

IGBT 的寄生晶闸管发射结分流电阻

曹茂旺 陈治明

(陕西机械学院自动化系 西安 710048)

摘要 为了设计具有最小寄生晶闸管发射结分流电阻 R_p 的大电流 IGBT, 针对圆形、方形、条形等发射极图形设计, 建立了 R_p 的计算公式模型, 并据此讨论了在各种图形设计中的 R_p 与 p 阱高浓度深层扩散的结深和表面杂质的关系, 以及图形及其尺寸对 R_p 大小的影响。

PACC: 7340L; EEACC: 2560L

1 引言

IGBT 是一种依靠绝缘栅来控制开关状态的自关断器件. 这种新型电力电子开关区别于老式开关器件晶闸管的主要之点, 在于其导通状态要用足够高的栅电压来维持, 而晶闸管一旦导通之后, 只要其通态电流不低于某个较小的临界值(维持电流 I_H), 其导通状态就会一直保持下去, 与触发信号是否继续存在无关. 存在于晶闸管中的这种现象叫锁定(latch-up), 相应的使晶闸管由断态到通态的电流临界值 I_L 叫锁定电流. 锁定使得普通晶闸管丧失了通过门极来实现由通到断的转换能力, 对其应用带来诸多限制. 不过, 锁定现象并不只是存在于晶闸管中, 它是一切 $p-n-p-n$ 半导体四层结构所共有的普遍现象. IGBT 因其纵向结构中存在有局部的 $p-n-p-n$ 四层构造, 即所谓寄生晶闸管, 也就面临着锁定令其丧失栅控关断能力的危险. 因此, 抗锁定设计是 IGBT 设计中的一个关键环节, 它将决定器件额定电流的大小.

IGBT 抗锁定设计的直接目标是提高其寄生晶闸管的锁定电流, 以便在器件已进入传送额定电流的状态时, 流过寄生晶闸管的电流仍不足以使其锁定. 晶闸管锁定电流的大小与其等效电路中的两个晶体管的放大系数有关, 减小任何一个等效晶体管的放大系数都能明显提高锁定电流. 不过, 下晶体管(对 n 沟道 IGBT 而言即是 pnp 管)放大系数 α_1 的减小是十分有限的, 因为这要通过缩短 n^- 漂移区的少子寿命^[1], 或在 n^- 漂移区与 p^+ 集电区之间加 n^+ 缓冲层^[2]来实现, 而这些措施无疑会对器件的其他工作特性, 例如电压阻断能力产生消极作用. 因此, 减小上晶体管(对 n 沟道 IGBT 而言即 nnp 管)的放大系数 α_2 对提高锁定电

曹茂旺 男, 1965 年生, 硕士, 工程师, 现在北京整流器厂从事电力半导体器件的设计与生产、以及技术和质量的管理工作

陈治明 男, 1945 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事半导体器件与半导体材料物理等领域的研究与教学工作
1993 年 8 月 9 日收到初稿, 1993 年 12 月 23 日收到修改稿

流的作用很重要. 减小 α_2 的一个重要措施是尽可能减小上晶体管发射结分流电阻 R_p . R_p 的存在及其对流经上晶体管发射结的电流的分流作用是由 IGBT 的特殊结构决定的, 其大小可由器件元胞的结构尺寸及 p 阱的杂质分布来调节^[3]. 本文针对三种不同的元胞结构, 建立 R_p 的简单计算模型, 并在此基础上计算和讨论了 R_p 与元胞的结构形式、尺寸及掺杂状态的关系, 提出合理选择结构及工艺参数, 以减小 R_p , 提高器件抗锁定能力的方案.

2 计算模型

图 1(a)所示为 n 沟 IGBT 的纵断面示意图, 为了清晰标注有关尺寸, 图中画了相邻的两个器件元胞. 对于同一个纵向结构, 发射极的平面结构可有多种不同的形式. 图 1(b)、(c)、(d)分别表示圆形、方形和条形这三种简单的结构形式. 为了便于对不同结构进行对比, 杂质的纵向分布, 以及沟道长度、栅宽、栅间距在三种情况下均无差别.

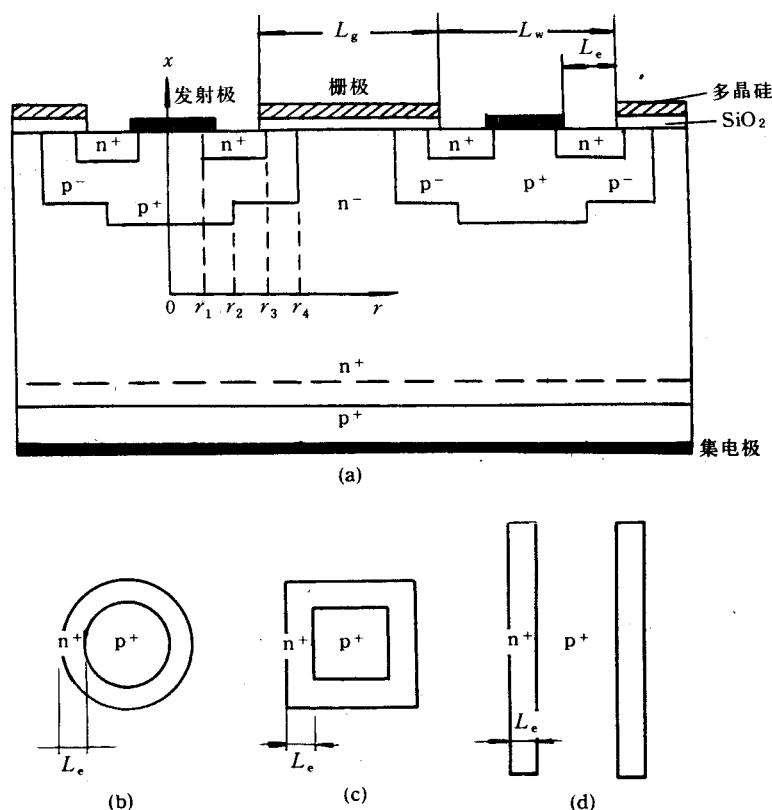


图 1 n 沟道 IGBT 的纵向断面示意图(a)及其发射极图形的圆形(b)、方形(c)、条形(d)设计与有关结构参数

由图 1(a)不难看出, R_p 代表 n^+ 区下的 p 阱横向电阻, 若其值很小, 则导通状态下 n^+ 区下的 p 阱区横向电流分量就会很大. 此电流即是寄生晶闸管的发射结旁路电流, 很显然它是距 p 阱中心的距离 r 的函数, 记为 $I(r)$. 若设流经 IGBT 每个元胞的电流 I 是完全竖直而均

匀地,越过 p 阱的底部,没有横向成份,则 $I(r)$ 可用 I 简单地表示成:

$$\text{对圆形结构} \quad I(r) = I[1 - (r/r_4)^2] \quad (1a)$$

$$\text{对方形结构} \quad I(r) = I[1 - (r/r_4)^2] \quad (1b)$$

$$\text{对条形结构} \quad I(r) = I[1 - (r/r_4)^2] \quad (1c)$$

利用平均电压法^[4]求 R_p , 即

$$IR_p = \int_{r_1}^{r_3} I(r) dr \quad (2)$$

式中,电阻积分元 dR 在三种结构中分别为:

$$dR = \bar{\rho} \frac{dr}{2\pi r \Delta x_j} = R_s \frac{dr}{2\pi r} \quad (\text{圆形}) \quad (3a)$$

$$dR = \bar{\rho} \frac{dr}{2\pi r \Delta x_j} = R_s \frac{dr}{2r} \quad (\text{方形}) \quad (3b)$$

$$dR = \bar{\rho} \frac{dr}{Lt \Delta x_j} = R_s \frac{dr}{Lt} \quad (\text{条形}) \quad (3c)$$

式中, $\bar{\rho}$ 和 R_s 分别是 p 阱底部的平均电阻率和薄层电阻, Lt 是条形元胞的长度,将式(1)和(3)代入式(2),可得三种结构中的 R_p 表达式为:

$$R_p = \frac{R_s^-}{2\pi} \left(\ln \frac{r_3}{r_2} - \frac{r_3^2 - r_2^2}{2r_4^2} \right) + \frac{R_s^+}{2\pi} \left(\ln \frac{r_2}{r_1} - \frac{r_2^2 - r_1^2}{2r_4^2} \right) \quad (\text{圆形}) \quad (4a)$$

$$R_p = \frac{R_s^-}{8} \left(\ln \frac{r_3}{r_2} - \frac{r_3^2 - r_2^2}{2r_4^2} \right) + \frac{R_s^+}{8} \left(\ln \frac{r_2}{r_1} - \frac{r_2^2 - r_1^2}{2r_4^2} \right) \quad (\text{方形}) \quad (4b)$$

$$R_p = \frac{R_s^-}{2L_t} \left(r_3 - r_2 - \frac{r_3^2 - r_2^2}{2r_4} \right) + \frac{R_s^+}{2L_t} \left(r_2 - r_1 - \frac{r_2^2 - r_1^2}{2r_4} \right) \quad (\text{条形}) \quad (4c)$$

式中, R_s^- , R_s^+ 分别代表 p 阱的轻掺杂区和重掺杂区的薄层电阻,可根据杂质分布用数值积分准确算出. p 阱及 n^+ 区的横向边界坐标 r_1, r_2, r_3, r_4 可由版图设计参数 L_w, L_g 和 L_e 准确算出,当然在计算时要考虑横向扩散的结深. 本文中取横向结深为纵向结深的 0.85 倍.

3 结果与讨论

实际工作证明,在 IGBT 的 p 阱中进行 p^+ 深层扩散对提高抗锁定能力是十分必要而有效的^[6]. 结深和表面浓度是进行 p^+ 深层扩散时需要着重考虑的工艺参数. 利用上述 R_p 模型,可以算出 R_p 与 p^+ 深层扩散工艺参数的关系. 为便于比较以下的计算结果都是在设定了 p^- 区的表面杂质浓度 $N_{sp^-} = 2.8 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, 结深 $x_{p^-} = 4.0 \mu\text{m}$, n^+ 区结深 $x_{n^+} = 1.5 \mu\text{m}$ 的情况下获得的,计算时并对所有的扩散杂质都按高斯分布对待.

图 2 所示,是上述三种元胞设计的 R_p 在 p^+ 深层扩散的表面浓度都固定在 $N_{sp^+} = 2.8 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 的情况下,与结深 x_{p^+} 的关系. 图中可见,尽管三种元胞的 R_p 各不相同,但对 x_{p^+} 的依赖关系基本上是一样的. 随着 x_{p^+} 从 $4.5 \mu\text{m}$ 推进到 $6.0 \mu\text{m}$, 三种元胞的 R_p 基本上都减小了一倍. 结深增加意味着传导寄生晶闸管发射结旁路电流的截面积增大,因而分流电阻 R_p 减小. 不过,由于表面杂质浓度固定不变,扩散前沿杂质浓度随着结深的推进而降低,结深超

过一定限度后, R_p 不再有明显的减小. 因此, 单从减小 R_p 的目的来看, p^+ 层的推进可不必太深. 图示结果还表明, 就 R_p 对 x_{jp^+} 的依赖程度而言, 条形设计要明显弱一些.

图 3 所示, 是在把 p^+ 深扩散的结深固定在 $x_{jp^+} = 5.0 \mu\text{m}$ 的情况下, 三种元胞的 R_p 随表面杂质浓度 N_{sp^+} 变化的曲线. 与图 2 所反映的情况类似, 尽管三种元胞的 R_p 都会随着 N_{sp^+} 的升高而减小, 但条形元胞的 R_p 对 N_{sp^+} 的依赖性还是相对弱一些. 随着表面杂质浓度的提高, 扩散层中的杂质总量增加, 平均电阻率下降, R_p 减小, 这是不言而喻的. R_p 随 N_{sp^+} 的提高而下降的幅度在高浓度情况下缩小, 很显然与杂质的电离率在高浓度下降低有关.

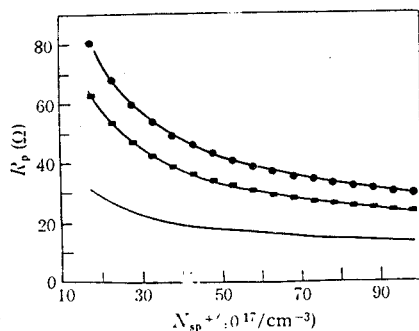


图 3 R_p 与 p^+ 深层扩散表面杂质浓度的关系

● 圆形曲线, □ 方形曲线, — 条形曲线

对提高锁定电流的效果要显著得多^[1]. 图 4 是在固定 $N_{sp^+} = 2.8 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, $x_{jp^+} = 5.0 \mu\text{m}$, 以及 $L_w = 12 \mu\text{m}$, $L_g = 14 \mu\text{m}$ 的情况下, 三种发射图形设计中的 R_p 随 L_e 变化的曲线. 这些曲线表明, 尽管 R_p 都会随着 L_e 的伸长而增大, 但在条型设计中 R_p 的增长幅度要比其他两种设计中的 R_p 增长幅度小得多, 而且同一 L_e 下的 R_p 也远低于其他两种设计中的 R_p 值, 尤其是在 L_e 较长的情况下.

图 5 中在 $N_{sp^+} = 2.8 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, $x_{jp^+} = 5.0 \mu\text{m}$, $L_g = 14 \mu\text{m}$, $L_e = 3 \mu\text{m}$ 的条件下, 计算 R_p 随栅间距 L_w 变化得到的曲线. 在这种情况下, 由于 n^+ 区下面的杂质浓度和区域尺寸都没有发生变化, 严格意义上的横向分流电阻也不应该变化. 但是, 由于本文提出的 R_p 模型是建立在寄生晶闸管发射结旁路电流的计算基础上的, L_w 加长而 L_e 不相应加长的结果, 必然是竖直地直接流向发射极的电流分量在越过 IGBT 发射结的总电流中所占比例增大, 这无异于增大了寄生晶闸管的发射结旁路电流, 其效果等价于 n^+ 区下 p 阱横向电阻的减小. 因此, 图 5 中曲线所反映的 R_p 对 L_w 关系, 严格讲应是等效 R_p 对 L_w 关系, 这些曲线同样反映了条形设计的优势. 这种优势在栅间距越短的情况下越明显. 在这种情况下, 对寄生晶闸管发

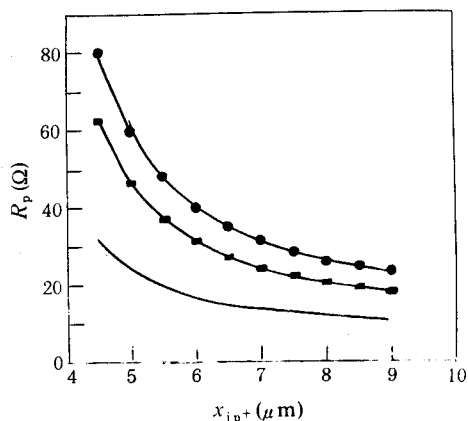


图 2 R_p 与 p^+ 深层扩散结深 x_{jp^+} 的关系

● 圆形曲线, □ 方形曲线, — 条形曲线

R_p 的大小不单决定于 p^+ 深层扩散的结深和杂质浓度, 还决定于发射极与栅极的形状和尺寸. 图 2 和图 3 中的三种图形发射极的有关尺寸都是 $L_w = 12 \mu\text{m}$, $L_g = 14 \mu\text{m}$, $L_e = 3 \mu\text{m}$. 这里, L_w 代表栅间距, L_g 代表栅电极的长度, L_e 代表 n^+ 扩散窗口的宽度, 如图 1(a) 所示. 因为 n^+ 区的存在是 IGBT 具有寄生晶闸管, 从而产生锁定问题的直接原因, 所以 L_e 的长短直接决定着锁定电流的大小. 缩短 L_e 将缩短寄生晶闸管发射极旁路电流在 n^+ 区下的横向路径, 从而使 R_p 减小. 这是提高 IGBT 抗锁定能力的一个有效途径, 实验表明缩短 L_e 比缩短 n^- 漂移区少子寿命对提高锁定电流的效果要显著得多^[1]. 图 4 是在固定 $N_{sp^+} = 2.8 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, $x_{jp^+} = 5.0 \mu\text{m}$, 以及 $L_w = 12 \mu\text{m}$, $L_g = 14 \mu\text{m}$ 的情况下, 三种发射图形设计中的 R_p 随 L_e 变化的曲线. 这些曲线表明, 尽管 R_p 都会随着 L_e 的伸长而增大, 但在条型设计中 R_p 的增长幅度要比其他两种设计中的 R_p 增长幅度小得多, 而且同一 L_e 下的 R_p 也远低于其他两种设计中的 R_p 值, 尤其是在 L_e 较长的情况下.

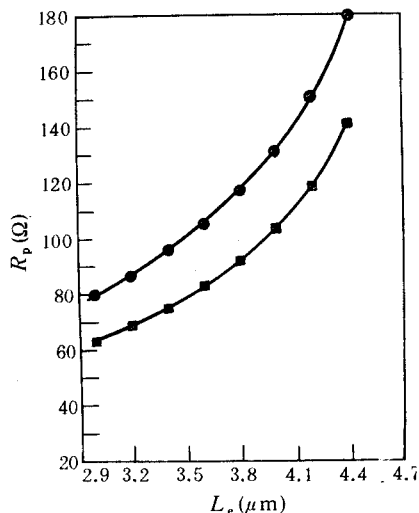


图4 R_p 与 n^+ 扩散窗口宽度 L_e 的关系
● 圆形曲线, □ 方形曲线, — 条形曲线

射结的分流作用主要决定于 n^+ 区下的 p 阱横向电阻的大小。

由于 p 阱是由低浓度浅扩散区和高浓度深层扩散区两部分组成的, n^+ 区下面的 p 阱一般也包含有这两个部分. 这两个部分的相对大小自然也直接影响到 R_p 的大小. 在浅扩散和深扩散的结深都固定不变的情况下, 可用 p^+ 扩散与 n^+ 扩散窗口的迭合长度 ΔL_e 与 n^+ 扩散窗口的宽度 L_e 的比来表示旁路电流通道的这两个组成部分的比例. 比例 $\Delta L_e/L_e$ 越大, R_p 越小, 因为深层扩散部分不仅杂质浓度高, 而且截面积大. 图 6 是在 $N_{sp^+} = 2.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $x_{jp^+} = 5.0 \mu\text{m}$, $L_g = 14 \mu\text{m}$, $L_e = 3 \mu\text{m}$, $L_w = 12 \mu\text{m}$ 等参数固定不变的情况下, 对三种发射极图形设计算出的 R_p 对 $\Delta L_e/L_e$ 关系曲线. 参数 $\Delta L_e/L_e = 0$ 时的过高的 R_p 值直观地反映了 p^+ 深层扩散对提高 IGBT 抗锁定能力的重要性.

$\Delta L_e/L_e = 1$ 时的 R_p 最小是不言而喻的, 但要做到这一点

实际工作中十分困难, 因为 p^+ 区一旦横向扩展越过 n^+ 区边界, 就会改变绝缘栅的阈值电压, 严重破坏 IGBT 的开关特性. 图 6 中的曲线还表明, 随着 n^+ 区与 p^+ 区重叠程度的增加, 不同发射极图形设计的 R_p 大小之差逐渐缩小. 反言之, 在重叠较少时, 图形选择十分重要.

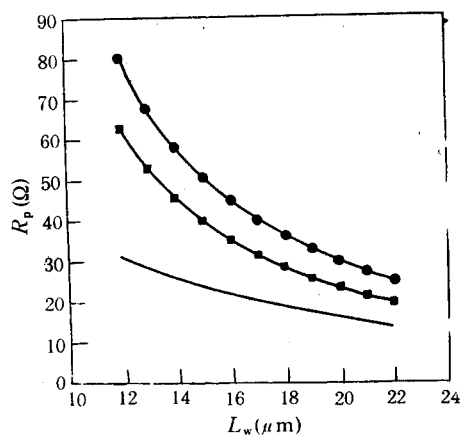


图5 R_p 与栅间距 L_w 的关系
● 圆形曲线, □ 方形曲线, — 条形曲线

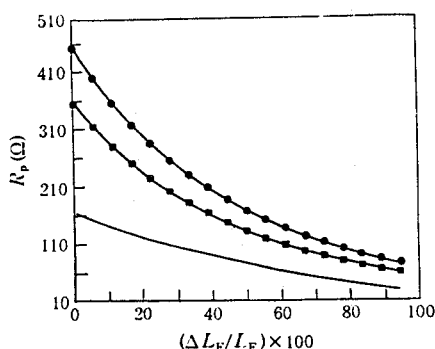


图6 R_p 同 n^+ 区与 p^+ 区的迭合程度的关系
● 圆形曲线, □ 方形曲线, — 条形曲线

4 结论

IGBT 的抗锁定能力可以通过减小其寄生晶闸管的发射结分流电阻 R_p 得到有效的提高. 为了设计具有最小 R_p 的大电流 IGBT, 针对圆形、方形、条形这三种最简单的 IGBT 发

射极图形设计建立了 R_p 的计算模型,并据此研究了在各种图形设计中的 R_p 与 p 阱高浓度深层扩散的结深和表面杂质浓度的关系,以及图形及其尺寸对 R_p 大小的影响.结果表明,在这三种图形设计中,条形设计在任何一种情况下都比其他两种设计更易获得较小的分流电阻 R_p ,且对扩散工艺参数和尺寸参数较不敏感,有利于提高批量生产的等级合格率.对不论那种图形设计在 p 阱的中央部分增加一个高浓度深层扩散,并使该深层扩散区的边沿与 n^+ 区有较大比例的重迭,是降低 R_p 的有效措施,在进行 p^+ 深层扩散的时候,表面杂质浓度宜适当高一点,结深可适当深一些,但不宜过量.对于图形尺寸, n^+ 区宽度要小,栅间距要大, p^+ 深层扩散的横向扩散要尽可能达到 n^+ 区的外边沿,但不能超过.

参 考 文 献

- [1] Y-Hwan Koh and Choong-K Kin, Solid State Electron., 1990, **33**:479.
- [2] A. M. Goofmsn *et al.*, International Electron Device Meeting Tech. Dig., 1983, 79.
- [3] H. Yilmaz, IEEE Electron Device Lett., 1985, **EDL-6**:419.
- [4] B. J. Baliga. Modern Power Devices, John Wiley & Sons, 1987, 358.
- [5] B. J. Baliga. IEEE Trans. Electron Devices, 1984, **ED-31**:1290.

Emitter Shunting Resistance of Parasitic Thyristor in IGBT

Cao Maowang and Chen Zhiming

(Shaanxi Institute of Mechanical Engineering, Xi' an 710048)

Received 9 August 1993, revised manuscript received 23 December 1993

Abstract Designing high current IGBT with minimum emitter shunting resistance of parasitic thyristor, we have established models of shunting resistance for different cell geometries. The function relationships between the shunting resistance and the junction depth and the surface concentration of p^+ -deep-diffusion in the p-well are discussed based on the models. The effects of cell geometry and cell size on shunting resistance are investigated as well.

PACC: 7340L; **EEACC:** 2560L