



ทางออกที่สดใสกับเทคโนโลยีบันทึกข้อมูลทางเลือกใหม่เมื่อฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ถึงจุดอิ่มตัว

New Alternative Data Storage Technology When Hard Disk Drive Reach Saturation

สุภกร หาญสูงเนิน¹*

Supakorn Harnsoongnoen¹*

¹ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

*Correspondent author: supakorn.ha@gmail.com

บทคัดย่อ

ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์เป็นเทคโนโลยีบันทึกข้อมูลแบบไม่ลบเลือนที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในปัจจุบัน นอกจากนั้นยังพบว่าในช่วง 10 – 20 ปีที่ผ่านมา มีการนำเสนอเทคโนโลยีบันทึกข้อมูลแบบไม่ลบเลือนชนิดใหม่ขึ้นมาเป็นจำนวนมาก ซึ่งมีโครงสร้างและหลักการทำงานแตกต่างกันออกไป บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอบทวิเคราะห์เกี่ยวกับเทคโนโลยีบันทึกข้อมูลทางเลือกใหม่ที่มีศักยภาพเพียงพอจะนำไปพัฒนาเพื่อใช้ทดแทนฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ในปี พ.ศ. 2563 ซึ่งมีจำนวน 10 ชนิดประกอบด้วย หน่วยความจำแบบเฟอร์โรอิเล็กทริก หน่วยความจำแบบเปลี่ยนเฟส หน่วยความจำแบบความต้านทาน หน่วยความจำแบบแม่เหล็ก หน่วยความจำแบบสปินทรานเฟอร์ทอริก หน่วยความจำแบบท่อนาโนคาร์บอน หน่วยความจำแบบโพรบ หน่วยความจำแบบโฮโลกราฟี หน่วยความจำแบบตัวนำบริดจ์ทองแดง และหน่วยความจำแบบเรซแทรค โดยแบ่งเกณฑ์การวิเคราะห์และเปรียบเทียบออกเป็น 2 เกณฑ์ คือ 1) การเปรียบเทียบโดยใช้ศักยภาพในการเพิ่มความหนาแน่นของการจัดเก็บข้อมูล และ 2) การเปรียบเทียบโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ประสิทธิภาพซึ่งประกอบด้วย ความเร็วในการเข้าถึงข้อมูล ความสามารถในการประหยัดพลังงาน ความสามารถในการเขียนซ้ำและระยะเวลาในการจัดเก็บข้อมูล จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า การเพิ่มความหนาแน่นของหน่วยความจำ คือความท้าทายที่สำคัญที่สุดสำหรับเทคโนโลยีบันทึกข้อมูลทางเลือกใหม่ทั้ง 10 ชนิดในการแข่งขันกับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ จากการศึกษาเปรียบเทียบศักยภาพของเทคโนโลยีบันทึกข้อมูลทางเลือกใหม่พบว่า หน่วยความจำแบบเปลี่ยนเฟส และหน่วยความจำแบบสปินทรานเฟอร์ทอริก เป็นสองเทคโนโลยีที่มีคุณสมบัติและศักยภาพเป็นไปตามเกณฑ์มากที่สุดในการพัฒนาเพื่อใช้ทดแทนฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

Abstract

A Hard disk drive (HDD) is the currently dominant for the non-volatile memory technology. Besides, it was also found that in the last 10-20 years, there have been numerous emerging nonvolatile memory technologies proposed, the structure and operating principle different from than that. This paper provides and analyzer to new alternative data storage technology which has potential enough to be developed to displace the hard disk drive in the year 2020. The ten alternative data storage technologies are to propose consists of Ferroelectric Memory, Phase Change Memory, Resistive Memory, Magnetic Memory, Spin Transfer Torque Memory, Carbon Nanotube Memory, Probe Memory,

Holographic Memory, Copper Bridge Memory and Racetrack Memory. The analysis is divided into two criteria: 1) comparison of the potential to increase the density of data storage and 2) comparison of the performance parameters, which include access time, power efficiency, endurance and retention time. A major conclusion of the study was that to compete with hard drives on a cost per terabyte basis will be challenging for alternative data storage technologies, Phase change random access memory (PCRAM) and spin transfer torque random access memory (STTRAM) appear to meet these criteria.

คำสำคัญ: เทคโนโลยีบันทึกข้อมูลทางเลือกใหม่ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ หน่วยความจำแบบเปลี่ยนเฟส หน่วยความจำแบบสปินทรานเฟอร์ทอร์ค

Keywords: Alternative Data Storage Technology, Hard Disk Drive, Phase Change Memory, Spin Transfer Torque

1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นฐานการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ใหญ่ที่สุดของโลก (1) มีมูลค่าการส่งออกมากกว่า 5 แสนล้านบาทต่อปี สร้างงานให้กับคนไทยไม่น้อยกว่า 100,000 อัตรา (2) นอกจากนี้อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ยังช่วยสนับสนุนด้านการศึกษาและการวิจัยของไทยผ่านช่องทางการให้ทุนการศึกษาและทุนวิจัยแก่นิสิตนักศึกษาและบุคลากรทางการศึกษา จะเห็นได้ว่าอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีความเกี่ยวข้องกับประเทศไทยในหลายมิติ ทั้งด้านเศรษฐกิจ การศึกษา สังคม และอื่นๆ อย่างไรก็ตาม เมื่อได้ขึ้นชื่อว่า “เทคโนโลยี” ย่อมต้องมีการพัฒนาและเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นเทคโนโลยีอีกชนิดหนึ่งที่ทำหน้าที่ในการบันทึกข้อมูลซึ่งไม่เคยหยุดนิ่งในเรื่องของการพัฒนาคุณภาพ ในบทความนี้ผู้เขียนจะพยากรณ์ไปถึงปี พ.ศ. 2563 โดยเน้นวิเคราะห์ถึงศักยภาพของเทคโนโลยีบันทึกข้อมูลทางเลือกใหม่ต่างๆ และทำการเปรียบเทียบกับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ถึงความเป็นไปได้ในการนำมาทดแทนซึ่งกันและกัน แม้ว่าในปัจจุบันฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะยังไม่ถึงจุดอิ่มตัว แต่ก็คงต้องเผชิญกับปัญหาดังกล่าวนี้อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ เนื่องจากข้อจำกัดต่างๆ เช่น ผลจากไฟฟ้าสถิต (ESD) (3) และสัญญาณรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) (4) ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิต เป็นต้น

The Information Storage Industry Consortium (INSIC) เป็นองค์กรที่ได้รับการสนับสนุนจากอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ มีเป้าหมายที่จะเพิ่มความหนาแน่นของ

หน่วยความจำให้ไปถึง 10 เทราบิตต่อตารางนิ้ว ในปี พ.ศ. 2558 (5) และสามารถที่จะเพิ่มความจุให้กับแผ่นแม่เหล็กของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 2.5 นิ้ว ที่หนึ่งแผ่นให้มีความจุได้มากกว่า 7 เทราบิตต่อตารางนิ้วทำให้ราคาของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์สามารถลดลงมาอยู่ที่ 3 ดอลลาร์ต่อเทราไบต์ ปัจจุบันอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อปีของอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีค่าอยู่ประมาณ 40% หากยังคงสามารถรักษาอัตราการเจริญเติบโตที่ตัวเลขนี้ไว้ได้อย่างต่อเนื่องในปี พ.ศ. 2563 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ควรที่จะมีความหนาแน่นเป็นไปตามเป้าหมายที่ตั้งเอาไว้ข้างต้น

ในทางตรงกันข้าม เมื่อพิจารณาหน่วยความจำแฟลช (Flash memory) ซึ่งเป็นหน่วยความจำที่มีความสำคัญมากสำหรับตลาดหน่วยบันทึกข้อมูลแบบไม่ลบเลือน (Nonvolatile memory) และปัจจุบันได้ถูกปรับให้เข้าไปอยู่ในตลาดหน่วยบันทึกข้อมูลของคอมพิวเตอร์ในรูปของโซลิตสเตทไดรฟ์ (SSDs) หน่วยความจำแฟลชมีจุดเด่นที่น่าสนใจหลายอย่าง เช่น ใช้พลังงานต่ำ เข้าถึงข้อมูลเร็ว สามารถเขียนซ้ำได้หลายรอบ และมีความทนทานต่อแรงกระแทกมากกว่าฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ อย่างไรก็ตาม ราคาของหน่วยความจำแฟลชต่อกิกะไบต์ยังคงแพงกว่าฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ประมาณสิบเท่า นอกจากนี้หน่วยความจำแฟลชยังประสบกับปัญหาและอุปสรรคในการเพิ่มความหนาแน่นของเซลล์ เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านลิโทกราฟี (Lithography) และคุณสมบัติทางกายภาพของโครงสร้างที่ไม่สามารถลดขนาดของเซลล์ให้เล็กลงไปได้มากกว่า 22 นาโนเมตรของเทคโนโลยีโหนด ทั้งนี้เพราะบริเวณขั้วเกตลอย (Floating gate) จะได้รับผลกระทบอย่างรุนแรง

เมื่อลดขนาดให้เล็กลงไปมากกว่านี้จะส่งผลให้ค่า Coupling ratio ต่ำหรือเกิดการรั่วไหลของกระแสบริเวณขั้วเกตลอยสูง ทำให้การสะสมประจุบริเวณขั้วเกตลอยมีค่าต่ำหรือไม่สามารถสะสมได้เลย ดังนั้นการที่หน่วยความจำแบบไม่ลบเลือนทางเลือกใหม่จะสามารถมาแทนที่หน่วยความจำแฟลช หรือฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้นั้น ปัจจัยแรกที่ต้องพิจารณาคือการเอาชนะข้อบกพร่องของหน่วยความจำแฟลช หรือการเพิ่มความหนาแน่นของเซลล์ให้มากกว่าหน่วยความจำแฟลช ปัจจัยที่สองต้องมีราคาต่อเทราไบต์ที่ไม่ต่างกับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มากจนเกินไป ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ยากและท้าทายสำหรับเทคโนโลยีหน่วยความจำแบบไม่ลบเลือนทางเลือกใหม่

2. เทคโนโลยีหน่วยความจำแบบไม่ลบเลือนทางเลือกใหม่

ศักยภาพในด้านต่างๆ ของเทคโนโลยีหน่วยความจำแบบไม่ลบเลือนทางเลือกใหม่ เช่น ความหนาแน่นของเซลล์ ประสิทธิภาพการทำงาน และความเป็นไปได้ในการสร้างได้จริงในปี พ.ศ. 2563 ได้แสดงในตารางที่ 1 โดยได้รวมข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ดีแรม (DRAM) และ 낸ดแฟลช (NAND Flash) เข้าไปในตารางนี้ด้วย ข้อมูลต่างๆ ที่อยู่ในตารางที่ 1 ได้รวบรวมโดย Kryder และ Chang (6-7) และในที่นี้ได้ทำการปรับปรุงข้อมูลให้เป็นปัจจุบันมากขึ้น โดยตรวจสอบจากการประชุมทางด้านเทคโนโลยี

สารกึ่งตัวนำในส่วนของ ERD ในปี พ.ศ. 2552-2554 ของ ITRS (8-10) ในเบื้องต้นสามารถแบ่งหน่วยความจำทางเลือกใหม่ออกเป็น 2 กลุ่ม คือ 1) กลุ่มที่มีการสร้างเป็นผลิตภัณฑ์แล้ว (FeRAM, PCRAM, RRAM และ MRAM) และ 2) กลุ่มที่กำลังอยู่ในช่วงของการวิจัยและตรวจสอบแนวคิด (STTRAM, NRAM, CBRAM, Racetrack, Holographic และ Probe)

2.1 หน่วยความจำกลุ่มที่ 1: กลุ่มที่มีการสร้างเป็นผลิตภัณฑ์แล้ว

2.1.1 หน่วยความจำแบบเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric Memory)

หน่วยความจำแบบเฟอร์โรอิเล็กทริก หรือเฟอร์โรอิเล็กทริกแรม (Ferroelectric RAM: FeRAM หรือ FRAM) เป็นหน่วยความจำที่อาศัยการสวิตช์ของเฟอร์โรอิเล็กทริกโพลาริแซชันของวัสดุที่มีโครงสร้างแบบ Perovskite เช่น $Pb(Zr_x Ti_{1-x}) O_3$ (PZT) และ $SrBi_2 Ta_2 O_9$ (SBT) เป็นพื้นฐานในการสร้าง โครงสร้างของ FeRAM มีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างของ DRAM ที่ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์แบบมอสเฟส (MOSFET) เชื่อมต่อกับตัวเก็บประจุแบบเฟอร์โรอิเล็กทริกอย่างละหนึ่งตัวหรือที่เรียกกันโดยทั่วๆ ไปว่าหนึ่งทีหนึ่งซี (1T1C) ดังแสดงในรูปที่ 1(ก) การเชื่อมต่อในลักษณะดังกล่าวนี้มีข้อจำกัดหลายอย่าง เช่น ไม่สามารถลดขนาดของเซลล์ให้ต่ำกว่า $8F^2$ ตารางเมตรได้ ความเร็วในการควบคุมผ่านเส้นสัญญาณเพลท (Plateline) มีค่าต่ำและสัญญาณที่วัดได้จาก

ตารางที่ 1 ศักยภาพในด้านต่างๆ ของเทคโนโลยีหน่วยความจำทางเลือกใหม่ (6-10)

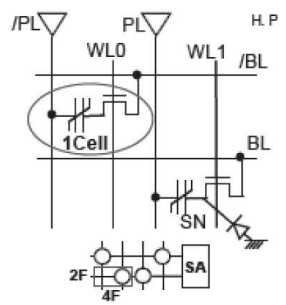
Device Type	HDD	DRAM	NAND Flash	FeRAM	PCRAM	RRAM	MRAM	STTRAM
Maturity	Product	Product	Product	Product	Product	Research	Product	Prototype
Cell Element	NA	1T1C	1T	1T1C	1T(D)1R	1T1R	1T1R	1(2)T1R
Present Density	400Gb/in ²	8Gb/chip	64Mb/chip	128Mb/chip	512Mb/chip	64Kb/chip	32Mb/chip	2Mb/chip
Cell Area	(2/3)F ²	6F ²	4F ²	6F ²	4F ²	6F ²	20F ²	4F ²
MLC Capability	No	No	4bits/cell	No	4bits/cell	2bits/cell	2bits/cell	4bits/cell
Program Energy/bit	NA	2pJ	10pJ	0.03pJ	6pJ	2pJ	120pJ	2.5pJ
Access Time(W/R)	9.5/8.5ms	10/10ms	200/25us	50/75ns	100/12ns	10/20ns	12/12ns	35/35ns
Endurance/Retention	NA	10 ¹⁶ /64ms	10 ⁵ /10yr	10 ¹⁵ /10yr	10 ⁹ / ^{>} 10yr	10 ⁶ /10yr	10 ¹⁶ / ^{>} 10yr	10 ¹⁶ / ^{>} 10yr
Device Type	NRAM	CBRAM	Racetrack	Holographic	Probe			
Maturity	Prototype	Prototype	Research	Product	Prototype			
Cell Element	1T1W	1R	NA	NA	NA			
Present Density	NA	2Mb/chip	NA	515Gb/in ²	1Tb/in ²			
Cell Area	5F ²	6F ²	NA	NA	NA			
MLC Capability	No	2bits/cell	12bits/cell	NA	NA			
Program Energy/bit	10pJ	2pJ	2pJ	NA	100pJ			
Access Time(W/R)	10/10ns	50/50ns	10/10ns	3.1/5.4ms	10/10us			
Endurance/Retention	10 ¹⁶ /10yr	10 ⁶ /months	10 ¹⁶ /10yr	10 ⁵ /50yr	10 ⁵ /NA			

เซลล์มีขนาดเล็ก จากข้อจำกัดดังกล่าวส่งผลให้มีการพัฒนาสถาปัตยกรรมของ FeRAM ขึ้นมาใหม่ โดยมีการเชื่อมต่อกันเป็นโครงข่ายสายโซ่ (Chain capacitor) ดังแสดงในรูปที่ 1(ข) การเชื่อมต่อในลักษณะดังกล่าวนี้จะมีการใช้ประจุร่วมกันระหว่างตัวเก็บประจุข้างเคียง นอกจากนั้นยังสามารถช่วยลดพื้นที่ของเซลล์ให้มีขนาดเล็กลง ($4F^2$ ตารางเมตร) มีความเร็วในการควบคุมผ่านเส้นสัญญาณพลทสูงขึ้น และเซลล์หน่วยความจำสามารถให้สัญญาณที่มีขนาดใหญ่ขึ้น อย่างไรก็ตาม FeRAM ยังไม่สามารถทำการเก็บข้อมูลให้ได้หลายบิตในหนึ่งเซลล์ บริษัท Ramtron International Corp. ได้ผลิต FeRAM เป็นผลสำเร็จเป็นบริษัทแรกในปี พ.ศ. 2536 (11) โดยสามารถผลิตได้ที่ขนาดความจุ 1 เมกะบิต, 2 เมกะบิต และ 4 เมกะบิต และในปี พ.ศ. 2552 บริษัท Toshiba ได้แสดงให้เห็นว่าสามารถสร้าง FeRAM ด้วยโครงข่ายสายโซ่ ความจุ 128 เมกะบิต ภายในพื้นที่ 0.252 ตารางไมโครเมตร จากกระบวนการผลิตที่เทคโนโลยี 130 นาโนเมตร ได้ (12)

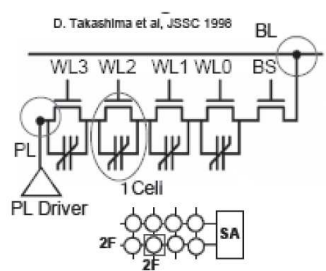
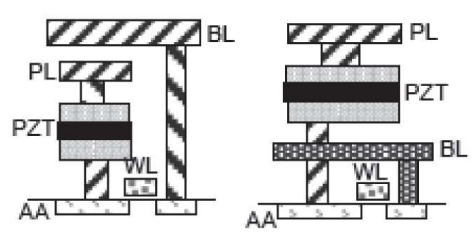
2.1.2 หน่วยความจำแบบเปลี่ยนเฟส (Phase Change Memory)

หน่วยความจำแบบเปลี่ยนเฟส หรือที่รู้จักกันอีกชื่อหนึ่งว่า พีซีแรม (Phase Change RAM: PCRAM) เป็นเทคโนโลยีที่อาศัยการเปลี่ยนเฟสกลับไป-มาระหว่างสถานะอสัณฐานและสถานะผลึกของวัสดุในกลุ่ม

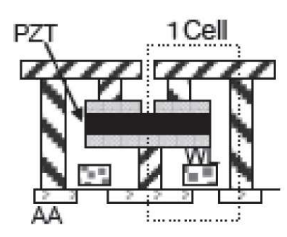
ชาโคจีไนต์ ($Ge_2Sb_2Te_5$ (GST)) โดยแต่ละสถานะจะมีความต้านทานแตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) ส่วนรูปที่ 2 (ข) แสดง โครงสร้างเซลล์ของหน่วยความจำแบบเปลี่ยนเฟส ซึ่งประกอบด้วยชั้นสารเปลี่ยนเฟส ชั้นสารสร้างความร้อน (Heater) และชั้นอิเล็กโทรด ซึ่งประกบด้านบนและด้านล่างสุดของเซลล์ ในการเปลี่ยนสถานะกลับไป-มาระหว่างสถานะอสัณฐาน (ความต้านทานสูง) และสถานะผลึก (ความต้านทานต่ำ) นั้น อาศัยการจ่ายกระแสผ่านตัวเซลล์ของหน่วยความจำ กระแสที่ไหลผ่านเซลล์ทำให้ชั้นสารสร้างความร้อน เกิดความร้อนขึ้น และแผ่กระจายความร้อนไปยังชั้นสารเปลี่ยนเฟสซึ่งอยู่ติดกัน เมื่อชั้นสารเปลี่ยนเฟสได้รับพลังงานและมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลว จากนั้นหยุดการจ่ายกระแสให้กับเซลล์ เพื่อให้เซลล์เกิดการเย็นตัวอย่างฉับพลัน เมื่อตรวจสอบชั้นสารเปลี่ยนเฟสพบว่าวัสดุเปลี่ยนเฟสมีสถานะเป็นอสัณฐาน และเมื่อต้องการเปลี่ยนจากสถานะอสัณฐานไปเป็นสถานะผลึกสามารถทำได้ในลักษณะเดียวกัน แต่ความร้อนที่ให้กับชั้นสารเปลี่ยนเฟสนั้นต้องมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนเฟส และไม่เกินอุณหภูมิหลอมเหลว เมื่อทำการควบคุมการให้พลังงานแก่เซลล์ได้ในลักษณะดังกล่าวก็สามารถเปลี่ยนสถานะของ PCRAM ให้มีค่าความต้านทานสูงและต่ำสลับกันไปมาได้ (14-17) โมเดลต้นแบบของ PCRAM ได้ถูกสร้างและทดสอบเป็นที่เรียบร้อยแล้ว พบว่ามีช่วง



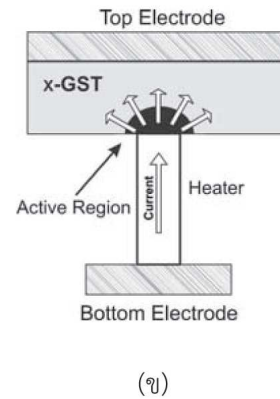
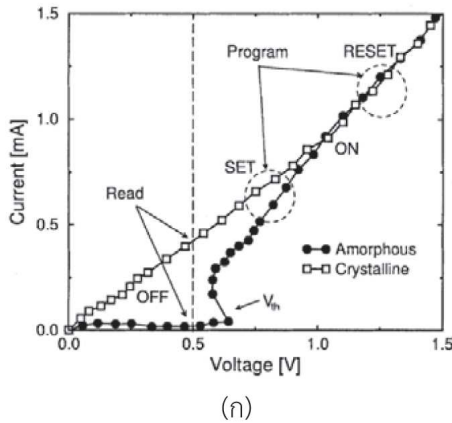
(ก)



(ข)



รูปที่ 1 โครงสร้างและสถาปัตยกรรมของ FeRAM (ก) โครงสร้างแบบ 1T1C (ข) โครงสร้างแบบสายโซ่ (13)

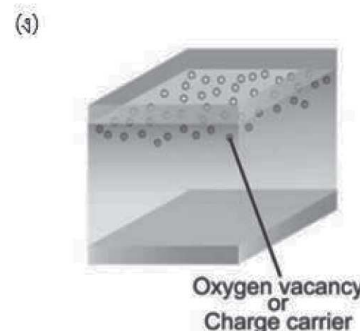
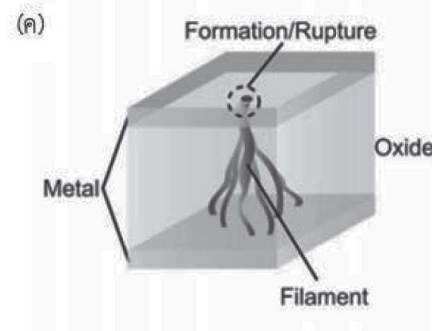
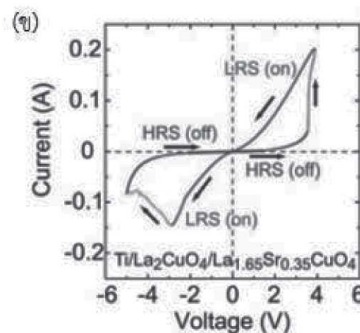
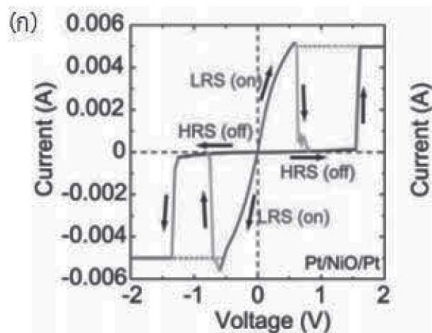


รูปที่ 2 หน่วยความจำแบบเปลี่ยนเฟส (ก) โครงสร้างเซลล์ (ข) คุณลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน (20)

ความแตกต่างระหว่างความต้านทานทั้งสองสถานะกว้างมาก และสามารถจัดเก็บข้อมูลได้หลายบิตในหนึ่งเซลล์ ในปี พ.ศ. 2550 บริษัท Samsung ได้ทำการสร้างชิป PCRAM แบบ SLC ความจุ 512 เมกะบิต ที่ขนาดของเซลล์ 0.047 ตารางไมโครเมตร (5.8F² ตารางเมตร) ด้วยเทคโนโลยีกระบวนการผลิต 90 นาโนเมตร ได้เป็นผลสำเร็จ (18) ต่อมาในเดือนตุลาคม พ.ศ. 2551 บริษัท Nymonyx และ Intel-ST Microelectronics ได้เข้าร่วมพัฒนาและผลิต PCRAM ในเชิงการค้าเป็นครั้งแรก โดยเริ่มทำการผลิตที่ความจุ 128 เมกะบิต แบบ MLC (2 บิต) ด้วยเทคโนโลยีกระบวนการผลิตที่ 90 นาโนเมตร (19)

2.1.3 หน่วยความจำแบบความต้านทาน (Resistive Memory)

หน่วยความจำแบบความต้านทาน หรือ อาร์เรม (Resistive RAM: RRAM) เป็นหน่วยความจำที่มีโครงสร้างคล้ายกับตัวเก็บประจุ สามารถเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานกลับไป-มาได้ ดังแสดงในรูปที่ 3 การสวิตช์กลับไป-มาของ RRAM นั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ การสวิตช์แบบยูนิโพลาร์ (Unipolar) ที่ควบคุมโดยใช้ขนาดของแรงดัน (Amplitude of voltage) และการสวิตช์แบบไบโพลาร์ที่ควบคุมโดยใช้โพลาริตีของแรงดัน (Polarity of voltage) มีการนำเสนอโมเดลของ RRAM ในรูปแบบต่างๆ



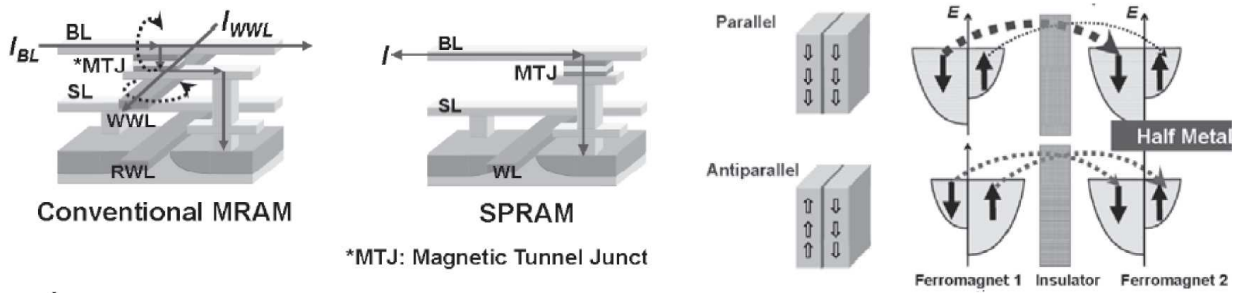
รูปที่ 3 รูปแบบการสวิตช์และโมเดลการทำงานของ RRAM (ก) การสวิตช์แบบยูนิโพลาร์ (ข) การสวิตช์แบบไบโพลาร์ (ค) โมเดลแบบ Filamentary conducting path (ง) โมเดลแบบ interface-type conducting path (21)

เช่น โมเดล Metallic Filament โมเดล Electron-Trapping/ Defect โมเดล Crystalline-to-Amorphous Phase Transition โมเดล Ferroelectric PbZrTiO_3 โมเดล Ferromagnetic $\text{Pr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ (PCMO) และ โมเดล Metal Oxide (Cu_xO , NiO , TiO_x , ZrO_x และ HfO_x) ซึ่งได้ทำการทดสอบเป็นที่เรียบร้อยแล้ว (21) RRAM มีขนาดของเซลล์ประมาณ 6F^2 ตารางเมตร สามารถจัดเก็บข้อมูลได้หลายบิตในหนึ่งเซลล์ ในปี พ.ศ. 2548 บริษัท Spansion ได้ทำการทดสอบ และแสดงให้เห็นว่า RRAM สามารถสร้างได้โดยใช้โครงสร้างแบบ $\text{Cu}_x\text{O}/\text{MIM}$ ภายใต้เทคโนโลยีกระบวนการผลิต 0.18 ไมโครเมตร โดยมีความจุ 64 กิโลบิต (22)

2.1.4 หน่วยความจำแบบแม่เหล็ก (Magnetic Memory)

หน่วยความจำแบบแม่เหล็ก หรือ เอ็มแรม (Magnetic RAM: MRAM) เป็นหน่วยความจำที่อาศัยการจัดเรียงตัวของแมกเนไตรเซชันของชั้นอิสระ (Free layer) ซึ่งเป็นหนึ่งในสองของชั้นสารความต้านทานทางแม่เหล็ก (Magnetic - Resistive) ที่สามารถเปลี่ยนทิศทางของแมกเนไตรเซชันได้ ทิศทางของแมกเนไตรเซชันที่เกิดขึ้นภายในชั้นสารทั้งสองดังกล่าวนี้ทำให้ MRAM มีความต้านทานรวมแตกต่างกัน เมื่อชั้นสารทั้งสองมีทิศของแมกเนไตรเซชันขนานกันทำให้ค่าความต้านทานรวมของ MRAM มีค่าต่ำ และในทางตรงกันข้าม เมื่อมีทิศสวนทางกันค่าความต้านทานรวมของ MRAM มีค่าสูง ความแตกต่างของความต้านทานที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ถูกใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลในการจัดเก็บโครงสร้าง และลักษณะการจัดเรียงตัวของแมกเนไตรเซชันในชั้นอิสระ และชั้นฟิกซ์ (Fix layer) ของ MRAM แสดงในรูปที่ 4 MRAM สามารถทำให้เกิดขึ้นได้จากปรากฏการณ์ทางกายภาพ 3 ปรากฏการณ์ คือ 1) แอนไอโซโทรปิกแมกเนติกเรซิสทีฟ (Anisotropic Magnetic Resistive : AMR) 2) ไจแอนท์แมกเนติกเรซิสทีฟ (Giant Magnetic Resistive : GMR) และ 3) ทันเนลลิงแมกเนติกเรซิสทีฟ (Tunneling Magnetic Resistive : TMR) โครงสร้างของ AMR และ GMR ถูกสร้างขึ้นจากโลหะทั้งหมด เมื่อพิจารณาความต้าน

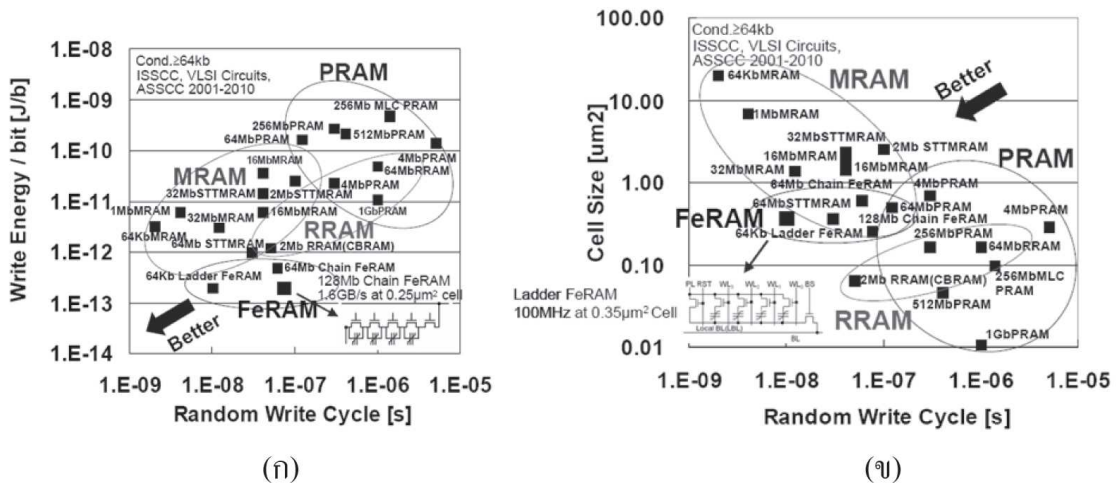
ทานที่เกิดขึ้นระหว่างสองสถานะพบว่ามีความแตกต่างกันไม่มาก จึงไม่เหมาะสำหรับนำมาพัฒนาเป็นหน่วยความจำที่มีความจุหรือความหนาแน่นสูงๆ ในขณะที่โครงสร้างแบบ TMR ซึ่งสร้างจากแมกเนติกทันเนลจังก์ชัน (Magnetic Tunnel Junction: MTJ) หรือรอยต่อแบบอุโมงค์ทะลุผ่านทางแม่เหล็ก ประกอบด้วยชั้นสารแบบเฟอร์โรแมกเนติก 2 ชั้น วางตัวขนานกันและถูกคั่นด้วยฉนวนที่มีความหนาในระดับนาโนเมตร ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวนี้สามารถทำให้ความต้านทานของทั้งสองสถานะมีความแตกต่างกันมากถึง 220% (23) TMR หนึ่งเซลล์ใช้พื้นที่ประมาณ 20F^2 ตารางเมตร และไม่สามารถทำการจัดเก็บข้อมูลได้หลายบิตภายในหนึ่งเซลล์ ในปี พ.ศ. 2549 บริษัท Freescale ได้เริ่มต้นสร้างชิป MRAM ที่มีความจุ 4 เมกะบิต โดยใช้ Mg-O เป็นชั้นฉนวนในโครงสร้างของ TMR (24) ต่อมาในปี พ.ศ. 2552 บริษัท NEC ได้แสดงให้เห็นว่าสามารถสร้าง MRAM ที่มีความจุ 32 เมกะบิต ซึ่งใช้เวลาในการอ่านข้อมูลเพียง 12 นาโนวินาที โดยโครงสร้างหนึ่งบิตของเซลล์ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์แบบมอสเฟส 2 ตัว และ MTJ หนึ่งตัว (25) เทคโนโลยีหน่วยความจำทางเลือกใหม่ทั้ง 4 ชนิดดังกล่าวข้างต้นนี้ จัดอยู่ในกลุ่มที่มีการสร้างเป็นผลิตภัณฑ์ได้แล้ว และเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการคาดหมายว่าสามารถเข้ามาแทนที่เทคโนโลยีแฟลชซึ่งกำลังจะถึงจุดอัมตวิญญูณของวงจร โครงสร้าง และรูปแบบการจัดเก็บข้อมูลของเทคโนโลยีทั้ง 4 ชนิด สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5 มีข้อสังเกตคือ หน่วยความจำ PCRAM, RRAM และ MRAM อาศัยคุณสมบัติในการเปลี่ยนค่าความต้านทานเป็นหลักในการจัดเก็บข้อมูล ในขณะที่หน่วยความจำแบบ FeRAM จัดเก็บข้อมูลโดยอาศัยคุณสมบัติในการเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าเป็นหลักในการจัดเก็บ เมื่อพิจารณาเวลาในการเขียนต่อรอบกับพลังงานที่ใช้ในการเขียนต่อบิต ดังแสดงในรูปที่ 6(ก) พบว่าหน่วยความจำแบบ FeRAM ใช้พลังงานในการเขียนต่อบิตต่ำที่สุด ในขณะที่หน่วยความจำแบบ PCRAM จะมีขนาดของเซลล์เล็กที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 6(ข)



รูปที่ 4 โครงสร้างและลักษณะการจัดเรียงตัวของแมกเนไทรเซนในชั้นอิสระ และชั้นฟิกซ์ของ MRAM

Type of Memory	Circuit Diagram	Characteristics	Structure & Material
Phase Change Memory (PRAM)		 R "1" "0" I	c-GST a-GST Ge ₂ Sb ₂ Te ₅ (GST) Heater
Resistive RAM (RRAM)		 R "1" "0" I	NiO, WO _x , HfO ₂ , ZnO ₂ , TiO ₂ , PrCaMnO, Ag-GeSe, Cu-GeSe, TaO _x , FeO, GeO, STO, CuSiO
Magnetoresistive RAM (MRAM)		 R "1" "0" I	Cap CoFeB MgO CoFeB/Ru/CoFeB PtMn
Ferroelectric RAM (FeRAM)		 P(Q) "1" "0" V Q=High, Low	IrO ₂ , SrRuO ₃ , PbZr _x Ti _{1-x} O ₃ (PZT), Ir

รูปที่ 5 เทคโนโลยีหน่วยความจำทางเลือกใหม่ทั้ง 4 ชนิด (PCRAM, RRAM, MRAM และ FeRAM) (26)



รูปที่ 6 เวลาในการเขียนต่อรอบกับ (ก) พลังงานที่ใช้ในการเขียนต่อบิต (ข) ขนาดของเซลล์ (26)

2.2 กลุ่มที่กำลังอยู่ในช่วงของการวิจัยและตรวจสอบแนวคิด

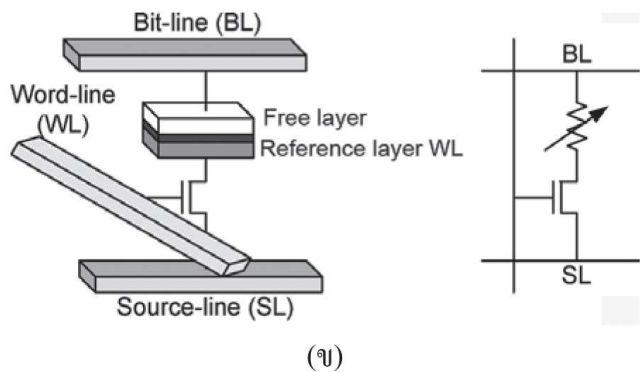
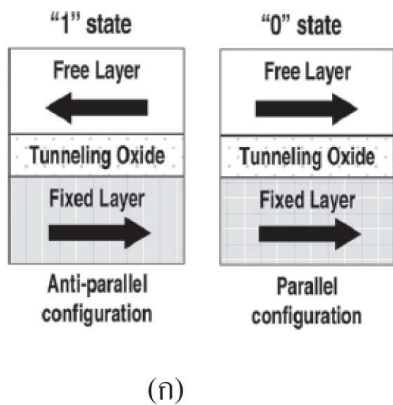
2.2.1 หน่วยความจำแบบสปินทรานเฟอร์ทอร์ก (Spin Transfer Torque Memory)

หน่วยความจำแบบสปินทรานเฟอร์ทอร์ก หรือ สปินทรานเฟอร์ทอร์กแรม (Spin Transfer Torque RAM: STTRAM) หน่วยความจำนี้ถูกสร้างและพัฒนาขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาของ MRAM ซึ่งใช้กระแสในการเขียนข้อมูลสูง และมีขนาดพื้นที่ของเซลล์ที่ใหญ่ โครงสร้างของ STTRAM ประกอบด้วย MTJ ที่มีชั้นสารแบบเฟอร์โรแมกเนติก 2 ชั้น วางตัวขนานกันและถูกคั่นด้วย Mg-O ที่มีความหนาน้อยกว่า 1 นาโนเมตร การควบคุมสถานะของ MTJ จากสถานะแอนติพาราเรล (Antiparallel “1”) สลับเป็นสถานะพาราเรล (Parallel “0”) หรือในทางย้อนกลับสามารถกระทำได้โดยการป้อนกระแสเล็กทรอนิกส์จากชั้นสารด้านบนของ MTJ ไปยังชั้นสารด้านล่าง หรือจากด้านล่างไปยังด้านบนดังแสดงในรูปที่ 7 (ก) โพลาริเซชันของกระแสอิเล็กทรอนิกส์ที่เคลื่อนที่ผ่านชั้นอิสระทำให้เกิดการเปลี่ยนโมเมนต์เชิงมุมและสปินของชั้นอิสระ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้ทำให้ชั้นอิสระสามารถสวิตช์และเปลี่ยนทิศทางของแมกเนไตรเซชันได้สำหรับกระบวนการในการอ่านข้อมูลของ STTRAM นั้นใช้พื้นฐานเดียวกันกับ MRAM ในขณะที่กระบวนการในการเขียนอาศัยโพลาริเซชันอิเล็กตรอนสปิน (Polarized electron spins) ทั้งนี้โพลาริเซชันอิเล็กตรอนสปินของกระแสไฟฟ้าสร้างสนามให้สามารถทำการเขียนได้แสดงให้เห็นว่า STTRAM ไม่จำเป็นต้องใช้สายตัวนำพาดผ่านเซลล์เพื่อสร้างสนามสำหรับการเขียนเหมือนดังเช่น

MRAM ซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 7 (ข) ขนาดเซลล์ของ STTRAM แบบ SLC มีขนาดเล็กเท่ากับ $4F^2$ ตารางเมตร และมีความเป็นไปได้ต่อการสร้าง MLC แบบ 4 บิต โดยอาศัยการสร้าง MTJ ซ้อนกันเป็นชั้นๆ (27) ในปี พ.ศ. 2550 บริษัท Hitachi ได้แสดงให้เห็นว่าสามารถสร้าง STTRAM ความจุ 2 เมกะบิต โดยใช้ Mg-O เป็นฉนวน ที่กระบวนการผลิต 0.2 ไมโครเมตร (28) ซึ่งในปัจจุบันบริษัท Grandis ได้เริ่มทำการสร้างต้นแบบของ STTRAM ที่ขนาดความจุ 0.5 เมกะบิต (โครงสร้างแบบ 2T2MTJ) และ 1 เมกะบิต (โครงสร้างแบบ 1T1MTJ) ภายใต้เทคโนโลยีกระบวนการผลิต 54 นาโนเมตร (29)

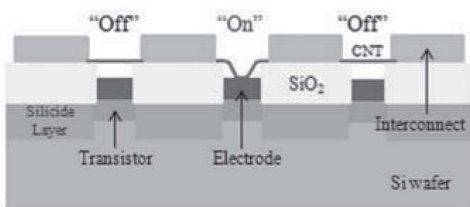
2.2.2 หน่วยความจำแบบท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotube Memory)

หน่วยความจำแบบท่อนาโนคาร์บอน หรือเอ็นแรม (Carbon Nanotube RAM: NRAM) เป็นหน่วยความจำที่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนเป็นพื้นฐานในการสร้าง ท่อนาโนคาร์บอนถูกพาดผ่านช่องว่างระหว่างขั้วซอร์ส (Source) และเดรน (Drain) การควบคุมให้ท่อนาโนคาร์บอนเกิดการเบนสัมผัส หรือ ไม่สัมผัสกับขั้วซอร์สและขั้วเดรน สามารถควบคุมได้จากการป้อนแรงดันให้กับขั้วอิเล็กโทรด ดังแสดงในรูปที่ 8 การป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโทรดทำให้เกิดแรงวันเดอร์วาลส์ (Van der Waals) ส่งผลให้ท่อนาโนคาร์บอนเกิดการเบนสัมผัสกับขั้วอิเล็กโทรด กระบวนการดังกล่าวนี้คือสถานะ “1” เมื่อหยุดให้แรงดัน ท่อนาโนคาร์บอนกลับสู่สภาพปกติ นั่นคือสถานะ “0” (31) สามารถปรับปรุงและพัฒนา NRAM ได้โดยการเพิ่มความยาวใน



รูปที่ 7 (ก) โครงสร้างและวงจรการทำงานของเซลล์ STTRAM (Li et al., 2010) (ข) สถานะการวางตัวของ MTJ (30)

การเบนของท่อนาโนคาร์บอน การลดระยะของช่องว่างระหว่างท่อนาโนคาร์บอน และการลดระยะห่างระหว่างขั้วเกต (Gate) หรือทำการปรับปรุงคุณสมบัติของชั้นสารพื้นผิวให้มีคุณสมบัติในการสร้างแรงวันเตอร์วาล์ได้ดียิ่งขึ้น การใช้แรงวันเตอร์วาล์ที่สูงมากต้องทำการเพิ่มแรงดัน Pull-out และลดแรงดัน Pull-in ง่ายให้กับ NRAM ขนาดของเซลล์ NRAM สามารถลดลงไปได้ถึง $5F^2$ ตารางเมตร แต่ยังไม่มียังไม่มีวิธีทำการบันทึกข้อมูลให้ได้หลายบิตในหนึ่งเซลล์ ซึ่งแสดงในตารางที่ 1 บริษัท Nantero ได้สร้างและทดสอบ NRAM เป็นผลสำเร็จ โดยใช้เทคโนโลยีกระบวนการผลิตที่ 22 นาโนเมตร (32)

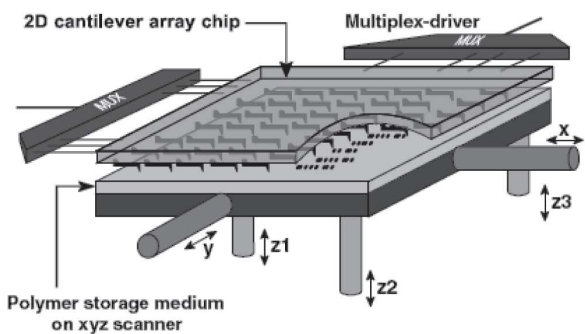


รูปที่ 8 ภาพตัดขวางของหน่วยความจำแบบท่อนาโนคาร์บอน (6)

2.2.3 หน่วยความจำแบบโพรบ (Probe Memory)

หน่วยความจำแบบโพรบทำงานโดยใช้อุปกรณ์ตรวจหรือโพรบ (Probe) ที่มีปลายแหลมเล็กซึ่งติดกับคานายื่น (Cantilever) สามารถโค้งงอและเคลื่อนที่สัมผัสบนพื้นผิวของวัตถุเพื่อทำการอ่านและเขียนข้อมูลลงบนพื้นผิวเช่นเดียวกับกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic Force Microscopes: AFM) เทคโนโลยีหน่วยความจำแบบโพรบชิ้นแรกคือ IBM Millipede ซึ่งเป็น AFM แบบ 2 อาร์เรย์ ใช้ความร้อนเชิงกลในการควบคุมหัวโพรบเพื่อสร้างรอยบุ๋มลงบนพื้นผิว (ทำจากพอลิเมอร์) การเกิดรอยบุ๋มดังกล่าวคือการสร้างสถานะบิต “1” และในทางตรงกันข้ามเมื่อไม่มีรอยบุ๋มคือสถานะบิต “0” กระบวนการดังกล่าวคือกระบวนการอ่านและเขียนข้อมูลของหน่วยความจำแบบโพรบ (33) ดังแสดงในรูปที่ 9 นอกจากนี้ยังมีการนำเสนอการจัดเก็บข้อมูลในลักษณะเดียวกันนี้แต่ทำการบันทึกข้อมูลลงบนแผ่นเฟอร์โรอิเล็กทริกซึ่งสามารถจัดเก็บข้อมูลได้มากกว่า 1 เทราบิตต่อตารางนิ้ว (34) และพบว่า นอกจากการใช้แผ่นพอลิเมอร์ และเฟอร์โรอิเล็กทริกในการจัดเก็บข้อมูลแล้ว ยังสามารถ

นำกระบวนการทางความร้อนเชิงกลมาใช้สำหรับการบันทึกข้อมูลลงบนแผ่นวัสดุเปลี่ยนเฟส (วัสดุเดียวกันกับที่ใช้สร้าง PCRAM) ซึ่งมีอิเล็กโทรดด้านล่างเป็นตัวนำและมีการแทรกและเคลือบชั้นสารที่เหมาะสมให้กับโครงสร้างของแผ่นได้อีกด้วย การเปลี่ยนแปลงสถานะของแผ่นวัสดุเปลี่ยนเฟสกระทำโดยการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านโพรบไปที่ชั้นวัสดุเปลี่ยนเฟสและไหลต่อไปยังอิเล็กโทรดด้านล่าง (35) การสร้างหน่วยความจำแบบโพรบไม่ถูกจำกัดด้วยกระบวนการลิโทกราฟี บริษัท IBM และหน่วยวิจัยใน Middlesex University, University of Exeter และ Nanchang Hangkong University ได้ผลิตและทดสอบหน่วยความจำแบบโพรบที่มีความจุมากกว่า 1 เทราบิตต่อตารางนิ้วได้เป็นผลสำเร็จ (36)



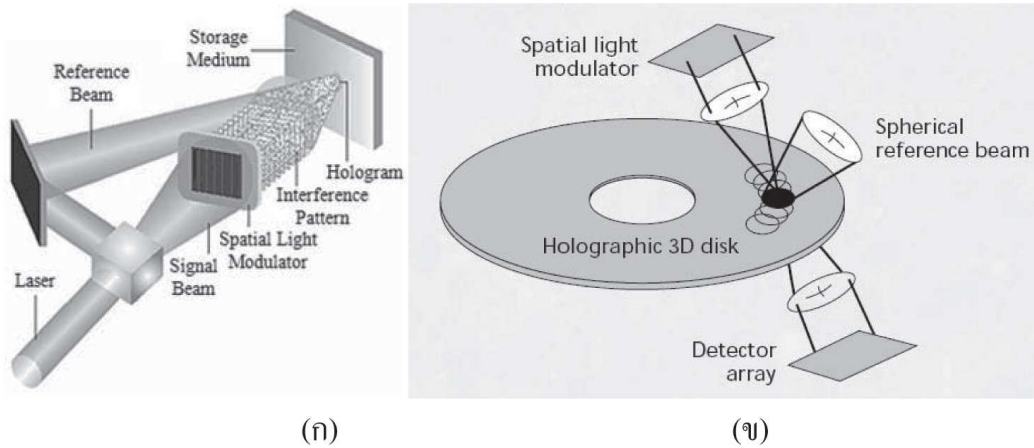
รูปที่ 9 โครงสร้าง MEMs พื้นฐานสำหรับหน่วยความจำแบบโพรบ (33)

2.2.4 หน่วยความจำแบบโฮโลกราฟ (Holographic Memory)

เพื่อให้หน่วยความจำแบบโฮโลกราฟสามารถจัดเก็บและเรียกข้อมูลกลับคืนได้มากกว่าหนึ่งล้านบิตต่อหนึ่งแฟลชของแสงนั้น ข้อมูลแบบดิจิทัลจะต้องถูกกำหนดให้อยู่ในรูปของคลื่นแสง การบันทึกข้อมูลแบบโฮโลกราฟที่มีความหนาแน่นสูงและสามารถทำการเรียกข้อมูลกลับคืนในรูปของคลื่นแสงนั้น สามารถกระทำได้ดังรูปที่ 10(ก) หน่วยความจำแบบโฮโลกราฟสามารถพัฒนาให้อยู่ในรูปของ CD/DVD สามารถทำการอ่านข้อมูลได้แบบขนานโดยใช้หลักการดังแสดงในรูปที่ 10(ข) (37) ในการเพิ่มความหนาแน่นของหน่วยความจำแบบโฮโลกราฟนั้นยังคงถูกจำกัดจากความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ที่ใช้ ทั้งนี้เพราะความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์มีผลกับความละเอียด

ของกระบวนการ ลิโทกราฟี การบันทึกข้อมูลแบบโฮโลกราฟีในปัจจุบันได้รับความสนใจจากกลุ่มนักวิจัยและผู้ที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีบันทึกข้อมูลอย่างกว้างขวาง เพราะสามารถจัดเก็บข้อมูลได้ยาวนานมากกว่า 50 ปี บริษัท InPhase technologies ได้นำหน่วยความจำแบบ

โฮโลกราฟี วางจำหน่ายในท้องตลาดเป็นครั้งแรกในชื่อ “Tapestry™” ซึ่งสามารถเขียนได้ครั้งเดียว แต่สามารถอ่านได้ไม่จำกัด (Write-Once, Read Many: WORM) โดยมีความจุ 300 กิกะบิต ที่อัตราการส่งถ่ายข้อมูล 20 เมกะบิตต่อวินาที (38)

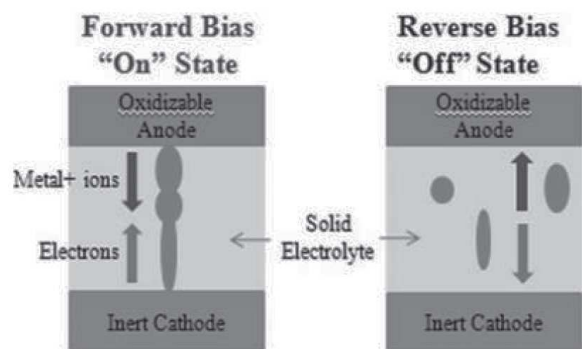


รูปที่ 10 รูปแบบการจัดเก็บข้อมูลของหน่วยความจำแบบโฮโลกราฟี (39)

2.2.5 หน่วยความจำแบบตัวนำบริดจ์ทองแดง (Copper Bridge Memory)

หน่วยความจำแบบตัวนำบริดจ์ทองแดง หรือ ซีบีแรม (Copper Bridge RAM: CBRAMs) หรือ พีเอ็มซี (Programmable Metallization Cells: PMCs) เป็นหน่วยความจำที่ประกอบด้วยอิเล็กโทรไลต์แบบโซลิตสแตต (Solid State Electrolyte) ซึ่งมีไอออนโลหะอิสระเคลื่อนที่อยู่ระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองของเซลล์ เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าในทิศทางที่เหมาะสมให้กับเซลล์ ไอออนโลหะจะจัดเรียงตัวเชื่อมต่อกันเป็นสะพานไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง เมื่อต้องการให้สายไอออนโลหะสลายตัวสามารถกระทำได้โดยให้สนามไฟฟ้าในทิศตรงกันข้ามกับทิศก่อนหน้า ดังแสดงในรูปที่ 11 CBRAMs ใช้ Ag เจือด้วย GeS_{1-x} เป็นอิเล็กโทรไลต์แบบโซลิตสแตต และใช้ Ag เป็นขั้วอิเล็กโทรด สถานะ “เปิด” ของ CBRAMs นั้นเกิดจากการป้อนแรงดันไฟฟ้าบวกให้กับขั้ว Oxidizable Anode ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยา redox ขึ้น ปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้ปริมาณไอออนเงินมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นและเคลื่อนที่มาเชื่อมต่อกันเป็นสะพานเชื่อมระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง (40) ในทางกลับกันเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าในทิศตรงกันข้ามกับทิศก่อนหน้า ปริมาณไอออนเงินมีจำนวนลดลง ส่งผลให้

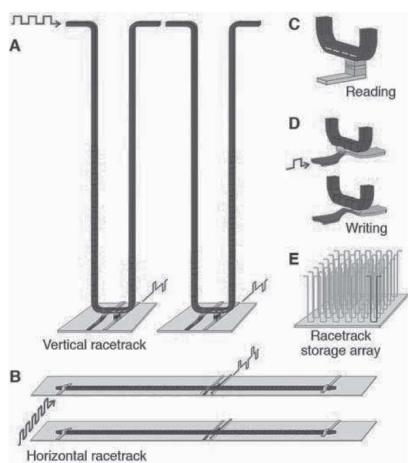
สายสะพานไฟขาด ซึ่งเรียกสถานะนี้ว่า “ปิด” CBRAMs สามารถทำการสวิตช์กลับไป-มาได้ระหว่างสถานะ “เปิด” (ความต้านทานต่ำ) กับสถานะ “ปิด” (ความต้านทานสูง) โดยมีอัตราส่วนความต้านทานระหว่าง เปิด/ปิด ประมาณ 10^6 CBRAMs มีขนาดของเซลล์อยู่ประมาณ $6F^2$ ตารางเมตร สามารถจัดเก็บข้อมูลได้หลายบิตในหนึ่งเซลล์ ในปี พ.ศ. 2549 บริษัท Altis Semiconductor ซึ่งเกิดจากการร่วมมือกันระหว่าง Infineon กับ IBM ได้แสดงให้เห็นว่าสามารถสร้าง CBRAMs ที่มีขนาดความจุ 2 เมกะบิต ได้โดยใช้เทคโนโลยีกระบวนการผลิต 90 นาโนเมตร (41)



รูปที่ 11 กระบวนการสวิตช์ไป-มา ระหว่างสถานะ “เปิด” และ “ปิด” ของ CBRAMs (42)

2.2.6 หน่วยความจำแบบเรซแทรค (Racetrack Memory)

หน่วยความจำแบบเรซแทรค เป็นหน่วยความจำที่จัดเก็บข้อมูลโดยอาศัยการส่งผ่านข้อมูลไปตามโดเมนวอลล์ (Domain wall) ทางแม่เหล็ก ซึ่งวางตัวอยู่บนแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ (Silicon Wafer) ดังแสดงในรูปที่ 12 โดเมนวอลล์ได้ถูกทำให้เคลื่อนที่อย่างเป็นจังหวะไปตามโครงสร้างของเรซแทรค โดยถูกกระตุ้นด้วยสปินโพลาไรซ์ (Spin-Polarized) ของพัลส์กระแสไฟฟ้า (ตำแหน่ง A ในรูปที่ 12) ข้อมูลของเรซแทรคถูกอ่านและเขียนโดยใช้หัวอ่านเขียนวางในตำแหน่งจุดที่ต้องการจัดเก็บข้อมูล ตำแหน่ง C และ D ของเทคโนโลยีดังกล่าวนี้ต้องการสร้างโดเมนวอลล์จำนวนมากต่อเรซแทรคหนึ่งเซลล์ โดยระยะห่างระหว่างโดเมนวอลล์เป็นตัวบ่งบอกความยาวของบิต ซึ่งถูกควบคุมโดย Pinning sites ในกระบวนการผลิตเรซแทรค การจัดเก็บข้อมูลสามารถทำได้ครั้งละหลายบิตทั้งในแนวตั้งและแนวนอน (แสดงในตำแหน่ง B ในรูปที่ 12) เรซแทรคสามารถสร้างให้อยู่ในรูปแบบ 3 มิติได้ ทำให้สามารถอ่านและเขียนได้หลายบิตต่อหนึ่งเซลล์ ในตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่า เรซแทรคมีจำนวนบิตเท่ากับ 12 บิต ในปี พ.ศ. 2551 นักวิจัยของ IBM ได้ทำการสร้างและทดสอบเรซแทรคโดยใช้สายนาโนแม่เหล็กแบบ permalloy ความยาว 1-10 ไมโครเมตร ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 นาโนเมตร หรือน้อยกว่า ได้เป็นผลสำเร็จ โดยมีความเร็วในการทำงานมากกว่าเทคโนโลยีแฟลชที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันถึง 100 เท่า (43)



รูปที่ 12 โครงสร้าง 3 มิติ ของหน่วยความจำแบบเรซแทรค (44)

3. รูปแบบและเกณฑ์ในการประเมิน

เมื่อถึงปี พ.ศ. 2563 คาดว่าฮาร์ดดิสก์ไครฟ์จะมีความหนาแน่นเท่ากับ 10 เทราบิตต่อตารางนิ้ว ในขณะที่หน่วยความจำแบบแฟลชถูกพยากรณ์ว่าไม่สามารถเพิ่มความหนาแน่นให้ได้มากไปกว่าในปัจจุบันก่อนถึงปี พ.ศ. 2563 ดังนั้นจึงนำเทคโนโลยีทั้งสองนี้มาเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีทางเลือกใหม่ชนิดต่างๆ โดยยึดตามศักยภาพพื้นฐานของหน่วยความจำทั้งสอง เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ที่เทคโนโลยีทางเลือกใหม่เหล่านี้จะสามารถมาแทนที่หน่วยความจำแบบแฟลช และเป็นคู่แข่งกับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ในปี พ.ศ. 2563 แม้ว่าจะมีข้อจำกัดและความแตกต่างมากมายของหลักเกณฑ์ที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบ แต่สำหรับการวิเคราะห์เปรียบเทียบศักยภาพของหน่วยความจำแต่ละชนิดในบทความนี้จะเลือกใช้ตัวชี้วัด 5 ด้านสำหรับการเปรียบเทียบ ประกอบด้วย

- 1) ความหนาแน่นของหน่วยความจำซึ่งคำนวณได้จากการนำขนาดของเซลล์มาหารด้วยจำนวนบิตต่อเซลล์
- 2) ปริมาณการใช้พลังงาน
- 3) เวลาในการเขียนและอ่านข้อมูล
- 4) ความทนทาน
- 5) ระยะเวลาที่สามารถเก็บรักษาข้อมูล

ข้อมูลทั้งหมดข้างต้นแสดงในตารางที่ 1 โดยเป็นค่าจากการประมาณบนสมมติฐานว่าเทคโนโลยีต่างๆ เหล่านี้สามารถพัฒนาและบรรลุเป้าหมายได้ในปี พ.ศ. 2563 ตลอดจนเทคโนโลยีทั้งหมดสามารถชนะอุปสรรคและผลิตออกสู่ตลาดได้

ความหนาแน่นถูกมองว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการพิจารณาว่าเทคโนโลยีหน่วยความจำแบบไม่ลบเลือนทางเลือกใหม่จะประสบความสำเร็จหรือไม่ในอนาคต ทั้งนี้เพราะความหนาแน่นมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับค่าใช้จ่ายที่จะเกิดขึ้นต่อกิกะไบต์ ในตลาดของการซื้อขายฮาร์ดดิสก์ไครฟ์นั้น ราคาต่อกิกะไบต์มีความสำคัญมากกว่าพารามิเตอร์ประสิทธิภาพต่างๆ ที่ใช้เป็นเกณฑ์ทั้งหมดในครั้งนี วิธีเปรียบเทียบราคาเป็นวิธีการแรกที่ผู้บริโภคเลือกใช้เป็นเกณฑ์หลักในการตัดสินใจเลือกซื้อเทคโนโลยีทางด้านหน่วยความจำ หรือเทคโนโลยีทางด้านไอทีต่างๆ

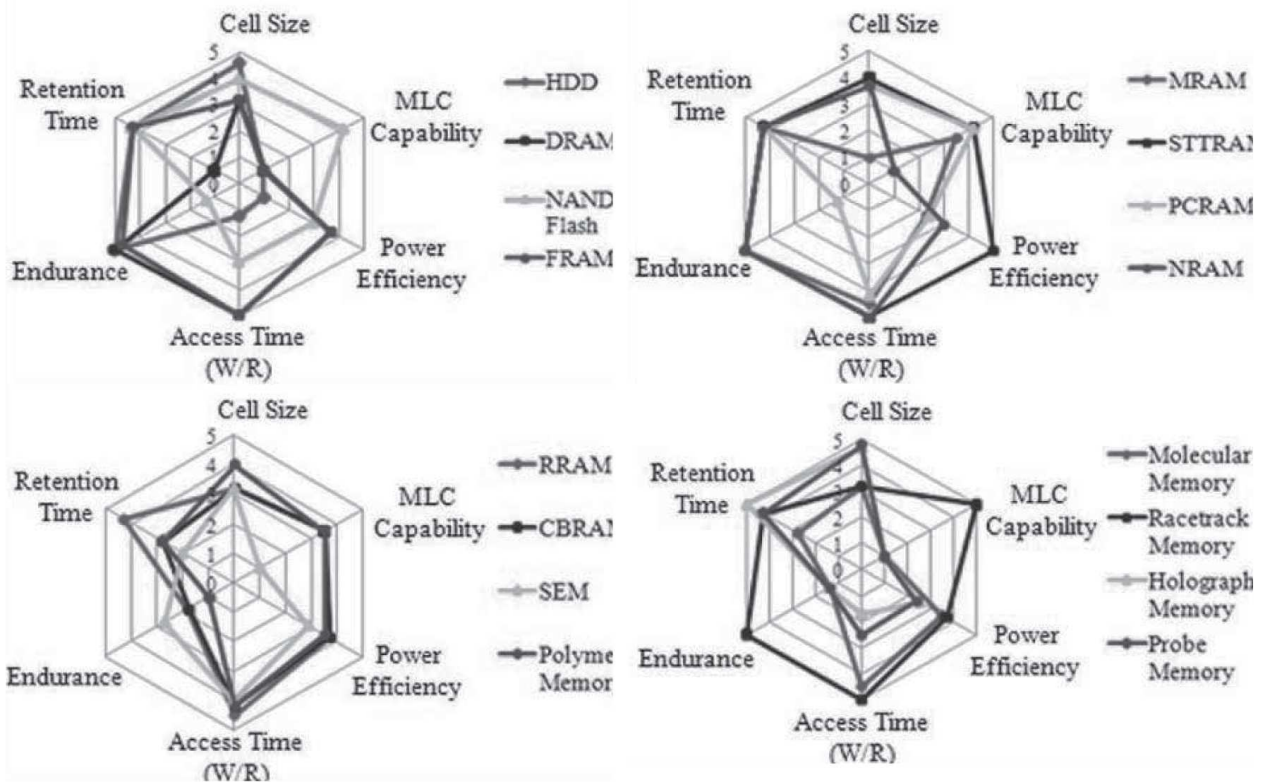
ราคาต่อกิกะไบต์สามารถคำนวณมาจากอัตราส่วนระหว่างราคากับความหนาแน่นของบิตข้อมูล ซึ่งความหนาแน่นของบิตข้อมูลนั้นคำนวณมาจากขนาดพื้นที่ของเซลล์หารด้วยจำนวนบิตต่อเซลล์

พารามิเตอร์ประสิทธิภาพที่สำคัญอีกพารามิเตอร์หนึ่งคือ การประหยัดพลังงาน เนื่องจากอุปกรณ์เคลื่อนที่แบบพกพาต่างๆ นั้น การใช้พลังงานเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมาก ทั้งนี้เพราะระยะเวลาในการใช้งานของอุปกรณ์จะขึ้นอยู่กับปริมาณพลังงานที่มีอยู่ในแบตเตอรี่และลักษณะการใช้พลังงานของอุปกรณ์ แม้ว่าในอดีตที่ผ่านมาการใช้พลังงานไม่มีผลโดยตรงต่อปริมาณของข้อมูล แต่ปัจจุบันพลังงานมีความสัมพันธ์กับปริมาณของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณาการใช้พลังงานของหน่วยความจำแบบแอนด์แฟลช พบว่าต้องการพลังงานประมาณครึ่งหนึ่งของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เท่านั้น แต่การเปรียบเทียบปริมาณการใช้พลังงานของเทคโนโลยีบันทึกข้อมูลแบบไม่ลบเลือนแห่งอนาคตนั้น ไม่ได้นำผลรวมของพลังงานแต่ละเทคโนโลยีมาเปรียบเทียบกับพลังงานรวมของ

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ แต่การเปรียบเทียบอาศัยการใช้พลังงานในการโปรแกรมของข้อมูลต่อบิตเป็นหลัก

เวลาในการเข้าถึงข้อมูลทั้งในส่วนของ การเขียนและการอ่านเป็นพารามิเตอร์ประสิทธิภาพที่มีความสำคัญเป็นอันดับที่สาม เนื่องจากความเร็วของการจัดการข้อมูลเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ผู้บริโภคใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณา เพราะถ้าสามารถเข้าถึงข้อมูลได้เร็วจะทำให้การดำเนินการกับข้อมูลต่างๆ สามารถทำได้เร็วขึ้น

ความสามารถในการเขียนซ้ำ และระยะเวลาในการเก็บรักษาข้อมูลเป็นสองพารามิเตอร์ประสิทธิภาพที่มีความสำคัญรองลงมาจากสามพารามิเตอร์ข้างต้น แม้ว่าระบบในปัจจุบันต้องการความสามารถในการเขียนซ้ำไม่น้อยกว่า 10^{15} รอบ (45) สำหรับระยะเวลาในการเก็บรักษาข้อมูลโดยทั่วๆ ไป สำหรับหน่วยความจำที่ขายในเชิงพาณิชย์ต้องสามารถจัดเก็บข้อมูลได้ไม่น้อยกว่า 5 ปี แต่ในกรณีที่จะนำไปใช้ในการจัดเก็บข้อมูลของสาธารณสุขต้องสามารถเก็บรักษาข้อมูลได้ไม่น้อยกว่า 50 - 100 ปี (6)



รูปที่ 13 ประสิทธิภาพของเทคโนโลยีหน่วยความจำแบบไม่ลบเลือน (6)

4. การประเมิน

เพื่อให้การประเมินและเปรียบเทียบครอบคลุมทุกเทคโนโลยี และทุกพารามิเตอร์ประสิทธิภาพ จึงนำข้อมูลในตารางที่ 1 มาเขียนในรูปของไดอะแกรมแบบโครงข่ายใยแมงมุมดังแสดงในรูปที่ 13 และเขียนข้อมูลในสเกลของลอการิทึม ปริมาณ 1 เป็นปริมาณที่บ่งชี้ว่ามีประสิทธิภาพแย่มาก ในขณะที่ปริมาณ 5 บ่งชี้ว่ามีประสิทธิภาพดีที่สุดในกลุ่มของเทคโนโลยีเหล่านี้ หน่วยความจำแบบไฮโลกราฟแบบโพรบ รวมไปถึงหน่วยความจำแบบเรซแทรก เป็นหน่วยความจำที่ไม่ได้รับผลกระทบจากระบบการทำให้โทรกราฟฟี ดังนั้นเทคโนโลยีเหล่านี้จึงมีศักยภาพในการเพิ่มความหนาแน่นให้สูงขึ้นไปได้อย่างต่อเนื่อง

หน่วยความจำแบบไฮโลกราฟเป็นหน่วยความจำที่มีความหนาแน่นสูง และมีความสามารถในการเก็บรักษาข้อมูลได้ยาวนาน แต่ยังคงมีความทนทานต่อการเขียนซ้ำต่ำ เข้าถึงข้อมูลช้า และมีศักยภาพในการประหยัดพลังงานน้อย ปัจจุบันหน่วยความจำแบบไฮโลกราฟมีฟังก์ชันที่น่าสนใจคือการเขียนครั้งเดียวแต่อ่านได้หลายๆ ครั้ง (WORM) ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่โดดเด่นในการรักษาข้อมูล ตลอดจนป้องกันการข้อมูลถูกเขียนทับหรือแก้ไข ผู้ผลิตและผู้สนับสนุนเทคโนโลยีดังกล่าวเปิดเผยว่าเทคโนโลยีไฮโลกราฟสามารถเขียนทับได้แต่ยังไม่มียางานที่ชัดเจนในเรื่องดังกล่าว ตลาดหลักของหน่วยความจำแบบไฮโลกราฟนั้นส่วนใหญ่เน้นไปที่ลูกค้าที่มีความต้องการหน่วยความจำที่มีราคาอยู่ในระดับปานกลาง และสามารถจัดเก็บข้อมูลได้นานไม่น้อยกว่า 50 ปี นอกจากนี้หน่วยความจำแบบไฮโลกราฟมีระบบทางด้านออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับการบันทึกและการอ่านข้อมูลคืนที่ค่อนข้างซับซ้อนและมีราคาแพง เมื่อเทียบกับราคาของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แล้วพบว่ามีความสูงกว่า 10-100 เท่า ซึ่งเสถียรภาพของแผ่นบันทึกข้อมูลและอัตราบิดผิดพลาดเป็นปัญหาหลักสำหรับหน่วยความจำแบบไฮโลกราฟซึ่งต้องได้รับการแก้ไขต่อไป

หน่วยความจำแบบโพรบเป็นหน่วยความจำที่บันทึกข้อมูลลงบนแผ่นข้อมูล โดยอาศัยหัวโพรบซึ่งหน่วยความจำดังกล่าวสามารถเพิ่มความหนาแน่นขึ้นไปได้โดยไม่ถูกจำกัดจากระบบการลิโทรกราฟฟี ดังนั้น

จึงมีศักยภาพที่จะเพิ่มความหนาแน่นให้สูงขึ้นไปได้อย่างต่อเนื่อง และยังคงพบว่าเป็นหน่วยความจำที่มีความสามารถในการเก็บรักษาข้อมูลได้ดีและยาวนาน (ขึ้นอยู่กับชนิดของแผ่นบันทึกข้อมูล) ในทางตรงกันข้าม หน่วยความจำแบบโพรบยังคงใช้เวลาในการเข้าถึงข้อมูลที่ช้าและใช้พลังงานค่อนข้างสูง ในขณะที่ความทนทานต่อการเขียนซ้ำอยู่ในระดับพอใช้ ซึ่งอาจจะเป็นปัญหาได้ในอนาคต บริษัทส่วนใหญ่ที่ผลิตและให้การสนับสนุนเทคโนโลยีดังกล่าวนี้ใช้ MEMS เป็นพื้นฐานในการผลิต ซึ่งยังไม่สามารถพิสูจน์ได้ว่าเป็นหน่วยความจำที่ต้องการพลังงานต่ำ ราคาถูก หรือสามารถเข้าถึงข้อมูลได้เร็วเมื่อเปรียบเทียบกับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เพื่อให้สามารถแข่งขันกับเทคโนโลยีอื่นได้ หน่วยความจำแบบโพรบต้องเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลให้เร็วขึ้น ซึ่งอาจจะทำได้โดยการเพิ่มจำนวนหัวโพรบให้มีจำนวนมากขึ้น และให้มีการทำงานแบบขนาน แต่การเพิ่มจำนวนหัวโพรบจะทำให้หน่วยความจำต้องการพลังงานเพิ่มมากขึ้น และราคาก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย หน่วยความจำแบบโพรบเป็นหน่วยความจำที่มีความหนาแน่นสูงและมีประสิทธิภาพอยู่ในระดับปานกลาง อย่างไรก็ตาม ยังคงมีข้อจำกัดหลายอย่างที่หน่วยความจำแบบโพรบจะต้องแก้ไขเพื่อให้สามารถนำไปใช้ในทางปฏิบัติได้

หน่วยความจำแบบเรซแทรก เป็นหน่วยความจำที่มีความเป็นไปได้ที่จะสร้างเป็นหน่วยความจำแบบสามมิติ และสามารถบันทึกข้อมูลได้หลายบิตในหนึ่งเซลล์ แม้ต้องใช้กระบวนการลิโทรกราฟฟีในการออกแบบโครงสร้างก็ตาม นอกจากนั้นยังพบว่าเป็นหน่วยความจำที่ต้องการพลังงานต่ำ เข้าถึงข้อมูลได้เร็ว มีความทนทานต่อการเขียนซ้ำ และมีความสามารถในการจัดเก็บข้อมูลดี ดังแสดงในรูปที่ 13 อย่างไรก็ตาม ในการสร้าง และทำงานของหน่วยความจำแบบเรซแทรกโครงสร้างแบบสามมิติยังคงต้องได้รับการศึกษา และพิสูจน์อย่างต่อเนื่อง นอกจากนั้นยังไม่มีมีการพิสูจน์อย่างชัดเจนว่าการสร้างเซลล์หน่วยความจำแบบเรซแทรก จะไม่ใช้กระบวนการลิโทรกราฟฟีในกระบวนการสร้าง และกระบวนการเคลื่อนย้ายข้อมูลระหว่างเซลล์ทุกข้อมูล จะไม่เกิดความผิดพลาดในระหว่างการเคลื่อนย้ายโดยใช้วิธีควบคุมจังหวะ (Synchronism) ที่ผ่านมามีความพยายามที่จะทำให้อุปกรณ์สามารถเคลื่อนย้ายข้อมูลโดยการเคลื่อนผนังโดเมน เช่น หน่วยความจำแบบคลอส-ไทล์ (Cross-tie)

(46) และหน่วยความจำแบบเส้นบล็อกซ์ (Bloch line) (47) ซึ่งยังคงไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะนำออกสู่ท้องตลาด ประกอบกับหน่วยความจำดังกล่าวต้องการกระแสที่สูงในการผลิตให้เกิดการเคลื่อนไหวยของผนังโดเมนของโครงสร้าง จากที่กล่าวมาข้างต้นจะพบว่าหน่วยความจำดังกล่าวจะต้องได้รับการพัฒนาทั้งในด้านกระบวนการผลิตและประสิทธิภาพในการทำงาน หน่วยความจำแบบเรซแทรคเป็นหน่วยความจำทางเลือกใหม่ที่มีศักยภาพสูงและน่าสนใจ แต่อย่างไรก็ตามยังคงต้องใช้ความพยายามอย่างมากเพื่อให้สามารถทำงานได้ตามศักยภาพที่คาดหวังไว้

CBRAMs เป็นหน่วยความจำที่มีศักยภาพสูงในเรื่องของการลดขนาดเซลล์ การประหยัดพลังงาน การเข้าถึงข้อมูล และความทนทานในการเขียนซ้ำ นอกจากนี้ยังสามารถทำเป็นเทคโนโลยีแบบเอ็มแอลซี (MLC) โดยอาศัยการโปรแกรมด้วยกระแส (48) แต่อย่างไรก็ตามการโปรแกรมด้วยวิธีดังกล่าวนี้ยังคงสามารถเก็บรักษาข้อมูลได้ในเวลาที่สั้นๆ เท่านั้น (รูปที่ 13) แม้ว่า CBRAMs จะได้รับการสนับสนุนและเสนอว่าสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเทคโนโลยีแบบฝังตัวชนิดต่างๆ ได้ แต่ก็เป็นเรื่องที่ยากมากที่จะแข่งขันในเรื่องของราคาต่อกิกะไบต์ หรือระยะเวลาในการจัดเก็บข้อมูลกับหน่วยความจำแบบแฟลช และฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

NRAMs เป็นหน่วยความจำที่มีศักยภาพดีเยี่ยมในการเข้าจัดการกับข้อมูล สามารถเขียนซ้ำได้จำนวนหลายรอบ สามารถเก็บรักษาข้อมูลได้ยาวนาน และมีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานที่ดี แต่มีขนาดของเซลล์อยู่ในระดับปานกลาง ($5F^2$ ตารางเมตร) เท่านั้น นอกจากนี้ยังไม่สามารถดำเนินการในระบบ MLC ได้ (รูปที่ 13) ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับนำไปใช้เป็นตัวความจำแบบสแตนด์อะโลน และระบบโปรแกรมฝังตัว ในรูปแคชของซีพียู (CPU) หรือ ใช้ทดแทน DRAM หรือแฟลชแบบนอนร์ แต่ยังไม่สามารถแข่งขันกับแฟลชแบบแนนด์ได้ นอกจากนี้การใช้ CNTs ในกระบวนการผลิตแบบซิมอส (CMOS) ทำให้เกิดการปนเปื้อนของโลหะเกิดขึ้นในกระบวนการผลิต และเป็นการยากมากในการควบคุมขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของ CNTs ให้มีความสม่ำเสมอ ดังนั้น NRAMs มีศักยภาพที่สามารถนำไปสร้างเป็นผลิตภัณฑ์ได้ แต่เป็นเรื่องที่ยากที่จะแข่งขันกับหน่วยความจำแบบแฟลชหรือ

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

จุดเด่นของ MRAM คือการเข้าถึงข้อมูลได้เร็ว สามารถเขียนซ้ำและเก็บรักษาข้อมูลได้ดี (รูปที่ 13) นอกจากนั้น MRAM ยังสามารถทำการผลิตร่วมกับกระบวนการทางซิมอสได้ โดยไม่ทำให้เกิดการปนเปื้อน จากข้อได้เปรียบข้างต้นทำให้ MRAM สามารถสร้างเป็นส่วนหนึ่งของระบบฝังตัว หรือการนำไปประยุกต์ใช้กับระบบบนชิป (System-on-Chip: SoC) อย่างไรก็ตามพื้นที่ของเซลล์ MRAM ยังคงมีขนาดใหญ่ เนื่องจากกระบวนการสร้างไอซีแบบซิมอสมีความซับซ้อน ตลอดจนขนาดศักยภาพในการประหยัดพลังงาน เนื่องจากเซลล์มีขนาดใหญ่จึงต้องการกระแสในปริมาณมากในการโปรแกรม ปริมาณกระแสที่สูงนี้เป็นอุปสรรคพื้นฐานที่สำคัญที่ทำให้ต้องมีการปรับปรุงโครงสร้างของเซลล์ เพื่อลดการใช้กระแส ตลอดจนเป็นการเพิ่มความหนาแน่นของเซลล์ให้มีปริมาณสูงขึ้น ทำให้ราคาต่อกิกะไบต์ต่ำลง ซึ่งเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาของทั้งหน่วยความจำแบบแฟลช และฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ วิธีการหนึ่งที่น่ามาใช้สำหรับลดขนาดของเซลล์ให้เล็กลงในระดับ $4F^2$ ตารางเมตร คือการใช้โครงสร้างแบบครอสบาร์ (Cross-bar) วิธีการดังกล่าวถูกจำกัดความเร็วในการทำงานและไม่สามารถรับรองได้ว่ากระแสที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงสถานะของ MRAM นั้นจะลดลง ด้วยเหตุนี้จึงเป็นไปได้ยากที่ MRAM จะมีความหนาแน่นสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง

FRAMs เป็นหน่วยความจำที่ใช้พลังงานต่ำ สามารถเข้าถึงข้อมูลได้เร็ว มีความทนทานและสามารถเก็บรักษาข้อมูลได้อย่างดี (รูปที่ 13) เทคโนโลยีนี้สามารถสร้างร่วมกันกับเทคโนโลยีแบบซิมอสได้เป็นอย่างดี และถูกประยุกต์ใช้เกี่ยวกับระบบคอมพิวเตอร์ และเทคโนโลยีฝังตัวต่างๆ ในอีกด้านหนึ่ง FRAMs มีศักยภาพต่ำในการลดขนาดของเซลล์ เนื่องจากเป็นเรื่องยากในการลดขนาดตัวเก็บประจุแบบเฟอร์โรอิเล็กทริก โครงสร้าง 3 มิติ โดยไม่ทำให้ประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือลดลง เนื่องจากขนาดของสัญญาณที่ได้จากเซลล์ต่ำลง และเป็นการยากต่อการลดค่าความจุแฝงต่างๆ ที่มีอยู่ในโครงสร้างของเซลล์ ดังนั้น FRAMs จึงไม่น่าจะเป็นคู่แข่งที่สำคัญของเทคโนโลยีแฟลช และฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

RRAMs ได้รับการเสนอว่ามีความศักยภาพสูงในการเพิ่มความหนาแน่นเนื่องจากมีขนาดของเซลล์ที่เล็กและ

สามารถทำเป็นเทคโนโลยีแบบ MLC ได้ นอกจากนั้นยังพบว่า RAMs มีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานที่ดี สามารถเข้าถึงข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว สามารถเขียนซ้ำได้หลายครั้ง (รูปที่ 13) RRAMs มีความสามารถในการจัดการความร้อนได้เป็นอย่างดีและสามารถสร้างร่วมกับกระบวนการซีมอสได้ดี ทำให้สามารถนำไปประกอบร่วมกับอุปกรณ์และเทคโนโลยีต่างๆ ได้ อีกนัยหนึ่ง RRAMs ไม่สามารถแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนถึงศักยภาพในการเขียนซ้ำที่ดี มีเพียงหน่วยความจำแบบ NiO เท่านั้น ที่แสดงให้เห็นว่าสามารถเขียนซ้ำได้มากกว่า 10^6 ครั้ง (49) นอกจากนั้นยังพบอีกว่าคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์ที่ใช้เป็นตัวควบคุมการทำงานของ RRAM ยังมีความแตกต่างกันอยู่มากเนื่องจากเกิดกระแสรั่วในปริมาณสูง ส่งผลให้ต้องใช้กระแสในการรีเซ็ตสูงตามไปด้วย แม้ว่าปัญหาเหล่านี้จะสามารถแก้ไขได้ เทคโนโลยีดังกล่าวนี้ก็ยังไม่สามารถนำออกสู่ตลาดได้ในปี พ.ศ. 2563

PCRAMs เป็นหน่วยความจำที่มีเซลล์ขนาดเล็ก สามารถจัดเก็บข้อมูลได้หลายบิตในหนึ่งเซลล์ สามารถเข้าถึงข้อมูลได้เร็ว เก็บรักษาข้อมูลได้นาน ความสามารถในการเขียนซ้ำเปรียบได้กับหน่วยความจำแฟลชแบบแนนด์ แต่ต้องการพลังงานที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีอื่นๆ (รูปที่ 13) PCRAMs เป็นหน่วยความจำแบบไม่ลบเลือนศักยภาพสูง ได้รับการคาดหมายว่าจะเข้ามาแทนที่หน่วยความจำแฟลชแบบนอร์ อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันกับหน่วยความจำแฟลชแบบแนนด์ มีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการลดปริมาณของกระแสรีเซ็ตให้มีค่าต่ำลง เนื่องจากกระแสรีเซ็ตดังกล่าวนี้ส่งผลโดยตรงกับการใช้พลังงานรวม

สำหรับหน่วยความจำสุดท้าย STTRAMs (รูปที่ 13) มีศักยภาพในด้านการประหยัดพลังงาน มีความเร็วในการเข้าถึงข้อมูลสูง และสามารถจัดเก็บข้อมูลได้ยาวนาน เมื่อพิจารณาศักยภาพในปัจจุบัน STTRAMs มีศักยภาพในการเข้ามาแทนที่หน่วยความจำแฟลชแบบนอร์ และ DRAM แต่ STTRAMs ต้องสามารถจัดเก็บข้อมูลได้หลายบิตในหนึ่งเซลล์ เพื่อเพิ่มความหนาแน่นและลดราคาให้ต่ำลง ถ้าทำได้จะทำให้ STTRAMs กลายเป็นเทคโนโลยีหน่วยความจำแบบไม่ลบเลือนแห่งอนาคตที่อาจมาแทนที่หน่วยความจำแบบแฟลชชนิดแนนด์ และฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้

5. สรุป

ถ้าทุกอย่างเป็นไปได้ตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ในปี พ.ศ. 2563 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 2.5 นิ้ว จะสามารถจัดเก็บข้อมูลได้มากกว่า 14 เทราไบต์ภายใต้แผ่นดิสก์ 2 แผ่น โดยมีราคาประมาณ 40 ดอลลาร์ แต่ก่อนที่จะถึงปีดังกล่าว เทคโนโลยีหน่วยความจำแบบแฟลชต้องประสบกับวิกฤติทางตันในการเพิ่มขนาดความจุ ดังนั้นเทคโนโลยีหน่วยความจำแบบไม่ลบเลือนทางเลือกใหม่จึงได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากเทคโนโลยีเหล่านี้มีแนวโน้มที่จะเข้ามาแทนที่หน่วยความจำแบบแฟลช และในที่สุดอาจไปแทนที่ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้อีกด้วยในอนาคต บทความนี้เป็นการนำเสนอบทวิเคราะห์ และเปรียบเทียบศักยภาพในด้านต่างๆ ของเทคโนโลยีทางเลือกใหม่ 10 ชนิด ที่คาดว่าจะสามารถทำให้เกิดขึ้นได้ในปี พ.ศ. 2563

ความหนาแน่นของหน่วยความจำเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญมากที่สุด รองลงมาคือพารามิเตอร์ประสิทธิภาพในการปฏิบัติงานต่างๆ เช่น ความสามารถในการประหยัดพลังงาน ความสามารถในการเข้าถึงข้อมูล ความสามารถในการเขียนซ้ำ และสุดท้ายคือระยะเวลาที่สามารถจัดเก็บข้อมูลได้ หน่วยความจำแบบเรซแทรคเป็นหน่วยความจำที่มีศักยภาพมาก อย่างไรก็ตามการเคลื่อนย้ายโดเมนต้องทำการควบคุมให้เป็นจังหวะ ซึ่งในการเคลื่อนย้ายข้อมูลโดยการเคลื่อนผนังโดเมนนั้นยังไม่ได้รับการพิสูจน์ความน่าเชื่อถือ ดังนั้นเรซแทรคจึงเป็นเทคโนโลยีที่ยังอยู่ไกลสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงและไม่ปรากฏว่านักวิจัยจะให้ความสำคัญและทำการแก้ไขปัญหาที่สำคัญต่างๆ หน่วยความจำแบบโพรบเป็นหน่วยความจำที่มีศักยภาพในการเพิ่มความหนาแน่นให้สูงขึ้นได้อย่างดีเยี่ยม เนื่องจากสามารถใช้แผ่นบันทึกข้อมูลที่มีลักษณะพิเศษร่วมกับหัวโพรบที่มีขนาดเล็ก ซึ่งสามารถสร้างขึ้นมาได้โดยไม่ต้องอาศัยกระบวนการลิโทกราฟี อีกนัยหนึ่งพบว่าประสิทธิภาพในด้านอื่นๆ ของหน่วยความจำแบบโพรบมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเทคโนโลยีอื่นๆ เช่นเดียวกับหน่วยความจำแบบเรซแทรคที่ยังห่างไกลสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งาน เนื่องจากมีจำนวนนักวิจัยที่สนใจในการศึกษาและพัฒนาน้อย หน่วยความจำแบบโฮโลกราฟีมีความหนาแน่นสูง ราคาถูก แต่เป็นเทคโนโลยีที่สามารถ

ทำการเขียนได้แค่ครั้งเดียว ซึ่งมีตลาดแตกต่างกับเทคโนโลยีแบบแฟลชและฮาร์ดดิสก์ไครฟ์มาก MRAMs และ FRAMs เป็นเทคโนโลยีที่มีราคาแพงเช่นเดียวกับเทคโนโลยี DRAMs ดังนั้นจึงไม่ใช่เทคโนโลยีเป้าหมายสำหรับนำมาแทนหน่วยความจำแบบแฟลชและฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ หน่วยความจำแบบพอลิเมอร์ (Polymer memory) หน่วยความจำแบบโมเลกุล (Molecular memory) และหน่วยความจำแบบอิเล็กตรอนเดี่ยว (Single Electron Memory: SEM) มีความหนาแน่นต่ำไม่สามารถแข่งขันกับหน่วยความจำแบบแฟลชได้ ประกอบกับมีระยะเวลาในการเก็บรักษาข้อมูลสั้นเกินไป ไม่เหมาะสำหรับใช้เป็นเทคโนโลยีในการบันทึกข้อมูล NRAMs เป็นหน่วยความจำที่สามารถตอบสนองความต้องการสำหรับหน่วยความจำแบบไม่ลบเลือนแห่งอนาคตได้เป็นอย่างดีแต่ความหนาแน่นและราคายังคงเป็นอุปสรรคต่อการแข่งขันกับหน่วยความจำแบบแฟลช RRAMs, CBRAMs, STTRAMs และ PCRAMs เทคโนโลยีเหล่านี้ ล้วนมีขนาดเซลล์ที่เล็ก และสามารถดำเนินการในระบบ MLC ได้ซึ่งมีความหนาแน่นและราคาต่อเทราไบต์ มีศักยภาพเพียงพอต่อการแข่งขันกับฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาในทุกด้านแล้ว PCRAMs และ STTRAMs เป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพและเหมาะสมที่สุดสำหรับนำไปพัฒนาเพื่อใช้ทดแทนหน่วยความจำแบบแฟลช และฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ เนื่องจากเทคโนโลยีทั้ง 2 ชนิด มีจุดเด่นที่เหนือกว่าเทคโนโลยีชนิดอื่นๆ กล่าวคือ PCRAMs สามารถทำการผลิตได้ง่าย มีความหนาแน่นสูง อีกทั้งปัจจุบันได้ส่งผลิตภัณฑ์ออกสู่ท้องตลาดเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ในขณะที่ STTRAMs เป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีทั้งหมดที่กล่าวมา

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ศ. ดร. ประนอม จันทรโณทัย Dr. Jolyon Dodgson และคณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ช่วยอนุเคราะห์ตรวจแก้ไขความถูกต้องของเนื้อหา

7. เอกสารอ้างอิง

- (1) Thannews. Hard drive crashes in the past 10 years. 2013; 32(2,809) [Internet] [update 2013 Jan 13; cited 2013 Sep 1]. Available from: http://www.thannews.th.com/index.php?option=com_content&view=article&id=163330:10-&catid=88:2009-02-08-11-23-46&Itemid=418. Thai.
- (2) Thairath online. A bright future of HDD industry in Thailand which can be exports annually 5 billion baht. 2013[Internet] [update 2013 Jul 29; cited 2013 Sep 1]. Available from: <http://www.thairath.co.th/content/tech/101252>. Thai.
- (3) Siritaratiwa A, Surakampoltorn W, Matsumoto M. Investigation of ESD prevention for deshunted GMR heads. IEICE Transactions on Electronics. 2005; E88-C (6):1343-1347.
- (4) Siritaratiwat A, Kruesubthaworn A, Ungvichian V. An EMI immunity study of tmr heads in quasi-static tester due to the direction of sweeping frequency. Diffusion and Defect Data Pt.B: Solid State Phenomena.2009;152-153:447-450.
- (5) Han GC, Qiu JJ, Wang CC, Ko V, Guo ZB. A differential dual spin valve with high pinning stability. Appl. Phys. Lett. 2010; 96(212506).
- (6) Kryder MH, Chang Soo K. After Hard Drives - What Comes Next? IEEE Transactions on Magnetics. 2009; 45(10): 3406-3413.
- (7) ITRS. Emerging Research Devices. [Internet] 2007 Sep 1 [update 2007 Sep 1; cited 2013 Jul 15]. Available from: http://www.itrs.net/Links/2007ITRS/2007_Chapters/2007_ERD.pdf.
- (8) ITRS. Emerging Research Devices. . [Internet] 2009 Sep 1 [update 2009 Sep 1; cited 2013 Jul 15]. Available from: http://www.itrs.net/Links/2009ITRS/2009Chapters_2009Tables/2009_ERD.pdf.

- (9) ITRS. Emerging Research Devices. . [Internet] 2010 Sep 1 [update 2010 Sep 1; cited 2013 Jul 15]. Available from: http://www.itrs.net/Links/2010ITRS/2010Update/ToPost/2010_Update_Overview.pdf.
- (10) ITRS. Emerging Research Devices. . [Internet] 2011 Sep 1 [update 2011 Sep 1; cited 2013 Jul 15]. Available from: <http://www.itrs.net/Links/2011ITRS/2011Chapters/2011ERD.pdf>.
- (11) Ramtron. FRAM Technology Background. An overview of FRAM Technology-Updated Dec. 2000; 1-4.
- (12) Shiga H. A 1.6 GB/s DDR2 128 Mb chain FeRAM with scalable octal bitline and sensing schemes. ISSCC. 2009, Session, 27, 464-465.
- (13) Kanaya H. A 0.602 μm^2 nestled chain cell structure formed by one mask etching process for 64 Mbit FeRAM. Symp. VLSI Technology Dig. Tech. 2004, Papers, 150 - 151.
- (14) Harnsoongnoen S. Phase change memory: the future of data storage technology part I. J Sci Technol MSU. 2013; 32(2): 257-268. Thai.
- (15) Harnsoongnoen S. Phase change memory: the future of data storage technology part II. J Sci Technol MSU. 2013; 32(3): 371-383. Thai.
- (16) Harnsoongnoen S, Sa-ngiamsak C, Siritaratiwa A. Confined-chalcogenide phase change memory with thin Metal interlayer for low reset current by Finite element modeling. Solid State Phenomena. 2009;152-153:399-402.
- (17) Harnsoongnoen S, Sa-ngiamsak C, Siritaratiwa A. Optimization of phase change memory With thin metal inserted layer on Material properties. International Journal of Modern Physics B.2009; 23(17):3625–3630.
- (18) Oh JH, Park JH, Lim YS, Lim HS, Oh YT, Kim JS, et al. Full integration of highly manufacturable 512Mb PRAM based on 90 nm technology. Technical Digest - International Electron Devices Meeting, IEDM, 2006.1-4.
- (19) Pirovano A, Pellizzer F, Tortorelli I, Riganó A, Harrigan R, Magistretti M, et al. Phase-change memory technology with self-aligned μ -Trench cell architecture for 90 nm node and beyond. Solid-State Electronics.2008; 52(9):1467-1472.
- (20) Pirovano A. Electronic switching effect in phase-change memory cells. IEEE Int. Electron Devices Meeting, Tech. Dig, 2005:923-926.
- (21) Sawa A. Resistive switching in transition metal oxides. Materials Today. 2008;11(6): 28-36.
- (22) Chen A, Haddad S, Wu YC, Fang TN, Lan Z, Avanzino S, et al. Non-volatile resistive switching for advanced memory applications. Technical Digest - International Electron Devices Meeting, IEDM, 2005:746-749.
- (23) Parkin SSP, Kaiser C. Giant tunnelling magnetoresistance at room temperature with MgO 100 tunnel barriers. Nature Mater. 2004:862 - 867
- (24) Engel BN, Akerman J, Butcher B, Dave RW, DeHerrera M, Durlam M, et al. A 4-Mb toggle MRAM based on a novel bit and switching method. IEEE Transactions on Magnetics. 2005; 41(11):132-136.
- (25) Nebashi R, Sakimura N, Honjo H, Saito S, Ito Y, Miura S, et al. A 90 nm 12 ns 32 Mb 2T1MTJ MRAM. IEEE Int. Solid-State Circuits Conf., 2009:462-463.
- (26) Takashima D. Overview of FeRAMs: Trends and perspectives. In: Non-Volatile Memory Technology Symposium (NVMTS), 2011 11th Annual, 7-9 November 2011. China. 1 - 6

- (27) Baek IG, Lee JE, Oh SC, Nam KT, Jeong JH. Memory Devices Including Multibit Memory Cells Having Magnetic and Resistive Memory Elements and Related Methods. 2008.
- (28) Kawahara T. 2 Mb spin-transfer torque RAM (SPRAM) with bit-by-bit bidirectional current write and parallelizing-direction current read. IEEE Int. Solid-State Circuits Conf, 2007:480 - 617.
- (29) Chen E, Apalkov D, Driskill-Smith A, Khvalkovskiy A, Lottis D, Moon K, et al. Progress and prospects of spin transfer torque random access memory. IEEE Transactions on Magnetics. 2012;48(11):3025-3030.
- (30) Chen Y, Wang X, Li H, Xi H, Yan Y, Zhu W. Design margin exploration of spin-transfer torque RAM (STT-RAM) in scaled technologies. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. 2010;18(12):1724-1734.
- (31) Ward JW, Meinhold M, Segal BM, Berg J, Sen R, Sivarajan R, Brock DK, et al. A Non-volatile nanoelectromechanical memory element utilizing a fabric of carbon nanotubes. Non-Volatile Memory Technology Symposium; 2004 Nov 15-17:34-38.
- (32) Smith RF, Rueckes T, Konsek S, Ward JW, Brock DK, Segal BM. Carbon nanotube based memory development and testing. Proc. IEEE Aerospace Conf; 2007 March 3 -10; Big Sky, MT, USA. 1-5.
- (33) Knoll A, Bächtold P, Bonan J, Cherubini G, Despont M, Drechsler U, et al. Integrating nanotechnology into a working storage device. Microelectronic Engineering. 2006;83:1692-1697.
- (34) Tanaka K, Kurihashi Y, Uda T, Daimon Y, Odagawa N, Hirose R, et al. Scanning nonlinear dielectric microscopy nano-science and technology for next generation high density ferroelectric data storage. Japanese Journal of Applied Physics. 2008;47(5PART1):3311-3325.
- (35) Wright CD, Armand M, Aziz MM, Bhaskaran H, Choo BC, Davies C, et al. Scanning probe-based phase-change terabyte memories. European Phase Change and Ovonic Symposium. 2008.
- (36) Wang L, Wright CD, Shah P, Aziz MM, Sebastian A, Pozidis H, et al. Ultra high density scanning electrical probe phase-change memory for archival storage. Japanese Journal of Applied Physics. 2011;50(9PART2):1-2.
- (37) Psaltis D, Burr GW. Holographic data storage. Computer. 1998;31(2):52-60.
- (38) Lanciloti M. Holographic data storage - A new archival solution for the professional market. EBU Technical Review. 2006;307:1-8.
- (39) Burr GW. Holographic storage. Encyclopedia of Optical Engineering. 2003:1-15.
- (40) Kozicki MN, Park M, Mitkova M. Nanoscale memory elements based on solid-state electrolytes. IEEE Transactions on Nanotechnology. 2005; 4(3):331-338.
- (41) Hönigschmid H. A non-volatile 2 Mbit CBRAM memory corefeaturing advanced read and program control. Symp. VLSI Circuits Dig. Tech. Papers. 2006:839 - 845.
- (42) Liaw C, Kund M, Schmitt-Landsiedel D, Ruge I. The conductive bridging random access memory (CBRAM): A non-volatile multi-level memory technology. Solid State Device Research Conf, ESSDERC 2007, 37th European; 2007 Sept. 11-13: 226 – 229.
- (43) Parkin SSP, Hayashi M, Thomas L. Magnetic domain-wall racetrack memory. Science. 2008; 320(5873):190-194.
- (44) Hayashi M, Thomas L, Moriya R, Rettner C, Parkin SSP. Current-controlled magnetic domain-wall nanowire shift register. Science. 2008;320(5873): 209-211.

- (45) Ozatay O, Mather PG, Thiele J-U, Uauet T, Bragancea PM. Handbook of Nanoscale Optics and Electronics. In: Wiederrecht GP, editor. Spin-based data storage. Elsevier; 2010. p.246.
- (46) Schwee LJ. Stability conditions for neel walls and crosstie walls in thin magnetic films. AIP Conf. Proc(10).1972:996.
- (47) Humphrey FB, Wu JC. Vertical bloch line memory. IEEE Trans. Magn. 1985:21(5).
- (48) Hönigschmid H. A non-volatile 2Mbit CBRAM memory core featuring advanced read and program control. Symp. VLSI Tech. 2006:138-139.
- (49) Baek IG, Lee MS, Seo S, Lee MJ, Seo DH, Suh DS, et al. Highly scalable non-volatile resistive memory using simple binary oxide driven by asymmetric unipolar voltage pulses. Technical Digest - International Electron Devices Meeting, IEDM. 2004:587-590.