第 21 卷第 9 期 半 导 体 学 报 Vol. 21, No. 9
2000 年 9 月 CHINESE JOURNAL OF SEMICONDUCTORS Sep., 2000

基于 SDB 技术的新结构 PT 型 IGBT 器件研制*

何 进 王 新 陈星弼

(电子科技大学微电子所, 成都 610054)

摘要: 报道了基于 SDB 技术的新结构穿通(PT)型 IGBT 器件的研制. 运用 SDB 技术, 实现了 PT 型 IGBT 器件的 N^+ 缓冲层的优化设计, 也形成了 IGBT 器件的正斜角终端结构. 研制出 IGBT 器件有较好的电击穿特性和关断特性.

关键词: IGBT; 穿通; 优化设计; 硅片直接键合

EEACC: 2560; 1210

中图分类号: TN323⁺.4 **文献标识码**: A **文章编号**: 0253-4177(2000)09-0877-05

Preparation of PT-IGBT with New Structure Based on SDB*

HE Jin, WANG Xin and CHEN Xing-bi

(*Institute of Microelectronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu* 610054, *China*)

Received 18 December 1999, revised manuscript 1 February 2000

Abstract: Preparation of PT-IGBT with the new positive bevel structure is investigated, based on the Silicon Wafer Direct Bonding(SDB) technology. Utilizing the SDB technology, it is very convenient to optimize the N^+ buffer layer and to obtain the positive bevel terminal structure of IGBT. The experimental results show that the SDB technology is very useful in the development of new generation of IGBT devices.

Key words: IGBT; punch-through; optimization design; silicon wafer direct bonding(SDB)

EEACC: 2560R

Article ID: 0253-4177(2000)09-0877-05

* 国家自然科学基金资助项目(69776041)[Project Supported by National Natural Science Foundation of China Under Grant No. 69776041].

何 进 男, 32 岁, 博士, 目前研究方向为功率半导体器件与新型半导体材料.

1999-12-18 收到, 2000-02-01 定稿

1 引言

具有MOS栅控能力和双极晶体管大电流传输性能的绝缘栅双极晶体管(IGBT)是理想的功率半导体开关之一,可广泛应用于开关电源、逆变器、激光电源、机车牵引等领域.为满足将来电力电子技术的更高要求,必须在现有的基础上,采用各种新工艺、新结构来进一步发展高耐压、大电流、更快开关速度的高性能IGBT器件.近年来,硅片直接键合技术(SDB)用于低正向压降和快关断速度的PT型IGBT的研制获得迅速发展.1986—1996年,东芝公司宣称其在1200—1700V IGBT的制造中用SDB技术取代高阻厚外延工艺获得成功[1];1995—1996年,摩托罗拉发表基于SDB技术的600V PT型IGBT技术报告和缓冲层的优化设计[2];1997年,韩国三星公司也宣布用SDB技术制造的1000—1200V IGBT实现商品化[3].上述IGBT的研制工作,其共同特点是用SDB技术代替厚外延或深扩散工艺实现N^+缓冲层的优化设计,得到IGBT在正向压降和关断速度之间的折衷,而器件的终端设计各自采用了不同的方案.本文作者通过对SDB技术进行的实验和理论研究[4,5],发现灵活运用SDB技术,不仅能顺利实现PT型IGBT的缓冲层优化,而且可将通常仅适用于大面积功率器件的首选终端技术——正斜角表面造形在小面积的IGBT单管上与键合结构同时实现.基于此,本文报道了利用SDB技术对这种新结构的PT型IGBT器件的研制工作,给出了实验测试的IGBT器件特性.

2 SDB技术和正斜角终端硅片结构的实现

2.1 SDB技术

硅片直接键合(SDB)技术的研究虽然从1985年Lasky提出后[6]才开始,但该技术的发展潜力使它近几年迅速成为VLSI、MEMS、PE、SOI等领域中硅工艺研究的热点.其基本原理为[7]:将抛光水平达到VLSI要求的两块硅片用氧化性化学液进行表面亲水化处理,依靠硅片表面形成的氢键作用力完成两硅片的面对面迭合时的室温预键合.温度升至200℃以上时,硅片靠表面水分子的升华造成的负压实现更大程度的贴紧.700℃以上时,表面Si-OH键发生缩聚反应生成SiO_2和H_2O,界面出现更多的Si-O-Si,Si-O键实现两硅片的Si-O-Si键合.1000℃左右,界面SiO_2发生形变和输运填充界面空洞,同时发生氧的间隙扩散引起的SiO_2溶解效应和界面自由能驱动的SiO_2团聚化和Si的类外延生长效应,实现了硅片之间高强度(≥100Pa)、薄界面层(0.1—2nm)的良好键合.这也适用于Si-Si、SiO_2-Si、SiO_2-SiO_2等类型的键合过程.

2.2 正斜角终端硅片结构的实现

虽然SDB技术已被上述研究运用于功率器件的设计,但他们运用该技术的主要目的是形成$N^-/P(N)^+$或P^-/N^+衬底结构以代替三重扩散技术和厚外延技术.Nakagami等人首次将SDB技术运用于PT型IGBT器件中[1],强调了N^+缓冲层的优化设计.通过SDB技术的深入研究,本研制灵活运用SDB技术,将N^+缓冲层的优化和正斜角终端结构在SDB工艺过程中一起实现.其工艺过程如下:(1)N^-及P^+材料准备;(2)P^+离子注入(N_T= 4—5×$10^{15}cm^{-2}$);(3)N^+离子注入(N_T= 3—3.5×$10^{15}cm^{-2}$);(4)正斜角腐蚀;(5)背键合;(6)薄减N^-硅片,如图1所示.对IGBT的N^+缓冲层理论分析表明[7]:在IGBT正向阻断情况下,耗尽层不能穿通N^+缓冲层,故缓冲层的电荷Q必须足够大,使电场强度在此几乎降为零.但同时,N^+缓冲层的电荷又不能太大,以免IGBT的注入效率太低,器件的正向特性变差.理论分析表明[8]:最佳N^+缓冲层的掺杂浓度和厚度的乘积,即Gummel数G_N^+为

$$1.3\times10^{12}\mathrm{cm}\leqslant G_N^+\leqslant2.0\times10^{14}\mathrm{cm} \tag{1}$$

本文器件的研制,N^+缓冲层离子注入剂量及能量以上述参数值为标准.

众所周知,PT型反偏P-N结在P^+-N^-结及N^+-N^-高低结界面上有强电场.根据TMA MEDICI软件

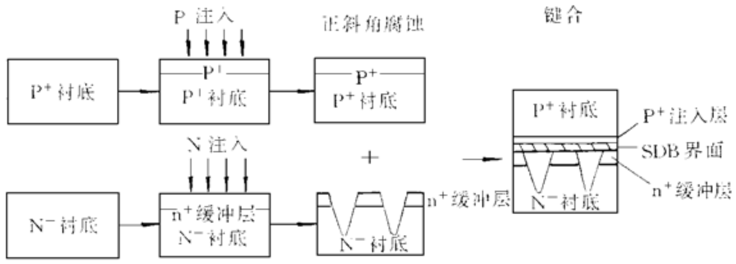

图 1　由 SDB 技术同时实现正斜角终端硅片结构和缓冲层的工艺示意图

FIG. 1　Processing Flow by Using Buffer Layer Optimization and Positive Bevel Terminal Simultaneously Based on SDB

对穿通结电场分布与正斜角角度关系的模拟, 最佳正斜角在 45—85°范围内. 通过 HF∶HNO_3∶CH_3COOH 腐蚀液和工艺的合理调节, 可以方便地形成上述正斜角的腐蚀外形. 显微分析表明: 虽然腐蚀外形在底部为一曲面, 但大部分表面出一恒正斜角. 本文通过数学模型的建立, 使用通用软件模拟了工艺上的腐蚀外形. 模拟工作表明: 这类腐蚀外形较之恒定正斜角外形, 更有利提高器件的击穿电压, 见图 2.

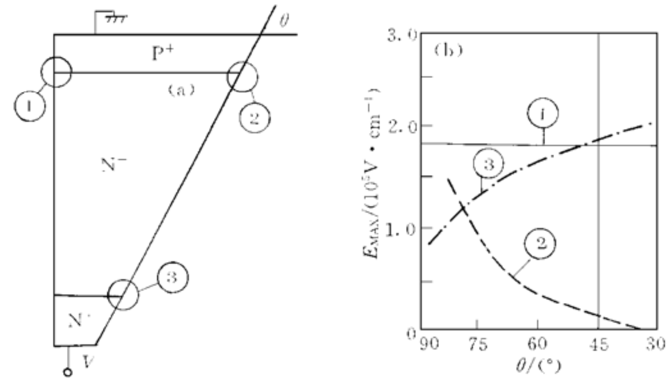

图 2(a)　穿通结强电场分布点　　　图 2(b)　模拟的强电场与正斜角的关系

FIG. 2(a) Strong Field Distribution Points(1, 2 and 3) of PT-Structure;

FIG. 2(b) Simulated Maximum Field Versus Positive Bevel Angle

3　PT 型 IGBT 器件的结构与工艺设计

IGBT 功率器件的设计内容包括表面布局的选择和纵向参数的确定. 为了获得较好的综合电性能, 原始材料采用 NTD 类型的长寿命高电阻的双面抛光 N^- 单晶硅片. IGBT 处于正向阻断状态时, P-N-P 晶体管处于基极开路状态. 因此, 其阳极阻断电压为:

$$V_{AK} = BV(1-\alpha)^{1/6} \tag{2}$$

式中　BV 为 P-N-N^+ 穿通结击穿电压; α 是共基极电流放大系数, 因为 $\alpha = \alpha^* \gamma$, 发射效率 γ 和输运系数 α^* 分别表示为:

$$\alpha^* = \mathrm{sech}(W_{n^-}/L)^* \mathrm{sech}(W_{n^+}/L') \tag{3}$$

$$\gamma = 1/(1 + G_B/G_E) \tag{4}$$

$$G_B = \int (N_B/D_B)\,dx \tag{5}$$

$$G_E = N_E W_E / D_E \quad (6)$$

式中 W_{B^-}、W_{B^+}、L、L'分别为轻、重 N 型掺杂区的中性区厚度及扩散长度; G_B 和 G_E 为基区发射区的 Gummel 数; W_E 是发射区的长度; D_E、D_B 是各区少子的扩散系数.

很明显: 加了 N^+ 缓冲层后, G_B 增大了, γ 下降了, 从而 V_{AK}提高. 同理, 在相同 V_{AK}下, 加了 N^+ 缓冲层后, N^- 区则减小了. 根据以上关系, 可以求出优化的 N^- 基区厚度 W_{B^-} 和浓度 N^-. 我们研制的 IGBT 要求 $V_{AK}= 1200V$, 则计算结果的 N^- 基区浓度 $N^- = 3\times10^{13}cm^{-3}$, $W_{B^-} = 100\mu m$.

在 IGBT 纵向参数中, P 基区必须采用双层 P 型注入的办法以减小横向电阻, 提高闩锁电流. 首先注入高浓度的 P^+ 区($N_T = 2—4\times10^{15}cm^{-2}$, $E = 80keV$)用以减小 P 基区横向电阻. 再注入低浓度的 P 区($N_T = 1—2\times10^{14}cm^{-2}$, $E = 140keV$)调节开启电压 V_T 和表面 MOSFET 沟道长度(1.5—2μm). 此外, P^+ 横向扩散的边缘要控制在元胞多晶硅窗口边缘.

IGBT 表面虽为一系列 MOS 元胞, 但布局却必须考虑闩锁电流、正向压降和最大电流之间的折衷. 基于 7mm 3μm 工艺线全离子注入工艺对图形布局的主要参数进行了计算机模拟. 考虑到工艺方便和光刻要求, 选择方形原胞. 因为

$$I = N(1 + \beta) I_{MOS} \quad (7)$$

式中 I 为通过 IGBT 器件的总电流; β 为电流放大系数; N 为原胞总数; I_{MOS}为 MOS 沟道电流. 设 IGBT 可通过最大电流 40A, 每个元胞可通过 1mA 电流. 计算出的原胞数为 10000 左右, 设计时取为 12000 个. IGBT 工艺的设计原则是按目前国内工艺水平及条件, 通过 SUPREM IV 工艺模拟按优化参数原则确定. 主要特点为: (1) 全离子注入; (2) 自对准工艺形成沟道; (3) 大面积的高质量栅氧; (4) 多晶掺杂与 N^+ 注入同时进行. 实现的器件结构如图 3 所示.

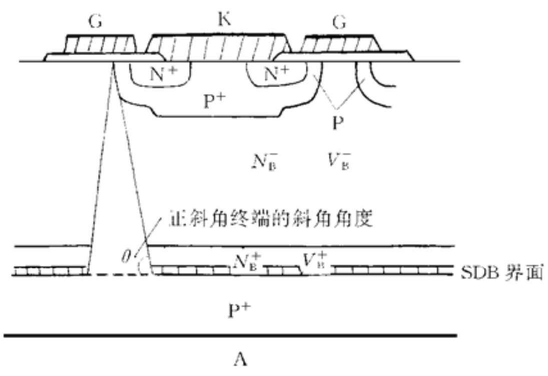

图 3 新结构的 PT 型 IGBT 器件

FIG. 3 Cross-Section of PT-IGBT with Positive Bevel Terminal Structure Prepared by SDB Technology

4 结果及分析

按照上述设计及工艺过程进行了 IGBT 器件的投片. 结果为典型 IGBT 特性, 如图 4 所示. 图 4(a) 是样品在室温下的正向阻断特性. 从测试曲线可以看出: 基于 SDB 技术的 PT 型 IGBT 器件, 由于优化的正斜角终端结构有很好的击穿特性, 大部分样品阳极阻断电压 V_{AK}达到 1200V. 这表明: 由 SDB 技术实现小面积功率器件的正斜角终端, 是成功而有效的. 图 4(b) 是样品在室温下关断特性示波器照片. 在 $V_{AK} = 30V$ 时, 关断时间约 7.6μs. 很显然, 关断电流与负载有关. 在 5Ω 的电阻负载下, 其关断电流是 6A, 相应的电流密度是 25A/cm^2. 图 4(c) 是样品的电流-电压特性. 样品的通态饱和压降较大, 达到 3.5V. 我们认为: 造成此缺陷的主要原因是两个非器质性的工艺问题. 其一, 键合界面的非完整性造成的注入少子效率下降. 经对键合界面的局部 SEM 分析, 图 4(d) 表明: 界面有团聚的非化学计量比 SiO_2 微区, 较之理想化的外延界面, 会引起少子注入的减少. 其二, 样品未进行严格封装, 电极接触比较粗糙. 这两个问题, 前者可通过 SDB 工艺的进一步优化以减小其影响, 后者在定型的投片工作中容易克服.

5 结论

灵活运用 SDB 技术, 可方便地实现 PT 型 IGBT 器件终端和缓冲层的优化设计. 合理设计器件结构和工艺, 能在国内现有的工艺线上制作出高压大电流 IGBT 功率器件来. 随着 SDB 工艺的进一步完善和在

IGBT 器件中应用的进一步研究, 可望研制出新一代 IGBT 器件.

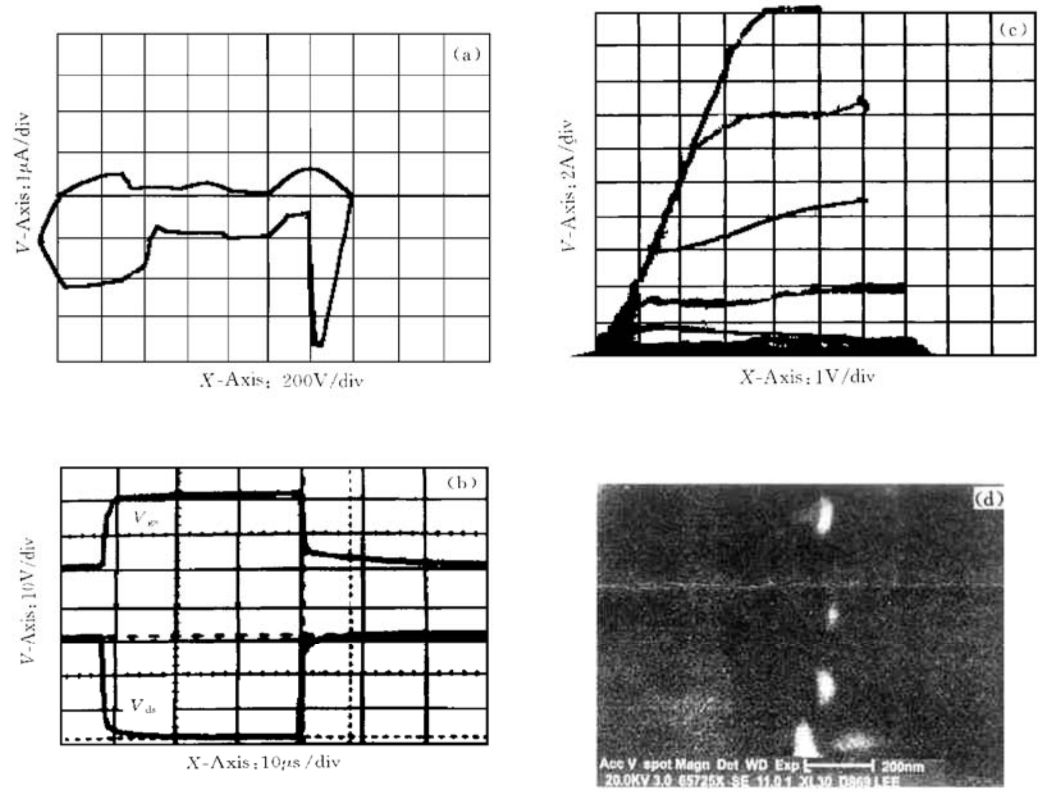

图 4　实验测量的新结构 IGBT 特性和键合界面的局部 SEM

(a) IGBT 的击穿特性(X- 200V/div, Y- 1μA/div); (b) 开关持性(R= 5Ω, X- 10μs/div, Y- 10V/div);

(c) IGBT 的 I-V 特性(X- 1V/div, Y- 2A/div, V_g- 1V/div); (d) SDB 界面局部 SEM.

FIG. 4　Measured Characteristics of New Structure PT-IGBT

参　考　文　献

[1] Y. Nakagami and T. Oani, IEDM'88, 1988: 107—112.

[2] S. L. Tu, G. Tam *et al.*, The Proceeding of 1995 IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting, 1995, 206—208.

[3] Ashok Bindra, Electrinic Design, 1998, **13**: 42.

[4] He Jin, Wang Xin and Chen Xing-bi, Chinese Journal of Semiconductors, 1999, **20**(4): 320(in English)[何进, 王新, 陈星弼, 半导体学报, 1999, **20**(4): 320].

[5] 何进, 王新, 陈星弼, 第二届中国西部地区微电子技术学术会议论文集, 1998, 桂林[HE Jin, WANG Xin and CHEN Xingbi, Symposium of 2nd Conference for Micorelectronics Technology in the West-Region of China, Guilin 1998].

[6] J. B. Lasky and F. R. White, J. Appl. Phys., 1986, **63**: 2987—2991.

[7] Stefan Bengtsson, Journal of Electronical Materials, 1992, **21**: 841—852.

[8] 何进, 电子科技大学博士学位论文, 成都, 1999, 49[HE Jin, Doctoral Thesis of University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, 1999, 49].