

# GTR 多环 FLR 结构优化

荆春雷 肖浦英 陈治明

(陕西机械学院自动化工程系 西安 710048)

**摘要** 利用泊松方程的准三维数值解法,以三环 FLR 系统为例,讨论对 GTR 的 FLR 系统进行结构优化的基本问题和方法.着重探讨了优化判据问题,指出界面电荷密度对优化结果的准确性影响很大.

EEACC: 2560J, 2560B, 0290T

## 1 引言

阻断电压依然是电力晶体管(GTR)最重要的工作特性之一.方片 GTR 由于采用平面制造工艺,其阻断电压受 pn 结弯曲及表面电荷的影响而严重下降,因而耐压超过 1000V 的方片 GTR 必然要采用终端技术.在各种平面终端技术中,场限环(FLR)工艺简单,并能有效克服结弯曲对器件耐压能力的削弱而在高压大电流方片 GTR 的制造工艺中广为采用.

FLR 对提高 GTR 由击穿电压的贡献大小,在很大程度上取决于其结构设计的合理性. FLR 结构优化的目的,就是要确定一组合理的结构参数.由于 FLR 通常是在器件主结的形成工艺中同时形成的,其结深与杂质分布随主结而定,因而结构优化所要考虑的主要参数是环的数目、宽度、环与主结以及环与环间的距离.其中,环距的确定较难,而器件击穿电压对环距最敏感.本文以三环 FLR 系统为例,以泊松方程的准三维数值解为基础<sup>[1]</sup>,讨论利用微机对 GTR 的 FLR 结构进行优化的基本问题和方法.文中着重探讨结构优化的判据,并指出界面电荷密度对优化结果的准确性影响很大.

## 2 理论

关于用有限元法求解准三维泊松方程,从而在微机上实现对多环 FLR 系统电位及电场分布的模拟和器件击穿特性分析的基本理论和方法,已在前文<sup>[1]</sup>发表.这里只着重讨论结构参数的优化问题.

优化设计的关键问题是确定准确可靠而可行性又高的优化判据.电场判据<sup>[2]</sup>是在平面

荆春雷 男,1963年生,现在上海海燕半导体器件厂任工程师,上海 200093

肖浦英 女,1941年生,副教授,主要从事电力半导体器件研究与相关课程的教学工作

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7月6日收到初稿,1993年10月28日收到修改稿

终端技术中常常使用且基本符合这些要求的一种简单判据. 对 FLR 系统, 电场判据以器件临近雪崩击穿时各环与主结的最大电场强度是否相等或接近相等来衡量结构参数的优化程度; 或作为一种合理近似, 看各相邻环间平均表面电场是否相等或接近相等. 这种判据在问题的处理过程中显然比较简单而且直观, 但从击穿理论上讲并不十分严密. 按 pn 结雪崩击穿的机制而言, 击穿电压定义为载流子的雪崩倍增因子  $M$  趋近于无穷大时器件所承受的外加电压<sup>[3]</sup>. 对于一个装备了 FLR 的 pn 结, 譬如本文所讨论的 GTR 的集电结, FLR 在其承受反偏压时的作用犹如一个分压器. 当集电结临近雪崩击穿状态时, 若各环结也同时临近雪崩击穿, 则此时的分压比最为理想, 器件所承受的反偏压最高. 因此, 就击穿机制而言, FLR 结构优化的具体目标就是保持主结与各环节之间有相等的载流子雪崩倍增因子, 并且会令其同时趋于无穷大.

对 GTR 的集电结及其 FLR 而言, 耗尽层主要在  $n^-$  区展开, 雪崩倍增的原生电流是由  $p^+$  区注入的空穴流, 相应的倍增方程可写成<sup>[4]</sup>:

$$1 - \frac{1}{M} = \int_{x_n}^{x_p} \alpha_p \cdot \exp\left[\int_{x_n}^x (\alpha_n - \alpha_p) dx'\right] dx \quad (1)$$

式中,  $\alpha_p$  和  $\alpha_n$  分别是空穴和电子的电离率,  $x_p$  和  $x_n$  分别是耗尽层在  $p^+$  区和  $n^-$  区的边界. 式(1)中被积函数的指数项在硅器件的实际问题中常近似为 1<sup>[5]</sup>, 而空穴电离率  $\alpha_p$  在电场  $E \leq 5 \times 10^5 \text{ V/cm}$  时是  $E$  的指数函数<sup>[6]</sup>. 因而式(1)中的积分可改为

$$I = \int_{x_n}^{x_p} \alpha_\infty \cdot \exp(-b/|E|) \cdot dx \quad (2)$$

式中,  $\alpha_\infty$  和  $b$  分别是半对数坐标中的  $\alpha_p$  对  $1/|E|$  曲线外推至电场为无穷大时的  $\alpha_p$  值和其直线部分的斜率. 由实验结果和知其值分别为  $7.03 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$  和  $1.47 \times 10^6 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$ . 积分应沿着经过主结与环结的最大电场点的电力线进行. 如果这条路径上有  $n$  个节点, 则利用复化梯形公式可将式(2)改写成

$$\begin{aligned} I(f) &= \int_{x_0}^{x_1} f(x) dx + \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx + \cdots + \int_{x_{n-1}}^{x_n} f(x) dx \\ &\approx \frac{h_1}{2} [f(x_0) + f(x_1)] + \frac{h_2}{2} [f(x_1) + f(x_2)] + \cdots + \frac{h_n}{2} [f(x_{n-1}) + f(x_n)] \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{2} [f(x_{i-1}) + f(x_i)] \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $f$  代表式(2)中的被积函数,  $h_i$  为节点  $i-1$  与节点  $i$  的距离.

利用上述方法对主结和每个环结求出相应的电离积分  $I(f)$ , 即可得到相应的倍增因子. 在主结或某一环结临近雪崩击穿, 即其  $I(f)$  趋近于 1 时, 比较其他倍增因子的相对大小, 以判断结构参数的优化程度. 此即倍增因子判据, 或称电离积分判据.

### 3 结构优化与验证

对于确定的器件设计和一组任意给定的 FLR 结构参数, 模拟计算中当任一倍增因子在足够高的外加电压下首先趋于无穷大时, 该外加电压即为器件的雪崩击穿电压. 改变 FLR 结构参数, 进行新的模拟计算将给出新的击穿电压和新的一组倍增因子. 这里所说的 FLR

结构参数不单指环宽、环距等,也包括环的个数.使击穿电压升高的参数变动是趋向优化的变动.对于确定环数的 FLR 系统,其他参数的优化变动必导致各个倍增因子之间相对误差的缩小,到各倍增因子相等时,雪崩击穿电压必为最高.对于确定的击穿电压额定值,环数最少而各个倍增因子相等时的结构参数即为优化参数.由于 pn 结临近雪崩击穿时倍增因子随外加电压变化的幅度较大,实际工作中只要差别最大的两个倍增因子的相对误差不超过 10%,即可认为优化目的基本实现.

为了检验理论和计算程序,设计了一个试验性的三环 FLR 系统,其击穿电压定额为 1000V.表 1 列举了优化过程中的三组结构参数及相应的倍增因子(按最大倍增因子作了归一化处理).相应的击穿电压计算值和按表列参数制作的实验样品的实测平均值同列于表中.表中数据表明,倍增因子比较一致的 FLR 系统的击穿电压无论是计算值还是实测值都最高,表明倍增因子判据是有效的.考虑到材料参数的涨落和工艺偏差等因素,击穿电压的理论值和实验值也是很吻合的,这反应了理论模型和计算方法的正确性.表中, $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  顺次代表主结、环 1、环 2、环 3 的间距, $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$  分别是三个环的宽度, $M_0$ 、 $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$  则分别是主结和三个环结的倍增因子.

表 1 一个电压额定值为 1000V 的三环 FLR 系统结构优化过程中的三种情况

| 序号  | 场环结构参数( $\mu\text{m}$ ) |       |       |       |       |       | 归一化雪崩倍增因子 |       |       |       | 击穿电压(V) |     |
|-----|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|---------|-----|
|     | $D_1$                   | $W_1$ | $D_2$ | $W_2$ | $D_3$ | $W_3$ | $M_0$     | $M_1$ | $M_2$ | $M_3$ | 理论值     | 实验值 |
| I   | 20                      | 77    | 26    | 72    | 38    | 57    | 1         | 0.87  | 0.88  | 0.71  | 800     | 747 |
| II  | 13                      | 87    | 24    | 72    | 28    | 57    | 0.83      | 1     | 0.80  | 0.63  | 850     | 795 |
| III | 13                      | 72    | 18    | 67    | 26    | 52    | 0.98      | 0.94  | 1     | 0.93  | 975     | 955 |

为了设计一种 50A/1200V GTR 模块,我们解剖了一个市售商品,发现其三环 FLR 结构并不符合优化判据,于是按上述优化程序进行了优化处理.优化前后的结构参数及有关数据列于表 2.对市售商品算出的击穿电压为 1375V,解剖前的实测值为 1400V,说明计算是准确可靠的.

表 2 50A/1200V GTR 的 FLR 结构优化设计

|      | 场环结构参数( $\mu\text{m}$ ) |       |       |       |       |       | 归一化倍增因子 |       |       |       | 最大电场( $10^5\text{V/cm}$ ) |       |       |       | 击穿电压<br>计算值(V) |
|------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|---------------------------|-------|-------|-------|----------------|
|      | $D_1$                   | $W_1$ | $D_2$ | $W_2$ | $D_3$ | $W_3$ | $M_0$   | $M_1$ | $M_2$ | $M_3$ | $E_0$                     | $E_1$ | $E_2$ | $E_3$ |                |
| 优化设计 | 18                      | 64    | 26    | 60    | 36    | 58    | 1       | 0.96  | 0.94  | 0.93  | 2.14                      | 2.19  | 2.25  | 2.23  | 1475           |
| 市售商品 | 32                      | 64    | 38    | 66    | 40    | 64    | 1       | 0.86  | 0.93  | 0.81  | 2.34                      | 2.15  | 2.07  | 2.14  | 1375           |

从表 2 所列数据看到,市售商品集电结与三个环结在倍增因子和最大电场强度方面都还有较大差别,而优化以后,不仅倍增因子和最大电场强度趋于均匀,击穿电压也提高了 100V.

该市售商品的 FLR 系统在结构优化前后的电场分布情况如图 1 所示.图中可见,按倍增因子判据实现的优化结构在临近雪崩击穿时的最大电场对主结和各环结是一致的.这表明倍增因子判据与电场判据等效,倍增因子趋于一致时,最大电场强度也趋于一致.但值得指出的是,最大电场强度与倍增因子在系统各 pn 结间的大小关系并不一定相符.譬如从表

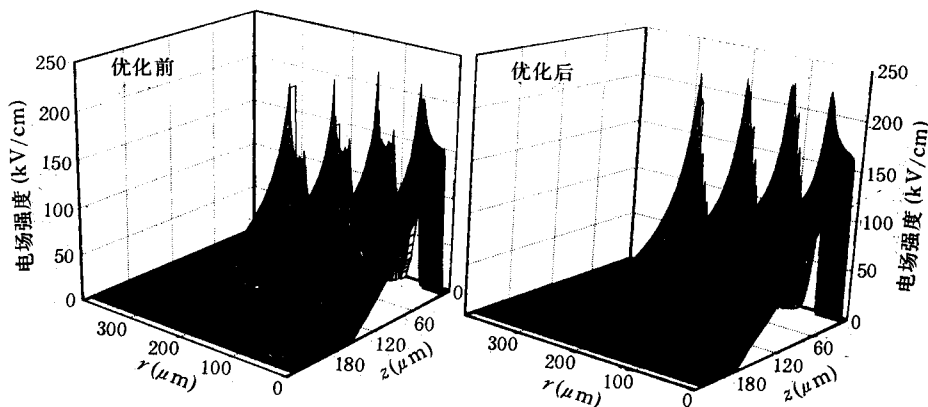


图1 一个50A/1200V 市售GTR商品的FLR系统在结构优化前后的电场分布情况

2 可以看出,市售商品的FLR系统中,电场强度和倍增因子皆以主结为最大;而优化后,主结的倍增因子仍为最大,但最大电场强度却比所有的环结都低.最大电场强度与倍增因子的相反变化趋势也可在市售商品的三个环结之间看到.pn结雪崩击穿时倍增因子的大小不仅取决于耗尽层电场强度,也与耗尽层宽度密切相关.这说明倍增因子判据比电场判据更严密.

## 4 讨论

存在于FLR系统表面与 $\text{SiO}_2$ 钝化膜之间的界面电荷对器件的击穿电压有着不可忽略的影响,因而在优化过程中界面电荷密度 $Q_{ss}$ 也是一个十分重要的参数.对于表2中所列的优化结构,计算中取 $Q_{ss}=2 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ .若维持所有结构参数和材料参数不变,仅仅改变 $Q_{ss}$ 的大小,则各处的最大电场强度和倍增因子都会有明显改变,器件的击穿电压也会明显降低,如图2所示.图中上部的四条曲线代表四个倍增因子,下部的曲线代表击穿电压.不同情况下的倍增因子都按优化结构的倍增因子作了归一化处理.图中可见,

$Q_{ss}$ 增大时,场限环特别是外环的倍增因子明显减小,而集电结倍增因子变化不大; $Q_{ss}$ 减小时,集电结倍增因子的减小十分明显,而场限环的倍增因子变化不大,只有最外环有较明显的增加.倍增因子的这些变化趋势表明, $Q_{ss}$ 增大会使FLR的分压作用削弱,集电极击穿时FLR还未进入临界状态.这与文献[7]的结论是一致的.界面正电荷在n型基片表面产生的附加电场与集电结耗尽层的电场方向相同,与FLR耗尽层的电场方向相反,其结果是集电结先于环结击穿.界面电荷为负时情况恰好相反,即外环首先击穿.便不管是哪种情况,器件击穿电压都要下降.对于按一定密度正电荷得出的优化结构,提高密度犹如引入正电荷,降

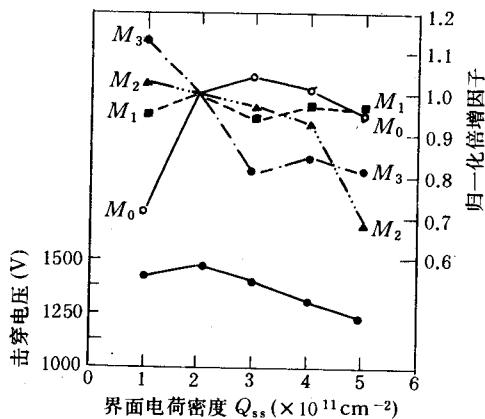


图2 界面电荷对FLR系统雪崩倍增因子及雪崩击穿电压的影响

低密度犹如引入负电荷. 由此可见, 在进行结构优化的时候, 正确设定  $Q_{ss}$  对结果的优劣程度十分重要; 在器件制造过程中, 严格控制  $Q_{ss}$  对产品的电压等级合格率十分重要. 一个优化结构是针对一定的  $Q_{ss}$  而言的.  $Q_{ss}$  变了, 这个结构也就不再是优化结构了.

## 5 结语

由于 pn 结的雪崩击穿不仅决定于耗尽层电场的强弱, 也与耗尽层宽度有关, 因此, 在对 FLR 系统进行结构优化的时候, 尽管电场判据也很有效, 但不及倍增因子判据更能全面反映雪崩击穿的实际情况. 界面电荷通过附加电场影响 FLR 系统的作用. 在倍增因子的计算过程中, 界面电荷密度的预设是否恰当直接影响到计算结果的准确程度. 特别是在预设偏低时, 实际存在超量正电荷使得按此结果设计的 FLR 系统失去对主结的保护作用.

作者衷心感谢西安交通大学张少云博士和陕西机械学院高勇副教授对本工作的支持和帮助.

## 参 考 文 献

- [1] 荆春雷、肖浦英、陈治明, 半导体学报, 1995, **16**(1): 67.
- [2] S. Georgescu *et al.*, Solid-State Electronics, 1986, **29**: 1035.
- [3] 施敏著, 王阳元等译, 《半导体器件——物理与工艺》, 科学出版社, 1992, 111.
- [4] S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, 2nd ED, John Wiley & Sons, 1981, 99.
- [5] N. Kotani *et al.*, Solid-State Electronics, 1981, **24**: 681.
- [6] W. N. Grant, Solid-State Electronics, 1973, **16**: 1189.
- [7] K. R. Whight and D. J. Coe, Solid -State Electronics, 1984, **27**: 1021.

## Structure Optimization of Multi-FLR System in GTR

Jing Chunlei, Xiao Puying and Chen Zhiming

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

Received 6 July 1993, revised manuscript received 28 October 1993

**Abstract** Based on a GTR sample equipped with a 3-ring FLR system, the principal considerations in the structure optimization of multi-FLR system are discussed through a numerical analysis of potential distribution by solving a quasi-3D Poisson equation. Optimization criterion is emphatically investigated. Affects of the interface charge on the optimization is demonstrated.

EEACC: 2560J, 2560B, 0290T