

หน่วยความจำเปลี่ยนเฟส : เทคโนโลยีบันทึกข้อมูลแห่งอนาคต ตอนที่ 1

Phase Change Memory: The Future of Data Storage Technology Part I

สันชัย หาญสูงเนิน¹Sanchai Harnsoongnoen¹

Received: 30 March 2012; Accepted: 10 June 2012

บทคัดย่อ

เทคโนโลยีหน่วยความจำเปลี่ยนเฟสเป็นเทคโนโลยีหน่วยความจำแบบไม่ลบเลือนแห่งอนาคต ที่ได้รับการคาดหมายว่าจะเข้ามาแทนที่เทคโนโลยีหน่วยความจำแฟลชที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เนื่องจากมีข้อได้เปรียบเทคโนโลยีหน่วยความจำชนิดอื่นหลายด้าน เช่น โครงสร้างของเซลล์มีขนาดเล็กและไม่ซับซ้อน สามารถผลิตได้กับเทคโนโลยีแบบซีมอส สามารถบันทึกข้อมูลได้มากกว่า 1 บิตใน 1 เซลล์ และเป็นเทคโนโลยีหน่วยความจำแบบไม่ลบเลือน เป็นต้น เทคโนโลยีหน่วยความจำเปลี่ยนเฟสทำงานโดยอาศัยคุณสมบัติพิเศษของวัสดุในกลุ่มชัลโคจีไนด์ที่สามารถเปลี่ยนเฟสกลับไปมาระหว่างสถานะอสัณฐานและสถานะผลึก โดยการควบคุมขนาดและช่วงเวลาในการไบแอสของสัญญาณไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างพลังงานความร้อนให้แก่วัสดุเปลี่ยนเฟส

บทความนี้เป็นการนำเสนอบทนำเกี่ยวกับเทคโนโลยีหน่วยความจำเปลี่ยนเฟส โดยจะอธิบายถึงประวัติความเป็นมา คุณสมบัติของวัสดุเปลี่ยนเฟส โครงสร้างวัสดุเปลี่ยนเฟส การปลูกฟิล์มบางของวัสดุเปลี่ยนเฟส และหลักการทำงานของหน่วยความจำเปลี่ยนเฟส เป็นต้น

คำสำคัญ: เทคโนโลยีบันทึกข้อมูล หน่วยความจำแบบไม่ลบเลือน หน่วยความจำเปลี่ยนเฟส

Abstract

Phase change memory (PCM) is one of the most promising candidates for the next generation of non-volatile memories that are being considered to replace the currently dominant Flash memories. The replacement has better properties when compared with other emerging memory technologies. The improved qualities include small structure and simplicity, low additional cost with respect to baseline CMOS, Multi-level cell (MLC) and non-volatile memory. The principle of PCM is based on the chalcogenide material's ability to be reversibly structurally transformed between highly resistive amorphous and lowly resistive crystalline by controlling the amplitude and time of application of an electrical pulse for thermally induced phase change of a chalcogenide material.

This paper provides an introduction to phase change memory technology describing the principle: history, properties and structure of phase change materials, thin film deposition and the principles of the phase change operation.

Keywords: Data Storage Technology, Non-volatile Memory, Phase Change Memory

¹ อาจารย์, ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

¹ Lecturer, Department of Physics, Faculty of Science, Mahasarakham University, Kantharawichi District, Maha Sarakham, 44150, Thailand.

บทนำ

ปัจจุบันความต้องการของผู้บริโภคที่จะนำเอาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพา และอุปกรณ์สมองกลฝังตัวมาประยุกต์ใช้งานในชีวิตประจำวันมีแนวโน้มสูงขึ้นเป็นลำดับ ส่งผลให้ส่วนแบ่งทางการตลาดของอุปกรณ์หน่วยความจำมีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้งในระดับประเทศ และทั่วโลก หน่วยความจำที่ได้รับความนิยมและกลายมาเป็นผลิตภัณฑ์หลักในปัจจุบัน คือ หน่วยความจำ DRAM (Dynamic Random Access Memory) และหน่วยความจำแฟลช เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคในการใช้หน่วยความจำที่มีความจุสูงๆ การลดขนาดของเซลล์เพื่อเพิ่มความจุของหน่วยความจำจึงกลายมาเป็นเป้าหมายหลักของเทคโนโลยีหน่วยความจำชนิดดังกล่าว จากรายงานของ ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors) DRAM และหน่วยความจำแฟลชสามารถลดขนาดของเซลล์ ใน 1 หน่วยเซลล์ลงต่ำสุดได้ $5\text{-}12F^2$ (F : minimum feature size) แต่อย่างไรก็ตามเมื่อลดขนาดของเซลล์ลง เสถียรภาพของหน่วยความจำก็ลดลงไปด้วย โดย DRAM นั้นมีข้อจำกัดหลายอย่างที่ตึงค้ำึง เช่น กระบวนการในการจัดเก็บข้อมูล กระบวนการในการสร้างตัวเก็บประจุที่มีชั้นสารหลายชั้น การอ่านข้อมูลที่เป็นการอ่านแบบทำลาย และการจัดเก็บข้อมูลที่เป็นแบบลบเลื่อน สำหรับข้อจำกัดของหน่วยความจำแฟลช เป็นเรื่องเกี่ยวกับคุณสมบัติทางด้านกายภาพของฉนวนออกไซด์ที่ไม่สามารถกักเก็บประจุไว้ได้เมื่อความหนาของชั้นฉนวนออกไซด์มีขนาดบางมากๆ นอกจากนั้นในกระบวนการเขียนยังคงใช้พลังงานในปริมาณที่สูง ข้อจำกัดเหล่านี้ล้วนแล้วแต่เป็นอุปสรรคที่ทำให้หน่วยความจำทั้งสองไม่สามารถลดขนาดให้เล็กลงไปได้ต่ำกว่าเทคโนโลยีโนด 16nm จากอุปสรรคและข้อจำกัดดังกล่าวข้างต้นทำให้มีการค้นคว้าและพัฒนาหน่วยความจำชนิดใหม่ๆ ขึ้นมาอย่างต่อเนื่อง โดยคาดหวังว่าจะนำมาใช้ทดแทนหน่วยความจำทั้งสองชนิดข้างต้น โดยคุณสมบัติพื้นฐานของเทคโนโลยีหน่วยความจำที่คิดค้นขึ้นมาใหม่นั้นควรคงไว้ซึ่งคุณสมบัติที่ดีของเทคโนโลยีทั้งสองชนิดข้างต้น เช่น มีความหนาแน่นสูง สามารถสร้างโดยกระบวนการซีมอส อ่านเขียนได้เร็ว มีเสถียรภาพ ใช้พลังงานต่ำ เข้าถึงข้อมูลโดยการสุ่มอ่านเขียนซ้ำได้หลายล้านรอบ มีความทนทาน สามารถเก็บข้อมูลได้นานหลายสิบปี มีกระบวนการผลิตที่ไม่ซับซ้อน และมีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำ เป็นต้น ถ้าพิจารณาจากความสามารถและประสิทธิภาพในการผลิตรวมถึงการนำมาใช้งานได้จริงของเทคโนโลยีหน่วยความจำชนิดใหม่ในปัจจุบัน แบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ได้แก่ หน่วยความจำแบบเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric Random Access Memory, FeRAM), หน่วยความจำแบบ

แมกเนตโตรีซิสทีฟ (Magnetic Random Access Memory, MRAM), และหน่วยความจำเปลี่ยนเฟส (PCM) หน่วยความจำทั้งสามชนิดนี้เป็นเทคโนโลยีหน่วยความจำที่กำลังได้รับความสนใจและอยู่ในช่วงของการพัฒนา ถึงแม้ว่า FeRAM และ MRAM จะมีประสิทธิภาพที่เหนือกว่า PCM ในหลายๆ ด้าน เช่น อ่านเขียนได้เร็วกว่า มีความน่าเชื่อถือในการบันทึกข้อมูลสูงกว่า ใช้พลังงานในการอ่านเขียนต่ำกว่า และเขียนซ้ำได้หลายครั้งกว่า แต่ถ้ามองคุณลักษณะที่มีความเหมาะสมที่จะเป็นหน่วยความจำในด้านเชิงการค้า PCM มีความเหมาะสมมากกว่า เนื่องจากมีกระบวนการในการผลิตไม่ซับซ้อน สามารถผลิตได้กับเทคโนโลยีแบบซีมอส (CMOS), มีขนาดเซลล์ที่เล็กกว่า และที่สำคัญสามารถพัฒนาให้ทำการบันทึกข้อมูลได้มากกว่า 1 บิตใน 1 เซลล์ ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลให้ PCM เป็นหน่วยความจำที่มีความน่าสนใจและถูกคาดหวังว่าจะเป็นหน่วยความจำแบบไม่ลบเลื่อนแห่งอนาคต การเปรียบเทียบคุณสมบัติโดยสรุปของเทคโนโลยีบันทึกข้อมูลชนิดต่างๆ ได้แสดงไว้ใน Table 1 ซึ่งพบว่า SRAM และ DRAM จะมีความโดดเด่นในเรื่องของความเร็วในการเข้าถึงข้อมูล โดยเฉพาะ SRAM แต่ SRAM ก็มีต้นทุนในการผลิตที่สูงเพราะต้องใช้ทรานซิสเตอร์ตั้งแต่ 4-6 ตัวในการสร้างหน่วยความจำ 1 เซลล์ ในขณะที่ DRAM ถึงแม้จะสามารถผลิตด้วยกระบวนการ CMOS ได้ดี และมีต้นทุนที่ต่ำกว่า SRAM แต่เป็นเทคโนโลยีแบบลบเลื่อน ไม่สามารถนำมาทดแทนหน่วยความจำแฟลชได้ จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า PCM มีคุณสมบัติที่เหมาะสมที่จะเป็นหน่วยความจำแบบไม่ลบเลื่อนแห่งอนาคตเพื่อเป็นการปูพื้นฐานความเข้าใจเกี่ยวกับเทคโนโลยีหน่วยความจำเปลี่ยนเฟส ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่จะเข้ามามีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของเราในอนาคตอันใกล้ การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของ PCM จึงเป็นสิ่งสมควรสำหรับผู้อ่านที่มีความสนใจเกี่ยวกับเทคโนโลยีหน่วยความจำ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญของอุปกรณ์อ่านหน่วยความจำที่ทันสมัยต่างๆ ในปัจจุบัน

Table 1 Performance comparisons between existing mainstream memory technologies and emerging memory technologies.

Property / Type	SRAM	DRAM	Flash	FeRAM	MRAM	PCRAM
Maturity	High volume Products	High volume Products	High volume Products	Niche Products	Product Samples	Product Demonstrators
Nonvolatile	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes
Cell Size (F ²)	140	6-12	5-10	22	20	4.8
CMOS Compatibility	Bad	Good	Yes, but Hi V	Yes, but Hi V	Yes	Good
Random Read Access	0.3ns	1-10ns	10-50ns	45ns	20ns	60ns
Random Write Access	0.3ns	0.7-10ns	1us/10ms	10ns	20ns	50ns/120ns
Destructive Read	Yes	Yes	No	Yes	No	No
Write Endurance	>3x10 ¹⁶	>3x10 ¹⁶	>10 ⁵	1x10 ⁺¹⁴	>3x10 ¹⁶	1x10 ⁺⁸
Write Voltage	1.1V	2.5V	12-15V	0.9-3.3V	1.5V	3V
Read Voltage	1.1V	2V	2V	0.9-3.3V	1.5V	3V
Multilevel Storage	No	No	Yes	No	No	Yes

ประวัติความเป็นมาของหน่วยความจำเปลี่ยนเฟสมนุษย์รู้จักนำวัสดุเหมือนแก้วและผลึกมาใช้งานเป็นเวลานานนับพันๆ ปีมาแล้ว วัสดุจำนวนมากมีสถานะเป็นอสัณฐาน ณ อุณหภูมิห้อง เช่น แก้ว แต่อย่างไรก็ตามเมื่อแก้วได้รับพลังงานที่เหมาะสมก็สามารถเปลี่ยนสถานะจากอสัณฐานกลายเป็นผลึกได้ คุณสมบัติทางกายภาพของสถานะทั้งสองนี้มีความแตกต่างกันเป็นอย่างมาก เช่น คุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางแสง มีความเป็นไปได้ที่จะทำการเปลี่ยนสถานะของวัสดุเปลี่ยนเฟสให้มีเฟสกลับไปกลับมาได้ระหว่างสถานะอสัณฐานและผลึก โดยการควบคุมปริมาณและระยะเวลาในการให้พลังงานแก่วัสดุเปลี่ยนเฟส การค้นพบเกี่ยวกับวัสดุเปลี่ยนเฟส² และอุปกรณ์หน่วยความจำ³ ได้ถูกจดสิทธิบัตรเป็นครั้งแรกโดยกลุ่มวิจัยของ Bell Telephone ซึ่งพวกเขาได้อธิบายว่าอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจากโลหะผสม As-Te-I นั้นสามารถทำให้มีความต้านทานสองค่าได้ โดยจะเกิดขึ้นในช่วงของความต้านทานเชิงลบ (Negative resistance) ซึ่งความต้านทานทั้งสองค่าดังกล่าวก็คือความต้านทานที่เกิดขึ้นกับวัสดุในสถานะอสัณฐาน และผลึกนั่นเอง ดร. สแตนฟอร์ด โอชินสกี (Dr. Standforh Ovshinsky) ได้ทำการจดสิทธิบัตร^{4,5} และตีพิมพ์ผลการทดลองเกี่ยวกับการเปลี่ยนเฟสของวัสดุในปี ค.ศ. 1960 โดยได้อธิบายว่าโลหะผสม $\text{Te}_{48}\text{As}_{30}\text{Si}_{12}\text{Ge}_{10}$ สามารถเปลี่ยนเฟสไปมาได้ระหว่างสถานะความต้านทานไฟฟ้าต่ำ และความต้านทานไฟฟ้าสูง นอกจากนั้นเขายังได้เสนอแนวคิดที่จะสร้างหน่วยความจำแบบโซลิตสเตท (Solid State memory) โดยใช้หลักการพื้นฐานของวัสดุเปลี่ยนเฟสดังกล่าวข้างต้น⁴ ข้อจำกัดการพัฒนาหน่วยความจำโดยใช้หลักการเปลี่ยนเฟสของวัสดุในขณะนั้น คือ ใช้เวลาและปริมาณกระแสในการเปลี่ยนเฟสนาน (ระดับไมโครวินาที) และสูง (ระดับร้อยมิลลิแอมแปร์) ตามลำดับ⁶ อย่างไรก็ตาม เฟียนเลียบ (Feinleib) และคณะ⁷ เป็นกลุ่มแรกที่อธิบายเกี่ยวกับการกระตุ้นให้โลหะผสม $\text{Te}_{81}\text{Ge}_{15}\text{Sb}_2\text{S}_2$ เกิดการเปลี่ยนเฟสได้โดยใช้เลเซอร์ ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานที่สำคัญในการผลิตหน่วยความจำเชิงแสงที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เช่น CD-RW, DVD-RW และ Blu-ray™ disks (BD)^{8,9,10,11,12} เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตาม การทำให้โลหะผสม $\text{Te}_{81}\text{Ge}_{15}\text{Sb}_2\text{S}_2$ เกิดการเปลี่ยนเฟสก็ยังคงต้องใช้ระยะเวลาที่นาน หลังจากนั้นงานวิจัยเกี่ยวกับวัสดุเปลี่ยนเฟสก็ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1986 ยามาตะ (Yamada) และคณะ¹³ ได้ค้นพบวัสดุที่สามารถเปลี่ยนเฟสได้เร็วขึ้น ซึ่งเป็นวัสดุที่อยู่บน line pseudobinary ระหว่าง GeTe และ Sb_2Te_3 วัสดุดังกล่าวถูกนำมาผลิตเป็นหน่วยความจำเปลี่ยนเฟสเชิงแสงที่ได้รับความนิยมและประสบความสำเร็จมากในเชิงการค้า Figure 1 เป็น

แผนภาพแสดงการประกอบกันของโลหะผสมที่ค้นพบและนำไปสร้างเป็นผลิตภัณฑ์หน่วยความจำเชิงแสง¹⁴

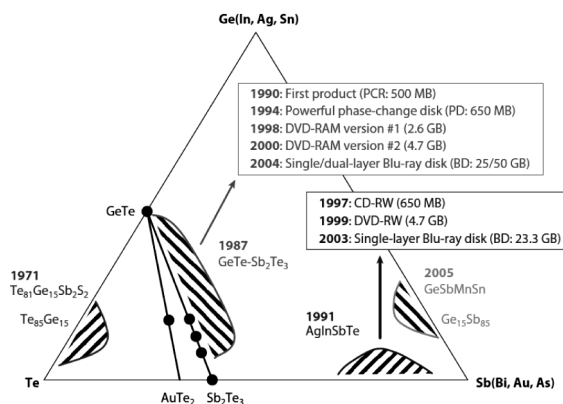


Figure 1 Ternary diagram depicting different phase change alloys¹⁵.

การค้นพบเกี่ยวกับหน่วยความจำเปลี่ยนเฟสได้รับความสนใจจากบริษัทต่างๆ เป็นจำนวนมาก เช่น Numerous companies¹⁶, Hitachi¹⁷, Renesas¹⁷, IBM¹⁸, Qimonda¹⁸, Macronix¹⁸, Intel¹⁹, NXP²⁰, Samsung²¹, and STMicroelectronics²² เป็นต้น จากความสนใจดังกล่าวทำให้บริษัทเหล่านี้ได้ทุ่มเทให้กับการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีหน่วยความจำเปลี่ยนเฟสอย่างจริงจัง โดยสังเกตได้จากข้อมูลเกี่ยวกับการจดสิทธิบัตรพบว่า มีสิทธิบัตรเกี่ยวกับหน่วยความจำเปลี่ยนเฟสน้อยกว่า 10 ชิ้น ในระหว่างปี ค.ศ. 1966-1997 และมีจำนวนเพิ่มขึ้นมากกว่า 100 ชิ้นในปี ค.ศ. 2006-2007²³ จากการวิจัยและพัฒนาอย่างมุ่งมั่นของบริษัทต่างๆ รวมไปถึงสถาบันและหน่วยวิจัยที่ทำวิจัยเกี่ยวกับหน่วยความจำเปลี่ยนเฟส ทำให้คาดการณ์ว่าผลงานการวิจัยเหล่านั้น จะถูกนำมาผลิตเป็นสินค้าในเชิงพาณิชย์ ในอนาคตอันใกล้นี้ หนึ่งในความสนใจที่ได้รับการศึกษาและวิจัยมากที่สุด คือเรื่องวัสดุเปลี่ยนเฟส ซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

วัสดุเปลี่ยนเฟส

การเปลี่ยนเฟสกลับไปมาได้ระหว่างสองสถานะเกิดขึ้นได้กับวัสดุจำนวนมาก เช่นวัสดุในกลุ่มของโลหะออกไซด์ต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น แทนทาลัมออกไซด์ (tantalum oxide)²⁴, นิกเกิลออกไซด์ (nickel oxide)²⁵, ออกไซด์ของโลหะทรานซิชัน (transition metal oxide)²⁶ หรือวัสดุในกลุ่มสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอนที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (amorphous silicon)²⁷, โครงสร้างที่มีการเชื่อมต่อแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (metal-semiconductor-metal structure)²⁸ เป็นต้น นอกจากวัสดุทั้ง 2 กลุ่มข้างต้นแล้ว ยังมีวัสดุอีกกลุ่มหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนเฟสได้ และกำลังได้รับความสนใจอยู่ในปัจจุบัน คือ

วัสดุในกลุ่ม ชาลโคไจไนด์ (Chalcogenide)^{29,30} ซึ่งเป็นวัสดุที่มีอะตอมของสารที่อยู่ในคอลัมน์ที่ 6 ของตารางธาตุแบบเพริออดิก (Periodic) ซึ่งมี Se, Te และ Sb เป็นส่วนประกอบหรือเรียกอีกอย่างว่า ซาโคเจน ถึงแม้ว่าจะมีวัสดุจำนวนมากที่สามารถเปลี่ยนเฟสกลับไปมาได้ แต่มีวัสดุเพียงไม่กี่ชนิดเท่านั้นที่มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับนำมาผลิตเป็นหน่วยความจำแบบไม่ลบเลือนชนิดเปลี่ยนเฟสที่สามารถทำการอ่านและเขียนซ้ำได้หลายล้านรอบโดยที่ไม่เกิดความเสียหายขึ้นกับโครงสร้างของวัสดุเหล่านั้น จากการสำรวจงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าวัสดุในกลุ่มชาลโคไจไนด์เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมในการนำไปใช้งานมากที่สุด โดยเฉพาะการนำไปสร้างเป็นหน่วยความจำเชิงแสง การเปลี่ยนเฟสของวัสดุสามารถควบคุมได้จากขนาดและช่วงเวลาในการให้ความร้อนโดยเลเซอร์ ผลที่ได้ทำให้ค่าการสะท้อนแสงของวัสดุมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งวัสดุในกลุ่มชาลโคไจไนด์สามารถแยกย่อยออกได้หลายกลุ่มตามจำนวนของสารที่นำมาผสมกันเป็นสารประกอบ เช่น สารประกอบที่เกิดจากการรวมกันของธาตุจำนวน 2 ธาตุ, 3 ธาตุ หรือแม้แต่ 4 ธาตุ ดังแสดงใน Table 2

Table 2 Chalcogenide materials of various compositions as tested for phase-change recording.

Binary	Ternary	Quaternary
GaSb	$\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$	AgInSbTe
InSb	InSbTe	$(\text{GeSn})\text{SbTe}$
InSe	GaSeTe	$\text{GeSb}(\text{SeTe})$
Sb_2Te_3	SnSb_2Te_4	$\text{Te}_{81}\text{Ge}_{15}\text{Sb}_{22}\text{S}_2$
GeTe	InSbGe	

จากตารางที่ 3 พบว่ามีสารประกอบชาลโคไจไนด์อยู่ด้วยกันหลายกลุ่ม แต่สารประกอบชาลโคไจไนด์ที่ได้รับความนิยมนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์บันทึกข้อมูลมากที่สุดคือ สารประกอบในกลุ่ม Ge-Sb-Te และ Ag-In-Sb-Te เพราะเป็นสารที่มีเสถียรภาพของเฟสสูง และสามารถเปลี่ยนเฟสได้เร็ว โดย Ge-Sb-Te นิยมนำมาใช้ในการสร้าง PD (Powerful Disk), DVD-RAM และ PCM ส่วน Ag-In-Sb-Te นิยมนำมาสร้างเป็น CD-RW และ DVD-RW ข้อดีของ Ge-Sb-Te คือมีอัตราเร็วในการเป็นผลึกสูง ซึ่งมีค่าประมาณ 100ns ในขณะที่การเปลี่ยนเฟสจากโครงสร้างแบบอสัณฐานไปเป็นโครงสร้างแบบผลึก ใช้เวลาเพียง 50ns เท่านั้น จากการศึกษาของเซา (Zhou) และจาคอบส์ (Jacobs)³¹ พบว่า เมื่อความหนาของสาร Ge-Sb-Te มีค่าลดลงจะส่งผลให้อัตราเร็วในการเปลี่ยน

เฟสลดลงตามไปด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเจือสารชนิดต่าง ๆ ผสมเข้าไป จะทำให้อัตราเร็วในการเปลี่ยนเฟสมีค่าสูงขึ้น เช่น ดีบุก (Sn)^{32,33,34}, สังกะสี (Zn)³⁵, เหล็ก (Fe)³⁵, บิสมัท (Bi)³⁵, อะลูมิเนียม (Al)³⁶, เงิน (Ag)³⁷, และซิลิกอน (Si)³⁸ เป็นต้น นอกจากการเพิ่มอัตราเร็วในการเป็นผลึกของสาร Ge-Sb-Te แล้ว การลดขนาดของกระแสในการไบแอสก็เป็นปัจจัยสำคัญที่จะต้องเร่งแก้ไข วิธีหนึ่งที่จะช่วยลดกระแสไบแอสให้มีค่าต่ำลง คือการเพิ่มค่าความต้านทานให้กับ Ge-Sb-Te ซึ่งสามารถทำได้โดยการเจือสารชนิดอื่นเพิ่มเข้าไป เช่น ไนโตรเจน (N)^{39,40,41,42,43}, ออกซิเจน (O)^{43,44,45} และสารชนิดอื่นๆ เป็นต้น นอกจากการเพิ่มความต้านทานให้วัสดุเปลี่ยนเฟสแล้วการลดขนาดของกระแส ยังสามารถทำได้โดยการลดขนาดและความหนาของจุดเชื่อมต่อระหว่างชั้นสารทำความร้อน (heater) กับชั้นสาร Ge-Sb-Te ซึ่งจะได้อธิบายในลำดับต่อไป จาก Figure 1 พบว่ามีการนำสารชาลโคเจนมาสังเคราะห์เป็นสารประกอบต่างๆ ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างเป็นหน่วยความจำเชิงแสง ที่สามารถพัฒนาเป็นสินค้าในเชิงพาณิชย์ ได้แก่ phase-change recording, phase-change disc, DVD-RAM, CD-RW, DVD-RW, Blu-ray™ disks⁴⁶, HD-DVD⁴⁷ และ PCRAM (phase change random access memory)⁴⁸ เป็นต้นเพื่อให้เกิดความเข้าใจอย่างลึกซึ้งเกี่ยวกับวัสดุเปลี่ยนเฟส การศึกษาโครงสร้างพื้นฐานของวัสดุเปลี่ยนเฟส จึงเป็นสิ่งสมควรสำหรับผู้อ่านที่สนใจ

โครงสร้างของวัสดุเปลี่ยนเฟส

วัสดุเปลี่ยนเฟสที่ได้รับความสนใจและมีการศึกษาเพื่อที่จะนำมาสร้างเป็นหน่วยความจำเปลี่ยนเฟสมากที่สุดคือ สารประกอบ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ ซึ่งอยู่บน line pseudobinary ระหว่าง GeTe และ Sb_2Te_3 ดังแสดงใน Figure 1 ลักษณะพิเศษของสารประกอบ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ และสารประกอบอื่นๆ เช่น $\text{Ge}_1\text{Sb}_2\text{Te}_4$ หรือ $\text{Ge}_1\text{Sb}_4\text{Te}_7$ คือ สามารถเปลี่ยนโครงสร้างของผลึกที่เป็นแบบเกลือหิน (rocksalt) ไปเป็นแบบหกเหลี่ยม (hexagonal) ได้ เมื่อได้รับพลังงานความร้อน ดังแสดงใน Figure 2 โดย Figure 2(a) คือสารประกอบ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ ที่มีโครงสร้างแบบ rocksalt การก่อตัวเป็นผลึกที่อุณหภูมิประมาณ 140°C⁴⁹ ภายในโครงสร้างของผลึกจะพบอะตอม Te อยู่ที่ตำแหน่ง 4a ของหน่วยเซลล์ย่อย (sub-lattice) ส่วนอะตอม Ge และ Sb ซึ่งมีขนาดของอะตอมใหญ่กว่า Te จะอยู่ที่ตำแหน่ง 4b ของหน่วยเซลล์ย่อย เมื่อตำแหน่งดังกล่าวนี้มีอะตอม Ge หรือ Sb อยู่ไม่ครบ จะเกิดเป็นช่องว่างแบบสุ่มขึ้นซึ่งมีประมาณ 20% ของหน่วยเซลล์ย่อย จากการวัดโดยใช้เทคนิค EXAFS⁵⁰ และการคำนวณ DFT⁵¹ แสดงให้เห็นว่า

โครงสร้างแบบ rocksalt จะเกิดการบิดเบี้ยวและทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในโครงสร้าง ทำให้เสถียรภาพของโครงสร้างมีค่าต่ำ^{51,52} การบิดเบี้ยวขนาดหนักจะทำให้อัตราการเป็นผลึกของสารประกอบเหล่านี้มีค่าสูงขึ้น Figure 2(b) แสดงโครงสร้างสารประกอบ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ ที่เป็นแบบ hexagonal ประกอบไปด้วยอะตอมที่ซ้อนทับกันจำนวน 9 ชั้น โดยมีลำดับการเรียงตัวเป็น Te-Ge-Te-Sb-Te-Te-Sb-Te-Ge ในทิศทางระนาบของผลึก (0001)⁵³ การก่อตัวเป็นผลึกจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 310°C ⁴⁹ ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิการก่อตัวเป็นผลึกของโครงสร้างแบบ rocksalt โครงสร้างแบบ hexagonal ไม่ปรากฏให้เห็นในหน่วยบันทึกข้อมูลเชิงแสง แต่พบว่าเกิดกับหน่วยบันทึกข้อมูลแบบโซลิดสเตทแรมชนิดเปลี่ยนเฟส เพราะในกระบวนการปลูกผลึกในชั้น back-end จะประกอบไปด้วยการให้ความร้อนที่แผ่นเวเฟอร์ (wafer) ประมาณ 400°C เป็นเวลา 30 นาที จึงทำให้ผลึกได้รับพลังงานและเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างเกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีสารประกอบเปลี่ยนเฟสอีกหลายตัวที่สามารถนำไปสร้างเป็นหน่วยบันทึกข้อมูลเชิงแสงได้ ดัง Figure 1 ซึ่งโดยปกติหน่วยความจำเปลี่ยนเฟสที่สามารถทำงานได้ด้วยความเร็วสูงและมีเสถียรภาพจะมีโครงสร้างเป็นแบบคิวบิก (cubic) หรือ rocksalt อย่างไรก็ตามการนำวัสดุเปลี่ยนเฟสมาสร้างเป็นหน่วยความจำเปลี่ยนเฟสทั้งแบบเชิงแสงและแบบโซลิดสเตทแรม การศึกษาคุณสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าเป็นพื้นฐานที่สำคัญที่สุดในการเลือกวัสดุมาสร้างเป็นเซลล์หน่วยความจำเปลี่ยนเฟส หรือใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาและปรับปรุงเซลล์หน่วยความจำเปลี่ยนเฟส ซึ่งจะได้อธิบายต่อในหัวข้อถัดไป

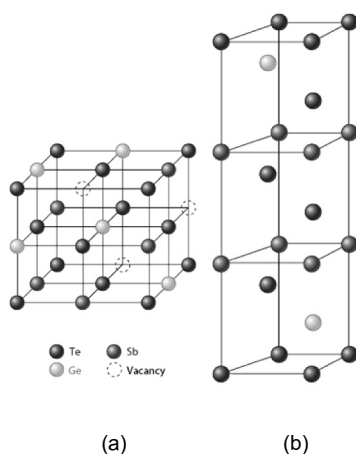


Figure 2 Crystal structure of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ in (a) the metastable rocksalt phase and (b) the stable hexagonal phase¹⁵

คุณสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าของวัสดุเปลี่ยนเฟส

คุณสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าของวัสดุเปลี่ยนเฟส เป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการนำไปประยุกต์สร้างเป็น PCM อย่างไรก็ตามการทำความเข้าใจเกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุเปลี่ยนเฟสที่ลึกและถูกต้องเป็นสิ่งที่สำคัญ เพราะจะทำให้ทราบถึงขีดจำกัดของวัสดุเปลี่ยนเฟสว่ามีศักยภาพในแต่ละด้านมากน้อยเพียงใด และควรที่จะทำการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ตลอดจนหารูปแบบที่เหมาะสมในการใช้งานวัสดุเหล่านี้ได้อย่างไร สำหรับการบันทึกข้อมูลด้วยแสงจะพิจารณาจากดัชนีการหักเหแสง (index refraction, n) สัมประสิทธิ์การสูญเสียแสง (extinction coefficient, κ) และสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (relate absorption coefficient α ($\alpha=4\pi\kappa/\lambda$)) เป็นหลัก เพราะค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จะเป็นค่าที่บอกถึงประสิทธิภาพในการดูดกลืนเลเซอร์ หรือความคมชัดของเลเซอร์นั่นเอง ค่าคงที่เชิงแสงที่กล่าวมาข้างต้นถูกควบคุมด้วยความยาวคลื่น λ หรือความหนาของฟิล์มบาง^{54,55,56,57} Figure 3 เป็นการแสดงค่าคงที่เชิงแสง (a) n (b) κ (c) α ของสาร $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ ในโครงสร้างผลึกแบบออสถฐาน, rocksalt และ hexagonal จากรูปแสดงให้เห็นว่าค่าคงที่เชิงแสงของโครงสร้างแบบออสถฐาน และ rocksalt มีความแตกต่างกันมาก แต่โครงสร้างแบบ rocksalt และ hexagonal จะมีความคล้ายคลึงกัน เมื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลเชิงแสงพบว่าความยาวคลื่นมีขนาดสั้นลงตามการเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยี ซึ่งการลดความยาวคลื่นลงจะช่วยเพิ่มความจุของหน่วยบันทึกข้อมูลเชิงแสงให้สูงขึ้นได้ แต่การลดขนาดความยาวคลื่นลงจะส่งผลให้ความคมชัดของแสงลดลง ซึ่งเป็นเหตุผลว่าทำไม Blu-ray discs จึงไม่ใช้สารประกอบ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ เป็นวัสดุในการจัดเก็บข้อมูล จากการวัดค่าคงที่เชิงแสงของสารประกอบตาม line pseudobinary ระหว่าง GeTe และ Sb_2Te_3 พบว่าความคมชัดของแสงจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของ Ge เข้าไปในสารประกอบ⁵⁵ ค่าพารามิเตอร์เชิงแสงที่สำคัญอีกค่าหนึ่งคือ ค่าแถบพลังงานเชิงแสง จากการวัดค่าพลังงานของสารประกอบ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ ด้วย Tauc plot พบว่าช่องว่างแถบพลังงานเชิงแสงของ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ ในโครงสร้างออสถฐานมีค่าประมาณ 0.5 eV แต่สำหรับโครงสร้างแบบ rocksalt และ hexagonal มีค่าประมาณ 0.7 eV จากการวัดการสะท้อนแสงในย่านอินฟราเรด (infrared, IR) ของวัสดุเปลี่ยนเฟส พบว่าสามารถแสดงคุณลักษณะการทำงานและความผิดปกติของพันธะต่างๆ ได้อย่างชัดเจน ทำให้สามารถอธิบายลักษณะพันธะชนิดพิเศษที่เกิดขึ้นกับวัสดุเปลี่ยนเฟสของ PCM ได้⁵⁸

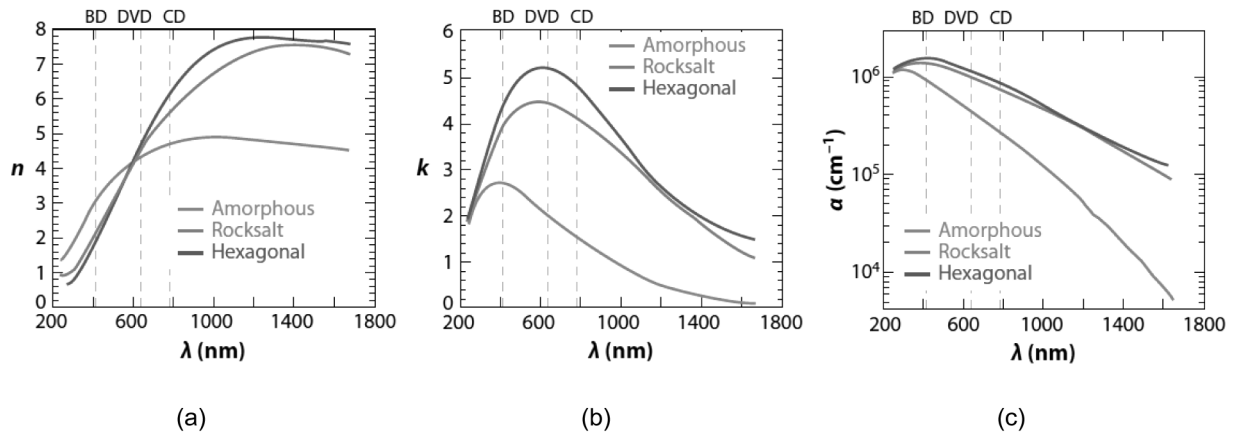


Figure 3 Optical constants (a) n (b) k (c) α of the amorphous, rocksalt, and hexagonal phases of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$. CD, DVD, and BD identifies the laser wavelength used for rewritable CDS, DVDs and Blu-ray discs, respectively¹⁵

จากการวัดสเปกตรัมการสะท้อนแสงของวัสดุเปลี่ยนเฟสชนิดต่างๆ พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนระหว่างโครงสร้างแบบอสัณฐาน และผลึก แต่มีความคล้ายคลึงกันกับสารกึ่งตัวนำทั่วไป เช่น AgInTe_2 ซึ่งมีความเร็วในการเปลี่ยนเฟสที่ช้าเมื่อนำมาสร้างเป็น PCM Figure 4 เป็นการแสดงการสะท้อนแสงอินฟราเรดที่ได้จากการวัดและการจำลองของสารประกอบ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_4$ โครงสร้างแบบอสัณฐานหนา 530nm ที่ปลูกอยู่บนชั้นฐานทองที่มีคุณสมบัติเกือบเหมือนกระจกโดยสมบูรณ์ จากการเปรียบเทียบผลระหว่างการจำลองกับการทดลองที่วัดในช่วงที่สารประกอบอยู่ในโครงสร้างแบบผลึก⁵⁸ เมื่อวัสดุเปลี่ยนเฟสอยู่ในสถานะผลึก ค่าความต้านทานของหน่วยความจำเปลี่ยนเฟสสามารถแสดงได้ดัง Figure 5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเกือบจะอยู่ในสถานะโอห์มมิก (ohmic) แต่เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นไปอีกจะทำให้วัสดุเปลี่ยนเฟสที่อยู่บริเวณจุดเชื่อมต่อระหว่างชั้นสารทำความร้อนกับวัสดุเปลี่ยนเฟสมีอุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากเกิด Joule Heating และเมื่อเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าขึ้นไปเรื่อยๆ จนถึงจุดที่เรียกว่ารีเซ็ต (Reset) วัสดุเปลี่ยนเฟสจะเกิดการหลอมเหลว เมื่อหยุดการให้กระแสไฟฟ้าอย่างรวดเร็วทำให้วัสดุเปลี่ยนเฟสที่หลอมเหลวเกิดการเย็นตัวอย่างฉับพลันส่งผลให้พันธะภายในโครงสร้างของวัสดุเปลี่ยนเฟสมีการยึดเกาะกันอย่างไม่เป็นระเบียบ เนื่องจากวัสดุเปลี่ยนเฟสไม่มีเวลาเพียงพอที่จะจัดเรียงอะตอมภายในเซลล์ให้เป็นระเบียบวัสดุเปลี่ยนเฟสดังกล่าวจึงเปลี่ยนสถานะจากผลึกไปเป็นสถานะอสัณฐานในที่สุด

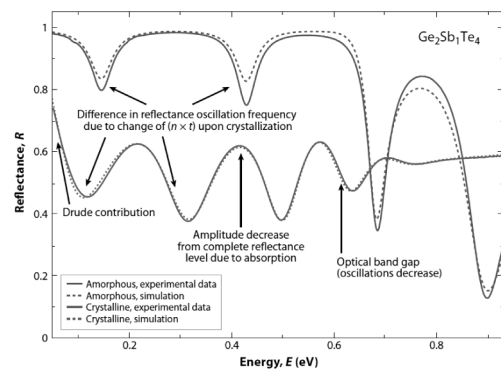


Figure 4 Infrared reflectance spectra of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_4$ film. Blue, amorphous state; red, crystalline state; solid lines, experimental data; dotted lines, simulations¹⁵.

จากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของวัสดุเปลี่ยนเฟสในสถานะที่เป็น อสัณฐานดังแสดงใน Figure 5 พบว่าสามารถแบ่งช่วงของค่าความต้านทานออกได้เป็นสองช่วง โดยในช่วงที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำๆ ความต้านทานจะมีค่าสูงมาก และเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นไปเรื่อยๆ จนถึงจุดที่เรียกว่าแรงดันวิกฤต (threshold voltage) ณ จุดดังกล่าวนี้ พบว่าเริ่มมีปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบเกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม ณ สถานะดังกล่าวสถานะของวัสดุเปลี่ยนเฟสยังคงเป็นอสัณฐาน แต่เมื่อทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นไปอีกวัสดุเปลี่ยนเฟสจะค่อยๆ เปลี่ยนสถานะจากอสัณฐานกลายเป็นสถานะผลึกจนกระทั่งไปถึงจุดที่เรียกว่าเซต (Set) วัสดุเปลี่ยนเฟสจะมีสถานะเป็นผลึกจนสามารถนำไฟฟ้าได้ดังเดิม ซึ่งสถานะดังกล่าวนี้สามารถกระทำได้โดยการให้พลังงานความร้อนจาก Joule Heating โดยที่วัสดุเปลี่ยนเฟสยังไม่เกิดการหลอมเหลว ซึ่งจะทำให้วัสดุเปลี่ยนเฟสมีค่าความต้านทานที่แตกต่างกันสองค่า ความต้านทานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสถานะ

อสมฐานนั้นสามารถคาดการณ์ได้ว่า เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของพาหะที่เปลี่ยนจากแถบวาเลนซ์ (Valence Band) ไปยังแถบนำ (Conduction Band) โดยได้รับพลังงานความร้อนที่มีค่ามากกว่ากำแพงศักย์ (Potential Barrier) กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนแบบ Poole-Frenkel ผ่านแถบว่างที่อยู่ระหว่างแถบวาเลนซ์กับแถบนำ โดยที่ระยะห่างของแถบว่างต่างๆ เหล่านี้จะมีผลกับค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของวัสดุเปลี่ยนเฟสในสถานะอสมฐาน⁵⁹

Figure 6 เป็นการแสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของวัสดุเปลี่ยนเฟสที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิที่ทำการศึกษาโดยฮานซาวา (Hanzawa) และคณะ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงสุดของสารประกอบเปลี่ยนเฟสที่ได้จากการศึกษามีค่าอยู่ระหว่าง 1 และ $10^4 \Omega\text{cm}$ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับนิดและองค์ประกอบของสารประกอบเมื่อวัสดุเปลี่ยนเฟสได้รับพลังงานความร้อนค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าลดลง เนื่องจากสารประกอบได้รับการกระตุ้นจากกลไกการนำความร้อนของสารที่อุณหภูมิ T_x

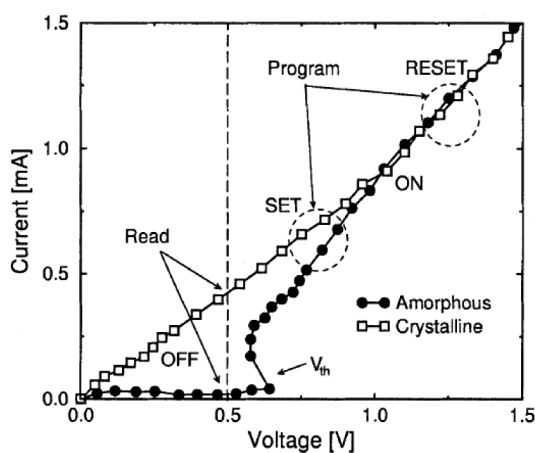


Figure 5 Experimental I-V curves for the crystalline and amorphous chalcogenide⁶⁰.

ซึ่งเป็นจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าอย่างฉับพลันจากค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงไปเป็นสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ อุณหภูมิ T_x จะมีค่าสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับชนิดของสารประกอบ จะพบว่าช่วงของอุณหภูมิ T_x ที่ใช้ในการเลือกสารประกอบนั้นจะมีค่าอยู่ระหว่าง 120°C และ 150°C ซึ่งช่วงอุณหภูมิดังกล่าวนี้จะเป็นช่วงที่ทำให้สารประกอบเปลี่ยนเฟสเปลี่ยนจากสถานะอสมฐานไปเป็นสถานะผลึก จาก Figure 6 พบว่า $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ ที่เจือไนโตรเจนจะมีลักษณะการเปลี่ยนเฟสแบบค่อยเป็นค่อยไป (gradual phase transition) เมื่อเปรียบเทียบกับ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ ที่ไม่มีการเจือธาตุใดเลยจะมีลักษณะการเปลี่ยนเฟสจากสถานะอสมฐานไปเป็นผลึกที่

อุณหภูมิประมาณ 160°C และจะมีการเปลี่ยนสถานะครั้งที่สองเกิดขึ้น โดยจะเปลี่ยนจากโครงสร้างผลึกแบบ rocksalt ไปเป็นผลึกแบบ hexagonal ที่อุณหภูมิประมาณ 330°C แต่เมื่อนำสารประกอบดังกล่าวไปทดสอบด้วย XRD (X-Ray Diffraction) พบว่าการเปลี่ยนเฟสจาก rocksalt ไปเป็น hexagonal เกิดขึ้น ณ อุณหภูมิใกล้เคียงกันกับสารประกอบ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ ที่ไม่มีการเจือ และเมื่อสารประกอบเย็นลงพบว่าสารประกอบยังคงมีสถานะเป็นผลึก และมีค่าสภาพต้านทานอยู่ระหว่าง 10^{-4} และ $10^{-2} \Omega\text{cm}$ จากทั้ง 3 หัวข้อที่กล่าวผ่านมาแล้วนั้น จะไม่สามารถเกิดขึ้นได้ หากไม่ได้ผ่านกระบวนการปลูกฟิล์มบางของวัสดุเปลี่ยนเฟสเพื่อใช้ในการศึกษา ดังนั้นกระบวนการปลูกฟิล์มบางสำหรับเทคโนโลยีหน่วยความจำเปลี่ยนเฟสจึงเป็นพื้นฐานที่มีอาจมองข้ามได้

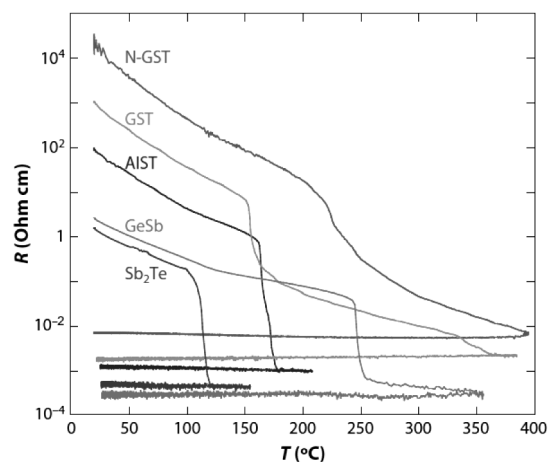


Figure 6 Resistivity as a function of temperature for 50-nm-thickness, as-deposited PCMs $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST), nitrogen-doped GST (N-GST), $\text{Ge}_{15}\text{Sb}_{85}$ (GeSb), Sb_2Te , and Ag-and In-doped Sb_2Te (AIST)¹⁵.

เทคนิคและกระบวนการในการปลูกฟิล์มของหน่วยความจำเปลี่ยนเฟส

จากหัวข้อที่ผ่านมาพบว่ามีการหลายชนิดที่สามารถเปลี่ยนเฟสได้ แต่มีสารเพียงไม่กี่ชนิดเท่านั้นที่มีความเหมาะสมสำหรับการนำมาใช้ในการสร้างเป็นอุปกรณ์บันทึกข้อมูลแบบเปลี่ยนเฟส ในบทความนี้จะกล่าวถึงเฉพาะสารที่อยู่ในกลุ่มซาลโคจีไนด์เท่านั้น เนื่องจากเป็นสารที่นิยมนำมาใช้ในการสร้างเป็นหน่วยความจำเปลี่ยนเฟสมากที่สุด โดย เฉพาะสารในกลุ่ม Ge/Sb/Te ซึ่งมีคุณสมบัติในการเปลี่ยนเฟสที่ดี และมีการนำไปสร้างเป็นหน่วยความจำเชิงแสงที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน แต่คุณสมบัติที่มีอยู่นี้ยังไม่เพียงพอสำหรับการนำไปสร้างเป็นหน่วยความจำแบบซิลิคอนสแตมชนิดเปลี่ยน

เฟส ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาและวิจัยเพื่อหาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของสารดังกล่าวให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการใช้ในการสร้างหน่วยความจำเปลี่ยนเฟสต่อไป จากวัตถุประสงค์ดังกล่าวจึงได้มีการปรับปรุงคุณสมบัติของสารในกลุ่ม Ge/Sb/Te โดยการเจือสารชนิดอื่นเข้าไปเพื่อช่วยในการปรับอัตราเร็วในการเป็นผลึกของสาร ตลอดจนเป็นการเพิ่มความต้านทานไฟฟ้าให้ค่าสูงขึ้น เช่น เจือธาตุออกซิเจน (O), ไนโตรเจน (N), สังกะสี (Zn), เหล็ก (Fe), บิสมัท (Bi), เงิน (Ag), ดีบุก (Sn) และอะลูมิเนียม (Al) ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ซึ่งการวิจัยและพัฒนาสารที่มีคุณสมบัติในการเปลี่ยนเฟสที่ดีนั้นยังคงมีการพัฒนากันอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามสิ่งที่ต้องมีการพัฒนาควบคู่กันไปกับการปรับปรุงคุณสมบัติของสารก็คือเทคนิคในการปลูกฟิล์ม ซึ่งการปลูกฟิล์มบางของวัสดุเปลี่ยนเฟส นั้นสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น

การปลูกด้วยไอเชิงเคมี (Chemical Vapor Deposition (CVD))⁶¹

- Atmospheric Pressure CVD (APCVD)
- Low-Pressure CVD (LPCVD)
- Ultrahigh Vacuum CVD (UHVCVD)
- Plasma-Enhanced CVD (PECVD)

การปลูกด้วยไอเชิงกายภาพ (Physical Vapor Deposition (PVD))

- Thermal Evaporative Deposition⁶²
- Electron Beam Physical Vapor Deposition
- Sputter Deposition (DC/RF Magnetron)
- Sputtering)⁶³
- Pulsed Laser Deposition⁶²

แต่สำหรับวิธีที่ได้รับความนิยมนำมาใช้ในการปลูกฟิล์มบางของสารชาลโคไนด์มากที่สุดคือ RF Magnetron Sputtering

หลักการทำงานของหน่วยความจำเปลี่ยนเฟส

หลักการทำงานของหน่วยความจำเปลี่ยนเฟสอาศัยคุณสมบัติการเปลี่ยนเฟสระหว่างโครงสร้างแบบอสัณฐานที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสูง กับโครงสร้างแบบผลึกที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำของวัสดุในกลุ่มชาลโคไนด์ ซึ่งการเปลี่ยนเฟสของวัสดุเปลี่ยนเฟสจะอาศัยพลังงานความร้อนที่ได้รับจากเลเซอร์ในกรณีที่เป็นการบันทึกข้อมูลเชิงแสง หรือพลังงานความร้อนที่ได้รับจากการไบแอสกระแสในกรณีที่เป็นการบันทึกข้อมูลแบบโซลิตสเททแรมชนิดเปลี่ยนเฟส พลังงานความร้อนที่ได้รับในปริมาณที่แตกต่างกัน

กันจะทำให้โครงสร้างของวัสดุมีคุณสมบัติแตกต่างกัน เช่น โครงสร้างที่เป็นแบบอสัณฐานจะมีโครงสร้างที่ไร้ระเบียบ มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสูง และมีสมบัติการสะท้อนแสงต่ำ ลักษณะโครงสร้างดังกล่าวเกิดขึ้นกับวัสดุเปลี่ยนเฟสได้โดยการยิงเลเซอร์หรือไบแอสด้วยกระแสขนาดสูงภายในช่วงเวลาสั้นๆ ดังแสดงใน Figure 7 (top) ซึ่งการที่ชั้นวัสดุเปลี่ยนเฟสได้รับพลังงานความร้อนสูง (มากกว่าจุดหลอมเหลว) จะทำให้ชั้นวัสดุเปลี่ยนเฟสเกิดการหลอมเหลว แต่เมื่อหยุดให้พลังงานจะทำให้วัสดุเปลี่ยนเฟสเกิดการเย็นตัวอย่างฉับพลัน ส่งผลให้สถานะของวัสดุเปลี่ยนเฟสที่เป็นของเหลวเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งแบบอสัณฐาน ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ทำให้โครงสร้างภายในของวัสดุเปลี่ยนเฟสมีการจัดเรียงตัวกันอย่างกระจัดกระจายไร้ระเบียบ ทั้งนี้เวลาที่จะใช้ในการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโครงสร้างของวัสดุไม่เพียงพอเพราะวัสดุถูกทำให้เย็นตัวอย่างฉับพลัน ในทางตรงกันข้ามเมื่อให้พลังงานความร้อนแก่โครงสร้างของวัสดุที่เป็น อสัณฐาน ด้วยพลังงานความร้อนที่อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่มากกว่าอุณหภูมิในการก่อตัวเป็นผลึก แต่น้อยกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว ด้วยเวลาที่มากพอสำหรับการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโครงสร้างของวัสดุเปลี่ยนเฟส วัสดุเปลี่ยนเฟสก็จะเปลี่ยนจากโครงสร้างที่ไร้ระเบียบมาเป็นโครงสร้างที่มีระเบียบได้อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถทำให้เกิดขึ้นสลับกันไปมาได้โดยการควบคุมขนาดและช่วงเวลาในการให้พลังงาน ดังแสดงไว้ใน Figure 7

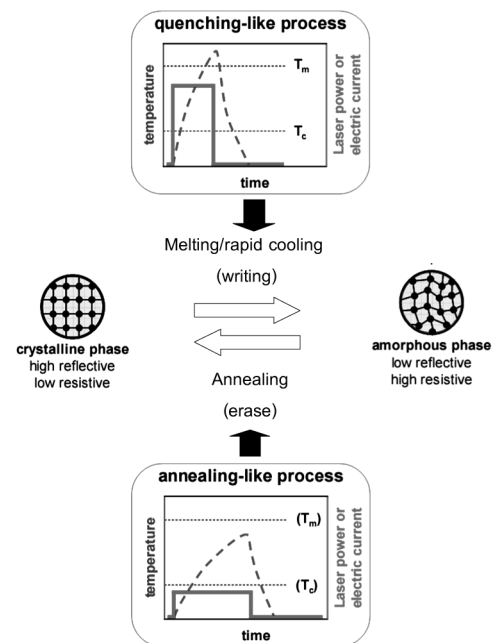


Figure 7 Operational working concepts of phase-change memory.

สรุป

หน่วยความจำเปลี่ยนเฟสทำงานโดยอาศัยคุณสมบัติพิเศษของสารในกลุ่มซัลโคไนด์ ที่สามารถเปลี่ยนเฟสกลับไปมาได้ระหว่างสถานะอสัณฐาน และสถานะผลึก โดยควบคุมการเปลี่ยนสถานะของวัสดุผ่านการให้พลังงานความร้อนโดยใช้แสงเลเซอร์ หรือกระแสไฟฟ้า ในกรณีที่จะทำให้วัสดุมีการเปลี่ยนสถานะจากอสัณฐานไปเป็นสถานะผลึก พลังงานความร้อนที่วัสดุได้รับจะต้องอยู่ในช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟส โดยใช้ระยะเวลาที่นานพอเพียงที่จะทำให้วัสดุมีการจัดโครงสร้างให้เป็นผลึกที่สมบูรณ์ การเปลี่ยนเฟสของวัสดุจากสถานะผลึกไปเป็นสถานะ ออสัณฐาน สามารถทำได้โดยการให้พลังงานความร้อนแก่วัสดุจนมีอุณหภูมิที่สูงกว่าจุดหลอมเหลว หลังจากนั้นทำให้วัสดุเย็นตัวอย่างรวดเร็ว วัสดุดังกล่าวจะมีสถานะกลับไปเป็นอสัณฐานอีกครั้ง จากคุณสมบัติพิเศษของวัสดุเปลี่ยนเฟสดังกล่าวข้างต้น จึงนำมาซึ่งการวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับเทคโนโลยีหน่วยความจำเปลี่ยนเฟสอย่างกว้างขวางดังเช่นในปัจจุบัน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ทุกท่านที่ช่วยตรวจสอบความถูกต้องของเนื้อหาตลอดจนให้คำแนะนำที่ดีในการปรับปรุงและแก้ไขข้อบกพร่องของบทความฉบับนี้

เอกสารอ้างอิง

1. International Technology Roadmap for Semiconductor (ITRS). Emerging Research Devices [online] 2007 cited 2009 sept 12]. Available from: http://www.itrs.net/Links/2007ITRS/2007_Chapters/2007_ERD.pdf
2. Northover WR, Pearson AD. 1964. Glass composition. US Patent No. 3,117,013.
3. Dewalt JF, Northover WR, Pearson AD. 1966. Multiple resistance semiconductor elements. US Patent No. 3,241,009.
4. Ovshinsky SR. 1966. Symmetrical current controlling device. U.S. Patent No. 3,271,591.
5. Ovshinsky SR. Reversible electrical switching phenomena in disordered structures. Phys Rev Lett 1968;22:1450-53.
6. Neale RG, Nelson DL, Moore GE. Nonvolatile and reprogrammable, the read mostly memory is here. Electronics 1970;30:56-60.
7. Feinleib J, deNeufville J, Moss SC, Ovshinsky SR. Rapid reversible light-induced crystallization of amorphous semiconductors. Appl Phys Lett 1971;18:254-57.
8. Yamada N. Rapid phase-transition of GeTe-Sb₂Te₅ pseudobinary amorphous thin films for an optical disk memory. J Appl Phys 1991;69: 2849-2856.
9. Kolobov AV et al. Understanding the phase-change mechanism of rewritable optical media. Nature Mater 2004;3:703-708.
10. Chen M, Rubin K, Barton R. Compound materials for reversible, phase-change optical data storage. Appl Phys Lett 1986;49:502-504.
11. Tyson S, Wicher G, Lowrey T, Hudgens S, Hunt K. Nonvolatile, high density, high performance phase-change memory, in Proc Aero Space Conf 2000;5:385-390.
12. Coombs J, Jongenelis A, Spiekman WVE, Jacobs B. Laserinduced crystallization phenomena in Ge-Te based alloys. I. Characterization of nucleation and growth. J Appl Phys 1995;78:4906-4917.
13. Yamada N, Ohno E, Akahira N, Nishiuchi K, Nagata K et al. High speed overwritable phase change optical disc material. Jpn J Appl Phys 1971;198726(Suppl. 4): 61-66.
14. Wuttig M, Yamada N. Phase-change materials for rewritable data storage. Nat Mater 2007; 6:824-32.
15. Simone R, Matthias W. Phase change materials. Annual Review of Material Research 2009;39: 25-48.
16. Li B, Bumgarner A, Pirkel D, Stobie J, Neiderer W et al. A 4-Mbit non-volatile Chalcogenide random access memory designed for space applications. Proc Non-Volatile Memory Technol Symp, San Mateo, CA; 2006. p. 64-70.
17. Hanzawa S, Kitai N, Osada K, Kotabe A, Matsui Y et al. A 512 kB embedded phase change memory with 416 kB/s write throughput in a 100 μ A cell written current. Int Solid-State Circuits Conf, San Francisco, CA; 2007.p. 474-75.
18. Nirschl T, Phillip JB, Happ TD, Burr GW, Rajendran B et al. Write strategies for 2 and 4-bit multi-level phase-change memory. Proc Int Electron Devices Meet, Washington, DC; 2007.p. 461-64.

19. Karpov I, Savransky S, Karpov V. Mechanism of threshold switching in chalcogenide phase change memory devices. Proc 22nd Non-Volatile Semiconductor Memory Workshop, Monterey, CA;2007.p. 56-57.
20. Lankhorst MHR, Ketelaars BWSMM, Wolters RAM. Low-cost and nanoscale non-volatile Memory concept for future silicon chips. Nat Mater 2005;4:347-52.
21. Kang S, Cho WY, Cho BH, Lee KJ, Lee CS et al. A 0.1- μ m 1.8 V 256-Mb phase-change random access memory (PRAM) with 66-MHz synchronous burst-read operation. IEEE J Solid-State Circuits 2007;42:210-218.
22. Bedeschi F, Bez R, Boffino C, Bonizzoni E, Buda EC et al. 4-mb mosfet-selected μ -trench phasechange memory experimental chip. IEEE J Solid-State Circuits 2005;40:1557-65
23. Raoux S, Wuttig M, editors. History of phase change memories. In Phase Change Materials: Science and Applications. New York: Springer+Business Media; 2009. p 1-14.
24. Argall F. Switching phenomena in titanium oxide films. Solid State Electron 1968;11:535-541.
25. Gibbons JF, Beadle WE. Switching properties of thin NiO films. Solid State Electron 1964;7: 785-797.
26. Ovshinsky SR, Ovshinsky IM. Analog model for information storage and transmission in physiological systems. Mater Res Bulletin 1970;5:681-690.
27. Haijto J, Snell AJ, Hu J, Holmes AJ, Owen A E, Rose MJ, Gibson RAG. Metal-semiconductor transition in electroformed chromium/amorphous silicon/vanadium thin film structures. Phil Mag B 1994;69:237-251.
28. Simmons JG, El-Badry A. Theory of switching phenomena in metal-semiconductor-n-p silicon devices. Solid State Electron 1977;20:954-961.
29. Owen AE, Robertson JM. Electronic conduction and switching in chalcogenide glasses. IEEE Trans. Electron Devices 1973;ED-20:105-122.
30. Ovshinsky SR. Reversible electrical switching phenomena in disordered structures. Phys Rev Let 1968;21:1450-1453.
31. Zhou GF, Jacobs BAJ. High performance media for phase change optical recording. Jpn J Appl Phys 1999;38:1625-1628.
32. Chen YC, Chen HP, Liao Y Y, Lin HT, Chou L H, Kuo JS, Chen PH, Lung SL, Liu R. A high performance 180nm nonvolatile memory cell using phase change Sn-doped Ge₂Sb₂Te₅ chalcogenide. IEEE 2003, p. 32-35.
33. Wang K, Wamwangi D, Ziegler S, Steimer C, Kang MJ, Chai SY, Wuttig M. Influence of Sn doping upon the phase change characteristics of Ge₂Sb₂Te₅. Physica Status Solidi 2004;A 201:3087-3095.
34. Song WD, Shi LP, Miao XS, Chong TC. Phase change behaviors of Sn-doped Ge-Sb-Te material. Appl Phys Lett 2007;90; 091904/1-091904/3.
35. Men LQ, Tominaga J, Fuji H, Kikukawa T, Atoda N. The effects of metal-doped GeSbTe films on light scattering- mode super-resolution near-field structure (super-RENS). Jpn J Appl Phys 2001;40:1629-1633.
36. Wei S, Li J, Wu X, Zhou P, Wang S, Zheng Y, Chen L, Gan F, Zhang X, Li G. Phase change characteristics of aluminum doped Ge₂Sb₂Te₅ films prepared by magnetron sputtering. Optical Society of America 2007;15:17.
37. Lie CT, Kuo PC, Hsu WC, Wu TH, Chen PW, Chen SC. Ge₂Sb₂Te₅ thin film doped with silver. Jpn J Appl Phys 2003;42:1026-1028.
38. Qiao B, Feng J, Lai Y, Ling Y, Lin Y, Tang T, Cai B, Chen B. Effects of Si doping on the structural and electrical properties of Ge₂Sb₂Te₅ films for phase change random access memory. Applied Surface Science 2006;252: 8404-8409.
39. Kim MR, Seo H, Jung TH, Park JW, Yeon C. Microstructure-property relationship in nitrogen doped Ge₂Sb₂Te₅ phase-change optical recording media. SPIE 3401 1998; p. 259-262.
40. Seo H, Jeong TH, Park JW, Yeon C, Kim SJ, Kim SY. Investigation of crystallization behavior of sputter-deposited nitrogen-doped amorphous Ge₂Sb₂Te₅ thin films. Jpn J Appl Phys 2000;39:745-751.
41. Honi H, Yi JH, Park JH, Ha YH, Baek IG, Park SO, Hwang YN et al. A novel cell technology using N-doped GeSbTe films for phase change RAM. Symposium on VLSI Technology Digest of Technical Papers 2003. p. 177-178.

42. Dimitrov D, Shieh HPD. The influence of oxygen and nitrogen doping on GeSbTe phase-change optical recording media properties. *Mat Sci and Eng* 2004; B 107:107-112.
43. Privitera S, Rimini E, Zonca R. Amorphous-to-crystal transition of nitrogen- and oxygen-doped Ge₂Sb₂Te₅ films studied by in situ resistance measurements. *Appl Phys Lett* 2004;85:3044-3046.
44. Liu B, Song Z, Zhang T, Feng S, Chen B. Effect of O-implantation on the structure and resistance of Ge₂Sb₂Te₅ film. *Applied Surface Science* 2005;242:62-69.
45. Men LQ, Tominaga J, Fuji H, Atoda N. Oxygen doping effects on super-resolution scattering-mode near-field optical data storage. *Jpn J Appl Phys* 2000;39:2639-2642.
46. Hellmig J, Mijiritskii AV, Borg HJ, Musialkova K, Vromans P. Dual-layer Blu-ray Disc based on fast-growth phase-change materials. *Jpn J Appl Phys Part 1* 2003;42:848.
47. Chang D, Yoon D, Ro M, Hwang I, Park I, Shin D. Synthesis and characteristics of protective coating on thin cover layer for high density-digital versatile disc. *Jpn J Appl Phys Part 1* 2003;42:754.
48. Lankhorst HR, Ketelaars BWSMM, Wolters R AM. Low-cost and nanoscale non-volatile memory concept for future silicon chips. *Nat Mater* 2005;4:347.
49. Friedrich I, Weidenhof V, Njoroge W, Franz P, Wuttig M. Structural transformations of Ge₂Sb₂Te₅ films studied by electrical resistance measurements. *J Appl Phys* 2000; 87:4130-4134.
50. Kolobov AV, Fons P, Frenkel AI, Ankudinov AL, Tominaga J, Uruga T. Understanding the phase-change mechanism of rewritable optical media. *Nature Materials* 2004;3(10):703-708.
51. Welnic W, Pamungkas A, Detemple R, Steimer C, Blugel S, Wuttig M. Unravelling the interplay of local structure and physical properties in phase-change materials. *Nature Materials* 2006;5(1):56-62.
52. Wuttig M, Lusebrink D, Wamwangi D, Welnic W, Gilleszen M, Dronskowski R. The role of vacancies and local distortions in the design of new phase-change materials. *Nature Materials* 2007;6(2):122-128.
53. Sun Z, Zhou J, Ahuja R. Structure of Phase Change Materials for Data Storage. *Physical Review Letters* 2006; 96(5):055507.
54. Lee BS, Abelson JR, Bishop SG, Kang DH, Cheong B, et al. Investigation of the optical and electronic properties of Ge₂Sb₂Te₅ phase change material in its amorphous, cubic, and hexagonal phases. *J Appl Phys* 2005; 97:093509.
55. Yamada N, Kojima R, Uno M, Akiyama T, Kitauro H, et al. Phase-change material for use in rewritable dual-layer optical disk. *Proc. SPIE* 2002;4342:55-63.
56. Miao XS, Chong TC, Huang YM, Lim KG, Tan PK, et al. Dependence of optical constants on film thickness of phase-change media. *Jpn J Appl Phys* 1999;38:1638-41.
57. Lee BS, Bishop SG. 2008. Optical and electrical properties of phase change materials. In *Phase Change Materials: Science and Applications*, ed. S Raoux, MWuttig, 9:175-98. Berlin/Heidelberg/New York: Springer
58. Shportko K, Kremers S, Woda M, Lencer D, Robertson J, et al. Resonant bonding in crystalline phase-change materials. *Nat Mater* 2008;7:653-58.
59. Ielmini D. 2008. Modeling of switching phenomena in phase change memory (PCM) devices. *Proc. Eur. Phase Change Ovonic Symp., Prague*, pp. 99-106. Pardubice, Czech Repub.: Univ. Pardubice
60. Pirovano A, Lacaita AL, Benvenuti A, Pellizzer F, Bez R. *Electronic Switching in Phase-Change Memories*. *IEEE Trans Electr Devices* 2004;51(3):452-459.
61. Lee JI et al. Highly scalable phase change memory with CVD GeSbTe for sub 50nm Generation. *VLSI Technology IEEE Symposium* 2007. p.102-103.
62. Krbal M et al. The comparison of Ag-As₃₃S₆₇ films prepared by thermal evaporation (TE), spin-coating (SC) and a pulsed laser deposition (PLD). *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 2007;68:953-957.
63. Kikuchi S et al. Preparation of oxygen-doped and nitrogen-doped Ge-Sb-Te system thin film for phase change random access memory by RF magnetron sputtering. *NVMTS* 2006, 7th Annual 81-83.