



6重界面の界面垂直型強磁性磁気トンネル接合素子で 最先端マイコン製造時の260°Cでのデータ保持耐性と 1千万回以上の書き換え耐性を実証

～1桁nm世代の最先端マイコン用混載不揮発メモリの高性能化と大容量化に道を開く～

【発表のポイント】

- 垂直磁気異方性の起源である記録層と酸化マグネシウム層の界面数を従来の3倍増加した「6重界面界面垂直型強磁性磁気トンネル接合素子(iPMA Hexa-MTJ)」を開発し、25nmの極微細接合加工後に260°Cのチップ組み立てのはんだ付け工程中のデータ保持と1千万回以上に到達する書き換え耐性を同時に達成できることを世界で初めて実証
- 先端1桁ナノメートル世代(Xnm世代)のロジックデバイス(論理演算素子)のデザインルールに適合するiPMA Hexa-MTJを開発
- 開発したiPMA Hexa-MTJは半導体バックエンドプロセス(配線工程)に必要な400°Cの熱耐性を持ち、チップ組み立てではんだ付け工程でのデータ保持に必要な熱安定性を有しており、高性能かつ大容量のAIマイコン等への応用の道を開く

【概要】

デジタル革新で創る持続可能な社会のSociety5.0や2020年に政府が宣言した2050年カーボンニュートラル(脱炭素)社会の実現のためには革新的な人工知能(AI)や半導体技術が不可欠となります。Society5.0ではすべてのモノとヒトがIoT(Internet of things)でつながり、AIにより必要な情報が瞬時に取り出され、ロボットや自動走行車によって人の可能性が広がります。これらを実現するためにはデータをモノやヒトの近くで瞬時にインターネットにつながったエッジデバイスで処理して判断する必要があるため、その中核をなす半導体素子の高性能化と低消費電力化が求められています。

東北大学国際集積エレクトロニクス研究開発センターの遠藤哲郎センター長・教授*のグループは、6重界面磁気トンネル接合素子(iPMA Hexa-MTJ)を開発し、工業製品化されている従来の2重界面磁気トンネル接合素子(Double-MTJ)では困難であった25nmの微細MTJにおいて260°Cのソルダーリフロー耐性、1千万回(1×10^7 回)以上に到達する高書き込み耐性、半導体プロセスに適合した400°Cの耐熱性を、iPMA Hexa-MTJ素子で同時に達成しました。

今回、性能を実証した25nmのiPMA Hexa-MTJは1桁nm世代(Xnm世代)の最先端のロジック半導体プロセスのデザインルールに適合しています。これにより、STT-MRAMの適用範囲が最先端半導体微細加工領域にまで拡大することから、IoTやAI等の幅広い分野でのエッジデバイス等のプロセッサ(CPU)やマイコン(マイクロコントローラ)における低消費電力・高性能化が図られ、Society5.0やカーボンニュートラル社会の実現へ大きく貢献することが期待されます。本成果は、2022年12月3日～7日の期間に米国サンフランシスコで開催される、電子デバイスに関する世界最高峰の国際会議である「米国電子情報学会主催の国際電子デバイス会議(IEEE International Electron Device Meeting)」で発表されま

す。

※以下の職を兼務:東北大学大学院工学研究科教授、電気通信研究所教授、先端スピントロニクス研究センター(世界トップレベル研究拠点)副センター長、スピントロニクス学術連携研究教育センター領域長

【問い合わせ先】

◆研究内容及びセンターの活動に関して

東北大学国際集積エレクトロニクス研究開発センター
センター長・教授 遠藤哲郎

TEL : 022-796-3410

◆その他の事項について

東北大学国際集積エレクトロニクス研究開発センター
支援室長 柴田 一

TEL : 022-796-3410 FAX : 022-796-3432

E-mail : support-office@cies.tohoku.ac.jp

【詳細な説明】

【背景】

モノのインターネット(IoT)の急速な普及によるエッジとクラウド間のデータ転送量の爆発的な増大により、それに伴う膨大なエネルギーの消費、処理速度の低下等が生じています。この課題解決のため、対象とするヒトやモノに近いエッジ側での分散処理が望まれています。電力供給環境が制限されるエッジ側で許容される消費電力で高い演算処理能力を実現することが既存の揮発性半導体ベース技術では困難な状況にあります。

この分散処理への移行を促進するためには、低消費電力性能と高い演算処理能力を両立するエッジデバイス^(注1)向けの不揮発性メモリの開発が不可欠となります。現在開発が進められている不揮発性メモリの中で、スピントロニクス^(注2)技術を用いたスピントルク移行型磁気ランダムアクセスメモリ(STT-MRAM)は、その不揮発、高速動作、高い書き換え耐性、CMOS動作との親和性などの優位性からロジック半導体との融合の最有力技術となっています。

STT-MRAMは、記憶保持特性に優れたeFlash^(注3)タイプと高速書き込み特性に優れたSRAM^(注4)タイプの2つの種類が現在開発されています。特にマイコンなどに使われている混載eFlashメモリは22/28nmノード以降の半導体では微細化が困難となっており、MRAMが22nm/28nmノードでeFlash代替として製品化され、14/16nmノードで開発が進められています。eFlashメモリの代替のためにはチップ組み立ての際のはんだ付け工程の温度の260℃でデータが保持されるソルダーリフロー耐性^(注5)が必要です。しかしながら、22nm/28nmノードで製品化されている2重界面の磁気トンネル接合(MTJ)素子^(注6)では、ソルダーリフロー耐性を得るために、MTJサイズを50nm以下に微細化することは困難でした。

そのため、最先端半導体微細加工世代でスピントロニクス技術を融合するためには、最先端のX nmノード^(注7)の半導体プロセスのデザインルールとソルダーリフロー耐性を満足するSTT-MRAMのMTJ素子を開発し、最先端の半導体プロセスに対応したSTT-MRAMのスケーリングを実証することが必要です。STT-MRAMのスケーリングの実証により開発ロードマップ上でのデバイス性能向上と応用市場拡大が可能となり、STT-MRAMの不揮発性を活用した低消費電力性能でSociety5.0^(注8)とカーボンニュートラル社会への貢献が期待されます。

【研究経緯と技術課題】

このような社会的要請を見据えて、東北大学では以下に示す経緯で研究開発成果を上げてきました。

大野英男教授(現 東北大学総長)と池田正二准教授(現 教授)のグループは、界面垂直磁気異方性(i-PMA)^(注9)型MTJ(以下、単にMTJ)を発明することにより、接合直径が40 nmのMTJを動作させることに、2010年に世界で初めて成功しました(S. Ikeda *et al.*, Nature Mater. 9, 721 (2010))。このMTJ素子のデータ保持は、CoFeB(磁石層)とMgO(障壁層)との界面に生じるi-PMAとよばれる物理現象を利用しています。しかし、一つの界面を活用したMTJでは、十分なデータ保持特性を実現できなかったために、更に大きなi-PMAが必要でした。

そこで、大野英男教授（現 東北大学総長）と遠藤教授のグループは、CoFeB(磁石層)とMgO(障壁層)とのi-PMAを2つ有するDouble-MTJを、2014年に世界に先駆けて開発すると共に、Double-MTJのCMOS集積回路との集積化を可能にする材料からプロセス・デバイス技術の開発を推進し、300 nmプロセスにてDouble-MTJを活用したSTT-MRAMや不揮発性マイコン/MCU等の試作・動作実証を世界に先駆けて成功してきました(<https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2019/02/press20190219-01-ISSCC.html>)。しかし、Double-MTJにおいても、最先端のX nm世代の半導体集積回路のデザインルールに適合するようにMTJの接合直径を小さくすると十分なデータ保持特性(熱安定性)が得られないスケーリングの課題があります。

極微細なMTJでデータ保持特性を向上させるために2つのアプローチが試みられています。ひとつはCoFeBとMgOの界面の数を従来の2重界面から4重界面、6重界面と増やす方法(iPMA-Type)です。遠藤教授のグループは2021年に4重界面のMTJで直径18nmのMTJ素子で10nsの高速書き込み動作と汎用ロジックでの動作温度範囲での10年間の記録保持を同時に実証しました(<https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2021/06/press20210601-03-quadmtj.html>)。もう一つの方法は、素子の直径よりも記録層の膜厚を厚くすることによって生じる形状磁気異方性(Shape Anisotropy)を利用する方法(SHA-Type)です。SHA-Typeは東北大学の英男教授と深見俊輔教授のグループが直径2.3nmという極微細なMTJでの高いデータ保持特性を実証しています(<https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2020/12/press20201208-01-tunnel.html>)。しかしながら、SHA-Typeでは素子の設計においてMTJの直径を任意に選べないという制約がありました。また、半導体のバックエンドプロセスで必要な400°C耐熱性とeFlashタイプのMRAMで必要なソルダーリフロー耐性についてはまだ実証されていませんでした。一方、iPMA-TypeではCoFeB/MgOの界面の数と記録層の膜厚を変えることによって、プロセスや材料を変えることなくデータ保持特性を任意のMTJ直径で設計することが可能です。しかしながら、iPMA-TypeでeFlashタイプのMRAMで必要な260°Cのソルダーリフロー耐性を達成するためには、CoFeBとMgOの界面をさらに増やして、より高いデータ保持特性と保持特性の温度依存性の低減が必要となります。

【研究手法と成果】

今回、CIESの遠藤哲郎センター長・教授のグループでは、CoFeBとMgOの界面の数を現在、工業化されている2重界面から6重界面としたiPMA typeのHexa-MTJを開発しました(図1)。Hexa-MTJでは、絶縁膜のMgO膜が4層と従来のDouble-MTJの2倍多くなるため、素子の抵抗が高くなるという問題がありました。また、磁性体は温度が高くなると熱揺らぎのため磁化の向きを保持するのが困難になります。さらに参照層の熱安定性も高温での読み出しと書き込みを行うために必要となります。

これらの課題を解決するために(a)低抵抗なMgO膜の開発、(b)熱安定性が高く、かつ、温度依存性の小さい記録層の開発、(c)低ダメージのパターニングプロセス(d)熱安定性の高い参照層の開発を行いました。

これらのMTJ膜およびプロセスを用いて、eFlashタイプのMRAMに必要な(a)20年間のデー

タ保持特性と、(b) ソルダリフロー耐性と、(c) 1千万回以上の書き換え耐性を同時に世界で初めて25nmサイズのMTJで実証し、最先端の半導体ロジックのデザインルールに適合させることに世界で初めて成功しました。これにより、従来のDouble-MTJでは実現困難であった1桁ナノメータ(X nm)世代の最先端半導体集積回路と大容量STT-MRAMを融合したアプリケーションプロセッサの実現に向け道を拓くことができるようになります。

本成果は、STT-MRAMの市場拡大を阻害している課題である25nm以下のMTJでeFlashタイプのMRAMを、最先端のX nm世代の半導体集積回路のデザインルールに適合できることを示す重要な成果です。

【研究成果の意義】

この成果はX nm世代の最先端半導体と大容量STT-MRAMを融合したアプリケーションプロセッサの実現に向け道を拓く、意義ある成果となります。加えて、高い信頼性性能を活用して自動車や産業用ロボットなどの耐環境応用への道も拓くという意義があります。

これにより、アプリケーションプロセッサの設計コンセプトを一変し、その結果、MRAM技術を融合したアプリケーションプロセッサの応用領域が、画像処理やAIシステムなどのハイエンド応用から、IoTやセンサネットワークシステムなどのローエンド応用に至る領域において、低消費電力化と高性能化が進んでいくことが期待されます。

以上の成果は、2022年12月3日～7日の期間に米国サンフランシスコで開催される、電子デバイスに関する世界最高峰の国際会議である「米国電子情報学会主催の国際電子デバイス会議(IEEE International Electron Device Meeting)」で発表(現地時間 12/6 9:55～10:20)します。

本成果は、本学国際集積エレクトロニクス研究開発センターにて推進している CIES コンソーシアム事業の支援を受け、本学発スタートアップ企業であるパワースピン株式会社で推進する国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業(JPNP12004)での本学委託業務において取得した技術要素を応用し、文部科学省次世代 X-nics 半導体創生拠点形成事業(JPJ011438)で材料・デバイス開発・動作実証することで得られたものです。

【用語説明】

(注1) エッジデバイス

インターネットに接続された製品のこと。スマートフォンやパソコンの他、家電やロボットなどのあらゆるインターネットに接続されたモノを示し、モノのインターネットIoT(Internet of things)とも呼ばれる。

(注2) スピントロニクス

これまで別々に用いられてきた電子が有する電氣的性質(電荷)と磁氣的な性質(スピン)の両方を積極的に用いることで、新しい物理現象の発見や新しい機能性デバイスの実

現を目指す学術分野です。

(注3) eFlash

埋込型 (embedded) フラッシュメモリ。フラッシュメモリは半導体メモリの一種で浮遊ゲートMOSFETと呼ばれる半導体素子を利用し、浮遊ゲートに電子を蓄えることによってデータ記録を行う不揮発性メモリ。埋め込み型フラッシュメモリはマイコン (マイクロコントローラ) やSoC(System on chip)などのファームウェア格納用メモリとして用いられる。CMOSロジックとのプロセスを流用して製造されるため、単体のflashとは構造が異なるため、22nmノード以降の微細化は困難である。

(注4) SRAM

Static Random Access Memoryの略。半導体メモリの一種で複数のトランジスタを内部構造に持ち、フリップフロップ等の順序回路でデータを記憶する素子。メモリの面積は大きい、高速 (~10 ns以下) での読み出し、書込みが可能であり、電力の供給時には記憶データは保持されるが、電力供給がなくなると記憶内容が失われる揮発性メモリです。

(注5) ソルダリフロー耐性

一般的なマイコンでは、プログラムコードをウエハの段階で書き込み、その後にチップに加工して組み立てを行います。チップの組み立て工程にはんだ付け工程があり、260°Cで90秒間チップを加熱してはんだ付けを行います。この処理の際に書き込み済みのプログラムコードが消えないように十分な熱安定性を持つことが必要となります。

(注6) 磁気トンネル接合(MTJ)素子

MTJとはナノメートルスケールの薄い絶縁層を二つの強磁性層で挟んだ3層構造を基本として、磁化方向が反転しやすい記録層と反転しにくい参照層を有し、素子抵抗は記録層と参照層の磁化の相対角度によって決まり(トンネル磁気抵抗(TMR)効果)ます。二つの磁化方向が平行のときに素子抵抗は最小値となり、反平行のときに最大値となり、情報を記録します。磁化方向は安定のため不揮発性メモリとしてMTJ素子は用いられています。

(注7) X nm世代

ナノメートルは1万分の1ミリメートル。最先端の半導体ロジックのデザインルールはX nm世代の研究・開発が行われています。MTJが半導体ロジックに適合するためには、MTJの接合直径が2X nmの研究・開発が必要であると考えられています。

(注8) Society5.0

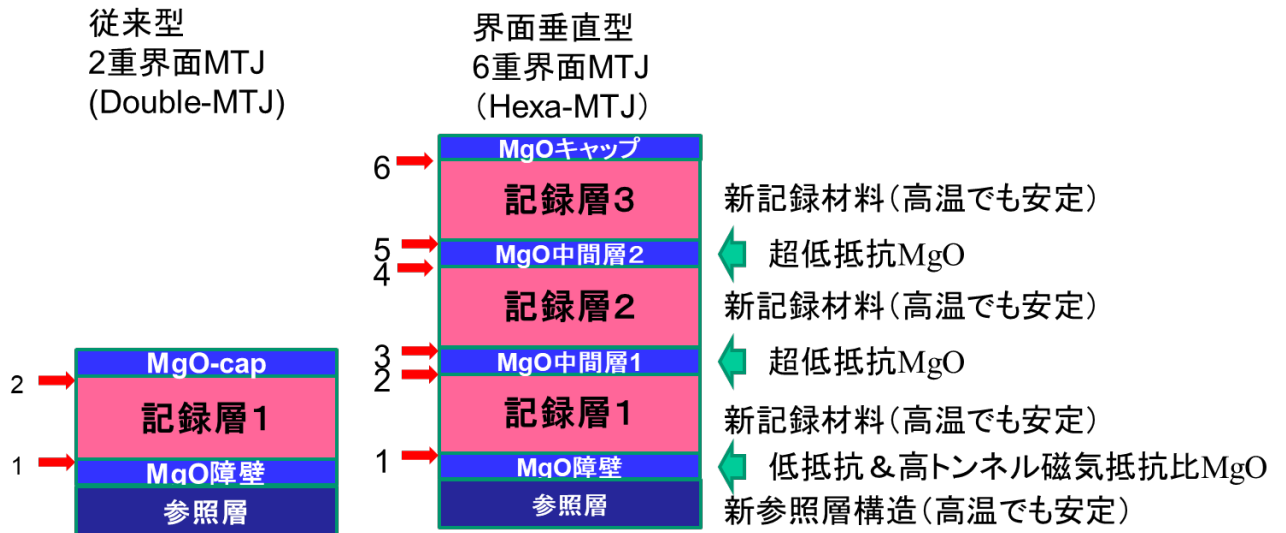
狩猟社会 (Society 1.0) 、農耕社会 (Society 2.0) 、工業社会 (Society 3.0) 、情報社会 (Society 4.0) に続く、新しい社会。サイバー空間 (仮想空間) とフィジカル空間 (現実空間) を高度に融合することで社会的な課題を解決するとされる、日本の「第5期科学技術基本計画」で提唱されたものです。

(注9) 界面垂直磁気異方性 (i-PMA)

Interfacial Perpendicular Magnetic Anisotropyの略。酸化マグネシウム層と直接接触する磁石層において生じる磁気異方性。磁石の方向を、積層界面に対して垂直方向に向ける働きがある。東北大学の同グループのメンバーによって2010年に発表された。¹⁾ 本効果を用

いた2重界面STT-MRAM素子は、²⁾ 全世界的に研究開発が展開されており、企業による実用化の発表も行われています。参考文献：1) S. Ikeda *et al.*, *Nature Mater.* 9, 721 (2010)、2) H. Sato *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* 105, 062403 (2014)を参照のこと。

【参考図】



6重界面技術を用いた高性能高密度AIマイコンのブレークスルー

- ① 極微細25nm素子でチップ組み立て工程の260°Cのはんだ付け工程に適合
- ② 6重界面MTJでマイコン用途のMRAMに必要な1千万回の書き換え耐性を達成

図1：本研究で開発したHexa-MTJ素子構造。低抵抗で高いTMR比、高い垂直磁気異方性、磁気特性の温度変化が小さいなどの優れた特性を持ちます。

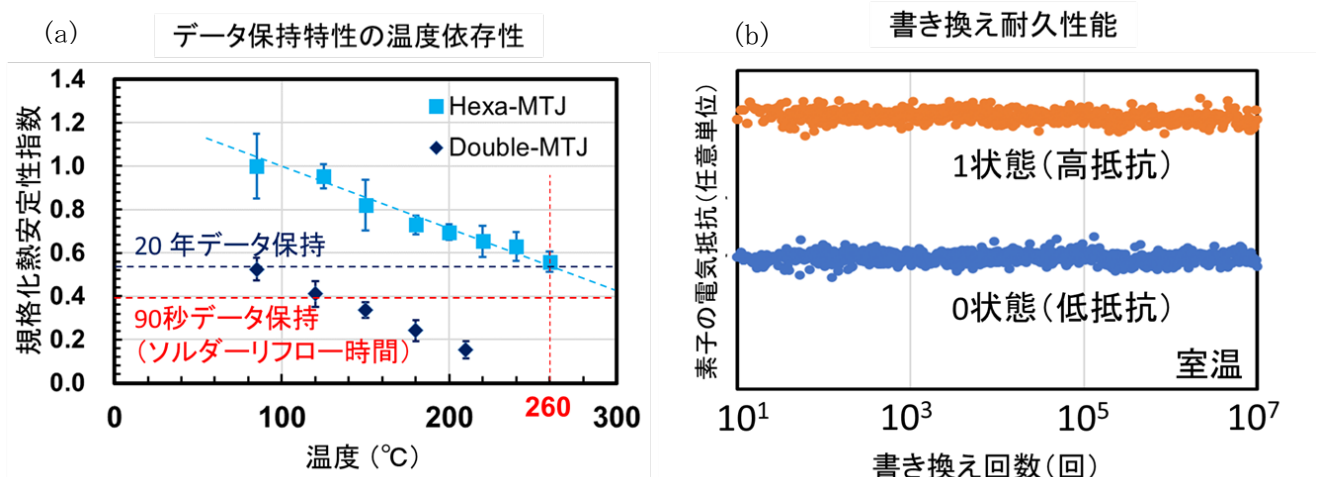


図2：(a)本研究で開発した新設計の6重界面MTJ素子と従来の2重界面MTJ素子における熱安定性指数 Δ (データ保持時間を決定するデバイス特性値)の温度依存性の比較。(b)6重界面MTJ素子面MTJ素子の書き換え回数。ソルダーリフロー耐性と10⁷以上の書

書き換え耐性を同時に達成することに世界で初めて成功しました。

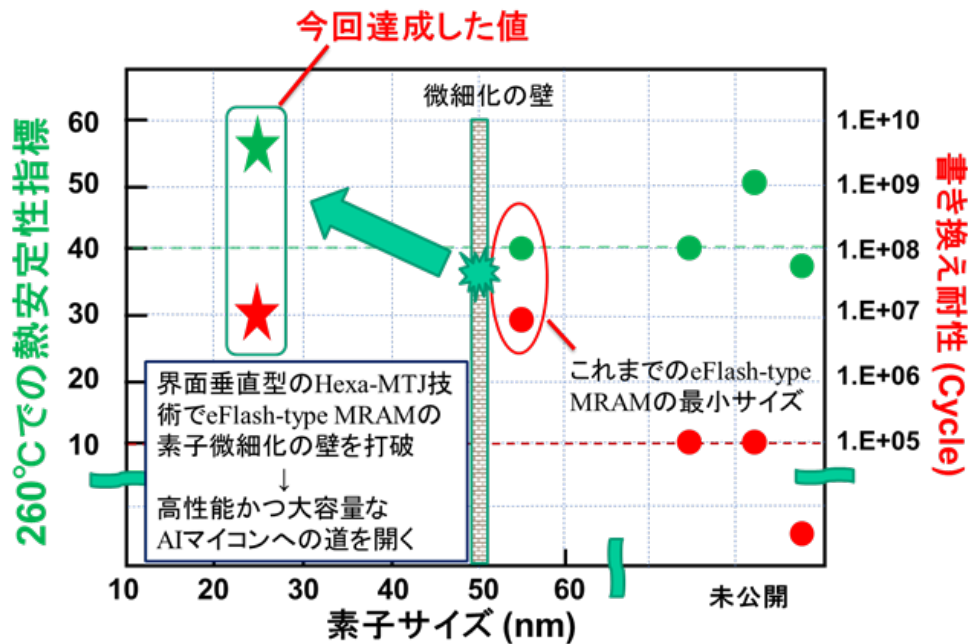


図3：本研究と従来の研究との比較。今回、6重界面MTJ素子によって、従来、50nm以下のMTJ素子では達成できなかった260℃のはんだ付け工程に必要な熱安定性と1千万回以上の書き換え耐性を25nmという微細なMTJで達成いたしました。この成果は高性能活大容量なAIマイコンへの道を開く画期的な成果です。

【論文情報】

| | |
|------------|--|
| Title | “25 nm iPMA-type Hexa-MTJ with solder reflow capability and endurance>10 ⁷ for eFlash-type MRAM” |
| Authors | H. Honjo , K. Nishioka, S. Miura, H. Naganuma, T. Watanabe, T. Nasuno, T. Tanigawa, Y. Noguchi, H. Inoue, M. Yasuhira, S. Ikeda, and T. Endoh |
| Conference | IEEE International Electron Device Meeting |
| DOI | 国際会議なので DOI 無し |