

半导体多物理效应并行计算程序 JEMS-CDS-Device 设计与实现*

李光荣^{1,2,3}, 赵振国^{1,2,3}, 王卫杰^{1,2,3}, 游春光^{1,2}, 周海京^{2,3}

(1. 中国工程物理研究院 高性能数值模拟软件中心, 北京 100088;

2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094;

3. 中国工程物理研究院 复杂电磁环境科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 针对复杂电磁环境下器件多物理效应机理研究需求, 研发了半导体多物理效应并行计算程序 JEMS-CDS-Device。介绍了 JEMS-CDS-Device 的架构设计与实现技术。程序基于非结构网格并行框架 JAUMIN 实现, 采用有限体积法 (FVM) 离散, 使用牛顿法全耦合求解“电-载流子输运-热”问题。程序采用“内核+算法库”形式架构, 支持 2 维和 3 维非结构网格、千万自由度问题并行求解, 支持物理方程、离散算法、材料物理模型等的扩展开发。

关键词: 半导体数值模拟; 漂移扩散模型; 有限体积法; 全耦合; 自动微分; 高性能计算

中图分类号: TN302

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.190264

Design and implementation of semiconductor multi-physical parallel computing program JEMS-CDS-Device

Li Guangrong^{1,2,3}, Zhao Zhenguo^{1,2,3}, Wang Weijie^{1,2,3}, You Chunguang^{1,2}, Zhou Haijing^{2,3}

(1. Software Center for High Performance Numerical Simulation, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China;

2. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China;

3. Complicated Electromagnetic Environment Laboratory, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: Aiming at the research requirements of multi-physical effects mechanism of devices in complex electromagnetic environment, a parallel computing program for semiconductor multi-physics effects, JEMS-CDS-Device, is developed. This paper introduces the architecture design and implementation technology of JEMS-CDS-Device. The program is based on the unstructured grid parallel framework—JAUMIN. It uses the finite volume method (FVM) to discretize and uses the Newton method to get fully coupled solution of the “electric-carrier transport-thermal” problem. The program which adopts the “kernel + algorithm library” form architecture, supports 2D/3D unstructured mesh, and can solve problems of tens of millions of degrees of freedom parallelly. It supports extended development of physical effect equations, discrete algorithms, material physics models, etc.

Key words: semiconductor numerical simulation; drift-diffusion model; finite volume method; fully coupled; automatic differentiation; high performance computing

半导体器件广泛存在于各种现代设备中, 其组成的电子系统面临着复杂电磁环境如高强度电磁辐射、电离辐射等的直接威胁。基于实验的器件效应分析昂贵、费时, 且不易分析物理机理。半导体器件仿真软件 (TCAD) 是进行复杂环境下器件特性分析的一种重要手段, 它是建立在半导体物理基础上的数值模拟仿真工具。国内学者采用 TCAD 对高功率微波作用下的器件特性退化与损伤、电离辐射对器件性能影响等问题进行了很多相关研究^[1-8]。半导体器件模拟基于求解电磁-载流子输运耦合方程组, 且须解决多介质、复杂边界、非线性多物理耦合等问题。JEMS-CDS-Device 基于非结构网格并行框架 JAUMIN 开发, 采用有限体积方法, 支持 2 维和 3 维器件仿真和相关组件的扩展开发。本文介绍了 JEMS-CDS-Device 软件的主要架构与关键实现技术及其验证与应用。

* 收稿日期: 2019-06-25; 修订日期: 2019-12-05

基金项目: 科学挑战专题资助项目 (TZ2018002); 国家自然科学基金项目 (11675022); 中物院复杂电磁环境重点实验室基金项目 (FZ2019-001); 中国工程物理研究院创新发展基金项目 (2019034); 国防基础科研计划项目 (C1520110002)

作者简介: 李光荣 (1988—), 男, 助理研究员, 从事高性能电磁计算研究, 器件与电路仿真软件研发: li_guangrong@iapcm.ac.cn。

1 物理模型与控制方程

半导体仿真一般需耦合求解三个基本方程:电势泊松方程、电子连续性方程和空穴连续性方程,即

$$\begin{cases} \nabla \cdot \varepsilon \nabla \psi = -q(p - n + N_D^+ - N_A^-) - \rho_s \\ \frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla \cdot \mathbf{J}_n - (U - G) \\ \frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \nabla \cdot \mathbf{J}_p - (U - G) \end{cases} \quad (1)$$

式中: ε 是介电常数; ψ 是电势; q 是单位电荷量; n 和 p 分别是电子和空穴浓度; N_A^- 和 N_D^+ 是杂质离子浓度; ρ_s 是固定电荷量; \mathbf{J}_n 和 \mathbf{J}_p 分别是电子与空穴电流密度; U 和 G 分别是载流子的生成率与复合率。

漂移-扩散输运模型(DDM)是玻耳兹曼方程的近似特例,适用于描述较大尺度半导体器件中的载流子输运现象^[9-11]

$$\begin{cases} \mathbf{J}_n = q\mu_n n \mathbf{E}_n + qD_n \nabla n \\ \mathbf{J}_p = q\mu_p p \mathbf{E}_p - qD_p \nabla p \end{cases} \quad (2)$$

式中: μ_n 与 μ_p 分别是电子与空穴的迁移速率; $D_n = (k_B T/q)\mu_n$, $D_p = (k_B T/q)\mu_p$, k_B 是玻耳兹曼常数, T 为温度; \mathbf{E}_n 和 \mathbf{E}_p 是电子和空穴受到的有效电场强度,考虑到能带变化等效效应^[10],可表示为

$$\begin{cases} \mathbf{E}_n = \frac{1}{q} \nabla(-q\psi - \chi - \Delta E_c) - \frac{k_B T}{q} \nabla(\ln N_c - \ln T^{3/2}) \\ \mathbf{E}_p = \frac{1}{q} \nabla(E_c - E_g + \Delta E_v) + \frac{k_B T}{q} \nabla(\ln N_v - \ln T^{3/2}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: ψ 是电势; χ 是电子亲和能; E_c 是导带底能级; E_g 是能隙; ΔE_c 和 ΔE_v 是重掺杂或压力引起的能带偏移; N_c 和 N_v 是态密度。

如考虑温度等效效应,还需与热传导方程等耦合求解^[10]

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \kappa \nabla T + \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} + (E_g + 3k_B T)(U - G) \quad (4)$$

式中: c_p 和 ρ 分别为材料的比热容和密度; κ 为热导率; 公式中右侧第二项为欧姆热,其中, \mathbf{J} 为电流密度矢量, \mathbf{E} 为电场; 第三项为载流子复合与生成导致的放热与吸热,其中, U 为载流子复合率, G 为载流子电离率。考虑到热效应,载流子扩散电流 $\mathbf{J}_{n,diff}$ 和 $\mathbf{J}_{p,diff}$ 应分别表达为^[10]

$$\begin{cases} \mathbf{J}_{n,diff} = \mu_n k_B (T \nabla n + n \nabla T) \\ \mathbf{J}_{p,diff} = -\mu_p k_B (T \nabla p + p \nabla T) \end{cases} \quad (5)$$

控制方程组改写为^[10]

$$\begin{cases} \frac{\partial n}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\mu_n n \mathbf{E}_n + \mu_n \frac{k_B T}{q} \nabla n + \mu_n \frac{k_B \nabla T}{q} n \right) - (U - G) \\ \frac{\partial p}{\partial t} = -\nabla \cdot \left(\mu_p p \mathbf{E}_p - \mu_p \frac{k_B T}{q} \nabla p - \mu_p \frac{k_B \nabla T}{q} p \right) - (U - G) \\ \nabla \cdot \varepsilon \nabla \psi = -q(p - n + N_D^+ - N_A^-) - \rho_s \\ \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \kappa \nabla T + \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} + (E_g + 3k_B T)(U - G) \end{cases} \quad (6)$$

迁移率与载流子有效质量和被散射几率有关^[11]。迁移率模型分为弱场模型、强场模型和表面模型,一般是载流子浓度、场强和温度等相关的非线性函数。常见的有 Analytic 模型、Philips 模型和 Lucent 模型等^[10]。载流子复合模型一般由 SRH 复合、Auger 复合和直接复合三种机制组合而成^[9-11]。载流子生成率模型一般考虑碰撞电离效应和能带间隧道跃迁两种机制^[9-11]。

2 数值方法与技术

2.1 数值离散方法

器件的三个控制方程皆可写为如下守恒形式

$$\frac{\partial Y_i}{\partial t} - \nabla \cdot \mathbf{J}_{Y_i} + R_{Y_i} = 0 \quad (7)$$

为保证守恒性,一般采用有限体积法离散此方程。程序采用顶点型有限体积法(CV-FVM),在原网格上进行场离散与通量插值,在对偶网格(外心型,如图1所示)上进行积分。方程两边对控制体 C_i 积分,并使用高斯公式将散度体积积分转换为通量的表面积分,即^[12]

$$\int_{C_i} \frac{\partial Y_i}{\partial t} dV - \int_{\partial C_i} \mathbf{J}_{Y_i} \cdot \mathbf{n} dS + \int_{C_i} R_{Y_i} dV = 0 \quad (8)$$

载流子输运问题通常是一种对流占优问题,一般需要采用迎风离散格式保持计算稳定。半导体模拟通常使用 Scharfetter-Gummel 离散格式(SG)离散电流,SG格式是一种自适应权重迎风格式。不考虑温度变化时,基于漂移-扩散模型(DDM)的电流通量密度SG格式可以表示为^[9-10]

$$\begin{cases} J_{n|_{\text{mid}}} = \frac{qV_T}{l} \mu_{n|_{\text{mid}}} \left[n_j B \left(\frac{\psi_j - \psi_i}{V_T} \right) - n_i B \left(\frac{\psi_i - \psi_j}{V_T} \right) \right] \\ J_{p|_{\text{mid}}} = \frac{qV_T}{l} \mu_{p|_{\text{mid}}} \left[p_i B \left(\frac{\psi_j - \psi_i}{V_T} \right) - p_j B \left(\frac{\psi_i - \psi_j}{V_T} \right) \right] \\ B(x) = \frac{x}{e^x - 1} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $J_{n|_{\text{mid}}}$ 和 $J_{p|_{\text{mid}}}$ 分别表示棱边中点的电子与空穴电流密度; $V_T = k_B T/q$ 为热电压常数; l 为棱边长度; n, p 为节点上的电子、空穴,下标 i, j 表示一条棱边上的两个节点编号。为考虑温度变化的SG电流密度离散公式较为复杂,可参考文献[10]。

半导体方程离散后,采用全耦合牛顿法直接求解非线性方程组,对于 $F(x) = 0$ ^[13],有

$$\begin{cases} J(x_k) \Delta x_k = -F(x_k) \\ x_{k+1} = x_k + \Delta x_k \end{cases} \quad (10)$$

式中: k 表示迭代步。对于瞬态求解,半导体方程稳定时间步长一般远小于模拟总时间,故时间离散一般采用隐式欧拉法。

2.2 数值技术

2.2.1 自动微分技术

牛顿法需建立 Jacobia 矩阵,其计算难度以平方比例增长。自动微分技术起源于 Bill Gear 的论文^[14],其原理基于复合函数链式求导法则,可以获得偏导数的数值精确解,示例如图2所示。

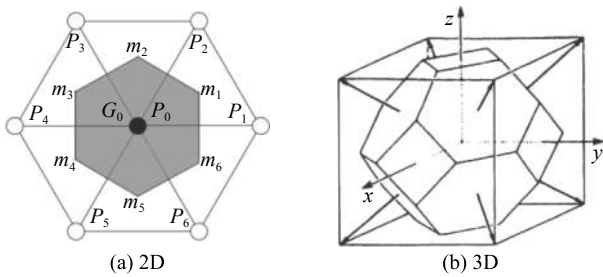


Fig. 1 Interpolation grid and integral grid (control body)
图1 插值网格与积分网格(控制体)

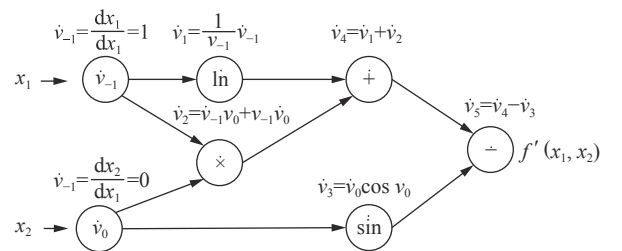


Fig. 2 Forward automatic differentiation
图2 前向自动微分

2.2.2 载流子密度修正

在牛顿法迭代过程中,载流子密度可能出现负值(载流子密度物理上不小于0),负密度易引起牛顿迭代发散,需引入密度修正^[10]

$$\rho_c = \begin{cases} \rho_c, & \rho_c > 0 \\ \varepsilon(\rho_c), & \rho_c \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: ρ_c 为电子或空穴载流子密度; $\varepsilon(\rho_c)$ 为远小于 ρ_c 量级的一个正数。

2.2.3 积分网格修正

CV-FVM方法对网格有一定要求,当原网格单元为含有钝角的非 Delaunay 网格或在边界上存在含有钝角的

Delaunay 网格时,其对偶网格会产生“负体积”,并引起积分错误,如图 3 所示。程序中需对积分网格按单元进行截断修正^[15]。

2.2.4 间断型边界处理

器件仿真中存在大量的间断型边界,间断型边界一般出现在两种不同材料的界面处,如金属-半导体界面、异质半导体界面、辐射问题中的 SiO₂-Si 界面。物理量在边界处不连续,出现了“跳跃”,如图 4(a) 所示。程序中在界面物理节点处引入了额外的逻辑节点^[15],用于区分不同算法区域,如图 4(b) 所示。

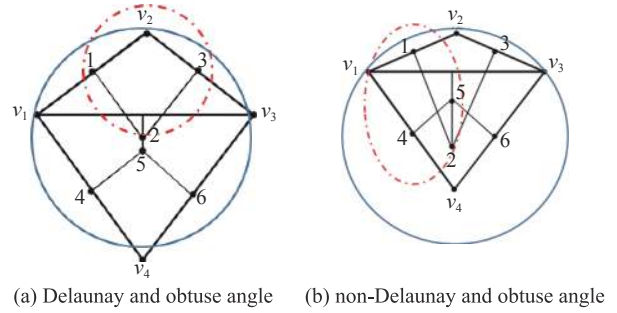
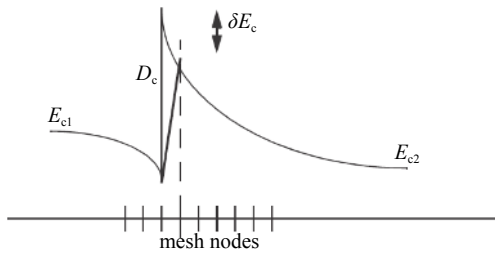
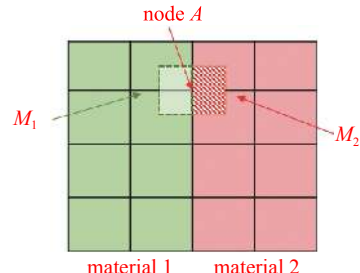


Fig. 3 Integral mesh (dual mesh) correction

图 3 积分网格(对偶网格)修正



(a) discontinuity heterogeneous interface^[15]



(b) algorithm region processing

Fig. 4 Discontinuity heterogeneous interface and algorithm region processing (right figure, there are two logical nodes M_1 and M_2 in node A)

图 4 异质界面处的间断与算法区域处理

2.2.5 方程求解与预条件技术

半导体 DD 模型全耦合生成的 Jacobia 矩阵为稀疏带状,且一般为非对称、强多尺度。此类型问题求解一般需采用直接法(LU)或使用“ILU 类预条件+Krylov 迭代”^[16]。表 1 为某 2 维 PN 器件生成的线性方程串行求解时线性解法器收敛情况对比,每次加密后未知量增加到原来的 4 倍。计算规模较小的情况下,直接法速度较快。表 1 中时间后的括号中为线性解法器迭代次数(直接法 LU 迭代次数为 1)。

表 1 DDM1 非线性迭代中线性解法器典型收敛情况)

Table 1 Typical convergence of linear solver in DDM1 nonlinear iteration

linear solver	precondition	time (iterations)/s			
		mesh refinement 0; DOF: 11 165	mesh refinement 1; DOF: 43 925	mesh refinement 2; DOF: 174 245	mesh refinement 3; DOF: 694 085
LU	-	0.209 6 (1)	1.065 2 (1)	7.018 4 (1)	50.442 3 (1)
BiCGSTAB	Jacobi	0.131 8 (106)	0.868 3 (226)	7.119 6 (455)	68.205 1 (1 011)
BiCGSTAB	ASM	0.126 5 (106)	0.919 0 (226)	7.666 1 (455)	72.558 4 (1 011)
BiCGSTAB	ILU	0.127 6 (106)	0.840 7 (226)	7.020 5 (455)	69.624 0 (1 011)
GMRES	BJacobi	0.263 5 (448)	2.358 7 (940)	26.995 4 (2 548)	427.814 (9 450)
GMRES	ASM	0.291 4 (448)	2.466 6 (940)	27.758 8 (2 548)	462.929 (9 450)
GMRES	ILU	0.283 8 (448)	2.311 4 (940)	27.126 1 (2 548)	425.375 (450)

3 软件架构与实现

JEMS-CDS-Device 并行基于 JAUMIN 并行计算框架实现,该框架由北京应用物理与计算数学研究所研制。JAUMIN 采用网格层-网格片-单元的分布式网格管理结构(图 5),使用并行构件搭建计算流程,构件遍历网格片并调用网格片数值子程序完成计算,用户需实现网格片策略类中特定函数来实现构件功能定制^[17-19]。JEMS-CDS-Device 计算结果的后处理绘图由 TeraVAP^[20-21] 软件完成,软件输入网格生成使用到了 SuperMesh^[22-23] 程序。

JEMS-Device 基于离散中台 DDMS 构建,主要层次关系如图 6 所示。DDMS 主要由内核与特征功能库两部分组成。内核包含数据模型、算法框架及方程构件。方程构件集成了各组件,并对外提供了统一的接口。算法框架

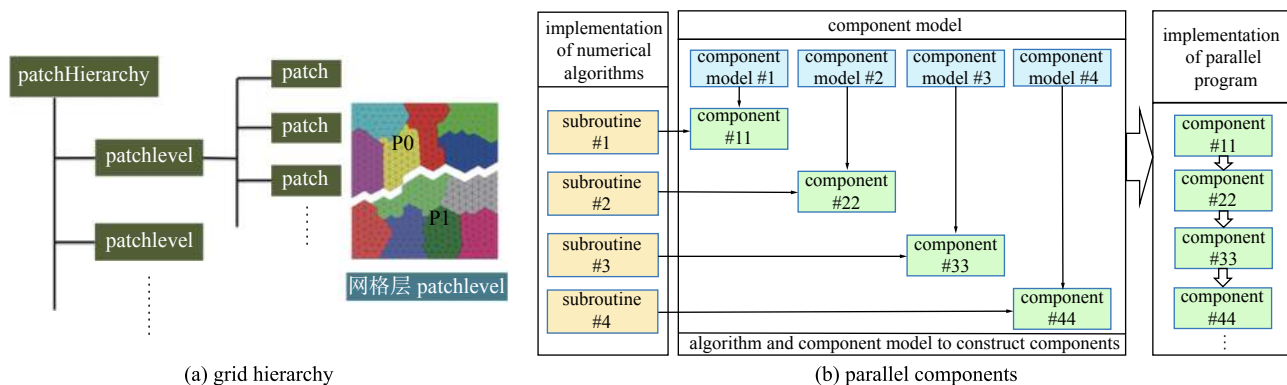


Fig. 5 Grid hierarchy and parallel components

图 5 网格层次结构与并行构件^[17]

定义了时间积分、非线性 FVM 求解、流程控制等的算法框架(模板)及接口。数据模型提供了器件结构的抽象描述和相关数据的存储。物理模型库中提供了常用材料的能带、迁移率等的计算模型,并通过统一的接口被算法调用。方程模板中包含了特定运输模型方程组的数值离散与组装算法,通过加载不同的方程模板,DDMS 可以生成用于解决特定运输模型的方程构件。各模块之间的关系如图 7 所示。

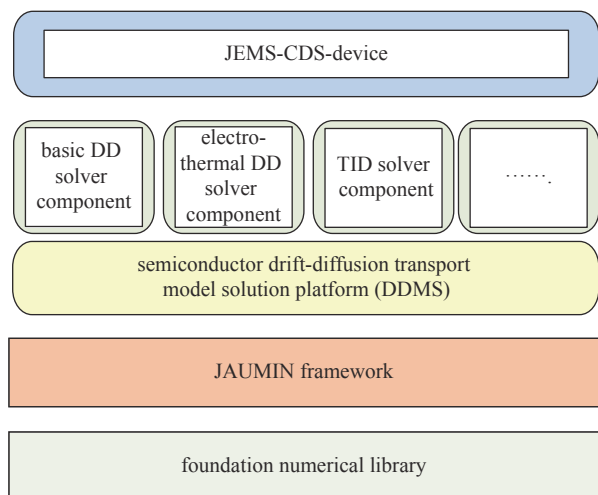


Fig. 6 JEMS-CDS-Device

图 6 JEMS-CDS-Device 主要层次

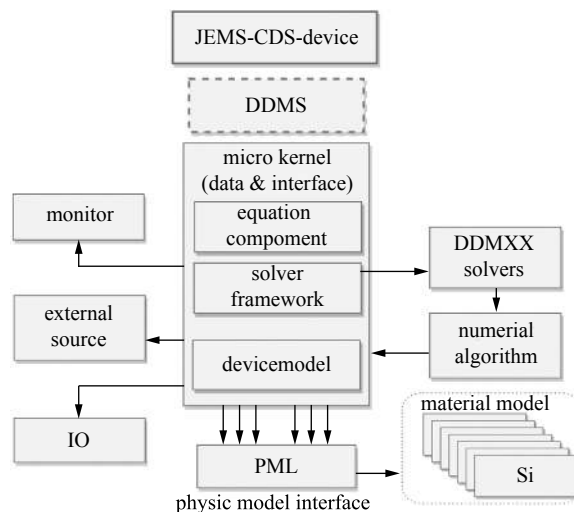


Fig. 7 Relationships between software modules

图 7 软件模块间关系

4 典型测试与应用

4.1 DDM 基本模型仿真与验证

基本算例 1: 3 维二极管稳态问题,此算例用于验证仿真程序基本功能。算例器件为在掺杂浓度 10^{15} cm^{-3} 的均匀 N 型 Si 衬底上注入 10^{19} cm^{-3} 受主杂质形成。图 8(a) 为器件净掺杂密度分布图,器件尺寸为 $6 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$,图中器件上面中心区域为阳极,下面为阴极。本算例中采用了 Analytic 迁移率模型,仿真了器件在 $0 \sim 1 \text{ V}$ 范围内正偏时的状态,得到了器件阳极的电压-电流关系,并与 Genius TCAD 软件进行了对比,结果符合良好,如图 8(b) 所示。

基本算例 2: 2 维 NMOS 管,此算例用于验证程序对异质间断型边界的处理能力。场效应晶体管(MOSFET)是现代集成电路中的重要器件,一般由金属、氧化物和半导体组成。算例器件为一个 μm 级工艺的 NMOS 管,由 Si, SiO_2 和金属三种类型材料组成,仿真时 Si-SiO₂ 界面设定存在密度为 10^{10} cm^{-2} 的界面电荷,程序中此界面作为间断型边界处理。本算例仿真得到了其平衡态电势分布,并与 Genius TAD 的仿真进行对比,电势分布结果相符,如图 9 所示。

4.2 并行性能测试

2 维 PN 算例,此算例器件为一 $3 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$ 的 Si 材质二极管,净掺杂分布如图 10(a) 所示,测试中对此 PN 管施加了 0.5 V 的正向偏压,电子浓度分布如图 10(b) 所示。线性解法器采用 BiCGSTAB,预条件使用 ASM。ASM 是一种加性区域分解预条件^[13],每个分解区域上单独采用 ILU^[13, 16] 生成子区域预条件。

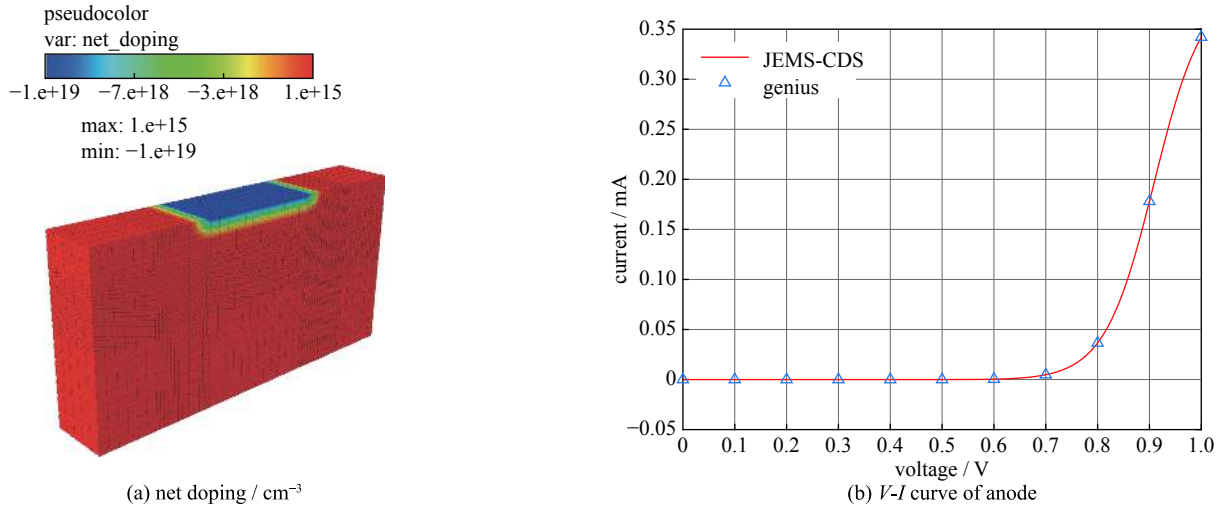


Fig. 8 PN diode's density distribution of net doping and anode $V-I$ curve

图 8 3 维 PN 净掺杂密度分布与二极管阳极 $V-I$ 曲线

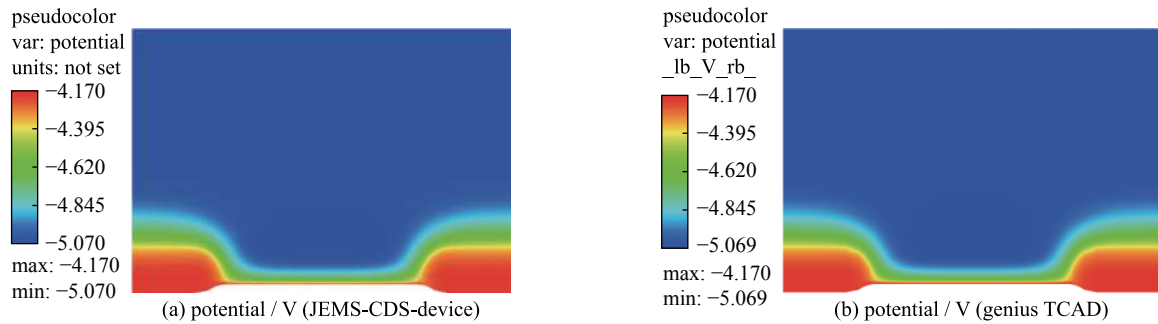


Fig. 9 2D NMOS equilibrium potential distribution comparison (potential unit: V, the potential reference zero is at infinity)

图 9 2 维 NMOS 管平衡态电势分布结果对比 (电势单位: V, 参考零点为无穷远)

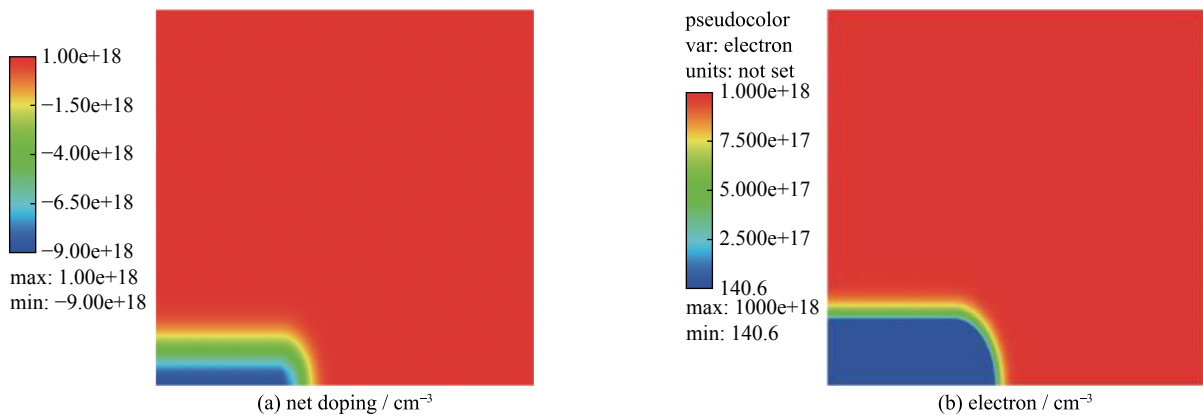


Fig. 10 Net doping and carrier distribution of 2D PN device (positive deviation 0.5 V)

图 10 2 维 PN 管的净掺杂分布与载流子分布 (正向偏压 0.5 V)

表 2 与表 3 展示了 JEMS-CDS-Device 的弱扩展测试 (保持每核心计算规模近似不变) 与强扩展测试 (保持总计算规模不变) 情况。由表 3 可知, 程序在 256 核并行强扩展效率为 59.1% (32 核基准), 效率较好。由表 2 中可知, 程序在 256 核并行时相对 4 核并行的弱扩展效率为 15.7%, 效率下降的主要原因在于, 随着每次未知量的增多 (未知量 4 倍, 并行核数 4 倍), 牛顿迭代每步线性求解需要的平均迭代数也随之增加 (约 2 倍, 与未知量数量的平方根成正比^[24])。

4.3 电热耦合仿真应用

电热耦合仿真通过联立求解基本 DDM 方程与晶格热传导方程, 得到器件在外部激励源作用下的瞬态温度分布。本算例中 PIN 二极管模型为 Si 材质的 P⁺NN⁺管, 主体为直径约 20 μm 的柱体, 净掺杂峰值绝对值约为 $9.17 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 采用其过中心截面进行二维仿真。器件两电极均设为欧姆接触型, 阳极边界热传导系数取某金属

表 2 弱扩展并行测试 (Basic Newton, ASM+BiCGSTAB)

Table 2 Weak extension parallel test (Basic Newton, ASM+BiCGSTAB)

cores	unknowns	average iterations	time/s	efficiency/%
4	1.74×10^5	154	83.32	100
16	6.94×10^5	353	151.70	54.9
64	2.77×10^6	757	285.78	29.1
256	1.11×10^7	1727	531.19	15.7

表 3 强扩展并行测试 (Basic Newton, ASM+BiCGSTAB, 2.771×10^6 未知量)Table 3 Strongly extended parallel test (Basic Newton, ASM+BiCGSTAB, 2.771×10^6 Unknowns)

cores	total time/s	linear solver time/s	speedup	efficiency/%
32	470.31	228.44	1.00	100.0
64	284.78	113.67	1.65	82.6
128	157.90	59.20	2.98	74.5
256	99.56	32.31	4.72	59.1

$3.17 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 器件后部因截断了部分硅, 故阴极导热系数取硅的导热系数 $1.56 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。载流子迁移率模型采用 Philips 模型并使用了 Caughey-Thomas 模型进行了强场修正, 复合率使用了 SRH, Auger 和直接复合机制模型计算, 碰撞电离率采用了适用于高温的 Valdinoci 模型。器件端口激励的波形如图 11(a) 所示, 图 11(b) 为此激励下 7.78 ns 时的温度分布情况, 局部放大图中可见, PIN 管 PN 结边缘处温度较高 (最高 707.5 K), 边缘阳极接触部分亦有明显升温, 这与实际经验相吻合。

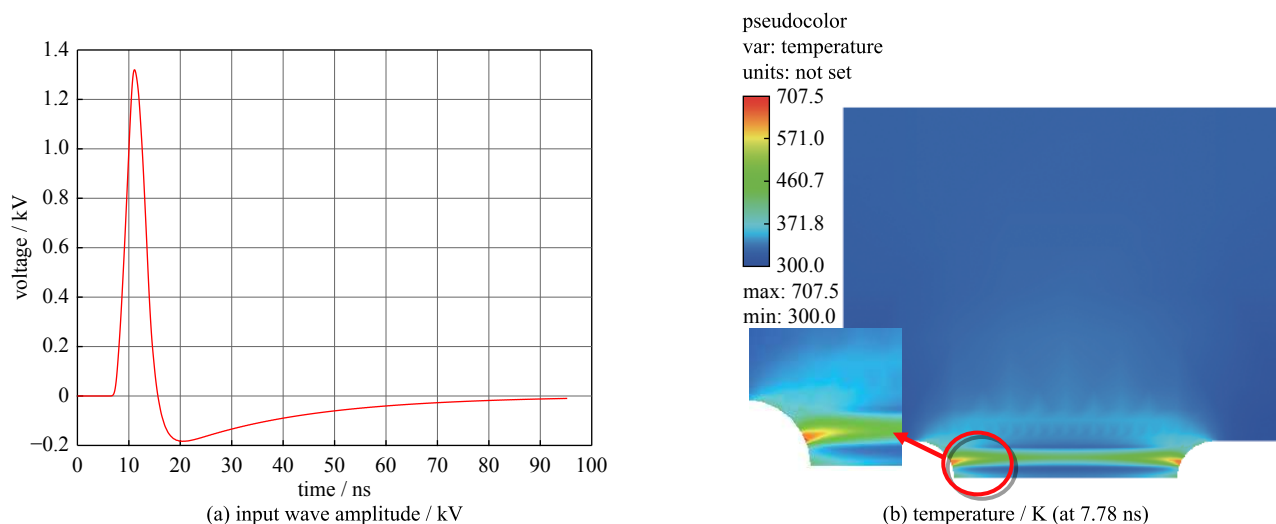


Fig. 11 Input waveform and temperature distribution of PIN (at 7.78 ns)

图 11 输入的波形与某时刻 PIN 的温度分布

5 结 论

本文介绍了 JEMS-CDS-Device 程序的架构与实现。JEMS-CDS-Device 基于 JAUMIN 框架与 DDMS 中台构建, 围绕多介质、多物理、非线性全耦合数值模拟这一需求, 主要实现了 3 方面功能: (1) 支持多介质, 间断型边界, 可用于半导体、导体、绝缘体组成的复杂器件模型, 支持典型间断型边界问题的高效计算; (2) 材料物理模型可扩展, 支持物理模型库扩展开发; (3) 基于 Newton 法与自动微分技术, 实现非线性多物理方程全耦合求解。算例验证与并行性能测试的情况表明, JEMS-CDS-Device 程序对非线性多物理全耦合问题具备千万未知量、数百 CPU 核的并行计算能力, 可以应用于强电磁脉冲等复杂电磁环境下半导体器件多物理效应机理的研究。

参考文献:

- [1] 赵振国. PIN限幅器高功率微波效应机理仿真与实验研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2013: 1-53. (Zhao Zhenguo. Simulation and experimental study of high power microwave effect of PIN limiter[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2013: 1-53)
- [2] 孟凡宝, 杨周炳, 马弘舸, 等. 高功率微波超宽带电磁脉冲技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 178-196. (Meng Fanbao, Yang Zhoubing, Ma Hongge, et

- al. High-power microwave ultra-wideband electromagnetic pulse technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 178-196)
- [3] 马振洋, 柴常春, 任兴荣, 等. 双极晶体管微波损伤效应与机理[J]. 物理学报, 2012, 61: 075011. (Ma Zhenyang, Chai Changchun, Ren Xinrong, et al. Microwave damage effect and mechanism of bipolar transistor[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61: 075011)
- [4] 游海龙, 蓝建春, 范菊平, 等. 高功率微波作用下热载流子引起n型金属-氧化物-半导体场效应管特性退化研究[J]. 物理学报, 2012, 61: 1085011. (You Hailong, Lan Jianchun, Fan Juping, et al. Research on characteristics degradation of n-metal-oxide-semiconductor field-effect transistor induced by hot carrier effect due to high power microwave[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61: 1085011)
- [5] 陈曦, 杜正伟, 龚克. 脉冲宽度对PIN限幅器微波脉冲热效应的影响[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(7): 1602-1606. (Chen Xi, Du Zhengwei, Gong Ke. Effect of pulse width on thermal effect of microwave pulse on PIN limiter[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(7): 1602-1606)
- [6] 周怀安. 电磁脉冲对电子设备中半导体有源器件作用的研究[D]. 北京: 清华大学电子工程系, 2005: 1-32. (Zhou Huaian. Research on the effect of electromagnetic pulses on semiconductor active devices in electronic equipment[D]. Beijing: Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, 2005: 1-32)
- [7] 陈曦, 杜正伟, 龚克. 外电路在电磁脉冲对双极型晶体管作用过程中的影响[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(7): 1197-1202. (Chen Xi, Du Zhengwei, Gong Ke. Influence of circuit during injection of EMP into bipolar junction transistor[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(7): 1197-1202)
- [8] 韦源, 谢红刚, 贡顶, 等. 金属氧化物半导体场效应管长期辐射效应的数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(4): 1031-1034. (Wei Yuan, Xie Honggang, Gong Ding. Numerical simulation of long-term radiation effects for MOSFETs[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(4): 1031-1034)
- [9] Kramer K M, Hitchon W N G. Semiconductor devices: A simulation approach[M]. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1997:20-54.
- [10] 贡顶, 张相华. 半导体器件的数值模拟: GSS软件用户手册[R]. 2008: 14-150. (Gong Ding, Zhang Xianghua. Numerical simulation of semiconductor devices: GSS software user manual[R]. 2008: 14-150)
- [11] 施敏, 伍国珏, 耿莉, 等. 半导体器件物理[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2008:5-193. (Shi Min, Wu Guojue, Geng Li, et al. Physics of semiconductor devices[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2008:5-193)
- [12] 李荣华. 偏微分方程数值解法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005: 45-213. (Li Ronghua. Numerical solution of partial differential equations[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005:45-213)
- [13] Balay S, Abhyankar S, Adams M, et al. PETSC users manual revision 3.8[R]. No. ANL-95/11 Rev 3.8, 2017: 73-129.
- [14] Speelpenning B. Compiling fast partial derivatives of functions given by algorithms[R]. UIUCDCS-R-80-1002, 1980: 8-82.
- [15] Synopsys. Sentaurus device user guide[M]. Version H, 2013: 973-986.
- [16] Lin P T. Improving multigrid performance for unstructured mesh drift-diffusion simulations on 147,000 cores[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2012, 91(9): 971-989.
- [17] 领域编程框架团队. 并行自适应非结构网格应用支撑软件框架JAUMIN用户指南[M]. 北京: 北京应用物理与计算数学研究所, 2015. (Domain Programming Framework Team. Parallel self-adaptive unstructured grid application support software framework JAUMIN user guide[M]. Beijing: Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, 2015)
- [18] Liu, Qingkai, Mo Zeyao, Zhang Aiqing, et al. JAUMIN: a programming framework for large-scale numerical simulation on unstructured meshes[J]. CCF Transactions on High Performance Computing, 2019, 1(1): 35-48.
- [19] <http://www.caep-scns.ac.cn/JAUMIN.php>[EB/OL].
- [20] 肖丽, 曹小林, 王华维, 等. 激光聚变数值模拟中的大规模数据可视分析[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(5): 675-686. (Xiao Li, Cao Xiaolin, Wang Huawei, et al. Large-scale data visual analysis for numerical simulation of laser fusion[J]. Chinese Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2014, 26(5): 675-686)
- [21] <http://www.caep-scns.ac.cn/TeraVAP.php>[EB/OL].
- [22] 郑澎, 方维, 徐权, 等. 面向JAUMIN的并行AFT四面体网格生成[J]. 计算机科学与探索, 2018, 12(4): 567-574. (Zheng Peng, Fang Wei, Xu Quan, et al. Parallel AFT tetrahedral mesh generation for JAUMIN[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2018, 12(4): 567-574)
- [23] <http://www.caep-scns.ac.cn/SuperMesh.php>[EB/OL].
- [24] Lin P T, Shadid J N, Sala M, et al. Performance of a parallel algebraic multilevel preconditioner for stabilized finite element semiconductor device modeling[J]. Journal of Computational Physics, 2009, 228(17): 6250-6267.