半导体器件电离辐射效应数值模拟及其应用的研究

马召灿

摘要

本文研究了半导体器件电离辐射损伤及电学响应的数值算法，基于国产并行有限元平台 PHG 研发了电离损伤模拟器，并分析了辐射损伤机制。

器件电离损伤定量模型具有多组分、电场-输运-反应多物理耦合以及强刚性等难点，本文采用有限元空间离散、隐式时间积分以及非线性系统解耦迭代等算法有效解决了上述问题。采用 Zlamal 有限元方法和改进 Gummel 迭代算法离散器件漂移扩散模型，通过边界条件的耦合模型实现了器件辐射损伤电学响应模拟。

本文基于三维并行自适应有限元平台 PHG 研发了半导体电离损伤数值仿真求解器 TIDSim，并将解法器模块与前后处理模块通过通信模块链接嵌入到半导体器件及其辐射损伤效应仿真软件系统 3Ddevice。其中前处理模块主要用于几何建模及网格生成，为求解器提供高质量的网格；后处理模块对求解器的结果进行可视化。在求解器模块中，求解器 DevSim 主要适用于通用半导体器件中的漂移扩散模型，TIDSim 主要适用于电离损伤的总剂量效应以及低剂量率辐射损伤增强效应，对应的辐射损伤模块可以与器件输运功能相耦合，实现器件电离损伤三维并行有限元模拟的全流程仿真测试。

基于所研发的解法器开展了半导体电离损伤定量模型的数值实验。首先通过构造解析解和与相关商业软件比较的方法测试了算法的可靠性。其次针对理想化的金属-绝缘层-半导体结构~MIS、场效应晶体管 MOSFET、横向双极晶体管 GLPNP 进行了电离辐射损伤模拟，数值模拟包括微观的缺陷变化的动力学过程和宏观的电学响应偏移，且数值结果与真实辐射实验数据定性吻合较好。

本文还分析了器件电离损伤机制，采用稳态分析方法对电离损伤定量模型进行了动力学机制的研究，结合所得到的数值结果配合模型特点展开分析，揭示了该模型能够较好拟合 ELDRS 效应的物理机制，以及氢气分子在电离损伤动力学反应机制中所扮演的角色，最终得到电离损伤在超低剂量率条件下的分析结果。

关键词：电离损伤，总剂量效应，低剂量率增强效应，有限元，TIDSim