

異種の不揮発性メモリで構成される半導体ストレージシステムに関する研究

松井 千尋

論文の内容の要旨

本論文では MRAM などの高速なメモリタイプ・ストレージクラスメモリ (M-SCM)、ReRAM、PRAM など大容量なストレージタイプ SCM (S-SCM)、NAND 型フラッシュメモリで構成するヘテロジニアス (異種) 半導体ストレージとそのデータ制御手法及び、アプリケーションに応じて自動的にメモリ構成を最適化するシステムを提案し、有効性を実証した。様々なアプリケーションに対して、最適なメモリ構成、メモリ階層を明らかにした。特に一部のデータが頻繁に書き込み、読み出されるアプリケーションに対しては高速な M-SCM が有効であり、その他のアプリケーションに対しては、大容量で NAND 型フラッシュメモリより高速な S-SCM が必要であることを示した。

SCM は DRAM のように高速、NAND 型フラッシュメモリと同じく不揮発である。本論文では高速な M-SCM、大容量な S-SCM および MLC (2 bit/cell)、TLC (3 bit/cell) NAND 型フラッシュメモリで構成する 2 種類のヘテロジニアス・ストレージを提案した。更にそれぞれのメモリの特性 (長所・短所) に適したデータ管理アルゴリズムを提案した。第 1 の提案、SCM、MLC および TLC NAND 型フラッシュメモリで構成されるストレージは、MLC NAND 型フラッシュメモリに滞留するアクセス頻度の低いデータを TLC NAND 型フラッシュメモリに保存する。第 2 の提案、M-SCM、S-SCM および NAND 型フラッシュメモリで構成されるストレージでは、極端にアクセス頻度の高いスーパーホットデータを M-SCM に、ややアクセス頻度の高いホットデータを S-SCM に保存する。一部のデータが頻繁に書き換えられる場合は、S-SCM を大容量にすることで性能を向上させた。更に M-SCM を極小容量用いて書き込み性能を向上できることを明らかにした。一部のデータが頻繁に読み出し・書き込みされる場合は、M-SCM を大容量用いることで性能を向上させた。

続いて、提案するストレージに最適なエラー訂正符号 (ECC) を提案した。一部のデータが頻繁にアクセスされ、データサイズが小さいアプリケーションでは、大容量の SCM の導入で性能は大きく向上するが、SCM の ECC 強度は弱くなる。このような大容量の SCM を用いるアプリケーションでは多量のデータが SCM に記憶されるため、NAND 型フラッシュメモリでは逆に、復号化時間が長くエラー訂正能力が高い LDPC 符号が可能になる。

最後に、様々なアプリケーションに対して最適な SCM の容量を自動調整する手法を提案した。M-SCM および MLC NAND 型フラッシュメモリを用いたハイブリッドストレージにおいて、MLC NAND 型フラッシュメモリに保存されたデータのアクセス頻度をモニターすることで、SCM の最適な容量を決定した。その結果、頻繁にアクセスされるデータが SCM に保存され、ストレージ性能を低下させることなく SCM 容量の自動調整が可能になった。

論文審査の結果の要旨

IoT (Internet of Things) とも言われるように IT 技術の発展と共に、膨大なデータ (ビッグデータ) がデータセンタのストレージに記憶され、かつ高速・リアルタイムにデータを読み出し・書き込むことが必要になっている。本論文では高速なメモリタイプ・ストレージクラスメモリ (M-SCM)、大容量なストレージタイプ SCM (S-SCM)、フラッシュメモリで構成するヘテロジニアス (異種) 半導体ストレージを世界に先駆けて提案するとともに、ヘテロジニアス・ストレージの各種メモリにデータを記憶する制御手法及び、アプリケーションに応じて自動的にメモリ構成を最適化するシステムを提案し、有効性を実証した。本研究を通じて提案したストレージおよびデータ制御技術により、将来のデータセンタにおいて大容量のデータを高速にアクセスすることが可能になり、学術面のみならず産業応用の面でも大きな貢献が期待される。

本論文は全 7 章で構成される。第 1 章では研究の背景と目的について述べている。ストレージクラスメモリ (SCM) と呼ばれる新規の不揮発性半導体メモリの登場によってメモリおよびストレージ階層が多層化しつつある。またストレージアプリケーションの特性はさまざまに異なるため、アプリケーションの特性に応じたストレージ構成の最適化が必要であることを述べている。さらに不揮発性半導体メモリに発生するエラーを訂正するためにエラー訂正符号 (ECC) が不可欠であるが、ECC によりストレージ性能が低下するため不揮発性半導体メモリに適用可能な ECC 強度を見積もる必要性を述べている。またストレージアプリケーションの特性によって必要な SCM 容量は異なり、SCM のビットコストは NAND 型フラッシュメモリと比較して高価であるため、SCM 容量の自動最適化が必要であることを述べている。

第 2 章では不揮発性半導体メモリを用いたストレージの従来研究および問題点について述べている。まず初めに不揮発性半導体メモリである SCM と NAND 型フラッシュメモリの動作について述べている。SCM はその特性によってメモリタイプおよびストレージタイプに分類でき、一方で NAND 型フラッシュメモリはセルあたりに保存するビット数によって SLC、MLC、TLC に分類できることを示している。従来研究として SCM 一種および NAND 型フラッシュメモリー種を用いたハイブリッドストレージの構成、および SCM を NAND 型フラッシュメモリの不揮発性キャッシュあるいは小容量ストレージとして用いるデータマネジメント手法について説明している。さらに不揮発性半導体メモリを用いた次世代のコンピュータアーキテクチャにおけるストレージの課題を論じている。第 1 章で述べたようにストレージアプリケーションの特性がさまざまに異なるためストレージアプリケーション内のデータの特徴によって、異種の不揮発性半導体メモリを用いたヘテロジニアス・ストレージの不揮発性半導体メモリの構成の最適化が必要となる。またヘテロジニア

ス・ストレージの SCM と NAND 型フラッシュメモリとではアクセス頻度が異なり、不揮発性半導体メモリの種類によってエラー発生頻度や許容書き換え回数が異なるため、それぞれに異なる強度の ECC を適用することが必要となる。さらにストレージアプリケーションの特性によって最適な SCM 容量は異なり、データセンタ事業者やユーザが手動でさまざまな種類のストレージアプリケーションに必要な SCM 容量を設定することは困難であるため、自動で SCM 容量を最適化する手法が必要であることを述べている。

第 3 章では異種の不揮発性半導体メモリを用いたヘテロジニアス・ストレージ構成を提案している。従来研究と異なり、三種以上の不揮発性半導体メモリを用いて構成したストレージをヘテロジニアス・ストレージと呼び本論文で扱っている。ヘテロジニアス・ストレージとして、1) SCM、MLC および TLC NAND 型フラッシュメモリを用いたヘテロジニアス・ストレージおよび 2) M-SCM、S-SCM および NAND 型フラッシュメモリを用いたヘテロジニアス・ストレージを提案している。第一の SCM、MLC および TLC NAND 型フラッシュメモリを用いたヘテロジニアス・ストレージは、SCM および MLC NAND 型フラッシュメモリを用いたハイブリッドストレージと比較して、MLC NAND 型フラッシュメモリに滞留するアクセス頻度の低いデータを TLC NAND 型フラッシュメモリに保存することで MLC NAND 型フラッシュメモリの書き換え回数を削減することを目的とする。さらに SCM の導入で上昇する総ストレージコストをビットコストの低い TLC NAND 型フラッシュメモリでバランスできる。第二の M-SCM、S-SCM および NAND 型フラッシュメモリを用いたヘテロジニアス・ストレージは、SCM を二種類用いて極端にアクセス頻度の高いデータを M-SCM に、ややアクセス頻度の高いデータを S-SCM に保存することを特徴とする。M-SCM は S-SCM と比較して高速だがビットコストが高いため、ごく少量のデータが頻繁にアクセスされるストレージアプリケーションに適していると考えている。

第 4 章では、第 3 章で提案した二種類のヘテロジニアス・ストレージの評価を行なっている。SystemC ベースのストレージエミュレータに、不揮発性半導体メモリの動作およびデータマネジメントアルゴリズムを実装している。不揮発性半導体メモリの容量比や書き込み・読み出し時間などのアクセス性能を変化させ、ヘテロジニアス・ストレージのアクセス性能、消費エネルギー、不揮発性半導体メモリの書き換え回数の点から評価し比較している。代表的なストレージアプリケーション毎にヘテロジニアス・ストレージの最適な不揮発性半導体メモリ構成を示している。一部のデータが頻繁に書き換えられる場合は、S-SCM を大容量用いることを示し、更に M-SCM を極小容量用いて書き込み性能を向上できることも明らかにしている。一部のデータが頻繁に読み出し・書き込みされる場合は、M-SCM を大容量用いることで性能が向上することを明らかにしている。一方で頻繁に読み出し・書き込みされない場合は、M-SCM を書き込みバッファメモリとして機能させることが良いことを示している。

第5章では異種メモリの高信頼化技術について述べている。ここではSCMおよびNAND型フラッシュメモリを用いたハイブリッドストレージに強度の異なるECCを適用する。NAND型フラッシュメモリには従来からBose-Chaudhuri-Hocquenghem (BCH)符号が用いられている。BCH符号は高速でランダムエラーを訂正できるECCであるため、ストレージとして用いるSCMにも適用する。またNAND型フラッシュメモリの微細化および多値化が進むにつれ、BCH符号より訂正能力の高いlow-density parity-check (LDPC)符号も適用されつつある。これらのECCを不揮発性半導体メモリに用いるとストレージ性能が低下するため、ハイブリッドストレージで用いるSCMおよびNAND型フラッシュメモリに適用できるECCの強度を示している。

第6章ではストレージアプリケーションの特性に応じたSCM容量の自動調整手法を述べている。SCMとNAND型フラッシュメモリを用いたハイブリッドストレージは、ストレージアプリケーションの性質によって必要となるSCM容量は異なる。さまざまな特性を持つストレージアプリケーションに最適なSCM容量をそれぞれ手動で決定することは難しい。SCMからNAND型フラッシュメモリへ移されたデータの中で頻繁にアクセスされるデータをゴーストleast recently used (ghost LRU)リストを用いて検出し拡大すべきSCM容量を計算する手法について述べている。またSCM内で頻繁にアクセスされるデータをNAND型フラッシュメモリへ移動することを防ぐアルゴリズムについても述べ、ハイブリッドストレージ性能を評価している。

第7章では本論文の結論と今後の研究について展望を述べている。本論文ではストレージアプリケーションの特性に応じた異種の不揮発性半導体メモリを用いたヘテロジニアス・ストレージの最適な構成を論じている。ごく頻繁にアクセスされるデータを含むアプリケーションには高速なM-SCMが必要である。一方で頻繁にアクセスされないデータを含むアプリケーションはTLC NANDフラッシュが必要であることがわかる。またSCMおよびNAND型フラッシュメモリを用いたストレージにおいて、SCM容量が多いとSCMへのアクセス頻度が増すためにSCMに適用するECCの強度は一定以下に抑えねばならず、しかしNAND型フラッシュメモリへのアクセス頻度は減少するためにNAND型フラッシュメモリに適用するECCの強度を強めることができる。さらにSCM容量の自動調整手法を用いることで、ストレージ動作期間中のストレージコストを抑えることができることを示している。最後に3次元積層されたNAND型フラッシュメモリを用いた場合のヘテロジニアス・ストレージのデータマネジメントアルゴリズム最適化や、SCM容量調整手法に機械学習を用いることが今後の研究課題であることを述べている。本論文の成果は、4件の英文有査読論文 (IEEE Transactions on VLSI Systems 等) に発表されている。

本論文の成果である異種の（ヘテロジニアスな）不揮発性半導体メモリで構成されるストレージおよびそのデータ制御手法の提案は世界で初めてのもので、独自性は高い。本研究成果は将来のデータセンタのストレージとして有望な技術であり、学術的知見を提供するとともに産業応用の面でも重要な貢献をすると評価される。

以上により本論文は、博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと認める。