

# 优质高阻异型厚层硅外延 IGBT 材料 $n^-/n^+/p^+$

杨 谟 华

黎 展 荣

(电子科技大学 成都 610054) (峨眉半导体材料研究所 峨眉 614200)

**摘要** 我们的实验研究结果表明,已经在  $n^-/n^+/p^+$  材料的纵向电气与几何参数的最佳理论设计、关键的工艺生长技术和缺陷控制诸主要方面取得了进展,并因此制备了 2''—3''100 $\mu\text{m}$  厚度的高阻异型镜面硅外延片,且将其成功应用于 1300V/20A 高性能 IGBT 的研制。

**PACC:** 2520M, 2560R, 2560J

## 1 引 言

由于绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 及其模块具有高压大电流、高速低导通损耗、易驱动安全工作区宽等优越的电气性能和在交流变频调速、逆变器、机器人、空调器等电力电子技术领域的一系列广泛用途<sup>[1]</sup>,无疑它将在现代功率电子学中扮演十分重要的角色<sup>[2]</sup>。为了研究和制备高性能 IGBT,以迎接新技术的挑战,显然必须能提供在异型衬底上具有缓冲层和高阻厚层基区的外延基片。为此,最佳的理论设计和工艺上实现优质高阻异型厚层硅外延材料  $n^-/n^+/p^+$  就成为关键技术之一。

我们的实验研究结果表明,已经在该材料的纵向电气与几何参数的准确计量设计、关键的工艺生长技术及缺陷控制等主要方面取得了进展,并将其成功应用于 1000—1300V/20A IGBT 的研制。本文将主要围绕这几方面逐一加以分析阐明。

## 2 外延层参数的准确计量设计

理论分析和机助模拟表明,如图 1 所示的 IGBT 基本单元垂直方向电气与几何结构参数的彼此协调和准确量化,将有助于提高其开关速度,获得宽的安全工作区 (SOA)、低的正向压降<sup>[3]</sup>和高的正向阻断电压 ( $BV_{CE}$ )。

我们的实践指出,依据一定的器件技术指标要求,要准确地计量 IGBT 纵向参数如掺杂浓度、外延层厚度等是比较困难的。其中,方便的理论设计途径是利用雪崩击穿模型来量化、调整和协调这些既互相依存又彼此制约、需要折衷考虑的外延层电学几何参数。

按照 p-n 结雪崩倍增理论, 并把由 P 阱形成的 pn<sup>-</sup> 结作为较接近实际情形的复合结模型处理, 于是首先可由雪崩击穿方程导出临界击穿电场强度  $\epsilon_c$ :

$$\left. \begin{aligned} \int_{-\frac{w_a}{2}}^{+\frac{w_a}{2}} \alpha_p \exp \left[ - \int_{-\frac{w_a}{2}}^x (\alpha_p - \alpha_n) dy \right] dx = 1 \\ \alpha_p = A \exp \left[ -a/\epsilon_c \left( 1 - \frac{4}{w^2} x^2 \right) \right] \\ \alpha_n = B \exp \left[ -b/\epsilon_c \left( 1 - \frac{4}{w^2} y^2 \right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

实际上, 在场强  $(2-6) \times 10^5 \text{Vcm}^{-1}$  的宽范围内,  $\alpha_n \neq \alpha_p$ , 相去甚远。显然由(1)式导出的  $\epsilon_c$  较传统的令  $\alpha_n = \alpha_p$  的结果更为合理。对(1)式作相应的数学处理, 在保证离化率二级近似不退化前提下, 可求得  $\epsilon_c$  的二级近似解析解为

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_c = a / \left[ \xi - \eta + \ln A w_a \left( \frac{3}{7} \xi \eta \theta - \frac{1}{5} \xi \eta - \theta + 1 \right) \right] \\ \theta = \frac{1}{3} \frac{a}{\epsilon_c} \left( \frac{w_a}{w} \right)^2 \quad \xi = \frac{w_a}{2} \left[ A \exp \left( -\frac{a}{\epsilon_c} \right) - B \exp \left( -\frac{b}{\epsilon_c} \right) \right] \\ \eta = \frac{w_a}{6} \left( \frac{w_a}{w} \right)^2 \left[ \frac{a}{\epsilon_c} A \exp \left( -\frac{a}{\epsilon_c} \right) - \frac{b}{\epsilon_c} B \exp \left( -\frac{b}{\epsilon_c} \right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中,  $w_a$  及  $w$  分别为雪崩区与耗尽区宽度, 离化率系数  $A, a, B, b$  可取实验值<sup>[4]</sup>

$$\begin{aligned} A &= 2.25 \times 10^7 \text{cm}^{-1} & a &= 3.26 \times 10^6 \text{Vcm}^{-1} \\ B &= 3.80 \times 10^6 \text{cm}^{-1} & b &= 1.75 \times 10^6 \text{Vcm}^{-1} \end{aligned}$$

于是基于 IMPATT 器件物理以及工艺技术的可行性, 则可由式(2)通过试验最优化等解法导出  $\epsilon_c$  与  $w$ 。一经求得  $\epsilon_c, w$ , 那么重要的 P 阱区掺杂梯度  $\alpha$ 、n<sup>-</sup> 区浓度及正向阻断电压  $BV_{CE}$  等参数也就相应地被确定下来, 并可进行反演调节。例如  $\epsilon_c = 2.4 \times 10^5 \text{Vcm}^{-1}$ ,  $\alpha = 1.2 \times 10^{19} \text{cm}^{-4}$ ,  $w = 100 \mu\text{m}$ ,  $BV_{CE} = 1371 \text{V}$  就是一组典型的最佳理论结果之一, 且与实验结果较为吻合。

分析与计算结果表明, p<sup>+</sup> 衬底与厚外延基区 n<sup>-</sup> 之间薄缓冲层 n<sup>+</sup> 的插入实现了把降低少子注入效率与穿通结构相结合, 提高了 IGBT 的开关速度和正向阻断电压, 降低了正向压降; n<sup>+</sup> 层应具备过渡区窄、厚度低于 10  $\mu\text{m}$ 、浓度较高约  $10^{17} \text{cm}^{-3}$  的要求<sup>[5]</sup>。

### 3 高性能 n<sup>-</sup>/n<sup>+</sup>/p<sup>+</sup> 的工艺生长

为了实现 n<sup>-</sup>/n<sup>+</sup>/p<sup>+</sup> 材料垂直结构的量化设计, 获得纵向杂质浓度分布、外延层厚

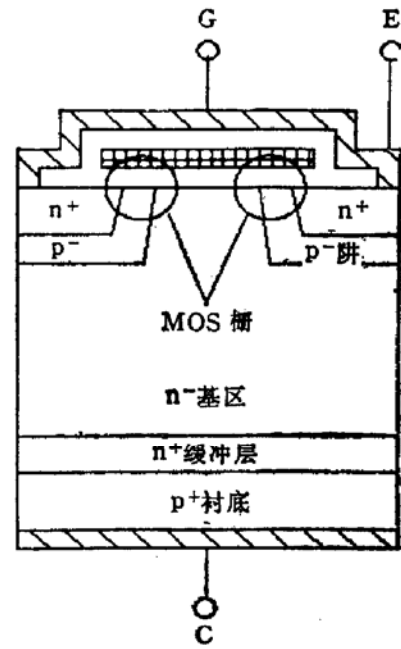


图1 IGBT 基本单元纵向结构

度与高电阻率的均匀性与一致性;有效地控制和减少位错、层错、小丘与桔皮等晶格结构缺陷,制备高质量的外延 IGBT 材料;解决 n 型与 p 型杂质的互补偿即反自掺杂问题,已经研究和发展的下述的特别工艺生长技术。

首先,采用多段外延生长技术,应用精制的高纯原辅材料  $N_2$ 、 $H_2$ 、 $SiCl_4$ 、超纯水等以及基座旋转的平底承片立式外延炉,可获得外延层的高电阻率,并提高厚层的均匀性与一致性。

其次,反复的实验研究包括外延材料生长、监测和器件应用表明,原始衬底的表面状况、反应淀积系统的净化程度和生长工艺是决定外延层性能优劣的主要因素;低缺陷密度高性能的外延材料可提高 IGBT 击穿电压 2—4 倍,管芯成品率 1—2 倍,并可大幅度地减少与之相关的软击穿现象。

生长前对优质硅原始衬底良好的化学机械抛光,将有效地减少在外延生长过程中继续产生位错、小丘、多晶点等点面缺陷的源,从而降低其密度一个数量级左右。实验和电镜观测指出,采用适宜的化学机械抛光工艺,无论是抛光片的表面平整度、小丘等缺陷密度,还是所生成的外延层缺陷,都远优于化学抛光工艺,后者表面粗糙,有桔皮结构出现,且缺陷较多。

为预防淀积在反应系统壁上的微粒于外延生长过程中降落至硅片表面上,形成小丘或钉形缺陷、金属离子沾污等,导致外延片的品质恶化,造成低击穿,宜在每一层次的外延生长前用  $HNO_3$  与  $HF$  的混合剂或  $HCl$  腐蚀净化反应系统,然后再在超纯水中彻底清洗干净备用,如是,效果相当明显。

一种新的生长工艺是在  $SiCl_4$  分解过程中仅采用  $H_2$  的生长技术。分析指出,这样将有助于提高气相原子达到硅表面的速率,从而增加硅原子被结合进外延层晶格的几率,并消除前面淀积过程中所形成的小丘等缺陷<sup>[6]</sup>,为下一步进行的生长提供更好的表面。与传统的利用  $HCl$  连续淀积流程不同,这样可获得镜面的优质外延层,进而大幅度地降低缺陷密度和提高击穿电压,避免早击穿现象发生。究其原因,无疑是  $HCl$  气相把污染带进反应系统所致。

此外,运用  $1.0 \pm 0.2 \mu m/min$  的低速生长技术;尽可能减小反应室中的热场梯度从而降低因非均匀加热而在硅片中诱生的热应力,可有效地减少外延层的位错、堆垛层错及桔皮等晶格结构缺陷,消除杂质原子的聚集,因而减少器件的漏电、源漏短路和低击穿。

利用高纯硅包封和新颖的双炉工艺,可较为满意地实现反自掺杂工艺技术。

最后,采用特别的倒角工艺,可消除厚层外延片的凸边现象,利于避免滑移线的形成。

## 4 实验结果

基于上述的理论计算与工艺技术,已经制得了位错密度小于  $500 \text{ units/cm}^2$ ,层错小于  $50 \text{ units/cm}^2$ ,表面无桔皮、凸边、雾状且呈光滑镜面的  $2''/3'' n^-/n^+/p^+$  外延材料。

典型的纵向扩展电阻测试曲线如图 2 所示,不难看出其中所包含的电气、几何参数及杂质浓度分布,且与理论值比较吻合。

应用该外延材料研制的 IGBT,已经取得了正向阻断电压  $BV_{CB} 1.0-1.3 \text{ kV}$ ,电流

10—20A, 正向压降 1.4V, 开关时间约 1.2 $\mu$ s, 芯片面积 18mm<sup>2</sup> 的实验结果。其正向阻

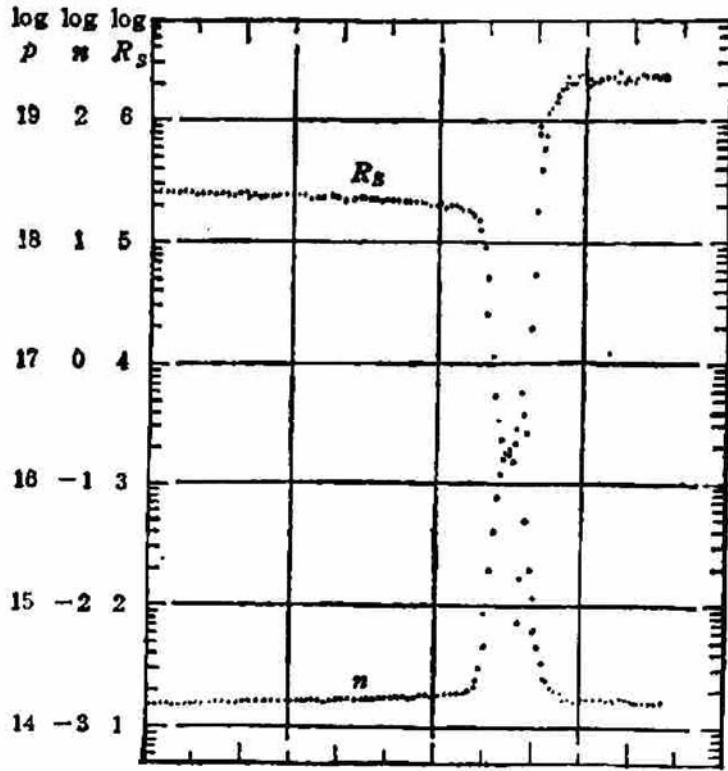


图2  $n^-/n^+/p^+$  材料纵向扩展测试曲线  
 $R_s$ ——纵深扩展电阻分布  $n$ ——纵深载流子浓度分布 横标——15 $\mu$ m/格

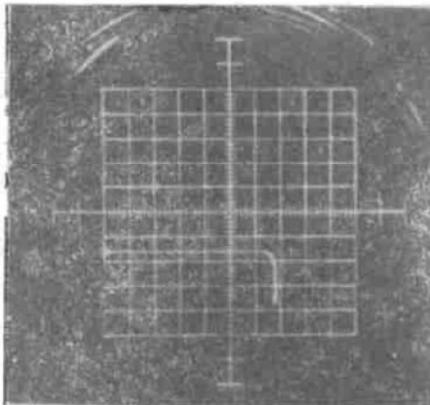


图3  $n^-/n^+/p^+$  IGBT 正向阻断特性  
x轴 200V/格 y轴 0.1mA/格  $V_{GE} = 0V$   $I_{CE} = 0.2mA$

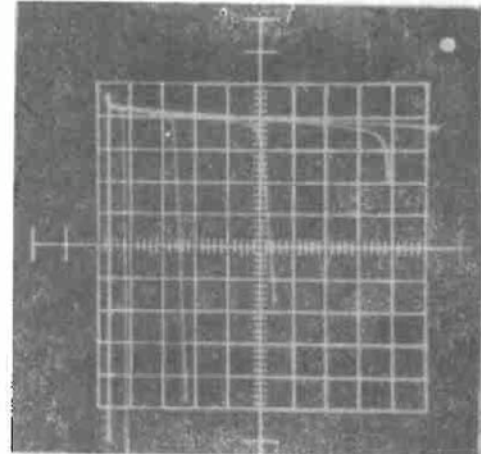


图4 IGBT 输出特性曲线  
x轴  $V_{CE}(V)$  5V/格 y轴  $I_{CE}(A)$  2A/格

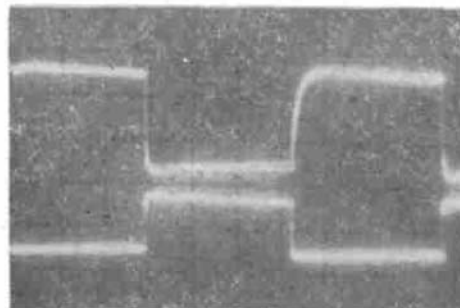


图5 IGBT 开关特性  
上——输出波形 下——输入波形 x轴 4 $\mu$ s/格

断特性、输出特性和开关特性分别示于图 3、图 4 与图 5。

器件研制的结果表明,若  $n^-/n^+/p^+$  材料主要的电气几何参数,凡一项或几项明显地左右偏离了准确的量化范围,则在相同元胞、终端技术与版图设计的条件下,器件技术指标将会显著降低,如  $BV_{CE}$  只能达到 400V 左右,严重者甚至不可能制得 IGBT。

目前,正把该器件实际应用于电机的交流变频调速、逆变器、1kVA 交流稳压源等电力电子技术领域。由于 IGBT 电气性能好、功率处理能力强,其推广应用前景令人鼓舞。

## 5 结 论

欲获得用于制备正向阻断电压高、电流大、开关速度快、SOA 宽的 IGBT 的优质高阻异型厚层硅外延材料  $n^-/n^+/p^+$ , 其关键因素为: 针对一定的器件性能指标,必须对该材料纵向电气与几何参数如临界击穿场强、掺杂浓度及各层厚度进行准确地量化设计;为实现该设计,还应开发并采用诸如多段外延与低速生长、有效地控制与减少缺陷密度的综合措施、反应淀积系统的净化、反自掺杂等重要新工艺生长技术。实验结果与理论计量比较吻合。

**致谢** 作者对于峨眉半导体材料研究所赵庆贵、张新生及其研究组为配合该研究所进行的大量实验工作深表谢忱。

## 参 考 文 献

- [1] 遠藤 保 *et al.*, 電子技術, 1991, **33**(10):42.
- [2] B. J. Baliga, IEEE-Electron Device 1991, **38** (7); 1568.
- [3] H. Yilmaz *et al.*, IEEE Trans. on Industry Application, 1990, **26**(5): 831.
- [4] S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, 1981, ch. 1, 2, 10.
- [5] D. S. Kuo and C. M. Hu, IEEE Electron Device Lett., 1986, **7**(9): 510.
- [6] S. K. Tung, J. Electrochem. Soc., 1965, 112: 436.

## High Quality Thick Si Epitaxial Films $n^-/n^+/p^+$ for IGBT

Yang Mohua

(University of Electronic Sci. & Tech., Chengdu 610054)

Li Zhanrong

(Emei Semiconductor Material Institute, Emei 614200)

**Abstract** Our experimental research findings show that quite important advances have been achieved in optimized theoretical design of the electrical and geometrical parameters of the  $n^-/n^+/p^+$  longitudinal, as well as in its key growth technologies and defects control. Based on these results, 2"—3" 100 $\mu$ m thick specular epitaxial layers have been fabricated which make high-performance 1300V/20A IGBT come true.

**PACC:** 2520M, 2526R, 2560J