

# 高压半导体器件电场的二维数值分析

陈星弼 李肇基 蒋 旭

(成都电讯工程学院, 成都)

1987年2月22日收到

利用作者们开发的有限元二维分析程序对高压半导体器件的电场分布进行了模拟分析。给出了这类器件中有离子注入、场板和栅极延伸等终端结构时的电场分布;根据模拟结果得出突变平面结表面电场的近似公式,将此公式与圆柱坐标对称解和计算机模拟结果进行了比较。

主题词: 半导体器件、电场分布。p-n 结数值分析

## 一、引言

近年来高压与功率半导体器件和集成电路的发展引起了人们的关注。在这类器件中,电场分布的研究和击穿电压的提高显然是十分重要的课题<sup>[1-3]</sup>。为提高击穿电压,常采用离子注入、场板和场限环等终端技术。这就使得长期以来计算表面电场的圆柱坐标和球坐标解析方法难于获得精确的结果,而需借助于数值分析方法<sup>[4-6]</sup>。在国外开发的这类计算机程序大大加速了器件和集成电路的研制进程。

本文借助于有限元法编制了高压器件电场的二维数值分析程序。由于器件包含了硅-氧化层两种不同性质的介质,在程序编制中对此问题进行了一种处理,以使程序简化。利用这一程序模拟了高压半导体器件中包含有离子注入、场板和栅极延伸等各种终端结构时的电场分布;利用计算机模拟结果,得到突变平面 p-n 结表面电场的经验公式。迄今对单边突变平面结的表面电场的计算,均采用圆柱坐标对称解,其实这并非严格解。我们将这一公式与圆柱坐标对称解和模拟结果进行了比较。文中的结果对高压器件的研制是有益的。作者希望这一公式不仅对高压器件而且对一般的 p-n 结的电场分析也是有用的。

## 二、有限元数值分析

讨论图 1 所示的 n<sup>+</sup>-p 结的电场分布。首先写出其二维泊松方程及边界条件:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = -\frac{qN_B}{\epsilon} \\ \phi|_{r_A} = V_0 \\ \phi|_{r_B} = 0 \\ \frac{\partial \phi}{\partial n}|_{r_C} = \frac{\partial \phi}{\partial n}|_{r_D} = 0 \end{array} \right\} \quad (1)$$

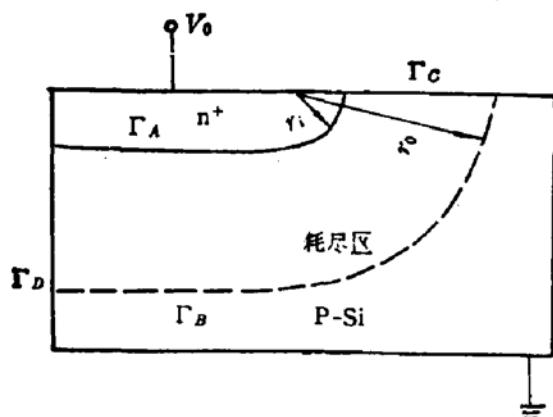
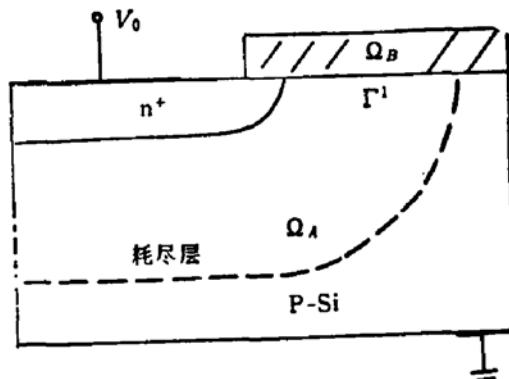
图 1 n<sup>+</sup>-p 结

图 2 覆盖有氧化层的 p-n 结

其中  $\Gamma$  表示各边界,  $V_0$  为外加电压, 其余均为惯用符号。在式(1)的边界条件中还设两种不同介质的交界面上电通量的法向分量是连续的, 且边界  $\Gamma_D$  离开冶金结在表面的位置至少是结深的三倍, 因此可在那里采用一维分析的对称性边界条件。

对一般 p-n 结耗尽层电场分布的分析只涉及求解上述泊松方程。而泊松方程的边值问题等价于泛函的极值问题, 因此可用建立在以变分原理为基础的有限元法进行处理。对方程(1)构造如下泛函:

$$\left. \begin{aligned} \chi(\phi) &= \frac{1}{2} \int_A (\nabla \phi)^2 dA - \int_A \frac{qN_B}{\epsilon} \phi dA \\ (\nabla \phi)^2 &= \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

用三角形单元将方程离散化, 对第  $i$  个单元的泛函有:

$$\left. \begin{aligned} \chi_i &= \frac{1}{2} \sum_{m=1}^3 \sum_{n=1}^3 \phi_m \phi_n K_{mn} - \sum_{m=1}^3 \phi_m (Q_m)_i \\ K_{mn} &= \int_{A_i} \left( \frac{\partial f_m}{\partial x} \frac{\partial f_n}{\partial x} + \frac{\partial f_m}{\partial y} \frac{\partial f_n}{\partial y} \right) dA \\ (Q_m)_i &= \int_{A_i} f(x, y) f_m(x, y) dA \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中  $A_i$  为第  $i$  个单元面积,  $f(x, y)$  为泊松方程的右端量。由变分原理,  $\partial \chi / \partial \phi = 0$ , 可得方程(3)的线性方程组, 并考虑强加边界条件对该方程组系数项和常数项的修正, 再用一般的方法求解此线性方程组, 则可解得全部节点的电位与电场。

在包含有氧化层的 p-n 结中, 如图 2 所示, 由于氧化层内电位分布服从 LAPLACE 方程, 而氧化层与半导体界面上的边界条件不满足标准的第一、二类边界条件<sup>11</sup>, 使上述边值问题的自伴性受到破坏。这样为求解包含有半导体与氧化层交界面的电场问题, 必须求两者的统一泛函。对  $\phi$  乘以适当的因子, 从变分原理得到简化的结果。首先构造泛函  $\chi_A$  与  $I_A$  如下:

$$\left. \begin{aligned} \chi_A &= \frac{1}{2} \int_{\Omega_A} \left[ \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 \right] ds - \int_{\Omega_A} \frac{qN_B}{\epsilon} \phi ds \\ I_A &= \int_{\Gamma_A} \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \frac{\partial \phi}{\partial n} dl \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

这里  $\eta$  为  $\phi$  在有限元法中经离散化后的参量,  $n$  为表面法向矢量,  $ds$  为面积元,  $dl$  为长度元,  $\Omega_A$  为耗尽层区域,  $\Gamma_1$  为法向导数已知的函数的边界, 以上讨论可知, 变分条件

$$\frac{\partial}{\partial \eta} \chi_A - I_A = 0$$

与泊松方程等价。

对氧化层可用  $\epsilon_{ox}/\epsilon_{Si}$  乘  $\phi$ , 构成新的泛函  $\chi_B$  和  $I_B$  如下:

$$\left. \begin{aligned} \chi_B &= \frac{1}{2} \int_{\Omega_B} \left[ \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 \right] \frac{\epsilon_{ox}}{\epsilon_{Si}} ds \\ I_B &= \int_{\Gamma_1} \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial n} \cdot \frac{\epsilon_{ox}}{\epsilon_{Si}} dl \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

符号意义同前。其变分条件

$$\frac{\partial}{\partial \eta} \chi_B - I_B = 0$$

与拉普拉斯方程等价。

根据上面讨论, 除氧化层与硅表面的交界  $\Gamma'$  这一边界外, 其他边界对  $I_A$  和  $I_B$  的贡献均为零。在  $\Gamma'$  上的边界条件为电位连续与电通量连续:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_{Si} &- \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_{SiO_2} \\ \epsilon_{Si} \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{Si} &- \epsilon_{ox} \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{SiO_2} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

从电位连续说明可用一个连续函数  $\phi$  包罗此问题, 从电通量连续说明在  $\Gamma'$  上  $I_A$  与  $I_B$  的贡献恰好抵消。即  $(I_A + I_B)|_{\Gamma'} = 0$ 。因此, 对两种介质的求解问题归结为求泛函  $(\chi_A + \chi_B)$  的极值问题, 即

$$\frac{\partial}{\partial \eta} (\chi_A + \chi_B) = 0 \quad (7)$$

$(\chi_A + \chi_B)$  是求得的包括氧化层在内的统一的泛函, 它可用上述一般有限元法求解。

在引出式(1)的边界条件时, 曾用  $\epsilon_{Si}/\epsilon_{ox} \gg 1$ , 而忽略穿出硅的电通量, 即取  $\partial \phi / \partial n|_{\text{硅表面}} = 0$ 。在硅的表面有一薄氧化层时, 虽不能忽略氧化层中的电通量, 但仍可忽略空气中的电通量, 即设  $\partial \phi / \partial n|_{\text{氧化层表面}} = 0$ 。

### 三、模拟结果及其讨论

利用上述程序对  $n^+ - p$  结在高压情况下的表面电场的二维分布进行了模拟分析。图 3 表示外加电压为 800 伏时  $n^+ - p$  结表面电场的二维分布和电势的等势图。从图中看出, 在  $n^+ - p$  结的边缘处电场出现峰值, 然后沿横向和纵向迅速下降。图 4 给出在 800 伏外加电压下  $n^+ - p$  结的等位线分布, 在  $n^+ - p$  结的表面处等位线变窄, 这与一般低电压下  $n^+ - p$  结表面处的电位分布相似。图 5 给出了表面电场的分布曲线, 图中包括根据圆柱对称近似解<sup>[8]</sup>、计算机模拟及由计算机模拟曲线所得到的经验公式等三种情况下的表电面场分布。根据圆柱对称近似解, 可得到相对电场分布公式为

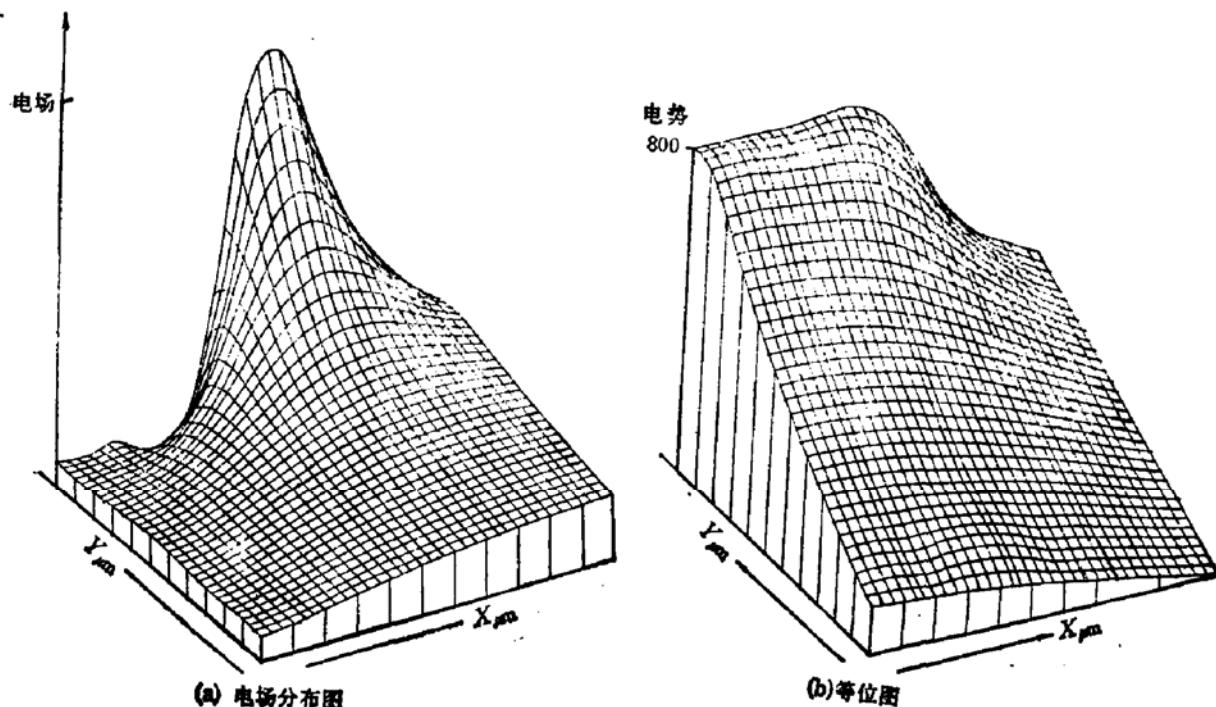


图 3 电场与电势分布图

$$\begin{cases} \frac{E}{E_m} = \frac{r_0^2 - r^2}{2rw} \\ r_0^2 \left( \ln \frac{r_0}{r_i} - \frac{1}{2} \right) + \frac{1}{2} r_i^2 = w^2 \end{cases} \quad (8)$$

其中  $E_m = 2V_0/W$ ,  $W = (2\epsilon V_0/qN_B)^{1/2}$  为耗尽层宽度,  $r_i$  为  $n^+$  区的结深。根据模拟曲线, 我们可获得在实际的器件参数范围内, 如  $5r_i \leq W \leq 100r_i$ , 相对电场分布的经验公式为

$$\begin{cases} \left( \frac{E}{E_m} \right)_E = K_1 \exp\left(-\frac{5.05 r}{W}\right) + K_2 \exp\left(-\frac{0.52 r}{r_i}\right) \\ K_1 = 1.74 \exp(5.05 r_i/W) \\ K_2 = 1.68 \exp\left[\frac{0.242}{\sqrt{r_i/W}} - \frac{11.03 r_i}{W}\right] \end{cases} \quad (9)$$

公式(8)和(9)的结果比较于图 5 中。从图 5 可以看出，当耗尽层宽度  $W > 5 r_i$  时，圆柱坐标近似解与模拟结果和经验公式相差较大；当  $W < 5 r_i$  时，三者比较符合。而在整个范围内，经验公式与模拟结果更为符合。这说明，严格来讲圆柱对称近似解仅在深结情况下较好，在浅结情况下并不合适。 $r_i$  较小时这个解无法光滑地过渡到平面结的一维解，只有在  $r_i$  较大时，两者才能较好地过渡。从图 5 看出，当  $r_i \geq 4W$  时，由圆柱坐标近似解和计算机模拟得到的表面电场与一维平面结的电场分布几乎相同。由式(8)和(9)可以得到在  $r = -r_i$  处的电场峰值为：

$$\begin{cases} \frac{E}{E_m}_c = \frac{r_i - r'_i}{2Wr_i} \\ \frac{E}{E_m}_k = 1.74 + 0.6K_2 \end{cases} \quad (10)$$

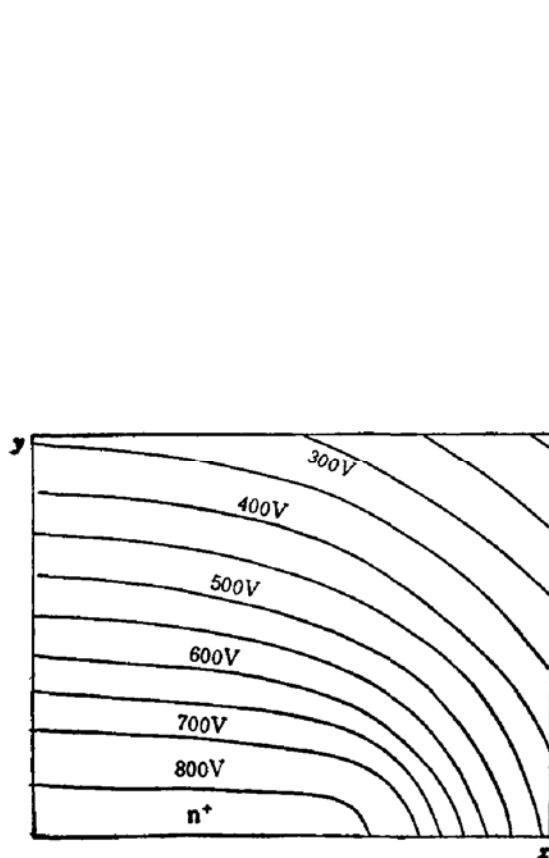


图4 等位线分布图

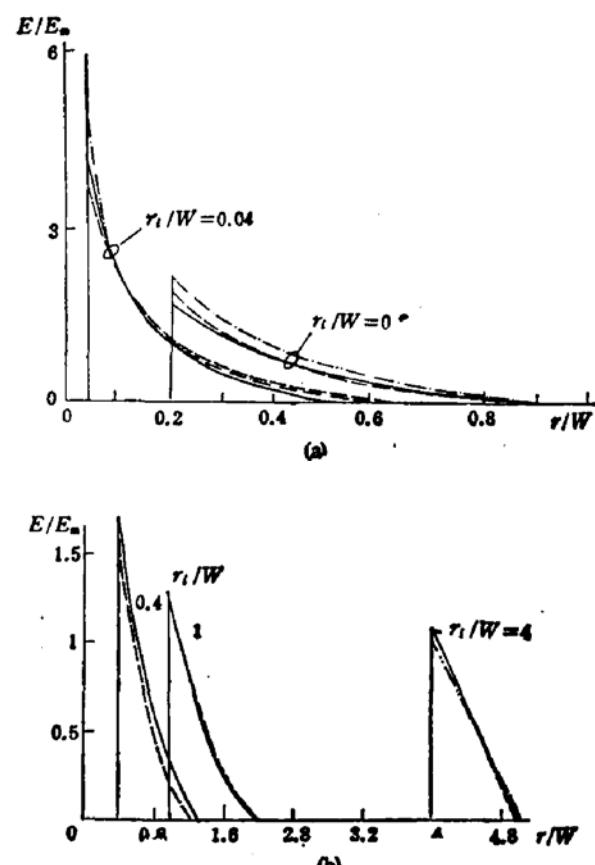
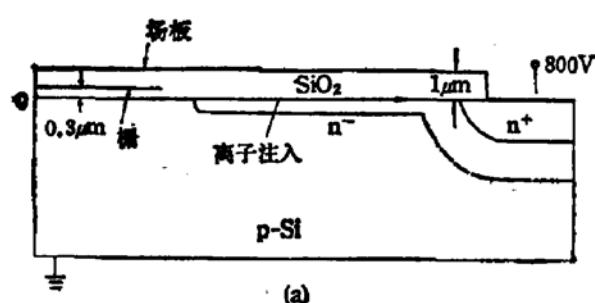


图5 三种情况下的电场分布  
—计算机模拟 ——圆柱解 - - -平面结 ----近似公式



(a)

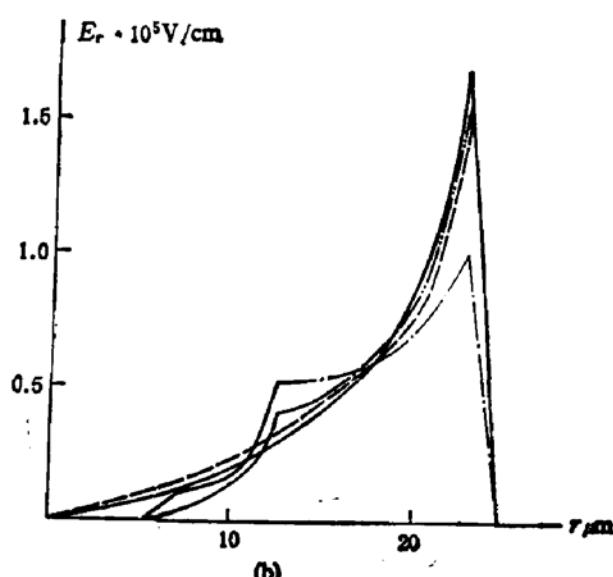


图6 各种终端结构下的电场分布  
—p-n<sup>+</sup> 结 - - -离子注入 - - -场板 ----场板+栅

从式(9)可得到浅结时, n<sup>+</sup>-p 结附近的电场值为

$$\frac{E}{E_m} = K_1 \exp\left(-\frac{0.52 r}{r_t}\right) \quad (11)$$

在结较深时,  $n^+$ - $p$  结附近的电场分布为

$$\frac{E}{E_m} = K_1 \exp\left(-\frac{5.05 r}{W}\right) \quad (12)$$

图6给出了  $n^+$ - $p$  结在有氧化层覆盖和带有场板和离子注入时的电场分布。从图中看出, 当  $n^+$ - $p$  结加有场板或加有延伸的栅极时, 均使  $n^+$ - $p$  结的峰值电场下降; 同样, 在  $n^+$ - $p$  结的表面进行离子注入时也使峰值电场下降。同时在场板的终点及离子注入的另一边缘处的硅表面出现新的电场尖峰。这些模拟结果为功率与高压器件的优化设计提供了理论依据<sup>[9,10]</sup>。

#### 四、结 论

借助于有限元法开发了高压半导体器件电场的二维分析程序。利用这一程序对高压器件在包含有场板、栅极和离子注入等终端结构时的电场分布进行了模拟, 获得了模拟曲线和二维电场及电位分布图。根据模拟结果, 得到突变平面结表面电场的近似公式。在耗尽层宽度与结深比为 5—100 这一实际上常见的且重要的范围内, 该公式可望获得较迄今为止常用的圆柱近似解有更好的近似。

#### 参 考 文 献

- [1] V. A. K. Temple, *IEEE Trans*, ED-30, 619—626, (1983).
- [2] C. Hu, *ibid.*, ED-26, 243 (1979).
- [3] X. B. Chen (陈星弼), C. Hu, *ibid.*, ED-29, 985 (1982).
- [4] A. Rusu, C. Bulucea, *ibid.*, ED-26, 201, (1979).
- [5] Takeaki et al., *ibid.*, ED-27, 334, (1980).
- [6] S. Colak, *ibid.*, ED-28, 1455 (1981).
- [7] R. T. Fenner, *Finite Element Methods for Engineers*, The Momillan Press LTD, London and Basingstoke, (1975).
- [8] S. M. Sze and G. Gibbons, *Solid-State Electronics*, 9, 231, (1966).
- [9] X. B. Chen(陈星弼), Best uniform surface doping in the drift region of offset-gate power MOSFET's with deep junctions, ICSICT'86, (1986).
- [10] 陈星弼, 电子学报, 14, 36(1986).

## Two-Dimensional Numerical Analysis of Electric Field Profile for High Voltage Semiconductor Devices

Chen Xingbi, Li Zhaoji and Jiang Xu

(Chengdu Institute of Radio Engineering)

### Abstract

A two-dimensional numerical analysis of electric field profile for high-voltage devices with the computer simulation program developed by the authors is presented. The program is based on Finite Element Method. A simple empirical formula for calculation of surface electric field in an abrupt planar junction is derived and compared with the cylindric approximation and simulation results. The electric field profiles are also given for high-voltage devices with terminal structure of ion implantation, plate and extention of gate.

**KEY WORDS:** Semiconductor device, Electric field profile, P-N junction, Numerical analysis