บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีการพัฒนาแรม (RAM) แบบ non-volatile ซึ่งสามารถเก็บรักษาข้อมูลได้ถึงแม้ว่าไม่มีไฟเลี้ยงก็ตาม เช่น FeRAM (Ferroelectric Random Access Memory) [1], MRAM (Magneto-resistive Random Access Memory) [2], PCM (Phase Change Memory) [3] และ RRAM (Resistive Random Access Memory) หรือที่เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Memristor [4] เพื่อมาใช้แทน DRAM (Dynamic Random Access Memory) ซึ่งกำลังจะถึงขีดจำกัดด้านเทคโนโลยีในเวลาไม่ช้านี้ เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของแรมชนิดต่าง ๆ แล้วจะพบว่า RRAM เป็นแรมที่ได้รับความสนใจมากที่สุด เนื่องจากเหตุผลหลายประการเช่น มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนซึ่งประกอบไปด้วยชั้นรอยต่อของ โลหะ/ฉนวน/โลหะ, กินไฟน้อย, scalability, ทำงานได้รวดเร็วและเข้ากันได้ดีกับเทคโนโลยี Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) [5] โดยในปี 2008 HP ได้สร้างต้นแบบ Memristor ในห้องปฏิบัติการ หลักการทำงานของ RRAM ใช้คุณสมบัติของสวิทซ์ความต้านทาน (Resistive Switching) โดยการใส่ความต่างศักย์เข้าไปที่ขั้วโลหะของรอยต่อ เพื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานของชั้นฉนวนซึ่งเป็นวัสดุไดอิเล็กทริคเพื่อกำหนดสถานะในการเก็บข้อมูล (Reset: High resistance และ Set: Low resistance) ชั้นที่เป็นตัวแปรสำคัญในการควบคุมคุณลักษณะของสวิทซ์ความต้านทาน คือ ชั้นฉนวนซึ่งมีสมบัติเป็นไดอิเล็กทริกซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารประกอบโลหะออกไซด์ (metal oxide) เช่น ZnO, ZrO_2, TiO_2, NiO, Al_2O_3, $SrZrO_3$, $BaTiO_3$, และ HfO_x โดยในงานวิจัยส่วนใหญ่ที่ผ่านมาจะมุ่งเน้นศึกษาสารประกอบโลหะออกไซด์ที่มีค่าไดอิเล็กทริกสูงๆ ซึ่งจะสามารถเก็บข้อมูลได้เสถียรกว่าและการศึกษาวัสดุที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้า เช่น Ti, Pt, Au และ TiN เป็นต้น ที่เหมาะสมกับวัสดุไดอิเล็กทริกแต่ละชนิด รวมทั้งศึกษากลไกการเกิดคุณสมบัติ Resistive Switching โดยทั่วไปการประดิษฐ์รอยต่อจะใช้ลักษณะของการสร้างเป็นแบบชั้น ๆ คล้ายกับตัวเก็บประจุโดยใช้เทคโนโลยีของฟิล์มบาง อีกเทคนิคหนึ่งที่กำลังพัฒนาในปัจจุบันคือ การใช้นาโนเทคโนโลยีในการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิคและอุปกรณ์บันทึกข้อมูลโดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านการจัดเก็บข้อมูลซึ่งต้องการความจุต่อพื้นที่ (areal density) ที่มากขึ้นเรื่อย ๆ โครงการนี้จึงได้นำเสนอวิธีการสร้างสวิทซ์ความต้านทาน จากลวดโลหะออกไซด์นาโนที่เตรียมโดยวิธี Atomic Force Microscopy (AFM) Nanolithography [6] สำหรับใช้เป็นชั้นฉนวน (insulating channel) ในโครงสร้างของสวิทซ์ความต้านทาน ซึ่งเป็นวิธีที่มีศักยภาพในการสร้างโครงสร้างระดับนาโนและการทำซ้ำรวมไปถึงเป็นเทคนิคที่มีราคาถูก ไม่จำเป็นต้องทำในระบบสุญญากาศ โดยงานนี้มุ่งเน้นศึกษา

คุณสมบัติด้านวัสดุศาสตร์ของลวดโลหะออกไซด์ที่สร้างขึ้น จากนั้นทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อที่จะนำมาประยุกต์ใช้เป็น Resistive Switching เพื่อบอกความเป็นไปได้สำหรับใช้ในอุปกรณ์ RRAM การวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์หน่วยความจำถือเป็นสิ่งที่สำคัญและจำเป็นของประเทศ นอกจากนี้ยังมีส่วนช่วยในการพัฒนาบุคลากรและเป็นการสร้างองค์ความรู้ใหม่ด้านการจัดการข้อมูลจาก RRAM ให้กับประเทศอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อประดิษฐ์โครงสร้างของ โลหะ/ลวดโลหะออกไซด์นาโน/โลหะ สำหรับอุปกรณ์หน่วยความจำเข้าถึงโดยสุ่มแบบความต้านทาน (RRAM)

2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ด้านวัสดุนาโนของลวดโลหะออกไซด์ที่สร้างขึ้นโดยวิธี AFM Nanolithography

3. เพื่อศึกษากลไกการเกิดสวิทช์ความต้านทานของรอยต่อ โลหะ/ลวดโลหะออกไซด์นาโน/โลหะ

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

การประดิษฐ์โครงสร้างของ โลหะ/ลวดโลหะออกไซด์นาโน/โลหะ ลงบนบนแผ่นรองรับ SiO_2/Si (100) wafer

1. สร้างลวดโลหะออกไซด์นาโนโดยวิธี AFM Nanolithography จากฟิล์มโลหะที่เตรียมขึ้นโดยกาสปัสเตอริ่ง ร่วมกับกระบวนการ etching ทางเคมี และวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างและสมบัติของพื้นผิวของลวดโลหะออกไซด์นาโน
2. สร้างชั้นโลหะสำหรับขั้วไฟฟ้าโดยวิธี Physical Vapor Deposition (PVD) ร่วมกับวิธี lithography ในการออกแบบลายวงจรขนาดเล็ก
3. วัดความสัมพันธ์ของค่ากระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ (I-V measurement) ของโครงสร้าง โลหะ/ลวดโลหะออกไซด์นาโน/โลหะ เพื่อบอกคุณสมบัติของ Resistive Switching

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัยแบ่งออกออกได้เป็น 3 ส่วน ได้แก่

1. การเตรียมตัวอย่าง (Sample Preparation)

- การเตรียมแผ่นรองรับ SiO_2/Si(100) (Thermal Oxidation)
- การเคลือบฟิล์มบาง Ti ลงบนแผ่นรองรับโดยวิธี DC magnetron sputtering
- การสร้างลวดโลหะออกไซด์โดยวิธี AFM-Nanolithography
- การออกแบบโครงสร้างโลหะ/โลหะออกไซด์/โลหะ โดยวิธี Photo-lithography

2. การตรวจสอบและวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของตัวอย่าง (Sample Characterization)
- สมบัติด้านพื้นผิวของวัสดุ วิเคราะห์โดยเทคนิค Atomic Force Microscope
- สมบัติเชิงโครงสร้างของตัวอย่าง วิเคราะห์โดยเทคนิค Micro Raman Spectroscopy
- สมบัติด้านองค์ประกอบทางเคมี วิเคราะห์โดยเทคนิค Auger electron spectroscopy
- สมบัติทางไฟฟ้าของโครงสร้าง โลหะ/ลวดโลหะออกไซด์/โลหะ (I-V characteristic)

3. สรุปและรายงานผลการทดลอง

1.5 กรอบแนวคิดการวิจัย

นาโนเทคโนโลยีมีความสำคัญและจำเป็นในการก้าวต่อไปของ integrated circuits, memory devices, display units, biochips และ biosensors ความก้าวหน้าของนาโนเทคโนโลยีเกี่ยวข้องกับความสามารถในการควบคุมและการสร้างโครงสร้างในระดับนาโนได้อย่างมีประสิทธิภาพ กระบวนการในการสร้างสิ่งประดิษฐ์ระดับนาโน คือ การสร้างหน่วยย่อยในขนาดที่น้อยกว่า 100 nm ซึ่งมีวิธีการสร้างสิ่งประดิษฐ์ระดับนาโนอยู่ด้วยกันอยู่สองวิธี ได้แก่ วิธี Top-down และวิธี bottom-up เทคนิคที่นิยมใช้สำหรับการสร้างสิ่งประดิษฐ์ระดับนาโนโดยวิธีการพิมพ์ (lithography) แบบ top-down มีหลายวิธีได้แก่ photolithography, electron beam lithography และ focused ion beam lithography อย่างไรก็ตามเทคนิคเหล่านี้ถูกจำกัดด้วยต้นทุนเครื่องที่สูง ค่าดำเนินการที่แพง มีกระบวนการหลายขั้นตอนและยากที่จะเข้าถึง ไม่กี่ปีที่ผ่านมาได้มีวิธีการใหม่เกิดขึ้นในการประดิษฐ์โครงสร้างระดับนาโนมาแทนที่ ได้แก่ วิธี nano-imprint lithography (NIL), soft lithography, และ atomic force microscopy (AFM) nanolithography [1-6] ซึ่งเป็นวิธีที่มีศักยภาพในการสร้างโครงสร้างระดับนาโนและการทำซ้ำรวมไปถึงเป็นเทคนิคที่มีราคาถูก ในหมู่เทคนิคใหม่ วิธี AFM nanolithography ถือว่าเป็นวิธีการหนึ่งที่โดดเด่นสำหรับการสร้างโครงสร้างและรูปแบบในระดับนาโนได้อย่างถูกต้องแม่นยำ สามารถทำซ้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่จำเป็นต้องทำในระบบสุญญากาศ โดยเทคนิค AFM nanolithography สามารถที่จะใช้หัววัด (AFM tip) ในการสร้างรูปแบบและโครงสร้างในระดับนาโนได้

หลากหลาย เช่น การขูดเขียนเชิงกลศาสตร์บนพื้นผิวเพื่อให้เกิดแบบรูปแบบตามที่ต้องการหรือจัดการกับโมเลกุล nanotube บนพื้นผิวของวัสดุโดยการผลัก การดัน และการหมุนของหัววัด นอกจากนี้ยังนำส่งสารเคมีลงไปยังพื้นผิว, สามารถใส่ความต่างศักย์ที่หัววัดเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่พื้นผิวตัวอย่าง เพื่อทำให้เกิดโครงสร้างออกไซด์บนพื้นผิวตัวอย่างได้อีกด้วย และยังสามารถที่จะสร้างรูปแบบการพิมพ์บนวัสดุที่หลากหลาย เช่น สารกึ่งตัวนำ โลหะ โพลิเมอร์ และ ชีวโมเลกุล ทั้งหมดนี้จึงกล่าวได้ว่า วิธี AFM nanolithography เป็นวิธีการใหม่ที่มีศักยภาพอย่างมากในการสร้างรูปแบบและโครงสร้างในระดับนาโนที่น่าสนใจซึ่งอยู่ในกระแสของงานวิจัยต่าง ๆ ในขณะนี้

กรอบแนวคิดแรก คือ การสร้างโครงสร้างนาโนของ Metal Oxide โดยวิธี Bias-assisted AFM nanolithography เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในกระบวนการสร้างและสมบัติของโครงสร้างนาโนออกไซด์ที่ได้จากการเตรียม เกี่ยวข้องกับการควบคุมปฏิกิริยาทางเคมีในระหว่างการไบแอสด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างฟิล์มโลหะและหัววัด, อัตราเร็วในการสแกนของหัวเข็ม, ความสมบูรณ์ของฟิล์มบางโลหะที่ใช้เป็นแผ่นรองรับ ล้วนแล้วแต่เป็นองค์ความรู้ที่สำคัญที่จะนำไปสู่การออกแบบและทรานซิสเตอร์ชนิดฟิล์มบางที่ต้องการความแม่นยำและมีคุณภาพสูง

กรอบแนวคิดอีกประการ คือ การวิเคราะห์สมบัติโครงสร้างนาโนของวัสดุชั้นสูง ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธี Micro Raman Spectroscopy ในการศึกษาโครงสร้างของโลหะออกไซด์ที่เตรียมได้ โดยตำแหน่งของความยาวคลื่นและรูปร่างของ peak จะเป็นตัวบอกเฟสและความสมบูรณ์ของโครงสร้างโลหะออกไซด์ ส่วนการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเลือกใช้วิธี Auger electron spectroscopy วัดองค์ประกอบทางเคมีและสิ่งเจือปนในโลหะออกไซด์ ซึ่งเป็นอีกปัจจัยที่เป็นตัวบอกถึงคุณภาพของฟิล์ม ส่วนของพื้นผิวใช้เทคนิค AFM ในการตรวจสอบความสูงต่ำและลึกในระดับไม่กี่นาโนเมตรของปฏิกิริยาออกซิเดชันในชั้นฟิล์ม และตรวจสอบคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของโลหะออกไซด์ ในระดับนาโนซึ่งต้องอาศัยการออกแบบและสร้างขั้วไฟฟ้าต่อเชื่อมกับโครงสร้างนาโน โดยใช้เทคนิค Photolithography เพื่อให้สามารถวัดความสัมพันธ์ของกระแสและความต่างศักย์ ทั้งสองแนวคิดนี้ล้วนแล้วแต่เป็นองค์ความรู้ที่สำคัญของการพัฒนาอุปกรณ์นาโนเทคโนโลยี

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 สร้างองค์ความรู้ใหม่ด้านวัสดุนาโนออกไซด์และอุปกรณ์ Resistive switching สำหรับใช้ใน RRAM

1.6.2 พัฒนางานวิจัยด้านนาโนเทคโนโลยีให้กับประเทศ

1.6.3 พัฒนาบุคลากรและผลิตบัณฑิตในระดับปริญญาโท/เอก