

高效率电力变换用SiC功率半导体的研发

Developments for Hi-efficiency Power Tranfering SiC Power Semiconductors

邓隐北, 张慧敏
河南汇德电气有限公司

中图分类号: TM23 文献标识码: B 文章编号: 1606-7517(2016)06-6-141

1 前言

全部能源中对电源的利用程度达到 40% 以上, 电源显示出愈益重要的作用。电能从发电到负载端 其使用过程中, 在重要场所的电压升降和频率变换, 加之在用户端的负载, 包括企业用电设备、办公事业设备、家用电器产品, 均离不开各种各样的电力电子 (PE) 器件。

功率半导体是电力电子和电能转换系统核心的技术基础, 对实现国家节能减排、建立资源节约型社会的目标, 将起到举足轻重的作用。

近年来, 迫切希望绿色能源的有效形成和能源利用效率的提高, 对太阳能电池和功率半导体的革新改进期望很大。功率器件是承担交流 直流及直流 交流的电力变换、电压变化、频率变换等电力变换器的关键器件。作为主要应用领域有电源、家电、汽车、工业用设备、电气车辆、输配电等。电力从发电站输出, 由送电、配电迄至在负载中消费用电, 其间经过多个阶段的变换, 转换效率约保持在 85~95%, 也即, 电力变换的程度约 10% 的电力变成了废热。如何降低这一变换损耗? 这是在该领域中一个重大的研究课题。

2 SiC 功率器件的优点

现在的功率器件几乎大部分是由硅 (Si) 制作的, 因技术的成熟, 今后要想飞跃发展很不容易。在此情况下, 非常期望开发出新的功率半导体材料。作为下一代功率器件用半导体而引人注目的是 SiC (碳化硅) 和氮化镓 (GaN)。

SiC 材料相比于 Si 材料, 由于能带隙较宽, 能级为

3.26eV (电子伏特), 约为 Si 半导体 1.1eV 的 3 倍。反映这一特性的绝缘击穿电场强度 :SiC 为 3MV/cm ;Si 为 0.3MV/cm, 相差甚殊, 如在相同厚度下, SiC 半导体器件则可实现 10 倍的高耐压性。SiC 的最高结温可达 600 , 还有较低的本征载流子浓度, 这均使得器件能在高电压、高温下工作。同时, SiC 具有较高的饱和迁移速度和较低的介电系数, 使用的 SiC 器件高频特性好, 在高电压下多数载流子器件开关时间短, 开关频率高达 1MHz, 可望实现高频操作。此外, SiC 功率器件的热导率为 4.9W/cmK (与金属铜相等), 比 Si 基器件的 1.5W/cmK 大 3 倍以上, 因其热传导率高, 故可望高温操作, 采用的冷却方式也相应简易。另据简单分析, 固有的通态阻抗反比于绝缘击穿场强的 3 次方, 考虑到电子的移动度, 能将损耗减小 2 个数量级。

作为一种新型宽禁带半导体材料, SiC 因其出色的物理性能及电特性, 正愈益受到产业界的广泛关注。SiC PE 器件的重要系统优势在于 :具有高压 (达数万伏) 高温 (500 以上) 特性, 突破了 Si 基功率半导体器件电压 (数千 V) 和温度 (<150) 所制约的严重局限性。与 Si 基器件对比, 宽禁带半导体器件具有击穿电压高、导通压降小、开关损耗低、工作温度高等优势, 代表了未来功率器件的发展方向。表 1 列出 SiC (4H-SiC)、Si、GaAs 的主要物理性能值。

3 SiC 半导体材料

如上节所述, SiC 具有高的禁带宽度、高的饱和电子

表1 SiC(4H-SiC)、Si、GaAsの主な物性値

	SiC	Si	GaAs
禁宽带 [eV]	3.26	1.12	1.42
电子移动度 [cm^2/Vs]	1000	1350	8500
绝缘击穿场强 [MV/cm]	2.8	0.3	0.4
电子饱和速度 [cm/s]	2.2×10^7	1.0×10^7	1.0×10^7
热传导率 [W/cmK]	4.9	1.5	0.46

漂移 (drift) 速度、高的绝缘击穿强度、低的介电常数和高的热导率等一系列优越特性。由此，决定了 SiC 在高温、高频率、高功率的应用场合下是极为理想的半导体材料。在同样的耐压和电流条件下，SiC 器件的漂移区电阻为硅器件电阻的 1/200，即使高耐压的 SiC 场效应管的导通压降，也比单极型、双极型硅器件低的多。而且，SiC 器件的开关时间可达 10ns 量级。

SiC 在禁带宽半导体中是例外的 p、n 双传导型，大范围价电子控制 ($10^{14} \sim 10^{20} \text{cm}^{-3}$) 容易；与 Si 同样由热氧化可形成优质的绝缘膜 (SiO_2)；以及优质的晶片 (wafer) 在市场上能买到。1980 年代在 SiC 的整块 (bulk) 结晶生长及外延 (epitaxial) 生长 (也即晶体取向成长) 就有过革新，作为半导体的研究开发已正规启动。

SiC 的多种型式中，最适合于器件应用的是 4H 型 (4H-SiC)。理由如下，(1) 电子移动度、禁带宽和绝缘击穿电场均大；(2) 电气传导的各向异性小；(3) 半导体发送体 (施主, donor) 和受体 (acceptor) 能级较浅；(4) 可易于获得优质的单结晶晶片等。

近年来，缺陷密度较低的单结晶晶片，多数生产厂家已经产品化，并在快速实现低成本化。将直径 100mm 的低阻抗晶片 (阻抗率 0.02 $\Omega \cdot \text{cm}$) 作为标准，数年前已开始销售直径 150mm 的低阻抗晶片。现正进行着结晶缺陷的降低，消除了被称之为微管 (micropipe) 的小孔状缺陷。市售晶片的位错密度约 $3000 \sim 6000 \text{cm}^{-2}$ ；研发水平已达到 100cm^{-2} ；以下的高品质晶片。

在制作 SiC 器件时，精密的半导体中掺杂质 (doping) 与薄膜厚度的控制，由容易的化学气相堆积 (CVD) 法，对形成 SiC 晶片上器件活性层的 SiC 薄膜进行外延生长，无添加成长层的不纯物密度达到 10^{13}cm^{-3} 这样的高纯度。掺

杂质在 n 型中 $10^{14} \sim 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 和 p 型中的 $10^{14} \sim 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 的范围内是可控制的。SiC 的 CVD 生长必需约 1600 的高温，开发了能获得优良均匀性、再现性的多枚同时生长装置，开始了器件的实用化进程。

4 SiC 功率器件的特征

功率器件要求的最重要特性是工作时的电力损耗小。多数场合下电力损耗的主要因素是通电时的焦耳热，如何使额定电流下能达到低的电压降这点很重要。通态电压主要取决于通电时器件的串联阻抗 (通态阻抗)，故降低通态阻抗是关键。

SiC (及 GaN) 功率器件比 Si 器件有显著小的通态阻抗，其原因可由图 1 来说明。对晶片单侧阶段结合施加以反向耐压 (V_B) 时，其半导体的耗尽层 (过渡层) 内的电场分布如图 1 所示。当结合界面的最大电场达到材料的绝缘击穿电场 (E_B) 时，这一结合被击穿。此时，耗尽层宽度 (W_M) 最大。以表示电场分布的直线作为直角三角形的边，耐压则由直角三角形的面积表示。SiC 的绝缘击穿强度为 Si 的 10 倍，故制作该耐压器件时，按如图所示纵向长度的三角形，能求得相同的耐压值 V_B 。从而在 SiC 场合比 Si 的场合下，耗尽层 (器件的耐压维持层) 的宽度仅为 1/10，而且该领域的掺杂质密度 (对应于电场分布的倾斜度) 能达到约 100 倍。总之，对于具有相同耐压的器件，用 Si 和 SiC 进行对比时，

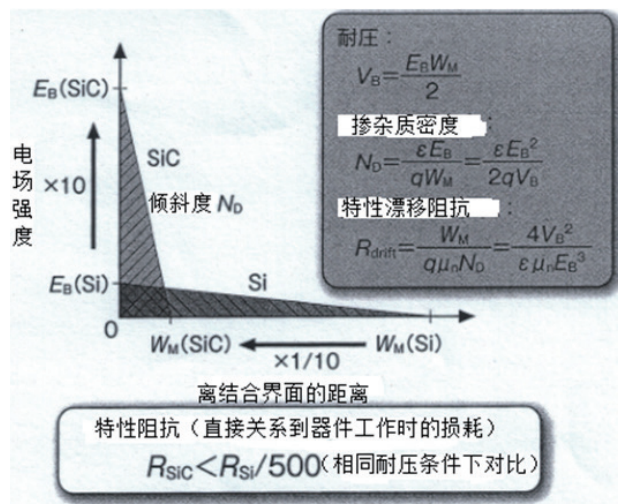


图1 对Si、SiC单侧阶段结合施加反向偏压时耗尽层内的电场分布界面的最大电场达到绝缘击穿电场 (E_B) 时，发生绝缘破坏。此时，耗尽层的宽度最大 (W_M)。 V_B —耐压， N_D —掺杂质密度， R_{drift} —特性漂移阻抗， ϵ —半导体的介电系数， μ_n —电子迁移率， q —单元电荷。

SiC 器件中耐压维持层的阻抗可减小约 3 位数。考虑到实际的电子移动度和绝缘击穿电场掺杂杂质密度的相互依赖性，计算出每单位面积的耐压维持层阻抗（特性漂移阻抗）与耐压的相互关系如图 2 所示。这样一来，采用 SiC 时通态阻抗能有不同位数的减小，电力损耗可大幅度下降。

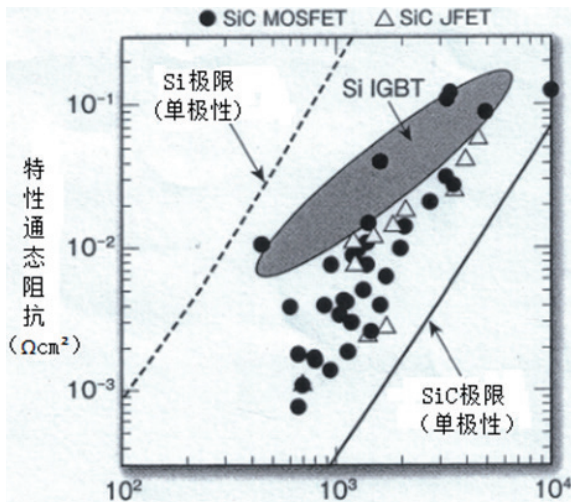


图2 SiC和Si单极性功率器件的特性通态阻抗（每单位面积的串联阻抗，单极性器件中由漂移层阻抗所决定的材料极限），与耐压的相互关系

●表示最新SiC功率-FET的报告例
△表示JFET

通常，在用 Si 的功率器件中，最高工作温度限制到约 150~180℃，而 SiC 功率器件即使在 300℃ 以上的高温下器件也可以工作的，尤其是配置 Si 功率器件的大型电力变换器，大多都要增设水冷单元，若采用 SiC 则可省去水冷系统。假如能用空冷，就整个变换器而言，则能大幅度实现小型化和高频率化。

图 3 说明 SiC 和 Si 功率器件的种类。对于 Si 二极管，耐压 100~200V 以下利用金属与半导体接触的肖特基势垒二极管 (SBD)；在此 (200V) 以上是采用 PIN 二极管。对于 Si 开关器件，耐压 300~600V 利用单极性器件（仅用多数载流子器件）与双极性器件（利用少数载流子注入的器件）。而对于 SiC 而言，其单极性器件即使耐压达到 6kV 左右，通态阻抗仍十分低，在 6kV 以下的应用范围内主要使用 SBD 和 FET（场效应晶体管）。而 SiC PIN 二极管和 SiC 闸流晶体管 (Thyristor)，则在 10kV 以上的超高耐压应用中显示出诱人的魅力。例如，配电使用的典型交流电压就是 6.6kV，这一电力变换元件需要 13kV 以上的耐压，故 SiC 双极性器件有望胜任。

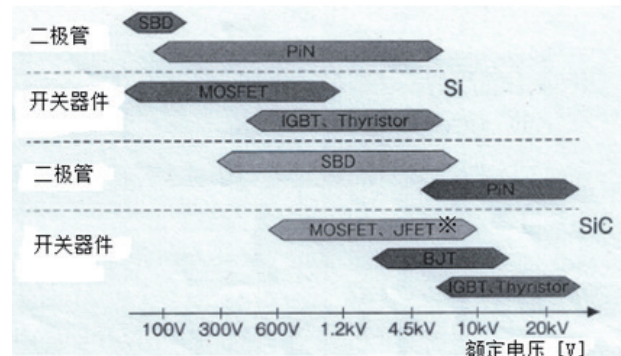


图3 以横轴表示额定电压时的SiC和Si功率器件的应用范围（器件等级）

JFET - 结型场效应开关管

5 SiC 功率二极管的研究开发

最初 SiC 功率器件的电势得到证实的是肖特基势垒二极管 (SBD)，其后，在国内外作为高速、低损耗的二极管，对其进行了开发。图 4 所示为典型的 SBD 断面结构。n 型漂移层 / 低阻抗 n 型基板的表面形成肖特基势垒，肖特基电极端部形成的 p 型区以达到电场集中缓和。

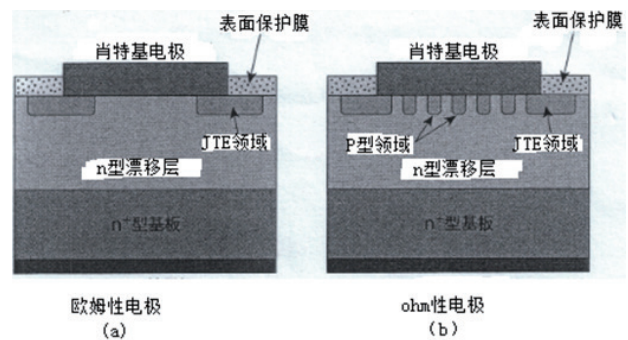


图4 SiC-SBD的断面模型图

(a)标准的SBD二极管；(b)MPS（合并成PN肖特基）二极管

作为肖特基电极的材料，采用了钛 (Ti)、钼 (Mo)、镍 (Ni) 等。图 5 所示为 1200V 级高速 Si PIN 二极管与 SiC SBD 二极管的断开 (turnoff) 波形。对 SiC SBD，因没有少数载流子积存，反方向几乎无过渡电流流通，高速下显示出低损耗的开关特性。

现在，SiC SBD 的高可靠性已得到实际验证，耐压 300~1700V、额定电流 10~60A 级的 SBD 已实现产品化。首先，在能充分发挥高速开关特性的开关电源中已开始实用。由于高频率化，电源的无源元件（线圈等）可以小型化，故作为整个系统，具有小型化，低损耗化的优点。最近，

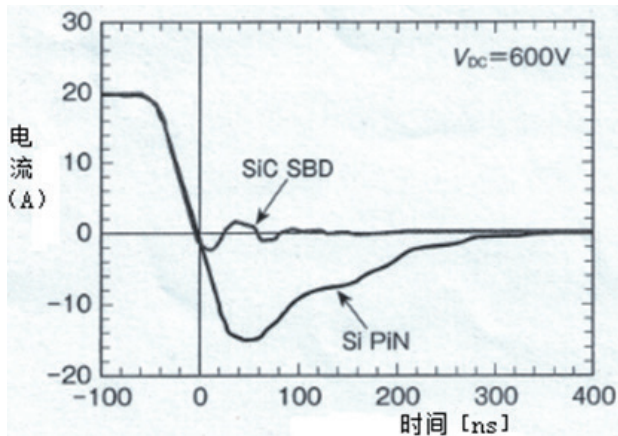


图5 1200v级SiC-SBD和高速Si PiN二极管的断开特性

由于 SiC 晶片的结晶缺陷减少, 对大容量的二极管进行了开发; 采用 200A 级的 SiC SBD、功率 100kw 以上的逆变器也正在试制。这数年间对民用空调、电梯、地铁上的配置均相继有所报道。总之, 比采用 Si 器件的场合都显著降低了损耗。预计对进入低成本化混合式动力汽车等的实用化也即将开始。高耐压 SBD 的批量生产技术如果可靠的话, 亦可望扩展到新干线等应用领域。

SiC PiN 二极管, 以上述那样的超高耐压领域的应用为主, 与这一耐压的 Si PiN 二极管比较, 即使扩散长度短 1 位数, 载流子寿命短 2 位数, 也能得到充分的传导率的调制效果, 故能大幅度降低断开时的逆回复电流和时间。总之, 对 SiC 即使是双极性器件, 也能实现高速、低损耗的开关操作。图 6 所示为已制作的台面式 (mesa) SiC PiN 二极管的断面结构及其电流 - 电压特性。耐压维持层的厚度为 268 μm , 发送体 (donor) 密度为 10^{14}cm^{-3} 。形成倾斜

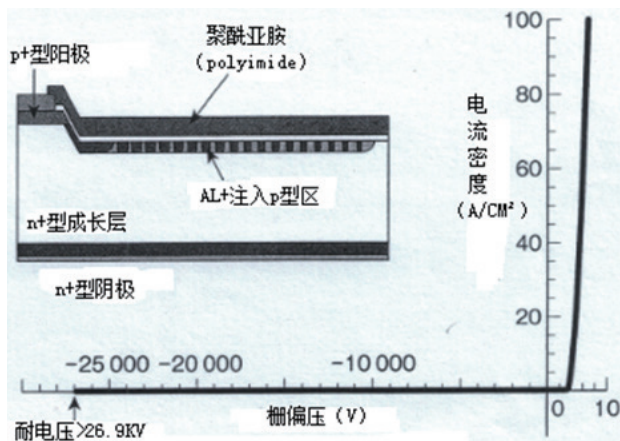


图6 高耐压台面式SiC PiN二极管的断面结构与电流密度~电压特性

的台面式结构, 由于其端部周边离子的注入, 结构上, 设置了结合终端, 耐压为 26.9kv 以上, 是作为半导体元件的最高特性。作为长年课题的载流子寿命有关问题, 最近, 对载流子寿命与限制缺陷的同时确定, 以及缺陷的消除方法进行了开发, 得到了超过 20 μs 的载流子寿命 (原来为 0.5~1 μs)。上述 PiN 二极管, 不仅为极高耐压的元件, 而且能达到 10m cm^2 这样微小的通态阻抗。

6 SiC 功率开关器件的研究开发

SiC 功率 MOSFET, 具有高耐压、低损耗、高速、电压驱动型这样的特点, 可望取代承担着现在功率器件核心作用的 Si-IGBT, 并能推向新领域应用。

图 7 所示为典型的纵型 SiC 功率 MOSFET 的断面模式图。图 7(a) 为 D1MOSFET; 图 7(b) 为沟槽式 (trench) MOSFET。

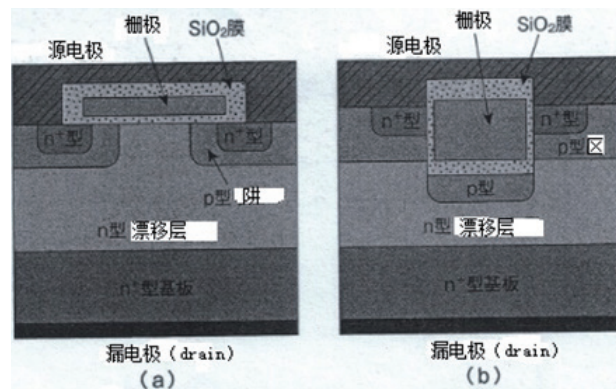


图7 纵型SiC功率MOSFET的断面模式图
(a)D1MOSFET; (b)沟槽式MOSFET。

DIMOSFET 为平面结构 (planar), 表面上设有 MOS 信道 (channel); 另一个是沟槽式 MOSFET, 利用干蚀刻法 (dry etching) 形成 U 字形沟槽, 其侧壁设有 MOS 信道。原来, 由通常的热氧化形成 SiO_2/SiC 界面上, 因信道移动度低 ($10\text{cm}^2/\text{VS}$), MOS 信道阻抗大, 存在功率 MOSFET 通态阻抗高的这一问题。近年来, 提出了各种各样形成氧化膜的方案, 改善了信道移动度达到 $30\sim 100\text{cm}^2/\text{VS}$ 。而且, 在 SiC 信道移动度提高的同时, 微细化 [信道缩短与元件节距 (cell pitch) 缩小] 对提高性能也是有效的。据报导, DIMOSFET 的耐压 1550v - 通态阻抗 3.7m cm^2 ; 而沟槽式 MOSFET 则有 690v - 0.8m cm^2 及 1260v - 1.4m cm^2 这样的优越特性。

图8所示为600V级SiC沟槽式MOSFET、SiC DIMOSFET、Si功率-MOSFET、Si-IGBT的通态特性。为达到相当于典型通态电流100A/cm²电流密度所必需的通态电压，SiC沟槽式MOSFET具有绝对优势的低压，因而显示出电力变换中的功率损耗可大幅度降低。SiC MOSFET需要高可靠性的栅氧绝缘层，并提供较高的沟道载流子迁移率。我们进行了有关栅氧化膜和电极可靠性方面的技术开发，在600~1700V电压下对10~30A级的SiC功率MOSFET已开始实用化。相继试制了采用SiC的MOSFET与SBD的逆变器，相对于Si IGBT与PiN二极管的优越性（低损耗、小型化）得到了实际验证。与使用Si器件的场合比较，变换器（逆变器等）的体积能减小1/4~1/10，电力损耗约降低1/3~1/5。

npn结构的双极性晶体管(BJT)，因制作比较容易，可获得良好的特性，故有望作为数kV以上的开关器件。为简

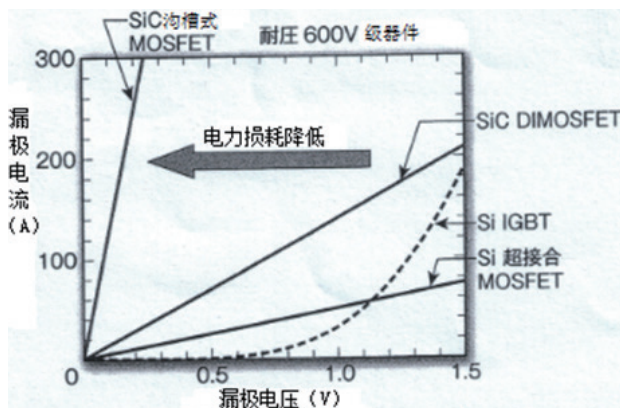


图8 600V级SiC沟槽式MOSFET、SiC DIMOSFET、Si超结合功率MOSFET、Si-IGBT的通态特性

化驱动电路和提高控制性能，要求改善电流的放大率。近年来，进行了载流子再结合过程的分析及其抑制，对600V级的元件已达到250~430左右的高流子放大率。此外，将高纯度厚膜外延生长层用于集电极(collector)，还试制了20kV以上的超高耐压BJT。具有pnpn结构的SiC晶闸管(thyristor)，有望成为超高耐压、高温操作的开关器件。耐压5kV、通态电流120A、断开增益(gain)20这一可关断晶闸管(GTO)，和20kV的超高耐压GTO正在试制；目标针对最能发挥SiC潜力的超高耐压应用的研究开发也在积极进行着。图9所示为已制作的n信道SiC IGBT的通态特性与耐压特性，结构上是将低阻抗p型SiC作为集电极，将厚度150μm的高纯度n型SiC作为耐压维持层，表面侧设有信道MOS，元件节距约为15μm，芯片(chip)尺寸为8mm见方。显示出良好的操作性能，达到50A级的通态电流与16kV以上的集电极耐压。将这一SiC IGBT与PiN二极管进行实装，在250℃的高温下达到5kV-20A以上的高速(约1μs)开关操作，也已予以报导。

7 超高耐压器件的研发尝试

SiC最先进的研发是考虑到配电系统所适用的功率器件，目前正在试制着PiN二极管、双极性晶体管、IGBT等。图10所示为超高耐压用已试制的21kV PiN二极管的特性曲线。据报导，其厚度186μm的固有通态阻抗为35mΩ/cm²。

图11所示为IGBT的结构，发射极侧与图7(a) DIMOSFET的源极(source)侧结构相同。MOSFET的漏极(drain)侧形成p⁺型，这被称为集电极。也即，MOSFET的

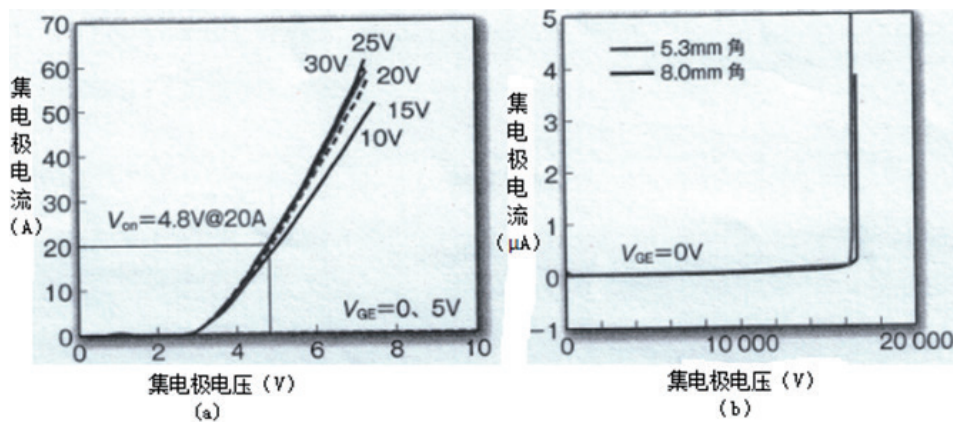


图9 高耐压SiC n信道IGBT的集电极特性
(a)通态特性；(b)耐压特性

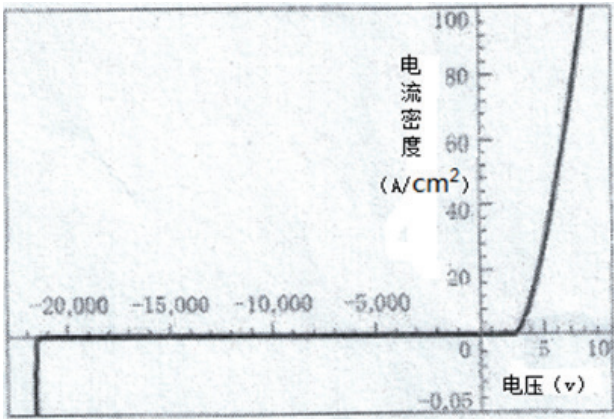


图10 耐压21kv pin二极管的特性

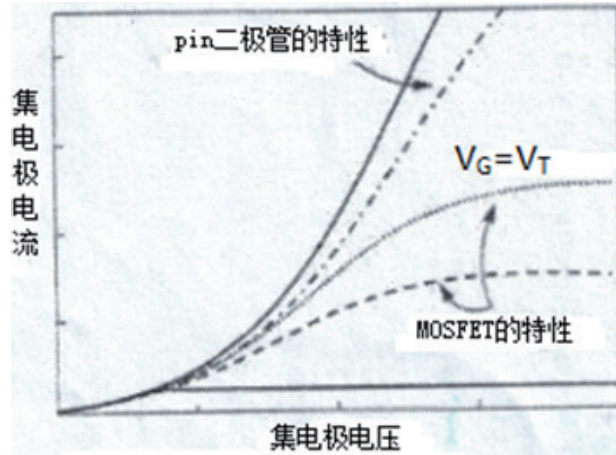


图12 IGBT的电流-电压特性

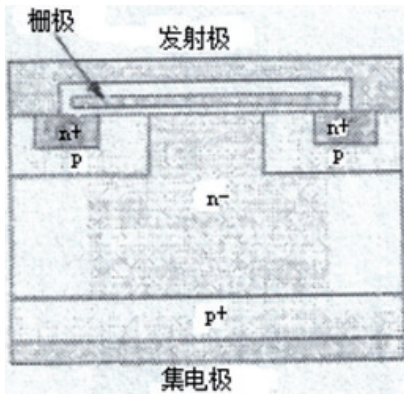


图11 IGBT的结构

n^- 区形成 p^+ 区，由此，将注入流向 n^- 区的空穴。图 12 所示为 IGBT 基本的电流 ~ 电压特性。

若对发射极施加负电压，对集电极施加正电压，上部的 n^+p 接合面因反向偏压的作用而无电流流通。在这一状态下，一旦施加比 MOSFET 栅极阈值电压 (V_T) 大的栅极电压 V_G ，在 P 层则形成信道 (channel)，电子由发射极流入 n^- 漂移层，这就形成纵结构 $p-n^-p^+$ 双极性晶体管的基极电流。纵结构下部的 p^+n^- 则改变成顺方向，故从 p^+ 到 n^- 注入空穴，引起导电率调制，显示出 PiN 二极管的特性，允许大的电流流通。假如栅极电压低，从集电极侧注入的空穴就少，显示出 MOSFET 的特性。

SiC IGBT 综合了功耗低和开关速度快的特点，尤其适用于高压电力系统。新型高温高压 SiC IGBT 器件将对

大功率应用特别是电力系统应用产生重大影响。可以预见，高压 SiC IGBT 器件将和 PiN 二极管器件一起，成为下一代智能电网技术中电力电子技术核心的器件。

8 结束语

太阳能电池和燃料电池的普及，混合动力车、高速铁路、高压直流输电和无功功率补偿等电力系统控制等，今后的 10~20 年社会基础设施将经历着重大的变革，无论在哪个领域，对高效率、小型电力变换器的需求都是十分迫切的。SiC 功率器件为实现低损耗小型变换器的关键器件而引人注目。600~1700v 极 SiC SBD 与最初的 Si IGBT 的组合，正在向电源、家电、产业用电动机等的实用化进展。具有相同额定电流、电压的 SiC 功率 MOSFET 技术也在逐渐成熟，全 SiC (SiC-MOSFET-SBD) 的变换器也开始实用化，低损耗化与小型化已经过实际验证，正向电梯、电气铁道车辆的继续配置，混合动力车上显著的燃费改善的验证，以及配置设计的公布报告 (announce) 等，这些都说明 SiC 功率半导体已接近正规的实用化阶段。

原文出处：

木本 恒畅 高效率電力变换用 SiC パワー半導体の進展
《OHM》2014. NO9, P52-56