

适于薄膜 SOI RESURF 器件击穿电压模拟的高阶紧致差分格式离散的 ADI 方法*

于宗光^{1,2,†} 刘 战² 王国章^{1,2} 须自明²

(1 中国电子科技集团公司第 58 研究所, 无锡 214035)

(2 江南大学信息工程学院, 无锡 214035)

摘要: 采用 ADI 与高阶紧致差分相结合的方法计算薄膜 SOI RESURF 结构击穿电压. 数值计算表明, 这种方法可以降低方程的迭代次数约 40%, 并明显减少方程的求解时间.

关键词: ADI; 高阶紧致差分; SOI; RESURF; 击穿电压

EEACC: 2560R

中图分类号: TN386

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)02-0354-04

1 引言

SOI(silicon-on-insulator)由于其独特的性能越来越得到广泛的重视与研究. 用 SOI 材料制作的器件能实现全介质隔离, 其寄生电容和泄漏电流小, 驱动电流大, 很适合用来制造功率集成电路及器件^[1].

击穿电压是功率 MOS 器件的一个重要参数, 提高输出功率要求提高击穿电压. 击穿电压还决定了 MOS 器件的运用范畴, 例如功率开关管就对高耐压有特殊要求, 因此必须要采取措施来提高器件的击穿电压. 为了使 SOI 功率器件具有较高的击穿电压, 人们研究了多种耐压结构, 例如场板结构、降低表面电场 (RESURF^[2~4]) 结构等, 其中应用最广泛而且最成熟的是 RESURF 结构.

所谓 RESURF, 就是减低表面电场强度 (reduced surface field), 利用较薄的垒晶层结构, 拉开空乏区, 从而降低表面电场的强度.

目前, 对 SOI RESURF 结构进行模拟的研究得到越来越多的重视, 大致可以分为以下三类:

第一类方法是通过数值模拟来计算, 较常用的有 SOR 迭代、有限元等. 此法通常难以兼顾精度与计算时间, 很难适于 VLSI 电路模拟.

第二类方法是利用通用的二维器件数值模拟软件 (如 PISCES, MEDICI 等) 对其进行研究, 虽具有很好的精度, 但其物理意义不够明确, 且由于一般为通用软件, 因此解决具体问题需要耗费大量机时.

第三类方法是在求解二维 Poisson 方程的基础

上, 建立 SOI RESURF 结构的解析模型. 这类方法具有精度较高、物理意义明确等优点, 但由于此类解析模型是在一定假设条件基础上建立的, 其精度较第一、二类方法差, 且计算比较复杂, 通用性较差.

交替方向隐式 (alternating direction implicit) 方法^[5]是种稳定性很好的算法, 它能把多维问题化为一系列的一维问题处理, 而且一维问题所要求解的三对角方程组很容易使用熟知的追赶法在计算机上实现, 因此计算速度较快. 而紧致差分格式^[6]使用较少的网格点便能实现高精度的计算格式, 它与传统的高精度格式相比, 有着计算量小, 对单元的敏感性小以及对边界单元的处理无特别的困难等优点. 本文将紧致差分格式与交替方向隐式方法结合起来, 具有精度高、稳定性好和速度快的特点.

2 模型方程

图 1 是薄膜 SOI RESURF 结构剖面示意图. n^- 型漂移区施主浓度为 N_b , 长度为 L , SOI 层厚度为 t_s , 介电常数是 ϵ_s , 埋氧层厚度为 t_{ox} , 介电常数为 ϵ_{ox} , p^+ 区和 n^+ 区结深均为 t_s , 是场 SiO_2 界面电荷密度.

在器件反偏漂移区全耗尽时, 各区电势满足二维 Poisson 方程:

$$\frac{\partial^2 \phi(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi(x, y)}{\partial y^2} = -\frac{qN_b}{\epsilon_s} \quad (1)$$

电势边界条件为:

$$\begin{cases} \phi(0, y) = 0 \\ \phi(L, y) = V + V_{bi} \end{cases}$$

* 电子元件器件可靠性物理及其应用技术重点实验室基金资助项目 (批准号: 51433020105D Z6801)

† 通信作者. Email: liuzhan84239@163.com

2005-09-09 收到

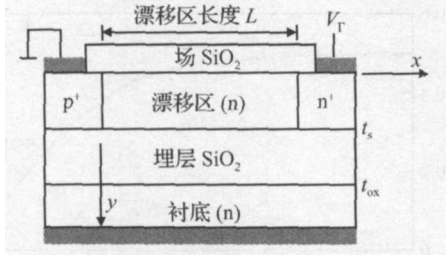


图 1 薄膜 SOI RESURF 结构剖面示意图

Fig. 1 Cross section of thin film SOI RESURF structure

其中 V 为外加电压, 即 n^+ 区所加电压; V_{bi} 是 p^+n^+ 结自建势.

电场边界条件为:

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial \phi(x, y)}{\partial y} \right|_{y=0} = -\frac{qN_{fox}}{\epsilon_0 \epsilon_s} \\ \left. \frac{\partial \phi(x, y)}{\partial y} \right|_{y=t_s} = -\frac{\partial \phi}{\partial y}(x, t_s) \end{cases}$$

其中 ϵ_0 是真空介电常数; q 是电子电荷量.

3 ADI 法

3.1 离散微分方程, 形成迭代格式

方程 (1) 是形如: $L_u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = f(x, y)$ 的二维 Poisson 方程, 而离散椭圆方程的迭代格式可以看成相应抛物形方程的格式, 故我们对偏微分方程

$$\frac{\partial u}{\partial t} = L_u - f \quad (2)$$

构造稳定的差分格式而得到 $L_u = f$ 的隐式迭代格式:

$$(L_x + rI) u^{n+1/2} = (rI - L_y) u^n - h^2 f \quad (3)$$

$$(L_y + rI) u^{n+1} = (rI - L_x) u^{n+1/2} - h^2 f \quad (4)$$

其中 u 即电压; L_x 和 L_y 是由紧致差分格式 (方程 (5)) 代入展开后得到的三对角矩阵; n 为迭代步数; r 为加速参数.

ADI 的计算过程相当于先用 $u_{j,1}^n$ 沿水平方向逐线解三对角方程组 (3) 式得 $u_{j,1}^{n+1/2}$, 然后用 $u_{j,1}^{n+1/2}$ 沿垂直方向逐线解三对角方程组 (4) 式得 $u_{j,1}^{n+1}$, 两步合起来才算完成一次迭代.

3.2 加速参数的选取

我们选用 N 个 r_n 的序列进行迭代, 即每次迭代顺序选的参数 r 为

$$r_1, r_2, r_3, \dots, r_N, r_1, r_2, r_3, \dots, r_N, r_1, r_2, r_3, \dots$$

而 N 个不同的参数 r_i ($1 \leq i \leq N$) 按如下方式计算:

设 L_x 及 L_y 的特征值范围为 $[\lambda, \mu]$, 则

$$(1) \text{ 令 } \lambda_0 = \lambda, \mu_0 = \mu.$$

$$(2) \text{ 计算 } \lambda_{j+1} = \sqrt{\lambda_j \mu_j}, \mu_{j+1} = \frac{\lambda_j + \mu_j}{2}, j =$$

$$0, 1, \dots, k-1.$$

$$(3) \text{ 令 } S_1^{(0)} = \sqrt{\lambda_k \mu_k}.$$

对每个 $j, j = 0, 1, 2, \dots, k-1$, 重复计算 $S_n^{(j+1)}$ ($n = 1, 2, \dots, 2^{j+1}$), 而使其为下面二次方程的解

$$S_n^{(j)} = \frac{1}{2} \left(x + \frac{k-1-j-k-1-j}{x} \right), n = 1, 2, \dots, 2^j.$$

$$(4) \text{ 令 } r_n = S_n^{(k)}, n = 1, 2, \dots, N = 2^k.$$

3.3 综合求解 (3) 和 (4) 式的步骤

$$(1) \text{ 计算初始向量 } u^0 = (rI - L_y) u^0.$$

$$(2) \text{ 对 } n = 0, 1, 2, \dots, \text{ 解 } (L_x + rI) u^{n+1/2} = (rI - L_y) u^n - h^2 f, \text{ 得到 } u^{n+1/2}.$$

$$(3) \text{ 令 } \phi = (rI - L_y) u^{n+1/2} - h^2 f.$$

$$(4) \text{ 解 } (L_x + rI) u^{n+1} = \phi, \text{ 得到 } u^{n+1}.$$

这样就完成了一次迭代, 若此时解 u^{n+1} 已满足精度要求, 迭代结束, 否则转到第 (2) 步继续迭代.

4 紧致差分格式

方程 (2) 中的二阶导数采用四阶精度的紧致差分格式来逼近,

$$\begin{cases} \frac{1}{12} S_{i-1,j} + \frac{5}{6} S_{i,j} + \frac{1}{12} S_{i+1,j} = \\ \quad \frac{1}{x^2} (u_{i-1,j} - 2u_{i,j} + u_{i+1,j}) \\ \frac{1}{12} \bar{S}_{i,j-1} + \frac{5}{6} \bar{S}_{i,j} + \frac{1}{12} \bar{S}_{i,j+1} = \\ \quad \frac{1}{y^2} (u_{i,j-1} - 2u_{i,j} + u_{i,j+1}) \end{cases} \quad (5)$$

其中 $S_{i,j}, \bar{S}_{i,j}$ 分别表示电势 u 对 x 和 y 的二阶偏导数 $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ 和 $\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$ 在 (i, j) 点的值.

边界条件:

本文计算使用的是非周期性边界条件. 非周期性边界条件对于一、二阶导数无显示边界条件, 可采用显式偏心格式和隐式偏心格式两种方法进行数值处理. 在对本文的算例的运算中, 发现显式偏心格式较为适合:

对于一阶导数采用

$$u_1 = \frac{1}{6} (-11u_1 + 18u_2 - 9u_3 + 2u_4)$$

对于二阶导数采用

$$u_1 = \frac{1}{x^2} (2u_1 - 5u_2 + 4u_3 - u_4)$$

$$u_1 = \frac{1}{x^2} \left(\frac{35}{12} u_1 - \frac{26}{3} u_2 + \frac{19}{2} u_3 - \frac{14}{3} u_4 + \frac{11}{12} u_5 \right)$$

5 数值结果及分析

本文实验以一个漂移区较短的薄膜 SOI RE-

SURF 器件为例,主要参数为 $t_s = 0.16\mu\text{m}$; $t_{ox} = 0.4\mu\text{m}$; $L = 1.2\mu\text{m}$; $N_{fox} = 0$. 以本文采用的 ADI 方法以及软件 MEDICI 计算了不同掺杂浓度下的击穿电压,计算得到的结果与文献[7]中的实验结果相符,如图 2 所示.

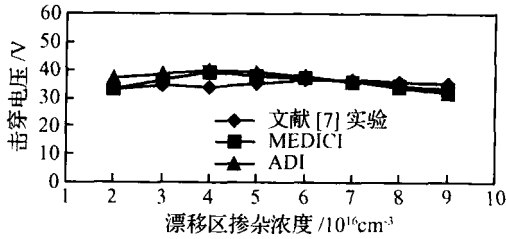


图 2 击穿电压与掺杂浓度的关系

Fig. 2 Relationship between breakdown voltage and doping density

为了体现本文采用的 ADI 方法(记为 ADI^+)的优势,以目前较为流行的 Chebyshev 加速超 SOR 法^[8]及普通的 ADI 方法^[5]分别计算漂移区掺杂浓度为 $9 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 的薄膜 SOI RESURF 器件(主要参数同上).

表 1 和 2 分别是这三种算法在不同网格点数及不同精度下的计算时间和迭代次数.可以看出随着网格点的增加及精度的提高, ADI^+ 迭代法的优越性越来越明显.以网格点 2116、精度 10^{-8} 为例, ADI^+ 迭代法较 ADI 迭代法计算时间减少 28.5%、迭代次数减少 41.6%,较 SOR 迭代法计算时间减少 43.8%、迭代次数减少 55.6%.图 3 是三种算法计算误差与时间的关系,可见 ADI^+ 在三种算法中计算误差下降的速度最快.

表 1 不同网格点下的计算时间和迭代次数

Table 3 Calculating time at different numbers of points

	网格点	576	1024	2116	2916
SOR	时间/s	173	257	331	1989
	迭代次数	47	59	117	362
	时间/s	161	188	260	1633
ADI	迭代次数	38	64	89	245
	时间/s	157	175	186	928
ADI^+	迭代次数	29	43	52	161

表 2 不同精度下的计算时间和迭代次数

Table 2 Calculating time at different precision

	精度	10^{-2}	10^{-4}	10^{-6}	10^{-8}	10^{-10}
SOR	时间/s	17	166	309	331	6723
	迭代次数	12	38	86	117	3049
ADI	时间/s	19	131	237	260	2185
	迭代次数	14	31	72	89	562
ADI^+	时间/s	24	112	167	186	1198
	迭代次数	11	23	49	52	291

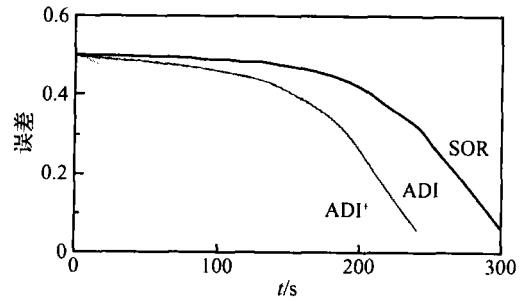


图 3 三种算法计算误差与时间的关系

Fig. 3 Relationship between calculation errors and calculation times of three algorithms

6 结论

计算薄膜 SOI RESURF 结构击穿电压的关键在于计算二维 Poisson 方程,本文采用 ADI 迭代法与高阶紧致差分格式相结合的方法进行求解,在较短的时间内获得了较高的计算精度,并且随着网格点的增加及精度的提高,其优势越来越明显.

参考文献

- [1] Li Zhanguo, Mao Guisheng. Growth technology of silicon single crystal. Beijing: The Industrial General Corporation of Nonferrous Metals, 1986:26 (in Chinese) [李占国,毛桂盛.硅单晶生长工艺学.北京:有色金属工业总公司,1986:26]
- [2] Huang Y S, Baliga B J. Extension of RESURF principle to dielectrically isolated power devices. Proc 3rd Int Symp Power Semiconductor Devices and ICs, 1991:27
- [3] Merchant S, Arnold E, Baumgart H, et al. Realization of high breakdown voltage (> 700V) in thin SOI devices. Proc 3rd Int Symp Power Semiconductor Devices and ICs, 1991:31
- [4] Kim L, Matsumoto S, Sakai T, et al. Analytical approach to breakdown voltages in thin-film SOI power MOSFETs. Solid-State Electron, 1996, 39(1):95
- [5] He Guangyu, Gao Yongli. The aggregation of numerical arithmetic in common use. Beijing: Science Press, 2002: 684 (in Chinese) [何光渝,高永利.常用数值算法集.北京:科学出版社,2002:684]
- [6] Fu D X, Xia Y W. A high order accurate difference scheme for complex flow fields. J Comput Phys, 1997, 134:1
- [7] Matsumoto S, Kim I J, Sakai T, et al. Device characteristics of a 30-V-class thin-film SOI power MOSFET. IEEE Trans Electron Devices, 1996, 43:746
- [8] He Guangyu, Gao Yongli. The aggregation of numerical arithmetic in common use. Beijing: Science Press, 2002: 680 (in Chinese) [何光渝,高永利.常用数值算法集.北京:科学出版社,2002:680]

An ADI Method for the Breakdown Voltage Analysis of Thin-Film SOI RESURF Structure with the High-Order Compact Finite Difference *

Yu Zongguang^{1,2,†}, Liu Zhan², Wang Guozhang^{1,2}, and Xu Ziming²

(1 No.58 Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Wuxi 214036, China)

(2 Jiangnan University, Wuxi 214036, China)

Abstract : The application of ADI and high-order compact finite difference method to the breakdown voltage analysis of thin film SOI RESURF structure. Numerical results present that this method can decrease the number of iterative by 40 % and reduce the computation time greatly.

Key words : ADI; high-order compact finite difference; SOI; RESURF; breakdown voltage

EEACC : 2560R

Article ID : 0253-4177(2006)02-0354-04

* Project supported by Key Laboratory Foundation of Electronic Component Device Reliability Physics and Its Adaptive Technology (No. 51433020105D Z6801)

† Corresponding author. Email: liuzhan84239 @163.com

Received 9 September 2005