

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึงทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ซึ่งประกอบด้วย กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง การก่อเกิดฟิล์มบาง โครงสร้างของฟิล์มบาง การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปีดเทอริง กระบวนการ โกล์ดดิซซาร์จ ระบบเคลือบแบบ ดีซี สปีดเทอริง ระบบเคลือบแบบ ดีซี แมกนีตรอน สปีดเทอริง ระบบเคลือบแบบ อันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเทอริง การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีรีเอคทีฟ สปีดเทอริง และการหาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง

การเคลือบฟิล์มบาง (Thin Film) ในสุญญากาศครั้งแรกทำโดย Bunsen และ Grove ในปี ค.ศ. 1852 โดยพื้นฐานแล้วแนวคิดเกี่ยวกับการเคลือบในสุญญากาศหรือการเคลือบฟิล์มบาง คือ การเรียงตัว (Fabricated) โดยการตกเคลือบ (Deposition) ของสารเคลือบในลักษณะอะตอมเดี่ยวบนวัสดุรองรับ (Substrate) จนเกิดเป็นชั้นของฟิล์มที่บางมาก ในระดับนาโนเมตรถึงไมโครเมตร จึงอาจกล่าวได้ว่า “ฟิล์มบาง (Thin Film) หมายถึง ชั้นของอะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่จับรวมกันเป็นชั้นบาง ๆ” อย่างไรก็ตามการระบุว่าฟิล์มใดเป็น “ฟิล์มบาง” นั้นอาจพิจารณาได้จากลักษณะการใช้งานว่าใช้สมบัติด้านใดของฟิล์ม กล่าวคือ ถ้าเป็นการใช้สมบัติเชิงผิว (Surface Properties) จะเรียกฟิล์มนั้นว่า “ฟิล์มบาง” แต่ถ้าเป็นการใช้สมบัติเชิงปริมาตร (Bulk Properties) จะเรียกฟิล์มนั้นว่า “ฟิล์มหนา” ทั้งนี้จะเห็นว่า ฟิล์มเดียวกันนั้นอาจเป็นทั้ง “ฟิล์มบาง” หรือ “ฟิล์มหนา” ก็ได้ขึ้นกับลักษณะการใช้งานเป็นสำคัญ (Bunshah, 1994)

ปัจจุบันมีการนำฟิล์มบางมาประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ มากมาย เช่น งานด้าน อิเล็กทรอนิกส์ เช่น สารกึ่งตัวนำ ฟิล์มตัวนำ และฟิล์มตัวต้านทาน หรืองานด้านทัศนศาสตร์ เช่น เลนส์ กระจกสะท้อนแสง กระจกสะท้อนความร้อน เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้วิธีการเคลือบฟิล์มบางในการเตรียมสารตัวอย่างสำหรับการศึกษสมบัติทางกายภาพของวัสดุในรูปของฟิล์มบาง ซึ่งสมบัติบางอย่างไม่สามารถวัดได้เมื่ออยู่ในสภาพเป็นก้อน (Bulk) เพราะฉะนั้นข้อมูลเหล่านี้มีประโยชน์อย่างมากต่อการพัฒนาวัสดุเพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรม

การเคลือบฟิล์มบางเป็นกระบวนการที่ทำให้สารเคลือบตกเคลือบลงบนผิววัสดุรองรับที่
ต้องการ ซึ่งสามารถทำได้ทั้งกระบวนการทางเคมีหรือกระบวนการทางฟิสิกส์ โดยพื้นฐานแล้ว
กระบวนการเคลือบฟิล์มบางมีขั้นตอนสำคัญ 3 ขั้นตอน (Smith, 1995) ดังนี้คือ

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

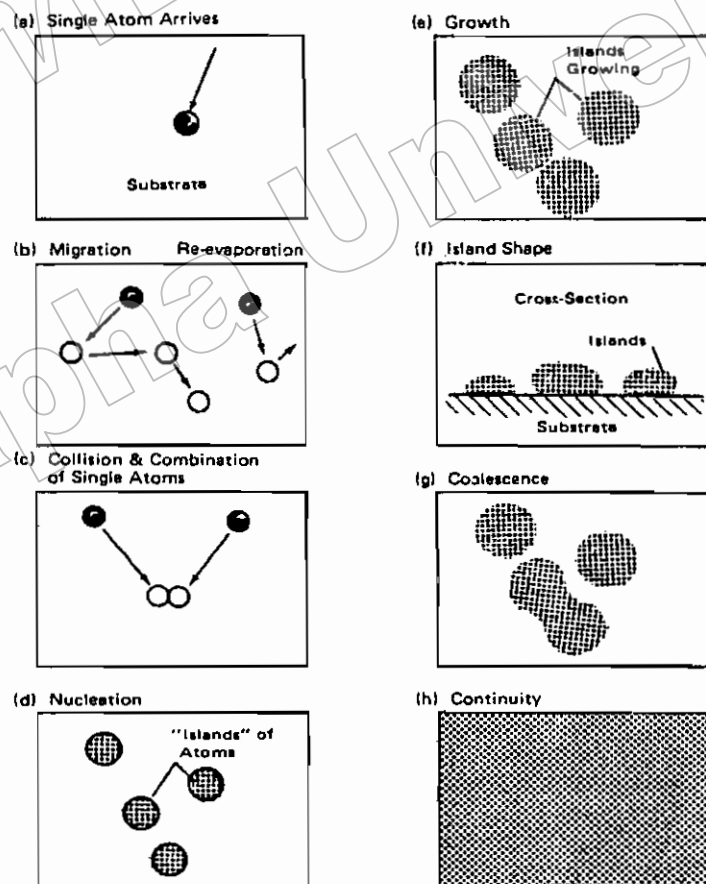
2. การเคลื่อนย้ายสารเคลือบมายังวัสดุรองรับ (Transport) ในภาวะสุญญากาศ
ไอระเหยของสารเคลือบอาจจะมีการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ไปยังวัสดุรองรับ หรืออาจจะเคลื่อนที่ไป
ในลักษณะของไหล ซึ่งจะทำให้ไอระเหยของสารเคลือบมีการชนกับอนุภาคอื่นภายในภาชนะ
สุญญากาศ นอกจากนี้ไอระเหยอาจจะเคลื่อนที่ไปยังวัสดุรองรับในลักษณะของพลาสมาก็ได้

3. การสะสมพอกพูน (Deposition) เป็นขั้นตอนการพอกพูนของสารเคลือบและ
โตขึ้นจนกลายเป็นชั้นของฟิล์มบางบนวัสดุรองรับ ขั้นตอนนี้จะขึ้นกับเงื่อนไขของวัสดุรองรับหรือ
การทำปฏิกิริยาของสารเคลือบกับวัสดุรองรับ ความสะอาดของผิววัสดุรองรับ ตลอดจนพลังงานที่
ใช้ในการเคลือบ

การก่อเกิดฟิล์มบาง

การเกิดฟิล์มบางจากกระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ Chapman (1980)
ได้อธิบายไว้ดังนี้เมื่อสารเคลือบจากแหล่งกำเนิดสารเคลือบเคลื่อนที่มาถึงวัสดุรองรับ สารเคลือบที่
กระทบผิววัสดุรองรับส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของอะตอมหรือโมเลกุล (ภาพที่ 2-1 (a)) โดยพลังงาน
พันธะ (Bonding Energy) ระหว่างอะตอมของสารเคลือบกับวัสดุรองรับและอุณหภูมิของวัสดุ
รองรับ จะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการแพร่ (Diffusion) ของสารเคลือบบนผิววัสดุรองรับ
อะตอมของสารเคลือบจะตกกระทบผิววัสดุรองรับในตำแหน่งที่เรียกว่าตำแหน่งการดูดซับ
(Adsorption Site) ทำให้เกิดการเกาะติดหรือถ้ามีพลังงานมากพอก็อาจกระโดดข้ามกำแพงพลังงาน
ไปยังบริเวณที่อยู่ติดกันหรือหลุดออกจากตำแหน่งนั้นไป (ภาพที่ 2-1 (b)) ในช่วงเวลาหนึ่งอะตอม
สารเคลือบอาจเกิดการระเหยกลับและเกิดการรวมตัวกันระหว่างอะตอมที่มีการแพร่ด้วยกัน เมื่อ
อะตอมของสารเคลือบรวมตัวกันอาจเกิดเป็นอะตอมคู่ (ภาพที่ 2-1 (c)) ซึ่งมีความเสถียรมากกว่า
อะตอมเดี่ยว (Single Atom) ซึ่งการรวมตัวกันของอะตอมนั้นจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของ
อะตอมเดี่ยวและอัตราเคลือบ (Deposition Rate) อะตอมคู่อาจรวมตัวกับอะตอมเดี่ยวอื่นแล้ว
กลายเป็นสามอะตอม (Triplets) หรือ สี่อะตอม (Quadruplets) หรืออื่น ๆ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า

สภาวะการเกิดนิวเคลียส (ภาพที่ 2-1 (d)) ทำให้ได้กลุ่มอะตอมกึ่งเสถียร (Quasi-Stable Islands) จากนั้นกลุ่มอะตอมจะเริ่มโตขึ้นเรียกว่า การโตเป็นกลุ่มก้อน (Island Growth) ขนาดของกลุ่มอะตอมจะใหญ่ขึ้น โดยมีจำนวนอะตอมเท่าเดิม หรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (ภาพที่ 2-1 (e) และ 2-1 (f)) การโตของกลุ่มอะตอมนี้จะเกิดขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งขอบของแต่ละกลุ่มอะตอมชนกัน เรียกว่า การรวมกันเป็นก้อนของกลุ่มอะตอม (Agglomeration หรือ Coalescence) (ภาพที่ 2-1 (g)) จากการศึกษาด้วยเทคนิค Transmission Electron Microscopy (TEM) พบว่าขณะที่กลุ่มอะตอมรวมกันเป็นก้อน อะตอมจะมีพฤติกรรมคล้ายของเหลว (Liquid-Like Behaviour) และมีการจัดเรียงทิศทางในเชิงผลึกวิทยา (Crystallographic Orientation) ด้วย การรวมกันเป็นก้อนของกลุ่มอะตอมจะเกิดขึ้นจนกระทั่งเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่อง (ภาพที่ 2-1 (h)) แต่ในบางกรณีการเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่องจะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์เมื่อฟิล์มมีความหนาโดยเฉลี่ยประมาณ $0.04 - 0.05 \mu\text{m}$ ลักษณะผิวของฟิล์มบางขณะเกิดการรวมกลุ่มอะตอมจะดูคล้ายเนินเขาและหุบเขา



ภาพที่ 2-1 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 และได้ฟิล์มที่มีความหนาพอสำหรับการเชื่อมต่อกันอย่างสมบูรณ์ ในทางกลับกันถ้าอุณหภูมิวัสดุรองรับต่ำแต่อัตราเคลือบสูงก็จะให้ผลลักษณะเดียวกัน

โครงสร้างของฟิล์มบาง

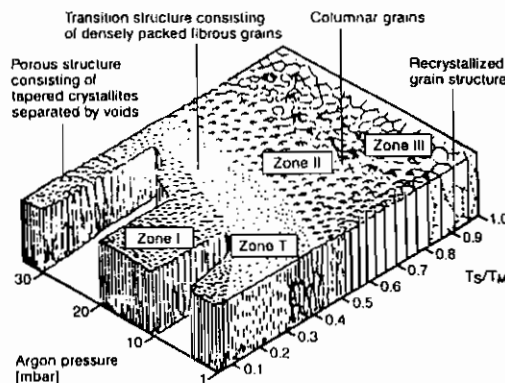
โครงสร้างของฟิล์มบางจะเป็นไปตามเงื่อนไขของอัตราส่วนระหว่างอุณหภูมิเคลือบกับอุณหภูมิหลอมเหลว (T/T_m) ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ตามลักษณะโครงสร้างและสมบัติทางกายภาพ (ซีวาร์ตน์ ม่วงพัฒน์, 2544) ดังภาพที่ 2-2

1. บริเวณ 1 (Zone I) เป็นการเคลือบ ที่เกิดในช่วงอุณหภูมิต่ำ และความดันขณะเคลือบมีค่าสูง อะตอมที่อยู่บนผิววัสดุรองรับจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำ ทำให้เกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มเล็ก ๆ กระจุกกระจาย และเกิดเป็น โครงสร้างผลึกที่มีลักษณะเรียวยแหลมแบบ Tapers Crystallites จากนิเวศที่มีปริมาณจำกัด ทำให้เกิดความหนาแน่นของโครงสร้างต่ำ มีช่องว่างขนาดความกว้างในระดับ 100 Å ที่ T/T_m เท่ากับ 0 - 0.1 ที่ความดัน 1 mtorr ถ้าความดันสูง บริเวณนี้จะขยายกว้างสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น และทำให้ขนาดของผลึกเพิ่มขึ้น ถ้า T/T_m เพิ่มขึ้น เนื่องจากที่ความดันสูงความหนาแน่นของแก๊สในภาชนะสุญญากาศมีมากขึ้น อนุภาคของสารเคลือบจะเคลื่อนที่ตกลงมาได้ยากขึ้น ทำให้อนุภาคของสารเคลือบตกลงมาได้ยาก และขณะที่ตกอาจรวมตัวกับอนุภาคอื่น ทำให้อนุภาคที่ตกลงมามีขนาดใหญ่ และมีเวลาในการเคลื่อนที่เพื่อฟอร์มตัวเป็นนิเวศมีมากขึ้น จึงทำให้ช่องว่างระหว่างเกรนมีขนาดใหญ่เกิดขึ้น ลักษณะของฟิล์มบางที่ขรุขระมักจะเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของการโตของนิเวศ โดยอุณหภูมิที่มีผลต่อการโตของฟิล์มมักจะมาจากไอออนที่ระดมยิงเป็นส่วนใหญ่

2. บริเวณ T (Zone T) เป็นบริเวณต้นแบบสำหรับการเคลือบฟิล์มด้วยระบบสปัตเตอร์ โดยที่ค่าของ T/T_m อยู่ในช่วง 0.1 - 0.5 ที่ความดันขณะเคลือบประมาณ 1 mtorr เกิดในช่วงระหว่างบริเวณ 1 และบริเวณ 2 อะตอมที่อยู่บนผิววัสดุรองรับจะมีปริมาณมากขึ้น และได้รับพลังงานจากการชนของอนุภาคสารเคลือบ ทำให้อุณหภูมิของวัสดุรองรับเพิ่มขึ้น ค่า Surface Mobility จะเพิ่มขึ้น และโครงสร้างในบริเวณ 1 ก็จะเข้าสู่บริเวณ T ซึ่งจะเริ่มมีเกรนยาว (Fibrous Grain) เต็มพื้นที่ และขอบเกรนมีความหนาแน่นสูงขึ้นจึงมีการแพร่ของอะตอมผ่านขอบเกรนที่ไม่แข็งแรงนั้นเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน จนกลายเป็นคอลัมน์ (Columnar) ต่อไป โดยปราศจากช่องว่างบริเวณที่ขอบ

3. บริเวณ 2 (Zone II) ที่บริเวณ 2 จะมีค่า T/T_m อยู่ระหว่าง 0.5 - 0.8 ที่ความดันขณะเคลือบประมาณ 1 mtorr จะเกิดการแพร่ที่รอยต่อระหว่างขอบเกรน จนเกิดเป็น โครงสร้างแบบคอลัมน์ที่เกิดจากการอยู่กันอย่างหนาแน่นของผลึกทั้งหลาย ขนาดของเกรนและความหนาของฟิล์มจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิในการเคลือบและอัตราการเคลือบเพิ่ม (มีผลต่อ Surface Mobility ของอะตอม) และขนาดของคอลัมน์จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากการแพร่ที่บริเวณรอยต่อระหว่างขอบคอลัมน์

4. บริเวณ 3 (Zone III) บริเวณนี้อุณหภูมิสูงสุดและค่า T/T_m อยู่ระหว่าง 0.8 - 1.0 ที่ความดันขณะเคลือบประมาณ 1 mtorr การแพร่จะมีค่าสูง และส่งผลต่อโครงสร้างสุดท้าย โครงสร้างที่ได้จะเป็นเกรนที่มีด้านเท่ากันหมด ขนาดของ คอลัมน์ จะมียุทธศาสตร์ใหญ่ และความหนาแน่นเพิ่มขึ้นอย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิสูงอาจจะทำให้เกิดการจัดเรียงผลึกใหม่ (Recrystallization) เนื่องมาจากพลังงานสะสมของความเครียด (Stored Strain Energy) ที่เกิดขึ้นตั้งแต่ตอนเคลือบเกรนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้จะเปลี่ยนจาก คอลัมน์ เป็นผลึกเดี่ยว



ภาพที่ 2-2 โครงสร้างของการเกิดฟิล์มในรูปแบบต่าง ๆ (ชีวารัตน์ ม่วงพัฒน์, 2544)

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริง

การเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริง เป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางที่เกิดจากสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริง การเคลือบด้วยวิธีนี้เกิดขึ้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงวิ่งเข้าชนวัสดุรองรับและมีการพอกพูนและ โดเป็นฟิล์มบางในที่สุด กระบวนการสปัตเตอริงคือการทำให้อะตอมหลุดจากผิวของวัสดุ โดยการชนของอนุภาคพลังงานสูงแล้วมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและ โมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิวสารเคลือบ โดยอนุภาคที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ และเนื่องจาก ไอออนที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงในการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริงจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่าวิธีการระเหยสารมาก ดังนั้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบวิ่งเข้ากระทบแผ่นวัสดุรองรับก็จะฝังตัวแน่นลงในเนื้อวัสดุที่ต้องการเคลือบมากกว่าวิธีระเหยสาร ดังนั้นการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริงจะทำให้การยึดเกาะระหว่างสารเคลือบกับวัสดุรองรับดีกว่า (พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ และธนัสถา รัตนะ, 2547; Chapman, 1980)

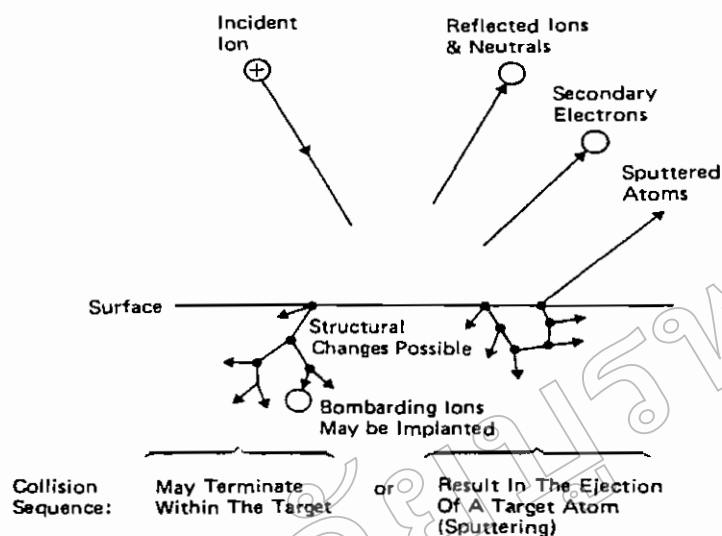
เมื่อผิวหน้าของวัสดุถูกระดมยิงด้วยอนุภาคพลังงานสูงจะทำให้เกิดการสึกกร่อนและมีอนุภาคที่ผิวหน้าของวัสดุหลุดมา เนื่องจากการชนของอนุภาคพลังงานสูงกับอนุภาคที่ผิวหน้าปรากฏการณ์ที่อนุภาคผิวหน้าวัสดุหลุดออกมาเรียกว่า สปัตเตอริง (Sputter) หรือสปัตเตอริง (Sputtering) กระบวนการสปัตเตอริงนี้ถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อ 100 กว่าปีที่ผ่านมาโดย grove ซึ่งในขณะนั้นสปัตเตอริงเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดความเสียหายกับคาโทดและกริดในหลอดคิสซาร์จ แต่ปัจจุบันมีการนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางเช่น การทำความสะอาดผิวหน้า (Surface Cleaning) การกัดเซาะ (Etching) การวิเคราะห์ชั้นผิวหน้าของวัสดุ (Surface Layer Analysis) และการเคลือบฟิล์มบาง

สำหรับแนวคิดเบื้องต้นเกี่ยวกับกระบวนการสปัตเตอริง อธิบายได้ดังนี้

1. อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ เมื่อวิ่งชนผิวหน้าวัสดุจะเกิดปรากฏการณ์ดังนี้

1.1 การสะท้อนที่ผิวหน้าของไอออน (Reflected Ion and Neutral) ไอออนอาจสะท้อนกลับจากผิวหน้าซึ่งส่วนใหญ่จะสะท้อนออกมาในรูปของอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้าอันเกิดจากการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิวเป้าสารเคลือบ

1.2 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Emission) จากการชนของไอออนอาจทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่สองจากเป้าสารเคลือบถ้าไอออนนั้นมีพลังงานสูงพอ



ภาพที่ 2-3 อันตรกิริยาระหว่างไอออนกับพื้นผิววัสดุ (Chapman, 1980)

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

1.4 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผิวสารเคลือบ (Target Material Structural Rearrangements) การชนของไอออนบนผิวสารเคลือบทำให้เกิดการเรียงตัวของอะตอมที่ผิวสารเคลือบใหม่และเกิดความบกพร่องของผลึก (Lattice Defect) โดยเรียกการจัดตัวใหม่ของโครงสร้างผิวนี้นี้ว่า Altered Surface Layer

1.5 การสปัตเตอร์ (Sputter) การชนของไอออนอาจทำให้เกิดกระบวนการชนกันแบบต่อเนื่องระหว่างอะตอมของเป้าอันทำให้เกิดการปลดปล่อยอะตอมจากเป้าสารเคลือบซึ่งเรียกว่ากระบวนการสปัตเตอร์ริง

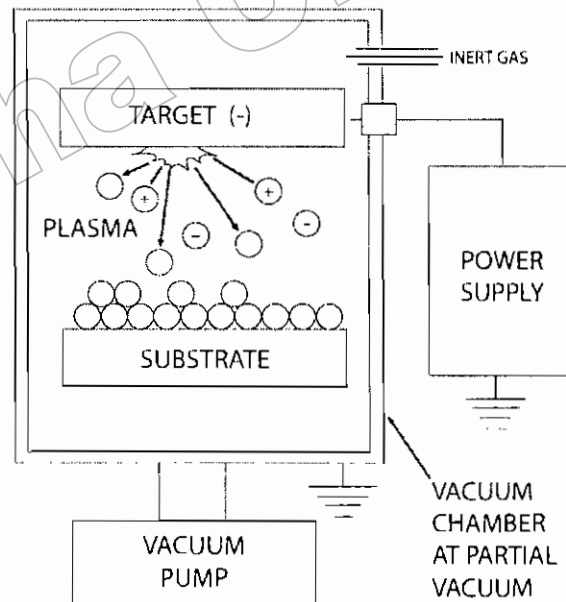
2. กระบวนการสปัตเตอร์ริง เป็นกระบวนการที่อะตอมผิวหน้าของวัสดุถูกทำให้หลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูง โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุดังกล่าว กระบวนการนี้อนุภาคที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ดังนั้นสิ่งที่จำเป็นในกระบวนการสปัตเตอร์ริง คือ

2.1 เป้าสารเคลือบ ทำหน้าที่เป็นเป้าให้อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนจนมีการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลือบลงเคลือบบนวัสดุรองรับ

2.2 อนุภาคพลังงานสูง ซึ่งวิ่งชนเป้าสารเคลือบ แล้วทำให้อะตอมของเป้าสารเคลือบหลุดออกมา ปกติอนุภาคพลังงานสูงนี้อาจเป็นกลางทางไฟฟ้า เช่น นิวตรอน หรืออะตอมของธาตุ

ต่าง ๆ แต่การทำให้อนุภาคที่เป็นกลางมีพลังงานสูงเกิน 10 eV เพื่อใช้ในกระบวนการสปัตเตอร์ริงทำได้ค่อนข้างยาก วิธีการหนึ่งที่นิยมคือการเร่งอนุภาคประจุภายใต้สนามไฟฟ้า ซึ่งสามารถควบคุมระดับพลังงานไอออนตามต้องการ อิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุชนิดหนึ่งที่เกิดได้ง่ายและสามารถเร่งให้มีพลังงานสูงภายใต้สนามไฟฟ้าได้ แต่อิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่าอะตอมของสารเคลือบมากทำให้การถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมต่ออะตอมสารเคลือบนั้นเป็นไปได้โดยไม่มีประสิทธิภาพและไม่สามารถทำให้กระบวนการสปัตเตอร์ริงเกิดขึ้นได้ ตามทฤษฎีทางฟิสิกส์การชนกันระหว่าง 2 อนุภาคที่มีการส่งถ่ายพลังงานและโมเมนตัมดีที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อมวลของอนุภาคทั้งสองมีค่าเท่ากันดังนั้นเราจึงเลือกการเร่งไอออนของก๊าสในสนามไฟฟ้าเป็นอนุภาควิ่งชนเป้าสารเคลือบซึ่งให้อัตราการปลดปล่อยเป้าสารเคลือบสูงเพียงพอกับความต้องการ

2.3 การผลิตอนุภาคพลังงานสูง อนุภาคพลังงานสูงในระบบสปัตเตอร์ริงนี้จะต้องถูกผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้กระบวนการเคลือบสารเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจนได้ความหนาฟิล์มบางตามต้องการ ทั้งนี้สามารถทำได้หลายวิธี เช่นการใช้ลำอนุภาคจากปืนไอออนที่มีปริมาณการผลิตไอออนในอัตราสูงหรือผลิตจากกระบวนการโกลว์ดีสชาร์จ เนื่องจากปืนไอออนมีราคาค่อนข้างสูงและให้ไอออนในพื้นที่แคบ กระบวนการสปัตเตอร์ริงทั่วไปในระดับอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้กระบวนการโกลว์ดีสชาร์จในการผลิตอนุภาคพลังงานสูง



ภาพที่ 2-4 ลักษณะของเครื่องเคลือบสุญญากาศด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง

3. ค่าyieldของสปัตเตอริง (Sputtering Yield: S) คือ ค่าเฉลี่ยปริมาณการหลุดของอะตอมเป้าสารเคลือบต่อปริมาณการชนของไอออน 1 อนุภาค มีหน่วยเป็น อะตอมต่อไอออน โดยการวัดค่าyieldนี้ สามารถทำได้โดยการหาน้ำหนักหรือความหนาที่ลดลงของเป้าสารเคลือบ หรือหาได้จากวัสดุทั้งหมดที่ถูกสปัตเตอริง หรืออาจหาได้จากการตรวจวัดสปัตเตอริงอะตอม (Sputter Atom) ขณะที่ยังพุ่งกระจาย (พิเศษฐ ลิ้มสุวรรณ และธนัสถา รัตนะ, 2547) ค่าyieldของกระบวนการสปัตเตอริงจะเปลี่ยนไปตามภาวะต่าง ๆ ดังนี้

3.1 เปลี่ยนแปลงตามพลังงานไอออน การชนของอนุภาค 2 อนุภาคในแนวเดียวกัน การถ่ายเทพลังงานระหว่างอนุภาคจะเป็นไปตามสมการที่ 2-1

$$\Delta E = \frac{4mM}{(m+M)^2} \quad (2-1)$$

เมื่อ ΔE	คือพลังงานที่ถ่ายเทระหว่างอนุภาค
m	คือมวลอะตอมที่ถูกชน
M	คือมวลของอะตอมที่วิ่งเข้าชน

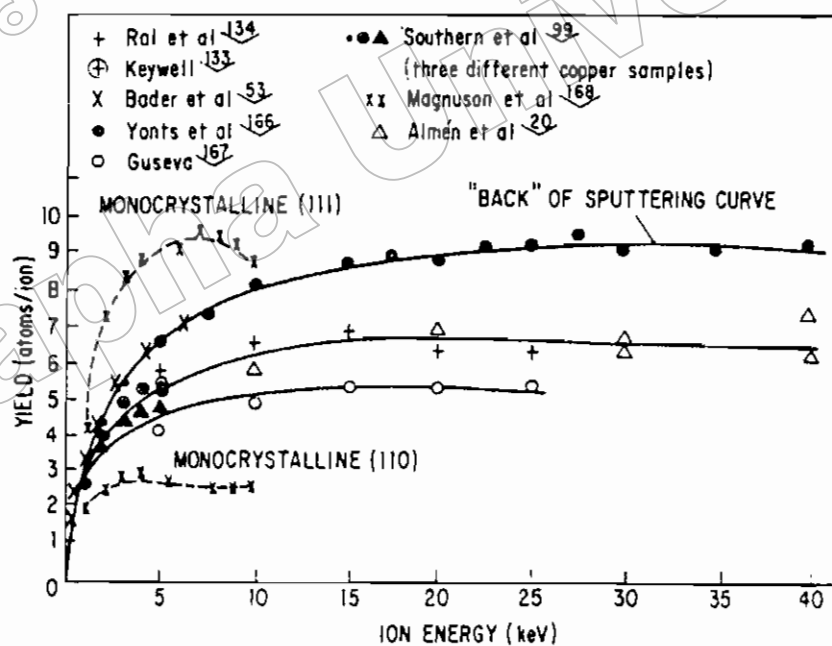
เมื่อพลังงานไอออนมีค่าต่ำกว่าค่าyieldจากกระบวนการสปัตเตอริง จะมีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากไม่สามารถเอาชนะแรงยึดเกาะระหว่างอะตอมบนเป้าสารเคลือบได้ เมื่อไอออนมีพลังงานสูงขึ้นเกินกว่า $4H$ (H คือค่าพลังงานเฉลี่ยที่ใช้ในการระเหิด 1 อะตอม จากผิวสารเคลือบ) ถ้าพลังงานไอออนสูงมากพอในการทำให้เกิดกระบวนการชนอย่างต่อเนื่องระหว่างอะตอมสารเคลือบและเริ่มมีการปลดปล่อยอะตอมสารเคลือบ เรียกพลังงานค่านี้ว่า พลังงานขีดเริ่ม (Threshold Energies) ซึ่งเปลี่ยนแปลงไประหว่างคู่การชนของอนุภาค (ตารางที่ 2-1)

เมื่อไอออนชนมีพลังงานสูงขึ้นyieldจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลในช่วงแรกและเปลี่ยนเป็นการเพิ่มแบบเชิงเส้นจากนั้นจึงมีการอิ่มตัว (Saturation) ของค่าyield เมื่อพลังงานไอออนมีค่าสูงมาก ทั้งนี้เนื่องจากไอออนพลังงานสูงมีโอกาสในการฝังตัวบนผิวเป้าสารเคลือบสูงขึ้นทำให้yieldของสารเคลือบมีค่าคงที่ จากนั้นจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มพลังงานไอออนให้สูงมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2-5

ตารางที่ 2-1 พลังงานขีดเริ่มของเป้าสารเคลือบชนิดต่าง ๆ (Maissel & Glang, 1970)

	Ne	Ar	Kr	Xe	Hg		Ne	Ar	Kr	Xe	Hg
Be	12	15	15	15	-	Mo	24	24	28	27	32
Al	13	13	15	18	18	Rh	25	24	25	25	-
Ti	22	20	17	18	25	Pd	20	20	20	15	20
C	21	23	25	28	25	Ag	12	15	15	17	-
Cr	22	22	18	20	23	Ta	25	26	30	30	30
Fe	22	20	25	23	25	W	35	33	30	30	30
Co	20	25	22	22	-	Re	35	35	25	30	35
Ni	23	21	25	20	-	Pt	27	25	22	22	25
Cu	17	17	16	15	20	Au	20	20	20	18	-
Ge	223	25	22	18	25	Th	20	24	25	25	-
Zr	23	22	18	25	30	U	20	23	25	22	27
Nb	27	25	26	32	-						

Boldface values are those for which the energy-transfer factor $4m_1m_2/(m_1+m_2)^2$ is 0.9 or higher



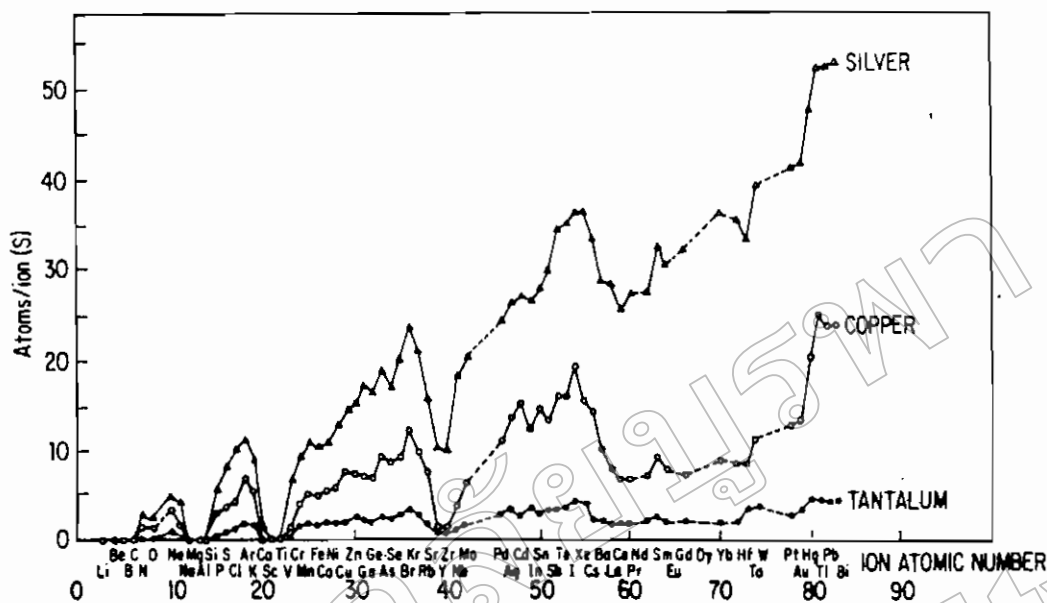
ภาพที่ 2-5 ยิลด์ของทองแดงที่ถูกชนด้วยไอออนจากแก๊สอาร์กอนที่พลังงานต่าง ๆ

(Maissel & Glang, 1970)

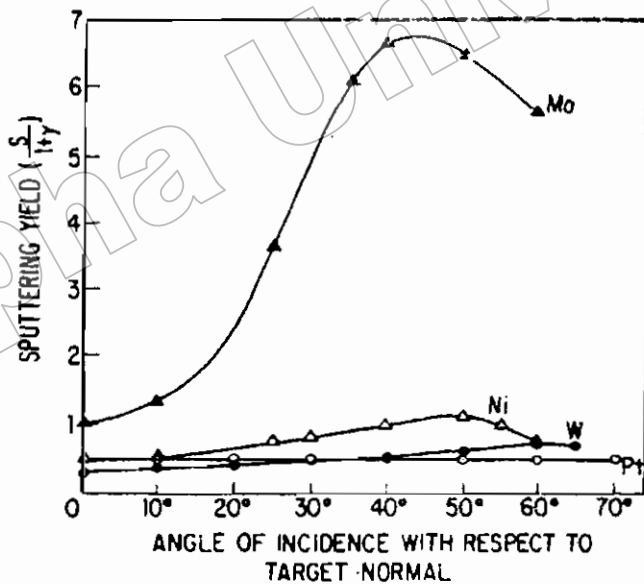
3.2 เปลี่ยนแปลงตามระนาบผลึกของผิวเป้าสารเคลือบ จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้เป้าสารเคลือบที่เป็นผลึกเดี่ยวค่าyieldจะมียค่ามากที่สุดเมื่อไอออนชนเป้าในแนวระนาบที่มีอะตอมหนาแน่นที่สุด และมีค่าต่ำในระนาบที่มีอะตอมเบาบาง ในทองแดงซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ FCC (Face Centered Cubic) พบว่าการชนบนระนาบ (111) ซึ่งมีความหนาแน่นอะตอมสูงสุด yieldจะมียค่าสูงสุดเมื่อใช้ค่าพลังงานไอออนในการชนค่าเดียวกัน ส่วนระนาบที่มีความหนาแน่นอะตอมต่ำ ไอออนมีแนวโน้มนิ่งฝังตัวในเป้าสารเคลือบมากขึ้น

3.3 เปลี่ยนแปลงตามชนิดของไอออนที่ชนเป้าสารเคลือบ ค่าyieldจากเป้าสารเคลือบชนิดเดียวกัน เมื่อใช้ไอออนต่างชนิดกันวิ่งชนจะมีค่าแตกต่างกันออกไป แม้สมการที่ 1 แสดงให้เห็นว่าการถ่ายเทพลังงานระหว่าง 2 อนุภาคที่ชนกันจะมีค่าสูงสุดเมื่อมวลของอะตอมทั้งสองมีค่าเท่ากัน แต่อะตอมบนเป้าสารเคลือบยึดเกาะกับอะตอมข้างเคียงจึงทำตัวเสมือนมีมวลยังผลสูงกว่ามวลของอะตอมเดี่ยวจึงพบว่าyieldมีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้ไอออนที่มีมวลสูงกว่ามวลของอะตอมเป้าสารเคลือบ ภาพที่ 2-6 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าyieldพบว่ามียค่าสูงสุดเป็นช่วง ๆ ณ ตำแหน่งที่ใช้ไอออนจากแก๊สเฉื่อย คือแก๊ส Ne, Ar, Kr, และ Xe ซึ่งเป็นอะตอมที่มีอิเล็กตรอนครบ 8 ในวงนอกสุด สาเหตุของการเกิดจุดสูงสุดของค่าyieldเป็นช่วง ๆ นี้ยังไม่มียคำอธิบายที่ชัดเจน

3.4 เปลี่ยนแปลงตามมุมตกกระทบของไอออนบนเป้าสารเคลือบ จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มมุมเอียงของการชนจากไอออนบนเป้ามามากขึ้นyieldจะมียค่าสูงขึ้นตามมุมที่เอียง เนื่องจากอะตอมสารเคลือบที่หลุดออกมาเปลี่ยนจากการกระเจิงกลับ (Back Scattering) เป็นการกระเจิงไปข้างหน้า (Forward Scattering) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ต้องการจำนวนครั้งของการชนระหว่างอะตอมน้อยกว่าทำให้yieldสูงขึ้นจนถึงจุดหนึ่งซึ่งมียค่าสูงสุดที่องศาการเอียงมากกว่า 45° จากนั้นyieldจะมียค่าลดลงเมื่อมุมสูงขึ้น และเป็นศูนย์เมื่อมุมเอียงมีค่า 90° โดยขณะนั้นพื้นที่การชนเมื่อมองจากไอออนมีค่าเป็นศูนย์ ภาพที่ 2-7



ภาพที่ 2-6 การเปลี่ยนแปลงค่าyield ของเป้าทองแดง (Cu) , เงิน (Ag) และแทนทาลัม (Ta) เมื่อใช้ไอออนพลังงาน 45 keV จากธาตุที่มีเลขอะตอมค่าต่าง ๆ (Maissel & Glang, 1970)



ภาพที่ 2-7 การเปลี่ยนแปลงของyield เมื่อใช้ไอออนของปรอทพลังงาน 200 eV ชนเป้านิกเกิล (Ni), โมลิบดีนัม (Mo) , ทังสแตน (W) และทองคำขาว (Pt) ที่มุมการตกกระทบค่าต่าง ๆ (วัดเทียบกับแนวขนตั้งฉากบนเป้า) (Maissel & Glang, 1970)

4. ความเร็วและพลังงานของอะตอมที่ถูกสปัตเตอร์หลุดออกจากผิวหน้าเป้าสารเคลื่อนด้วยวิธีการสปัตเตอร์มีพลังงานจลน์ค่อนข้างสูงและมากกว่าพลังงานของอะตอมที่หลุดออกด้วยวิธีการระเหยสารประมาณ 50 - 100 เท่า อะตอมมีการกระจายพลังงานแบบ Maxwellian โดยที่พลังงานส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่า 10 eV และอีกส่วนหนึ่งมีพลังงานระหว่าง 10 - 40 eV ถ้าไอออนที่ใช้มีพลังงานสูงขึ้น พลังงานเฉลี่ยของอะตอมจากสปัตเตอร์จึงมีค่าสูงขึ้นจนเมื่อไอออนที่วิ่งชนมีพลังงานเกิน 1 keV พลังงานเฉลี่ยของอะตอมจากการสปัตเตอร์จะไม่เพิ่มขึ้นและเป้าที่มีค่าอิเล็กสูงมีแนวโน้มทำให้พลังงานเฉลี่ยของอะตอมที่หลุดออกมามีค่าต่ำ เนื่องจากไอออนที่วิ่งชนเมื่อเฉลี่ยพลังงานให้กับอะตอมที่หลุดออกมาจำนวนมาก อะตอมแต่ละตัวจะรับพลังงานเฉลี่ยจากไอออนได้น้อยลง

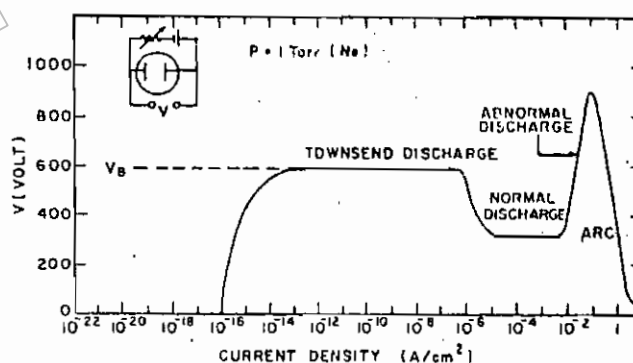
กระบวนการโกลด์วูดิสชาร์จ

พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ และธนัสดา รัตนะ (2547) ได้อธิบายกระบวนการโกลด์วูดิสชาร์จไว้ดังนี้ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้ว ที่วางห่างกันเป็นระยะ d ภายใต้ความดันประมาณ 1.33 mbar ของแก๊สไนออน พบว่าช่วงแรกที่เพิ่มแรงดันทางไฟฟ้าจะมีกระแสไหลในวงจรมีค่าต่ำ กระแสส่วนนี้เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออนของแก๊สที่เกิดขึ้นตลอดเวลาในบรรยากาศเนื่องจากการชนของรังสีคอสมิกและถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้า กระแสนี้จะมีค่าค่อนข้างคงที่เพราะอัตราการเกิดประจุขึ้นอยู่กับความเข้มของรังสี เมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นใกล้ค่าแรงดันไฟฟ้าทะลาย (Breakdown Voltage: VB) พลังงานของประจุที่ถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้นจนสามารถชนโมเลกุลของแก๊สทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอนซึ่งถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าให้มีการชนและเกิดการไอออไนซ์เพิ่มขึ้น ส่วนของไอออนบวกจะถูกเร่งเข้าชนคาโทด จนเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) เรียกกระบวนการช่วงนี้ว่า ทาวนด์เซนดิสชาร์จ (Townsend Discharge)

เมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นถึงแรงดันไฟฟ้าทะลายจะเกิดกระบวนการถล่ม (Avalanche) ทำให้ปริมาณไอออนบวกวิ่งเข้าชนคาโทดมากขึ้นและมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิมากขึ้น ซึ่งจะถูกร่งให้วิ่งเข้าหาแอโนดขณะเดียวกันอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้ก็จะมีการชนกับโมเลกุลของแก๊สทำให้เกิดไอออนมากขึ้น สุดท้ายไอออนบวกที่เพิ่มขึ้นมากขึ้นนี้จะวิ่งเข้าชนคาโทดแล้วเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิเพิ่มขึ้นตามมาด้วย และชนโมเลกุลแก๊สทำให้เกิดผลผลิตไอออนเพิ่มขึ้น ทำให้กระแสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีปริมาณไอออนมากเพียงพอที่จะผลิตอิเล็กตรอนได้ในจำนวนคงที่ ช่วงนี้ระบบสามารถรักษาสภาพดิชาร์จได้ด้วยตนเอง โดยไม่ต้องอาศัยแหล่งกำเนิดจากรังสีภายนอกในการผลิตไอออน ช่วงนี้แก๊สภายในระบบจะเกิดการเรืองแสงขึ้น แรงดันไฟฟ้าระหว่าง

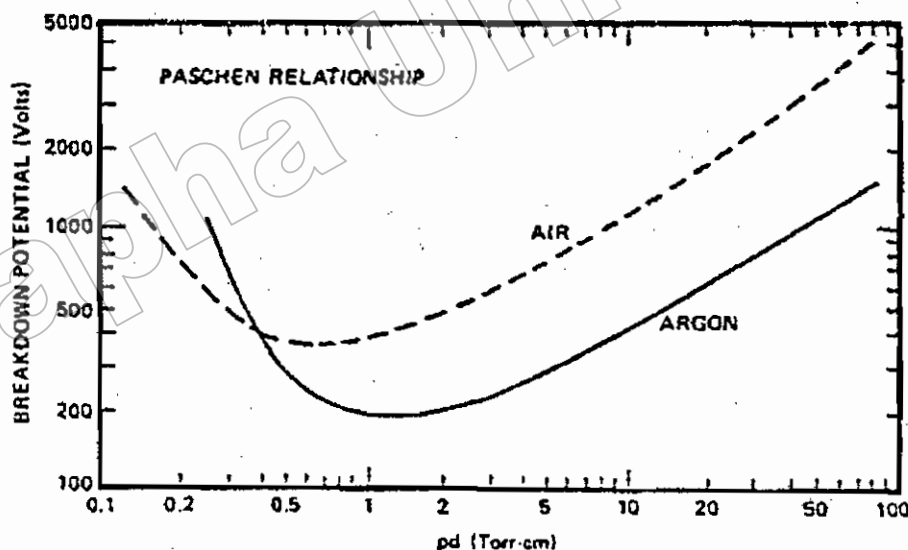
อิเล็กโตรดลดค่าลงและกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเรียก การเรืองแสงปกติ หรือ นอร์มอล โกลว์ (Normal Glow) สถานะนี้อัตราการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิต่ออัตราการชนของไอออน มีค่าค่อนข้างต่ำ คือประมาณ 0.1 สำหรับเป้าคาโทดที่ทำจากวัสดุทั่วไป โดยในช่วงเริ่มต้นของการเรืองแสงหรือ โกลว์ การชนของไอออนบนคาโทดจะปรับตัวเองให้เกิดขึ้นในบางบริเวณ แนวการเรืองแสงอาจเลื่อนไปมาได้และการชนของไอออนบนคาโทด ไม่มีความสม่ำเสมอโดยจะมีความเข้มของบริเวณการเรืองแสงตามแนวขอบหรือมุมของคาโทดที่มีสนามไฟฟ้าสูงเพื่อรักษาสภาพการ โกลว์ (Self-Sustaining) บางบริเวณไว้ เมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นตามแนวการชนของไอออนจะค่อย ๆ ขยายตัว เพิ่มพื้นที่จนครอบคลุมตลอดผิวคาโทด จนกระทั่งมีค่าความหนาแน่นกระแส เท่ากันตลอด โดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดคงที่

หลังจากการชนของไอออนครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดของคาโทดแล้ว การเพิ่มกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบจะทำให้ทั้งแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น เรียกว่า ช่วงการเรืองแสงผิดปกติ เปล่งแสงจ้าขึ้น หรือ แอบนอร์มอล โกลว์ (Abnormal Glow) เป็นช่วงที่ใช้กับระบบสปีดเตอริง และอีกหลาย ๆ ระบบของกระบวนการเกี่ยวข้องกับ โกลว์ดีสชาร์จ ช่วงนี้ถ้าไม่ระบายความร้อนให้กับคาโทด เมื่อความหนาแน่นของกระแสของคาโทดเพิ่มขึ้นสูงประมาณ 0.1 A/cm^2 ความร้อนที่เกิดจากการชนของไอออนบนผิวคาโทดมีมากขึ้น จนเกิดการปล่อยอิเล็กตรอนแบบเทอร์มิออนิก (Thermionic Electron Emission) เสริมกับการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิและติดตามด้วยกระบวนการถล่มอีกครั้งหนึ่ง ทำให้ความนำไฟฟ้าของแก๊สในระบบสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดตกลงมากขณะที่กระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นและเปล่งประกายจ้าของการอาร์ค (Arc Discharge) ภาพที่ 2-8

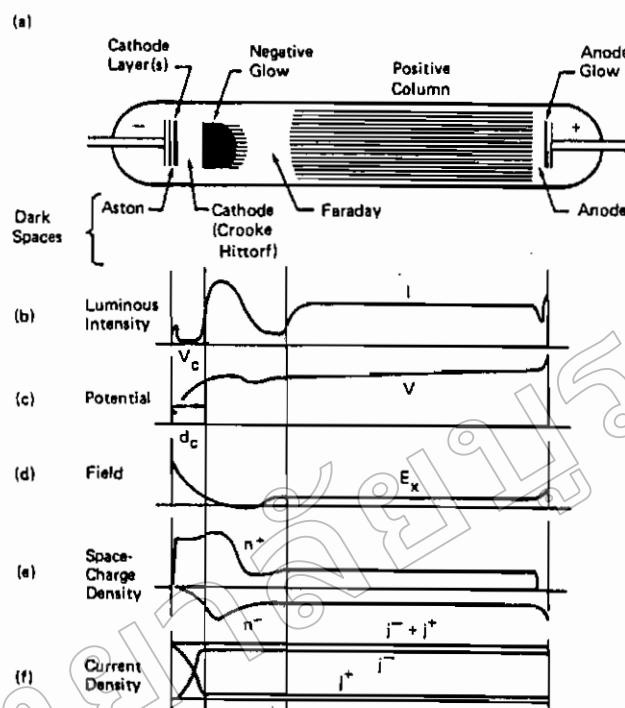


ภาพที่ 2-8 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดของกระบวนการเกิด ดีซี โกลว์ดีสชาร์จ ในหลอดสุญญากาศบรรจุแก๊สนีออน (Vossen & Kerns, 1978)

ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ละลายในกระบวนการ โกลว์ดีสชาร์จจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปกับระยะทาง d ระหว่างอิเล็กโทรดและระยะปลอดการชนระหว่างอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และ โมเลกุลของแก๊ส (ระยะปลอดการชนของอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะแปรผกผันกับความดัน และมีค่ามากกว่าระยะปลอดการชนของการชนกันเองระหว่างโมเลกุลแก๊ส) ปกติอิเล็กตรอนทุติยภูมิแต่ละตัวมีความสามารถในการผลิตไอออนบวกได้ระหว่าง 10 ถึง 20 ตัว เพื่อให้เกิดกระบวนการถล่มในช่วงของนอร์มอล โกลว์ ถ้าความดันต่ำเกินไป (ระยะปลอดการชนยาวขึ้น) หรือระยะทาง d มีค่าน้อยเกินไป อิเล็กตรอนทุติยภูมิจะไม่สามารถผลิตไอออนได้มากพอก่อนการชนกับอะตอม ถ้าความดันสูงเกินไป (ระยะปลอดการชนสั้นลง) หรือระยะ d มากเกินไป อิเล็กตรอนทุติยภูมิไม่สามารถเพิ่มพลังงานให้กับตัวเองในสนามไฟฟ้าได้มากพอสำหรับการไอออไนซ์ เมื่อเกิดการชนพลังงานจะถูกถ่ายทอดให้โมเลกุลแก๊สในรูปการกระตุ้น (Excite) ขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงขึ้นทำให้ไม่สามารถผลิตไอออนบวกได้มากเพียงพอเช่นกัน ดังนั้นทั้งสองกรณีจะต้องใช้แรงดันทางไฟฟ้าที่ละลายค่อนข้างสูง โดยมีจุดหนึ่งระหว่างนี้ที่ใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ละลายต่ำสุดตามกฎของปาสเชน (Paschen's law) ซึ่งแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ละลายและผลคูณระหว่างความดันแก๊ส (P) และระยะระหว่างอิเล็กโทรด (d) (ภาพที่ 2-9)



ภาพที่ 2-9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ละลายและผลคูณระหว่างความดัน (P) และระยะระหว่างอิเล็กโทรด (d) (Bunshah, 1994)



ภาพที่ 2-10 โกลว์ดิสชาร์จของหลอดนีออนยาว 50 cm ที่ความดัน 1.33 mbar (Chapman, 1980)

ในระบบสปัตเตอริงทั่วไปสภาวะของการเกิด โกลว์ดิสชาร์จจะกระทำในช่วงที่ผลคูณของความดันกับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ($P \times d$) ซึ่งมีค่าต่ำกว่าจุดต่ำสุดของกราฟมาก (เนื่องจากการเคลือบฟิล์มที่ความดันต่ำทำให้ฟิล์มที่ได้มีคุณภาพดี การแทรกตัวของแก๊สในเนื้อฟิล์มน้อยและลดปริมาณสารปฏิกิริยาในฟิล์ม) จึงต้องการแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นค่อนข้างสูง บางครั้งจึงมีความจำเป็นต้องใช้การเพิ่มความดันชั่วขณะเพื่อให้เริ่มการดิสชาร์จได้ที่แรงดันไฟฟ้าต่ำ

ส่วนต่าง ๆ ของกระบวนการโกลว์ดิสชาร์จ แสดงได้ดังภาพที่ 2-10 แต่ละส่วนอธิบายได้ดังนี้ ช่วงแรกคือช่วงมืดแอสตัน (Aston Dark Space) เป็นบริเวณที่อิเล็กตรอนถูกปล่อยจากคาโทดด้วยพลังงานต่ำประมาณ 1 eV ซึ่งไม่สามารถไอออไนซ์โมเลกุลแก๊สได้ ทำให้เกิดเป็นช่วงมืด ตัดจากผิวคาโทดบริเวณที่มีการเปล่งแสงออกมาด้วยความเข้มสูงมากเรียกว่า คาโทดโกลว์ (Cathode Glow) เป็นบริเวณที่ไอออนของแก๊สจากการดิสชาร์จ และไอออนของอะตอมสารเคลือบซึ่งถูกผลิตขึ้นบริเวณคาโทดมีการรวมตัวเป็นกลางกับอิเล็กตรอนใกล้ผิวคาโทดด้วยกระบวนการต่าง ๆ ทำให้เกิดแสงซึ่งเป็นการเฉพาะของสารที่คาโทดและของแก๊สที่ใช้ เช่นถ้าคาโทดเป็นทองแดงจะมีสีเขียว ทองคำมีสีส้มแดง แก๊สอาร์กอนมีสีน้ำเงินฟ้า และแก๊สไนโตรเจนมีสีม่วง เป็นต้น

ถัดจากคาโทด โกลว์เรียกว่าช่วงมืดครุคหรือช่วงมืดคาโทด (Crook or Cathode Dark Space) พลังงานของอิเล็กตรอนมีค่าสูงกว่าพลังงานในการไอออไนซ์โมเลกุลของแก๊สเมื่อถูกเร่งผ่านสนามไฟฟ้าในระยะปลอดการชนออกมา ทำให้บริเวณปลอดการชนนั้นไม่มีกระบวนการกระตุ้นหรือไอออไนซ์เกิดขึ้น การปลดปล่อยแสงจึงไม่เกิดในช่วงนี้และกลายเป็นบริเวณมืด ถัดจากระยะปลอดการชนออกไปอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะสูญเสียพลังงานส่วนใหญ่โดยการไอออไนซ์โมเลกุลของแก๊ส ไอออนบวกที่เกิดขึ้นเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าอิเล็กตรอนมาก ทำให้ระยะปลอดการชนของอิเล็กตรอนมีการสะสมของไอออนบวกอยู่มาก (Positive Space Charge) ศักย์ไฟฟ้าเกือบทั้งหมดตกคร่อมบริเวณคาโทดคาร์คสเปซนี้ ทำให้สนามไฟฟ้าบริเวณนี้สูงขึ้นมากและมากเกินพอในการเร่งอิเล็กตรอนชนและไอออไนซ์โมเลกุลของแก๊สในเวลาถัดมาจึงทำให้ภายหลังการเกิดนอร์มอล โกลว์ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขั้วอิเล็กโตรดมีค่าลดลงตามกราฟ ดังภาพที่ 2-8 ส่วนอิเล็กตรอนเมื่อเลยจากบริเวณที่ผลิตไอออนของคาร์คสเปซแล้วจะมีพลังงานลดต่ำลงมาก ดังนั้นพลังงานที่เหลือจึงเพียงใช้ในการกระตุ้นโมเลกุลของแก๊สและเกิดการเรืองแสงขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนจะเป็นอนุภาคที่เคลื่อนที่ได้เร็วแต่พลังงานที่เหลือน้อยมารวมทั้งประจุบวกและประจุสะสมของไอออนทางด้านขั้วมือในบริเวณคาร์คสเปซทำให้อิเล็กตรอนใช้เวลาในการเคลื่อนที่ผ่านช่วงเรืองแสงนี้นานขึ้นและเกิดการสะสมประจุลบบริเวณนี้จึงเรียกว่า เนกาทีฟ โกลว์ (Negative Glow)

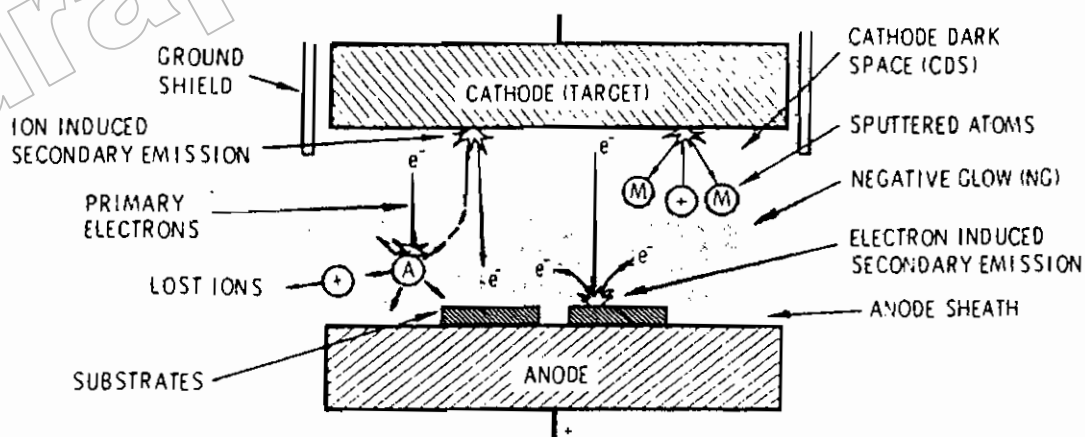
จากนั้นอิเล็กตรอนจะมีพลังงานลดลงจนไม่สามารถกระตุ้นโมเลกุลแก๊สให้เปลี่ยนไปอยู่ในระดับพลังงานสูงได้ ทำให้เกิดบริเวณมืดอีกช่วงหนึ่งเรียกว่า ช่วงมืดฟาราเดย์ (Faraday Dark Space) ถัดจากช่วงนี้กระบวนการที่เกิดขึ้นคล้ายกับการดิสรจาร์จของทาวน์เซนดซึ่งมีปริมาณอิเล็กตรอนค่อนข้างคงที่ถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าค่าต่ำ ๆ ทำให้อิเล็กตรอนถูกเร่งเข้าสู่แอนอด และมีพลังงานสูงพอสำหรับการกระตุ้นโมเลกุลของแก๊สหรือไอออไนซ์และเกิดการเรืองแสงขึ้นที่บริเวณนี้อีกครั้งหนึ่ง อิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่เร็วจะถูกกวาดเข้าสู่แอนอดอย่างรวดเร็วทำให้พลาสมาบริเวณนี้มีประจุบวกสูงกว่าจึงเรียกว่า ลำเรืองแสงศักย์ไฟฟ้าบวก (Positive Glow Column)

เนื่องจากการรักษาสภาวะ โกลว์ดิสรจาร์จขึ้นกับปริมาณของอิเล็กตรอนที่ถูกผลิตขึ้น บริเวณคาโทดจากการชนของไอออนที่ถูกผลิตบริเวณเนกาทีฟ โกลว์ จึงพบว่าการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งแอนอดเพียงเล็กน้อยจะไม่มีผลต่อกระบวนการ โกลว์ดิสรจาร์จ เมื่อเลื่อนแอนอดเข้าหาคาโทด จนพ้นช่วงมืดฟาราเดย์ เข้าสู่เนกาทีฟ โกลว์จนถึงช่วงคาโทดคาร์คสเปซ ทำให้ปริมาณไอออนที่ถูกผลิตจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิมีปริมาณน้อยลง การรักษาสภาพ โกลว์ดิสรจาร์จไว้จำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นซึ่งจะส่งผลถึงปริมาณไอออนที่ถูกผลิตสูงขึ้นด้วย การ โกลว์ในลักษณะนี้จะเรียกว่า ออปสตรัค โกลว์ (Obstructed Glow) และเมื่อเลื่อนแอนอดเข้าใกล้คาโทดต่อมา

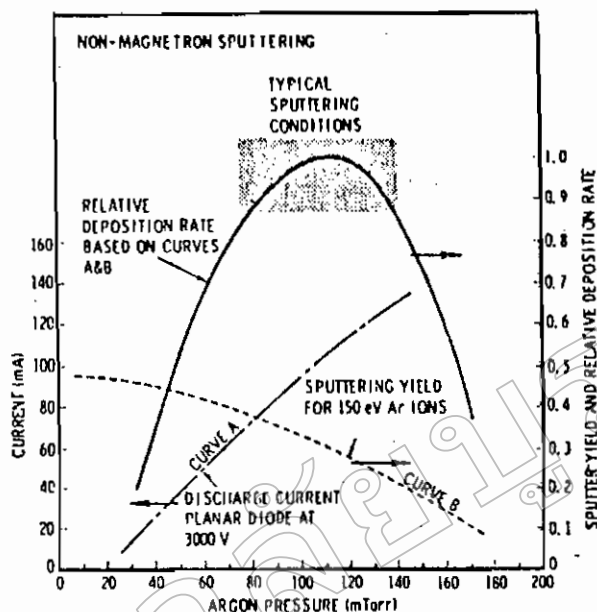
จนพื้นขอบของ คาโทด คาร์คสเปซ ซึ่งมีระยะสั้นกว่าระยะปลดการชนของอิเล็กตรอน จะไม่มีการผลิตไอออนเกิดขึ้นและกระบวนการดิสชาร์จไว้ได้ และถ้าหากมีสิ่งสกปรกบริเวณคาโทด การอาร์คอาจเกิดขึ้นได้โดยไม่เกิดการ โกลว์ดิสชาร์จก็ได้

ระบบเคลือบแบบ ดีซี สปีดเตอริง

ภาพที่ 2-11 แสดงระบบเคลือบแบบ ดีซี สปีดเตอริง อย่างง่ายที่สุด (พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ และธนัสดา รัตน์, 2547; Bunshah, 1982; Smith, 1995) ซึ่งประกอบด้วยคาโทด คือ แผ่นเป้าสารเคลือบและอานอด คือ ที่วางวัสดุรองรับหรือชิ้นงานที่ต้องการเคลือบ ปกติระยะระหว่างคาโทดและวัสดุรองรับจะอยู่ระหว่าง 4 - 10 cm เพื่อป้องกันการสูญเสียอะตอมสารเคลือบที่ผนังของภาชนะสุญญากาศ โดยทั่วไประยะคาร์คสเปซ อยู่ระหว่าง 1 - 4 cm โดยอานอดจะอยู่บริเวณเนกาทีฟโกลว์ ส่วนอุปกรณ์ทำงานจะอยู่ในช่วงแอนนอร์มอล โกลว์ดิสชาร์จ แก๊สที่ใช้เป็นแก๊สเฉื่อยซึ่งให้ขั้วสูงและไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคลือบ (ปกติใช้แก๊สอาร์กอน) ขณะเกิด โกลว์ดิสชาร์จที่ความดันค่าหนึ่ง กระบวนการ ไอออนในเซชั่นจะรักษาสภาพโกลว์ดิสชาร์จไว้ตราบที่ระยะคาร์คสเปซ ไม่มากกว่าระยะระหว่างคาโทดและอานอด เมื่อความดันลดลงหรือแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดสูงขึ้น ระยะปลดการชนของอิเล็กตรอนจะสูงขึ้น ทำให้ระยะคาร์คสเปซขยายตัวออกและแหล่งผลิตไอออนในระบบมีปริมาณน้อยกระแสลดลงและอะตอมที่ถูกสปีดเตอริงมีปริมาณลดลงตามปริมาณของไอออนและกระแสไฟฟ้าในระบบ ที่ความดันต่ำกว่า 10^{-2} mbar ระยะคาร์คสเปซจะยาวกว่าระยะระหว่างอิเล็กโตรด และกระแสไฟฟ้าลดลงสู่ศูนย์ ทำให้กระบวนการผลิตไอออนสิ้นสุดลงและไม่มีการหลุดออกจากเป้าสารเคลือบเนื่องจากการสปีดเตอริงอีก



ภาพที่ 2-11 ระบบเคลือบแบบ ดีซี สปีดเตอริง (Bunshah, 1994)



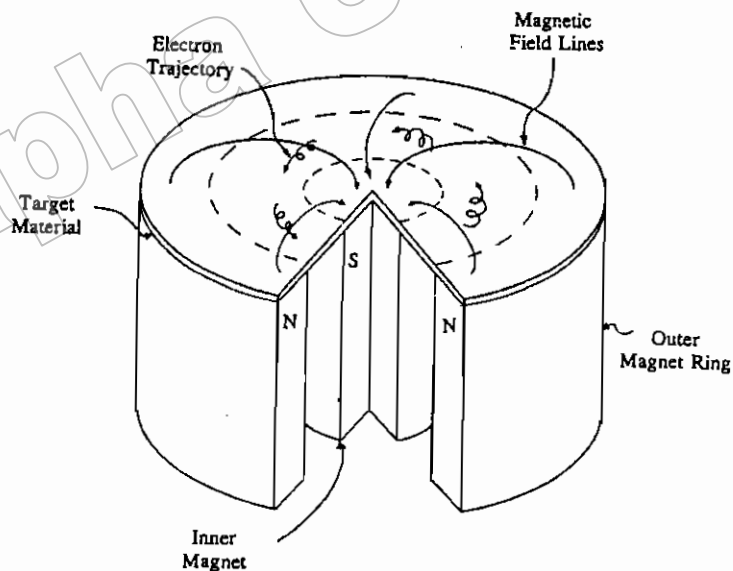
ภาพที่ 2-12 ผลของความดันในระบบที่มีผลต่ออัตราเคลือบ ค่าyield และกระแสไฟฟ้าในระบบสปัตเตอร์ของนิเกิลที่ใช้แรงดันไฟฟ้า 3,000 V ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่วางห่างกัน 4.5 cm (Vossen & Kerns, 1978)

ขณะที่ความดันสูงขึ้นระยะคาร์คัสเปจจะหดสั้นลงบริเวณการผลิตไอออนมีปริมาณสูงขึ้นกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรเพิ่มขึ้นและกระบวนการสปัตเตอร์จึงเกิดขึ้นในอัตราสูงตามความดัน ดังภาพที่ 2-12 เส้นกราฟ A ขณะที่ความดันภายในระบบสูงขึ้นระยะปลดการชนระหว่างโมเลกุลของแก๊สมีค่าลดลง อะตอมสารเคลือบที่หลุดออกจากเป้าจะส่งผ่านเคลือบบนวัสดุรองรับได้ยากจากการชนกับ โมเลกุลของแก๊สและสะท้อนกลับสู่เป้าสารเคลือบหรือสูญเสียสู่ผนังภาชนะสุญญากาศทำให้ค่าของyield จากการสปัตเตอร์มีค่าลดลง แต่เมื่อความดันสูงขึ้น ดังภาพที่ 2-12 เส้นกราฟ B ผลรวมระหว่างyield และกระแสไอออนจะทำให้อัตราการเคลือบมีค่าสูงสุดที่ความดันค่าหนึ่งทั้งนี้พบว่าสปัตเตอร์นิเกิลเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า 3,000 V ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่วางห่างกัน 4.5 cm ในแก๊สอาร์กอน การเคลือบจะหยุดที่ความดันมีค่าต่ำกว่า 2.6×10^{-4} mbar และที่ความดันสูงกว่า 1.6×10^{-5} mbar โดยอัตราการเคลือบจะมีค่าสูงสุดและลดลงเมื่อความดันสูงเกินค่านี้ ดังนั้นบริเวณที่เหมาะสมกับกระบวนการสปัตเตอร์คือบริเวณที่ให้อัตราการเคลือบสูงและประสิทธิภาพดีที่สุด จากภาพที่ 2-10 พบว่าความดันที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบคือ 1.0×10^{-5} mbar ความหนาแน่นกระแสประมาณ 1.0 mA/cm^2 ด้วยอัตราการเคลือบ $0.036 \text{ } \mu\text{m/min}$ ซึ่งเป็นอัตราการเคลือบที่ค่อนข้างต่ำในขณะที่ใช้แรงดันไฟฟ้าค่อนข้างสูง (พิเศษฐ ลิมสุวรรณ และธนัสถา รัตนะ, 2547)

ระบบเคลือบแบบ ดีซี แมกนีตรอน สปีดเตอริง

อัตราการเกิดสปีดเตอริงนั้นจะขึ้นกับผลคูณระหว่างอัตราเร็วและปริมาณไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบ ดังนั้นการเพิ่มอัตราการสปีดเตอริงนั้นนอกจากจะทำได้โดยการเพิ่มอัตราเร็วแล้วยังทำได้โดยการเพิ่มปริมาณไอออนที่วิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ ซึ่งในระบบ ดีซี สปีดเตอริง ปกตินั้น ทำได้เพียงการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด หรือเพิ่มความดัน ซึ่งจะมีขีดจำกัดสูงสุดที่ความหนาแน่นกระแสประมาณ 1 mA/cm^2 และความดันประมาณ $1.33 \times 10^{-5} \text{ mbar}$ นอกจากนี้ยังพบว่าในระบบ ดีซี สปีดเตอริง ทั่วไปอะตอมของแก๊สที่จะเกิดการไอออไนซ์มีค่าน้อยกว่า 1% นอกจากนี้ยังมีข้อเสียเมื่อความดันสูงขึ้นจะทำให้ปริมาณแก๊สที่แทรกตัวในฟิล์มบางที่ได้มีค่าสูงด้วย (พิเชษฐ ลีสุวรรณ และธนัสดา รัตนะ, 2547)

ต่อมาได้มีการพัฒนาระบบใหม่เรียกว่า ระบบดีซี แมกนีตรอน สปีดเตอริง (พิเชษฐ ลีสุวรรณ และธนัสดา รัตนะ, 2547; Bunshan, 1994; Smith, 1995) ซึ่งเป็นการใช้สนามแม่เหล็กช่วย โดยจ่ายสนามแม่เหล็กให้มีทิศทางกับผิวหน้าเป้าสารเคลือบและมีทิศตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า ซึ่งจะช่วยให้ระยะทางเดินของอิเล็กตรอนให้ยาวขึ้น โดยอำนาจของสนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นทางโค้ง (ภาพที่ 2-13) ทำให้การไอออไนซ์เนื่องจากการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมแก๊สเฉื่อยมีค่าสูงขึ้นซึ่งจะทำให้อัตราการสปีดเตอริงสูงขึ้นด้วย



ภาพที่ 2-13 การเคลื่อนที่ของอนุภาคอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก (Rickerby & Matthews, 1991)

ทั้งนี้จากการศึกษาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก พบว่าถ้าอิเล็กตรอนมีทิศทางการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก อิทธิพลของสนามแม่เหล็กจะทำให้อนุภาคประจุนั้นเคลื่อนที่ในแนววงกลม (ภาพที่ 2-14 (a)) ด้วยรัศมี

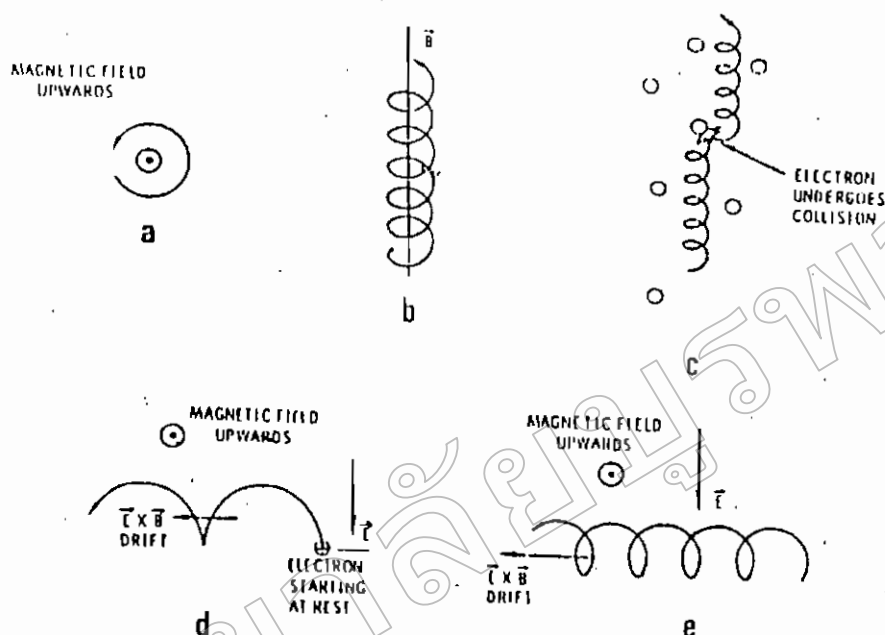
$$r = \frac{3.37\sqrt{W}}{B} \quad (2-2)$$

เมื่อ W คือพลังงานของอิเล็กตรอนในหน่วย eV
 B คือความเข้มสนามแม่เหล็กในหน่วย gauss หมุนด้วยความถี่ไซโคลตรอน
 $\nu = 2.8 \times 10^6$ Hz

ถ้าพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กมีค่า 10 eV และสนามแม่เหล็กมีค่าความเข้ม 100 gauss รัศมีการหมุนมีค่าเท่ากับ 0.1 cm ด้วยความถี่การหมุนเท่ากับ 2.8×10^6 Hz ภาพที่ 2-14 (b) แสดงอิเล็กตรอนมีความเร็วส่วนหนึ่งในแนวขนานกับสนามแม่เหล็ก อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่หมุนควงรอบแนวสนามแม่เหล็กด้วยจำนวนเส้นแรงคงที่ค่าหนึ่งระหว่างนี้ ถ้าอิเล็กตรอนชนกับอะตอมแก๊ส ภาพที่ 2-14 (c) แนวการหมุนควงรอบสนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนไป ถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ภายในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าซึ่งมีทิศที่ตั้งฉากกัน อำนาจของสนามทั้งสองนอกจากจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในแนวโค้งแล้วยังสามารถทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเรียกว่าการเคลื่อนที่แบบลอยเลื่อน (Drift motion) มีค่าเท่ากับ

$$V_E = \frac{10^8 E}{B} \quad (2-3)$$

เมื่อ E คือสนามไฟฟ้าหน่วยเป็น V/cm
 B คือความเข้มสนามแม่เหล็กในหน่วย gauss

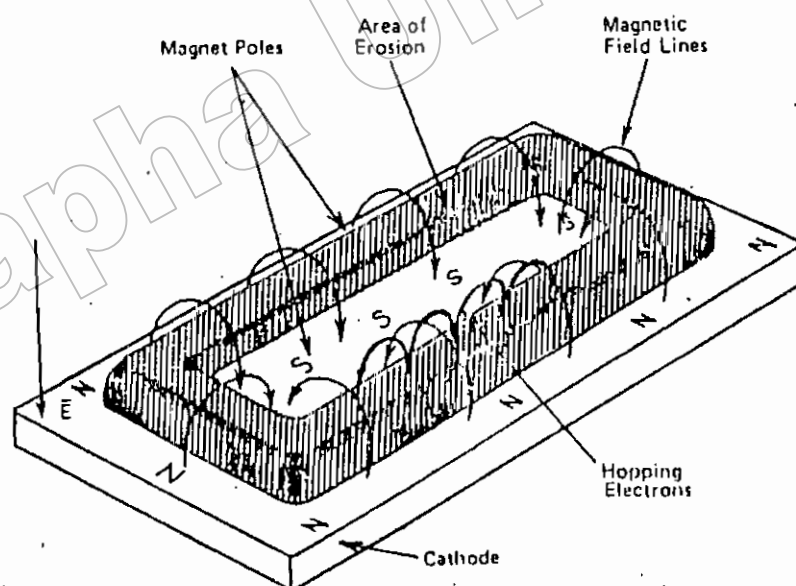


ภาพที่ 2-14 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามต่าง ๆ โดยที่ a, b, c เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กอย่างเดียว ส่วน d และ e เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าร่วมกัน ในลักษณะต่าง ๆ (Bunshah, 1994)

กรณีสนามไฟฟ้าบริเวณคาร์คสเปซมีค่าประมาณ $1,000 \text{ V/cm}$ และสนามแม่เหล็กมีค่าประมาณ 100 gauss จะให้ค่าความเร็วลอยเลื่อน (Drift Velocity) เท่ากับ 107 m/s ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูงกรณีพลังงานเริ่มต้นของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้า การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะเป็นรูป Cycloid ดังภาพที่ 2-14 (d) ถ้าอิเล็กตรอนมีพลังงานเริ่มต้นสูงกว่าพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้า การเคลื่อนที่แบบลอยเลื่อน จะอยู่ในแนววงกลมซ้อนกันดังแสดงในภาพที่ 2-14 (e) พฤติกรรมที่ปรากฏต่ออิเล็กตรอนนี้จะเด่นชัดมาก ถึงแม้จะใช้สนามแม่เหล็กมีค่าน้อย ๆ ระหว่าง $50 - 500 \text{ gauss}$ แต่จะมีผลในการเบี่ยงเบนแนวทางการเดินของไอออน (ซึ่งมีมวลสูงกว่าอิเล็กตรอนมาก) อย่างไม่เด่นชัด

ระบบสปัตเตอร์ริงที่ใช้สนามแม่เหล็กช่วยเพิ่มปริมาณไอออนนั้น ถ้าสนามแม่เหล็กมีทิศทางขนานกับสนามไฟฟ้าจะเรียกว่า สนามตามยาว (Longitudinal Field) จะทำให้ประสิทธิภาพการเพิ่มไอออนไม่สูงนักแต่ไม่ทำให้แนวการเกิดโกลด์ดิสชาร์จเปลี่ยนแปลงไปและยังสามารถรักษาความสม่ำเสมอของฟิล์มบางไว้ได้ดี กรณีของสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าเรียกว่า สนามตามขวาง (Transverse Field) โดยกระบวนการเพิ่มปริมาณไอออนเกิดขึ้นดังนี้ หลังจากที

ไอออนบวกชนกับเป้าสารเคลือบและเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองออกมา อิเล็กตรอนชุดที่สองจะเคลื่อนที่ในลักษณะเดียวกับภาพที่ 2-14 (d) ทำให้อิเล็กตรอนถูกกักอยู่ในบริเวณสนามแม่เหล็กใกล้คาโทด และเคลื่อนที่แบบลอยเลื่อน ตามแนวผิวหน้าของคาโทด (ภาพที่ 2-15) ทำให้อิเล็กตรอนมีโอกาสชนกับ โมเลกุลแก๊สบริเวณผิวหน้าเป้าสารเคลือบมากขึ้นจนเพิ่มปริมาณไอออนสูงมากใกล้ผิวเป้าสารเคลือบ อิเล็กตรอนตัวใดที่ไม่ชนโมเลกุลของแก๊สจะเดินทางเป็นวงโค้งเข้าชนเป้าสารเคลือบและผลิตอิเล็กตรอนชุดที่สองมากขึ้นเป็นผลทำให้ไอออนถูกผลิตในปริมาณสูงมากและเกิดใกล้ผิวคาโทด ทำให้เกิดสเปซชาร์จจากไอออนบวกสูงที่ผิวคาโทด ซึ่งอาจสั้นกว่าระยะปลดการชน ใน ดีซี สปีดเตอริงที่ความดันใช้งานมาก แรงเคลื่อนไฟฟ้าเกือบทั้งหมดจะตกคร่อมบริเวณนี้และมีค่าสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณคาร์คสเปซใน ดีซี สปีดเตอริง ขณะไม่มีสนามแม่เหล็กมากทำให้ความต้องการแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดของระบบแมกนีตรอนสปีดเตอริง ลดลงทั่วไปมีค่าประมาณ 300 - 800 V ถ้าใช้สนามแม่เหล็กกับแมกนีตรอนทรงกระบอกจะเรียกว่า แมกนีตรอนสปีดเตอริงทรงกระบอก (Cylindrical Magnetron Sputtering) และถ้าใช้สนามแม่เหล็กกับระบบดีซี สปีดเตอริงที่ใช้เป้าแบบแผ่นราบจะเรียกว่า พลาสมาแมกนีตรอนสปีดเตอริง (Planar Magnetron Sputtering)



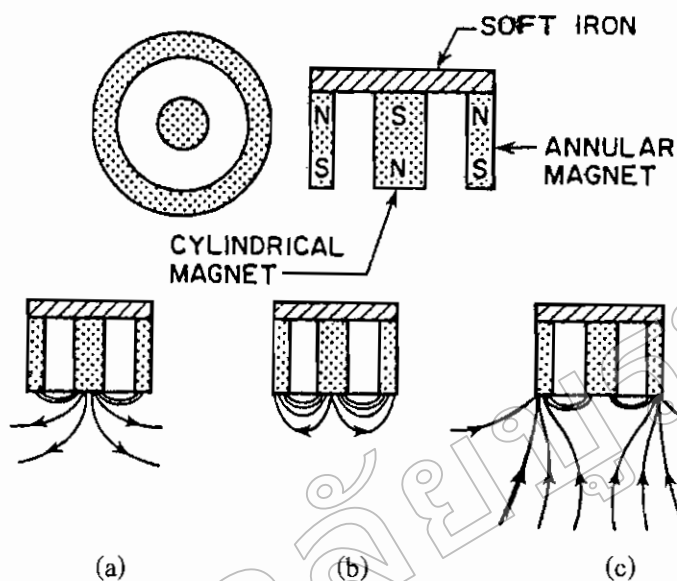
ภาพที่ 2-15 การจัดสนามแม่เหล็กและแนวการกักคร่อนของเป้าสารเคลือบในระบบพลาสมาแมกนีตรอน สปีดเตอริง (Chapman, 1980)

ประสิทธิภาพการเพิ่มไอออนที่สูงมากในระบบแมกนีตรอนและพลาสมาที่เกิดขึ้นจะเข้ามาบริเวณเป้าสารเคลือบทำให้อัตราการสปีดเตอร์ของระบบนี้มีค่าสูง ขณะที่ความดันในระบบจะมีค่าต่ำแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าเกือบคงที่ที่ทุกค่าของอัตราการสปีดเตอร์ แมกนีตรอนสปีดเตอร์จึงทรงระบอบอกทั่วไปมีอัตราการสปีดเตอร์สูงกว่า $1.0 \mu\text{m}/\text{min}$ และมีอัตราเคลือบสูงกว่า $0.2 \mu\text{m}/\text{min}$ ความหนาแน่นกระแสที่ผิวคาโทด ประมาณ $20.0 \text{ mA}/\text{cm}^2$ แรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าระหว่าง $300 - 800 \text{ V}$ ที่ความดันประมาณ $5.33 \times 10^{-5} \text{ mbar}$ ประสิทธิภาพการเคลือบสูงชันกว่า 10 เท่าตัว นอกจากนี้ยังสามารถขยายสเกลใช้กับระบบสปีดเตอร์ขนาดใหญ่ได้ง่ายเมื่อออกแบบใช้งานร่วมกับไดร็อคสปีดเตอร์ ระบบสามารถเคลือบได้ที่ความดันต่ำถึง 10^{-5} mbar

ระบบเคลือบแบบ อัมบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอร์

ในการเคลือบฟิล์มพบว่าถ้าระดมยิงไอออนระหว่างการเกิดฟิล์มจะเป็นการเปลี่ยนแปลงฟิล์มหลายอย่างเช่น พฤติกรรมการเกิดนิวเคลียส (Nucleation Behaviour) สัณฐานวิทยา (Morphology) องค์ประกอบ (Composition) ทิศทางการจัดเรียงตัว และสมบัติเชิงกล เป็นต้น ในกรณีแมกนีตรอน สปีดเตอร์ ไอออนที่ใช้ในการระดมยิงวัสดุรองรับจะมาจากประจุไฟฟ้าที่อยู่รอบวัสดุรองรับ ซึ่งทำได้โดยการจ่ายศักย์ลบประมาณ $1 - 500 \text{ V}$ ให้กับวัสดุรองรับ อย่างไรก็ตาม ความหนาแน่นกระแสที่ฟิล์มหรือผิวหน้าของวัสดุรองรับ สำหรับ ระบบดีซี แมกนีตรอน ปกติจะมีค่าต่ำประมาณ $0.05 - 0.10$ ไอออน/อะตอมสารเคลือบ แต่การใช้งานจริงต้องมีค่าสูงกว่านี้ (Rohde & Munz, 1991)

สำหรับการเคลือบแข็ง (Hard coating) ฟิล์มบางที่ต้องการนั้นจะต้องมีช่องว่าง (Voids) ในเนื้อฟิล์มน้อยที่สุด ซึ่งจะทำให้ฟิล์มบางที่ได้นั้นมีความทนต่อการกัดกร่อน (Corrosion) และทนต่อการขัดสี (Wear Resistance) มากยิ่งขึ้น โดยการลดช่องว่างในเนื้อฟิล์มนี้สามารถทำได้โดยการเพิ่มความต่างศักย์ไบแอสให้กับวัสดุรองรับ แต่ก็จะทำให้เกิดความแล่นและความบกพร่อง (Defects) ภายในเกรน (Grain) ของฟิล์มมากขึ้นเมื่อความต่างศักย์ไบแอสเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งจะทำให้คุณภาพของฟิล์มและการยึดติดของฟิล์มกับวัสดุรองรับลดลง ปัญหานี้สามารถแก้ได้โดยเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไอออน (อัตราส่วนของไอออน/อะตอมสารเคลือบ) ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้ระบบเคลือบแบบอัมบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอร์ (Unbalanced Magnetron Sputtering) (Rohde & Munz, 1991; Sproul, 1992)



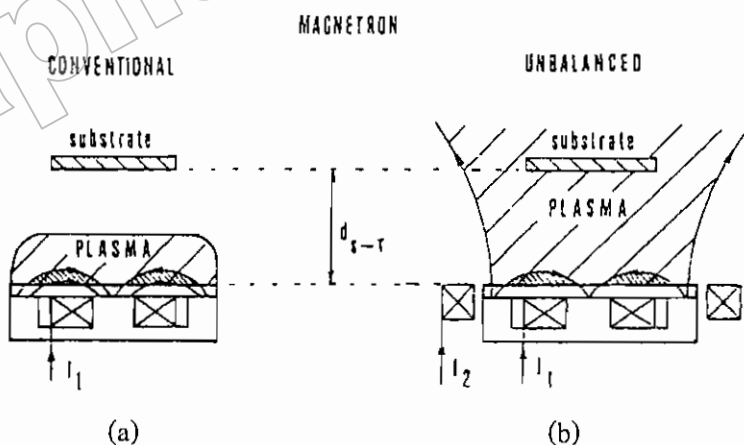
ภาพที่ 2-16 ลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กของระบบอันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง

(Rickerby & Matthews, 1991)

ระบบอันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง ได้รับการคิดค้นและตีพิมพ์เผยแพร่โดย Window และ Savvides ครั้งแรกในปี ค.ศ.1986 โดยทั้งสองพบว่า การติดตั้งแม่เหล็กที่คาโทดของระบบสปีดเตอริงปกติ นั้น ถ้าหากทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กด้านใดด้านหนึ่งมากกว่าหรือน้อยกว่าอีกด้านหนึ่งแล้ว สนามแม่เหล็กที่คาโทดจะมีลักษณะไม่สมมาตร ทำให้ปริมาณไอออนที่วิ่งเข้าชนหรือระดมยิงวัสดุรองรับนั้นมีปริมาณเพิ่มขึ้นมากกว่าปกติ ซึ่งจะมีผลต่อคุณภาพของฟิล์ม โดยตรงการจัดแม่เหล็กของระบบนี้อาจแบ่งเป็น 3 แบบ คือ ความเข้มสนามของแม่เหล็กที่ด้านในมากกว่าด้านนอก (ภาพที่ 2-16 (a)) หรือกลับกัน (ภาพที่ 2-16 (c)) หรือใกล้เคียงกัน (ภาพที่ 2-16 (b))

ถ้าจัดแม่เหล็กตามภาพที่ 2-16 (a) ไอออนที่ระดมยิงวัสดุรองรับจะมีค่าต่ำ (อัตราส่วนไอออน/อะตอมสารเคลือบประมาณ 0.25 : 1) ส่วนการจัดแม่เหล็กตามภาพที่ 2-16 (c) ไอออนที่ระดมยิงวัสดุรองรับจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นทำให้อัตราส่วนไอออน/อะตอมสารเคลือบมีค่าสูงขึ้นคือประมาณ 2 : 1 (เมื่อใช้ความต่างศักย์ไบแอสต่ำ) ปัจจุบันมีนักวิจัยหลายกลุ่มที่นำแนวคิดนี้ไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย ซึ่งมีทั้งที่ใช้แม่เหล็กแบบถาวรและแม่เหล็กไฟฟ้า จากการศึกษาของ Musil และ Kadlec ที่ระบบเคลือบใช้อันบาลานซ์พลาสมาแมกนีตรอนเดี่ยวและขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า 2 ขด เคลือบไททานเนียมไนไตรด์ที่ระยะเป้าสารเคลือบและวัสดุรองรับประมาณ 200.0 mm โดยใช้ความต่างศักย์ไบแอสในช่วง -5 ถึง -100 V พบว่าสามารถทำให้ได้ความหนาแน่นกระแสสูงถึง 6.0 mA/cm² ซึ่งสูงมากพอสำหรับใช้ในงานอุตสาหกรรม (Munz, 1991)

หากพิจารณาเปรียบเทียบระบบสปัตเตอร์ทั้ง 3 ระบบจะพบว่าในกรณีระบบสปัตเตอร์ ปกตินั้นอิเล็กตรอนที่เกิดจากการไอออไนซ์จะวิ่งไปจับที่อานอด โดยไม่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสปัตเตอร์เลย ดังนั้นเพื่อให้ระบบสปัตเตอร์มีประสิทธิภาพมากขึ้นจึงมีแนวคิดที่จะนำอิเล็กตรอนเหล่านี้เข้ามาช่วยในกระบวนการสปัตเตอร์ซึ่งทำได้โดยการใช้สนามแม่เหล็กช่วยจึงเกิดระบบแมกนีตรอน สปัตเตอร์ ซึ่งเป็นที่ใช้สนามแม่เหล็กช่วยทำให้เกิดอิเล็กตรอนบริเวณหน้าคาโทดเพิ่มขึ้นเนื่องจากอิเล็กตรอนเหล่านี้มีส่วนช่วยทำให้กระบวนการสปัตเตอร์คงอยู่อย่างต่อเนื่องจากอำนาจของสนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นทางโค้งทำให้เกิดการไอออไนซ์อะตอมแก๊สเฉื่อยสูงขึ้น นอกจากนี้สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้ายังทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบมีลักษณะเป็นการชนแบบซำๆ ต่อเนื่องกันทำให้เกิดอิเล็กตรอนชุดที่สองออกมาในปริมาณมากขึ้นซึ่งทำให้เกิดการสปัตเตอร์มากตามไปด้วย แต่ก็ยังมีอิเล็กตรอนบางส่วนที่มีพลังงานสูงซึ่งสามารถหลุดออกจากอำนาจของสนามแม่เหล็กนี้ได้ซึ่งจะวิ่งเข้าหาขั้วอานอดโดยทันที สำหรับในระบบอานบาลานซ์ แมกนีตรอน สปัตเตอร์ นั้นอิเล็กตรอนพลังงานสูงที่หลุดออกจากสนามแม่เหล็กจะถูกยึดไว้ด้วยเส้นแรงแม่เหล็กส่วนเกินของระบบแล้วเคลื่อนที่เป็นทางโค้งไปตามเส้นแรงแม่เหล็กเข้าชนกับอะตอมของแก๊สเฉื่อยและเกิดการไอออไนซ์เป็นพลาสมาชุดที่สองบริเวณผิวหน้าของวัสดุรองรับทำให้ความหนาแน่นกระแสที่วัสดุรองรับมีค่าสูงมากกว่าในระบบแมกนีตรอน สปัตเตอร์ ปกติมาก (ประมาณ $5.0 - 10.0 \text{ mA/cm}^2$ ปกติมีค่าน้อยกว่า 1.0 mA/cm^2) โดยพลาสมาที่เกิดขึ้นนี้จะมีส่วนช่วยในการเคลือบฟิล์มที่เรียกว่า Ion-Assisted Deposition ซึ่งจะให้ฟิล์มบางที่ได้นั้นมีคุณภาพหนาแน่นสูงและมีการยึดติดดี (Munz, 1991)



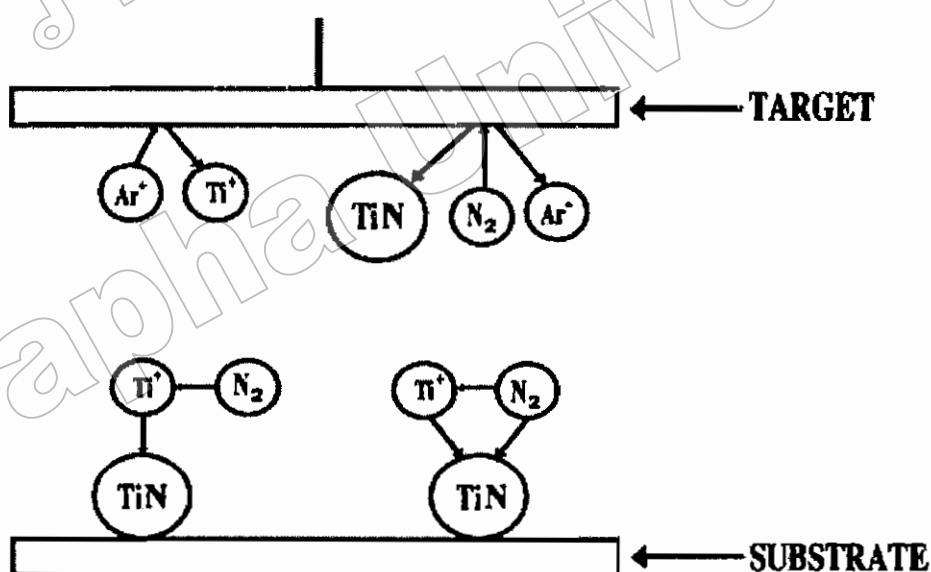
ภาพที่ 2-17 ลักษณะพลาสมาของระบบสปัตเตอร์ (Munz, 1991)

(a) ระบบบาลานซ์แมกนีตรอน สปัตเตอร์

(b) ระบบอานบาลานซ์แมกนีตรอน สปัตเตอร์

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธี รีแอคทีฟ สปีดเตอริง

สำหรับกระบวนการรีแอคทีฟ สปีดเตอริง (Reactive Sputtering) มติ ห่อประทุม (2548) ได้อธิบายไว้ว่า เป็นกระบวนการสปีดเตอริงที่มีการป้อนแก๊สไวปฏิกิริยา (Reactive Gas) เข้าสู่ระบบ เพื่อให้เกิดสารประกอบของฟิล์มตกเคลือบบนชิ้นงานหรือวัสดุรองรับ การสปีดเตอริงที่มีเป้าสารเคลือบเป็นโลหะบริสุทธิ์ โดยการป้อนแก๊สไวปฏิกิริยา จะทำให้เกิดสารประกอบต่าง ๆ ของโลหะได้ เช่น การป้อนแก๊สไนโตรเจนอาจทำให้เกิดโลหะไนไตรด์ ถ้าป้อนแก๊สอะเซทิลีน (C_2H_2) หรือ มีเทน (CH_4) อาจเกิดเป็นสารประกอบของโลหะคาร์ไบด์ เป็นต้น โดยปกติความดันแก๊สไวปฏิกิริยาที่ใช้ค่อนข้างต่ำจนไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาในสภาวะปกติ อย่างไรก็ตามหากตามคาดกันว่า อิเล็กตรอนในพลาสมาที่มีส่วนในการกระตุ้นหรือไอออนไนซ์แก๊สไวปฏิกิริยาให้มีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับโลหะได้สูงกว่าสภาวะปกติ โดยแก๊สไวปฏิกิริยา เช่น แก๊สไนโตรเจน (N_2) อาจรวมตัวกันกับโลหะ เช่น ไททาเนียม (Ti) แล้วเกิดเป็นสารประกอบไททาเนียมไนไตรด์ (TiN) ตามภาพที่ 2-18 ได้เป็น 3 ลักษณะ ดังนี้



ภาพที่ 2-18 การเกิดปฏิกิริยารวมตัวกันเป็นสารประกอบระหว่างแก๊สไวปฏิกิริยากับอะตอมเป้าสารเคลือบในบริเวณต่าง ๆ (มติ ห่อประทุม, 2548)

1. แก๊สไวปฏิกิริยาเช่นแก๊สไนโตรเจนทำปฏิกิริยากับอะตอมไททาเนียมที่ผิวหน้าเป่าของสารเคลือบกลายเป็นสารประกอบไททาเนียมไนไตรด์แล้วถูกสปีดเตอร์ให้หลุดออกแล้วตกเคลือบลงบนแผ่นวัสดุรองรับ ปฏิกิริยาส่วนนี้เกิดขึ้นสูงเมื่อความดันย่อยของแก๊สไวปฏิกิริยาในระบบมีค่าสูง พบว่า ในการเคลือบไททาเนียมไนไตรด์บนฟิล์มเคลือบที่เป่าสารเคลือบ ส่วนที่มีอัตราการสปีดเตอร์ต่ำจะปรากฏฟิล์มของสีทองไททาเนียมบริเวณนั้น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Target Poisoning มีผลทำให้อัตราการเคลือบลดลง

2. แก๊สไวปฏิกิริยาเช่นแก๊สไนโตรเจนรวมตัวกับอะตอมไททาเนียมที่ถูกสปีดเตอร์ในระหว่างทางวิ่งสู่แผ่นวัสดุรองรับแล้วตกเคลือบบนแผ่นวัสดุรองรับ กระบวนการนี้ในทางทฤษฎีถือว่าเกิดได้น้อยมากเนื่องจากสถานะของการทำปฏิกิริยาไม่เหมาะสมตามกฎอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัม แต่เป็นไปได้ที่การรวมตัวของสารประกอบจะเกิดในช่วงนี้

3. แก๊สไวปฏิกิริยาเช่นแก๊สไนโตรเจนรวมตัวกับไททาเนียมบนผิววัสดุรองรับหรือชิ้นงาน การทำรีแอคทีฟ สปีดเตอร์จึง โดยทั่วไปความดันแก๊สไวปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดสารประกอบที่ต้องการมีค่าต่ำกว่าช่วงที่เกิดขบวนการ โกลว์ดีสชาร์จ ในกระบวนการจึงใช้แก๊สไวปฏิกิริยากับแก๊สเฉื่อยทำให้รักษาสภาวะ โกลว์ดีสชาร์จ ไว้ได้ ในเวลาเดียวกันช่วยให้อัตราเคลือบสูงขึ้น ในการทำรีแอคทีฟ สปีดเตอร์ ยังมีสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงคือความดันย่อยของแก๊สไวปฏิกิริยาต้องมีค่าพอเหมาะกับการเกิดฟิล์มสารประกอบที่ต้องการ เช่น การเคลือบสารประกอบ Ferroferric Oxide (Fe_3O_4) ความดันแก๊สออกซิเจนที่ใช้ในรีแอคทีฟ สปีดเตอร์ ถูกจำกัดในช่วงความดันแคบมาก ถ้าความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนมากไปจะเกิดสารประกอบของ Ferric Oxide (Fe_2O_3) ถ้าน้อยเกินไปจะเกิดสารประกอบ Ferrous Oxide (FeO) หรือฟิล์มของเหล็ก (Fe)

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) กรม 2547) อธิบายหลักการของเทคนิคนี้ไว้ดังนี้ การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับการแยกแยะโครงสร้างของสารที่ใช้ในการเคลือบ โดยการวิเคราะห์อาศัยการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนกับมาตรฐาน JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) ของสารนั้น ดังนั้นเทคนิค XRD เป็นเทคนิคสำหรับวัดค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ที่สะท้อนจากผลึก ใช้หลักการของการเลี้ยวเบนของคลื่น โดยพบว่ารังสีเอกซ์เลี้ยวเบนได้เมื่อให้ตกกระทบผลึก ซึ่ง Bragg ได้เสนอแนวคิดที่เราสามารถมองผลึกประกอบด้วยชั้น (Layer) หรือ ระนาบ (Plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมที่ตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้คลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่าง ๆ ดังกล่าวจะมีความเข้มสูง ลำรังสีเอกซ์ 1 และ 2 ตกกระทบทำมุม θ กับระนาบของผลึก A และ B สนามไฟฟ้าของรังสีเอกซ์จะก่อให้เกิดแรงคูลอมป์กระทำบนอิเล็กตรอนที่ P กับ Q ให้สั้นด้วยความถี่เดียวกับรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบ และอิเล็กตรอนนั้นแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นรังสีเอกซ์ออกไปทุกทิศทางแต่ในทิศทาง 1' และ 2' ซึ่งเสมือนรังสีเอกซ์สะท้อนออกจากระนาบของผลึกจะไปแทรกสอดแบบเสริมกัน (In Phase) แม้ว่าแบบจำลองที่กล่าวมาจะไม่ถูกต้องในทางกายภาพ เนื่องจากแท้จริงแล้วระนาบของอะตอมไม่ได้สะท้อนคลื่นแต่วิธีนี้ก็ได้ใช้ได้ในทางเรขาคณิต พิจารณา

$$\delta = n\lambda \quad (2-4)$$

เมื่อ δ คือ ความแตกต่างของระยะที่คลื่นเดินทาง

λ คือ ความยาวคลื่น

n คือ จำนวนเต็มใด ๆ

จากภาพที่ 2-19

$$\delta = SQ + QT = 2SQ \quad (2-5)$$

จากรูปตรีโกณมิติพื้นฐาน

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

โดย PQ คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ d_{hkl}

$$\delta = 2d \sin \theta \quad (2-7)$$

จากสมการ (2-4) เท่ากับ (2-7) จะได้

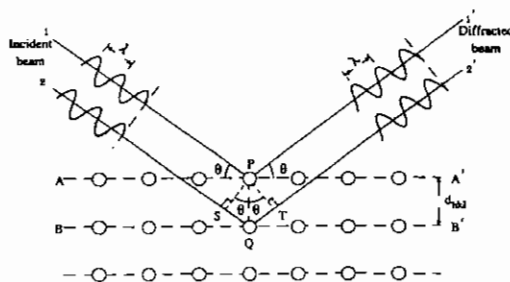
$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (2-8)$$

เรียกสมการที่ (2-8) นี้ว่า สมการการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากผลึก (Bragg's law)

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

และ θ เป็นมุมตกกระทบและมุมสะท้อนเมื่อวัดจากแนวระนาบที่กำลังพิจารณา

ในภาพที่ 2-19 เป็นแบบจำลองสำหรับการพิสูจน์กฎของแบรกก์ อะตอมเรียงตัวเป็นระเบียบ โดยมีระยะห่างระหว่างอะตอมใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ($\sim 10^{-10}$ m) จะทำหน้าที่เป็นเสมือน เกรตติงเลี้ยวเบนแต่จะเป็นเกรตติงเลี้ยวเบนแบบ 3 มิติ



ภาพที่ 2-19 แบบจำลองการเรียงตัวของอะตอม (กมล เขี่ยมพนากิจ, 2547)

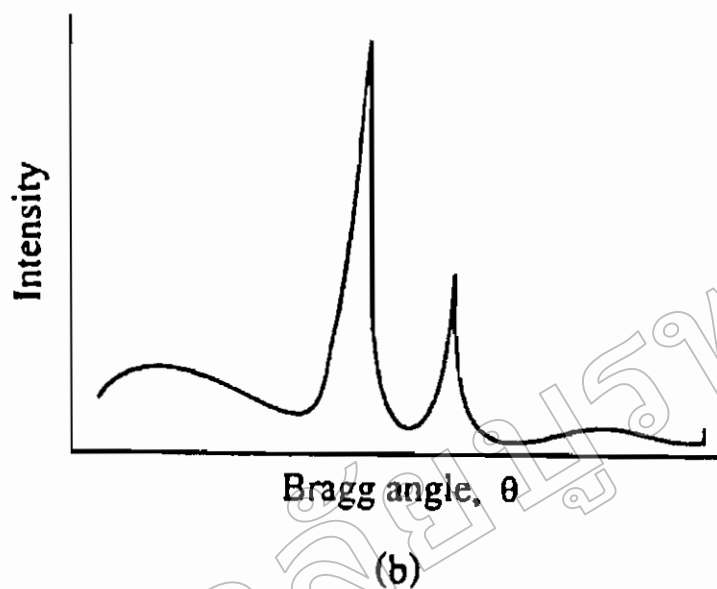
สัญญาณที่ตรวจจับได้จะแสดงออกมาในรูปแบบของการเลี้ยวเบนรังสี (Diffraction Pattern) ความเข้มของสัญญาณขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกันเช่น โครงสร้างของวัสดุ ปริมาตรของวัสดุที่แผ่รังสี (Volume of Irradiated Material) รูปทรงของการหักเห (Diffraction Geometry) และการวางชิ้นงาน (Sample Alignments) เป็นต้น

ตำแหน่งของพีค ที่มีค่ามากที่สุดสามารถบอกถึงขนาดและรูปร่างของหน่วยเซลล์ได้ในขณะที่ความกว้างให้หาค่าขนาด การจัดเรียงตัว (Orientation) และความเครียด (Strain) ภายในเกรนของวัสดุหลายผลึก กรณีของการศึกษาขนาดของผลึกจากรายงานการวิจัยของ Kim, Hahn, Oh, and Kim (2002) ได้ทำการศึกษาขนาดของผลึกไททาเนียมไดออกไซด์ที่อบฟิล์มบางด้วยอุณหภูมิต่างๆ โดยอาศัย Scherrer equation ดังสมการที่ 2-9

$$L = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (2-9)$$

- เมื่อ L คือ ขนาดของผลึกฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์
 k คือ ค่าคงที่เท่ากับ 0.94
 λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ($\text{CuK}\alpha = 1.5406$)
 β คือ ความกว้างครึ่งหนึ่งของพีคที่มีค่าความเข้มสูงสุด
 θ คือ ครึ่งหนึ่งของมุมตรงจุดศูนย์กลางพีค

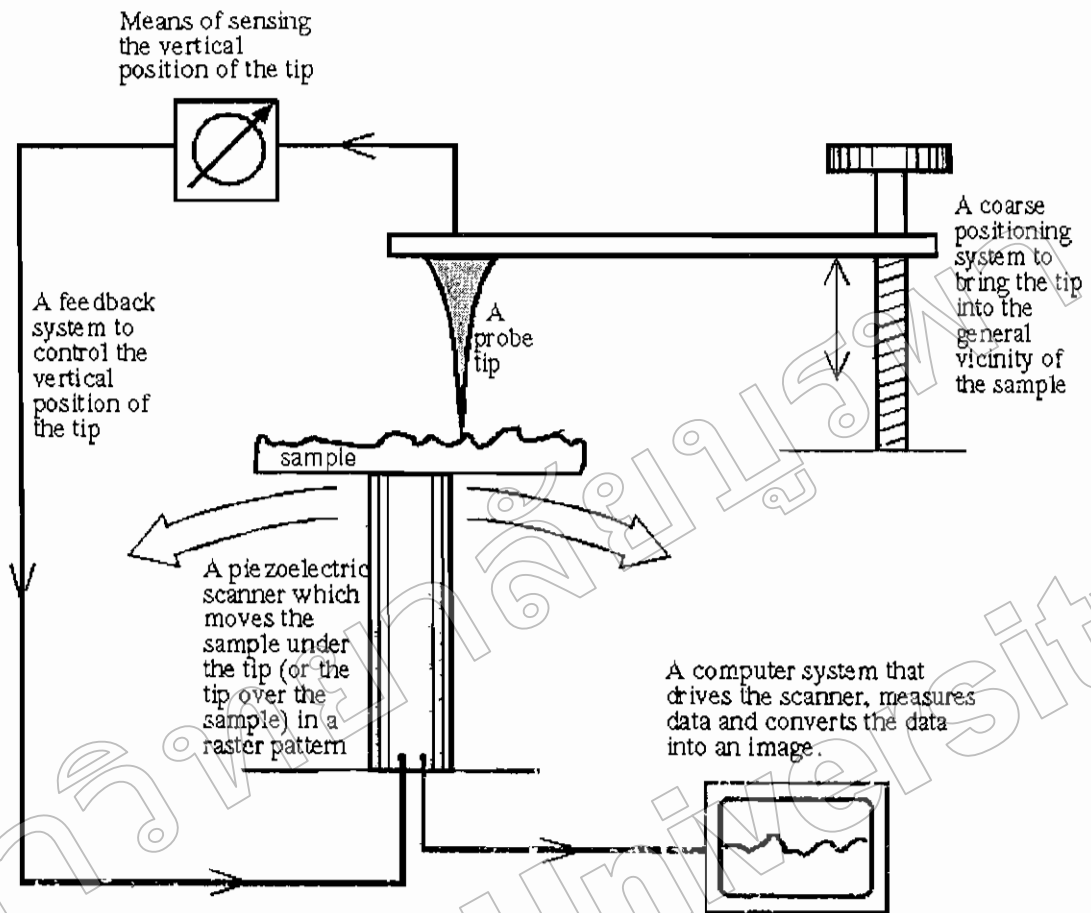
บางครั้งตำแหน่งของรูปแบบการเลี้ยวเบนที่วัดได้อาจจะเลื่อนไปด้วยค่ามุมที่สูงขึ้นเนื่องจากผลของความเค้นคงค้าง (Residual Stress) ในผิวสารเคลือบนั่นเอง ส่วนความเข้มของสัญญาณที่ได้อาจไม่เป็นไปตามค่ามาตรฐาน JCPDS เพราะเกิดการจัดเรียงตัวในทิศทางที่ชอบ (Preferred Orientation) ของอะตอมในฟิล์มนอกจากนี้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ยังสามารถให้ข้อมูลที่บอกถึงส่วนผสมทางเคมีของเฟส (Phase Composition) และค่าพารามิเตอร์ของแลตทิซ (Lattice Parameter)



ภาพที่ 2-20 ความเข้มของพีคที่แสดงถึงระนาบผลึกของวัสดุในตำแหน่งที่มีการสะท้อนรังสี (มคิ ห่อประทุม, 2548)

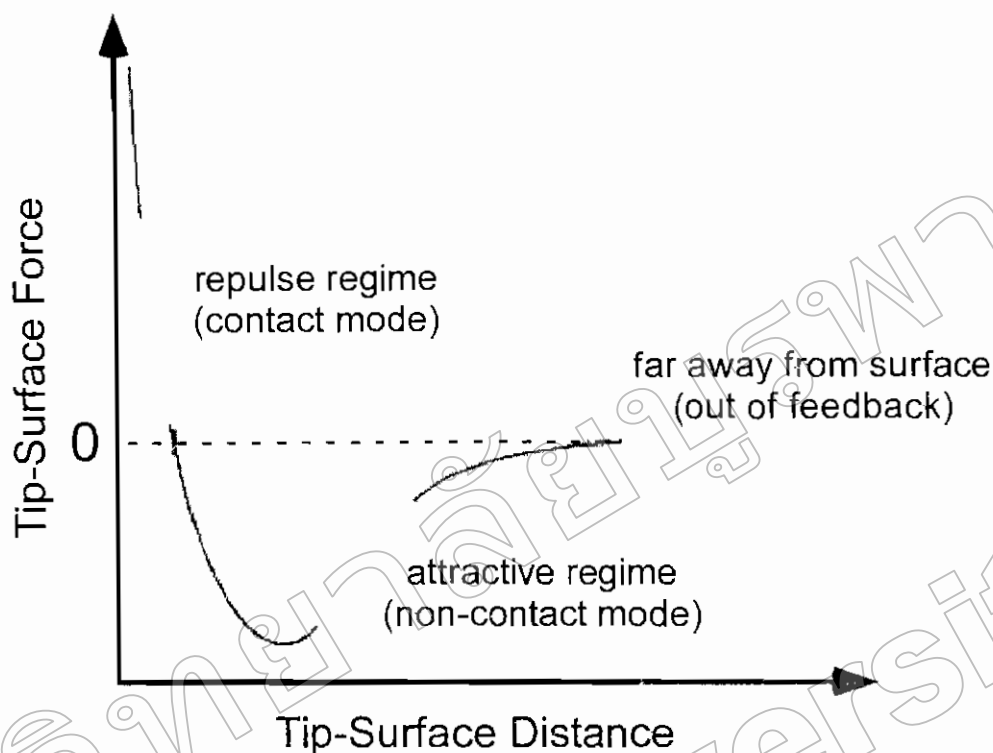
2. การศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยเครื่อง Atomic Force Microscopy (AFM)

ลักษณะเฉพาะสำคัญอีกอย่างหนึ่งของฟิล์มบางคือการศึกษาลักษณะพื้นผิว และความหนา เทคนิคที่นิยมใช้ในการศึกษาความหนาและลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางในระดับนาโน คือ Atomic Force Microscopy (AFM) ซึ่ง จตุพร วุฒิกนกกาญจน์ (2542) ได้อธิบายหลักการการทำงานของเครื่อง AFM ไว้ดังนี้ เทคนิค Atomic Force Microscopy เป็นการสร้างภาพของผิววัสดุจากแรงกระทำระหว่างผิววัสดุกับตัวตรวจวัดที่ทำจากเข็มขนาดเล็ก (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) ปริมาณการโค้งงอนี้สามารถตรวจวัดได้โดยใช้โฟโตดีเทคเตอร์ (Photo Detector) ดังภาพที่ 2-21 ภาพที่ได้จากเทคนิคนี้จะสอดคล้องตามสภาพพื้นผิวในแต่ละบริเวณที่ตรวจสอบ ในเทคนิค AFM นี้ สิ่งที่ทำให้คานามีเข็มเกาะอยู่เกิดการโค้งงอขึ้นก็คือ แรงกระทำระหว่างอะตอม ซึ่งอาจจะเป็นแรงดึงดูดหรือแรงผลักรักก็ได้ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างเข็มปลายแหลมกับพื้นผิวดังแสดงในภาพที่ 2-22



ภาพที่ 2-21 องค์ประกอบหลักของเครื่องมือ Scanning Probe Microscope

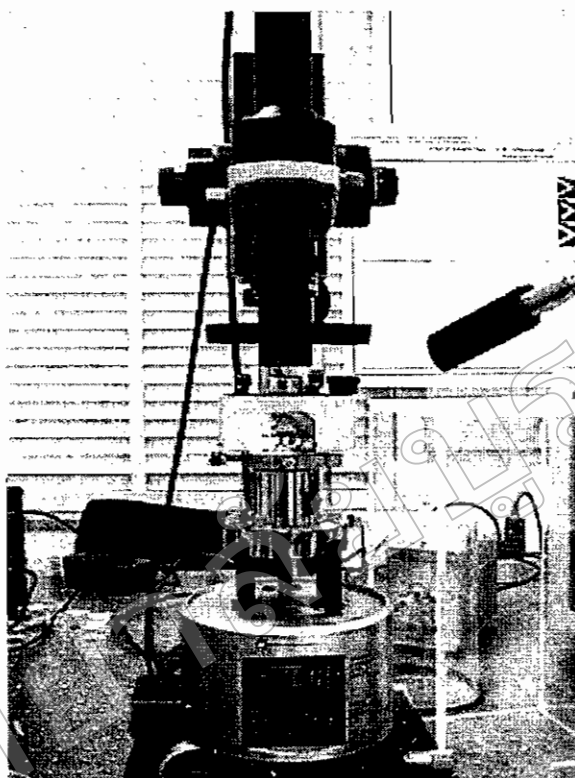
(<http://www2.polito.it/ricerca/micronanotech/Strumentu/SPM.html>)



ภาพที่ 2-22 ลักษณะของแรงกระทำระหว่างอะตอมที่เกิดขึ้นในระยะห่างระหว่างวัตถุต่าง ๆ
(www.science.siu.edu/chemistry/zang/afm.html)

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

ภาพที่ 2-23 แสดงให้เห็นถึงเครื่อง Atomic Force Microscope รุ่น NanoScope IIIa บริเวณตรงกลางเป็นบริเวณที่ใช้วางชิ้นงาน โดยมีเข็มวัดวางอยู่ด้วย ส่วนที่บริเวณด้านบนของเครื่องมือจะมีกล้องจุลทรรศน์วิดีโอ (Video Microscope) ติดตั้งไว้ เพื่อใช้สำหรับดูตำแหน่งของเข็มที่จะทำการวางลงบนบริเวณต่าง ๆ บนผิว ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์วิดีโอนี้จะแสดงทางจอโทรทัศน์ นอกจากนี้ในบริเวณด้านบน จะมีแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์และโฟโตดีเทคเตอร์ที่ใช้วัดการโค้งงอของคานยื่น



ภาพที่ 2-23 เครื่อง AFM แบบ Multimode (http://rclsgi.eng.ohio-state.edu/nlim/page_01.htm)

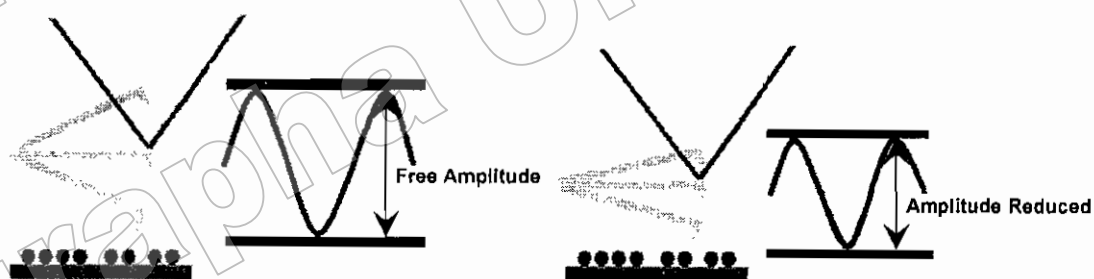
ลักษณะการเก็บข้อมูลด้วยเทคนิค AFM สามารถใช้เก็บข้อมูลได้ 4 ลักษณะ (Mode) ที่สำคัญดังนี้คือ

1. Contact mode เป็นการศึกษาสภาพผิวชิ้นงานโดยการขยับให้เข็มไถล (Slide) ไปบนผิวงานซึ่งจะทำให้มีแรงผลักรู้สึกขึ้น เนื่องจากเข็มกับผิวงานจะอยู่ใกล้กันมาก แรงผลักรู้สึกจะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพผิว ซึ่งจะทำให้มีการโก่งงอ (Deflection) ของคานยื่น (Cantilever) ที่มีเข็มยึดเกาะอยู่ที่ปลาย โดยปริมาณการโก่งงอจะเปลี่ยนแปลงสอดคล้องเป็นไปตามลักษณะของผิวงาน
- อย่างไรก็ตาม เทคนิคแบบ Contact mode นี้มีข้อเสียคือ การลากให้เข็มตรวจวัดเคลื่อนที่ไถลข้ามไปยังบริเวณต่าง ๆ บนผิวงาน อาจจะทำให้พื้นผิววัสดุที่กำลังศึกษาต่างไปจากสภาพเดิมที่แท้จริง หรืออาจเกิดความเสียหายขึ้นแก่ผิวงานได้ ยกตัวอย่างเช่น ภายใต้อากาศปรกติซึ่งมีอากาศและความชื้นในอากาศ อาจจะทำให้หยดน้ำหรือสิ่งสกปรกบนผิวงาน ซึ่งเมื่อเข็มวัดเคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวที่มีชั้นบาง ๆ ของหยดน้ำและสิ่งสกปรกดังกล่าว จะทำให้มีแรงดึงไฟฟ้าสถิตและแรงดึงดูดดึงดูดให้ตัวคานที่มีเข็มยึดอยู่ที่ปลายเคลื่อนที่ลงมาสัมผัสกับชั้นดังกล่าว ทำให้แรงระหว่างเข็มกับผิวงานที่เกิดขึ้นโดยรวมเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ ยังอาจทำให้ผิวงานถูกทำลาย เช่น เกิดการฉีกขาดจากการลากเข็มไปบนผิวงาน

2. Non-contact mode เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวข้างต้น จึงได้มีการพัฒนาเทคนิคแบบ Non-contact mode ขึ้นมา โดยในที่นี้ ตัวเข็มปลายแหลมจะถูกยกขึ้นมาให้มีระยะห่างเหนือผิวงานสูงมากขึ้น คือประมาณ 10 - 100 Å จึงไม่มีปัญหาเรื่องการทำลายโครงสร้างผิวงาน โดยในกรณีนี้ แรงกระทำระหว่างตัวคานที่มีเข็มปลายแหลมยึดเกาะอยู่กับผิวงานจะเป็นลักษณะแรงดึงดูด ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามรูปทรงของสภาพผิวงานเช่นเดียวกัน

วิธีนี้มีข้อจำกัดเกี่ยวกับความละเอียดของภาพที่เกิดขึ้น นั่นคือ แรงดึงดูดประเภทแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals) ที่เกิดขึ้นในกรณีนี้จะเป็นแรงที่อ่อนกว่าเมื่อเทียบกับแรงผลักที่เกิดขึ้นในกรณีของ Contact mode ดังนั้นการตรวจสอบอาจไว (Sensitive) ต่อสิ่งแปลกปลอมที่อยู่บนผิวงาน เช่น หยดน้ำที่เกาะอยู่บนผิว

3. Tapping mode เป็นเทคนิคที่รวมเอาลักษณะของการวัดทั้งในแบบของ Contact mode และ Non-contact mode เข้าด้วยกัน กล่าวคือ ยังคงให้มีการสัมผัสกันระหว่างเข็มกับผิวงานในระบะที่ใกล้กันมาก เหมือนกับกรณีของ Contact mode เพื่อให้ได้ภาพที่ชัดเจน ในขณะเดียวกัน ก็ยังมีการสั่นหรือขยับเข็มปลายแหลมให้เคลื่อนที่ขึ้นลง ไปพร้อม ๆ กับการเคลื่อนที่สแกนไปยังบริเวณต่าง ๆ บนผิวงาน ดังนั้นจึงเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาการลากไถลเข็มปลายแหลม ซึ่งจะทำให้เกิดการทำลายสภาพของผิวงานได้ เหมือนใน Contact mode



ภาพที่ 2-24 ลักษณะการสั่นของคานที่มีเข็มติด

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

ภาพที่ 2-24 แสดงการสั่นของคานในสถานะอิสระหรือคอนเริ่มต้นที่ยังไม่เกิดการสัมผัส และขยับเคลื่อนที่ไปบนผิวงาน จะเห็นได้ว่าแอมพลิจูดจะยังสูงอยู่เมื่อเทียบกับแอมพลิจูดที่เกิดจากการสั่นของคานเมื่อมีการแตะสัมผัส (Tapping) ลงบนผิวงาน เนื่องจากในการสัมผัสกันนั้นจะมีการสูญเสียพลังงานของการสั่น ทำให้แอมพลิจูดของการสั่น (Oscillation Amplitude) ลดลง ซึ่งค่าที่ลดลงนี้จะใช้เป็นตัววัดและบอกถึงลักษณะของสภาพพื้นผิวที่มีความสูงต่ำแตกต่างกันไป ตัวอย่างเช่น เมื่อเข็มตรวจวัดเคลื่อนที่ผ่านบริเวณผิวงานที่มีความนูนสูงขึ้นมา ตัวคานก็จะมีพื้นที่หรือแอมพลิจูดในการสั่นลดลง ในทางตรงข้าม เมื่อเข็มปลายแหลมเคลื่อนที่ผ่านบริเวณผิวงานที่มีการยุบตัวหรือมีความลึกลงไป ตัวคานก็จะมีพื้นที่ในการสั่นเพิ่มขึ้น และมีแอมพลิจูดสูงขึ้น (เข้าใจคือแอมพลิจูดสูงสุดในสภาพที่ยังไม่มีการทำการสแกน) แอมพลิจูดของการสั่นที่เปลี่ยนแปลงไปก็จะถูกวัด โดยแอมพลิจูดดีเทคเตอร์ (Amplitude Detector) แล้วส่งผลเข้าไปยังตัวควบคุม ซึ่งจะทำการวัดสัญญาณพร้อมทั้งปรับระยะระหว่างเข็มกับผิวงาน เพื่อรักษาให้ค่าแอมพลิจูดของการสั่นให้คงที่ต่อไป จนกว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดของการสั่นตามสภาพพื้นผิวในบริเวณถัดไป

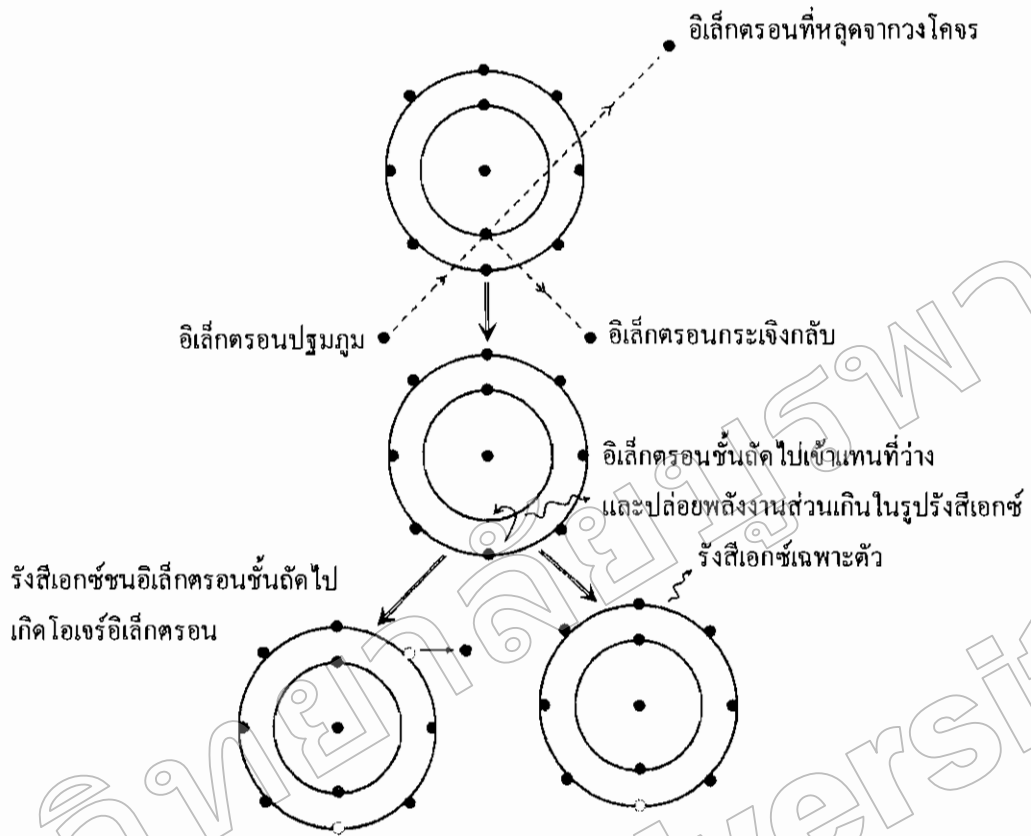
4. Force modulation mode สำหรับพื้นผิวของวัสดุที่มีองค์ประกอบหลายเฟส พบว่าเทคนิค AFM ในวิธีแบบ Force modulation mode จะเป็นที่ยอมรับใช้มาก โดยเทคนิคนี้จะเป็นการวัดและสร้างภาพของพื้นผิวชิ้นงานที่มีความแตกต่างของความแข็งเกร็ง (Stiffness) ในแต่ละเฟสสูง โดยในกรณีนี้ตัวเข็มจะสแกนไปในลักษณะที่มีการสั่นในแนวตั้งฉากกับผิววัสดุด้วยแอมพลิจูดเล็กน้อย แต่จะมีความเร็วในการสั่นที่สูงกว่าการเคลื่อนที่สแกนของเข็ม และเมื่อตัวเข็มถูกนำเข้ามาแตะสัมผัสกับผิววัสดุก็จะเกิดแรงต่อต้านจากผิวของวัสดุที่เกิดจากการสั่นและทำให้ตัวคานงอ และถ้าหากว่าเราให้แรงที่ทำให้ตัวคานสั่นคงที่ พื้นผิวบริเวณที่แข็งกว่าจะทำให้เกิดการต่อต้านต่อการสั่นในแนวตั้งของตัวคานมากกว่า และจึงทำให้ตัวคานงอมากกว่า ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดที่เกิดจากการ โกงงอของตัวคานจึงนำมาใช้วัดเปรียบเทียบความแข็งที่บริเวณต่างๆ ของผิวงาน

หลักการของวิธี Tapping mode กับ Force modulation mode คล้ายกันที่มีการสั่นของเข็มในแนวตั้งพร้อมกับมีการสแกนไปบนผิวชิ้นงาน อย่างไรก็ตามทั้ง 2 เทคนิค จะมีความแตกต่างกัน คือ ในกรณี Force modulation mode จะสั่นด้วยความเร็วสูงกว่า (สูงกว่าความเร็วในการสแกน) และการวัดแอมพลิจูดที่เกิดจากการบิดงอของคาน เป็นการวัดเนื่องจากผลของแรงต้านการสั่น เมื่อมีการสัมผัสของเข็มกับผิวงานในขณะที่ Tapping Mode จะเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของการสั่นของคานที่เปลี่ยนแปลงไป (ลดลง) เนื่องมาจากมีการสูญเสียพลังงานไปเมื่อมีการสัมผัสผิวงานที่มีระดับความสูงต่ำแตกต่างกัน

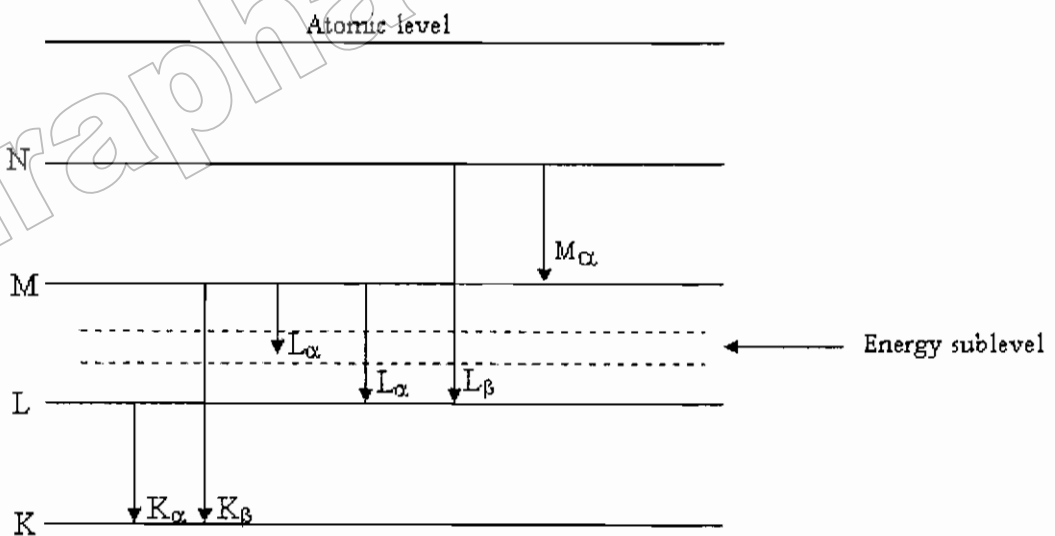
3. การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-ray spectroscopy (EDX)

ลักษณะเฉพาะสำคัญอีกประการหนึ่งของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์คือ องค์ประกอบของธาตุทางเคมี เทคนิคที่นิยมใช้ในการศึกษาองค์ประกอบของธาตุทางเคมีของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์คือ Energy Dispersive X-ray spectroscopy ซึ่ง วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ (2543) ได้อธิบายหลักการทำงานของเครื่องไว้ดังนี้ เมื่อลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงเคลื่อนที่เข้าชนอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นในของอะตอม เช่น ชั้น K หรือ L แล้วเกิดการถ่ายโอนพลังงานให้แก่อิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนชั้นในที่ได้รับพลังงานดังกล่าวมีพลังงานสูงขึ้นเกินพลังงานยึดเหนี่ยวของชั้นโคจรจึงหลุดออกมาจากวงโคจรและทำให้เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนในชั้นโคจร จากนั้นอะตอมที่อยู่ในสถานะถูกระงับลดระดับพลังงานลงสู่สภาวะปกติในช่วงระยะเวลาอันสั้น (10^{-15} วินาที) โดยอิเล็กตรอนของวงจรชั้นถัดออกไปจะลดระดับพลังงานลงมาให้เท่ากับพลังงานยึดเหนี่ยวของวงจรที่เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอน ด้วยการปล่อยพลังงานส่วนเกินในรูปของรังสีเอกซ์ แล้วอิเล็กตรอนจะเข้ามาแทนที่ พลังงานส่วนเกินนี้มีพลังงานเท่ากับความต่างของระดับพลังงานยึดเหนี่ยวเฉพาะชั้นโคจรของอิเล็กตรอน และเฉพาะของธาตุนั้น ๆ จึงมีค่าพลังงานเฉพาะค่า เรียกรังสีชนิดนี้ว่า “รังสีเอกซ์เฉพาะตัว” ดังแสดงในภาพที่ 2-25 และภาพที่ 2-26

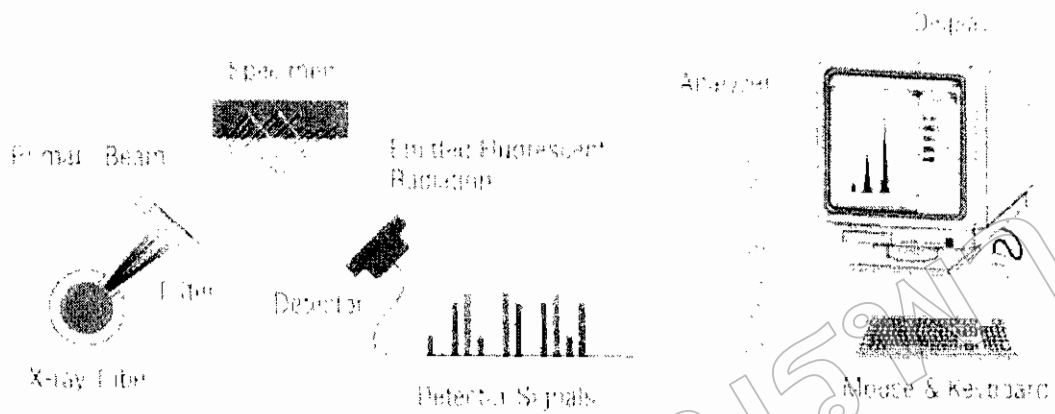
ในระบบการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์แบบ EDX หัววัดรังสีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ หัววัดรังสีแบบ Si (Li) ซึ่งเหมาะสำหรับการวัดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่มีพลังงานในช่วง 1 ถึง 30 keV หรือหัววัดชนิดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง (High Purity Germanium; HPGe) ซึ่งสามารถวัดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวได้ช่วงกว้าง คือ 3 ถึง 200 keV โดยหัววัดรังสีเอกซ์ทั้งสอง 2 แบบ จะเปลี่ยนพลังงานของรังสีให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าในรูปของศักย์ไฟฟ้า โดยขนาดของสัญญาณไฟฟ้าที่ทางออกของหัววัดจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบบนหัววัด จากนั้นวงจรขยายแบบช่องเดียวหรือหลายช่องจะเก็บสัญญาณไฟฟ้าจากหัววัดในหน่วยความจำที่อยู่ภายในเครื่อง และแสดงผลวิเคราะห์บนจอภาพในรูปของสเปกตรัม พร้อมทั้งผลวิเคราะห์เชิงปริมาณและคุณภาพ โดยโปรแกรมสำเร็จรูปดังภาพที่ 2-27 และภาพที่ 2-28



ภาพที่ 2-25 การกระตุ้นให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวโดยใช้ลำอิเล็กตรอน (วีระศักดิ์ อุคมกิจเดชา และคณะ, 2543)

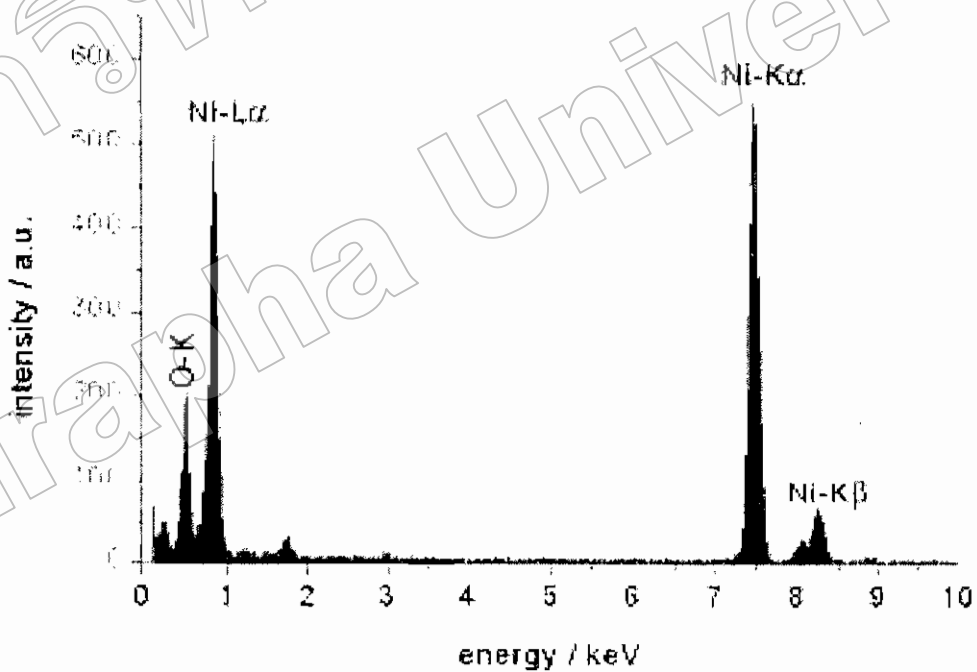


ภาพที่ 2-26 การเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่ระดับพลังงานของชั้นโคจรต่างๆ (วีระศักดิ์ อุคมกิจเดชา และคณะ, 2543)



ภาพที่ 2-27 องค์ประกอบหลักของเครื่องมือ Energy Dispersive X-ray spectroscopy (EDX)

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



ภาพที่ 2-28 ตัวอย่างการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุทางเคมีด้วยเทคนิค EDX

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

ฟิล์มโครเมียมไนไตรด์

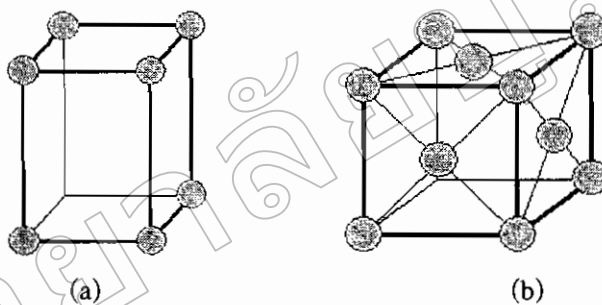
โครเมียมไนไตรด์เป็นหนึ่งในโลหะทรานซิชันที่ได้รับความสนใจและได้รับการพัฒนา
มากกว่า 20 ปี เนื่องจากฟิล์มโครเมียมไนไตรด์มีสมบัติเด่นหลายประการเช่น ยึดเกาะกับวัสดุ
รองรับที่ดี มีสมบัติต้านทานการทำปฏิกิริยาออกซิเจนได้ดี และยังทนสภาพการเสียดสี จากสมบัติที่
กล่าวมาฟิล์มโครเมียมไนไตรด์จึงถูกประยุกต์ในงานด้านต่าง ๆ ที่ต้องการสมบัติของฟิล์มโครเมียม
ไนไตรด์ไปใช้ (Lee, Tien, Kuo, & Chen, 2006) และนำมาประยุกต์ทางด้านเทคนิคต่าง ๆ เช่น
ปัญหาในงานอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก การเคลือบแข็งด้านการจัดสีบนเครื่องมือตัด ด้านการกัดกร่อน
รอยขูดบนผิวเลนส์และอุปกรณ์เครื่องกล (Min, Kyung, Yun, & Jeon, 2003) เป็นต้น

โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างผลึกของโครเมียมไนไตรด์ แบ่งได้ 2 ชนิด คือ CrN
(Face-centred cubic; fcc) และ Cr₂N (Hexagonal closest packing; hcp) โดย Cr₂N มีความแข็งแรงมาก
และแสดงความต้านทานการกัดกร่อนได้ดี ในทางตรงข้าม CrN มีความต้านทานการขัดสีได้ดีกว่า
(Zhang et al., 2008) สำหรับโครงสร้างผลึกของฟิล์มโครเมียมไนไตรด์ขึ้นกับเทคนิคและเงื่อนไข
การเคลือบ

การเตรียมฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ ต้องทำการเปลี่ยนค่าตัวแปรหลายค่า
แล้วนำฟิล์มที่เคลือบได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD เพื่อศึกษารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
และเปรียบเทียบตำแหน่งของพีคที่เกิดขึ้นกับแฟ้มข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึกผง
(Joint Committee on Powder Diffraction Standard, JCPDS) ของโครเมียมไนไตรด์

ตารางที่ 2-2 ระบบผลึกของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์

ระบบผลึก	แกน	มุมระหว่างแกน
ออร์โทโรมบิก	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
คิวบิก	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$



ภาพที่ 2-29 เฟสของโครเมียมไนไตรด์

(http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/def_en/kap_1/basisc/b3_1_1.html)

(a) เฟสออร์โทโรมบิก

(b) เฟสคิวบิก

ตารางที่ 2-3 ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึกโครเมียมไนไตรด์เฟสออร์โธโรมบิก

Pattern: 65-6914		Wavelength = 1.54060 (Å)		
CrN (Cubic /Chromium Nitride)		d (Å)	Intensity	h k l
Lattice: Orthorhombic		2.8796	2	0 0 1
S.G. : Pmmn (59)		Molecular Weight = 66.00		
a = 2.969		Volume [CD] = 35.33		
b = 4.131		Dx = 6.204		
c = 2.879		Dm = -		
$\alpha = \gamma = \beta = 90^\circ$		I/ Icor = 2.97		
		2.4115	478	1 1 0
		2.3624	448	0 1 1
		2.0673	999*	1 0 1
		2.0673	999*	0 2 0
		1.8488	4	1 1 1
		1.6786	1	0 2 1
		1.4849	88	2 0 0
		1.4613	326	1 2 1
		1.4398	73	0 0 2
		1.3596	2	0 1 2
		1.3197	1	2 0 1
		1.2955	1	1 0 2
		1.2571	70	2 1 1
		1.2494	35	1 3 0
		1.2424	33	0 3 1
		1.2362	64	1 1 2
		1.2057	64	2 2 0
		1.1812	58	0 2 2
		1.1462	1	1 3 1

ตารางที่ 2-4 ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึกโครเมียมไนไตรด์เฟสออร์โธโรมบิก

Pattern: 65-6914		Wavelength = 1.54060 (Å)		
CrN (Cubic /Chromium Nitride)		d (Å)	Intensity	h k l
Lattice: Orthorhombic		1.1121	1	2 2 1
S.G. : Pmmn (59)		Molecular Weight = 66.00		
a = 2.969	$\alpha = \gamma = \beta = 90^\circ$	Volume [CD] = 35.33		
b = 4.131		1.0336	34	2 0 2
c = 2.879		1.0336	34	0 4 0
		1.0027	1	2 1 2
		0.99524	1	0 3 2
		0.97228	1	0 4 1
		0.96268	11	3 1 0
		0.95986	6	0 0 3
		0.95289	22	2 3 1
		0.94366	21	1 3 2
		0.93616	22	3 0 1
		0.93496	10	0 1 3
		0.92402	68	2 2 2
		0.92402	68	1 4 1
		0.91334	21	1 0 3
		0.91334	21	3 1 1
		0.89181	1	1 1 3
		0.87049	1	0 2 3
		0.85269	36	3 2 1

ตารางที่ 2-5 ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึกโครเมียมไนไตรด์เฟสออร์โทโรมบิก

Pattern: 65-6914		Wavelength = 1.54060 (Å)		
CrN (Cubic /Chromium Nitride)		d (Å)	Intensity	h k l
Lattice: Orthorhombic		0.84796	18	2 4 0
S.G. : Pmmn (59)		Molecular Weight = 66.00		
a = 2.969	$\alpha = \gamma = \beta = 90^\circ$	Volume [CD] = 35.33		
b = 4.131		Dx = 6.204		
c = 2.879		Dm = -		
		I/ Icor = 2.97		
		0.83929	17	0 4 2
		0.83534	34	1 2 3
		0.82672	1	2 3 2
	0.81572	1	3 0 2	
	0.81342	1	2 4 1	
	0.80766	1	1 4 2	
	0.80611	1	2 0 3	
	0.80383	8	3 3 0	
	0.80028	15	3 1 2	

Eddine, M.N., Sayetat, F., Bertaut, E.F., C.R. Seances Acad. Sci., Ser.B, 269B, 574 (1969)

ตารางที่ 2-6 ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึกโครเมียมไนไตรด์เฟสคิวบิก

Pattern: 11-0065		Wavelength = 1.5418 (Å)			
CrN (Cubic /Chromium Nitride)		d (Å)	Intensity	h k l	
Lattice: Cubic		2.3940	80	1 1 1	
S.G. : Fm $\bar{3}$ m (225)		Molecular Weight = 66.00	2.0680	100	2 0 0
a = 4.140	$\alpha = \gamma = \beta = 90^\circ$	Volume [CD] = 70.96	1.4630	80	2 2 0
		Dx = 6.178	1.2490	60	3 1 1
		Dm = 5.900	1.1970	30	2 2 2
		I/ Icor = -	1.0340	30	4 0 0
			0.94960	50	3 3 1
			0.92600	60	4 2 0
		0.84600	60	4 2 2	
		0.79790	30	-	

*Turkdogan, Ignatowicz, J. Iron Steel Inst., London, 188, 242 (1958)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Forniés, Escobar Galindo, Sánchez, and Albella (2005) ศึกษาการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์บนแผ่นซิลิกอนด้วยระบบ แมกนีตรอน สปีดเตอริง ในบรรยากาศผสมแก๊สอาร์กอนกับแก๊สไนโตรเจนโดยมีการให้ศักย์ไฟฟ้าไบแอสกับวัสดุรองรับที่ค่าต่าง ๆ ปรากฏการณ์พอยท์โซนิ่ง (poisoning) ศึกษาจากความต่างศักย์ดิสชาร์จ และความดันรวมขณะเคลือบองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ วิเคราะห์ โดย Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy (GDOES) และ X-ray Diffraction (XRD) ตามลำดับ การเปลี่ยนอัตราไหลแก๊สอาร์กอนและแก๊สไนโตรเจนพร้อมกัน โดยให้อัตราไหลแก๊สรวมมีค่าคงที่เท่ากับ (11 sccm) จนสังเกตเห็นความแตกต่างเฟสของโครงสร้างผลึก ที่ความเข้มข้นที่แก๊สไนโตรเจนต่ำ $f_{N_2} < 2\%$ พบ โครเมียมบริสุทธิ์ เมื่อแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้น ($5\% < f_{N_2} < 40\%$) ผลที่ตามมาพบเฟส $[Cr+N]$, $[Cr+CrN_x]$ และ $[Cr+CrN]$ สุดท้ายในช่วง $5\% < f_{N_2} < 100\%$ จะพบ Cr_2N ที่มีเฟส hexagonal เท่านั้น Scanning electron microscopy (SEM) ใช้ศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคที่เปลี่ยนจากโครงสร้างคอลัมน์ (Columnar) ไปเป็นโครงสร้างแกรนูลาร์ (Granular) เมื่อปรับแรงดันไฟฟ้าที่ไบแอสวัสดุรองรับในช่วง +20V-150V ตามลำดับ เครื่องนาโนอินเดนเตอร์และเครื่อง pin-on-disk ทำให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่าง ไตรโบโลยีและเฟสของ โครงสร้างผลึก

Wei, Rar, and Barnard (2001) ศึกษาการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ บนแผ่นซิลิกอน (100) ในช่วงกว้างของความดันย่อยไนโตรเจน ด้วยระบบ ดิซี แมกนีตรอน สปีดเตอริง องค์ประกอบและโครงสร้างผลึกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) และ X-ray Diffraction (XRD) ตามลำดับ ค่าความแข็งตรวจสอบด้วยเครื่องนาโนอินเดนเตอร์ (Nanoindentation) และ ค่าโมดูลัสลดลง (Reduce modulus) ตรวจสอบด้วย Hysitron nanomechanical properties system มีการศึกษาการอบอ่อน (Annealing effect) โครงสร้างและสมบัติเชิงกล พบเฟส Cr, Cr_2N และ CrN ซึ่งการผสมของเฟสเหล่านี้เกี่ยวข้องกับค่าเฉลี่ย แก๊สไนโตรเจนที่มีปริมาณน้อย ($p_{N_2} \sim 0.5\%$) ทำให้พิก Cr (110) ที่มีความเข้มสูงหายไปและค่าความแข็งของโครเมียมเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ พบพิก Cr_2N บริสุทธิ์ ที่ความดันไนโตรเจนในช่วง (7.5 - 9.5%) จนกระทั่งพบพิก CrN บริสุทธิ์ ที่ความดันไนโตรเจนในช่วง ($p_{N_2} > 20\%$) ของความดันรวมขณะเคลือบ ทำให้พบค่าความแข็งสูงสุดที่ความดันไนโตรเจนในช่วง (10-15%) ของความดันรวมขณะเคลือบ ในระหว่างการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง ทำให้พบ Cr_2N (111) ที่ความดันไนโตรเจนในช่วง 0.5-10.0% ของความดันรวมขณะเคลือบ ค่าความแข็งและค่าโมดูลัสของ Cr, Cr_2N และ CrN เพิ่มขึ้นหลังจากการอบอ่อน

Zenghu, Jiawan, Qianxi, Xiaojiang, and Geyang (2003) ศึกษาการเคลือบฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ (CrN_x) ด้วยวิธี รีแอคทีฟ แมกนีตรอน สปีดเตอริง และศึกษาองค์ประกอบทางเคมี เฟส และโครงสร้างจุลภาค ด้วยเทคนิค EDX, XRD และ TEM ส่วนความแข็งระดับจุลภาคและโมดูลัสความยืดหยุ่นวัดด้วยเครื่องวัดความแข็งระดับไมโคร (Microhardness) และศึกษาผลของความดันย่อยแก๊สไนโตรเจนที่มีต่อองค์ประกอบ เฟส โครงสร้างจุลภาค และสมบัติเชิงกลของฟิล์มบาง CrN_x จากผลการศึกษาพบว่า การเกิดเฟสของฟิล์มบาง CrN_x เปลี่ยนจาก $\text{Cr}+\text{Cr}_2\text{N}$ เป็น single-phase Cr_2N แล้วเปลี่ยนเป็น $\text{Cr}_2\text{N}+\text{CrN}$ จนเกือบเป็น single-phase CrN เมื่อเพิ่มความดันย่อยแก๊สไนโตรเจน สำหรับค่าความแข็งระดับจุลภาคของฟิล์มที่ศึกษามีค่าอยู่ในช่วง HV 21.4 GPa ถึง HV 27.1 GPa และเมื่ออัตราส่วนอะตอมของ $\text{Cr}:\text{N}$ เท่ากับ 1:2 และ 1:1 ฟิล์มบางมีค่าความแข็งสูงสุดเท่ากับ HV 27.1 GPa และ HV26.8 GPa ตามลำดับ ขณะที่โมดูลัสของ single-phase Cr_2N มีค่าสูงสุดเท่ากับ 350 GPa

Zhang et al. (2008) ศึกษาการเคลือบฟิล์มโครเมียมไนไตรด์ด้วย ระบบ ดีซี แมกนีตรอน รีแอคทีฟ สปีดเตอริง ซึ่งในบรรยากาศผสมแก๊สอาร์กอนกับแก๊สไนโตรเจน โดยที่ความดันขณะเคลือบและแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เข้าสัมพันธ์กับเส้นโค้งของอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน เพื่อสังเกตโครงสร้างและสมบัติการเคลือบของโครเมียมไนไตรด์ ว่าสอดคล้องระหว่างความดันขณะเคลือบกับการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เข้า จากการทดลองพบว่าอัตราไหลของแก๊สไนโตรเจนมีผลต่อเฟส stoichiometric Cr_2N และ CrN วิเคราะห์ด้วยเครื่อง EPMA และ เครื่อง XRD ส่วนของเครื่อง Cryogenic fracture cross-section SEM แสดงรูปการโตของโครงสร้างคอลัมน์ (columnar) stoichiometric CrN แสดงค่าความแข็ง ค่าโมดูลัสสภาพยืดหยุ่นสูงและ อัตราส่วน H^3/E^2 สูงที่ทดสอบด้วยเครื่องนาโนอินเดนเตอร์ สมบัติการขีดเกาและ ไดร โป โลยีของฟิล์มโครเมียมไนไตรด์ ทดสอบด้วย การขูดขีด (scratch) และเครื่อง pin-on-disk ตามลำดับ ฟิล์มโครเมียมไนไตรด์แสดงสมบัติการขีดเกาด้วยค่าต่ำสุดของแรงกดวิกฤตสูงสุด (L_{C2}) มีค่าระหว่าง 10 และ 20 นิวตันและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าระหว่าง 0.5 ถึง 0.75

Han, Lin, Wang, and Shih (2003) ศึกษาการเคลือบฟิล์มโครเมียมไนไตรด์ที่แสดงสมบัติเชิงกล ด้านทานการกัดกร่อนและด้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี ซึ่งสมบัติดังกล่าวขึ้นอยู่กับ การนำไปใช้งานและศึกษา การเคลือบฟิล์มโครเมียมไนไตรด์บนแผ่นเหล็ก (SKD11) ด้วยระบบ อันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง พบฟิล์ม CrN ระบาย (200) และ ฟิล์ม Cr_2N ระบาย (111) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างสมบัติเชิงกลของการเคลือบฟิล์มโครเมียมไนไตรด์ เช่น ความแข็ง การขีดเกาและ การขัดสี และศึกษา โครงสร้าง ลักษณะพื้นผิว องค์ประกอบทางเคมี และ stoichiometry ด้วยเทคนิค AFM, SEM, XRD และ XPS จากผลการศึกษาพบว่าพื้นผิวลักษณะภาพตัดขวางของ

ฟิล์มโครเมียมไนไตรด์พบโครงสร้างคอลัมน์ (Columnar) และยังพบฟิสิก Cr_2N ที่มีโครงสร้างหนาแน่น ดังนั้น CrN ระบาย (200) มีสมบัติการยึดเกาะแข็งแรงแต่พบว่าค่าความแข็งลดลง

Rebholz, Ziegele, Leyland, and Matthews (1999) ศึกษาการเคลือบฟิล์มโครเมียมไนไตรด์ $Cr_{1-x}N_x$ ด้วยระบบแมกนีตรอน สเป็คเตอริง ที่เคลือบฟิล์มบนสแตนเลส (AISI 316) ซึ่งเป็นวัสดุรองรับ ที่อุณหภูมิ $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในอัตราส่วนแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สไนโตรเจน และศึกษาอิทธิพลของปริมาณแก๊สไนโตรเจนที่มีต่อโครงสร้าง สมบัติเชิงกลและสมบัติไดรไบโพลีของการเคลือบฟิล์มโครเมียมไนไตรด์ $Cr_{1-x}N_x$ (อยู่ในช่วง 0-0.4) ส่วนองค์ประกอบ โครงสร้างจุลภาค และลักษณะพื้นผิว ทดสอบโดยใช้เครื่อง optical emission spectroscopy, X-ray diffraction และ scanning electron microscopy ส่วนสมบัติเชิงกลและสมบัติไดรไบโพลีทดสอบด้วยเครื่อง วัดความแข็ง Knoop microhardness เครื่องทดสอบการยึดเกาะและการขีดด้วยเข็ม เครื่อง pin-on-disk เครื่อง ball-on-plate และเครื่องทดสอบการกัดกร่อนและการขัดสี ดังนั้นฟิสิกที่พบคือ Cr , Cr_2N , CrN สำหรับการเคลือบฟิล์มโครเมียมไนไตรด์ $Cr_{1-x}N_x$ ที่ $x \leq 0.16$ พบเฟส α -Cr เท่านั้น โครงสร้างระดับจุลภาคมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่อพบว่าปริมาณไนโตรเจนเพิ่มขึ้น $x = 0.29$ และความแข็งเพิ่มขึ้นจาก 700 ถึง 2400 HK การเคลือบฟิล์มโครเมียมไนไตรด์ $Cr_{1-x}N_x$ ที่ $x = 0.10-0.16$ แสดงสมบัติการยึดเกาะ การกัดกร่อนและการขัดสีได้ดี รวมถึงบริเวณที่กัดมีรอยแตกเล็กน้อยแสดงถึงฟิล์มมีความเหนียวที่ดีหลังจากการทดสอบแรงอัด 50000 กับหัวบอลกดทั้งสแตนคาร์ไบด์ ดังนั้นการเคลือบแข็ง ($Cr_{0.71}N_{0.29}$) มีประสิทธิภาพสูงสุดในแง่ของการลดปริมาณแรงอัดได้ดี

Kyung, Nam, Jung, and Han (2000) ศึกษาการเคลือบฟิล์มโครเมียมไนไตรด์ด้วยอัตราสูง ควบคุมโครงสร้างจุลภาคด้วยระบบ แมกนีตรอน สเป็คเตอริง และศึกษากระบวนการเคลือบด้วยเงื่อนไข อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน ไบแอสวัสดุรองรับด้วยแรงดันไฟฟ้าและใช้ ดีซี พัลส์ ควบคุมความถี่ของกำลังจ่าย และศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) และ scanning electron microscopy (SEM) ส่วนสมบัติเชิงกลวัดด้วยเครื่องวัดความแข็งระดับไมโคร (microhardness) และเครื่องการยึดเกาะ จากการศึกษาพบว่าอัตราเคลือบสูงสุดของฟิล์มโครเมียมไนไตรด์ ประมาณเกือบ 90% เมื่อเทียบกับเคลือบ Cr บริสุทธิ์ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพโดย ไบแอสวัสดุรองรับด้วยศักย์ไฟฟ้าลบแบบ ดีซี พัลส์ เมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้น โครงสร้างระดับจุลภาคของฟิล์มโครเมียมไนไตรด์เปลี่ยนจาก $Cr+Cr_2N$ เป็น CrN ดังนั้น การเปลี่ยนเฟส (Phase transformation) เกิดขึ้นระหว่าง Cr_2N+CrN (multi-phase) และ CrN (mono-phase) ควบคุมโดย ศักย์ไฟฟ้าลบแบบ ดีซี และ ไบแอสด้วยแรงดันไฟฟ้าโดยใช้ ดีซี พัลส์ ควบคุมความถี่ของกำลังจ่าย ความแข็งระดับจุลภาคฟิล์มโครเมียมไนไตรด์ ค่าความแข็งที่วัด

ได้ 1600 kg/mm^2 ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ค่าความแข็งสูงสุดเท่ากับ 2250 kg/mm^2 ที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจน 20 sccm และไบแอสด้วยศักย์ไฟฟ้าลบเท่ากับ -100 V

Lee, Kuo, Wang, Chang, and Liu (2008) ศึกษาการเคลือบฟิล์มโครเมียมไนไตรด์ที่เป็นรูจ็อกอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เนื่องจากมีสมบัติทางด้านเชิงกลและสมบัติการกัดกร่อนที่ดี และศึกษาการเคลือบฟิล์มโครเมียมไนไตรด์บริสุทธิ์ที่เตรียมด้วย bipolar symmetric พัลส์ ดีซี รีแอกตีฟ แมกนีตรอน สปีดเตอร์ริง โดยไบแอสวัสดุรองรับและใช้ ดีซี พัลส์ ที่ความถี่แตกต่างกันสี่ค่า เป็นที่สังเกตว่า โครงสร้างฟิล์มโครเมียมไนไตรด์เปลี่ยนจาก (200) เป็น (220) โดยไบแอสวัสดุรองรับที่ใช้ความถี่และเพิ่มไบแอสวัสดุรองรับที่ใช้กระแส จากผลการศึกษาพบว่า ไบแอสวัสดุรองรับที่ใช้กระแสสูง ทำให้โครงสร้างระดับจุลภาคแข็งแรงส่งผลถึงสมบัติการยึดเกาะและสมบัติการขัดสีของฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์ ฟิล์มบางโครเมียมไนไตรด์มีความแข็งเพียงพอ มีคุณสมบัติการยึดเกาะและคุณสมบัติการขัดสีที่ไบแอสวัสดุรองรับที่ใช้กระแสต่ำกว่า 0.394 A

Lin et al. (2009) ศึกษาการเคลือบโครเมียมไนไตรด์ที่เตรียมด้วย รีแอกตีฟ สปีดเตอร์ริง เป้าโลหะโครเมียมไนไตรด์ การเปลี่ยนร้อยละของอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน โดยใช้ระบบ closed field unbalanced magnetron sputtering ด้วยเงื่อนไข ดีซี และความถี่กลางของพัลส์ (100 kHz and 50% duty cycle) และศึกษาระบบพลาสมาเพื่อพิสูจน์ว่ามีปริมาณไอออนกับพลังงานไอออนในช่วง (65 eV ขึ้นไปและส่วนมากจาก $10\text{-}30 \text{ eV}$) ได้ระบุใน พัลส์ พลาสมาเปรียบเทียบกับไอออนพลักซ์ต่ำและพลังงาน ($0\text{-}10 \text{ eV}$) ในการปล่อยประจุกระแสตรงของพลาสมา จากการศึกษาพบว่า โครงสร้างเฟสของโครเมียมไนไตรด์ได้เปลี่ยนจาก Cr(N) เป็น $\beta\text{-Cr}_2\text{N}$ และเฟสของ $\beta\text{-Cr}_2\text{N}$ และ c-CrN เปลี่ยนเป็น c-CrN บริสุทธิ์ อัตราไหลไนโตรเจนเพิ่มขึ้นในเงื่อนไข ดีซี และ พัลส์ พบเฟส CrN อย่างไรก็ตาม การเคลือบด้วยเงื่อนไขพัลส์ของโครเมียมไนไตรด์ ให้ความสำคัญกับแก๊สไนโตรเจนน้อยกว่าเงื่อนไขการเคลือบด้วยเงื่อนไข ดีซี ที่เตรียมด้วยอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน ซึ่งทำให้พบเฟส $\beta\text{-Cr}_2\text{N}$ ที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนในช่วง ($30\text{-}50\%$) เปรียบเทียบกับการเคลือบด้วย ดีซี สปีดเตอร์ทำให้พบโครงสร้างคอลัมน์ (Columnar) ขนาดใหญ่ การเคลือบด้วยเงื่อนไขพัลส์ของโครเมียมไนไตรด์แสดงเกี่ยวกับโครงสร้างจุลภาคที่ดีซึ่งได้รับประโยชน์จากความหนาแน่นของพลาสมาและการระดมยิงไอออนจากพัลส์พลาสมา ซึ่งโครงสร้างความหนาแน่นใกล้เคียงกับโครงสร้าง equi-axial ที่ศึกษาในช่วงของอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน การปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของการเคลือบด้วยเงื่อนไขพัลส์ของโครเมียมไนไตรด์ มีส่วนทำให้ความแข็งและทนต่อการเสียดสีดีขึ้น การเคลือบด้วยเงื่อนไขพัลส์ของโครเมียมไนไตรด์มีค่าความแข็ง มากกว่า 30 GPa ที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนในช่วง $30\text{-}40 \%$ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเกิดเฟส $\beta\text{-Cr}_2\text{N}$ กับเฟสของ $\beta\text{-Cr}_2\text{N}$ และ

c-CrN ที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจน 40-50% ค่า COF ต่ำ มีค่าเท่ากับ 0.36 และอัตราการขัดสีมีค่าเท่ากับ $1.66 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-1}$

Lee, Tien, Kuo, and Chen (2006) ศึกษาโครเมียมไนไตรด์ที่เตรียมจากวิธีรีแอคทีฟแมกนีตรอน สปีดเตอริง ที่ใช้แหล่งจ่ายกำลังแบบดีซี พัลส์สมมาตรสองขั้ว ซึ่งกระบวนการเคลือบจะแปรค่าอุณหภูมิและการไบแอสวีลครอกรับด้วยศักย์ไฟฟ้าลบแบบ ดีซี พัลส์ โดยควบคุมความถี่พัลส์ของกำลังที่จ่ายให้แก่เป้าสารเคลือบกับวีลครอกรับ 2 kHz และ 50 kHz ตามลำดับ และศึกษาสมบัติเชิงกลและการยึดเกาะของฟิล์มโครเมียมไนไตรด์ด้วยเทคนิคนาโนอินเดนเตอร์และเทคนิค Daimler-Benz Rockwell-C ผลการศึกษาพบว่าเฟสของโครเมียมไนไตรด์เปลี่ยนจากระนาบ (111) ไปสู่ระนาบ (200) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการอบและการไบอัส -290 V ให้แก่วีลครอกรับทั้งยังพบว่าฟิล์มโครเมียมไนไตรด์มีความแข็ง 21 GPa และมีสมบัติการยึดเกาะที่ดีเมื่อเคลือบด้วยเงื่อนไขอุณหภูมิอบวีลครอกรับ 300 องศาเซลเซียสและไบอัส -290 V จากผลที่ได้จะเห็นว่าการเตรียมโครเมียมไนไตรด์จากกระบวนการรีแอคทีฟแมกนีตรอน สปีดเตอริง โดยใช้แหล่งจ่ายกำลังแบบ ดีซี พัลส์สมมาตรสองขั้ว นั้นได้ ฟิล์มที่มีการยึดเกาะที่เพียงพอต่อความต้องการใช้งาน