

相変化メモリの高信頼・低電力書き込み方式の研究

Study on Highly Reliable and Low Power Program Methods of Phase Change Memories

電気電子情報通信工学専攻 江上 徹

Toru EGAMI

学会・論文に未発表の非公開情報は要旨に掲載していません

1. はじめに

サーバや PC など電子機器の消費電力が大きくなり、演算処理やデータ記憶を行う集積回路の低電力化、不揮発化が本質的に重要となる。これらの電子機器には不揮発性のストレージである HDD が使用されているが、DRAM との間に大きな性能ギャップが存在する。この差を埋めるために NAND フラッシュメモリを使用した SSD が普及しているが、SSD でも DRAM との間に性能ギャップが存在する。そこで NAND フラッシュメモリを置き換え、記憶装置の性能ギャップを埋めることが可能であるストレージクラスメモリ (SCM) の研究が進められている。

現在有力と見られている SCM の 1 つに PRAM (Phase change Random Access Memory) がある[1-2]。PRAM は DVD などを使用している材料を使っており、また 1 つのセルで複数の値を記憶する多値化が可能で、単純な構造であるため微細化に向いているなどの利点がある。そのため、DRAM との性能差を埋める SCM としての役割や NAND フラッシュメモリの置き換えなどが期待されている。しかし、PRAM は書き込み電流が大きいため消費エネルギーが大きくなるといった問題がある。そこで、消費エネルギーを小さくするために超格子構造の PRAM (Super-Lattice PRAM, SL-PRAM) の研究が進められている。PRAM を超格子構造にすることによって消費エネルギーを削減可能となる。以上の利点を踏まえて PRAM、SL-PRAM に注目し、研究を行う。

2. PRAM、SL-PRAM の原理

PRAM は GST 系の相変化材料を使用しており、適切な電圧を印加することで発生したジュール熱により、アモルファス相と結晶相の間で相変化を起こす(図 1)。PRAM はこの相の違いによる抵抗値の変化をメモリとして利用している。アモルファス相になると高抵抗状態となり、結晶相にな

ると低抵抗状態となる。PRAM に書き込みを行う場合、低抵抗状態をアモルファス化し高抵抗状態にする動作は RESET と呼ばれ、高抵抗状態を結晶化して低抵抗状態にする動作を SET と呼ぶ。RESET は高い電圧を短時間かけることにより発生するジュール熱で相変化材料を融点以上に加熱した後、立下り時間を短くし、急冷することにより実行可能である。SET の場合、200°C 程度に温めた相変化材料を電圧パルスの立下り時間を長くすることにより、徐々に冷ましていくことで行われる。PRAM は高速で書き込みを行うことが可能であるが、フラッシュメモリと比較すると書き込み電流が非常に大きく、並列で書き込むのに適していない。また、書き込み電流が大きいと選択スイッチに流せる電流の制限を超える可能性や、配線の抵抗による電圧降下の影響を受け、書き込みが困難になるといった問題がある。そこで、この問題を解決するために SL-PRAM と呼ばれる超格子という特殊な構造を持つ PRAM が提案されている[3]。

SL-PRAM は図 2 に示した通り、GeTe 層が SbTe 層に挟み込まれた構造をしており、電圧を印加することで SbTe 層は動かずに、GeTe 層の Ge 原子が相に垂直な方向に動くことで抵抗値が変化する。従来の PRAM は相変化材料を溶かすことによって相変化を起こすため、Ge や Te や Sb といった原子が一定の規模でランダムに動く。一方で、SL-PRAM は Ge 原子のみを 1 方向に動かすだけであるため、エントロピーの増加を抑制し、書き込み電流を小さくすることが可能となる。

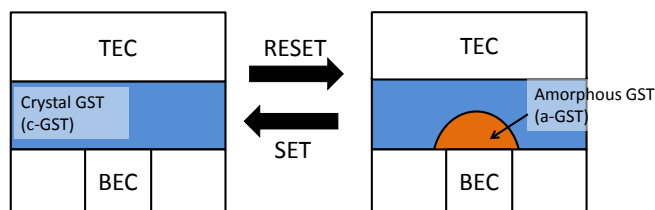


図 1 PRAM の相変化の様子

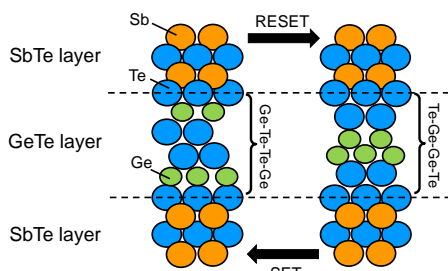


図2 SL-PRAMの書き込みメカニズム

3. SL-PRAMにおける基本特性、信頼性測定

3.1 RESET、SET 特性

本研究ではSL-PRAMメモリデバイスの測定を行うことで、RESET特性、SET特性などの基本特性を測定し、PRAMとの比較を行う。また、SL-PRAMはGe原子のスイッチングによって抵抗値が変化すると考えられているが、この理論を認めていない研究者もいるため、電気的特性の観点からGe原子スイッチング理論の証明を行う。まず、SL-PRAMとPRAMのRESET電圧の比較を図3に、RESET電流の比較を図4に示す。図3より、PRAMはRESETを行うのに2.5V程度必要であるのに対し、SL-PRAMは1.1V程度であり、約56%低い電圧でRESETの実行が可能になる。また、RESET電流の比較では図4より、PRAMはRESET実行時に7mA程度の電流が流れているのに対し、SL-PRAMは200 μ A程度で書き込みが可能になっており、RESET電流を約97%抑制可能となる。

次にSL-PRAM、PRAMにおけるSET特性の比較を行う。まず、SET電圧の比較を図5に、この時のSET電流の比較を図6に示す。図5より、PRAM、SL-PRAMともにSETを行うのに1.2V程度の電圧が必要であることが分かる。PRAMは1.2V~2.0VまでSETに成功しているのに対し、SL-PRAMは1.6VからSETに失敗している。このことから、印加する電圧が大きいと逆にSETに失敗することが分かる。次に図6より、PRAMはSETを行うのに電流が5mA程度流れているのに対し、SL-PRAMは250 μ A程度で書き込みが行えており、PRAMと比較して約95%低い電流でSETが可能である。また、PRAMはSET電圧が1.2Vの時に書き込み電流が10倍程度大きくなっている。これは図5、6より、電圧1.2V時に相変化材料が溶けて、アモルファス相から結晶相に相変化が起きて抵抗値が低下したため、SET電流が大きくなったと考えられる。しかし、SL-PRAMは図5、6

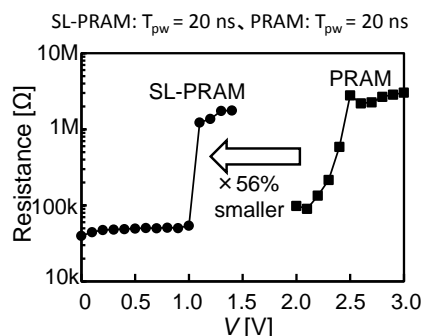


図3 SL-PRAMとPRAMのRESET電圧比較

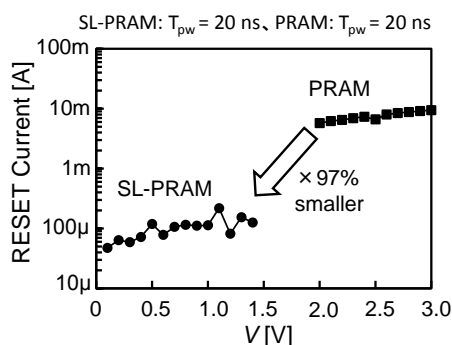


図4 SL-PRAMとPRAMのRESET電流比較

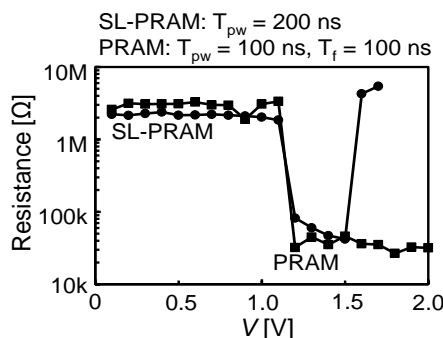


図5 SL-PRAMとPRAMのSET電圧比較

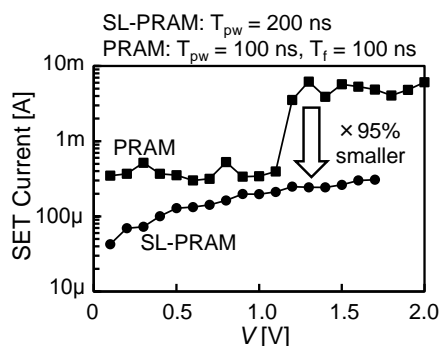


図6 SL-PRAMとPRAMのSET電流比較

より、電圧1.2V時でSETに成功し、抵抗値が低下しているのに対し、SET電流はほとんど変化していない。このことから、SL-PRAMは相変化材料を溶かすことなく、Ge原子のみが動くことによって抵抗値が変化すると考えられる。

次にSL-PRAMとPRAMのSETパルスの立下りの比較を図7に示す。図7より、SL-PRAMは $T_{pw}=100$ nsという条件のもとではSETを行うのに

立下りは必要ないことが分かる。SL-PRAM、PRAMともにRESETと比較するとSETは低速であることが分かる。また、PRAMは立下りが大きくなるにつれて抵抗値が低下している。これは、PRAMはSETパルスの立下り部分で相変化材料の冷め具合を制御することによりSETを実現している。そのため、立下りを大きくすると相変化材料を冷ますことが容易になるため、抵抗値を低下されることが可能となる。しかし、SL-PRAMは立下りが大きくなるとSETに失敗している点が見られる。よって、SL-PRAMはSETパルスに立下りが必要ないことが分かる。このことから、SL-PRAMは相変化材料を溶かしてから冷却するという動作を必要としないことが分かり、相変化によって抵抗値を変化させているPRAMとは書き込みのメカニズム異なり、Ge原子のみが動くことによって抵抗値が変化すると考えられる。

3.2 温度特性

PRAMは熱による相変化を利用しているため、周囲の温度に影響を受け、抵抗値が変化する。SL-PRAMも構造は異なるがPRAMと同じ相変化材料を使用しているため、周囲の温度に影響を受ける可能性がある。そこで本研究では、温度による抵抗値の変化を検証する。まず、図8に85°Cで書き込みを行い、27°Cに温度を変化させて読み出しを行った時の抵抗値の変化を示す。図8より、SL-PRAM、PRAMともに85°CでRESET、SETを行い、27°Cで読み出しを行うと抵抗値が大きく変化する事が分かる。また、SL-PRAMとPRAMでは似たような温度特性を持っている。温度の変化によって抵抗値が変化するが、SLCで利用する場合、閾値を低めに設定すれば温度が85°Cまではエラーを起こすことなく読み出しを行うことが可能である。しかし、NANDフラッシュメモリの置き換えを考えると大容量化や低コスト化のためにMLCでの利用は必要である。そこで図9にPRAMにおいて85°CでMLC書き込みを行い、-5°Cまで温度を変化させて読み出しを行った時の抵抗値の変化とその時の読み出し電流の変化を示す。図9(a)より、各値の読み出しのマージンはほとんどなく、温度に対して閾値を一定にするとエラーが起きる。実際に回路で0、1を判別する場合、読み出してきた電流値によって判別を行うが、図9(b)より温度に対して閾値を一定にするとエラ

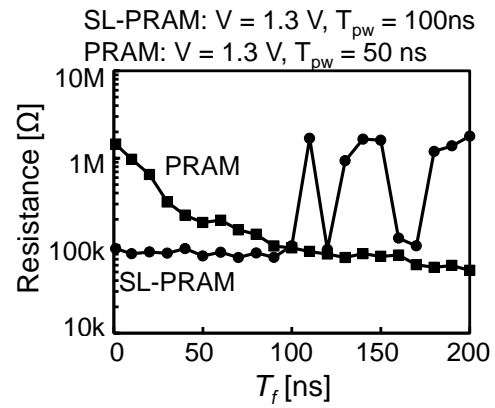


図7 SL-PRAMとPRAMの立下り依存性

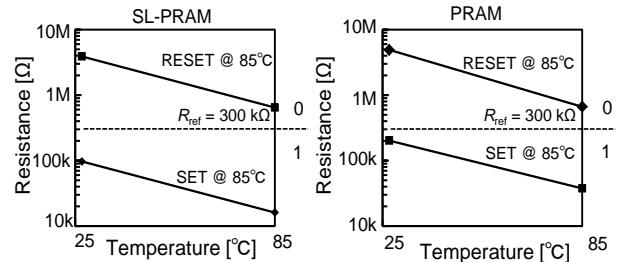


図8 SL-PRAMとPRAMの温度による抵抗変化

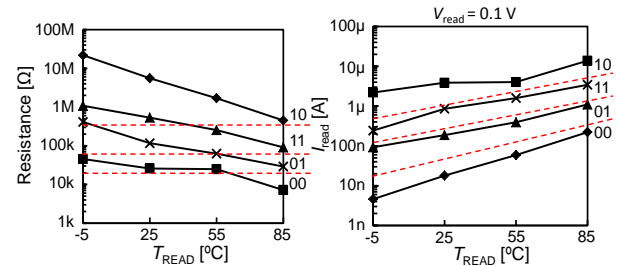


図9 (a) 温度による抵抗値の変化 (b) 温度による読み出し電流値の変化

ーが起きるため、温度の変化によって基準の電流も変化させる必要がある。そこで、絶対温度に比例する電流を生成するPTAT(Proportional To Absolute Temperature)回路と温度に依存せずに一定の電流を出力するCONST回路を用いることによって、温度によって基準の電流を変化させる。

4. 読み出し基準電流生成回路測定結果

図10にPTAT回路、CONST回路を示す。図10(a)よりPTAT回路から出力される電流 I_{PTAT} は

$$I_{PTAT} = \frac{kT}{qR_{BGR}} \ln \frac{m_1}{m_2} \quad (1)$$

となり、温度 T に依存する電流を得ることが可能となる。また、図10(b)よりCONST回路から出力される電流 I_{CONST} は

$$I_{CONST} = \frac{V_2}{R_1} + I_2' \quad (2)$$

となる。ダイオード電圧 V_2 の温度特性は一般的に -2.0mV/K なので、 V_2/R_1 は負の温度特性を持つ。

また、 $I_2' = I_{PTAT}$ なので I_2' は正の温度特性を持つ。よって、 V_2/R_1 と I_2' を足し合わせて温度特性が 0 になるように抵抗 R_1 を決定すると、 I_{CONST} は温度に依存しない電流となる[4]。ここで、PTAT 回路から出力される電流 I_{PTAT} と CONST 回路から出力される電流 I_{CONST} にカレントミラー回路を用いることにより、出力電流 I_{OUT} は

$$I_{OUT} = N_{P_PTAT} \times I_{P_PTAT} - N_{N_PTAT} \times I_{N_PTAT} + N_{P_CONST} \times I_{P_CONST} - N_{N_CONST} \times I_{N_CONST} \quad (3)$$

$$= (A - C) \times T + (B - D)$$

となり、温度に依存する電流と温度に依存しない電流となる。よって、温度によって出力電流 I_{OUT} の傾きと切片を変化させることが可能になるため、読み出しのマージンを取得することが容易になる[5]。

図 11 に SPICE を用いたシミュレーションにより生成した最適な基準電流 I_{ref3} を示し、図 12 に実測結果を示す。図 11 より、オンにする P_PTAT と N_CONST のカレントミラースイッチの数を適切にし、傾きと切片を調整することで、「01」と「00」の読み出しマージンを取得可能となる最適な基準電流 I_{ref3} を生成することが可能となる。また、図 12 より、基準の電流 I_{ref3} の傾きと切片を変化させることで、温度によって読み出し電流値が変化してもエラーを起こすことなく「01」と「00」を判別することが可能なことを実測結果から証明した。

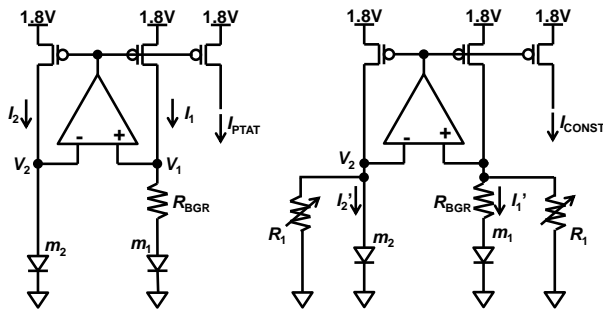
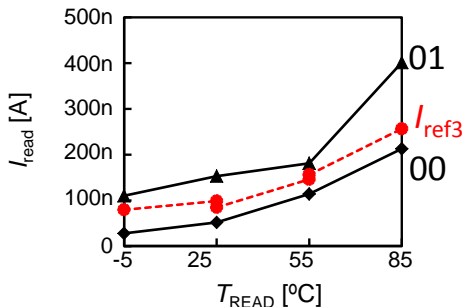
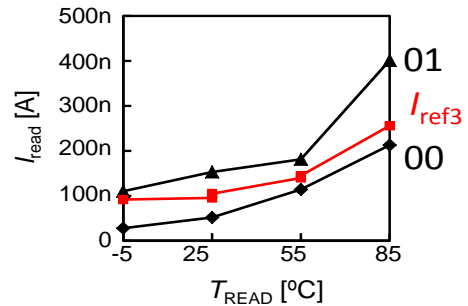


図 10 (a) PTAT 回路 (b) CONST 回路



T_{READ} range	-5°C-25°C	25°C-55°C	55°C-85°C
P_PTAT	3	8	12
N_CONST	1	7	12

図 11 最適な基準電流 I_{ref3} のシミュレーション結果



T_{READ} range	-5°C-25°C	25°C-55°C	55°C-85°C
P_PTAT	3	8	13
N_CONST	1	8	12

図 12 最適な基準電流 I_{ref3} の実測結果

参考文献

- [1] S. Lai et al., IEEE IEDM, 2001, pp. 803
- [2] M. Gill et al., IEEE ISSCC, 2002, pp. 158
- [3] J. Tominaga et al., IEEE IEDM, 2010, pp. 528
- [4] H. Bamba et al., IEEE JSSC, 1999, pp. 670
- [5] K. Miyaji et al., IEEE ASSCC, 2012, pp. 313

発表文献

学術雑誌

- [1] ○T. Egami, K. Johguchi, S. Yamazaki and K. Takeuchi, “Investigation of multi-level-cell and SET operations on super-lattice phase change memories,” Japanese Journal of Applied Physics, 2014
- [2] K. Johguchi, T. Egami, K. Miyaji and K. Takeuchi, “A Temperature Characteristics Tracking Read Reference Current and Write Voltage and Read Generator for Multi-Level Ge₂Sb₂Te₅-based Phase Change Memories,” IEICE Transactions on Electronics, 2014

国際会議

- [1] ○T. Egami, K. Johguchi, S. Yamazaki and K. Takeuchi, “Investigation of Multi-Level-Cell Operation with 2-Step SET Pulse and SET Operation on Super-Lattice Phase Change Memories,” International Conference on Solid State Device and Materials, 2013
- [2] K. Johguchi, T. Egami and K. Takeuchi, “Low-Power Super-Lattice Phase-Change Memory without Melting and Write-Pulse Down Slope,” International Reliability Physics Symposium, 2013
- [3] K. Johguchi, T. Egami, K. Miyaji and K. Takeuchi, “Write Voltage and Read Reference Current Generator for Multi-Level Ge₂Sb₂Te₅-based Phase Change Memories with Temperature Characteristics Tracking,” International Memory Workshop, 2013

国内会議

- [1] ○江上 徹, 上口 光, 竹内 健, “相変化メモリの環境温度依存性評価,” 集積回路研究会, 信学技報, vol. 112, no. 365, ICD2012-107, pp. 65, 2012年12月
- [2] 山崎 泉樹, 江上 徹, 上口 光, 竹内 健, “超格子相変化メモリの SET 書き込み最適化の研究,” 第 61 回応用物理学関係連合後援会, 2014年3月
- [3] 山崎 泉樹, 上口 光, 江上 徹, 吉岡 和顕, 竹内 健, “GST-PCM と SL-PCM の高速・低エネルギーの電気特性評価と書き込み/読み出し回路,” LSI のシステムとワークショップ, 2014年5月