

收集区局部掺杂的硅双极晶体管的 二维数值分析

林绪伦

(北京大学微电子学研究所 北京 100871)

摘要 对于硅 NPN 晶体管中新型的收集区局部掺杂结构以及常规的收集区均匀掺杂结构, 本文采用数值分析, 计算出这两种结构的晶体管内部的电势及电场的二维分布. 结果表明: 在常规结构中, 其浓硼扩散结的弯曲边缘处存在着电场集中效应, 收集极雪崩击穿电压 BV_{cb0} 深受这种效应的影响. 而在新型结构中, 上述电场集中效应不复存在, 其收集极雪崩击穿电压 BV_{cb0} 获得了明显的改善.

EEACC: 2560J, 0290

1 引言

为了满足大规模集成技术以及无线数据通讯等方面的要求, 近年来硅双极晶体管采用低温光外延^[1], 浅扩散技术^[2]等可以制备 1000 Å 以下的薄基区晶体管, 使基区渡越时间大为缩短; 又如采用高掺杂的非晶硅-硅异质结形成的二维电子气发射结结构^[3], 获得了高电流增益、低基区电阻以及性能稳定的高频特性; 又如在发射结 N^+P 之间夹有 I 层, 即 N^+IP 结构^[4], 能有效地减小发射结电容, 从而减少了发射结渡越时间. 在基区渡越时间以及发射结渡越时间都能有效控制的情况下, 收集结渡越时间将上升为影响晶体管的频率特性及开关特性的主要因素. 为了缩短收集结渡越时间, 朱恩均等人采用了收集区局部掺杂结构, 即在 N^+-v 外延片上通过高能离子注入, 对收集区进行局部掺杂^[5]; 1993 年张利春、王阳元等人的一项专利是在常规的 N^+N 外延片上, 对晶体管外基区下方对应的外延层区域进行高能离子注入, 通过杂质补偿使该处变为高阻层^[6], 两种方式异曲同工, 都能明显地减小收集结电容, 缩短收集结渡越时间. 为了对于这种收集区局部掺杂结构的晶体管内部的电势及电场分布等物理图象有一个全面而直观的认识, 本文对它进行了二维数值分析的计算, 结果表明, 在新型结构的外基区下方的收集区中的电势及电场的二维分布都与常规结构的迥然不同, 它消除了常规结构中存在于浓硼扩散结边缘的曲面结区的电场集中效应, 收集结的雪崩

林绪伦 女, 1936 年生, 高级工程师, 半导体物理专业
1994 年 3 月 17 日收到初稿, 1994 年 5 月 7 日收到修改稿

击穿电压有明显的提高.

2 收集区局部掺杂的硅双极晶体管结构

常规的硅 NPN 晶体管的收集区为 N^+N 外延片, 根据收集结击穿电压、最大工作电流、二次击穿特性以及收集区串联电阻等项参数的综合考虑, 选取外延层的杂质浓度及其厚度^[7,8], 通常分别选为 $1.0 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 和 $3.0 \mu\text{m}$. 收集区局部掺杂的硅 NPN 晶体管与常规结构的主要区别在于收集区, 采用 N^+p 外延片, N^+ 衬底的杂质浓度仍为 $1.0 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$, 而 p 型外延层的杂质浓度及厚度分别为 $1.0 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ 及 $3.0 \mu\text{m}$. 在发射区的正下方, 通过高能离子注入, 对收集区进行局部掺杂, 杂质浓度仍为 $1.0 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$. 文献[5]采用的步骤为: (1) 用硅表面的 SiO_2 膜作为覆盖膜, 用溅射的钨膜做掩蔽, 刻蚀出所需要的图形; (2) 用 $1.7 \times 2 \text{MeV}$ 串列加速器加速磷离子, 使其能量界于 $0.5 \sim 7.5 \text{MeV}$, 采用 $2 \times 10^{11} \sim 2.4 \times 10^{12} / \text{cm}^2$ 范围内的剂量进行多次不同能量和剂量的迭加注入; (3) 用 KST-1 型碘钨灯瞬态退火, 退火温度可取 1050°C , 退火时间为 10 秒. 最终可以形成一个平坦的杂质分布. 该文图 2 给出了一个用扩展电阻仪测量得到的深度 $4.0 \mu\text{m}$ 、载流子浓度为 $1.0 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 的剖面分布图.

采用硼扩散形成 P 型基区, 设基区宽度为 $0.1 \mu\text{m}$, 其纵向杂质分布为

$$C(y) = \begin{cases} N_{\text{PB1}} & (y < y_0) \\ N_{\text{PB1}} \exp\left[-\left(\frac{y - y_0}{\sigma_1}\right)^2\right] & (y \geq y_0) \end{cases} \quad (1)$$

式中 $y_0 = 0.2 \mu\text{m}$, 位于 y_0 处的杂质浓度为峰值浓度 N_{PB1} , 选取 N_{PB1} 为 $5.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, 以免发射结产生隧道漏电流^[9], 标准偏差 σ_1 为 $0.030 \mu\text{m}$, 发射区为 N 型均匀掺杂, 杂质浓度为 $2.4 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$, 厚度为 $0.2 \mu\text{m}$. 为了减小基极电阻, 在基极接触下方采用浓硼扩散形成 P^+ 区, 设 P^+ 区结深为 $0.6 \mu\text{m}$, 其纵向杂质分布为

$$c(y) = N_{\text{PB2}} \exp\left[-\left(\frac{y}{y_2}\right)^2\right] \quad (2)$$

式中 N_{PB2} 为表面处的杂质浓度, 设 N_{PB2} 为 $1.0 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$, 标准偏差 $\sigma_2 = 0.161 \mu\text{m}$.

综上所述, 收集区局部掺杂的硅 NPN 晶体管与常规结构的主要的区别就在于外基区下方的收集区的杂质浓度 ($1.0 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$) 比常规结构的低两个数量级, 收集区局部掺杂的硅 NPN 晶体管的截面图如图 1 所示.

3 二维数值分析的结果及讨论

我们是使用美国 VAX-11/785 型计算机以及奥地利维也纳技术大学的 BAMB1^[10,11] 软件包进行计算的. BAMB1 采用有限箱法 (finite boxes)^[10] 对器件的偏微分方程组进行离散化, 依据器件的几何结构先产生一个初始的网格分布, 随后在求解过程中通过使局部离散误差均匀分布而自动改进网格的格点分布, 最终形成一个最佳的配置. 与有限差分法相比, 它不仅节省计算机的资源, 还可以应用于任意形状的器件. 经过有限箱法离散化的二维的非线性方程组采用改进的牛顿法同时求解.

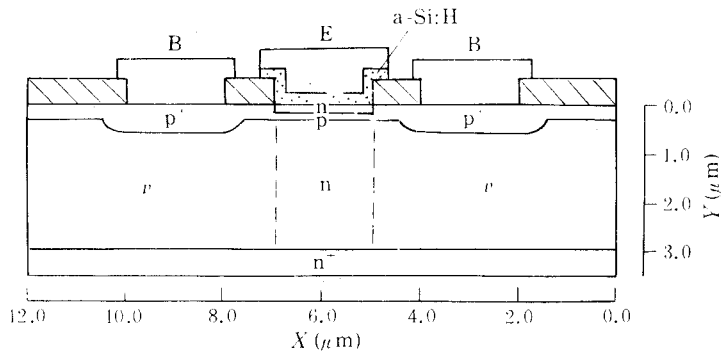
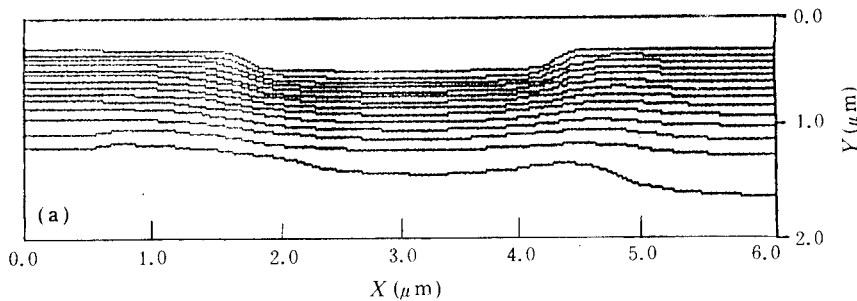


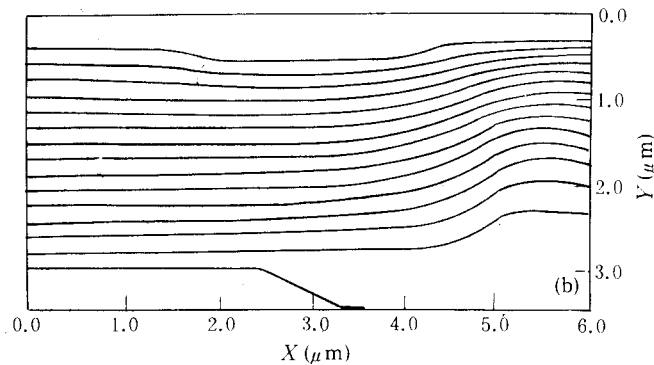
图1 收集区局部掺杂的硅NPN晶体管的截面图

由于图1所示的晶体管截面图是左右对称的,为了节省计算的工作量,我们选取图1的一侧作为模拟计算的定义域.针对收集区局部掺杂结构,求出了晶体管内部的电势及电场的二维分布.为了进行比较,对于常规结构也进行了计算.

图2(a)、(b)分别给出了两种结构在发射极、基极以及收集极偏置电压分别为0V、0.83V以及10.83V的情况下电势等值线分布图.



(a) 常规结构



(b) 新型结构

图2 硅NPN晶体管内部的电势等值线分布

图2(a)中 $x=1.87\mu\text{m}$, $y=0.55\mu\text{m}$ 以及 $x=4.13\mu\text{m}$, $y=0.55\mu\text{m}$ 两点处的电势等值线间的间距最小,表明该处的电场强度最强.该处正是浓硼扩散在掩模边缘形成的曲面结区,

它清楚地表明：在常规结构中的浓硼扩散结的弯曲边缘处存在着电场集中效应。而图 2(b) 中，位于 $5.0\mu\text{m} \leq x \leq 6.0\mu\text{m}$ 区域内，也就是在晶体管的内基区下方的收集区中的电势等值线间的间距最小，表明该处的电场强度最强，与常规结构迥然不同，表明在收集区局部掺杂的结构中，电场集中效应不复存在。

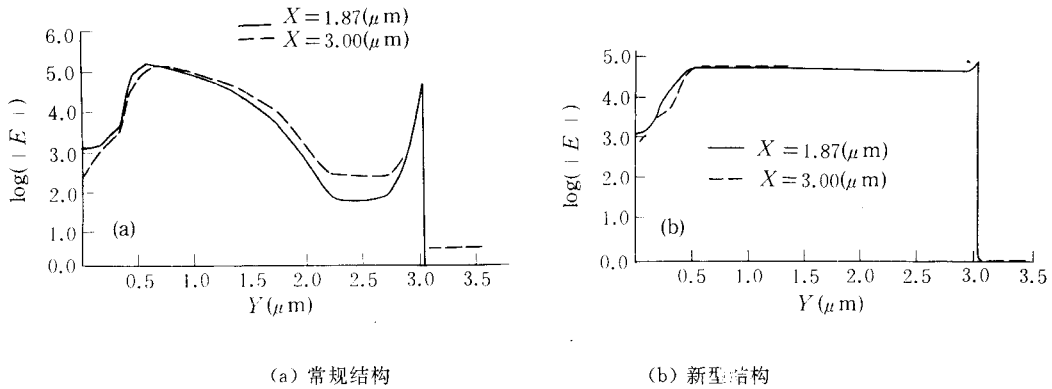


图 3 硅 NPN 晶体管内部的纵向电场分布

图 3(a)、(b) 分别给出两种结构在发射极、基极以及收集极偏置电压分别为 0V、0.83V 以及 10.83V 的情况下对应于浓硼 P⁺ 区的中央 ($x = 3.0\mu\text{m}$) 平面结处以及浓硼 P⁺ 区的边缘 ($x = 1.87\mu\text{m}$) 曲面结处的电场纵向分布。从图 3(a) 也可以看出，在 $x = 1.87\mu\text{m}$ 、 $y = 0.55\mu\text{m}$ 处的电场强度最强，高达 $1.8 \times 10^5 \text{V/cm}$ 。常规结构中浓硼扩散结的弯曲边缘处具有高于平面结区域的电场强度。而图 3(b) 则不然，在收集区局部掺杂的结构中浓硼扩散结的弯曲边缘处与平面结区域的电场强度很相近，都低于 $1.0 \times 10^5 \text{V/cm}$ 。

图 4 给出收集区局部掺杂结构在上述偏置电压情况下分别对应于外基区的淡硼区 ($x = 0.5\mu\text{m}$)，外基区的浓硼区的中央 ($x = 0.3\mu\text{m}$) 以及内基区 ($x = 5.5\mu\text{m}$) 的电场纵向分布。从图 4 也可以看出，在新型结构中的内基区下方的收集区中的电场强度最强。

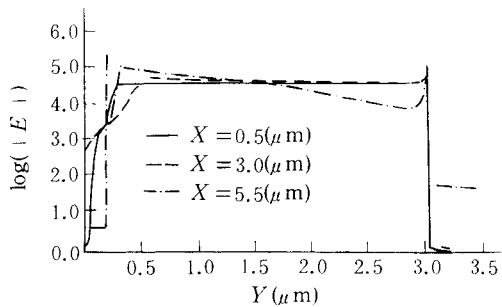


图 4 收集区局部掺杂的硅 NPN 晶体管内部不同区域的纵向电场分布

载流子的碰撞电离率 α 强烈地依赖于电场强度。施敏在文献^[8]的图 2.26 中，给出了硅单边突变结当低掺杂一边的杂质浓度为 $1.0 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 时，平面结的击穿电压可达 50V。文献^[8]的图 2.35 还给出了 Ghandi^[13] 关于柱面结和球面结归一化的击穿电压与归一化的曲率半径的关系曲线。所谓归一化曲率半径是指曲率半径除以耗尽层厚度，浓硼扩散结的归一化曲率半径 $\eta = 0.6/9.4 = 0.25$ ，对应的柱面结的归一化击穿电压为 0.5，即对应于外延层的杂质浓度为 $1.0 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 的浓硼 P⁺ 区的柱面结的击穿电压只有 35V。

通过对于收集区局部掺杂的硅 NPN 晶体管的二维数值分析，求出晶体管内部电势及电场的二维分布，结果表明，这种新型结构的晶体管与常规的晶体管相比，不仅具有更为优异的频率特性和开关特性，而且具有更高的收集结雪崩击穿电压。因为它消除了常规结构

中限制收集结雪崩击穿电压的存在于浓硼扩散结弯曲边缘处的电场集中效应. 朱恩均等人在微波功率管的研制工作中, 已经观测到收集结击穿电压在采用收集区局部掺杂结构后, 可以获得明显改善的效果.

本工作得到北京大学信息中心刘玉民、孙立等同志以及浙江大学信息电子工程系叶润涛教授、郭妙泉同志的热情帮助. 作者在此深表感谢.

参 考 文 献

- [1] T. Sugii, T. Yamazaki, *et al.*, Tech. Dig. Symp. VLSI Tech., 1987, 35.
- [2] M. Ugajin, S. Konaka and Y. Amemiya, Ext. Abs. 19th Conf. SSDM, 1987, 339.
- [3] E. J. Zhu, IEEE Electron Device Lett., 1989, EDL-10:4.
- [4] 林绪伦, 朱恩均, “改善微波功率管小电流特性的模拟分析”, 待发表.
- [5] 吴瑜光等, 第五届全国电子束离子束光子束学术年会论文集, 1988, 2-11.
- [6] 张利春, 王阳元等人的专利, 北京大学校刊第 652 期, (1993 年 11 月 3 日专刊).
- [7] S. M. Sze and G. Gibbons, Appl. Phys. Lett., 1966, 8:111.
- [8] 施敏著, 黄振岗译, 半导体器件物理, 电子工业出版社.
- [9] J. A. del Alamo, IEEE Electron Device Lett., 1986, EDL-7:629.
- [10] A. F. Franz, G. A. Franz, S. Selberherr *et al.*, IEEE Trans. on Electron Devices, 1983, ED-30:1070.
- [11] A. F. Franz and G. A. Franz, BAMBI 1.0 USER'S GUIDE(1985).
- [12] 浙江大学信息电子工程系郭妙泉等, PASS4 软件包.
- [13] S. K. Ghandhi, Semiconductor Power Devices, Wiley, New York.

Two-Dimensional Numerical Analysis of Silicon Bipolar Transistors with Locally Doped Collector

Lin Xulun

(Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871)

Received 17 March 1994, revised manuscript received 7 May 1994

Abstract For the novel Si NPN transistors with locally doped collector and the normal transistors with uniformly doped collector, using numerical analysis, the two-dimensional distributions of the electric potential and electric field in these two kinds transistors are presented. The results suggest: in the normal silicon NPN transistors, there is an electric field concentrating effect in the curved edge of the dense boron diffusion junction. Its avalanche breakdown voltage BV_{cbo} is seriously affected by this effect, while in the novel transistors, the electric field concentrating effect vanishes, so its avalanche BV_{cbo} has been obviously improved.

EEACC: 2560J, 0290