

1.2.4 MOSFET和IGBT技术的发展新动向

目前, MOSFET 和 IGBT 芯片的继续发展的目标在于

- 1) 降低通态压降;
- 2) 降低开关损耗;
- 3) 改善耐冲击性 (抵抗过流、过压的能力, 对开关过程的耐受力);
- 4) 提高高压晶体管的正向截止电压;
- 5) 由1) 到3) 而得到: 提高电流密度 (缩小尺寸);
- 6) 由5) 而得到: 提升单个芯片的电流, 或减少芯片的面积和成本;
- 7) 对 IGBT 来说, 分别针对饱和压降或高开关速度进行优化;
- 8) 集监测、保护和驱动功能或电力电子线路为一体 (单芯片化, 芯片叠加技术或硅片直接绝缘技术)。

特别是在最近的几年里, 我们看到这方面的发展异常迅速, 主要体现在: 单元设计在水平和垂直方向上的优化、单元结构的精细化、对超薄硅片的处理等等。

例如, 随着对薄硅片技术 (硅片厚度 $100\mu\text{m}$) 的掌握, 基于 NPT 技术的低损耗 600 伏 IGBT 已经问世 [164]。

目前, 改善 MOSFET 和 IGBT 的最大潜力在于单元设计的优化。

在这方面, 可以采用新的自适应工艺来实现高精微结构, 例如西门子公司 S-FET 系列。它的通态电阻较上一代 MOSFET 小了 5 倍左右, 而且在开关以及锁定运行时具有明显较高的耐受冲击力 [216]。这类 MOSFET 结构含有双重植入的栅极, 并在边缘隔离。类似的结构也被应用于现代的高密度 IGBT 中 (图 1.14)。

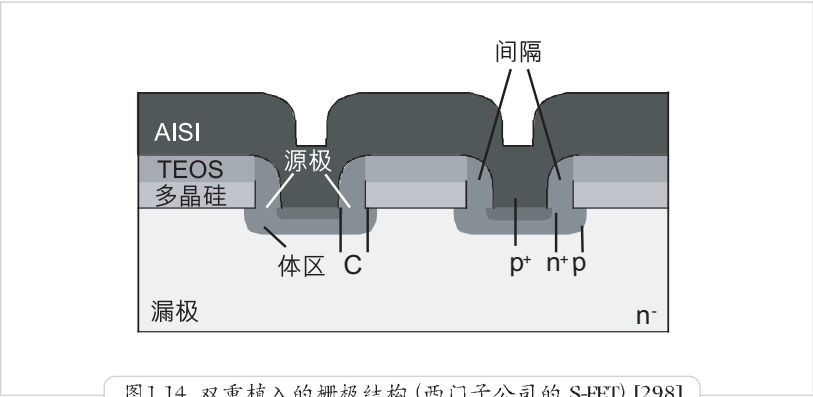
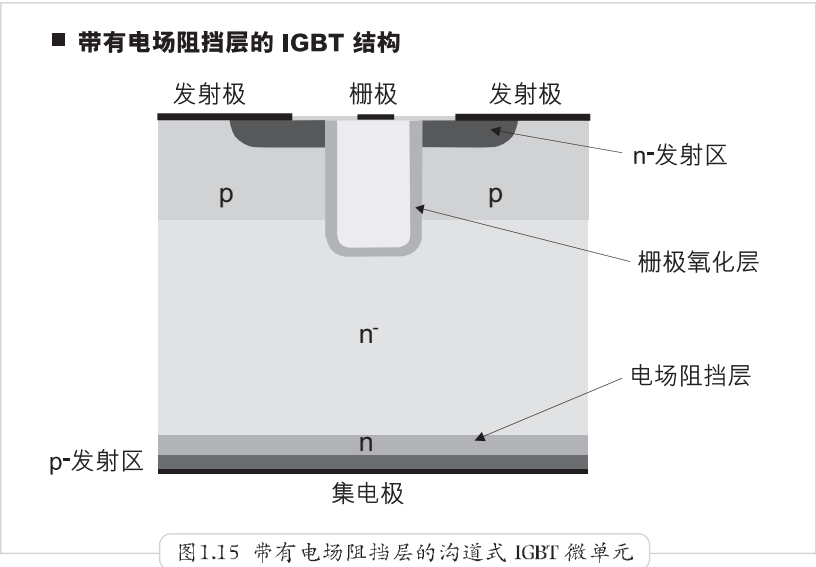


图 1.14 双重植入的栅极结构 (西门子公司 S-FET) [298]

一种新的 MOSFET 和 IGBT 的栅极结构是沟道式栅极。它与传统栅极结构的不同之处是在 p 井区上实现了一个垂直的沟道 (图 1.15)。因为采用这种结构使硅片的有效面积增大, 所以沟道截面的控制变得更容易, 可以实现更小的沟道电阻。具体来说, 通态的损耗可以降低约 30%。

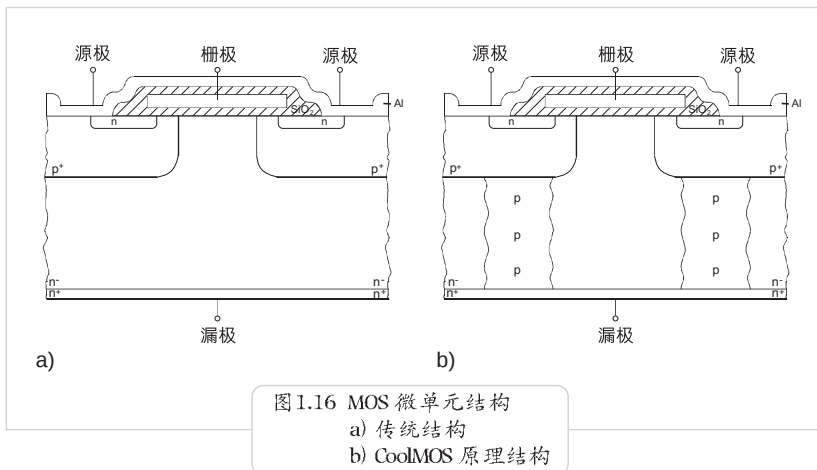
另外, 与平面式栅极的 MOSFET 或 IGBT 相比较, 沟道式 IGBT 的单元面积可以进一步缩小、电流密度更高、通态损耗更低、耐受锁定的能力更好、开关损耗更低、以及击穿电压更高。

和平面式器件相比较, 它的缺点是承受短路的能力稍低、栅极的电容也较大, 约为平面式的三倍左右。



应用沟道技术, 被称作 IEGT (注入式增强栅极晶体管 Injection Enhanced Gate Transistors) 的器件可以达到非常高的耐压 (4.5 至 6.5kV)。由于采用了阴极式发射极结构, 使空穴流失现象得以防止, 从而在导通状态下所得到的载流子的密度分布接近于晶闸管 [194]。

在研究高截止电压的功率 MOSFET 的领域内, 一个引人注目的进步是西门子公司在 1998 年推出的 CoolMOS [216]。如图 1.16 所示, CoolMOS 的 MOSFET 单元结构在漂移区内含有与井区相连的 p 导通区域。



由此,在正向截止状态下,电场不仅是在垂直方向上,而且也在水平方向上衰减,以至于 n^- 漂移区的厚度可以大大低于传统的 MOSFET,所以,导电能力得以提高。

因此,通态电阻 $R_{DS(on)}$ 不再象第 1.2.1 节所描述的那样呈指数性(指数 2.4 到 2.6)增长,而是仅随击穿电压 $V_{(BR)DS}$ 呈线性增长。例如对于一个 600V 的 CoolMOS 来说,它的通态损耗仅为具有相同芯片面积的传统 MOSFET 的 1/5。换句话说,为达到相同的电流输出能力,它只需要 1/3 的芯片面积,且它的开关损耗减少一半,通态损耗降至 35%。由于芯片面积的缩小,栅极的电容和电量也同样降至 1/3 [216]。

它的缺点是它固有的反向二极管的动态特性不佳。这一点限制了它在硬开关电路感性换流场合中的应用。

除此之外,其它方面的进展是利用其它的半导体材料,如碳化硅 (SiC) 等。

和硅相比, SiC 的击穿场强几乎是前者的 10 倍。

尽管 SiC 内部的电子活动性较低,但将它用在单极性元件中,它的导电电阻可以降低至 1/300。这使得器件的耐压可以远远超过 1000V。对于双极式 SiC 元件来说,由于它的漂移区较窄,使得存储电量可以小上约一个数量级。另外, SiC 的跃迁能量约为硅的 3 倍,一方面使它的运行温度可以高达 500 度,另一方面则使得双极性元件的开启电压可达 2.5V。

和硅元件相比,它的缺点是结电容明显较高,以及到目前为止仍十分巨大的技术难题:杂质的扩散几乎无法实现,无损伤的大面积芯片目前也还制造不出,当前用于边缘处理的基本技术还不能用于 SiC [282]、[124]、[130]。

将监测、保护和驱动功能或电力电子线路集成为一体(单片式、芯片叠加或芯片加绝缘体)的方法越来越显示出其重要性,特别是对低电压(例如,汽车电子)或低电流(例如,家用电器)的大批量应用来说更是如此。

例如,在被称作 SMARTPOWER 的智能晶体管中,驱动、保护、系统和诊断功能已经集成到一块芯片上。这除了使系统变得更小之外,还降低了损耗功率,增加了系统的可靠性 [277]、[213]、[232]。

最简单的方法是,在 MOSFET 或 IGBT 芯片表面上用扩散的工艺来实现各种检测和保护单元,从而在驱动电源的电位等级上实现对电流、电压或温度的检测和保护。

在这方面,较为流行的应用形式是 SENSFET 和 Sense (传感) - IGBT。在那里,主回路的源极或发射极被分做两部分:一个用来传递主电流的主要部分和一个平行的测量回路(电流镜像)。通过测量信号对控制回路的反馈作用,测量回路的传感电阻增加,从而使得测量回路的电流减小。Sense - IGBT 是多数 IPM 的组成部分。

TEMPFET 含有一个集成的温度传感元件。后者被用来作为过流的指示,同时当某一临界温度被超过后,将触发栅极和源极之间的短路。

PROFET 和 HITFET 则具有完整的驱动电路,包括如过流和短路保护、过压和过温保护、栅极保护、负载识别、防极性错误保护、过压和欠压关断线路以及一个用于产生栅极电压的倍充电路,见 [4]、[277]。

目前,PROFET 已经被制成一单元或多单元的高端元件,其耐压可达 60V。

与高端的开关元件相反,在 MOSFET 导通状态下,一个处于底部的开关并不具备充足的供电电压,来使得保护逻辑得以正常工作。因此,在 HITFET 中,一个集成的温度传感器可以使栅极电压在芯片温度升高时减小,进而使得漏极电压升至最低要求的供电电压 (3V),可以触发保护线路。

参阅 [232],将整个逆变器,包括功率半导体、高压控制/保护集成电路以及微电子系统控制电路,集成到单个芯片上的技术已经问世。目前的功率可达 1A/600V (不久将有 2A) 以及 5A/75V。和多芯片的混合电路相比较(目前达 30A/1200V,在 2002 年将达 150A),它的缺点是耐压局限在 600V 以下,耐受短路和脉冲电流的能力较低。另外同垂直结构式的晶体管相比,这里所采用的水平结构式的晶体管的损耗约为三倍。