

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การเตรียมตัวอย่าง (Sample Preparation)

ขั้นตอนแรกที่สำคัญสำหรับการสร้างลวดโลหะออกไซด์ คือ กระบวนการในการเตรียมตัวอย่าง โดยเริ่มต้นจาก การเตรียมชั้นฟิล์มบาง SiO_2 ลงบนแผ่นรองรับ Si(100) wafer ซึ่งได้รับความร่วมมือจาก ศูนย์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์แห่งชาติ (TMEC) ในกระบวนการเตรียมตัวอย่างก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการเตรียมลวดโลหะออกไซด์โดยวิธี AFM Nanolithography ต่อไป

3.1.1 การเตรียมแผ่นรองรับ SiO_2 ลงบน Si(100) โดยวิธี Thermal Oxidation

แผ่นรองรับ Si-wafer ระบาย (100) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว เกรดระดับห้องปฏิบัติการ ผ่านกระบวนการล้างโดยวิธี RCA clean (Iscoff, 1993) ประกอบไปด้วยขั้นตอนต่อไปนี้

การกำจัดน้ำมัน สารหล่อลื่นด้วยสารละลาย (Sulfuric-peroxide mixture)

- 1) SPM solution (1:1 hydrogen peroxide และ sulfuric acid)
- 2) แช่ในสารละลาย SPM เป็นเวลา 12 นาที
- 3) ล้างด้วยน้ำ DI เป็นเวลา 12 นาที

การกำจัดสิ่งเจือปนพวกสารอินทรีย์และโลหะวิธีมาตรฐาน SC1

- 1) SC1 solution (5:1:1 DI water, ammonium hydroxide, hydrogen peroxide)
- 2) แช่ในสารละลาย SC1 เป็นเวลา 12 นาที
- 3) ล้างด้วยน้ำ DI เป็นเวลา 12 นาที

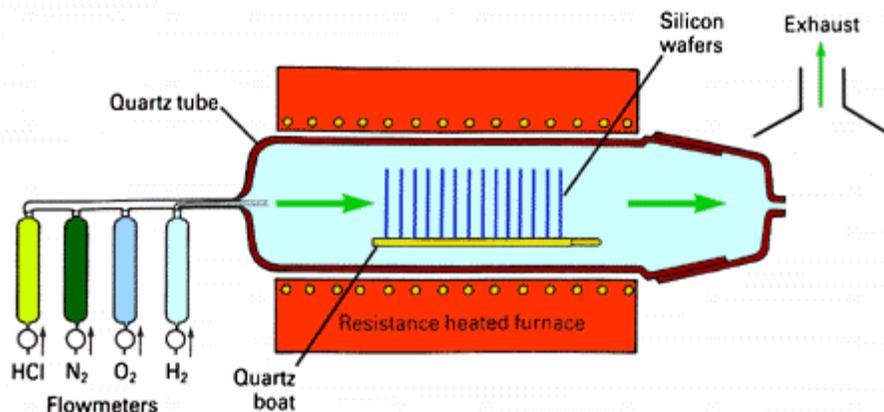
การกำจัดออกไซด์สารละลาย Buffered Oxide Etch (BOE)

- 1) จุ่มในสารละลาย BOE (6:1 ของ 40% NH_4F : 49% HF) เป็นเวลา 45 วินาที
- 2) ล้างด้วยน้ำ DI เป็นเวลา 5 นาที

การกำจัด atomic or ionic component

- 1) สารละลาย SC2 (6:1:1 DI water, hydrochloric acid, และ hydrogen peroxide)
- 2) จุ่มลงในสารละลาย SC2 ที่อุณหภูมิ 80 °C
- 3) ล้างด้วยน้ำ DI เป็นเวลา 12 นาที
- 4) เป่าแห้งด้วยลมไนโตรเจน

จากนั้นจึงนำแผ่นรองรับเข้าเตาเพื่อเตรียมชั้นฟิล์ม SiO_2 โดยวิธี Thermal Oxidation ที่อุณหภูมิ $1000\text{ }^\circ\text{C}$ ฟิล์มบาง SiO_2 ปลูกลงบนแผ่นรองรับ Si-wafer มีค่าความหนาประมาณ 625 nm ดังรูปที่ 3.1 แสดงกระบวนการเตรียมฟิล์มโดยวิธี thermal oxidation



รูปที่ 3.1 กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง SiO_2 ลงบน Si wafer โดยวิธี thermal oxidation

(http://web.eng.gla.ac.uk/groups/sim_centre/courses/oxidation/sigrowth_1.html)

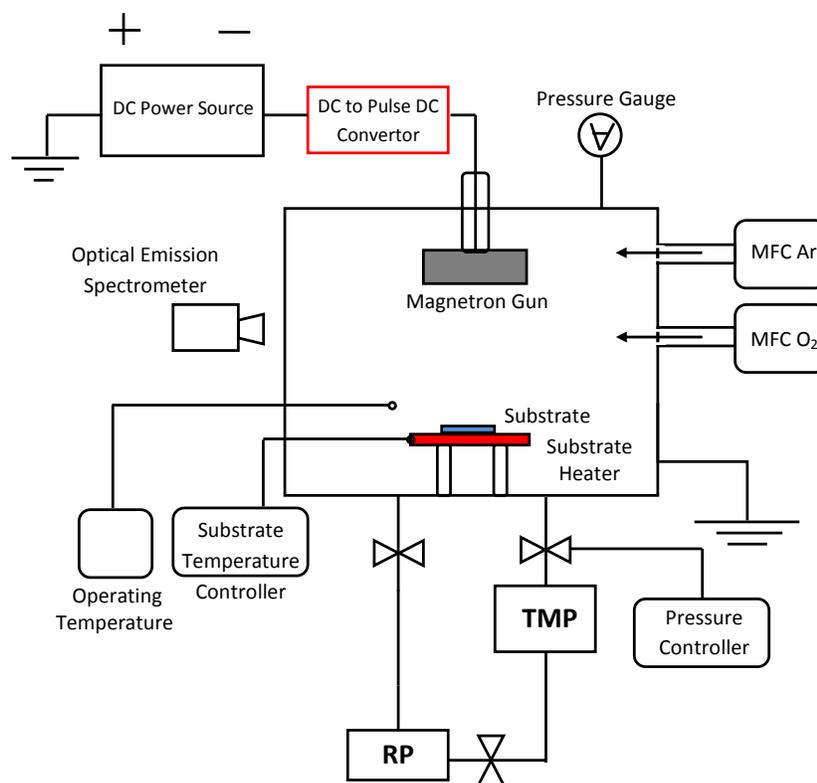
3.1.2 การเคลือบฟิล์มบาง Ti ลงบนแผ่นรองรับโดยวิธี DC magnetron sputtering

ฟิล์มบางไททาเนียมความหนาประมาณ 5 nm ถูกเตรียมโดยวิธีดีซี แมกนีตรอนสปัสเตอร์ริงลงบนแผ่นรองรับ SiO_2/Si (100) วิธีดีซีแมกนีตรอนสปัสเตอร์ริงเป็นวิธีหนึ่งในการเคลือบฟิล์มบางแบบ physical vapor deposition ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมซึ่งวิธีการที่ถูกให้อัตราในการเคลือบฟิล์มที่สูงและมีความสม่ำเสมอบนพื้นที่ขนาดใหญ่ ใช้หลักการระดมยิงด้วยไอออนของก๊าซลงไปบนเป้าวัสดุทำให้อะตอมของเป้าวัสดุหลุดออกมาและไปเกาะยังแผ่นรองรับโดยจับพันธะกัน ในระดับอะตอมเกิดเป็นฟิล์มบางนอกจากนี้ยังใช้หลักการของสนามแม่เหล็ก (magnetron) ช่วยให้สามารถควบคุมทิศทางของไอออนที่พุ่งชนเป้าวัสดุทำให้เกิดปริมาณการชนที่มากขึ้น ก๊าซที่นิยมใช้ให้เกิดการแตกตัวเป็นพลาสมา คือ ก๊าซอาร์กอน ซึ่งจะใช้ High voltage DC power supply ทำให้ก๊าซอาร์กอนเกิดการแตกตัวเป็นไอออนที่มีพลังงานสูง จากนั้น Ar^+ ไอออนจะวิ่งพุ่งชนกับเป้าวัสดุ (แคโทด) แรงเนื่องจากการชนของไอออนจะทำให้อะตอมของวัสดุหลุดออกมาจากเป้าเคลือบและไปจับกันบนแผ่นรองรับ

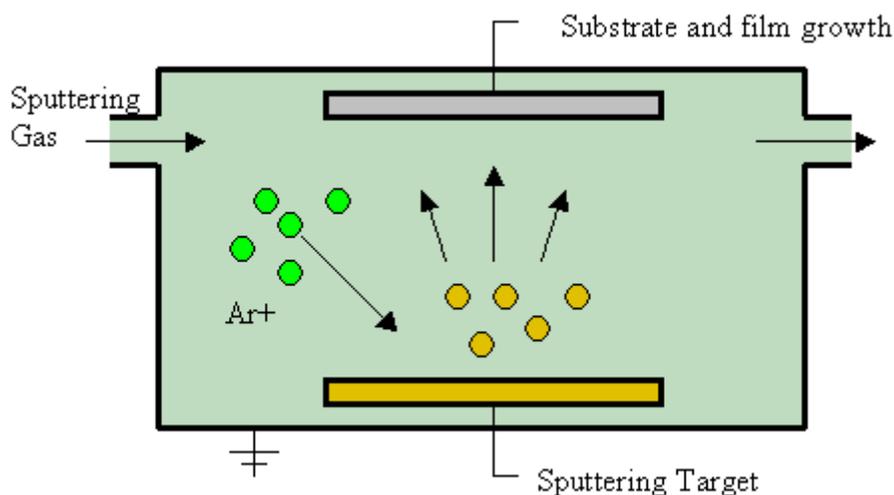
ส่วนประกอบที่สำคัญสำหรับระบบสปัสเตอร์ริงได้แก่ ห้องสุญญากาศ (vacuum chamber) ที่มีระดับความดันต่ำสุดในช่วง 10^{-6} mbar ซึ่งใช้ rotary pump (RP) และ turbomolecular pump (TMP) ทำหน้าที่ดูดอากาศออก โดยสามารถอ่านค่าความดันได้จาก pressure gauge ส่วนที่สองคือ ปืนแมกนีตรอนทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์สำหรับใส่วัสดุที่ต้องการจะเคลือบ โดยระบบที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว

ส่วนที่สาม คือระบบควบคุมปริมาณก๊าซอาร์กอนในขณะที่ทำการเคลือบโดยควบคุมผ่านทาง mass flow controller ซึ่งปริมาณก๊าซอาร์กอนในเชิงระดับของความดันส่งผลสำคัญต่อคุณภาพของฟิล์มบางที่เตรียมได้ ส่วนสุดท้ายคือระบบควบคุมต่าง ๆ ของเครื่อง ประกอบไปด้วย ระบบควบคุมอุณหภูมิของแผ่นรองรับ ระบบควบคุมความดันในระบบสุญญากาศ และระบบตรวจสอบสถานะพลาสมาจาก optical emission spectroscopy ซึ่งจะทำหน้าที่ตรวจสอบปริมาณของไอออนต่าง ๆ ในขณะที่ทำการเคลือบฟิล์ม

เงื่อนไขการเตรียมดังนี้ ความดันในห้องสุญญากาศ 3.0×10^{-6} mbar, กำลังไฟฟ้า: 150W, Ar gas: 5.0×10^{-3} mbar, เวลา: 30 วินาที, ระยะห่างระหว่างเป้าโลหะ 12 cm เป้าไททาเนียมมีความบริสุทธิ์ 99.95% หาดัชนีในการเคลือบฟิล์มบางจากการวัด surface profiler จากตัวอย่างซึ่งผ่านกระบวนการกัดทางเคมีเพื่อให้เกิดช่องว่างของฟิล์มและหาดัชนีในการเคลือบฟิล์มบางจากเงื่อนไขที่ใช้เตรียมฟิล์ม และวัดหาค่าความเรียบจากเครื่อง AFM จากนั้นจึงนำตัวอย่างออกเพื่อสร้างลวดโลหะออกไซด์ต่อไป



รูปที่ 3.2 ภาพแสดงส่วนประกอบของเครื่องแมกนีตรอนสปัตเตอริง



รูปที่ 3.3 แผนภาพหลักการทำงานของเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางแบบสปัตเตอร์ริง (wiki)

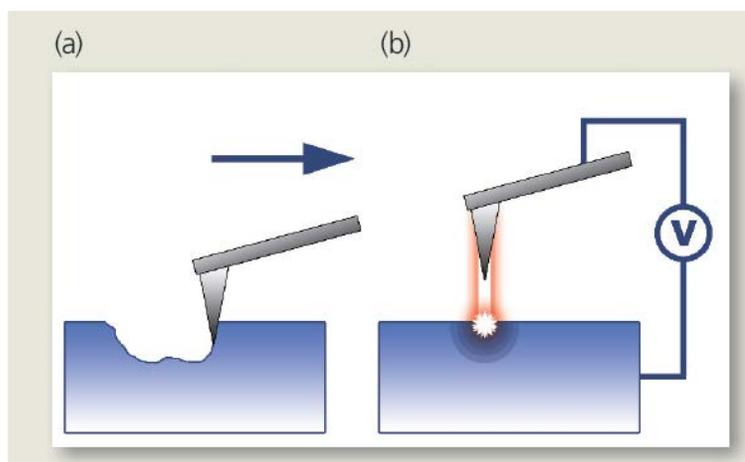
3.1.3 การสร้างลวดโลหะออกไซด์โดยวิธี AFM-Nanolithography

เทคนิค AFM nanolithography ได้มีการพัฒนาในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมา โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มตามหลักการทำงาน ได้แก่ (1) Force-assisted AFM nanolithography และ (2) Bias-assisted AFM nanolithography [7] สำหรับเทคนิค Force-assisted AFM nanolithography จะใช้แรงปริมาณมากใส่เข้าไปที่หัววัดซึ่งมากกว่าแรงที่ใช้ในการลากเพื่อสร้างภาพ (image mode) เพื่อสร้างรูปแบบลวดลายตามที่ต้องการ โดยปฏิกิริยาส่วนใหญ่ระหว่างหัววัดและพื้นผิวจะเป็นแบบกลศาสตร์ เช่น การขูด การดึง หรือการผลักดันอะตอมหรือโมเลกุลด้วยหัววัด ซึ่งสามารถแยกออกเป็นหมวดหมู่ได้ดังนี้ mechanical indentation และ plowing, thermomechanical writing, nanomanipulation และ dip-pen nanolithography (DPN) โดยวิธี DPN จะมีความพิเศษ แทนที่จะใช้แรงกระทำกับโมเลกุลบนพื้นผิว แต่หัววัดจะถูกใช้เป็นปากกานาโนสเกลซึ่งจะนำพาวาสดู (ink material) ที่ต้องการลงบนแผ่นรองรับที่กำหนดโครงสร้างเอาไว้แล้ว สำหรับวิธี Bias-assisted AFM nanolithography เป็นวิธีที่นิยมสำหรับการสร้างวัสดุนาโนออกไซด์ หัววัด AFM จะถูกไบแอสด้วยสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้นแบบวงจำกัดในช่วง 10^8 V/m ถึง 10^{10} V/m และหัววัดทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับรับส่งกระแสไฟฟ้า ภายใต้สนามไฟฟ้าที่สูงจึงทำให้เกิดกระบวนการไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic), ไฟฟ้าเคมี (electrochemical), การปลดปล่อยสนาม (field emission), dielectric breakdown และ การแตกตัวของก๊าซ (explosive gas discharge) นำไปสู่การเกิดโครงสร้างในระดับนาโนผ่านทางปฏิกิริยานาโนออกซิเดชัน (nanooxidation), electrochemical deposition, electrostatic attraction, nanoscale explosion และ shock wave propagation สำหรับในกระบวนการออกซิเดชัน หัววัด (tip) จะถูกไบแอสความต่างศักย์แบบ negative สนามไฟฟ้าที่

เกิดขึ้นจะเหนี่ยวนำให้เกิด ionic dissociation ของน้ำที่ผิวของวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นสะพานไฟฟ้าเชื่อมต่อระหว่าง หัววัดและพื้นผิวดตัวอย่าง โมเลกุลของน้ำจะแตกตัวเนื่องจากสนามไฟฟ้าให้อิออน O^- และ OH^- และทำปฏิกิริยากับแผ่นรองรับที่ต้องการจะสร้างออกไซด์ ณ ตำแหน่งที่เฉพาะเจาะจงเกิดเป็นโครงสร้างออกไซด์ในระดับนาโนขึ้น กลไกการเกิดนาโนออกไซด์เช่นนี้มีการอธิบายกันหลายแบบจำลอง ซึ่งล้วนแล้วแต่สัมพันธ์กับ electrical field, surface stress, water meniscus formation, และ OH^- diffusion ระหว่างหัววัดกับพื้นผิวดตัวอย่างเทคนิค AFM nanolithography ได้มีการพัฒนามาในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมา โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มตามหลักการทำงาน ได้แก่ (i) force-assisted AFM nanolithography; (ii) bias-assisted AFM nanolithography ตารางที่ 3.1 [14]

ตารางที่ 3.1 การเปรียบเทียบความแตกต่างของวิธี Force-assisted AFM nanolithography และ วิธี Bias-assisted AFM nanolithography

	Force-assisted AFM nanolithography	Bias-assisted AFM nanolithography
Operational principle	Large force applied to tip	Bias applied to tip create
Tip-surface interaction	Largely mechanical	Tip acts as nanoscale electrode and induce physical and/or chemical processes
Pattern formation modes	Patterns are formed by mechanically scratching, pulling or pushing the surface atoms and molecules with the probe	Under high field, electrostatic, electrochemical, field emission, dielectric breakdown and explosive gas discharge processes can be initiated to facilitate pattern formation
Typical examples	Thermomechanical writing and Dip-pen nanolithography (DPN)	AFM nanooxidation and electrostatic attraction



รูปที่ 3.4 แผนภาพหลักการของวิธี Force-assisted AFM nanolithography (a); bias-assisted AFM nanolithography (b)

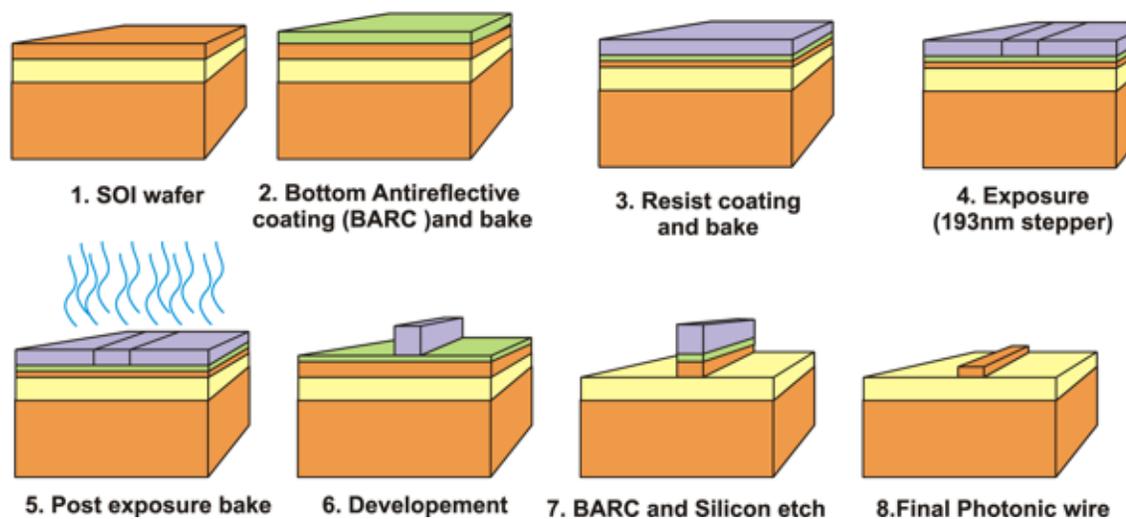
ลวดโลหะออกไซด์ (ไททานเนียมออกไซด์) ถูกเตรียมโดยวิธี AFM-Nanolithography โดยใช้การไบแอสด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วง -10V ถึง 10V และความเร็วในการสแกนของ cantilever ในช่วง $0.25 - 1\ \mu\text{m}/\text{sec}$ จากเครื่อง AFM รุ่น Park Systems XE-100 ที่อุณหภูมิห้อง $20-25^\circ\text{C}$ ความชื้น $50-60\%RH$ ใช้อัตราในการสแกน $0.1-1\ \mu\text{m}/\text{sec}$ ก่อนและหลังการสร้างลวดโลหะออกไซด์จะทำการวิเคราะห์เบื้องต้นด้วย เครื่อง AFM ใน contact mode และ lateral force mode เพื่อศึกษา topology และความต่างเฟสระหว่างลวดโลหะออกไซด์กับฟิล์มโลหะที่เป็นแผ่นรองรับ จากนั้นจะทำการหาค่าความลึกของปฏิกิริยาโดยใช้การกัดด้วยสารละลายผสมระหว่าง $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$ แล้วทำการสแกนด้วยเครื่อง AFM อีกครั้งหนึ่งทำการศึกษาอิทธิพลของค่าความต่างศักย์และอัตราในการสแกนที่ส่งผลถึงการเกิดลวดโลหะออกไซด์ที่มีสมบัติแตกต่างกัน

3.1.4 การออกแบบโครงสร้างโลหะ/โลหะออกไซด์/โลหะ โดยวิธี Photo-lithography

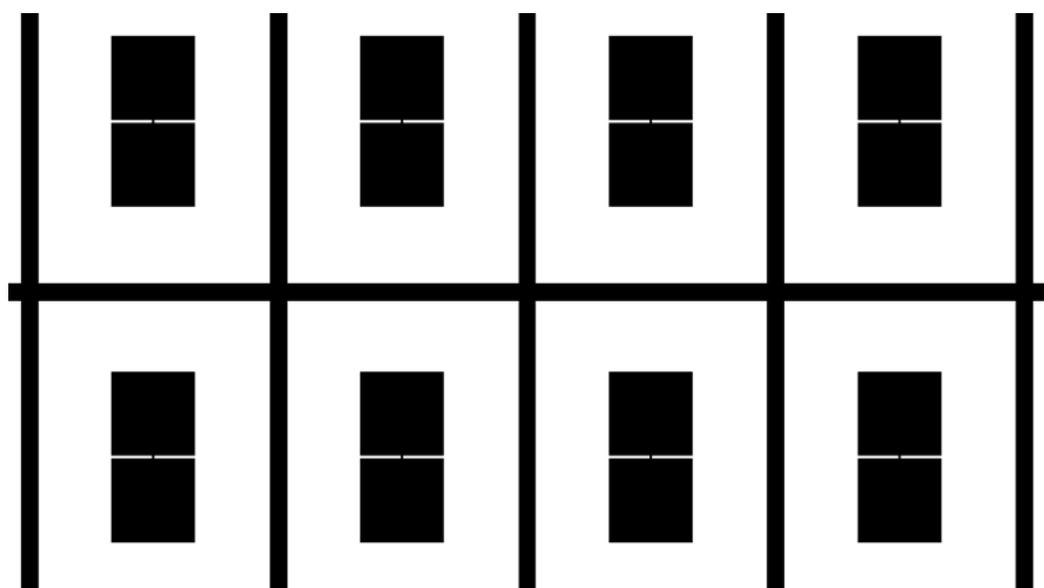
โครงสร้าง โลหะ/โลหะออกไซด์/โลหะ (MIM) เป็นโครงสร้างที่ใช้ในการสร้างหน่วยความจำเข้าถึงแบบสุ่มชนิดความต้านทาน (RRAM) ในการออกแบบโครงสร้างขนาดเล็กจำเป็นต้องใช้เทคนิค Photo-lithography โดยใช้แสง UV ฉายผ่านหน้ากาก (mask) ซึ่งออกแบบลวดลายตามที่ต้องการ กระบวนการนี้ได้รับความร่วมมือจากศูนย์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์แห่งชาติ (TMEC)

1. ตัวอย่าง $\text{Ti}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ wafer
2. เคลือบด้วยชั้น antireflective coating และทำการอบ
3. เคลือบชั้น resist และทำการอบ

4. ฉายด้วยแสง UV เพื่อสร้างลวดลายตามที่ต้องการ
5. อบตัวอย่างอีกครั้งเพื่อให้ส่วนที่โดนฉายแสง UV เกิดปฏิกิริยา
6. ล้างด้วยน้ำยา developer
7. ทำการกัดชั้นฟิล์ม antireflection และ ฟิล์ม Ti บางส่วนที่ไม่มี resist ออกไป
8. กำจัด resist ออกอีกครั้งให้ได้ลวดลายตามที่ต้องการ



รูปที่ 3.5 แผนภาพขั้นตอนการสร้างลวดลายโดยเทคนิค photo-lithography



รูปที่ 3.6 หน้ากาก (mask) ที่ใช้ในการสร้างลวดลายโดยเทคนิค photo-lithography

3.2 การตรวจสอบสมบัติต่าง ๆ ของตัวอย่าง (Sample Characterization)

3.2.1 Surface Morphology (Atomic Force Microscope) รุ่น Park systems model XE100

การตรวจสอบสภาพพื้นผิวของตัวอย่างเริ่มต้นตั้งแต่การเตรียมชั้น SiO_2 ชั้นฟิล์ม Ti ลวดโลหะ TiO_x ที่สร้างขึ้นโดยวิธี AFM lithography กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic force microscope : AFM) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางในระดับนาโน โดยอาศัยหลักการของอันตรกิริยาของแรงระหว่างอะตอม (atomic force) ระหว่างหัวเข็มวัดในระดับนาโนกับพื้นผิวของสาร และจะทำการประมวลผลออกในลักษณะของภาพพื้นผิว Atomic Force Microscope (AFM) เป็นเครื่องมือที่ใช้ทางด้านวิทยาศาสตร์ระดับนาโน โดยเฉพาะเช่นเดียวกัน กับ STM แต่เครื่อง AFM ถูกพัฒนาขึ้นมาหลังจากเครื่อง STM และสร้างขึ้นมาด้วยหลักการพื้นฐานเดียวกันกับเครื่อง STM โดยเครื่อง AFM จะสามารถทำงานได้โดยการใช้อุปกรณ์ตรวจหรือโพรบ (probe) ที่มีปลายแหลมเล็ก (เหมือนกันกับเครื่อง STM) ซึ่งติดอยู่กับคานยื่น (cantilever) ที่สามารถโก่งงอตัวได้เคลื่อนที่สัมผัสไปบนพื้นผิวของวัตถุ (ซึ่งสามารถที่จะวัด แรงกระทำที่ปลายแหลมของโพรบได้แม้ว่าจะมีขนาดน้อยมากในระดับนาโนก็ตาม) และคุณสมบัติของเครื่อง AFM ที่มีมากกว่าเครื่อง STM ก็คือ สามารถที่จะตรวจวัดพื้นผิวที่เป็นฉนวนไฟฟ้าได้ เช่น พื้นผิวโพลีเมอร์, เซรามิก, คอมโพสิต, กระจกหรือแก้ว หรือแม้แต่โมเลกุลทางชีวภาพต่าง ๆ ก็สามารถที่จะวัดได้

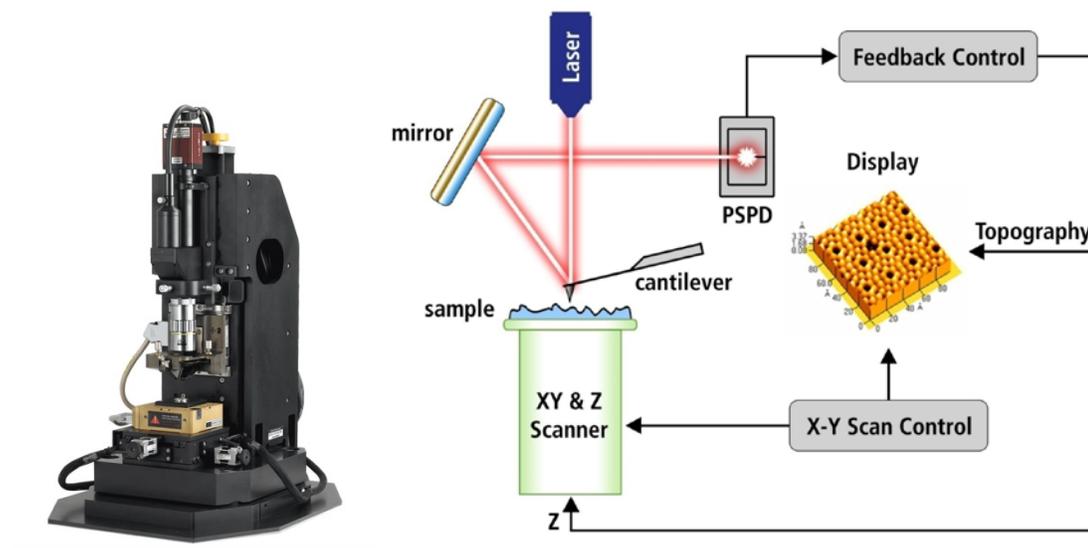
หลักการการทำงานของเครื่อง AFM การผ่านแสงเลเซอร์ไปให้กับส่วนปลายแหลม (tip) ของคานยื่นที่มีขนาดระดับอะตอมในระยะใกล้ ซึ่งส่วนปลายแหลมของคานนั้นจะไปสัมผัสแบบกระดกในทิศทางขึ้นและลงกับพื้นผิว ของวัตถุ และเมื่อเครื่อง AFM ลากส่วนปลายแหลมผ่านโครงสร้างระดับนาโน แรงปฏิกิริยาที่กระทำในแนวตั้งฉากที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของพื้นผิวกับปลายแหลมจะดึงคาน ทำให้คานโก่งงอตัวทำให้สามารถตรวจวัดขนาดของแรงเชิงปฏิสัมพันธ์ ระหว่างความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งของส่วนปลายแหลมและพื้นผิวของวัตถุ (ทำให้สามารถทราบถึงระดับพลังงานที่เกิดขึ้นได้) ซึ่งจะถูกนำมาแปรสัญญาณร่วมกันเพื่อนำมาสร้างเป็นภาพพื้นผิวที่เป็นลักษณะ เชิงโครงสร้างระดับอะตอมที่มีกำลังการขยายสูงไปแสดงบนจอภาพที่เป็นมอเนเตอร์เช่นเดียวกันกับเครื่อง STM (และโดยหลักการเดียวกันนี้ก็สามารถที่ใช้ปลายแหลมของคานนี้ในการสร้างแรงผลัก เพื่อเคลื่อนย้ายอะตอมแต่ละตัวของโครงสร้างวัสดุได้เช่นเดียวกันอีกด้วย)

วิธีการทำงานของเครื่อง AFM ที่นำมาใช้งานทางด้านวิทยาศาสตร์ระดับนาโน สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี ได้แก่

1. เป็นการสัมผัสพื้นผิวพร้อมกับการลากปลายแหลมไปบนพื้นผิวนั้นๆ ตลอดเวลา ข้อเสียของวิธีนี้คือ จะทำให้เกิดแรงต้านในแนวของการเคลื่อนที่ซึ่งขนานกับพื้นผิวขึ้น อันอาจทำให้คานของโพร

รูปที่ใช้วัดเกิดการโก่งงอตัวหรือเกิดบิดเบี้ยวไป โดยที่มิได้เกิดจากแรงดึงดูดที่ปลายเนื่องจากแรงในแนวตั้งฉากเพียงอย่างเดียว จึงทำให้ข้อมูลความสูงของพื้นผิวที่วัดได้นั้นอาจผิดไปจากความสูงที่แท้จริง

2. เป็นการสัมผัสพื้นผิวโดยให้ปลายแหลมสัมผัสกับพื้นผิวเป็นระยะเวลาสั้นๆ ในแนวตั้งฉากกับพื้นผิว (คล้ายกับการใช้ปลายนิ้วเคาะโต๊ะเป็นจังหวะๆ นั่นเอง) ด้วยลักษณะการสัมผัสแบบนี้แรงต้านในแนวตั้งฉากจะไม่เกิดขึ้น แต่เนื่องจากปลายแหลมสัมผัสพื้นผิวเป็นระยะสั้นๆ จึงทำให้เกิดการสั่นของคาน ซึ่งจะส่งผลให้ค่าสัญญาณที่ตรวจวัดได้นั้น ไม่คง ที่หรือไม่แม่นยำได้

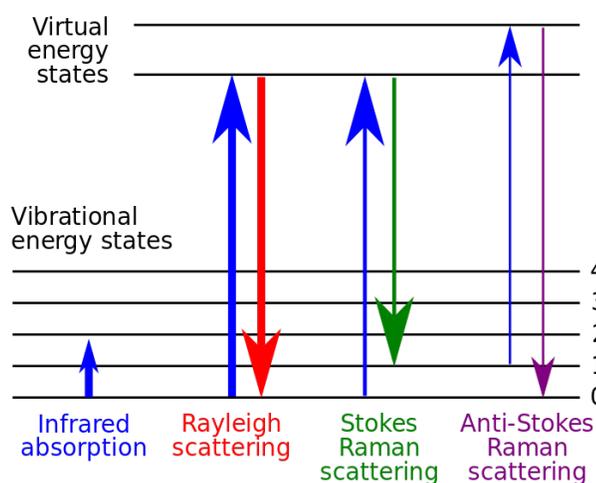


รูปที่ 3.7 เครื่อง AFM (Parks systems model XE100) และแผนภาพหลักการทำงาน of เครื่อง AFM

3.2.2 Structural Property (Micro Raman Spectroscopy)

สมบัติเชิงโครงสร้างของลวดโลหะออกไซด์ (TiO_x) ที่สร้างขึ้นผ่านการตรวจสอบโดยใช้เครื่อง Raman Spectroscopy เพื่อศึกษาเฟสที่เกิดขึ้น เทคนิครามานสเปกโตรสโคปีเป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์โมเลกุลของวัสดุซึ่งเป็นเทคนิคที่คล้ายกับการวิเคราะห์ด้วยอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีแต่มีข้อดีนั่นคือ ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างไม่ยุ่งยาก หลักการของเทคนิคนี้ เมื่อแสงตกกระทบกับวัสดุจะทำให้เกิดปฏิกิริยาการดูดกลืน การส่งผ่านและการกระเจิงของแสงขึ้นซึ่งเกี่ยวข้องกับ โครงสร้างของวัสดุสารนั้น อาศัยหลักการชนแบบไม่ยืดหยุ่นระหว่างโฟตอนกับ โมเลกุลของสาร จากนั้นพลังงานบางส่วนจะถูกถ่ายเทไปยัง โมเลกุลทำให้เกิดการสั่นของโมเลกุลแล้วเกิดกระเจิงออกไป เทคนิคนี้ใช้การตรวจวัดการกระเจิงของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่ทราบโพลาไรเซชันและมีความยาวคลื่นค่าเดียวโดย

จะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวคลื่นของแสงที่กระเจิงออกมา สามารถแบ่งออกได้เป็นสามแบบ ได้แก่ การกระเจิงแบบที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวคลื่น (Rayleigh scattering), การกระเจิงที่ทำให้แสงสูญเสียพลังงาน (ค่าความยาวคลื่นมากขึ้น) เราเรียกว่า Stoke radiation, และการกระเจิงให้แสงที่มีพลังงานมากขึ้น (ค่าความยาวคลื่นลดลง) เราเรียกว่า Anti-stoke radiation การเปลี่ยนแปลงค่าความยาวคลื่นเป็นผลจากการสั่นของโมเลกุลของสาร โดยสเปกตรัมในช่วง Stoke radiation จะมีความเข้มสูงซึ่งเป็นช่วงที่สนใจมาใช้ในการวิเคราะห์หโมเลกุลของสาร สารหรือวัสดุแต่ละตัวจะมีข้อมูลสเปกตรัมเฉพาะซึ่งสามารถใช้ระบุชนิดของสารได้



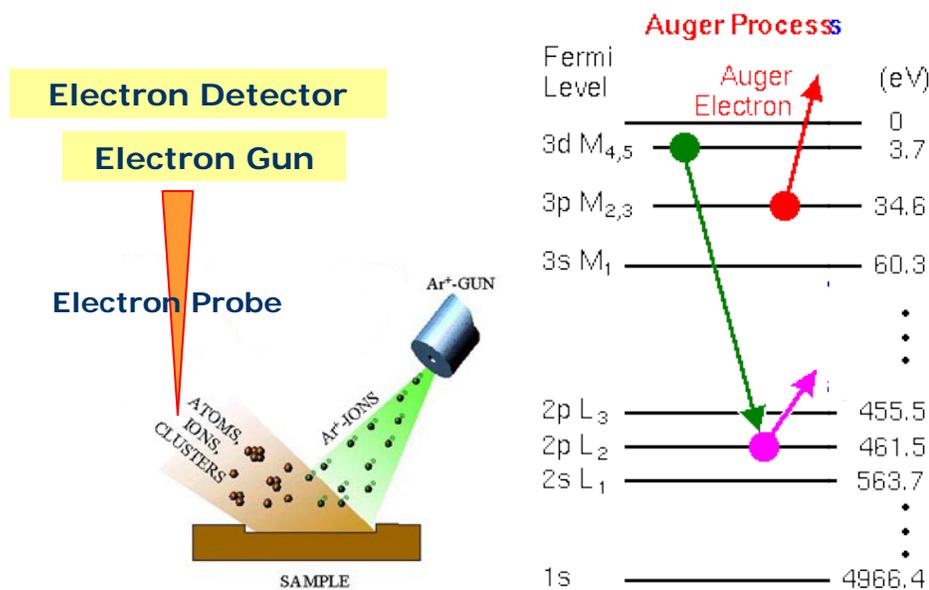
รูปที่ 3.8 แผนภาพการเปลี่ยนสถานะพลังงานจากเทคนิค Raman Spectroscopy

3.2.3 Chemical Composition (Auger electron spectroscopy) รุ่น Ulvac Phi-700

องค์ประกอบทางเคมีและสิ่งเจือปนต่าง ๆ ภายในลวดโลหะออกไซด์โดยวิธี Auger Electron Spectroscopy เทคนิค AES เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเช่นเดียวกับเทคนิค Energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM/EDX), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), Rutherford backscattering spectrometry (RBS) และ Secondary ion mass spectrometry (SIMS) โดยใช้หลักการวัดค่าพลังงานของ Auger electrons เนื่องจากการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนในวงโคจรซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละอะตอมดังรูปที่ 3.9(a) ซึ่งประกอบไปด้วย ปืนอิเล็กตรอน (electron gun), ตัวตรวจจับอิเล็กตรอน (electron detector) และ Ar⁺ gun โดยลำอิเล็กตรอนจากปืนอิเล็กตรอนพุ่งเข้าไปชนที่ผิวของฟิล์มทำให้เกิดอันตรกิริยาขึ้นซึ่งจะทำการตรวจจับค่าพลังงานของ Auger electron เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์พื้นผิวที่มีความลึกต่ำกว่า 15 Å อีกทั้งยังสามารถหาอัตราการเปลี่ยนแปลงอะตอม

ตามความลึก (depth profile) ได้โดยใช้ sputter etching จาก Ar^+ gun โดยอัตรากิริยาที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ด้วยแผนภาพ electronic structure ของอะตอมที่ถูกกระตุ้นได้ดังรูป 3.9(b) อิเล็กตรอนแต่ละตัวจะอยู่ในชั้นของระดับพลังงานต่าง ๆ ออกได้เป็นชั้น K, L, M,... ตามลำดับและสัมพันธ์กับการจัดเรียงของอิเล็กตรอน 1s, 2s, 2p, 3s, ... เมื่อลำอิเล็กตรอนวิ่งเข้าชนอะตอมจะทำให้อิเล็กตรอนวงในสุดของอะตอมหลุดออกไปทำให้เกิดที่ว่างขึ้น จากนั้นอิเล็กตรอนที่ระดับชั้นพลังงานที่สูงกว่าจะวิ่งลงมาแทนที่ตำแหน่งที่ว่างเนื่องจากเสถียรกว่า การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนจะทำให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานของโฟตอนขึ้นมา พลังงานของโฟตอนจะไปทำให้อิเล็กตรอนอีกตัวหนึ่งหลุดออกมาเราเรียกอิเล็กตรอนตัวนี้ว่า Auger electrons ซึ่งจะมีพลังงานจลน์ติดตัวมาด้วย สามารถหาได้จากสมการ

$$E_{\text{Auger}} = E_{L_2} - E_{M_4} - E_{M_3}$$



รูปที่ 3.9 แผนภาพหลักการทำงานของเครื่อง Auger Electron Spectroscopy

3.2.4 Electrical Property (I-V characteristic) Keithley voltage-current source

เป็นการหาสมบัติ resistive switching ของโครงสร้าง โลหะ/โลหะออกไซด์/โลหะ สำหรับประยุกต์ใช้เป็นหน่วยความจำแบบความต้านทาน สมบัติทางไฟฟ้าเป็นสมบัติที่สำคัญสำหรับใช้เป็นหน่วยความจำหรือที่เรียกว่า resistive switching และเสถียรภาพในการเปลี่ยนสถานะจากความต้านทานสูงไปเป็นความต้านทานต่ำที่ส่งผลต่อการนำไปใช้งานจริง โดยสามารถหาสมบัติดังกล่าวได้จากการวัด Current-

voltage characteristic โดยการไบแอสความต่างศักย์และวัดค่าของกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์ โดยลักษณะของความสัมพันธ์อธิบายดังรายละเอียดในหัวข้อที่ผ่านมา



รูปที่ 3.10 เครื่องวัดค่าความสัมพันธ์ของกระแสและความต่างศักย์ของโครงสร้างที่ประดิษฐ์ขึ้น (Keithley 238)