

MOSFET における高精度移動度モデルの構築

Construction of Accurate Mobility Model for MOSFETs

石原 貴光

ISHIHARA Takamitsu

松沢 一也

MATSUZAWA Kazuya

半導体事業において、新規材料の導入や新規デバイス構造の提案が盛んに行われるようになってきている現在、開発コストの低減や製品の迅速な市場投入のために、シミュレーション技術を活用することが不可欠である。そのためには、シミュレーションの各段階においてシミュレータの高精度化を図る必要がある。このうち、半導体デバイスの電気特性を求めるのがデバイスシミュレータである。東芝は、高精度デバイスシミュレーション技術構築の一環として、デバイスの電気特性を直接決める移動度モデルの高精度化を、典型的な新規材料であるオキシナイトライドゲート絶縁膜を備えた MOSFET(金属酸化膜半導体型電界効果トランジスタ)に対して行った。高精度な移動度モデル構築の過程で得られた知見は、電流駆動力変調の原因を追求するための手段としても活用できる。

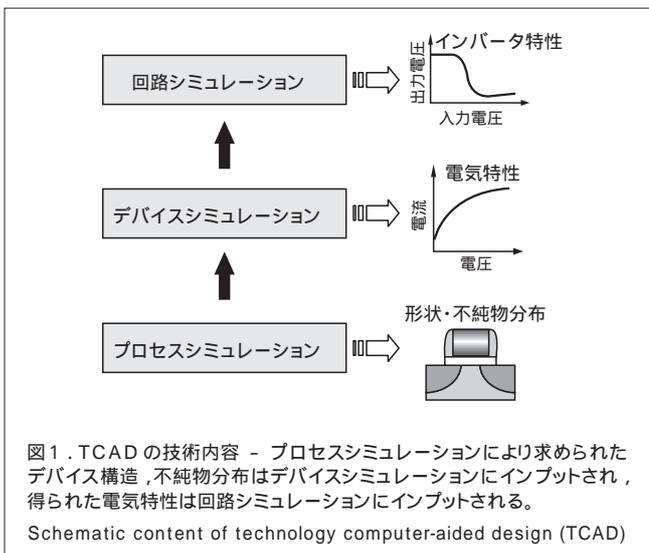
Lowering of production costs and faster development speeds are required in the semiconductor business field. Simulation technology is useful for such tasks. However, it is necessary to improve simulators for the accurate evaluation of various characteristics of semiconductor devices. The aim of a device simulator is to evaluate the electrical properties of semiconductor devices. In order to increase the reliability of device simulators, Toshiba has formulated an accurate mobility model for MOSFETs with an oxynitride gate insulator. The knowledge obtained through the construction of this accurate mobility model will contribute to the physical understanding of electric current modulation.

1 まえがき

半導体事業において、開発コストの低減と製品の迅速な市場投入は事業の成否を左右する。しかし、LSIの高集積化に伴うデバイス構造の複雑化により、試作から工場での量産に至る各段階において、技術者の経験と勘だけでは対処しきれない様々な課題が発生している。開発コストと開発期間の増大が深刻な問題である。

このような状況に対し、TCAD(Technology Computer-Aided Design)の有効性が広く認識されてきている。TCADは、問題解決の手段としてもっとも有効であり、その技術内容は多岐にわたる(図1)。プロセスシミュレーションによりデバイス構造や不純物分布を求め、これらをデバイスシミュレーションにインプットすることにより、デバイスの電気特性が得られる。得られた電気特性は、回路シミュレーションにフィードバックされる。

近年、新規材料の導入や新規デバイス構造の提案が盛んに行われるようになってきている。このような場合にも TCAD を有効に活用するためには、シミュレーションの各段階において、シミュレータの高精度化を図る必要がある。東芝は、なかでもデバイスシミュレーションの高精度化を目指している。そのためには、様々な技術的課題が存在するが、デバイスの電気特性を直接決めるのが移動度であることから、移動度



モデルの高精度化はもっとも重要な技術課題の一つである。移動度にはキャリア散乱の様々な素過程が関与する。デバイスシミュレータにより電気特性を正確に予測するためには、それぞれの散乱の性質に基づいて移動度モデルの高精度化がなされる必要がある。そこで、典型的な新規材料であるオキシナイトライドゲート絶縁膜に着目し、このゲート絶縁膜を備えた MOSFET における高精度移動度モデル構築を行ったので、以下にその内容について述べる。

2 MOSFETでのキャリア移動度の特徴

まず, MOSFETでのキャリア移動度の特徴について説明する。MOSFETでは, 極めて大きな垂直電界のため, 基板の導電型とは逆の導電型のキャリアがチャンネル表面に誘導される。このようなキャリアが存在する領域は, 反転層と呼ばれている。反転層では, 大きな垂直電界により形成された深いポテンシャル内にキャリアが閉じ込められることから, 界面に垂直方向の運動が量子化される。この量子効果により, 反転層中でのキャリア移動度は, 単なる抵抗体としての場合とは異なる特徴的なふるまいを示すので, 特に反転層移動度と呼ばれている。反転層移動度は, 反転層の表面キャリア密度と基板中の空間電荷密度で決まる実効電界, あるいは表面キャリア密度の関数として表される。反転層移動度を特徴づける散乱は, フォノン散乱, クーロン散乱, 界面ラフネス散乱である(図2)。フォノン散乱は, シリコン結晶中の格子振動による散乱である。クーロン散乱は, 図3に示すように, 基板中のイオン化不純物やゲート絶縁膜中の固定電荷といったク

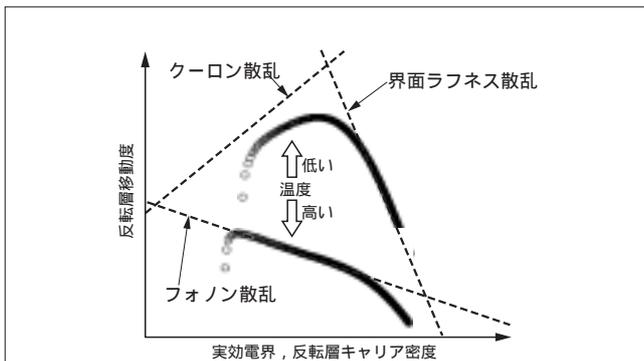


図2. シリコン MOSFET 中の反転層移動度 - シリコン MOSFET 中の反転層移動度は, フォノン散乱, クーロン散乱, 界面ラフネス散乱で特徴づけられる。

Inversion layer mobility in Si MOSFET

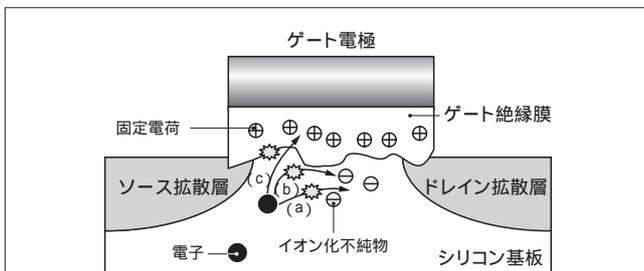


図3. MOSFET 中のクーロン散乱と界面ラフネス散乱を表す概念 - MOSFET における (a) 基板中のイオン化不純物によるクーロン散乱, (b) 界面ラフネス散乱 (c) ゲート絶縁膜中の固定電荷によるクーロン散乱, を表している。

Schematic of Coulomb scattering and surface roughness scattering in MOSFET

ーロン散乱源による散乱である。界面ラフネス散乱は, ゲート絶縁膜と基板との間の凹凸による散乱である(図3)。フォノン散乱は高温で, クーロン散乱は低電界で, 界面ラフネス散乱は高電界で, それぞれ支配的な散乱である(図2)。

熱酸化膜をゲート絶縁膜として用いた従来の MOSFET では, この反転層移動度の性質についてはかなりの理解が得られており, 高精度な移動度モデルが確立され, 実際にデバイスシミュレータに導入されて MOSFET の電気特性の予測に活用されている。

3 オキシナイトライドゲート絶縁膜での反転層移動度の特徴

オキシナイトライド絶縁膜は, 従来の熱酸化膜に窒素がたかだか数%の割合で導入された絶縁膜である。オキシナイトライド絶縁膜をゲート絶縁膜として用いることで, 極薄ゲート絶縁膜に特徴的ないくつかの問題を解決することができる。例えば, 極薄ゲート絶縁膜ではゲート電極形成のためゲートポリシリコンへホウ素をドーピングするが, そのホウ素がゲート絶縁膜を突き抜けて基板に注入されてしまい, 電気特性をばらつかせてしまう問題があるが, この問題を解決することができる。このような理由で, オキシナイトライド絶縁膜はゲート絶縁膜として現在盛んに用いられている。

オキシナイトライド絶縁膜における反転層移動度の特徴を, 電子, 正孔それぞれの場合について図4, 図5に示す。図4, 5から次のことがわかる。低い実効電界では電子, 正孔ともに反転層移動度が減少する。一方, 高い実効電界では, 熱酸化膜の場合と比べて, 電子では増大し, 正孔では減少するという複雑なふるまいを示す。オキシナイトライド絶縁膜におけるこのような反転層移動度のふるまいは, 長年にわたってそのメカニズムの解明がなされていなかった。しかし,

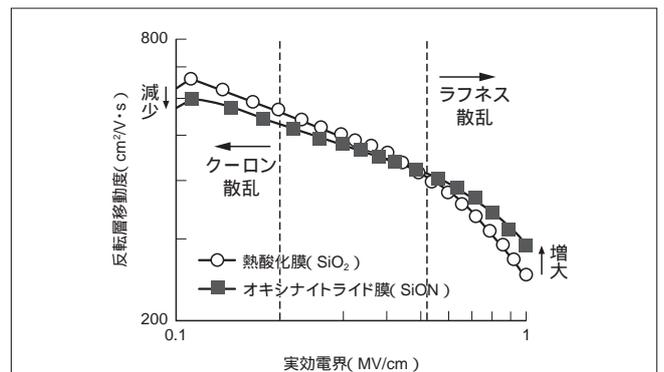


図4. MOSFET 中の反転層電子移動度 - オキシナイトライドゲート絶縁膜を備えた MOSFET 中の反転層電子移動度を, 熱酸化膜を備えた MOSFET 中の反転層電子移動度と比較している。

Electron inversion layer mobility in MOSFET with oxynitride gate insulator

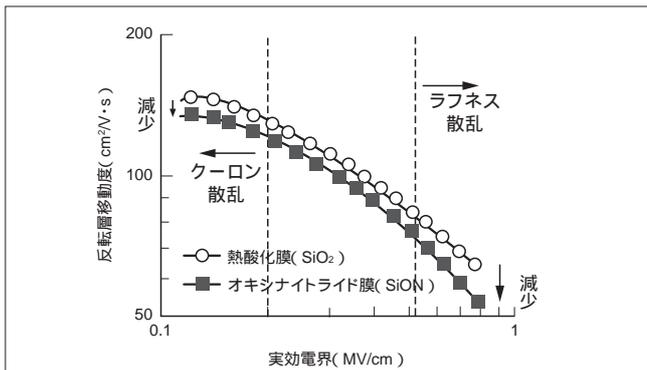


図5 . MOSFET 中の反転層正孔移動度 - オキシナイトライドゲート絶縁膜を備えた MOSFET 中の反転層正孔移動度を、熱酸化膜を備えた MOSFET 中の反転層正孔移動度と比較している。
Hole inversion layer mobility in MOSFET with oxynitride gate insulator

これまでの実験的検討からオキシナイトライド絶縁膜では、クーロン散乱とラフネス散乱が変調されていると考えられる。そこで、以下では、クーロン散乱とラフネス散乱の観点から、オキシナイトライド絶縁膜での反転層移動度の高精度なモデルを構築する。

4 オキシナイトライド絶縁膜でのクーロン散乱移動度

実験結果から、オキシナイトライド絶縁膜では正の固定電荷が発生していることがわかっている。したがって、低い実効電界における反転層移動度の低下は、この固定電荷によるクーロン散乱の増大によるものと考えられる。固定電荷によるクーロン散乱移動度は、固定電荷の量及び位置と、反転層中キャリアによるクーロン散乱に対する遮蔽(しゃへい)効果で決まる。固定電荷量とその位置は実測から見積もられている。そこで、反転層中キャリアによる遮蔽効果を適切に考慮することがモデル計算のポイントである。クーロン散乱移動度のモデル計算結果と実測値との比較を、電子の場合について図6に示す。モデル計算結果と実測値は良好に一致していることがわかる。したがって、オキシナイトライド膜において低い実効電界で観察される反転層移動度低下は、ゲート絶縁膜中の固定電荷によるクーロン散乱の増大によると結論される。

5 オキシナイトライド絶縁膜でのラフネス散乱移動度

ラフネス散乱を特徴づけるのは、図7に示すように、ラフネスの縦方向の平均的な高さを表すラフネスの高さ、ラフネスの横方向の平均的な長さを表すラフネスの相関長、及びラフネスの分布を表すラフネス分布関数である。これら三つの量は、実験的に決めることは難しいので、ラフネス移動度

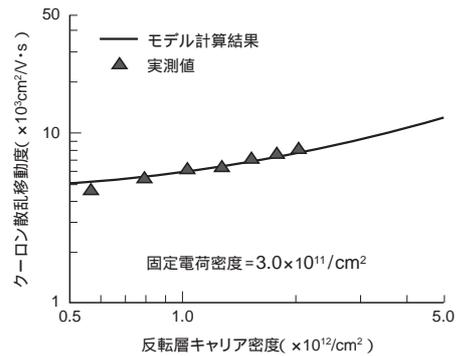


図6 . MOSFET 中の反転層電子のクーロン散乱移動度 - オキシナイトライドゲート絶縁膜を備えた MOSFET 中の反転層電子のクーロン散乱移動度のモデル計算結果と実測値との比較である。
Electron mobility limited by Coulomb scattering in MOSFET with oxynitride gate insulator

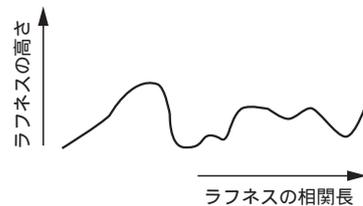


図7 . ラフネス散乱を特徴づけるパラメータ - ラフネス散乱は、ラフネスの高さとラフネスの相関長で特徴づけられる。
Parameters of roughness scattering

のモデル計算と実測値との比較により決めることになる。しかし、電子と正孔について別々にフィッティングしたのでは物理的な妥当性が保障されない。そこで、電子と正孔両方のラフネス移動度の実測値を同じパラメータで再現できるということで、これらパラメータ値の妥当性を確認する。モデル計算のポイントは、正孔のほうがラフネス分布関数の形状変化に対する感度が高いということである。

図8は、オキシナイトライドゲート絶縁膜での、ラフネス移動度のモデル計算結果と実測値との比較を示している。ラフネス高さは0.45 nm、ラフネスの相関長は1 nm、ラフネス分布としてはガウス型を想定している。これらを用いることで、電子、正孔ともにラフネス移動度の実測値を良好に再現していることがわかる。比較のため、熱酸化膜の場合は、ラフネス高さは0.55 nm、ラフネスの相関長は1 nm、ラフネス分布は指数型である。

熱酸化膜とオキシナイトライド膜でのラフネス移動度モデル化の内容を端的にまとめると、図9のようになる。オキシナイトライド絶縁膜ではラフネスの高さが減少しているため、界面はより平坦(へいたん)になっているように見える一方、ラフネス分布関数が変化している。電子は前者に、正孔は

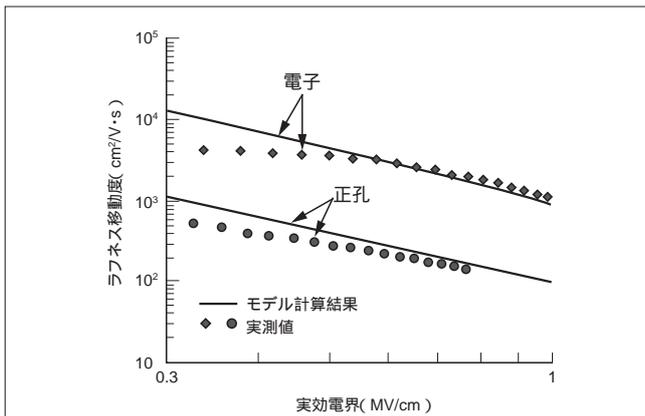


図8 . MOSFET 中の反転層キャリアのラフネス散乱移動度 - オキシナイトライドゲート絶縁膜を備えた MOSFET 中の反転層電子及び正孔のラフネス散乱移動度のモデル計算結果と実測値との比較である。Electron mobility limited by roughness scattering in MOSFET with oxynitride gate insulator

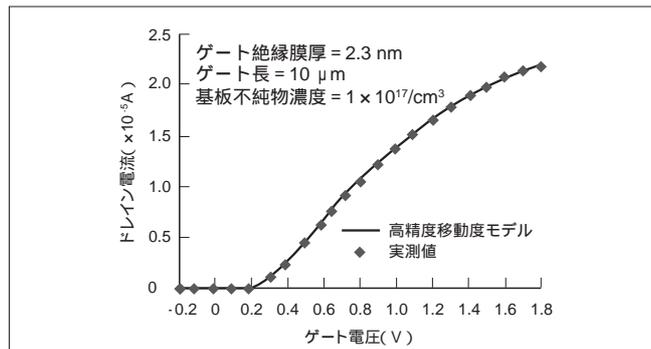


図10 . MOSFET 中のドレイン電流・ゲート電圧特性のデバイスシミュレータによる計算結果と実測値の比較 - 開発したラフネス散乱移動度モデル及びクーロン散乱移動度モデルをデバイスシミュレータに導入して、オキシナイトライドゲート絶縁膜を備える MOSFET 中のドレイン電流とゲート電圧特性を計算し、実測値と比較した。Comparison of experimental and simulated results of drain current vs. gate voltage in MOSFET with oxynitride gate insulator

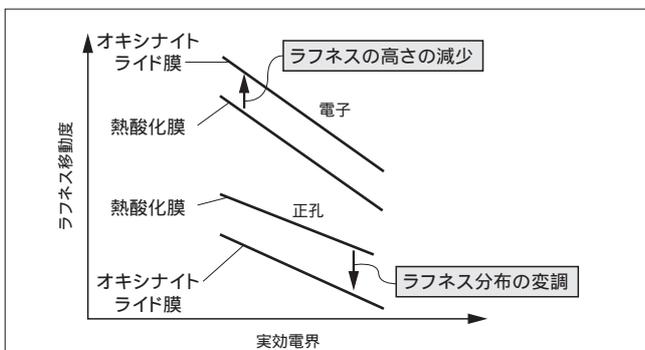


図9 . 熱酸化膜とオキシナイトライド膜でのラフネス移動度モデル化の概念 - オキシナイトライド絶縁膜では、ラフネスの高さの減少が電子のラフネス移動度の増大をもたらす、ラフネス分布関数の変化が正孔のラフネス移動度の減少をもたらす。Schematic of key issues for modeling of carrier mobility limited by roughness scattering in MOSFET with oxynitride gate insulator

後者に強く影響を受ける結果、オキシナイトライド絶縁膜では、電子のラフネス移動度は増大するが、正孔のラフネス移動度は減少する。こうして、一見不可解なふるまいも、明確な物理的根拠に基づいて説明することができる。

また、ラフネス分布関数の形状が熱酸化膜とオキシナイトライド膜で異なっていることから、一般に、ゲート絶縁膜の材質が異なれば、シリコン基板との界面におけるラフネスの分布の性質が異なっていることが結論される。これは、ゲート絶縁膜とシリコン基板界面におけるラフネスの性質について重要な知見を与える。

6 移動度モデルのデバイスシミュレータへの導入

図10は今回開発したラフネス散乱移動度モデルとクーロ

ン散乱移動度モデルをデバイスシミュレータに導入して、オキシナイトライドゲート絶縁膜を備える MOSFET のドレイン電流とゲート電圧特性を計算した結果である。図10から計算値は実測値を極めて良く再現していることがわかる。

このようにして、デバイスシミュレーションの予測精度を大幅に向上させることができる。また、キャリア移動度の背景にある散乱の素過程にまで立ち入った理解を得ることができ、解析の過程で得られた知見を、実際のデバイス開発の現場で、電流駆動力変調の原因を追求するための手段として活用することができる。

7 あとがき

デバイスシミュレータの高精度化を目指し、オキシナイトライドゲート絶縁膜を備えた MOSFET で移動度モデルの構築を行った。開発した移動度モデルにより、MOSFET の電気特性の正確なシミュレーションが可能となった。また、移動度モデルの構築に用いた手法は、新規材料の導入や新構造デバイスにも対応できる。今後、適用範囲を拡大し、開発した手法の汎用性を高めていきたい。



石原 貴光 ISHIHARA Takamitsu
研究開発センター LSI 基盤技術ラボラトリー研究主務。微細 MOS デバイスの研究・開発に従事。日本物理学会、応用物理学会、IEEE 会員。
Advanced LSI Technology Lab.



松沢 一也 MATSUZAWA Kazuya
研究開発センター LSI 基盤技術ラボラトリー主任研究員。デバイスシミュレータ用物理モデル開発に従事。応用物理学会会員。
Advanced LSI Technology Lab.