有很高的功率因数及波形质量,IGBT和IGCT将成为其主型器件。

(3) 智能电网。以Facts技术^[11]为基础,综合实现电网的安全、高效、智能化和互动性,其中涉及的有源电力补偿控制器如:静止同步补偿器(STATCOM)、统一潮流控制器(UPFC)、统一电能质量调节器(UPQC)、动态电压恢复器(DVR)等将会大量使用全控型电力半导体器件,尤其是IGBT和IGCT。10 MW左右的相控晶闸管被大量用于静止无功补偿器(SVC)。

3.3 新能源

传统的能源并非取之不尽又用之安全,为了缓解传统能源消费所产生的压力,开发新型、高效、安全、持久的新能源成为了人们的新追求,也成为电力电子技术展现其风采的新领域。

(1) 新能源发电。风力发电、大型光伏发电、潮汐发电、浪波发电等在能量转换及并网时均用到电力变流器,基本上都是采用PWM控制的开关技术实现变换。

(2) 储能技术。超导电感储能和超级电容储能通常作为新能源电站的调剂,其能量的储存及释放均是通过PWM四象限变流器来实现的。

因此,新能源行业将大量使用IGBT和IGCT器件,单体变流器以3 MW为参考分界线。

3.4 节能与环保^[12]

提高能源的利用效率,减少其损耗会关系到人类活动所创造的经济效益以及对环境产生的负面作用这对矛盾。电力电子技术恰能对其实行有效的协调。

(1) 电机变频调速。变频调速不但控制精度高,而且节能显著,如大量使用的风机和水泵的场所采用变频调速取代挡板调速可节能20%以上,这涉及到所有的传统工业。

(2) 无功控制及消谐。PWM变流通过控制功率因数和削减高次谐波,可大大降低其在线路中的损耗。

(3) 能量回馈电网。采用四象限的PWM变流技术,能将负载的制动能回馈到电网,实现进一步节能。

(4) 新型环保技术。应用电力电子节能,能高效利用现有发电装机容量,减少因过量发电造成对环境的过度污染。现有煤发电行业流行一种碳捕获技术,能将

排气中95%的二氧化碳压缩成干冰后注入距地面1500 m以下深处永久封存。整个处理过程中,也要大量采用PWM变流器来控制各种电机工作。

3.5 军工

(1) 航船驱动。包括航母在内的舰船需要强大的电驱动系统,一般是采用PWM变频调速方式来实现。

(2) 电磁火炮。据报导,国外已将采用IGCT器件的变流器装备到新一代坦克及火炮上。

上述行业的发展均需要大量的IGBT和IGCT器件的支持,目前主要是从少数几家国外公司进口相关的器件,或者直接购买变流器。相比相控器件,国内全控器件与国外的差距要大得多,这对中国的经济发展及国家安全是极为不利的。

4 三种新型器件的物理能力与限度

这三种器件当前均是以硅材料为基底制成的,受各种物理因素限制^[13],必定存在工作极限,下面将对此进行初探^[1]。

4.1 器件的温度极限

材料中的本征载流子浓度 n_i 受温度 $T(K)$ 及材料的禁带宽度 E_g 制约:

$$n_i = 3.44 \times 10^{15} T^{3/2} e^{-E_g / 2kT} \quad (1)$$

取 $E_g = 1.12$ eV(Si)、3.1 eV(SiC)代入上式计算Si和SiC^[14]两种材料的 n_i 温度曲线,如图14所示。

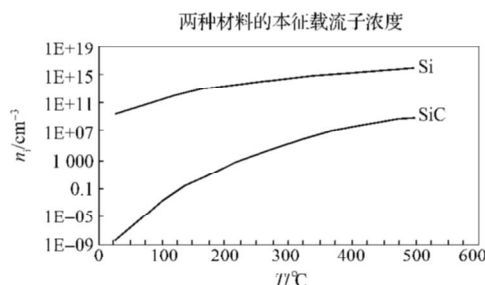


图14 本征载流子浓度 n_i

Fig.14 Intrinsic carrier concentration n_i

材料中掺入的杂质浓度 N_B 决定了PN结的耐压能力,但当 n_i 随温度增加超出 N_B 时,PN结就会失效。因此, n_i 值较低的材料,其失效温度将更高。

4.2 器件的耐压极限

PN结的击穿电压 V_{BRM} 与杂质浓度 N_B 和禁带宽度 E_g 的关系为:

$$V_{BRM} = 60 \left(\frac{E_g}{1.1} \right)^{2/3} \left(\frac{N_B}{10^{16}} \right)^{-3/4} \quad (2)$$

为了保证杂质浓度 N_B 在器件中起主导作用,应使器件工作温度范围内的 $N_B \gg n_i$ 。如果按 $N_B = 10n_i$ 考虑,则可计算出PN结的工作结温 T_{jm} ()及对应的理论击穿

电压 V_{BRM} (V) (图 15)

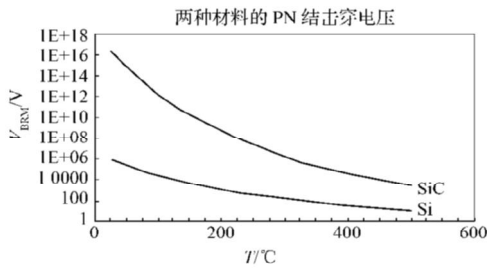


图 15 击穿电压 V_{BRM}
Fig.15 Breakdown voltage V_{BRM}

由上图可查得：Si 在 $T_{jm}=125$ 时， $V_{BRM}=12\ 000\text{ V}$ ；而 SiC 在 $T_{jm}=450$ 时， $V_{BRM}=12\ 000\text{ V}$ 。

工程上为了确保产品质量的安全可靠及配套件的兼容性，通常要离“极限值”有一定的安全裕度。因此，实际的 Si 器件的最高电压一般达到 $9\ 000\text{ V}$ ，而实际 SiC 的工作结温目前也多在 350 以内。

4.3 硅器件的工频电流能力

器件在工作中会产生损耗和发热，为了使结温不超过额定值，必须采用散热装置带走多余热量，当散热功率 P_S 与发热功率 P_F 平衡时，结温将是稳定的。

$$P_F = V_{TO} I_{T(AV)} + 2.46 \times 10^{-3} r_T I_{T(AV)}^2 \quad (3)$$

$$P_S = (T_{jm} - T_C) / R_{THJC} \quad (4)$$

令 $P_S = P_F$ ，可解出 $I_{T(AV)}$ 。

$$I_{T(AV)} = \sqrt{\left(\frac{203V_{TO}}{r_T} \right)^2 + \frac{406P_S}{r_T}} - \frac{203V_{TO}}{r_T} \quad (5)$$

式(3)~式(5)中： $I_{T(AV)}$ ——通态平均电流(A)； V_{TO} ——门槛电压(V)； r_T ——斜率电阻(mΩ)； T_{jm} ——额定结温(°C)； T_C ——额定壳温(°C)； R_{THJC} ——结壳热阻(°C/W)。

4.4 硅器件的工频转换功率

器件的转换功率 P_Z 是在其本身允许损耗范围内能够向负载提供的功率。

$$P_Z = 1 \times 10^{-6} V_{BRM} I_{T(AV)} \text{ (MW)} \quad (6)$$

4.5 硅器件的浪涌能力

浪涌表示器件耐受的冲击电流，它所引起的短时高温可能使器件失效。

浪涌引起的温升由下式计算^[15]：

$$\Delta T_J(t_n) = \sum_{m=0}^n \Delta P_m Z(t_n - t_m) \quad (7)$$

$$T_{JSurge} = T_{jm} + \Delta T_J(t_n) \quad (8)$$

式(7)~式(8)中： $\Delta T_J(t_n)$ ——浪涌结温升(°C)； ΔP_m ——

功率损耗增量(W)； $Z(t_n - t_m)$ ——区间瞬态热阻(°C/W)； T_{jm} ——额定结温(°C)； T_{JSurge} ——浪涌瞬时结温(°C)（失效范围为 $350 \sim 400$ °C）。

4.6 高频硅器件的频率能力

IGBT 和 IGCT 均属中高频器件，以 IGBT 为例，其开关过程中的典型波形如图 16^[16] 所示。

器件的开关能量为：

$$E_{on} = \int_{t_1}^{t_1+t_{on}} i(t)v(t)dt \approx \frac{1}{6} I_T V_D t_{on} \quad (9)$$

$$E_{off} = \int_{t_2}^{t_2+t_{off}} i(t)v(t)dt \approx \frac{1}{6} I_T V_D t_{off} \quad (10)$$

器件的开关损耗为：

$$P_{sw} = (E_{on} + E_{off})f \approx \frac{1}{6} I_T V_D (t_{on} + t_{off})f \quad (11)$$

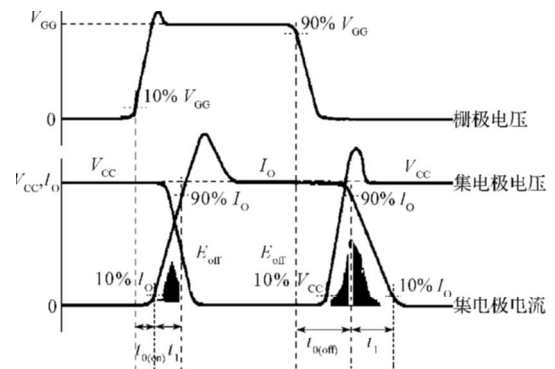


图 16 IGBT 的开关特性
Fig.16 Switch performance of IGBT

器件的开关频率为(忽略导通损耗)：

$$f = P_{sw} / (E_{on} + E_{off}) = P_S / E_{sw} = \frac{T_{jm} - T_C}{R_{THJC} E_{sw}} \quad (12)$$

式(9)~式(12)中： E_{on} 、 E_{off} ——分别为开通、关断能量(J)； t_{on} 、 t_{off} ——分别为开通、关断时间(s)； I_T ——通态工作电流(A)； V_D ——断态工作电压(V)； f ——开关频率(Hz)；

由于开关能量与线路的工作电压和工作电流之积呈正比，因此允许的开关频率会随着器件的转换功率呈反比例下降。

5 未来发展^[17]

电力半导体总的趋势是朝着大容量、高频化、高功率密度、集成化及智能化方向发展。上述三种兆瓦级器件应国产化以满足中国经济发展的旺盛需求^[18](表 3)。未来，主流器件将形成鼎立之势，全面支撑电力电子技术的发展(图 17)。

表3 三种器件的发展方向
Tab.3 Development trends of three devices

	PCT	HV IGBT	IGCT
特性与规格	HVDC 基本用到 8 500 V/5 000 A(6 英寸) ； 冲刺 12 000 V 极限	改善短路电流能力 ； 6 500 V 系列成熟 ； 提高频率特性 ； IPM (未来：集成化，智能化)	6 000 V , 9 000 V 系列 ； 逆导结构、逆阻结构 (集成化) ； 双门极结构 ； 改善频率特性
工艺与技术	发展非对称结构 (二极管串联承受反压) ； 关注低温键合技术 (可提高电流量) ； 关注 SiC 材料的进展 (可提高总容量)	终端结技术 ； 栅极结构技术 ； 关注 SiC 材料的进展 (可提高总容量) ； 高结温、高密度、高集成化和智能化	终端结技术 (器件) ； 过流保护技术 (应用)

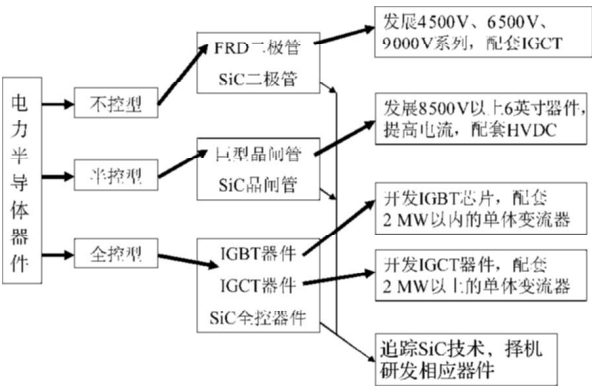


图 17 器件高端主流
Fig.17 Mainstream of high grade devices

6 结语

以低碳化为标志的绿色环保运动引发的电力牵引及传动领域的节能技术浪潮和以智能电网带动的中国电力系统的技术变革 , 将强力地推动大型 PCT、IGBT 和 IGCT 三种兆瓦级电力半导体器件的国产化进程 , 使之成为我国现代化建设中不可缺少的基础性部件 ; 同时推动国民经济朝着高效、低耗、安全、智能化方向前进 , 并形成快速、稳健和可持续的发展。

参考文献：

[1] 钱照明 , 盛况 . 大功率半导体器件的发展与展望 [J]. 大功率变流技术 , 2010(1) : 1-9.
[2] 维捷斯拉夫 · 本达 . 功率半导体器件 - 理论及应用 [M]. 捷克 : 化学出版社 , 2008.
[3] 袁寿财 . IGBT 场效应半导体功率器件导论 [M]. 北京 : 科学出版社 , 2008.

[4] 张明 , 戴小平 , 李继鲁 , 等 . K1c4000_45 非对称型 IGCT 组件的研究 [J]. 变流技术与电力牵引 , 2007(2) : 22-26.
[5] 丁荣军 , 张明 , 黄建伟 . 大功率电力电子器件产业化平台的建设 [J]. 机车电传动 , 2010(1) : 25-29.
[6] Motto K , Li Y , Huang A Q. Comparison of the state-of-the-art high power IGBTs, GCTs and ETOs [C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition 2000, Fifteenth Annual IEEE. New Orleans, 2000: 1129-1136.
[7] Sheng Kuang , Williams B W, Finney S J. A Review of IGBT Models [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15 (6) : 1250-1266.
[8] Hefner A R. Modeling buffer layer IGBTs for circuit simulation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1995, 10(2) : 111-123.
[9] 陈坚 . 电力电子学 - 电力电子变换和控制技术 [M]. 北京 : 高等教育出版社 , 2002.
[10] 李立涅 . 特高压直流输电的若干技术问题 [R]. 中国南方电网 , 2008.
[11] 沈斐 , 姜齐荣 , 王兆平 . 中国柔性交流输电技术 (FACTS) 研究概况 [J]. 四川电力技术 , 2005(增刊 1)
[12] Shenai K , Scott R S , Baliga B J , et al. Optimum semiconductor for high power electronics [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1989 , 36(9) : 1811-1823.
[13] Weitzel C E , Palmour J W , Carter C H , et al. Silicon carbide high-power devices [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1996, 43(10) : 1732-1741.
[14] 刘恩科 , 朱秉升 , 罗晋生 . 半导体物理学 [M]. 西安 : 西安交通大学出版社 , 1979.
[15] 彭勇殿 , 李世平 , 黄建伟 , 等 . 高压直流系统故障电流下晶闸管的温升计算 [J]. 变流技术与电力牵引 , 2008(1) : 20-23.
[16] 张景超 , 赵善麒 , 刘利峰 , 等 . 绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 的设计要点 [J]. 电力电子技术 , 2010 , 44(1) : 1-3 , 16.
[17] Baliga B J. Trends in power semiconductor devices [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1996, 43(10) : 1717-1731.
[18] Kwok Ng K. A survey of semiconductor devices [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1996, 43(10) : 1702-1705.

声 明

为顺应网络环境下期刊出版的新要求 , 促进期刊网络出版进程 , 凡被本刊录用的论文 , 在《中华人民共和国著作权法》的框架内 , 其复制权、发行权、信息网络传播权、翻译权、汇编权等权利在全球范围内一并转让给本刊 , 本刊一次性支付作者著作权使用报酬 (即稿费 , 包括印刷版、光盘版和网络版等各种版本的稿酬) 。

《大功率变流技术》编辑部