

# ESD保护器件栅接地 N型 MOS管开启后区域模拟方法 Research on the Simulation Method for ESD Protection Device GGNMOS after Turning on

刘 瑶,高英俊

LIU Yao, GAO Ying-jun

(广西大学物理科学与工程技术学院,广西南宁 530004)

(College of Physical Science and Engineering Technology, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China)

摘要:基于 ESD应力下栅接地 N型 MOS管(GGNMOS)的工作特性,提出一种开启后区域的器件级模型结构和相应的参数提取方法,并利用 Matlab分别基于两种模型对不同工艺参数的样品进行模拟,获得相应的  $I-V$  特性曲线。虽然模型比模型简单,而且需要的参数少,但是模型比模型更为精确,与实际情况更吻合,更加能够反映出工艺参数对样品开启后特性的影响。

关键词: ESD GGNMOS 模拟仿真 LNP 开启

中图分类号: O45, TN406 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2009)02-0154-04

**Abstract** Based on the behavior of GGNMOS under ESD conditions, two device-level models of GGNMOS after turning on and the parameters extraction methods are given. Then the corresponding  $I-V$  characteristics of GGNMOS can be simulated by Matlab if the different process parameters are given to the two models. It is confirmed that the second model is superior to the first model by comparison and analysis.

**Key words** ESD, GGNMOS, simulation, LNP turning on

在深亚微米集成电路的可靠性问题中,静电放电(ESD)是重要的原因之一<sup>[1]</sup>。因此必须加上 ESD 保护电路,提供 ESD 电流泄放路径,避免 ESD 电流流入电路内部而造成损伤。栅接地 N 型 MOS 管(GGNMOS)是常用的 ESD 保护器件,对其结构的研究一直是通过直接流片测试样品进行的<sup>[2]</sup>。这样不仅成本高,而且周期长、效果差。因此本文针对 GGNMOS 泄放 ESD 大电流的开启区域,提出两种基于 GGNMOS 保护机理的器件级模型结构和参数提取方法,并用 Matlab 对其进行模拟,得到相应的  $I-V$  特性曲线。

## 1 GGNMOS 的保护机理

GGNMOS 及其寄生双极管(LNPN)的剖面如图

收稿日期: 2008-11-17

作者简介:刘 瑶(1982-),女,硕士,助教,主要从事深亚微米器件建模与参数提取以及电子器件可靠性研究。

\* 国家自然科学基金项目(50661001, 50061001),广西科学基金资助项目(桂科基 0639004)资助。

所示,其中 LNPN 管的集电极由 GGNMOS 的漏极形成,发射极由源极形成,基极是衬底。图 2 为 GGNMOS 二次击穿前典型的 TLP 测试曲线<sup>[3]</sup>,其中,  $V_D, I_D$  为漏电压和漏电流;  $V_{in}, I_{in}$  为 LNPN 管的开启电压和电流;  $V_{sp}, I_{sp}$  为维持电压和电流,椭圆框内的曲线为 LNPN 开启后区域的  $I-V$  特性曲线。由图 2 可知 GGNMOS 实际的导通结构是其中的 LNPN 管,它在开启后承担 ESD 大电流的泄放任务,从而达到保护内部电路的目的。

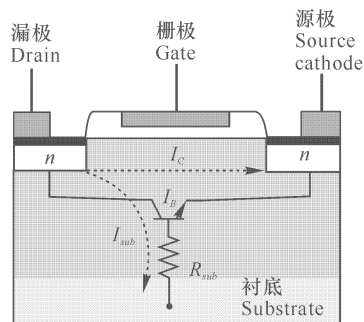


图 1 GGNMOS 及其 LNPN 管的剖面

Fig. 1 Cross section of a GGNMOS and its LNPN

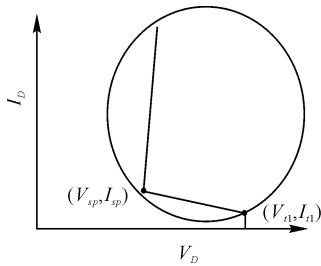


图2 GGNMOS二次击穿前典型的TLP测试曲线<sup>[3]</sup>

Fig. 2 Typical TLP curve of GGNMOS before second breakdown<sup>[3]</sup>

## 2 模型及其参数

### 2.1 模型的建立

由图2可知GGNMOS二次击穿前可分LNPN管开启前和开启后两个区域。在文献[4]已初步建立的开启前模型基础上,我们把雪崩击穿经验公式<sup>[5]</sup>与本电路特性结合起来,并考虑硅作衬底材料,可得雪崩击穿因子 $M$ 和漏电压 $V_D$ 的关系式为:

$$M = \frac{1}{1 - (V_D / V_{av})^2}, \quad (1)$$

其中 $V_{av}$ 为雪崩击穿电压。基于式(1)及 $M$ 与各电流的关系,对以前的模型改进后得到开启前的 $I_D-V_D$ 模型为

$$\begin{cases} I_D = 10^{-16} W, \text{其中 } V_D \leq V_{av}, \\ \frac{10^{-16} W}{1 - (V_D / V_{av})^2} = I_D, \text{其中 } V_{av} \leq V_D \text{ 且 } I_D \leq \\ \frac{0.7}{R_{sub}} + 10^{-16} W. \end{cases} \quad (2)$$

(2)式中, $10^{-16}$ 是一个常数,单位为 $\text{mA}\mu\text{m}$ ;  $W$ 为栅宽,单位为 $\mu\text{m}$ ;  $R_{sub}$ 为衬底电阻。这里主要对承担ESD大电流泄放任务的开启后区域的建模做研究。由于此区域内温度对器件特性的影响非常小,模型可建立在室温条件下。模型中的电流单位取 $\text{mA}$ ,电压单位取 $\text{V}$ 。

当衬底电压 $V_{sub}$ 接近 $0.7\text{V}$ 时,源结正偏引起电子注入到衬底,来自源极的电子电流密度开始贡献给漏电流,这时可以认为LNPN管开启,建立开启后GGNMOS的等效电路模型如图3所示。

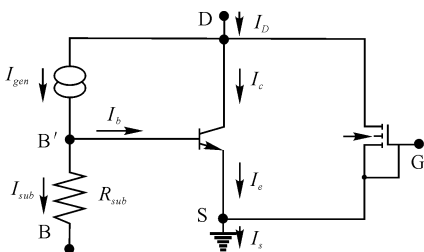


图3 开启后GGNMOS包括LNPN的等效电路模型

Fig. 3 Equivalent circuit model of GGNMOS including LNPN after turning on

由图2可知, LNPN开启后首先进入负阻区, 电流升高, 电压迅速减少到LNPN管的维持电压 $V_{sp}$ , 大部分的ESD电流由LNPN承担; 之后进入一个低阻维持状态, 随着注入电流的进一步增加, 电压会有稍微的增加, 这是由于高电流引起的电流增益 $U$ 下降效应

#### 2.1.1 模型1

LNPN管开启后工作的稳定条件由 $U$ 和 $R_{sub}$ 共同决定, 由图3中 $M$ 和各电流关系可推导出开启后有

$$M = \frac{(U+1)I_D}{U(I_D - I_{sub})}, \quad (3)$$

其中 $I_{sub}$ 是衬底电流。又由于在开启后区域电流会上升到高电流状态, 则需考虑高电流下 $U$ 下降效应。为了维持LNPN管处于开启状态,  $U$ 的下降可能需要一个较高的 $M$ 值, 这就是在GGNMOS达到维持电压 $V_{sp}$ 后电压可能随着电流增大而增加的原因。在建模中把这种效应用一个修正的等效公式<sup>[6]</sup>来表示, 即

$$U = \frac{A_1}{I_D} + A_2, \quad (4)$$

其中 $A_1$ 和 $A_2$ 是与工艺和器件相关的常数。在这里,  $A_1 = (0.01\text{W})/\text{mA}$ ,  $0.01$ 是一个单位为 $\text{mA}\mu\text{m}$ 的常数;  $A_2$ 和低电流下的 $U$ 相关, 在下文给出。结合式(1)、(3)和(4)可得LNPN开启后的 $I_D-V_D$ 关系模型1为

$$\begin{aligned} \frac{A_1 + (A_2 + 1) \cdot I_D}{(A_1 / I_D + A_2) \cdot (I_D - I_{sub})} &= \frac{1}{1 - (V_D / V_{av})^2}, \text{其中 } I_D \\ &\geq \frac{0.7}{R_{sub}} + 10^{-16} W. \end{aligned} \quad (5)$$

#### 2.1.2 模型2

在这个模型中, 把LNPN管开启后分为2个区域分别建模, 即负阻区和低阻维持区。

首先考虑负阻区。由于此区域内电流增加非常小, 则 $U$ 可以由低电流下电流放大系数 $U_b$ 代替。由于 $I_{sub} = V_{sub} / R_{sub} = 0.7 / R_{sub}$ , 结合(3)式和(1)式, 可得负阻区的 $I_D-V_D$ 模型为

$$\frac{U_b(I_D - 0.7/R_{sub})}{(U_b + 1)I_D} = 1 - (V_D / V_{av})^2, \text{其中 } \frac{0.7}{R_{sub}} + 10^{-16} W \leq I_D \leq I_{sp} \quad (6)$$

其次考虑低阻维持区。低阻维持区是开启后的稳定工作区, 此时 $U$ 和 $M$ 之间需满足

$$U(M - 1) = 2, \quad (7)$$

把高电流下 $U$ 的修正公式(4)和(1)式、(7)式结合, 则可得低阻维持区域的 $I_D-V_D$ 模型为

$$\frac{0.01W}{I_D} + A_2 = 2 \left[ \left( \frac{V_{av}}{V_D} \right)^2 - 1 \right], \text{其中 } I_{sp} \leq I_D \quad (8)$$

## 2.2 模型参数提取

在建立好的开启后模型 (5) (6) 和 (8) 式中,需从物理级提取一些未知参数。

首先需提取的是雪崩击穿电压  $V_{av}$  和衬底电阻  $R_{sub}$ 。一般 GGNMOS 属于浅结工艺,则集电极-衬底结形成的反偏 PN 结可近似为单边突变结,用单边突变结的雪崩击穿电压方程<sup>[7]</sup>求解,即

$$V_{av} = \frac{6 \times 10^{13}}{N_{BC}^{3/4}}, \quad (9)$$

其中  $N_{BC}$  是衬底掺杂浓度。在 GGNMOS 中有

$$R_{sub} = R_{\square} L / W \quad (10)$$

其中  $L$  为栅长,  $R_{\square}$  为方块电阻

接着要提取的是低电流下电流放大系数  $U_0$ 。由 npn 管的电流特性结合 ESD 电压主要落在高场区域的特性,并考虑在浅结硅扩散工艺里可用发射极有效结深  $x_j$  代替发射极空穴扩散长度,可得  $U_0$  的物理模型为

$$U_0 = \frac{D_n N_E x_j}{D_p N_{BC} L}, \quad (11)$$

其中  $D_n$  是电子有效扩散系数,  $D_p$  是空穴有效扩散系数,  $N_E$  是发射极掺杂浓度。

$A_2$  是高电流下  $U$  等效公式中的参数,为了使维持电压前后两个区域的电流增益  $U$  保持连续,有

$$A_2 = U_0 - 0.01W / I_{sp} \quad (12)$$

最后需提取的是维持电流  $I_{sp}$ 。由于在负阻区有  $U = U_0$ ,则结合 (1) 式和 (7) 式可得  $V_{sp}$  为

$$V_{sp} = V_{av} \left( \frac{2}{U_0 + 2} \right)^{0.5} \quad (13)$$

把  $V_{sp}$  的值代入 (6) 式可得  $I_D = I_{sp}$  时,有

$$I_{sp} = I_{sub} / \left\{ \left[ 1 - \left( 1 - \frac{V_{av} \left( \frac{2}{U_0 + 2} \right)^{0.5}}{V_{av}} \right)^2 \right] \left[ \frac{U_0 + 1}{U_0} \right] \right\} \quad (14)$$

## 3 模拟仿真试验

根据常用 GGNMOS 的设计规则选择工艺参数如表所示的 2 种硅衬底 GGNMOS 样品来模拟。通常电子扩散系数<sup>[8]</sup>  $D_n = 33.75 \text{ cm}^2/\text{s}$ ,空穴扩散系数  $D_p = 13.52 \text{ cm}^2/\text{s}$ 。根据前面所建立的模型 1((5)式)和模型 2((6)式和(8)式),调用建立的参数模型(9)~(14)式,则输入样品的工艺参数就能用 Matlab 模拟出开启后区域的  $I-V$  曲线。样品 1 分别依据模型 1 和模型 2 模拟得到的  $I-V$  曲线如图 4 所示,样品 2 分别依据模型 1 和模型 2 模拟得到的  $I-V$  曲线如图 5 所示,图 4 和图 5 中标记了开启后区域的几个转折点,即开启电压  $V_{t1}$  和维持电压  $V_{sp}$ 。

表 1 样品 1 和样品 2 的工艺参数

Table 1 Process parameters of sample one and sample two

样品 Sample	W ( $\mu\text{m}$ )	L ( $\mu\text{m}$ )	$N_{BC}$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$N_E$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$R_{\square}$ ( $\Omega$ )	$x_j$ ( $\mu\text{m}$ )
1	10	0.6	$1.6 \times 10^{17}$	$1.0 \times 10^{18}$	5000	0.1
2	7	0.36	$1.8 \times 10^{17}$	$1.1 \times 10^{18}$	4000	0.1

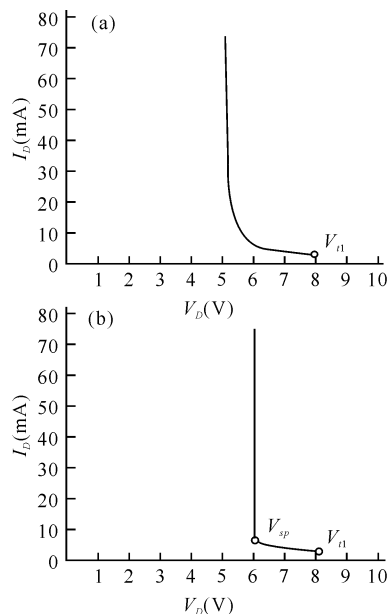


图 4 样品 1 开启后的  $I_D-V_D$  模拟曲线

Fig. 4 The simulated  $I_D-V_D$  curve of sample one after turning on

(a)模型 1, (b)模型 2 (a) Model one, (b) Model two.

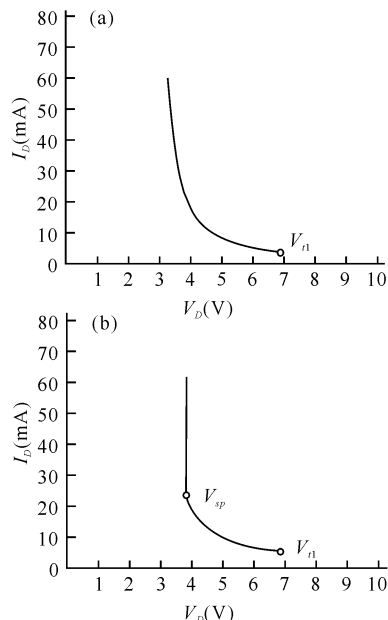


图 5 样品 2 开启后的  $I_D-V_D$  模拟曲线

Fig. 5 The simulated  $I_D-V_D$  curve of sample two after turning on

(a)模型 1, (b)模型 2 (a) Model one, (b) Model two.

比较图 4和图 5两种模拟结果可知,模型 1仿真出的  $I-V$  曲线找不到一个确切的维持电压,即 LNP 开启后电压开始迅速下降,随着电流增大则电压下降变慢,在高电流下电压几乎不变,这与实际情况有所差别,说明模型 1不够精确;而模型 2仿真出的曲线上有维持电压点  $V_{sp}$ ,即 LNP 开启后电压最初迅速下降至维持电压  $V_{sp}$ ,之后随着电流的上升,电压几乎不变但会有些许的增加,这与理论及实际结果完全符合。因此,虽然模型 1比模型 2更简单而且需提取的参数少,但是模型 2比模型 1更为精确,更与实际情况相吻合。

由表 2结果可知,样品 2的开启电压比样品 1的要小,这是因为根据式 (9)衬底掺杂浓度和开启电压的关系可知,衬底掺杂浓度  $N_{BC}$  越低,则开启电压越高;样品 2开启后电压下降的程度比样品 1的要少,这是因为结合 (11)式、(13)式栅长和维持电压的关系可知,栅长越小,则开启后电压下降程度越少。因此模型 2更能反映出工艺参数对样品开启后特性的影响。

表 2 样品 1和样品 2基于模型 2的模拟结果比较

Table 2 The comparison of the simulated results of sample one and sample two based on the second model

样品 Sample	$V_{t1}$ (V)	$V_{sp}$ (V)	$V_{sp}/V_{t1}$ (%)
1	8.000	5.986	0.748
2	6.866	3.888	0.566

基于模型 2的模拟结果比模型 1的更能精确地反映器件的工作特性,而且对于不同工艺参数的

GGNMOS,基于模型 2的模拟能够更好地分析工艺参数对开启后器件特性(如关键值  $V_{t1}$  和  $V_{sp}$ )的影响程度。

参考文献:

- [1] 谭志良. 静电放电对电子装置的危害机理分析与模型研究 [J]. 军械工程学院学报, 1994, 6(4): 265-269.
- [2] Mohan N, Kumar A. Modeling ESD protection [J]. Potentials IEEE, 2005, 24(1): 21-24.
- [3] Amerasekera A, Duvvury C. ESD in Silicon Integrated Circuits [M]. 2nd Edition. New York: John Wiley & Sons Ltd, 2002: 88-89.
- [4] 刘瑶,姚若河,罗宏伟,等. ESD保护器件 GGNMOS的理论建模 [C]. 中国电子学会可靠性分会第十三届学术年会论文选, 2006: 285-291.
- [5] Sze S. Physics of semiconductor devices [M]. 2nd Ed. New York: John Wiley, 1991: 253.
- [6] Amerasekera A, Gupta V, Vasanth K, et al. Analysis of snapback behavior on the ESD capability of sub-0.20  $\mu$ m MOS [C]. San Diego, CA, USA: Proc 37th IRPS, 1999: 159-166.
- [7] Miller S L. Avalanche breakdown in germanium [J]. Phys Rev, 1955, 99(4): 1234.
- [8] 李金平. 模拟集成电路基础 [M]. 北京: 北方交通大学出版社, 2003: 14-16.

(责任编辑: 邓大玉)

(上接第 153页 Continue from page 153)

- [4] Lee Hueyming, Yao Jingshing. Economic production quantity for fuzzy demand quantity and fuzzy production quantity [J]. European Journal of Operational Research, 1998, 109(1): 203-211.
- [5] Lee E S, Li R L. Comparison of fuzzy numbers based on the probability measure of fuzzy events [J]. Computer and Mathematics with Applications, 1988, 15(10): 887-896.
- [6] Chih Hsun Hsieh. Optimization of fuzzy production inventory models [J]. Information Sciences, 2002, 146(1-4): 29-40.
- [7] 刘志国. 一个新的最优模糊存储模型 [J]. 数学的实践与

认识, 2006, 36(12): 1-5.

- [8] 胡宝清. 模糊理论基础 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004: 52-80.
- [9] Chen S H, Hsieh C H. Graded mean integration representation of generalized fuzzy number [J]. Journal of Chinese Fuzzy Systems, 1999, 5(2): 1-7.
- [10] Yao J S, Wu K K. Ranking fuzzy numbers based on decomposition principle and signed distance [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000, 116(2): 275-288.

(责任编辑: 韦廷宗 邓大玉)