

# 平面结场板结构表面场分布的二维解析

何 进 张 兴 黄 如 王阳元

(北京大学微电子学研究所, 北京 100871)

**摘要:** 提出了基于二维泊松方程解的平面结场板结构的二维表面电场解析物理模型。在该模型基础上, 分析了衬底掺杂浓度、场板厚度和长度对二维表面场分布的影响。解析预言的场分布与击穿电压的计算结果与先前的数值分析基本符合。该模型为场板结构的优化设计提供了理论基础。

**关键词:** 平面结; 场板结构; 电场分布; 击穿电压

**EEACC:** 2560R; 2560B

中图分类号: TN401

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2001)07-0915-04

## 1 前言

由 Grove 等人提出的场板技术(FP)<sup>[1]</sup>, 因其工艺上的简单和提高击穿电压的有效性, 在新型功率器件的生产和研制中得到了极大重视。目前, 对 FP 的研究大多使用数值方法, 已发表的数值分析结果<sup>[2-4]</sup>使设计者对 FP 的击穿机理有了一定认识。数值分析虽有很好的精度, 但浪费机时、资源。而且, 其结果也仅是对具体结构的优化, 缺乏明确的物理意义。相对数值分析, 采用解析方法要实现 FP 结构的优化, 应首先清楚 FP 表面电场的分布。然而, 因其复杂性, 迄今只有陈星弼和 Chung 进行了基于镜象电荷法的一维分析<sup>[5, 6]</sup>。

平面结的场分布和击穿电压, 就其本质而言应是一个二维问题, 任何一维分析仅可给出近似的结果。因此, 本文基于二维泊松方程的求解, 提出了平面结场板结构的二维表面电场的解析物理模型, 定量分析了表面场分布与衬底掺杂浓度、场板厚度和长度的关系。模型预言的场分布和计算的击穿电压与先前的数值分析结果相符, 为 FP 技术进一步应用于平面结器件的终端优化设计提供了理论基础<sup>[7, 8]</sup>。

何 进 1966 年出生, 博士后, 主要从事深亚微米 SOI 器件和新型 MOS 功率器件研究。

张 兴 1965 年出生, 教授, 主要从事深亚微米 CMOS/SOI 工艺, ASIC 模拟和设计研究。

黄 如 1969 年出生, 副教授, 主要从事深亚微米 CMOS/SOI 器件和电路、ASIC 设计以及 SOI 材料表征研究。

2000-06-25 收到, 2000-10-22 定稿

## 2 二维解析物理模型

图 1 是平面结场板结构剖面示意。 $W_{FP}$  和  $t_{ox}$  分别是场板有效长度和厚度;  $\epsilon$  和  $\epsilon_s$  是  $\text{SiO}_2$  介质和 Si 的介电常数;  $E_{J\text{-peak}}$  和  $E_{FP\text{-peak}}$  分别是结和场板边缘的峰值电场;  $E_c$  是击穿临界电场, 与衬底浓度  $N_a$  相关。坐标系是  $x$  轴沿 Si/SiO<sub>2</sub> 界面,  $y$  轴沿着 N<sup>+</sup> P 结界面。

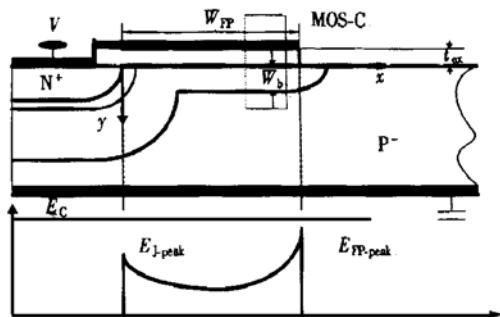


图 1 有场板的平面结结构耗尽区和电场分布示意

FIG. 1 Depletion Region and Electrical Field Distribution of Planar Junction with a Single-Step Field Plate

设  $\phi(x, y)$  是场板下面耗尽区的电势, 则二维泊

松方程为

$$\frac{d^2\phi(x,y)}{dx^2} + \frac{d^2\phi(x,y)}{dy^2} = \frac{qN_a}{\epsilon_{Si}} \quad 0 \leq x \leq W_{FP} \quad (1)$$

设  $V$  是外加反偏电压, 利用深耗尽情况下的 MOS 耗尽层深度表达式<sup>[6]</sup>

$$w_b = t_{ox} \left[ -\frac{\epsilon_{Si}}{\epsilon_i} + \sqrt{\left(\frac{\epsilon_{Si}}{\epsilon_i}\right)^2 + \frac{2\epsilon_{Si}V}{qN_a t_{ox}}} \right] \quad (2)$$

很容易得出氧化层的电压降为

$$E_{Si,y}(x,0) = \frac{qN_a w_b}{\epsilon_{Si}}, \quad V_{ox} = \frac{\epsilon_i}{\epsilon_{Si}} E_{Si,y} t_{ox} \quad (3)$$

根据场板下面耗尽区的耗尽特性, 可设场板下面耗尽区的势分布为抛物线函数

$$\phi(x,y) = c_0(x) + c_1(x)y + c_2(x)y^2 \quad (4)$$

上述近似不仅可从均匀掺杂区域的一维泊松方程得出, 而且可得到数值分析的证实。这个基本近似已被应用于 SOI RESURF 功率器件的解析, 得到与实验和数值分析基本一致的结果<sup>[9]</sup>。

沿着 Si/SiO<sub>2</sub> 界面的电势为  $\phi(x)$ , 则电势的边

$$\phi(x,0) = \beta_f \alpha_f^2 + \frac{(V_t - \beta_f \alpha_f^2) \sinh\left[\frac{x}{\alpha_f}\right] - (\beta_f \alpha_f^2 - V) \sinh\left[\frac{W_{FP} - x}{\alpha_f}\right]}{\sinh\left[\frac{W_{FP}}{\alpha_f}\right]} \quad (9)$$

对电势分布求距离的微分, 沿着 Si/SiO<sub>2</sub> 界面的侧向电场  $E_{Si,x}(x,0)$  分布为

$$E_{Si,x}(x,0) = -\frac{d\phi}{dx} = -\frac{(V_t - \beta_f \alpha_f^2) \cosh\left[\frac{x}{\alpha_f}\right] + (\beta_f \alpha_f^2 - V) \cosh\left[\frac{W_{FP} - x}{\alpha_f}\right]}{\alpha_f \sinh\left[\frac{W_{FP}}{\alpha_f}\right]} \quad (10)$$

在 Si/SiO<sub>2</sub> 界面上的表面场应是侧向电场  $E_{Si,x}(x,0)$  和纵向电场  $E_{Si,y}(x,0)$  之和, 可表达为

$$E_{tot} = \sqrt{E_{Si,x}^2(x,0) + E_{Si,y}^2(x,0)} \quad (11)$$

### 3 结构参数对场板结构表面电场的影响

方程(9)–(11)是计算表面电场的理论基础。代入不同的结构参数可得场板结构表面电场的分布。图 2 是在一定的场板结构时, 解析计算的不同衬底掺杂浓度对表面场的影响。可以看出: 场板在表面存在两个峰值电场, 一个在场板边缘, 另一个在结边缘, 而中间区电场几乎恒定, 这与所有数值分析<sup>[1–5]</sup>一致。下面对不同结构的分析将进一步证实这一点。

随衬底掺杂浓度增加, 表面电场分布出现明显的变化。衬底掺杂浓度增大, 结边缘峰值电场增高,

界条件为

$$\begin{aligned} \phi(x,0) &= \phi(x) \\ \phi(0,0) &= \phi(0) = V_R \\ V_t &= \phi(W_{FP}) = V - V_{ox} \end{aligned} \quad (5)$$

由电通量的连续性条件得出电场的边界条件为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi(x,y)}{\partial y} \Big|_{y=0} &= \frac{\epsilon_i}{\epsilon_{Si}} \times \frac{V - \phi(x)}{t_{ox}} \\ \frac{\partial \phi(x,y)}{\partial y} \Big|_{y=w_b} &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

解上述方程(1)–(6), 可得沿着 Si/SiO<sub>2</sub> 界面的电势满足

$$\frac{d^2\phi(x)}{dx^2} - \alpha_f^2 \phi(x) = \beta_f \quad (7)$$

其中

$$1/\alpha_f = \left(\frac{\epsilon_i}{\epsilon_{Si}} \times \frac{1}{t_{ox} w_b}\right)^{1/2}, \quad \beta_f = \frac{qN_a}{\epsilon_{Si}} - \frac{\epsilon_i V}{\epsilon_{Si} t_{ox} w_b} \quad (8)$$

再根据边界条件(5)可得沿着 Si/SiO<sub>2</sub> 界面的电势分布为

$$\phi(x,0) = \beta_f \alpha_f^2 + \frac{(V_t - \beta_f \alpha_f^2) \sinh\left[\frac{x}{\alpha_f}\right] - (\beta_f \alpha_f^2 - V) \sinh\left[\frac{W_{FP} - x}{\alpha_f}\right]}{\sinh\left[\frac{W_{FP}}{\alpha_f}\right]} \quad (9)$$

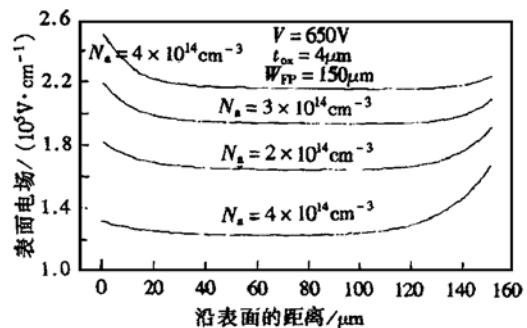


图 2 在不同衬底掺杂浓度下表面电场与沿表面距离的关系

FIG. 2 Surface Field Distribution Versus Surface Distance at Different Substrate Doping Concentration

而场板边缘的峰值电场相对而言却减小。从器件物理的角度看, 衬底掺杂浓度的增大将使结上电压的横向耗尽区长度减小, 从而导致结边缘的峰值电场

增加。基于同样的原理, 衬底掺杂浓度的增大将使场板边缘下的纵向耗尽区长度减小, 从而导致场板边缘的峰值电场增加。但由于氧化层的分压效果, 场板边缘的纵向耗尽区长度减小明显小于结边缘的横向耗尽区长度减小。故最后的结果是结边缘峰值电场增高, 而场板边缘的峰值电场相对结边缘峰值电场而言却减小。

从表面峰值电场的变化可知, 随衬底掺杂浓度增大, 击穿空间将从场板边缘向结边缘转移。这与 Rusu 等人<sup>[2]</sup>的数值分析结果: 在低浓度侧, 以边缘击穿为主; 在高浓度侧, 以结内部击穿为主相符。

场板厚度对场板结构表面电场分布的影响如图 3 所示。随场板厚度增大, 场板边缘的峰值电场明显受到压抑, 而结边缘的峰值电场却相对增高。从表面峰值电场的变化可知, 随场板厚度增大, 击穿空间将从场板边缘向结边缘转移, 这与 Conti 的透明电极测量电离率实验一致<sup>[10]</sup>。在场板厚度使场板边缘的峰值电场减小但始终大于随之相对增大的结边缘的峰值电场时, 击穿将发生在场板边缘。这时, 随场板加厚场板边缘的峰值电场减小, 击穿电压将随场板加厚而迅速上升。这是 O'Neil 等人的场板等效结深计算方法适用的情形<sup>[3]</sup>。但是, 在场板厚度增大使场板边缘的峰值电场减小, 且小于随之相对增大的结边缘的峰值电场时, 击穿将发生在结边缘。这时, 随场板加厚结边缘的峰值电场绝对值减小, 击穿电压将随场板加厚而缓慢增大。据此, 场板厚度存在一个优化值, 在此优化厚度上, 击穿将同时发生在场板边缘和结上, 此时击穿电压为最大。实际的场板结构击穿位置取决于在一定结构参数下场板边缘和结边缘谁先达到临界电场, 此时的击穿电压由这一位置确定。

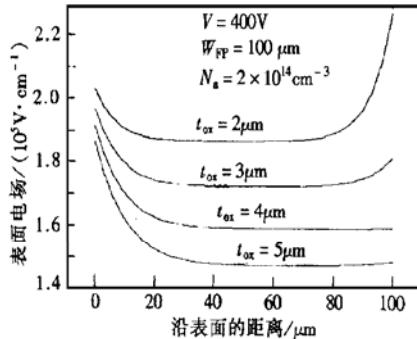


图 3 不同场板厚度下表面电场与沿表面距离的关系

FIG. 3 Surface Field as Function of Surface Distance with Different Field Plate Thicknesses

场板长度对场板结构表面电场分布的影响很复杂。在场板长度远小于对应衬底浓度的平行平面结之耗尽层宽度时, 场板长度对减小边缘电场非常有效<sup>[5]</sup>, 如图 4 的内部插图所示。在场板长度远大于对应衬底浓度的平行平面结之耗尽层宽度时, 场板结构在表面的两个峰值电场基本不随场板长度的增加而变化, 如图 4 所示。这时, 场板长度的再增加不会对击穿有任何改进, 击穿电压出现饱和<sup>[4]</sup>。考虑到节减场板占用的有效硅片面积, 场板长度也存在一个优化值。因而, 场板的优化应是厚度和长度两者的优化, 即轮廓的优化<sup>[11]</sup>。

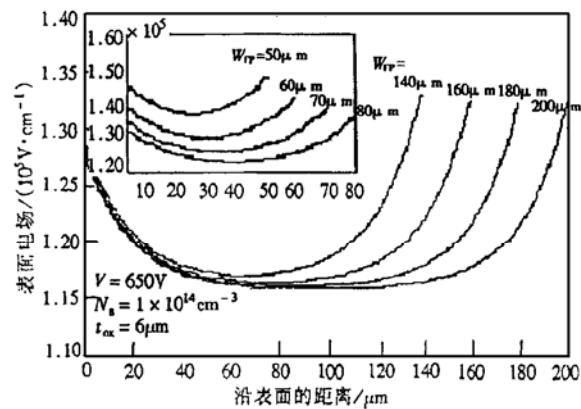


图 4 表面电场与沿表面距离的关系

FIG. 4 Surface Field Versus Surface Distance Plotted as Field Plate Length

图 5 是解析给出的击穿电压与数值分析的结果<sup>[2]</sup>。在击穿计算时, 击穿电压在结和场板边缘是不同的计算方法。前者用体击穿电压加上氧化层压降来计算, 而后者以模型  $V_R$  来计算, 这与二者击穿机理一致<sup>[2]</sup>。可以看出解析计算与数值分析结果比较接近。

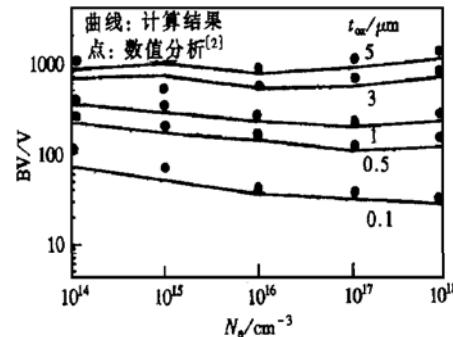


图 5 击穿电压与  $N_a \cdot t_{ox}$  的关系  $W_{fp} = 40 \mu m$

FIG. 5 Relationship Between Breakdown Voltage and  $N_a \cdot t_{ox}$   $W_{fp} = 40 \mu m$ .

## 4 结论

本文提出了基于二维泊松方程的平面结场板结构的二维电场解析物理模型。定量分析了衬底掺杂浓度、场板厚度、长度和表面二维场分布之间的关系。模型计算的场分布和击穿电压与数值分析基本符合。该模型为平面结场板结构的优化设计提供了理论依据。

## 参考文献

- [ 1 ] A. S. Grove, O. Leistikko and W. W. Hooper, IEEE Trans. Electron Devices, 1967, **14**: 157—162.
- [ 2 ] A. Rusu and R. C. Bulucea, IEEE Trans. Electron Devices, 1979, **26**: 202—205.
- [ 3 ] V. P. O'Neil and P. G. Alonas, IEEE Trans. Electron Devices, 1979, **26**: 1098—1102.
- [ 4 ] C. B. Goud and K. N. Bhat, IEEE Trans. Electron Devices, 1991, **38**: 1497—1504.
- [ 5 ] CHEN Xing-bi, Acta Electronica Sinica, 1986, **14**: 36—41[ 陈星弼, 电子学报, 1986, **14**: 36—41].
- [ 6 ] S. K. Chung, D. C. Yoo and Y. I. Choi, IEEE Trans. Electron Devices, 1995, **42**: 192—194.
- [ 7 ] HE Jin, WANG Xin and CHEN Xing-bi, Chinese Journal of Semiconductors, 1999, **20**: 612—618.
- [ 8 ] HE Jin, WANG Xin and CHEN Xing-bi, Chinese Journal of Semiconductors, 1999, **20**: 753—758.
- [ 9 ] HE Jin, ZHANG Xing, HUANG Ru and WANG Yang-yuan, Chinese Journal of Electronics, accepted.
- [ 10 ] F. Conti and M. Conti, Solid-State Electron., 1972, **15**: 60—66.
- [ 11 ] Elmar Falck, Willi Gerlach and Jacek Korec, IEEE Trans. Electron Devices, 1996, **43**: 165—169.

## 2-Dimensional Analysis of Surface Electric Field Profile of Planar Junction with Single-Step Field-Plate Termination Structure

HE Jin, ZHANG Xing, HUANG Ru and WANG Yang-yuan

(Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Based on Poisson Equation, an analytical model is proposed for the 2-dimensional surface electric field profile of the planar junction with a single-step filed plate structure for the first time. The dependence on the doping concentration, field plate thickness and length of the surface electric field profile has been analyzed. The calculated breakdown voltages show good agreement with the previous numerical results. The presented analytical model is especial useful in design of the filed plate termination of the power devices and SPIC.

**Key words:** planar junction; field plate termination; surface field; breakdown voltage

**EEACC:** 2560R; 2560B

**Article ID:** 0253-4177(2001)07-0915-04

---

HE Jin was born in 1966. He is a postal doctor at the Institute of Microelectronics, Peking University. His current research interests focus on the deep sub-micron SOI devices and new MOS power devices.

ZHANG Xing was born in 1965. He is a professor and vice director of Institute of Microelectronics, Peking University. He has been working in the area of sub-micron CMOS/SOI process, simulation and design of ASICs since 1986.

HUANG Ru was born in 1969. She is an associate professor in the Institute of Microelectronics, Peking University. Her current interests are in the deep sub-micron CMOS/SOI devices and circuits, ASICs design and characterization of the SOI materials.