

## 新ばらつき設計手法を用いた強誘電体シャドーSRAMの再検討

A Feasibility Study on Ferroelectric Shadow SRAM Using a New Variability Design Scheme

東大生研 ○竹内 潔, 小林 正治, 平本 俊郎

Univ. Tokyo, °Kiyoshi Takeuchi, Masaharu Kobayashi, and Toshiro Hiramoto

E-mail: takeuchi@nano.iis.u-tokyo.ac.jp

**はじめに** 無線通信機能を有し環境発電で動作する超低電力なセンサー端末を大量に設置することで新たなアプリケーション領域が創出できるのではないかと期待が議論されている[1]。このようなIoTセンサー端末においては取得したデータが電源喪失時も失われないよう不揮発メモリが必須と考えられる。しかしこのような応用に必要な超低消費電力不揮発メモリとしてどのような技術を用いるのが最適かは十分検討されていない。そこで本研究では近年のハフニウム系強誘電体の発見を踏まえ、かつて盛んに研究された強誘電体シャドーSRAM[2-5]の可能性を再検討した[6]。

**検討対象** 今回検討したシャドーSRAMのセル構成を図1に示す。シャドーSRAMは普段は通常の揮発性SRAMとして動作するが、電源断前に記憶を強誘電体キャパシタの分極として定着(退避)させ、電源回復後に記憶をSRAMラッチ回路に逆転写(復帰)することであたかも真の不揮発SRAMであるかのように振舞うことができる。退避と復帰は信号線Vp1、Vp2と電源線Vccを図1bのように変化させることで実現される。その電力、速度性能はばらつきに対する余裕を確保しつつどこまで強誘電体キャパシタを小さくできるかに懸かっている。

**検討方法** SRAMにおいてはトランジスタのランダムばらつきに対して概ね $\pm 6\sigma$ の動作余裕を持たせた設計が必須だが、シャドーSRAMにおいては加えて復帰動作についてのばらつき考慮設計が重要である[4,5]。ところが復帰動作はキャパシタンスの左右差をSRAMセル自体で増幅する過渡的動作であるためStatic Noise Margin (SNM)のような安定性指標を用いた解析が難しい。そこで今回はトランジスタ特性を変化させつつ実施した多数の過渡回路シミュレーションのPass/Fail情報のみからメモリセルの動作余裕を容易に算出できる手法を考案し採用した。65nm LP SRAMセルのネットリストにVerilog-Aで記述したPreisach型のキャパシタモデルを接続してセルを構成し、キャパシタ寸法、信号の遷移時間などを種々に変化させて動作余裕を算出した。ばらつきとしてはトランジスタのランダムばらつきのみを考慮し、強誘電体膜厚は4nm、電源電圧は1.2Vと想定した。

**検討結果** 図2にばらつきの標準偏差 $\sigma$ で規格化した動作余裕の計算結果例を示す。横軸はVp1とVp2に接続されるキャパシタの面積比 $R=A1/(A1+A2)$ であり、片側総面積 $A1+A2$ をパラメータとしている。動作余裕を極大化する最適面積比率が存在すること、総面積を増すほど最適比率における動作余裕が増すことがわかった。図2において片側 $0.01\mu\text{m}^2$ のキャパシタで $8\sigma$ に近い十分な動作余裕が得られている。この面積であれば素のSRAM性能の劣化は想定される応用において無視できるレベルである。また退避・復帰に要するエネルギーも往復で10fJ/bit以下と見積もられ、0.1~1pJ/bit程度のMRAMの書き込みエネルギーと比べても大幅な低電力化が期待できる。ただしこれは信号遷移時間が10nsの場合であり、遷移時間が長くなる、あるいは強誘電体の材料遅延が増すと動作余裕は劣化した。

**まとめ** シャドーSRAM設計に適用可能なばらつき考慮設計手法を考案した。これを用いた解析よりハフニウム系強誘電体キャパシタを用いたシャドーSRAMは超低消費電力不揮発メモリとして有望であることが判った。ただしその実現には強誘電体材料の高速応答性が重要である。

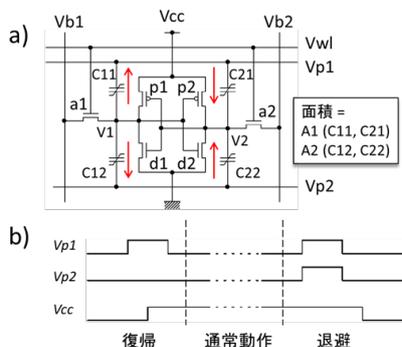


図1 シャドーSRAMのセル構成と制御波形

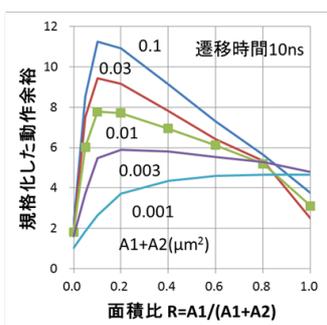


図2 動作余裕計算結果例

### 参考文献

- [1] A. Keshavarzi et al., IEEE Design & Test, 36, p.41 (2019).
- [2] S. S. Eaton, ISSCC 1988, p.130.
- [3] T. Miwa et al., JSSC, 36, p.522 (2001).
- [4] S. Masui et al., CICC 2003, p. 403.
- [5] S. Masui et al., JSSC, 38, p.715 (2003).
- [6] K. Takeuchi et al., EDTM 2019.

This work is based on a project commissioned by the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO).