

IGZO と次世代機能性材料を融合した新デバイスの開発に成功  
～メモリーデバイスの低消費電力化、高速化、大容量化に期待～

JST 戦略的創造研究推進事業において、東京大学 生産技術研究所の小林 正治 准教授らは、8nm の金属酸化物半導体 IGZO(\*1) をチャンネルとしたトランジスタ一型強誘電体メモリー (FeFET) の開発に成功しました。本技術により、サブスレッショルド係数は理想的な 60mV/dec、メモリーウィンドウは 0.5V 以上の高移動度で低電圧動作可能な優れたメモリー特性を実現しました。

強誘電体二酸化ハフニウム (HfO<sub>2</sub>) をゲート絶縁膜とした FeFET は、低消費電力で大容量なメモリーデバイスとして注目を集めていますが、シリコンをチャンネルとするデバイス構造の場合、誘電率の低い界面層が形成されてしまい、界面層への電圧降下と電荷トラップが起るため低電圧動作と高信頼性動作を同時に実現することが困難でした。

本研究では、界面層の形成と電荷トラップの影響を抑制し、3次元積層構造でも高い読み出し電流を得るために、金属酸化物半導体 IGZO をチャンネルとする強誘電体 HfO<sub>2</sub> ゲート絶縁膜 FeFET を提案しました。このデバイス構造を用いると、IGZO と強誘電体 HfO<sub>2</sub> の間で誘電率の低い界面層の形成を抑えることができます。

本成果は低消費電力で大容量、かつ高速なメモリーデバイスの新しい可能性を拓き、IoT エッジデバイスのエネルギー効率の飛躍的な向上や高度な IoT ネットワークの展開、そしてビッグデータに基づく社会サービスの充実が期待されます。

本研究成果は、2019年6月11日に「VLSI Technology Symposium 2019」で発表された。

### <研究の背景と経緯>

全ての「もの」や「こと」がインターネットを通じてつながった IoT 社会の実現に向けて、センサーや通信機能が備わったセンサーノードデバイスが重要な役割を担い、今後数兆個以上導入されることが試算されています。そのような IoT デバイスは、低消費電力であることが必然的に求められ、消費電力で支配的となるリーク電力（電流の漏れ出し）を削減するためにはメモリーの待機時の電力を抑えることができる低消費電力な不揮発性メモリーが必要となります。

強誘電体をゲート絶縁膜とするトランジスタ型強誘電体メモリー (FeFET) は、低消費電力で大容量なメモリーデバイスという特徴があります。特に集積回路作製プロセスと整合性が高く、10nm以下の膜厚でも強誘電性を示す強誘電体二酸化ハフニウム (HfO<sub>2</sub>) 材料が開発され、注目を集めています。さらにフラッシュメモリーのような3次元積層構造をとることも期待されており、IoTデバイスに限らず、サーバー用の超大容量なメモリーとしての潜在能力も予見されています。

しかし、シリコンをチャンネルとする従来の FeFET のデバイス構造では、ゲート絶縁膜とシリコンチャンネルの間に誘電率の低い界面層が形成され、界面層に大きな電圧降下や界面層を通じて電荷トラップが起こり、低電圧動作と高信頼性動作を同時に実現することが困難でした。また、3次元積層構造にする場合にはチャンネルは移動度の低いポリシリコンを用いる必要があるため読み出し電流が小さく、アクセス時間が遅くなることが懸念されていました。

### <研究の内容>

本研究では、界面層の形成と電荷トラップの影響を抑制し、3次元積層構造でも高い読み出し電流を得るために、金属酸化物半導体 IGZO をチャンネルとする強誘電体 HfO<sub>2</sub> ゲート絶縁膜 FeFET を提案しました。このデバイス構造を用いると、IGZO 自体が金属酸化膜であるため、強誘電体 HfO<sub>2</sub> との間で誘電率の低い界面層の形成を抑えることができます (図1)。

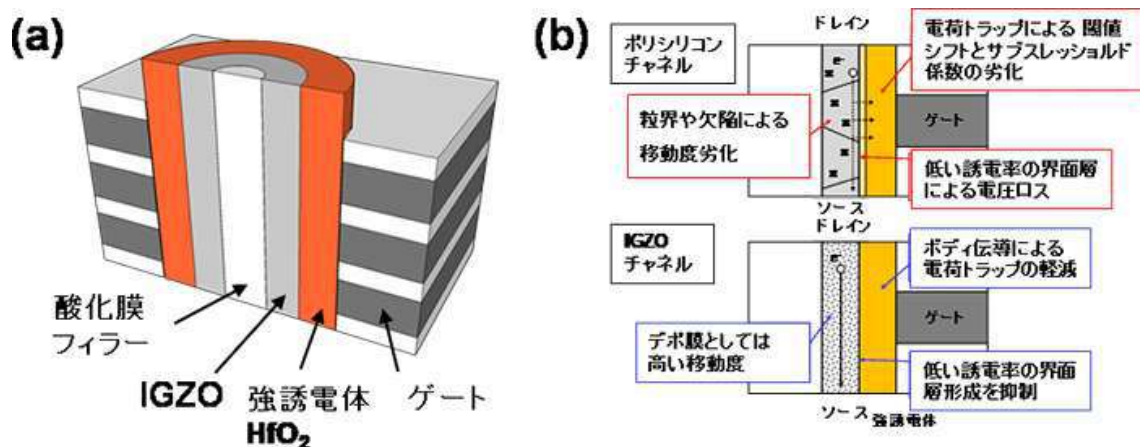


図1

(a) 提案する3次元積層型IGZOチャンネル強誘電体HfO<sub>2</sub> FeFETの模式図

(b) ポリシリコンチャンネルとIGZOチャンネルのFeFETの特徴比較。IGZOチャンネルを用いることで、界面層形成を抑制でき、電荷トラップを抑え、高移動度を実現できる。

さらにN型にドーピングされている IGZO をチャンネルにすることでジャンクションレストランジスタとして動作し、キャリアは界面でなくボディ（チャンネル中央部）を流れるため、キャリアの電荷トラップを抑制することが可能です。ジャンクションレストランジスタがノーマリーオフ動作、つまりゲート電圧がゼロの時に電流が流れないようにするには閾値電圧を制御する必要があります、IGZO の膜厚を 10nm 以下にしました。10nm 以下の膜厚では、ポリシリコンの移動度は  $10\text{cm}^2/\text{Vs}$  よりも低くなってしまいますが、IGZO であれば  $10\sim 100\text{cm}^2/\text{Vs}$  の高い移動度を維持することができます。

デバイスプロセスの開発ではまず、IGZO の膜厚の最適化を行いました。IGZO をチャンネルとし、二酸化ケイ素 ( $\text{SiO}_2$ ) をゲート絶縁膜とする通常の MOSFET を作製してサブスレッショルド係数と閾値電圧の膜厚依存性を調査したところ、膜厚を薄くするにつれてサブスレッショルド係数が小さくなり、閾値も負から正に変化することが分かりました（図 2）。最終的に 8nm の膜厚が最適値となり、サブスレッショルド係数は理想的な  $60\text{mV}/\text{dec}$  で、閾値電圧も正となりノーマリーオフ動作することが分かりました。

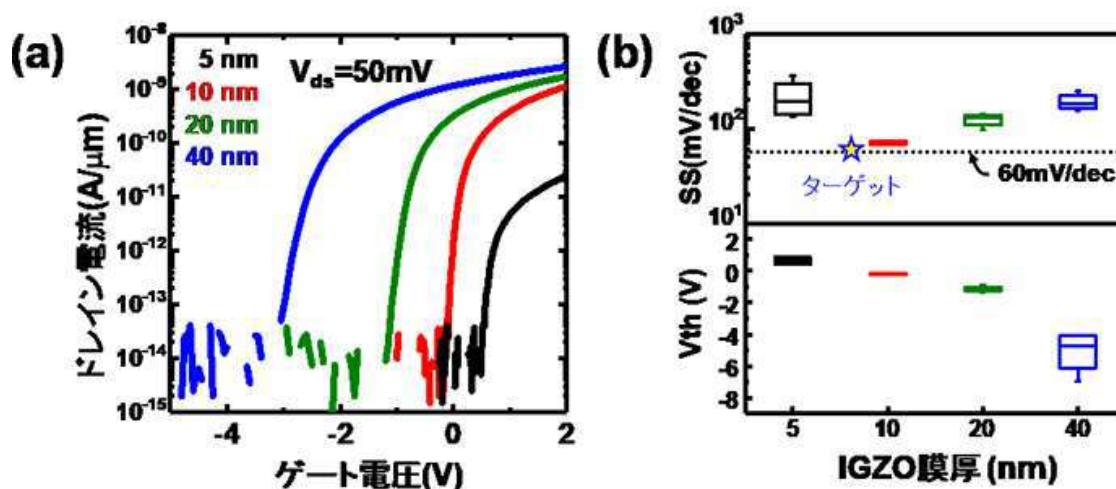


図 2

(a) FeFET 開発のための準備段階として作製した  $\text{SiO}_2$  をゲート絶縁膜とする MOSFET の電流伝達特性

(b) (a) のデータからサブスレッショルド係数と閾値電圧を抽出した。膜厚が薄いほどサブスレッショルド係数が急峻で閾値電圧も正となる。本研究では 8nm をターゲットの膜厚とした。

次に IGZO をチャンネルとした場合に、ゲート絶縁膜である  $\text{HfO}_2$  が強誘電性を示

すかを調査しました。上部電極を TiN、下部電極を IGZO として、Zr を添加した HfO<sub>2</sub> (HfZrO<sub>2</sub>) のキャパシターを作製し評価しました (図 3)。断面 TEM 像から分かるように界面層は形成されておらず (図 3 (a))、また強誘電体の特徴を示す残留分極は 30  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$  と極めて大きな値を示し (図 3 (b))、IGZO チャンネル上に強誘電体 HfO<sub>2</sub> が形成できることを明らかにしました。

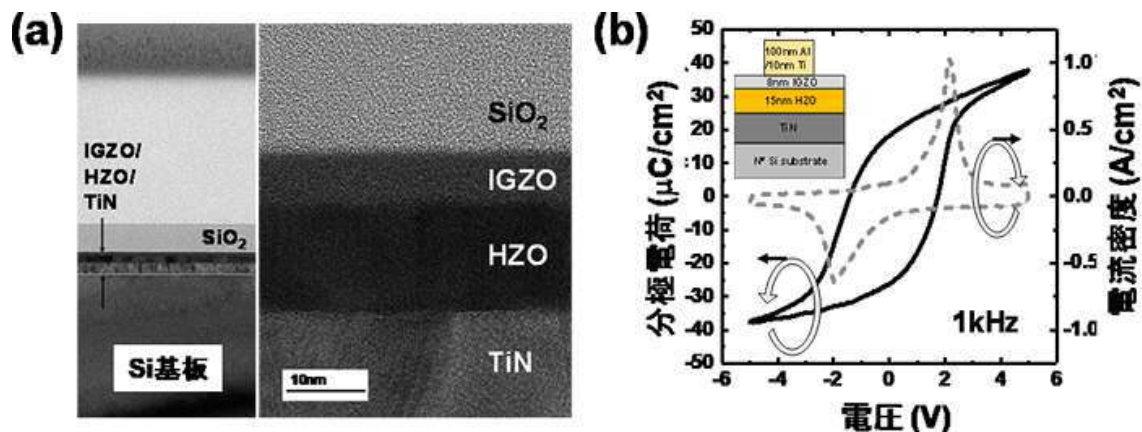


図 3

(a) 作製した TiN/HfZrO<sub>2</sub>/IGZO キャパシターの断面 TEM 像

(b) キャパシターの分極電荷および電流密度特性。低い誘電率の界面層の形成が抑制され、IGZO 上に強誘電体 HfO<sub>2</sub> が形成できることが確認された。

以上のプロセス要素を用いて、8nm の膜厚の IGZO をチャンネルとする強誘電体 HfO<sub>2</sub> ゲート絶縁膜 FeFET を作製しました (図 4)。電流伝達特性は電流のオンオフ比が 5 桁以上の良好な特性を示し (図 4 (a))、サブスレッシュホールド係数は MOSFET で得られた結果と約 60mV/dec という急峻な特性を得ることができました。さらに電界効果移動度を測定したところ 10cm<sup>2</sup>/Vs 以上の値が得られ、これは同じ膜厚でのポリシリコンチャンネルより 50%以上高い値となります (図 4 (b))。

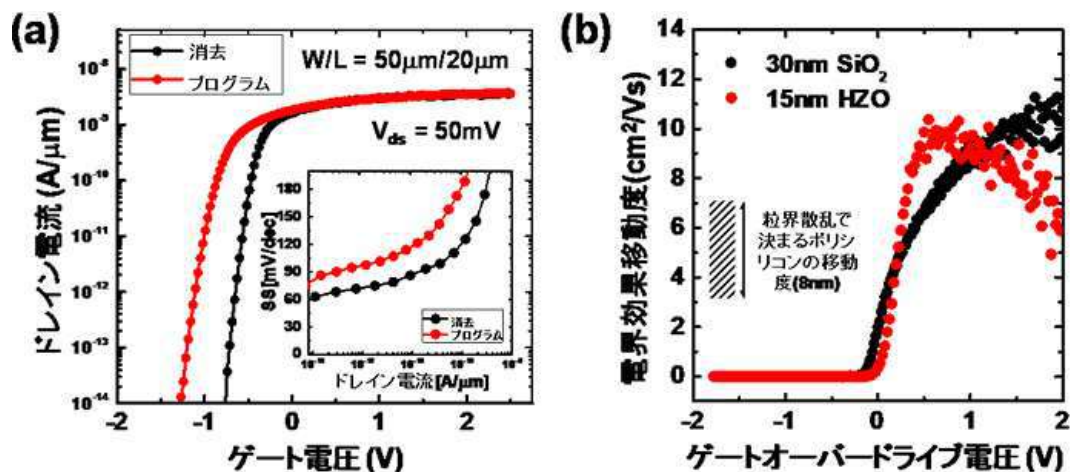


図 4

(a) 作製した IGZO チャンネル FeFET の電流伝達特性

(b) 電界効果移動度。ほぼ理想的なサブスレッショルド係数である 60mV/dec を持ち、0.5V 以上の大きなメモリーウィンドウを持つ FeFET を実現。電界効果移動度も FeFET 構造で 10cm<sup>2</sup>/Vs 以上の値が得られ、同じ膜厚でのポリシリコンの移動度を上回る。

シリコンではない新材料チャンネルをメモリーに応用して FeFET の低電圧動作や高信頼性動作、高移動度を実現したことにより、新たなメモリーデバイス開発の方向性を示し、さらなる低消費電力化、大容量化、高速化の可能性を拓いたといえます。

<今後の展開>

本研究では IGZO をチャンネルとする FeFET のコンセプト実証のため、バックゲート型のデバイス構造を採用しました。今後はトップゲート型、3次元積層型構造の場合には積層型ゲート構造を開発、評価する必要があります。また、保持特性を向上させるためには強誘電体 HfO<sub>2</sub> ゲート絶縁膜の材料特性を調整し、IoT やストレージクラスメモリーへの応用のため、1.8V 動作や書き換え速度の高速化、10年間のデータ保持、10<sup>12</sup>回の書き換え耐性、1~10mA などの読み出し電流を目指してデバイス開発を行っていきます。

(日文发布全文 <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20190610/index.html> )

\*1 In-Ga-Zn-O からなる材料で、アモルファス状態で半導体となり、移動度が 10~100cm<sup>2</sup>/Vs を示し、現在ディスプレイのドライバ回路などで使われている。