

三重扩散型 IGBT 的计算机模拟分析

李如春

陈去非 陈启秀

(浙江工业大学电子系 杭州 310014)

(浙江大学功率器件研究所 杭州 310027)

摘要 本文根据目前国内半导体工艺水平的现状,提出了一种适合我国国情的制作 IGBT 的工艺方法——三重扩散法,着重用器件模拟的方法,从理论上分析了三重扩散法在高压 IGBT 器件制作上的优势和切实可行性,并用实验的结果验证了其正确性。

EEACC: 2560J, 2550, 1130B

1 引言

绝缘栅双极晶体管(IGBT)^[1]是双极与 MOS 的复合器件,它集中 MOSFET 与双极的优点于一身,其特性明显优于双极和 MOSFET,所以自问世以来一直受到人们的青睐。

IGBT 的基本结构见图 1。从图中可以看到,IGBT 与 VDMOS 结构上唯一的不同是将 VDMOS 的 N^+ 衬底换成了 P^+ 衬底(对于 N 沟道器件),从而将双极的电导调制效应引入了 IGBT 的 N^- 区。由于强电导调制效应的引入,不仅使 IGBT 的导通电阻大大减小,而且也使 IGBT 的电流密度随击穿电压的平方根慢慢下降,远优于功率 MOSFET 的电流密度随击穿电压的 2.5 次方下降,从而使 IGBT 成为高压器件(大于 500V)领域中一个强有力的竞争对手。

从上述介绍我们可知,IGBT 的制作需要这样一种材料,即在低阻 P^+ 材料上形成厚的高阻 N^- 层,从而获得高的击穿电压和低的导通电阻。国外对于此种衬底材料的制

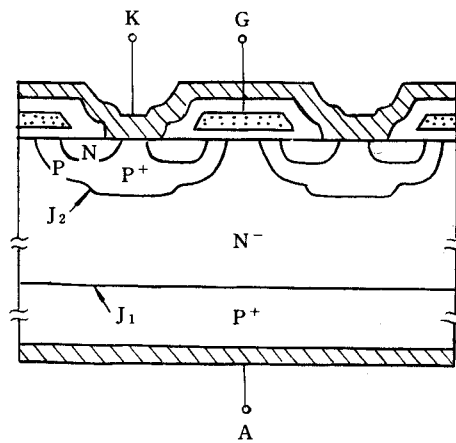


图 1 IGBT 的基本结构图

李如春 女,1968 年生,硕士,助教,目前从事专业为应用电子技术
陈去非 男,1962 年生,博士,讲师,目前从事专业为半导体器件与微电子技术
陈启秀 男,1933 年生,教授,博士生导师,目前从事功率器件及功率集成电路的研究
1994 年 6 月 9 日收到初稿,1994 年 11 月 12 日收到修改稿

作一般采用厚外延技术与硅片直接键合技术(SDB). 由于国内的半导体工艺水平和国外相差较远,厚外延和 SDB 的工艺技术都还不成熟,无法实现大批量生产,而且价格相当昂贵. 鉴于 IGBT 卓越的功率性能和广泛的应用^[2],使其在我国实现大批量生产是很有必要的,但这必须从我国的国情出发. 为此,我们从实现优异的价格性能比的角度出发,提出采用三重扩散的方法来制作 IGBT 的衬底.

用三重扩散法制作的 IGBT,其背面形成的阳极结为缓变结;而采用外延与 SDB 技术形成的阳极结则为突变结,这是三重扩散法与常规方法制作的 IGBT 最重要的不同. 本文将从计算机模拟的角度,分析和证实用三重扩散法在高压 IGBT 器件制作上的优势和切实可行性.

2 程序简介

模拟所用的软件是美国斯坦福大学编制的 PISCES-1^[3],这是一个二维器件模拟程序,可以模拟器件稳态和瞬态时的电特性. 不管是平面器件还是非平面器件,只要其具有完整的几何形状和杂质分布,都可用此程序进行分析模拟. 程序采用非均匀的三角形网格,且程序在解的过程中可进一步完善已定义的网格.

由于半导体的电特性可由泊松方程和载流子连续性方程来描述,即:

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla \phi) = -q(p - n + N) \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{J}_n = qU(n, p) + q \frac{\partial n}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{J}_p = -qU(n, p) + q \frac{\partial p}{\partial t} \quad (3)$$

其中

$$\vec{J}_n = q\mu_n \left(-N \nabla \phi + \frac{kT}{q} \nabla n \right) \quad (4)$$

$$\vec{J}_p = q\mu_p \left(-p \nabla \phi - \frac{kT}{q} \nabla p \right) \quad (5)$$

所以 PISCES-1 的基本功能就是把电势 ϕ 、电子浓度 n 、空穴浓度 p 作为自变量解以上三个方程.

程序提供了多种求解方程的方法,用户可根据器件的工作条件自行选择. 在本文的模拟中,采用 Gummel 法(非耦合法)外加 ICCG 迭代(Incomplete Cholesky Conjugate Gradients)获取初始解,然后采用牛顿法求解各种偏置情况下的器件特性.

由于 IGBT 具有横向对称的结构,所以在实际的模拟中只须取其单元的一半即可. 模拟所用的结构参数如图 2 所示:

根据实验所积累的经验,我们在模拟中采用如下比较接近实际生产条件的的工艺参数:
 N^+ 阴极区: $X_j = 1.5 \mu\text{m}$, $N_s = 1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$, P^+ 阱: $X_j = 5 \mu\text{m}$, $N_s = 1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$, P : $X_j = 4 \mu\text{m}$, $N_s = 2.5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$, N^- 基区: $W_B = 220 \mu\text{m}$, $N = 1 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$, $\tau = 30 \mu\text{s}$, P^+ 阳极区: $X_j = 130 \mu\text{m}$, $N = 1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$, 栅氧化层: $t_{ox} = 1000 \text{\AA}$, 多晶硅厚度: 5000\AA , 铝条厚度: $3 \mu\text{m}$.

实际的模拟按以下三个步骤进行:①根据器件的结构参数、工艺参数的分布,生成网格.

②在生成的网格的基础上,根据器件的偏置情况求解器件的各种特性. ③分析所求得解,并将数据画成相应的曲线图.

3 结果及分析

IGBT 在正常工作时,栅极加正向电压,形成沟道,给 PNP 管提供基极电流,使 IGBT 开通;反之,加反向栅极电压时,消除沟道,使 IGBT 关断. 在本文的模拟分析中,着重讨论了 IGBT 的正向导通特性、耐压特性、关断特性和寄生门锁特性.

下面我们就利用模拟所得到的结果进行讨论.

图 3 是其纵向电流密度分布图,虽然 N^- 基区的电导调制效应不及外延和 SDB 强,但由于扩散型 IGBT 是在单晶片上制作的,材料的载流子寿命较高,一般可达到 $30\mu s$ 以上,提高了 N^- 基区少子的扩散长度,使电导调制效应有所增强,故其通态电流密度可达 $170A/cm^2$,比外延和 SDB 略为逊色.

图 4 的输出特性的模拟结果表明,尽管扩散型 IGBT 的基区宽度较厚,阳极区的品质因数较小,但因其 N^- 基区为单晶材料,它的完整性比较好,载流子寿命比较大,所以其正向压降虽比外延和 SDB 材料制作的 IGBT 大,但也只有 2.8V 左右.

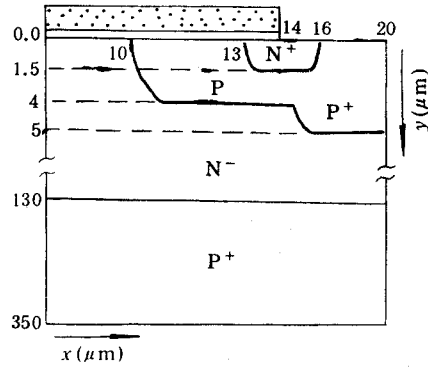


图 2 结构参数图

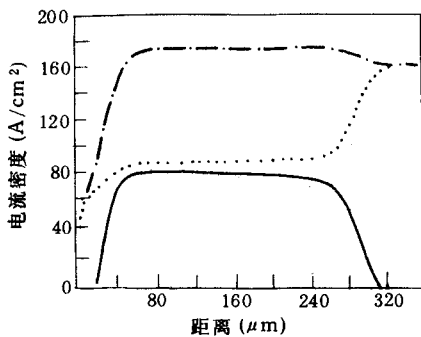


图 3 $x=20\mu m$ 处纵向电流密度分布

$$V_{AK}=2.5V, V_g-V_{th}=11.1V$$

——电子 - - - - 空穴 - · - · - 总量

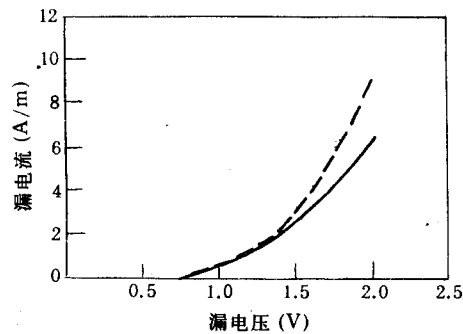


图 4 输出特性

—— $V_g=4.5V$ - - - - $V_g=7.0V$

图 5 是正向耐压特性图. 我们知道, IGBT 的正向阻断能力是由 J_2 结提供的, 它的正向击穿电压, 实际上就是 PNP-BJT 的 C-E 击穿电压, 即:

$$BV_{AK} = BV_{KBO}(1 - \gamma_p \beta_p^*)^{1/6} \tag{6}$$

其中 γ_p, β_p^* 为阳极结的注射率和基区输运系数, BV_{KBO} 为 J_2 的雪崩击穿电压. 当 J_2 结为突变结时, J_2 结的雪崩击穿电压为:

$$BV_{KBO} = 5.34 \times 10^{13} N_B^{-3/4} \quad (7)$$

实际上,上式还包含 PNP 基区穿通的限制.若基区一旦穿通, γ_p 、 β_p^* 均趋于 1,此时的 BV_{AK} 即为基区的穿通电压,所以 IGBT 的正向耐压主要取决于 N^- 基区的浓度和宽度.由于扩散型 IGBT 的 N^- 基区宽度大、浓度小,所以正向阻断能力可达 960V 左右,这是扩散型 IGBT 的一个很大的优势.

图 6 是关断特性的模拟结果.由于关断时间是 IGBT 性能优劣很重要的一个参数,许多结构及工艺上的优化都是为了提高关断时间,而关断时间的长短主要取决于 N^- 基区过剩

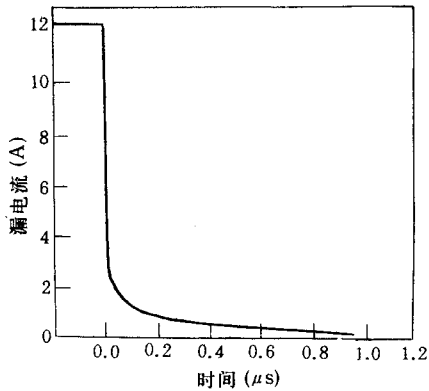


图 5 正向耐压特性

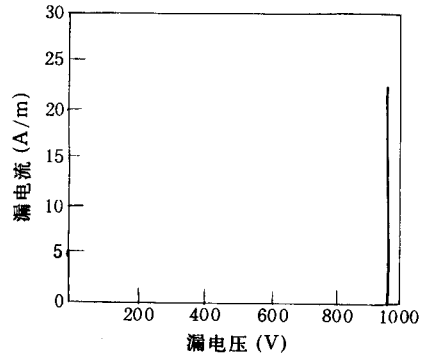


图 6 关断特性

少数载流子的多少,所以,要缩短 IGBT 的关断时间,应设法减少 N^- 基区的过剩少子的存储量.由于扩散型 IGBT 的阳极结注入效率低,可减少 N^- 基区少子的存储量,从而提高了关断速度.从图中我们可以看到,扩散型 IGBT 的关断时间大约只有 $0.3\mu s$,这比外延和 SDB 要优越得多.

模拟结果还表明,扩散型 IGBT 的闩锁电流密度约 $1.65A/cm^2$.这是由于闩锁发生的条件为 $\alpha_N + \alpha_P \geq 1$,而扩散型 IGBT 的阳极结的注入效率较低,故其 PNP 的电流增益 α_P 较小,从而使其闩锁电流密度较高.

4 实验结果

为了验证模拟结果的正确性,我们进行了小批量实验,分别用三重扩散法与 SDB 和外延材料制作 IGBT,并测试其性能指标.

由于 SDB 材料未能搞到,本实验只能用外延材料和三重扩散材料进行.实验用的外延材料:外延 N^- 区电阻率为 $40 \pm 6\Omega \cdot cm$,外延厚度为 $100 \pm 10\mu m$;三重扩散材料: N^- 区电阻率为 $36 \sim 42\Omega \cdot cm$, P^+ 阳极区扩散结深为 $130 \pm 10\mu m$,最终留下的 N^- 区厚度为 $220 \pm 10\mu m$.实验用的芯片面积为 $3.35 \times 4.65mm^2$,有源区面积为 $8.75mm^2$,采用六环部分覆盖环场板混合终端,所得的典型实验结果如下表:

电参数	外延材料 IGBT	三重扩散材料 IGBT
击穿电压(V)	600	1000
电流密度(A/cm ²)	230	160
正向压降(V)	1.8	2.8
下降时间(μ s)	1	0.25

对比以上电参数可以看出,所得实验结果与模拟结果吻合得较好.

5 结论

综上所述,利用三重扩散的工艺制作 IGBT,在高压器件上很有优势. 特别是从性能价格比的角度来看,在目前我国半导体工艺水平还比较落后的情况下,三重扩散法制作 IGBT 更具有推广实施的价值.

参 考 文 献

- [1] B. Jayant Baliga *et al.*, IEEE, Electron Device, 1984, 31(6):821-827.
- [2] 张秀澹, 半导体技术, 1990, 3:1-7.
- [3] Mark R. Pinto *et al.*, "PISCES— II User's Manual", Stanford Electronics Laboratories Department of Electrical Engineering Stanford University, (1984).

Device Modeling of Triple-Diffused IGBT

Li Ruchun

(Department of Electronics, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014)

Chen Qufei and Chen Qixiu

(Institute of Power Device, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Received 9 June 1994, revised manuscript received 12 November 1994

Abstract According to the state of the semi-conductor technology in our country, this paper proposed a new technology—triple-diffused, used to fabricate IGBT. The superiority and feasibility of the triple-diffused IGBT have been analysed by device modelling and proved by experiments.

EEACC: 2560J, 2550, 1130B