

IT イノベーションプログラム・エネルギーイノベーションプログラム
「高速不揮発メモリ機能技術開発」

事業原簿
【公開版】

担当部	独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 電子・材料・ナノテクノロジー部
-----	--

—目次—

概要	概要-1
プロジェクト用語集	プロジェクト用語集-1

I. 事業の位置付け・必要性について

1. NEDOの関与の必要性・制度への適合性	1
1.1 NEDOが関与することの意義	1
1.2 実施の効果予測(費用対効果)	3
2. 事業の背景・目的・位置づけ	3
2.1 事業の背景と目的	3
2.2 事業の位置付け	4

II. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標	6
2. 事業の計画内容	8
2.1 研究開発の内容	8
(1) 事業内容	8
(2) 研究開発スケジュール	10
(3) 開発事業費実績	11
2.2 研究開発の実施体制	12
2.3 研究の運営管理	13
2.4 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性	14
3. 情勢変化への対応	16
4. 中間評価結果への対応	16
5. 評価に関する事項	16

III. 研究開発成果について

1. 事業全体の成果	17
2. 研究開発項目毎の成果	19
2.1 不揮発アーキテクチャの研究開発	19
2.2 高速不揮発メモリの開発	41

IV. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

1. 他社・市場状況	53
2. 実用化・事業化の見通しについて	55

(添付資料)

- ・プロジェクト基本計画
- ・事前評価書
- ・論文リスト

概要

最終更新日

平成25年10月21日

プログラム名	IT イノベーションプログラム・エネルギーイノベーションプログラム				
プロジェクト名	高速不揮発メモリ機能技術開発	プロジェクト番号	P10002		
担当推進部/ 担当者	電子・情報技術開発部 主担当者 島津 高行 (平成22年4月～平成23年6月) 電子・材料・ナノテクノロジー部 主担当者 酒井 俊二 (平成23年7月～平成25年3月) 電子・材料・ナノテクノロジー部 主担当者 遠目塚 幸二 (平成25年4月～平成25年11月)				
0. 事業の概要	電源オフにしてもデータが保存され、かつ高速に動作する高速不揮発メモリを搭載したシステムの開発が革新的な超低消費電力情報機器の実現のために重要である。これらの要求に応えることのできる、高速性と不揮発性を両立したメモリの開発と不揮発アーキテクチャの研究開発を実施する。				
I. 事業の位置付け・必要性について	わが国のエネルギーセキュリティの確保や世界中で取り組みが行われている温室効果ガス削減運動への対応は、今後の我が国の発展に不可欠な課題である。一方産業の観点においては、我が国の製造業で重要な位置を占める半導体および電子機器産業競争力の維持向上もまた重要な課題である。このような問題意識のもと、本プロジェクトでは情報機器において看過できない問題となっているメモリ消費電力の抜本的削減を目的として、高速不揮発メモリを搭載する革新的な超低消費電力情報機器の実現を目的とする。これまで多種の不揮発性メモリが提案されたものの、現時点では大容量・高速性・高信頼性・低消費電力をはじめとする種々の要求を満たしたものはなく、既存のメモリ素子を置き換えるまでに至っていない。そのため新規素子の提案も含め、メモリ素子の開発が引き続き重要である。同時に、開発されるメモリ素子の動作特性を想定したうえで、効率の良いシステムが成立するアーキテクチャの仕様、およびその基本構成を明らかにすることが期待される。アーキテクチャの開発は、メモリ素子の開発成果として得られる特性を最大限に生かし、メモリ素子が早期にかつ広く普及するための基盤となるため、世界的にも研究開発が進められている。以上のように、本プロジェクトは、わが国の競争力の確保と、地球レベルでのエネルギー消費削減・低炭素化の両方に貢献すると期待され、本プロジェクト推進の必要性は高い。				
II. 研究開発マネジメントについて					
事業の目標	<ul style="list-style-type: none"> システムを部分的または全体的に不揮発化するために、現行メモリの代替となる高速不揮発メモリ素子を開発する。 基本ソフトウェアを含むデモシステムまたは仮想デモシステムによって消費電力を実質上1/10以下に削減できる構成を提示する。 				
事業の計画内容	主な実施事項	H22fy	H23fy	H24fy	H25fy
	高速不揮発メモリの開発	→			
	不揮発アーキテクチャの研究開発	→			
開発予算 (会計・勘定別に事業費の実績額を記載) (単位:百万円)	会計・勘定	H22fy	H23fy	H24fy	総額
	特別会計(需給)	267	225	107	599
	加速予算(成果普及費を含む)	29	20	0	49
	総予算額	296	245	107	648
契約の種類	委託 (負担率:100%)	48	49	49	146
	共同研究 (負担率:2/3)	248			248
	共同研究 (負担率:1/2)		196	58	254

開発体制	経産省担当原課	商務情報政策局 情報通信機器課
	委託先	①「高速不揮発メモリの開発」 共同研究先:エルピーダメモリ株式会社 共同実施先:(独)産業技術総合研究所、シャープ(株) ②「不揮発アーキテクチャの研究開発」 委託先:中央大学 (平成24年4月1日 東京大学から権利承継)
情勢変化への対応	(1)平成22年2月 ReRAM とフラッシュメモリの統合ウェアレベリングの開発加速 (2)平成23年2月 ReRAM 専用縦型 MOSトランジスタ(4F ²)構造プロセス開発およびデータ処理アルゴリズムの研究開発加速 (3)平成25年1月 東日本大震災影響による開発遅延対応のため、実施計画書更新および事業契約期間の延長(終了を平成25年2月28日から平成25年3月31日に変更)	
中間評価結果への対応	本プロジェクトは、実施期間が3年間であるため、中間評価は実施しない。	
評価に関する事項	事前評価	平成22年 2月実施 担当部 電子・情報技術開発部
	基本計画検討委員会	平成22年 2月実施 担当部 電子・情報技術開発部
	採択審査委員会	平成22年 6月実施 担当部 電子・情報技術開発部
	技術推進委員会	平成23年12月実施 担当部 電子・材料・ナノテクノロジー部
	事後評価	平成25年11月実施予定 担当部 電子・材料・ナノテクノロジー部
Ⅲ. 研究開発成果について	①高速不揮発メモリの開発 プロジェクトの目標を全て達成した。特に、書換え耐性は、不揮発アーキテクチャの研究開発と組み合わせることにより、ストレージクラスメモリに必要な装置寿命を達成することが出来た。 ②不揮発アーキテクチャの研究開発 消費電力を従来SSDアーキテクチャより実質1/10とすることが出来た。	
	投稿論文	「査読付き」26件、「その他」0件
	特許	①「出願済」35件、「登録」0件、「実施」0件(うち国際出願12件) ②「出願済」9件、「登録」0件、「実施」0件(うち国際出願3件)
	その他の外部発表(プレス発表等)	2012年1月24日 エルピーダメモリ株式会社よりプレスリリース。 「新メモリ(高速不揮発抵抗変化型メモリ、ReRAM)の開発に成功」 -64Mビットメモリセルアレイ動作を確認- 2012年6月12日 中央大学竹内研究室よりプレスリリース 「性能を11倍化、電力を93%削減、寿命を7倍化するReRAMとフラッシュメモリのハイブリッドSSD」

IV. 実用化・事業化の見通しについて	<p>ReRAM実用化のためには、更なるスイッチング素子の信頼性向上とばらつき低減が必要であり、プロジェクト終了後の現在も中規模アレイを使った改善活動を継続している。一方、大容量プロトチップは、回路設計を終わり、チップレベルでの動作確認をシミュレーションレベルで完了した。今後は、スイッチング素子の改善結果を反映させた大容量プロトチップの試作を行い、早期にサンプル出荷を行うことを目指す。</p>	
V. 基本計画に関する事項	作成時期	平成 22 年 3 月 作成
	変更履歴	<p>平成 22 年 3 月 制定。 平成 23 年 4 月 共同研究事業 NEDO 負担率を 2/3 から 1/2 に改訂。</p>

プロジェクト用語集

	用語	説明
C	CAM セル	【8Gb プロトチップローカル用語】 チップの各種設定や、リダンダンシ情報が書き込まれているメモリセル。電源投入時の CAM-Sequence でセル情報が読み出され、チップ内の該当するレジスタにその情報がセットされる。
	CAM-SWL	【8Gb プロトチップローカル用語】 CAM セルを制御するサブワード線。
	CMOS	p チャネルと n チャネルの金属酸化膜半導体・電界効果トランジスタ(MOSFET)を、相補うように接続した集積回路の構造。消費電力の少ない論理回路を実現でき、集積度を上げることが可能である。
D	DLTS	Deep Level Transient Spectroscopy の略。深い準位過渡分光と呼ばれ、ショットキー障壁の空乏層幅を電圧で変調してキャパシタンスを評価することにより、界面のトラップ準位を評価することができる。
	DRAM	Dynamic Random Access Memory の略。高速に読み出し・書き込みのアクセスが可能であるが電源が切られるとデータが消失する揮発性のメモリ
	DT 電流	Direct Tunneling 電流 絶縁膜中を電子または正孔がトンネル現象により透過することで流れる電流。
E	EELS	Electron Energy Loss Spectroscopy の略。電子エネルギー損失分光法と呼ばれ、薄片化した試料に入射した電子ビームが試料固体中の電子を励起して生じたエネルギー損失量に注目して固体中の元素の種類や化学結合状態を評価できる。
F	F 値	半導体プロセスにおける最小加工寸法値。DRAM においてはビット線の半ピッチ。例えば”F65”はビット線の線幅と線間隔が65nm を意味する。また、単位メモリセルの面積もこの F を用いて4F ² , 6F ² などと表現をし、同一プロセスにおけるメモリセル 1 個当たりの面積の比較に用いる。
	FeRAM	Ferroelectric Random Access Memory の略。強誘電体という、外部電界によって生じた電気分極が電界を切った後も零に戻らない物質を利用した不揮発性メモリである。電界の極性で電気分極が2つの状態をとり、これを情報記録に利用する。
G	GBL	【8Gb プロトチップローカル用語】 グローバルビット線
H	HRS	High Resistive State メモリ素子が高抵抗の状態
I	ICP	Inductively Coupled Plasma 誘導結合プラズマと呼ばれ、高周波数の変動磁場によってそのプラズマ内部に渦電流によるジュール熱を発生させることによって得られる高温のプラズマ

	I_{RESET}	RESET 電流。高抵抗状態へ変化させるに必要な書き込み電流。
	I_{SET}	SET 電流。低抵抗状態へ変化させるに必要な書き込み電流。
L	LRS	Low Resistive State メモリ素子が低抵抗の状態
M	MAT	【8Gb プロトチップローカル用語】 SWD(サブワードドライバ)と MUX(マルチプレクサ)で囲われたメモリアレイ。
	MRAM	Magnetic Random Access Memory の略。原子数個程度の厚さの絶縁体薄膜(トンネル障壁)を 2 層の磁性体薄膜(電極)で挟んだ構造を持ち、その磁性体電極の磁化方向を変化させることで抵抗値が変化するトンネル磁気抵抗(TMR)効果を応用したメモリ。微細加工時にエッチングを施しにくい低融点強磁性金属や貴金属からなる層構造を持つ。
P	PF 電流	Pool-Frenkel 電流 絶縁膜中に不純物や欠陥による順位が存在する場合、中性の捕獲サイト(トラップ)が電子と正イオンに分かれ、電子が伝導帯に熱的に放出される現象が生じる。このとき電子に対する正イオンのクーロンポテンシャル障壁が低下することで流れる電流。
	PRAM	Phase Change Random Access Memory の略。 DVD で用いられている GeSbTe からなる化合物をメモリ素子とし、メモリ素子に流れる電流により発生する発熱で、非晶質状態と結晶状態との相変化を起こすことを原理とする。非晶質状態は電氣的に高抵抗に、また結晶状態は低抵抗になることにより、データを記憶する。
R	RBS	Rutherford Backscattering Spectroscopy の略。ラザフォード後方散乱分析と呼ばれ、MeV (メガエレクトロンボルト)イオンを固体に入射して後方へ散乱されるイオンのエネルギーを分析して固体中の元素の種類や深さ方向の分布を評価する方法。
	REG	【8Gb プロトチップローカル用語】 Resistor 回路。WA(ライトアンプ)、SA(センスアンプ)、PB(ページバッファ)等で構成される。
	RESET	メモリ素子を高抵抗状態(HRS)に変化させること、高抵抗状態への書き込みもしくはプログラム動作。
	ReRAM	Resistance Random Access Memory の略。電圧(電流)の印加により生じる抵抗変化を利用したランダムアクセスメモリ。RRAM あるいは ReRAM と呼ばれている。
	R_{RESET}	書き込まれた HRS の抵抗値
	R_{SET}	書き込まれた LRS の抵抗値
S	SEG	【8Gb プロトチップローカル用語】 1つの COL 置換セグメントの Col 制御回路の単位。約 1k 台の Reg.回路及びその Control 回路で構成

	SET	メモリ素子を低抵抗状態(LRS)に変化させること、低抵抗状態への書き込みもしくはプログラム動作。
	SSD(ソリッド・ステート・ドライブ)	大容量のフラッシュメモリをハードディスクドライブの代わりに記憶媒体として用いる記憶装置。
	SIMS	Secondary Ion Mass Spectroscopy の略。二次イオン質量分析と呼ばれ、試料にイオンを照射し、試料表面からスパッタリング放出される二次イオンを質量分析することによって深さ方向の元素分布情報を得る分析手法。
	SPM	Scanning Probe Microscopy の略。走査プローブ顕微鏡法と呼ばれ、レーザーを照射したカンチレバーを試料表面で走査し、表面凹凸に依存して変化するレーザー位置を検出して表面形状観察を行う方法。
	STT-RAM	Spin Torque Transfer Random Access Memory の略。メモリ素子に電流を流し、スピントルク磁化反転という動作技術でメモリ動作を行う MRAM である。
T	TEM	Transmission Electron Microscopy の略。透過電子顕微鏡観察という観察手法であり、薄片化した試料に電子線を入射し、試料を透過した電子線を利用して観察を行う。
	TSC	Thermally Stimulated Current の略。熱刺激電流と呼ばれ、この電流の温度依存性を評価することによって、半導体内部や界面のトラップ準位の深さや密度を評価できる。
X	XPS	X-ray Photoelectron Spectroscopy の略。X 線光電子分光法と呼ばれ、X 線を固体表面に照射して発生する光電子を測定することにより、元素の種類や化学結合状態を評価できる。

あ行	誤り訂正(ECC)	データに符号誤り(エラー)が発生した場合に、エラーを検出・訂正する信号処理技術。
	ID リード	CPU から RRAM 等メモリに行う読み出し動作の一種。製品番号・仕様・容量などメモリの属性を CPU に読み出しを行う。
	ウェア・レベリング	フラッシュメモリなど、書き換えることができる回数が限られている記憶装置の使用寿命を延ばすための技術。書き換えが一つのメモリに集中せず、全てのメモリに均等に分散するように制御することで、媒体全体としての信頼性を向上させる。
か行	機能モデル	ハードウェアをモデル化したもの。複数の精度レベル(抽象度)を持つ。純粋なハードウェアの演算機能のみをモデル化したレベルから、ハードウェアのビット精度、サイクル精度を持つレベルがある。
	キャッシュメモリ	メモリシステム内の CPU、DRAM、ストレージ(SSD,HDD)などのデバイス間の性能差を埋めるためにデバイス間に挿入される高速なメモリ。キャッシュメモリにデータを一時的に蓄えることで、システムの高速度を図る。

	機能モデル	CPU、DRAM など LSI チップの動作、アクセス時間、消費電力等をソフトウェアで記述したモデル。機能モデルを組み合わせることで、ソフトウェア上で携帯電話などの機器を仮想的にシミュレーションできる。
	コードストレージ	プログラムを記憶し、実行可能なストレージデバイス
さ行	ストレージ	データを記憶するメモリ
	スケールング	半導体プロセスにおける最小加工寸法値 F の縮小のこと。F 値の縮小に伴い、デバイスの性能も変化する。
	セット動作	RRAM のメモリ動作のうち、高抵抗状態から、低抵抗状態へのスイッチング動作。
た行	縦型 MOS トランジスタ (3D トランジスタ)	これまでのトランジスタ(平面構造:プレーナ型)を 3 次元方向に作成したもの。
な行	2 元系遷移金属酸化物	HfO ₂ , Ta ₂ O ₅ , NiO, CoO などの酸化物
	NAND コントローラ	NAND フラッシュメモリを制御するためのコントロール LSI。誤り訂正 (ECC)、ウェア・レベリングなど NAND フラッシュメモリの信頼性向上制御を行う。
は行	バイポーラ動作	正と負の両極性の電圧で書込/消去を行うメモリ動作。例えば、書き込みを正電圧で行う場合は、消去を負電圧で行う。
	フォーミング(Forming)	メモリ素子をプログラム動作可能な状態にすること。ReRAM の場合はフィラメントの形成過程。
	フラッシュメモリ	データの一括消去を特徴とする、電氣的にデータの読み書きが可能で電源を切ってもデータが消えない半導体記憶装置。
	ファイルシステム	OS(オペレーティングシステム)内でファイル(データ)のメモリへの転送など、ファイル制御を行うソフトウェア
	ブレイクダウン	素子への電圧印加により、なだれ電流が発生した状態。
	プロセスシュリンク	微細加工プロセス技術の微細化を行うこと
ま行	メモリマネジメントユニット (MMU)	CPU 内のメモリコントローラ機能部
	メモリインタリーブ	メモリのデータ転送を高速化する技術の一つ。複数のメモリバンク・チャネルに同時並行で読み書きを行なうことにより高速化を行なう。
	メモリセル	データを記憶する単位素子
	メモリアレイ	メモリセルを格子状に複数配置したもの
や行	ユニポーラ動作	正または負の単一極性の電圧で書込/消去を行うメモリ動作。
ら行	論理アドレスと物理アドレス	OS(ファイルシステム)が指定する、ソフトウェア上でファイル(データ)が記憶されるメモリの番地が論理アドレス。RRAM・フラッシュメモリなど実際のメモリにファイル(データ)が記憶されている番地が物理アドレス。
	リセット動作	RRAM のメモリ動作のうち、低抵抗状態から、高抵抗状態へのスイッチング動作。
わ行	ワークメモリ	システムのメインメモリ(作業メモリ)

I.事業の位置付け・必要性について

1. NEDO の関与の必要性・制度への適合性

1.1 NEDO が関与することの意義

我が国のエネルギーセキュリティの確保や、世界中で取り組みが行われている温室効果ガス削減運動への対応は、今後の我が国の発展に不可欠な課題である。そのため、経済・社会活動を支えるあらゆる分野で、省エネルギー化を図る画期的な技術革新が求められている。特に、我が国をはじめとして先進国では経済・社会活動への情報機器の浸透が進んでおり、現行の生活水準を保ちつつ社会全体の消費電力の低減を図る上で、情報機器・システムの小電力化の貢献度は高い。また、近年経済発展が急速に進んでいるBRICsや今後経済発展が見込まれている諸国・地域においては、経済発展に伴い急速なIT化が進んでおり、パソコンや携帯電話といった情報機器の消費電力量が一層増大すると予想され、それら情報機器の大幅な低消費電力化が急務となる。さらに、これら諸国に続いて経済発展を目指す途上国においては、パソコンや携帯電話といった情報機器への普及ニーズは高いものの十分な電力インフラが整備されておらず、バッテリー動作に対応することが望ましい。以上より、極めて少ない電力で動作する事が可能な情報機器の実現が望まれている。これらの問題を解決するためには、現行の機器の内部構成を前提とした単体機器の省電力技術開発では不十分であり、革新的な超低消費電力情報機器の基盤となる技術開発が必要不可欠である。中でも、情報機器におけるメモリの消費電力の大きさは看過できないものであり、電源をオフにしてもデータが保存され、かつ高速に動作する高速不揮発メモリを搭載したシステムの開発が革新的な超低消費電力情報機器の実現に重要な要素となる。

このような動向を踏まえて本プロジェクトは、ITイノベーションプログラムおよびエネルギーイノベーションプログラムの一環として実施する。将来の情報通信分野における低炭素社会を実現する中核的・革新的技術であり、我が国エレクトロニクス産業の国際的優位性の確保と情報化社会のグローバル推進にとって大きな意義を持つものである。我が国が、新規メモリの開発技術力や産業知的財産権保有等で国際競争力の優位性がある中で、早期に研究開発を完了させ実用化、事業化を先駆的に投入することにより、先駆者利益を確保し、日本の半導体産業の活性化に繋がる技術である。(表 I-1)

しかしながら「高速不揮発メモリ機能技術」の実現及び実用化には素子技術単体の開発のみならず、メモリシステムアーキテクチャの再検討など、多岐にわたる側面からのアプローチが必要であり、民間単独では行うことは、技術開発リソース及び開発資金的リスクも高く、極めて困難である。従って、本プロジェクトは、産学官の英知を結集して開発を行う必要があることに加え、その関連産業の国際競争力強化、および国家的重点目標である高度情報化社会の実現に寄与するものであり、産業政策・情報政策の面からも極めて重要な課題であることから、国家プロジェクトとして NEDO が関与すべきものと考えられる。

(図 I-1)

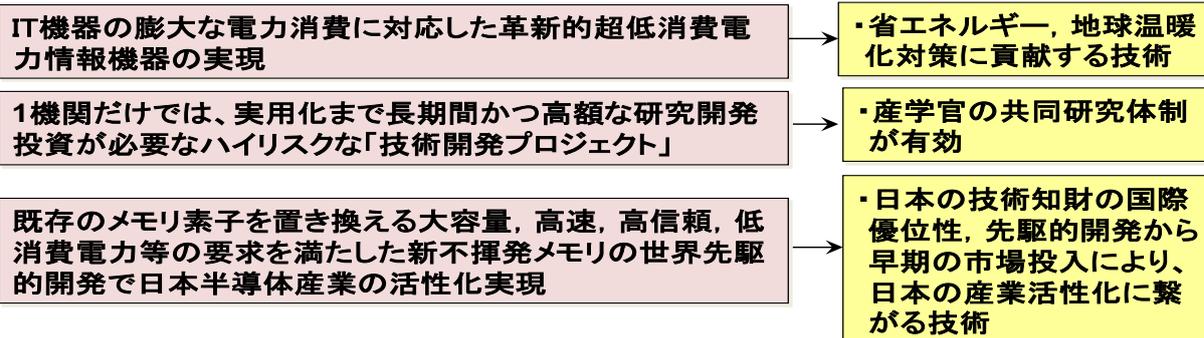
表 I-1 新不揮発メモリベンチマーク(2010年当時)

提案されている新不揮発メモリ比較表

	既存メモリ				新不揮発メモリ		
	混載SRAM	DRAM	Flash	FeRAM	STT-MRAM	PRAM	ReRAM
データ記憶	揮発	揮発	不揮発	不揮発	不揮発	不揮発	不揮発
データ保持時間	-	数μs	10Y	10Y	10Y	10Y	10Y
書換回数	10 ¹⁶	10 ¹⁶	10 ³ ~10 ⁶	10 ¹²	10 ¹⁶	10 ⁶	10 ⁶
書換電圧	<0.8V	>1.5V	>5V	<3V	<1V	<1V	<3V
アクセス時間	<5ns	<50ns	<50μs	<100ns	<5ns	<100ns	<10ns
セルサイズ	<150F ²	4F ²	2F ²	>15F ²	6~14F ²	4F ²	4F ²
用途	Cashレジスタ	主記憶メモリ	補助記憶SSD	ICカード マイコン ゲーム	Cash Main	SCM Storage	SCM Storage SOC
開発推進 企業国籍 及び競争力	1		韓国	日本	日本	日本	日本
	2		日本	米国	米国	韓国	韓国
	3		米国	韓国	韓国	米国	米国

NEDOが関与する意義

事業目的: 高速性と不揮発性を両立した新メモリの開発と
不揮発メモリデバイス機器アーキテクチャの実現



NEDOが関与すべき事業

図 I-1 NEDO が関与する意義

1.2 実施の効果予測(費用対効果)

本プロジェクトは、事業期間3年間、事業予算規模約10.4億円(内、NEDO 負担額は6.5億円)の計画で進められた。

本プロジェクトは、モバイルPCやスマートフォンなどのほか、常時オンが原則であるルータおよび企業内サーバーを待機電力がゼロであるノーマリー・オフ化することで、消費電力の低減を図るものである。これらの取り組みにより、高速不揮発メモリの実用化、普及が拡大されると、2020年におけるメモリ市場における不揮発メモリのシェアは10%に達し、不揮発メモリの製造チップ数は10億個を超えると予想される。これらから、2020年における省電力効果は85億kWh/年、CO₂削減効果は約350万トン/年となると予測される。また、2020年における不揮発メモリの市場創出規模は、約5,200億円が期待される。

(図 I-2)

※省電力量算出= 従来機器総消費電力量(2020年)×新不揮発メモリ搭載機器採用率(2020年:10%)
×新不揮発メモリ搭載機器の電力削減率(90%)

CO₂換算量は、CO₂=0.41kg/1kWhで換算

実施の効果予測(費用対効果)

事業総額10.4億円(NEDO負担分:6.5億円)に対し、下記予測効果

- 2020年における省電力量 85億kWh/年
- 2020年におけるCO₂削減効果 約350万トン/年
- 約5,200億円の経済効果創出(2020年度不揮発メモリ市場規模予測)

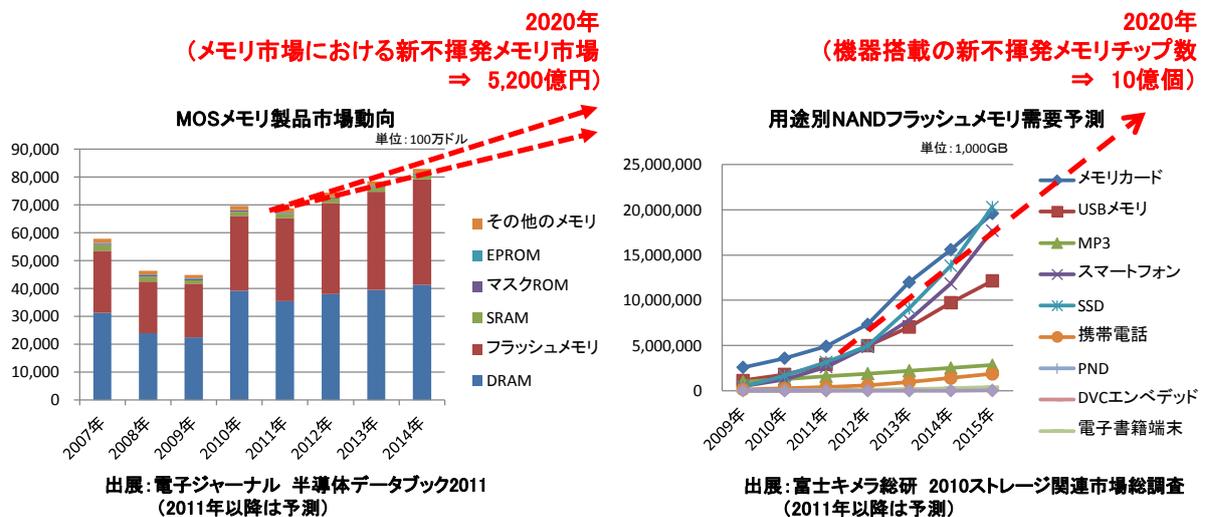


図 I-2 実施の効果予測(費用対効果)

2. 事業の背景・目的・位置付け

2.1 事業の背景と目的

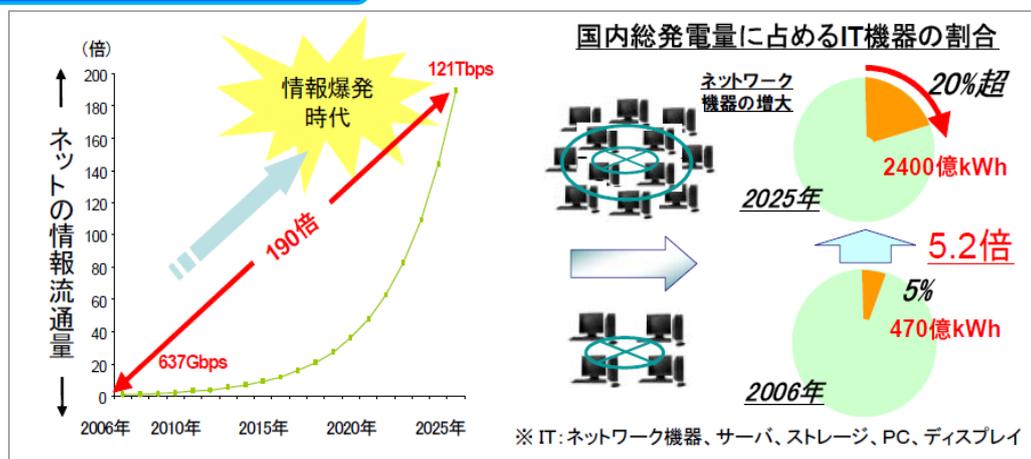
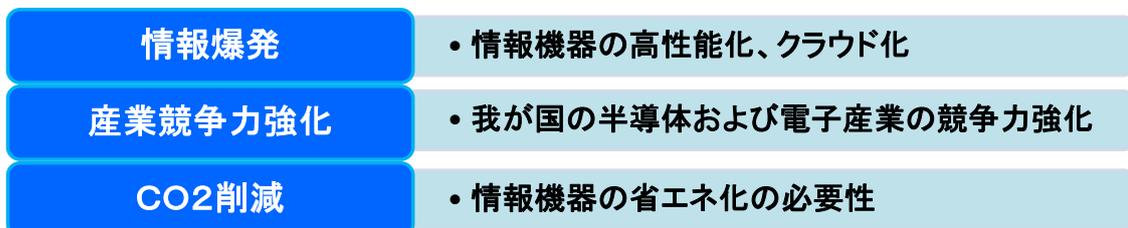
スマートグリッドやクラウドコンピューティングといった流れの中、ネットに流れる情報量の爆発的な増加、それに伴うIT機器の待機電力を含む消費電力の急激な増加も指摘されており、今後コンピュータが社会のあらゆる局面で活用されるためには、メンテナンスの観点・低炭素化の観点から更なる機器・システムの低消費電力化が求められる。電源を切っても情報を保持できる次世代不揮発性素子は、この点で大きな

可能性を秘めている。当該分野のデバイス開発において、我が国の技術的水準は最先端にあつて大きな発展の可能性を秘めているが、不揮発性素子やその周辺分野の更なる技術向上が必要である。他方でコンピュータアーキテクチャやソフトウェアの面では諸外国に比べて必ずしも研究開発が盛んでなく、早急な取り組みが求められる。

また、米国、欧州、韓国におけるそれぞれの企業や機関で、基礎研究から技術開発、実証研究等の取り組みが行われている。不揮発メモリに関する新規性を有した技術的成果が続々と登場しており、各国の開発競争が激化することが予想される。各国が自国の研究開発組織に数十億円規模の公的資金を投入するなど、戦略的な取り組みをおこなっていることを考慮すると、我が国においても、国際競争力強化の観点から、引き続き戦略的・重点的な支援が必要である。

NEDOにおいても、これまで半導体アプリケーションチッププロジェクト、スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクトや低炭素社会を実現する超低電圧デバイスプロジェクトにて、FeRAM、MRAM、PRAMなど様々なメモリの個別開発を行い、それぞれ、一定の成果を上げて来た。しかし一方で、開発した不揮発メモリが既存のシステムに部品として組み込まれるのみでなく、現行の揮発メモリが有する利便性をも併せもつ新規高速不揮発メモリを軸に、情報機器システム全体を再構成し、我が国が当該業界でイニシアティブを握れることが、国際競争力強化の観点からも喫緊の課題となつてきている。(図 I-3)

事業の社会的背景と目的



資料：経済産業省の情報政策について

ストレージ機器に対して革新的に高速かつ超低消費電力化の実現が重要課題

図 I-3 事業の社会的背景と目的

2.2 事業の位置付け

ネットなどに流れる情報量は年々爆発的に増加し、それを取り扱う情報技術もめざましい発展を見せている今日の社会では、情報・知識を、時間や場所の制約を受けず誰もが自由自在かつ安全に活用できる情報通信環境の実現が望まれている。また、2006年3月に閣議決定された「第3期科学技術基本計画」、および2010年6月に閣議決定された「新成長戦略」においても、世界をリードする「グリーン

イノベーション」を実現し、我が国の強みを活かし国際競争力強化のために注力すべき分野として、情報通信機器(IT 機器)・関連デバイス等の情報通信技術分野が挙げられている。そして、その「第3期科学技術基本計画」および「新成長戦略(基本方針)」に基づき、「IT イノベーションプログラム」として「半導体の微細化に係る革新的基盤技術の開発」等が具体的に展開された。

さらに、2011年8月に閣議決定された「第4期科学技術基本計画」でも「グリーンイノベーション」の継続が示され、直近では、「日本再興戦略」(2013年6月の閣議決定)で提示された「世界最高水準のIT 社会の実現」に向けて、「科学技術イノベーション総合戦略」(2013年6月の閣議決定)において、第4期科学技術基本計画と整合をとる形で、長期ビジョンと短期プログラムが設定された。これらの政策内容を支える基幹デバイスとなる半導体集積回路には、一層の高機能化、低消費電力化が求められている。(図 I-4)

政策上の位置付け

経済産業省 研究開発プログラム「ITイノベーションプログラム」および「エネルギーイノベーションプログラム」の1テーマとして実施

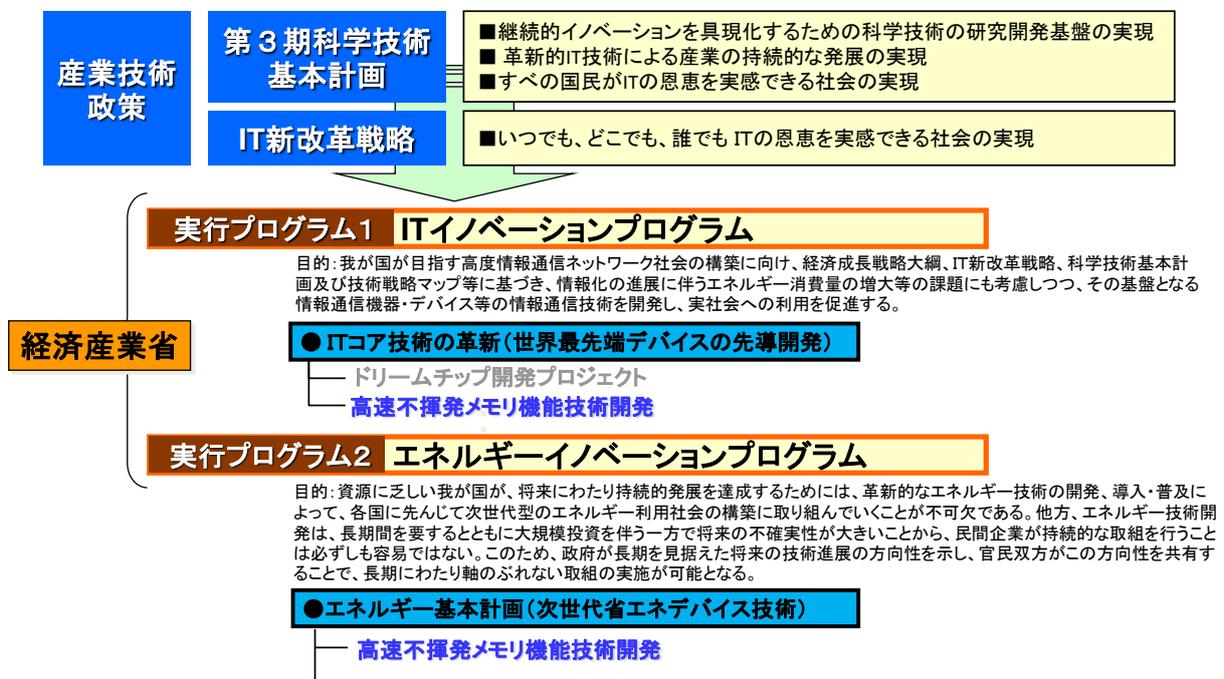


図 I-4 政策上の位置付け

また、NEDOの第2期中期計画(2008年度から2012年度)が示すように、我が国の「高度な情報通信社会の実現」、「IT産業の国際競争力の強化」のため、半導体分野を注力すべき基盤技術分野として捉えており、NEDOの目標にも合致する開発プロジェクトである。

2013年3月に策定された第3期中期計画においても、電子デバイス分野で「我が国の電子関連企業の競争力向上と新市場開拓のために、低消費電力、高速処理、高信頼性、設計期間の短縮化等のデバイス技術開発を推進する。」とされ、引き続き電子デバイスの半導体分野は注力すべき基盤技術分野として捉えている。(図 I-5)

NEDO第2期中期計画('08~12年)における位置付け

「高度な情報通信社会の実現」「IT産業の国際競争力の強化」のため
情報技術開発分野の半導体における技術開発の一環として実施

第3期中期計画(2013年-2017年)においても継承



図 I-5 NEDO 第2期中期計画における位置付け

II. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

我が国のエネルギーセキュリティの確保や、世界中で取り組みが行われている温室効果ガス削減運動への対応は、今後の我が国の発展に不可欠な課題である。そのため、経済・社会活動を支えるあらゆる分野で、省エネルギー化を図る画期的な技術革新が求められている。

特に、我が国をはじめとして先進国では経済・社会活動への情報機器の浸透が進んでおり、現行の生活水準を保ちつつ社会全体の消費電力の低減を図る上で、情報機器・システムの省電力化の貢献度は高い。また、現在経済発展が進んでいるBRICsや今後経済発展が見込まれている諸国・地域においては、経済発展に伴い急速なIT化が進んでおり、パソコンや携帯電話といった情報機器の消費電力量が一層増大すると予想され、情報機器の大幅な低消費電力化が必須となる。さらに、これら諸国に続いて経済発展を目指す途上国においては、パソコンや携帯電話といった情報機器への普及ニーズは高いものの十分な電力インフラが整備されておらず、バッテリー動作に対応することが望ましい。以上より、極めて少ない電力で動作する情報機器の実現が望まれている。

これらの問題を解決するためには、現行の機器の内部構成を前提とした単体機器の省電力技術開発では不十分であり、革新的な超低消費電力情報機器の基盤となる技術開発が必要不可欠である。中でも、情報機器におけるメモリの消費電力の大きさは看過できないものであり、電源をオフにしてもデータが保存され、かつ高速に動作する高速不揮発メモリを搭載したシステムの開発が革新的な超低消費電力情報機器の実現に重要な要素となる。

このような動向を踏まえて本プロジェクトではITイノベーションプログラムおよびエネルギー

ギーイノベーションプログラムの一環として実施することとし、以下の2点を確立することを目的とする。

- a) 現行の揮発メモリに比較してより高速かつ大幅に消費電力を低減することが可能な不揮発メモリの物理的な基本構成を確立する。
- b) 同メモリが実用レベルに達した際の特性を予期して、その不揮発メモリがCPUをはじめとする周囲の素子間の整合をとりつつ、全体として機能するのに必要な項目を明らかにし、それらの洗い出された項目に対応して必要なシステムの構成を提示することにより、低消費電力かつ有効なモデル機器の基本構成を確立する。

また、これまで揮発メモリの使用を前提として進められてきた情報機器が高速不揮発メモリの使用を前提とした場合、情報機器の設計手法は大きく変化することが予想される。このような設計手法は、当該メモリを用いて新規なシステムの設計に携わろうとする関係者間で、広く共有または活用されるべきものであり、その基盤となる知識の蓄積を図る。

研究開発項目① 「高速不揮発メモリの開発」 【共同研究事業】(NEDO負担率：1/2)

<達成目標>

- (1) 書き換え耐性
DRAMの書き込み耐性以上 ($\geq 10^{16}$ 程度)
または、研究開発項目②不揮発アーキテクチャの研究開発との組み合わせにおいて実質的に適用製品の装置寿命と同等であること
- (2) 書き込み電流
50 μ A以下/セル
- (3) 容量
1 Gbit 以上、ないし1 Gbit への拡張可能性の根拠を示すこと
- (4) 読み書き時間
混載メモリマクロとして：ランダム3 nsec 以下
(実用化目標10 ns 以下：off chip)
- (5) 動作温度上下限
0～55℃で動作
- (6) そのほか、民生用情報機器への適用時に致命的な制約がないこと

<目標の根拠>

- (1) 書き換え耐性
研究開発項目②不揮発アーキテクチャの仕様から、適用製品(SCM想定)の装置寿命を満足するための書き換え耐性仕様を設定。
- (2) 書き込み電流
現行のDRAMと同等の書き込み電流(10～50 μ A)より設定。
- (3) 容量
拡張性の根拠としての目標設定。
- (4) 読み書き時間
書き込み時間単独の目標として、現行技術レベルの更なる高速化を目指した目標として設定。
- (5) 動作温度上下限
情報通信機器での使用を前提としての目標設定。
- (6) そのほか、民生用情報機器への適用時に致命的な制約がないこと
適用製品(SCM想定)にコスト、標準規格等に課題無きことを設定

研究開発項目②「不揮発アーキテクチャの研究開発」

【委託事業】(NEDO負担率:100%)

<達成目標>

研究開発項目①で得られたメモリを用い、現行のアーキテクチャの消費電力に対し、実質上1/10以下に削減する不揮発アーキテクチャのいずれかまたは全部に関する構成事例を提示する。

<目標の根拠>

新たな価値としてノーマリー・オフのシステムを実現するためには、メモリの研究だけではなく、その不揮発メモリを実際に用いた場合に構成される現実的な不揮発アーキテクチャの検討を同時並行して実施し実現可能性を提示する必要がある。

適用製品の普及における省電力及びCO₂削減効果が、2020年の期待効果予測(省電力効果:85億kWh/年、CO₂削減効果:約350万トン/年)を実現するための必要要件。

2. 事業の計画内容

2.1 研究開発の内容

(1) 事業内容

研究開発項目①「高速不揮発メモリの開発」

現行の揮発メモリに比較してより高速かつ大幅に消費電力を低減することが可能な不揮発メモリの物理的な基本構成を確立する。過去の取り組みとその評価で、半導体アプリケーションチッププロジェクトやスピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクトにおいて、FeRAM、MRAM、ReRAMなど様々なメモリの個別開発を行い、それぞれ、一定の成果を上げている。しかし一方で、開発した不揮発メモリが既存のシステムに部品として組み込まれるのみでなく、現行の揮発メモリが有する利便性をも併せもつ新規高速不揮発メモリを軸に、情報機器システム全体を再構成し、我が国が当該業界でイニシアティブを握れることが、国際競争力強化の観点からも喫緊の課題となってきた。これまでのメモリ関連プロジェクトの成果も積極的に活用し、新しいアーキテクチャ創出を視野に入れた取り組みが重要となってきた。

本技術開発では、平成24年度までに1Gbit以上の容量を持つ高速な不揮発メモリ(ReRAM)を開発することを目標とする。不揮発メモリ(ReRAM)は、(図 II-1)に示すように、読み出し/書き込み速度に優れ、微細化/大容量化にも有望であることから、メモリ市場の中で導入を目指す階層として考えるSCM(ストレージクラスメモリ)に採用され、大幅なビットコスト低減に寄与出来るものとする。

不揮発メモリの特徴と適用用途

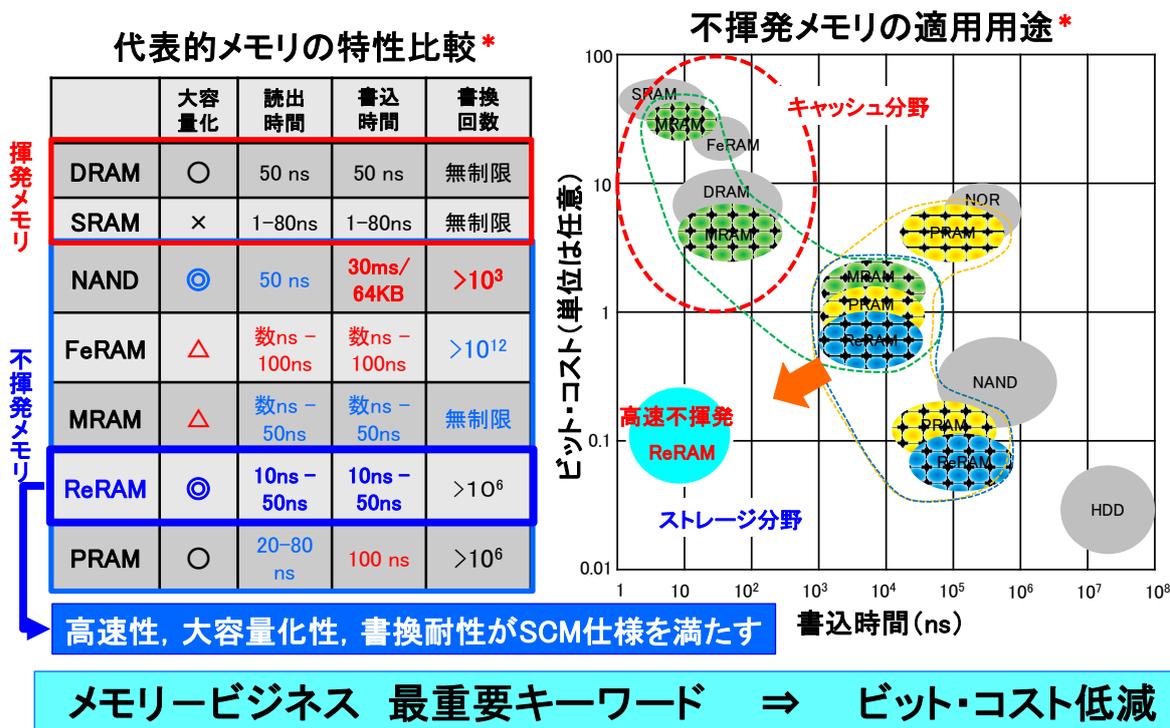


図 II-1 不揮発メモリの特徴と適用用途

研究開発項目②「不揮発アーキテクチャの研究開発」

従来のメモリ階層は、CPUの論理演算処理部へのデータ供給能力向上を目的として設計されてきている。すなわち、集積度の向上のみを頼りに、論理演算処理部の近くに搭載するメモリを大容量化するに對してメモリを大容量かつ高速に見せるためのメモリ階層最適化が行われてきた。搭載可能なキャッシュメモリをできるだけ論理演算処理部の近くに配置し、そして多階層化することで高速性も実現して実装する手法はその典型である。しかし、例えばキャッシュメモリに限っても、多くのアクセスされない情報が保持されていることが10年以上前より指摘されており、揮発メモリが消費するスタティック電力の大部分は不要な情報の保持に費やされている。これは、揮発メモリで構成されているキャッシュメモリを、スタティック電力を消費しない不揮発メモリで構成することで消費電力を大きく削減できる可能性を示唆している。しかしながら、不揮発メモリには揮発メモリに比べてアクセス速度が遅く、アクセス時(特に書き込み時)の消費エネルギーが大きいという短所もある。したがって、揮発メモリと不揮発メモリの長所をお互いに補完しあえる新しいメモリ階層の構築が必要となる。また、DRAMとStorageの間には性能的に大きなギャップがあるため、従来のメモリ階層においては、上位メモリ階層からDRAMで構成される主記憶まではハードウェアによる制御、Storageを含む主記憶より下の階層は基本ソフトウェア(オペレーティングシステム)が制御している。しかし、DRAMとStorageの間に不揮発性素子を導入する場合には、メモリ階層間の性能差が縮小される傾向になるため、ハードウェアとソフトウェアのどちらがメモリ階層のどの範囲を司るのか、という点に関して再検討する必要がある。本技術開発では、上記2つの点を勘案して、揮発メモリと不揮発メモリが混在し、その長所を発揮できる新しいメモリ階層の検討・提案を行う。

(2) 研究開発スケジュール

以降に各研究開発のスケジュールを示す

① 高速不揮発メモリの開発 (主担当:エルピーダメモリ株式会社)

事業項目	H22 年度		H23 年度		H24 年度		H25 年度
	上期	下期	上期	下期	上期	下期	上期
① -1 単体メモリセル評価	→		→		→		
	i)プロセス条件最適化 書換電流 $\leq 50 \mu A$ ii)スケールリング予測 1Gbit以上のスケールリング性		i) ii)特性改善		i)特性改善		
	v)ナノスケール評価		v)特性改善		ii)ナノスケール評価 解析・改善		
							→ 特性改善
① -2-1 中規模アレイ評価 チップ開発評価	→		→		→		
	チップ設計		アレイ動作確認		iii)基本特性確認 iv)メモリ素子信頼性の確認 書込耐性改善方法の見極め 確認と改善		
	iii)信頼度データ取得 iv)ばらつき抽出 vi)安定性要因分析 vii)書込耐性 $\geq 10^{16}$ のための条件 見極め		物理解析・改善				
							→ 試作 評価・信頼性
① -2-2 中規模アレイ評価 縦MOSアレイ TEG開発			→		→		
			v)チップ設計 40nm 縦 MOS アレイ TEG		v)プロセス開発・試作		
					vi)アレイ特性(書込 時間・信頼性)評価		
							→ 試作 評価・信頼性
① -3 大容量プロトタイプ チップ設計			→		→		
			viii)インタフェース回路・メモリ 制御回路検討・設計				
			iv)チップ設計		iv)チップ設計・回路シ ミュレーションによる動 作確認		
							→ チップ設計 完了

② 不揮発アーキテクチャの研究開発(主担当:学校法人中央大学)

事業項目	H22 年度		H23 年度		H24 年度		H25 年度
	上期	下期	上期	下期	上期	下期	上期
② 不揮発アーキテクチャの研究開発	<p>1)メモリシステム開発プラットフォームの構築、 2)メモリ特性(目標仕様)を用いたメモリモデルの開発と 単体メモリデバイス開発へのフィードバック</p>		<p>1)メモリ特性(実チップデータ)を用いたメモリシステムの検討・最適化 2)プロトタイプチップのデバイス仕様の決定</p>		<p>1) 仮想デモシステムを用いたフラッシュメモリへの書込を極力低減し、ReRAM に書込を代替するアルゴリズムの開発</p>		

(3)開発事業費実績

(単位:百万円)

事業項目	契約	区分	H22 年度	H23 年度	H24 年度	総事業費
高速不揮発メモリの開発	共同研究契約 (NEDO 負担率: H22=2/3, H23-24=1/2)	契約額	373	427	116	916
		NEDO 負担金額	249	216	58	523
不揮発アーキテクチャの研究開発	委託契約 (NEDO 負担率: 100%)	契約額	48	29	49	126
		NEDO 負担金額	48	29	49	126
事業費総計			421	456	165	1,042
NEDO負担額総計			297	245	107	649

2.3 研究の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有するNEDOは、経済産業省及び研究開発実施者と密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的及び目標並びに本研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。具体的には、必要に応じて設置される技術検討委員会等における外部有識者の意見を運営管理に反映させるとともに、産業競争力の強化と知的財産を含む研究成果の普及を両立させるための標準化活動、分野技術のベンチマーク活動を含めた取り組みを実施する。

【委託元(NEDO)】

平成22年 1月	ヒアリング
平成22年 2月	事前評価
平成22年 2月	基本計画検討委員会
平成22年 3月	パブリックコメント募集及び結果報告
平成22年 6月	実施者の採択審査委員会
平成23年 2月	本研究開発加速(開発成果創出促進制度適用)
平成23年12月	技術推進委員会
平成24年 2月	本研究開発加速(開発成果創出促進制度適用)
平成25年 1月	高速不揮発メモリ開発プロジェクトの契約期間延長
平成25年11月	事後評価分科会

【委託先(各実施者)】

平成22年 2月	基本計画決定
平成22年 4月	実施方針決定
平成22年10月	実施計画決定
平成22年12月	実施方針修正
平成23年 4月	実施計画変更
平成23年 8月	平成 22 年度中間年報
平成24年 1月	実施方針修正
平成24年 4月	実施計画変更
平成24年 6月	平成 23 年度中間年報
平成24年12月	実施計画変更
平成25年 4月	平成 22 年～24 年度実績報告
平成25年 5月	平成 22 年～24 年度成果報告

・平成 23 年12月 技術推進委員会実施

研究開発の設定目標に対する進捗度、実用化・事業化見通しを確認したうえで、委員の専門性を活かし目標達成のためのコメントを頂いた。技術推進委員会での主な指摘事項及びその対応について下表に示す。(表Ⅱ-1)

表Ⅱ-1 技術推進委員会(平成23年12月20日実施)での指摘事項及び対応まとめ

開発項目	指摘事項	対応
高速不揮発メモリ開発	書換耐性の目標達成指針を明確にすべき	製品開発ターゲットをSCMとして、アーキテクチャとの組み合わせでの目標設定($\geq 10^5$)し、書換耐性が $\geq 10^6$ の研究成果を得た。(研究成果に反映)
	動作メカニズムの解明と信頼性の確認をすべき	測定結果と物理分析結果を基にした動作モデルの構築とそれに基づく改善を推進し、フィールドリリース可能レベルの信頼性を確認した。(研究成果に反映)
	On/Off 比向上、抵抗値差マージン拡大策を検討すべき	材料・構造の最適化、単体メモリセルを使った短TAT評価を推進し On/Off 比向上、抵抗値差マージン拡大を図った。(研究成果に反映)
	他不揮発メモリのベンチマークと勝ち残り戦略を検討すべき	高速書き込みの利点を活かして最適な市場に早期参入するべく、他不揮発メモリベンチマークを行い戦略策定した(実用化・事業化の見通しに反映)
不揮発アーキテクチャの研究開発	波及効果の説明をすべき	SCMのみならず、エンタープライズサーバー、クラウドストレージなど様々なアプリケーションへ展開した。
	ReRAM 特有のデバイス特性を反映した回路設計技術の階層への貢献を説明すべき	システムレベルでの性能を劣化させることなく、低電力・高信頼性を実現する書き込み・センス方式を開発推進した。

2.4 研究開発成果の実用化, 事業化に向けたマネジメントの妥当性

本研究開発の期間は、平成22年度から平成24年度までの3年間。

研究成果の実用化, 事業化に向けて、委託元(NEDO)と委託先(各実施者)の合同による会議を実施し、研究開発の進捗チェックとともに、各実施者の実施しているテーマの実用化, 事業化スケジュールを確認し議論した。(共同研究/委託研究契約書に付す研究成果の利用・普及条項の履行義務)

平成23年 9月	開発進捗全体会議(1回)
平成23年10月	開発進捗全体会議(2回)
平成24年 8月	開発進捗全体会議(3回)
平成24年 9月	開発進捗全体会議(4回)
平成25年 1月	開発進捗全体会議(5回)
平成25年 3月	開発進捗全体会議(6回)
平成25年 6月	開発結果フォロー会議(1回)
平成25年 8月	開発結果フォロー会議(2回)
平成25年10月	開発結果フォロー会議(3回)

また、普及活動として、主に下記を実施した。

- 平成22年7月のNEDOプレスリリースにおいて
「新規メモリ開発プロジェクトをスタート-携帯情報機器の消費電力を1/10以下に-」を発表した。
- 平成23年10月のCEATEC2011(Green IT Symposium)において
「ポストムーアを目指したNEDO戦略」と題した公開シンポジウム開催した。
各実施者の実用化の利用先を想定した外部有識者の招待講演を加え、併設した意見交換会も含めて、実用化, 事業化に向けての外部聴取を実施した。

知財マネジメントに関しては、図 II-3 に示すように研究テーマの知財に関して、実施者間との運用ルールを規定し運営した。

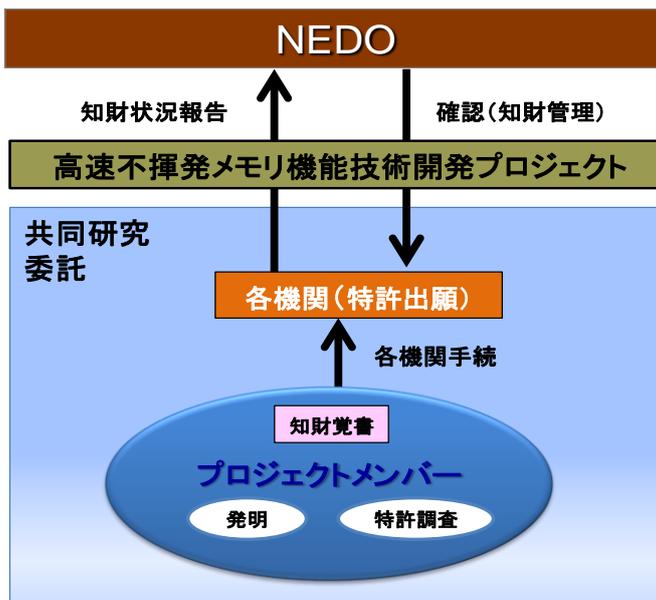
◆ 参加各社の実用化・事業化をサポートするために、共同研究契約により研究開発成果物の利用に関するルールを明確化

○バイドール遵守事項(約款第31条第3項)の条件の遵守を約定することにより、委託研究開発から派生した発明等に係る知的財産権はすべて受託者に帰属(成果報告書、これに類する著作権を除く。)

- ①産業財産権等の出願・登録等を行った場合は NEDO に報告すること
 - ②国の要請に応じて、公共利益のために特に必要がある場合には、NEDO に無償で許諾すること
 - ③正当な理由なく相当期間活用していない場合において、国の要請に応じ NEDO が活用を促進するために特に必要なときは、第三者に許諾すること
 - ④第三者に移転、専用実施権の設定等する場合には、NEDO の事前承認を受けること
 - ⑤ NEDO が実施する知的財産権の利用状況調査(バイドール調査)に対して回答すること(バイドール調査への協力義務化)
- 但し、委託先が、①～⑤のいずれかを満たしておらず、かつ正当な理由が無いと NEDO が認める場合は、NEDO に無償譲渡しなければならない。

知財マネジメント戦略

・ 事業強化のため実施者による知財の創出/権利化を推進する体制をバイドール適用で構築
 ・ プロジェクト研究開発活動で創出された知的財産の取り扱いを規定し推進



◆ 参加各社の実用化・事業化をサポートするために、共同研究契約により研究開発成果物の利用に関するルールを明確化

○バイドール遵守事項(約款第31条第3項)の条件の遵守を約定することにより、委託研究開発から派生した発明等に係る知的財産権はすべて受託者に帰属(成果報告書、これに類する著作権を除く。)

- ①産業財産権等の出願・登録等を行った場合は NEDO に報告すること
- ②国の要請に応じて、公共利益のために特に必要がある場合には、NEDO に無償で許諾すること
- ③正当な理由なく相当期間活用していない場合において、国の要請に応じ NEDO が活用を促進するために特に必要なときは、第三者に許諾すること
- ④第三者に移転、専用実施権の設定等する場合には、NEDO の事前承認を受けること
- ⑤ NEDO が実施する知的財産権の利用状況調査(バイドール調査)に対して回答すること(バイドール調査への協力義務化)

但し、委託先が、①～⑤のいずれかを満たしておらず、かつ正当な理由が無いと NEDO が認める場合は、NEDO に無償譲渡しなければならない。

図 II-3 本プロジェクトの知財マネジメント推進体制

3. 情勢変化への対応

本プロジェクトでは、研究開発の進捗と外部の情勢変化とを照らし合わせ、実施計画の変更、修正を行った。

(1) 平成 22 年度 ②不揮発アーキテクチャの研究開発において ReRAM とフラッシュメモリの統合ウエアレベリングの開発加速予算投入(平成 23年2月)

新アーキテクチャの検討をより一層推し進め、ReRAM とフラッシュメモリの統合ウエアレベリングの開発を行った。提案するメモリシステムでは、ReRAM とフラッシュメモリの両方に対して書き換え回数の平滑化(ウエアレベリング)が必要であった。従来のフラッシュメモリに対するウエアレベリングでは、各種テーブル(論物変換テーブル・不良ブロック管理テーブル・アクセス回数管理テーブル)を参照することで書き換え回数の平滑化を行った。アクセスサイズがフラッシュメモリに比べて小さい ReRAM では、テーブルのサイズが増大し、テーブルを格納するための RAM の容量が数ギガバイトまで増大し、それは電力・コストの増大を招いた。そこで、新メモリアーキテクチャに最適な統合ウエアレベリングを開発した。ReRAM に対して循環型アドレス変換システムを導入することで、RAM 容量を大幅に低減が可能となった。RAM 容量の削減により、新メモリシステムの電力及びコストの低減が可能となった。以上により、平成 23 年度に予定していた仮想デモシステムの開発を約 0.5 年加速することができた。

(2) 平成 23 年度 ②不揮発アーキテクチャの研究開発において ReRAM 専用縦型 MOS トランジスタ(4F²)構造プロセス開発およびデータ処理アルゴリズムの開発加速予算投入(平成 24年2月)

当初計画では、最終的な 40nm 8Gbit 3次元セル構造(4F²)の ReRAM プロトタイプチップを開発・評価するに当たり、既存の 40nm 3次元セル構造(4F²)DRAM プロセスを採用予定であったが、ReRAM 固有のプロセス課題があることが判り、技術推進委員会での評価を踏まえ、2 次元セル(6F²)構造チップの開発と平行して ReRAM 専用の縦型 MOS トランジスタ構造(4F²)の 40nm 1Gbit 中規模アレイ TEG を立ち上げる事が重要であると判断し、研究開発の加速を実行した。

また、より実用化に向けた ReRAM チップに対応するため、不揮発アーキテクチャの研究開発においても、その特性を評価し、最適にデータがやりとり出来るためのデータ処理アルゴリズムの開発を追加することとした。

(3) 平成 24 年度 東日本大震災影響により①高速不揮発メモリの開発遅延対応として、エルピーダメモリ株式会社との委託事業契約のプロジェクト期間を1ヶ月間延長(平成 25年1月)

プロジェクト終了日を平成25年2月28日終了から平成25年3月30日終了に延長変更し、研究成果の遅れを解消した。

4. 中間評価結果への対応

本プロジェクトは、実施期間が3年間の中規模プロジェクトであるため、中間評価は実施しない。

5. 評価に関する事項

NEDO 技術開発機構は、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果に対する技術的意義ならびに将来の日本の産業への波及効果等について、外部有識者による本研究開発の技術評価を開催した。評価結果を踏まえてプロジェクトの各項目に対する見直し等を迅速に行った。

平成 22 年 2 月 事前評価実施 (担当部 電子・情報技術開発部)

平成 22 年 2 月 基本計画検討委員会実施 (担当部 電子・情報技術開発部)

平成 22 年 6 月 採択審査委員会実施 (担当部 電子・情報技術開発部)

平成 23 年12月 技術推進委員会実施 (担当部 電子・材料・ナノテクノロジー部)

平成 25 年11月 事後評価実施予定 (担当部 電子・材料・ナノテクノロジー部)

Ⅲ. 研究開発成果について

1. 事業全体の成果

Mobile機器やTablet端末、家庭内でのAV機器や、Enterpriseなど全てがクラウドの中で接続されるようになり、ストレージデータ・サービスの共用化が本格的に進み始めた。しかしながら、クラウド化が進むにつれ、データセンターのシステム拡大による記憶媒体の容量増大に伴い、現状、ハードディスク(HDD)を用いた場合、その発熱量の増大、それに伴う冷却装置・設備に係る費用、設置面積、電力消費が増大する。例えば、2020年の2ギガIOP/秒のデータ処理を実現するためには、HDDの場合、必要台数:500万台、設置面積:16,500 ft²、消費電力:22メガワット、となり(IBMデータ)膨大なエネルギーが全世界で必要になる。

そこで、エコシステムとしてのHDDに変わる記憶媒体として、低電力・高性能な不揮発半導体メモリ(NAND FLASH)を適用した固体ストレージディスク(SSD: Solid State Disk)が提案された。現在では既にEnterprise向けシステムにおいて稼働しており、その大きな効果により、システムへの導入が加速的に進行している状況である。

IHS iSuppliが発表したりポートによると、世界のSSD出荷数は2012年の3,900万ユニットから、2013年は2.12倍の8,300万ユニットへと増加する見込みだという。SSD出荷数はその後も成長を続け、2016年には2億3,900万ユニットの出荷が予想されており、HDDの出荷台数の40%となる見込みであるとしている。

このように、益々その必要性が重要となるSSDにとって、NAND FLASHの信頼性・高速性のネックが顕在化してきており、より高性能なストレージ・クラス・メモリ(SCM)が注目されてきた。特に、DRAMキャッシュの代替として、高速・不揮発を有するメモリの開発には各社取り組みを行っているところである。

しかし、いずれの研究においても、未だ実用化までには至っていない状況である。

実用化のためには、メモリ素子が既存のシステムに組み込まれるのみでなく、新規メモリ素子を軸に、システム全体を再構成していくことが必要となっている。

我々は、低消費電力のシステムを構成すべく、高速不揮発メモリの実現を目指すこと、その候補として、多くの学会でも相次いで成果が報告されている遷移金属酸化物を用いたReRAM技術に着目した。

ReRAM技術に関して、すでに多くの実績および解析のKnow Howを有するシャープ株式会社およびデバイスの基本特性・理論で多くの実績を誇る産業技術総合研究所と、エルピーダメモリの製造技術とを合わせ、3社による共同開発により、高速不揮発メモリのデバイスの材料・構造・特性の最適化を計りメモリ素子の開発を実施。また、研究項目の一つである中央大学の研究成果を元にし、最適なシステム構成の開発と実現すべきSCMの基本仕様検討、プロトタイプチップの設計を行い、今後、エコシステムへのインパクトを測定する予定である。

本事業におけるH22～H24年度までの達成の状況を以下の表1-1にまとめる。

研究開発項目②「不揮発アーキテクチャの研究開発」と組み合わせることにより、ストレージクラスメモリの実用化に必要なデバイス目標・特性を得ることができた。加えて、DRAM インタフェースを用いた場合と同等の高速性を得つつも、従来のメモリシステムに比較し大幅に電力削減を実現できることを示した。

本事業においては、数々の困難な場面に直面し、共同実施者との連携・多大なご協力を基に研究を進めていった。その中でも、これまで難航していた物理解析において、現象の理解・特性改善へ繋がる一つ有用な実験方法が見出され、メモリ素子の特性改善へ繋げることができたことは、本事業での大きな成果の一つであり、競合他社・研究機関以上の成果を得ることができたのではないだろうか。

今後、製品化を目指して、H25年度以降もエルピーダメモリ独自に研究開発を進め、ReRAM製品の实用化を目指していくものである。

表 1-1 事業全体の成果

①高速不揮発メモリの開発

目標	成果	達成度	今後の課題
1 DRAMの書き換え耐性以上($\geq 10^{16}$ 程度) または、 研究開発項目②との組み合わせにおいて、実質的に適用製品の装置寿命と同等であること	研究開発項目②より実用化に必要な装置寿命は $\geq 10^5$ 。デバイス性能は 10^8 を達成し、目標をクリア。	○	バラツキの改善
2 書き込み電流: 50uA以下/セル	<30uA の実力を有することを確認	◎	
3 容量: 1Gbit以上	中規模アレイ(1Gbit)の設計・評価完。 8Gbitプロトタイプ設計完。	○	実用化の判断
4 書き込み時間: ランダム3nsec以下 実用化目標10ns以下(off chip)	<10ns(Off Chip)の実力を有することを確認	○	縦MOS Tr特性・バラツキ
5 動作温度上下限: 0~55℃で動作	保持特性: 240年@55℃達成	◎	
6 そのほか、民生用情報機器への適用時に致命的な制約がないこと	民生機器の実用化レベルまで達成している	◎	

②不揮発アーキテクチャの研究開発

目標	成果	達成度	今後の課題
1 研究開発項目①で得られたメモリを用い、現行のアーキテクチャの消費電力に対し、実質上1/10以下に削減する不揮発アーキテクチャの提示	高速不揮発性メモリに書き込みを代替するアーキテクチャと制御アルゴリズムを開発することに成功。 その結果、消費電力を従来SSDアーキテクチャより実質1/10とすることができ、本研究の目標を達成。	◎	

◎ 大幅達成、○達成、△達成見込み、×未達

2. 研究開発項目毎の成果

2.1 不揮発アーキテクチャの研究開発

2.1.1 研究開発の成果

携帯電話やスマートフォン等の高機能携帯機器、電子ブックなどの普及が急速に進んできている。これらの機器はバッテリーによる駆動が主であり、搭載される部品には低消費電力であることの必要性が高い。特に搭載される半導体メモリの消費電力の低減が要求されており、高速に動作すると共に電源を切ってもデータが保持される不揮発メモリを搭載したシステムの開発が望まれている。本研究開発では高速不揮発メモリを用いて、現状のメモリアーキテクチャの消費電力に対して、実質上 1/10 以下に削減する不揮発アーキテクチャに関する構成事例を提示することを目標とする。

平成 22 年度は高速不揮発メモリを用いたメモリアーキテクチャのシステムレベルでの性能等を評価するための ESL (CAD) ツールを用いたメモリシステム開発プラットフォームを構築した。また、高速不揮発メモリの高速性・不揮発という特性を生かしたアーキテクチャとして、高速不揮発メモリとフラッシュメモリを搭載したメモリアーキテクチャ (SSD) を提案しピーク電力を 97%削減できることを示し SSDM (Solid-State Devices and Materials) で論文発表を行った。

平成 23 年度は ESL (CAD) ツールを用いて、平成 22 年度に開発したメモリシステム開発プラットフォーム上に、メモリ等のデバイスの機能モデルから成る仮想デモシステムを構築した。また、高速不揮発メモリの書き換え回数を 50 倍増加する、ターンバック書き込み方式を開発し、50 ナノメートルサイズの高速不揮発メモリ素子を用いて、有効性を実証し、IMW (International Memory Workshop) で論文発表を行った。提案手法はシステム性能の劣化なしに信頼性を向上することができる。

平成 24 年度は、平成 23 年度に開発した仮想デモシステムを用いて、従来のメモリアーキテクチャの消費電力に対し、実質上 1/10 以下に削減する不揮発アーキテクチャを開発した。フラッシュメモリのページサイズより小さな断片化したデータと、頻繁に上書きされるホットデータを高速不揮発メモリに格納することで、SSD の電力を93%削減することに成功した。電力削減と同時に、書き込み性能も 11 倍に高速化することができた。また、断片化したデータや頻繁にアクセスするデータを高速不揮発メモリに記憶することで、フラッシュメモリの書き換え回数を 1/7 に削減することに成功した。その結果、フラッシュメモリが書き換え回数の寿命に達すると置き換える、交換のコストを 1/7 に削減することに相当する。本技術は集積回路分野の世界トップクラスの学会である、Symposium on VLSI Circuits 2012 で論文発表を行った。本アーキテクチャにより、本研究の目標である、電力を 1/10 以下に削減することを達成した。

また、高速不揮発メモリに必要とされる仕様を探索し、書き込み、読み込み時間は $3\mu\text{s}$ 以下、書き換え回数は 10^5 回以上必要であることが明らかになった。その結果、「高速不揮発メモリ機能技術開発」プロジェクトで開発中の ReRAM が十分、実際のシステムで利用できることを明らかにした。

研究成果はジャーナル論文・国際会議・国内会議で 26 件を発表を行った。また、7 件の解説論文の発表を行った。特許は7件出願した。研究成果は、学会だけでなく、新聞社等のメディアにも注目され、47 件の報道が行われた。

i) コードワード可変 ECC を用いた不揮発 RAM と NAND 型フラッシュメモリ統合 SSD

平成 22 年度では、大容量な高速不揮発 RAM を NAND フラッシュメモリへの書き込みバッファとして使用する SSD(ソリッドステートドライブ)において、ReRAM(抵抗変化型 RAM)や PRAM(相変化型 RAM)や MRAM(磁気抵抗型 RAM)などの高密度化が見込める高速不揮発 RAM と NAND フラッシュメモリ双方のエラーを効率よく訂正し、3.6 倍のビットエラーレートを許容可能とする ECC 手法を提案した。また、大容量高速不揮発 RAM を書き込みバッファとして使用することで、NAND フラッシュメモリと SSD インタフェース転送速度の差を補間し且つ既存の SSD インタフェース高速化手法に比べ 97%消費電力を抑える手法を示した。

現在のソリッドステートドライブ(SSD)には NAND フラッシュメモリが使用されている。NAND フラッシュメモリインタフェースの転送速度と PCI Express や SATA(Serial ATA バス)、SAS(Serial Attached SCSI バス)などの SSD インタフェースの転送速度には大きな速度差が存在する(図 2.1.1-1)。SSD の転送速度を高速化するためには NAND フラッシュメモリをインタリーブ(並列動作)させるなどの技術があるが、インタリーブ数を大きくすれば SSD 全体の消費電力が増加してしまう。また、書き込み速度に関しては高い書き込み電圧を得るための昇圧、正常に書き込まれたかどうかを判断するためのベリファイ等の時間がかかるため読み出し速度に比べて遅い。高速な書き込み用バッファとして DRAM が使用されるが、揮発性メモリであり瞬断時にデータが失われる可能性があるため、書き込み用バッファとして適していない。

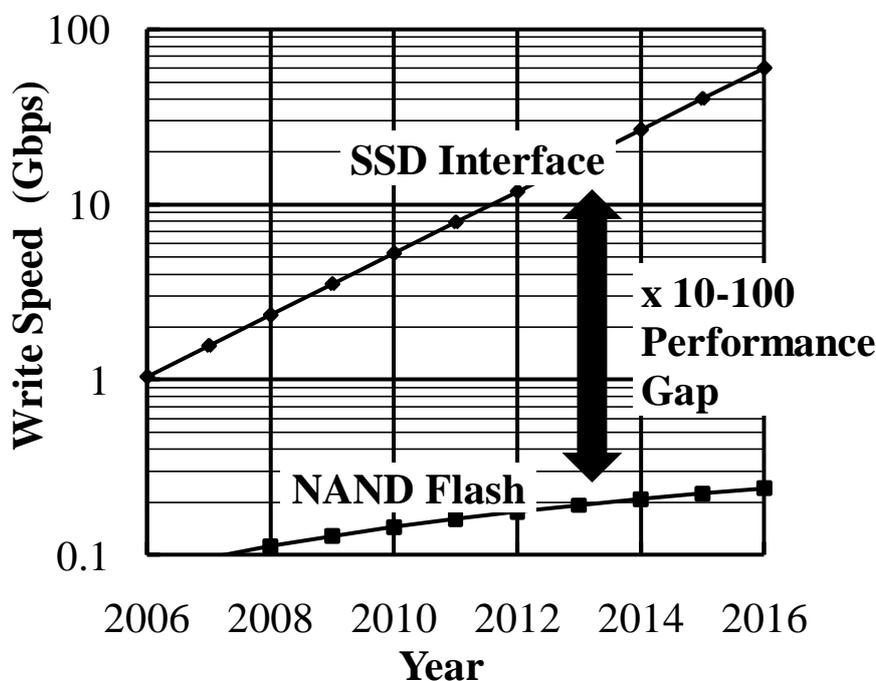


図 2.1.1-1 SSD 用インタフェースと NAND フラッシュメモリの書き込み速度。

そこで本項目では、大容量で高速な書き込み用バッファを用意することで NAND フラッシュメモリの書き込み時間を隠ぺいし高速化かつ低消費電力を実現するアーキテクチャを提案した(図 2.1.1-2 (a))。このアーキテクチャでは書き込みと読み出しの転送速度を 10Gbps にすることが可能である。書き込み時はホストから転送されるデータが不揮発 RAM に一時的に蓄えられ、そのデータを適宜 NAND フラッシュメモリへ転送することで高速化を図る(図 2.1.1-2(b))。読み出し時は NAND フラッシュメモリから直接ホストへデータを転送する(図 2.1.1-2(c))。提案した SSD の転送速度を表 2.1.1-1 に示す。

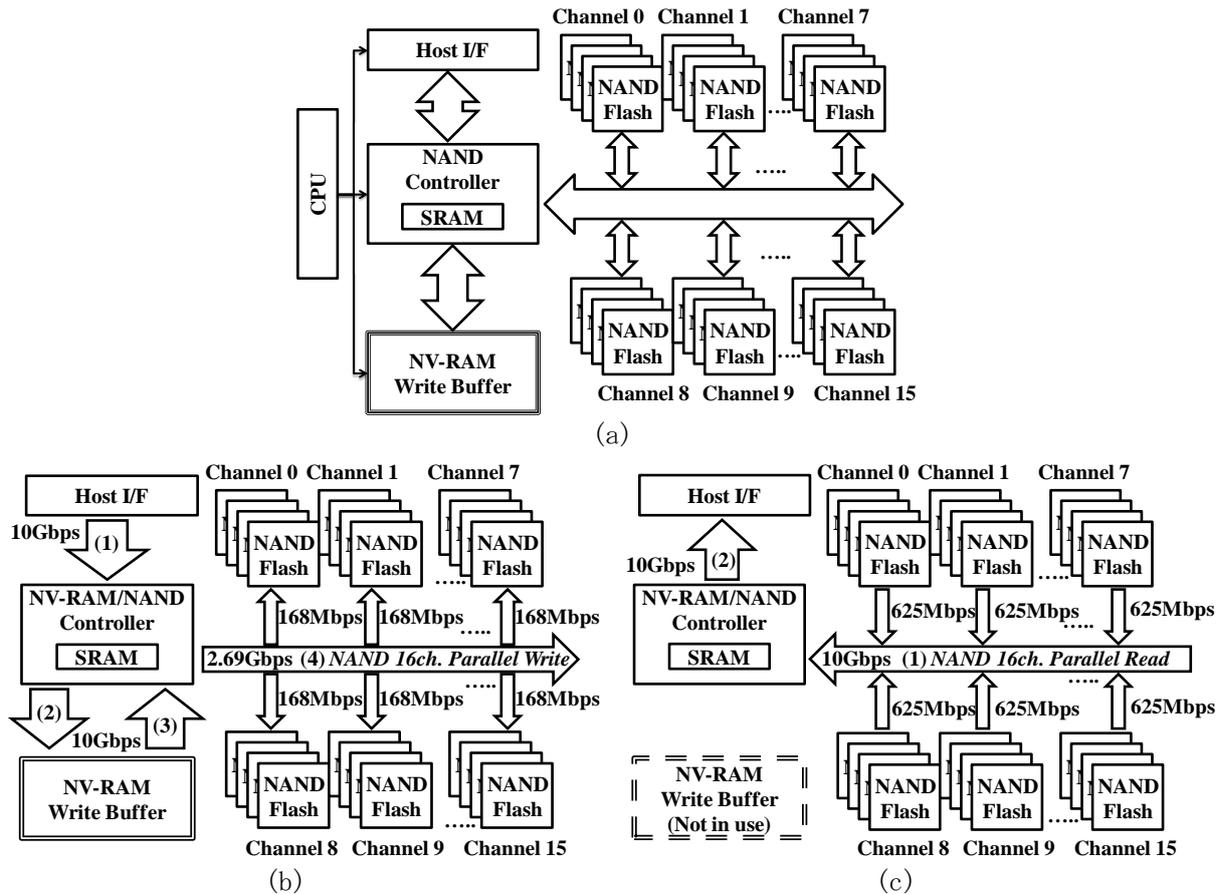


図 2.1.1-2 (a)提案した不揮発メモリと NAND フラッシュを統合した SSD。(b)書き込み時の動作。ホストから転送されるデータは不揮発 RAM に 10Gbps で書き込まれ、NAND フラッシュメモリに 2.69Gbps(平均)で書き込まれる。(c)読み出し時の動作。データは不揮発 RAM を介さず直接 NAND フラッシュメモリから 10Gbps で読み出される。

表 2.1.1-1 提案した SSD の転送速度

	Read (Gbps)	Buffered write (Gbps)	Sustained write (Gbps)
Speed	10	10	2.69

従来の SSD において、読み出し速度は入出力時間が支配的なため、NAND フラッシュメモリチップのインタリーブ数(N_{NAND})、つまりチャンネル数を増加することで高速化されている。一方、書き込み速度は NAND フラッシュメモリの書き込み時間が読み出し時間に比べはるかに長いいため、読み出し速度と同等の性能を得るためのインタリーブ数は爆発的に増加する。一方、提案した SSD では、不揮発 RAM の書き込み時間は NAND フラッシュメモリに比べて十分短く、1 本のデータ IO 当たりのデータ転送レートが高速であり、不揮発 RAM のインタフェースは DDR3 並みであると仮定すると、データ転送速度は入出力データバス幅(N_{IO})によって高速化される。以下、従来の SSD と提案した SSD が 10Gbps の性能を出す場合の消費電力を求める。まず従来の SSD の消費電力について、NAND フラッシュメモリのインタフェースをデータ IO(入出力)数 16 の 40MHz DDR(Double Data Rate)とすると NAND フラッシュメモリの電源電圧 3V、書き込み読み出し時の動作電流 50mA として、従来の SSD では、チップ当たりの消費電力にインタリーブ数を乗じて

$$P_{SSD_Conventional} = N_{NAND} \times 50mA \times 3V \quad (1)$$

となる。

一方、提案した SSD は、電源電圧 1.5V データ IO 毎の書き込み、読み出し時の動作電流を 29mA, データ転送レート 1.6Gbps と仮定すると

$$P_{SSD_Proposed} = N_{IO} \times 29mA \times 1.5V \quad (2)$$

となる。10Gbps の転送速度を実現しようとする NAND フラッシュメモリの 1 チップあたりの書き込み平均転送速度は 0.168Gbps であるので N_{NAND} は 60 となる(図 2.1.1-3)。よって、 $P_{SSD_Conventional}$ は 10.2W となる。提案した SSD において不揮発 RAM に必要な N_{IO} は 7(図 2.1.1-4(a))であり $P_{SSD_Proposed}$ は 0.3W となる。よって提案した 10Gbps のインタフェース性能を持つ SSD は、従来の高速化手法に比べて 97%の消費電力を低減可能である(図 2.1.1-4(b))。

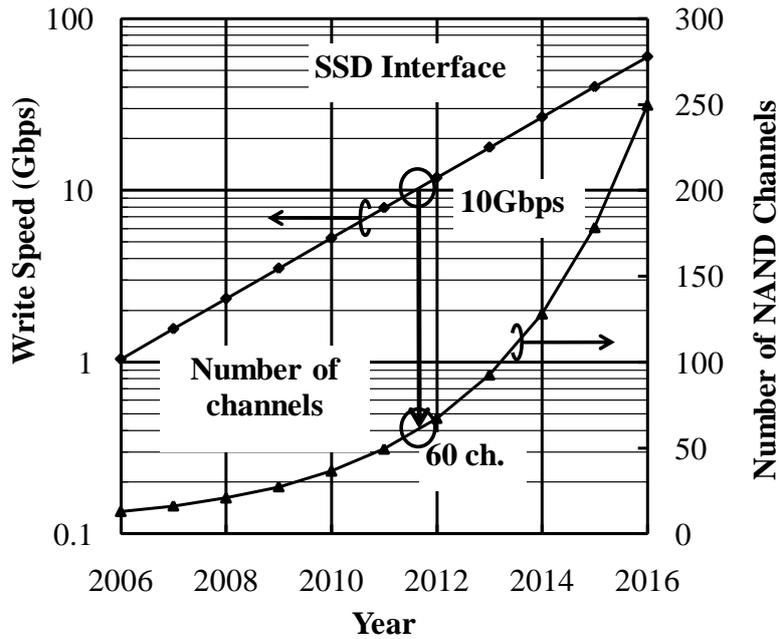


図 2.1.1-3 NAND フラッシュメモリのチャンネル数(N_{NAND})と SSD 用インタフェース転送速度。

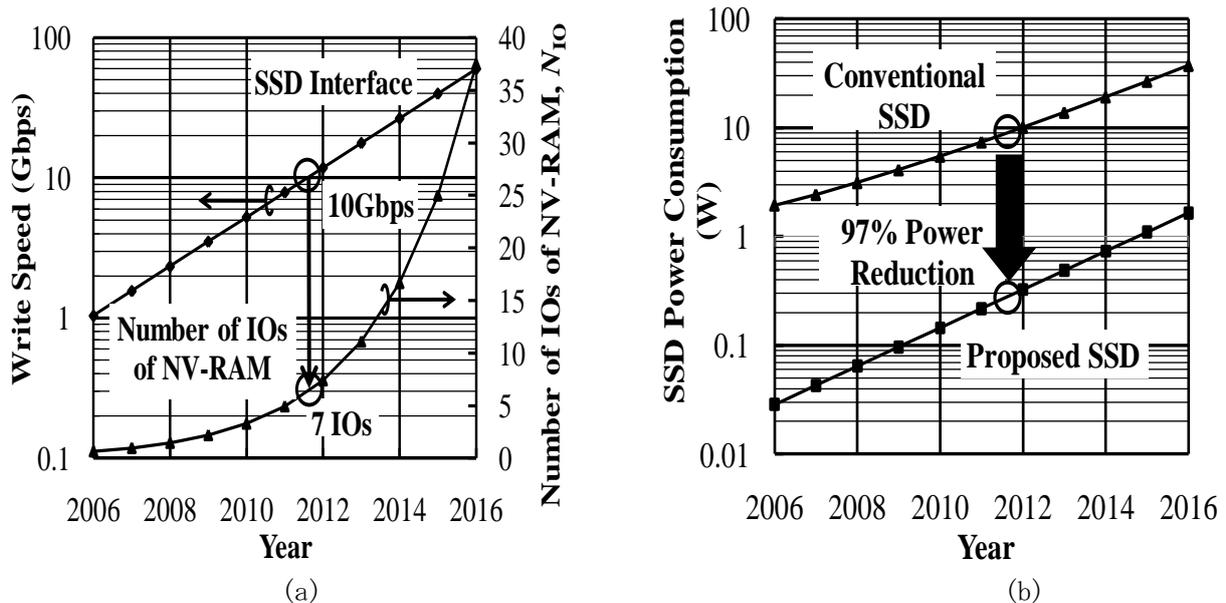


図 2.1.1-4 (a)1.6GHz DDR3 を仮定した場合の不揮発 RAM の入出力数(N_{IO})。7IO で 10Gbps を達成できる。(b)SSD の消費電力。提案した SSD は書き込み性能 10Gbps を得る場合、消費電力を 97%低減できる。

本項目では誤り訂正符号(ECC)の訂正能力に関しても議論している。本項目で提案した SSD には不揮発 RAM と NAND フラッシュメモリが搭載される。NAND フラッシュメモリはディスタ urb エラーやリテンションエラー等のメモリセルエラーが起こり、ECC が必要とされているが ReRAM や MRAM、PRAM などの不揮発 RAM についても微細化、高密度化されるとセルエラーは避けられないとされている。

現在、NAND フラッシュメモリを用いた SSD には Bose と Chaudhuri、Hocquenghem らによって発見された BCH 符号と呼ばれる ECC が用いられている。BCH 符号を始めとする ECC では、データに使われる情報記号と誤り訂正のためのパリティ検査記号が付随している。符号長を n 、 k ビットの情報記号があるとすると $n-k$ ビットはパリティ検査記号となる。ECC を使用するには最初に情報記号となるデータを元にパリティを計算する符号化処理を行い、情報記号とパリティ検査記号をストレージに格納する。読み出す際にはストレージから読み出したパリティ検査記号を元に誤りを訂正する演算を行い、データを取り出す復号化処理を行う(図 2.1.1-5)。符号長と情報記号長の比率である符号化率は k/n で定義される。また、誤り訂正能力は n ビット中 t ビット訂正できるという指標で評価できる。誤り訂正数は

$$BER_{OUT} = \frac{1}{k} \sum_{i=t+1}^N \binom{N}{i} BER_{RAW}^i (1 - BER_{RAW})^{N-i} \quad (3)$$

と計算される。しかし、復号化には符号長に対して 2 乗に比例した計算量が必要となる。ECC の復号回路では回路面積と演算時間がそれぞれ符号長に比例して大きくなるため、消費電力と回路面積が増加する。以降では、消費電力と回路面積の制約条件の下 ECC の符号長を最適化する手法を提案した。提案したアーキテクチャにおいて ECC 処理回路は不揮発 RAM と NAND フラッシュメモリの統合コントローラに内蔵される。簡易 ECC 手法では不揮発 RAM に書き込む際と NAND フラッシュメモリから読み出す際にそれぞれエンコーダ(符号化回路)で符号化処理し、デコーダ(復号化回路)で復号化処理する(図 2.1.1-5)。読み出し速度 10Gbps を実現するために NAND フラッシュメモリと同様に並列動作するチャンネル数分の ECC 回路が必要となる。16 チャンネルある場合は 16 セットの ECC 回路が必要となる。消費電力、回路面積からの制約から簡易 ECC 手法では誤り訂正は 2Kbyte の符号長となる。本提案では他の 2 手法をこの簡易 ECC 手法を基準とした誤り訂正能力で比較する。

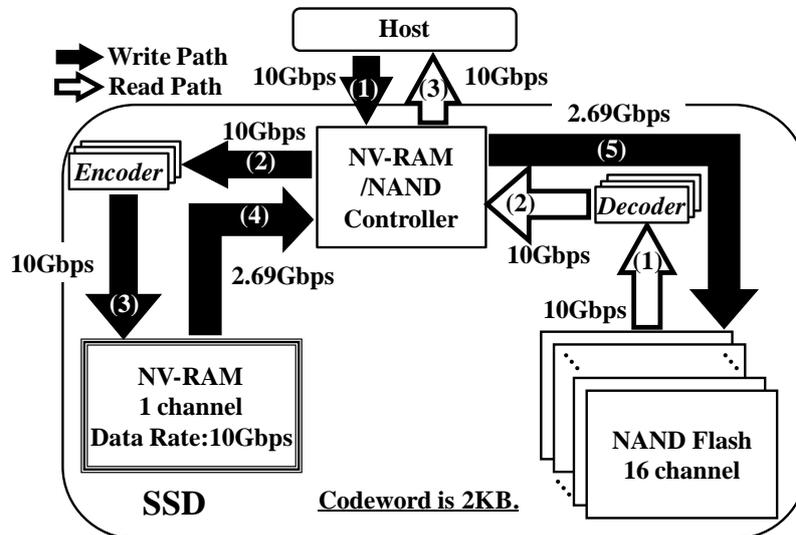


図 2.1.1-5 簡易 ECC 手法。符号化は不揮発 RAM に書き込む前に、復号化は NAND フラッシュメモリから読み出した後に行う。

本開発で提案した共有型 ECC 手法は不揮発 RAM と NAND フラッシュメモリのそれぞれで誤り訂正の処理が施される(図 2.1.1-6(a))。初段の ECC では、ホストから入力されたデータを不揮発 RAM に書き込む前に符号化し、不揮発 RAM から読み出されたデータを復号化して不揮発 RAM のメモリエラーを訂正する。次段の ECC では、初段の ECC デコーダから転送されたデータを NAND フラッシュメモリに書き込む前に符号化し、NAND フラッシュメモリから読み出されたデータを復号化して NAND フラッシュメモリのメモリエラーを訂正する。不揮発 RAM と NAND フラッシュメモリのエラーが独立に訂正される。不揮発 RAM、NAND フラッシュメモリ内で許されるビット誤り率をそれぞれ $BER_{NV\text{RAM}}$ 、 BER_{NAND} とすると、全体で許容されるエラー率 BER_{TOTAL} は

$$BER_{TOTAL} = 1 - (1 - BER_{NVRAM})(1 - BER_{NAND})$$

$$\approx BER_{NVRAM} + BER_{NAND} \quad (4)$$

となる。よって、共有型 ECC 手法では簡易 ECC 手法と同じ符号長かつ符号化率の ECC を使用するならば 2 倍の誤り率が許されることになる。初段と次段の ECC のデコーダ回路は同時に動作する可能性があるため 2 つの独立したエンコーダが必要となる。一方、SSD の読み出しと書き込み処理は同時に発生しないためデコーダを共有することができる。共有型 ECC 手法では符号化回路が 2 つ必要となるが、ECC のエンコーダはデコーダに比べ 10 分の 1 以下の回路面積であるため、全体として ECC 処理回路は簡易 ECC 手法と比較して 1%以下しか回路面積は増加しない。本項目ではさらに不揮発 RAM と NAND フラッシュメモリ各々適応的に ECC の符号長を調整する手法を提案した(図 2.1.1-6(b))。共有型 ECC 手法と同様、不揮発 RAM と NAND フラッシュメモリの両方で誤り訂正の処理が行われる。この手法では不揮発 RAM に使用される ECC の符号長は、NAND フラッシュメモリに使用される符号長よりも大きくできる。これにより不揮発 RAM はより多くのビットエラーが許容され高い信頼性を確保することができる(図 2.1.1-7)。回路面積と消費電力の制約条件の下、信頼性を上げるために ECC の符号長を最大化することを考える。符号長と誤り訂正可能なビット誤り率を表 2.1.1-2 に示す。

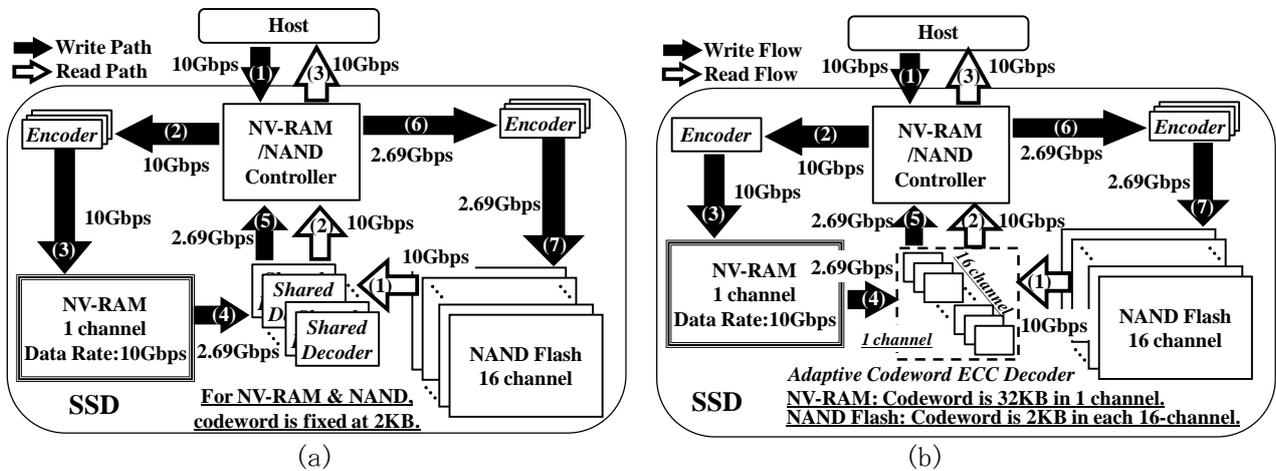


図 2.1.1-6 (a)共有型 ECC 手法。ECC の符号化・復号化は不揮発 RAM と NAND フラッシュメモリでそれぞれ行われる。デコーダ回路は共有される。(b)符号長適応型 ECC 手法。ECC の符号長は不揮発 RAM において 32Kbyte、NAND フラッシュメモリにおいては 2Kbyte を使用できる。

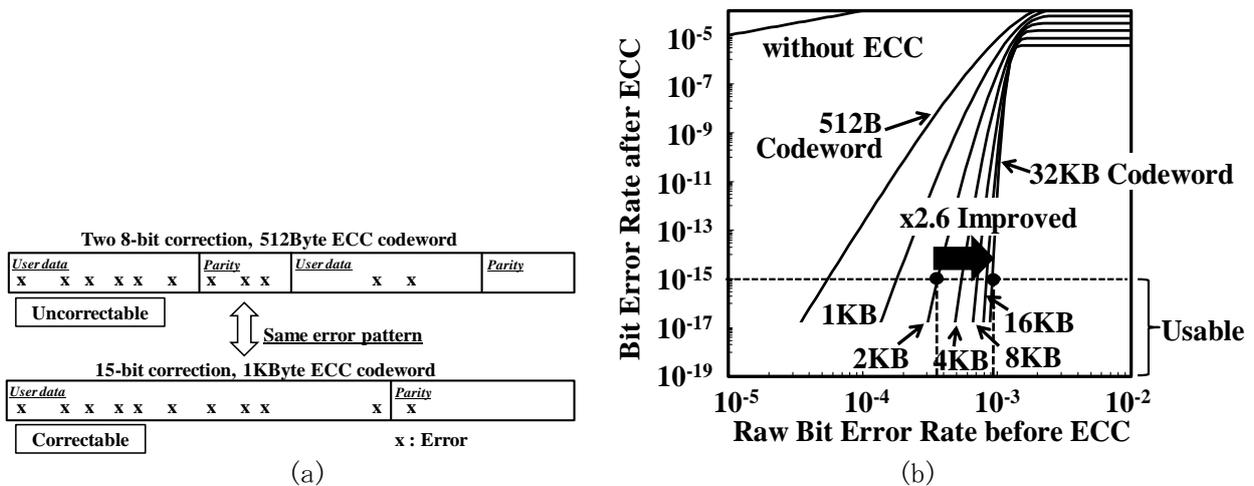


図 2.1.1-7 (a)符号長 512Byte、1Kbyte それぞれの ECC で誤りが発生した場合の比較。符号長が大きいほど多くのエラーを訂正できる例。(b)ECC 処理前のビット誤り率と ECC 処理後のビット誤り率。

表 2.1.1-2 符号長と誤り訂正可能なビット誤り率

ECC codeword	2KByte	4KByte	8KByte	16KByte	32KByte
Acceptable raw bit error rate before ECC	3.6×10^{-4} (x 1)	5.5×10^{-4} (x 1.5)	7.1×10^{-4} (x 2.0)	8.4×10^{-4} (x 2.3)	9.2×10^{-4} (x 2.6)

NAND フラッシュメモリの ECC 回路はチャンネル数分必要であり、16 チャンネルの場合の符号長は 2Kbyte となる(図 2.1.1-9)。一方、不揮発 RAM は書き込み、読み出し速度共に高速であるためインタリーブは必要ない。従って、不揮発 RAM の ECC 処理回路は 1 チャンネルでよい。回路面積と消費電力の制約から NAND フラッシュメモリ用の ECC 処理回路に比べて 16 倍の符号長である 32KByte の符号を用いることが可能である(図 2.1.1-8、図 2.1.1-9)。ゆえに、2Kbyte の符号長に比べて 2.6 倍の誤り率を許容することができる。NAND フラッシュメモリの ECC と合わせて全体では式(4)から簡易 ECC 手法の 3.6 倍、共有型 ECC 手法の 1.8 倍の誤り率を許容することができる。不揮発 RAM と NAND フラッシュメモリのデコーダ回路は同じものを利用するため ECC 回路面積の増分はほぼ無視することができる。表 2.1.1-3 に従来・提案 ECC 手法の比較をまとめる。

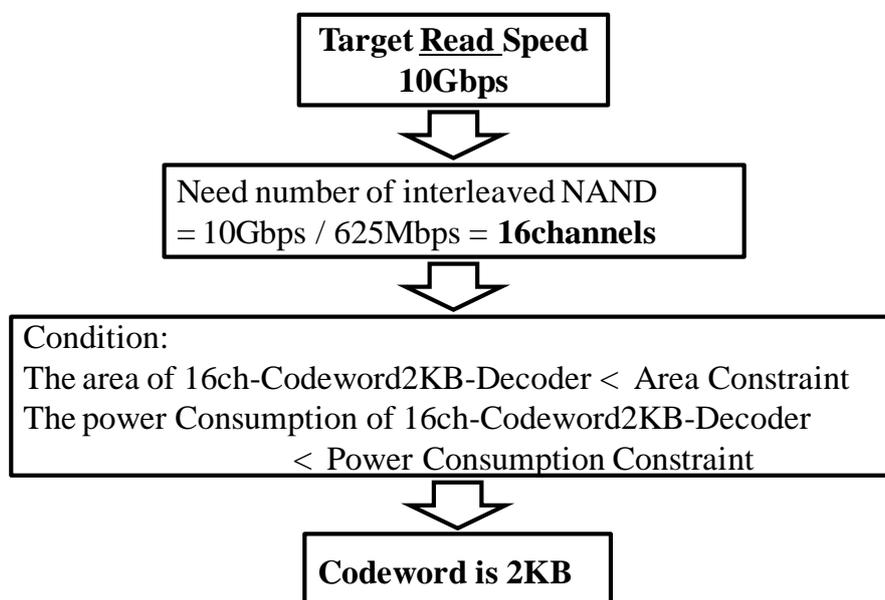


図 2.1.1-8 NAND フラッシュメモリ用 ECC の符号長決定フロー例

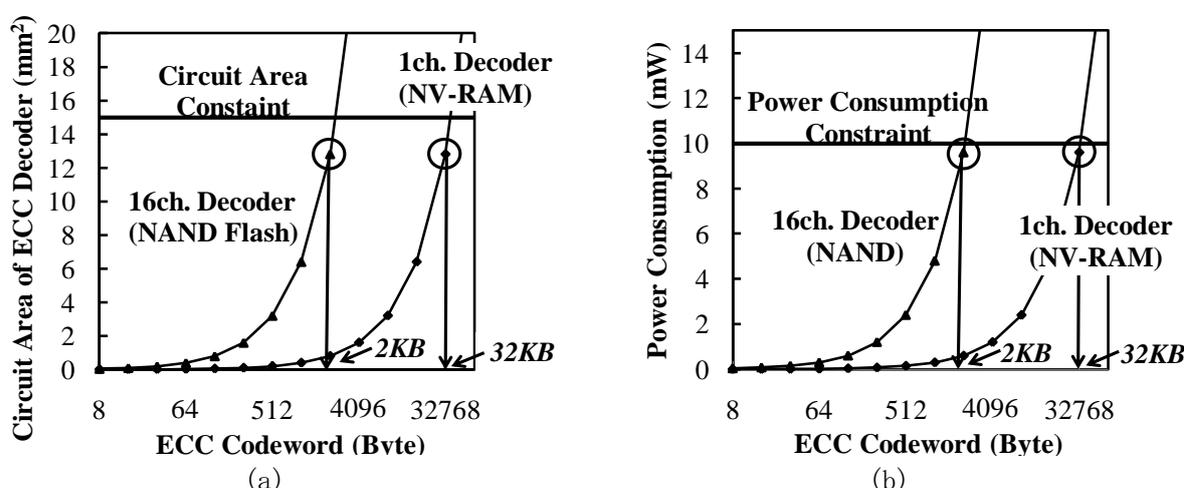


図 2.1.1-9 (a)ECC の符号長と ECC 処理回路の面積の関係。符号長が増加すると回路面積も増加する。(b) ECC の符号長と ECC 処理回路における消費電力の関係。符号長が増加すると消費電力も増加する。

表 2.1.1-3 簡易 ECC 手法、共有型 ECC 手法、符号長適応型 ECC 手法の比較。

	Single ECC	Proposed Shared ECC	Proposed Adaptive Codeword ECC
Acceptable Raw Bit Error Rate (NAND)	3.6×10^{-4}	3.6×10^{-4}	3.6×10^{-4}
Acceptable Raw Bit Error Rate (NV-RAM)		3.6×10^{-4}	9.2×10^{-4}
Acceptable Raw Bit Error Rate (Total: NV-RAM&NAND)	3.6×10^{-4} (x 1)	7.2×10^{-4} (x 2)	12.8×10^{-4} (x 3.6) (x 1.8)
ECC Codeword (NAND) [channel number]	2KByte [16ch]	2KByte [16ch]	2KByte [16ch]
ECC Codeword (NV-RAM) [channel number]		2KByte [16ch]	32KByte [1ch]
ECC circuit area (mm ²)	12.9 (x 1)	13.0 (x 1.01)	13.0 (x 1.01)

ii) 50nm 抵抗変化型メモリにおける耐久性向上書き換え手法

50nm 級の抵抗変化型メモリは高抵抗状態および低抵抗状態のばらつきが大きいいため抵抗を制御するためのベリファイ・プログラミングが必要であることが測定から分かった。平成 23 年度では書き換え回数を向上させつつ最短のアクセス時間を同時に達成するための手法と測定結果からデバイスモデルを提案した。ReRAM の素子は初期状態では酸化物なので抵抗が高い状態であるが Forming という電圧をかける操作により、金属の濃度が高いフィラメントが成長し低抵抗状態 (Low Resistance State: LRS) となる。Forming と逆方向に電圧パルスを加える Reset と呼ばれる操作を行うとフィラメントは破壊され、高抵抗状態 (High Resistance State: HRS) となる。また、Forming と同方向に電圧パルスを加えるとフィラメントが成長し、低抵抗状態 (Low Resistance State: LRS) となる (図 2.1.1-10)。しかし、Reset を行っても十分に高い抵抗状態にならないことがあり、また逆に Set を行っても低い抵抗状態にならないことがある。Set を確実にを行うために Reset 後に高電圧で Set する手法や Reset を確実にを行うために次第に高い電圧をかけていく方法が提案されているものの、従来の研究は書き換え回数に注目したものではなく大量のデバイスを確実に HRS や LRS にすることに注目している。本研究では書き換え回数に注目し、HRS と LRS という状態に確実にするため下部電極系が 50nm である ReRAM の測定を通じて新しいベリファイ・プログラミングの手法について提案し、測定結果から ReRAM の摩耗モデルも提案した。

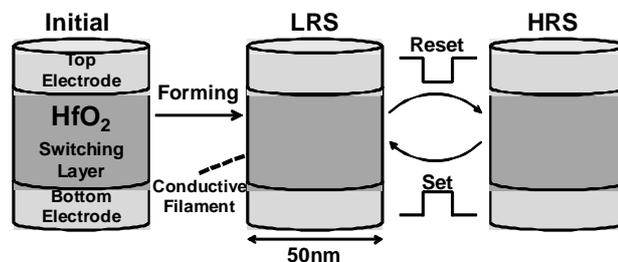


図 2.1.1-10 左:Forming を行う前の ReRAM の状態。中:Forming 後と Set 後の状態。フィラメントが成長して LRS になる。右:Reset 後の状態。フィラメントが途切れて HRS になる。

ii)-1 ベリファイなし手法

ReRAM のベリファイ・プログラミング手法について比較検討するために ReRAM が集積されたウエハを用いて図 2.1.1-11(a)の測定系を組み、PC で各測定器を制御した。Forming は半導体パラメータアナライザで V_{cell} を 0V から 4V まで掃引することで行った(図 2.1.1-11(b))。まず、ReRAM の書き込みをベリファイ・プログラミングを行わずに単純に Set と Reset を繰り返し、抵抗を読み出すという測定を行った(図 2.1.1-12(a))。また、Set は V_{cell} が 2V で 50ns のパルス、Reset は V_{cell} が -2V で 20ns のパルスを加えた。読み出しは V_{cell} に 0.1V を印加して行った。結果は図 2.1.1-12(b)のようになった。Set 後の抵抗は Reset 後より低くなっているが、実際にメモセルとして使用する場合はセンスアンプ等で読み出すことを考慮すると抵抗の閾値を設けなければならないが、この状態ではそれを決定することが不可能である。よってこのデバイスにおいてはベリファイ・プログラミングの手法が必須となる。

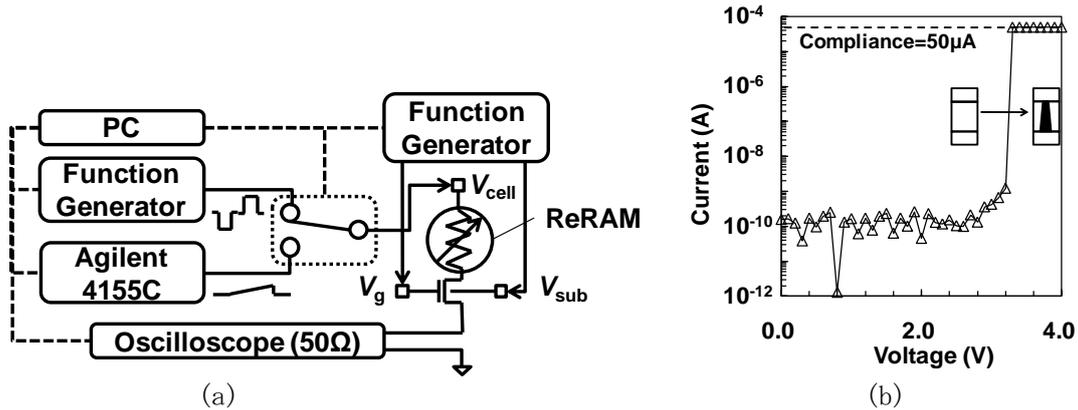


図 2.1.1-11 (a)ReRAM 測定系。(b)Forming 特性。

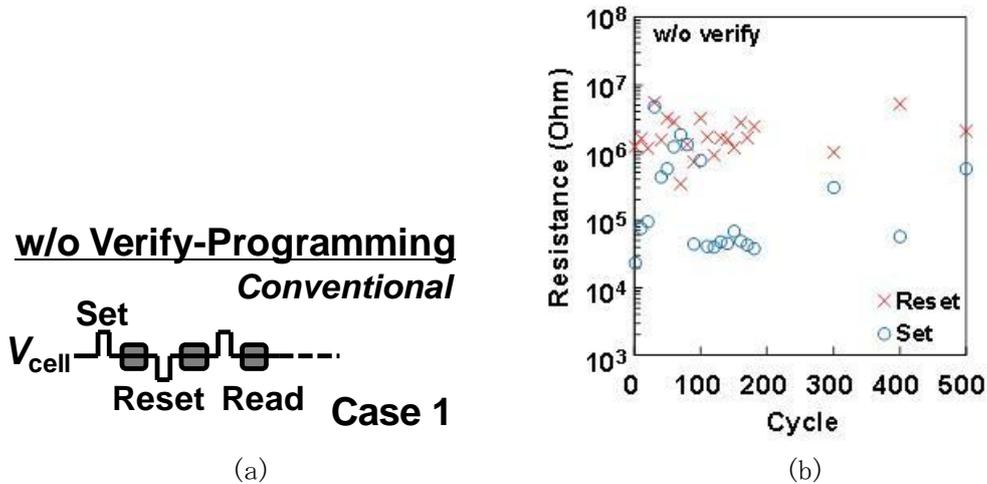


図 2.1.1-12 (a)ベリファイ・プログラミングを行わない操作。(b)ベリファイ・プログラミングを行わなかったときの書き換え回数と抵抗値の関係。

ii)-2 固定パルス手法

簡易な手法として同じパルスを一定の閾値を超えるまで加え続けるという固定パルス手法(Fixed Pulse)を行った(図 2.1.1-13(a))。ここでは 20 回以上同じパルスを加え続けても閾値を超えなければデバイスが壊れたと判断する。LRS の閾値は 50kΩとし、HRS の閾値は 200kΩとした。結果は図 2.1.1-13(b)のようになった。デバイスが壊れるまでは HRS と LRS の状態になっているが、40k 回目までは正常に書き込みができたが 44k 回目で Reset ができずにデバイスが壊れた。

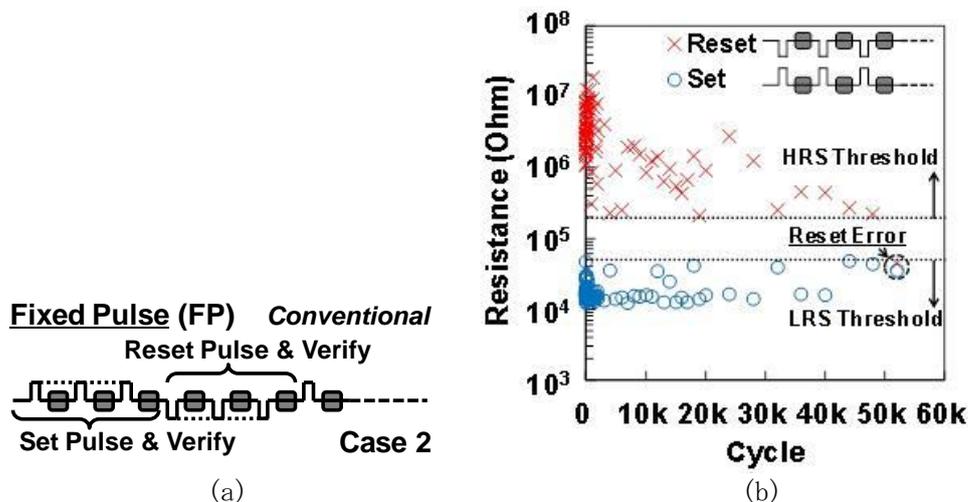


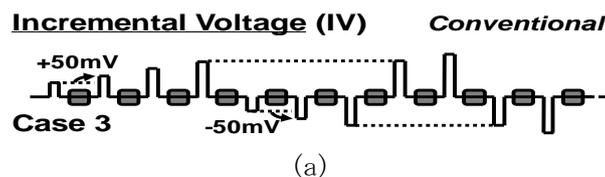
図 2.1.1-13 (a)固定パルスによるベリファイ・プログラミング手法。(b)固定パルス手法によるベリファイ・プログラミングを行ったときの書き換え回数と抵抗値の関係。

ii)-3 電圧増加パルス手法

次に図 2.1.1-14(a)のように Set や Reset に失敗したら電圧を上げるという電圧増加パルス手法(Incremental Voltage: IV)を行った。これは図 2.1.1-13(b)の書き込みの失敗原因を電圧が足りなかったと考えたためである。この手法では最初の Set と Reset は 2V と -2V で行った。そして、書き込みに失敗すると 50mV ずつあげていく。1 回の Reset や Set の間に 20 回書き込みに失敗したらそのデバイスは壊れたと判断する。図 2.1.1-14(a)のように最初の Set において 4 回必要であったら次の Set は $2V + 50mV \times 4 = 2.2V$ から書き込みを開始する。Reset も同様に行った。結果は図 2.1.1-14(b)のようになった。固定パルス手法よりも HRS と LRS の比が大きくなったが書き換えは 48k 回目まで成功という同じ結果になった。また、Set/Reset 時の電圧と回数を図 2.1.1-14(c)に示す。Set 電圧は書き込み失敗時にその都度上昇しているが、Reset 電圧はデバイス破壊まで 1 回も失敗することなく書き込みに成功した。

ii)-4 復帰パルス幅増加手法

電圧増加次に図 2.1.1-15(a)のように Set は上記の電圧増加パルス手法で、Reset はパルス幅を増加する復帰パルス幅増加手法(Incremental Voltage with Turnback: IVWT)を取った。これは図 2.1.1-14(b)の結果から Set は電圧増加によるベリファイ・プログラミングが有効だと思われるが Reset のベリファイ・プログラミングは電圧増加パルス手法では有効性がないと判断したためである。また、電圧増加パルス手法と同様に単調にパルス幅を増加していくと書き込み速度が非常に遅くなる。よって Reset におけるベリファイ・プログラミングでは電圧を -2V で固定し 20ns ずつパルス幅を増加していくが 4 回以上失敗したときのみ次の Reset パルス幅を 40ns 増加するが 4 回未満ならば元のパルス幅で Reset を行うという手法を採用した。結果は図 2.1.1-15(b)のようになった。この手法では 104k 回まで書き込みに成功している。また、Set 電圧と Reset パルス幅の書き換え回数ごとの値を図 2.1.1-15(c)に示す。Set 電圧が単調に増加し、Reset のパルス幅は増加や元に戻ることを繰り返しながら全体的には徐々に増加していった。



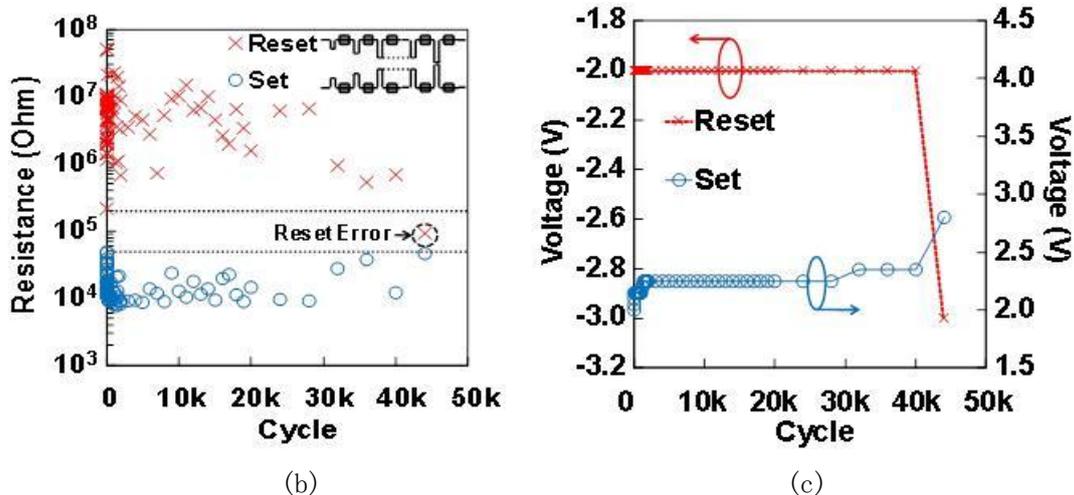


図 2.1.1-14 電圧増加パルスによるベリファイ・プログラミング手法。(a)制御方式。(b)書き換え回数と抵抗値の関係。(c)書き換え回数と Set/Reset 電圧の関係。

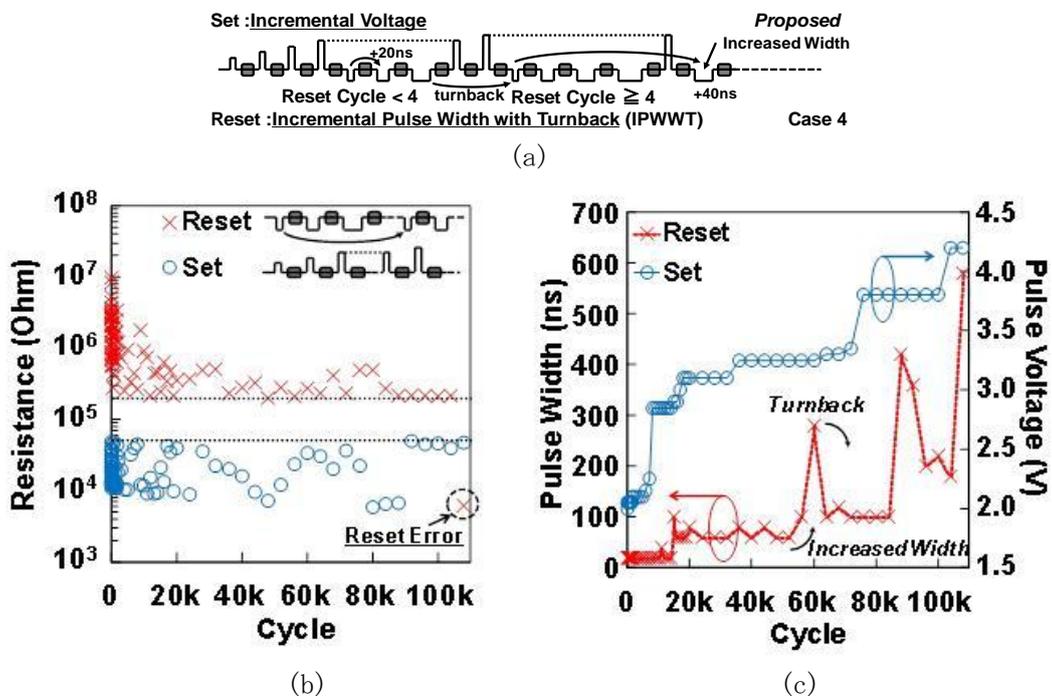


図 2.1.1-15 Reset を復帰パルス幅手法で、Set を電圧増加パルス手法で行うベリファイ・プログラミング手法。(a)制御方式。(b)書き換え回数と抵抗値の関係。(c)書き換え回数と Set 電圧/Reset パルス幅の関係。

ii)-5 復帰電圧増加手法

復帰パルス幅増加手法で Reset を行う上記の方法では書き換え回数を増加することができたが、既に発表されているサイズが大きい ReRAM の書き換え回数を下回っている。また、上記の手法では Reset においてベリファイ・プログラミングの失敗が起きているがこれは Reset ではなく Set 電圧が高すぎるため Reset が困難になっているとも考えられる。よって、Set 電圧を復帰パルス幅増加手法と類似した変化させるという復帰電圧増加手法によるベリファイ・プログラミングで測定を行った。具体的にはパルス幅を 50ns で固定し 50mV ずつパルス幅を増加させ 4 回以上失敗したときのみ次の Set 電圧を 100mV 増加させるが 4 回未満ならば元の電圧で Set を行うという手法を採用した(図 2.1.1-16(a))。結果は図 2.1.1-16(b)のようになり書き換え回数は大幅に向上した。また、Set 電圧と Reset パルス幅を図 2.1.1-16(c)に示す。Set 電圧はこの手法により急激に増加することなく Set を行うことが困難であったときのみ電圧が大きく増加している。また、読み出し時間を 50ns と仮定

した場合に Set/Reset にかかった時間を図 2.1.1-16(d)に示す。Set と Reset の時間はそれぞれ最初の 40k の平均では 138ns と 70ns であり、これは NAND フラッシュメモリの 10000 倍以上高速である。また、図 2.1.1-16(e)には Set/Reset 時の最大電流を示した。電流はデバイスが破壊される直前に大きくなっていき最後には Reset に失敗した。図 2.1.1-16(f)にはこの手法で 20k 回書き込んだ後に 85°Cにおけるデータ保持特性を示した。10⁶ 秒まで良好な保持特性を得られた。

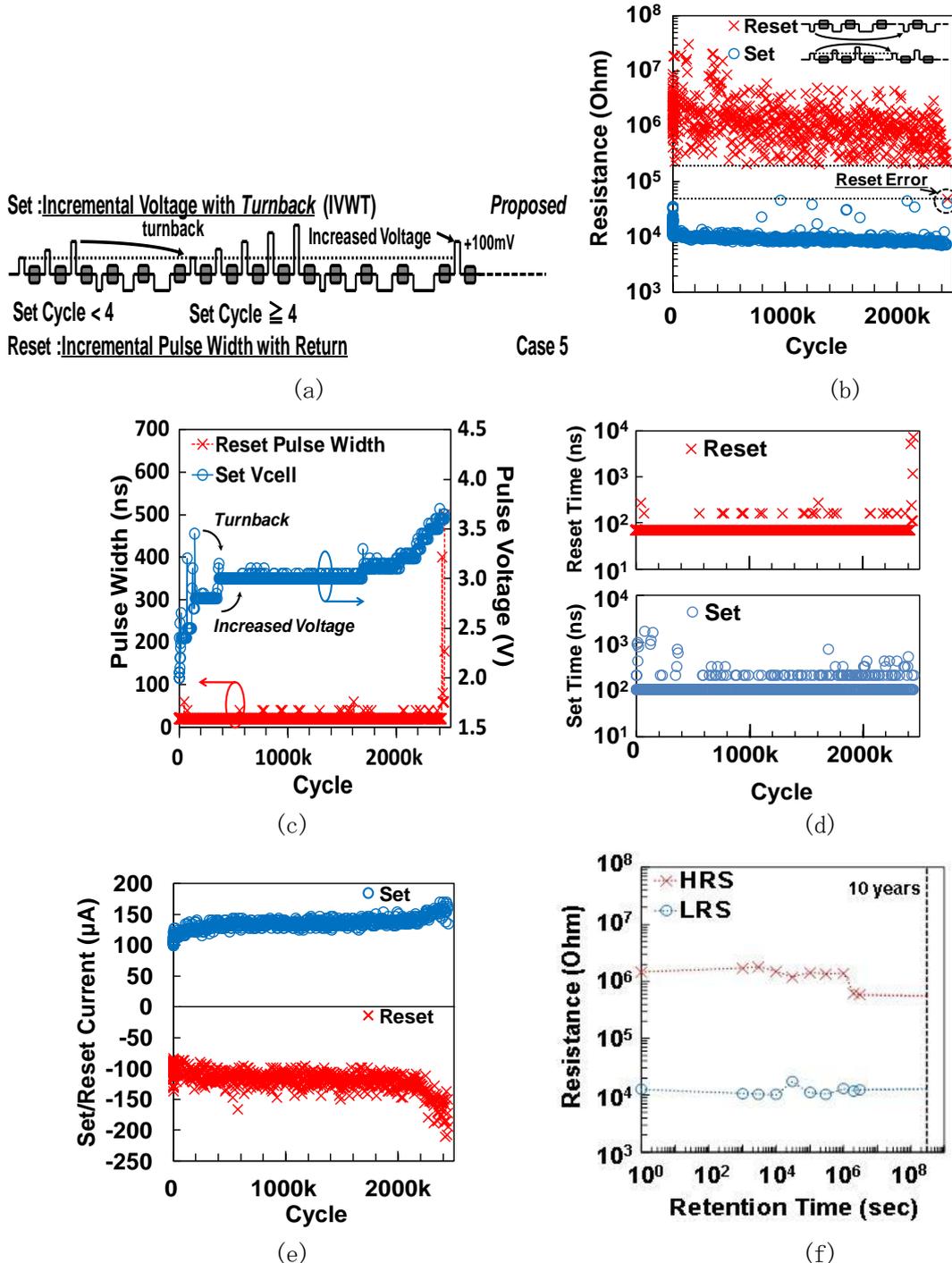


図 2.1.1-16 Reset を復帰パルス幅手法で、Set を復帰電圧増加パルス手法で行うベリファイ・プログラミング手法。(a)制御手法。(b)書き換え回数と抵抗値の関係。(c)書き換え回数と Set 電圧/Reset パルス幅の関係。(d)読み出し時間を 50ns と仮定した条件における書き換え回数と Set/Reset 時間の関係。(e)書き換え回数と最大書き換え電流の関係。(f) 20k 回書き換えを行った後の 85°Cにおけるデータ保持特性。

ii)-6 デバイスの摩耗モデル

以上の測定結果から ReRAM のモデルを議論する(図 2.1.1-17)。ReRAM のデバイスサイズから動作するモデルが違うと言われている。今回使用したデバイスの下部電極系は 50nm であり、フィラメントの直径は 10nm と言われているのでフィラメントモデルを元にデバイスが故障するモデルを考える。フィラメントの幅はパルス幅に比例し、フィラメントの長さは電圧に比例すると考える。このモデルにおいて、摩耗したデバイスの LRS には長いパルスを、HRS には高い電圧のパルスを加えることでデバイスを回復させることができる。スイッチングを多く行くと LRS においてフィラメントは初期よりも太くなると考えられる。一方、HRS ではスイッチングを行っていくとフィラメントが初期よりも短くなると考えられる。摩耗したデバイスの LRS では Reset パルス幅が十分に長くないと上部電極の界面からフィラメントが取り除かれずに Reset に失敗する。よって復帰パルス増加手法は摩耗した LRS であるデバイスを回復することができると考えられる。一方、摩耗したデバイスの HRS では Set 電圧が十分に高くないとフィラメントは十分に上部電極まで成長せずに Set に失敗する。よって、電圧を増加させる手法で摩耗した HRS であるデバイスを回復させることができる。ここで、電圧を増加させ過ぎるとフィラメントの幅が急激に増加してしまう。ゆえに、HRS から Set するために過剰な電圧を加えるとフィラメントが太くなってしまい Reset に失敗する。また、Reset パルスが長すぎると HRS でのフィラメントが短くなりすぎて Set に失敗する。よって、これらの過剰な Set や Reset を防止することと同時に書き込み時間を最小にするため、復帰パルス幅増加手法と復帰電圧増加手法が必要となる。

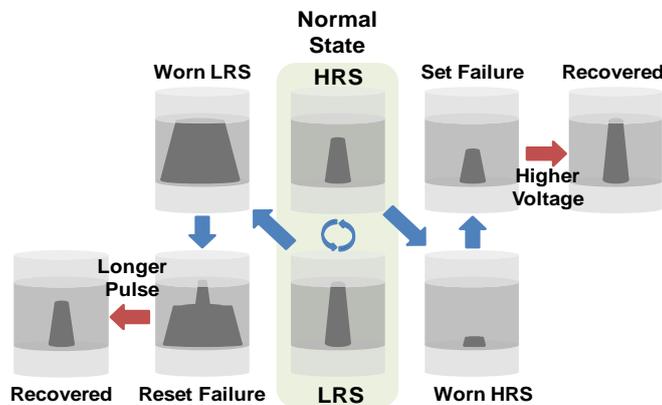


図 2.1.1-17 フィラメントモデルを元に提案した ReRAM の故障モデル。

表 2.1.1-4 にこれまでに挙げた手法と書き換え回数との関係を示した。また、表 2.1.1-5 には最初の 40k 回目までの HRS と LRS それぞれの平均と分散の比を示すとともに、1 回のベリファイ読み出し時間を 50ns と仮定したときの平均時間を示した。復帰パルス幅手法による Reset と復帰電圧増加手法による Set の組み合わせで簡易な同じパルスの繰り返しによるベリファイ・プログラミングによる書き換え回数は 50 倍以上になった。また、Set/Reset ごとの抵抗のばらつきはベリファイ・プログラミングを行った場合に比べ十分に抑えられた。また、フィラメントのデバイスモデルを仮定することで提案した手法がなぜ有効なのかを議論し、デバイスが摩耗していく現象をフィラメントの幅と長さがそれぞれパルス幅と電圧に関係するモデルを提案し説明した。

表 2.1.1-4 ベリファイ・プログラミング手法と書き換え回数。

	Method	Set Method	Reset Method	Endurance
Conventional	Case 1	w/o Verification	w/o Verification	< 100
	Case 2	Fixed Pulse Set Cycle	Fixed Pulse Reset Cycle	48k
	Case 3	IV Set Cycle	IV Reset Cycle	40k
Proposed	Case 4	IV Set Cycle	IPWWT Reset Cycle	104k
	Case 5	IVWT Set Cycle	IPWWT Reset Cycle	2444k (x50)

表 2.1.1-5 ベリファイ・プログラミング手法と最初の 40k 回までの抵抗値の平均と分散の比と読み出し時間を 50ns と仮定したときの平均時間。

	Method	σ_{LRS}/μ_{LRS}	σ_{HRS}/μ_{HRS}	Set Time	Reset Time
Conventional	Case 1	0.73	2.35	-	-
	Case 2	0.38	0.94	63 ns	73 ns
	Case 3	0.55	1.16	106 ns	70 ns
Proposed	Case 4	0.53	1.00	132 ns	86 ns
	Case 5	0.38	1.13	138 ns	70 ns

iii) 消費電力 1/10 を実現する 3 次元実装 ReRAM/MLC NAND ハイブリッド SSD とデータマネジメント手法

平成 24 年度はにおいて、ReRAM を SCM に用いた 3 次元実装 ReRAM/MLC NAND ハイブリッド SSD のデータマネジメントアルゴリズムの提案と、ReRAM に求められる仕様を探索した。その結果、従来の SSD の問題点を解消し、従来比で消費電力 1/10 を達成する SSD アーキテクチャを開発した。提案 SSD の物理イメージ図は図 2.1.1-18 のようになる。

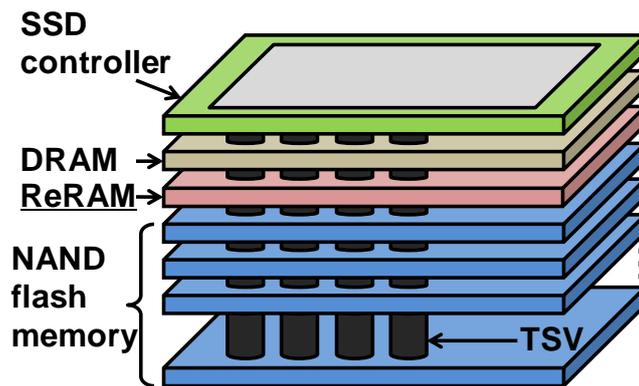


図 2.1.1-18 3次元実装 ReRAM/MLC NAND ハイブリッド SSD の物理イメージ図

iii)-1 ReRAM の仕様

まず昨年度の成果により ReRAM I/F の仕様について議論した。図 2.1.1-19(a)は、ReRAM の実測 Set パルス波形で、50ns の書き込みができています。ベリファイ・プログラミングを行うことで、書き換え回数は 10^6 回まで実現できるが、ワースト条件では、ベリファイ・プログラミングが 10 回以上必要であった図 2.1.1-19(b)は、ベリファイ・プログラミングありで書き換えした場合のベリファイ回数の実測結果である。よって、レイテンシーの要求仕様が厳しい DRAM I/F ではなく、NAND I/F のような、Ready/Busy を持つ仕様が必要である。

次に、データの上書き仕様について議論する。書き込みデータの断片化が SSD の書き込み性能低下の原因の一つであると示されている。表 2.1.1-6 に、NAND フラッシュメモリと ReRAM の仕様を示す。NAND フラッシュメモリの最小書き込み単位はページである。消去はブロック単位であり、書き込み済みページへは上書きができない。従って、ページサイズより小さい断片化したデータの上書きが発生した場合、上書き対象のページからデータを読み、上書きデータとマージをした後、新しいページにデータを書き込む。そして古いページは無効とする。NAND フラッシュメモリに上書きが続くと、無効ページが増え、書き込み可能な新しいページが少なくなる。書き込み可能な新しいページを作るためには、ブロック回収が必要となる。まず、ある一つのブロックに注目し、ブロック内の有効なデータは書き込み可能な他ブロックの新しいページにコピーする。結果ブロック内のページはすべて無効となり、そのブロックは消去できると同時に、書き込み可能な新しいページを得ることができる。これら一連の操作が書き込み性能、信頼性低下と、電力増大の原因となっている。これに対して、ReRAM のアクセス単位はセクター (512B) で、セクター単位での上書きが可能である。NAND フラッシュメモリは、記憶素子であるフローティングゲート (FG) と選択トランジスタが一体化した構造を持つことに対し、ReRAM は、選択トランジスタと記憶素子である抵抗変化素子が独立しているためである。これにより、断片化した上書きデータにより発生する問題を解決できる。

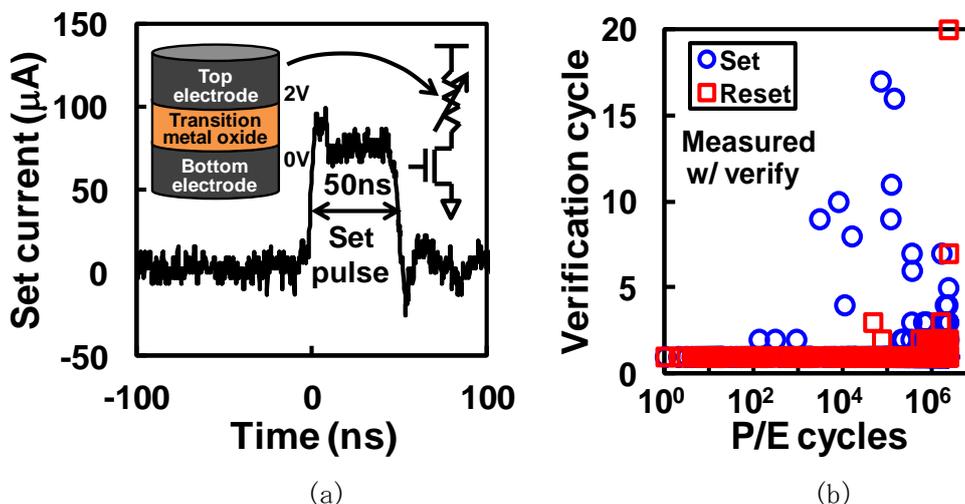


図 2.1.1-19 ReRAM の測定結果。(a)実測 Set パルス波形。(b)ベリファイ回数。

表 2.1.1-6 SLC/MLC NAND と ReRAM の仕様

	SLC/MLC NAND	ReRAM
Read latency (Max.)	85us/page	<3μs/sector
Write latency (Typical)	Lower page 400μs (SLC) Upper page 2800μs	(Set/Reset) <3μs/sector
Erase latency (Typical)	8500μs/block	Unnecessary
I/O: Toggle/ONFi DDR	400MHz	1066MHz
V _{DD} (Core / I/O)	3.3V / 1.8V	1.8V / 1.2V
Access unit	Page (16KiB)	Sector (512B)
Partial write/ overwrite	Impossible (erase required)	Possible
Required endurance	3x10 ³	10 ⁵

iii)-2 データマネジメントアルゴリズム

図 2.1.1-20 に 3 次元実装 ReRAM/MLC NAND ハイブリッド SSD のブロック図を示し、データマネジメントアルゴリズムを提案する。アイデアの鍵は、断片化したデータと、頻繁に上書きされるページのデータは ReRAM へ書き込み、シーケンシャルなデータは NAND フラッシュメモリに書き込むことである。

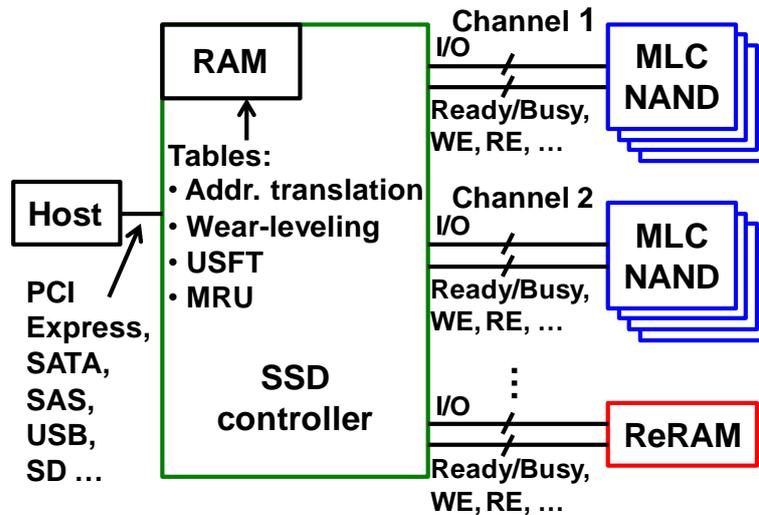


図 2.1.1-20 3次元実装 ReRAM/MLC NAND ハイブリッド SSD のブロック図

まず、書き込みデータの断片化判定手法を提案する。図 2.1.1-21 で示す、Used Sector Flag Table (USFT) を SSD コントローラ内に持ち、Logical Sector Address (LSA) ごとに、使用済みであれば 1 未使用であれば 0 のフラグを記録する。次にページ単位の使用率 R を計算する。例えば、NAND フラッシュメモリのページサイズが 4KiB の場合、セクター数は 8 である。そのうち、使用済みのセクター数が 3 であれば使用率 $R=3/8=0.375$ となる。

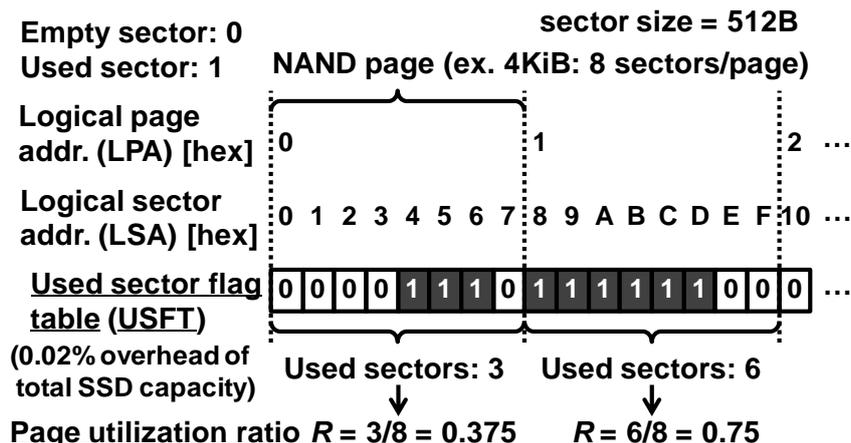
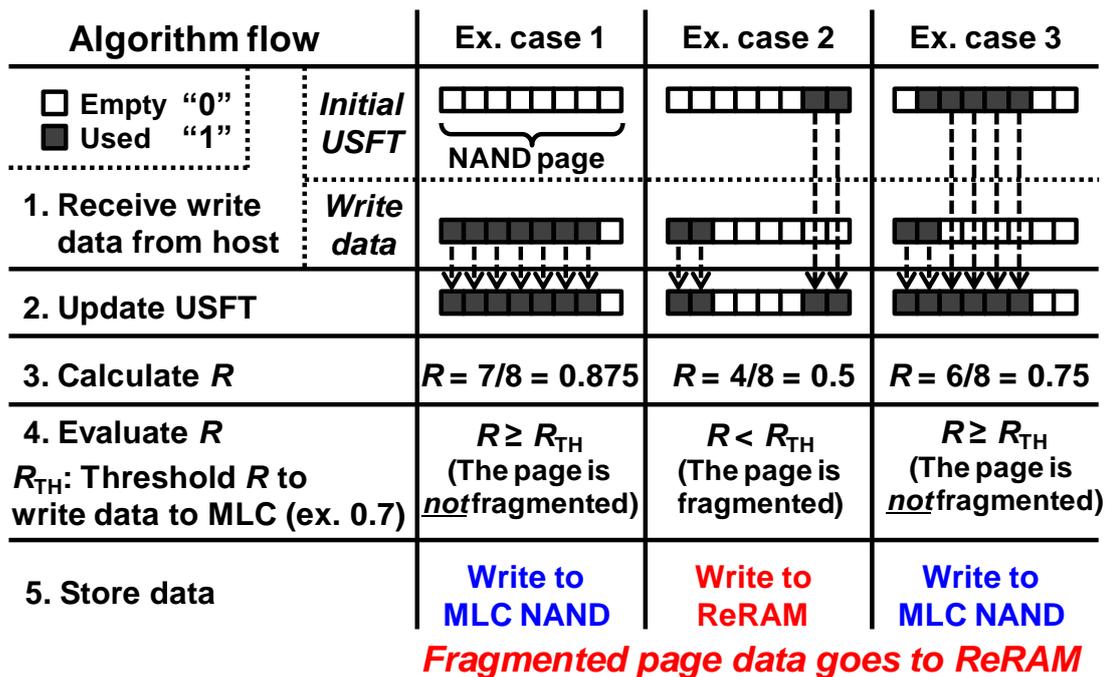


図 2.1.1-21 used sector flag table (USFT)と使用率 R の計算

データマネジメントアルゴリズムとして、図 2.1.1-22 に示す Anti-Fragmentation (AF) アルゴリズムを提案する。このアルゴリズムは断片化したデータのみ ReRAM に書き込むことを目的としている。ホストからのデータ書き込みリクエストが発行された場合、書き込み対象ページの使用率 R を計算する。 R が基準値 R_{TH} より小さい場合、断片化したデータと判断し、ReRAM に書き込む。 R_{TH} は ReRAM の空き容量でダイナミックに変更する。ReRAM の空き容量が多い場合には、 R_{TH} の値を大きくし、ReRAM への書き込みが増えるようにする。ReRAM の空き容量が小さい場合には、 R_{TH} の値を小さくし、より断片化したデータのみ ReRAM へ書き込むようにする。



(a)

ReRAM free region	~10%	10%~19%	20%~29%	30%~39%	40%~
R_{TH}	0	0.6	0.7	0.8	0.9

(b)

図 2.1.1-22 Anti-Fragmentation (AF) アルゴリズム。(a) Fragmented page 判定方法。(b) ダイナミック R_{TH} 変更方法。

次に、Most-Recently-Used (MRU) アルゴリズムを提案する (図 2.1.1-23)。ホストから来る書き込みリクエストの Logical Page Address (LPA) を FIFO アルゴリズムを使って MRU テーブルへ保存する。書き込みリクエストの LPA が、MRU テーブル内に存在する場合には、頻繁に上書きされる LPA と判断し、AF アルゴリズムの R と関係なく ReRAM に書き込む。このアルゴリズムにより、頻繁に上書きされるホットデータを、データの断片化に関わらず、ReRAM 内に留めることができる。

最後に、Reconsider-As-A-Fragmentation (RAAF) アルゴリズムを提案する (図 2.1.1-24)。AF アルゴリズムでは、ページの使用率 R が R_{TH} より大きくなった場合、そのページのデータは MLC NAND に留まり続けることになる。その R が R_{TH} より大きいページに断片化した書き込みリクエストがホストから来る場合、必ず MLC NAND 内で上書き操作が行われるため、性能低下の原因となる。RAAF は、この問題を解決し MLC NAND から ReRAM にデータを戻すアルゴリズムである。まず MLC NAND フラッシュメモリへデータが書き込まれたページの USFT はすべて 0 に戻す。次に、断片化した上書きリクエストが来た場合には、AF アルゴリズムにより R が小さいと判断され、MLC NAND フラッシュメモリのデータを ReRAM に書き戻す。以上により、RAAF はホストからの断片化した上書きデータを ReRAM へ書き込むことを実現する。

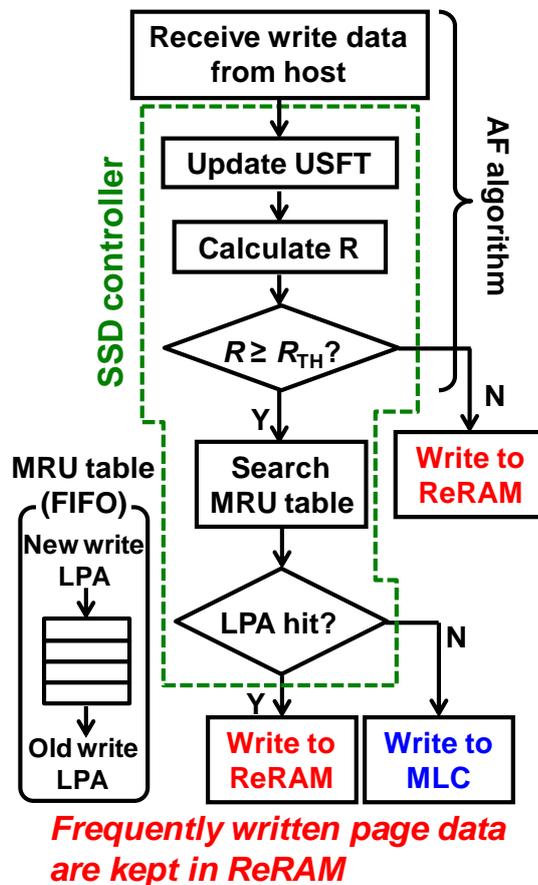


図 2.1.1-23 Most-Recently-Used (MRU) アルゴリズム

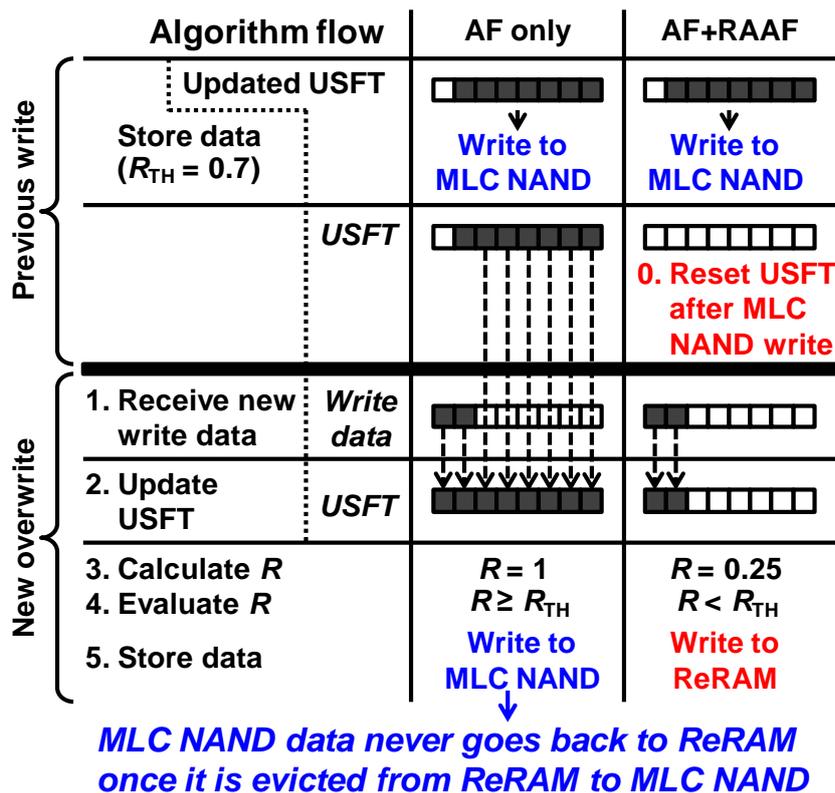


図 2.1.1-24 Reconsider-As-A-Fragmentation (RAAF) アルゴリズム

提案する 3 次元実装 ReRAM/MLC NAND ハイブリッド SSD について、TLM(transaction level modeling) ベースのエミュレータを前年度までに開発したため、これを用いて、書き込み性能、消去回数、消費電力の評価を行った。本エミュレータは各種メモリ遅延、消費エネルギー、書き換え回数を計算することが可能で、ブロック回収、ウェアレベリングなど各種 SSD 内動作を、ハードウェア記述言語を用いず、抽象度を上げた形で SSD 全体の動作のモデリングが可能である。比較対象には、従来の MLC NAND SSD と提案の 3 次元実装 ReRAM/MLC NAND ハイブリッド SSD、さらに ReRAM の代わりに SLC NAND を SCM に用いた SLC NAND/MLC NAND ハイブリッド SSD を用いた。評価に使ったワークロードは、図 2.1.1-25 に示すような、金融サーバのものを用いた。

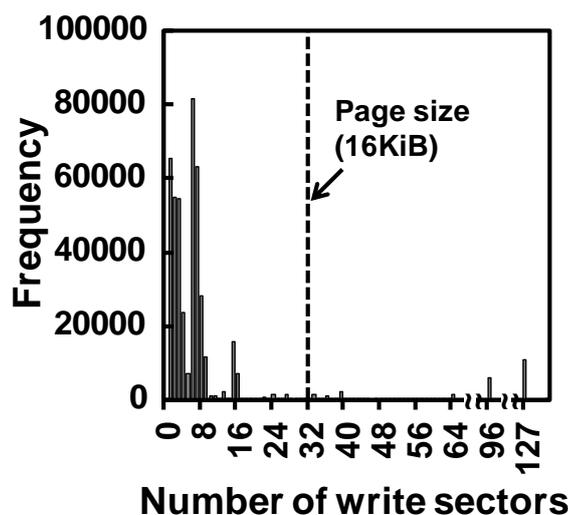


図 2.1.1-25 評価に使用した金融サーバの書き込みデータサイズの分布

評価結果を図 2.1.1-26 に示す。従来の MLC NAND SSD と比べて、提案アルゴリズムを用いた ReRAM/MLC NAND ハイブリッド SSD は、書き込み性能で 11 倍、79%の消費電力削減を実現した。さらに ReRAM/MLC NAND ハイブリッド SSD を 3 次元実装し IO 接続に TSV を用いた場合、IO 電力を 27 倍削減でき、消費電力を 93%削減できた。これにより消費電力を実質 1/10 にするアーキテクチャが可能であることが示された。TSV を用いた場合は、ESD 保護素子、パッケージ、PCB 配線などの負荷容量が削減できるためである。また MLC NAND の消去回数は、6.9 倍削減できた。SSD の交換周期を長くできるため、ストレージシステムのランニングコストを減らすことができる。

提案アルゴリズムを使い、ReRAM の代わりに SLC NAND を SCM に用いた場合、MLC NAND の消去回数を減らすことができる (図 2.1.1-26(c))。しかしながら、SLC NAND の消去回数は、MLC NAND の消去回数より 250 倍多く、SLC NAND のデバイス性能上許容できない。これは、断片化したデータが SLC NAND に書かれることで、頻繁にブロック回収が発生するためである。セクター単位で上書きが可能な ReRAM では、この問題が発生しないため、消去回数が SLC NAND より少ない。

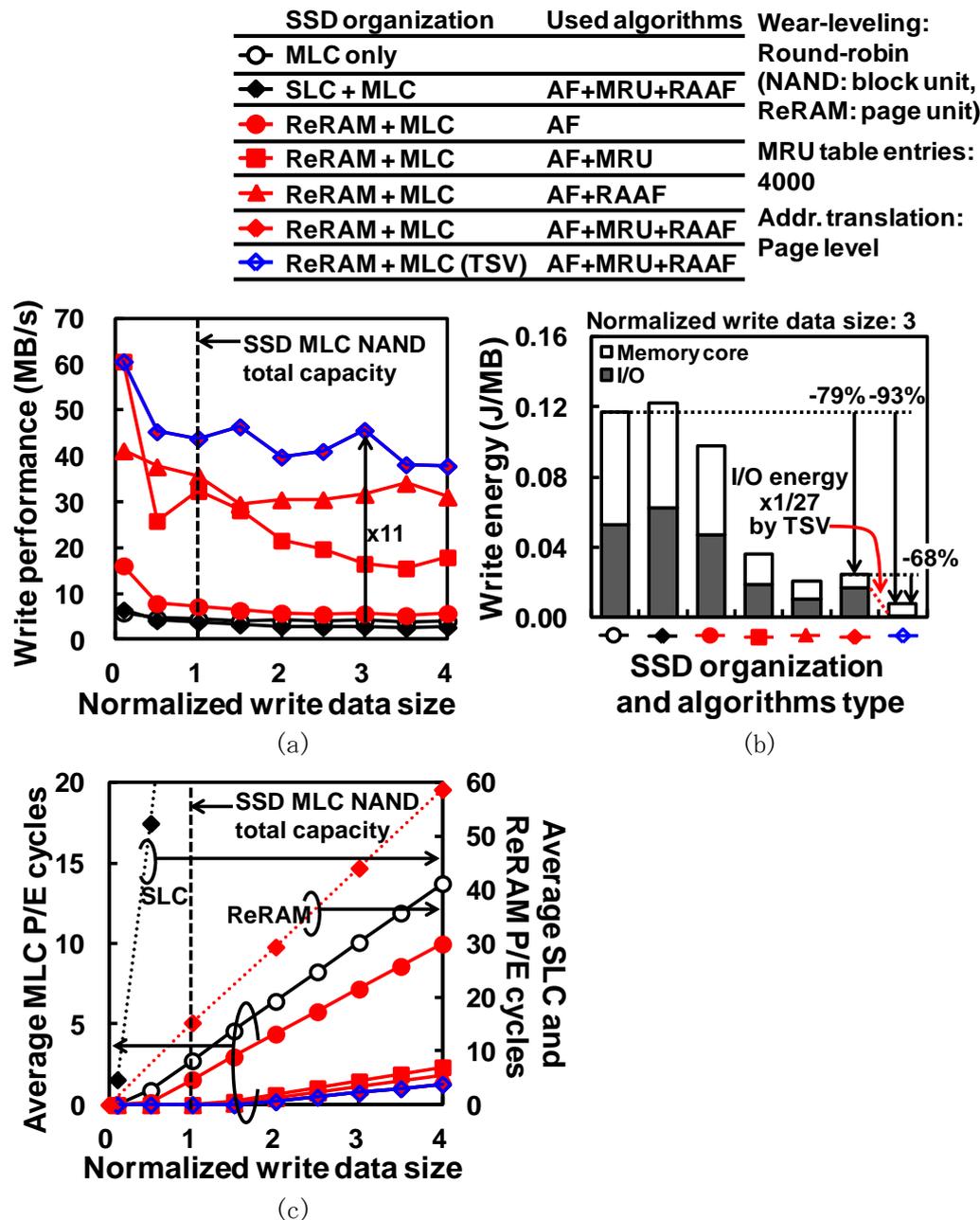


図 2.1.1-26 提案手法を含めた SSD の評価結果。(a)書き込み性能。(b)消費電力。TSV と ReRAM および提案アルゴリズムを用いることで消費電力 1/10 を実現。(c)書き換え回数。

次に ReRAM に求められる性能を探索した。図 2.1.1-27 に、ReRAM の書き込みレイテンシー、読み込みレイテンシーを様々に変えた場合の書き込み性能 (図 2.1.1-27(a))、消費電力 (図 2.1.1-27(b)) を示す。書き込み、読み込みレイテンシーは $3\mu\text{s}$ 以下であれば、書き込み性能を維持できることが判る。つまり、ReRAM の書き込みパルスを 50ns として $3\mu\text{s}$ までは書き込みベリファイ操作が許容できる。図 2.1.1-26(c) で ReRAM の書き換え回数と、MLC NAND の書き換え回数の比を示す。ReRAM の書き換え回数は、MLC NAND の書き換え回数の 28 倍であった。MLC NAND の許容書き換え回数を 3×10^3 とすると、ReRAM に求められる書き換え回数は 10^5 以下となる。ReRAM の書き換え回数は 10^6 のため、これを十分満たしている。本評価をまとめたものを表 2.1.1-7 に示す。

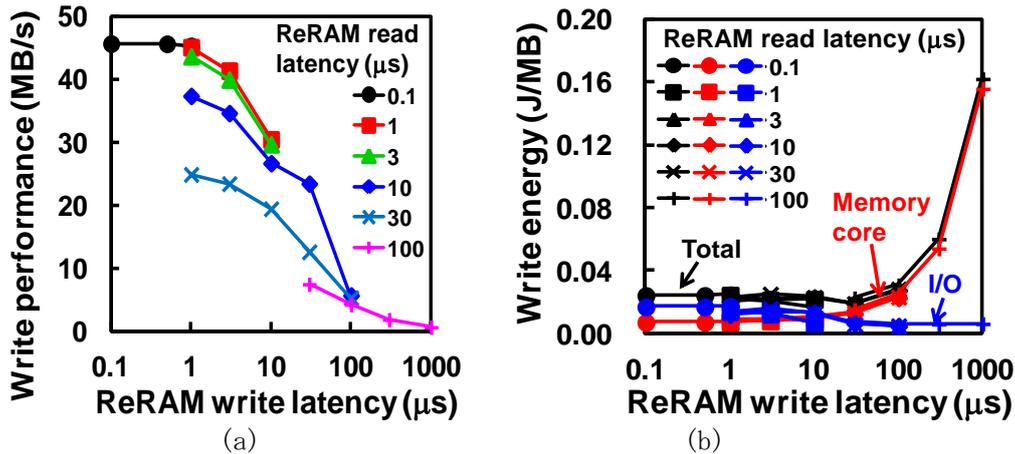


図 2.1.1-27 ReRAM の書き込み、読み込みレイテンシーを様々に変えた場合の評価結果。(a)書き込み性能 (b)消費電力。

表 2.1.1-7 本研究のまとめ

	MLC NAND only	ReRAM + MLC	ReRAM + MLC (TSV)
Algorithm	-	AF+MRU +RAAF	AF+MRU +RAAF
Write performance (MB/s)	4.2	46	46
Write energy (J/MB)	0.12	0.024	0.0079
MLC NAND P/E cycles*	3.6	0.53	0.53

Additional annotations in the table:
 - From MLC NAND only (4.2) to ReRAM + MLC (46): $\times 11$
 - From MLC NAND only (0.12) to ReRAM + MLC (0.024): -79%
 - From MLC NAND only (0.12) to ReRAM + MLC (TSV) (0.0079): -93%
 - From ReRAM + MLC (0.024) to ReRAM + MLC (TSV) (0.0079): -68%
 - From MLC NAND only (3.6) to ReRAM + MLC (0.53): $\times 1/6.9$

2.1.2 目的に照らした達成状況

平成 22 年度は主として、メモリ特性(目標仕様)を用いたメモリ等のモデルの開発を行うこととしていた。まず、システムパフォーマンス評価ツール、電力・熱評価ツール等の ESL(CAD)ツールを用いたメモリシステム開発プラットフォームの構築を行い、メモリ特性評価計測装置を導入し、メモリの特性評価に着手することで、目標を達成した。さらに高速不揮発メモリの高速性・不揮発という特性を生かしたアーキテクチャとして、高速不揮発メモリとフラッシュメモリを搭載したメモリアーキテクチャ(SSD)を提案しピーク電力を 97%削減できることを示し SSDM(Solid-State Devices and Materials)で論文発表を行った。

平成 23 年度は、メモリ特性(実チップデータ)を用いたメモリシステムの検討と最適化を行い、メモリシステム開発プラットフォームを用いて、機能モデルの作製および、仮想システムの開発に着手することとしていた。そこで、ESL(CAD)ツールを用いて、平成 22 年度に開発したメモリシステム開発プラットフォーム上に、メモリ等のデバイスの機能モデルから成る仮想デモシステムを構築することに成功した。さらに、メモリ特性評価において高速不揮発メモリの書き換え回数を 50 倍増加する、ターンバック書き込み方式を開発し、50 ナノメートルサイズの高速不揮発メモリ素子を用いて、有効性を実証し、IMW(International Memory Workshop)で論文発表を行った。提案手法はシステム性能の劣化なしに信頼性を向上することができる。ここで得られた知見、データはメモリシステムの最適化に必要なパラメータとして抽出、活用され、該当年度目標を達成した。

平成 24 年度は、平成 23 年度にまでに開発した仮想デモシステムを用いて、従来のメモリアーキテクチャの消費電力に対し、実質上 1/10 以下に削減する不揮発アーキテクチャの構成事例を探索することとしていた。そこで、フラッシュメモリへの書き込みに伴うデータ断片化による性能劣化を極力低減し、高速不揮発メモリに書き込みを代替するアーキテクチャと制御アルゴリズムを開発することに成功した。その結果、消費電力を従来 SSD アーキテクチャより実質 1/10 とすることができ、本研究の目標を達成することができた。また、これに付随して書き込み性能も 11 倍、フラッシュメモリの寿命を決定する書き換え回数も約 1/7 に削減できることも明らかとなった。さらに、高速不揮発メモリに求められる仕様を探索し、書き込み、読み込み時間は $3\mu\text{s}$ 以下、書き換え回数は 10^5 回以上必要であることを明らかにした。本技術は集積回路分野の世界トップクラスの学会である、Symposium on VLSI Circuits 2012 で論文発表が行われた。

研究成果はジャーナル論文・国際会議・国内会議で 26 件の発表を行った。また、7 件の解説論文の発表を行った。特許は 7 件出願した。研究成果は、学会だけでなく、新聞社等のメディアにも注目され、47 件の報道が行われた。

以上の結果より、「高速不揮発メモリ機能技術開発」プロジェクトで開発中の ReRAM が十分、実際のシステムで利用できることを明らかにし、本研究で設定した目標は全て達成された。

2.2 高速不揮発メモリの開発

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構とエルピーダメモリは、「高速不揮発メモリ機能技術開発／高速不揮発メモリの開発」として、既存の不揮発メモリに比べて、高速性、書換え耐性を大幅に向上させ、情報機器の圧倒的な消費電力低減を実現しうる高速不揮発メモリの開発を平成22年から24年までの3年間共同で行った。また、共同実施先として、シャープ株式会社と独立行政法人産業技術総合研究所が参画した。メモリデバイスの仕様の策定は、「高速不揮発メモリ機能技術開発／不揮発アーキテクチャの研究開発」を行う中央大学チームと連携して実施した。

ギガビットクラスのメモリを実現するために、抵抗変化素子膜として遷移金属酸化物を選択した。この薄膜を上下の金属電極で挟む構造の抵抗変化素子の材料と構造の検討を、主に単体メモリセルの試作と評価を通して行った。この結果、平成23年度までにオンオフ比として一桁以上を、書き込み電流として20 μ A／セル程度を、書き込み時間として10ns程度を、書換え耐性として1E8回程度を、データ保持特性として240年(@55°C)を確認できた。これにより、プロジェクトの最終年度の目標である大容量プロトタイプチップの設計／回路シミュレーションを通して、ストレージクラスメモリの実用化判断を行うことが出来る見通しを得た。

抵抗変化素子と選択デバイスとしてのNch-MOSTランジスタから成るReRAMメモリセルをアレイ状に配置してメモリチップを構成する。平成24年度に実施した大容量プロトタイプチップの設計にフィードバックするため、中規模アレイ搭載チップおよび縦MOSアレイTEGの設計、試作、評価を行い、それぞれのアレイ動作を確認した。特に、縦MOSアレイTEGは、30～40nmプロセスで、選択デバイスに縦MOSTランジスタを用いた4F2メモリセルを使って平成23年度に設計を行い、平成24年度に試作を行って基本的なアレイ動作を確認することが出来た。これと同じタイプのメモリセルおよびプロセスを使うことで、更に、これをスケールダウンすることにより、大容量プロトタイプチップおよび、これ以降のギガビットクラスの高速不揮発メモリ実現の可能性をプロセス、デバイス面から見出した。

大容量プロトタイプチップは、縦MOSアレイTEGで開発したメモリセルをベースに設計した、容量8ギガビットのメモリである。ストレージクラスメモリとして、システム側からのデータ転送の高速化の要求に応えるための仕様の検討を、「高速不揮発メモリ機能技術開発／高速不揮発メモリの開発」チームと協業して行った。目標性能は、既存の不揮発メモリであるSLC NANDフラッシュに対して10倍以上速いRead、Program時間とした。現在、設計を完了し、チップレベルでの動作を検証中であり、回路的に目標を達成できる見通しである。

以上により、遷移金属酸化物を用いた、ReRAMを、ギガビットクラスの高速不揮発メモリとして用いることで、ストレージクラスメモリが実用化可能なレベルであることの判断が出来た。

2.2.1 中規模アレイ TEG の設計

ReRAMメモリセル素子は、抵抗変化材料とNch-MOSTランジスタから成り(図 2.2.1-1)、高抵抗状態(RESET状態=1)と低抵抗状態(SET状態=0)が存在する。高抵抗状態から低抵抗状態に変化させることをSET書き込み、逆に高抵抗状態から低抵抗状態に変化させることをRESET書き込みと定義する。SET書き込みは、図 2.2.1-2 においてワード線(WL)、トランジスタのゲートを電圧 V_g としてトランジスタをオン状態にしてビット線(BL)にSET電圧 V_{SET} を印加することにより、ビット線からソース線(SL)に電流を流して行なう。この時、 V_g を調整して流れる電流を I_{comp} に抑える必要がある。一方、RESET書き込みは、ソース線にリセット電圧 V_{RESET} を印加してSET書き込みと逆に電流を流すことにより行なわれる(図 2.2.1-3)。また、ReRAMの初期の抵抗値は高抵抗状態となっており、ReRAM素子には初期化(フォーミング)動作が必要である。フォーミング動作はSET書き込みと方向に電流を流すことによって行なわれるが、ビット線(BL)に印加する電圧はセット電圧よりも高い電圧を印加する($V_{FORMING} \geq V_{SET}$)。この際、SET書き込みと同様に流れる電流を I_{comp} 以下となる様に V_g を設定して行なう。

Read動作はビット線にセット電圧よりも低い電圧をかけて行い、ビット線からソース線に流れる電流の大きさをセンスアンプ回路で検出してメモリセルが高抵抗状態(RESET状態=電流:小)と低抵抗状態(SET状態=電流:大)を読み分ける(図 2.2.1-4)。

これらの動作における電圧と素子に流れる電流の関係図を図 2.2.1-5 に示す。

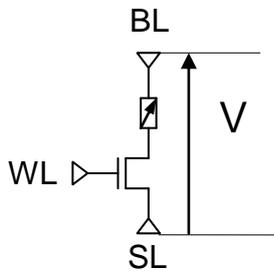


図 2.2.1-1 ReRAM 素子

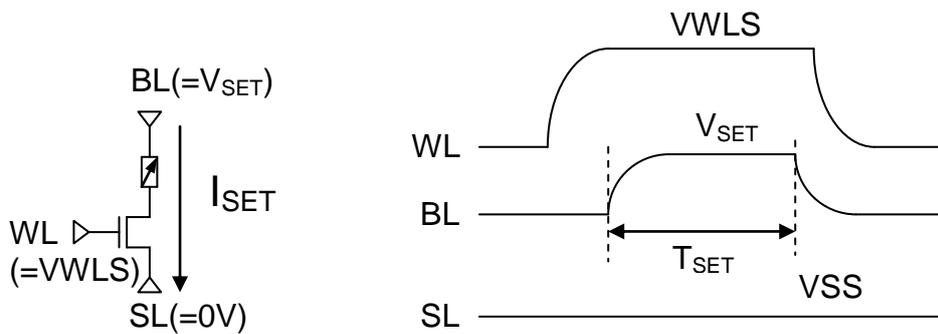


図 2.2.1-2 SET 動作

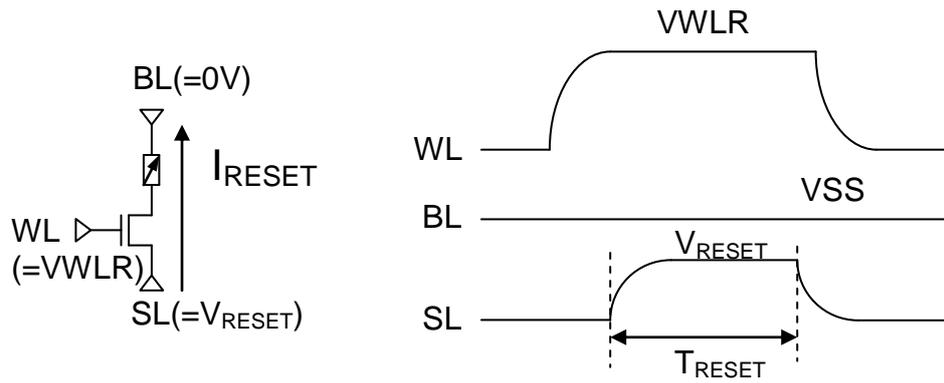


図 2.2.1-3 RESET 動作

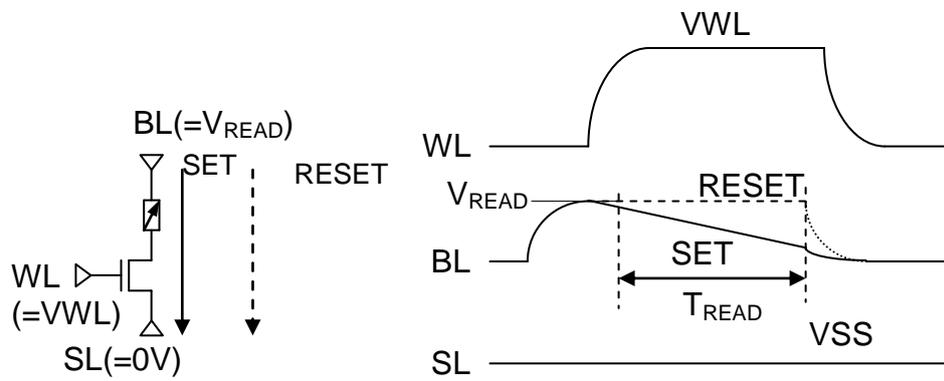


図 2.2.1-4 読み出し動作

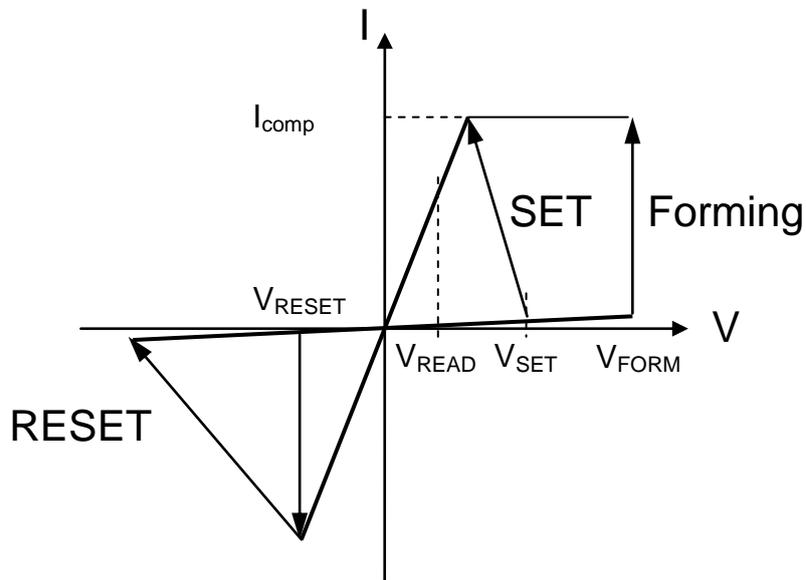


図 2.2.1-5 ReRAM 素子の電圧-電流特性

ReRAMメモリ素子の電気諸特性(電圧: V_{SET} 、 V_{RESET} 、 $V_{FORMING}$ 、 V_{READ} 、電流: I_{SET} 、 I_{RESET} 、 I_{comp} 、時間: T_{SET} 、 T_{RESET} 、 T_{READ})は加工プロセス条件、材料の組み合わせ、構造などの影響を受けて大きく変動する。特に、電圧と電流については選択素子のNch-MOSTランジスタの特性との補完関係がある為、様々なReRAM素子に対応する為にはNch-MOSTランジスタの特性(耐圧=最大印加可能電圧、電流駆動能力)を幅広く取る必要がある。この為、本研究で設計した中規模アレイTEGチップには2種類のNch-MOSTランジスタ(Cell-1, Cell-2)を選択デバイスとしたアレイを搭載することとした。表 2.2.1-1 に搭載するNch-MOSTランジスタ毎の電流・電圧仕様と搭載するメモリ容量を示す。

前述の様に、ReRAMメモリ素子の電気特性が大きく変動することに対応する為、電圧(V_{SET} 、 V_{RESET} 、 $V_{FORMING}$ 、 V_{READ})、電流(I_{SET} 、 I_{RESET} 、 I_{comp})、時間(T_{SET} 、 T_{RESET} 、 T_{READ})は評価パラメータとして様々な値に変更できる仕組みをテストチップに搭載し、メモリ素子の評価に対応可能とした。また、メモリ素子の抵抗値は10K Ω ~10M Ω の広範囲にわたり測定可能な回路を搭載することにより、メモリセルの特性評価の範囲を広げることが可能となった。

図 2.2.1-6 に中規模アレイ搭載テストチップのチップ写真を示す。プロセスルールは65nm CMOSプロセスで、チップサイズは7.3mm \times 9.47mm=69.131mm²となった。Cell-1、Cell-2は図 2.2.1-6 の通り、Bank A/BとBankC/Dにそれぞれ搭載されている。電源電圧(VDD)は1.8Vで、語構成(I/O)は \times 16、最大データ転送速度は200Mbpsとなっている。

表 2.2.1-1 メモリ素子動作条件

	Cell1	Cell2
容量	64Mb (32Mb x 2Bank)	16Mb (8Mb x 2Bank)
$V_{FORMING}$ (max)	3.0V	4.0V
V_{SET} (max)	3.0V	3.5V
V_{WLS} (max)	2.0V	2.8V
V_{RESET} (max)	3.0V	3.5V
V_{WLR} (max)	2.0V	2.8V
V_{READ} (typ)	0.3V	0.3V
V_{WL} (typ)	2.5V	2.5V
I_{SET} (max)	180uA	300uA
I_{RESET} (max)	180uA	300uA

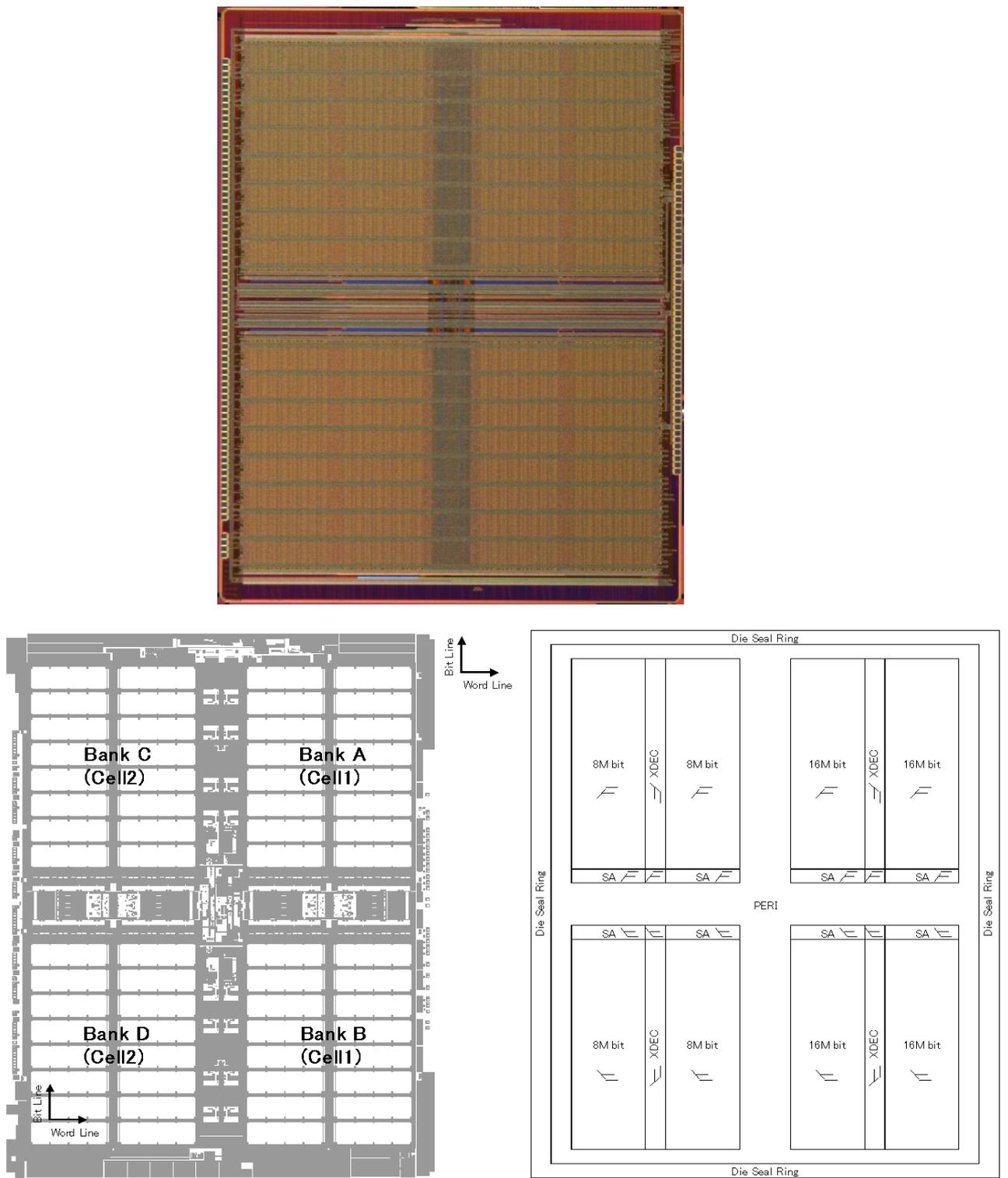


図 2.2.1-6 アレイ TEG チップ写真とバンク構成

2.2.2 単体メモリセルの試作と評価

容量1Gbit以上の高集積度のReRAMを実現するための基本データの取得を目的に単体メモリセルの試作を行った。単体メモリセルは、中規模アレイTEGの Cell1 と同じ構造の1ビットのセルをアルミ配線で引き出すものである。これにより、中規模アレイTEGをフル試作する場合に比べて、試作TATを大幅に短縮することが可能となった。試作には、300mmウエハ加工ラインを用いた。

抵抗変化素子膜としては、学会等で種々の材料が報告されているが、本研究では、既存のメモリプロセスとの整合性等も考慮して遷移金属酸化物を候補として選定した。また、素子膜とともにスイッチング特性を決める重要な要素となる電極材料／構造に関しても数種類を選択し、パラメータを比較した。更に、メモリプロセス構築で必要となる熱処理工程の影響も評価し、素子構造構築の判断材料とした。

平成22年度と平成23年度に、上記のタイプの単体メモリセルの試作評価を行い、書き込み電流として $20\mu\text{A}$ /セル(図 2.2.2-1)を確認し、達成目標の2)を、また、書き込み時間として10ns(図 2.2.2-2)を確認し、達成目標4)を実用化レベルでクリアした。書き換え耐性は、 10^8 回(図 2.2.2-3)程度であり、DRAMの置き換えを考えた達成目標には届いていないが、既存のNANDフラッシュメモリを凌駕するものであり、ストレージクラスメモリとして十分実用化可能なレベルであると判断している。オンオフ比は一桁以上(図 2.2.2-4)と目標を達成。単体メモリセル評価を通して、中規模/大規模アレイに適用可能な素子構造を構築出来た。

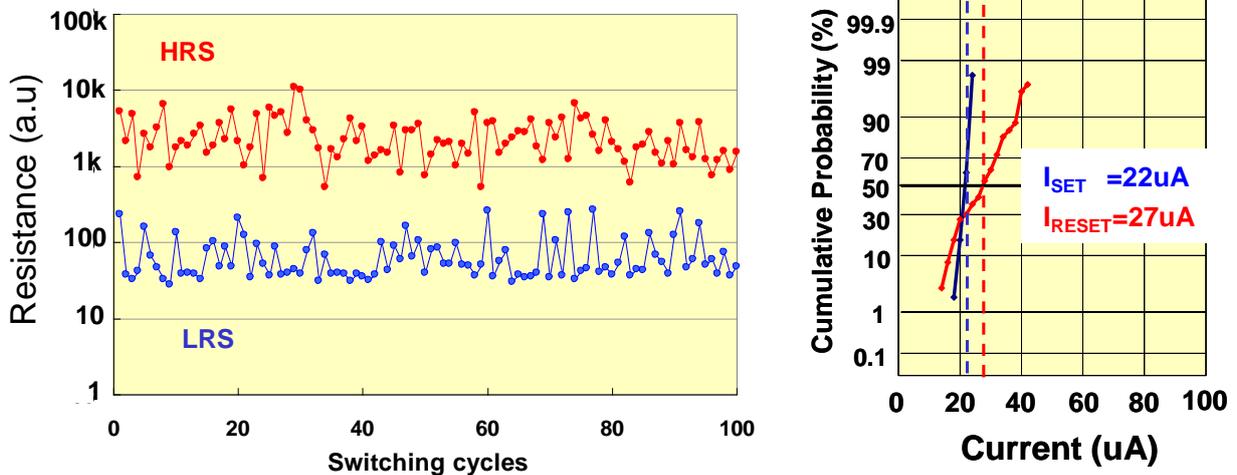


図 2.2.2-1 単体メモリセル Switching 特性

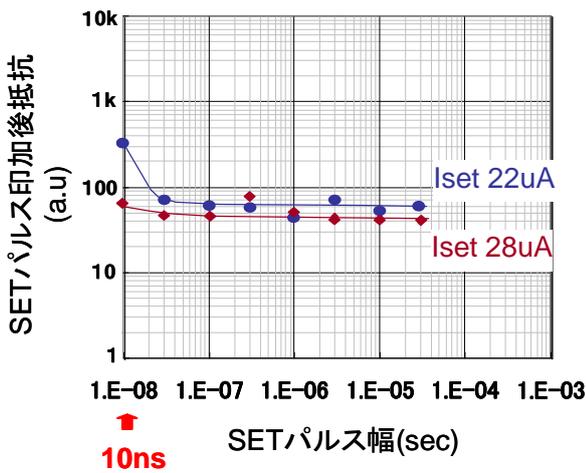


図 2.2.2-2 書き込み時間

10ns まで低電流書き込みが可能

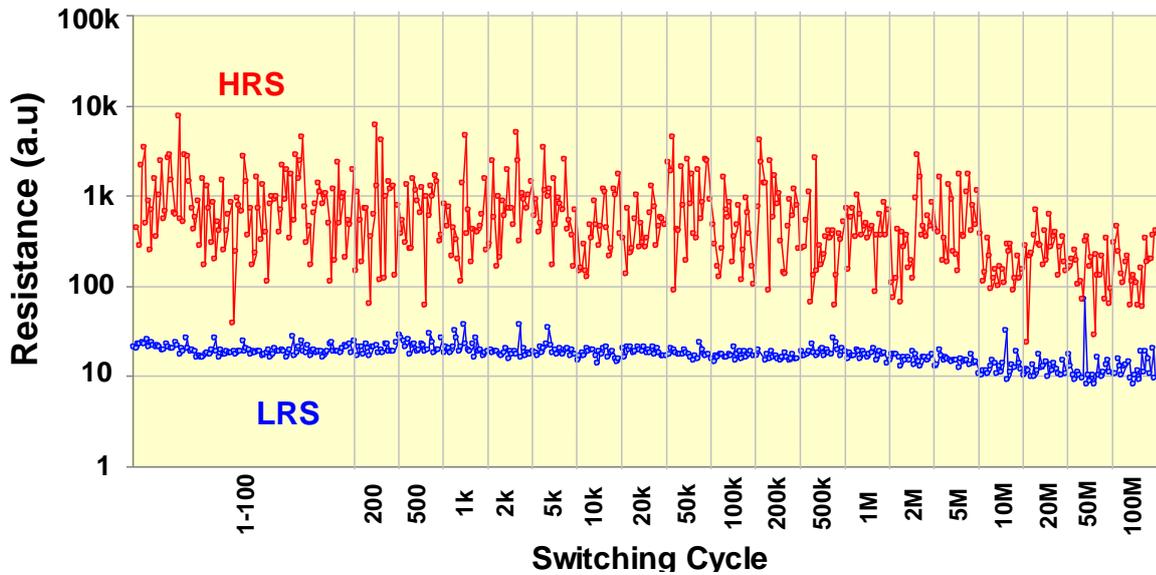


図 2.2.2-3 書き換え耐性

100cycle 以降、各測定ポイントで 20 回の Set/Reset を繰り返し測定。10⁸ 回まで Switching を確認。

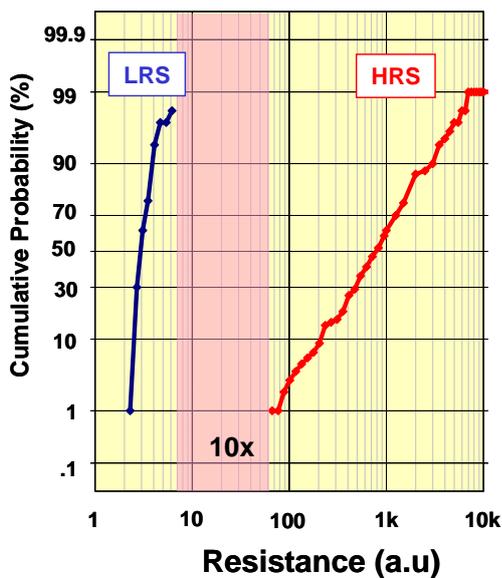


図 2.2.2-4 抵抗分布

2.2.3 中規模アレイ搭載テストチップの試作と評価

平成22年度に設計した中規模アレイ搭載テストチップの試作を平成23年度に行い、アレイ動作を確認した。このアレイの抵抗変化素子の下部電極サイズ(直径)はおよそ50nmであり、実用的なチップサイズで容量1Gbit以上を実現出来るレベルである。

この中規模アレイを用いてデータ保持特性を評価。55℃で240年(@t_{1%}, 図 2.2.3-1)を確認。製品化に向けて更に精度を上げていく。

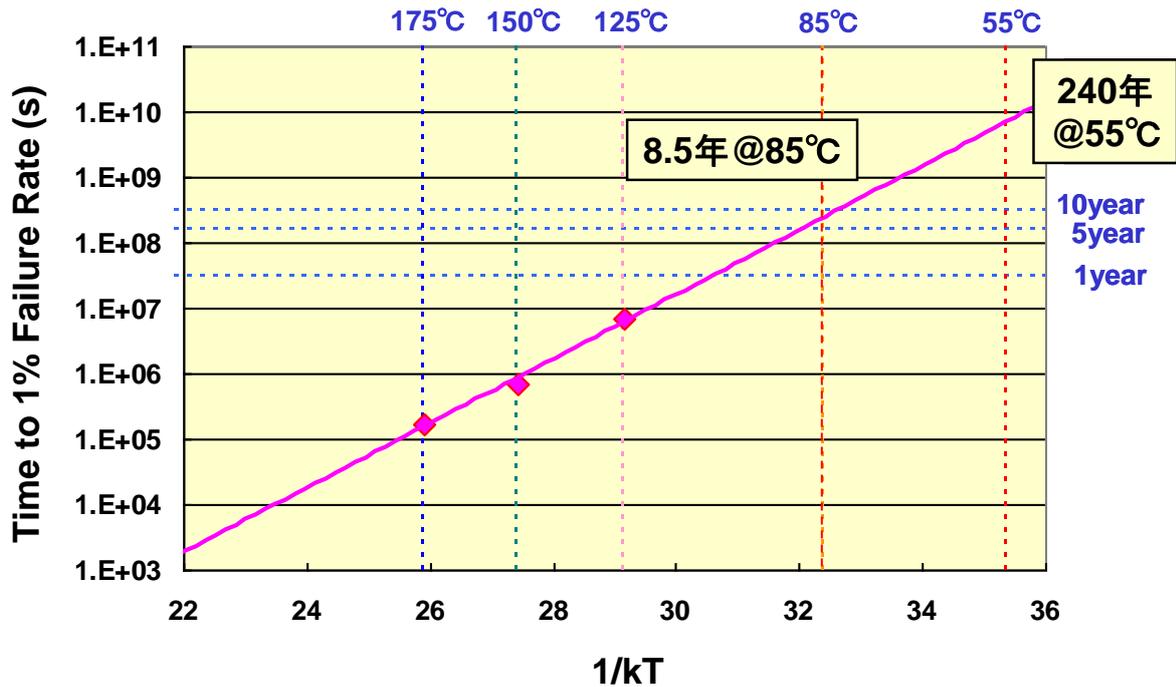


図 2.2.3-1 データ保持特性

2.2.4 縦MOSアレイTEGの設計

大容量プロトタイプチップではコスト面でリーズナブルなチップサイズを実現するため、30~40nmプロセスで、選択デバイスにセルサイズが4F2となる縦MOSTランジスタを採用する。抵抗変化素子と縦MOSTランジスタの整合性の確認と、トータルプロセスの立ち上げを目的とした1Gb縦MOSアレイTEGの設計を行った。

本アレイTEGの基本的な回路構成は前述の中規模アレイTEGチップを踏襲し、電圧、電流、時間は評価パラメータとして様々な値に変更できる仕組みを搭載し、抵抗変化素子の特性が大きく変動しても、同様に評価が可能となるように設計した。

ただし、縦MOSTランジスタの電流駆動能力と電圧条件が中規模アレイTEGに搭載したセルトランジスタ(平面N-Ch MOSTランジスタ)のものとは異なる事、及び周辺トランジスタのプロセスが異なることから、メモリアレイ制御電圧と外部の電源電圧が異なる。図 2.2.4-1 に縦MOSアレイTEGのセル構造を、バイアス条件を表 2.2.4-1 に示す。

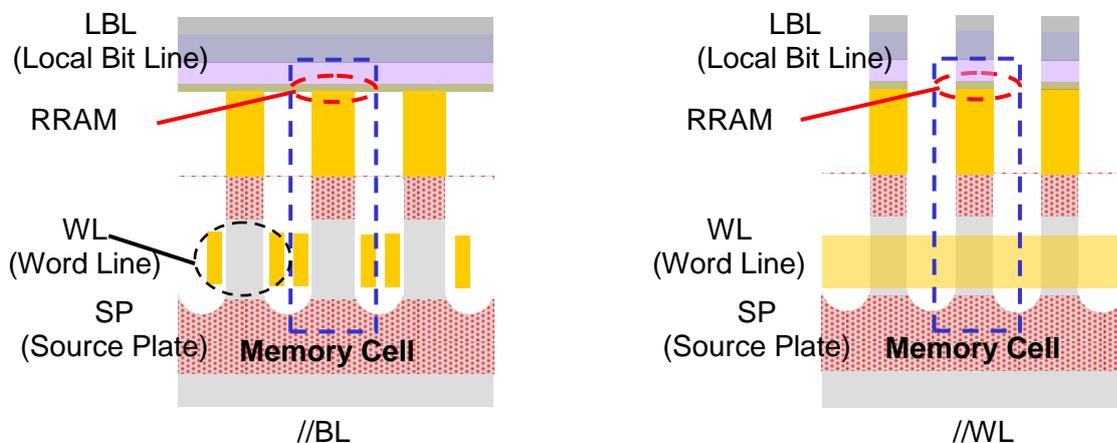


図 2.2.4-1 縦 MOS アレイ TEG セル構造

表 2.2.4-1 縦 MOS アレイ TEG 動作条件

電圧/電流	
V_{FORMING} (max)	3.5V
V_{SET} (max)	2.5V
V_{WLS} (max)	1.5V
V_{RESET} (max)	2.5V
V_{WLR} (max)	2.0V
V_{READ} (typ)	0.3V
V_{WL} (typ)	1.5V
V_{KK} (max) (非選択WL電圧)	-2.0V
I_{SET} (max)	35uA
I_{RESET} (max)	35uA

図 2.2.4-2 に縦 MOS アレイ TEG のチップレイアウト結果を示す。チップサイズは 8.14mm x 6.48mm=52.75mm² で、評価可能ビット数は1Gb、プロセス加工用のダミーセルは約3Gb 含まれている。DDR3 インタフェース、電源電圧(=VDD)は 1.5V で語構成(I/O)は x8 となっている。

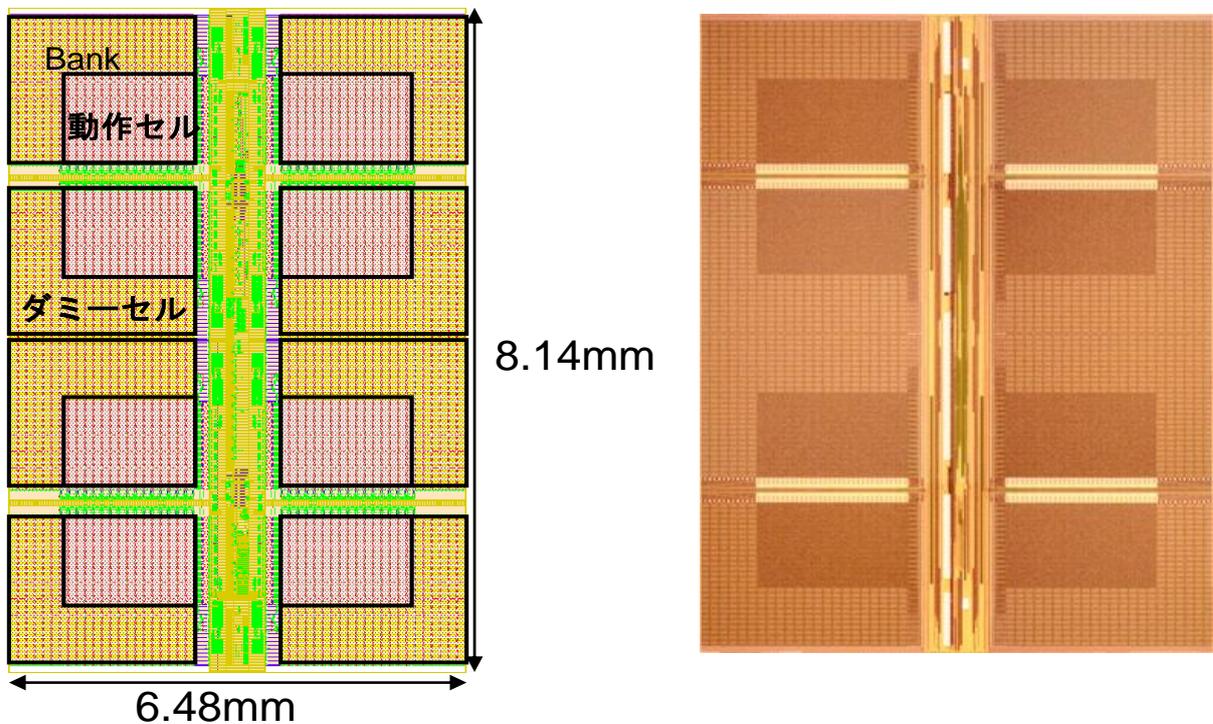


図 2.2.4-2 縦 MOS アレイ TEG チップイメージ

2.2.5 縦MOSアレイTEGの試作と評価

平成23年度に設計した縦MOSアレイTEGの試作と評価を平成24年度に行った。抵抗変化材料・電極材料の構造は、単体メモリセルと中規模アレイ搭載チップを使って開発したものを適用した。しかし、これらの従来ツールに比べて、縦MOSアレイTEGでは、フォーミングに要する電圧が大幅に増加し、フォーミングやその後のスイッチング特性が悪化することが判明した。従来ツールと縦MOSアレイTEGのメモリセルでは、下部電極径はほぼ等しいが、上部電極のサイズが、従来ツールでは、およそ200nmの方形パターンであるのに対して、縦MOSアレイTEGでは、設計最小寸法であるおよそ40nmのラインパターンであるという違いがある。物理解析を行った結果、上部電極の一部に使っている材料 α を通して外部から酸素が進入することがフォーミング耐圧上昇の原因であることが判った。種々の実験の結果、材料 α から酸素を通しにくい材料 β に変えることで、フォーミング耐圧を改善出来た。また、電極材料の変更によるスイッチング特性への影響を抑えるため、構造の見直しを行った。この結果、従来の材料 α で得られていたものと同等の特性を材料 β でも実現出来た。

この新構造を縦MOSアレイTEGに適用することで、図 2.2.5-1 に示す様にアレイとしてのスイッチング特性を確認することが出来、ギガビットクラスのストレージクラスメモリ実現の可能性を見出した。

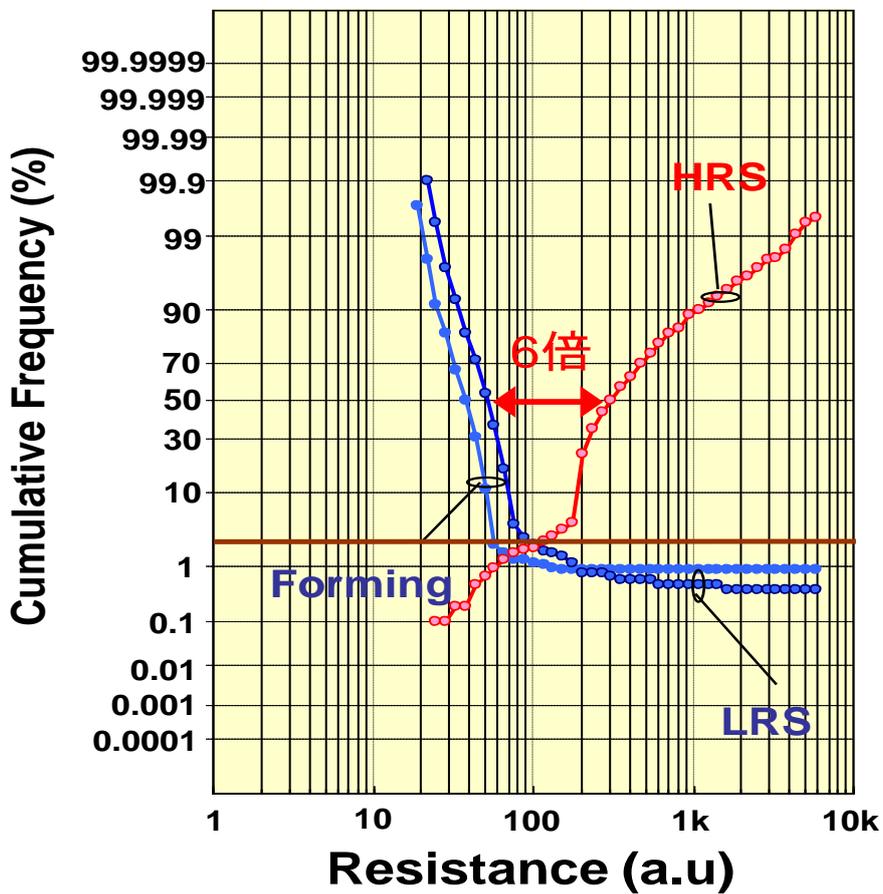


図 2.2.5-1 縦 MOS アレイ TEG のスイッチング特性(LRS/HRS 抵抗分布)

2.2.6 大容量プロトタイプチップの設計

縦 MOS アレイ TEG のメモリセルをベースに 8Gb プロトタイプチップの設計を行った。メモリセルは縦 MOS アレイ TEG と同じで、周辺トランジスタはスタンバイ電流低減の為、モバイル DRAM の周辺トランジスタを使用している。

「不揮発アーキテクチャの研究開発」における NAND Flash, DRAM, コントローラ+ReRAM のシステムの研究との協業において、既存のメモリインタフェースを踏襲し、かつ高速データ転送が必要との要求から、コマンド・アドレス体系は NAND インタフェース、Din/Dout のデータ転送が高速な Toggle Mode を使用できるという点から、インタフェースとして、Toggle NAND 1.0 を採用した。このシステム側からデータ転送の高速化の要求に応える為に Read/Write 時のデータの転送レートを最大 400Mbps とし、通常の NAND フラッシュの 40Mbps(SDR モード)に対して高速化を図る。電源電圧は VDD=3.3V, VDDQ=1.8V で語構成(I/O)は x8 のみ。縦 MOS アレイ TEG では、アレイ制御の電圧は外部印加としていたが、本チップにおいては外部電圧 VDD から発生させている。チップサイズは、11.95mm x 8.03mm=95.96mm²、セル占有率は 59.6%。

プロトタイプチップの目標仕様を表 2.2.6-1 に、プロトタイプチップ・レイアウトイメージを図 2.2.6-1 に示す。

SLC NAND フラッシュに対して、10 倍以上短い Read(1st アクセス)時間、Program 時間を目標に設計を行い、メモリ特性に依存する部分はあるが、回路的に目標を達成できる見通しであり、現在チップレベルでの動作検証中である。(事業終了後、検証を完了済み)

表 2.2.6-1 プロトタイプチップ目標仕様

項目	目標
容量	8Gb (4Gb x 2Bank)
インタフェース	Toggle NAND 1.0
ページサイズ	(4K+128) Byte
ブロックサイズ	(256K+8K) Byte
ページプログラム時間 (typical)	8us
ブロック消去時間 (typical)	0.5ms
1st アクセス時間 (max.)	1us
シリアルアクセス時間 (min.)	5ns
Din/Dout スループット (max.)	SDR Mode: 200MB/s Toggle Mode: 400MB/s
動作電流 1 (max.) @Din/Dout Burst	SDR Mode: 30mA Toggle Mode: 200mA
動作電流 2 (max.) @Program/Erase	30mA
スタンバイ電流 (max.)	50uA
VDD/VDDQ	VDD=2.7V-3.6V/VDDQ=1.7V-1.95V
動作温度	0C - +85C
書き換え耐性	10 ⁶ 回以上

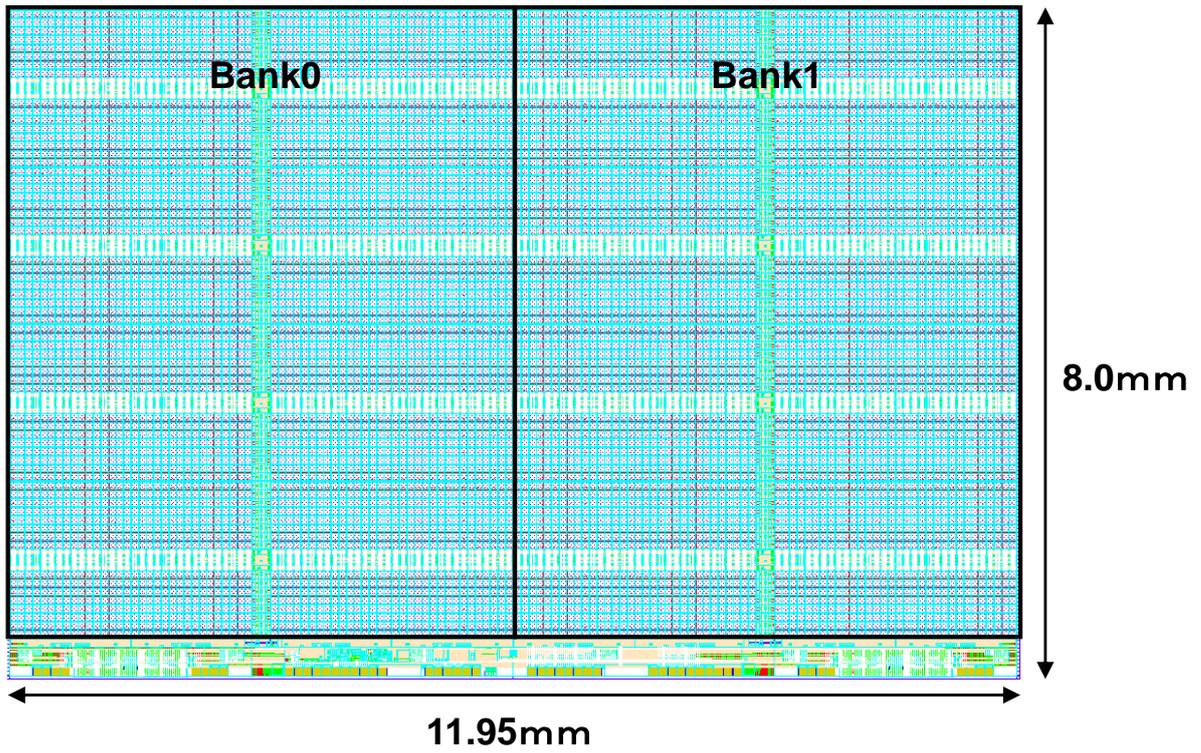


図 2.2.6-1 プロトタイプチップ・レイアウトイメージ

IV. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

1. 他社・市場状況

1-1. 他社状況

次世代不揮発メモリとして、ReRAM の開発は更に活発となってきており、国際学会での発表においても年々その数が増加すると同時に、研究成果の質の向上も図られてきた。最近では、IMW2013 にて、トータル 53 件中 ReRAM のみで 3 ブロック・計 17 件の発表があり、数々の不揮発メモリの中で最も多くの研究成果が発表され、また大きな注目が注がれていた。多くのデバイス研究者・装置開発者からも次世代不揮発メモリとして、一早い実用化への期待が高いことが伺える。

表IV-1-1 に、メモリ・メーカー各社の ReRAM 開発への取り組み状況・ベンチマーク結果を示す。

表IV-1-1 各社 ReRAM 開発状況・ベンチマーク結果

	高速不揮発	NAND 代替				混載メモリ	
プログラム方式・特徴	Bipolar			Unipolar	CMOx	Bipolar	
企業	Elpida	A社	B社	C/D社	E/G社	H社	
セルサイズ	4F ²	4F ²	4F ²	4F ²	4F ²	4F ²	
書き込み電圧 (SET/RESET)	+2.5V/-1.6V	4V/-5V	-5V/7V	-3V/+2.5V	2.5V<	-2.5V/+2.5V	-1.8V/+1.8V
書き込み電流	30uA~	80uA	30uA(DC)	-	?	1uA	<100uA
書き込み時間	<10ns	1000ns	10ns	-	230us (With Verify)	1000ns	<30ns
書換え回数	10 ⁸	10 ⁶	10 ⁷	10 ¹⁰	?	10 ⁵	10 ⁷
データ保持特性	10years	10years	10years	10 ⁴ s<	?	> 1Year	10years

Good

Average

Not Good

ReRAM の素子としてはこれまで二元系遷移金属酸化物を中心に多岐に渡る材料が研究されてきたが、現在では HfO、TaO、HfO/AlO、TiO などの材料にほぼ収束してきたもようだ。また、ターゲットとする市場は異なっているが、エルピーダメモリおよび Panasonic 社以外の各社においては、ポスト NAND Flash として性能・構造の最適化を図っている。それぞれに要求されるスペックに従い、プログラム電流・電圧、書き込み速度、書換え耐性と採用するセレクト・デバイス、素子配置構造の研究・最適化が進められている状況である。現在、各社とも ReRAM に対する解決すべき課題が明確になりつつある状況であり、今後、特性改善のための研究及びメカニズム解析より、材料・構造の最適化、プログラム電圧・電流の低減、信頼性の更なる向上、バラツキの対策などが進められると思われる。また NAND Flash 代替のためにはチップコストの削減も必須技術開発事項であり、多層積層構造または BiCS に代表される NAND Flash の 3D 構造を応用した ReRAM 開発も進められるであろう。

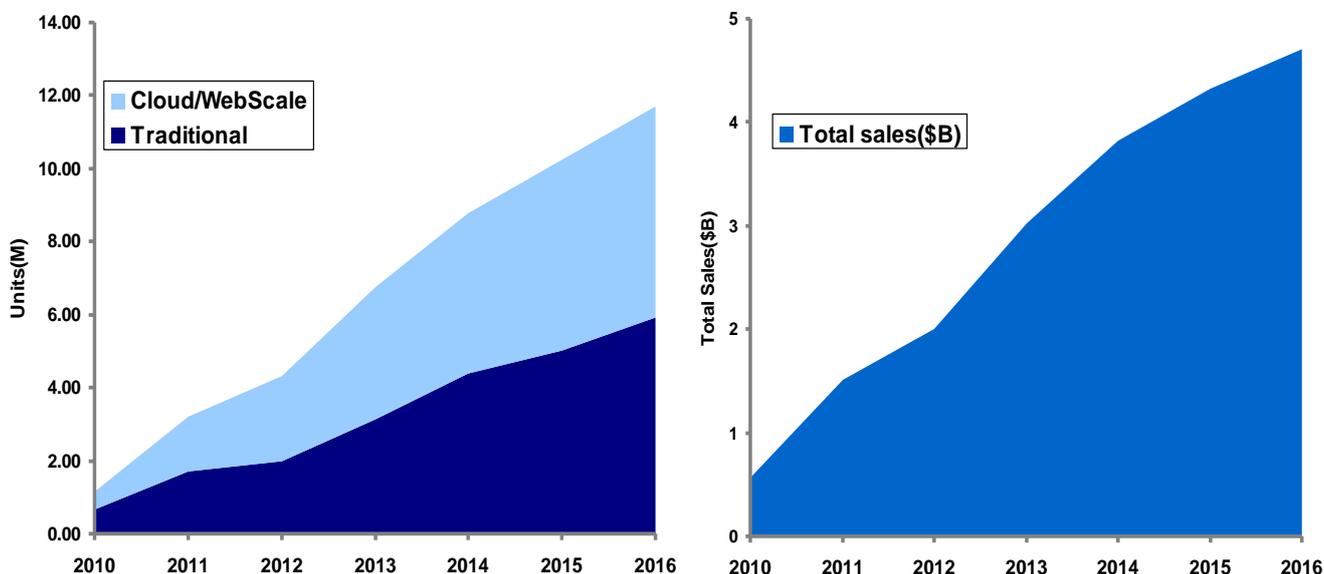
ISSC2013 においては、ポスト NAND Flash を目指した ReRAM の大容量化技術と回路技術について、Sandisk/東芝社より学会では初めてギガビットクラスの製品化を目指した 2 層スタック構造の 32Gbit ReRAM テストチップの開発状況が報告され、多いに話題を呼んだところである。2015 年にはプロトタイプ品を市場投入していくとの事であり、他社においても、おおよそ同様の時期を見て開発を進めている状況である。

一方で、Panasonic 社はすでに自社マイコン用の組み込みメモリとして ReRAM を採用している。マイコンの消費電力削減、内蔵 NOR Flash の代替技術として量産が開始されているもようである。

以上のように、各社の状況から 2015 年はポスト NAND Flash として大容量 ReRAM の製品化元年になる可能性が高いと考えられるのではないだろうか。

1-2. 市場状況

コンピューティングの世界は確実にパラダイムシフトを起こし、クラウド・コンピューティング化による膨大なデータの保存と共有化、それに伴うデータセンターの増大に伴い発生する発熱・冷却コスト削減のため、ストレージデバイスの SSD 化が急激に加速、SQL サーバーの高速化においても SSD の利用が加速されてきた。マイクロソフト社はじめ、各サーバーメーカーもプロモーション活動を活発に開始し、SSD 化を加速させている状況である。



図IV-1-1 Enterprise サーバー向け SSD 出荷台数予測

図IV-1-2 Enterprise サーバー向け SSD 出荷金額予測

図IV-1-1 に、Enterprise サーバー向け SSD の出荷台数予測、また図IV-1-2 には、Enterprise サーバー向け SSD の出荷金額予測(出典:Gartner 社)を示す。本事業を開始した 2010 年には、1.15 百万台・5.6 億ドルの市場規模であったが、2016 年にはおよそ 9 倍の 11.7 百万台、金額にすると 47 億ドルまで伸張すると予測されている。

現在のところ依然として SSD のメインとなるメモリは、これまでのように NAND Flash が主流であると見られている。高信頼度を要求される Enterprise 向け SSD においても、既に MLC の採用が加速しており、今後 TLC/QLC 化が加速され、よりコストパフォーマンスの高い不揮発メモリが要求されてくるようになるだろう。多値化・微細化プロセスにより十分でなくなる信頼性及び性能は、採用するメモリに適用したメモリコントローラーの最適化設計により補われる。つまり、ハードウェアとソフトウェアとのシステムレベルでの協調設計がより一層重要なファクターとなっている状況である。

1-3. まとめ

本事業においては、デバイスの開発とシステムの開発とを協調して行うことにより、新たなシステムの提案を行った。

現在、高性能サーバー用 SSD として、PCIe SSD が主流となっているが、レイテンシーは 20us 程度とまだまだ改善の余地は残されている。より、高性能・大容量のストレージサーバーを実現する上で、本事業で提案した高速不揮発メモリを SSD のキャッシュとして利用することにより、より高速で高信頼度、低電力化を実現するデバイスの提供が可能となると考える。

ReRAM の実用化については、デバイス改善及び評価と、中規模アレイ及び大規模アレイでの評価・信頼性を見極めを継続して行い、弱点部分をシステムレベルで補っていく最適仕様化・協調設計手法の水平展開を進め、製品化を目指して行きたい。

2. 実用化・事業化の見通しについて

ReRAM実用化のためには、更なるスイッチング素子の信頼性向上とばらつき低減が必要であり、プロジェクト終了後の現在も中規模アレイを使った改善活動を継続している。一方、大容量プロトチップは、回路設計を終わり、チップレベルでの動作確認をシミュレーションレベルで完了した。今後は、スイッチング素子の改善結果を反映させた大容量プロトチップの試作を行い、早期にサンプル出荷を行うことを目指す。

(ITイノベーションプログラム・エネルギーイノベーションプログラム)

「高速不揮発メモリ機能技術開発」基本計画

電子・材料・ナノテクノロジー部

1. 研究開発の目的・目標・内容

(1) 研究開発の目的

①政策的な重要性

我が国のエネルギーセキュリティの確保や、世界中で取り組みが行われている温室効果ガス削減運動への対応は、今後の我が国の発展に不可欠な課題である。そのため、経済・社会活動を支えるあらゆる分野で、省エネルギー化を図る画期的な技術革新が求められている。

特に、我が国をはじめとして先進国では経済・社会活動への情報機器の浸透が進んでおり、現行の生活水準を保ちつつ社会全体の消費電力の低減を図る上で、情報機器・システムの小電力化の貢献度は高い。また、現在経済発展が進んでいるBRICsや今後経済発展が見込まれている諸国・地域においては、経済発展に伴い急速なIT化が進んでおり、パソコンや携帯電話といった情報機器の消費電力量が一層増大すると予想され、情報機器の大幅な低消費電力化が必須となる。さらに、これら諸国に続いて経済発展を目指す途上国においては、パソコンや携帯電話といった情報機器への普及ニーズは高いものの十分な電力インフラが整備されておらず、バッテリー動作に対応することが望ましい。以上より、極めて少ない電力で動作する情報機器の実現が望まれている。

これらの問題を解決するためには、現行の機器の内部構成を前提とした単体機器の省電力技術開発では不十分であり、革新的な超低消費電力情報機器の基盤となる技術開発が必要不可欠である。中でも、情報機器におけるメモリの消費電力の大きさは看過できないものであり、電源をオフにしてもデータが保存され、かつ高速に動作する高速不揮発メモリを搭載したシステムの開発が革新的な超低消費電力情報機器の実現に重要な要素となる。

このような動向を踏まえて本プロジェクトは、ITイノベーションプログラムおよびエネルギーイノベーションプログラムの一環として実施する。

②我が国の状況

我が国では、国内各機関により、様々な不揮発メモリの開発を進めており、世界に先駆けた研究成果をあげている。

一方で、DRAMに代表される汎用のメモリは、容量・速度の向上などのトレンドに乗

った開発には巨額の投資を要するにもかかわらず、適用製品の基本設計がおもに海外企業によりなされたものであり、素子自体の規格はオープン化されているため、シェアを獲得するにはグローバルなコスト競争に勝ち続ける必要があり、利益を確保することが容易でない状況である。このため、これまでにない機能の素子を実現し、基本設計と市場を日本主導で立ち上げることが望まれる。不揮発メモリの使用を前提とする全く新しい情報機器システムを生み出すことが、その期待に応えるひとつの道筋と考える。

③世界の取り組み状況

米国、欧州、韓国におけるそれぞれの企業や機関で、基礎研究から技術開発、実証研究等の取り組みが行われている。不揮発メモリに関する新規性を有した技術的成果が続々と登場しており、各国の開発競争が激化することが予想される。各国が自国の研究開発組織に数十億円規模の公的資金を投入するなど、戦略的な取り組みをおこなっていることを考慮すると、我が国においても、国際競争力強化の観点から、引き続き戦略的・重点的な支援が必要である。

④本事業のねらい

本プロジェクトでは、以下の2点を目指す。

- a) 現行の揮発メモリに比較してより高速かつ大幅に消費電力を低減することが可能な不揮発メモリの物理的な基本構成を確立する。
- b) 同メモリが実用レベルに達した際の特性を予期して、その不揮発メモリがCPUをはじめとする周囲の素子間の整合をとりつつ、全体として機能するのに必要な項目を明らかにし、それらの洗い出された項目に対応して必要なシステムの構成を提示することにより、低消費電力かつ有効なモデル機器の基本構成を確立する。

また、これまで揮発メモリの使用を前提として進められてきた情報機器が高速不揮発メモリの使用を前提とした場合、情報機器の設計手法は大きく変化することが予想される。このような設計手法は、当該メモリを用いて新規なシステムの設計に携わろうとする関係者間で、広く共有または活用されるべきものであり、その基盤となる知識の蓄積を図る。

(2) 研究開発の目標

①過去の取り組みとその評価

これまで、半導体アプリケーションチッププロジェクトやスピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクトにおいて、FeRAM、MRAM、ReRAMなど様々なメモリの個別開発を行い、それぞれ、一定の成果を上げている。

しかし一方で、開発した不揮発メモリが既存のシステムに部品として組み込まれるのみでなく、現行の揮発メモリが有する利便性をも併せもつ新規高速不揮発メモリを

軸に、情報機器システム全体を再構成し、我が国が当該業界でイニシアティブを握れることが、国際競争力強化の観点からも喫緊の課題となってきた。これまでのメモリ関連プロジェクトの成果も積極的に活用し、新しいアーキテクチャ創出を視野に入れた取り組みが重要となってきた。

②本研究開発の目標

以下を平成24年度までに達成する。

- ・システムを部分的または全体的に不揮発化するために、現行のメモリの代替となる高速不揮発メモリを開発する。
- ・基本ソフトウェアを含むデモシステムまたは仮想デモシステムによって消費電力を実質上1/10以下に削減できる構成を提示する。

③本事業以外に必要とされる取り組み

標準化や普及活動等、本研究開発に関連して必要とされる取り組みを行う。

④全体としてのアウトカム目標

本プロジェクトは、モバイルPCやスマートフォンなどのほか、常時オンが原則であるルータおよび企業内サーバーを待機電力がゼロであるノーマリー・オフ化することで、消費電力の低減を図るものである。これらの取り組みにより、高速不揮発メモリの普及が拡大されると、2020年における省電力85億kWh/年、CO₂削減効果は約350万トン/年となる。また、約5,200億円の市場規模創出が期待される。

(3) 研究開発の内容

上記目標を達成するために、以下の研究開発項目について、別紙の研究開発計画に基づき研究開発を実施する。

[共同研究事業（NEDO負担率：1/2）]

研究開発項目① 高速不揮発メモリの開発

[委託事業]

研究開発項目② 不揮発アーキテクチャの研究開発

本研究開発項目は、試験・評価方法、基準・プラットフォームの提案等、国民経済的には大きな便益がありながらも、民間企業の研究開発投資に見合うものが見込めない「公共財の研究開発」事業であり、委託事業として実施する。

2. 研究開発の実施方式

(1) 研究開発の実施体制

本研究開発は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、「NEDO」という。）が、単独ないし複数の原則本邦の企業、大学等の研究機関（原則、本邦の企業等で日本国内に研究開発拠点を有していること。なお、国外の企業等（大学、研究機関を含む）の特別の研究開発能力、研究施設等の活用または国際標準獲得の観点から国外企業等との連携が必要な部分を、国外企業等との連携により実施することができる。）から、公募によって研究開発実施者を選定し共同研究（NEDO負担率1/2）および委託により実施する。また、必要に応じてプロジェクトリーダーを選定し、プロジェクトリーダーと密接な関係を維持し、効果的な研究開発を実施する。

(2) 研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有するNEDOは、経済産業省及び研究開発実施者と密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的及び目標、並びに本研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。具体的には、必要に応じて設置される技術検討委員会等における外部有識者の意見を運営管理に反映させるとともに、産業競争力の強化と知的財産を含む研究成果の普及を両立させるための標準化活動を含めた取り組みを実施する。

3. 研究開発の実施期間

本研究開発の期間は、平成22年度から平成24年度までの3年間とする。

4. 評価に関する事項

NEDOは、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の事後評価を平成25年度に実施する。なお、評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

5. その他の重要事項

(1) 研究開発成果の取扱い

①共通基盤技術の形成に資する成果の普及

得られた研究成果のうち、下記共通基盤技術に係る研究開発成果については、NEDO、実施者とも普及に努めるものとする。

a) 技術のモデル化および汎用性の獲得

- ・プロトタイプシステムの作成
- ・高速動作システムとソフトの開発

②知的基盤整備事業又は標準化等との連携

得られた研究開発の成果については、知的基盤整備事業又は標準化等との連携を図るため、データベースへのデータの提供、標準案の提案等を積極的に行う。

③知的財産権の帰属

委託研究開発及び共同研究の成果に関わる知的財産権については、「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第25条の規定等に基づき、原則として、すべて委託先及び共同研究先に帰属させることとする。

(2) 基本計画の変更

NEDOは、研究開発内容の妥当性を確保するため、社会・経済的状況、国内外の研究開発動向、政策動向、プログラム基本計画の変更、評価結果、研究開発費の確保状況、当該研究開発の進捗状況等を総合的に勘案し、達成目標、実施期間、研究開発体制等、基本計画の見直しを弾力的に行うものとする。

(3) 根拠法

本プロジェクトは、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第15条第1項第1号ニに基づき実施する。

6. 基本計画の改訂履歴

- (1) 平成22年3月 制定。
- (2) 平成23年4月 共同研究事業NEDO負担率を2/3から1/2に改訂
- (3) 平成23年7月 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法の改正に伴う改訂。

(別紙) 研究開発計画

研究開発項目①「高速不揮発メモリの開発」

1. 研究開発の必要性

現在普及している情報機器はCPUとメモリを主な構成要素としているが、高集積化・高周波数化に伴い、それらの消費電力増大が課題視されている。構成要素の1つであるCPUについてはパワーゲーティング等の手法により一定の低消費電力化が達成されており、もう一方の構成要素であるメモリに対する低消費電力化が強く求められている。しかしながら、現在情報機器に用いられているメモリは、電源を供給しないと記憶が保持できない揮発メモリであるため、使用していないときにも電力が必要となり低消費電力化の妨げとなっている。いわゆるスリープモードでは、メモリの内容をストレージに退避する時間が必要であり、使い勝手に影響する。

電源を供給しなくても記憶を保持することができる不揮発メモリも種々提案されているが、現状ではいずれも開発段階であって、高速性、書き込み電流・電圧、書き換え回数などの制限から情報機器の主記憶素子としては決定打となっていない状況である。そこで今回、不揮発性でありながら、高速性・書き換え耐性などの特性を向上させ、情報機器の圧倒的な消費電力低減を実現しうる素子の開発を行う。

2. 研究開発の具体的内容

現行揮発メモリの代替となり得る不揮発メモリを実現するため、メモリ材料および要素プロセスの開発を行う。

また、研究開発項目②「不揮発アーキテクチャの研究開発」から導きだされるメモリとしての必要性能とも整合させ、より効率的な研究開発を図る。

3. 達成目標

DRAM機能を代替できる高速不揮発メモリを開発する。

その際、以下の条件を目標とする。

1. 書き換え耐性

DRAMの書き込み耐性以上 ($\geq 10^{16}$ 程度) または、研究開発項目②との組み合わせにおいて実質的に適用製品の装置寿命と同等であること

2. 書き込み電流

50 μ A 以下/セル

3. 容量
1 G b i t 以上、ないし 1 G b i t への拡張可能性の根拠を示すこと
4. 読み書き時間
混載メモリマクロとして：ランダム 3 n s e c 以下
5. 動作温度上下限
0 ~ 5 5 ° C で動作
6. そのほか、民生用情報機器への適用時に致命的な制約がないこと

研究開発項目②「不揮発アーキテクチャの研究開発」

1. 研究開発の必要性

新たな価値としてノーマリー・オフのシステムを実現するためには、メモリの研究開発だけでなく、その不揮発メモリを実際に用いた場合に構成される現実的な不揮発アーキテクチャの検討を同時並行で実施し実現可能性を提示する必要がある。

2. 研究開発の具体的内容

前項で記述した必要性に基づいて、メモリアーキテクチャ、システムアーキテクチャ、OS等不揮発アーキテクチャのいずれかまたは全部に関する開発を行う。開発にあたっては、研究開発項目①で開発するメモリと研究開発項目②で開発するシステム等が連係してスムーズに機能することが重要である。そこで、研究開発項目①のメモリ開発において予測される素子の特性値と不揮発アーキテクチャの動作との整合をとること、逆にシステム等側の要求をメモリに対する仕様へ適宜フィードバックすることによって、現行のアーキテクチャの消費電力に対し、実質上1/10以下に削減することができる携帯情報機器等の実現可能性を提示する。

3. 達成目標

研究開発項目①で得られたメモリを用い、現行のアーキテクチャの消費電力に対し、実質上1/10以下に削減する不揮発アーキテクチャのいずれかまたは全部に関する構成事例を提示する。

(添付資料)

● 事前評価書

作成日 平成 22 年 2 月 25 日

1. 事業名称: 高速不揮発メモリ機能技術開発
(コード番号): P10002

2. 推進部署名 電子・情報技術開発部

3. 事業概要

(1) 概要:

電源オフにしてもデータが保存され、かつ高速に動作する高速不揮発メモリを搭載したシステムの開発が革新的な超低消費電力情報機器の実現のために重要である。これらの要求に応えることのできる、①高速性と不揮発性を両立したメモリの開発と、②不揮発アーキテクチャの検討を実施する。

(2) 事業規模: 総事業費(国費分) 3.3 億円(2/3 補助・委託)

(3) 事業期間: 平成 22 年度～24 年度(3 年間)

4. 評価の検討状況

(1) 事業の位置付け・必要性

わが国のエネルギーセキュリティの確保や世界中で取り組みが行われている温室効果ガス削減運動への対応は、今後の我が国の発展に不可欠な課題である。一方産業の観点においては、我が国の製造業で重要な位置を占める半導体および電子機器産業競争力の維持向上もまた重要な課題である。このような問題意識のもと、本プロジェクトでは、情報機器において看過できない問題となっているメモリ消費電力の抜本的削減を目的として、高速不揮発メモリを搭載する革新的な超低消費電力情報機器の実現を目的とする。これまで多種の不揮発性メモリが提案されたものの、現時点では、大容量・高速性・高信頼性・低消費電力をはじめとする種々の要求を満たしたものはなく、既存のメモリ素子を置き換えるまでに至っていない。そのため新規素子の提案も含め、メモリ素子の開発が引き続き重要である。同時に、開発されるメモリ素子の動作特性を想定したうえで、効率の良いシステムが成立するアーキテクチャの仕様、およびその基本構成を明らかにすることが期待される。アーキテクチャの開発は、メモリ素子の開発成果として得られる特性を最大限に生かし、メモリ素子が早期にかつ広く普及するための基盤となるため、世界的にも研究開発が進められている。以上のように、本プロジェクトは、わが国の競争力の確保と、地球レベルでのエネルギー消費削減・低炭素化の両方に貢献すると期待され、本プロジェクト推進の必要性は高い。

(2) 研究開発目標の妥当性

NEDOロードマップ上のシステム・イン・メモリに分類される。本プロジェクトの成果として同じくロードマップ上の「SoC における低消費電力長時間動作」や、「瞬時の電源 ON・OFF」の実現が期待される。また、システム LSI における従来の「次世代低電力化」の次段階に位置する。ノーマリー・オフの実現が期待され、ロードマップ中に「電子機器の設計自体をも大きく変えていくほどのインパクトを持つであろう」と記載された期待にも応え得るものと考えられる。具体的な研究開発目標としては、研究開発項目①では、現行の揮発性メモリ機能に置き換えることのできる性能として、以下を提示する。

1. 書き換え耐性

$\geq 10^{16}$ (DRAM の書き込み耐性以上) または、②のシステム技術との組み合わせにおいて実質的に適用製品の装置寿命と同等であること

2. 書き込み電流

50 μ A 以下/セル

3. 読み書き時間

混載メモリマクロとして: ランダム 3nsec 以下

4. 容量

1Gbit 以上、ないし 1Gbit への拡張可能性の根拠を示すこと

5. 動作温度上下限

0～55℃で動作

6. その他

民生用情報機器への適用時に致命的な制約がないこと

研究開発項目②では、本研究開発後の技術的・経済的發展を想定して、①の成果がスムーズに実用化され、広く普及することを想定し、以下とした。

①で得られたメモリ素子を用い、現行の消費電力に対し、実質上1/10以下に削減するメモリアーキテクチャ、システムアーキテクチャ、OS 等不揮発アーキテクチャのいずれかまたは全部に関する構成事例を提示する。

以上は、2010年2月17日「高速不揮発メモリ機能技術開発」基本計画検討委員会での有識者との議論を踏まえたものであり、妥当と判断する。なお達成目標の設定値については、研究開発実施にあたっての必須の目標値のみを基本計画に設定することで、委託先公募において広く提案を収集し、優れた提案を採択する。

したがって、提案者が技術の優位性を示したい場合には、達成目標等を適時追加または改訂することによって対応できるものとする。また、これら目標設定については今後も委員会ならびに有識者ヒアリングなどで聴取した意見を適切に反映させる。

(3) 研究開発マネジメント

公募を通じて、高い技術を有する民間企業、大学等の研究機関による最適な実施体制を構築する。特に、メモリ素子の開発とアーキテクチャ開発の連携によって成果を最大化する点にマネジメントの力点を置く。また、競争力確保のため知財権の確保も推進する。外部有識者の意見を求め、その結果を踏まえて事業全体の予算配分や計画について見直しを行い、適切な運営管理に努める。さらに別途定められた技術評価に係る指針、および技術評価実施要領に基づき、技術的および産業技術政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義、将来の産業への波及効果等について、外部有識者による評価を実施する。

(4) 研究開発成果

本研究開発の成果は、世界最高水準のメモリ素子の実現にあたるとともに、研究開発項目②により、市場の創出や新たな技術領域の開拓とともに、汎用性のあるノウハウの提供が可能となる。さらに、メモリ素子の開発においては、材料開発・デバイス構造開発・プロセス開発・製造装置開発など広い範囲の連携が必要と想定される。

それぞれが幅広く、かつ有機的に関係するため、デバイス開発に直接かかわる事業者だけでなく、材料メーカー、製造装置メーカーをはじめとする種々の関連産業においても、技術の底上げと雇用の促進が期待される。

同時に、メモリ素子開発、システム開発の専門性を備えた人材の育成が期待できる。

(5) 実用化・事業化の見通し

本プロジェクトは2012年度で終了するが、その後、メモリ素子開発、アーキテクチャ開発を企業において本格化し、2015年にプロトタイプによって検証、引き続き量産化開発を行い、2018年に製品出荷を見込む。同時進行でアーキテクチャ、システムソフトウェア開発の本格化が必要である。さらに、不揮発・高速性を生かした低消費電力情報機器向けのアプリケーションソフトウェアまでの広がりが予想できる。これらより、成果の実用化可能性、波及効果および事業化までのシナリオは十分に見込まれると考える。

(6) その他特記事項

特になし

5. 総合評価

本プロジェクトは、不揮発性メモリ素子を開発するとともに、素子の特性を最大に生かすアーキテクチャを同時に開発するという、挑戦的・野心的な研究開発であり、かつ、異なる企業体間、ないし産学官の連携がもっても奏功すると期待できる。異なる事業者の連携推進というNEDO機能が貢献できる内容であるので、NEDOが実施する事業として適切であると判断する。

(添付資料)

●論文リスト

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年	月日
1	Mayumi Fukuda, Kazuhide Higuchi, Shuhei Tanakamaru and Ken Takeuchi	東京大学	3.6-Times Higher Acceptable Raw Bit Error Rate, 97% Lower-Power, NV-RAM & NAND-Integrated Solid-State Drives (SSDs) with Adaptive Codeword ECC	International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM)		2010年	9月24日
2	Ken Takeuchi	東京大学	Storage Class Memory	8th International Workshop on Future Information Processing Technologies (IWFIPT)		2010年	10月19日
3	樋口和英、福田真由美、田中丸周平、竹内健	東京大学	不揮発性 RAM 及び NAND フラッシュを用いた SSD 向け高エラー率補償アーキテクチャとエラー訂正符号	電子情報通信学会 集積回路研究会		2010年	12月16日
4	Mayumi Fukuda, Kazuhide Higuchi and Ken Takeuchi	東京大学	Non-volatile RAM and NAND Flash Memory-Integrated Solid-State Drives (SSDs) with Adaptive Codeword ECC for 3.6-Times Acceptable Raw Bit Error Rate Enhancement and 97% Power Reduction	Japanese Journal of Applied Physics		2011年	4月20日
5	Ken Takeuchi	東京大学	Storage Class Memory and Memory System Innovation - International Collaboration for Material, Device, Circuit, Signal Processing and OS Integration	The Seventh International Nanotechnology Conference on Communication and Cooperation		2011年	5月17日
6	竹内健	東京大学	フラッシュメモリと抵抗変化型メモリの技術動向	新化学技術推進協会電子情報技術部会講演会		2011年	7月21日
7	Ken Takeuchi	東京大学	Green High Performance Storage Class Memory & NAND Flash Memory Hybrid SSD System	IEEE International Symposium on Low Power Electronics and Design		2011年	8月1日
8	竹内健	東京大学	3次元 NAND フラッシュメモリ&SCM	Electronic Journal 第 771 回 Technical Seminar		2011年	8月2日
9	竹内健	東京大学	ストレージ・クラス・メモリ(SCM)を搭載した SSD の仮想プラットフォーム	シノプシス・ユーザーズ・ミーティング		2011年	9月1日
10	Kazuhide Higuchi, Kousuke Miyaji, Koh Johguchi and Ken Takeuchi	東京大学	50nm HfO ₂ ReRAM with 50-Times Endurance Enhancement by Set/Reset Turnback Pulse & Verify Scheme	International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM)		2011年	9月30日

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年	月日
11	Ken Takeuchi	東京大学	Highly reliable Low Power Storage Class Memory & NAND Flash Memory Hybrid Solid-State Drive	IEEE Non-Volatile Memory Technology Symposium		2011年	11月10日
12	樋口和英、竹内健	東京大学	50nm 級抵抗変化型メモリにおける耐久性向上書き換え手法の研究	電子情報通信学会 集積回路研究会		2011年	12月15日
13	Kazuhide Higuchi, Kousuke Miyaji, Koh Johguchi and Ken Takeuchi	東京大学	Endurance Enhancement and High Speed Set/Reset of 50nm Generation HfO ₂ -based Resistive Random Access Memory (ReRAM) Cell by Intelligent Set/Reset Pulse Shape Optimization and Verify Scheme	Japanese Journal of Applied Physics		2012年	2月20日
14	樋口和英、宮地幸祐、上口光、竹内健	東京大学	50nm 抵抗変化型メモリにおける書き換え回数向上手法	応用物理学会		2012年	3月16日
15	Kazuhide Higuchi, Tomoko Ogura Iwasaki and Ken Takeuchi	中央大学	Investigation of Verify-Programming Methods to Achieve 10 Million Cycles for 50nm HfO ₂ ReRAM	IEEE International Memory Workshop		2012年	5月15日
16	Kazuhide Higuchi, Tomoko Ogura Iwasaki and Ken Takeuchi	中央大学	Investigation of Verify-Programming Methods to Achieve 10 Million Cycles for 50nm HfO ₂ ReRAM	IEEE International Memory Workshop		2012年	5月20日
17	Hiroki Fujii, Kousuke Miyaji, Koh Johguchi, Kazuhide Higuchi, Chao Sun and Ken Takeuchi	中央大学	x11 Performance Increase, x6.9 Endurance Enhancement, 93% Energy Reduction of 3D TSV-Integrated Hybrid ReRAM/MLC NAND SSDs by Data Fragmentation Suppression	IEEE Symposium on VLSI Circuits		2012年	6月15日
18	竹内健	中央大学	SSD とストレージ・クラス・メモリを用いたメモリスステム	電気学会 ナノエレクトロニクス集積化・応用技術調査専門委員会		2012年	7月13日
19	竹内健	中央大学	x11 Performance Increase, x6.9 Endurance Enhancement, 93% Energy Reduction of 3D TSV-Integrated Hybrid ReRAM/MLC NAND SSDs by Data Fragmentation Suppression	Symposium on VLSI Circuits 報告会		2012年	7月28日
20	竹内健		次世代ビックデータ処理基盤システム ハードの強みを生かしたソフト・サービスの統合システム	JEITA マルチコア懇談会		2012年	9月4日

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年	月日
21	竹内健		不揮発メモリの低電圧・低電力化技術	電子情報通信学会 ソサイエティ大会		2012年	9月13日
22	竹内健		ストレージクラスメモリを搭載したハイブリッド SSD と高信頼 ECC 技術	NE テクノロジー・シンポジウム		2012年	10月5日
23	Chao Sun, Kousuke Miyaji, Koh Johguchi and Ken Takeuchi		x8 High Write-Throughput, 84% Write-Energy Saving, x6.5 Extended Lifetime Hybrid ReRAM/MLC NAND SSD with Cold Data Eviction Algorithm	IEEE Non-Volatile Memory Technology Symposium		2012年	10月31日
24	Ken Takeuchi		Sophisticated Error Correction and Data Management Technologies for Storage Class Memory & NAND Flash Memory Hybrid Solid-State Drives (SSD)	IEEE Non-Volatile Memory Technology Symposium		2012年	11月1日
25	Ken Takeuchi		Signal Processing and Data Management Technologies for NAND&ReRAM Hybrid SSD	New Non-Volatile Memory Workshop		2012年	11月15日
26	Chao Sun, Hiroki Fujii, Kousuke Miyaji, Koh Johguchi, Kazuhide Higuchi and Ken Takeuchi		Over 10-times High-speed, Energy Efficient 3D TSV-Integrated Hybrid ReRAM/MLC NAND SSD by Intelligent Data Fragmentation Suppression	18th Asia and South Pacific Design Automation Conference		2013年	1月22日