

氏名	くろ だ り ひ と 黒 田 理 人
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成22年 3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)技術社会システム専攻
学位論文題目	A Study on High Performance Metal-Insulator-Semiconductor Devices with Atomic Order Flat ate Insulator Film/Silicon Interface (原子オーダー平坦ゲート絶縁膜/シリコン界面を有する 金属-絶縁膜-半導体デバイスの高性能化に関する研究)
指導教員	東北大学教授 須川 成利
論文審査委員	主査 東北大学教授 須川 成利 東北大学教授 伊藤 隆司 東北大学客員教授 大見 忠弘 東北大学准教授 寺本 章伸 (未来科学技術共同研究センター)

論文内容要旨

Metal-Insulator-Semiconductor(MIS)型トランジスタはゲート絶縁膜と半導体の界面に形成するチャンネルにキャリアを走行させるデバイスである。界面に凹凸が存在するとキャリアモビリティやゲート絶縁膜の信頼性を劣化させる要因となる。デバイスの性能、信頼性を向上させるためにはゲート絶縁膜の高品質化のみならずゲート絶縁膜とシリコンの界面の平坦化が重要である。界面の平坦性は平坦化手法、ゲート絶縁膜形成手法、シリコン表面洗浄などの工程によって決まるが、従来の技術によって形成した界面には、1nm 程度の凹凸が存在していた。本論文は、こうした課題を解決し Metal-Oxide-Silicon(MOS)トランジスタの電気的特性を高性能化するために、新たにシリコン表面と、ゲート絶縁膜とシリコンの界面を原子オーダーで平坦化する技術を開発し、その有効性を示すために作製した原子オーダー平坦界面を有する MOS 型トランジスタの電気的特性とその応用例をまとめたものであり、全文5章からなる。

第1章は、序論である。

第2章では、原子オーダー平坦表面形成手法および、平坦性を維持した CMOS 製造手法を開発した。図1には、1,200 度の高潔浄アルゴン雰囲気下で 30 分程度熱処理後の、0.1 度以下の結晶軸オフ角度を有する 200mm 径のシリコン(100)面ウェーハの表面原子間力顕微鏡観察像を示す。結果から、この処理により原子テラスと原子一層分の高さを持つ原子ステップから構成される原子オーダー平坦面が 200mm 径ウェーハ全面で得られることが明らかになった。さらに、この原子オーダー平坦表面にラジカル反応による絶縁膜形成を行えば、得られた原子オーダー平坦性を維持したままゲート絶縁膜/シリコン界面が形成できることを明らかになった。またしきい値電圧調整用不純物イオン注入後にわずかにあれた表面もラジカル酸化膜を形成すれば表面の平坦性を原子オーダーで回復できることを明らかにしている。図2には、従来技術で作製した CMOS と新たに開発したプロセス技術を用いて作製した原子オーダー平坦界面を有する CMOS のゲート絶縁膜/シリコン界面の原子間力顕微鏡観察像を示す。この結果から、従来技術ではまったく得られなかった原子オーダーで平坦化された界面を有する CMOS を作製できることが分かった。

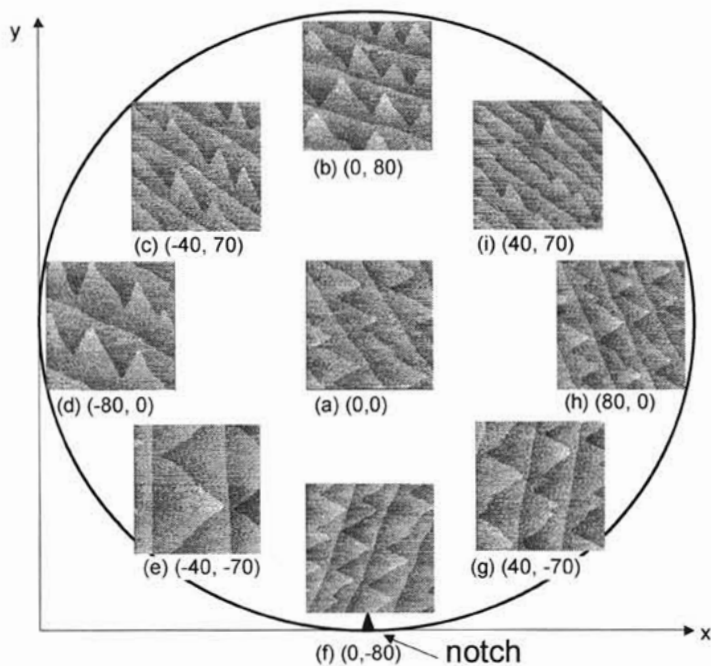


図 1. 1,200 度の高純度アルゴン雰囲気下で 30 分間熱処理後の 200mm 径ウェハ上の様々な場所で得られた原子間力顕微鏡観測像。

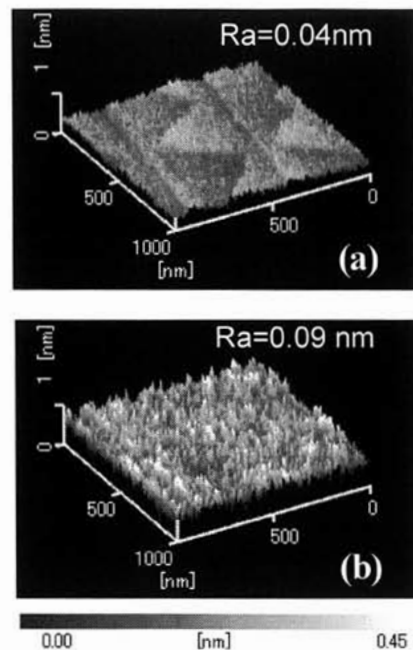


図 2. (a)原子オーダー平坦化プロセスを導入した CMOS、(b)従来技術で作製した CMOS のゲート絶縁膜/シリコン界面の原子間力顕微鏡観測像。

第 3 章では、第 2 章で明らかにした原子オーダー平坦化及び平坦性を維持したプロセス技術を用いて MOS トランジスタを作製し、従来の平坦性を有するトランジスタと電気的特性を比較した。図 3 に原子オーダー平坦界面を有する CMOS と従来技術で作製した CMOS のキャリアモビリティ特性を示す。原子オーダーで界面を平坦化することにより、22K においては電子、ホールモビリティ共に従来のデバイスと比べて約 60% の向上が確認され、300K においては電子、ホールモビリティでそれぞれ 5%、10% の向上が確認された。図 4 には、(a) ゲート絶縁膜破壊耐圧特性、(b) 0.1 A/cm^2 の一定電流ストレスを印加した際のゲート絶縁膜破壊特性を示す。A、B、C はそれぞれ、原子オーダー平坦シリコン表面上にゲート絶縁膜をラジカル酸化により形成したデバイス、従来平坦シリコン表面上にゲート絶縁膜をラジカル酸化により形成したデバイス、従来平坦シリコン表面上にゲート絶縁膜を 750°C の水分雰囲気下で熱酸化により形成したデバイスの特性を示す。A は、B、C と比べて破壊特性の平均値が高いと共に、分布のばらつきが非常に小さいことが分かった。また、得られた絶縁耐圧の差が、界面の凹凸による局所的な電界集中を盛り込んだ理論計算とよく合うことを見出した。この結果から、原子オーダー平坦界面を導入することにより、界面における局所的な電界集中を抑制でき、デバイスの寿命が大幅に増加できることが明らかになった。

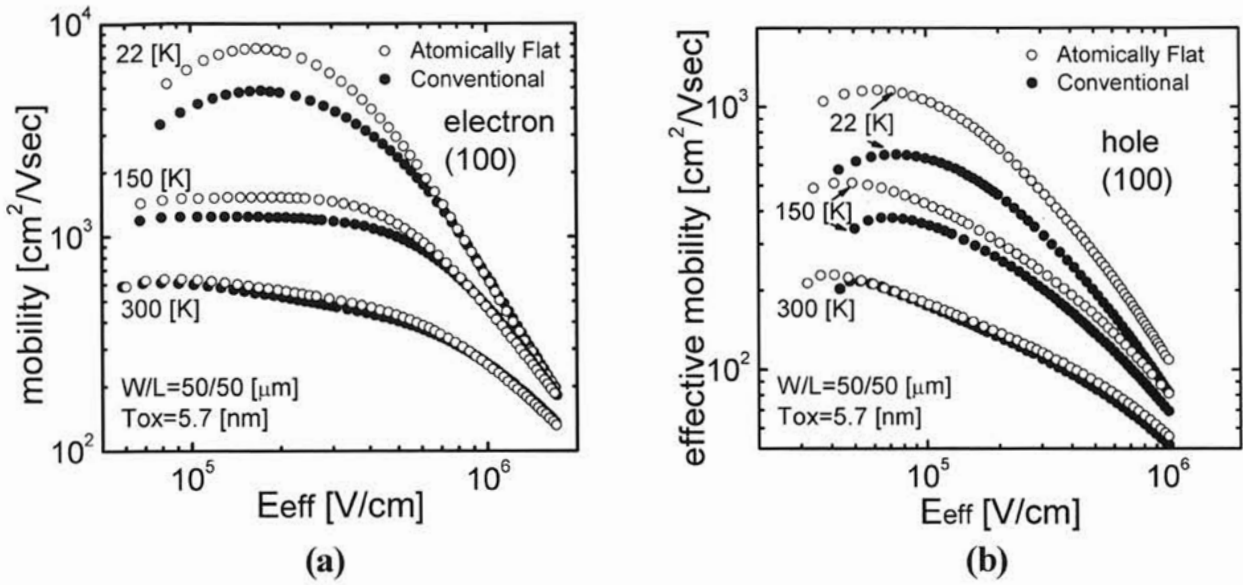


図 3 原子オーダー平坦化されたゲート絶縁膜シリコン界面を有する CMOS と従来技術で作製した CMOS の(a)電子モビリティ、(b)ホールモビリティ特性。

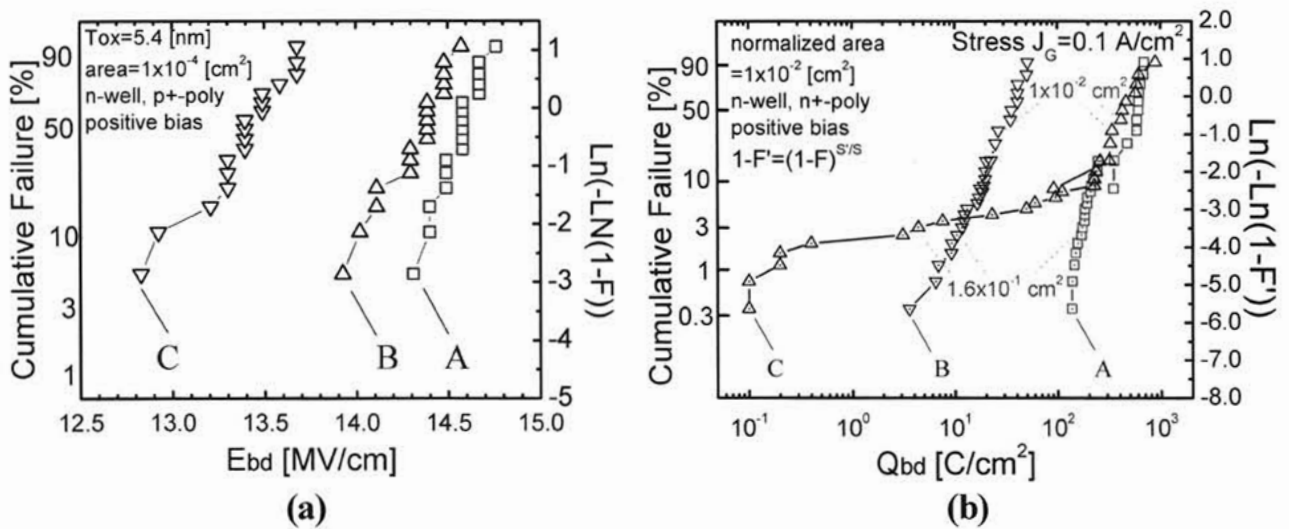


図 4 (a) 絶縁膜破壊耐圧特性、(b) 0.1A/cm² の一定電流ストレス印加した際の絶縁膜破壊特性。A, B, C はそれぞれ、原子オーダー平坦シリコン表面上にゲート絶縁膜をラジカル酸化により形成したデバイス、従来平坦シリコン表面上にゲート絶縁膜をラジカル酸化により形成したデバイス、従来平坦シリコン表面上にゲート絶縁膜を 750℃ の水分雰囲気中で熱酸化により形成したデバイスの特性を示す

第 4 章では、MOS トランジスタで構成される集積回路の性能向上にはキャリアモビリティの向上と共にソース・ドレイン電極直列抵抗の低減が重要であることを示し、ホールモビリティの高いシリコン(551)面を表面に有する Silicon-on-Insulator (SOI) 基板に、n 領域と p 領域にそれぞれ仕事関数差の小さい ErSi₂, Pd₂Si シリサイドコンタクトを有する蓄積型 MOS トランジスタを作製している。トランジスタの電流電圧特性と CMOS インバータの直列接続から構成されるリングオシレータの遅延時間を評価した。図 5 には、作製したデバイスのドレイン電流-ドレイン電圧特性を

示す。ソース・ドレイン電極の直列抵抗を低減した Si(551)面 SOI 上に作製した蓄積型 CMOS で、ゲート長約 100nm のデバイスサイズにおいて、nMOS、pMOS でそれぞれ 775, 888 $\mu\text{A}/\text{mm}$ の電流駆動能力を得た。図 6 には、CMOS インバータの入出力電圧伝達特性を示す。Si(551)面 SOI 上に作製した蓄積型 CMOS により Si(100)面 SOI 上に作製した反転型 CMOS と比べてよりバランスした特性を得た。図 7 には、Si(551)面 SOI 蓄積型 CMOS で作製した 51 段 CMOS リングオシレータの、1 段当たりの遅延時間の電源電圧依存性を示す。

電源電圧 2.0V, 3.0V においてそれぞれ 44 psec, 36 psec の特性を得た。

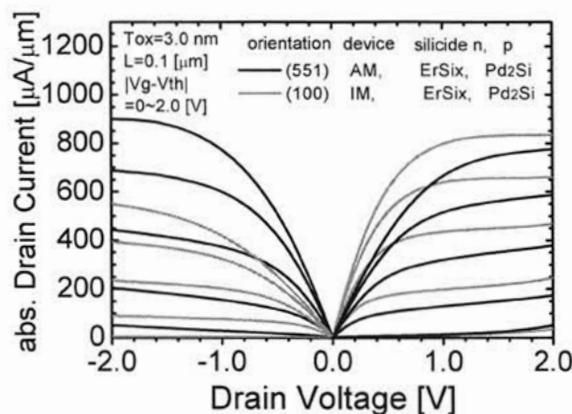
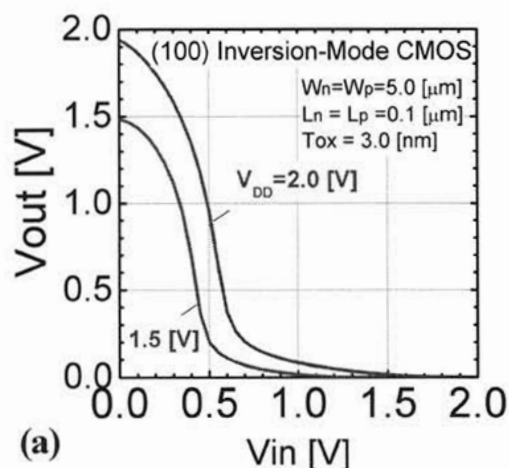


図 5 作製したデバイスのドレイン電流-ドレイン電圧特性

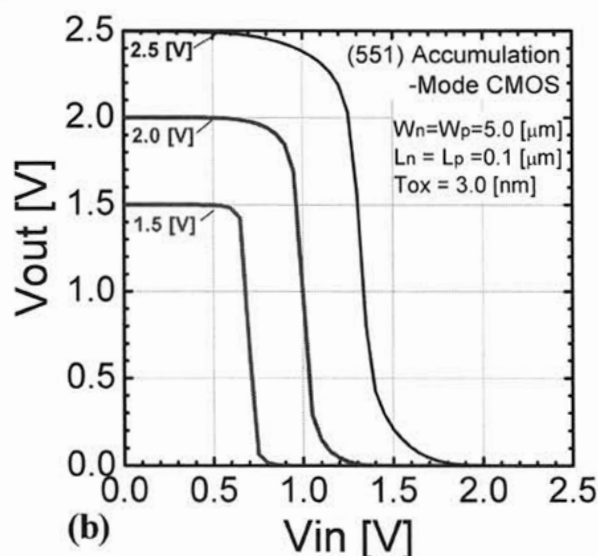


図 6 CMOS インバータの入出力電圧伝達特性。(a) (100)面 SOI 反転型 CMOS, (b) (551)面 SOI 蓄積型 CMOS。

第 5 章は、結論である。

以上要するに本論文は、これまで存在しなかった、原子オーダーで平坦化されたゲート絶縁膜/シリコン界面を有する MOS トランジスタを新たに開発し、その形成手法と応用例をまとめたものであり、LSI の高性能化に貢献できるものといえる。

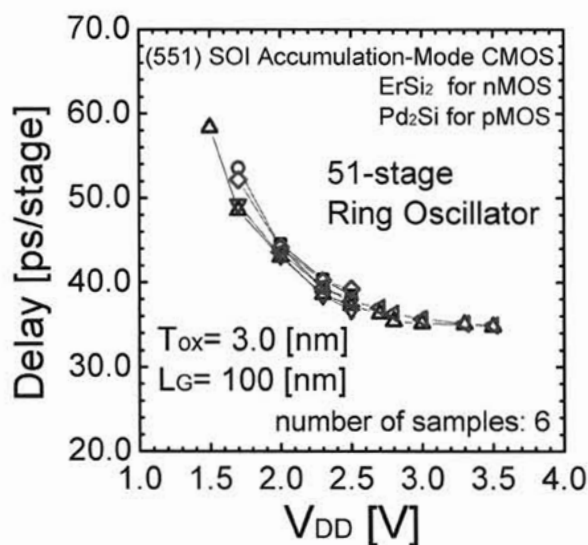


図 7 作製したデバイスのドレイン電流-ドレイン電圧特性

論文審査結果の要旨

シミュレーション技術は現代科学の進展にとって不可欠な技術であり、近年では、計算機性能の向上も相まって、シミュレーションが表現しうる現象の種類、精度は飛躍的に増大し、シミュレーションは理論、実験（観測）と並ぶ科学技術の三本目の柱と称されるまでになった。シミュレーション技術が有効な手段とされるのは、解析的に求めることが困難な非線形現象の再現においてであり、非線形性、あるいは複雑性はシミュレーション技術の本質的な特性である。本研究では、複雑系シミュレーションの代表的なアプリケーションである気候シミュレーションモデルを対象として、不確実性やプログラムの複雑性、計算性能など、大規模複雑系シミュレーションに関わる問題を解決し、高性能、高精度の計算を可能とする新たなソフトウェア（カップラー）を設計・開発し、その有効性を明らかにすることを目的としている。本論文はその成果をまとめたものであり、全5章より構成される。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的について述べている。

第2章では、気候シミュレーションモデルのソフトウェア上の特徴や気候研究の方法論、気候モデルと気候研究コミュニティの関係など、従来のシミュレーションソフトウェア設計では省みられなかった要素までも考慮した上で、カップラーが具現すべき機能として、「交換するデータに関して値の変化を伴う操作と値が変化しない操作を分離する」、「値が変化する操作（補間計算）に関わるコードを自由に実装できるようにする」ことの2つを導いた。

第3章においては、第2章で導かれた計に基づいてカップラーを実装した。特に「補間計算に関わるコードを自由に実装できる」ことを実現するために、補間計算を抽象化して任意の補間アルゴリズムに対応する要素を抽出し、その結果から、カップラーは格子位置情報ではなく補間計算における格子番号の対応関係のみを保持するようにした。このことによって、任意の補間アルゴリズムに対してローカルな補間計算を実装可能とした。

第4章では、実装されたカップラーを実際の気候モデルMIROCに適用して性能を評価した。大気モデルと海洋モデルの結合では、全実行時間に対しておよそ5%の実行時間向上を達成し、特に結合に関する実行時間はほぼゼロにすることに成功した。大気モデルとエアロゾルモデルの結合実験では、大量のデータ交換に有効な手法を調べることを目的として性能測定を行った。その結果、データのバッファリングを行わず逐次的にデータ交換する手法が効果的であることを明らかにした。

第5章は本研究の結論を述べている。

以上、本論文では、気候シミュレーションモデルを主要なターゲットとし、大規模複雑系シミュレーションに関わる諸問題を解決し、高性能、高精度の計算を可能とする新たなソフトウェア（カップラー）を設計・開発した。これにより、気候モデルMIROCの大気海洋結合において、結合に要する実行時間を大幅に短縮するとともに、大気モデルとエアロゾルモデルの結合試験を通じて、大容量のデータ交換を必要とする際の有効な結合手法を明らかにした。本研究は、現代科学技術の基盤である計算科学の発展や気候変動予測の基礎である気候シミュレーション技術の発展に大いに寄与するものである。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。