

# 用于下一代功率模块中的新一代硅片设计

Katsumi Satoh, Tetsuo Takahashi, Hidenori Fujii, Manabu Yoshino

(三菱电机功率器件福冈制作所, 日本 福冈, 819-0192)

摘要: 受益于快速发展的硅片工艺, IGBT 硅片和二极管硅片的性能得到了显著提高并且日趋接近其理论极限。三菱电机通过采用新的硅片技术, 已经可以进一步降低功率器件的功率损耗。这里介绍了该新硅片技术中的微细图形工艺和优化杂质分布后新的硅片结构。

关键词: 模块; 损耗 / 硅片设计技术

中图分类号: TM46; TN3

文献标识码: A

文章编号: 1000-100X(2008)10-0075-03

## New Chip Design Technology for Next Generation Power Module

Katsumi Satoh, Tetsuo Takahashi, Hidenori Fujii, Manabu Yoshino

(Power Device Works, Mitsubishi Electric Corporation, Fukuoka, Japan 819-0192)

**Abstract:** Benefiting from the rapid process development, the performance of the latest silicon power devices such as IGBT and the performance of pin diode have been significantly improved and are approaching to their theoretical limits. Recently, a further reduction in the power loss of these power devices is achieved by applying new technologies. The application of finer patterning process and the new design of device structures with optimising the impurity profile are described.

**Keywords:** module; loss / chip design technology

### 1 引言

上世纪八十年代后期, 平面型 IGBT 模块被用于工业市场, 遂与续流二极管一起成为了主要的功率模块产品。在微细图形工艺发展的十年里, IGBT 的性能已经得到了显著改善。1999 年, 沟槽型 IGBT 开始批量生产, 现已广泛用于工业领域。沟槽型 IGBT 由于在 MOSFET 部分的表面未使用结型场效应管电阻, 从而通态阻抗低, 具有相当好的电气特性。优化  $n^-$  层中载流子分布的技术在 IEGT 或 CSTBT<sup>TM</sup> 产品中开始应用, 从而进一步降低了 IGBT 模块的功率损耗。另外, 薄晶片加工技术也得到了发展, 如采用 FZ 晶片来控制成本。

优良指数是 FOM (Figure of Merit, 简称 FOM) 常用来表示新技术与旧技术间变革有效性的指数。这里定义 FOM 为感性负载下, 硅片电流密度  $J_c$  除以产品在 125 °C 时的饱和压降  $V_{ce\ sat}$  和单个脉冲、单位电流下的关断损耗  $E_{off}$ 。最新的 IGBT 技术(第 5 代)的 FOM 比第一代产品要高出一个数量级。

寿命控制技术和薄晶片加工技术的应用进一步优化了杂质分布, 同时显著降低了续流二极管的功率损耗。另外, 为了响应全球对 EMI/EMC 的限定, 降低模块的噪声也受到更多的关注。因此, 伴随着新的 IGBT 技术的发展, 其特性越接近硅功率器件的理论极限。

阐述了通过发展微细图形技术来进一步改善

IGBT 模块性能的可行性。通过优化器件的结构设计可以实现在不牺牲安全工作区域(SOA)和噪声的前提下, 进一步降低器件的功率损耗。

### 2 目前的情况

#### 2.1 IGBT

通常, IGBT 参数中有两个相互制约的折衷关系: ①  $V_{ce\ sat}$  与关断功率损耗  $E_{off}$  的关系; ②  $V_{ce\ sat}$  与短路 SOA (SCSOA) 的关系。

为改善折衷关系①, 可对 CSTBT<sup>TM</sup> 或 IEGT 的  $n^-$  层载流子分布进行调制, 实现器件结构的优化。器件结构的改变降低了  $V_{ce\ sat}$ , 同时也提高了模块噪声源之一的关断  $dv/dt$ 。因此, 用栅极电阻来控制关断  $dv/dt$  很重要。

相反, 折衷关系②已经因薄晶片加工技术和轻掺杂  $n^-$  型缓冲结构的组合得到了极大的改进。薄晶片工艺的厚度小于 100  $\mu\text{m}$ , 轻掺杂  $n^-$  型缓冲结构可参考轻穿透、场截止或软穿透垂直结构。由于主电流是从背面的集电极流向正面的 MOS 结构表面的发射极, 因此 IGBT 的通态阻抗也取决于晶片的厚度。薄晶片工艺提供了一种提高器件性能的解决方案, 即通过研磨 IGBT 的背面来减小晶片的厚度, 因而不会降低 IGBT 的电压阻断能力或 SCSOA。但研磨过程会损坏晶体, 使得载流子寿命减小, 所以必须精确控制相关的工艺条件。1.2 kV 第 5 代 CSTBT<sup>TM</sup> 硅片关键参数的典型值为:  $J_{c\ sat}=145\text{ A/cm}^2$ ; 当  $T_j=125\text{ }^\circ\text{C}$  时,  $V_{ce\ sat}=1.9\text{ V}$ ;  $V_{ge\ th}=6.8\text{ V}$ ; 当  $V_{cc}=600\text{ V}$ ,  $V_{ge}=15\text{ V/0 V}$ ,  $T_j=125\text{ }^\circ\text{C}$  的感性负载时,  $E_{on}=10\text{ mJ/p}$ ,  $E_{off}=16\text{ mJ/p}$ 。

定稿日期: 2008-09-14

作者简介: Katsumi Satoh, 男, 日本人, 电子工程硕士, 研究方向为 IGBT 模块的设计。

## 2.2 二极管

提高续流二极管的性能主要在于改善  $V_F$ - $E_{rec}$  的折衷关系和减小反向恢复的振荡。采用 PIN 结构和寿命控制技术,可提高续流二极管的性能。

一方面,采用最近开发出来的局部寿命控制技术,被证实可以得到较好的  $V_F$ - $E_{rec}$  折衷关系;另一方面,PIN 结构中采用了 epi 二极管,在该结构中,n 层作为本征层和重掺杂分布的  $n^+$  缓冲层,通过外延的方式在  $n^+$  硅衬底上生长。重掺杂分布可以带来低的正向导通压降  $V_F$ ,但通常会引起反向恢复时的电压振荡。这种振荡是模块噪声的又一来源。虽然已经开发出具有消振去噪功能的阻断电压高于 3.3 kV 的高压二极管,但是,具有消振功能的二极管对控制晶体管寄生参数非常的敏感,相关的制作成本也很高。因此,目前从 pn 二极管到 epi 二极管主要还是在一定程度上牺牲了  $V_F$  的特性。另外,薄晶片工艺也可降低  $V_F$ 。

采用薄晶片工艺的 1.2 kV 二极管硅片参数的典型值为:当  $T_j=125^\circ\text{C}$ ,  $J_F=250\text{ A/cm}^2$  时,  $V_F=1.8\text{ V}$ ;当  $V_{ce}=600\text{ V}$ ,  $J_F=250\text{ A/cm}^2$ ,  $L=250\ \mu\text{H}$ ,  $T_j=125^\circ\text{C}$ ,  $di/dt=2.45\text{ kA/cm}^2/\mu\text{s}$  时,  $E_{rec}=0.075\text{ mJ/A/pulse}$ 。

## 3 下一代功率模块的技术

实现更好的折衷关系是功率器件开发最重要的目标之一。采用微细图形加工技术和更优化的杂质分布设计可以克服目前功率器件设计的困难。

### 3.1 微细图形技术

IGBT 的性能取决于微细图形技术。全部采用微细图形技术能提高沟槽密度。沟槽栅作为 MOS 的导电沟道,极大地提高了高密度 MOS 导电通道的导电能力。图 1 示出沟槽型 IGBT 硅片的截面图。元胞间距定义为相邻沟槽中心的距离。

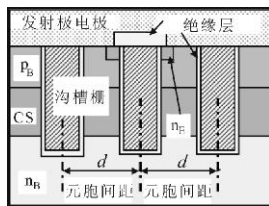


图 1 IGBT 集电极侧的结构图

图 2 示出 1.2 kV IGBT 特性参数与元胞间距的关系曲线。图 2a 是在电流密度  $150\text{ A/cm}^2$ ,  $125^\circ\text{C}$  条件下第 4 代沟槽型 IGBT 和第 5 代 CSTBT™ 硅片的  $V_{ce\text{ sat}}$  与  $d$  之间的关系。可见,在  $d=4\ \mu\text{m}$  时,CSTBT™ 的  $V_{ce\text{ sat}}$  比沟槽型的低 0.6 V。当  $d=2.2\ \mu\text{m}$  时,CSTBT™ 的  $V_{ce\text{ sat}}$  比沟槽型的还要低 0.3 V。图 2b 是两种硅片的饱和电流密度  $J_{ce\text{ sat}}$  变化曲线。可见,CSTBT™ 硅片的  $J_{ce\text{ sat}}$  比沟槽型 IGBT 增加约  $40\text{ A/cm}^2$ 。因此,CSTBT™ 技术可以获得更小的  $d$ 、更低的  $V_{ce\text{ sat}}$  和更大的  $J_{ce\text{ sat}}$ 。

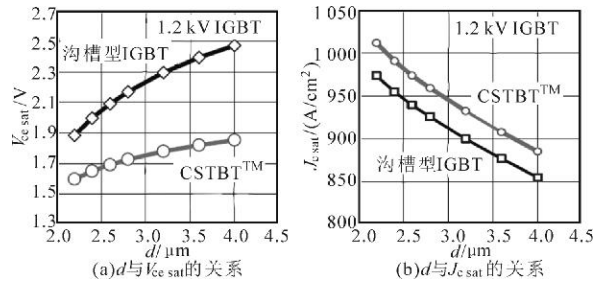


图 2 1.2 kV IGBT 特性参数与元胞间距的关系曲线

图 3 示出  $V_{ge\text{ th}}$ ,  $I_{c\text{ sat}}$  与短路承受能力之间的关系。由图可见,抑制  $V_{ge\text{ th}}$  可以提高 SCSOA 性能,且满足最小的集电极电流。因此,对于 IGBT, CSTBT™ 之类的双极性器件,在大规模集成技术基础上存在优化的空间。微细图形技术和器件性能的一致性在未来发展 CSTBT™ 的有效方法之一。

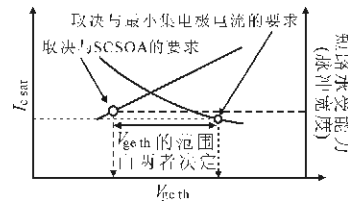


图 3 二极管在  $25^\circ\text{C}$  和  $125^\circ\text{C}$  时的正向特性

### 3.2 IGBT 元胞杂质分布

CSTBT™ 在沟槽栅区域由 3 层组成,N 发射极/P 基极/CS 层。如同三明治结构的 P 基极最终的掺杂情况反映了 CSTBT™ 垂直 MOSFET 部分的沟道掺杂分布,它是 n 型 CS 层和 P 基极掺杂过程互相补偿而形成的,如图 4a 所示。因此,由于额外的补偿,CSTBT™ 沟道的掺杂浓度分布比标准的双层沟槽型 IGBT 大。考虑到 CS 层和 P 基极之间额外补偿的影响,调整 CS 层掺杂分布为逆转型分布,由于在 MOS 沟道区减少了 n 型杂质,因而减小 CS 层杂质的影响,如图 4b 所示,最终减小了  $V_{ge\text{ th}}$  的分布,提高了 SCSOA 性能。

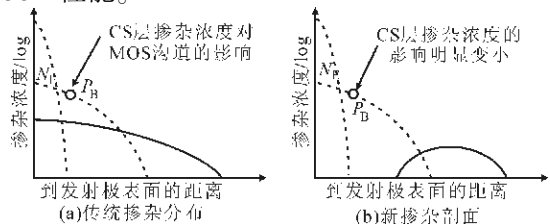


图 4 垂直 MOSFET 部分新掺杂与传统掺杂剖面分布

图 5 示出 CSTBT™ 新的掺杂分布的跨导特性与传统器件的比较。

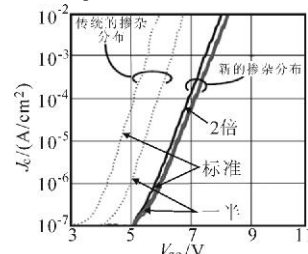


图 5 新掺杂分布和传统掺杂分布的跨导特性

对应于 CS 层掺杂剂量为 50%~100%,传统掺杂分布 CSTBT™ 硅片的阈值电压变化范围约为 0.85 V。相反,即使 CS 层掺杂剂量为 50%~200%,具有逆向分布的 CSTBT™ 的阈值电压变化被限制在 0.2 V。所以,MOS 沟道对  $V_{ge,th}$  的影响可以忽略,而且增强了器件性能的一致性。

### 3.3 二极管设计

图 6 示出续流二极管的正向导通载流子分布和掺杂分布,表明缓冲层的高掺杂浓度通常会致本征层附近的缓冲层掺杂浓度梯度大。这是引起反向恢复振荡的主要原因之一。高掺杂载流子缓冲层和薄本征层的应用能降低  $V_F$ ,但是也增加了相应的反向恢复电荷  $Q_r$ 。

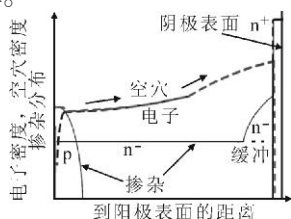


图 6 续流二极管正向导通的载流子分布

开发出一种新型 1.2 kV 续流二极管硅片。因采用薄晶片工艺和扩散技术,该硅片优化了缓冲层杂质分布和本征层、缓冲层厚度,减小了反向恢复的拖尾电流,并获得更好的  $V_F$  与  $Q_r$  的折衷关系。图 7 示出不同硅工艺二极管  $V_F$  ( $J_F=250 \text{ A/cm}^2, T_j=125 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 与  $E_{rec}$  ( $V_{cc}=600 \text{ V}, J_F=250 \text{ A/cm}^2, di/dt=2.45 \text{ kA/cm}^2/\mu\text{s}, T_j=125 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 折衷曲线。寿命控制技术通过控制电子束的辐照剂量来调整  $V_F$ 。相比传统工艺而言,该新工艺下的二极管具有更低的恢复功率损耗,因而通过优化杂质分布和缓冲层厚度可显著改善折衷关系。

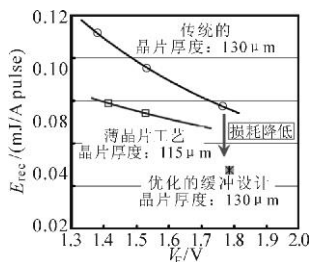


图 7  $V_F$  与  $E_{rec}$  的折衷关系

## 4 新一代硅片的电气特性

为了改进  $V_{ce,sat}-E_{OFF}$  关系,采用大规模集成微细图形技术和薄晶片工艺的第 6 代 IGBT(CSTBT™)已经诞生。可以通过微细图形技术减小沟槽间距离来加强 CS 层的影响。

### 4.1 IGBT

有效面积为  $8.3 \text{ mm}^2$  的第 6 代 1.2 kV/13 A IGBT 在  $V_{clamp}=1.2 \text{ kV}, V_{ge}=+17 \text{ V}/-15 \text{ V}, R_g=30 \text{ } \Omega$  和  $T_j=125 \text{ }^\circ\text{C}$  条件下拥有高于  $600 \text{ A/cm}^2$  的关断能力。图 8 示出关断波形,显示出新硅片具有足够宽的反向偏置安全工作区域(RBSOA)。

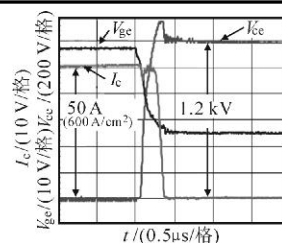


图 8 第 6 代 1.2 kV/13A CSTBT™ 的关断波形

具有高电流密度和低  $V_{ce,sat}$  的新型 CSTBT™ 不会损失宽 SCSOA 的特性,这使  $V_{ge,th}$  分布窄且可控。图 9 示出 SCSOA 测试波形。在  $V_{cc}=800 \text{ V}, T_j=125 \text{ }^\circ\text{C}$  和感性负载测试条件下,新型 CSTBT™ 展现了宽 SCSOA 和  $10 \mu\text{s}$  的短路承受时间。

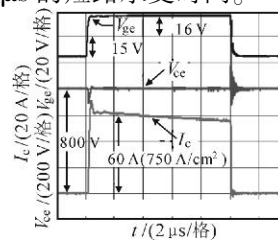


图 9 SCSOA 测试波形

### 4.2 二极管

薄晶片工艺和优化设计降低了  $V_F$ 。

在  $J_F=250 \text{ A/cm}^2$  条件下,新型二极管的  $V_F \approx 1.8 \text{ V}$ ,相应的  $E_{rec} \approx 0.047 \text{ mJ/A/pulse}$ ,这比图 6 描述的传统二极管(硅片厚度为  $115 \mu\text{m}$ )减少了 30%。更重要的是,轻掺杂的缓冲层能有效抑制反向恢复振荡。图 10 示出反向恢复波形。硅片厚度应为  $130 \mu\text{m}$ 。结果表明,新型二极管的拖尾电流明显比传统二极管的小,从而新型二极管的  $E_{rec}$  要小,折衷关系得到了更好的改善。

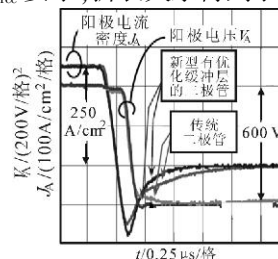


图 10 新型二极管和传统二极管的反向恢复波形

### 4.3 FOM 比较

通过比较第 6 代 CSTBT™ 和第 5 代 IGBT 发现,新型 CSTBT™ 因采用了微细图形技术,以提高沟道密度、优化掺杂分布来获得稳定的跨导特性降低总的功率损耗,故其 FOM 比第 5 代 CSTBT™ 高 30%。对 1.2 kV 的二极管做类似的 FOM 比较,以传统二极管作为参考。新型二极管的 FOM 比传统的高 30%。

## 5 结论

提出了一种新的掺杂分布和精细图形技术的设计思想。新开发的 IGBT 和二极管硅片将会应用于下一代的功率模块,以改进其性能,降低其开关和通态损耗。这项新技术在功率半导体工业应用领域中的影响势必将越来越大。