

|              |   |
|--------------|---|
| Title        | モンテカルロ法による半導体中のキャリア輸送シミュレーションに関する研究   |
| Author(s)    | 鎌倉, 良成  |
| Citation     |   |
| Issue Date   |   |
| Text Version | ETD   |
| URL          | <a href="http://hdl.handle.net/11094/1859">http://hdl.handle.net/11094/1859</a> |
| DOI          |   |
| rights       |   |
| Note         |   |

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

|            |  |
|------------|--|
| 氏名         | かま 鎌 くら 倉 よし 良 なり 成  |
| 博士の専攻分野の名称 | 博 士 (工 学)  |
| 学位記番号      | 第 18230 号  |
| 学位授与年月日    | 平成16年1月23日   |
| 学位授与の要件    | 学位規則第4条第2項該当   |
| 学位論文名      | モンテカルロ法による半導体中のキャリア輸送シミュレーションに関する研究                                  |
| 論文審査委員     | (主査)<br>教授 谷口 研二<br><br>(副査)<br>教授 森田 瑞穂 情報科学研究科教授 小田中紳二<br>助教授 森 伸也 |

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、モンテカルロ (MC) 法による半導体キャリア輸送シミュレーションに関する研究成果をまとめたものであり、全体は6章から構成されている。

第1章では、本研究の背景と目的について概略を述べている。

第2章では、フルバンドモンテカルロ法の基本概念を解説するとともに、その計算効率を改善するアルゴリズムの提案を行っている。従来最も計算時間を要する手続きであった散乱後の終状態選択部に対し改善を加えたことについて説明している。あらかじめ散乱候補をメモリ上にリスト化する状態密度テーブル法を導入することで、大幅に計算速度を高速化できることを示している。

第3章では、Si中のホットホール解析用フルバンドMCシミュレータに取り入れる散乱モデルの整備を行っている。Si中のホットエレクトロン輸送に関しては、これまで数多くの実験とシミュレーションとの比較検証が行われ、その精度が確認されてきたが、ホールに関するモデル整備状況は十分とは言えない。本研究では、従来利用されてきたドリフト速度とイオン化係数に加え、1を越す量子生成効率の実験値を参考にしてホールフォノン散乱確率とインパクトイオン化確率のより厳密な検証が可能であることを示している。

第4章では、第2、3章で開発したフルバンドMC法をMOSFETゲート酸化膜の長期信頼性の解析に応用した事例について述べている。これまで、酸化膜の絶縁破壊を説明するため用いられてきた陽極正孔注入モデルは、FNトンネリング注入法による信頼性試験を通じて得られたものであり、MOSFETのチャネルからホットエレクトロンが酸化膜に注入される状況下での適用可能性については確認されていない。本研究では、FN注入法に加え、基板ホットエレクトロン注入法を用いてゲート酸化膜の絶縁破壊実験を行い、両者の実験結果がゲート酸化膜陽極端における電子エネルギーで統一的に解釈できることを実証している。

第5章では、アンサンブルMC/分子動力学法を利用して、バルクSiおよびMOSFET反転層中での低電界電子移動度を解析している。バルク電子移動度の電子濃度依存性、反転層電子移動度のロールオフ現象、極薄ゲート酸化膜MOSFETにおけるリモートイオン散乱効果を解析対象として取り上げ、本シミュレーション手法の適用限界を明らかにしている。

第6章では、本論文で取り上げた各研究の成果をまとめている。

## 論文審査の結果の要旨

計算機シミュレーションは半導体デバイスの研究・開発に大きな貢献をしている。現在の主要半導体素子である MOSFET のサイズは、既に 100 nm を切る領域に到達しており、このような微細化されたデバイスの解析手法として MC シミュレーション法が注目されている。本研究は、極微細 MOSFET の解析に威力を発揮するフルバンド MC 法とアンサンブル MC/分子動力学法に着目して、これら手法の効率・精度面の改善を加えるとともに、MOSFET の解析に応用することで素子の信頼性やデバイス内部の電子伝導に関する新たな知見を得ている。その主要な成果は次の通りである。

- (1)フルバンド MC シミュレータにおいて、最も計算に手間のかかる散乱後の終状態選択の手続き部分を高速化するアルゴリズムを提案している。この高速化は、等間隔立方格子にて波数空間を分割したフルバンド MC シミュレータに適用したものであり、特殊なメッシュ形成技術が不要である。実際に、MC デバイスシミュレーションを実行し、計算時間を評価して従来の解析バンド MC 法と同程度の速度で、フルバンド MC シミュレーションが実行可能であることを確認している。
- (2)量子生成効率の実験とフルバンド MC シミュレーションの結果を比較することでシリコン結晶中の高エネルギーホールに対する散乱モデルの精度を検証している。理論的に導出したホール起因の量子生成効率をシリコン中のホール散乱確率を検証する用途にも用い、従来のドリフト速度とイオン化係数のみでは不確定性の強かったフォノン散乱確率とイオン化確率の精度をより厳しく判定できることを示している。さらに、第一原理的に計算したイオン化確率に基づく散乱モデルが、実験値と良い一致を示したものの、Random-k 近似法をベースにしたモデルでは、大きめの値が得られることを報告している。
- (3)FN および SHE 注入ストレス実験を、酸化膜厚 5 nm の MOSFET を用いて行い、絶縁破壊と電子エネルギーの関係を調べている。電子エネルギーの解析には MC シミュレーションを活用し、酸化膜絶縁破壊寿命は酸化膜に加わる電界のみの関数では決まらず、同じ酸化膜電界の下でも注入する電子のエネルギーが高いほど早く劣化が進行すること、およびゲート酸化膜内部の陽極側における電子エネルギーが絶縁破壊寿命の決定要因であることを示している。陽極側の電子エネルギー、あるいはその指標量である基板ホール電流を比較して注入法やバイアス条件によらず、統一的にゲート酸化膜劣化を解釈できることを提示している。
- (4)アンサンブルモンテカルロ/分子動力学 (EMC/MD) 法を用いて、陰イオンと電子が混在した系での電子輸送シミュレーションを行い、その妥当性を評価している。まず、3次元バルク系での低電界電子輸送をシミュレーションし、これまで一般的に用いられてきた Brooks-Herring モデルよりも実験値に近い計算結果を得ている。
- (5)EMC/MD 法を MOS 反転層電子輸送に応用し、そのため必要な鏡像法による力の計算法、カットオフ近似を補正するための垂直電界計算法などのアルゴリズムを提案している。応用例として、遮蔽効果の電子濃度依存性により引き起こされる MOS 反転層移動度のロールオフ現象、リモートイオン化不純物散乱が極薄ゲート絶縁膜 MOSFET の反転層電子移動度に与える影響を調べている。その結果、ゲート絶縁膜の薄膜化に伴い、ゲートリモートイオンによる界面ポテンシャルのゆらぎが、反転層移動度の低下をもたらすことを確認している。

以上のように、本論文は、モンテカルロ法を用いた半導体中のキャリア輸送シミュレーション方式の効率、精度に対し大きな改善をもたらし、また同技術を用いて極微細 Si-MOSFET の電気伝導や信頼性に関わる多くの知見を明らかにしたもので、半導体デバイスシミュレーション技術、ひいては電子工学の発展に貢献するところが大きい。よって、本論文は博士論文として価値あるものと認める。