

PSJ 高压器件的优化设计*

陈万军[†] 张 波 李肇基 邓小川

(电子科技大学 IC 设计中心, 成都 610054)

摘要: 基于 Semi-SJ(super junction)结构,提出了 SJ 的比例可以从 0~1 渐变的 PSJ(partial super junction)高压器件的概念.通过对 PSJ 比导通电阻的分析,得到了 PSJ 高压器件比导通电阻优化设计的理论公式.计算了不同击穿电压的比导通电阻,并与二维器件模拟结果和实验结果相比较.讨论了 BAL(bottom assist layer)部分穿通因素 η 、p 型区深度归一化参数 r 、p 型区深宽比 A 以及 PSJ 漂移区掺杂浓度是否统一对 PSJ 高压器件比导通电阻的影响.其理论结果和器件模拟结果相吻合,为设计与优化 PSJ 高压器件提供了理论依据. PSJ 结构特别适于制造工艺水平不高、很难实现大的 p 型区深宽比的情况,为现有工艺实现高压低导通电阻器件提供了一种新的思路.

关键词: partial super junction; RESURF; 击穿电压; 比导通电阻

EEACC: 2560; 2560B; 2560P

中图分类号: TN386

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)06-1089-05

1 引言

高压 MOSFET 具有输入阻抗大、开关速度快、热稳定性好等一系列独特的优点,目前在开关电源、马达驱动、电子整流器等方面获得了广泛的应用.对于高压 MOSFET 器件,获得足够高的击穿电压和尽可能低的比导通电阻是设计中需要同时考虑的两个主要因素^[1~4].近年来,super junction(SJ)结构引起人们的广泛关注.这种新结构利用相互交替的 n 型层和 p 型层代替传统单一的 n 型漂移区,在提高击穿电压的同时减小比导通电阻,很大程度上打破了击穿电压与比导通电阻之间的“硅极限”^[5~9].在常规 SJ 结构中,p 型区和 n 型区需要大的深宽比(aspect ratio),以实现高压低导通电阻.然而,现有技术在实现大的深宽比时存在工艺复杂、制造成本高等缺点,大大限制了 SJ 结构在实际中的应用^[10~12].最近,Satito 等人提出一种 Semi-SJ 结构,这种结构由 SJ 和 BAL(bottom assist layer)两部分构成,不但具有优良的电特性,而且工艺难度和制造成本也大大降低^[11,12].

本文基于 Semi-SJ 结构,提出了 PSJ(partial super junction)高压器件的概念,其 SJ 部分的比例可以从 0~1 渐变,大大拓宽了 Semi-SJ 结构的应用范围. PSJ 结构不仅具有低的导通电阻,而且寄生体二极管的反向恢复特性也大大提高^[11,12].此结构特别适于制造工艺水平不高、很难实现大的 p 型区深宽

比的情况,为实现高压低导通电阻器件提供了一种新的思路.

2 器件结构与优化设计

图 1 给出了 PSJ 高压器件结构以及理想的电场分布.从图 1 可知,PSJ 由两部分组成,即 p/n 相间的 SJ 部分以及单一掺杂的 BAL 部分.其 SJ 部分的实现工艺与常规 SJ 结构相同.

对图 1 所示的 SJ 部分,当器件处于关态时,由于 SJ 部分的 n 区和 p 区相互耗尽,SJ 部分的电场也从传统的三角形分布(非穿通型)或梯形分布(穿通型)变成矩形分布.因此,SJ 部分击穿电压 BV_1 和比导通电阻 R_{on_sp1} 可以表示为^[5,9]:

$$BV_1 = E_c t_1 \quad (1)$$

$$R_{on_sp1} = \frac{2t_1}{q\mu_n N_{D1}} \quad (2)$$

式中 E_c 是临界击穿电场; t_1 是 SJ 部分 p 型区深度; q 是电子电量; μ_n 是电子迁移率; N_{D1} 是 SJ 部分 n 型区掺杂浓度.

从(1)和(2)式可知,SJ 部分击穿电压与掺杂浓度无关,而增加 N_{D1} 的浓度有利于降低比导通电阻.但 p 区和 n 区的浓度和宽度必须满足 RESURF 条件^[5]:

$$N_{D1} W_n = N_A W_p = 2 \times 10^{12} \text{cm}^{-2} \quad (3)$$

式中 N_{D1} , N_A , W_n 和 W_p 分别是 SJ 部分 n 区和 p 区掺杂浓度以及宽度.常取 $W_n = W_p$ 以增加器件元

* 国家自然科学基金重点项目(批准号:60436030),国家自然科学基金(批准号:60576052),国防预研基金(批准号:51408060904DZ0211)资助项目
[†] 通信作者. Email: cwjzcz@yahoo.com.cn

2005-10-21 收到,2005-12-14 定稿

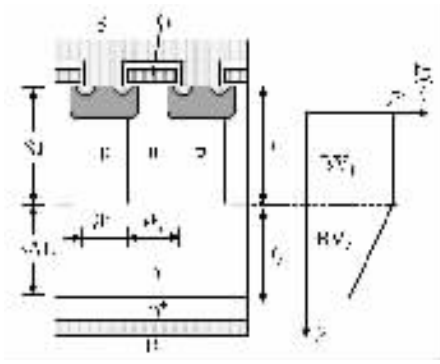


图 1 PSJ 结构及理想电场分布

Fig.1 PSJ structure and ideal electric field distribution

胞密度,减小器件电阻,则 SJ 优化的比导通电阻为:

$$R_{on_sp1(opt)} = \frac{W_n t_1}{q\mu_n \times 10^{12}} \quad (4)$$

而单一掺杂 BAL 部分,电场分布类似常规 VDMOS.对于 VDMOS 高压器件,采用穿通型结构可以去掉 VDMOS 漂移区不必要的额外欧姆压降,因此有图 1 所示的电场分布(穿通型).BAL 部分的击穿电压 BV_2 和比导通电阻 R_{on_sp2} 可以表示为^[1]:

$$BV_2 = t_2 E_c - \frac{qN_{D2}}{2\epsilon_s} t_2^2 \quad (5)$$

$$R_{on_sp2} = \frac{t_2}{q\mu_n N_{D2}} \quad (6)$$

式中 t_2 和 N_{D2} 分别是 BAL 部分的漂移区长度和掺杂浓度; ϵ_s 是硅的介电常数.

对于 BAL 部分,漂移区越长,电阻率越高,击穿电压也就越高,同时导通电阻也越大.因此,对于一定的击穿电压,BAL 部分的漂移区长度和掺杂浓度需要优化设计.如图 2 所示的穿通结与同衬底突变结耗尽层关系,设 BAL 长度 t_2 与同衬底突变结耗尽层宽度 W_{pn} 的比值为穿通因素 η ($\eta = t_2 / W_{pn}$, $0 < \eta \leq 1$).则由(5)式和突变结击穿电压公式 $BV_{pn} = \frac{1}{2} E_c W_{pn}$ 有:

$$BV_2 = (\eta - \frac{1}{2}\eta^2) E_c W_{pn} \quad (7)$$

由文献[1]知,当 $\eta = 0.75$ 时, t_2 成为同衬底浓度突变结耗尽层宽度的最佳分割长度,比导通电阻取得最优值.由此可得到一定击穿电压下 BAL 长度 t_2 和掺杂浓度 N_{D2} 的优化值,分别为:

$$t_{2(opt)} = \frac{BV_2}{0.625 E_c} \quad (8)$$

$$N_{D2(opt)} = \frac{2(t_{2(opt)} E_c - BV_2) \epsilon_s}{qt_{2(opt)}^2} \quad (9)$$

将(8),(9)式代入(6)式,以及由(4)式得到 PSJ 器件击穿电压 BV 一定时,优化的比导通电阻为:

$$R_{on_sp(opt)} = \frac{W_n t_1}{q\mu_n \times 10^{12}} + \frac{t_{2(opt)}}{q\mu_n N_{D2(opt)}} \quad (10)$$

其中

$$t_{2(opt)} = \frac{BV - E_c t_1}{0.625 E_c} \quad (11)$$

$$N_{D2(opt)} = \frac{2(t_{2(opt)} E_c - BV + E_c t_1) \epsilon_s}{qt_{2(opt)}^2} \quad (12)$$

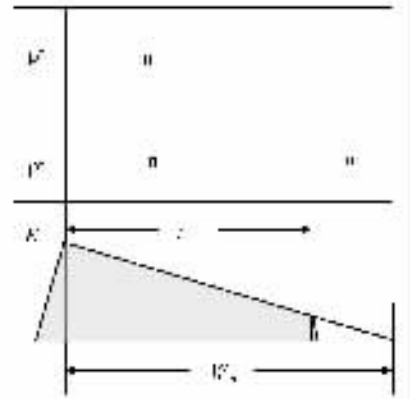


图 2 穿通结与同衬底突变结耗尽层关系(阴影区面积为击穿电压)

Fig.2 Comparison of the depletion layer between the punch through structure and the abrupt junction structure

定义 SJ 的比例为 α ($\alpha = t_1 / (t_1 + t_{2(opt)})$), 则(10)式变为:

$$R_{on_sp(opt)} = (t_1 + t_{2(opt)}) \times \left[\frac{\alpha W_n}{q\mu_n \times 10^{12}} + \frac{(1 - \alpha)}{q\mu_n N_{D2(opt)}} \right] \quad (13)$$

由于 α 的取值可以在 $0 \sim 1$ 渐变,这就比 Satito 等人提出的 Semi-SJ 更具代表性,也是本文称为 PSJ 所在.特殊地, $\alpha = 0$ 是常规 VDMOS 结构; $\alpha = 1$ 是常规 SJ 结构.对确定的 PSJ 击穿电压和工艺条件 (t_1, W_n) 下,先由(11)式计算出优化的 $t_{2(opt)}$,然后由(12)计算出对应的优化掺杂浓度 $N_{D2(opt)}$,从而可以从(13)式得到 PSJ 器件优化的比导通电阻.

3 结果与讨论

为了验证 PSJ 高压器件优化设计理论,使用二维器件模拟软件 MEDICI 对各种 PSJ 器件进行了模拟.在模拟中,复合模型采用了 CONSRH,迁移率模型采用了 CONMOB,FLBMOB 和 SRFMOB2.此外在模拟击穿电压中还考虑了电离碰撞效应 I. IMPACT^[13].

图 3 给出了三种不同结构在击穿电压为 600V 时所对应的漂移区电场分布图.从图中看出,PSJ 结构电场分布形状介于 SJ 矩形分布和 VDMOS 梯形分布之间,在相同的击穿电压下,所需的漂移区长度

也介于 SJ 和 VDMOS 之间. 图中的尖峰电场是由于 pn 结掺杂产生的内建电场在此处叠加形成的, 它对整个器件的耐压影响不大^[8]. 在后面的讨论中将忽略掺杂产生的尖峰电场, 直接用矩形区恒定电场代替临界击穿电场^[11,12].

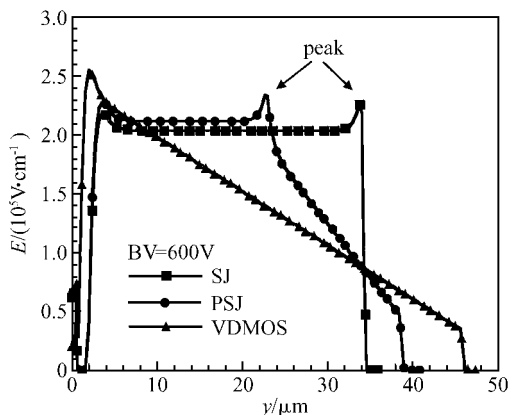


图 3 不同漂移区结构的电场分布

Fig.3 Electric field distribution for different drift structures

图 4 给出了击穿电压分别为 600,700 和 800V 时,不同 η 值所对应的比导通电阻. 在讨论中,固定 SJ 的深度 t_1 为 $20\mu\text{m}$,且 SJ 部分的掺杂满足 RE-SURF 条件的最优化结果. 由图可知,随着击穿电压的增加,比导通电阻增加. 这是由于增加的电压需要更长的 BAL 长度 t_2 或更低的掺杂浓度 N_{D2} 来实现,这都会导致比导通电阻的增加. 在同一击穿电压下,比导通电阻随着 η 的增加先减小,然后增加. 当 $\eta = 0.75$ 时比导通电阻取值最小,与本文的理论分析一致,这很好地证明了优化设计的重要性. 在以后的讨论中,没有特别说明,比导通电阻都是指最优化情况下的结果.

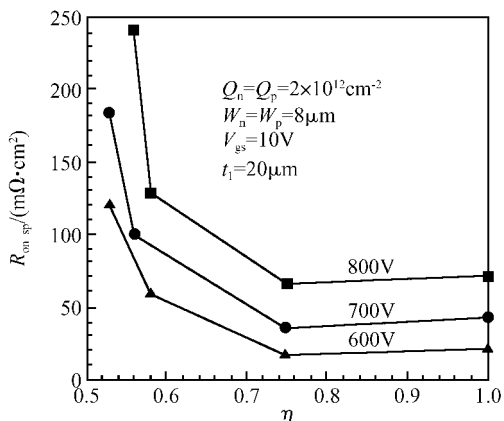


图 4 BAL 穿透因素 η 与比导通电阻的关系

Fig.4 Relationship between η and specific on resistance

图 5 是不同 p 型区深度归一化参数 r ($r = t_1 / (t_{SJ})$) 下, SJ 部分比导通电阻 (R_{on_sp1}) 和 BAL 部分比导通电阻 (R_{on_sp2}) 对 PSJ 比导通电阻的影响. 其中, t_{SJ} 是相同击穿电压下常规 SJ 器件漂移区长度. 从图中可以看出, SJ 部分的比导通电阻随着 r 的增加缓慢增加; 而 BAL 部分的比导通电阻却迅速减小. 从而导致 PSJ 的比导通电阻也随着 r 的增加迅速减小. 但是,随着 r 的增加,制造工艺难度及成本也增加. 图 5 中还表明了本文解析结果与仿真结果基本一致. 解析结果略小于仿真结果是由于在本文分析中,只考虑了漂移区的电阻,没有考虑接触电阻、沟道电阻、积累区电阻以及 SJ 部分 p 区和 n 区横向耗尽层对导通沟道宽度的影响. 对于高压器件,这样考虑是合理的^[1]. 根据上面的分析,分别计算了文献^[11,12]中 PSJ 高压器件的比导通电阻. 计算得到的比导通电阻和模拟结果基本相符,且均优于参考文献中的实验值,如图 6 所示. 从图 6 中也可以看出, PSJ 高压器件打破了击穿电压和比导通电阻的“硅极限”,为高压器件设计提供了一种新的选择.

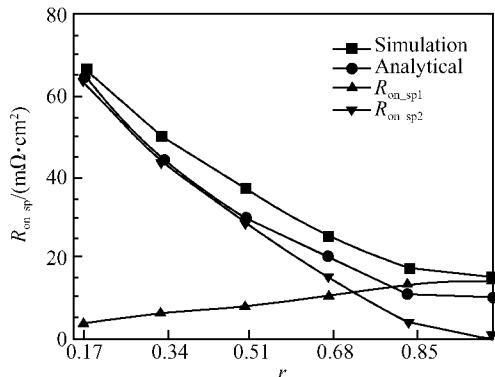


图 5 p 型区深度归一化参数 r 与比导通电阻的关系

Fig.5 Normalized depth of p column versus specific on resistance

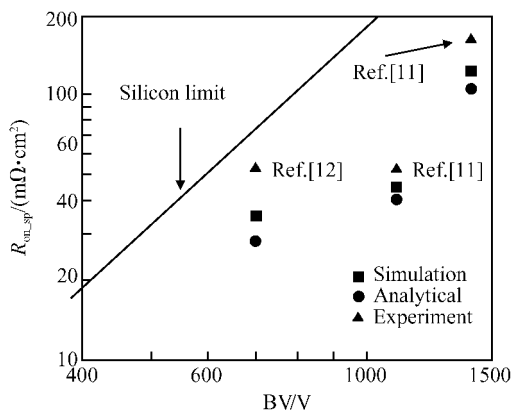


图 6 击穿电压与比导通电阻的关系

Fig.6 Trade off characteristics between specific on resistance and breakdown voltage

前面已知, PSJ 器件的比导通电阻随着 r 的增加而减小, 然而, 工艺难度和成本也急剧增加, 这使得在实际中以增加 r 值来减小器件电阻并不可行. 为了方便讨论, 常用 p 型区深宽比 A ($A = t_1/W_p$) 来表示该器件工艺难度, A 越大, 工艺难度越大, 成本越高^[10~12]. 图 7 比较了 PSJ 和常规 SJ 器件在不同深宽比 A 下的比导通电阻. 可见, PSJ 和常规 SJ 比导通电阻都随着 A 的增加而减小. 特别值得注意的是, 在 A 较小时, PSJ 比常规 SJ 器件有更小的比导通电阻. 也可以说, 在相同的比导通电阻下, PSJ 可以比常规 SJ 取得更小的 A 值. 这就意味着现实工艺不能实现大的 p 型区深宽比 A 时(也就是说实际工艺不能实现深而窄的 p 型区的时候), 采用 PSJ 结构将比常规 SJ 结构取得更好的击穿电压和比导通电阻的优值. 这为现有工艺实现高压、低导通电阻器件提供了一种新思路.

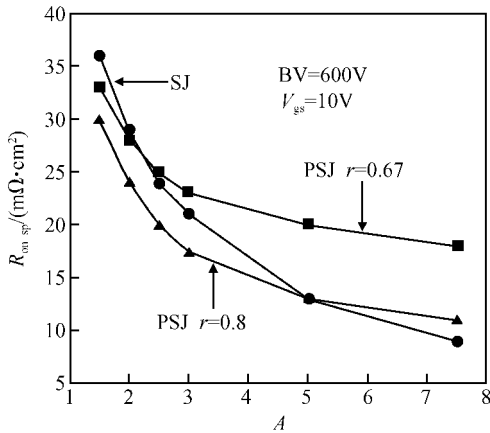


图 7 p 型区深宽比 A 与比导通电阻的关系

Fig. 7 Relationship between aspect ratio and specific on resistance

前面所有的分析和讨论都是基于 PSJ 器件的 SJ 部分和 BAL 部分掺杂浓度分别取得最优的情况, 这就需要至少两次外延以得到各自不同的优化掺杂浓度, 这给制作带来了不小的麻烦. 在实际操作中, 为了工艺简单, 常以 BAL 部分的掺杂浓度来确定整个漂移区的掺杂浓度. 图 8 是 PSJ 漂移区掺杂浓度分别优化 ($N_{D1} \neq N_{D2}$) 和统一掺杂 ($N_{D1} = N_{D2}$) 时比导通电阻 ($R_{on,sp}$) 的对比. 可知, 漂移区统一掺杂后比导通电阻将变得更大, 特别是 r 比较小的情况, 这种变化主要是 SJ 部分比导通电阻变化引起的. 图中也给出了 SJ 部分比导通电阻随 r 的变化情况, 随着 r 的增加, 统一掺杂的 SJ 部分比导通电阻先增加后减小. 其原因与导通时 SJ 部分 pn 结耗尽层横向扩展有关, 文献[2]中有详细讨论, 在此不再赘述.

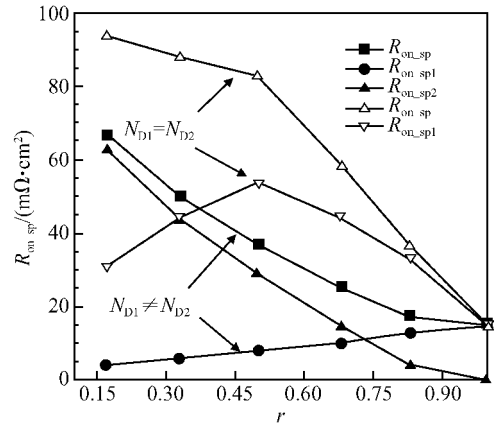


图 8 不同漂移区 n 区掺杂情况与比导通电阻的关系

Fig. 8 Comparison of specific on-resistance for the different concentration conditions of n column

4 结论

本文提出了 PSJ 高压器件的概念, 并通过对组成 PSJ 高压器件比导通电阻的理论分析, 首次得到了器件优化设计的理论公式. 通过该公式, 可容易得到各种情况下 PSJ 器件漂移区所对应的优化参数. 并讨论了 BAL 部分穿通因素 η , p 型区深度归一化参数 r , p 型区深宽比 A 以及 PSJ 漂移区掺杂浓度是否统一对 PSJ 高压器件比导通电阻的影响. 该理论分析结果与二维器件仿真结果相吻合, 这一理论结果可以直接作为 PSJ 高压器件的设计准则.

参考文献

- [1] He Jin, Wang Xin, Chen Xingbi. Optimum design of epitaxial layers with uniform doping for VDMOS transistor. Chinese Journal of Semiconductors, 1999, 20(11): 977 (in Chinese) [何进, 王新, 陈星弼. VDMOS 均匀掺杂外延区的优化设计. 半导体学报, 1999, 20(11): 977]
- [2] Chen Wanjun, Zhang Bo, Li Zhaoji, et al. Optimized the breakdown voltage and specific on-resistance of double RESURF TMOS. IEEE ICCAS05, 2005: 1390
- [3] Luo Luyang, Fang Jian, Luo Ping, et al. Breakdown characteristics of novel SOI-LDMOS with reducing field electrode and U-type drift region. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(2): 194 (in Chinese) [罗卢杨, 方健, 罗萍, 等. 具有降场电极 U 型漂移区 SOI-LDMOS 的耐压特性. 半导体学报, 2003, 24(2): 194]
- [4] Guo Yufeng, Li Zhaoji, Zhang Bo, et al. Breakdown model and new structure of SOI high voltage devices with step buried oxide fixed charges. Chinese Journal of Semiconductors, 2004, 25(12): 1695 (in Chinese) [郭宇峰, 李肇基, 张波, 等. 阶梯分布埋氧层固定电荷 SOI 高压器件新结构和耐压模型. 半导体学报, 2004, 25(12): 1695]
- [5] Zhang Bo, Xu Zhenxue, Huang A Q. Analysis of the forward bias safe operation area of the super junction MOSFET. Proc ISPSD, 2000, 61

- [6] Chen X. Semiconductor power devices with alternating conductivity. U. S. Patent 5216275, 1993
- [7] Chen X B, Mawby P A, Board K, et al. Theory of a novel voltage sustaining layer for power devices. *Microelectronics Journal*, 29, 1998; 1005
- [8] Chen Xingbi, Sin J K O. Optimized of the specific on-resistance of the COOLMOS™. *IEEE Trans Electron Devices*, 2001, 48; 344
- [9] Strollo A G M, Napoli E. Optimized on-resistance versus breakdown voltage tradeoff in superjunction power device: a novel analytical model. *IEEE Trans Electron Devices*, 2001, 48; 2161
- [10] Minato T, Nitta T, Uenisi A, et al. Which is cooler, trench or multi-epitaxy. *Proc ISPSD*, 2000; 73
- [11] Saito W, Omura I, Aida S, et al. Over 1000V semi-superjunction MOSFET with ultra low on-resistance blow the Si-limit. *Proc ISPSD*, 2005; 27
- [12] Saito W, Omura I, Aida S, et al. 600V semi-superjunction MOSFET. *Proc ISPSD*, 2003; 45
- [13] TMA Medici. Technology modeling associates, Inc. Version 4.1, 1998

Optimum Design of PSJ for High-Voltage Devices*

Chen Wanjun[†], Zhang Bo, Li Zhaoji, and Deng Xiaochuan

(Center of IC Design, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: A novel design for a high-voltage PSJ (partial super junction) is proposed. The ratio of the SJ region varies from 0 to 1. Through analysis of the specific on-resistance of the PSJ device, a theory of PSJ optimization is developed. Based on this result, the specific on-resistances at different breakdown voltages are calculated and compared with the simulation and experimental results. The influence on the specific on-resistance of the PSJ is discussed in detail, including the punch-through factor of the BAL region η , the normalized depth of p column r , the aspect ratio of p column A , and the uniformity of the concentration of the SJ region. The theoretical results agree with the simulation. The theory is an academic element for the optimization of PSJS for high-voltage devices.

Key words: partial super junction; RESURF; breakdown voltage; specific on-resistance

EEACC: 2560; 2560B; 2560P

Article ID: 0253-4177(2006)06-1089-05

* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China(No. 60436030), the National Natural Science Foundation of China(No. 60576052), and Pre-Research Foundation(No. 51408060904DZ0211)

[†] Corresponding author. Email: cwjzcx@yahoo.com.cn

Received 21 October 2005, revised manuscript received 14 December 2005