



第 81 回応用物理学会秋季学術講演会 (オンライン開催) 報告 (2)

CRDS 特任フェロー 佐藤勝昭

9/9 シンポジウム T11「ここまできた不揮発性メモリ技術 スピン・相変化・抵抗変化・強誘電体・それぞれの強み」

[9p-Z08-1] MRAM's Journey to Becoming a Mainstream Memory Sumio Ikegawa (Everspin Technologies, Inc.)



Everspin 社は MRAM の先駆者です。2006 年に最初の商用 MRAM(4MB)を発売して以来メモリ容量と市場規模は拡大しています。2019 年、MRAM の歴史の中で 2 つの画期的なイベントがありました。Everspin 社は 1Gb の STT-MRAM 製品を発売したほか、3 つの主要ファウンドリが埋め込み型 MRAM を発表、2 つの他の企業が製品発売を予定しています。これらは、MRAM がメインストリームメモリの有望な候補であることを示しています。STT-MRAM は高速かつ不揮発、高い繰り返し耐性、10 年に及ぶリテンションなどからユニバーサルメモリとして

期待されていますが、コスト面や製造技術面では課題も抱えています。一方、従来のトグル MRAM も高信頼性、耐環境性から車載用・宇宙用として今も根強い需要があります。今後高密度化に向けて SOT スイッチングも期待されます。

[9p-Z08-2] ReRAM 技術とその新しい展開—不揮発性メモリから AI, センシング技術へ 栗村聡資 (ヌボトンテクノロジー ジャパン=旧パナソニックセミコンダクターソリューション)



Cloud の負担を減らすためにエッジ搭載用不揮発性メモリの需要が高まっており、電力消費が小さくセキュアで高速な抵抗変化メモリ (ReRAM) が期待されています。2013 年には 180nm の ReRAM が MCU に搭載、2019 年には 40nm の ReRAM(8Mb) が量産体制にはいりました。ReRAM は、上下電極間に挟まれた 2 層のタンタル酸化物(TaO)構造に、フォーミングと呼ばれる電気処理で、 Ta_2O_5 中にフィラメントと呼ばれる導電層を形成されており、電極に電圧を印加することで、酸素イオンが移動し、フィラメント内の酸素空孔密度が変化し、酸素空孔を介したホッピング伝導が制御されます。今後ニューラルネットワーク、AI アクセラレータ、水素センサなどへの応用が考えられています。

[9p-Z08-3] STT-MRAM のメモリ性能向上に向けた技術課題について 細見政功 (ソニーセミコンダクターソリューション)[画像なし]

STT-MRAM は不揮発、低スタンバイ電力という特徴から、ロジックウェアに混載可能なメモリです。製品化状況は、単体では、エバースピン・アバランシェ・キオクシア/SK ハイニクス、埋め込み型は、インテル・サムスン・TSMC・グローバルなどが出荷開始あるいは準備中です。今後埋め込み型の市場が拡大すると考えられます。本格製品化に向け、設計環境・製造装置・製造プロセスが立上りつつあります。量産製品化技術向上に向けて、歩留まり・ばらつき改善が行われていますが、評価技術も重要です。技術課題としては、書き込み・読み出し電流のマージンをいかに広くするか、書き込み特性の改善、書き込み速度の改善などがあり、スピントロニクス の基礎に帰った検討が行われています。

[9p-Z08-4] 強誘電体 FET を用いた機械学習向け積和演算回路 竹内健 (東大) [画像なし]
機械学習、深層学習では、各層のビットに重みをかけて加算する積和演算が行われています。この回路を MRAM, ReRAM で行うと電流動作であるために限界があり、電圧動作が可能な FeFET にしなければなりません。通常に加算ではダイナミックレンジを生かせないが、FET を用いたデジタル加算であれば広いダイナミックレンジがとれます。FeFET は高集積にも向いています。正確性・電力・性能のバランスがよく信頼性が高い積和回路が構成できます。

[9p-Z08-5] 電圧制御型スピントロニクスメモリを用いたバイナリニューラルネットワーク用不揮発性論理素子 與田博明 (Spin-Orbitronics Technologies, Inc.)



近年、バイナリニューラルネットワークを用いた深層学習技術が実用化されています。この技術では、頻繁な積和演算の実行と、メモリへのデータの頻繁な保存が必要となります。しかし、転送バンド幅の不足や電力消費の増加により、既存のデバイスで、これに対応することが困難となっています。ひとつのデバイスで演算機能とデータ保存機能を行えば、上述の多くの問題を解消できます。これを可能とするのが電圧制御型スピントロニクスメモリ VoCSM です。このメモリは①低いエネルギー消費 $\sim 10\text{fJ/bit}$ 、②高速書き込み 2ns、③ 10^5 を超える書き換え耐性、④不揮発性をもち、1つの素子で

メモリ機能と、論理機能の両方を備えておけるのでニューラルネットワークの高度化が可能です。

[9p-Z08-6] 省エネルギー動作に向けた相変化メモリ材料の研究開発 須藤祐司 (東北大)



相変化メモリ (PCRAM) は、アモルファスと結晶の間の相変化を利用するメモリで、Ge-Sb-Te (GST) など多元系材料が使われていますが、2つの課題があります。GST の結晶化温度は約 160°C と低く、高温環境下におけるデータ保持性に劣ることと、動作エネルギーが高いといった課題を残しています。須藤らは、 200°C 以上の高い結晶化温度を有する新しい相変化材料として遷移金属 (TM) を含む TM-Ge-Te 系化合物を提案、動作エネルギーを GST の 10 分の 1 に低減しました。最近、可逆的な結晶多形変化を示す MnTe 系材料

を発見、PCRAM 材料として期待できるということです。

[9p-Z08-7] スピン軌道トルクを用いた面内磁化型スピン流磁気メモリ的高速書き込み特性比較 塩川 陽平 (TDK)



エッジで使用する IoT/AI デバイスの低消費電力化のため、高速不揮発性メモリが求められています。STT-MRAM が抱えるトリレンマ(密度、速度、保持時間)を克服するのが、スピン軌道トルク (SOT) を用いたスピン流磁気メモリで、その高速動作から SRAM を代替する不揮発性メモリの候補として考えられています。SOT を用いたスピン流型磁気メモリには、垂直磁化型の Type-Z と、面内磁化型で書き込み電流と磁化容易軸が平行な Type-X が報告されており、高速書き込みにおける低電流密度の可能性が期待され、4kb の SOT-MRAM の量産化が進められています。