

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึงทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ซึ่งประกอบด้วย กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง โครงสร้างของฟิล์มบาง กระบวนการโกล์ดิสซาร์จ การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปีดเทอริง ระบบเคลือบแบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเทอริง ระบบเคลือบแบบอันบาลานซ์แมกนีตรอนสปีดเทอริง การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีรีเอคทีฟสปีดเทอริง และการหาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ในไตรด์ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง

การเคลือบฟิล์มบาง (Thin Film) ในสุญญากาศครั้งแรกทำโดย Bunsen และ Grove ในปี คศ.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 งานด้านอิเล็กทรอนิกส์ เช่น สารกึ่งตัวนำ ฟิล์มตัวนำ และฟิล์มตัวต้านทาน หรืองานด้านทัศนศาสตร์ เช่น เลนส์ กระจกสะท้อนแสง กระจกสะท้อนความร้อน เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้วิธีการเคลือบฟิล์มบางในการเตรียมสารตัวอย่างสำหรับการศึกษสมบัติทางกายภาพของวัสดุในรูปของฟิล์มบาง ซึ่งสมบัติบางอย่างไม่สามารถวัดได้เมื่ออยู่ในสภาพเป็นก้อน (Bulk) เพราะฉะนั้นข้อมูลเหล่านี้มีประโยชน์อย่างมากต่อการพัฒนาวัสดุเพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรม

การเคลือบฟิล์มบางเป็นกระบวนการที่ทำให้สารเคลือบตกเคลือบลงบนผิววัสดุรองรับที่ต้องการ ซึ่งสามารถทำได้ทั้งกระบวนการทางเคมีหรือกระบวนการทางฟิสิกส์ โดยพื้นฐานแล้วกระบวนการเคลือบฟิล์มบางมีขั้นตอนสำคัญ 3 ขั้นตอน (Smith, 1995) ดังนี้คือ

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

2. การเคลื่อนย้ายสารเคลือบมายังวัสดุรองรับ (Transport) ในภาวะสุญญากาศ ไอระเหยของสารเคลือบอาจจะมีการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ไปยังวัสดุรองรับ หรืออาจจะเคลื่อนที่ไปในลักษณะของไหล ซึ่งจะทำให้ไอระเหยของสารเคลือบมีการชนกับอนุภาคอื่นภายในภาชนะสุญญากาศ นอกจากนี้ไอระเหยอาจจะเคลื่อนที่ไปยังวัสดุรองรับในลักษณะของพลาสมาก็ได้

3. การสะสมพอกพูน (Deposition) เป็นขั้นตอนการพอกพูนของสารเคลือบและ โคขึ้นจนกลายเป็นชั้นของฟิล์มบางบนวัสดุรองรับ ขั้นตอนนี้จะขึ้นกับเงื่อนไขของวัสดุรองรับหรือ การทำปฏิกิริยาของสารเคลือบกับวัสดุรองรับ ความสะอาดของผิววัสดุรองรับ ตลอดจนพลังงาน ที่ใช้ในการเคลือบ

โครงสร้างของฟิล์มบาง

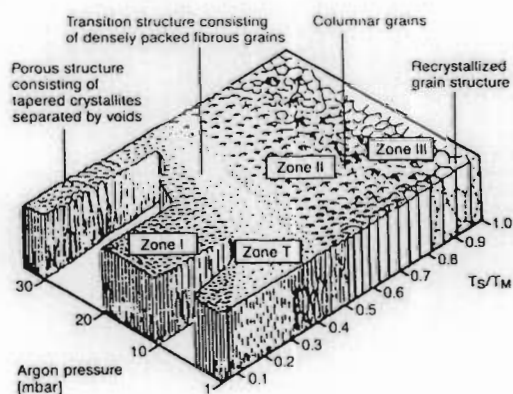
โครงสร้างของฟิล์มบางจะเป็นไปตามเงื่อนไขของอัตราส่วนระหว่างอุณหภูมิเคลือบกับ อุณหภูมิหลอมเหลว (T/T_m) ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ตามลักษณะโครงสร้างและสมบัติทางกายภาพ (ชีวารัตน์ ม่วงพัฒน์, 2544; หนึ่งฤทัย แก้วไข, 2555) ดังภาพที่ 2-1

1. บริเวณ 1 (Zone1) เป็นการเคลือบ ที่เกิดในช่วงอุณหภูมิต่ำ และความดันขณะ เคลือบมีค่าสูง อะตอมที่อยู่บนผิววัสดุรองรับจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำ ทำให้เกิดการเกาะกัน เป็นกลุ่มเล็ก ๆ กระจัดกระจาย และเกิดเป็นโครงสร้างผลึกที่มีลักษณะเรียวยแหลมแบบ Tapers Crystallites จากนิวเคลียสที่มีปริมาณจำกัด ทำให้เกิดความหนาแน่นของโครงสร้างต่ำ มีช่องว่าง ขนาดความกว้างในระดับ $100 \text{ \AA}$ ที่ T/T_m เท่ากับ 0 - 0.1 ที่ความดัน 1 mtorr ถ้าความดันสูง บริเวณ นี้จะขยายกว้างสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น และทำให้ขนาดของผลึกเพิ่มขึ้น ถ้า T/T_m เพิ่มขึ้น เนื่องจากที่ความดันสูงความหนาแน่นของแก๊สในภาชนะสุญญากาศมีมากขึ้น อนุภาคของสาร เคลือบจะเคลื่อนที่ตกลงมาได้ยากขึ้น ทำให้อนุภาคของสารเคลือบตกลงมาได้้น้อย และขณะที่ตก อาจรวมตัวกับอนุภาคอื่น ทำให้อนุภาคที่ตกลงมามีขนาดใหญ่ และมีเวลาในการเคลื่อนที่เพื่อฟอร์ม ตัวเป็นนิวเคลียสมากขึ้น จึงทำให้ช่องว่างระหว่างเกรนมีขนาดใหญ่เกิดขึ้น ลักษณะของฟิล์มบาง ที่ขรุขระมักจะเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของการโตของนิวเคลียส โดยอุณหภูมิที่มีผลต่อการ โตของฟิล์มมักจะมาจากไอออนที่ระดมยิงเป็นส่วนใหญ่

2. บริเวณ T (Zone T) เป็นบริเวณต้นแบบสำหรับการเคลือบฟิล์มด้วยระบบสปัตเตอริงโดยที่ค่าของ 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 จนกลายเป็นคอลัมน์าร์ (Columnar) ต่อไป โดยปราศจากช่องว่างบริเวณที่ขอบ

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

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

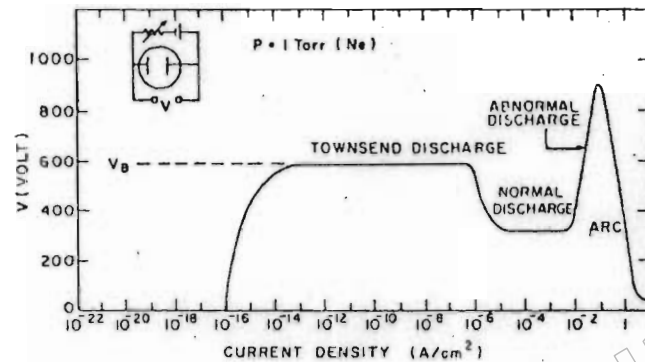


ภาพที่ 2-1 โครงสร้างของการเกิดฟิล์มในรูปแบบต่าง ๆ (ชีวรัตน์ ม่วงพัฒน์, 2544)

กระบวนการโกลว์ดิสชาร์จ

พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ และชนัสนา รัตนะ (2547) ได้อธิบายกระบวนการ โกลว์ดิสชาร์จไว้ดังนี้ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้ว ที่วางห่างกันเป็นระยะ d ภายใต้ความดันประมาณ 1.33 mbar ของแก๊สนีออน พบว่าช่วงแรกที่เพิ่มแรงดันทางไฟฟ้าจะมีกระแสไหลในวงจรน้อยมาก กระแสส่วนนี้เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออนของแก๊สที่เกิดขึ้นตลอดเวลาในบรรยากาศเนื่องจากการชนของรังสีคอสมิกและถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้า กระแสนี้จะมีค่าค่อนข้างคงที่เพราะอัตราการเกิดประจุขึ้นอยู่กับความเข้มของรังสี เมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นใกล้ค่าแรงดันไฟฟ้าทะลาย (Breakdown Voltage: VB) พลังงานของประจุที่ถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้นจนสามารถชนโมเลกุลของแก๊สทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอนซึ่งถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าให้มีการชนและเกิดการไอออไนซ์เพิ่มขึ้น ส่วนของไอออนบวกจะถูกเร่งเข้าชนคาโทด จนเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) เรียกกระบวนการช่วงนี้ว่า ทาวนด์เซนดิสชาร์จ (Townsend Discharge)

เมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นถึงแรงดันไฟฟ้าทะลายจะเกิดกระบวนการถล่ม (Avalanche) ทำให้ปริมาณ ไอออนบวกวิ่งเข้าชนคาโทดมากขึ้นและมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิมากขึ้น ซึ่งจะถูกร่งให้วิ่งเข้าหาอโนดขณะเดียวกันอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้ก็จะมีการชนกับโมเลกุลของแก๊สทำให้เกิดไอออนมากขึ้น สุดท้ายไอออนบวกที่เพิ่มขึ้นมากขึ้นนี้จะวิ่งเข้าชนคาโทดแล้วเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิเพิ่มขึ้นตามมาด้วย และชนโมเลกุลแก๊สทำให้เกิดผลิตไอออนเพิ่มขึ้น ทำให้กระแสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีปริมาณไอออนมากเพียงพอที่จะผลิตอิเล็กตรอนได้ในจำนวนคงที่ ช่วงนี้ระบบสามารถรักษาสภาพดิสชาร์จได้ด้วยตนเองโดยไม่ต้องอาศัยแหล่งกำเนิดจากรังสีภายนอกในการผลิตไอออน ช่วงนี้แก๊สภายในระบบจะเกิดการเรืองแสงขึ้น แรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดลดค่าลงและกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเรียก การเรืองแสงปกติ หรือ นอร์มอล โกลว์ (Normal Glow) สถานะนี้อัตราการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิต่ออัตราการชนของไอออนมีค่าค่อนข้างต่ำ คือประมาณ 0.1 สำหรับเป้าคาโทดที่ทำจากวัสดุทั่วไป โดยในช่วงเริ่มต้นของการเรืองแสงหรือโกลว์ การชนของไอออนบนคาโทดจะปรับตัวเองให้เกิดขึ้นในบางบริเวณ แนวการเรืองแสงอาจเลื่อนไปมาได้และการชนของไอออนบนคาโทด ไม่มีความสม่ำเสมอโดยจะมีความเข้มของบริเวณการเรืองแสงตามแนวขอบหรือมุมของคาโทดที่มีสนามไฟฟ้าสูงเพื่อรักษาสภาพการโกลว์ (Self-Sustaining) บางบริเวณไว้ เมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นตามแนวการชนของไอออนจะค่อย ๆ ขยายตัว เพิ่มพื้นที่จนครอบคลุมตลอดผิวคาโทด จนกระทั่งมีค่าความหนาแน่นกระแสเท่ากันตลอดโดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดคงที่

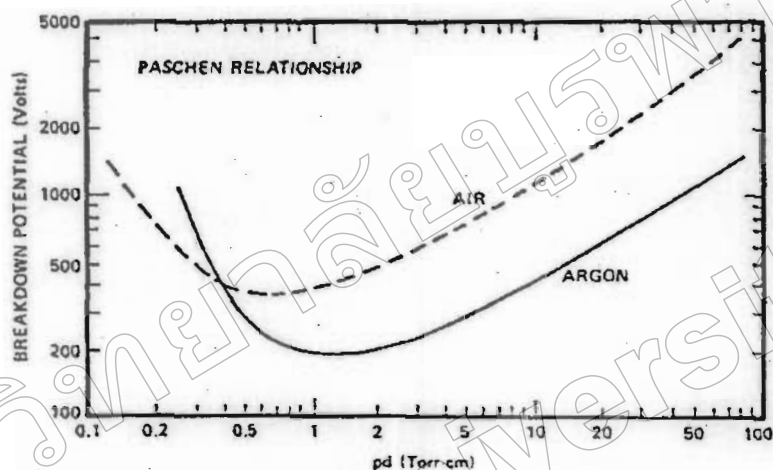


ภาพที่ 2-2 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดของกระบวนการเกิด ดิซี โกลว์ดิสชาร์จ ในหลอดสุญญากาศบรรจุแก๊สนีออน (Vossen & Kerns, 1978)

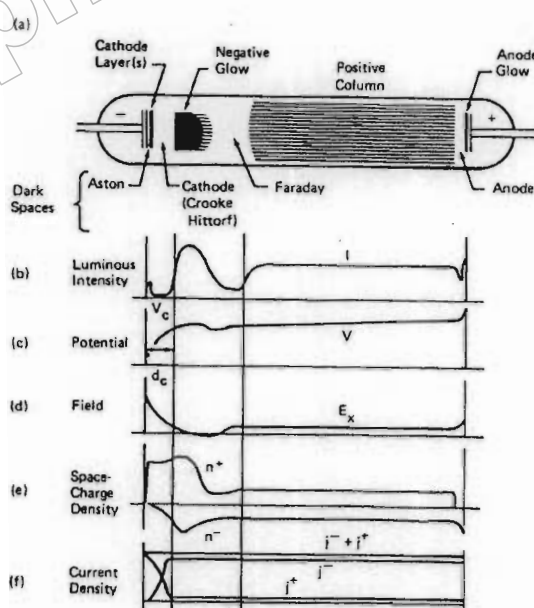
หลังจากการชนของไอออนครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดของคาโทดแล้ว การเพิ่มกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบจะทำให้ทั้งแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น เรียกว่า ช่วงการเรืองแสงผิดปกติ เปล่งแสงจ้าขึ้น หรือ แอบนอร์มอลโกลว์ (Abnormal Glow) เป็นช่วงที่ใช้กับระบบสปีดเตอริง และอีกหลาย ๆ ระบบของกระบวนการเกี่ยวข้องกับ โกลว์ดิสชาร์จ ช่วงนี้ถ้าไม่ระบายความร้อนให้กับคาโทด เมื่อความหนาแน่นของกระแสของคาโทดเพิ่มขึ้นสูงประมาณ 0.1 A/cm^2 ความร้อนที่เกิดจากการชนของไอออนบวกบนผิวคาโทดมีมากขึ้น จนเกิดการปล่อยอิเล็กตรอนแบบเทอร์มิออนิก (Thermionic Electron Emission) เสริมกับการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิและติดตามด้วยกระบวนการกลืนอีกครั้งหนึ่ง ทำให้ความนำไฟฟ้าของแก๊สในระบบสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดตกลงมากขณะที่กระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นและเปล่งประกายจ้าของการอาร์ค (Arc Discharge) ภาพที่ 2-2

ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ละลายในกระบวนการ โกลว์ดิสชาร์จจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปกับระยะทาง d ระหว่างอิเล็กโตรดและระยะปลดการชนระหว่างอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และ โมเลกุลของแก๊ส (ระยะปลดการชนของอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะแปรผกผันกับความดัน และมีค่ามากกว่าระยะปลดการชนของการชนกันเองระหว่าง โมเลกุลแก๊ส) ปกติอิเล็กตรอนทุติยภูมิแต่ละตัวมีความสามารถในการผลิตไอออนบวกได้ระหว่าง 10 ถึง 20 ตัว เพื่อให้เกิดกระบวนการกลืนในช่วงของนอร์มอลโกลว์ ถ้าความดันต่ำเกินไป (ระยะปลดการชนยาวขึ้น) หรือระยะทาง d มีค่าน้อยเกินไป อิเล็กตรอนทุติยภูมิจะไม่สามารถผลิตไอออนได้มากพอก่อนการชนกับอะโนด ถ้าความดันสูงเกินไป (ระยะปลดการชนสั้นลง) หรือระยะ d มากเกินไป อิเล็กตรอนทุติยภูมิไม่สามารถเพิ่มพลังงานให้กับตัวเองในสนามไฟฟ้าได้มากพอสำหรับการไอออไนซ์ เมื่อเกิดการชนพลังงาน

จะถูกถ่ายทอดให้โมเลกุลแก๊สในรูปการกระตุ้น (Excite) ขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงขึ้นทำให้ไม่สามารถผลิตไอออนบวกได้มากเพียงพอเช่นกัน ดังนั้นทั้งสองกรณีจะต้องใช้แรงดันทางไฟฟ้าทะลาค่อนข้างสูงโดยมีจุดหนึ่งระหว่างนี้ที่ใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าทะลาคต่ำสุดตามกฎของปาส์เชน (Paschen's law) ซึ่งแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าทะลาคและผลคูณระหว่างความดันแก๊ส (P) และระยะระหว่างอิเล็กโตรด (d) (ภาพที่ 2-3)



ภาพที่ 2-3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าทะลาคและผลคูณระหว่างความดัน (P) และระยะระหว่างอิเล็กโตรด (d) (Bunshah, 1994)



ภาพที่ 2-4 โกลว์ดิสชาร์จของหลอดนีออนยาว 50 cm ที่ความดัน 1.33 mbar (Chapman, 1980)

ในระบบสปิตเตอร์ทั่วไปสถานะของการเกิดโกลว์ดิซาร์จจะกระทำในช่วงที่ผลคูณของความดันกับระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด ($P \times d$) ซึ่งมีค่าต่ำกว่าจุดต่ำสุดของกราฟมาก (เนื่องจากการเคลือบฟิล์มที่ความดันต่ำทำให้ฟิล์มที่ได้มีคุณภาพดี การแทรกตัวของแก๊สในเนื้อฟิล์มน้อยและลดปริมาณสารปลอมปนในฟิล์ม) จึงต้องการแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นค่อนข้างสูง บางครั้งจึงมีความจำเป็นต้องใช้การเพิ่มความดันชั่วขณะเพื่อให้เริ่มการดิซาร์จได้ที่แรงดันไฟฟ้าต่ำ

ส่วนต่าง ๆ ของกระบวนการโกลว์ดิซาร์จ แสดงได้ดังภาพที่ 2-4 แต่ละส่วนอธิบายได้ดังนี้ ช่วงแรกคือช่วงมืดแอสตัน (Aston Dark Space) เป็นบริเวณที่อิเล็กตรอนถูกปล่อยจากคาโทดด้วยพลังงานต่ำประมาณ 1 eV ซึ่งไม่สามารถไอออไนซ์โมเลกุลแก๊สได้ ทำให้เกิดเป็นช่วงมืด ถัดจากผิวคาโทดบริเวณที่มีการเปล่งแสงออกมาด้วยความเข้มสูงมากเรียกว่า คาโทดโกลว์ (Cathode Glow) เป็นบริเวณที่ไอออนของแก๊สจากการดิซาร์จ และไอออนของอะตอมสารเคลือบซึ่งถูกผลิตขึ้นบริเวณคาโทดมีการรวมตัวเป็นกลางกับอิเล็กตรอนใกล้ผิวคาโทดด้วยกระบวนการต่าง ๆ ทำให้เกิดแสงซึ่งเป็นความถี่เฉพาะของสารที่ทำคาโทดและของแก๊สที่ใช้ เช่น ถ้าคาโทดเป็นทองแดงจะมีสีเขียว ทองคำมีสีส้มแดง แก๊สอาร์กอนมีสีน้ำเงินฟ้า และแก๊สไนโตรเจนมีสีม่วง เป็นต้น

ถัดจากคาโทดโกลว์เรียกว่าช่วงมืดครูกหรือช่วงมืดคาโทด (Crook or Cathode Dark Space) พลังงานของอิเล็กตรอนมีค่าสูงกว่าพลังงานในการไอออไนซ์โมเลกุลของแก๊สเมื่อถูกเร่งผ่านสนามไฟฟ้าในระยะปลอดการชนออกมา ทำให้บริเวณปลอดการชนนั้นไม่มีกระบวนการกระตุ้นหรือไอออไนซ์เกิดขึ้น การปลดปล่อยแสงจึงไม่เกิดในช่วงนี้และกลายเป็นบริเวณมืด ถัดจากระยะปลอดการชนออกไปอิเล็กตรอนทุกตัวจะสูญเสียพลังงานส่วนใหญ่โดยการไอออไนซ์โมเลกุลของแก๊ส ไอออนบวกที่เกิดขึ้นเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าอิเล็กตรอนมาก ทำให้ระยะปลอดการชนของอิเล็กตรอนมีการสะสมของไอออนบวกอยู่มาก (Positive Space Charge) ศักย์ไฟฟ้าเกือบทั้งหมดตกคร่อมบริเวณคาโทดคาร์คสเปซนี้ ทำให้สนามไฟฟ้าบริเวณนี้สูงขึ้นมากและมากเกินไปในการเร่งอิเล็กตรอนชนและไอออไนซ์โมเลกุลของแก๊สในเวลาถัดมาจึงทำให้ภายหลังการเกิดนอร์มอลโกลว์ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขั้วอิเล็กโตรดมีค่าลดลงตามกราฟ ดังภาพที่ 2-2 ส่วนอิเล็กตรอนเมื่อเลยจากบริเวณที่ผลิตไอออนของคาร์คสเปซแล้วจะมีพลังงานลดต่ำลงมาก ดังนั้นพลังงานที่เหลือจึงเพียงใช้ในการกระตุ้นโมเลกุลของแก๊สและเกิดการเรืองแสงขึ้น แม้อิเล็กตรอนจะเป็นอนุภาคที่เคลื่อนที่ได้เร็วแต่พลังงานที่เหลือน้อยมากรวมทั้งประจุบวกและประจุสะสมของไอออนทางด้านซ้ายมือในบริเวณคาร์คสเปซทำให้อิเล็กตรอนใช้เวลาในการเคลื่อนที่ผ่านช่วงเรืองแสงนี้นานขึ้นและเกิดการสะสมประจุลบบริเวณนี้จึงเรียกว่า เนกาทีฟ โกลว์ (Negative Glow)

จากนั้นอิเล็กตรอนจะมีพลังงานลดลงจนไม่สามารถกระตุ้น โมเลกุลแก๊สให้เปลี่ยนไปอยู่ในระดับพลังงานสูงได้ ทำให้เกิดบริเวณมืดอีกช่วงหนึ่งเรียกว่า ช่วงมืดฟาราเดย์ (Faraday Dark Space) ถัดจากช่วงนี้กระบวนการที่เกิดขึ้นคล้ายกับการคายรังสีของทาวนเซนด์ซึ่งมีปริมาณอิเล็กตรอนค่อนข้างคงที่ถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าค่าต่ำ ๆ ทำให้อิเล็กตรอนถูกเร่งเข้าสู่แอโนด และมีพลังงานสูงพอสำหรับการกระตุ้น โมเลกุลของแก๊สหรือไอออนไนซ์และเกิดการเรืองแสงขึ้นที่บริเวณนี้อีกครั้งหนึ่ง อิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่เร็วจะถูกกวาดเข้าสู่แอโนดอย่างรวดเร็วทำให้พลาสมาบริเวณนี้มีประจุบวกสูงกว่าจึงเรียกว่า ลำเรืองแสงศักย์ไฟฟ้าบวก (Positive Glow Column)

เนื่องจากการรักษาสภาพ โกลว์ดีสชาร์จขึ้นกับปริมาณของอิเล็กตรอนที่ถูกผลิตขึ้นบริเวณคาโทดจากการชนของไอออนที่ถูกผลิตบริเวณแคโทดโฟลว์ จึงพบว่าการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งแอโนดเพียงเล็กน้อยจะไม่มีผลต่อกระบวนการ โกลว์ดีสชาร์จ เมื่อเลื่อนแอโนดเข้าหาคาโทด จนพ้นช่วงมืดฟาราเดย์ เข้าสู่แคโทดโฟลว์จนถึงช่วงคาโทดคาร์คสเปซ ทำให้ปริมาณไอออนที่ถูกผลิตจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิมีปริมาณน้อยลง การรักษาสภาพ โกลว์ดีสชาร์จไว้จำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นซึ่งจะส่งผลถึงปริมาณไอออนที่ถูกผลิตสูงขึ้นด้วย การโกลว์ในลักษณะนี้จะเรียกว่า ออบสตรัคต์ โกลว์ (Obstructed Glow) และเมื่อเลื่อนแอโนดเข้าใกล้คาโทดต่อมาจนพ้นขอบของ คาโทด คาร์คสเปซ ซึ่งมีระยะสั้นกว่าระยะปลอดการชนของอิเล็กตรอน จะไม่มีการผลิตไอออนเกิดขึ้นและกระบวนการคายรังสีไว้ได้ และถ้าหากมีสิ่งสกปรกบริเวณคาโทดการอาร์คอาจเกิดขึ้นได้โดยไม่เกิดการ โกลว์ดีสชาร์จก็ได้

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริง

การเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริง เป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางที่เกิดจากสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริง การเคลือบด้วยวิธีนี้เกิดขึ้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงวิ่งเข้าชนวัสดุรองรับและมีการพอกพูนและโตเป็นฟิล์มบางในที่สุด กระบวนการสปัตเตอริงคือการทำให้อะตอมหลุดจากผิวของวัสดุโดยการชนของอนุภาคพลังงานสูงแล้วมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิวสารเคลือบ โดยอนุภาคที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ และเนื่องจากไอออนที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงในการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริงจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่าวิธีการระเหยสารมาก ดังนั้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบวิ่งเข้ากระทบแผ่นวัสดุรองรับก็จะฝังตัวแน่นลงในเนื้อวัสดุที่ต้องการเคลือบมากกว่าวิธีการระเหยสาร ดังนั้นการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริงจะทำให้การยึดเกาะระหว่างสารเคลือบกับวัสดุรองรับดีกว่า (พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ และธณัฐา รัตนะ, 2547; Chapman, 1980)

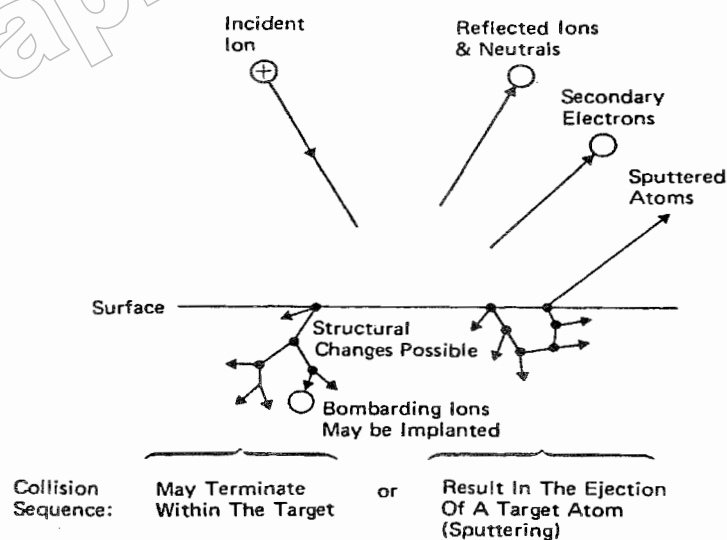
เมื่อผิวหน้าของวัสดุถูกระดมยิงด้วยอนุภาคพลังงานสูงจะทำให้เกิดการสึกกร่อนและมีอนุภาคที่ผิวหน้าของวัสดุนั้นหลุดมา เนื่องจากการชนของอนุภาคพลังงานสูงกับอนุภาคที่ผิวหน้าปรากฏการณ์ที่อนุภาคผิวหน้าวัสดุหลุดออกมานี้เรียกว่า สปีดเตอร์ (Sputter) หรือสปีดเตอรिंग (Sputtering) กระบวนการสปีดเตอรिंगนี้ถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อ 100 กว่าปีที่ผ่านมาโดย grove ซึ่งในขณะนั้นสปีดเตอรिंगเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดความเสียหายกับคาโทดและกริดในหลอดคิซิสอาร์จ แต่ปัจจุบันมีการนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางเช่น การทำความสะอาดผิวหน้า (Surface Cleaning) การกัดเซาะ (Etching) การวิเคราะห์ชั้นผิวหน้าของวัสดุ (Surface Layer Analysis) และการเคลือบฟิล์มบาง

สำหรับแนวคิดเบื้องต้นเกี่ยวกับกระบวนการสปีดเตอรिंग อธิบายได้ดังนี้

1. อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ เมื่อวิ่งชนผิวหน้าวัสดุจะเกิดปรากฏการณ์ดังนี้

1.1 การสะท้อนที่ผิวหน้าของไอออน (Reflected Ion and Neutral) ไอออนอาจสะท้อนกลับจากผิวหน้าซึ่งส่วนใหญ่จะสะท้อนออกมาในรูปของอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้าอันเกิดจากการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิวเป้าสารเคลือบ

1.2 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สอง (Secondary Electron Emission) จากการชนของไอออนอาจทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองจากเป้าสารเคลือบถ้าไอออนนั้นมีพลังงานสูงพอ



ภาพที่ 2-5 อันตรกิริยาระหว่างไอออนกับพื้นผิววัสดุ (Chapman, 1980)

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

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

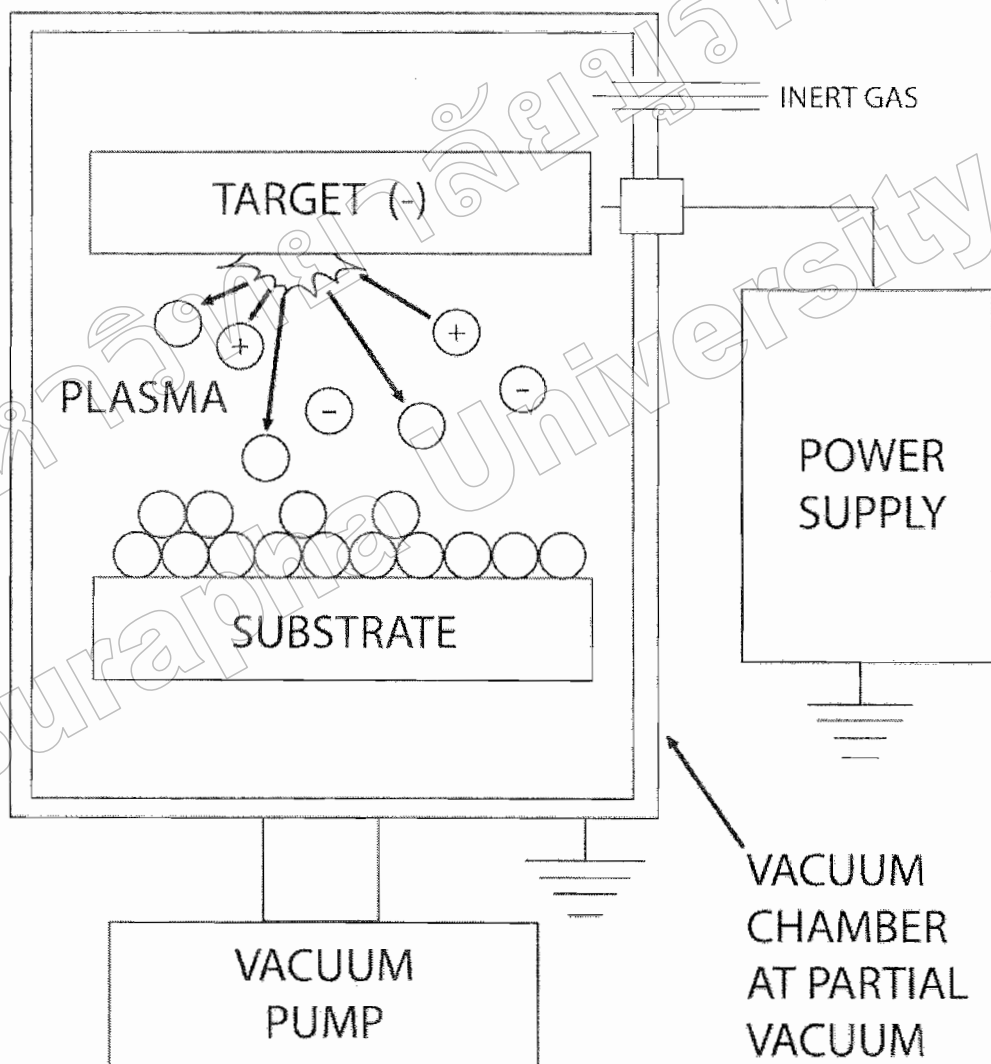
1.5 การสปัตเตอร์ (Sputter) การชนของไอออนอาจทำให้เกิดกระบวนการชนกันแบบต่อเนื่องระหว่างอะตอมของเป้าอันทำให้เกิดการปลดปล่อยอะตอมจากเป้าสารเคลือบซึ่งเรียกว่ากระบวนการสปัตเตอร์

2. กระบวนการสปัตเตอร์เป็นกระบวนการที่อะตอมผิวหน้าของวัสดุถูกทำให้หลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูง โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุดังกล่าว กระบวนการนี้อ่อนกว่าที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ ดังนั้นสิ่งที่จำเป็นในกระบวนการสปัตเตอร์ คือ

2.1 เป้าสารเคลือบ ทำหน้าที่เป็นเป้าให้อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนจนมีการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลือบลงเคลือบบนวัสดุรองรับ

2.2 อนุภาคพลังงานสูง ซึ่งวิ่งชนเป้าสารเคลือบ แล้วทำให้อะตอมของเป้าสารเคลือบหลุดออกมา ปกติอนุภาคพลังงานสูงนี้อาจเป็นกลางทางไฟฟ้า เช่น นิวตรอน หรืออะตอมของธาตุต่าง ๆ แต่การให้อนุภาคที่เป็นกลางมีพลังงานสูงเกิน 10 eV เพื่อใช้ในกระบวนการสปัตเตอร์ทำได้ค่อนข้างยาก วิธีการหนึ่งที่นิยมคือการเร่งอนุภาคประจุภายใต้สนามไฟฟ้า ซึ่งสามารถควบคุมระดับพลังงานไอออนตามต้องการ อิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นได้ง่ายและสามารถเร่งให้มีพลังงานสูงภายใต้สนามไฟฟ้าได้ แต่อิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่าอะตอมของสารเคลือบมากทำให้การถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมต่ออะตอมสารเคลือบนั้นเป็นไปได้โดยไม่มีประสิทธิภาพและไม่สามารถทำให้กระบวนการสปัตเตอร์เกิดขึ้นได้ ตามทฤษฎีทางฟิสิกส์การชนกันระหว่าง 2 อนุภาคที่มีการส่งถ่ายพลังงานและโมเมนตัมดีที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อมวลของอนุภาคทั้งสองมีค่าเท่ากัน ดังนั้นเราจึงเลือกการเร่งไอออนของก๊าสในสนามไฟฟ้าเป็นอนุภาควิ่งชนเป้าสารเคลือบซึ่งให้อัตราการปลดปล่อยเป้าสารเคลือบสูงเพียงพอกับความต้องการ

2.3 การผลิตอนุภาคพลังงานสูง อนุภาคพลังงานสูงในระบบสปัตเตอริงนี้จะต้องถูกผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้กระบวนการเคลือบสารเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจนได้ความหนาฟิล์มบางตามต้องการ ทั้งนี้สามารถทำได้หลายวิธี เช่นการใช้ลำอนุภาคจากปืนไอออนที่มีปริมาณการผลิตไอออนในอัตราสูงหรือผลิตจากกระบวนการโกลว์ดีสชาร์จ เนื่องจากปืนไอออนมีราคาค่อนข้างสูงและให้ไอออนในพื้นที่แคบ กระบวนการสปัตเตอริงทั่วไปในระดับอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้กระบวนการโกลว์ดีสชาร์จในการผลิตอนุภาคพลังงานสูง



ภาพที่ 2-6 ลักษณะของเครื่องเคลือบสุญญากาศด้วยวิธีสปัตเตอริง

3. ค่าyield ของสปัตเตอริง (Sputtering Yield: S) คือ ค่าเฉลี่ยปริมาณการหลุดของอะตอมเป้าสารเคลือบต่อปริมาณการชนของไอออน 1 อนุภาค มีหน่วยเป็น อะตอมต่อไอออน โดยการวัดค่าyield นี้ สามารถทำได้โดยการหาน้ำหนักหรือความหนาที่ลดลงของเป้าสารเคลือบ หรือหาได้จากวัสดุทั้งหมดที่ถูกสปัตเตอริง หรืออาจหาได้จากการตรวจวัดสปัตเตอริงอะตอม (Sputter Atom) ขณะที่ยังฟุ้งกระจาย (พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ และธรรณัฐ รัตน์, 2547) ค่าyield ของกระบวนการสปัตเตอริงจะเปลี่ยนไปตามภาวะต่าง 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

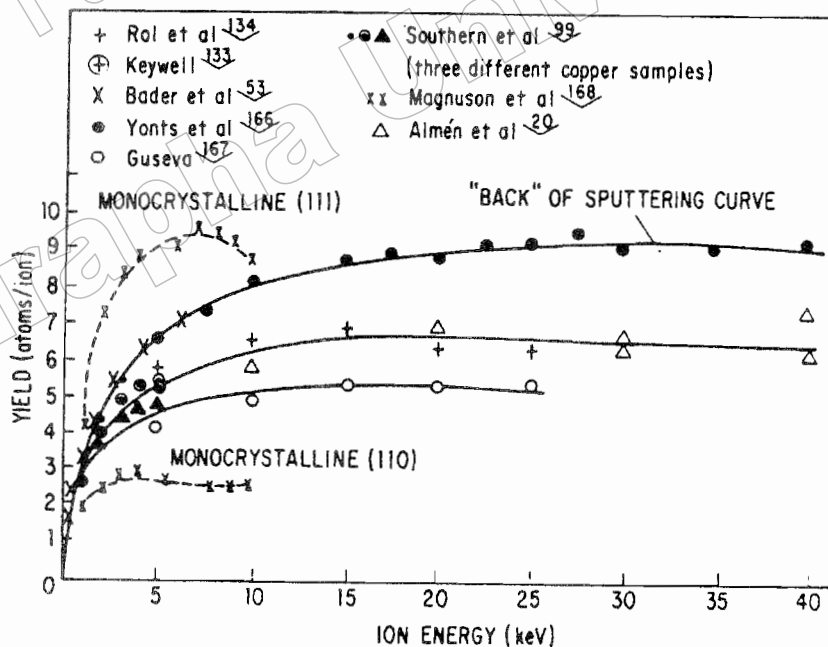
เมื่อพลังงานไอออนมีค่าต่ำมากค่าyield จากกระบวนการสปัตเตอริง จะมีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากไม่สามารถเอาชนะแรงยึดเกาะระหว่างอะตอมบนเป้าสารเคลือบได้ เมื่อไอออนมีพลังงานสูงขึ้นเกินกว่า $4H$ (H คือค่าพลังงานเฉลี่ยที่ใช้ในการระเหิด 1 อะตอม จากผิวสารเคลือบ) ถ้าพลังงานไอออนสูงมากพอในการทำให้เกิดกระบวนการชนอย่างต่อเนื่องระหว่างอะตอมสารเคลือบและเริ่มมีการปลดปล่อยอะตอมสารเคลือ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

เมื่อไอออนชนมีพลังงานสูงขึ้นyield จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลในช่วงแรกและเปลี่ยนเป็นการเพิ่มแบบเชิงเส้นจากนั้นจึงมีการอิ่มตัว (Saturation) ของค่าyield เมื่อพลังงานไอออนมีค่าสูงมาก ทั้งนี้เนื่องจากไอออนพลังงานสูงมีโอกาสนในการฝังตัวบนผิวเป้าสารเคลือบสูงขึ้นทำให้yield ของสารเคลือบมีค่าคงที่ จากนั้นจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มพลังงานไอออนให้สูงมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2-7

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 2-7 ยึดของทองแดงที่ถูกชนด้วยไอออนจากแก๊สอาร์กอนที่พลังงานต่าง ๆ

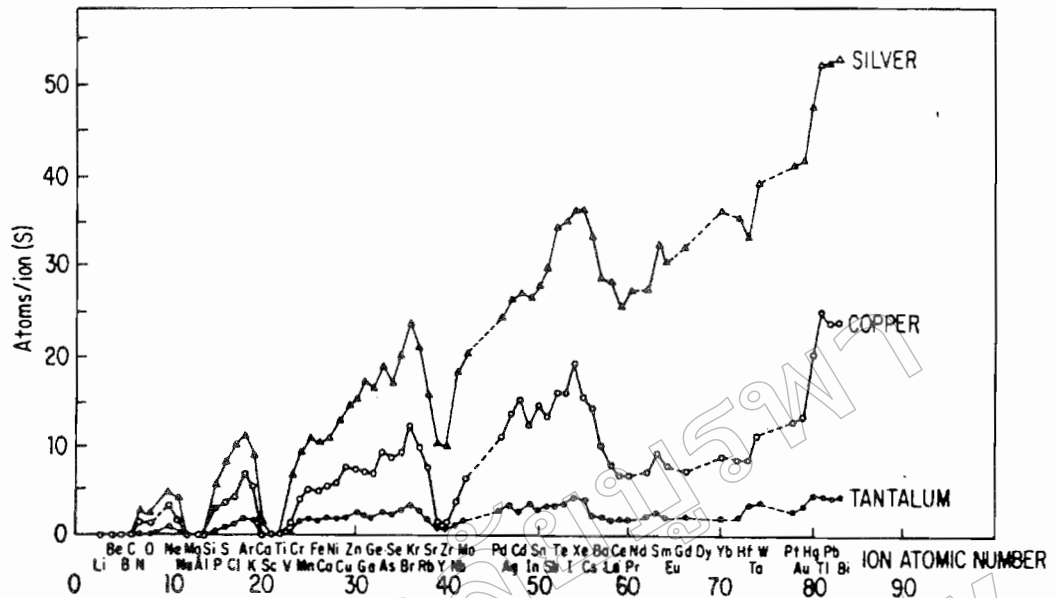
(Maissel & Glang, 1970)

3.2 เปลี่ยนแปลงตามระนาบผลึกของผิวเป้าสารเคลือบ จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้เป้าสารเคลือบที่เป็นผลึกเดี่ยวค่าyieldจะมีค่ามากที่สุดเมื่อไอออนชนเป้าในแนวระนาบที่มีอะตอมหนาแน่นที่สุด และมีค่าต่ำในระนาบที่มีอะตอมเบาบาง ในทองแดงซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ FCC (Face Centered Cubic) พบว่าการชนบนระนาบ (111) ซึ่งมีความหนาแน่นอะตอมสูงสุด yield จะมีค่าสูงสุดเมื่อใช้กำลังงานไอออนในการชนค่าเดียวกัน ส่วนระนาบที่มีความหนาแน่นอะตอมต่ำ ไอออนมีแนวโน้มวิ่งฝังตัวในเป้าสารเคลือบมากขึ้น

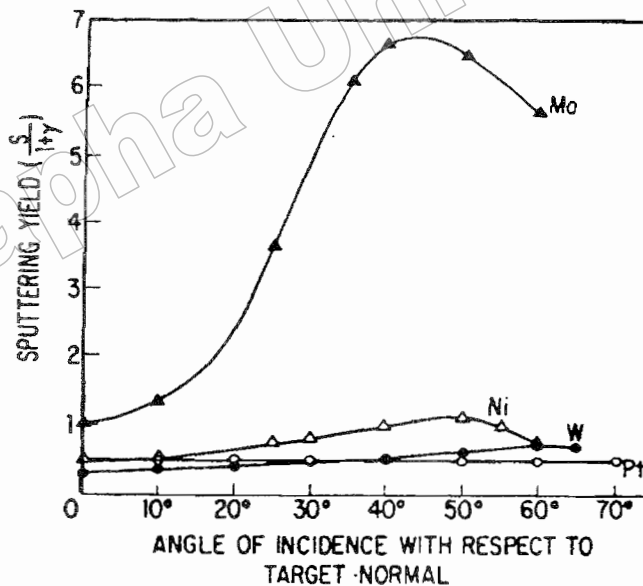
3.3 เปลี่ยนแปลงตามชนิดของไอออนที่ชนเป้าสารเคลือบ ค่าyieldจากเป้าสารเคลือบชนิดเดียวกัน เมื่อใช้ไอออนต่างชนิดกันวิ่งชนจะมีค่าแตกต่างกันออกไป แม้สมการที่ 1 แสดงให้เห็นว่าการถ่ายเทพลังงานระหว่าง 2 อนุภาคที่ชนกันจะมีค่าสูงสุดเมื่อมวลของอะตอมทั้งสองมีค่าเท่ากัน แต่อะตอมบนเป้าสารเคลือบยึดเกาะกับอะตอมข้างเคียงจึงทำตัวเสมือนมีมวลยังผลสูงกว่ามวลของอะตอมเดี่ยวจึงพบว่าyield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

3.4 เปลี่ยนแปลงตามมุมตกกระทบของไอออนบนเป้าสารเคลือบ จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มมุมเอียงของการชนจากไอออนบนเป้าหมายมากขึ้น yield จะมีค่าสูงขึ้นตามมุมที่เอียง เนื่องจากอะตอมสารเคลือบที่หลุดออกมาเปลี่ยนจากการกระเจิงกลับ (Back Scattering) เป็นการกระเจิงไปข้างหน้า (Forward Scattering) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ต้องการจำนวนครั้งของการชนระหว่างอะตอมน้อยกว่าทำให้yieldสูงขึ้นจนถึงจุดหนึ่งซึ่งมีค่าสูงสุดที่องศาการเอียงมากกว่า 45° จากนั้น yield จะมีค่าลดลงเมื่อมุมสูงขึ้น และเป็นศูนย์เมื่อมุมเอียงมีค่า 90° โดยขณะนั้นพื้นที่การชนเมื่อมองจากไอออนมีค่าเป็นศูนย์ ภาพที่ 2-9

4. ความเร็วและพลังงานของอะตอมที่ถูกสปัตเตอร์หลุดออกจากผิวหน้าเป้าสารเคลือบ ด้วยวิธีการสปัตเตอร์มีพลังงานจลน์ค่อนข้างสูงและมากกว่าพลังงานของอะตอมที่หลุดออกด้วยวิธีการระเหิดสารประมาณ 50 - 100 เท่า อะตอมมีการกระจายพลังงานแบบ Maxwellian โดยที่พลังงานส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่า 10 eV และอีกส่วนหนึ่งมีพลังงานระหว่าง 10 - 40 eV ถ้าไอออนที่มีพลังงานสูงขึ้น พลังงานเฉลี่ยของอะตอมจากสปัตเตอร์จะมีค่าสูงขึ้นจนเมื่อไอออนที่วิ่งชนมีพลังงานเกิน 1 keV พลังงานเฉลี่ยของอะตอมจากการสปัตเตอร์จะไม่เพิ่มขึ้นและเป้าที่มีค่าyieldสูงมีแนวโน้มทำให้พลังงานเฉลี่ยของอะตอมที่หลุดออกมามีค่าต่ำ เนื่องจากไอออนที่วิ่งชนเมื่อเฉลี่ยพลังงานให้กับอะตอมที่หลุดออกมาจำนวนมาก อะตอมแต่ละตัวจะรับพลังงานเฉลี่ยจากไอออนได้น้อยลง



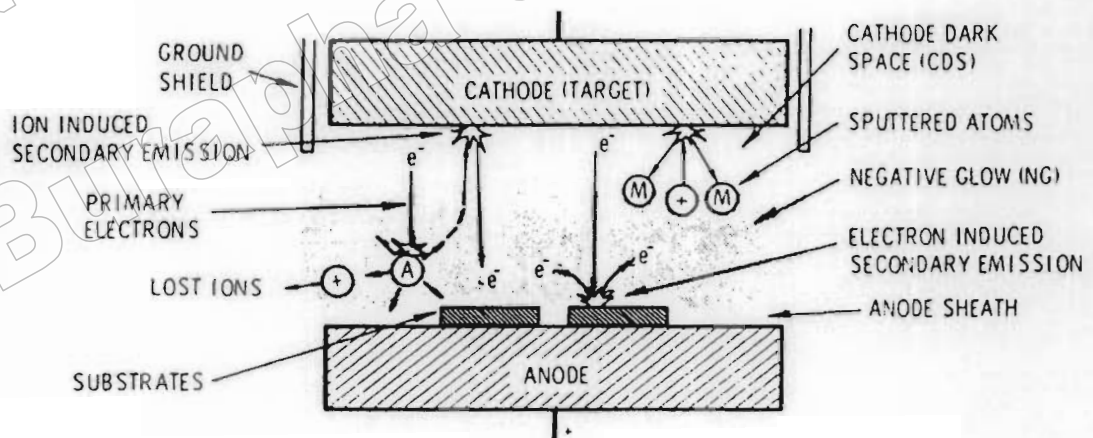
ภาพที่ 2-8 การเปลี่ยนแปลงค่าyieldของเป้าทองแดง (Cu) , เงิน (Ag) และแทนทาลัม (Ta) เมื่อใช้ไอออนพลังงาน 45 keV จากธาตุที่มีเลขอะตอมค่าต่าง ๆ (Maissel & Glang, 1970)



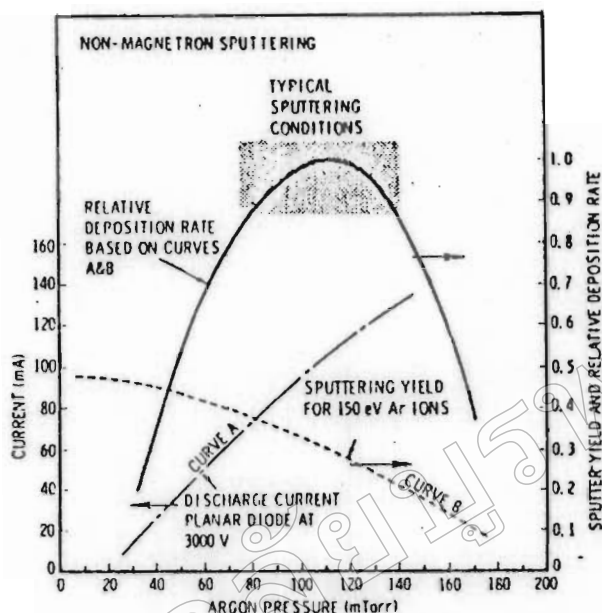
ภาพที่ 2-9 การเปลี่ยนแปลงของyieldเมื่อใช้ไอออนของปรอทพลังงาน 200 eV ชนเป้าหมาย (Ni), โมลิบดีนัม (Mo) , ทังสเตน (W) และทองคำขาว (Pt) ที่มุมการตกกระทบค่าต่าง ๆ (วัดเทียบกับแนวขนตั้งฉากกับเป้า) (Maissel & Glang, 1970)

ระบบเคลือบแบบดีซีสปัตเตอริง

ภาพที่ 2-10 แสดงระบบเคลือบแบบดีซีสปัตเตอริง อย่างง่ายที่สุด (พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ และธนัสดา รัตนะ, 2547; Bunshah, 1982; Smith, 1995) ซึ่งประกอบด้วยคาโทด คือ แผ่นเป้าสารเคลือบและอโนด คือ ที่วางวัสดุรองรับหรือชิ้นงานที่ต้องการเคลือบ ปกติระยะระหว่างคาโทดและวัสดุรองรับจะอยู่ระหว่าง 4 - 10 cm เพื่อป้องกันการสูญเสียอะตอมสารเคลือบที่ผนังของภาชนะสุญญากาศ โดยทั่วไประยะคาร์คัสเปช อยู่ระหว่าง 1 - 4 cm โดยอโนดจะอยู่บริเวณนากาที่ฟิโกลัว ส่วนอุปกรณ์ทำงานจะอยู่ในช่วงแอมบอร์มอลโกลัวดิซาร์จ แก๊สที่ใช้เป็นแก๊สเฉื่อยซึ่งให้ศักย์สูงและไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคลือบ (ปกติใช้แก๊สอาร์กอน) ขณะเกิดโกลัวดิซาร์จที่ความดันต่ำหนึ่ง กระบวนการไอออนในเซชันจะรักษาสภาพโกลัวดิซาร์จไว้ที่ระยะคาร์คัสเปชไม่มากกว่าระยะระหว่างคาโทดและอโนด เมื่อความดันลดลงหรือแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดสูงขึ้น ระยะปลดการชนของอิเล็กตรอนจะสูงขึ้น ทำให้ระยะคาร์คัสเปชขยายตัวออกและแหล่งผลิตไอออนในระบบมีปริมาณน้อยกระแสลดลงและอะตอมที่ถูกสปัตเตอริงมีปริมาณลดลงตามปริมาณของไอออนและกระแสไฟฟ้าในระบบ ที่ความดันต่ำกว่า 10^{-2} mbar ระยะคาร์คัสเปชจะยาวกว่าระยะระหว่างอิเล็กโตรด และกระแสไฟฟ้าลดลงสู่ศูนย์ ทำให้กระบวนการผลิตไอออนสิ้นสุดลงและไม่มีอะตอมหลุดออกจากเป้าสารเคลือบเนื่องจากการสปัตเตอริงอีก



ภาพที่ 2-10 ระบบเคลือบแบบ ดีซี สปัตเตอริง (Bunshah, 1994)



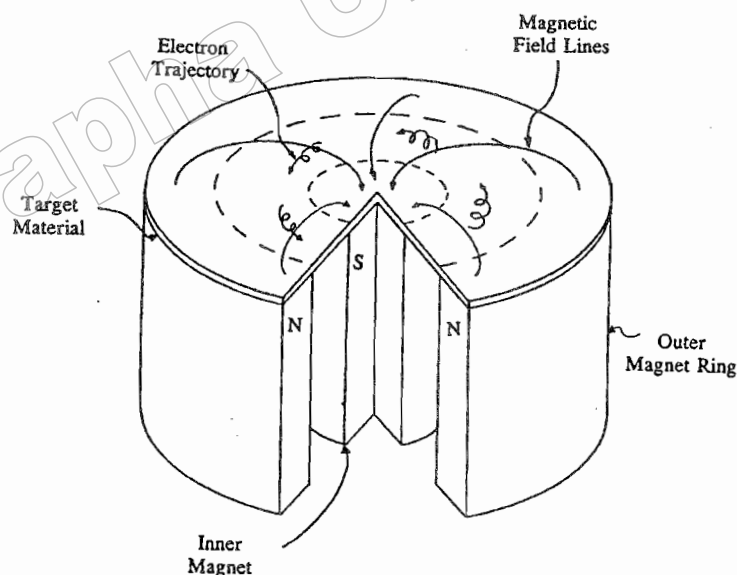
ภาพที่ 2-11 ผลของความดันในระบบที่มีผลต่ออัตราเคลือบ ค่าอิเล็กและกระแสไฟฟ้าในระบบสปัตเตอริงของนิเกิลที่ใช้แรงดันไฟฟ้า 3,000 V ระหว่างขั้วอิเล็กโตรดที่วางห่างกัน 4.5 cm (Vossen & Kerns, 1978)

ขณะที่ความดันสูงขึ้นระยะคาร์คสเปซจะหดสั้นลงบริเวณการผลิตไอออนมีปริมาตรสูงขึ้นกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรเพิ่มขึ้นและกระบวนการสปัตเตอริงเกิดขึ้นในอัตราสูงตามความดัน ดังภาพที่ 2-11 เส้นกราฟ A ขณะที่ความดันภายในระบบสูงขึ้นระยะปลอดการชนระหว่างโมเลกุลของแก๊สมีค่าลดลง อะตอมสารเคลือบที่หลุดออกจากเป้าจะส่งผ่านเคลือบบนวัสดุรองรับได้ยากจากการชนกับโมเลกุลของแก๊สและสะท้อนกลับสู่เป้าสารเคลือบหรือสูญเสียสู่ผนังภาชนะสุญญากาศทำให้ค่าของอิเล็กจากการสปัตเตอริงมีค่าลดลง แต่เมื่อความดันสูงขึ้น ดังภาพที่ 2-11 เส้นกราฟ B ผลรวมระหว่างอิเล็กและกระแสไอออนจะทำให้อัตราการเคลือบมีค่าสูงสุดที่ความดันค่าหนึ่งทั้งนี้พบว่าการสปัตเตอริงนิเกิลเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า 3,000 V ระหว่างขั้วอิเล็กโตรดที่วางห่างกัน 4.5 cm ในแก๊สอาร์กอน การเคลือบจะหยุดที่ความดันมีค่าต่ำกว่า 2.6×10^{-4} mbar และที่ความดันสูงกว่า 1.6×10^{-5} mbar โดยอัตราเคลือบจะมีค่าสูงสุดและลดลงเมื่อความดันสูงเกินค่านี้นั้นบริเวณที่เหมาะสมกับกระบวนการสปัตเตอริงคือบริเวณที่ให้อัตราเคลือบสูงและประสิทธิภาพดีที่สุด จากภาพที่ 2-4 พบว่าความดันที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบคือ 1.0×10^{-5} mbar ความหนาแน่นกระแสประมาณ 1.0 mA/cm^2 ด้วยอัตราเคลือบ $0.036 \mu\text{m/min}$ ซึ่งเป็นอัตราเคลือบที่ค่อนข้างต่ำในขณะที่ใช้แรงดันไฟฟ้าค่อนข้างสูง (พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ และธนัสสา รัตนะ, 2547)

ระบบเคลือบแบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

อัตราการเกิดสปัตเตอริงนั้นขึ้นกับผลคูณระหว่างอีลด์และปริมาณไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบ ดังนั้นการเพิ่มอัตราการสปัตเตอริงนอกจากจะทำได้โดยการเพิ่มอีลด์แล้วยังทำได้โดยการเพิ่มปริมาณไอออนที่วิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ ซึ่งในระบบดีซีสปัตเตอริงปกติ ทำได้เพียงการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรด หรือเพิ่มความดัน ซึ่งจะมีขีดจำกัดสูงสุดที่ ความหนาแน่นกระแสประมาณ 1 mA/cm^2 และความดันประมาณ $1.33 \times 10^{-5} \text{ mbar}$ นอกจากนี้ยังพบว่าในระบบดีซี สปัตเตอริง ทั่วไปอะตอมของแก๊สที่เกิดการไอออไนซ์มีค่าน้อยกว่า 1% เมื่อความดันสูงขึ้น ปริมาณแก๊สที่แทรกตัวในฟิล์มบางที่ได้มีค่าสูงด้วย (พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ และธนัสถา รัตนะ, 2547)

ต่อมาได้มีการพัฒนาระบบใหม่เรียกว่า ระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง (พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ และธนัสถา รัตนะ, 2547; Bunsban, 1994; Smith, 1995) ซึ่งเป็นการใช้สนามแม่เหล็กช่วย โดยจ่ายสนามแม่เหล็กให้มีทิศทางกับผิวหน้าเป้าสารเคลือบและมีทิศตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า ซึ่งช่วยเพิ่มระยะทางเดินของอิเล็กตรอนให้ยาวขึ้น โดยอำนาจของสนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นทางโค้ง (ภาพที่ 2-12) ทำให้การไอออไนซ์เนื่องจากการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมแก๊สเหนี่ยวนำมีค่าสูงขึ้นซึ่งทำให้อัตราการสปัตเตอริงสูงขึ้นด้วย



ภาพที่ 2-12 การเคลื่อนที่ของอนุภาคอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก (Rickerby & Matthews, 1991)

ทั้งนี้จากการศึกษาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก พบว่าถ้าอิเล็กตรอนมีทิศทางการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก อิทธิพลของสนามแม่เหล็กทำให้อนุภาคประจุนั้นเคลื่อนที่ในแนววงกลม (ภาพที่ 2-13 (a)) ด้วยรัศมี

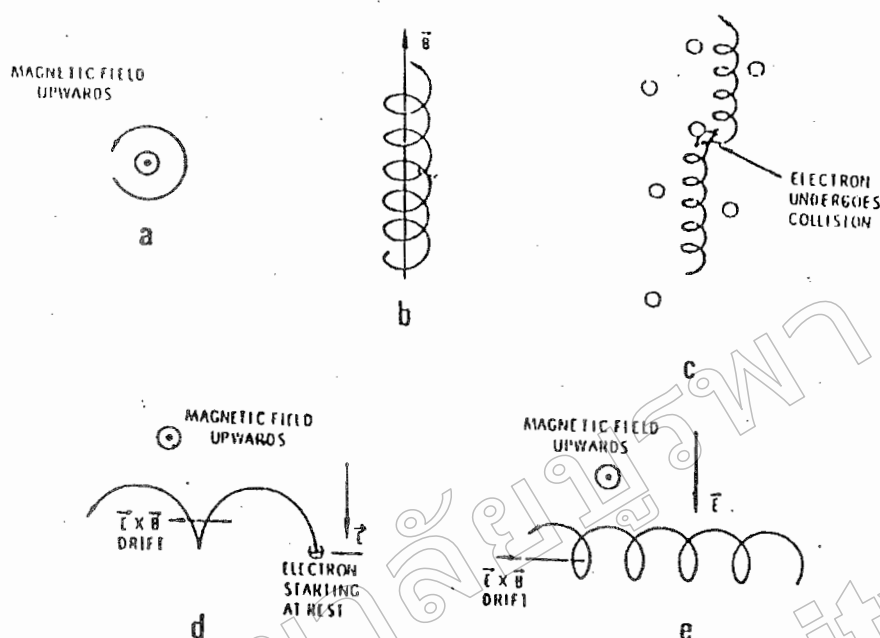
$$r = \frac{3.37 \sqrt{W}}{B} \quad (2-2)$$

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

ถ้าพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กมีค่า 10 eV และสนามแม่เหล็กมีค่าความเข้ม 100 gauss รัศมีการหมุนมีค่าเท่ากับ 0.1 cm ด้วยความถี่การหมุนเท่ากับ $2.8 \times 10^6 \text{ Hz}$ ภาพที่ 2-13 (b) แสดงอิเล็กตรอนมีความเร็วส่วนหนึ่งในแนวขนานกับสนามแม่เหล็ก อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่หมุนควงรอบแนวสนามแม่เหล็กด้วยจำนวนเส้นแรงคงที่ค่าหนึ่งระหว่างนี้ ถ้าอิเล็กตรอนชนกับอะตอมแก๊ส ภาพที่ 2-13 (c) แนวการหมุนควงรอบสนามแม่เหล็กเปลี่ยนไป ถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ภายในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกัน อำนาจของสนามทั้งสองนอกจากจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในแนวโค้งแล้วยังสามารถทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเรียกว่าการเคลื่อนที่แบบลอยเลื่อน (Drift motion) มีค่าเท่ากับ

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

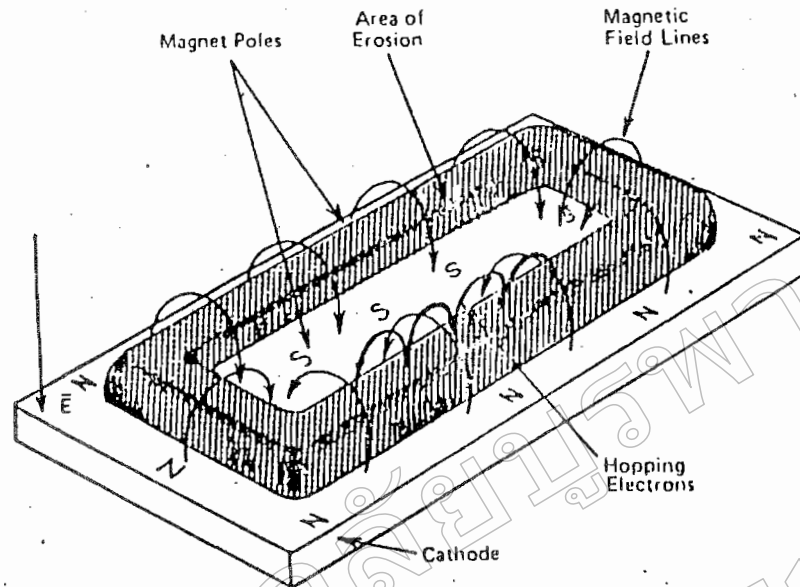
เมื่อ E คือสนามไฟฟ้าหน่วยเป็น V/cm
 B คือความเข้มสนามแม่เหล็กในหน่วย gauss



ภาพที่ 2-13 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามต่าง ๆ โดยที่ a, b, c เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กอย่างเดียว ส่วน d และ e เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าร่วมกันในลักษณะต่าง ๆ (Bunshah, 1994)

กรณีสนามไฟฟ้าบริเวณดาร์คสเปซมีค่าประมาณ $1,000 \text{ V/cm}$ และสนามแม่เหล็กมีค่าประมาณ 100 gauss จะให้ค่าความเร็วลอยเลื่อน (Drift Velocity) เท่ากับ 107 m/s ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูงกรณีพลังงานเริ่มต้นของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้า การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเป็นรูป Cycloid ดังภาพที่ 2-13 (d) ถ้าอิเล็กตรอนมีพลังงานเริ่มต้นสูงกว่าพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้า การเคลื่อนที่แบบลอยเลื่อน จะอยู่ในแนววงกลมซ้อนกันดังแสดงในภาพที่ 2-13 (e) พฤติกรรมที่ปรากฏต่ออิเล็กตรอนนี้จะเด่นชัดมาก ถึงแม้จะใช้สนามแม่เหล็กมีค่าน้อย ๆ ระหว่าง $50 - 500 \text{ gauss}$ แต่มีผลในการเบี่ยงเบนแนวทางเดินของไอออน (ซึ่งมีมวลสูงกว่าอิเล็กตรอนมาก) อย่างไม่เด่นชัด

ระบบสปัตเตอร์ริงที่ใช้สนามแม่เหล็กช่วยเพิ่มปริมาณไอออนนั้น ถ้าสนามแม่เหล็ก มีทิศทางขนานกับสนามไฟฟ้าจะเรียกว่า สนามตามยาว (Longitudinal Field) จะทำให้ประสิทธิภาพ การเพิ่มไอออนไม่สูงนักแต่ไม่ทำให้แนวการเกิดโกล์ด์สซาร์จเปลี่ยนแปลงไปและยังสามารถรักษา ความสม่ำเสมอของฟิล์มบางไว้ได้ดี กรณีของสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าเรียกว่า สนามตามขวาง (Transverse Field) โดยกระบวนการเพิ่มปริมาณไอออนเกิดขึ้นดังนี้ หลังจาก ที่ไอออนบวกชนกับเป้าสารเคลือบและเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองออกมา อิเล็กตรอนชุด ที่สองจะเคลื่อนที่ในลักษณะเดียวกับภาพที่ 2-13 (d) ทำให้อิเล็กตรอนถูกกักอยู่ในบริเวณ สนามแม่เหล็กใกล้คาโทด และเคลื่อนที่แบบลอยเลื่อน ตามแนวผิวหน้าของคาโทด (ภาพที่ 2-14) ทำให้อิเล็กตรอนมีโอกาสนชนกับโมเลกุลแก๊สบริเวณผิวหน้าเป้าสารเคลือบมากขึ้นจนเพิ่มปริมาณ ไอออนสูงมากใกล้ผิวเป้าสารเคลือบ อิเล็กตรอนตัวใดที่ไม่ชน โมเลกุลของแก๊สจะเดินทางเป็นวง โค้งเข้าชนเป้าสารเคลือบและผลิตอิเล็กตรอนชุดที่สองมากขึ้นเป็นผลทำให้ไอออนถูกผลิตใน ปริมาณสูงมากและเกิดโกล์ด์สซาร์จ ทำให้เกิดสเปซชาร์จจากไอออนบวกสูงที่ผิวคาโทด ซึ่งอาจ สั้นกว่าระยะปลอดการชน ใน ดิซีสปัตเตอร์ริงที่ความดันใช้งานมาก แรงเคลื่อนไฟฟ้าเกือบทั้งหมด จะตกคร่อมบริเวณนี้และมีค่าสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณคาร์ลสเปซในดิซีสปัตเตอร์ริง ขณะไม่มี สนามแม่เหล็กมากทำให้ความต้องการแรงดัน ไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดของระบบแมกนีตรอน สปัตเตอร์ริง ลดลงทั่วไปมีค่าประมาณ 300 - 800 V ถ้าใช้สนามแม่เหล็กกับแมกนีตรอนทรงกระบอก จะเรียกว่า แมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงทรงกระบอก (Cylindrical Magnetron Sputtering) และถ้าใช้ สนามแม่เหล็กกับระบบดิซีสปัตเตอร์ริงที่ใช้เป้าแบบแผ่นราบจะเรียกว่า พลาเนียร์แมกนีตรอน สปัตเตอร์ริง (Planar Magnetron Sputtering)



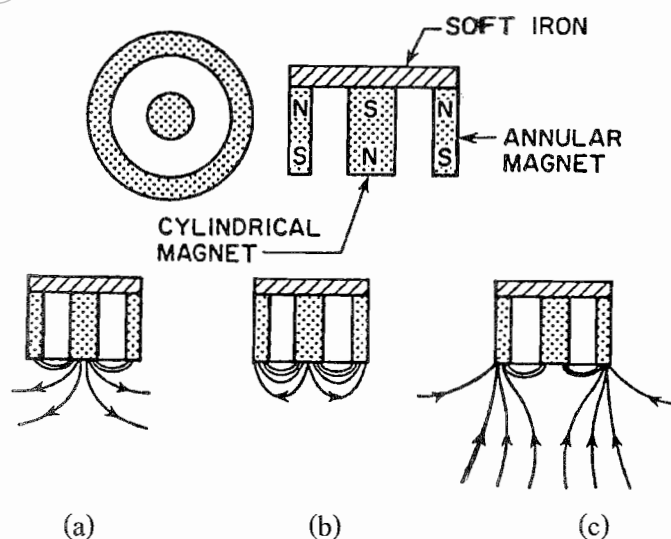
ภาพที่ 2-14 การจัดสนามแม่เหล็กและแนวการกักตร้อนของเป้าสารเคลือบในระบบปลานาร์แมกนีตรอนสปัตเตอริง (Chapman, 1980)

ประสิทธิภาพการเพิ่มไอออนที่สูงมากในระบบแมกนีตรอนและพลาสมาที่เกิดขึ้นจะเข้มข้นมากบริเวณเป้าสารเคลือบทำให้อัตราการสปัตเตอริงของระบบนี้มีค่าสูง ขณะที่ความดันในระบบมีค่าต่ำแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าเกือบคงที่ที่ทุกค่าของอัตราการสปัตเตอริง แมกนีตรอนสปัตเตอริง ทรงกระบอกทั่วไปมีอัตราการสปัตเตอริงสูงกว่า $1.0 \mu\text{m}/\text{min}$ และมีอัตราเคลือบสูงกว่า $0.2 \mu\text{m}/\text{min}$ ความหนาแน่นกระแสที่ผิวคาโทด ประมาณ $20.0 \text{ mA}/\text{cm}^2$ แรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าระหว่าง $300 - 800 \text{ V}$ ที่ความดันประมาณ $5.33 \times 10^{-5} \text{ mbar}$ ประสิทธิภาพการเคลือบสูงขึ้นกว่า 10 เท่าตัว นอกจากนี้ยังสามารถขยายสเกลใช้กับระบบสปัตเตอริงขนาดใหญ่ได้ง่ายเมื่อออกแบบใช้งานร่วมกับไดรไอคสปัตเตอริง ระบบสามารถเคลือบได้ที่ความดันต่ำถึง 10^{-5} mbar

ระบบเคลือบแบบอเนกประสงค์แมกนีตรอนสปัตเตอริง

ในการเคลือบฟิล์มพบว่าถ้าระดมยิงไอออนระหว่างเกิดฟิล์มจะเป็นการเปลี่ยนแปลงฟิล์มหลายอย่างเช่น พฤติกรรมการเกิดนิวเคลียส (Nucleation Behaviour) สัณฐานวิทยา (Morphology) องค์ประกอบ (Composition) ทิศทางการจัดเรียงตัว และสมบัติเชิงกล เป็นต้น ในกรณีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ไอออนที่ใช้ในการระดมยิงวัสดุรองรับจะมาจากประจุไฟฟ้าที่อยู่รอบวัสดุรองรับ ซึ่งทำได้โดยการจ่ายศักย์ลบประมาณ 1 - 500 V ให้กับวัสดุรองรับ อย่างไรก็ตาม วัสดุที่มีความหนาแน่นกระแสที่ฟิล์มหรือผิวหน้าของวัสดุรองรับ สำหรับ ระบบดีซีแมกนีตรอน ปกติจะมีค่าต่ำประมาณ 0.05 - 0.10 ไอออน/อะตอมสารเคลือบ แต่การใช้งานจริงต้องมีค่าสูงกว่านี้ (Rohde & Munz, 1991)

สำหรับการเคลือบแข็ง (Hard coating) ฟิล์มบางที่ต้องการนั้นจะต้องมีช่องว่าง (Voids) ในเนื้อฟิล์มน้อยที่สุด ซึ่งจะทำให้ฟิล์มบางที่ได้นั้นมีความทนต่อการกัดกร่อน (Corrosion) และทนต่อการขัดสี (Wear Resistance) มากยิ่งขึ้น โดยการลดช่องว่างในเนื้อฟิล์มนี้สามารถทำได้โดยการเพิ่มความต่างศักย์ไบแอตให้กับวัสดุรองรับ แต่ก็จะทำให้เกิดความเค้นและความบกพร่อง (Defects) ภายในเกรน (Grain) ของฟิล์มมากขึ้นเมื่อความต่างศักย์ไบแอตเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งจะทำให้คุณภาพของฟิล์มและการยึดติดของฟิล์มกับวัสดุรองรับลดลง ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไอออน (อัตราส่วนของไอออน/อะตอมสารเคลือบ) ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้ระบบเคลือบแบบอเนกประสงค์แมกนีตรอนสปัตเตอริง (Unbalanced Magnetron Sputtering) (Rohde & Munz, 1991; Sproul, 1992)



ภาพที่ 2-15 ลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กของระบบอเนกประสงค์แมกนีตรอนสปัตเตอริง

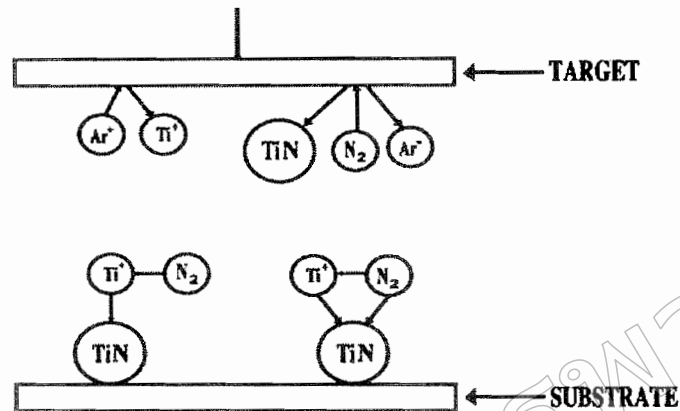
(Rickerby & Matthews, 1991)

ระบบอานาลาสนซ์แมกนีตรอนสปัตเตอริง ได้รับการคิดค้นและตีพิมพ์เผยแพร่โดย Window และ Savvides ครั้งแรกในปี ค.ศ.1986 โดยทั้งสองพบว่าการติดตั้งแม่เหล็กที่คาโทดของระบบสปัตเตอริงปกติ นั้น ถ้าหากทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กด้านใดด้านหนึ่งมากหรือน้อยกว่าอีกด้านหนึ่งแล้วสนามแม่เหล็กที่คาโทดจะมีลักษณะไม่สมมาตร ทำให้ปริมาณไอออนที่วิ่งเข้าชนหรือระดมยิงวัสดุรองรับนั้นมีปริมาณเพิ่มขึ้นมากกว่าปกติ ซึ่งจะมีผลต่อคุณภาพของฟิล์มโดยตรงการจัดแม่เหล็กของระบบนี้อาจแบ่งเป็น 3 แบบ คือความเข้มสนามของแม่เหล็กที่ด้านในมากกว่าด้านนอก (ภาพที่ 2-15 (a)) หรือกลับกัน (ภาพที่ 2-15 (c)) หรือใกล้เคียงกัน (ภาพที่ 2-15 (b))

ถ้าจัดแม่เหล็กตามภาพที่ 2-15 (a) ไอออนที่ระดมยิงวัสดุรองรับจะมีค่าต่ำ (อัตราส่วนไอออน/ อะตอมสารเคลือบประมาณ 0.25 : 1) ส่วนการจัดแม่เหล็กตามภาพที่ 2-15 (c) ไอออนที่ระดมยิงวัสดุรองรับจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นทำให้อัตราส่วนไอออน/ อะตอมสารเคลือบมีค่าสูงขึ้นคือประมาณ 2 : 1 (เมื่อใช้ความต่างศักย์ไบแอสตั้ง) ปัจจุบันมีนักวิจัยหลายกลุ่มที่นำแนวคิดนี้ไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย ซึ่งมีทั้งที่ใช้แม่เหล็กแบบถาวรและแม่เหล็กไฟฟ้า จากการศึกษาของ Musil และ Kadlec ที่ระบบเคลือบใช้อานาลาสนซ์ฟลานาร์แมกนีตรอนเดี่ยวและขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า 2 ขดเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์ที่ระยะเป้าสารเคลือบและวัสดุรองรับประมาณ 200.0 mm โดยใช้ความต่างศักย์ไบแอสในช่วง -5 ถึง -100 V พบว่าสามารถทำให้ได้ความหนาแน่นกระแสสูงถึง 6.0 mA/ cm² ซึ่งสูงมากพอสำหรับใช้ในงานอุตสาหกรรม (Munz, 1991)

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีแอคทีฟสปัตเตอริง

สำหรับกระบวนการแอคทีฟสปัตเตอริง (Reactive Sputtering) มติ ห่อประชุม (2548) ได้อธิบายไว้ว่า เป็นกระบวนการสปัตเตอริงที่มีการป้อนแก๊สไวปฏิกิริยา (Reactive Gas) เข้าสู่ระบบ เพื่อให้เกิดสารประกอบของฟิล์มตกเคลือบบนชิ้นงานหรือวัสดุรองรับ การสปัตเตอริงที่มีเป้าสารเคลือบเป็นโลหะบริสุทธิ์ โดยการป้อนแก๊สไวปฏิกิริยา จะทำให้เกิดสารประกอบต่าง ๆ ของโลหะได้ เช่น การป้อนแก๊สไนโตรเจนอาจทำให้เกิดโลหะไนไตรด์ ถ้าป้อนแก๊สอะเซททิลีน (C₂H₂) หรือ มีเทน (CH₄) อาจเกิดเป็นสารประกอบของโลหะคาร์ไบด์ เป็นต้น โดยปกติความดันแก๊สไวปฏิกิริยาที่ใช้ค่อนข้างต่ำจนไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาในสภาวะปกติ อย่างไรก็ตามคาดกันว่าอิเล็กตรอนในพลาสมาที่มีส่วนในการกระตุ้นหรือไอออไนซ์แก๊สไวปฏิกิริยาให้มีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับโลหะได้สูงกว่าสภาวะปกติ โดยแก๊สไวปฏิกิริยา เช่น แก๊สไนโตรเจน (N₂) อาจรวมตัวกันกับโลหะ เช่น ไทเทเนียม (Ti) แล้วเกิดเป็นสารประกอบไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) ตามภาพที่ 2-16 ได้เป็น 3 ลักษณะ ดังนี้



ภาพที่ 2-16 การเกิดปฏิกิริยารวมตัวกันเป็นสารประกอบระหว่างแก๊สไวปฏิกิริยากับอะตอมเป้าสารเคลือบในบริเวณต่าง ๆ (มติ ห่อประชุม, 2548)

1. แก๊สไวปฏิกิริยาเช่นแก๊สไนโตรเจนทำปฏิกิริยากับอะตอมไทเทเนียมที่ผิวหน้าเป้าของสารเคลือบกลายเป็นสารประกอบไทเทเนียมไนไตรด์แล้วถูกสปัตเตอร์ให้หลุดออกแล้วตกเคลือบลงบนแผ่นวัสดุรองรับ ปฏิกิริยาส่วนนี้เกิดขึ้นสูงเมื่อความดันย่อยของแก๊สไวปฏิกิริยาในระบบมีค่าสูง พบว่า ในการเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์บนฟิล์มเคลือบที่เป้าสารเคลือบ ส่วนที่มีอัตราการสปัตเตอร์ต่ำจะปรากฏฟิล์มของสปีทงไทเทเนียมบริเวณนั้น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Target Poisoning มีผลทำให้อัตราการเคลือบลดลง

2. แก๊สไวปฏิกิริยาเช่นแก๊สไนโตรเจนรวมตัวกับอะตอมไทเทเนียมที่ถูกสปัตเตอร์ในระหว่างทางวิ่งสู่แผ่นวัสดุรองรับแล้วตกเคลือบบนแผ่นวัสดุรองรับ กระบวนการนี้ในทางทฤษฎีถือว่าเกิดได้น้อยมากเนื่องจากสภาวะของการทำปฏิกิริยาไม่เหมาะสมตามกฎอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัม แต่เป็นไปได้ที่การรวมตัวของสารประกอบจะเกิดในช่วงนี้

3. แก๊สไวปฏิกิริยาเช่นแก๊สไนโตรเจนรวมตัวกับไทเทเนียมบนผิววัสดุรองรับหรือชิ้นงาน การทำรีแอคทีฟสปัตเตอร์ โดยทั่วไปความดันแก๊สไวปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดสารประกอบที่ต้องการมีค่าต่ำกว่าช่วงที่เกิดการไอออไนซ์สสารจ ในกระบวนการจึงใช้แก๊สไวปฏิกิริยากับแก๊สเฉื่อยทำให้รักษาสภาวะไอออไนซ์สสารจไว้ได้ ในเวลาเดียวกันช่วยให้อัตราเคลือบสูงขึ้น ในการทำรีแอคทีฟสปัตเตอร์ ยังมีสิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือความดันย่อยของแก๊สไวปฏิกิริยาต้องมีค่าพอเหมาะกับการเกิดฟิล์มสารประกอบที่ต้องการ เช่น การเคลือบสารประกอบ Ferroferric Oxide (Fe_3O_4) ความดันแก๊สออกซิเจนที่ใช้ในรีแอคทีฟสปัตเตอร์ ถูกจำกัดในช่วงความดันแถบมาก ถ้าความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนมากเกินไปจะเกิดสารประกอบของ Ferric Oxide (Fe_2O_3) ถ้าน้อยเกินไปจะเกิดสารประกอบ Ferrous Oxide (FeO) หรือฟิล์มของเหล็ก (Fe)

การหาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง

ลักษณะเฉพาะหรือสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มบางสามารถวิเคราะห์ได้จากเทคนิคต่าง ๆ งานวิจัยนี้ศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางได้แก่ โครงสร้างผลึก เฟส ลักษณะพื้นผิว และความหนา ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ดังนี้

1. การศึกษาโครงสร้างด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

ลักษณะเฉพาะสำคัญอย่างหนึ่งของฟิล์มบางคือการศึกษาโครงสร้างผลึก หรือ เฟส ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (Diffraction Analysis) หนึ่งฤทัย แก้วไข (2555) อธิบายหลักการของเทคนิคนี้ไว้ดังนี้ การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับการแยกแยะโครงสร้างของสารที่ใช้ในการเคลือบ โดยการวิเคราะห์อาศัยการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนกับมาตรฐาน JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) ของสารนั้น ดังนั้นเทคนิค XRD เป็นเทคนิคสำหรับวัดค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ที่สะท้อนจากผลึก ใช้หลักการของการเลี้ยวเบนของคลื่นโดยพบว่ารังสีเอกซ์เลี้ยวเบนได้เมื่อให้ตกกระทบผลึก ซึ่ง Bragg ได้เสนอแนวคิดที่เราสามารถมองผลึกประกอบด้วยชั้น (Layer) หรือ ระนาบ (Plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมที่ตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้คลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่าง ๆ ดังกล่าวจะมีความเข้มสูง ถ้ารังสีเอกซ์ 1 และ 2 ตกกระทบทำมุม θ กับระนาบของผลึก A และ B สนามไฟฟ้าของรังสีเอกซ์จะก่อให้เกิดแรงคูโอมป์กระทำบนอิเล็กตรอนที่ P กับ Q ให้สั่นด้วยความถี่เดียวกับรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบ และอิเล็กตรอนนั้นแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นรังสีเอกซ์ออกไปทุกทิศทางแต่ในทิศทาง 1' และ 2' ซึ่งเสมือนรังสีเอกซ์สะท้อนออกจากระนาบของผลึกจะไปแทรกสอดแบบเสริมกัน (In Phase) แม้ว่าแบบจำลองที่กล่าวมาจะไม่ถูกต้องในทางกายภาพ เนื่องจากแท้จริงแล้วระนาบของอะตอมไม่ได้สะท้อนคลื่นแต่วิธีนี้ก็ได้ใช้ทางเรขาคณิต พิจารณา

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

เมื่อ δ คือ ความแตกต่างของระยะที่คลื่นเดินทาง
 λ คือ ความยาวคลื่น
 n คือ จำนวนเต็มใด ๆ

จากภาพที่ 2-17

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

จากรูปตรีโกณมิติพื้นฐาน

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

โดย PQ คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ d_{hkl}

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

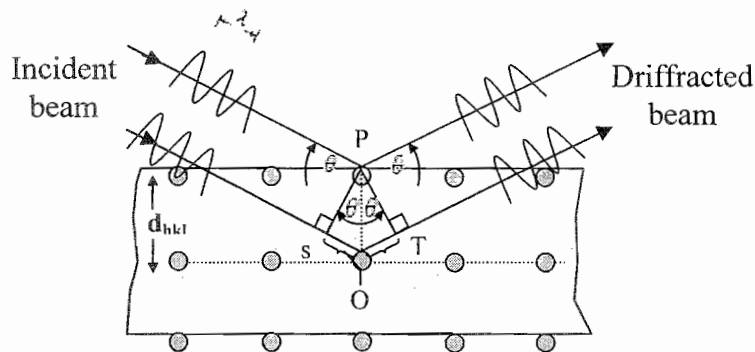
จากสมการ (2-3) เท่ากับ (2-6) จะได้

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

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

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

ในภาพที่ 2-17 เป็นแบบจำลองสำหรับการพิสูจน์กฎของแบรกก์ อะตอมเรียงตัวเป็นระเบียบโดยมีระยะห่างระหว่างอะตอมใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ($\sim 10^{-10}$ m) จะทำหน้าที่เป็นเสมือน เกรตติงเลี้ยวเบนแต่จะเป็นเกรตติงเลี้ยวเบนแบบ 3 มิติ



ภาพที่ 2-17 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 ทั้งนี้ขนาดผลึกของฟิล์มสามารถหาได้จากสมการของ Scherrer (ดังสมการที่ 2-9)

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

เมื่อ L คือ ขนาดผลึก

k คือ ค่าคงที่เท่ากับ 0.9

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

β คือ ความกว้างครึ่งหนึ่งของพีคที่มีค่าความเข้มสูงสุด

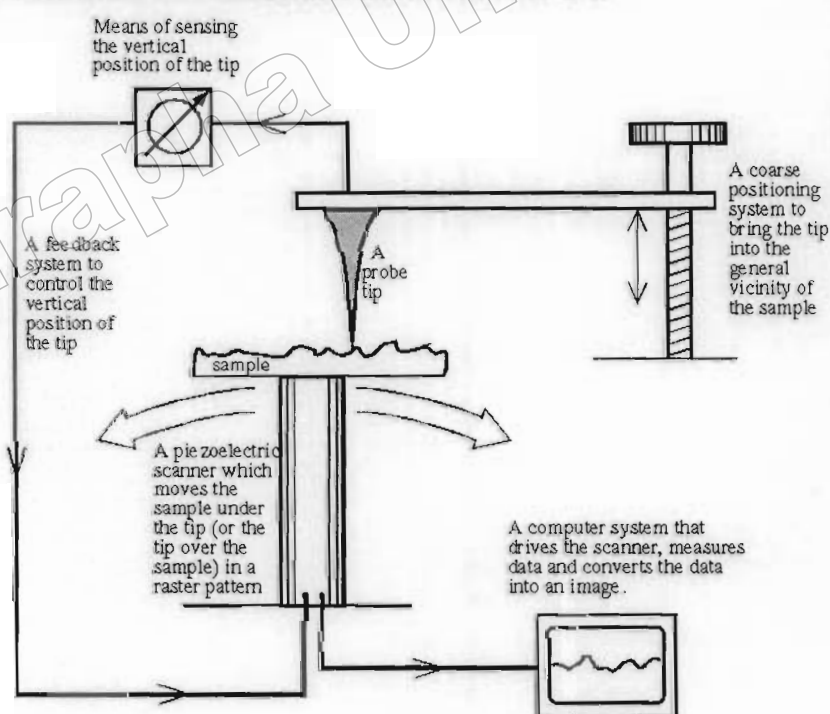
θ คือ ครึ่งหนึ่งของมุมตรงจุดศูนย์กลางพีค

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

2. การศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยเครื่อง Atomic Force Microscopy (AFM)

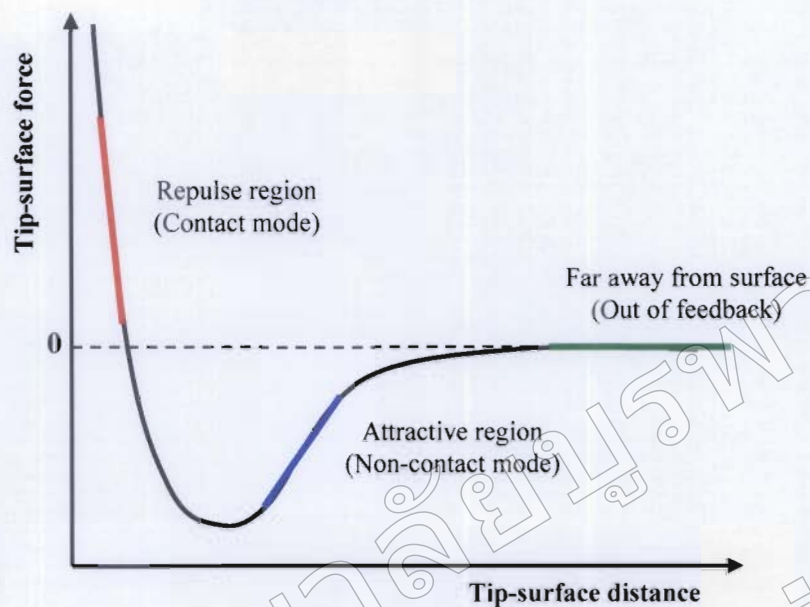
ลักษณะเฉพาะสำคัญอีกอย่างหนึ่งของฟิล์มบางคือ ลักษณะพื้นผิว และความหนา

เทคนิคที่ใช้ศึกษาลักษณะพื้นผิว และความหนา ของฟิล์มบาง คือ Atomic Force Microscopy (AFM) ซึ่ง จตุพร วุฒิกนกกาญจน์ (2542) อธิบายหลักการทำงานไว้ดังนี้ 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 สภาพผิวที่แตกต่างกันไปจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกับเข็มตรวจวัดแตกต่างกันไป โดยตัวคานามีเข็มเกาะติดอยู่จะมีการโค้งงอ (Bending) ปริมาณการโค้งงอนี้สามารถตรวจวัดได้โดยใช้โฟโตดีเทกเตอร์ (Photo Detector) ดังภาพที่ 2-18 ภาพที่ได้จากเทคนิคนี้จะสอดคล้องตามสภาพพื้นผิวในแต่ละบริเวณที่ตรวจสอบ ในเทคนิค AFM นี้ สิ่งที่ทำให้คานามีเข็มเกาะอยู่เกิดการโค้งงอขึ้นก็คือ แรงกระทำระหว่างอะตอมซึ่งอาจจะเป็นแรงดึงดูดหรือแรงผลักก็ได้ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างเข็มปลายแหลมกับพื้นผิว ดังแสดงในภาพที่ 2-19



ภาพที่ 2-18 องค์ประกอบหลักของเครื่องมือ Scanning Probe Microscope

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



ภาพที่ 2-19 ลักษณะของแรงกระทำระหว่างอะตอมที่เกิดขึ้นในระยะห่างระหว่างวัตถุต่าง ๆ (อดิศร บุรณวงศ์, 2551)



ภาพที่ 2-20 เครื่อง AFM แบบ Multimode (http://rclsgi.eng.ohio-state.edu/nlim/page_01.htm)

ภาพที่ 2-20 แสดงให้เห็นถึงเครื่อง Atomic Force Microscope รุ่น NanoScope IIIa บริเวณตรงกลางเป็นที่ใช้วางชิ้นงาน โดยมีเข็มวัดวางอยู่ด้วย ส่วนด้านบนของเครื่องมือมีกล้องจุลทรรศน์วิดีโอ (Video Microscope) ติดตั้งไว้ สำหรับใช้ดูตำแหน่งของเข็มที่จะทำการวางลงบนบริเวณต่าง ๆ บนผิว ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์วิดีโอนี้จะแสดงทางจอโทรทัศน์ ด้านบนยังมีแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์และโฟโตดีเทคเตอร์ที่ใช้วัดการ โค้งงอของคานยื่น

การเก็บข้อมูลด้วยเทคนิค AFM เก็บได้ 4 ลักษณะ (Mode) ดังนี้คือ

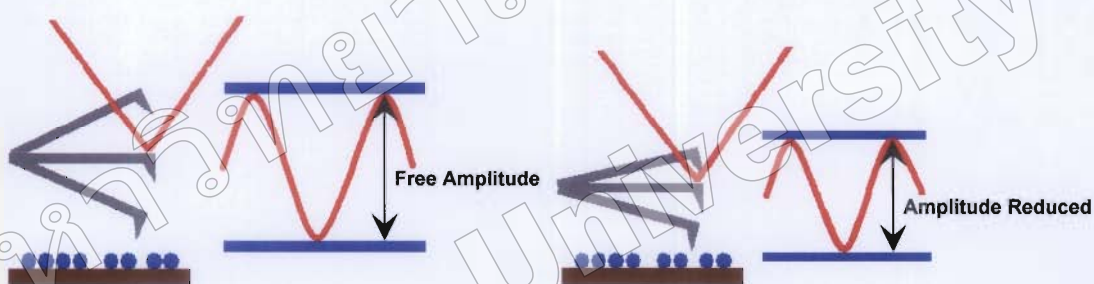
1. Contact Mode เป็นการศึกษาสภาพผิวชิ้นงาน โดยการขยับให้เข็ม ไกล (Slide) ไปบนผิวงานซึ่งจะทำให้มีแรงผลักระหว่างเข็มกับผิวงานอยู่ใกล้กันมาก แรงผลักระหว่างเข็มกับผิวงานจะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพผิว ซึ่งทำให้มีการ โค้งงอ (Deflection) ของคานยื่น (Cantilever) ที่มีเข็มยึดเกาะอยู่ที่ปลาย โดยปริมาณการ โค้งงอจะเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะของพื้นผิวชิ้นงาน

เทคนิคแบบ Contact Mode มีข้อเสียคือ การลากให้เข็มตรวจวัดเคลื่อนที่ไถลข้ามไปยังบริเวณต่าง ๆ บนผิวงาน อาจทำให้พื้นผิววัสดุที่ศึกษาต่างไปจากสภาพเดิมที่แท้จริง หรืออาจเกิดความเสียหายขึ้นแก่ผิวงานได้ เช่น ภายใต้อากาศปรกติซึ่งมีอากาศและความชื้นในอากาศ อาจเกิดหยดน้ำหรือสิ่งสกปรกบนผิวงาน ซึ่งเมื่อเข็มวัดเคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวที่มีชั้นบาง ๆ ของหยดน้ำและสิ่งสกปรกดังกล่าว ทำให้มีแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิตและแรงดึงดูดให้ตัวคานที่มีเข็มยึดเกาะที่ปลายเคลื่อนที่ลงมาสัมผัสกับชั้นดังกล่าว ทำให้แรงระหว่างเข็มกับผิวงานที่เกิดขึ้นโดยรวมเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ ยังอาจทำให้ผิวงานถูกทำลาย เช่น เกิดการขีดข่วนจากการลากเข็มไปบนผิวงาน

2. Non-Contact Mode เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาข้างต้น ได้มีการพัฒนาเทคนิคแบบ Non-Contact Mode ขึ้นมา โดยตัวเข็มปลายแหลมจะถูกยกขึ้นมาให้มีระยะห่างเหนือผิวงานสูงมากขึ้น คือประมาณ 10 - 100 Å จึงไม่มีปัญหาเรื่องการทำลายโครงสร้างผิวงาน กรณีนี้แรงกระทำระหว่างตัวคานที่มีเข็มปลายแหลมยึดเกาะอยู่กับผิวงานจะเป็นลักษณะแรงดึงดูด ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามรูปทรงของสภาพผิวงานเช่นเดียวกัน

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

3. Tapping Mode เป็นเทคนิคที่รวมเอาลักษณะของการวัดแบบ Contact Mode และ Non-Contact Mode เข้าด้วยกัน กล่าวคือ ยังคงให้มีการสัมผัสกันระหว่างเข็มกับผิวงานในระยะที่ใกล้กันมาก เหมือนกับกรณีของ Contact Mode เพื่อให้เกิดภาพที่ชัดเจน ในขณะที่เดียวกัน ก็จะมีการสั่นหรือขยับเข็มปลายแหลมให้เคลื่อนที่ขึ้นลงไปพร้อม ๆ กับการเคลื่อนที่สแกนไปยังบริเวณต่าง ๆ บนผิวงาน ดังนั้นจึงเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาการลากไถลเข็มปลายแหลม ซึ่งทำให้เกิดการทำลายสภาพของผิวงานได้ เหมือนใน Contact Mode



ภาพที่ 2-21 ลักษณะการสั่นของคานที่มีเข็มติด

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

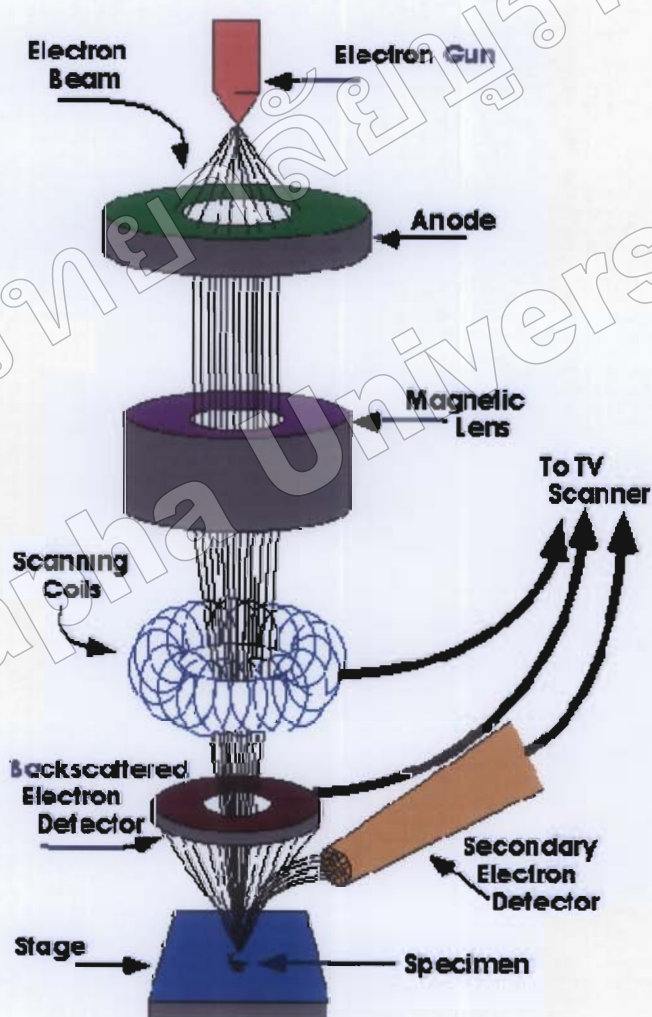
ภาพที่ 2-21 แสดงการสั่นของคานในสภาวะอิสระหรือตอนเริ่มต้นที่ยังไม่เกิดการสัมผัส และเคลื่อนที่ไปบนผิวงาน จะเห็นว่าแอมพลิจูดยังสูงเมื่อเทียบกับแอมพลิจูดจากการสั่นของคาน เมื่อมีการแตะสัมผัส (Tapping) ลงบนผิวงาน เนื่องจากในการสัมผัสกันจะมีการสูญเสียพลังงานของการสั่น ทำให้แอมพลิจูดของการสั่น (Oscillation Amplitude) ลดลง ซึ่งค่าที่ลดลงนี้ใช้เป็นตัววัดและบอกถึงลักษณะของสภาพพื้นผิวที่มีความสูงต่ำแตกต่างกัน ไปเช่น เมื่อเข็มตรวจวัดเคลื่อนที่ผ่านบริเวณผิวงานที่มีความนูนสูงขึ้นมา คานจะมีพื้นที่หรือแอมพลิจูดในการสั่นลดลง ในทางตรงข้ามเมื่อเข็มปลายแหลมเคลื่อนที่ผ่านบริเวณผิวที่มีการยุบตัวหรือมีความลึกลงไป ตัวคานก็จะมีพื้นที่ในการสั่นเพิ่มขึ้น และมีแอมพลิจูดสูงขึ้น (เข้าใจคือแอมพลิจูดสูงสุดในสภาพที่ยังไม่มีการทำการสแกน) แอมพลิจูดของการสั่นที่เปลี่ยนแปลงไปถูกวัดโดยแอมพลิจูดดีเทคเตอร์ (Amplitude Detector) ส่งไปยังตัวควบคุม เมื่อวัดสัญญาณพร้อมทั้งปรับระยะระหว่างเข็มกับผิวงาน เพื่อรักษาให้ค่าแอมพลิจูดของการสั่นคงที่ต่อไป จนกว่ามีการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดของการสั่นตามสภาพพื้นผิวในบริเวณถัดไป

4. Force Modulation Mode วิธีนี้เหมาะสำหรับพื้นผิววัสดุที่มีหลายเฟส เทคนิคนี้เป็นการวัดและสร้างภาพพื้นผิวชิ้นงานที่มีความแตกต่างของความแข็งแรง (Stiffness) ในแต่ละเฟสสูง โดยกรณีนี้นี้ตัวเข็มสแกนไปในลักษณะที่มีการสั่นในแนวตั้งฉากกับผิววัสดุด้วยแอมพลิจูดเล็กน้อย แต่มีความเร็วในการสั่นที่สูงกว่าการเคลื่อนที่สแกนของเข็ม และเมื่อตัวเข็มถูกนำเข้ามาแตะสัมผัสกับผิววัสดุจะเกิดแรงต้านจากผิวของวัสดุที่เกิดจากการสั่นและทำให้ตัวคานงอ ถ้าหากให้แรงที่ทำให้ตัวคานสั่นคงที่ พื้นผิวบริเวณที่แข็งกว่าจะทำให้เกิดการต้านต่อการสั่นในแนวตั้งของตัวคานมากกว่า และจึงทำให้ตัวคานงอมากกว่า ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดที่เกิดจากการโค้งงอของตัวคานจึงนำมาใช้วัดเปรียบเทียบความแข็งที่บริเวณต่าง ๆ ของผิวงาน

หลักการของวิธี Tapping Mode กับ Force Modulation Mode คล้ายกันที่มีการสั่นของเข็มในแนวตั้งพร้อมมีการสแกนไปบนผิวชิ้นงาน ความแตกต่างของ 2 เทคนิคคือ กรณี Force Modulation Mode จะสั่นด้วยความเร็วสูง (สูงกว่าความเร็วในการสแกน) และการวัดแอมพลิจูดที่เกิดจากการบิดงอของคาน เป็นการวัดเนื่องจากผลของแรงต้านการสั่น เมื่อมีการสัมผัสของเข็มกับผิวงาน ขณะที่ Tapping Mode เป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของการสั่นของคานที่เปลี่ยนแปลงไป (ลดลง) เนื่องมาจากมีการสูญเสียพลังงานไปเมื่อมีการสัมผัสผิวงานที่มีระดับความสูงต่ำแตกต่างกัน

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 2-22

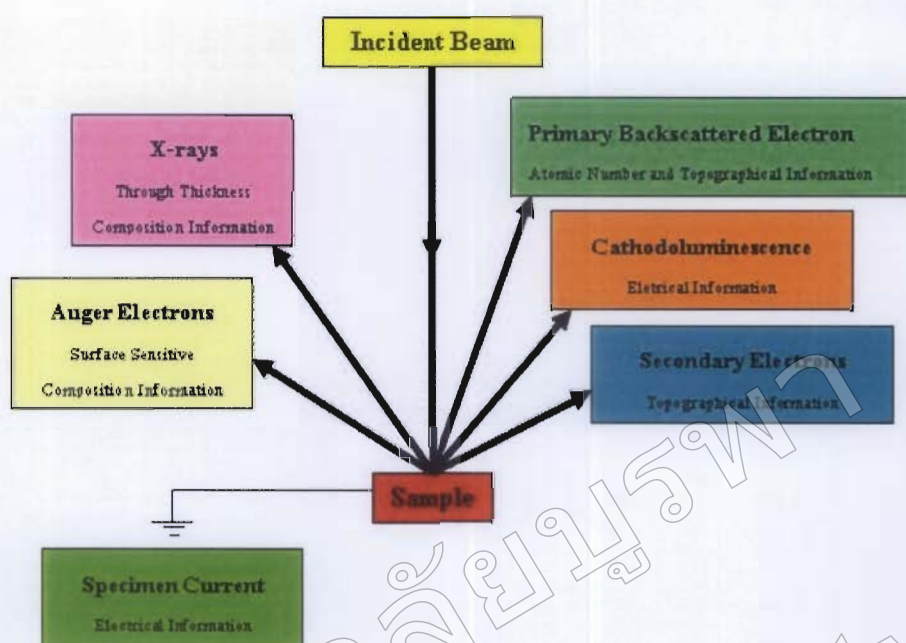


ภาพที่ 2-22 องค์ประกอบหลักของเครื่องมือ Scanning Electron Microscope

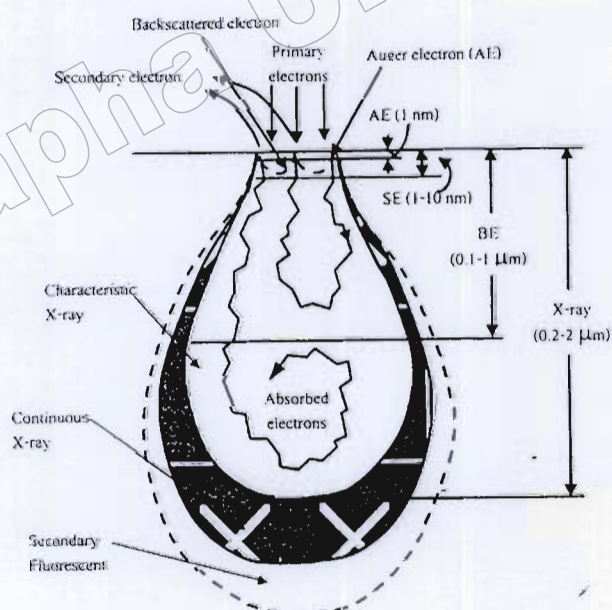
(www.purdue.edu/REM/rs/graphics/sem2.gif)

อิเล็กตรอนทุติยภูมิจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูงที่สามารถปรับค่าได้ จากนั้นจึงถูกดึงดูดลงสู่เบื่องล่างโดยแผ่นอานโคภายใต้ภาวะความดันสุญญากาศ 10^{-5} ถึง 10^{-7} torr และมีชุดคอนเดนเซอร์เลนส์ที่จะปรับลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดเล็กลง เพื่อเป็นการเพิ่มความเข้มของลำอิเล็กตรอน จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะวิ่งลงสู่เบื่องล่างผ่านเลนส์วัตถุ ซึ่งทำหน้าที่ในการปรับลำอิเล็กตรอนทุติยภูมิให้มีจุดโฟกัสบนผิวตัวอย่างพอดี และลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบผิววัตถุหรือตัวอย่างจะมีขนาดในช่วง 5 ถึง 200 nm โดยมีชุดลวดควบคุมการส่องกราดของลำอิเล็กตรอนทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนบนพื้นผิวตัวอย่าง ขณะที่ลำอิเล็กตรอนกระทบผิวตัวอย่างจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนทุติยภูมิตับอะตอมของธาตุในวัตถุหรือตัวอย่างและเกิดการถ่ายโอนพลังงานที่ขึ้นความลึกจากพื้นผิวที่ระดับต่าง ๆ ทำให้เกิดการปลดปล่อยสัญญาณอิเล็กตรอนชนิดต่าง ๆ ออกมา (ภาพที่ 2-23 และภาพที่ 2-24) สัญญาณภาพที่ได้จากสัญญาณอิเล็กตรอนชนิดต่าง ๆ ที่เกิด คือ

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



ภาพที่ 2-23 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมตัวอย่าง
(วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ, 2543)

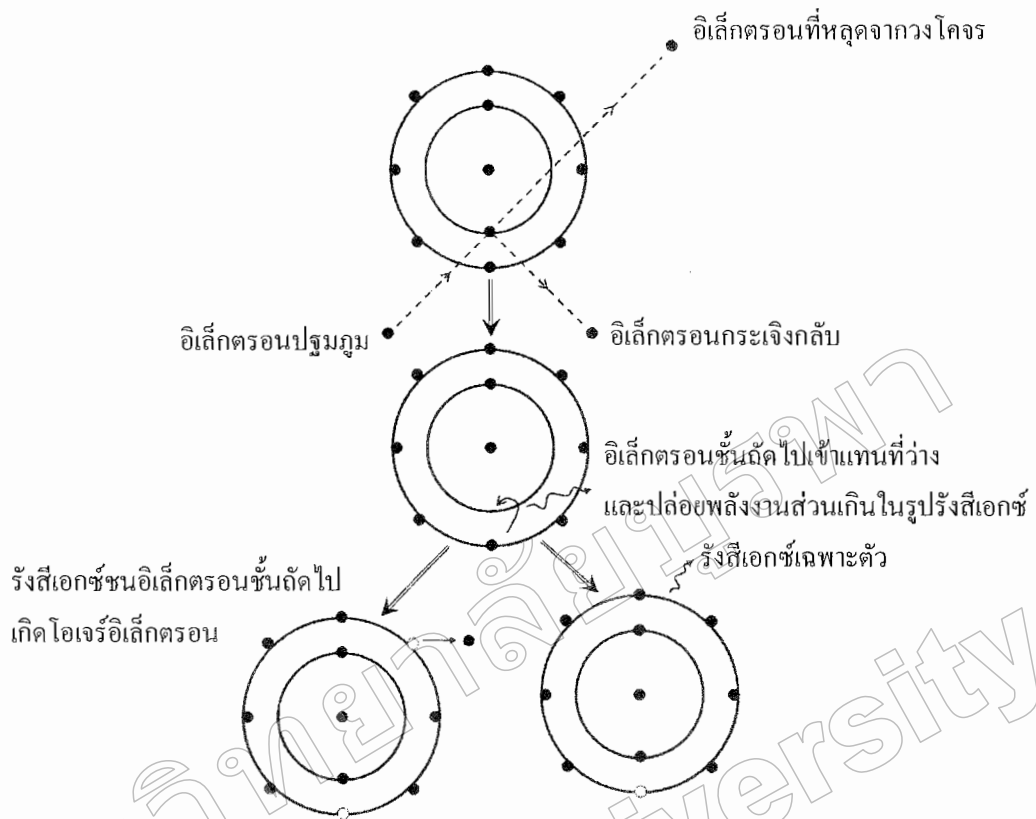


ภาพที่ 2-24 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับตัวอย่างที่ระดับชั้นความลึกต่างๆ
(วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ, 2543)

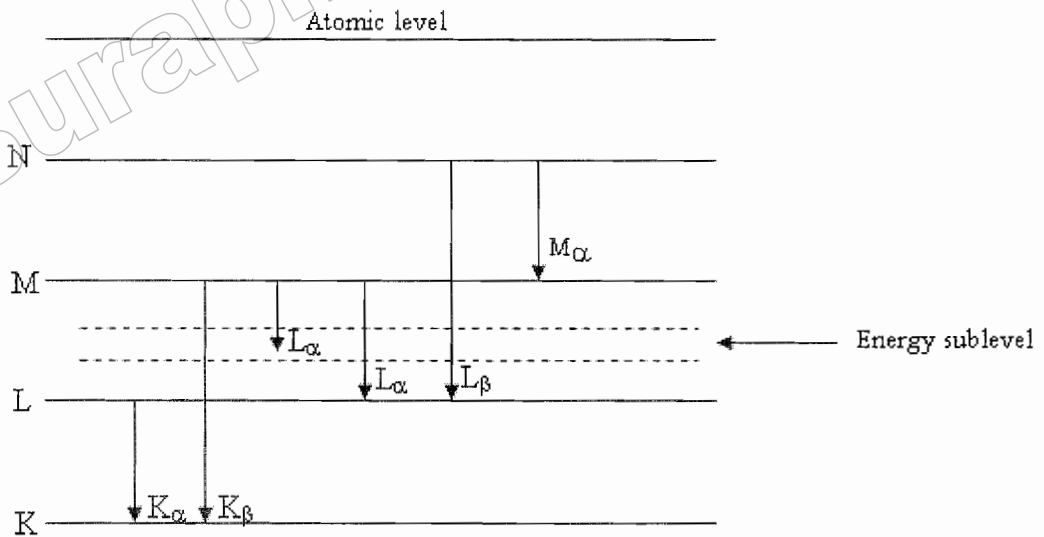
4. การศึกษาองค์ประกอบของธาตุทางเคมีด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-ray spectroscopy (EDX)

ลักษณะเฉพาะสำคัญอีกประการหนึ่งของฟิล์มบางคือ องค์ประกอบของธาตุทางเคมี เทคนิคที่นิยมใช้ศึกษาองค์ประกอบของธาตุทางเคมีของฟิล์มบาง คือ Energy Dispersive X-ray spectroscopy ซึ่ง วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา 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 2-25 และภาพที่ 2-26

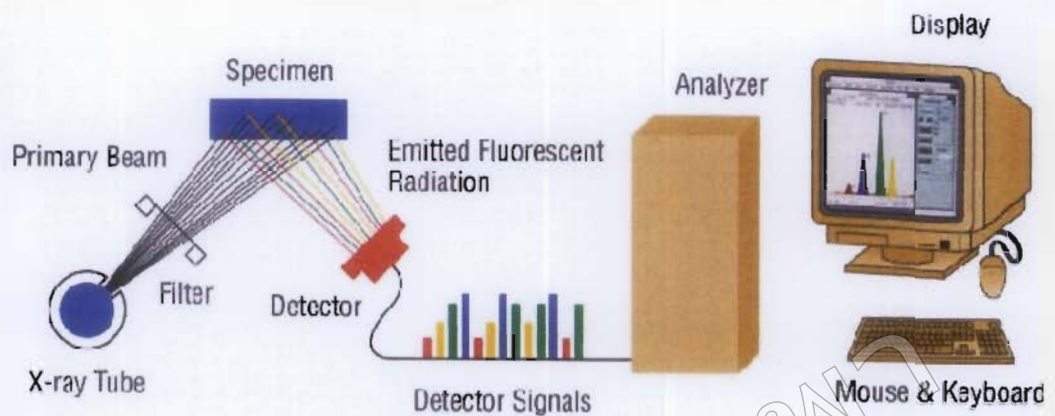
ในระบบการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์แบบ EDX หัววัดรังสีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ หัววัดรังสีแบบ Si (Li) ซึ่งเหมาะสำหรับการวัดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่มีพลังงานในช่วง 1 ถึง 30 keV หรือหัววัดชนิดเจอร์มานเนียมความบริสุทธิ์สูง (High Purity Germanium; HPGe) ซึ่งสามารถวัดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวได้ช่วงกว้าง คือ 3 ถึง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



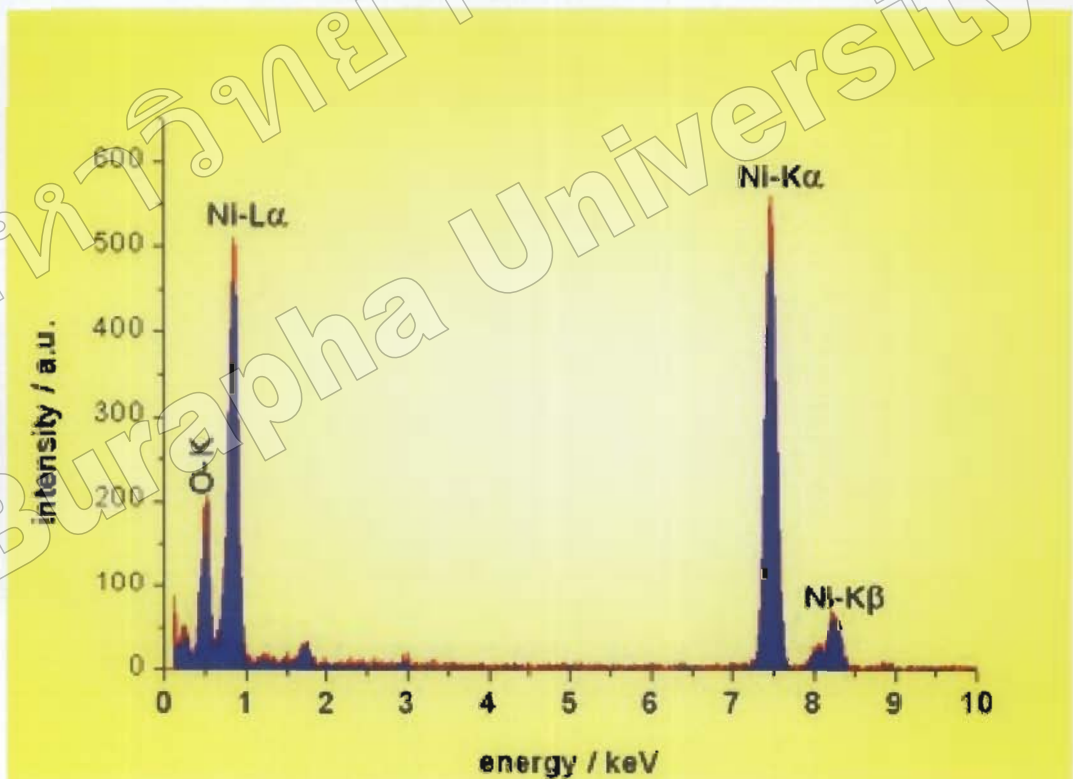
ภาพที่ 2-25 การกระตุ้นให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวโดยใช้ลำอิเล็กตรอน
(วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ, 2543)



ภาพที่ 2-26 การเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่ระดับพลังงานของชั้นโคจรต่างๆ
(วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา 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)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมไนไตรด์เป็นฟิล์มบางหรือชั้นเคลือบแข็งในกลุ่มชั้นเคลือบของสารประกอบสามชนิด ที่เหมาะสำหรับงานด้านการเคลือบแข็งบน Tooling หรือ High Speed Machining มากกว่ากลุ่มชั้นเคลือบของสารประกอบสองชนิด ซึ่งทำได้โดยการผสมอลูมิเนียม (Al) ในระหว่างกระบวนการเตรียมฟิล์มบาง ทำให้ได้ฟิล์มที่มีความแข็งแรงสูง สามารถทำงานได้ดีในช่วงความร้อนสูงตั้งแต่ 750 – 900 °C (Harish, Barshilia, Yogesh, & Rajim, 2009; Wuhler & Yeung, 2003) ด้านงานการเกิดออกซิเดชัน การกัดกร่อนและมีสมบัติการเสียดทานต่ำ ช่วยยืดอายุการใช้ชิ้นงานที่เคลือบให้นานขึ้นทำให้มีการศึกษาวิจัยและพัฒนาเทคนิคและกระบวนการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมไนไตรด์ด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น การเคลือบในสุญญากาศด้วยวิธีรีแอคทีฟแมกนีตรอน โครสปัตเตอริง (Reactive Magnetron Co-Sputtering) (Wuhler & Yeung, 2003; Buranawong, Witit-anun, Chaiyakun, Pokaipisit, & Limsuwan, 2011) รีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง (Reactive Magnetron Sputtering) (Chu, Shum, & Shen, 2006; Fanghua, Nam, Lun, & Geyang, 2005) อาร์กไอออนเพลตติง (Arc Ion Plating) (Sheng-Sheng et al., 2008) รวมถึงการเคลือบด้วยวิธีรีแอคทีฟดีซี หรือ อาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง (Reactive DC RF Magnetron Sputtering) (Tao, Pulin, Xun, & Chu, 2009; Jong-Keuk, Hyun-Jin, Jin-Ho, & Young-Joon, 2009; Liu, Duh, Chung, & Wang, 2005) อย่างไรก็ตามพบว่ากระบวนการเตรียมฟิล์มที่กล่าวมานั้นมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป แต่การเคลือบด้วยวิธีรีแอคทีฟแมกนีตรอน โครสปัตเตอริง มีข้อได้เปรียบเทียบกับหลายประการ เช่น ใช้อุณหภูมิในการเคลือบชิ้นงานต่ำ สามารถควบคุมสัดส่วนขององค์ประกอบธาตุของฟิล์มได้สะดวกและไม่ยุ่งยากเพียงแค่แปรค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่เป้าสารเคลือบเท่านั้น และสามารถประยุกต์ใช้กับงานเคลือบขนาดใหญ่ได้ ในช่วงที่ผ่านมาจึงมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยสรุปดังนี้

Wuhler and Yeung (2003) ศึกษาผลของระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบและวัสดุรองรับที่เคลือบแบบแมกนีตรอนสปัตเตอริง ซึ่งมีผลต่อโครงสร้างผลึกระดับนาโนของชั้นเคลือบไทเทเนียมอลูมิเนียมไนไตรด์ โครงสร้างระดับนาโนของชั้นเคลือบไทเทเนียมอลูมิเนียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยวิธีแมกนีตรอนสปัตเตอริง โดยที่ระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบและวัสดุรองรับมีผลต่อโครงสร้างระดับจุลภาคและสมบัติของชั้นเคลือบ ที่ระยะห่างน้อย ๆ ชั้นเคลือบแน่น โครงสร้างระดับนาโนของชั้นเคลือบ ternary nitride มีความแข็งแรงมากขึ้น

Subramanian, Ashok, Kuppusami, Sanjeeviraja, and Jayachandran (2008) ศึกษา ลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ในไตรด์ ด้วยวิธีเอคทีพีดีซี แมกนีตรอน สปีดเตอริง การเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ในไตรด์ ที่มีความหนาประมาณ $1\ \mu\text{m}$ เคลือบ ลงบนเหล็กอ่อน (Mild Steel) ด้วยวิธีเอคทีพีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง โดยป้อนสารเคลือบที่ใช้ คือเป่าไทเทเนียม และเป่าออกไซด์ เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางที่เคลือบได้ด้วยเทคนิค ต่าง ๆ โดยผลจาก XRD มีเฟสของไทเทเนียมออกไซด์ในไตรด์ในระนาบ (111) และ (200) ซึ่งมี โครงสร้างผลึกแบบ face center cubic ผลจาก SEM และ AFM บอกถึงความสม่ำเสมอและความ แน่นของฟิล์ม Photoluminescence (PL) แสดงถึงสมบัติทางแสงที่ดีของฟิล์มบางไทเทเนียม ออกไซด์ในไตรด์ ผลจาก Laser Raman แสดงถึงลักษณะเฉพาะของฟิสิกไทเทเนียมออกไซด์ในไตรด์ ที่ 312.5 , 675 และ $1187.5\ \text{cm}^{-1}$

Fanghua, Nam, Lun, and Geyang (2005) ศึกษาผลของความดันย่อยแก๊สไนโตรเจนต่อ โครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของชั้นเคลือบ (Ti, Al)N ที่เคลือบด้วยวิธีเอคทีพีดีซี สปีดเตอริง ด้วยเป่าโมเสกของ Ti-Al และใช้แก๊สอาร์กอนและไนโตรเจน โดยแปรค่าความดันย่อยแก๊ส ไนโตรเจน ในส่วนของการวิเคราะห์ อัตราการเคลือบ ส่วนประกอบและโครงสร้างจุลภาคของชั้น เคลือบ วัดโดย Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, X-ray Diffraction, Transmission Electron Microscopy และ Nanoindenter ผลที่ได้พบว่าความดันย่อยแก๊สไนโตรเจนมีบทบาทสำคัญต่อชั้น เคลือบ (Ti, Al)N สามารถสังเคราะห์ชั้นเคลือบ (Ti, Al)N ที่ stoichiometric ratio ได้ง่ายในช่วง ความดันย่อยแก๊สไนโตรเจนที่เหมาะสม และพบว่าชั้นเคลือบมีโครงสร้างแบบ fcc เฟสเดี่ยว ที่ texture preferential orientation (111) ชั้นเคลือบมีความแข็งมากที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ $34.4\ \text{GPa}$ และมีค่าความยืดหยุ่นมากที่สุดเท่ากับ $392\ \text{GPa}$ ชั้นเคลือบ (Ti, Al)N ที่เตรียมด้วยความดันย่อยแก๊ส ไนโตรเจนต่ำพบว่าปริมาณไนโตรเจนและความแข็งต่ำ ในทางกลับกันที่ความดันย่อยแก๊ส ไนโตรเจนสูง ๆ อัตราการเคลือบของฟิล์มลดลงอย่างมากเนื่องจากไนโตรเจนทำปฏิกิริยากับเป่า Ti-Al และฟอร์มตัวเป็นชั้นไนไตรด์ที่หน้าเป่า ขณะที่องค์ประกอบเคมีของชั้นเคลือบเกือบไม่มี การเปลี่ยนแปลง และพบโครงสร้างผลึกระดับนาโน หรือ โครงสร้างอสัณฐานและมีความแข็งต่ำ

Tao, Pulin, Xun, and Chu (2009) ศึกษาผลของความดันย่อยแก๊สไนโตรเจนที่มีต่อสมบัติ เชิงกลของฟิล์ม (Ti, Al)N ที่เคลือบด้วยวิธีเอคทีพีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง โดยใช้เป่าโมเสก ของ Ti-Al ที่วัสดุรองรับจ่ายไบแอส $-100\ \text{V}$ การทดสอบความแข็งด้วยเทคนิค Nanoindentation แสดงให้เห็นว่าเมื่อความดันย่อยไนโตรเจนเพิ่มขึ้น ฟิล์มมีความแข็งและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น เพิ่มขึ้นในระยะแรกและลดลงในภายหลัง ค่าความแข็งและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น มีค่ามากที่สุด เท่ากับ $43.4\ \text{GPa}$ และ $430.8\ \text{GPa}$ ตามลำดับ เชื่อว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในขนาดเกรน

และ preferential orientation ของผลึกในฟิล์ม (Ti, Al)N เปลี่ยนไปเมื่อแปรค่าความดันย่อยแก๊สไนโตรเจน ปรากฏการณ์นี้ถูกยืนยันโดย ผลที่ได้จาก X-ray Diffraction (XRD) และ Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)

Harish, Yogesh, and Rajam (2009) ศึกษาการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมอลูมิเนียมไนไตรด์ ด้วยวิธีรีแอคทีฟไบโพลาร์พลาสมาสเปกตรัมแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง เคลือบบนหัวเจาะความเร็วสูง (high-speed steel drill bits) ซิลิกอน และเหล็กโดยใช้คาร์โบไดไซด์ ระบุรีแอคทีฟไบโพลาร์พลาสมาสเปกตรัมแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง เคลือบฟิล์มไทเทเนียมอลูมิเนียมไนไตรด์จากรีแอคทีฟสปัตเตอร์ริง ของเป้าไทเทเนียมและเป้าอลูมิเนียมในพลาสมาของไนโตรเจนกับอาร์กอน การปรับปรุงผิววัสดุทำได้หลายวิธีเพื่อปรับปรุงการยึดเกาะของฟิล์มไทเทเนียมอลูมิเนียมไนไตรด์ เงื่อนไขของกระบวนการเคลือบที่เหมาะสมทำให้ฟิล์มไทเทเนียมอลูมิเนียมไนไตรด์คุณภาพดี นำฟิล์มที่ได้ไปศึกษาลักษณะเฉพาะด้วย X-ray Diffraction, Scanning-Electron Microscopy, Energy-Dispersive X-ray Analysis, X-ray Photoelectron Spectroscopy, Nano-indentation, Atomic Force Microscopy, Wear Tester and Potentiodynamic Polarization Techniques ประสิทธิภาพของฟิล์มไทเทเนียมอลูมิเนียมไนไตรด์ ที่เคลือบบนหัวเจาะความเร็วสูง แล้วนำไปทดสอบโดยการเจาะบนแผ่นสแตนเลส 304 ความหนา 13 mm ประสิทธิภาพการทดสอบมีการใช้และไม่ใช้วัสดุให้ความเย็น ผลแสดงถึงนัยสำคัญของการปรับปรุงในประสิทธิภาพของฟิล์มไทเทเนียมอลูมิเนียมไนไตรด์ที่ถูกเคลือบบนหัวเจาะความเร็วสูง นอกจากนี้ยังแสดงการเจาะแห้งของแผ่นสแตนเลสสตีล 304 มีความเป็นไปได้กับฟิล์มไทเทเนียมอลูมิเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบนหัวเจาะความเร็วสูง การปรับปรุงประสิทธิภาพของฟิล์ม ไทเทเนียมอลูมิเนียมไนไตรด์ประกอบด้วย ความต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงได้ดี และความต้านทานการกัดกร่อนของฟิล์มไทเทเนียมอลูมิเนียมไนไตรด์

Buranawong, Witit-anun, Chaiyakun, Pokaipisit, and Limsuwan (2011) ศึกษาผลของกระแสไทเทเนียมต่อ โครงสร้างและความแข็งแรงของฟิล์มอลูมิเนียมไทเทเนียมไนไตรด์โดยเทคนิครีแอคทีฟพลาสมาสเปกตรัมแมกนีตรอน โคสปีดเตอร์ริง ผลลัพธ์บ่งชี้ว่าฟิล์มบาง อลูมิเนียมไทเทเนียมไนไตรด์ (AlTi_3N) ที่เคลือบบนซิลิกอน (100) และ กริด โดยไม่มีความร้อนจากภายนอกและการไบแอสที่อุณหภูมิห้อง โดยเทคนิครีแอคทีฟพลาสมาสเปกตรัมแมกนีตรอน โคสปีดเตอร์ริง ซึ่งใช้เป้าไทเทเนียม และ อลูมิเนียมบริสุทธิ์ ผลของกระแสไฟฟ้าที่ให้กับเป้าไทเทเนียม (I_T) ที่มีต่อโครงสร้าง และความแข็งแรงของฟิล์มเป็นสิ่งที่สนใจศึกษา ฟิล์มถูกสปัตเตอร์ด้วย อาร์กอนและไนโตรเจน ในอัตรา 8 และ 4 sccm ตามลำดับ กระแสไฟฟ้าที่ให้กับเป้าอลูมิเนียม (I_A) กำหนดไว้ที่ 600 mA และกระแสไฟฟ้าที่ให้กับเป้าไทเทเนียม (I_T) แปรค่าจาก 600 ถึง 800 mA ฟิล์มถูกเคลือบ

โดยเวลาการเคลือบที่แตกต่างกัน อยู่ในช่วง 15 ถึง 60 นาที นำฟิล์มที่เคลือบแล้วไปศึกษา ลักษณะเฉพาะ และวิเคราะห์โดย X-ray Diffraction (XRD), Atomic Force Microscopy (AFM), Scanning Electron Microscopy (SEM), Transmission Electron Microscopy (TEM) และ Nanoindentation ผลที่ได้ระบุถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างระดับจุลภาค ซึ่งขึ้นกับเงื่อนไขการเคลือบ รูปแบบ XRD แสดงถึงโครงสร้างผลึกกับ preferred orientations ในระนาบ (112) (004) และ (153) ซึ่งเหมือนโครงสร้างมาตรฐานของฟิล์มอลูมิเนียม ไทเทเนียมไนไตรด์ (AlTi_3N) นอกจากนี้โครงสร้างของ AlTi_3N ยังถูกยืนยันโดย TEM ผลนี้แสดงให้เห็นว่า กระแสไฟฟ้าที่ให้กับเป้าไทเทเนียมและเวลาในการเคลือบ มีอิทธิพลอย่างมากต่อปริมาณ อลูมิเนียม ค่าความหยาบผิวและความหนาของฟิล์ม การวิเคราะห์ภาคตัดขวางโดย SEM แสดงถึงความหนาแน่น และอัดแน่นของลักษณะพื้นผิวของเกรน ความแข็งของฟิล์มส่วนใหญ่ มีค่าประมาณ 26.24-30.37 GPa

Sheng-Sheng, Ying, Jia-Bao, Jun, and Chao (2008) ศึกษาผลของกระบวนการเคลือบ ต่อรูปแบบความเค้นคงค้างและความหนาในฟิล์ม (Ti, Al)N ผลของกระบวนการเคลือบที่มีต่อการกระจายความเค้นคงค้างในความหนาของฟิล์ม (Ti, Al)N ที่เตรียมด้วยวิธีอาร์คไอออนเพลตติง (arc ion plating, AIP) ซึ่งเป็นสิ่งที่สนใจในการนำเสนองาน ซึ่งระบุถึงการนำเสนอการกระจายความเค้น รูปแบบระฆัง และความเค้นอัดมากสุดปรากฏขึ้นในชั้นใกล้พื้นผิว ความเค้นคงค้างเพิ่มขึ้นตามความหนาของฟิล์มและการจ่ายไปแอตแทกต์วูดรองรับตามลำดับ การกระจายความเค้นและการยึดเกาะของฟิล์มกับวัสดุรองรับสามารถทำได้ดีโดยปรับเงื่อนไขการเคลือบให้เหมาะสม ซึ่งฟิล์มที่มีความหนา 7.57 μm เป็นฟิล์มที่มีกระแสไปแอตแทกต์วูดรองรับที่เหมาะสม