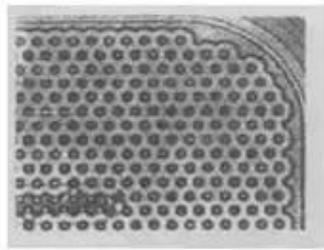


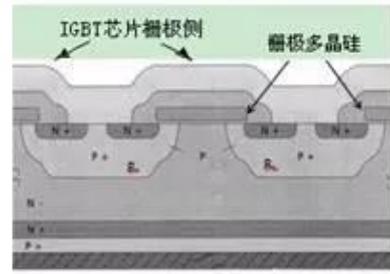
大功率器件—《从 PowerMOS 到 IGBT》



IGBT芯片中
原胞分布照片(栅极侧)



IGBT芯片中
栅极侧表面立体示意图



IGBT芯片剖面图中的原胞示意图

电的发现是人类历史的革命，由它产生的动能每天都在源源不断的释放，人对电的需求不亚于人类世界的氧气，如果没有电，人类的文明还会在黑暗中探索。

然而在电力电子里面，最重要的一个元件就是 IGBT。没有 IGBT 就不会有高铁的便捷生活。

一谈起 IGBT，半导体制造的人都以为不就是一个分立器件(Power Discretet)嘛，都很瞧不上眼。然而他和 28nm/16nm 集成电路制造一样，是国家“02 专项”的重点扶持项目，这玩意是现在目前功率电子器件里技术最先进的产品，已经全面取代了传统的 Power MOSFET，其应用非常广泛，小到家电、大到飞机、舰船、交通、电网等战略性产业，被称为电力电子行业里的“CPU”，长期以来，该产品（包括芯片）还是被垄断在少数 IDM 手上(FairChild、Infineon、TOSHIBA)，位居“十二五”期间国家 16 个重大技术突破专项中的第二位（简称“02 专项”）。

究竟 IGBT 是何方神圣？让我们一起来学习它的理论吧。

1、何为 IGBT？

IGBT 全称为绝缘栅双极型晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor)，所以它是一个有 MOS Gate 的 BJT 晶体管。奇怪吧，它到底是 MOSFET 还是 BJT？其实都不是又都是。不绕圈子了，他就是 MOSFET 和 BJT 的合体。

我在前面讲 MOSFET 和 BJT 的时候提到过他们的优缺点，MOSFET 主要是单一载流子(多子)导电，而 BJT 是两种载流子导电，所以 BJT 的驱动电流会比 MOSFET 大，但是 MOSFET 的控制级栅极是靠场效应反型来控制的，没有额外的控制端功率损耗。所以 IGBT 就是利用了 MOSFET 和 BJT 的优点组合起来的，兼有 MOSFET 的栅极电压控制晶体管(高输入阻抗)，又利用了 BJT 的双载流子达到大电流(低导通压降)的目的 (Voltage-Controlled

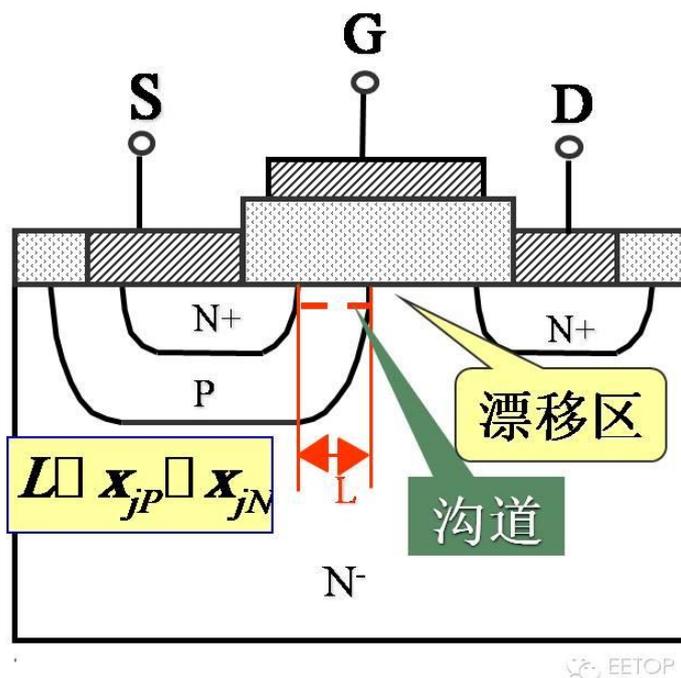
Bipolar Device)。从而达到驱动功率小、饱和压降低的完美要求，广泛应用于 600V 以上的交流系统如交流电机、变频器、开关电源、照明电路、牵引传动等领域。

Table 1: The IGBT Characteristics Comparison with BJT, MOSFET

Features	BJT	MOSFET	IGBT
Drive Method	Current	Voltage	Voltage
Drive Circuit	Complex	Simple	Simple
Input Impedance	Low	High	High
Drive Power	High	Low	Low
Switching Speed	Slow (μs)	Fast (ns)	Middle
Operating Frequency	Low (less than 100kHz)	Fast (less than 1MHz)	Middle
S.O.A.	Narrow	Wide	Wide
Saturation Voltage	Low	High	Low

2、传统的功率 MOSFET

为了等一下便于理解 IGBT，我还是先讲下 Power MOSFET 的结构。所谓功率 MOS 就是要承受大功率，换言之也就是高电压、大电流。我们结合一般的低压 MOSFET 来讲解如何改变结构实现高压、大电流。



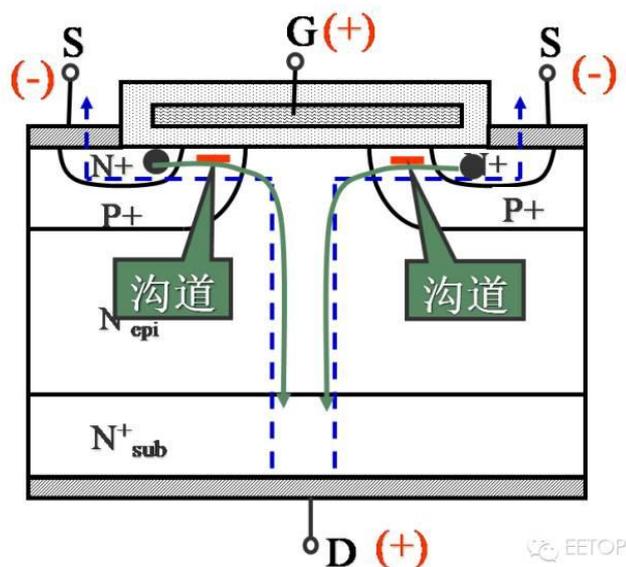
1) 高电压：一般的 MOSFET 如果 Drain 的高电压，很容易导致器件击穿，而一般击穿通道就是器件的另外三端(S/G/B)，所以要解决高压问题必须堵死这三端。Gate 端只能靠场氧垫在 Gate 下面隔离与漏的距离(Field-Plate)，而 Bulk 端的 PN 结击穿只能靠降低

PN 结两边的浓度，而最讨厌的是到 Source 端，它则需要一个长长的漂移区来作为漏极串联电阻分压，使得电压都降在漂移区上就可以了。

2) 大电流：一般的 MOSFET 的沟道长度有 Poly CD 决定，而功率 MOSFET 的沟道是靠两次扩散的结深差来控制，所以只要 process 稳定就可以做的很小，而且不受光刻精度的限制。而器件的电流取决于 W/L ，所以如果要获得大电流，只需要提高 W 就可以了。

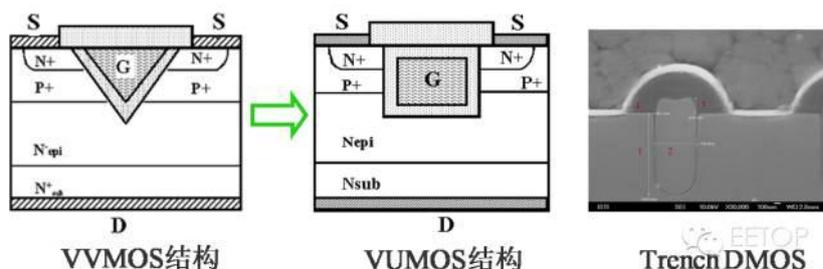
所以上面的 Power MOSFET 也叫作 LDMOS (Lateral Double diffusion MOS)。虽然这样的器件能够实现大功率要求，可是它依然有它固有的缺点，由于它的源、栅、漏三端都在表面，所以漏极与源极需要拉的很长，太浪费芯片面积。而且由于器件在表面则器件与器件之间如果要并联则复杂性增加而且需要隔离。所以后来发展了 VDMOS (Vertical DMOS)，把漏极统一放到 Wafer 背面去了，这样漏极和源极的漂移区长度完全可以通过背面减薄来控制，而且这样的结构更利于管子之间的并联结构实现大功率化。但是在 BCD 的工艺中还是利用 LDMOS 结构，为了与 CMOS 兼容。

再给大家讲一下 VDMOS 的发展及演变吧，最早的 VDMOS 就是直接把 LDMOS 的 Drain 放到了背面通过背面减薄、Implant、金属蒸发制作出来的(如下图)，他就是传说中的 Planar VDMOS，它和传统的 LDMOS 比挑战在于背面工艺。但是它的好处是正面的工艺与传统 CMOS 工艺兼容，所以它还是有生命力的。但是这种结构的缺点在于它沟道是横在表面的，面积利用率还是不够高。



再后来为了克服 Planar DMOS 带来的缺点，所以发展了 VMOS 和 UMOS 结构。他们的做法是在 Wafer 表面挖一个槽，把管子的沟道从原来的 Planar 变成了沿着槽壁的

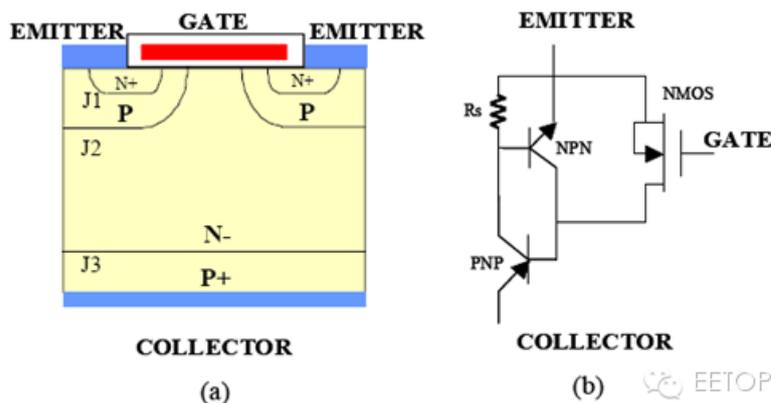
vertical，果然是个聪明的想法。但是一个陷阱总是会搭配一个陷阱(IC 制造总是在不断 trade-off)，这样的结构天生的缺点是槽太深容易电 场集中而导致击穿，而且工艺难度和成本都很高，且槽的底部必须绝对 rouding，否则很容易击穿或者产生应力的晶格缺陷。但是它的优点是晶饱数量比原来多很多，所以可以实现更多的晶体管并联，比较适合低电压大电流的 application。



还有一个经典的东西叫做 CoolMOS，大家自己 google 学习吧。他应该算是 Power MOS 撑电压最高的了，可以到 1000V。

3、IGBT 的结构和原理

上面介绍了 Power MOSFET，而 IGBT 其实本质上还是一个场效应晶体管，从结构上看和 Power MOSFET 非常接近，就在背面的漏电极增加了一个 P+层，我们称之为 Injection Layer (名字的由来等下说)。在上面介绍的 Power MOSFET 其实根本上来讲它还是传统的 MOSFET，它依然是单一载流子(多子)导电，所以我们还没有发挥出它的极致性能。所以后来发展出一个新的结构，我们如何能够在 Power MOSFET 导通的时候除了 MOSFET 自己的电子我还能从漏端注入空穴不就可以了吗？所以自然的就在漏端引入了一个 P+ 的 injection layer (这就是名字的由来)，而从结构上漏端就多了一个 P+/N-drift 的 PN 结，不过他是正偏的，所以它不影响导通反而增加了空穴注入效应，所以它的特性就类似 BJT 了有两种载流子参与导电。所以原来的 source 就变成了 Emitter，而 Drain 就变成了 Collector 了。



从上面结构以及右边的等效电路图看出，它有两个等效的 BJT 背靠背链接起来的，它其实就是 PNP 的 Thyristor(晶闸管)，这个东西不是我们刻意做的，而是结构生成的。我在 5 个月前有篇文章讲 Latch-up(<http://ic-garden.cn/?p=511>)就说了，这样的结构最要命的东西就是栓锁(Latch-up)。而控制 Latch-up 的关键就在于控制 R_s ，只要满足 $\alpha_1 + \alpha_2 < 1$ 就可以了。

另外，这样的结构好处是提高了电流驱动能力，但坏处是当器件关断时，沟道很快关断没有了多子电流，可是 Collector (Drain)端这边还继续有少子空穴注入，所以整个器件的电流需要慢慢才能关闭(拖尾电流, tailing current)，影响了器件的关断时间及工作频率。这个可是开关器件的大忌啊，所以又引入了一个结构在 P+与 N-drift 之间加入 N+buffer 层，这一层的作用就是让器件在关断的时候，从 Collector 端注入的空穴迅速在 N+ buffer 层就被复合掉提高关断频率，我们称这种结构为 PT-IGBT (Punch Through 型)，而原来没有带 N+buffer 的则为 NPT-IGBT。

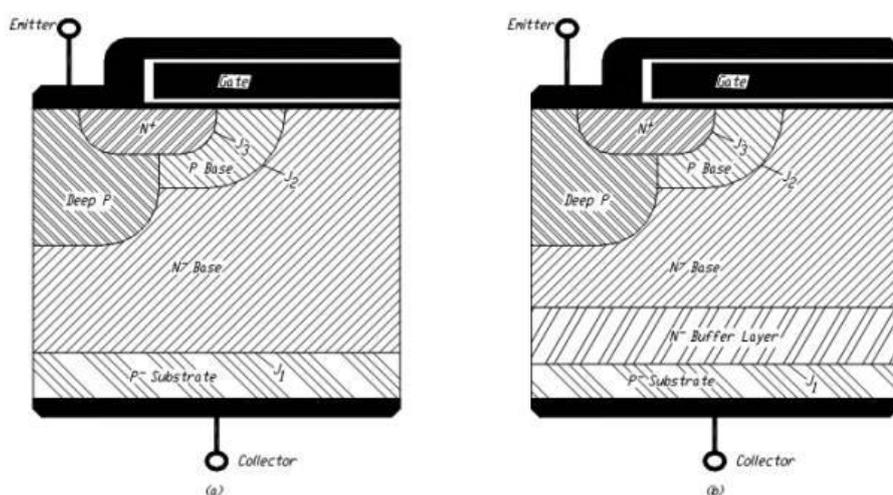


Figure 4: Structure (a) NPT-IGBT and (b) PT-IGBT [2]

一般情况下，NPT-IGBT 比 PT-IGBT 的 $V_{ce(sat)}$ 高，主要因为 NPT 是正温度系数(P+衬底较薄空穴注入较少)，而 PT 是负温度系数(由于 P 衬底较厚所以空穴注入较多而导致的三极管基区调制效应明显)，而 $V_{ce(sat)}$ 决定了开关损耗(switch loss)，所以如果需要同样的 $V_{ce(sat)}$ ，则 NPT 必须要增加 drift 厚度，所以 R_{on} 就增大了。

Table 1: Characteristics Comparison of NPT and PT IGBTs:

	NPT	PT
Switching Loss	Medium Long, low amplitude tail current. Moderate increase in E_{off} with temperature	Low Short tail current Significant increase in E_{off} with temperature
Conduction Loss	Medium Increases with temperature	Low Flat to slight decrease with temperature
Paralleling	Easy Optional sorting Recommend share heat	Difficult Must solve $V_{CE(on)}$

4、IGBT 的制造工艺：

IGBT 的制程正面和标准 BCD 的 LDMOS 没差，只是背面比较难搞：

1) 背面减薄：一般要求 6~8mil，这个厚度很难磨了，容易碎片。

2) 背面注入：都磨到 6~8mil 了，还要打 High current P+ implant >E14 的 dose，很容易碎片的，必须有专门的设备 dedicate。甚至第四代有两次 Hi-current 注入，更是挑战极限了。

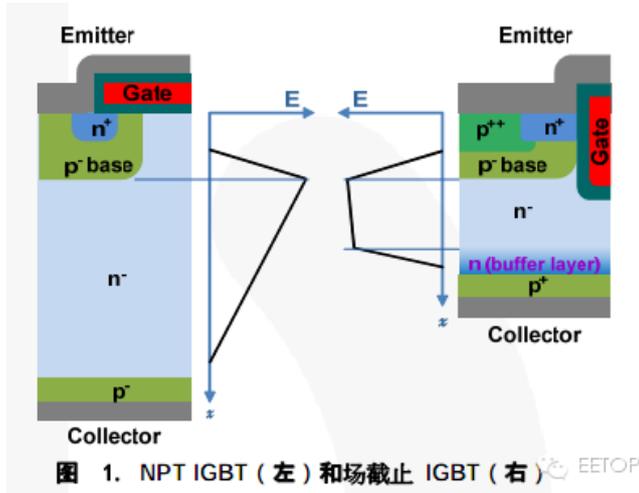
3) 背面清洗：这个一般的 SEZ 就可以。

4) 背面金属化：这个只能用金属蒸发工艺，Ti/Ni/Ag 标准工艺。

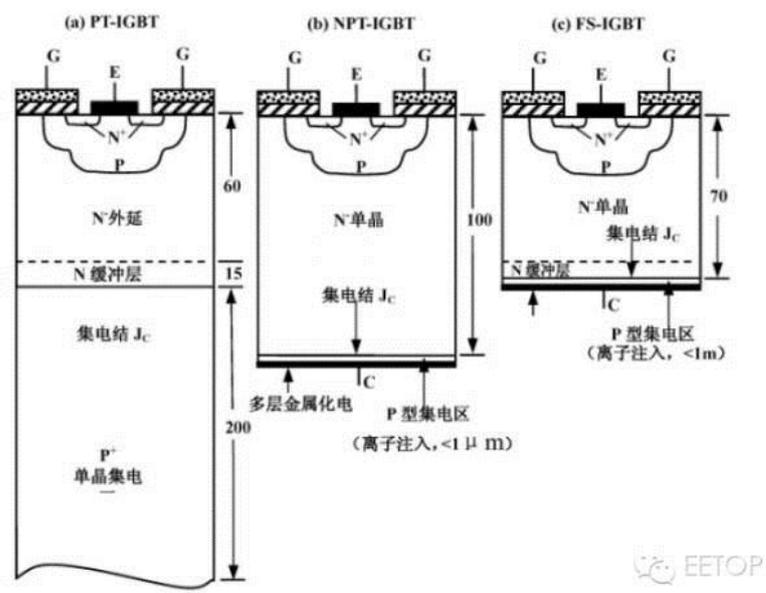
5) 背面 Alloy：主要考虑 wafer 太薄了，容易翘曲碎片。

5、IGBT 的新技术：

1) 场截止 FS-IGBT：不管 PT 还是 NPT 结构都不能最终满足无限 high power 的要求，要做到 high power，就必须降低 $V_{ce(sat)}$ ，也就是降低 R_{on} 。所以必须要降低 N-drift 厚度，可是这个 N-drift 厚度又受到截止状态的电场约束（太薄了容易 channel 穿透）。所以如果要降低 drift 厚度，必须要让截止电场到沟道前提前降下来。所以需要在 P+ injection layer 与 N-drift 之间引入一个 N+场截止层(Field Stop, FS), 当 IGBT 处于关闭状态，电场在截止层内迅速降低到 0，达到终止的目的，所以我们可以进一步降低 N-drift 厚度达到降低 R_{on} 和 V_{ce} 了。而且这个结构和 N+ buffer 结构非常类似，所以它也有 PT-IGBT 的效果抑制关闭状态下的 tailing 电流提高关闭速度。



问题来了，这和 PT-IGBT 的 N+ buffer 差在哪里？其实之制作工艺不一样。PT-IGBT 是用两层 EPI 做出来的，它是在 P+ 衬底上长第一层~10um 的 N+ buffer，然后再长第二层~100um 的 N-Drift。这个 cost 很高啊！而相比之下的 FS-IGBT 呢，是在 NPT-IGBT 的基础上直接背面 打入高浓度的 N+截止层就好了，成本比较低，但是挑战是更薄的厚度下如何实现不碎片。



2) 阳极短接(SA: Shorted-Anode)：它的结构是 N+集电极间歇插入 P+集电极，这样 N+集电极直接接触场截止层并用作 PN 二极管的阴极，而 P+还继续做它的 FS-IGBT 的集电极，它具有增强的电流特性且改变了成本结构，因为不需要共封装反并联二极管了。实验证明，它可以提高饱和电流，降低饱和压降(~12%)。

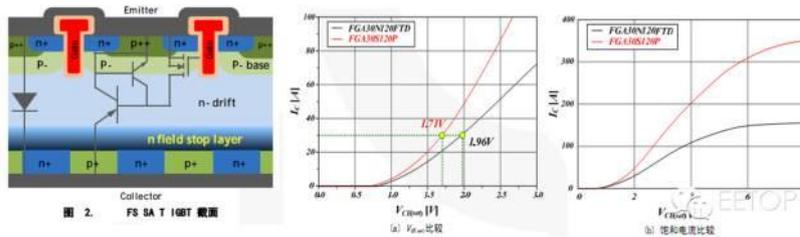


图 2. FS SA T IGBT 截面

6、IGBT 的主要 I-V 特性：

IGBT 你既可以把它当做一个 MOSFET 与 PiN 二极管串联，也可以当做是一个宽基区的 PNP 被 MOSFET 驱动(Darlington 结构)，前者可以用来理解它的特性，后者才是他的原理。它看起来就是一个 MOSFET 的 I-V 曲线往后挪了一段(>0.7V)，因为沟道开启产生电流必须满足漂移区电流与漂移区电阻乘积超过 0.7V，才能使得 P+衬底与 N-drift 的 PN 结正向导通，这样才可以 work，否则沟道开启也不能 work 的。

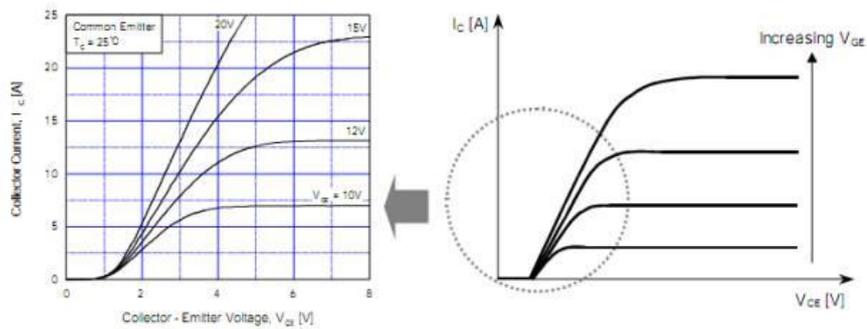


Figure 2. Static Characteristics of the IGBT

最后给大家吹吹牛吧，大家经常会听到第一代 IGBT 一直到第六代 IGBT，这些是什么意思呢？

1) 第一代：他就是 IGBT 的雏形，最简单的原理结构图那种，所以他必须要提高 N-drift 来提高耐压，所以导通电阻和关断功耗都比较高，所以没有普及使用。

2) 第二代：PT-IGBT，由于耗尽层不能穿透 N+缓冲层，所以基区电场加强呈梯形分布，所以可以减小芯片厚度从而减小功耗。这主要是西门子公司 1990~1995 年的产品 BSM150GB120DN1("DN1"就是第一代的意思)。它主要在 600V 上有优势(类似 GTR 特性)，到 1200V 的时候遇到外延厚度大成本高、且可靠性低的问题(掺杂浓度以及厚度的均匀性差)。

3) 第三代：NPT-IGBT，不再采用外延技术，而是采用离子注入的技术来生成 P+集电极(透明集电极技术)，可以精准的控制结深而控制发射效率尽可能低，增快载流子抽取速度来降低关断损耗，可以保持基区原有的载流子寿命而不会影响稳态功耗，同时具有

正温度系数特点，所以技术比较成熟在稳态损耗和关断损耗间取得了很好的折中，所以被广泛采用。代表公司依然是西门子公司率先采用 FZ(区熔法)代替外延的批量产品，代表产品 BSM200GB120DN2, $V_{CE} > 1200V$, $V_{ce(sat)} = 2.1V$ 。

4)第四代：Trench-IGBT，最大的改进是采用 Trench 结构，是的沟道从表面跑到了垂直面上，所以基区的 PIN 效应增强，栅极附近载流子浓度增大，从而提高了电导调制效应减小了导通电阻，同时由于沟道不在表面，所以消除了 JFET 效应，所以栅极密度增加不受限制，而且在第四代 IGBT 继续沿用了第三代的集电极 P+implant 技术同时加入了第二代的 PT 技术作为场终止层，有效特高耐压能力等。需要使用双注入技术，难度较大。这个时候是英飞凌的时代了，Infineon 的减薄技术世界第一，它的厚度在 1200V 的时候可以降低到 120um~140um(NPT-IGBT 需要 200um)，甚至在 600V 可以降低到 70um。

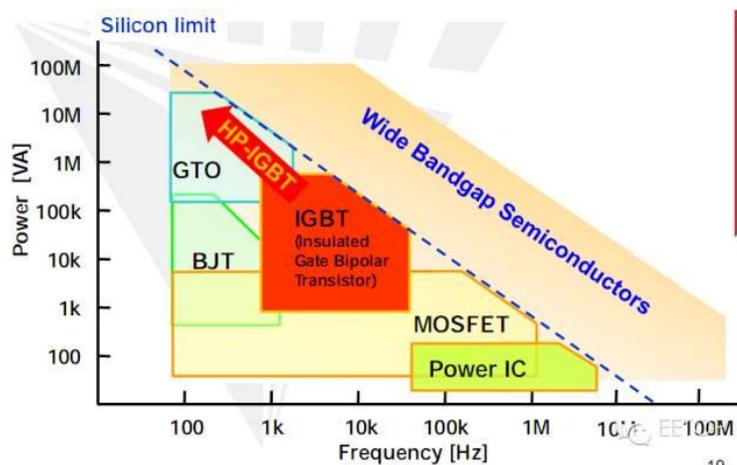
5)第五代：FS-IGBT 和第六代的 FS-Trench，第五、第六代产品是在 IGBT 经历了上述四次技术改进实践后对各种技术措施的重新组合。第五代 IGBT 是第四代产品“透明集电区技术”与“电场中止技术”的组合。第六代产品是在第五代基础上改进了沟槽栅结构，并以新的面貌出现。

代别	以技术特点命名	芯片面积 (相对值)	工艺 线宽 (微米)	通态饱和 和压降 (伏)	关断 时间 (微秒)	功率损耗 (相对值)	断态 电压 (伏)	出现 时间 (年)
1	平面穿通型 (PT)	100	5	3.0	0.50	100	600	1988
2	改进的平面穿通型 (PT)	56	5	2.8	0.30	74	600	1990
3	沟槽型 (trench)	40	3	2.0	0.25	51	1200	1992
4	非穿通型 (NPT)	31	1	1.5	0.25	39	3300	1997
5	电场截止型 (FS)	27	0.5	1.3	0.19	33	4500	2001
6	沟槽型电场-截止型 (FS-Trench)	24	0.3	1.0	0.15	29	6500	2003

目前我国的总体能源利用效率为 33%左右，比发达国家低约 10 个百分点。当前我国节能工作面临较大压力。

根据“十一五规划”要求，到 2010 年中国的能源使用效率将在 2005 年基础上提高 20%。在新能源领域，中国已成为太阳能电池生产的第一大国，风力发电的累计装机容量也连续 4 年实现翻番，这意味着中国新能源市场蕴藏着巨大的商机。无论是太阳能电池、风力发电还是新能源汽车，其系统应用都需要把直流电转换为交流电，承担这一任务的部件称为逆变器。逆变器的核心器件是 IGBT(绝缘栅双极型晶体管)，也是价格最高的部件之一，在国外，IGBT 技术及产品不断更新换代，而我国目前还不具备大批量生产 IGBT

的能力，主要都是珠海南车、北车生产的用于高铁的 IGBT 技术，还有华润微电子(想收购 Fairchild)，还有华宏宏力貌似也有，现在国家重点扶持 8 寸的 IGBT 技术。



来源：EETOP 论坛的网友分享