



Rezistif belleklerin kapasitör tabanlı AC okunmasında non-lineerliğin okuma marjini üzerine etkisi

Effect of nonlinearity on the reading margin of resistive memories with capacitor-based AC sensing

Ertuğrul Karakulak^{1*}, Reşat Mutlu², Erdem Uçar³

¹Elektronik Programı, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ, Türkiye

E-posta: ekarakulak@nku.edu.tr

²Elektronik Haberleşme Mühendisliği, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ, Türkiye

E-posta: rmutlu@nku.edu.tr

³Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Trakya Üniversitesi, Edirne, Türkiye

E-posta: erdemucar@trakya.edu.tr

Özet

Rezistif belleklerden AC okuma üzerine literatürde çeşitli yayınlar bulunmaktadır. Bir direnç veya bir kapasitörün pull-up elemanı olarak kullanılıp rezistif belleklerden okuma işlemi yapılabileceği yine literatürde deneysel olarak gösterilmiştir. Literatürde henüz rezistif bellek hücrelerinin nonlineerliğinin okuma marjini üzerine olan etkisi parametrik olarak incelenmemiştir. Bu çalışma rezistif belleklerden kapasitör tabanlı AC okumaya nonlineer rezistans parametrelerinin etkisini incelemek üzere yapılmıştır ve okuma marjini bellek boyutuna göre incelenmiştir. Parametrelerin bazı değerlerinde ve bazı bellek boyutlarında, okuma marjininin çok düştüğü görülmüştür. Bu bölge bellek tasarımları için önlenmesi gereken bir bölgedir. Ayrıca bu çalışmada nonlineerliğin daha iyi bir okuma marjinine sebep olduğu da gösterilmiştir.

Abstract

Feasibility of AC sensing of resistive memories has been previously demonstrated in literature. A Resistor or a capacitor can be used on the pull-up line to sense the state of the resistive memory and a capacitor based pull-up circuit for the resistive memories has already been experimentally verified in literature. However, to the best of our knowledge, the effect of the nonlinearity of a resistive switch on its reading margin has not been examined parametrically yet. In this paper, a parameteric study of the reading margin of a resistive memory with capacitor based AC sensing has been done. It has been found that there is a region with a very low reading margin in which such a design should be prevented. It has also been found that the nonlinearity provides a higher reading margin.

1. Giriş

Memristif sistem tanımına uyan rezistif anahtarlar ile günümüzde yeni tip kalıcı bellekler yapılabilmektedirler[1-7]. Bu tür yeni bellekler düşük enerji sarfları, hızlı okuma/yazma işlemleri ve küçük boyutları ile gelecek vaad eden bellek türlerinin arasında yer almaktadır. Bu belleklerin kullanıma yaygınca girmesi için kaçak akımları ve güç sarfiyatları azaltılmalı, okuma marjinleri ise yükseltilmelidir[8,9].

Literatürde kapasitör tabanlı alçak geçiren filtreler şeklinde değerlendirerek rezistif belleklerden AC gerilim ile okuma ele alınmıştır[10,11]. Bir pull-up direnci ile rezistif crossbar (karesel) belleklerden okuma yapılması da literatürde ele alınmıştır[6, 9,10]. Tüm bit hatlarının pull-up dirençleri ile bağlandığı crossbar bellek [12]'de incelenmiştir. [13]'de rezistif bellek hücrelerinin nonlineerliğindeki artışın daha küçük kaçak akımlara ve daha iyi okuma marjinine neden olduğu gösterilmiştir. Nonlineer rezistif hücrelere sahip crossbar yapıllı rezistif belleklerin pull-up kapasitörü ile AC okuma işlemi literatürde henüz yer almamaktadır. Bu çalışmada nonlineer rezistif bellek elemanlarından oluşan crossbar belleğin okuma marjini, crossbar bellek eşdeğer devre modelleri kullanılarak incelenmiştir. Bellek hücreleri voltaj bağımlı nonlineer dirençler olarak modellenmiştir. Kaçak akımlar “off” durumundaki rezistif hücreler ile “on” durumundaki rezistif bellek hücreleri arasındaki orana göre eşik voltajında ve yarı eşik voltajında olacak şekilde parametrize edilmiştir. Simülasyonlar AC okumada ve bir pull-up kapasitörü bağlı olacak şekilde yapılmış ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Ayrıca okuma marjini crossbar bellek boyutunun/satır sayısının fonksiyonu olarak incelenmiş

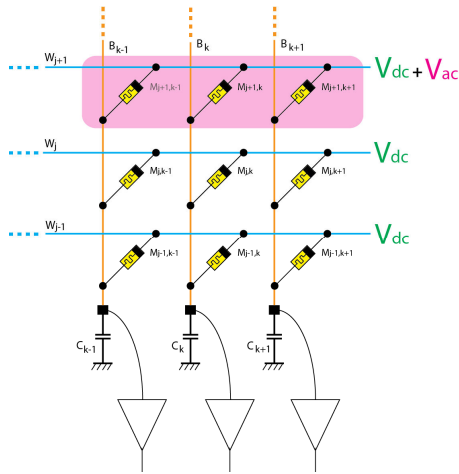
* İletişim: Elektronik Programı, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ, Türkiye

ve küçük bellek boyutlarında çok düşük okuma marjinine sahip bir bölge olduğu gözlemlenmiştir. Uygulama çalışmalarında söz konusu düşük okuma marjin bölgesi boyutlarına sahip belleklerin üretiminden kaçınılmalıdır.

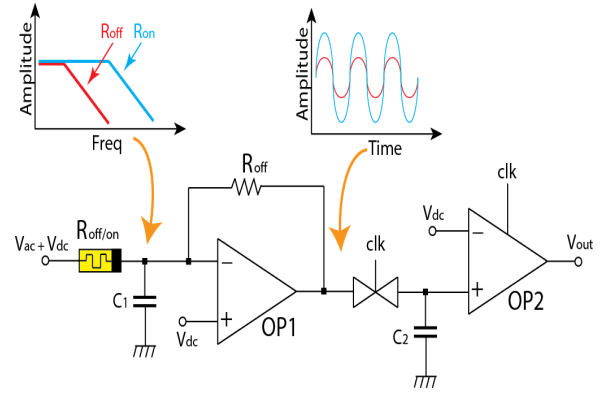
Bu çalışmanın ikinci bölümünde TiO_2 memristör tabanlı crossbar bellekten kapasitör ile AC okuma işlemi[10] kısaca açıklanmıştır. Üçüncü bölümde voltaj bağımlı rezistif crossbar bellekten pull-up kapasitörü ile AC okuma bellek kaçak akım devresi ve okunan hücre eşdeğer devresi verilmiştir. Dördüncü bölümde pull-up kapasitörlü AC okuma altındaki rezistif crossbar bellekte nonlineerliğin okuma marjini üzerindeki etkisi ele alınmıştır. Çalışma sonuç bölümüyle sonlandırılmıştır.

2. TiO_2 crossbar bellek katmanından kapasitör tabanlı AC okuma

AC okuma işlemi uygulanan bir crossbar bellek Şekil 1’de gösterilmiştir[10]. Yine [10]’da bu bellek katmanından okuma yapan devre verilmiştir ve bu devre Şekil 2’de görülebilir. Şekil 2’deki devre örnekle ve tut devresi, bir opamp’li komparatör ve seçili bellek hücresinin memristör sembolü ile gösterildiği bir alçak geçiren filtreden oluşmaktadır. Şekil 2’de verilen filtrenin frekans cevabı temel olarak seçili bellek hücresine ve kaçak direncine bağlıdır. [10]’daki çalışmada yalnızca seçili bellek hücresinin direnci ele alınmış, kaçak direnç göz ardı edilmiştir. R_{off} olarak ifade edilmiş olan geri besleme direnci değeri off durumundaki bellek hücresinin direnç değerine eş olarak seçilmiştir. Sonuç olarak okuma kapasitörünün akım değeri seçili hücre akımına ve seçilmemiş hücre kaçak akımları toplamına eşittir.



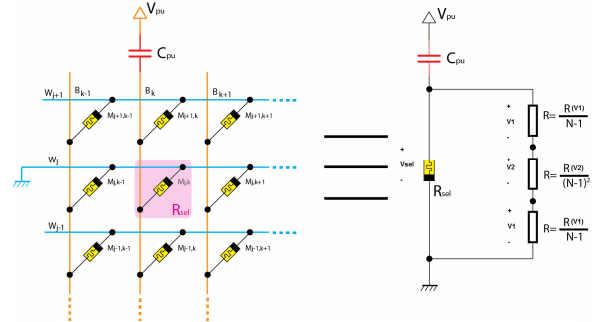
Şekil 1: Bit hatlarına kapasitör ekleyerek oluşturulmuş DC kaçak akımı azaltan AC okuma [10].



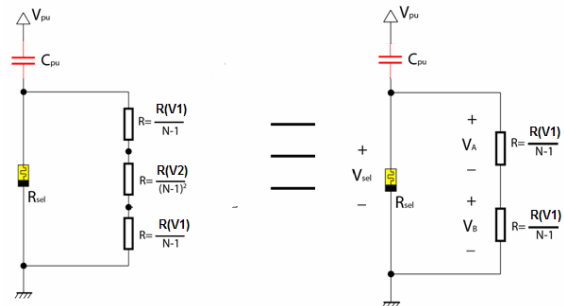
Şekil 2: Tek bir bit/hücre için AC okuma devresi[10].

3. Pull-up kapasitörlü ve gerilim bağımlı rezistif belleğin kaçak akım devresi ve AC okuma eşdeğer devresi

Bu bölümde Şekil 3’te kapasitör ile pull-up yapılmış, AC işaret ile okunan rezistif crossbar belleğe ait eşdeğer devre modeli verilmiştir. Bu eşdeğer devrede kullanılan nonlineer dirençler gerilim bağımlı direnç olarak modellenmiştir. Bu belleğin okuma marjini eşik gerilimi ve yarı eşik gerilimindeki nonlineer dirençler kullanılarak analiz edilmiştir. Bellek boyutları $N \times N$, yani bit hatları (N) ile word hatları sayısı (N) birbirine eşit olarak alınmıştır. Yani çalışmada incelenen bellek karesel bir bellektir.



Şekil 3: Tek pull-up kapasitörü kullanıldığında bellek boyutuna/bellek satır sayısına bağlı eşdeğer kaçak akım devre modeli.



Şekil 4: Eşdeğer kaçak akım devre modeli ve N 'in çok yüksek değerleri için $R / (N - 1)^2$ denklemi sıfıra yaklaşırken, ihmal edildiğinde elde edilen basitleştirilmiş eşdeğer kaçak akım devre modeli.

Deneysel çalışmalar eşik geriliminin altındaki gerilim değerlerinde memristive hücre akımının “on” ya da “off” durumunda da olsa eşik gerilimindeki akıma oranla çok daha az olduğunu göstermektedir. Bu daha düşük kaçak akımlı yeni memristif malzemelerin aranma sebebidir[9]. Yüksek düzeyde nonlineerliğe sahip rezistif anahtarlar [9,13]’de rapor edilmiştir, bu yayınlarda kullanılan malzemenin yarı eşik gerilimi altında çektiği akım tam eşik gerilimi altında çektiği akımın yaklaşık yüzde biri düzeyinde olmaktadır;

$$V_{TH} \approx V \quad (1)$$

ve

$$I(V_{TH} / 2) \leq \frac{I(V_{TH})}{100} \quad (2)$$

bu gerilimlere tekabül eden rezistif anahtar direnç değerleri arasında,

$$R(V_{TH} / 2) \geq 100.R(V_{TH}) \quad (3)$$

ilişkisi de yazılabilir. Burada V_{TH} ise seçili bellek hücresi eşik gerilim değeridir,

Kaçak akımlardaki önemli düşüş ve okuma marjindeki yükseliş göz önüne alındığında bu non-lineerlik özelliği oldukça faydalıdır. [12]’de verilen eşdeğer devre Şekil 3’te görülmektedir. Bu devrede seçilen hücre üzerine düşen gerilim, kaçak devre eşdeğer elemanlarının her birinin üzerine düşen gerilimlerden daha yüksektir. Dikkat edilirse en kısa kaçak patika eşdeğer devresi üç adet seri rezistif elementten oluşmaktadır. Nonlineer modeli basitleştirmek için, bir hücrelerin direnci gerilim (V) bağımlı direnç olarak modellenebilir; $R(V)$ [9]. Kullanım esnasında her bir bellek hücresi “on” veya “off” konumunda olabileceği için her hangi bir anda hepsinin lojik durumlarını bilmek mümkün değildir. Bu sebeple belleklerde çalışma esnasında kaçak akımı tam olarak belirlemek mümkün olmamaktadır. Yinede seçilmemiş durumdaki hücrelerin tamamı “on” konumundayken kaçak akım maksimum değer alacağı bilinmektedir ve bu olası en kötü kaçak akım durumu kolaylıkla incelenebilir. Eğer üzerine eşik gerilimi (V_{TH}) düşen hücre “on” durumundaysa, hücre direnci $R_{on}(V_{TH})$ değerine eşittir ve onun için aşağıdaki ilişki yazılabilir:

$$R_{on}(V_{TH} / 2) = \beta.R_{on}(V_{TH}) \quad (4)$$

Burada,

$R_{on}(V_{TH} / 2)$ “on” konumundaki rezistif elementin üzerine yarı eşik gerilimi $V_{TH} / 2$ düşerkenki direnç değeridir,

$R_{on}(V_{TH})$ “on” konumundaki rezistif anahtarın eşik gerilimindeki V_{TH} direnç değeridir,

β non-lineerlik katsayısıdır ve R_{on} konumundaki bellek hücresinin tam ve yarı eşik gerilimi altında gösterdiği direnç değerleri arasındaki orana eşittir.

Rezistif anahtarın “off” ve “on” durumlarının arasındaki ilişki ise aşağıdaki denklemdeki haliyle yazılabilir:

$$R_{off} = \gamma.R_{on} \quad (5)$$

γ parametresi ise R_{off}/R_{on} oranı olarak ifade edilebilir. Şekil 3’te görülen eşdeğer direnç değeri $R(V_2)/(N-1)^2$ yüksek N değerleri için serideki diğer eşdeğer direnç eşdeğerlerine $R(V_1)/(N-1)$ göre çok daha küçük bir değere sahip olacağı için ihmal edilmiştir. Bu durumda, V_{sel} geriliminin yarısı $R/(N-1)$ değerlikli eşdeğer dirençler üzerinde eşit olarak dağılacaktır. Bu durum Şekil 4’te açık olarak görülebilir. Kullanılan modelde iletim anında seçilen hücrenin üzerine düşen gerilim eşik gerilimine eşit kabul edilebilir;

$$V_{sel} = V_{TH} \quad (6)$$

Bu durumda $V_2 = V_{TH}/2$ kabul edilebilir. En kötü kaçak akım senaryosu olarak, tüm kaçak hücre dirençleri “on” konumunda kabul edilebilir. Bu durumdaki eşdeğer kaçak direnç değerine ise R_{LEAK} denilebilir:

$$R_{LEAK} = \frac{2.R_{on}(V_{TH} / 2)}{(N-1)} \quad (7)$$

Kaçak direnç ve seçili bellek hücresinin paralel eşdeğer direnç değeri,

$$R_{p_eq} = \frac{R_{sel}.R_{leak}}{R_{sel} + R_{leak}} = \frac{R_{sel}}{1 + \left(\frac{R_{sel}}{R_{leak}}\right)} \quad (8)$$

dirençin ve seçili bellek hücresinin paralel eşdeğer direnci,

$$R_{on_eq} = \frac{R_{on}.R_{LEAK}}{R_{LEAK} + R_{on}} \quad (9)$$

$$R_{on_eq} = \frac{R_{on}(V_{TH})}{1 + \left(\frac{(N-1)R_{on}(V_{TH})}{2.R_{on}(V_{TH}/2)} \right)} = \frac{R_{on}(V_{TH})}{1 + \left(\frac{(N-1)}{2\beta} \right)} \quad (10)$$

Eğer seçili bellek hücresi “on” konumundaysa ortaya çıkan alçak geçiren filtrenin açılmal hızı

$$\omega_{on} = \frac{1}{R_{on_eq} \cdot C} \quad (11)$$

olur. Eğer seçili bellek hücresi “off” konumundaysa, kaçak direncin ve seçili bellek hücresinin paralel eşdeğer direnci,

$$R_{off_eq} = \frac{R_{off}}{1 + \left(\frac{(N-1)\gamma \cdot R_{on}(V_{TH})}{2.R_{on}(V_{TH}/2)} \right)} = \frac{\gamma \cdot R_{on}(V_{TH})}{1 + \left(\frac{(N-1)\gamma}{2\beta} \right)} \quad (12)$$

Eğer seçili bellek hücresi “off” durumundaysa alçak geçiren filtrenin kesim açılmal hızı,

$$\omega_{off} = \frac{1}{R_{off_eq} \cdot C} \quad (13)$$

olur. Bu açılmal hız değerini okuma için yeterince yüksek değerli seçersek, her bir bellek hücresi sabit dirençler gibi davranmaya başlayacaktır.

4. Kapasitör pull-up ile rezistif crossbar bellekten okuma esnasında okuma marjini üzerinde nonlineerliğin etkisi.

Bu bölümde kapasitör tabanlı AC okumada okuma marjini denklemleri verilmiş ve hesaplamalarda kullanılmıştır. Williams’ın topolojisinde okuma gerilimi kapasitör gerilimi eşit olarak seçilmiştir[1] ve fazör domeninde okuma geriliminin genliği,

$$|\bar{V}_c| = |\bar{V}_{pu}| \cdot \left| \frac{\bar{X}_c}{\bar{X}_c + R_{p_eq}} \right| = \frac{|\bar{V}_{read}|}{\sqrt{1 + (\omega CR_{p_eq})^2}} \quad (14)$$

olarak verilir. Okunan bellek hücresi “on” durumundaysa, okuma gerilimi,

$$|\bar{V}_{c_on}| = |\bar{V}_{pu}| \cdot \left| \frac{\bar{X}_c}{\bar{X}_c + R_{p_eq}} \right| = \frac{|\bar{V}_{read}|}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega \cdot C \cdot R_{on}(V_{TH})}{1 + \left(\frac{(N-1)}{2\beta} \right)} \right)^2}} \quad (15)$$

değerine eşittir. Okunan bellek hücresi “off” durumundaysa, okuma gerilimi,

$$|\bar{V}_{c_off}| = |\bar{V}_{pu}| \cdot \left| \frac{\bar{X}_c}{\bar{X}_c + R_{p_eq}} \right| = \frac{|\bar{V}_{read}|}{\sqrt{1 + \left(\frac{\gamma \cdot \omega \cdot C \cdot R_{on}(V_{TH})}{1 + \left(\frac{(N-1)\gamma}{2\beta} \right)} \right)^2}} \quad (16)$$

olur. Okuma marjini denklemi ise ,

$$\Delta V\% = \frac{|\bar{V}_{c_off}| - |\bar{V}_{c_on}|}{V_{pu}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\gamma \omega CR_{on}(V_{TH})}{1 + \left(\frac{(N-1)\gamma}{2\beta} \right)} \right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\gamma \omega CR_{on}(V_{TH})}{1 + \left(\frac{(N-1)}{2\beta} \right)} \right)^2}} \quad (17)$$

olarak bulunabilir. “On” konumundaki rezistif anahtarın V_{TH} eşik gerilimindeki direnç değeri $R_{on}(V_{TH})$ ile okuma kapasitörünün reaktans değeri sadeleştirme amacıyla birbirine eş seçilebilir;

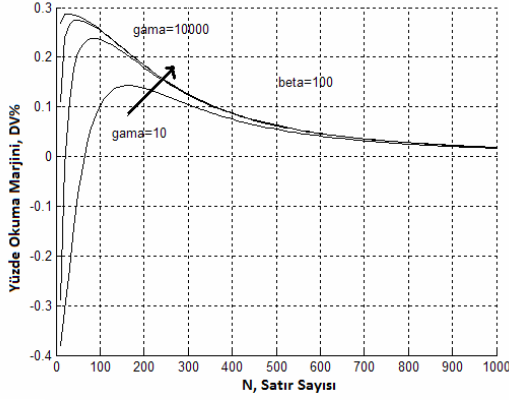
$$\bar{X}_c = \frac{1}{j\omega C} = -j \cdot R_{on}(V_{TH}) \quad (18)$$

Bu durumda Okuma marjini denklemi,

$$\Delta V = \frac{|\bar{V}_{c_off}| - |\bar{V}_{c_on}|}{V_{pu}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\gamma}{1 + \left(\frac{(N-1)\gamma}{2\beta} \right)} \right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{(N-1)}{2\beta} \right)} \right)^2}} \quad (19)$$

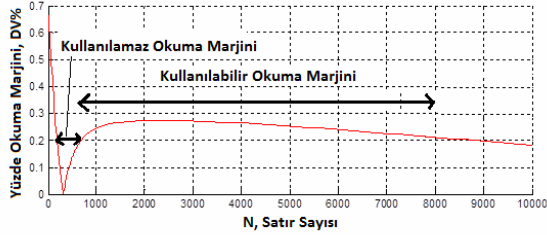
olarak basitleştirilebilir. Parametrelerin $\beta = 100$ ve $\gamma = 10, 100, 1000, 10000$ değerleri için bellek hatlarının sayısının (N) fonksiyonu olarak okuma marjini Şekil 5’te çizdirilmiştir ve γ parametresinin artarken okuma marjininin küçük N değerleri için arttığı Şekil 5’te görülebilir.

Kaynakça



Şekil 5: $\beta = 100$ ve $\gamma = 10, 100, 1000, 10000$ değerleri için okuma marjini

β 'nin daha yüksek değerinin okuma marjinine etkisi, $\beta = 5000$ ve $\gamma = 1000$ yapılarak, Şekil 6'da yine satır veya sütun sayısının (N) fonksiyonu olarak görülebilir. Şekil 6 dikkatle incelendiğinde N değerinin 1000'den küçük olduğu bölgede bir çentik bulunduğu görülebilir ve okuma marjini yaklaşık olarak sıfıra kadar düşmektedir. Bu bölge kullanılamaz okuma marjini olarak isimlendirilmiştir.



Şekil 6: $\beta = 5000$ ve $\gamma = 1000$ için kullanılabılır okuma marjini hafıza satır sayısına göre değişimi.

5. Sonuç

Bu çalışmada pull-up kapasitörlü AC okuma yapılan rezistif crossbar belleğin okuma marjini parametrik nonlinear model kullanılarak incelenmiştir. İlk olarak söz konusu bellek ve pull-up kapasitöre ait eşdeğer devre verilmiştir. Ardından okuma marjini bellek satır sütun sayısının fonksiyonu olarak ele alınmış ve incelenmiştir. Bu incelemelerde $\gamma = R_{off} / R_{on}$ oranı ve nonlinearlik katsayısı β parametreler olarak kullanılmıştır. Simülasyonlar farklı seçilmiş nonlinearlik katsayıları ile yapılmıştır. Simülasyon sonuçları değerlendirildiğinde, nonlinearlik katsayısının yüksek olmasının, daha yüksek okuma marjini ortaya çıkardığı gösterilmiştir. Ayrıca, okuma marjini sıfıra yaklaştığı, yani hafıza tasarımının mümkün olmadığı ve önlenmesi gereken bir bellek bölgesi olduğu da bulunmuştur.

- [1] Joshua, Y. J. Pickett, M. D. Li, X. Ohlberg, D. A. A. Stewart, D. R. Williams, R. S. "Memristive switching mechanism for metal/oxide/metal nanodevices" Nature Nanotechnology 3, 429 – 433, 2008.
- [2] Akinaga, H. Shima, H., "Resistive Random Access Memory (ReRAM) Based on Metal Oxides", Proceedings of the IEEE (Volume:98 , Issue: 12), 2010.
- [3] Yao, J., Sun, Z., Zhong, L., Natelson, D., & Tour, J. M. (2010). Resistive switches and memories from silicon oxide. Nano letters, 10(10), 4105-4110.
- [4] Pascal O Vontobel, Warren Robinett, Philip J Kuekes, Duncan R Stewart, Joseph Straznicky and R Stanley Williams "Writing to and reading from a nano-scale crossbar memory based on memristors" Nanotechnology vol.20, 2009.
- [5] Chua, L. O. , "Resistance switching memories are memristors", Applied Physics A 102 (4): 765–783, 2011.
- [6] Chul-Moon Jung, Jun-Myung Choi, and Kyeong-Sik Min, "Two-Step Write Scheme for Reducing Sneak-Path Leakage in Complementary Memristor Array", Transactions on nanotechnology, vol. 11, 2012.
- [7] Akifumi Kawahara, Ryotaro Azuma, Yuuichirou Ikeda, Ken Kawai, Yoshikazu Katoh, Yukio Hayakawa, Kiyotaka Tsuji, Shinichi Yoneda, Atsushi Himeno, Kazuhiko Shimakawa, Takeshi Takagi, Takumi Mikawa, and Kunitoshi Aono, "An 8 Mb Multi-Layered Cross-Point ReRAM Macro With 443 MB/s Write Throughput", IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS, VOL. 48, NO. 1, JANUARY 2013.
- [8] Eike Linn, Roland Rosezin, Carsten Kügel, Rainer Waser, "Complementary resistive switches for passive nanocrossbar memories" Nature Mater, vol.9, pp. 403-406, 2010.
- [9] Zidan, M. A. Fahmy, H. H. Hussain, M. M. Salama, K.N. "Memristor-based memory: The sneak paths problem and solutions" Microelectronics Journal, 2012.
- [10] M.S. Qureshi, W. Yi, G. Medeiros-Ribeiro and R.S.Williams, "AC sense technique for memristor crossbar", ELECTRONICS LETTERS, Vol. 48 No. 13,757-758.
- [11] S Tappertz, E Linn, L Nielen, R Rosezin, F Lentz, R Bruchhaus, I Valov, U B'ottger and R Waser "Capacity based nondestructive readout for complementary resistive switches", Nanotechnology 22 (2011) 395203 (7pp)
- [12] Chun-Li Lo, Tuo-Hung Hou, Mei-Chin Chen, and Jiun-Jia Huang, Dependence of Read Margin on Pull-Up Schemes in High-Density One Selector–One Resistor Crossbar Array", TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 60, NO. 1, pp.420–426,2013.
- [13] J. Joshua Yang, M.-X. Zhang, Matthew D. Pickett, Feng Miao, John Paul Strachan, "Engineering nonlinearity into memristors for passive crossbar applications", Appl. Phys. Lett. 100, 113501 (2012).