

## 論文の内容の要旨

論文題目 Negative-Capacitance FETs based on Ferroelectric Hafnium Oxide for Low-Power VLSIs

(低消費電力VLSIのための強誘電性ハフニウム酸化膜を用いた負性容量FETに関する研究)

氏 名 蒋 京 珉

集積回路の高速化・低消費電力化はわれわれの生き方そのものを根本的に変えている。このような集積回路の発展は、シリコン(Si)という優れた半導体材料、また微細化に適したMOSFETという半導体デバイスのおかげと言える。現代のCMOS集積回路は微細化によってその性能向上を実現してきたが、その一方で、今我々は消費電力増大の危機に直面している。集積回路の消費電力を大きく低減するためには従来より急峻にオン・オフ切り替えが可能なトランジスタが必要となる。オン・オフの急峻さを示す指標としてはサブスレッショルド係数(Subthreshold Swing, SS)が用いられる。従来のMOSFETのSSには室温で約60mV/decという物理的な限界が存在する。もし従来のMOSFETより急峻なオン・オフ特性をもつ急峻スロープトランジスタが実現できれば、集積回路の低消費電力化・低電源電圧化に大きい進展を期待できる。このような急峻スロープトランジスタを集積回路に組み込むためにこれまでいくつかの急峻スロープトランジスタが提案され研究されてきた。

2007年には、S. SalahuddinとS. Dattaによって強誘電薄膜をゲート絶縁膜に利用す

る負性容量FET (Negative-Capacitance FETs, NCFET) が提案された。彼らの理論・モデルによると強誘電体には容量が負になる状態が存在し、通常は不安定で実現されない負の容量の状態がMOSFET構造では安定化できるという。この理論・モデルによれば、強誘電体のNC効果を用いることでSSが従来のMOSFETより急峻になる。我々は2011年に始めて報告された強誘電性を有するハフニウム酸化薄膜 ( $\text{HfO}_2$ ) を用いたNCFETに注目し、研究対象とした。強誘電性 $\text{HfO}_2$ を用いるSi NCFETは次のような利点を持つ。従来のMOSFETと同じレベルの高いオン電流がとれる点、デバイス動作に対称性があることから従来の回路レイアウトの変更が少なく済む点、またCMOSプロセス技術と整合性が高いことから低コストで低消費電力デバイスが実現できる点である。このような利点からNCFETは次世代トランジスタとして注目されており、S. SalahuddinらのNCFETの理論・モデルを正しく理解し急峻スロープトランジスタの設計を行おうとする研究が世界中から精力的に行われている。

ここでこの論文の構成を述べる。第2章はS. Salahuddin らによるNCFETの理論・モデルに立脚しデバイスの静特性をシミュレーションした結果である。シミュレーションには長チャネルのマルチゲート構造を用いた。強誘電性 $\text{HfO}_2$ 系NCFETにおいて急峻なSSを得るための必要な強誘電材料特性・ゲート絶縁膜厚に関する設計指針を論じた。さらにこれまで明確に議論されたことのなかった、最先端プロセス・デバイス構造で考慮すべき点を指摘し、強誘電性 $\text{HfO}_2$ 系NCFETの微細化を議論した。S. Salahuddin らによるNCFETの理論・モデルがどのようなものかを示しその理論に立脚した設計指針を明確に示した。

第3章は、我々の研究室で試作した強誘電性 $\text{HfZrO}_2$  (HZO) キャパシタの実験結果に基づき、強誘電性 $\text{HfO}_2$ 系NCFETの動特性をシミュレーションした。強誘電性の動特性を記述するLandau-Khalatnikov (LK) 方程式を用い、NCFETの動特性を計算できる解析式シミュレーションモデルを開発した。このLK方程式はS. Salahuddin らがNCFETの理論・モデルの根拠とするLandau相転移理論の拡張版である。強誘電性 $\text{HfO}_2$ 系キャパシタの過渡応答の実験結果から分極反転の動特性を評価し、分極反転がNCFETの動特性にどう影響を与えるかをシミュレーション結果から調べた。分極反転が強誘電性 $\text{HfO}_2$ 系NCFETの動作速度を制限する可能性があり、具体的にどの程度の動作速度が実現できそうかを提示した。

第4章では、複数の強誘電ドメイン効果を取り入れ、強誘電キャパシタの新らたなコンパクト・モデルを構築した。第3章のシングル強誘電ドメインモデルに比べマルチ強誘電ドメインモデルは強誘電性 $\text{HfO}_2$ キャパシタの実験結果を正確に再現することができた。さまざまな測定条件の実験結果を再現できていることから、今後マルチ強誘電ドメイン効果を考慮したNCFETのシミュレーションに有用なモデルであると言える。

第5章は、強誘電性 $\text{HfO}_2$ 系NCFETに関する実験的な研究結果を示した。デバイスの基本的な動作を確認するために、プレナー構造を採用した。まず、 $\text{TiN}/\text{HfZrO}_2/\text{TiN}/\text{SiO}_2/\text{Si}$  のゲートスタック構造を用いたMFMS (Metal/Ferroelectric/Metal/Insulator/Semi

-conductor) FETの $I_d$ - $V_g$ 特性から $\text{HfZrO}_2$ の強誘電性を確認することに成功した。しかし我々の実験結果では強誘電性によるメモリ効果は確認されたものの、S. Salahuddin らによるNCFETの理論・モデルに類似した結果は得られず強誘電体のNC効果を確認することはできなかった。第5章ではその原因を多角的な視点から考察および検討している。その後、強誘電性FETにおいて急峻スロープ特性を得るためのデバイス・強誘電材料の設計指針を実験的に探索することとなった。そこで下記に記す2つの設計思想に基づくデバイス・強誘電材料設計を行い、強誘電性 $\text{HfO}_2$ 系MFMS-FETの急峻SS化の可能性を実験的に探索した。

1. MFMS-FETのMISキャパシタのリーク電流が比較的に大きい場合には内部フローティングゲートへの電荷注入が顕著になる。この電荷注入と強誘電体の分極反転が共存する環境を強誘電性FETの急峻SS化に利用することはできるか。
2. 強誘電体の分極反転に伴う誘電率の変化をMFMS-FETの急峻SS化に利用できるか。

電荷注入の大きい強誘電性FET（上記 1）の場合、ある限られた測定条件において急峻なSS特性が実験的に確認された。こちらの急峻スロープ特性ではゲートスタックでの電荷のやり取りと強誘電性 $\text{HfZrO}_2$ の分極反転が両方関与している可能性がある。

しかし上記 2の強誘電体の分極反転に伴う誘電率の変化を急峻SS化に利用する実験的な試みは成功しなかった。強誘電体の分極反転に伴う誘電率の変化が半導体のサブスレッショルド特性(SS)に与える効果は微弱なものだった。こちらはMOSFETの直列容量モデルで説明できる。つまり分極反転時の強誘電体の容量・電荷に比べ半導体の空乏層の容量・電荷がとても小さいことに起因すると考えられる。

また我々の実験では強誘電性FETの測定時にゲート電流を測定することが分極反転電流を観測する有用な方法であることが明らかになった。今後のNCFETの研究において分極反転電流を観測することは、いくつかのグループから実験的に報告されているNCFETの急峻なSS特性の起源を理解する上で重要な役割を担う可能性がある。