

# 求解半导体器件流体力学模型的新方法

刘 战<sup>1,†</sup> 顾晓峰<sup>1</sup> 于宗光<sup>1,2</sup> 胡西多<sup>3</sup> 臧佳锋<sup>1</sup>

(1 江南大学信息工程学院, 无锡 214036)

(2 中国电子科技集团公司第 58 研究所, 无锡 214035)

(3 东莞理工学院电子工程系, 东莞 523808)

**摘要:** 采用样条分步法 SADI 与高阶紧致差分相结合的方法, 计算用于半导体器件模拟的流体力学模型. 数值计算表明, 相比当前最为流行的两种器件模拟方法 CGS 及 Newton-SOR, 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:** SADI; 高阶紧致差分; 器件模拟

**PACC:** 7115Q EEACC: 2560B

**中图分类号:** TN602 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2008)08-1570-05

## 1 引言

随着超大规模集成电路的不断发展, 分析、设计半导体器件变得日益复杂和更加重要, 计算机模拟在半导体器件的物理分析、新型结构器件的研制等许多方面具有较高的实用价值, 受到微电子专业人员的广泛重视. 然而, 器件模拟耗时巨大这一问题严重限制了其实际应用, 因此在保持模拟的可靠性和计算精度的前提下, 降低计算时间就成为一个关键问题. 模拟时间的减少可以从多方面考虑, 如算法的改进和计算量的限制等. 在算法方面, 即减少迭代的次数和每次迭代的时间以达到目的.

一般来说, 器件模拟主要采用两种方法. 一种是漂移扩散模型(drift-diffusion, DD)<sup>[1,2]</sup>, 这种方法需要的 CPU 时间短, 精度也比较高. 但是, 随着半导体工业的发展, 半导体器件的尺寸逐渐缩小, 带来一些新的物理效应, 如速度过冲等, DD 模型变得不再适用. 另一种是近些年来发展起来的流体力学(hydro-dynamics, HD)模型<sup>[3~5]</sup>, 它能较好地模拟器件尺寸缩小以后带来的一些物理效应, 它占用的 CPU 时间只比 DD 模型稍有增加, 但在精度上有很大的提高. 然而对于流体力学模型方程这类复杂的二阶偏微分方程组, 一般无法给出其精确的解析解, 只有经过方程离散后, 得到一组非线性方程组, 并进一步将非线性方程组转化为线性方程组后才能求解. 所以, 最终需要求解大型稀疏线性方程组, 大型稀疏线性方程组的求解效率决定了器件方程的求解效率.

目前, 大型线性稀疏方程组的迭代方法大致可以分为两大类:

(1) 基本迭代法: 主要有雅可比法(Jacobi)、高斯-塞

德尔迭代法(Gauss-Seidel)和超松弛迭代法(SOR)等. 此类方法发展较早, 应用比较成熟, 稳定性较好, 但效率较低.

(2) CG 类方法: 主要有不完全分解预优 CG 法(IC-CG)、广义最小剩余方法(GMRES)以及共扼梯度平方方法(CGS)等. 此类方法计算精度较好, 但难以兼顾稳定性和计算速度.

样条近似法是国际上近十几年发展起来的求解流体力学问题的数值方法, 对于处理带有激波、边界层、不规则边界和相变等一些较特殊问题具有重要的实用价值. Rubin 等用三次样条近似求解流体力学问题, 他们系统地研究了求解偏微分方程的配置法, 给出了可用于直接求解的  $3 \times 3$  矩阵系统, 还把差分法中的交替方向隐式(ADI)法推广到样条中, 称为样条交替方向隐式(spline alternating direction implicit, SADI)法<sup>[6~8]</sup>.

本文将三次样条方法(SADI)用于半导体器件模拟, 数值计算结果表明 SADI 是一种稳定性很好的算法, 它对于函数的一次导数及二次导数在求解过程可直接求出, 并且能把多维问题化为一系列的一维问题处理, 而一维问题所要求解的标量方程组总是三对角形的, 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. 但另一方面, 采用 SADI 方法, 一阶导数的计算精度可以达到三、四阶, 而二阶导数仅可以达到二阶精度. 并且在用于三维器件模拟时, 对于一、二阶导数的边界条件, SADI 方法缺乏高精度的有效处理手段. 而紧致差分格式<sup>[9,10]</sup>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 SADI 方法结合起来(HOC-SADI), 具有精度高、稳定性好和速度快的特点.

† 通信作者. Email: liuzhan84239@163.com

2008-01-02 收到, 2008-03-31 定稿

## 2 模型方程

对于工艺特征尺寸在  $1\mu\text{m}$  以上的器件,我们主要采用漂移-扩散模型<sup>[1,2]</sup>,然而,随着半导体技术的发展,半导体器件的尺寸越来越小,同时也带来了一些新的物理效应,因此出现了能更精确地描述载流子的输运特性的能量守恒模型即流体力学模型<sup>[3~5]</sup>:

(1) 载流子输运的粒子数守恒方程

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\nabla \cdot (nv) + \left[ \frac{\partial n}{\partial t} \right]_c$$

(2) 动量守恒方程

$$\frac{\partial np}{\partial t} = -\nabla \cdot (nU) - qnE + \left[ \frac{\partial np}{\partial t} \right]_c$$

(3) 能量守恒方程

$$\frac{\partial nw}{\partial t} = -\nabla \cdot S - qnE \cdot v + \left[ \frac{\partial nw}{\partial t} \right]_c$$

(4) 三阶矩方程

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -\nabla \cdot (nR) - qnE \cdot (wI + U) + \left[ \frac{\partial Q}{\partial t} \right]_c$$

其中  $v$  为电子平均速度;  $p$  为电子平均动量;  $w$  为电子平均动能密度;  $S$  为电子能流密度;  $U$  为动能张量;  $R$  为四阶矩张量;  $Q$  为电子平均热流密度;  $I$  为单位张量; 每一个方程的最后一项分别代表与碰撞有关的电子密度变化率、动量密度变化率、能量密度变化率和热流密度变化率。

## 3 HOC-SADI 法

### 3.1 利用三次样条函数降维技术求解 HD 模型

假定所要求解的非线性系统为一个  $x$ - $y$  面的二维结构. HD 模型的各项方程可看作以下方程的变形:

$$\left( \frac{\partial u}{\partial t} \right)_{i,j} = f(u_{i,j}, \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)_{i,j}, \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)_{i,j}, \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)_{i,j}, \left( \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)_{i,j}) \quad (1)$$

若按照三次样条法<sup>[8]</sup>近似,可写成

$$(u_t)_{i,j} = f(u_{i,j}, m_{i,j}, l_{i,j}, M_{i,j}, L_{i,j}) \quad (2)$$

其中

$$m = \frac{\partial u}{\partial x}, M = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, l = \frac{\partial u}{\partial y}, L = \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

(2)式按照 SADI 方法,可分为下列两个步骤

$$u_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = u_{i,j}^n + \frac{\Delta t}{2} f(u_{i,j}^n, m_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}, M_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}, l_{i,j}^n, L_{i,j}^n) \quad (3)$$

$$u_{i,j}^{n+1} = u_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{2} f(u_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}, m_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}, M_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}, l_{i,j}^{n+1}, L_{i,j}^{n+1}) \quad (4)$$

根据 HD 模型中各方程的特性,方程 (3) 可视为:

$$u_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = u_{i,j}^n + \frac{\Delta t}{2} f(u_{i,j}^n, m_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}, M_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}) + K \quad (5)$$

其中  $K$  为常数,对上式作线性展开,并整理成

$$u_i^{n+\frac{1}{2}} = F_i + G_i m_i^{n+\frac{1}{2}} + S_i M_i^{n+\frac{1}{2}} \quad (6)$$

式中下标  $j$  省略. 要解 (6) 式,可利用三次样条函数关系,分别化成只含有  $u_i$ 、或一次导数  $m_i$  或二次导数  $M_i$  之代数方程式.但是在化成只含有  $u_i$ 、或一次导数  $m_i$  之代数方程式的过程中,必须依赖二次导数的连续条件所推导出的三次样条函数基本关系式.而对于二次导数  $M_i$  而言,不论是取均匀或非均匀格点都仅具有二阶精度.

利用三次样条关系式<sup>[8]</sup>,可将(6)式转换成仅含二次导数之方程组,其形式如下

$$A_i M_{i-1}^{n+\frac{1}{2}} + B_i M_i^{n+\frac{1}{2}} + C_i M_{i+1}^{n+\frac{1}{2}} = D_i \quad (7)$$

$$(i = 1, 2, \dots, N-1)$$

其中

$$A_i = \frac{e_i h_i}{6c_i} - \frac{1}{h_i}$$

$$B_i = \frac{e_i h_i}{6c_i} + \frac{e_{i+1}(h_i + h_{i+1})}{3c_{i+1}} - \frac{R_{i+1}(h_{i+1}^2 + 3R_i h_{i+1} - 6Q_i)}{36c_{i+1}} + \frac{h_i + h_{i+1}}{h_i h_{i+1}}$$

$$C_i = \frac{d_{i+1}(h_i + h_{i+1})}{3c_{i+1}} - \frac{R_i(2h_{i+1}^2 - 3R_{i+1} h_{i+1}) - 6Q_i h_{i+1}}{36c_{i+1}} - \frac{1}{h_{i+1}}$$

$$D_i = \frac{a_i h_{i+1}}{6c_i} + \frac{a_{i+1}(h_i + h_{i+1})}{3c_{i+1}} - \frac{F_{i+1}(2R_i h_{i+1}^2 - 6Q_i h_{i+1}) + F_i R_{i+1} h_{i+1}^2}{36c_{i+1}}$$

(7) 式为一递归关系式,其系数矩阵为三对角线矩阵:

$$\begin{bmatrix} B_0 & C_0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ A_1 & B_1 & C_1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & A_{N-1} & B_{N-1} & C_{N-1} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & A_N & B_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_0 \\ M_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ M_{N-1} \\ M_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_0 \\ D_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ D_{N-1} \\ D_N \end{bmatrix}$$

其中  $B_0, C_0, D_0$  及  $A_N, B_N, D_N$  由边界条件求得,因此 (7) 式可利用 Thomas Algorithm 迅速地解出微分方程式的二次微分值  $M_i^{n+\frac{1}{2}}$ ,然后利用高阶紧致差分方法(方程(9)、(10))解得  $u_i^{n+\frac{1}{2}}$ ,再代入 (4) 式,将(4)式转化为:

$$A_j M_{j-1}^{n+1} + B_j M_j^{n+1} + C_j M_{j+1}^{n+1} = D_j \quad (8)$$

$$(j = 1, 2, \dots, N-1)$$

采用与求解 (3) 式相同的方法求解(8)式.

SADI 的计算过程相当于先用  $u_{i,j}^n$  沿水平方向逐线解三对角方程组 (3) 式得  $u_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}$ ,然后用  $u_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}$  沿垂直方向逐线解三对角方程组 (4) 式得  $u_{i,j}^{n+1}$ ,两步合起来才

算完成一次迭代。

由此可见,采用降维技术后,原本对一个  $x$ - $y$  面方程的求解转化为对  $x$  方向及  $y$  方向的线方程的求解。(7)、(8) 式所表述的线方程的系数矩阵为三对角矩阵,因此可以采用追赶法进行直接求解,速度可以大大提高。

### 3.2 HOC-SADI 综合求解流程

HOC-SADI 综合求解流体力学模型方程的流程步骤如下:

- (1) 选择适合的边界条件及初始值;
- (2) 采用 SADI 方法将 (3) 式转化为 (7) 式,用追赶法求解,得到  $M_i^{n+\frac{1}{2}}$ ;
- (3) 用高阶紧致差分方法(方程(9)和(10))离散  $M_i^{n+\frac{1}{2}}$  解得  $u_i^{n+\frac{1}{2}}$ ;
- (4) 采用 SADI 方法将 (4) 式转化为(8)式,用追赶法求解,得到  $M_i^{n+1}$ ;
- (5) 用高阶紧致差分方法(方程(9)和(10))离散  $M_i^{n+1}$  解得  $u_i^{n+1}$ ;
- (6) 若  $\left| \frac{u_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^n}{u_{i,j}^{n+1}} \right| < \epsilon$  则程序结束,否则转入步骤(2)继续迭代。

## 4 紧致差分格式

二阶导数的高阶紧致差分的通用格式为

$$\beta S_{i-2} + \partial S_{i-1} + S_i + \partial S_i + \beta S_{i+2} = c \frac{u_{i-3} - 2u_i + u_{i+2}}{9h^2} + b \frac{u_{i-2} - 2u_i + u_{i+2}}{4h^2} + a \frac{u_{i-1} - 2u_i + u_{i+1}}{9h^2}$$

本文在上式中采用的系数  $\alpha, \beta, a, b, c$  为

$$\beta = 0, c = 0, a = \frac{4}{3}(1 - \alpha), b = \frac{1}{3}(-1 + 10\alpha)$$

方程(7)、(8)中的二阶导数  $M_i$  及  $M_j$  采用如下紧致差分格式离散:

(1) 四阶精度的紧致差分格式:

$$\alpha = \frac{1}{10}, \beta = 0, a = \frac{6}{5}, b = 0, c = 0$$

$$\begin{cases} \frac{1}{12} S_{i-1,j} + \frac{5}{6} S_{i,j} + \frac{1}{12} S_{i+1,j} = \\ \frac{1}{\Delta x^2} (u_{i-1,j} - 2u_{i,j} + u_{i+1,j}) \\ \frac{1}{12} \bar{S}_{i,j-1} + \frac{5}{6} \bar{S}_{i,j} + \frac{1}{12} \bar{S}_{i,j+1} = \\ \frac{1}{\Delta y^2} (u_{i,j-1} - 2u_{i,j} + u_{i,j+1}) \end{cases} \quad (9)$$

(2) 六阶精度的紧致差分格式:

$$\alpha = \frac{1}{11}, \beta = 0, a = \frac{12}{11}, b = \frac{3}{11}, c = 0$$

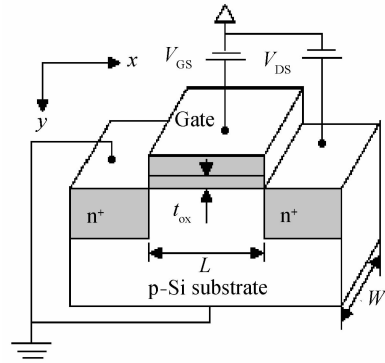


图 1 模拟模型结构示意图

Fig. 1 MOSFET structure for simulation

$$\begin{cases} \frac{1}{6} S_{i-1,j} + \frac{11}{12} S_{i,j} + \frac{1}{6} S_{i+1,j} = \\ \frac{1}{\Delta x^2} (u_{i-1,j} - 2u_{i,j} + u_{i+1,j}) + \\ \frac{1}{16\Delta x^2} (u_{i-2,j} - 2u_{i,j} + u_{i+2,j}) \\ \frac{1}{6} \bar{S}_{i,j-1} + \frac{11}{12} \bar{S}_{i,j} + \frac{1}{6} \bar{S}_{i,j+1} = \\ \frac{1}{\Delta y^2} (u_{i,j-1} - 2u_{i,j} + u_{i,j+1}) + \\ \frac{1}{16\Delta y^2} (u_{i,j-2} - 2u_{i,j} + u_{i,j+2}) \end{cases} \quad (10)$$

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  $M_i, M_j$  在  $(i, j)$  点之值。

## 5 数值结果及分析

在通用 HD 模型中考虑了一般能带结构,在对动量和三阶矩碰撞项的弛豫近似中,用迁移率代替了常规模型中的弛豫时间,并将动量和三阶矩碰撞项分成同质和异质部分,分别进行模拟,即同质部分利用弛豫时间近似,异质部分则采用蒙特卡罗修正项。相比传统的方法,这在一定程度上提高了模型的精度,因此十分适用于抛物线型、非抛物线型能带结构以及 SOI 和异质结构半导体器件的模拟。但是,采用通用 HD 模型进行模拟的计算量相比传统方法大大增加,计算速度逐渐降低,并且随着器件的尺寸逐渐缩小,结构复杂化,此问题日益严峻。因此,本文采用计算速度较快的 SADI 算法与稳定性好、精度高的 HOC 算法相结合的 HOC-SADI 方法以解决这个问题。

本文实验以一个小尺寸  $0.35\mu\text{m}$  LDD n-MOSFET 为例,图 1 为其结构剖面示意图,栅氧化层厚度为  $7\text{nm}$ 。迭代初解为热平衡初解,即不考虑能带弯曲,由热平衡及电中性条件计算载流子分布及电势分布的初始值。采用 HD 模型,图 2 显示了一个栅源偏压  $V_{GS}$  为  $3\text{V}$  且漏源偏压  $V_{DS}$  为  $3\text{V}$  的模拟静电势。

$I_D$ - $V_{DS}$  直流特性的模拟结果如图 3 所示,其中  $V_{DS}$  从  $0$  到  $5\text{V}$ ,  $V_{GS}$  从  $0$  到  $5\text{V}$ 。

由图 2、图 3 可知, HOC-SADI 迭代法数值计算的

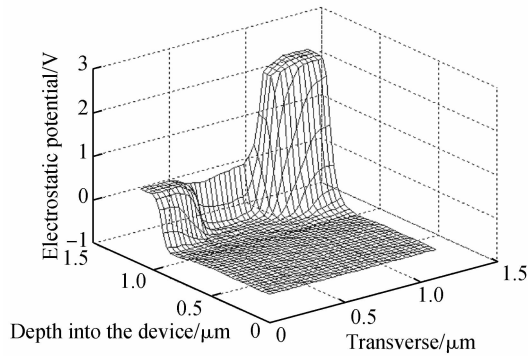


图 2 采用 HD 模型的 0.35 $\mu\text{m}$  n-MOSFET 器件的模拟静电势  
Fig.2 Surface plot of the electrostatic potential for the tested 0.35 $\mu\text{m}$  n-MOSFET device in HD model

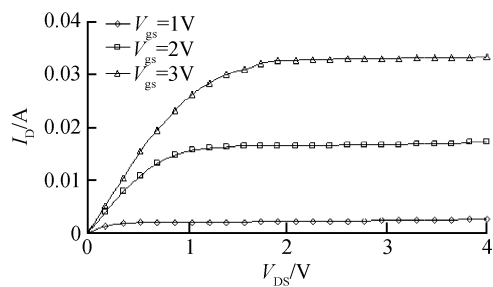


图 3 采用 HD 模型的 0.35 $\mu\text{m}$  n-MOSFET 器件的  $I_D$ - $V_{DS}$  直流特性曲线  
Fig.3  $I$ - $V$  curves of the 0.35 $\mu\text{m}$  LDD n-MOSFET device in HD model

结果与文献[11]的结果完全相同,这证明了采用 HOC-SADI 用于流体力学模型以模拟半导体器件是成功的.为了体现本文采用的 HOC-SADI 方法的优势,分别以目前较为流行的 CGS<sup>[12]</sup>及 Newton-SOR<sup>[13]</sup>对以上器件进行模拟.

表 1 是精度为  $10^{-6}$  时,在不同网格点下的计算时间及迭代次数;表 2 是网格点为 1369 时,在不同精度下的计算时间及迭代次数.可以看出随着网格点的增加及精度的提高,本文采用的 SADI 迭代法的优越性越来越明显.以网格点 1369、精度  $10^{-6}$  为例,HOC-SADI 迭代法较 CGS 迭代法计算时间减少 35.6%、迭代次数减少 38.7%;较 Newton-SOR 迭代法计算时间减少 29.2%、迭代次数减少 39.4%.另外,由于本文采用了高阶紧致差分格式,因此在相同的网格点下可达到更高的精度.例如,在五点网格下,CGS 迭代法及 Newton-SOR 迭代

表 1 不同网格点下的计算时间和迭代次数

Table 1 Computation time and iteration at different numbers of mesh points at precision  $10^{-6}$  in HD model

	网格点	841	1225	1369	1521
CGS	时间/s	274	354	568	936
	迭代次数	145	203	284	511
Newton-SOR	时间/s	298	373	517	894
	迭代次数	116	252	287	393
HOC-SADI	时间/s	218	313	368	557
	迭代次数	70	105	178	301

表 2 不同精度下的计算时间和迭代次数

Table 2 Computation time and iteration at different precision at the mesh point 1369 in HD model

	精度	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$
CGS	时间/s	0.8	3.7	19	174	568
	迭代次数	2	9	17	85	284
Newton-SOR	时间/s	1.2	4.5	27	196	517
	迭代次数	4	7	24	78	287
HOC-SADI	时间/s	0.8	3.1	22	161	366
	迭代次数	3	12	20	58	178

法只能达到二阶精度,而本文采用的 HOC-SADI 迭代法可达到四阶.综上所述,可以看出,本文采用的 HOC-SADI 方法在计算速度和精度上都存在较大优势.

## 6 结论

半导体器件模拟的关键在于计算偏微分方程组,本文采用的 HOC-SADI 算法的成功之处在于:(1)引入降维技术,大大减小了求解规模;(2)采用了高阶紧致差分格式,以较少的网格点就能获得较高的精度,因而提高了计算速度.与其他算法相比,本文采用的 HOC-SADI 算法更适合于大型非线性系统求解,并且随着网格点的增加及精度的提高,优势越来越明显.

## 参考文献

- [1] Selberherr S. Analysis and simulation of semiconductor devices. Springer-Verlag Press, 1984:16
- [2] Thornber K K. Current equation for velocity overshoot. IEEE Electron Device Lett, 1982, 3(3):69
- [3] Rudan M, Odeh F. Multi-dimensional discretization scheme for the hydrodynamic model of semiconductor devices. COMPEL, 1986, 5(3):149
- [4] Blotekjaer K. Transport equations for electrons in two valley semiconductors. IEEE Trans Electron Devices, 1970, 17:38
- [5] Chen D. An improved energy transport model including nonparabolicity and non-Maxwellian distribution effects. IEEE Electron Device Lett, 1992, 13(1):26
- [6] Wang Pu, Kahawita R. The numerical solution of the unsteady natural convection flow in a square cavity at high Rayleigh number using SADI method. Applied Mathematics and Mechanics, 1987, 3:219
- [7] Wang C C, Chen C K. Forced convection in a wavy-wall channel. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45:2587
- [8] Wang P, Kahawita R. A two-dimensional model of estuarine circulation using cubic splines. Can J Civil Eng, 1983, 10:116
- [9] Fu D X, Xia Y W. A high order accurate difference scheme for complex flow fields. J Comput Phys, 1997, 134:1
- [10] Lele S K. Compact finite difference schemes with spectral-like resolution. J Comput Phys, 1992, 103:16
- [11] Li Yiming, Chen C K, Lin S S, et al. An implementation of parallel dynamic load balancing for adaptive computing in VLSI device simulation. IEEE 15th Proc Intl Parallel & Distributed Processing Symposium, IPDPS, San Francisco, 2001:702
- [12] Sonneveld P. A fast Lanczos-type Solver for nonsymmetric linear systems. SIAM J Sc Stat Comput, 1989, 10(1):36
- [13] Greenfield J A, Dutton R W. Nonplanar VLSI device analysis using the solution of Poisson's equation. IEEE Trans Electron Devices, 1980, 27:1520

## A New Hydrodynamic Model Method for Semiconductor Device Simulation

Liu Zhan<sup>1,†</sup>, Gu Xiaofeng<sup>1</sup>, Yu Zongguang<sup>1,2</sup>, Hu Xiduo<sup>3</sup>, and Zang Jiafeng<sup>1</sup>

(1 *School of Information Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214036, China*)

(2 *The 58th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Wuxi 214035, China*)

(3 *Department of Electronic Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China*)

**Abstract:** The solution using a spline procedure, SADI, and a high-order compact finite difference (HOC) method is presented for the hydrodynamic (HD) model for semiconductor device simulation. We compare the numerical results with two of the most popular simulation methods currently, CGS and Newton-SOR. Our method decreases the number of iterations by 40% and reduces the computation time greatly.

**Key words:** SADI; high-order compact finite difference; device simulation

**PACC:** 7115Q      **EEACC:** 2560B

**Article ID:** 0253-4177(2008)08-1570-05

---

† Corresponding author. Email: liuzhan84239@163.com

Received 2 January 2008, revised manuscript received 31 March 2008