

신 메모리 소자의 개발 현황 및 전망

<http://dx.doi.org/10.5757/vacmag.1.3.4>

정홍식

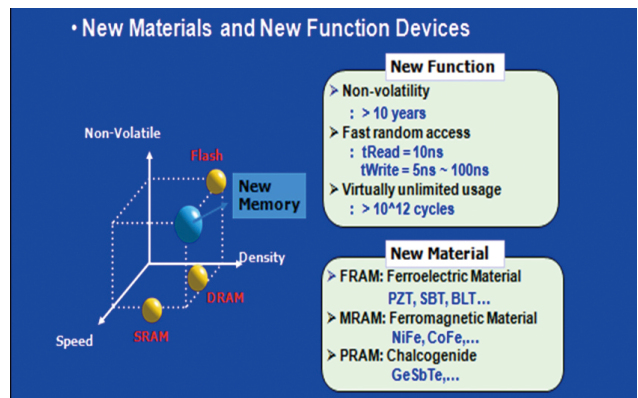
Development Status and Prospect of New Memory Devices

Hongsik Jeong

Since the modern computer architecture was suggested by Von Neumann in 1945, computer has become inevitable for our life. This brilliant growth of computer has been led by device miniaturization trend, so called Moore's law. Especially, the explosive growth of memory devices such as DRAM and Flash have played key role in huge enlarging utilization of computer. However, abrupt increase of data used for many applications in big data era provoke the excessive energy consumption of data center which results from the inefficiency of conventional memory-storage hierarchy. As a solution, the application of new memory devices has been brought up for innovative memory-storage hierarchy. In this paper, the current development status and prospect of new memory devices will be discussed.

기존 메모리의 문제 및 신 메모리의 필요성

메모리소자의 대표적인 3대 기능요소는 집적도 (Density), 비휘발성(Non-volatility), 속도(Speed)라고 할 수 있다. 기존 메모리소자인 DRAM과 Flash(NAND)은 불행히도 3대 요소를 다 만족하지 못하고 있다. 그림 1에서 보이듯이 DRAM은 속도는 빠르지만 비휘발성 특성을 갖지 못했으며 Flash는 비휘발성과 집적도는 매우 우수하지만 속도는 매우 느리다. 따라서 기존의 메모리/스토리지 시스템은 불완전한 두 소자의 최적의 조합으로 이루어져서 이에 따른 비효율성은 어쩔 수 없는 숙명이라



[Fig. 1] The characteristics of conventional memory devices and development target of new memory devices.

고 할 수 있다. 만일 세 가지 특성을 다 가진 신 메모리를 개발한다면, 메모리/스토리지 시스템의 효율을 급격히 높일 수 있으며, 동시에 에너지 소모도 크게 줄일 수 있다. 신 메모리의 개발 목표는 이와 같은 모든 특성이 좋은 Universal 메모리를 목표로 개발을 추진하였다.

이와 같은 신메모리 개발을 위해서 수십 년간 많은 메모리 소자 연구 개발이 추진되었다. 그림 2에 나타난 것처럼 메모리의 연구 개발 단계는 개념 증명 단계(Proof of Concept), 단일 소자(Single Transistor) 단계, 어레이 단계(Array), 칩 제작(Chip Proof) 단계 그리고 마지막으로 생산의 5단계로 구분될 수 있다.

수 십년간 많은 신 메모리 후보가 연구되었지만, 실질적으로 사업화가 된 소자는 PRAM, MRAM과 FRAM 뿐



<저자 약력>

정홍식 박사는 연세대학교 물리학과에서 분광학 전공으로 물리학박사 학위를 취득하고 삼성전자 메모리 사업부에서 DRAM개발에 참여하다 2002년부터 MRAM, FRAM, PRAM 신 메모리 연구의 Project leader로서 연구 개발을 주도하였고, 이 공로로 2005년 대통령 표창을 수상하였으며 2006년부터 삼성전자 상무로서 PRAM 사업화를 주도하였다. 세계 최초로 휴대폰용 PRAM 사업화에 성공하였고 현재 연세대학교 연구 교수로 재직하면서 신 메모리향 시스템 연구를 추진 중임. 다수의 논문과 특허의 저자이며 많은 초청강연을 통해서 신 메모리 기술의 확대에 기여하고 있다. (jeonghs2@naver.com)

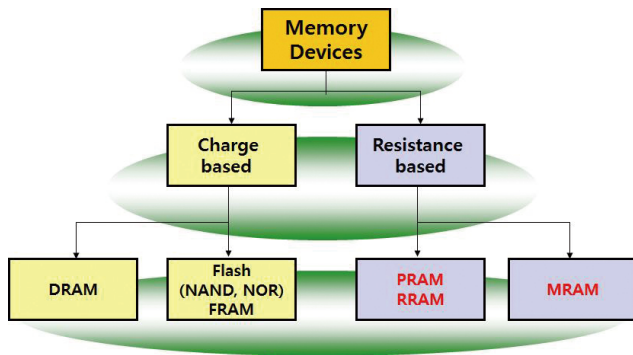


[Fig. 2] Development stages and new memory devices

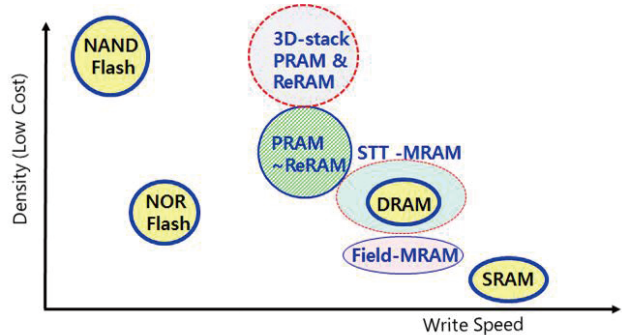
이고, 이중 MRAM과 FRAM은 고집적에 어려움이 있어서 Universal 메모리의 가능성에서는 탈락이 되고 새로운 기능을 갖는 틈새 시장에서 활용이 되고 있지만, 아직 사업화는 되지 않았지만, 가능성이 있는 칩 제작 수준에는 STT-MRAM과 RRAM이 있다. 다른 신 메모리 소자들은 아직 검증이 안 된 수준이라서 여기서는 PRAM, STT-MRAM과 RRAM에 대해서 연구 개발 현황과 그 전망에 대해서 집중적으로 논의하고자 한다.

메모리의 분류와 신 메모리의 특징

메모리는 크게 전하 기반(Charge Based)과 저항 기반(Resistance Based) 소자로 분류할 수 있고, 기존의 메모리들은 전하 기반의 소자들이고 신 메모리들은 공교롭게도 모두 저항 기반의 소자들이다. 전하 기반 소자의 대표인 Flash의 경우 Bit당 전하의 수가 20nm 이하 기술에서는 이미 100ea 이하여서 근원적인 비휘발성 특성 확보에 문제를 나타내고 있으며 반면에 저항 기반 소자들은 이보다 1,000~10,000배 정도 물질의 수가 많기 때문에 비휘발성에 대한 Shrinkability가 확실히 우세한 장점이 있다. 또 다른 특징은 기존의 메모리에서 개발된 읽기/쓰기



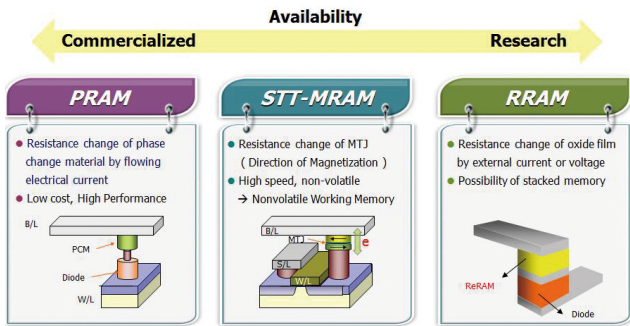
[Fig. 3] The classification of memory devices



[Fig. 4] The comparison of new memory devices

회로기술과 다른 방식의 고유의 읽기/쓰기 회로 기술이 필요하다. 그러나 저항 기반 소자들은 거의 유사한 읽기 방식을 사용할 수 있어서 동일한 회로를 활용할 수 있고 특히 PRAM과 RRAM은 공정과 회로 설계 부분을 90% 이상 동일한 기술로 구성이 되어 있어서 기술 공유가 가능하여 Cell 특성만 다른 같은 부류의 기술로 생각할 수 있다.

그림 4는 신 메모리 소자들과 기존 메모리의 특성을 비교한 것이다. 그림에서 보듯이 현재까지의 신메모리 기술로는 Universal 메모리가 될 수 있는 신메모리 기술은 아직 존재하지 않는다. PRAM과 RRAM은 3차원 구조와 Shrink 기술을 성공적으로 개발하면 NAND Flash와 집적도는 비슷하면서 쓰기 성능은 우수한 메모리 소자가 될 수 있으나, 여전히 DRAM에 비하면 쓰기 속도는 1/10 정도의 수준에 머무르고 있다. STT-MRAM의 경우 쓰기 속도는 DRAM과 비슷한 수준까지 가능하지만, 집적도는 NAND Flash대비 1/10~1/100 수준에 머물 것으로 판단된다. 따라서 현재까지의 신 메모리 기술을 검토해 보았을 때 Universal 메모리를 추구하기는 어렵고 성능은 NAND Flash보다 우수하나 집적도는 떨어지고, DRAM 보다는 성능이 부족하지만, 비휘발성의 장점을 가지고 있는 기술로 판단되어진다. 따라서 신 메모리 소자의 응용을 고려할 때 Universal 메모리로의 접근보다는 이들의 특성을 활용하여 시스템의 효율성을 증가시키고 에너지 소모를 감소할 수 있는 새로운 응용을 찾는 접근이 현실적인 대안으로 받아들여지고 있다. 최근 들어서는 시스템 연구자들이 DRAM의 휘발성 특성과 여전히 큰 DRAM과 NAND Flash의 성능 차이의 Gap으로 인한 Data 저장 시스템이 비효율성을 개선하기 위해서 SCM(Storage Class Memory) 또는 Persistence 메모리와 같은 새로운 Hierachy를 신 메모리를 활용하는 응용에 대해서 많은



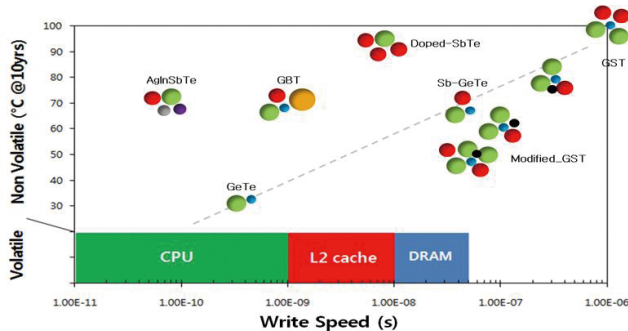
[Fig. 5] Operation principles and cell structures of new memory devices

연구를 하고 있으며 자세한 내용은 뒤 쪽에서 다시 언급하도록 하겠다.

신 메모리 소자의 기술 현황과 향후 과제

가. PRAM (Phase Change Random Access Memory)

그림 5에서 보듯이 PRAM은 6족 원소인 Chalcogenide 물질의 비정질과 결정질의 가역적 변화를 이용하여 비정질시 저항이 크고 결정질시 저항이 작은 성질을 이용하여 메모리 소자를 만드는 방법이다. PRAM은 STT-MRAM과 RRAM과는 달리 사업화에 성공한 소자로 현재 1Gb 집적도의 제품이 휴대폰에 사용되고 있다[1]. 이미 양산성이 검증된 기술이나 Write 속도는 약 1 us 수준으로 Flash 대비는 100배 빠르나, DRAM 보다는 10~20배 정도 느린 문제가 있다. 또한 현재 상용화 기술은 19 nm NAND Flash(TLC)대비 집적도가 1/10 이하에 머무는 수준이다. PRAM의 응용을 높이기 위해선 첫 번째 쓰기 속도를 더 빠르게 하는 방법과 두 번째로 집적도를 더 높이는 방법을 고려할 수 있다.



[Fig. 6] The relationship between write speed and materials in PRAM

쓰기 속도를 높이는 방법은 철저히 물질에 의존하기 때문에 쓰기 속도를 개선하기 위해선 새로운 물질을 발굴해야 한다[2].

그림 6에 물질과 쓰기 속도에 대한 관계가 표현되어 있다. 일반적으로 PRAM의 쓰기 속도는 비휘발성 성질과 Trade off 관계이다. 즉, 쓰기 속도를 개선하기 위해서 GeSbTe의 조성을 바꾸면 반대로 비휘발성은 감소하는 경향을 보이고 있다. 현재 물질 수준에서 평가한 결과로는 DRAM보다 빠른 쓰기 속도와 비휘발성을 갖는 물질들이 발굴되어 있으나, 아직 실제 제품에 적용되는 수준은 아니지만, 지속적 발굴을 통해서 이를 개선하는 노력으로 인해 많은 발전이 있는 상태이다.

두 번째인 집적도를 높이는 방법으로는 PRAM은 원리적으로는 7.5 nm 기술 까지도 Shrink가 가능성이 밝혀져서 집적도를 올리는 공정 기술을 확보하면 쉽게 고집적화가 가능하지만 큰 문제는 발열 현상으로 인한 Cell과 Cell 사이에 교란이 일어나는 문제이다[3]. 이를 개선하기 위한 구조 연구가 필요하고 더 나아가서는 지금 NAND Flash와 같은 방식으로 다치화 기술이나, 3D 집적화 기술의 발굴이 중요하다[4,5]. 이와 같은 양산 기술이 개발이 되면 NAND Flash의 집적도를 능가할 수 있는 고집적 소자개발이 가능할 것으로 예측이 된다.

나. STT-MRAM (Spin-Transfer-Torque Magnetoresistive Random Access Memory)

STT-MRAM은 기존 MRAM의 Shrink 한계를 극복하고 고집적화를 달성하기 위해서 Switching 방식에 변화를 준 기술이다. 이론적으로 Out of Plane 형식의 STT-MRAM은 8~20 nm까지 Shrink가 가능하다고 알려졌

Types	Conventional MRAM	STT-MRAM (In-plane)	STT-MRAM (Out-of plane)
Schematic View			
Features	MTJ size ↓ → Isw ↑	MTJ size ↓ → Isw ↓ MTJ aspect ratio > 2:1	MTJ size ↓ → Isw ↓ MTJ aspect ratio ~1:1
Cell size	> 22.5F2	6~12F2	4~12F2
Scalability	~ 90nm	20nm ~ 40nm	8~20nm @ Interface 5 ~ 10nm @ Bulk
Anisotropy	Shape K ₁ ~10 ⁴ erg/cc	Shape K ₁ ~10 ⁴ erg/cc	Interface: K ₁ ~5*10 ⁶ erg/cc Bulk: K ₁ ~10 ⁷ erg/cc

[Fig. 7] Different switching types of MRAM

다. 그림 7에 각 Switching 방식에 따른 특성 변화를 보여 주고 있다.

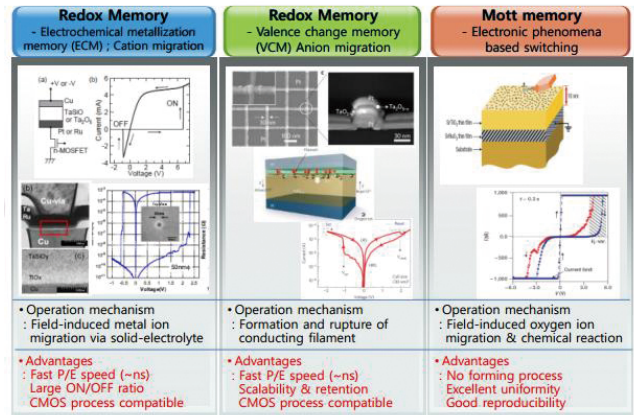
현재 상용화되고 있는 제품은 Everspin사의 8Mb의 Field Switching 방식의 메모리이다. 최근 64Mb STT-MRAM 개발 중에 있음이 알려져 있다. STT-MRAM은 쓰기 속도는 PRAM과 RRAM에 비해서 매우 우수하여 DRAM에 근접할 수 있는 기술로 알려져 있으나, 저항비가 낮아서 센싱 시그널이 작은 문제, 여전히 Switching 전류가 커서 Shrink에 어려운 문제 그리고 비휘발성 특성의 신뢰성이 부족한 문제로 인해서 본격적인 사업화 단계로 가지 못하고 있다.

이를 해결하기 위해서 많은 연구가 수행되고 있으며, 최근 들어서 Double MgO 방식의 새로운 Cell 구조 개발과 Voltage Control 할 수 있는 새로운 Cell 기술 개발 등을 통해서 문제를 극복하고자 노력하고 있다. 최근 들어서는 STT-MRAM의 Shrink 기술이 너무 많은 문제가 있어서 DRAM을 대체하기 보다는 먼저 개발하기 쉬운 CPU내 S3 Cache를 대체하여 에너지를 절감하는 방식의 개발 방향이 대두되고 있다[6].

다. RRAM (Resistive Random Access Memory)

RRAM은 저항차를 이용한 메모리 소자로서 PRAM도 일종의 RRAM의 분류에 들어갈 수 있다. 그러나 통상적으로 RRAM은 Metal 전극 사이에 Electro Chemical Metalization, Filament Formation 그리고 Mott 물질들이 전압 조건에 따라서 저항이 크고 작아짐의 차이를 읽는 메모리 소자이다. 그림 8과 같이 RRAM의 종류는 크게 3가지로 구분이 된다[7].

RRAM은 PRAM 대비 Switching 전류가 상대적으로 작아서 이를 구동하는 Transistor의 크기가 작아서 Shrink하기에 상대적으로 강점이 있어서 RRAM은 목표를 고집적화를 목표로 삼고 연구 개발을 추진하였다. 그러나 RRAM 소자의 문제는 Cell의 Switching 산포가 매우 커서 안정적인 Switching이 어렵다는 문제가 있다. 기본적으로 RRAM의 동작은 전극 사이에 Metallic Oxide의 부도체가 존재하여 저항이 큰 상태인데 외부에 전압을 걸어주면 Filament가 형성되어 전하가 Filament를 통해서 흐를 수 있는 전도체 즉, 저항이 작은 상태가 되는 메카니즘을 가지고 있다. 그러나 이 Filament 형성이 마치 번개를 치듯이 정해진 불특정한 path가 Random하게 발



[Fig. 8] Different types of RRAM and their characteristics [7]

생하여 Switching 산포가 큰 문제가 되는 것이 밝혀졌다. 이와 같은 근원적인 문제를 개선하기 위해서 구조를 피뢰침 같은 구조로 만들어서 항상 일정하게 Switching path가 발생하도록 하는 방법과 Switching 영역을 매우 작게 만들어서 불확실성을 감소시키는 방법이 연구되고 있다. 아직 생산을 할 만큼의 안정적인 Cell 동작을 확보하지는 못했지만, 지속적인 연구를 통해서 개선이 진행되고 있다. RRAM은 균일하고 반복성이 있는 Cell 특성을 확보하는 것이 무엇보다 시급한 기술적 문제이다.

RRAM의 고집적화를 위해서 PRAM과 달리 Cell을 선택하는 Transistor나 Bipolar Diode 없이 Cross Point 형태의 3D 구조를 제안하였다. 그러나 Cell간 누설 전류 (Leakage Current) 문제로 고집적화에 가능성이 크지 않다고 밝혀져서 최근 들어서는 PRAM과 같은 형태의 Bipolar 형태의 Diode를 사용하는 방법을 현실적인 대안으로 제시하여 새로운 3D Cell 어레이 구조를 연구 중에 있으며 이는 PRAM과 거의 비슷한 집적도를 갖는 수준으로 판단 된다.

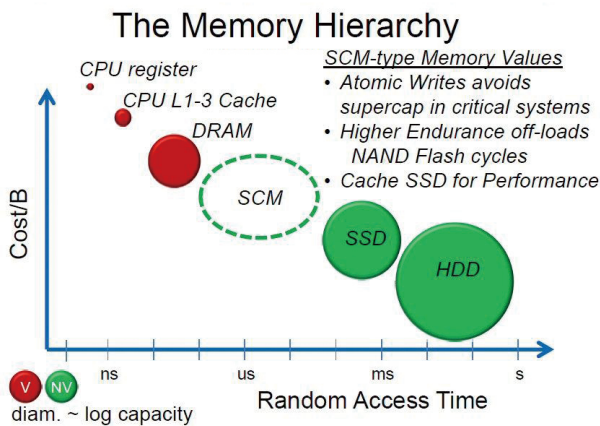
지금까지 PRAM, STT-MRAM, RRAM에 대한 현재의 연구 개발 현황과 향후 기술적 개발 방향에 대해서 논의 하였다. 어떤 제품도 Universal 메모리의 가능성보다는 그 고유의 특성을 활용하여 System 전체의 효율성과 에너지 소모를 최소화하는 방향에 활용되는 것이 바람직하다고 판단되고 있으며, 이를 위해서 소자 기술 개발 자체도 중요하지만 동시에 이들의 특성을 극대화해서 System 전체의 성능을 높이기 위한 응용 발굴 역시 매우 중요하다.

신 메모리를 위한 새로운 응용 연구 개발 (SCM: Storage Class Memory)

컴퓨팅 시스템을 고려할 때 Hierachy에서 DRAM 과 Flash Memory 사이에 가장 성능 차이의 갭이 크고 앞에서 논의된 것처럼 DRAM의 휘발성 특성으로 인한 System 전체의 비효율성의 발생으로 최근 들어서 DRAM과 NAND Flash 메모리 사이에 SCM이라는 새로운 단계를 삽입하는 새로운 Hierachy를 통해서 System 전체의 성능 개선과 에너지 소모를 개선하는 연구가 활발히 진행 중이다[8].

IBM은 90 nm급 PRAM을 SSD Cache로 결합하여 쓰기 속도를 최소 12배에서 최대 275배까지 성능을 대폭 개선한 새로운 System 개발 결과를 소개하였고[9] Storage System 업체인 HGST에서는 45 nm급 PRAM을 장착한 SSD 신제품을 발표하였다.

신 메모리들의 궁극적 목표인 Universal 메모리를 단 시간 내에 달성하는 것은 어렵다는 것이 지금까지 연구 결과이다. 따라서 신 메모리 연구 개발은 PRAM, STT-MRAM, RRAM의 Universal 메모리로서 미진한 특성을 지속적으로 개선하는 연구 개발 외에도 이와 같은 새로운 응용을 발굴하여 이를 활용하는 연구 개발을 병행하는 것이 바람직한 방향으로 판단된다. 즉, 신 메모리 소자들의 특성 개선과 더불어서 Storage System 연구자들과의 공동 연구를 통해서 신 메모리의 고유의 장점을 잘 활용하는 방식의 Hardware와 Software의 융합적인 연구가 매우 중요한 시점이라고 생각한다.



[Fig. 9] SCM will be embedded in the innovative memory-storage hierarchy [8]

맺음말

신 메모리 소자에 대한 연구 개발이 많은 연구가 되어 왔고 지금도 많은 새로운 개념이 연구되고 있다. 현재까지 메모리에서 가장 중요한 고집적화, 속도 그리고 비휘발성 특성을 만족할 가능성이 있는 신 메모리 소자는 PRAM, STT-MRAM, RRAM이 그 후보자이다. 그러나 이들이 Universal 메모리가 되기 위해선 아직 개선해야 할 특성과 기술적 장벽이 많이 있는 것으로 밝혀졌다. 앞으로 신 메모리 여능 개발은 여기서 논의된 각 메모리 소자들의 기술적 장벽을 뛰어넘는 기술을 지속적으로 개발하는 것과 함께 현재까지 개발된 기술을 활용하는 System 연구도 병행해서 추진이 되어서 메모리 시스템을 효율적이고 에너지 소모를 개선하는 데 충분히 기여할 수 있도록 하는 것이 중요한 연구 개발 방향이라고 생각한다. 다행히 최근 SCM 또는 Persistent 메모리라는 새로운 메모리 시스템의 연구가 활발히 되고 있어서 아주 작은 틈새시장에 머물러 있는 신 메모리 기술이 수 년 내 혁신적인 메모리 시스템에 적용된 제품이 사업화될 것으로 기대된다.

References

[1] Peter Clarke, "Micron ships phase-change memory for Nokia phones" EE Times, 2012.12.12.
 [2] Hongsik Jeong, NVMTS (2013).
 [3] S.B. Kim et al., IRPS, pp 99-103 (2010).
 [4] Kang D-H et al., VLSI Technology (2008).
 [5] M. Kinoshita et al., VLSI Technology (2012).
 [6] S.H. Kang, Non-volatile Memories Workshop (2010).
 [7] ITRS Roadmap (2011).
 [8] R. Fackenthal et al., ISSCC (2014).
 [9] R. Colin Johnson, "IBM Hawks PCM for Storage", EE Times, 2014.05.09.