

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึงทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ซึ่งประกอบด้วย กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง การก่อเกิดฟิล์มบาง การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการสเป็คเตอรืง การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการรีแอคทีฟสเป็คเตอรืง เครื่องเคลือบฟิล์มบางแบบ ดีซี สเป็คเตอรืง เครื่องเคลือบฟิล์มบางแบบ ดีซี แมกนีตรอน สเป็คเตอรืง เครื่องเคลือบฟิล์มบางแบบ อันบาลานซ์ แมกนีตรอน สเป็คเตอรืง การหาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง

การเคลือบฟิล์มบาง (Thin Film) ในสุญญากาศครั้งแรกทำโดย Bunsen และ Grove ในปี ค.ศ.1852 ทั้งนี้โดยแนวคิดพื้นฐานแล้ว การเคลือบฟิล์มบาง คือ การเรียงตัว (Fabricated) โดยการพอกพูนหรือสะสม (Deposition) ของสารเคลือบในลักษณะอะตอมเดี่ยวบนวัสดุรองรับ (Substrate) จนเกิดเป็นชั้นของสารเคลือบนั้นในลักษณะฟิล์มบาง โดยฟิล์มที่ได้จะบางมาก มีความหนาในระดับนาโนเมตร (Bunshah, 1994)

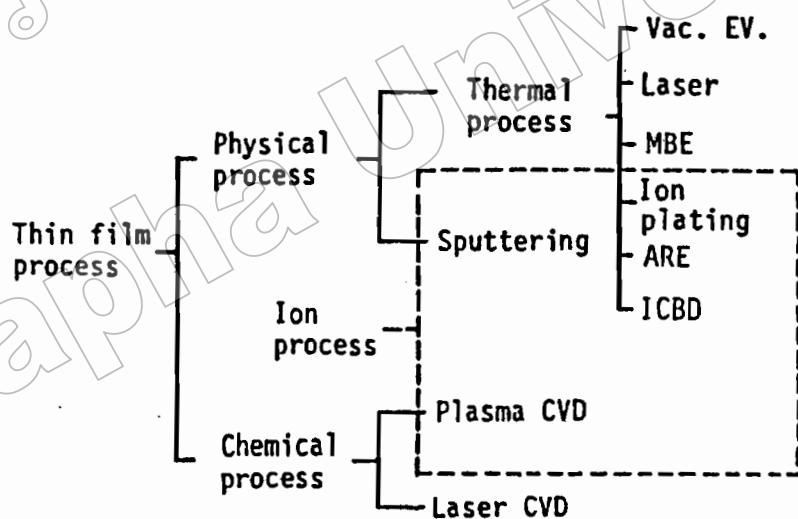
ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ฟิล์มบางจากกระบวนการเคลือบในสุญญากาศในงานด้านต่าง ๆ มากมาย เช่น อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ เช่น สารกึ่งตัวนำ ฟิล์มตัวนำและฟิล์มตัวต้านทาน หรือ อุปกรณ์ทางแสง เช่น เลนส์ กระจกเลเซอร์ กระจกสะท้อนแสง กระจกกรองแสงเฉพาะบางช่วงความถี่ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางนี้ในการเตรียมสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางและมีความเป็นระเบียบสำหรับใช้ศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุต่าง ๆ ในรูปของฟิล์มบาง ซึ่งสมบัติบางประการไม่สามารถวัดได้เมื่ออยู่ในสภาพเป็นก้อน ข้อมูลเหล่านี้มีประโยชน์มากในการพัฒนาวัสดุเพื่อนำไปใช้ในทางอุตสาหกรรม

การเคลือบฟิล์มบางเป็นกระบวนการที่ทำให้สารเคลือบตกเคลือบลงบนผิววัสดุรองรับที่ต้องการ ซึ่งสามารถทำได้ทั้งกระบวนการทางเคมีหรือกระบวนการทางฟิสิกส์ โดยพื้นฐานแล้ว กระบวนการเคลือบฟิล์มบางมีขั้นตอนสำคัญ 3 ขั้นตอน (Smith, 1995) ดังนี้คือ

1. การสร้างสารเคลือบ (Source) โดยทั่วไปแล้วสารเคลือบอาจอยู่ในรูปของ ของแข็ง ของเหลว ไอ หรือแก๊ส ก็ได้ แต่สารเคลือบขณะทำการเคลือบนั้นจำเป็นต้องอยู่ในรูปของไอระเหย เท่านั้น ซึ่งวิธีการที่ทำให้สารเคลือบกลายเป็นไอระเหยสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การให้ความร้อน หรือการระดมยิงด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูง เป็นต้น

2. การเคลื่อนย้ายสารเคลือบมายังวัสดุรองรับ (Transport) ในภาวะสุญญากาศไอ ระเหยของสารเคลือบอาจจะมีการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ไปยังวัสดุรองรับ หรืออาจจะเคลื่อนที่ไป ในลักษณะของไหล ซึ่งจะทำให้ไอระเหยของสารเคลือบมีการชนกับอนุภาคอื่นภายในภาชนะ สุญญากาศ นอกจากนี้ไอระเหยอาจจะเคลื่อนที่ไปยังวัสดุรองรับในลักษณะของพลาสมาก็ได้

3. การควบแน่น (Deposition) เป็นการพอกพูนและโตขึ้นจนกลายเป็นชั้นฟิล์มบาง บนวัสดุรองรับส่วนของการควบแน่นและพอกพูนของชั้นฟิล์มบางนั้น จะขึ้นกับเงื่อนไขของวัสดุ รองรับหรือการทำปฏิกิริยาของสารเคลือบกับวัสดุรองรับ ความสะอาดของผิววัสดุรองรับ ตลอดจน พลังงานที่ใช้ในการเคลือบ



ภาพที่ 2-1 ประเภทของกระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ (Wasa & Hayakawa, 1992)

การเคลือบฟิล์มในสุญญากาศบางอาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท (Wasa & Hayakawa, 1992) (ภาพที่ 2-1) ได้แก่

1. การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางเคมี (Chemical Process) เป็นการเคลือบที่อาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสภาพของแก๊สแล้วเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นสารใหม่ (New Species) ตกเคลือบบนวัสดุรองรับ เช่น วิธี Plasma CVD และ วิธี Laser CVD เป็นต้น

2. การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์ (Physical Process) เป็นการเคลือบที่อาศัยการทำให้อะตอมของสารเคลือบหลุดออกจากผิวแล้วฟุ้งกระจายหรือวิ่งเข้าไปจับและยึดติดกับผิวของวัสดุรองรับ เช่น วิธีระเหยสาร (Evaporation) และ วิธีสปัตเตอริง (Sputtering) เป็นต้น

สำหรับการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์นั้นจะอาศัยการทำให้อะตอมของสารเคลือบหลุดออกจากผิวของสารเคลือบตั้งต้น แล้วฟุ้งกระจายวิ่งไปจับและยึดติดกับผิวของวัสดุรองรับ แล้วพอกพูนเป็นชั้นของฟิล์มบางในที่สุด สามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีหลัก ๆ (พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ และธนัสถา รัตน์, 2547; Wasa & Hayakawa, 1992) คือ

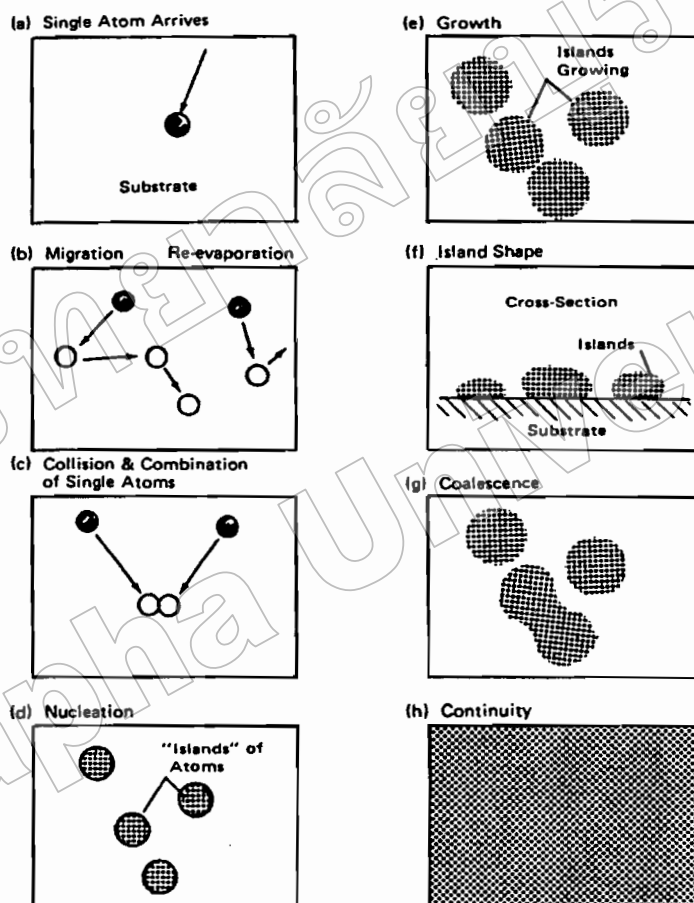
1. การเคลือบด้วยวิธีระเหยสาร (Evaporation) เป็นการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบที่ทำให้ระเหยซึ่งเกิดขึ้นในสุญญากาศ ทำได้โดยการให้ความร้อนที่มากพอที่จะทำให้สารเคลือบกลายเป็นไอ ซึ่งไอของสารเคลือบนี้จะฟุ้งไปกระทบกับวัสดุรองรับที่มีอุณหภูมิเหมาะสมก็จะเกิดการควบแน่นของสารเคลือบและพอกพูนโตเป็นชั้นของฟิล์มบางต่อไป การให้ความร้อนในการระเหยสารเคลือบทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้และไม่ยุ่งยากคือการให้ความร้อนแก่ภาชนะบรรจุสารเคลือบด้วยวิธีทางไฟฟ้านอกจากนี้ยังมีวิธีอื่น เช่น การให้ความร้อนจากตัวต้านทาน (Resistive Heating) การระเหยแบบวาบแสง (Flash Evaporation) การระเหยด้วยเลเซอร์ (Laser Evaporation) การระเหยด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron Beam Evaporation) การระเหยด้วยการอาร์ค (Arc Evaporation) การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (Radiofrequency Heating) การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีนี้นิยมใช้เคลือบสารไดอิเล็กทริก (Dielectric) เช่น แมกนีเซียมไดฟลูออไรด์ (MgF_2) หรือ ออกไซด์ (Oxide) ของโลหะที่มีสมบัติโปร่งใสบนวัสดุที่ต้องการเคลือบ เช่น เลนส์กล้องถ่ายรูป แว่นตาและกระจกเลเซอร์ ฯลฯ สำหรับข้อเสียของการเคลือบวิธีนี้คือ แรงยึดติดระหว่างสารเคลือบและวัสดุรองรับจะไม่สูงนัก จึงต้องอาศัยกระบวนการอบด้วยความร้อนหรือวิธีอื่นช่วยให้การยึดเกาะของสารเคลือบดีขึ้น นอกจากนี้ฟิล์มบางที่ได้อาจมีการปนเปื้อนของสารที่ใช้ทำภาชนะบรรจุสารเคลือบได้ ถ้าภาชนะบรรจุสารเคลือบมีจุลหอยหรือสิ่งสกปรกติดกับสารเคลือบ

2. การเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริง (Sputtering) เป็นการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริง การเคลือบด้วยวิธีนี้เกิดขึ้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงวิ่งเข้าชนวัสดุรองรับและมีการพอกพูนเป็นฟิล์มบางในที่สุด กระบวนการสปัตเตอริงคือการทำให้อะตอมหลุดจากผิวของวัสดุโดยการชนของอนุภาคพลังงานสูง โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและ โมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิวสารเคลือบ เนื่องจากไอออนที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่าวิธีการระเหยสารมาก ดังนั้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบวิ่งเข้ากระทบบนวัสดุรองรับก็จะฝังตัวแน่นลงในเนื้อวัสดุที่ต้องการเคลือบมากกว่าวิธีการระเหยสาร ดังนั้นการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริง จะทำให้การยึดเกาะระหว่างสารเคลือบกับวัสดุรองรับดีกว่า

การก่อเกิดฟิล์มบาง

การเกิดฟิล์มบางจากกระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ Chapman (1980) ได้อธิบายไว้ดังนี้เมื่อสารเคลือบจากแหล่งกำเนิดสารเคลือบเคลื่อนที่มาถึงวัสดุรองรับ สารเคลือบที่กระทบบนผิววัสดุรองรับส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของอะตอมหรือ โมเลกุล (ภาพที่ 2-2 (a)) โดยพลังงานพันธะ (Bonding Energy) ระหว่างอะตอมของสารเคลือบกับวัสดุรองรับและอุณหภูมิของวัสดุรองรับ จะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการแพร่ (Diffusion) ของสารเคลือบบนผิววัสดุรองรับ อะตอมของสารเคลือบจะตกกระทบบนผิววัสดุรองรับในตำแหน่งที่เรียกว่าตำแหน่งการดูดซับ (Adsorption Site) ทำให้เกิดการเกาะติดหรือถ้ามีพลังงานมากพอก็อาจกระโดดข้ามกำแพงพลังงานไปยังบริเวณที่อยู่ติดกันหรือหลุดออกจากตำแหน่งนั้นไป (ภาพที่ 2-2 (b)) ในช่วงเวลาหนึ่งอะตอมสารเคลือบอาจเกิดการระเหยกลับและเกิดการรวมตัวกันระหว่างอะตอมที่มีการแพร่ด้วยกัน เมื่ออะตอมของสารเคลือบรวมตัวกันอาจเกิดเป็นอะตอมคู่ (ภาพที่ 2-2 (c)) ซึ่งมีความเสถียรมากกว่าอะตอมเดี่ยว (Single Atom) ซึ่งการรวมตัวกันของอะตอมนั้นจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอะตอมเดี่ยวและอัตราเคลือบ (Deposition Rate) อะตอมคู่อาจรวมตัวกับอะตอมเดี่ยวอื่นแล้วกลายเป็นสามอะตอม (Triplets) หรือ สี่อะตอม (Quadruplets) หรืออื่น ๆ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าสภาวะการเกิดนิวเคลียส (ภาพที่ 2-2 (d)) ทำให้ได้กลุ่มอะตอมกึ่งเสถียร (Quasi-Stable Islands) จากนั้นกลุ่มอะตอมจะเริ่มโตขึ้นเรียกว่า การโตเป็นกลุ่มก้อน (Island Growth) ขนาดของกลุ่มอะตอมจะใหญ่ขึ้น โดยมีจำนวนอะตอมเท่าเดิม หรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (ภาพที่ 2-2 (e) และ 2-2 (f)) การโตของกลุ่มอะตอมนี้จะเกิดขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งขอบของแต่ละกลุ่มอะตอมชนกัน เรียกว่าการรวมกันเป็นก้อนของกลุ่มอะตอม (Agglomeration หรือ Coalescence) (ภาพที่ 2-2 (g)) จากการศึกษาด้วยเทคนิค Transmission Electron Microscopy (TEM) พบว่าขณะที่กลุ่มอะตอม

รวมกันเป็นก้อนอะตอมจะมีพฤติกรรมคล้ายของเหลว (Liquid-Like Behaviour) และมีการจัดเรียงทิศทางในเชิงผลึกวิทยา (Crystallographic Orientation) ด้วย การรวมกันเป็นก้อนของกลุ่มอะตอมจะเกิดขึ้นจนกระทั่งเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่อง (ภาพที่ 2-2 (h)) แต่ในบางกรณีการเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่องจะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์เมื่อฟิล์มมีความหนาโดยเฉลี่ยประมาณ $0.04 - 0.05 \mu\text{m}$ ลักษณะผิวของฟิล์มบางขณะเกิดการรวมกลุ่มอะตอมจะคล้ายเนินเขาและหุบเขา



ภาพที่ 2-2 การก่อเกิดฟิล์มบาง (Chapman, 1980)

เมื่อพิจารณาการเกิดฟิล์มในสภาวะที่เป็นกลุ่มอะตอม (Island) พบว่าอาจเป็นกลุ่มของผลึกเดี่ยวหรือกลุ่มของผลึกคู่หรือมากกว่านั้น ซึ่งกลุ่มอะตอมเหล่านี้จะตกเคลือบลงบนวัสดุรองรับที่เป็นวัสดุหลายผลึก ทิศทางการจัดเรียงตัว (Orientation) ของแต่ละกลุ่มอะตอมนั้นจะเป็นแบบสุ่ม (Random) ทำให้ได้ฟิล์มบางที่มีโครงสร้างเป็นหลายผลึกด้วย แต่ถ้ากลุ่มอะตอมเหล่านั้นตกเคลือบลงบนวัสดุรองรับที่เป็นผลึกเดี่ยว การจัดเรียงตัวของฟิล์มก็จะมีลักษณะเป็นผลึกเดี่ยว และเรียกการเกิดฟิล์มแบบผลึกเดี่ยวประเภทนี้ว่า เอพิแทกซี (Epitaxy)

ถ้าอะตอมที่ผิวของวัสดุรองรับมีพลังงานเพียงพอ อะตอมเหล่านั้นจะเคลื่อนที่เพื่อเลือกเข้าไปอยู่ในตำแหน่งที่มีพลังงานต่ำกว่าเสมอ ทั้งนี้ความสามารถในการเคลื่อนที่ (Mobility) ของอะตอมจะเพิ่มขึ้น ถ้าอุณหภูมิที่ผิววัสดุรองรับสูงขึ้น นอกจากนี้การลดอัตราเคลือบยังสามารถช่วยให้การโตของผลึกเกิดได้ดียิ่งขึ้น เพราะอะตอมมีเวลาในการโตมากพอ ดังนั้นถ้าอุณหภูมิของวัสดุรองรับสูงและมีอัตราเคลือบต่ำจะได้ฟิล์มที่มีขนาดของเกรนใหญ่ขึ้น มีข้อบกพร่องในเกรนน้อยลง และได้ฟิล์มที่มีความหนาแน่นมากพอสำหรับการเชื่อมต่อกันอย่างสมบูรณ์ ในทางกลับกันถ้าอุณหภูมิวัสดุรองรับต่ำแต่อัตราเคลือบสูงก็จะให้ผลลักษณะเดียวกัน

การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการสปัตเตอริง

การเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริงเป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางจากสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริง การเคลือบด้วยวิธีนี้เกิดขึ้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงวิ่งเข้าชนวัสดุรองรับและมีการพอกพูนและโตเป็นฟิล์มบางในที่สุด ทั้งนี้กระบวนการสปัตเตอริง คือ กระบวนการทำให้อะตอมหลุดจากผิวของวัสดุโดยการชนของอนุภาคพลังงานสูง โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุ ซึ่งอนุภาคที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้

ทั้งนี้เมื่อไอออนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนผิวหน้าเป้าสารเคลือบจะเกิดปรากฏการณ์ต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 2-3 ซึ่งสรุปได้ดังนี้คือ (Chapman, 1980; Maissel & Gland, 1970)

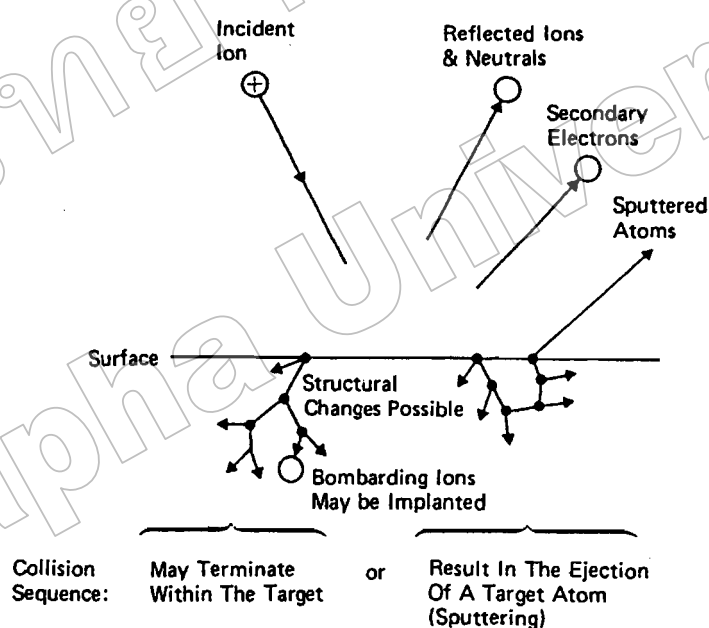
1. การสะท้อนที่ผิวหน้าของไอออน (Reflected Ion and Neutral) ไอออนอาจสะท้อนกลับจากผิวหน้าซึ่งส่วนใหญ่จะสะท้อนออกมาในรูปของอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้าอันเกิดจากการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิวเป้าสารเคลือบ

2. การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Emission) จากการชนของไอออนอาจทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่ส่องจากเป้าถ้าไอออนมีพลังงานสูงพอ

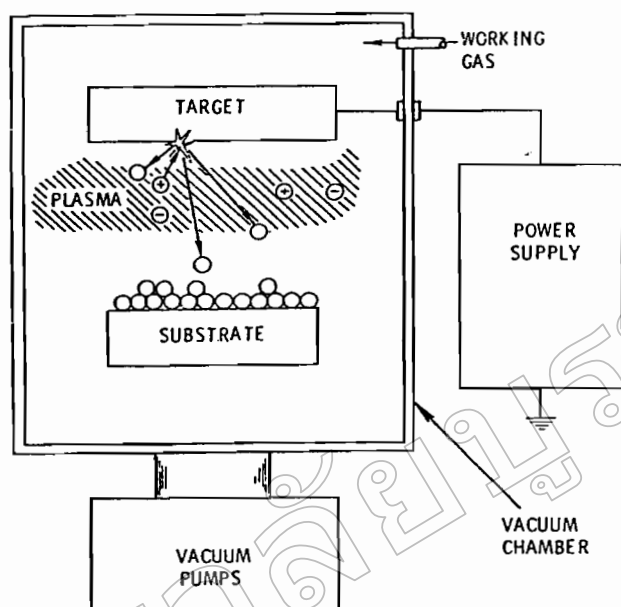
3. การฝังตัวของไอออน (Ion Implantation) ไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบนั้นอาจฝังตัวลงในสารเคลือบ โดยความลึกของการฝังตัวจะแปรผันโดยตรงกับพลังงานไอออน ซึ่งมีค่า 10 อังสตรอม/ พลังงานไอออน 1 keV สำหรับไอออนของแก๊สอาร์กอนที่ฝังตัวในทองแดง

4. การเปลี่ยนโครงสร้างของผิวหน้าเป้าสารเคลือบ (Target Material Structural Rearrangements) การชนของไอออนบนผิวสารเคลือบทำให้เกิดการเรียงตัวของอะตอมที่ผิวสารเคลือบใหม่และเกิดความบกพร่องของผลึก (Lattice Defect) โดยเรียกการจัดตัวใหม่ของโครงสร้างผิวนานี้ว่า Altered Surface Layer

5. การสปัตเตอร์ (Sputter) การชนของไอออนอาจทำให้เกิดกระบวนการชนกันแบบต่อเนื่องระหว่างอะตอมของเป้าอันทำให้เกิดการปลดปล่อยอะตอมจากเป้าสารเคลือบซึ่งเรียกว่ากระบวนการสปัตเตอร์



ภาพที่ 2-3 อันตรกิริยาระหว่างไอออนกับพื้นผิววัสดุ (Chapman, 1980)



ภาพที่ 2-4 องค์ประกอบพื้นฐานของระบบเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริง (จินตารธรรม
ธรรมปรีชา, 2554)

ทั้งนี้กระบวนการสปัตเตอริงจำเป็นต้องมีองค์ประกอบพื้นฐานอย่างน้อย 3 อย่างคือ

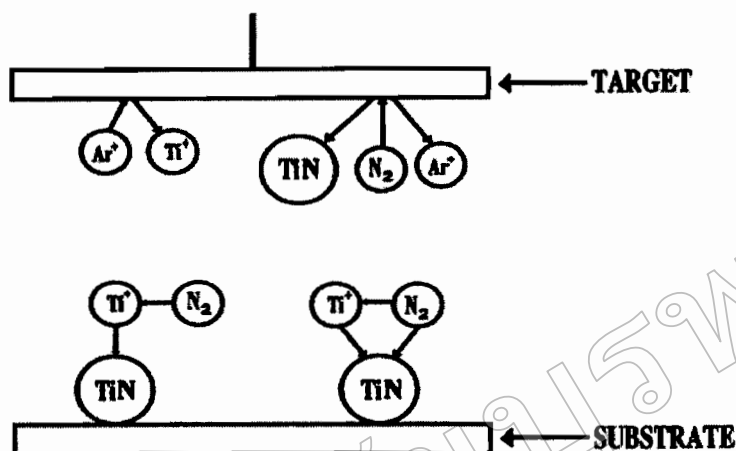
1. สารเคลือบ ซึ่งทำหน้าที่เป็นเป้า (Target) ให้ไอออนพลังงานสูงวิ่งเข้าชน จนมีการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลือบลงเคลือบบนวัสดุรองรับ
2. อนุภาคพลังงานสูง (High Energy Ion) ซึ่งจะวิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบแล้วทำให้อะตอมของเป้าสารเคลือบหลุดออกมา ปกติอนุภาคพลังงานสูงนี้อาจเป็นกลางทางไฟฟ้า เช่น นิวตรอนหรืออะตอมของธาตุต่าง ๆ แต่การทำให้อนุภาคที่เป็นกลางมีพลังงานสูงเกิน 10 eV เพื่อใช้ในกระบวนการสปัตเตอริงทำได้ค่อนข้างยาก วิธีการหนึ่งที่นิยมคือการเร่งอนุภาคประจุภายใต้สนามไฟฟ้าซึ่งสามารถควบคุมระดับพลังงานของไอออนได้ตามต้องการ อิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นได้ง่ายและสามารถเร่งให้มีพลังงานสูงภายใต้สนามไฟฟ้าได้ แต่อิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่าอะตอมของสารเคลือบมาก ทำให้การถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมต่ออะตอมสารเคลือบเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพและไม่สามารถทำให้กระบวนการสปัตเตอริงเกิดขึ้นได้ ตามทฤษฎีทางฟิสิกส์การชนระหว่าง 2 อนุภาคที่มีการส่งถ่ายพลังงานและโมเมนตัมดีที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อมวลของอนุภาคทั้งสองมีค่าเท่ากัน ดังนั้นจึงนิยมเลือกการเร่งไอออนของแก๊สในสนามไฟฟ้าเป็นอนุภาควิ่งชนเป้าสารเคลือบซึ่งให้อัตราการปลดปล่อยเป้าสารเคลือบสูงเพียงพอกับความต้องการ

3. การผลิตอนุภาคพลังงานสูงอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้อนุภาคพลังงานสูงในระบบสปัตเตอร์ จะต้องถูกผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้กระบวนการเคลือบสารเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจนได้ฟิล์มที่มีความหนาตามต้องการ ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีเช่น การใช้ลำอนุภาคจากปืนไอออน (Ion Gun) ที่มีปริมาณการผลิตไอออน ในอัตราสูง หรือผลิตจากกระบวนการโกลว์ดีสชาร์จ (Glow Discharge) แต่เนื่องจากปืนไอออนมีราคาสูงและให้ไอออนในพื้นที่แคบ ดังนั้นในกระบวนการสปัตเตอร์ในระดับอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้กระบวนการโกลว์ดีสชาร์จในการผลิตอนุภาคพลังงานสูงแทน

เนื่องจากไอออนที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอร์ในการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอร์นั้นจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่าวิธีการระเหยสารมาก เมื่ออะตอมของสารเคลือบวิ่งเข้ากระทบแผ่นวัสดุรองรับก็จะฝังตัวแน่นลงในเนื้อวัตถุที่ต้องการเคลือบมากกว่าวิธีระเหยสาร ดังนั้นการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอร์จะทำให้การยึดเกาะระหว่างสารเคลือบกับวัตถุที่ต้องการเคลือบดีกว่า การเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอร์นี้ยังแบ่งได้หลายแบบ เช่น วิธีอาร์เอฟสปัตเตอร์ (RF Sputtering) เป็นการใช้ระบบไฟฟ้าความถี่คลื่นวิทยุในการทำให้ไอออนของสารเคลือบหลุดจากผิวของเป้าสารเคลือบ หรือวิธีไอออนบีม สปัตเตอร์ (Ion Beam Sputtering) เป็นระบบที่ใช้วิธีกำเนิดไอออนในห้องไอออนแล้วเร่งให้ชนกับขั้วคาโทดซึ่งเป็นสารเคลือบด้วยศักย์สูงในสุญญากาศจากนั้นไอออนที่หลุดจากขั้วคาโทดจะวิ่งไปเกาะวัตถุที่ต้องการอีกคือหนึ่ง วิธีนี้จะได้สารเคลือบที่บริสุทธิ์มาก ทั้งนี้จะเห็นว่าฟิล์มบางที่ได้จากการเคลือบนั้นขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร ซึ่งรวมถึงกระบวนการเคลือบด้วย

การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการรีแอคทีฟสปัตเตอร์

สำหรับกระบวนการรีแอคทีฟ สปัตเตอร์ (Reactive Sputtering) มติ ห่อประชุม (2548) ได้อธิบายไว้ว่า เป็นกระบวนการสปัตเตอร์ที่มีการป้อนแก๊สไวปฏิกิริยา (Reactive Gas) เข้าสู่ระบบ เพื่อให้เกิดสารประกอบของฟิล์มตกเคลือบบนชิ้นงานหรือวัสดุรองรับ การสปัตเตอร์ที่มีเป้าสารเคลือบเป็นโลหะบริสุทธิ์ โดยการป้อนแก๊สไวปฏิกิริยา จะทำให้เกิดสารประกอบต่าง ๆ ของโลหะได้ เช่น การป้อนแก๊สไนโตรเจนอาจทำให้เกิดโลหะไนไตรด์ ถ้าป้อนแก๊สอะเซทิลีน (C_2H_2) หรือ มีเทน (CH_4) อาจเกิดเป็นสารประกอบของโลหะคาร์ไบด์ เป็นต้น โดยปกติความดันแก๊สไวปฏิกิริยาที่ใช้ค่อนข้างต่ำจนไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาในสถานะปกติ อย่างไรก็ตามคาดกันว่าอิเล็กตรอนในพลาสมาที่มีส่วนในการกระตุ้นหรือไอออไนซ์แก๊สไวปฏิกิริยาให้มีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับโลหะได้สูงกว่าสถานะปกติ โดยแก๊สไวปฏิกิริยา เช่น แก๊สไนโตรเจน (N_2) อาจรวมตัวกันกับโลหะ เช่น ไททาเนียม (Ti) แล้วเกิดเป็นสารประกอบไททาเนียมไนไตรด์ (TiN) ตามภาพที่ 2-5 ได้เป็น 3 ลักษณะ ดังนี้



ภาพที่ 2-5 การเกิดปฏิกิริยารวมตัวกันเป็นสารประกอบระหว่างแก๊สไวปฏิกิริยากับอะตอมเป้าสารเคลือบในบริเวณต่าง ๆ (มติ ห่อประทุม, 2548)

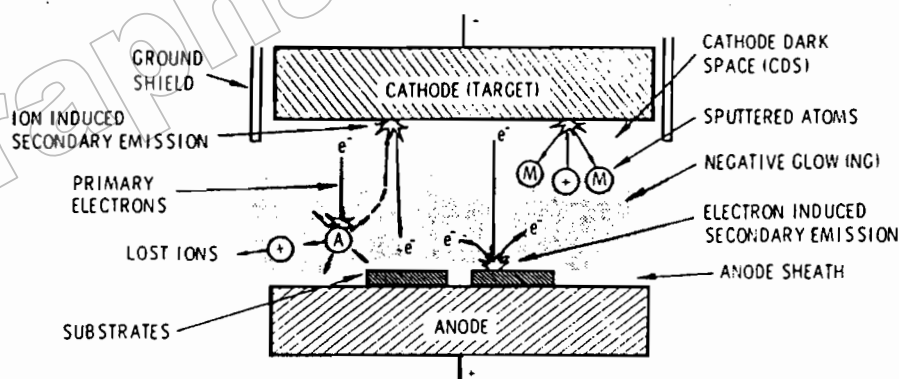
1. แก๊สไวปฏิกิริยา เช่น แก๊สไนโตรเจนทำปฏิกิริยากับอะตอมไททาเนียมที่ผิวหน้าเป้าของสารเคลือบกลายเป็นสารประกอบไททาเนียมไนไตรด์แล้วถูกสปัตเตอร์ให้หลุดแล้วเคลือบบนแผ่นวัสดุรองรับ ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นสูงเมื่อความดันย่อยของแก๊สไวปฏิกิริยาในระบบมีค่าสูง ซึ่งอาจพบเคลือบของไททาเนียมไนไตรด์ที่หน้าเป้าสารเคลือบ โดยบริเวณที่มีอัตราการสปัตเตอร์ต่ำจะปรากฏฟิล์มสีทองของไททาเนียมไนไตรด์บริเวณนั้น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Target Poisoning มีผลทำให้อัตราการเคลือบลดลง

2. แก๊สไวปฏิกิริยา เช่น แก๊สไนโตรเจนรวมตัวกับอะตอมไททาเนียมที่ถูกสปัตเตอร์ระหว่างทางวิ่งสู่แผ่นวัสดุรองรับแล้วตกเคลือบบนแผ่นวัสดุรองรับ กระบวนการนี้ทางทฤษฎีถือว่าเกิดได้น้อยมากเนื่องจากสถานะของการทำปฏิกิริยาไม่เหมาะสมตามกฎอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัม แต่เป็นไปได้ที่การรวมตัวของสารประกอบจะเกิดในช่วงนี้

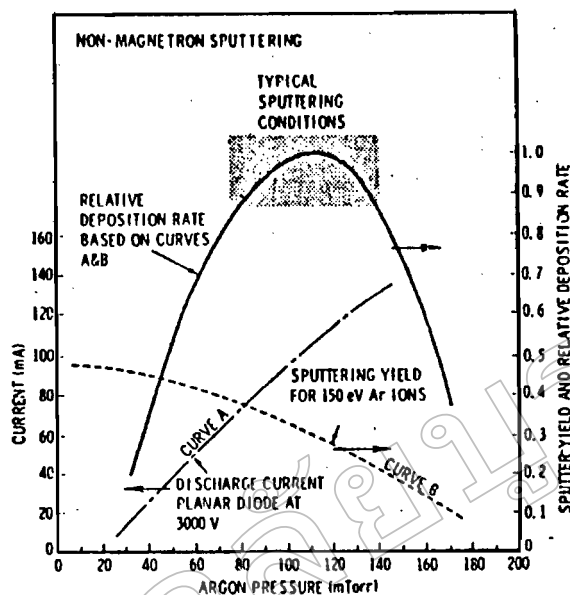
3. แก๊สไวปฏิกิริยา เช่น แก๊สไนโตรเจนรวมตัวกับอะตอมไททาเนียมบนผิววัสดุรองรับ การทำรีแอคทีฟ สปัตเตอร์ริง โดยทั่วไปความดันแก๊สไวปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดสารประกอบที่ต้องการมีค่าต่ำกว่าช่วงที่เกิดการ โกลว์ดิสชาร์จ ในกระบวนการจึงใช้แก๊สไวปฏิกิริยากับแก๊สเฉื่อยทำให้รักษาสภาวะ โกลว์ดิสชาร์จไว้ได้ ขณะเดียวกันช่วยให้อัตราเคลือบสูงขึ้น รีแอคทีฟ สปัตเตอร์ริง ยังต้องคำนึงถึงความดันย่อยของแก๊สไวปฏิกิริยาต้องมีค่าเหมาะสมกับการเกิดฟิล์มสารประกอบที่ต้องการ

เครื่องเคลือบฟิล์มบางแบบ ดีซี สเป็คเตอรिंग

เครื่องเคลือบแบบ ดีซี สเป็คเตอรिंग แบบพื้นฐานที่ง่ายที่สุดสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2-6 ซึ่งประกอบด้วยคาโทดคือแผ่นเป้าสารเคลือบและอานอดใช้เป็นทิวางวัสดุรองรับหรือชิ้นงานที่ต้องการเคลือบ ปกติระยะระหว่างคาโทดและวัสดุรองรับจะอยู่ระหว่าง 4.0-10.0 cm เพื่อป้องกันการสูญเสียอะตอมสารเคลือบออกด้านข้างหรือผนังของภาชนะสุญญากาศ โดยทั่วไประยะคาร์คสเปซอยู่ระหว่าง 1.0-4.0 cm โดยอานอดจะอยู่บริเวณเนกาทีฟโกลว์ ส่วนอุปกรณ์ทำงานอยู่ในช่วงแอนนอร์มอลโกลว์ แก๊สที่ใช้เป็นแก๊สเฉื่อยซึ่งให้ฮิลด์สูงและไม่ทำปฏิกิริยากับเป้าสารเคลือบ (ปกติใช้แก๊สอาร์กอน) ขณะเกิดโกลว์ดีสชาร์จที่ความดันต่ำหนึ่ง กระบวนการไอออนไนซ์จะรักษาสภาพโกลว์ดีสชาร์จไว้ตรงที่ระยะคาร์คสเปซไม่มากกว่าระยะระหว่างคาโทดและอานอด เมื่อความดันลดลงหรือแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดสูงขึ้น ระยะปลดการชนของอิเล็กตรอนจะสูงขึ้น ทำให้ระยะคาร์คสเปซขยายตัวออก และแหล่งผลิตไอออนในระบบมีปริมาณน้อย กระแสไฟฟ้าจะลดลงและอะตอมที่ถูกสเป็คเตอรິงมีปริมาณลดลงตามปริมาณของไอออนและกระแสไฟฟ้าในระบบ ที่ความดันต่ำกว่า 10^{-2} mbar ระยะคาร์คสเปซจะยาวกว่าระยะระหว่างอิเล็กโตรดและกระแสไฟฟ้าลดลงสู่ศูนย์ ทำให้กระบวนการผลิต ไอออนสิ้นสุดลงและไม่มีอะตอมหลุดออกจากเป้าสารเคลือบเนื่องจากการ สเป็คเตอรິง (Bunshah, 1994; พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ และธณัฐธา รัตนะ, 2547; Smith, 1995; Maissel & Gland, 1970)



ภาพที่ 2-6 ระบบสเป็คเตอรິงแบบ ดีซี สเป็คเตอรິง (Bunshah, 1994)



ภาพที่ 2-7 ผลของความดันที่มีต่ออัตราเคลือบ ค่าyield และกระแสไฟฟ้าในระบบสปัตเตอริงของนิเกิลที่ใช้ศักย์ไฟฟ้า 3,000 V ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่วางห่างกัน 4.5 cm (Vossen & Kerns, 1978)

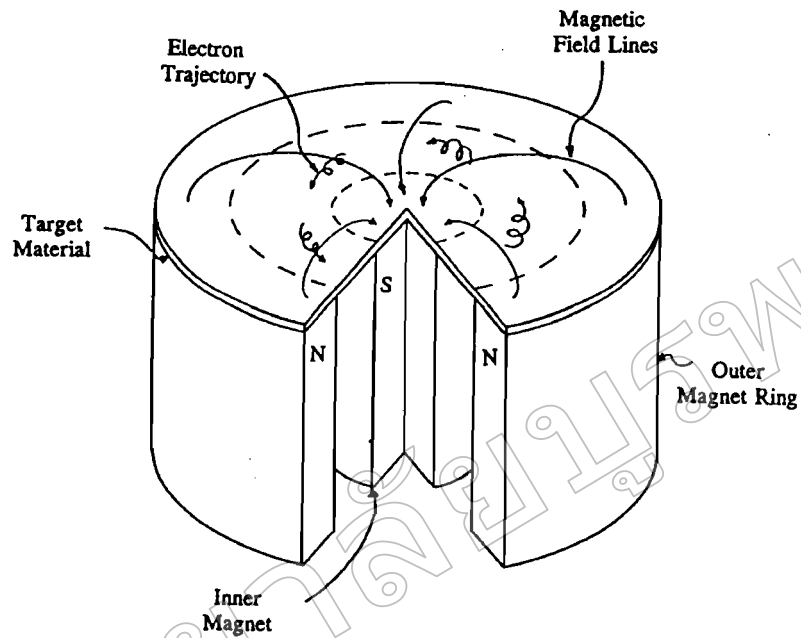
ขณะที่ความดันสูงขึ้นระยะคาร์คสเปจจะหดสั้นลง บริเวณการผลิตไอออนมีปริมาตรสูงขึ้นกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรเพิ่มขึ้นและกระบวนการสปัตเตอริงเกิดขึ้นในอัตราสูงตามความดัน (ภาพที่ 2-7 เส้นกราฟ A) ขณะที่ความดันภายในระบบสูงขึ้นระยะปลดการชนระหว่างโมเลกุลของแก๊สมีค่าลดลง อะตอมสารเคลือบที่หลุดออกจากเป้าจะส่งผ่านเคลือบบนวัสดุรองรับได้ยากจากการชนกับ โมเลกุลของแก๊สและสะท้อนกลับสู่เป้าสารเคลือบหรือสูญเสียสู่ผนังภาชนะสุญญากาศทำให้ค่าyield จากการสปัตเตอริงมีค่าลดลง แต่เมื่อความดันสูงขึ้น (ภาพที่ 2-7 เส้นกราฟ B) ผลรวมระหว่างyield และกระแสไอออนจะทำให้อัตราเคลือบมีค่าสูงสุดที่ความดันค่าหนึ่ง ทั้งนี้พบว่าการสปัตเตอริงนิเกิลเมื่อใช้ศักย์ไฟฟ้า 3,000 V ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่วางห่างกัน 4.5 cm ในแก๊สอาร์กอน การเคลือบจะหยุดที่ความดันมีค่าต่ำกว่า 2.6×10^{-4} mbar และที่ความดันสูงกว่า 1.6×10^{-5} mbar โดยอัตราเคลือบจะมีค่าสูงสุดและลดลงเมื่อความดันสูงเกินค่านี้ ดังนั้นบริเวณที่เหมาะสมกับกระบวนการสปัตเตอริงคือบริเวณที่ให้อัตราเคลือบสูงและประสิทธิภาพดีที่สุด จากภาพที่ 2-7 พบว่าความดันที่เหมาะสมสำหรับเคลือบคือ 1.0×10^{-5} mbar ความหนาแน่นกระแส 1.0 mA/cm^2 ด้วยอัตราเคลือบ $0.036 \text{ } \mu\text{m/min}$ ซึ่งเป็นอัตราเคลือบที่ค่อนข้างต่ำในขณะที่ใช้ศักย์ไฟฟ้าค่อนข้างสูง

ระบบสปัดเตอริงทั่วไปต่ออาโนดลงกราวด์ร่วมกับภาชนะสุญญากาศและให้คาโทด มี สักย์ไฟฟ้าลบ โดยแยกขั้วคาโทดและผิวของภาชนะสุญญากาศด้วยฉนวน เรียกว่า กราวด์ชีลด์ (Ground Shield) ดังในภาพที่ 2-6 กราวด์ชีลด์จะมีลักษณะเป็นผนังโลหะหุ้มรอบๆ ขอบของคาโทด โดยจะต้องจัดระยะระหว่างคาโทดและกราวด์ชีลด์ให้สั้นกว่าระยะคาร์คสเปซ ดังนั้นแม้ว่า สักย์ไฟฟ้าของ กราวด์ชีลด์จะเท่ากับอาโนดการ โกลว์ดีสชาร์จและสปัดเตอริงจะไม่สามารถเกิดกับ คาโทดในบริเวณที่มีกราวด์ชีลด์หุ้มอยู่ทำให้สามารถควบคุมบริเวณที่ต้องการสปัดเตอริงได้

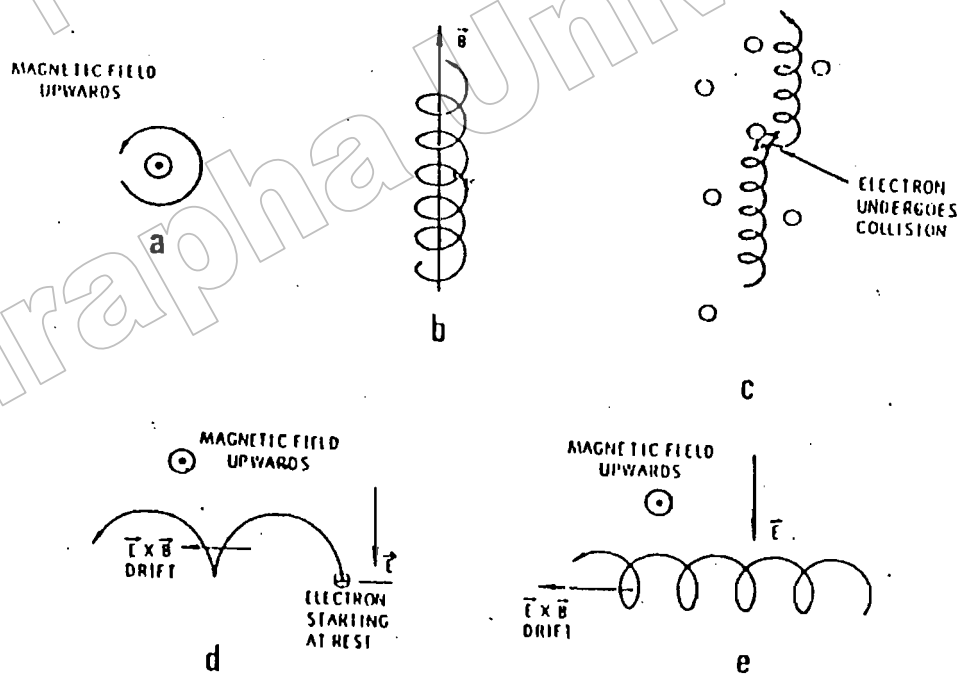
เครื่องเคลือบฟิล์มบางแบบ ดีซี แมกนีตรอน สปัดเตอริง

เครื่องเคลือบอีกแบบหนึ่งที่พัฒนาดังมาจากแบบดีซี สปัดเตอริง เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพ ของการสร้างสารเคลือบคือ เครื่องเคลือบแบบ ดีซี แมกนีตรอน สปัดเตอริง เนื่องจาก อัตราการเกิด สปัดเตอริงนั้นขึ้นกับผลคูณระหว่าง ยิลด์และปริมาณไอออนที่วิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ ดังนั้นการ เพิ่มอัตราการสปัดเตอริงนอกจากทำได้โดยการเพิ่มยิลด์แล้วยังทำได้โดยการเพิ่มปริมาณ ไอออนที่วิ่ง เข้าชนเป้าสารเคลือบ แต่ในระบบ ดีซี สปัดเตอริง ทำได้เพียงการเพิ่มแรงดันไฟฟ้า หรือเพิ่มความดัน ซึ่งมีขีดจำกัดสูงสุดที่ ความหนาแน่นกระแสประมาณ 1 mA/cm^2 และความดันประมาณ $1.33 \times 10^{-4} \text{ mbar}$ เท่านั้น ซึ่งในระบบดีซี สปัดเตอริง อะตอมแก๊สที่จะเกิดการไอออไนซ์มีค่าน้อยกว่า 1% นอกจากนี้เมื่อความดันสูงขึ้นจะทำให้แก๊สที่แทรกตัวในฟิล์มบางที่ได้มีค่าสูงด้วย (Bunshah, 1994; พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ และธนิศ รัตนะ, 2547; Maissel & Gland, 1970; Vossen & Kerns, 1978)

เครื่องเคลือบระบบ ดีซี แมกนีตรอน สปัดเตอริง ซึ่งได้รับการพัฒนาใหม่นี้เป็นการใช้ สนามแม่เหล็กช่วย โดยจ่ายสนามแม่เหล็กให้มีทิศขนานกับผิวหน้าเป้าสารเคลือบและมีทิศตั้งฉาก กับสนามไฟฟ้าซึ่งจะช่วยเพิ่มระยะทางเดินของอิเล็กตรอนให้ยาวขึ้น โดยอำนาจของสนามแม่เหล็ก จะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นทางโค้ง (ภาพที่ 2-8) ทำให้การไอออไนซ์เนื่องจากการชนระหว่าง อิเล็กตรอนกับอะตอมแก๊สเฉื่อยมีค่าสูงขึ้นซึ่งจะทำให้อัตราการสปัดเตอริงสูงขึ้นด้วย



ภาพที่ 2-8 การเคลื่อนที่ของอนุภาคอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก (Rohde & Munz, 1991)



ภาพที่ 2-9 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามต่าง ๆ โดย a, b, c เป็นการเคลื่อนที่ของประจุในสนามแม่เหล็กอย่างเดียว ส่วน d และ e เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าร่วมกันในลักษณะต่าง ๆ (Bunshah, 1994)

ทั้งนี้จากการศึกษาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก พบว่าถ้าอิเล็กตรอนมีทิศทางการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก อิทธิพลของสนามแม่เหล็กจะทำให้อนุภาคประจุนั้นเคลื่อนที่ในแนววงกลม (ภาพที่ 2-9(a)) ด้วยรัศมี

$$r = \frac{3.37(W)^{1/2}}{B} \quad (2-1)$$

เมื่อ W คือพลังงานของอิเล็กตรอนในหน่วย eV

B คือความเข้มสนามแม่เหล็กในหน่วย gauss หมุนด้วยความถี่ไซโคลตรอน

$$V = 2.8 \times 10^6 \text{ Hz}$$

ถ้าพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กมีค่า 10 eV และสนามแม่เหล็กมีค่าความเข้ม 100 gauss รัศมีการหมุนมีค่าเท่ากับ 0.1 cm ด้วยความถี่การหมุนเท่ากับ 2.8×10^6 Hz ภาพที่ 2-9(b) แสดงอิเล็กตรอนมีความเร็วส่วนหนึ่งในแนวนานกับสนามแม่เหล็ก อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่หมุนควงรอบแนวสนามแม่เหล็กด้วยจำนวนเส้นแรงคงที่ค่าหนึ่ง ระหว่างนี้ถ้าอิเล็กตรอนชนกับอะตอมแก๊ส ภาพที่ 2-9(c) แนวการหมุนควงรอบสนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนไป ถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ภายในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกัน อำนาจของสนามทั้งสองนอกจากจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในแนวโค้งแล้วยังสามารถทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเรียกว่า การเคลื่อนที่แบบลอยเลื่อน (Drift Motion) มีค่าเท่ากับ

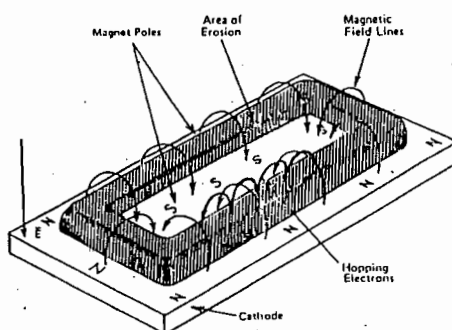
$$V_E = \frac{10^8 E}{B} \quad (2-2)$$

เมื่อ E คือสนามไฟฟ้าหน่วยเป็น V/cm

B คือความเข้มสนามแม่เหล็กในหน่วย gauss

กรณีสนามไฟฟ้าบริเวณคาร์คสเปซมีค่าประมาณ 1,000 V/cm และสนามแม่เหล็ก 100 gauss จะให้ค่าความเร็วลอยเลื่อนเท่ากับ 10^7 m/s ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูงกรณีพลังงานเริ่มต้นของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้า การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะเป็นรูปไซคลอยด์ (Cycloid) ดังภาพที่ 2-9(d) ถ้าอิเล็กตรอนมีพลังงานเริ่มต้นสูงกว่าพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้า การเคลื่อนที่แบบลอยเลื่อนจะอยู่ในแนววงกลมซ้อนกันดังแสดงในภาพที่ 2-9(e) พฤติกรรมที่ปรากฏต่ออิเล็กตรอนนี้จะเด่นชัดมาก ถึงแม้จะใช้สนามแม่เหล็กมีค่าน้อย ๆ ระหว่าง 50-500 gauss แต่จะมีผลในการเบี่ยงเบนแนวทางการเดินของไอออน (ซึ่งมีมวลสูงกว่าอิเล็กตรอนมาก) อย่างไม่เด่นชัด

ระบบสปัตเตอร์ริงที่ใช้สนามแม่เหล็กช่วยเพิ่มปริมาณไอออนนั้น ถ้าสนามแม่เหล็กมีทิศทางขนานกับสนามไฟฟ้าเรียกว่า สนามตามยาว (Longitudinal Field) จะทำให้ประสิทธิภาพการเพิ่มไอออนไม่สูงนักแต่ไม่ทำให้แนวการเกิดโกลด์สชาร์จเปลี่ยนแปลงไปและยังสามารถรักษาความสม่ำเสมอของฟิล์มบางได้ กรณีสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าเรียกว่า สนามตามขวาง (Transverse Field) โดยกระบวนการเพิ่มปริมาณไอออนเกิดขึ้นดังนี้ หลังจากไอออนบวกชนกับเป้าสารเคลือบและเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมา อิเล็กตรอนทุติยภูมิจะเคลื่อนที่ลักษณะเดียวกับภาพที่ 2-9(d) ทำให้อิเล็กตรอนถูกกักอยู่ในบริเวณสนามแม่เหล็กใกล้ผิวคาโทดและเคลื่อนที่แบบลอยเลื่อนไปตามแนวผิวหน้าของคาโทด (ภาพที่ 2-10) ทำให้อิเล็กตรอนมีโอกาสนชนกับโมเลกุลแก๊สบริเวณผิวหน้าเป้าสารเคลือบมากขึ้นจนเพิ่มปริมาณไอออนสูงมากใกล้ผิวเป้าสารเคลือบ อิเล็กตรอนตัวใดที่ไม่ชน โมเลกุลของแก๊สจะเดินทางเป็นวงโค้งเข้าชนเป้าสารเคลือบและผลิตอิเล็กตรอนทุติยภูมิมากขึ้น ทำให้ไอออนถูกผลิตในปริมาณสูงมากและเกิดโกลด์สชาร์จ ทำให้เกิดสเปซชาร์จ (Space Charge) จาก ไอออนบวกสูงที่ผิวคาโทด ซึ่งอาจสั้นกว่าระยะปลดปล่อยการชนของระบบ ดีซี สปัตเตอร์ริงที่ความดันใช้งานมาก แรงเคลื่อนไฟฟ้าเกือบทั้งหมดตกคร่อมบริเวณนี้ และมีค่าสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณคาร์คสเปซ ใน ดีซี สปัตเตอร์ริงจะไม่มีสนามแม่เหล็กมากทำให้ความต้องการแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดของระบบ แมกนีตรอน สปัตเตอร์ริง ลดลงมีค่าประมาณ 300-800 V โดยแมกนีตรอนที่ใช้อาจเป็นแบบทรงกระบอกที่เรียกว่า แมกนีตรอน สปัตเตอร์ริงทรงกระบอก (Cylindrical Magnetron Sputtering) หรือแบบแผ่นราบที่เรียกว่า พลาแนร์แมกนีตรอน สปัตเตอร์ริง (Planar Magnetron Sputtering) ก็ได้



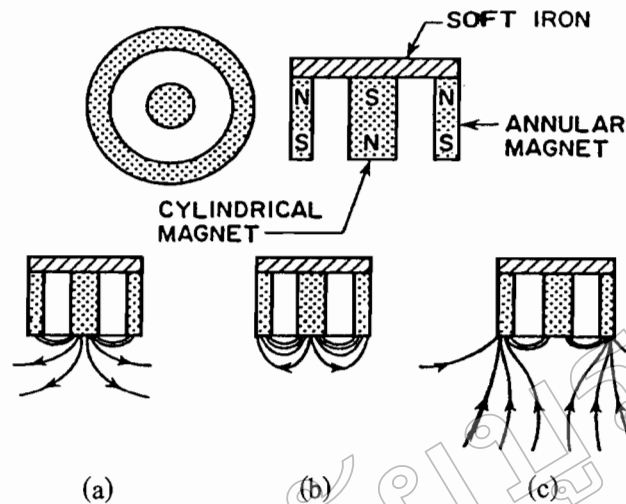
ภาพที่ 2-10 การจัดสนามแม่เหล็กและแนวการกักคร่อนของเป้าสารเคลือบในระบบพลาแนร์แมกนีตรอน สปัตเตอร์ริง (Chapman, 1980)

ในระบบแมกนีตรอน สเป็คเตอริง ไอออนและพลาสมาที่เกิดขึ้นเข้มข้นมากบริเวณเป้าสารเคลือบทำให้อัตราการสเป็คเตอริงมีค่าสูง ขณะที่ใช้ความดันต่ำและแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าเกือบคงที่ที่ทุกค่าของอัตราการสเป็คเตอริง แมกนีตรอนสเป็คเตอริงทรงกระบอกทั่วไปมีอัตราการสเป็คเตอริงสูงกว่า $1.0 \mu\text{m}/\text{min}$ และมีอัตราเคลือบสูงกว่า $0.2 \mu\text{m}/\text{min}$ ความหนาแน่นกระแสที่ผิวคาโทด ประมาณ $20.0 \text{ mA}/\text{cm}^2$ แรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าระหว่าง $300\text{-}800 \text{ V}$ ที่ความดันประมาณ $5.33 \times 10^{-5} \text{ mbar}$ แสดงถึงการเพิ่มประสิทธิภาพการเคลือบสูงขึ้นกว่า 10 เท่า นอกจากนี้ยังสามารถขยายสเกลใช้กับระบบสเป็คเตอริงขนาดใหญ่ได้ง่าย ส่วนข้อเสียคือแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าต่ำ จึงมีข้อจำกัดในการเคลือบวัสดุบางชนิดที่ต้องการแรงดันไฟฟ้าสูงเพื่อควบคุมคุณภาพฟิล์ม แต่มีข้อได้เปรียบที่สามารถคุมอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ให้อยู่ภายในกรอบสนามแม่เหล็ก จึงมีอิเล็กตรอนหลุดและวิ่งเข้าสู่วัสดุรองรับปริมาณน้อยซึ่งช่วยลดปัญหาความร้อนบนวัสดุรองรับเนื่องจากการชนของอิเล็กตรอนลง

เครื่องเคลือบฟิล์มบางแบบ อันบาลานซ์ แมกนีตรอน สเป็คเตอริง

กระบวนการเคลือบฟิล์มนั้น พบว่าหากมีการระดมยิงไอออนระหว่างที่มีการตกเคลือบและการก่อตัวเป็นฟิล์มจะเป็นการเปลี่ยนแปลงสมบัติของฟิล์มหลายอย่างเช่น พฤติกรรมการเกิดนิวเคลียส (Nucleation Behaviour) สัณฐานวิทยา (Morphology) องค์ประกอบ (Composition) ทิศทางการจัดเรียงตัว และสมบัติเชิงกล เป็นต้น เช่น กรณี แมกนีตรอนสเป็คเตอริง ไอออนที่ใช้ระดมยิงวัสดุรองรับมาจากประจุไฟฟ้าที่อยู่รอบวัสดุรองรับ ทำได้โดยจ่ายศักย์ไฟฟ้าลบประมาณ -1 ถึง -500 V ให้กับวัสดุรองรับ ทั้งนี้ความหนาแน่นกระแสที่ฟิล์มหรือผิวหน้าของวัสดุรองรับ สำหรับระบบคิซีแมกนีตรอน ปกติมีค่าต่ำประมาณ $0.05\text{-}0.10$ ไอออน/อะตอมสารเคลือบ แต่การใช้งานจริงต้องมีค่าสูงกว่านี้ (Rohde & Munz, 1991; Munz, 1991; Sproul, 1992; Rickerby & Matthews, 1991)

การเคลือบแข็ง (Hard Coating) ฟิล์มต้องมีช่องว่าง (Voids) ในเนื้อฟิล์มน้อยที่สุด ซึ่งจะทำให้ฟิล์มที่ได้ทนต่อการกัดกร่อน (Corrosion) และทนต่อการขัดสี (Wear Resistance) มากขึ้น การลดช่องว่างในเนื้อฟิล์มนี้ทำได้โดยการเพิ่มความต่างศักย์ไบแอสให้กับวัสดุรองรับ แต่อาจทำให้เกิดความเค้นและความบกพร่อง (Defects) ภายในฟิล์มมากขึ้นเมื่อความต่างศักย์ไบแอสเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้คุณภาพของฟิล์มและการยึดติดของฟิล์มกับวัสดุรองรับลดลง ปัญหานี้แก้ไขได้โดยการเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไอออนที่ใช้ ด้วยระบบเคลือบแบบอันบาลานซ์ แมกนีตรอน สเป็คเตอริง (Unbalanced Magnetron Sputtering)

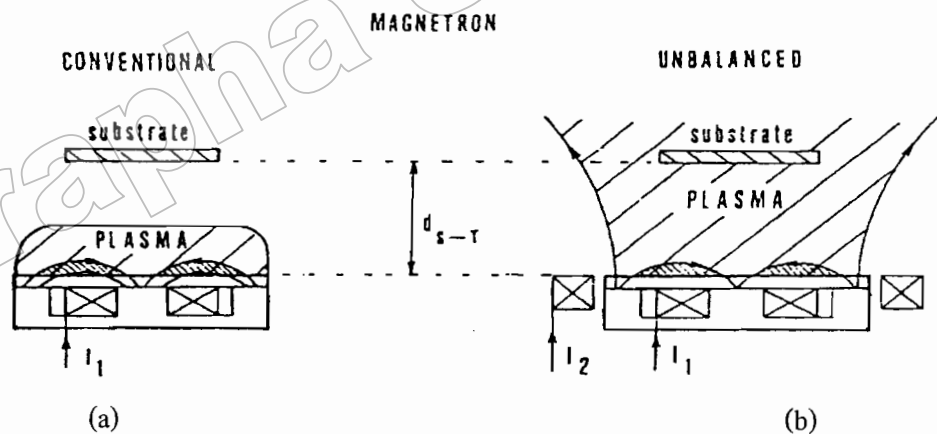


ภาพที่ 2-11 ลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กของระบบอานาลาซ์ แมกนีตรอน สปัดเตอร์
(Rickerby & Matthews, 1991)

ระบบอานาลาซ์ แมกนีตรอน สปัดเตอร์ ได้รับการคิดค้นและตีพิมพ์เผยแพร่โดย Window และ Savvides ครั้งแรกในปี ค.ศ.1986 โดยทั้งสองพบว่า การติดตั้งแม่เหล็กที่คาโทด ของระบบสปัดเตอร์ปกติ หากทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กด้านใดด้านหนึ่งมากกว่าอีกด้านหนึ่งแล้วสนามแม่เหล็กที่คาโทดมีลักษณะไม่สมมาตร ทำให้ปริมาณไอออนที่วิ่งเข้าชนหรือระดมยิงวัสดุรองรับ หรือฟิล์มบางบนวัสดุรองรับขณะเกิดกระบวนการเคลือบนั้นมีปริมาณมากกว่าปกติ ซึ่งจะมีผลต่อคุณภาพของฟิล์มบางที่เคลือบได้โดยตรง การจัดแม่เหล็กของระบบนี้อาจแบ่งเป็น 3 แบบ คือความเข้มสนามของแม่เหล็กที่ด้านในมากกว่าด้านนอก (ภาพที่ 2-11 (a)) หรือกลับกัน (ภาพที่ 2-11 (c)) หรือใกล้เคียงกัน (ภาพที่ 2-11 (b))

การจัดแม่เหล็กตามภาพที่ 2-11(a) ไอออนที่ระดมยิงวัสดุรองรับจะมีค่าต่ำ (อัตราส่วนไอออน/อะตอมสารเคลือบประมาณ 0.25:1) ส่วนการจัดแม่เหล็กตามภาพที่ 2-11(c) ไอออนที่ระดมยิงวัสดุรองรับจะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราส่วนไอออน/อะตอมสารเคลือบมีค่าสูงขึ้นคือประมาณ 2:1 (เมื่อใช้ความต่างศักย์ไบแอสต่ำ) จากการศึกษาของ Musil และ Kadlec ที่ใช้ระบบเคลือบแบบอานาลาซ์ ฟลนาร์ แมกนีตรอนเดี่ยวและขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า 2 ขด เคลือบไททาเนียมไนไตรด์ที่ระยะเป่าสารเคลือบและวัสดุรองรับประมาณ 200.0 mm ใช้ความต่างศักย์ไบแอสในช่วง -5 ถึง -100 V พบว่าความหนาแน่นกระแสสูงถึง 6.0 mA/cm^2 ซึ่งมากพอสำหรับใช้ในงานอุตสาหกรรม

หากเปรียบเทียบระบบสปัตเตอริงทั้ง 3 ระบบ พบว่าในระบบสปัตเตอริงปกตินั้น อิเล็กตรอนจากการไอออนไนซ์จะวิ่งไปจับอาโนดโดยไม่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสปัตเตอริงเลย ดังนั้นเพื่อให้ระบบสปัตเตอริงมีประสิทธิภาพมากขึ้นจึงมีแนวคิดที่จะนำอิเล็กตรอนเหล่านี้เข้ามาช่วยในกระบวนการสปัตเตอริงโดยใช้สนามแม่เหล็กช่วย จึงเกิดระบบแมกนีตรอน สปัตเตอริง ซึ่งใช้สนามแม่เหล็กช่วยทำให้เกิดอิเล็กตรอนบริเวณหน้าคาโทดเพิ่มขึ้น (เนื่องจากอิเล็กตรอนเหล่านี้มีส่วนช่วยทำให้กระบวนการสปัตเตอริงคงอยู่อย่างต่อเนื่อง) อำนาจของสนามแม่เหล็กจะทำให้ให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นทางโค้งทำให้การไอออนไนซ์แก๊สเฉื่อยสูงขึ้น นอกจากนี้สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้ายังทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบมีลักษณะเป็นการชนแบบซ้ำ ๆ ต่อเนื่องกันทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิปริมาณนี้มากขึ้น ซึ่งทำให้เกิดการสปัตเตอริงมากตามไปด้วย แต่ก็ยังมีอิเล็กตรอนบางส่วนที่มีพลังงานสูงสามารถหลุดจากอำนาจของสนามแม่เหล็กนี้วิ่งเข้าหาขั้วอาโนดทันที สำหรับในระบบอัมบาลานซ์ แมกนีตรอน สปัตเตอริง นั้นอิเล็กตรอนพลังงานสูงที่หลุดจากสนามแม่เหล็กนี้จะถูกยึดไว้ด้วยเส้นแรงแม่เหล็กส่วนเกินของระบบแล้วเคลื่อนที่เป็นทางโค้งไปตามเส้นแรงแม่เหล็กเข้าชนกับอะตอมของแก๊สเฉื่อยและเกิดการ ไอออนไนซ์เป็นพลาสมาบริเวณผิวหน้าวัสดุรองรับทำให้ความหนาแน่นกระแสที่วัสดุรองรับมีค่าสูงกว่าระบบแมกนีตรอน สปัตเตอริง มาก (ประมาณ $5.0\text{-}10.0\text{ mA/cm}^2$ ปกติมีค่าน้อยกว่า 1.0 mA/cm^2)



ภาพที่ 2-12 ลักษณะพลาสมาของระบบสปัตเตอริง (Munz, 1991)

(a) ระบบบาลานซ์แมกนีตรอน สปัตเตอริง

(b) ระบบอัมบาลานซ์แมกนีตรอน สปัตเตอริง

การหาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง

ลักษณะเฉพาะหรือสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มบางสามารถวิเคราะห์หรือหาได้จากเทคนิคต่าง ๆ หลายเทคนิค ในงานวิจัยนี้จะศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางต่อไปนี้ โครงสร้างผลึก เฟส ลักษณะพื้นผิว และความหนา ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ดังนี้

1. การศึกษาโครงสร้างด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

ลักษณะเฉพาะสำคัญอย่างหนึ่งของฟิล์มบางคือการศึกษาโครงสร้างผลึก หรือ เฟส ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (Diffraction Analysis) กมล เอี่ยมพนากิจ (2547) อธิบายหลักการของเทคนิคนี้ไว้ดังนี้ การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับการแยกแยะโครงสร้างของสารที่ใช้ในการเคลือบ โดยการวิเคราะห์อาศัยการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนกับมาตรฐาน JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) ของสารนั้น ดังนั้นเทคนิค XRD เป็นเทคนิคสำหรับวัดค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ที่สะท้อนจากผลึก ใช้หลักการของการเลี้ยวเบนของคลื่นโดยพบว่ารังสีเอกซ์เลี้ยวเบนได้เมื่อให้ตกกระทบผลึก ซึ่ง Bragg ได้เสนอแนวคิดว่าเราสามารถมองผลึกประกอบด้วยชั้น (Layer) หรือระนาบ (Plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมที่ตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้คลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่าง ๆ ดังกล่าวจะมีความเข้มสูง ลำรังสีเอกซ์ 1 และ 2 ตกกระทบทำมุม θ กับระนาบของผลึก A และ B สนามไฟฟ้าของรังสีเอกซ์จะก่อให้เกิดแรงคูลอมบ์กระทำบนอิเล็กตรอนที่ P กับ Q ให้สั้นด้วยความถี่เดียวกับรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบ และอิเล็กตรอนนั้นแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นรังสีเอกซ์ออกไปทุกทิศทางแต่ในทิศทาง 1' และ 2' ซึ่งเสมือนรังสีเอกซ์สะท้อนออกจากระนาบของผลึกจะไปแทรกสอดแบบเสริมกัน (In Phase) แม้ว่าแบบจำลองที่กล่าวมาจะไม่ถูกต้องในทางกายภาพ เนื่องจากแท้จริงแล้วระนาบของอะตอมไม่ได้สะท้อนคลื่นแต่วิธีนี้ก็ใช้ได้ทางเรขาคณิต พิจารณา

$$\delta = n\lambda \quad (2-3)$$

เมื่อ δ คือ ความแตกต่างของระยะที่คลื่นเดินทาง
 λ คือ ความยาวคลื่น
 n คือ จำนวนเต็มใด ๆ

จากภาพที่ 2-13

$$\delta = SQ + QT = 2SQ \quad (2-4)$$

จากรูปตรีโกณมิติพื้นฐาน

$$\delta = 2PQ \sin \theta \quad (2-5)$$

โดย PQ คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ d_{hkl}

$$\delta = 2d \sin \theta \quad (2-6)$$

จากสมการ (2-3) เท่ากับ (2-6) จะได้

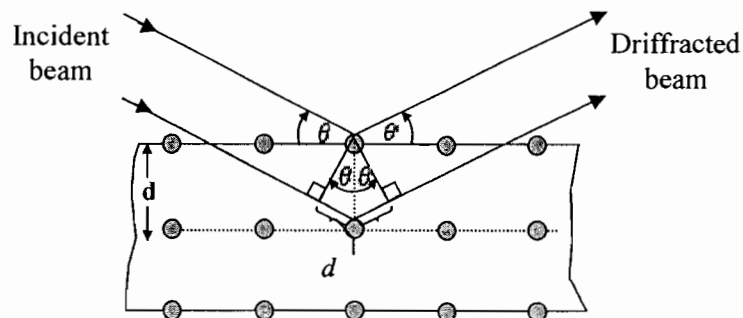
$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (2-7)$$

เรียกสมการที่ (2-7) นี้ว่า สมการการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากผลึก (Bragg's Law)

โดยที่ λ เป็นความยาวคลื่น n เป็นลำดับของการสะท้อน d_{hkl} เป็นระยะห่างระหว่างระนาบ ($h k l$)

และ θ เป็นมุมตกกระทบและมุมสะท้อนเมื่อวัดจากแนวระนาบที่กำลังพิจารณา

ในภาพที่ 2-13 เป็นแบบจำลองสำหรับการพิสูจน์กฎของแบรกก์ อะตอมเรียงตัวเป็นระเบียบโดยมีระยะห่างระหว่างอะตอมใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ($\sim 10^{-10}$ m) จะทำหน้าที่เป็นเสมือน เกรตติงเลี้ยวเบนแต่จะเป็นเกรตติงเลี้ยวเบนแบบ 3 มิติ



ภาพที่ 2-13 แบบจำลองการเรียงตัวของอะตอม

สัญญาณที่ตรวจจับได้จะแสดงออกมาในรูปแบบของการเลี้ยวเบนรังสี (Diffraction Pattern) ความเข้มของสัญญาณขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกันเช่น โครงสร้างของวัสดุ ปริมาตรของวัสดุที่แผ่รังสี (Volume of Irradiated Material) รูปทรงของการหักเห (Diffraction Geometry) และการวางชิ้นงาน (Sample Alignments) เป็นต้น

ตำแหน่งของพีค ที่มีค่ามากที่สุดสามารถบอกถึงขนาดและรูปร่างของหน่วยเซลล์ได้ในขณะที่ความกว้างให้หาค่าขนาด การจัดเรียงตัว (Orientation) และความเครียด (Strain) ภายในเกรนของวัสดุหลายผลึก กรณีของการศึกษาขนาดของผลึกจากรายงานการวิจัยของ Kim, Hahn, Oh, and Kim (2002) ได้ทำการศึกษาค่าขนาดของผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยอาศัย Scherrer Equation ดังสมการที่ 2-8

$$L = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (2-8)$$

เมื่อ L คือ ขนาดของผลึกฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์

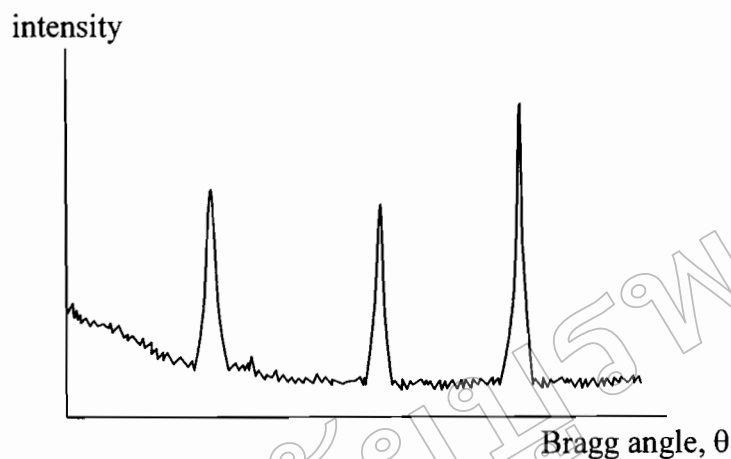
k คือ ค่าคงที่เท่ากับ 0.9

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ($\text{CuK}\alpha = 1.5406$)

β คือ ความกว้างครึ่งหนึ่งของพีคที่มีค่าความเข้มสูงสุด

θ คือ ครึ่งหนึ่งของมุมตรงจุดศูนย์กลางพีค

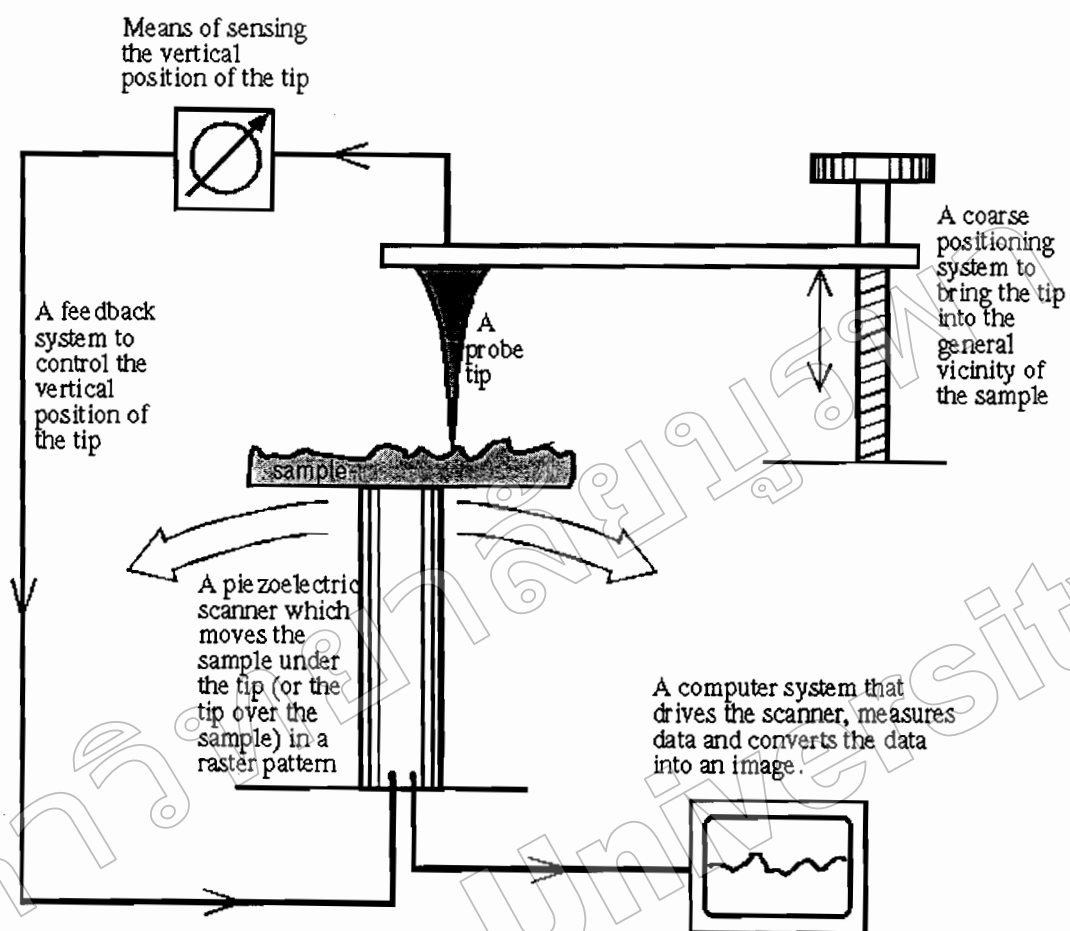
บางครั้งตำแหน่งของรูปแบบการเลี้ยวเบนที่วัดได้อาจจะเลื่อนไปด้วยค่ามุมที่สูงขึ้นเนื่องจากผลของความเค้นคงค้าง (Residual Stress) ในผิวสารเคลือบนั่นเอง ส่วนความเข้มของสัญญาณที่ได้ อาจไม่เป็นไปตามค่ามาตรฐาน JCPDS เพราะเกิดการการจัดเรียงตัวในทิศทางที่ชอบ (Preferred Orientation) ของอะตอมในฟิล์ม นอกจากนี้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ยังสามารถให้ข้อมูลที่บอกถึงส่วนผสมทางเคมีของเฟส (Phase Composition) และค่าพารามิเตอร์ของแลตทิซ (Lattice Parameter)



ภาพที่ 2-14 ความเข้มของฟลักที่แสดงถึงระนาบผลึกของวัสดุในตำแหน่งที่มีการสะท้อนรังสี

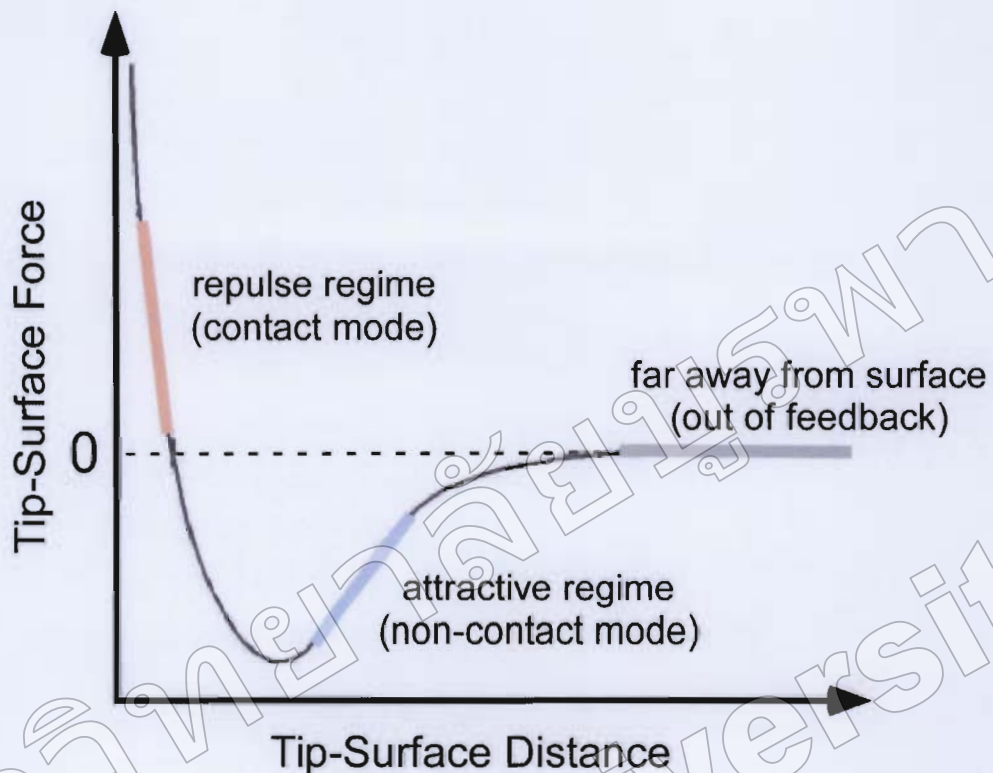
2. การศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยเครื่อง Atomic Force Microscopy (AFM)

ลักษณะเฉพาะสำคัญอีกอย่างหนึ่งของฟิล์มบางคือการศึกษาลักษณะพื้นผิว และความหนาเทคนิคที่นิยมใช้ในการศึกษาความหนาและลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางในระดับนาโน คือ Atomic Force Microscopy (AFM) ซึ่ง จตุพร วุฒิกนกกาญจน์ (2542) ได้อธิบายหลักการทำงานของเครื่อง AFM ไว้ดังนี้ เทคนิค Atomic Force Microscopy เป็นการสร้างภาพของผิววัสดุจากแรงกระทำระหว่างผิววัสดุกับหัวตรวจวัดที่ทำจากเข็มขนาดเล็ก (Probe Tip) และเป็นเทคนิคหนึ่งในกลุ่มของ Scanning Probe Microscopy (SPM) ซึ่งเป็นกลุ่มเทคนิคที่สามารถใช้ในการศึกษาสภาพพื้นผิวของวัสดุประเภทต่าง ๆ ได้ หลักการพื้นฐานคือ การใช้เข็มตรวจวัดขนาดเล็กที่ทำจากซิลิคอนไนไตรด์ (Silicon Nitride, Si_3N_4) เคลื่อนที่กราด (Scan) ไปทั่วบริเวณต่าง ๆ ของผิววัสดุ โดยมีตัวเพียโซอิเล็กทริกสแกนเนอร์ (Piezoelectric Scanner) เป็นตัวควบคุม สภาพผิวที่แตกต่างกันไปจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกับเข็มตรวจวัดแตกต่างกันไป โดยตัวคานามีเข็มเกาะติดอยู่จะมีการโค้งงอ (Bending) ปริมาณการโค้งงอนี้สามารถตรวจวัดได้โดยใช้โฟโตดีเทกเตอร์ (Photo Detector) ดังภาพที่ 2-15 ภาพที่ได้จากเทคนิคนี้จะสอดคล้องตามสภาพพื้นผิวในแต่ละบริเวณที่ตรวจสอบ ในเทคนิค AFM นี้ สิ่งที่ทำให้คานามีเข็มเกาะอยู่เกิดการโค้งงอขึ้นก็คือ แรงกระทำระหว่างอะตอม ซึ่งอาจจะเป็นแรงดึงดูดหรือแรงผลักก็ได้ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างเข็มปลายแหลมกับพื้นผิวดังแสดงในภาพที่ 2-16



ภาพที่ 2-15 องค์ประกอบหลักของเครื่องมือ Scanning Probe Microscope

(<http://www2.polito.it/ricerca/micronanotech/Strumentu/SPM.html>)



ภาพที่ 2-16 ลักษณะของแรงกระทำระหว่างอะตอมที่เกิดขึ้นในระยะห่างระหว่างวัตถุต่าง ๆ
(อดิศร บุรณวงศ์, 2551)

เทคนิค AFM สามารถแบ่งได้หลายวิธีตามลักษณะการเก็บข้อมูล ซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป อย่างไรก็ตามไม่ว่าจะเป็นการใช้ AFM วิธีใด แรงกระทำที่เกิดขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพพื้นผิว (Topography) ของวัสดุ

ภาพที่ 2-17 แสดงให้เห็นถึงเครื่อง Atomic Force Microscope รุ่น NanoScope IIIa บริเวณตรงกลางเป็นบริเวณที่ใช้วางชิ้นงาน โดยมีเข็มวัดวางอยู่ด้วย ส่วนที่บริเวณด้านบนของเครื่องมือจะมีกล้องจุลทรรศน์วิดีโอ (Video Microscope) ติดตั้งไว้เพื่อใช้สำหรับดูตำแหน่งของเข็มที่จะทำการวางลงบนบริเวณต่าง ๆ บนผิว ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์วิดีโอนี้จะแสดงทางจอโทรทัศน์ นอกจากนี้ในบริเวณด้านบน จะมีแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์และโฟโตดีเทคเตอร์ที่ใช้วัดการโค้งงอของคานาขึ้น



ภาพที่ 2-17 เครื่อง AFM แบบ Multimode (http://rclsgi.eng.ohio-state.edu/nlim/page_01.htm)

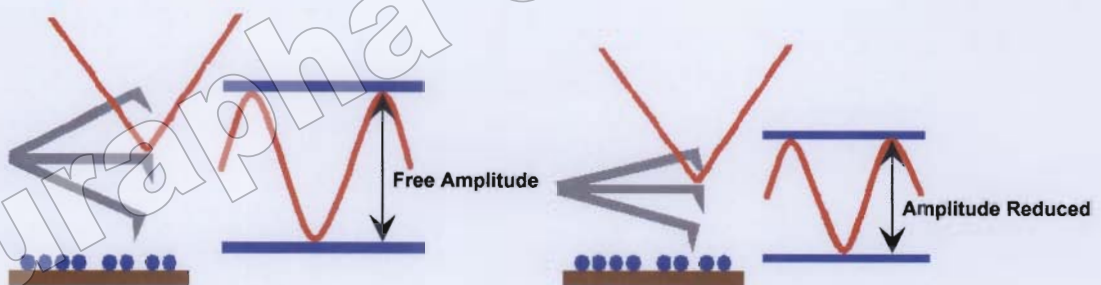
ลักษณะการเก็บข้อมูลด้วยเทคนิค AFM สามารถใช้เก็บข้อมูลได้ 4 ลักษณะ (Mode) ที่สำคัญดังนี้คือ

1. Contact Mode เป็นการศึกษาสภาพผิวชิ้นงานโดยการขยับให้เข็มไถล (Slide) ไปบนผิวงานซึ่งจะทำให้มีแรงผลักระหว่างเข็มกับผิวงานจะอยู่ใกล้กันมาก แรงผลักนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพผิว ซึ่งจะทำให้มีการโก่งงอ (Deflection) ของคานขึ้น (Cantilever) ที่มีเข็มยึดเกาะอยู่ที่ปลาย โดยปริมาณการโก่งงอจะเปลี่ยนแปลงสอดคล้องเป็นไปตามลักษณะของผิวงาน อย่างไรก็ตาม เทคนิคแบบ Contact Mode นี้มีข้อเสียคือ การลากให้เข็มตรวจวัดเคลื่อนที่ไถลข้ามไปยังบริเวณต่าง ๆ บนผิวงาน อาจจะทำให้พื้นผิววัสดุที่กำลังศึกษาต่างไปจากสภาพเดิมที่แท้จริง หรืออาจเกิดความเสียหายขึ้นแก่ผิวงานได้ ยกตัวอย่างเช่น ภายใต้อากาศปรกติซึ่งมีอากาศและความชื้นในอากาศ อาจเกิดหยดน้ำหรือสิ่งสกปรกบนผิวงาน ซึ่งเมื่อเข็มวัดเคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวที่มีชั้นบาง ๆ ของหยดน้ำและสิ่งสกปรกดังกล่าว จะทำให้มีแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิตและแรงดึงดูดผิวทำให้ตัวคานที่มีเข็มยึดอยู่ที่ปลายเคลื่อนที่ลงมาสัมผัสกับชั้นดังกล่าว ทำให้แรงระหว่างเข็มกับผิวงานที่เกิดขึ้นโดยรวมเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ ยังอาจทำให้ผิวงานถูกทำลาย เช่น เกิดการฉีกขาดจากการลากเข็มไปบนผิวงาน

2. Non-Contact Mode เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวข้างต้น จึงได้มีการพัฒนาเทคนิคแบบ Non-Contact Mode ขึ้นมา โดยในที่นี้ ตัวเข็มปลายแหลมจะถูกยกขึ้นมาให้มีระยะห่างเหนือผิวงานสูงมากขึ้น คือประมาณ 10 - 100 Å จึงไม่มีปัญหาเรื่องการทำลายโครงสร้างผิวงาน โดยในกรณีนี้ แรงกระทำระหว่างตัวคานที่มีเข็มปลายแหลมยึดเกาะอยู่กับผิวงานจะเป็นลักษณะแรงดึงดูด ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามรูปร่างของสภาพผิวงานเช่นเดียวกัน

วิธีนี้มีข้อจำกัดเกี่ยวกับความละเอียดของภาพที่เกิดขึ้น นั่นคือ แรงดึงดูดประเภทแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals) ที่เกิดขึ้นในกรณีนี้จะเป็นแรงที่อ่อนกว่าเมื่อเทียบกับแรงผลักระหว่างเข็มกับผิวงานที่เกิดขึ้นในกรณีของ Contact Mode ดังนั้นการตรวจสอบอาจไว (Sensitive) ต่อสิ่งแปลกปลอมที่อยู่บนผิวงาน เช่น หยดน้ำที่เกาะอยู่บนผิว

3. Tapping Mode เป็นเทคนิคที่รวมเอาลักษณะของการวัดทั้งในแบบของ Contact Mode และ Non-Contact Mode เข้าด้วยกัน กล่าวคือ ยังคงให้มีการสัมผัสกันระหว่างเข็มกับผิวงานในระยะที่ใกล้กันมาก เหมือนกับกรณีของ Contact Mode เพื่อให้เกิดภาพที่ชัดเจน ในขณะเดียวกัน ก็ยังมีการสั่นหรือขยับเข็มปลายแหลมให้เคลื่อนที่ขึ้นลงไปพร้อม ๆ กับการเคลื่อนที่สแกนไปยังบริเวณต่าง ๆ บนผิวงาน ดังนั้นจึงเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาการลากไถลเข็มปลายแหลม ซึ่งจะทำให้เกิดการทำลายสภาพของผิวงานได้ เหมือนใน Contact Mode



ภาพที่ 2-18 ลักษณะการสั่นของคานที่มีเข็มติด

(<http://www.nanocraft.de/kompetenz/tapping/tapping.html>)

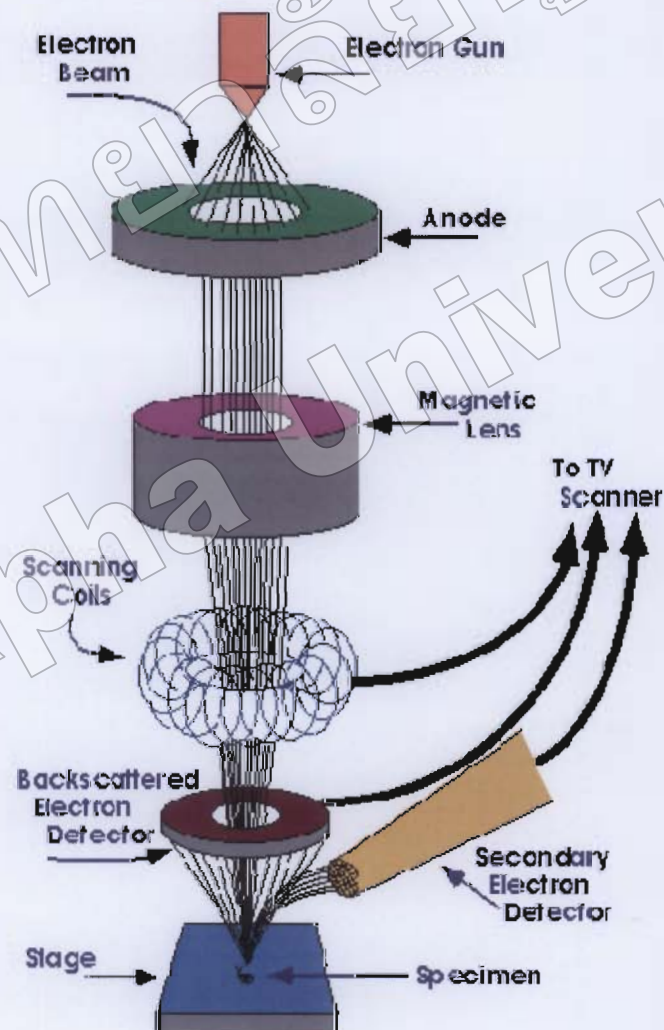
ภาพที่ 2-18 แสดงการสั่นของคานในสภาวะอิสระหรือตอนเริ่มต้นที่ยังไม่เกิดการสัมผัส และเคลื่อนที่ไปบนผิวงาน จะเห็นว่าแอมพลิจูดยังสูงเมื่อเทียบกับแอมพลิจูดจากการสั่นของคาน เมื่อมีการแตะสัมผัส (Tapping) ลงบนผิวงาน เนื่องจากในการสัมผัสกันจะมีการสูญเสียพลังงานของการสั่น ทำให้แอมพลิจูดของการสั่น (Oscillation Amplitude) ลดลง ซึ่งค่าที่ลดลงนี้ใช้เป็นตัววัด และบอกถึงลักษณะของสภาพพื้นผิวที่มีความสูงต่ำแตกต่างกันไปเช่น เมื่อเริ่มตรวจวัดเคลื่อนที่ผ่าน บริเวณผิวงานที่มีความนูนสูงขึ้นมา คานจะมีพื้นที่หรือแอมพลิจูดในการสั่นลดลง ในทางตรงข้าม เมื่อเริ่มปลายแหลมเคลื่อนที่ผ่านบริเวณผิวที่มีการยุบตัวหรือมีความลึกลงไป ตัวคานก็จะมีพื้นที่ในการสั่นเพิ่มขึ้น และมีแอมพลิจูดสูงขึ้น (เข้าใจคือแอมพลิจูดสูงสุดในสภาพที่ยังไม่มีการทำการ สแกน) แอมพลิจูดของการสั่นที่เปลี่ยนแปลงไปถูกวัดโดยแอมพลิจูดคิเทคเตอร์ (Amplitude Detector) ส่งไปยังตัวควบคุม เมื่อวัดสัญญาณพร้อมทั้งปรับระยะระหว่างเข็มกับผิวงาน เพื่อรักษา ให้ค่าแอมพลิจูดของการสั่นคงที่ต่อไป จนกว่ามีการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดของการสั่นตาม สภาพพื้นผิวในบริเวณถัดไป

4. Force Modulation Mode วิธีนี้เหมาะสำหรับพื้นผิวของวัสดุที่มีองค์ประกอบหลาย เฟส โดยเทคนิคนี้เป็นการวัดและสร้างภาพของพื้นผิวชิ้นงานที่มีความแตกต่างของความแข็งแรง (Stiffness) ในแต่ละเฟสสูง โดยกรณีนี้ตัวเข็มสแกนไปในลักษณะที่มีการสั่นในแนวตั้งฉากกับผิว วัสดุด้วยแอมพลิจูดเล็กน้อย แต่มีความเร็วในการสั่นที่สูงกว่าการเคลื่อนที่ที่สแกนของเข็ม และเมื่อตัว เข็มถูกนำเข้ามาแตะสัมผัสกับผิววัสดุจะเกิดแรงต้านจากผิวของวัสดุที่เกิดจากการสั่นและทำให้ตัว คานงอ ถ้าหากให้แรงที่ทำให้ตัวคานสั่นคงที่ พื้นผิวบริเวณที่แข็งแรงกว่าจะทำให้เกิดการต้านต่อการสั่น ในแนวตั้งของตัวคานมากกว่า และจึงทำให้ตัวคานงอมากกว่า ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงของ แอมพลิจูดที่เกิดจากการ โกงงอของตัวคานจึงนำมาใช้วัดเปรียบเทียบความแข็งที่บริเวณต่าง ๆ ของผิวงาน

หลักการของวิธี Tapping Mode กับ Force Modulation Mode คล้ายกันที่มีการสั่นของ เข็มในแนวตั้งพร้อมมีการสแกนไปบนผิวชิ้นงาน ความแตกต่างของ 2 เทคนิคคือ กรณี Force Modulation Mode จะสั่นด้วยความเร็วสูง (สูงกว่าความเร็วในการสแกน) และการวัดแอมพลิจูดที่ เกิดจากการบิดงอของคาน เป็นการวัดเนื่องจากผลของแรงต้านการสั่น เมื่อมีการสัมผัสของเข็มกับ ผิวงาน ขณะที่ Tapping Mode เป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของการสั่นของคานที่ เปลี่ยนแปลงไป (ลดลง) เนื่องมาจากมีการสูญเสียพลังงานไปเมื่อมีการสัมผัสผิวงานที่มีระดับความ สูงต่ำแตกต่างกัน

3. การศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

เทคนิคที่นิยมใช้ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบาง คือ Scanning Electron Microscope (SEM) ซึ่ง วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ (2543) ได้อธิบายหลักการทำงานของเครื่อง ไว้ดังนี้ เทคนิค Scanning Electron Microscope สัญญาณภาพที่เกิดขึ้นจากการใช้ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron detector; SE detector) มาจับสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดขึ้น หรือใช้ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscatter Electron detector; BSE detector) มาจับสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับที่เกิดขึ้นดังแสดงในภาพที่ 2-19

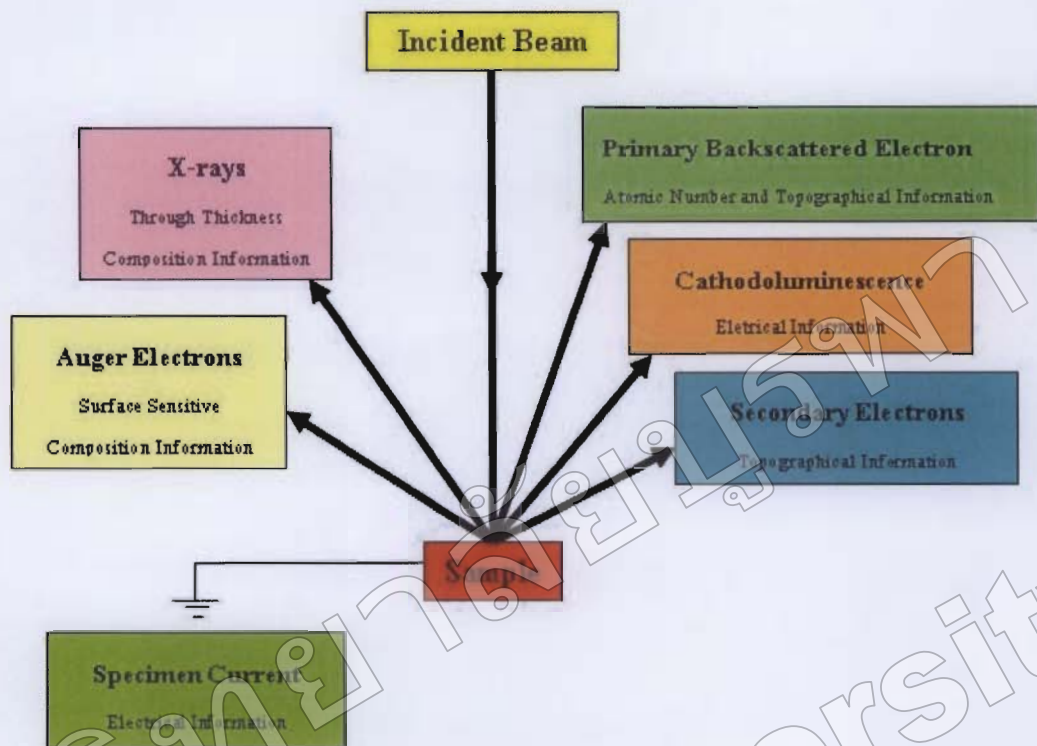


ภาพที่ 2-19 องค์ประกอบหลักของเครื่องมือ Scanning Electron Microscope

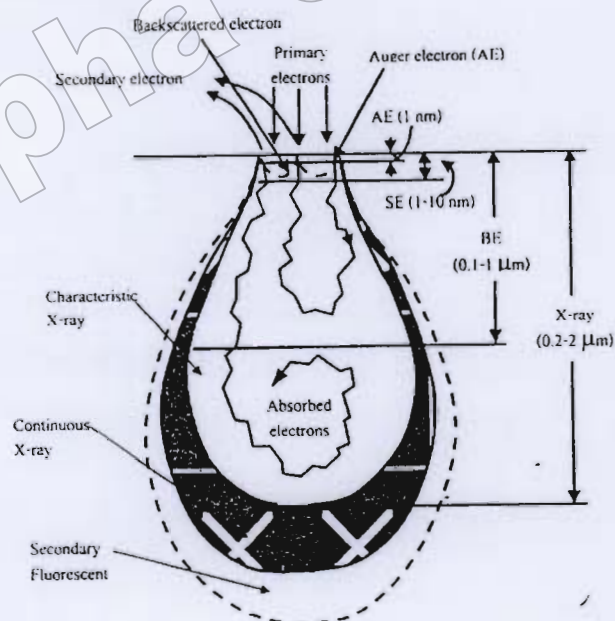
(www.purdue.edu/REM/rs/graphics/sem2.gif)

อิเล็กตรอนทุติยภูมิจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูงที่สามารถปรับค่าได้ จากนั้นจึงถูกดึงดูดลงสู่เบื่องล่างโดยแผ่นอาโนดภายใต้ภาวะความดันสุญญากาศ 10^{-5} ถึง 10^{-7} torr และมีชุดคอนเดนเซอร์เลนส์ที่จะปรับลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดเล็กลง เพื่อเป็นการเพิ่มความเข้มของลำอิเล็กตรอน จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะวิ่งลงสู่เบื่องล่างผ่านเลนส์วัตถุ ซึ่งทำหน้าที่ในการปรับลำอิเล็กตรอนทุติยภูมิให้มีจุดโฟกัสบนผิวตัวอย่างพอดี และลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบผิววัสดุหรือตัวอย่างจะมีขนาดในช่วง 5 ถึง 200 nm โดยมีชุดลวดควบคุมการส่องกราดของลำอิเล็กตรอนทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนบนพื้นผิวตัวอย่าง ขณะที่ลำอิเล็กตรอนกระทบผิวตัวอย่างจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนทุติยภูมิกับอะตอมของธาตุในวัตถุหรือตัวอย่างและเกิดการถ่ายโอนพลังงานที่ขึ้นความลึกจากพื้นผิวที่ระดับต่าง ๆ ทำให้เกิดการปลดปล่อยสัญญาณอิเล็กตรอนชนิดต่าง ๆ ออกมา (ภาพที่ 2-20 และภาพที่ 2-21) สัญญาณภาพที่ได้จากสัญญาณอิเล็กตรอนชนิดต่าง ๆ ที่เกิด คือ

1. สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image; SEI) หรือเป็นกลุ่มอิเล็กตรอนพลังงานต่ำ 3 ถึง 5 eV เกิดที่พื้นผิวระดับไม่ลึก โดยเกิดกับธาตุที่มีแรงยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนที่ผิวต่ำ
2. สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattered Electron Image; BEI) หรือเป็นกลุ่มอิเล็กตรอนที่สูญเสียพลังงานเป็นบางส่วนและกระเจิงกลับออกมา
3. สัญญาณภาพจากรังสีเอกซ์ (X-ray Electron Image; XRI) ชนิดที่เป็นรังสีเอกซ์เฉพาะตัวเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กตรอนในระดับชั้น โคจรต่าง ๆ (K, L, M,...) ถูกกระตุ้นหรือได้รับพลังงานมากพอจนหลุดออกจากวงโคจรออกมา ทำให้อะตอมต้องรักษาสสมดุลของโครงสร้างรวมภายในอะตอมโดยการดึงอิเล็กตรอนจากชั้น โคจรถัดไปมาแทนที่ และต้องลดระดับพลังงานภายใน เนื่องจากอิเล็กตรอนที่ถูกดึงมาแทนที่ระดับพลังงานสูงกว่า โดยการปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อให้ตัวเองมีพลังงานเท่ากับวงโคจรที่ไปแทนที่ ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในแต่ละธาตุ จึงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพ



ภาพที่ 2-20 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมตัวอย่าง
(วีระศักดิ์ อุทุมภิกเฉลา และคณะ, 2543)

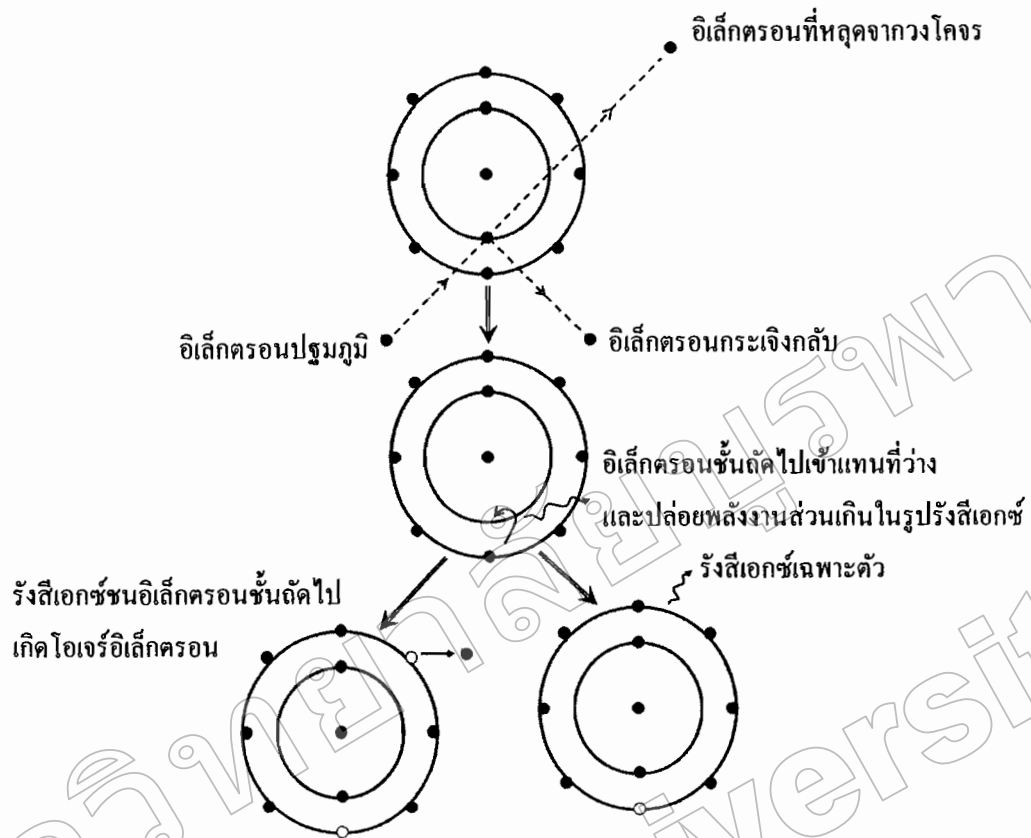


ภาพที่ 2-21 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับตัวอย่างที่ระดับชั้นความลึกต่าง ๆ
(วีระศักดิ์ อุทุมภิกเฉลา และคณะ, 2543)

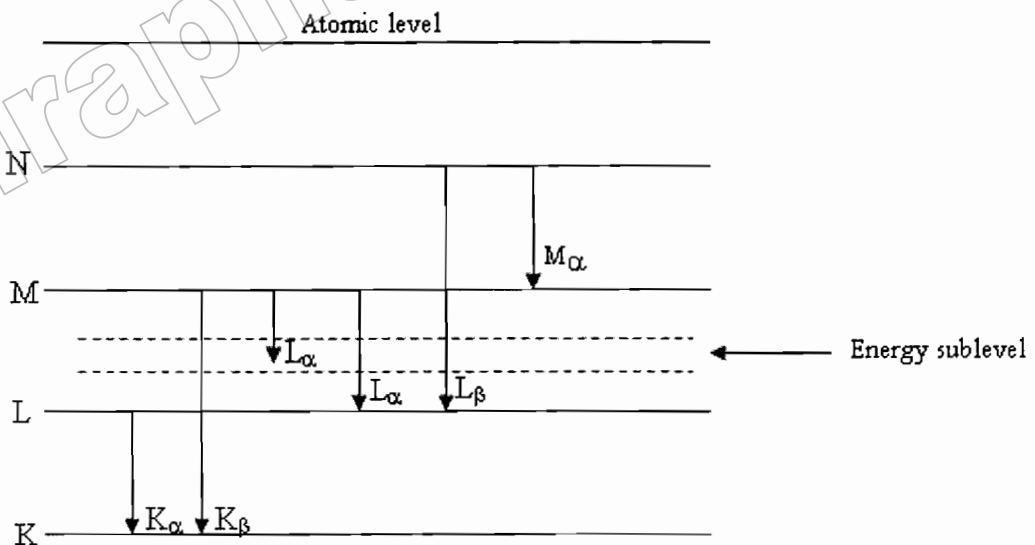
4. การศึกษาองค์ประกอบของธาตุทางเคมีด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-ray spectroscopy (EDX)

ลักษณะเฉพาะสำคัญอีกประการหนึ่งของฟิล์มบางคือ องค์ประกอบของธาตุทางเคมี เทคนิคที่นิยมใช้ศึกษาองค์ประกอบของธาตุทางเคมีของฟิล์มบาง คือ Energy Dispersive X-ray spectroscopy ซึ่ง วีระศักดิ์ อุคมกิจเดชา และคณะ (2543) ได้อธิบายหลักการทำงานของเครื่องไว้ ดังนี้ เมื่อลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงเข้าชนอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นในของอะตอม เช่น ชั้น K หรือ ชั้น L แล้วเกิดการถ่ายโอนพลังงานให้แก่อิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนชั้นในที่ได้รับพลังงานดังกล่าวมีพลังงานสูงขึ้นเกินพลังงานยึดเหนี่ยวของชั้นโคจรจึงหลุดออกมาจากวงโคจร ทำให้เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนในชั้นโคจร จากนั้นอะตอมที่อยู่ในสถานะกระตุ้นลดระดับพลังงานลงสู่สภาวะปกติในช่วงระยะเวลาอันสั้น (10^{-15} วินาที) โดยอิเล็กตรอนของวงจรชั้นถัดออกไปลดระดับพลังงานลงมาเท่ากับพลังงานยึดเหนี่ยวของวงจรที่เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอน ด้วยการปล่อยพลังงานส่วนเกินในรูปของรังสีเอกซ์ แล้วอิเล็กตรอนจะเข้ามาแทนที่ พลังงานส่วนเกินนี้มีพลังงานเท่ากับความต่างของระดับพลังงานยึดเหนี่ยวเฉพาะชั้นโคจรของอิเล็กตรอน และเฉพาะของธาตุนั้น ๆ จึงมีค่าพลังงานเฉพาะค่า เรียกรังสีชนิดนี้ว่า “รังสีเอกซ์เฉพาะตัว” ดังแสดงในภาพที่ 2-22 และภาพที่ 2-23

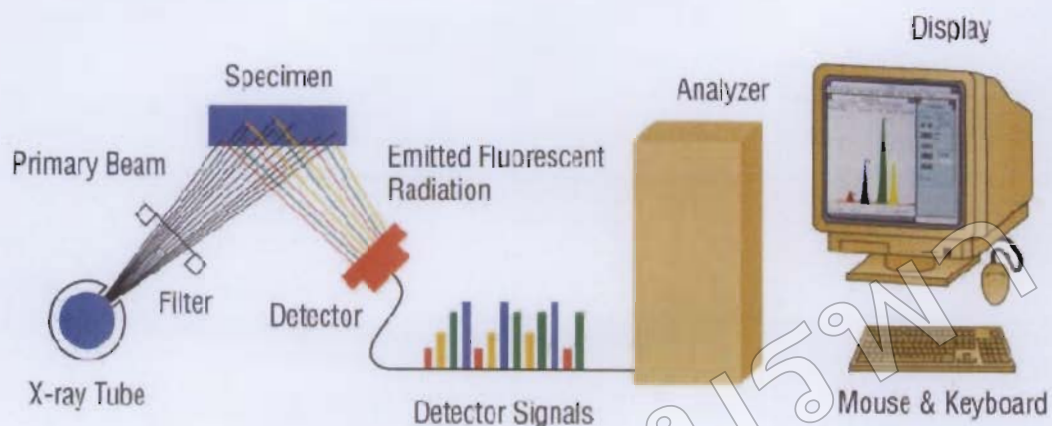
ในระบบการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์แบบ EDX หัววัดรังสีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ หัววัดรังสีแบบ Si (Li) ซึ่งเหมาะสำหรับการวัดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่มีพลังงานในช่วง 1 ถึง 30 keV หรือหัววัดชนิดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง (High Purity Germanium; HPGe) ซึ่งสามารถวัดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวได้ช่วงกว้าง คือ 3 ถึง 200 keV โดยหัววัดรังสีเอกซ์ทั้งสอง 2 แบบ จะเปลี่ยนพลังงานของรังสีให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าในรูปของศักย์ไฟฟ้า โดยขนาดของสัญญาณไฟฟ้าที่ทางออกของหัววัดจะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบบนหัววัด จากนั้นวงจรขยายแบบช่องเดียวหรือหลายช่องจะเก็บสัญญาณไฟฟ้าจากหัววัดในหน่วยความจำที่อยู่ภายในเครื่อง และแสดงผลวิเคราะห์บนจอภาพในรูปของสเปกตรัม พร้อมทั้งผลวิเคราะห์เชิงปริมาณและคุณภาพ โดยโปรแกรมสำเร็จรูปดังภาพที่ 2-24 และภาพที่ 2-25



ภาพที่ 2-22 การกระตุ้นให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวโดยใช้ลำอิเล็กตรอน
(วีระศักดิ์ อุคมกิจเดชา และคณะ, 2543)

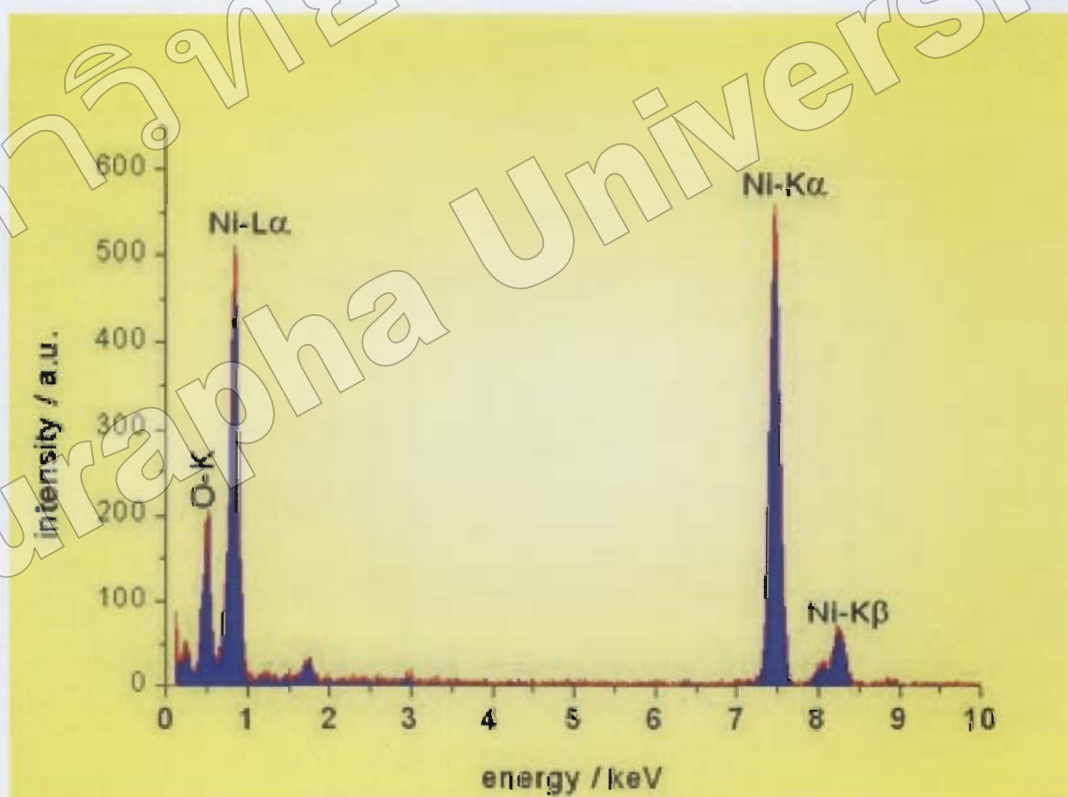


ภาพที่ 2-23 การเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่ระดับพลังงานของชั้น โคจรต่าง ๆ
(วีระศักดิ์ อุคมกิจเดชา และคณะ, 2543)



ภาพที่ 2-24 องค์ประกอบหลักของเครื่องมือ Energy Dispersive X-ray spectroscopy (EDX)

(<http://pirun.ku.ac.th/~fscipww/instrutech.doc>)



ภาพที่ 2-25 ตัวอย่างการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุทางเคมีด้วยเทคนิค EDX

(www.ifw-dresden.de/institutes/ikm/organisatio)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ฟิล์มบางไทเทเนียมเซอร์โคเนียมไนไตรด์เป็นฟิล์มบางหรือชั้นเคลือบแข็งในกลุ่มชั้นเคลือบของสารประกอบสามชนิด ที่เหมาะสำหรับงานด้านการเคลือบแข็งบน Tooling หรือ High Speed Machining มากกว่ากลุ่มชั้นเคลือบของสารประกอบสองชนิด ซึ่งทำได้โดยการผสมเซอร์โคเนียม (Zr) ในระหว่างกระบวนการเตรียมฟิล์มบาง ทำให้ได้ฟิล์มที่มีความแข็งแรงสูง สามารถทำงานได้ดีในช่วงความร้อนสูงตั้งแต่ 600 – 800 °C ด้านทานการเกิดออกซิเดชัน การกัดกร่อนและมีสมบัติการเสียดทานต่ำ ช่วยยืดอายุการใช้ชิ้นงานที่เคลือบให้นานขึ้นทำให้มีการศึกษาวิจัยและพัฒนาเทคนิคและกระบวนการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมเซอร์โคเนียมไนไตรด์ด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น การเคลือบในสุญญากาศด้วยวิธีแมกนีตรอนสปัตเตอริงและการอาร์คไปพร้อมกัน (Hybrid Ion Deposition from Simultaneous Magnetron and Arc Sources) (Donohue, Cawley, & Brook, 1995) การอาร์คในสุญญากาศ (Vacuum Arc Deposition) (Niu et al., 2008; Uglov, Anishchik, Zlotski, & Abadias, 2006) รวมถึงการเคลือบด้วยวิธีรีแอคทีฟดีพีซี หรือ อาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง (Reactive DC RF Magnetron Sputtering) (Wang et al., 2000; Liu, Huang, & Yu, 2010; Ramana, Kumar, David, & Saju, 2004) อย่างไรก็ตามพบว่ากระบวนการเตรียมฟิล์มที่กล่าวมานั้นมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป แต่การเคลือบด้วยวิธีรีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง มีข้อได้เปรียบหลายประการ เช่น ใช้อุณหภูมิในการเคลือบชิ้นงานต่ำ เป็นกระบวนการเคลือบที่ไม่ยุ่งยาก และสามารถประยุกต์ใช้กับงานเคลือบขนาดใหญ่ได้ ในช่วงที่ผ่านมา มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยสรุปดังนี้

Wang et al. (2000) สังเคราะห์ชั้นเคลือบแข็งไทเทเนียมเซอร์โคเนียมไนไตรด์ (Ti,Zr)N ด้วยวิธีอินบัลานซ์ แมกนีตรอน สปัตเตอริง โดยให้ศักย์ไบแอสแบบพัลส์ (Pulsed) กับวัสดุรองรับ เพื่อลดการเกิดอาร์คบนพื้นผิวจากสิ่งสกปรกและสารประกอบออกไซด์ จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD และ TEM พบว่าเกิดสารละลายของแข็ง (Ti,Zr)N จากการฟอร์มตัวของ Ti-Zr-N เกรนของฟิล์มบางเป็นแบบคอลัมน์ (Columnar) โครงสร้างผลึกมีการจัดเรียงตัวในระนาบ (111) ฟิล์ม (Ti,Zr)N ค่าความแข็งจุลภาคมากกว่าฟิล์ม TiN และ ZrN เปรียบเทียบที่เงื่อนไขการเคลือบเดียวกัน โดยเงื่อนไขที่ทำให้ฟิล์มบางมีความแข็งจุลภาคและการยึดเกาะที่ดีได้แก่ OEM 60% และไบแอส -70 V

Ramana et al. (2004) ศึกษาองค์ประกอบ โครงสร้างและความแข็งจุลภาคของฟิล์มบาง (Ti,Zr)N และ (Ti,Al)N ที่เคลือบด้วยเทคนิคดีซี รีแอคทีฟ แมกนีตรอน สเปคโตรริง (DC Reactive Magnetron Sputtering) ใช้เป้าสารเคลือบแบบเป่าร่วม โดยแปรค่าอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนและ คาร์บอนไดออกไซด์รองรับ จากวิเคราะห์ผลด้วยเทคนิค XRD พบว่าฟิล์มบาง (Ti,Zr)N และ (Ti,Al)N ที่เคลือบได้ มีโครงสร้างผลึกแบบ Face Center Cubic (FCC) ผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ ด้วยเทคนิค Backscattering พบว่ามีเปลี่ยนแปลงไปตามเงื่อนไขการเคลือบ ความแข็งจุลภาคของ ฟิล์มบางประมาณค่าด้วยแบบจำลอง J-H เพื่อหาความสัมพันธ์กับองค์ประกอบธาตุของฟิล์มบาง โดยเฉพาะปริมาณของไนโตรเจนที่เป็นส่วนประกอบในฟิล์มบาง

Uglov et al. (2006) ศึกษาองค์ประกอบเฟสและความเค้นของฟิล์ม Ti-Zr-N ที่เกิดโดย กระบวนการการรวมตัวของพลาสมาของไทเทเนียมและเซอร์โคเนียมในบรรยากาศไนโตรเจน โดยเป้าไทเทเนียมและเซอร์โคเนียม จะใช้กระแสในการอาร์คต่างกัน จากนั้นนำฟิล์มบางที่เคลือบ ได้ไปศึกษาองค์ประกอบฟิล์มและองค์ประกอบเฟส Preferred Orientation และความเค้นดงค้ำ ด้วยเทคนิค XMA และ XRD ตามลำดับ จากการศึกษาด้วยเทคนิค XMA พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้มี องค์ประกอบธาตุแตกต่างกันไป โดยการควบคุมอัตราไหลของพลาสมาระหว่างเคลือบซึ่งสามารถ สังเคราะห์ฟิล์มบางชั้นเคลือบของสารประกอบสามชนิดให้มีองค์ประกอบของธาตุให้เป็นตามที่ ต้องการ สำหรับผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD พบว่าเกิดการฟอร์มตัวเป็น สารละลายของแข็ง Ti-Zr-N และแสดง Preferred Orientation ที่ระนาบ (111) แล้วหาความสัมพันธ์ ระหว่างค่าที่แสดงทิศ และองค์ประกอบของธาตุของฟิล์ม พบว่าค่า Stress-Free Lattice Parameter เพิ่มขึ้นเมื่อกระแสการอาร์คของเป้าไทเทเนียมลด ความเค้นดงค้ำที่อัดอยู่ในเนื้อฟิล์มมีค่า ก่อนข้างมาก ประมาณ 6.5 GPa ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของธาตุกับความเค้นใช้ แบบจำลองการเกิดสารละลายของแข็งแบบชั้นเคลือบของสารประกอบสามชนิด ที่มาจากการ รวมตัวของพลาสมาไทเทเนียมและเซอร์โคเนียม

Hodak, Seppänen, and Tungasmita (2008) ศึกษาการเกิดฟิล์มบาง (Zr,Ti)N ที่เคลือบ บนวัสดุรองรับคือซิลิกอน ซึ่งเคลือบด้วยเทคนิค Ion-Assisted Dual D.C. Reactive Magnetron Sputtering ด้วยการระดมยิงโดยไอออนบนพื้นผิววัสดุรองรับและแปรค่าพลังงานจลน์ในช่วง 3-103 eV อัตราส่วนของ N/Ar เท่ากับ 1:3 จากเงื่อนไขดังกล่าวทำให้เกิดฟิล์ม (Zr_{0.6}Ti_{0.4})N เมื่อ วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าเกิด Preferred Orientation ที่ระนาบ (111) แต่พบระนาบ (200) เฉพาะที่พลังงานมากกว่า 33 eV เป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุดสำหรับการเกิดฟิล์ม ค่าความแข็งอยู่ในช่วง 27-29 GPa

Uglov et al. (2008) ศึกษาโครงสร้างและเสถียรภาพเชิงกลของฟิล์มบาง Ti-Zr-N ที่เคลือบด้วยวิธี Cathodic Arc Vapor Deposition ที่เกิดโดยกระบวนการการรวมตัวของพลาสมาของไทเทเนียมและเซอร์โคเนียมในบรรยากาศไนโตรเจน ที่อัตราส่วนของกระแส Ti และ Zr ต่างกัน นำฟิล์มที่เคลือบได้ ไปอบอ่อนในสุญญากาศที่อุณหภูมิ 850 °C วิเคราะห์องค์ประกอบและองค์ประกอบเฟส ความเค้นคงค้าง และความแข็ง ด้วยเทคนิค AES, XRD และ nanoindentation ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าเกิดการฟอร์มตัวเป็นฟิล์ม Ti-Zr-N มีโครงสร้างแบบสารละลายของแข็ง ฟิล์ม Ti-Zr-N มีค่าความแข็งจุลภาคมากกว่าฟิล์ม TiN และ ZrN ความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่ออะตอมของเซอร์โคเนียมเพิ่มขึ้น ฟิล์มที่ผ่านการอบอ่อนแล้ว อะตอมของเซอร์โคเนียมลดลง ฟิล์มจึงมีความแข็งเพิ่มขึ้น ส่วนฟิล์ม Ti-Zr-N ที่ไม่ผ่านการอบอ่อนพบว่า ความเค้นคงค้างมีค่าค่อนข้างมากประมาณ -4 GPa ซึ่งสูงกว่า ZrN และ TiN (-2 GPa) เมื่อฟิล์มทุกชั้นผ่านการอบอ่อนแล้วพบว่าสิ่งเจือปนลดลง การวิเคราะห์หาความเค้นเพื่อใช้ในการตรวจสอบ Stress-Free Lattice Parameter (a_0) พบว่าขยายตัวประมาณ 0.4 - 0.7% เมื่อเทียบกับ Vegard's Law

Niu et al. (2008) ศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์ม Ti-Zr-N ที่เคลือบด้วยวิธีคาโทดิกอาร์คในสุญญากาศ (Cathodic Vacuum Arc) โดยแปรค่าศักย์ไบแอสกับวัสดุรองรับตั้งแต่ 0 - 500 V โดยกระบวนการการรวมตัวของพลาสมาของไทเทเนียมและเซอร์โคเนียมในบรรยากาศไนโตรเจน จากการศึกษาพบว่า โครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลขององค์ประกอบฟิล์ม ขึ้นอยู่กับตัวแปรในการเคลือบ นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มบางที่เคลือบได้ประกอบด้วยเฟสของ ZrN, TiN และ TiZrN ลักษณะเกรนเปลี่ยนจากแบบก้อน (Equiaxial) ไปเป็นแบบคอลัมน์าร์ (Columnar) และยังแสดง Preferred Orientation ตามศักย์ไบแอสที่ให้กับวัสดุรองรับ เมื่อศักย์ไบแอสเพิ่มขึ้น อัตราส่วนของ Ti ต่อ Zr มีค่าค่อนข้างคงที่ ในขณะที่อัตราส่วนของ N/(Ti+Zr) เพิ่มขึ้นประมาณ 1.1 ความแข็งฟิล์มเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ TiN และ ZrN ที่เงื่อนไขการเคลือบเดียวกัน โดยฟิล์มที่ให้ศักย์ไบแอสเท่ากับ -300 V มีค่า Scratch Critical Load (L_c) สูงสุด

Lin et al. (2010) ศึกษาผลของอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่อโครงสร้างและสมบัติของฟิล์มบาง TiZrN ที่เคลือบด้วยวิธีอาร์เอฟ แมกนีตรอน สปีดเตอริง โดยแปรค่าอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าเกิดสารละลายของแข็งแบบ single-phase ที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนในช่วง 2-7 sccm และเกิดเฟส mixture (Ti,Zr) และ TiZr ที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 1 sccm ขนาดของเกรนน้อยกว่า 20 nm ความแข็งเพิ่มขึ้นในช่วง 35.5 ถึง 37.5 GPa และแสดง Preferred Orientation ที่ระนาบ (111)