

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึงทฤษฎีเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วย การเคลือบฟิล์มบาง การก่อเกิดฟิล์มบาง การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง กระบวนการ โกลว์ดิสชาร์จ ระบบเคลือบแบบดีซีสปัตเตอร์ริง ระบบเคลือบแบบดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอร์ริง ระบบเคลือบแบบ อันบาลานซ์แมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีแอคทีฟสปัตเตอร์ริง การหา ลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง โทเทเนียมไนไตรด์ และ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การเคลือบฟิล์มบาง

การเคลือบฟิล์มบาง (Thin Film) ในศตวรรษแรกๆแรกทำโดย Bunsen และ Grove ในปี ค.ศ.1852 โดยพื้นฐานแล้วแนวคิดเกี่ยวกับ การเคลือบในสุญญากาศหรือการเคลือบฟิล์มบาง คือ การเรียงตัว (Fabricated) โดยการเคลือบ (Deposition) ของสารเคลือบในลักษณะอะตอมเดี่ยว บนวัสดุรองรับ (Substrate) จนเกิดเป็นชั้นของฟิล์มที่บางมาก ในระดับนาโนเมตรถึงไมโครเมตร จึงอาจกล่าวได้ว่า “ฟิล์มบาง (Thin Film) หมายถึงชั้นของอะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่จับรวมกัน เป็นชั้นบาง ๆ” อย่างไรก็ตามการระบุว่าเป็น “ฟิล์มบาง” นั้นอาจพิจารณาได้จากลักษณะการใช้งานว่าใช้สมบัติด้านใดของฟิล์มกล่าวคือถ้าเป็นการใช้สมบัติเชิงผิว (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 นอกจากนี้ยังสามารถใช้วิธีการเคลือบฟิล์มบางในการเตรียมสารตัวอย่างสำหรับการศึกษาสมบัติทางกายภาพของวัสดุในรูปของฟิล์มบาง ซึ่งสมบัติบางอย่างไม่สามารถวัดได้เมื่ออยู่ในสภาพเป็นก้อน (Bulk) เพราะฉะนั้นข้อมูลเหล่านี้มีประโยชน์อย่างมากต่อการพัฒนาวัสดุเพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรม

การเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ เป็นการทำให้สารเคลือบบนผิววัสดุรองรับที่ต้องการ ซึ่งทำได้หลายวิธี โดยพื้นฐานแล้วการเคลือบฟิล์มมีขั้นตอนสำคัญ 3 ขั้นตอน (Smith, 1995) ดังนี้คือ

1. การสร้างสารเคลือบ (Source) โดยทั่วไปแล้วสารเคลือบอาจอยู่ในรูปของ ของแข็ง ของเหลว ไอ หรือแก๊ส ก็ได้ แต่สารเคลือบขณะทำการเคลือบนั้นจำเป็นต้องอยู่ในรูปของไอระเหย ซึ่งวิธีการที่ทำให้สารเคลือบกลายเป็นไอระเหยสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การให้ความร้อนหรือ การระดมยิงด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูง เป็นต้น

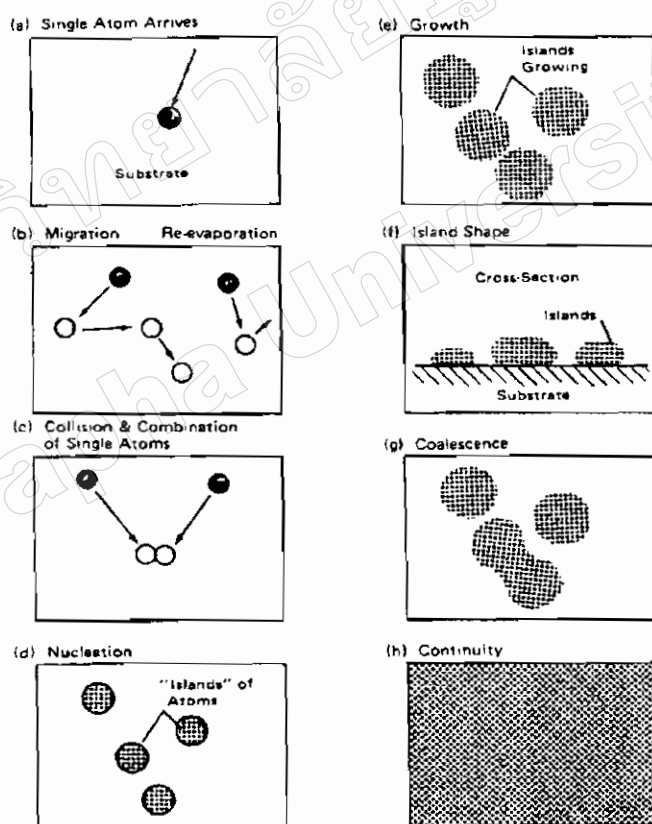
2. การเคลื่อนย้ายสารเคลือบมายังวัสดุรองรับ (Transport) ในภาวะสุญญากาศ ไอระเหยของสารเคลือบอาจจะมีการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ไปยังวัสดุรองรับ หรืออาจจะเคลื่อนที่ไปในลักษณะของไหล ซึ่งจะทำให้ไอระเหยของสารเคลือบมีการชนกับอนุภาคอื่นภายในภาชนะสุญญากาศ นอกจากนี้ไอระเหยอาจจะเคลื่อนที่ไปยังวัสดุรองรับในลักษณะของพลาสมาก็ได้

3. การสะสมพอกพูน (Deposition) เป็นขั้นตอนการพอกพูนของสารเคลือบและ โตขึ้นจนกลายเป็นชั้นของฟิล์มบางบนวัสดุรองรับ ขั้นตอนนี้ขึ้นกับเงื่อนไขของวัสดุรองรับหรือ การทำปฏิกิริยาของสารเคลือบกับวัสดุรองรับ ตลอดจนพลังงานที่ใช้ในการเคลือบ

การก่อเกิดฟิล์มบาง

การเกิดฟิล์มบางจากกระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ Chapman (1980) ได้อธิบายไว้ดังนี้ เมื่อสารเคลือบจากแหล่งกำเนิดสารเคลือบเคลื่อนที่มาถึงวัสดุรองรับสารเคลือบที่กระทบผิววัสดุรองรับส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของอะตอมหรือโมเลกุล (ภาพที่ 2-1(a)) โดยพลังงาน พันธะ (Bonding Energy) ระหว่างอะตอมของสารเคลือบกับวัสดุรองรับและอุณหภูมิของวัสดุรองรับจะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการแพร่ (Diffusion) ของสารเคลือบบนผิววัสดุรองรับ อะตอมของสารเคลือบจะตกกระทบผิววัสดุรองรับในตำแหน่งที่เรียกว่าตำแหน่งการดูดซับ (Adsorption Site) ทำให้เกิดการเกาะติดหรือถ้ามีพลังงานมากพอก็อาจจะกระโดดข้ามกำแพงพลังงาน ไปยังบริเวณที่อยู่ติดกันหรือหลุดออกจากตำแหน่งนั้นไป (ภาพที่ 2-1(b)) ในช่วงเวลาหนึ่งอะตอม สารเคลือบอาจเกิดการระเหยกลับและเกิดการรวมตัวกันระหว่างอะตอมที่มีการแพร่ด้วยกันเมื่อ อะตอมของสารเคลือบรวมตัวกันอาจเกิดเป็นอะตอมคู่ (ภาพที่ 2-1(c)) ซึ่งมีความเสถียรมากกว่า อะตอมเดี่ยว (Single Atom) ซึ่งการรวมตัวกันของอะตอมนั้นจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของ อะตอมเดี่ยวและอัตราเคลือบ (Deposition Rate) อะตอมคู่อาจรวมตัวกับอะตอมเดี่ยวอื่นแล้ว กลายเป็นสามอะตอม (Triplets) หรือสี่อะตอม (Quadruplets) หรืออื่น ๆ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า สภาวะการเกิดนิวเคลียส (ภาพที่ 2-1(d)) ทำให้ได้กลุ่มอะตอมกึ่งเสถียร (Quasi-Stable Islands) จากนั้นกลุ่มอะตอมจะเริ่มโตขึ้นเรียกว่า การโตเป็นกลุ่มก้อน (Island Growth) ขนาดของกลุ่ม

อะตอมจะใหญ่ขึ้นโดยมีจำนวนอะตอมเท่าเดิมหรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (ภาพที่ 2-1(e) และ 2-1(f)) การโตของกลุ่มอะตอมนี้จะเกิดขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งขอบของแต่ละกลุ่มอะตอมชนกันเรียกว่า การรวมเป็นก้อนของกลุ่มอะตอม (Agglomeration หรือ Coalescence) (ภาพที่ 2-1(g)) จากการศึกษา ด้วยเทคนิค Transmission Electron Microscopy (TEM) พบว่าขณะที่กลุ่มอะตอมรวมเป็นก้อน อะตอมมีพฤติกรรมคล้ายของเหลว (Liquid-Like Behaviour) และมีการจัดเรียงทิศทางในเชิงผลึก วิทยา (Crystallographic Orientation) ด้วยการรวมกันเป็นก้อนของกลุ่มอะตอมจะเกิดขึ้นจนกระทั่ง เชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่อง (ภาพที่ 2-1(h)) แต่ในบางกรณีการเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่องจะเกิดขึ้นได้ อย่างสมบูรณ์เมื่อฟิล์มมีความหนาโดยเฉลี่ยประมาณ $0.04-0.05 \mu\text{m}$ ลักษณะผิวของฟิล์มบางขณะ เกิดการรวมกลุ่มอะตอมจะคล้ายเนินเขาและหุบเขา



ภาพที่ 2-1 การก่อเกิดฟิล์มบาง (Chapman, 1980)

เมื่อพิจารณาการเกิดฟิล์มในสถานะที่เป็นกลุ่มอะตอม (Island) พบว่าอาจเป็นกลุ่มของผลึกเดี่ยวหรือกลุ่มของผลึกคู่หรือมากกว่านั้น ซึ่งกลุ่มอะตอมเหล่านี้จะตกเคลือบลงบนวัสดุรองรับที่เป็นวัสดุหลายผลึก ทิศทางการจัดเรียงตัว (Orientation) ของแต่ละกลุ่มอะตอมนั้นจะเป็นแบบสุ่ม (Random) ทำให้ได้ฟิล์มบางที่มีโครงสร้างเป็นหลายผลึกด้วย แต่ถ้ากลุ่มอะตอมเหล่านั้นตกเคลือบลงบนวัสดุรองรับที่เป็นผลึกเดี่ยวการจัดเรียงตัวของฟิล์มก็จะมีลักษณะเป็นผลึกเดี่ยวและเรียกการเกิดฟิล์มแบบผลึกเดี่ยวประเภทนี้ว่า เอพิแทกซี (Epitaxy)

ถ้าอะตอมที่ผิวของวัสดุรองรับมีพลังงานเพียงพอ อะตอมเหล่านั้นจะเคลื่อนที่เพื่อเลือกเข้าไปอยู่ในตำแหน่งที่มีพลังงานต่ำกว่าเสมอทั้งนี้ความสามารถในการเคลื่อนที่ (Mobility) ของอะตอมจะเพิ่มขึ้นถ้าอุณหภูมิที่ผิววัสดุรองรับสูงขึ้นนอกจากนี้การลดอัตราเคลือบยังสามารถช่วยให้การโตของผลึกเกิดได้ดียิ่งขึ้นเพราะอะตอมมีเวลาในการโตมากพอ ดังนั้นถ้าอุณหภูมิของวัสดุรองรับสูงและมีอัตราเคลือบต่ำจะได้ฟิล์มที่มีขนาดของเกรนใหญ่ขึ้นมีข้อบกพร่องในเกรนน้อยลง และได้ฟิล์มที่มีความหนามากพอสำหรับการเชื่อมต่อกันอย่างสมบูรณ์ในทางกลับกันถ้าอุณหภูมิวัสดุรองรับต่ำแต่อัตราเคลือบสูงก็จะให้ผลลักษณะเดียวกัน

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริง

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริงเป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นสารเคลือบในลักษณะฟิล์มบางของสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงการเคลือบด้วยวิธีนี้เกิดขึ้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงวิ่งเข้าชนวัสดุรองรับและมีการพอกพูนและโตเป็นฟิล์มบางในที่สุดกระบวนการสปัตเตอริงคือการทำให้อะตอมหลุดจากผิวของวัสดุโดยการชนของอนุภาคพลังงานสูงแล้วมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิวสารเคลือบ โดยอนุภาคที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้และเนื่องจากไอออนที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงในการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริงจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่าวิธีการระเหยสารมากดังนั้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบวิ่งเข้ากระทบแผ่นวัสดุรองรับก็จะฝังตัวแน่นลงในเนื้อวัสดุที่ต้องการเคลือบมากกว่าวิธีระเหยสาร ดังนั้นการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริงจะทำให้การยึดเกาะระหว่างสารเคลือบกับวัสดุรองรับดีกว่า (พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ และธนัสสา รัตน์, 2547; Chapman, 1980)

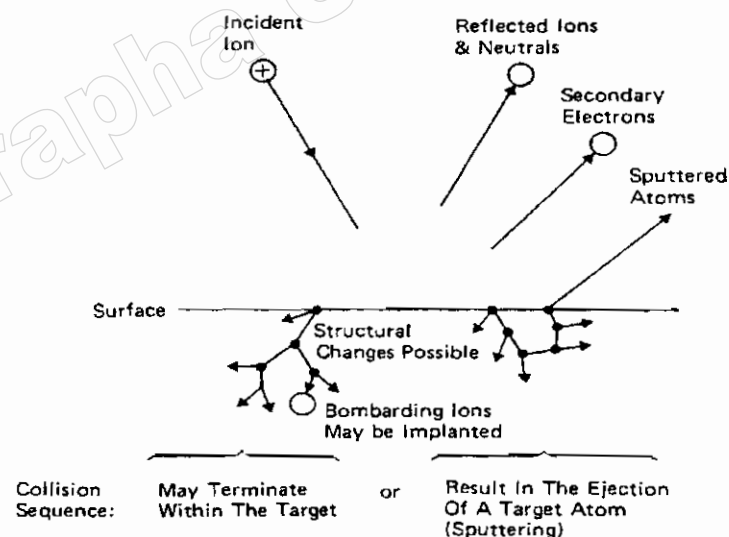
เมื่อผิวหน้าของวัสดุถูกระดมยิงด้วยอนุภาคพลังงานสูงจะทำให้เกิดการสึกกร่อนและมีอนุภาคที่ผิวหน้าของวัสดุนั้นหลุดมา เนื่องจากการชนของอนุภาคพลังงานสูงกับอนุภาคที่ผิวหน้าวัสดุ ปรากฏการณ์ที่อนุภาคผิวหน้าวัสดุหลุดออกมานี้เรียกว่า สปีดเตอร์ (Sputter) หรือสปีดเตอริง (Sputtering) ปัจจุบันมีการนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง เช่น การทำความสะอาดผิวหน้า (Surface Cleaning) การกัดเซาะ (Etching) การวิเคราะห์ชั้นผิวหน้าของวัสดุ (Surface Layer Analysis) และการเคลือบฟิล์มบาง

สำหรับแนวคิดเบื้องต้นเกี่ยวกับกระบวนการสปีดเตอริง อธิบายได้ดังนี้

1. อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบเมื่อไอออนพลังงานสูงวิ่งชนผิวหน้าวัสดุจะเกิดปรากฏการณ์ต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 2-2 ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

1.1 การสะท้อนที่ผิวหน้าของไอออน (Reflected Ion and Neutral) ไอออนอาจสะท้อนกลับจากผิวหน้าซึ่งส่วนใหญ่จะสะท้อนออกมาในรูปของอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้าอันเกิดจากการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิวเป้าสารเคลือบ

1.2 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สอง (Secondary Electron Emission) จากการชนของไอออนอาจทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองจากเป้าสารเคลือบถ้าไอออนนั้นมีพลังงานสูงพอ



ภาพที่ 2-2 อันตรกิริยาระหว่างไอออนกับพื้นผิววัสดุ (Chapman, 1980)

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

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

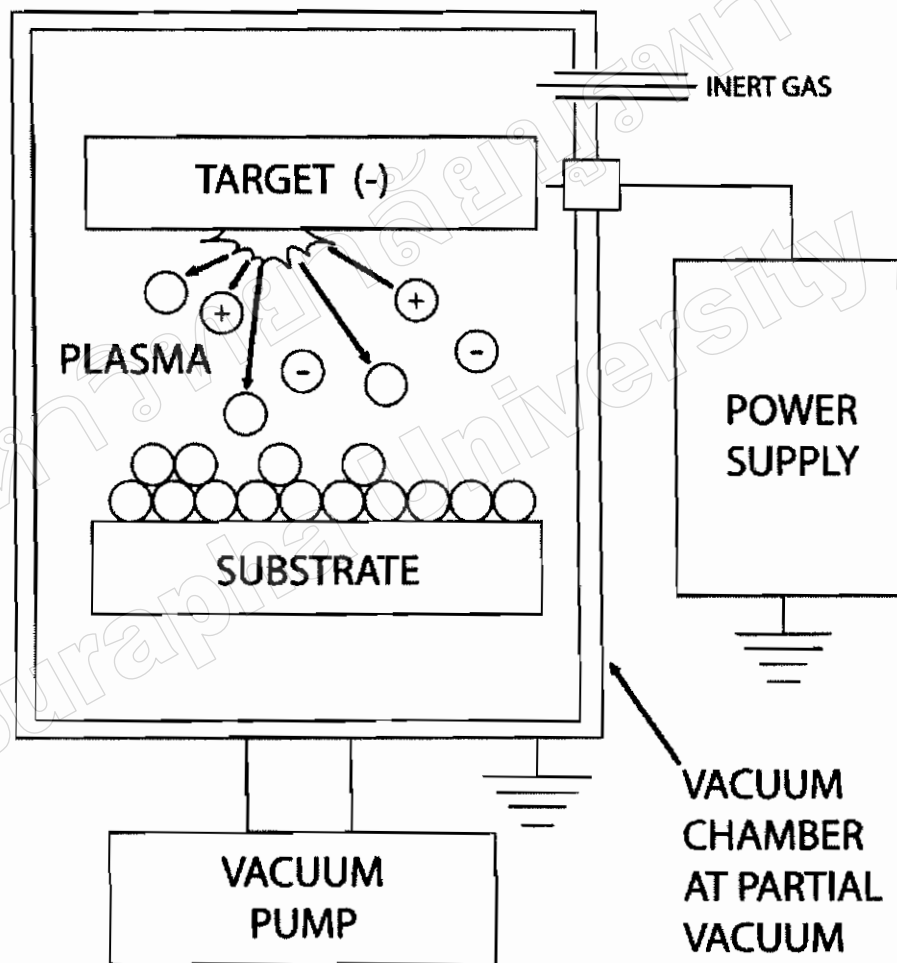
1.5 การสปัตเตอร์ (Sputter) การชนของไอออนอาจทำให้เกิดกระบวนการชนกันแบบต่อเนื่องระหว่างอะตอมของเป้าอันทำให้เกิดการปลดปล่อยอะตอมจากเป้าสารเคลือบซึ่งเรียกว่ากระบวนการสปัตเตอร์

2. กระบวนการสปัตเตอร์เป็นกระบวนการที่อะตอมผิวหน้าของวัสดุถูกทำให้หลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูง โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุดังกล่าว กระบวนการนี้อนุภาคที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ ดังนั้นสิ่งที่จำเป็นในกระบวนการสปัตเตอร์ คือ

2.1 เป้าสารเคลือบ ทำหน้าที่เป็นเป้าให้อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนจนมีการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลือบลงเคลือบบนวัสดุรองรับ

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

2.3 การผลิตอนุภาคพลังงานสูง อนุภาคพลังงานสูงในระบบสปัตเตอริงนี้จะต้องถูกผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้กระบวนการเคลือบสารเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจนได้ความหนาฟิล์มบางตามต้องการ ทั้งนี้สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้ลำอนุภาคจากปืนไอออนที่มีปริมาณการผลิตไอออนในอัตราสูงหรือผลิตจากกระบวนการโคล์ดีสชาร์จ์ เนื่องจากปืนไอออนมีราคาค่อนข้างสูงและให้ไอออนในพื้นที่แคบ กระบวนการสปัตเตอริงทั่วไปในระดับอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้กระบวนการ โคล์ดีสชาร์จ์ในการผลิตอนุภาคพลังงานสูง



ภาพที่ 2-3 ลักษณะของเครื่องเคลือบสุญญากาศด้วยวิธีสปัตเตอริง

3. ค่าyieldของสปัตเตอริง (Sputtering Yield: S) คือค่าเฉลี่ยปริมาณการหลุดของอะตอมเป้าสารเคลือบต่อปริมาณการชนของไอออน 1 อนุภาคมีหน่วยเป็นอะตอมต่อไอออนการวัดค่าyieldทำได้โดยการหาน้ำหนักหรือความหนาที่ลดลงของเป้าสารเคลือบหรือหาได้จากวัสดุทั้งหมดที่ถูกสปัตเตอริงหรืออาจหาได้จากการตรวจวัดสปัตเตอริงอะตอม (Sputter Atom) ขณะที่ยังฟุ้งกระจาย (พิเศษฐ ลิ้มสุวรรณ และธณัฐธา รัตน์ะ, 2547) ค่าyieldของกระบวนการสปัตเตอริงจะเปลี่ยนไปตามภาวะต่าง ๆ ดังนี้

3.1 เปลี่ยนแปลงตามพลังงานไอออนการชนของอนุภาค 2 อนุภาคในแนวเดียวกัน การถ่ายเทพลังงานระหว่างอนุภาคจะเป็นไปตามสมการที่ 2-1

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

เมื่อ ΔE คือพลังงานที่ถ่ายเทระหว่างอนุภาค

m คือมวลอะตอมที่ถูกชน

M คือมวลของอะตอมที่วิ่งเข้าชน

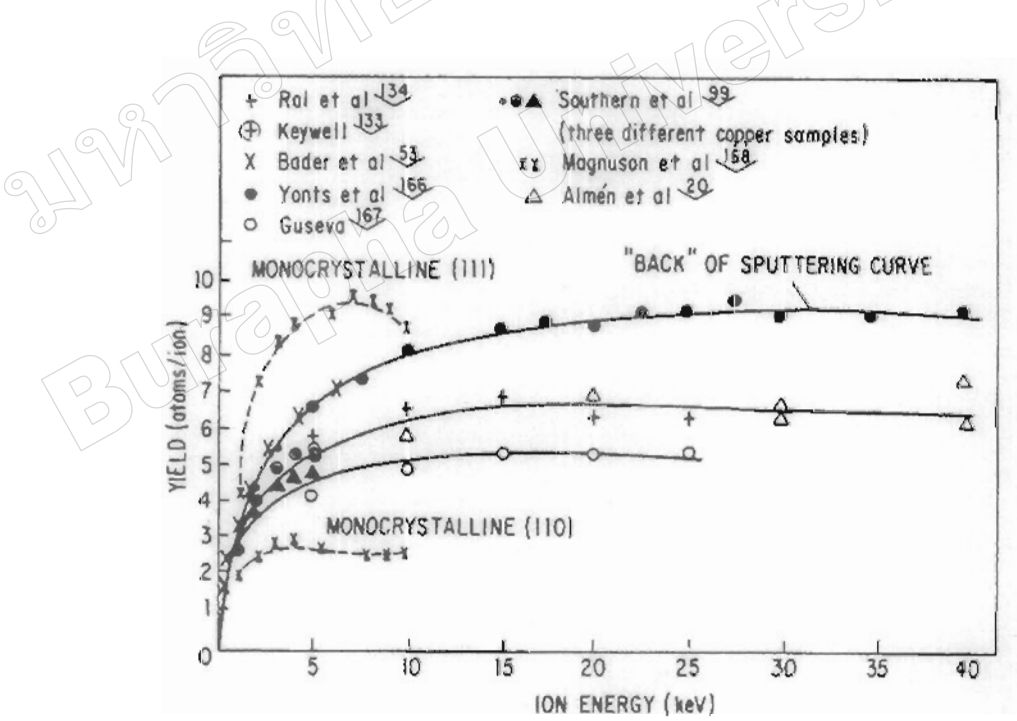
เมื่อพลังงานไอออนมีค่าต่ำกว่าค่าyieldจากกระบวนการสปัตเตอริงจะมีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากไม่สามารถเอาชนะแรงยึดเกาะระหว่างอะตอมบนเป้าสารเคลือบได้เมื่อไอออนมีพลังงานสูงขึ้นเกินกว่า $4H$ (H คือค่าพลังงานเฉลี่ยที่ใช้ในการระเหิด 1 อะตอมจากผิวสารเคลือบ) ถ้าพลังงานไอออนสูงมากพอในการทำให้เกิดกระบวนการชนอย่างต่อเนื่องระหว่างอะตอมสารเคลือบและเริ่มมีการปลดปล่อยอะตอมสารเคลือบเรียกพลังงานค่านี้ว่า พลังงานขีดเริ่ม (Threshold Energies) ซึ่งเปลี่ยนแปลงไประหว่างคู่การชนของอนุภาค (ตารางที่ 2-1)

เมื่อไอออนชนมีพลังงานสูงขึ้นyieldจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลในช่วงแรกและเปลี่ยนเป็นการเพิ่มแบบเชิงเส้นจากนั้นจึงมีการอิ่มตัว (Saturation) ของค่าyield เมื่อพลังงานไอออนมีค่าสูงมากทั้งนี้เนื่องจากไอออนพลังงานสูงมีโอกาสนในการฝังตัวบนผิวเป้าสารเคลือบสูงขึ้นทำให้yieldของสารเคลือบมีค่าคงที่จากนั้นจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มพลังงานไอออนให้สูงมากขึ้นดังแสดงในภาพที่ 2-4

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

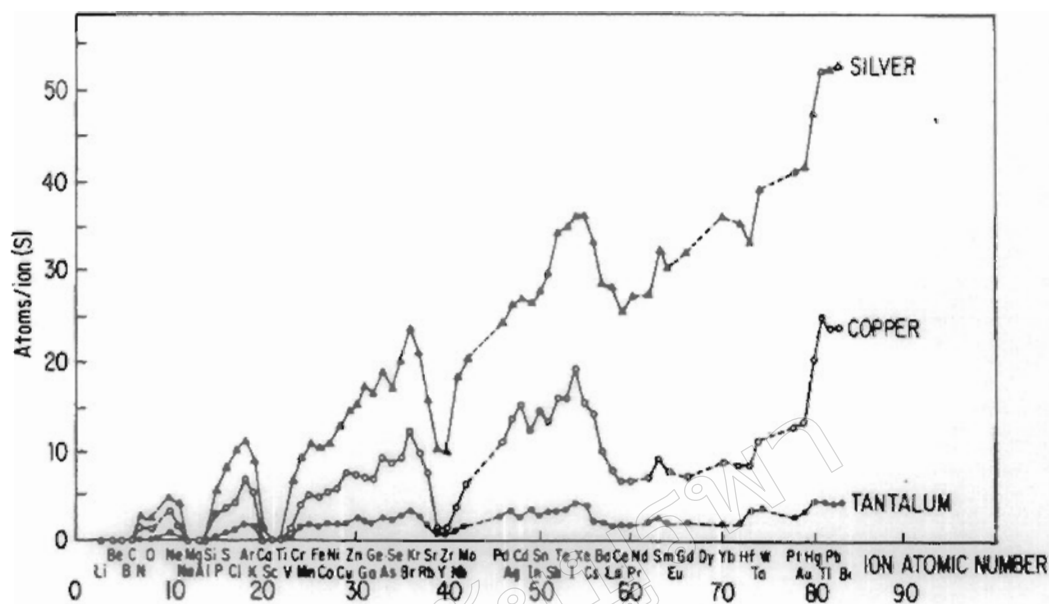


ภาพที่ 2-4 บิลด์ของทองแดงที่ถูกชนด้วยไอออนจากแก๊สอาร์กอนที่พลังงานต่าง ๆ (Maissel & Glang, 1970)

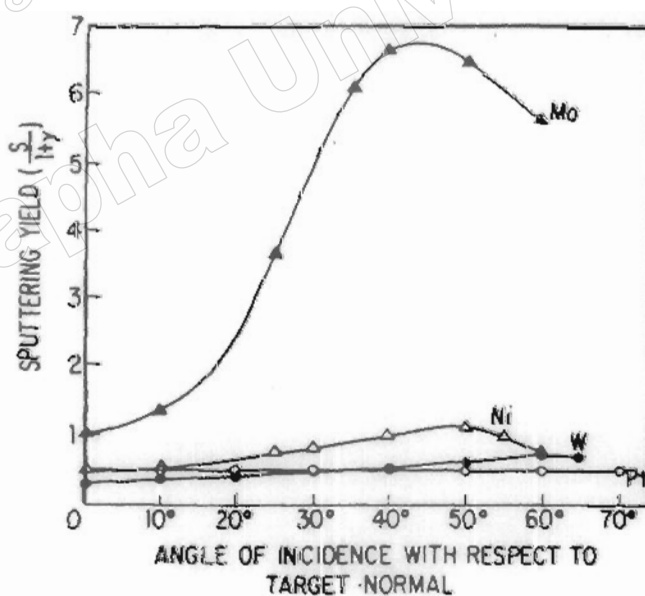
3.2 เปลี่ยนแปลงตามระนาบผลึกของผิวเป้าสารเคลือบจากการทดลองพบว่าเมื่อใช้เป้าสารเคลือบที่เป็นผลึกเดี่ยวค่าอิเล็กต์จะมีค่ามากที่สุดเมื่อไอออนชนเป้าในแนวระนาบที่มีอะตอมหนาแน่นที่สุดและมีค่าต่ำในระนาบที่มีอะตอมเบาบางในทองแดงซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ FCC (Face Centered Cubic) พบว่าการชนบนระนาบ (111) ซึ่งมีความหนาแน่นอะตอมสูงสุดอิเล็กต์จะมีค่าสูงสุดเมื่อใช้ค่าพลังงานไอออนในการชนค่าเดียวกันส่วนระนาบที่มีความหนาแน่นอะตอมต่ำ ไอออนมีแนวโน้มวิ่งฝังตัวในเป้าสารเคลือบมากขึ้น

3.3 เปลี่ยนแปลงตามชนิดของไอออนที่ชนเป้าสารเคลือบค่าอิเล็กต์จากเป้าสารเคลือบชนิดเดียวกันเมื่อใช้ไอออนต่างชนิดกันวิ่งชนจะมีค่าแตกต่างกันออกไปแม้สมการที่ 2-1 แสดงให้เห็นว่าการถ่ายเทพลังงานระหว่าง 2 อนุภาคที่ชนกันจะมีค่าสูงสุดเมื่อมวลของอะตอมทั้งสองมีค่าเท่ากันแต่อะตอมบนเป้าสารเคลือบยึดเกาะกับอะตอมข้างเคียงจึงทำตัวเสมือนมีมวลยังผลสูงกว่ามวลของอะตอมเดี่ยวจึงพบว่าอิเล็กต์มีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้ไอออนที่มีมวลสูงกว่ามวลของอะตอมเป้าสารเคลือบภาพที่ 2-5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าอิเล็กต์พบว่ามีค่าสูงสุดเป็นช่วง ๆ ณ ตำแหน่งที่ใช้ไอออนจากแก๊สเฉื่อยคือแก๊ส Ne, Ar, Kr, และ Xe ซึ่งเป็นอะตอมที่มีอิเล็กตรอนครบ 8 ในวงนอกสุดสาเหตุของการเกิดจุดสูงสุดของค่าอิเล็กต์เป็นช่วง ๆ นี้ยังไม่มีคำอธิบายที่ชัดเจน

3.4 เปลี่ยนแปลงตามมุมตกกระทบของไอออนบนเป้าสารเคลือบจากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มมุมเอียงของการชนจากไอออนบนเป้ามามากขึ้นอิเล็กต์จะมีค่าสูงขึ้นตามมุมที่เอียงเนื่องจากอะตอมสารเคลือบที่หลุดออกมาเปลี่ยนจากการกระเจิงกลับ (Back Scattering) เป็นการกระเจิงไปข้างหน้า (Forward Scattering) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ต้องการจำนวนครั้งของการชนระหว่างอะตอมน้อยกว่าทำให้อิเล็กต์สูงขึ้นจนถึงจุดหนึ่งซึ่งมีค่าสูงสุดที่องศาการเอียงมากกว่า 45° จากนั้นอิเล็กต์จะมีค่าลดลงเมื่อมุมสูงขึ้นและเป็นศูนย์เมื่อมุมเอียงมีค่า 90° โดยขณะนั้นพื้นที่การชนเมื่อมองจากไอออนมีค่าเป็นศูนย์ภาพที่ 2-6



ภาพที่ 2-5 การเปลี่ยนแปลงค่าyield ของเป้าทองแดง (Cu), เงิน (Ag) และแทนทาลัม (Ta) เมื่อใช้ไอออนพลังงาน 45 keV จากธาตุที่มีเลขอะตอมค่าต่าง ๆ (Maissel & Glang, 1970)



ภาพที่ 2-6 การเปลี่ยนแปลงของyield เมื่อใช้ไอออนของปรอทพลังงาน 200 eV ชนเป้านิกเกิล (Ni), โมลิบดีนัม (Mo), ทังสแตน (W) และทองคำขาว (Pt) ที่มุมการตกกระทบค่าต่าง ๆ (วัดเทียบกับแนวระนาบตั้งฉากบนเป้า) (Maissel & Glang, 1970)

4. ความเร็วและพลังงานของอะตอมที่ถูกสปีดเตอร์หลุดออกจากผิวหน้าเป้าสารเคลือบด้วยวิธีการสปีดเตอร์มีพลังงานจลน์ค่อนข้างสูงและมากกว่าพลังงานของอะตอมที่หลุดออกด้วยวิธีการระเหยสารประมาณ 50-100 เท่าอะตอมมีการกระจายพลังงานแบบ Maxwellian โดยที่พลังงานส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่า 10 eV และอีกส่วนหนึ่งมีพลังงานระหว่าง 10-40 eV ถ้าไอออนที่ใช้มีพลังงานสูงขึ้นพลังงานเฉลี่ยของอะตอมจากสปีดเตอร์จะมีค่าสูงขึ้นจนเมื่อไอออนที่วิ่งชนมีพลังงานเกิน 1 keV พลังงานเฉลี่ยของอะตอมจากการสปีดเตอร์จะไม่เพิ่มขึ้นและเป้าที่มีค่ายึดสูงมีแนวโน้มทำให้พลังงานเฉลี่ยของอะตอมที่หลุดออกมามีค่าต่ำเนื่องจากไอออนที่วิ่งชนเมื่อเฉลี่ยพลังงานให้กับอะตอมที่หลุดออกมาจำนวนมากอะตอมแต่ละตัวจะรับพลังงานเฉลี่ยจากไอออนได้น้อยลง

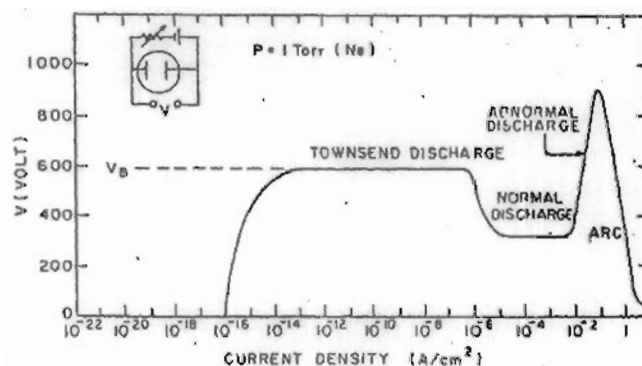
กระบวนการโกลว์ดิสชาร์จ

พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ และธนิษฐา รัตนะ (2547) ได้อธิบายกระบวนการโกลว์ดิสชาร์จไว้ดังนี้ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้ว ที่วางห่างกันเป็นระยะ d ภายใต้ความดันประมาณ 1-33 mbar ของแก๊สไนออน พบว่าช่วงแรก que เพิ่มแรงดันทางไฟฟ้าจะมีกระแสไหลในวงจรน้อยมาก กระแสส่วนนี้เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออนของแก๊สที่เกิดขึ้นตลอดเวลาในบรรยากาศเนื่องจากการชนของรังสีคอสมิกและถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้า กระแสนี้จะมีค่าค่อนข้างคงที่เพราะอัตราการเกิดประจุขึ้นอยู่กับความเข้มของรังสี เมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นใกล้ค่าแรงดันไฟฟ้าทะลาย (Breakdown Voltage: VB) พลังงานของประจุที่ถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้นจนสามารถชนโมเลกุลของแก๊สทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอนซึ่งถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าให้มีการชนและเกิดการไอออไนซ์เพิ่มขึ้น ส่วนของไอออนบวกจะถูกเร่งเข้าชนคาโทด จนเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) เรียกกระบวนการช่วงนี้ว่า ทาวนด์เซนส์ดิสชาร์จ (Townsend Discharge)

เมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นถึงแรงดันไฟฟ้าทะลายจะเกิดกระบวนการถล่ม (Avalanche) ทำให้ปริมาณไอออนบวกวิ่งเข้าชนคาโทดมากขึ้นและมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิมากขึ้น ซึ่งจะถูกร่งให้วิ่งเข้าหาแอโนดขณะเดียวกันอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้ก็จะมีการชนกับโมเลกุลของแก๊สทำให้เกิดไอออนมากขึ้น สุดท้ายไอออนบวกที่เพิ่มขึ้นมากขึ้นนี้จะวิ่งเข้าชนคาโทดแล้วเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิเพิ่มขึ้นตามมาด้วย และชนโมเลกุลแก๊สทำให้เกิดผลิตไอออนเพิ่มขึ้น ทำให้กระแสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีปริมาณไอออนมากเพียงพอที่จะผลิตอิเล็กตรอนได้ในจำนวนคงที่ ช่วงนี้ระบบสามารถรักษาสภาพดิสชาร์จได้ด้วยตนเองโดยไม่ต้องอาศัยแหล่งกำเนิดจากรังสีภายนอกในการผลิตไอออน ช่วงนี้แก๊สภายในระบบจะเกิดการเรืองแสงขึ้น แรงดันไฟฟ้าระหว่าง

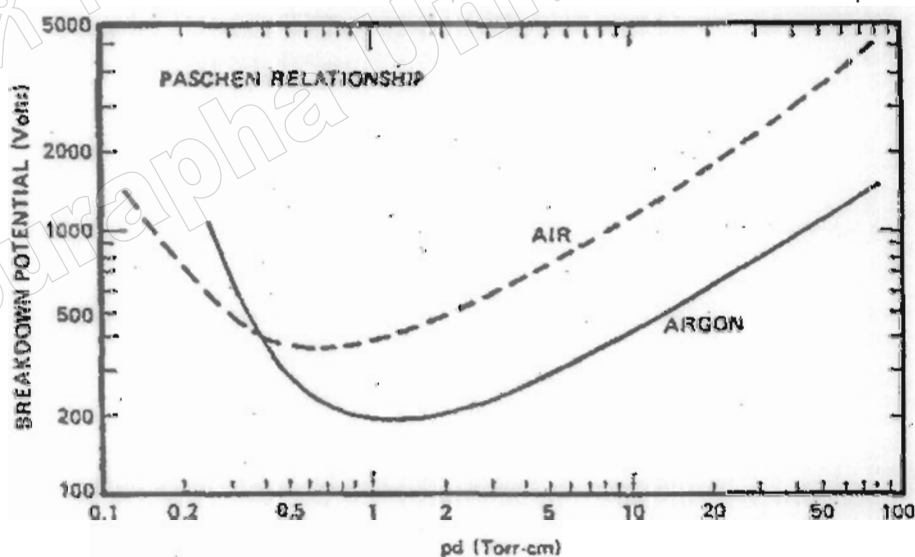
อิเล็กโตรดลดค่าลงและกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเรียก การเรืองแสงปกติ หรือ นอร์มอล โกลว์ (Normal Glow) สถานะนี้อัตราการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิต่ออัตราการชนของไอออน มีค่าค่อนข้างต่ำ คือประมาณ 0.1 สำหรับเป้าคาโทดที่ทำจากวัสดุทั่วไป โดยในช่วงเริ่มต้นของการเรืองแสงหรือโกลว์ การชนของไอออนบนคาโทดจะปรับตัวเองให้เกิดขึ้นในบางบริเวณ แนวการเรืองแสงอาจเลื่อนไปมาได้และการชนของไอออนบนคาโทด ไม่มีความสม่ำเสมอโดยจะมีความเข้มของบริเวณการเรืองแสงตามแนวขอบหรือมุมของคาโทดที่มีสนามไฟฟ้าสูงเพื่อรักษาสภาพการโกลว์ (Self-Sustaining) บางบริเวณไว้ เมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นตามแนวการชนของไอออนจะค่อย ๆ ขยายตัว เพิ่มพื้นที่จนครอบคลุมตลอดผิวคาโทด จนกระทั่งมีค่าความหนาแน่นกระแสเท่ากันตลอด โดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดคงที่

หลังจากการชนของไอออนครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดของคาโทดแล้ว การเพิ่มกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบจะทำให้ทั้งแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น เรียกว่า ช่วงการเรืองแสงผิดปกติ เปล่งแสงจ้าขึ้น หรือ แอบนอร์มอล โกลว์ (Abnormal Glow) เป็นช่วงที่ใช้กับระบบสปีดเตอริง และอีกหลาย ๆ ระบบของกระบวนการเกี่ยวข้องกับ โกลว์ดีสชาร์จ ช่วงนี้ถ้าไม่ระบายความร้อนให้กับคาโทด เมื่อความหนาแน่นของกระแสของคาโทดเพิ่มขึ้นสูงประมาณ 0.1 A/cm^2 ความร้อนที่เกิดจากการชนของไอออนบนผิวคาโทดมีมากขึ้น จนเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบเทอร์มิออนิก (Thermionic Electron Emission) เสริมกับการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิและติดตามด้วยกระบวนการถล่มอีกครั้งหนึ่ง ทำให้ความนำไฟฟ้าของแก๊สในระบบสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดตกลงมากขณะที่กระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นและเปล่งประกายจ้าของการอาร์ค (Arc Discharge) ภาพที่ 2-7

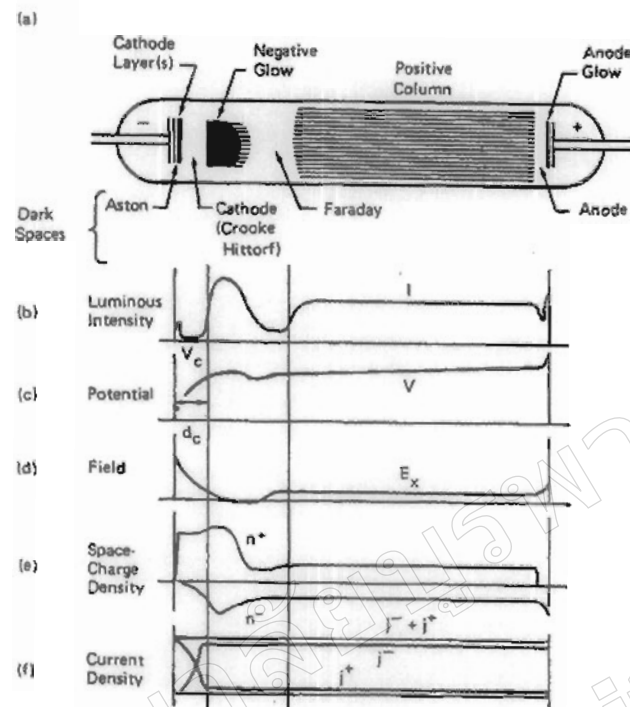


ภาพที่ 2-7 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดของกระบวนการเกิด ดีซี โกลว์ดีสชาร์จ ในหลอดสุญญากาศบรรจุแก๊สนีออน (Vossen & Kerns, 1978)

ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ละลายในกระบวนการ โกลว์ดีสชาร์จจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปกับระยะทาง d ระหว่างอิเล็กโตรดและระยะปลอดการชนระหว่างอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และโมเลกุลของแก๊ส (ระยะปลอดการชนของอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะแปรผกผันกับความดัน และมีค่ามากกว่าระยะปลอดการชนของการชนกันเองระหว่างโมเลกุลแก๊ส) ปกติอิเล็กตรอนทุติยภูมิแต่ละตัวมีความสามารถในการผลิตไอออนบวกได้ระหว่าง 10 ถึง 20 ตัว เพื่อให้เกิดกระบวนการถล่มในช่วงของนอร์มอล โกลว์ถ้าความดันต่ำเกินไป (ระยะปลอดการชนยาวขึ้น) หรือระยะทาง d มีค่าน้อยเกินไป อิเล็กตรอนทุติยภูมิจะไม่สามารถผลิตไอออนได้มากพอก่อนการชนกับไอออน ถ้าความดันสูงเกินไป (ระยะปลอดการชนสั้นลง) หรือระยะ d มากเกินไป อิเล็กตรอนทุติยภูมิไม่สามารถเพิ่มพลังงานให้กับตัวเองในสนามไฟฟ้าได้มากพอสำหรับใช้ในการไอออไนซ์ เมื่อเกิดการชนพลังงานจะถูกถ่ายทอดให้โมเลกุลแก๊สในรูปการกระตุ้น (Excite) ขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงขึ้นทำให้ไม่สามารถผลิตไอออนบวกได้มากเพียงพอเช่นกัน ดังนั้นทั้งสองกรณีจะต้องใช้แรงดันทางไฟฟ้าที่ละลายค่อนข้างสูงโดยมีจุดหนึ่งระหว่างนี้ที่เรียกว่าแรงดันไฟฟ้าที่ละลายต่ำสุดตามกฎของปาสเชน (Paschen's law) ซึ่งแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ละลายและผลคูณระหว่างความดันแก๊ส (P) และระยะระหว่างอิเล็กโตรด (d) (ภาพที่ 2-8)



ภาพที่ 2-8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ละลายและผลคูณระหว่างความดัน (P) และระยะระหว่างอิเล็กโตรด (d) (Bunshah, 1994)



ภาพที่ 2-9 โกลว์ดิสชาร์จของหลอดนีออนยาว 50 cm ที่ความดัน 1.33 mbar (Chapman, 1980)

ในระบบสปัตเตอริงทั่วไปสภาวะของการเกิดโกลว์ดิสชาร์จจะกระทำในช่วงที่ผลคูณของความดันกับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (Pxd) ซึ่งมีค่าต่ำกว่าจุดต่ำสุดของกราฟมาก (เนื่องจากการเคลือบฟิล์มที่ความดันต่ำทำให้ฟิล์มที่ได้มีคุณภาพเกิดการแทรกตัวของแก๊สในเนื้อฟิล์มน้อยและลดปริมาณสารปลอมปนในฟิล์ม) จึงต้องการแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นค่อนข้างสูง บางครั้งจึงมีความจำเป็นต้องใช้การเพิ่มความดันชั่วขณะเพื่อให้เริ่มการดิสชาร์จได้ที่แรงดันไฟฟ้าต่ำ

ส่วนต่าง ๆ ของกระบวนการโกลว์ดิสชาร์จ แสดงดังภาพที่ 2-9 โดย ช่วงแรกคือช่วงมืดแอสตัน (Aston Dark Space) เป็นบริเวณที่อิเล็กตรอนถูกปล่อยจากคาโทดด้วยพลังงานต่ำประมาณ 1 eV ซึ่งไม่สามารถไอออไนซ์โมเลกุลแก๊สได้ ทำให้เกิดเป็นช่วงมืดถัดจากผิวคาโทดบริเวณที่มีการเปล่งแสงออกมาด้วยความเข้มสูงมากเรียกว่า คาโทดโกลว์ (Cathode Glow) เป็นบริเวณที่ไอออนของแก๊สจากการดิสชาร์จ และไอออนของอะตอมสารเคลือบซึ่งถูกผลิตขึ้นบริเวณคาโทดมีการรวมตัวเป็นกลางกับอิเล็กตรอนใกล้ผิวคาโทดด้วยกระบวนการต่าง ๆ ทำให้เกิดแสงซึ่งเป็นการแผ่ของสารที่ทำคาโทดและของแก๊สที่ใช้ เช่น ถ้าคาโทดเป็นทองแดงจะมีสีเขียว ทองคำมีสีส้มแดง แก๊สอาร์กอนมีสีน้ำเงินฟ้า และแก๊สไนโตรเจนมีสีม่วง เป็นต้น

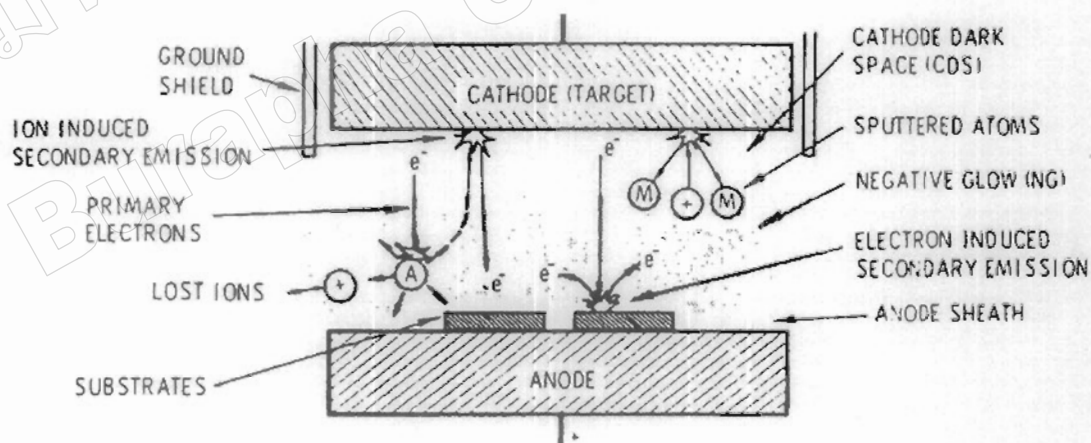
ถัดจากคาโทดโกลว์เรียกว่า ช่วงมืดครุคหรือช่วงมืดคาโทด (Crook or Cathode Dark Space) พลังงานของอิเล็กตรอนมีค่าสูงกว่าพลังงานในการไอออไนซ์โมเลกุลของแก๊สเมื่อถูกเร่งผ่านสนามไฟฟ้าในระยะปลอดการชนออกมา ทำให้บริเวณปลอดการชนไม่มีการไอออไนซ์เกิดขึ้น จึงไม่เกิดการปลดปล่อยแสงในช่วงนี้ กลายเป็นบริเวณมืด ถัดจากระยะปลอดการชนอิเล็กตรอนทุกตัวจะสูญเสียพลังงานส่วนใหญ่โดยการไอออไนซ์โมเลกุลแก๊ส ไอออนบวกที่เกิดขึ้นเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าอิเล็กตรอน ทำให้ระยะปลอดการชนของอิเล็กตรอนมีการสะสมของไอออนบวกอยู่มาก (Positive Space Charge) ศักย์ไฟฟ้าเกือบทั้งหมดตกคร่อมบริเวณคาโทดคาร์คสเปซนี้ทำให้สนามไฟฟ้าบริเวณนี้สูงขึ้นและมากเกินไปสำหรับการเร่งอิเล็กตรอนชนและ ไอออไนซ์โมเลกุลแก๊สในเวลาถัดมาทำให้ หลังการเกิดนอร์มอลโกลว์ แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอิเล็กโตรดมีค่าลดลงตามกราฟภาพที่ 2-8 ส่วนอิเล็กตรอนเมื่อเลยจากบริเวณผลิตไอออนของคาร์คสเปซแล้วจะมีพลังงานลดลง พลังงานที่เหลือเพียงในการกระตุ้น โมเลกุลของแก๊สและเกิดการเรืองแสงขึ้น เมื่ออิเล็กตรอนจะเป็นอนุภาคที่เคลื่อนที่ได้เร็วแต่พลังงานที่เหลือน้อยมากรวมทั้งประจุบวกและประจุสะสมของไอออนทางด้านซ้ายมือในบริเวณคาร์คสเปซทำให้อิเล็กตรอนใช้เวลาในการเคลื่อนที่ผ่านช่วงเรืองแสงนี้นานขึ้นและเกิดการสะสมประจุลบบริเวณนี้จึงเรียกว่า เนกาทีฟโกลว์ (Negative Glow)

จากนั้นอิเล็กตรอนจะมีพลังงานลดลงจนไม่สามารถกระตุ้น โมเลกุลแก๊สให้เปลี่ยนไปอยู่ในระดับพลังงานสูงได้ ทำให้เกิดบริเวณมืดอีกช่วงหนึ่งเรียกว่า ช่วงมืดฟาราเดย์ (Faraday Dark Space) ถัดจากช่วงนี้กระบวนการที่เกิดขึ้นคล้ายกับการดิสชาร์จของทาวนด์เซนส์ซึ่งมีปริมาณอิเล็กตรอนค่อนข้างคงที่ถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าค่าต่ำ ๆ ทำให้อิเล็กตรอนถูกเร่งเข้าสู่แอโนดและมีพลังงานสูงพอสำหรับการกระตุ้น โมเลกุลของแก๊สหรือไอออไนซ์และเกิดการเรืองแสงขึ้นที่บริเวณนี้อีกครั้งหนึ่ง อิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่เร็วจะถูกกวาดเข้าสู่แอโนดอย่างรวดเร็วทำให้พลาสมาบริเวณนี้มีประจุบวกสูงกว่าจึงเรียกว่า ลำเรืองแสงศักย์ไฟฟ้าบวก (Positive Glow Column)

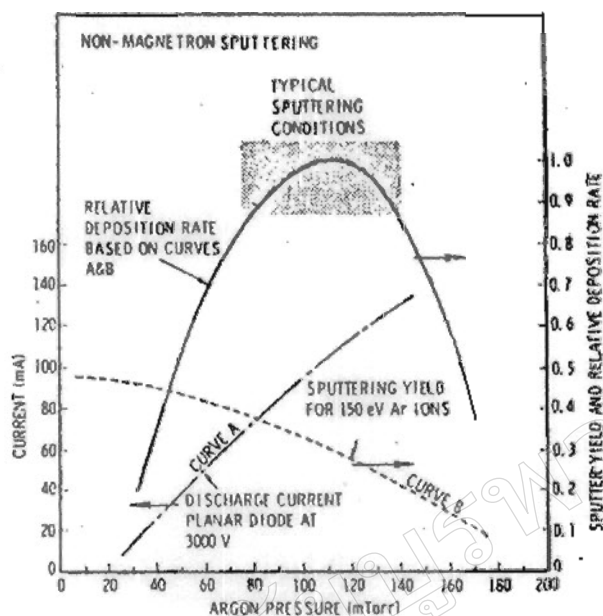
เนื่องจากโกลว์ดิสชาร์จขึ้นกับปริมาณของอิเล็กตรอนที่ถูกผลิตขึ้นบริเวณคาโทดจากการชนของไอออนที่ถูกผลิตบริเวณเนกาทีฟโกลว์ จึงพบว่าการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งแอโนดเพียงเล็กน้อยจะไม่มีผลต่อโกลว์ดิสชาร์จ เมื่อเลื่อนแอโนดเข้าหาคาโทดพื้นช่วงมืดฟาราเดย์เข้าสู่เนกาทีฟโกลว์จนถึงช่วงคาโทดคาร์คสเปซ ทำให้ปริมาณไอออนที่ถูกผลิตจากอิเล็กตรอนทุกตัวมีปริมาณน้อยลง การรักษาสภาพโกลว์ดิสชาร์จไว้จำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นซึ่งจะส่งผลถึงปริมาณไอออนที่ถูกผลิตสูงขึ้นด้วย การโกลว์ในลักษณะนี้จะเรียกว่า ออบสตรัคทด์โกลว์ (Obstructed Glow) และเมื่อเลื่อนแอโนดเข้าใกล้คาโทดต่อมาจนพ้นขอบของ คาโทดคาร์คสเปซ ซึ่งมีระยะสั้นกว่าระยะปลอดการชนของอิเล็กตรอน จะไม่มีการผลิตไอออนเกิดขึ้นและกระบวนการดิสชาร์จไว้ได้ และถ้าหากมีสิ่งสกปรกบริเวณคาโทดการอาร์คอาจเกิดขึ้นได้โดยไม่เกิดการโกลว์ดิสชาร์จก็ได้

ระบบเคลือบแบบดีซีสปัตเตอร์ริง

ภาพที่ 2-10 แสดงระบบเคลือบแบบดีซีสปัตเตอร์ริงอย่างง่ายที่สุด (พิเชษฐ ถัมสุวรรณ และธนัสถา รัตน์, 2547; Bunshah, 1982; Smith, 1995) ซึ่งประกอบด้วยคาโทดคือแผ่นเป้าสารเคลือบและอโนด คือ ที่วางวัสดุรองรับหรือชิ้นงานที่ต้องการเคลือบปกติระยะระหว่างคาโทดและวัสดุรองรับจะอยู่ระหว่าง 4-10 cm เพื่อป้องกันการสูญเสียอะตอมสารเคลือบที่ผนังของภาชนะสุญญากาศโดยทั่วไประยะคาร์คัสเปออยู่ระหว่าง 1-4 cm โดยอโนดจะอยู่บริเวณเนกาทีฟโกล์วส่วนอุปกรณ์ทำงานจะอยู่ในช่วงแอนนอร์มอลโกล์วดีสชาร์จ์แก๊สที่ใช้เป็นแก๊สเฉื่อยซึ่งให้ยึดสูงและไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคลือบ (ปกติใช้แก๊สอาร์กอน) ขณะเกิดโกล์วดีสชาร์จ์ที่ความดันค่าหนึ่ง กระบวนการไอออนในเซชันจะรักษาสภาพโกล์วดีสชาร์จ์ไว้ครบที่ระยะคาร์คัสเปอไม่มากกว่าระยะระหว่างคาโทดและอโนดเมื่อความดันลดลงหรือแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดสูงขึ้นระยะปลดการชนของอิเล็กตรอนจะสูงขึ้นทำให้ระยะคาร์คัสเปอขยายตัวออกและแหล่งผลิตไอออนในระบบมีปริมาณน้อยกระแสนลดลงและอะตอมที่ถูกสปัตเตอร์มีปริมาณลดลงตามปริมาณของไอออนและกระแสไฟฟ้าในระบบที่ความดันต่ำกว่า 10^{-2} mbar ระยะคาร์คัสเปอจะยาวกว่าระยะระหว่างอิเล็กโตรดและกระแสไฟฟ้าลดลงสู่ศูนย์ทำให้กระบวนการผลิตไอออนสิ้นสุดลงและไม่มีอะตอมหลุดออกจากเป้าสารเคลือบเนื่องจากการสปัตเตอร์อีก



ภาพที่ 2-10 ระบบเคลือบแบบดีซีสปัตเตอร์ริง (Bunshah, 1994)



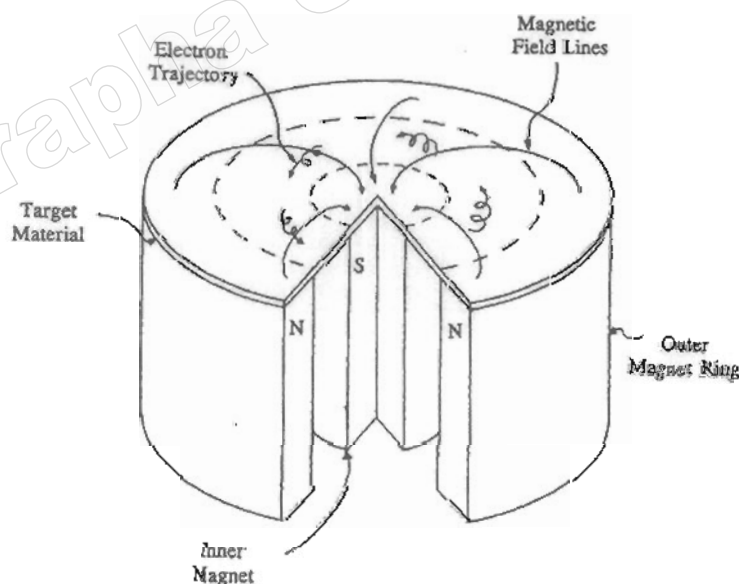
ภาพที่ 2-11 ผลของความดันในระบบที่มีผลต่ออัตราเคลือบค่าบิลด์และกระแสไฟฟ้าในระบบสปัตเตอร์ของนิกเกิลที่ใช้แรงดันไฟฟ้า 3,000 V ระหว่างขั้วอิเล็กโตรดที่วางห่างกัน 4.5 cm (Vossen & Kerns, 1978)

ขณะที่ความดันสูงขึ้นระยะการสปัตเตอร์จะหดสั้นลง บริเวณการผลิตไอออนมีปริมาตรสูงขึ้นกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรเพิ่มขึ้นและกระบวนการสปัตเตอร์เกิดขึ้นในอัตราสูงตามความดันดังภาพที่ 2-11 เส้นกราฟ A ขณะที่ความดันภายในระบบสูงขึ้นระยะปลอดการชนระหว่างโมเลกุลของแก๊สมีค่าลดลงอะตอมสารเคลือบที่หลุดออกจากเป้าจะส่งผ่านเคลือบบนวัสดุรองรับได้ยากจากการชนกับ โมเลกุลของแก๊สและสะท้อนกลับสู่เป้าสารเคลือบหรือสูญเสียสู่ผนังภาชนะสุญญากาศทำให้ค่าของบิลด์จากการสปัตเตอร์มีค่าลดลงแต่เมื่อความดันสูงขึ้นดังภาพที่ 2-11 เส้นกราฟ B ผลรวมระหว่างบิลด์และกระแสไอออนจะทำให้อัตราการเคลือบมีค่าสูงสุดที่ความดันค่าหนึ่งทั้งนี้พบว่าการสปัตเตอร์นิกเกิลเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า 3,000 V ระหว่างขั้วอิเล็กโตรดที่วางห่างกัน 4.5 cm ในแก๊สอาร์กอนการเคลือบจะหยุดที่ความดันมีค่าต่ำกว่า 2.6×10^{-4} mbar และที่ความดันสูงกว่า 1.6×10^{-5} mbar โดยอัตราเคลือบจะมีค่าสูงสุดและลดลงเมื่อความดันสูงเกินค่านี้นี้ ดังนั้นบริเวณที่เหมาะสมกับกระบวนการสปัตเตอร์คือบริเวณที่ให้อัตราเคลือบสูงและประสิทธิภาพดีที่สุดจากภาพที่ 2-11 พบว่าความดันที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบคือ 1.0×10^{-5} mbar ความหนาแน่นกระแสประมาณ 1.0 mA/cm^2 ด้วยอัตราเคลือบ $0.036 \text{ } \mu\text{m/min}$ ซึ่งเป็นอัตราเคลือบที่ค่อนข้างต่ำในขณะที่ใช้แรงดันไฟฟ้าค่อนข้างสูง (พิเชษฐ ถิมสุวรรณ และธนัสถา รัตน์ะ, 2547)

ระบบเคลือบแบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

อัตราการเกิดสปัตเตอริงนั้นจะขึ้นกับผลคูณระหว่างอัตราเร็วและปริมาณไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบ ดังนั้นการเพิ่มอัตราการสปัตเตอริงนั้นนอกจากจะทำได้โดยการเพิ่มอัตราเร็วแล้วยังทำได้โดยการเพิ่มปริมาณไอออนที่วิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบซึ่งในระบบดีซีสปัตเตอริงปกตินี้ทำได้เพียงการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดหรือเพิ่มความดันซึ่งจะมีขีดจำกัดสูงสุดที่ความหนาแน่นกระแสประมาณ 1 mA/cm^2 และความดันประมาณ $1.33 \times 10^{-5} \text{ mbar}$ นอกจากนี้ยังพบว่าในระบบดีซีสปัตเตอริงทั่วไปอะตอมของแก๊สที่จะเกิดการไอออไนซ์มีค่าน้อยกว่า 1% นอกจากนี้ยังมีข้อเสียเมื่อความดันสูงขึ้นจะทำให้ปริมาณแก๊สที่แทรกตัวในฟิล์มบางที่ได้มีค่าสูงด้วย (พิเชษฐ ลัมสุวรรณ และธนัสถา รัตน์, 2547)

ต่อมามีการพัฒนาระบบใหม่เรียกว่า ระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง (พิเชษฐ ลัมสุวรรณ และธนัสถา รัตน์, 2547; Smith, 1995) ซึ่งเป็นการใช้สนามแม่เหล็กช่วยโดยง่าย สนามแม่เหล็กให้มีทิศทางกับผิวหน้าเป้าสารเคลือบและมีทิศตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าซึ่งจะช่วยเพิ่มระยะทางเดินของอิเล็กตรอนให้ยาวขึ้นโดยอำนาจของสนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นทางโค้ง (ภาพที่ 2-12) ทำให้การไอออไนซ์เนื่องจากการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมแก๊สเพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้อัตราการสปัตเตอริงสูงขึ้นด้วย



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

ทั้งนี้จากการศึกษาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กพบว่าถ้าอิเล็กตรอนมีทิศทางการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กอิทธิพลของสนามแม่เหล็กจะทำให้อนุภาคประจุนี้เคลื่อนที่ในแนววงกลม (ภาพที่ 2-13 (a)) ด้วยรัศมี

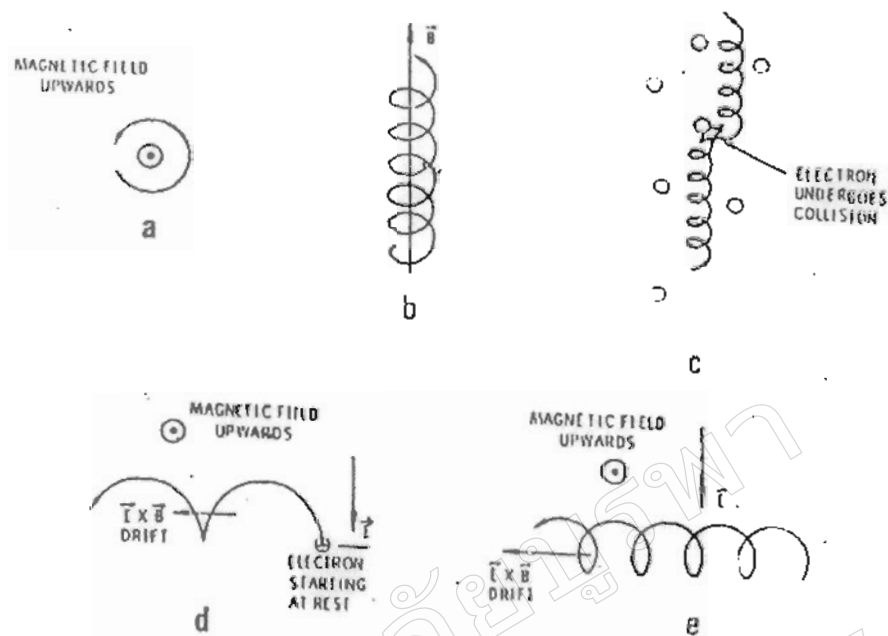
$$r = \frac{3.37\sqrt{W}}{B} \quad (2-2)$$

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 อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่หมุนควงรอบแนวสนามแม่เหล็กด้วยจำนวนเส้นแรงคงที่ค่าหนึ่งระหว่างนี้ถ้าอิเล็กตรอนชนกับอะตอมแก๊สภาพที่ 2-13(c) แนวการหมุนควงรอบสนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนไปถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ภายในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกันอำนาจของสนามทั้งสองนอกจากจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในแนวโค้งแล้วยังสามารถทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเรียกว่า การเคลื่อนที่แบบลอยเลื่อน (Drift Motion) มีค่าเท่ากับ

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

เมื่อ E คือสนามไฟฟ้าหน่วยเป็น V/cm
 B คือความเข้มสนามแม่เหล็กในหน่วย gauss

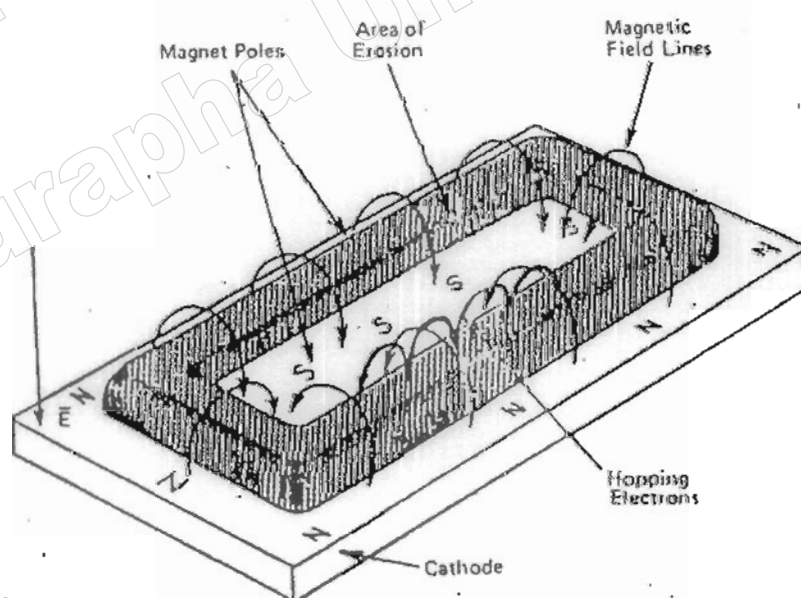


ภาพที่ 2-13 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามต่าง ๆ โดยที่ a, b, c เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กอย่างเดียวน ส่วน d และ e เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าร่วมกัน ในลักษณะต่าง ๆ (Bunshah, 1994)

กรณีสนามไฟฟ้าบริเวณแคโรคสเปซมีค่าประมาณ $1,000 \text{ V/cm}$ และสนามแม่เหล็กมีค่าประมาณ 100 gauss จะให้ค่าความเร็วลอยเลื่อน (Drift Velocity) เท่ากับ 10^7 m/s ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูงกรณีพลังงานเริ่มต้นของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้าการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะเป็นรูป Cycloid ดังภาพที่ 2-13 (d) ถ้าอิเล็กตรอนมีพลังงานเริ่มต้นสูงกว่าพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้าการเคลื่อนที่แบบลอยเลื่อนจะอยู่ในแนววงกลมซ้อนกันดังแสดงในภาพที่ 2-13 (e) พฤติกรรมที่ปรากฏต่ออิเล็กตรอนนี้จะเด่นชัดมากถึงแม้จะใช้สนามแม่เหล็กมีค่าน้อย ๆ ระหว่าง $50\text{-}500 \text{ gauss}$ แต่จะมีผลในการเบี่ยงเบนแนวทางการเดินของไอออน (ซึ่งมีมวลสูงกว่าอิเล็กตรอนมาก) อย่างไม่เด่นชัด

ระบบสปัดเตอริงที่ใช้สนามแม่เหล็กช่วยเพิ่มปริมาณ ไอออนนั้นถ้าสนามแม่เหล็กมีทิศทางขนานกับสนามไฟฟ้าจะเรียกว่า สนามตามยาว (Longitudinal Field) จะทำให้ประสิทธิภาพการเพิ่มไอออนไม่สูงนักแต่ไม่ทำให้แนวการเกิดโกลว์ดิสซาร์จเปลี่ยนแปลงไปและยังสามารถรักษาความสม่ำเสมอของฟิล์มบางไว้ได้กรณีของสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าเรียกว่า สนามตามขวาง (Transverse Field) โดยกระบวนการเพิ่มปริมาณไอออนเกิดขึ้นดังนี้ หลังจากที

ไอออนบวกชนกับเป้าสารเคลือบและเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองออกมาอิเล็กตรอนชุดที่สองจะเคลื่อนที่ในลักษณะเดียวกับภาพที่ 2-13 (d) ทำให้อิเล็กตรอนถูกกักอยู่ในบริเวณสนามแม่เหล็กใกล้คาโทดและเคลื่อนที่แบบลอยเลื่อนตามแนวผิวหน้าของคาโทด (ภาพที่ 2-14) ทำให้อิเล็กตรอนมีโอกาสนชนกับโมเลกุลแก๊สบริเวณผิวหน้าเป้าสารเคลือบมากขึ้นจนเพิ่มปริมาณไอออนสูงมากใกล้ผิวเป้าสารเคลือบอิเล็กตรอนตัวใดที่ไม่ชนโมเลกุลของแก๊สจะเดินทางเป็นวงโค้งเข้าชนเป้าสารเคลือบและผลิตอิเล็กตรอนชุดที่สองมากขึ้นเป็นผลทำให้ไอออนถูกผลิตในปริมาณสูงมากและเกิดใกล้ผิวคาโทดทำให้เกิดสเปซชาร์จจากไอออนบวกสูงที่ผิวคาโทดซึ่งอาจสั้นกว่าระยะปลดการชนในดีซีสปัตเตอริงที่ความดันใช้งานมากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเกือบทั้งหมดจะตกคร่อมบริเวณนี้และมีค่าสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณคาร์คสเปซในดีซีสปัตเตอริงขณะไม่มีสนามแม่เหล็กมากทำให้ความต้องการแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดของระบบแมกนีตรอนสปัตเตอริงลดลงทั่วไปมีค่าประมาณ 300-800 V ถ้าใช้สนามแม่เหล็กกับแมกนีตรอนทรงกระบอกจะเรียกว่า แมกนีตรอนสปัตเตอริงทรงกระบอก (Cylindrical Magnetron Sputtering) และถ้าใช้สนามแม่เหล็กกับระบบดีซีสปัตเตอริงที่ใช้เป้าแบบแผ่นราบจะเรียกว่า พลาสมาแมกนีตรอนสปัตเตอริง (Planar Magnetron Sputtering)



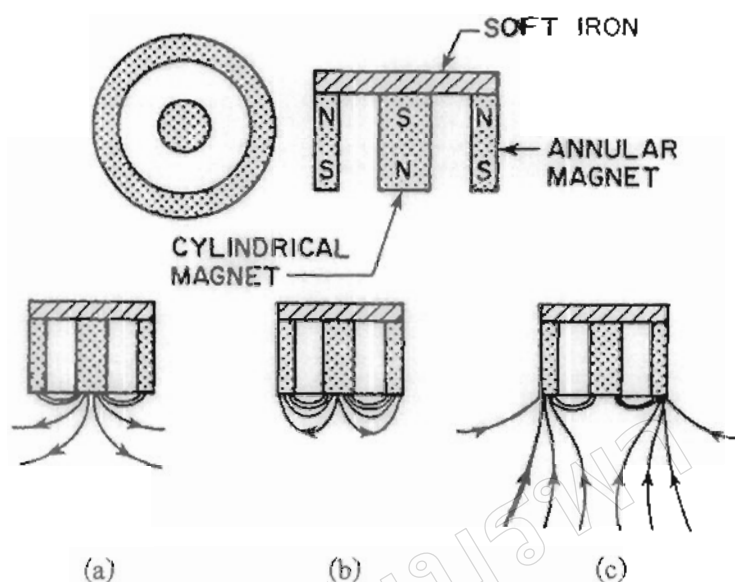
ภาพที่ 2-14 การจัดสนามแม่เหล็กและแนวการกักตร้อนของเป้าสารเคลือบในระบบพลาสมาแมกนีตรอนสปัตเตอริง (Chapman, 1980)

ประสิทธิภาพการเพิ่มไอออนในระบบแมกนีตรอนและพลาสมาที่เกิดขึ้นจะเข้มข้นมาก บริเวณเป้าสารเคลือบทำให้อัตราการสputteringของระบบนี้มีค่าสูงขณะที่ความดันในระบบจะมีค่าต่ำ แรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าเกือบคงที่ที่ทุกค่าของอัตราการสputteringแมกนีตรอน สputteringทรงกระบอกทั่วไปมีอัตราการสputteringสูงกว่า $1.0 \mu\text{m}/\text{min}$ และมีอัตราเคลือบสูงกว่า $0.2 \mu\text{m}/\text{min}$ ความหนาแน่นกระแสที่ผิวคาโทดประมาณ $20.0 \text{ mA}/\text{cm}^2$ แรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าระหว่าง $300\text{--}800 \text{ V}$ ที่ความดันประมาณ $5.33 \times 10^{-5} \text{ mbar}$ ประสิทธิภาพการเคลือบ สูงขึ้นกว่า 10 เท่าตัวนอกจากนี้ยังสามารถขยายสเกลใช้กับระบบสputteringขนาดใหญ่ได้ง่ายเมื่อ ออกแบบใช้งานร่วมกับไดโอดสputteringระบบสามารถเคลือบได้ที่ความดันต่ำถึง 10^{-5} mbar

ระบบเคลือบแบบอเนกประสงค์แมกนีตรอนสputtering

ในการเคลือบฟิล์มพบว่าถ้าระดมยิงไอออนระหว่างการเกิดฟิล์มจะเป็นการเปลี่ยนแปลงฟิล์มหลายอย่าง เช่น พฤติกรรมการเกิดนิวเคลียส (Nucleation Behaviour) สัณฐานวิทยา (Morphology) องค์ประกอบ (Composition) ทิศทางการจัดเรียงตัวและสมบัติเชิงกล เป็นต้น ในกรณีแมกนีตรอนสputtering ไอออนที่ใช้ในการระดมยิงวัสดุรองรับจะมาจากประจุไฟฟ้าที่อยู่รอบวัสดุรองรับซึ่งทำได้โดยการจ่ายศักย์ลบประมาณ $1\text{--}500 \text{ V}$ ให้กับวัสดุรองรับอย่างไรก็ดี ความหนาแน่นกระแสที่ฟิล์มหรือผิวหน้าของวัสดุรองรับสำหรับระบบดีซีแมกนีตรอนปกติจะมีค่าต่ำประมาณ $0.05\text{--}0.10$ ไอออน/อะตอมสารเคลือบแต่การใช้งานจริงต้องมีค่าสูงกว่านี้ (Rohde & Munz, 1991)

สำหรับการเคลือบแข็ง (Hard coating) ฟิล์มบางที่ต้องการนั้นจะต้องมีช่องว่าง (Voids) ในเนื้อฟิล์มน้อยที่สุดซึ่งจะทำให้ฟิล์มบางที่ได้นั้นมีความทนต่อการกัดกร่อน (Corrosion) และทนต่อการขัดสี (Wear Resistance) มากยิ่งขึ้น โดยการลดช่องว่างในเนื้อฟิล์มนี้สามารถทำได้โดยการเพิ่มความต่างศักย์ไบแอสให้กับวัสดุรองรับแต่ก็จะทำให้เกิดความเค้นและความบกพร่อง (Defects) ภายในเกรน (Grain) ของฟิล์มมากขึ้นเมื่อความต่างศักย์ไบแอสเพิ่มขึ้นด้วยซึ่งจะทำให้คุณภาพของฟิล์มและการยึดติดของฟิล์มกับวัสดุรองรับลดลงปัญหานี้สามารถแก้ได้โดยเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไอออน (อัตราส่วนของไอออน/อะตอมสารเคลือบ) ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้ระบบเคลือบแบบอเนกประสงค์แมกนีตรอนสputtering (Unbalanced Magnetron Sputtering) (Rohde & Munz, 1991; Sproul, 1992)

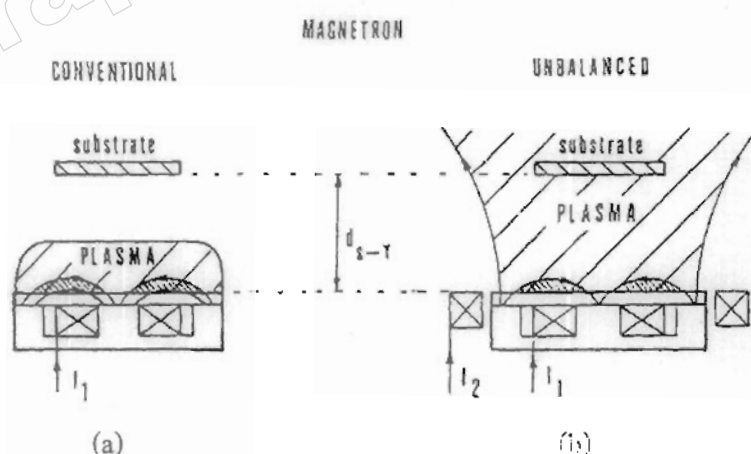


ภาพที่ 2-15 ลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กของระบบอันทาลานซ์แมกนีตรอนสปีดเตอริง
(Rickerby & Matthews, 1991)

ระบบอันทาลานซ์แมกนีตรอนสปีดเตอริงได้รับการคิดค้นและตีพิมพ์เผยแพร่โดย Window และ Savvides ครั้งแรกในปี ค.ศ.1986 โดยทั้งสองพบว่า การติดตั้งแม่เหล็กที่คาโทดของระบบสปีดเตอริงปกตินั้นถ้าหากทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กด้านใดด้านหนึ่งมากกว่าหรือน้อยกว่าอีกด้านหนึ่งแล้วสนามแม่เหล็กที่คาโทดจะมีลักษณะไม่สมมาตรทำให้ปริมาณไอออนที่วิ่งเข้าชนหรือระดมยิงวัสดุรองรับนั้นมีปริมาณเพิ่มขึ้นมากกว่าปกติซึ่งจะมีผลต่อคุณภาพของฟิล์มโดยตรงการจัดแม่เหล็กของระบบนี้อาจแบ่งเป็น 3 แบบคือความเข้มสนามของแม่เหล็กที่ด้านในมากกว่าด้านนอก (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 (เมื่อใช้ความต่างศักย์ไบแอสต่ำ) ปัจจุบันมีนักวิจัยหลายกลุ่มที่นำแนวคิดนี้ไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายซึ่งมีทั้งที่ใช้แม่เหล็กแบบถาวรและแม่เหล็กไฟฟ้าจากการศึกษาของ Musil และ Kadlec ที่ระบบเคลือบใช้อันทาลานซ์ฟลันาร์แมกนีตรอนเดี่ยวและชุดหลอดแม่เหล็กไฟฟ้า 2 ชุดเคลือบไททาเนียมไนไตรด์ที่ระยะเป้าสารเคลือบและวัสดุรองรับประมาณ 200.0 mm โดยใช้ความต่างศักย์ไบแอสในช่วง -5 ถึง -100 V พบว่าสามารถทำให้ได้ความหนาแน่นกระแสสูงถึง 6.0 mA/cm^2 ซึ่งสูงมากพอสำหรับใช้ในงานอุตสาหกรรม (Munz, 1991)

หากพิจารณาเปรียบเทียบระบบสปัตเตอริงทั้ง 3 ระบบจะพบว่าในกรณีระบบสปัตเตอริงปกตินั้นอิเล็กตรอนที่เกิดจากการไอออไนซ์จะวิ่งไปจับที่อาโนดโดยไม่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสปัตเตอริงเลย ดังนั้นเพื่อให้ระบบสปัตเตอริงมีประสิทธิภาพมากขึ้นจึงมีแนวคิดที่จะนำอิเล็กตรอนเหล่านี้เข้ามาช่วยในกระบวนการสปัตเตอริงซึ่งทำได้โดยการใช้สนามแม่เหล็กช่วยจึงเกิดระบบแมกนีตรอนสปัตเตอริงซึ่งเป็นที่ใช้สนามแม่เหล็กช่วยทำให้เกิดอิเล็กตรอนบริเวณหน้าคาโทดเพิ่มขึ้นเนื่องจากอิเล็กตรอนเหล่านี้จะมีส่วนช่วยทำให้กระบวนการสปัตเตอริงคงอยู่อย่างต่อเนื่องจากอำนาจของสนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นทางโค้งทำให้เกิดการไอออไนซ์อะตอมแก๊สเฉื่อยสูงขึ้นนอกจากนี้สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้ายังทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบมีลักษณะเป็นการชนแบบซ้ำ ๆ ต่อเนื่องกันทำให้เกิดอิเล็กตรอนชุดที่สองออกมาในปริมาณมากขึ้นซึ่งทำให้เกิดการสปัตเตอริงมากตามไปด้วยแต่ก็มีอิเล็กตรอนบางส่วนที่มีพลังงานสูงซึ่งสามารถจะหลุดออกจากอำนาจของสนามแม่เหล็กนี้ได้ซึ่งจะวิ่งเข้าหาหัวอาโนดโดยทันทีสำหรับในระบบอัมบาลานซ์แมกนีตรอนสปัตเตอริงนั้นอิเล็กตรอนพลังงานสูงที่หลุดออกจากสนามแม่เหล็กจะถูกยึดไว้ด้วยเส้นแรงแม่เหล็กส่วนเกินของระบบแล้วเคลื่อนที่เป็นทางโค้งไปตามเส้นแรงแม่เหล็กเข้าชนกับอะตอมของแก๊สเฉื่อยและเกิดการไอออไนซ์เป็นพลาสมาชุดที่สองบริเวณผิวหน้าของวัสดุรองรับทำให้ความหนาแน่นกระแสที่วัสดุรองรับมีค่าสูงกว่าในระบบแมกนีตรอนสปัตเตอริงปกตินัก (ประมาณ $5.0\text{--}10.0\text{ mA/cm}^2$ ปกติมีค่าน้อยกว่า 1.0 mA/cm^2) โดยพลาสมาที่เกิดขึ้นนี้จะมีส่วนช่วยในการเคลือบฟิล์มที่เรียกว่า Ion-Assisted Deposition ซึ่งจะให้ฟิล์มบางที่ได้นั้นมีความหนาแน่นสูงและมีการยึดติดดี (Munz, 1991)



ภาพที่ 2-16 ลักษณะพลาสมาของระบบสปัตเตอริง (Munz, 1991)

(a) ระบบบาลานซ์แมกนีตรอนสปัตเตอริง

(b) ระบบอัมบาลานซ์แมกนีตรอนสปัตเตอริง

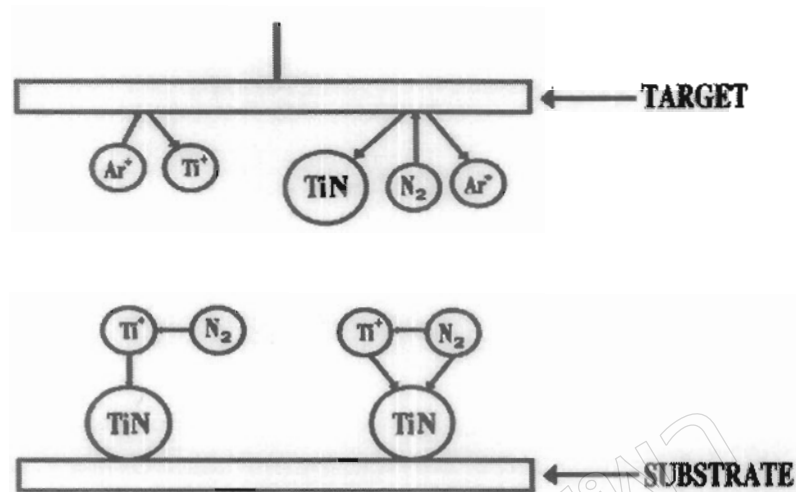
การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีรีแอคทีฟสเปตเตอริง

การเคลือบด้วยวิธีรีแอคทีฟสเปตเตอริง (Reactive Sputtering) มติ ห่อประทุม (2548) ได้อธิบายไว้ว่าเป็นกระบวนการสเปตเตอริงที่มีการป้อนแก๊สไวปฏิกิริยา (Reactive Gas) เข้าสู่ระบบเพื่อให้เกิดสารประกอบของฟิล์มเคลือบบนชิ้นงานหรือวัสดุรองรับการสเปตเตอริงที่มีเป้าสารเคลือบเป็นโลหะบริสุทธิ์ โดยการป้อนแก๊สไวปฏิกิริยา จะทำให้เกิดสารประกอบต่าง ๆ ของโลหะได้ เช่น การป้อนแก๊สไนโตรเจนอาจทำให้เกิดโลหะไนไตรด์ถ้าป้อนแก๊สอะเซทิลีน (C_2H_2) หรือมีเทน (CH_4) อาจเกิดเป็นสารประกอบของโลหะคาร์ไบด์ เป็นต้น ปกติความดันแก๊สไวปฏิกิริยาที่ใช้ค่อนข้างต่ำจนไม่พอต่อการเกิดปฏิกิริยาในภาวะปกติอย่างไรก็ตามคาดกันว่าอิเล็กตรอนในพลาสมาที่มีส่วนไอออนไนซ์แก๊สไวปฏิกิริยาให้มีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับโลหะได้สูงกว่าภาวะปกติ โดยแก๊สไวปฏิกิริยา เช่น แก๊สไนโตรเจน (N_2) อาจรวมตัวกับโลหะ เช่น ไททาเนียม (Ti) แล้วเกิดเป็นสารประกอบไททาเนียมไนไตรด์ (TiN) (ภาพที่ 2-17) ได้ 3 ลักษณะ ดังนี้

1. แก๊สไวปฏิกิริยา เช่น แก๊สไนโตรเจนทำปฏิกิริยากับอะตอมไททาเนียมที่ผิวหน้าเป้าของสารเคลือบกลายเป็นสารประกอบไททาเนียมไนไตรด์แล้วถูกสเปตเตอริงให้หลุดออกแล้วตกเคลือบลงบนแผ่นวัสดุรองรับ ปฏิกิริยาส่วนนี้เกิดขึ้นสูงเมื่อความดันย่อยของแก๊สไวปฏิกิริยาในระบบมีค่าสูง พบว่า ในการเคลือบไททาเนียมไนไตรด์บนฟิล์มเคลือบที่เป้าสารเคลือบ ส่วนที่มีอัตราการใช้สเปตเตอริงต่ำจะปรากฏฟิล์มของสีทองไททาเนียมบริเวณนั้น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Target Poisoning มีผลทำให้อัตราการเคลือบลดลง

2. แก๊สไวปฏิกิริยา เช่น แก๊สไนโตรเจนรวมตัวกับอะตอมไททาเนียมที่ถูกสเปตเตอริงในระหว่างทางวิ่งสู่แผ่นวัสดุรองรับแล้วตกเคลือบลงบนแผ่นวัสดุรองรับ กระบวนการนี้ในทางทฤษฎีถือว่าเกิดได้น้อยมากเนื่องจากสถานะของการทำปฏิกิริยาไม่เหมาะสมตามกฎอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัม แต่เป็นไปได้ที่การรวมตัวของสารประกอบจะเกิดในช่วงนี้

3. แก๊สไวปฏิกิริยา เช่น แก๊สไนโตรเจนรวมตัวกับไททาเนียมบนผิววัสดุรองรับหรือชิ้นงาน การทำรีแอคทีฟสเปตเตอริง โดยทั่วไปความดันแก๊สไวปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดสารประกอบที่ต้องการมีค่าต่ำกว่าช่วงที่เกิดขบวนการ โกลว์ดิสชาร์จ ในกระบวนการจึงใช้แก๊สไวปฏิกิริยากับแก๊สเฉื่อยทำให้รักษาสภาวะ โกลว์ดิสชาร์จ ไว้ได้ ในเวลาเดียวกันช่วยให้อัตราเคลือบสูงขึ้น ในการทำรีแอคทีฟสเปตเตอริง ยังมีสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงคือความดันย่อยของแก๊สไวปฏิกิริยาต้องมีค่าพอเหมาะกับการเกิดฟิล์มสารประกอบที่ต้องการ เช่น การเคลือบสารประกอบ Ferroferric Oxide (Fe_3O_4) ความดันแก๊สออกซิเจนที่ใช้ในรีแอคทีฟสเปตเตอริง ถูกจำกัดในช่วงความดันแคบมาก ถ้าความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนมากเกินไปจะเกิดสารประกอบของ Ferric Oxide (Fe_2O_3) ถ้าน้อยเกินไปจะเกิดสารประกอบ Ferrous Oxide (FeO) หรือฟิล์มของเหล็ก (Fe)



ภาพที่ 2-17 การเกิดปฏิกิริยารวมตัวกันเป็นสารประกอบระหว่างแก๊สไวปฏิกิริยากับอะตอมเป้าสารเคลือบในบริเวณต่าง ๆ (มดี ห่อประทุม, 2548)

การหาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง

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

1. การศึกษาโครงสร้างด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) ลักษณะเฉพาะสำคัญอย่างหนึ่งของฟิล์มบางคือการศึกษาโครงสร้างผลึก หรือ เฟส ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (Diffraction Analysis) กมล เอี่ยมพนากิจ (2547) อธิบายหลักการของเทคนิคนี้ไว้ดังนี้ การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับการแยกแยะ โครงสร้างของสารที่ใช้ในการเคลือบโดยการวิเคราะห์อาศัยการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนกับมาตรฐาน JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) ของสารนั้น ดังนั้นเทคนิค XRD เป็นเทคนิคสำหรับวัดค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ที่สะท้อนจากผลึก ใช้หลักการของการเลี้ยวเบนของคลื่น โดยพบว่ารังสีเอกซ์เลี้ยวเบนได้เมื่อให้ตกกระทบผลึกซึ่ง Bragg ได้เสนอแนวคิดว่าเราสามารถมองผลึกประกอบด้วยชั้น (Layer) หรือ ระนาบ (Plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมที่ตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนทั้งนี้คลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่าง ๆ ดังกล่าวจะมีความเข้มสูง ลำรังสีเอกซ์ 1 และ 2 ตกกระทบทำมุม θ กับระนาบของผลึก A และ B สนามไฟฟ้าของรังสีเอกซ์จะก่อให้เกิดแรงคูโอมป์กระทำบนอิเล็กตรอนที่ P กับ Q ให้สั่นด้วยความถี่เดียวกับรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบ และอิเล็กตรอนนั้นแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็น

รังสีเอกซ์ออกไปทุกทิศทางแต่ในทิศทาง $1'$ และ $2'$ ซึ่งเสมือนรังสีเอกซ์สะท้อนออกจากระนาบของผลึกจะไปแทรกสอดแบบเสริมกัน (In Phase) แม้ว่าแบบจำลองที่กล่าวมาจะไม่ถูกต้องในทางกายภาพ เนื่องจากแท้จริงแล้วระนาบของอะตอมไม่ได้สะท้อนคลื่นแต่วิธีนี้ก็ใช้ได้ ในทางเรขาคณิตพิจารณา

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

เมื่อ δ คือ ความแตกต่างของระยะที่คลื่นเดินทาง
 λ คือ ความยาวคลื่น
 n คือ จำนวนเต็มใดๆ

จากภาพที่ 2-18

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

จากรูปตรีโกณมิติพื้นฐาน

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

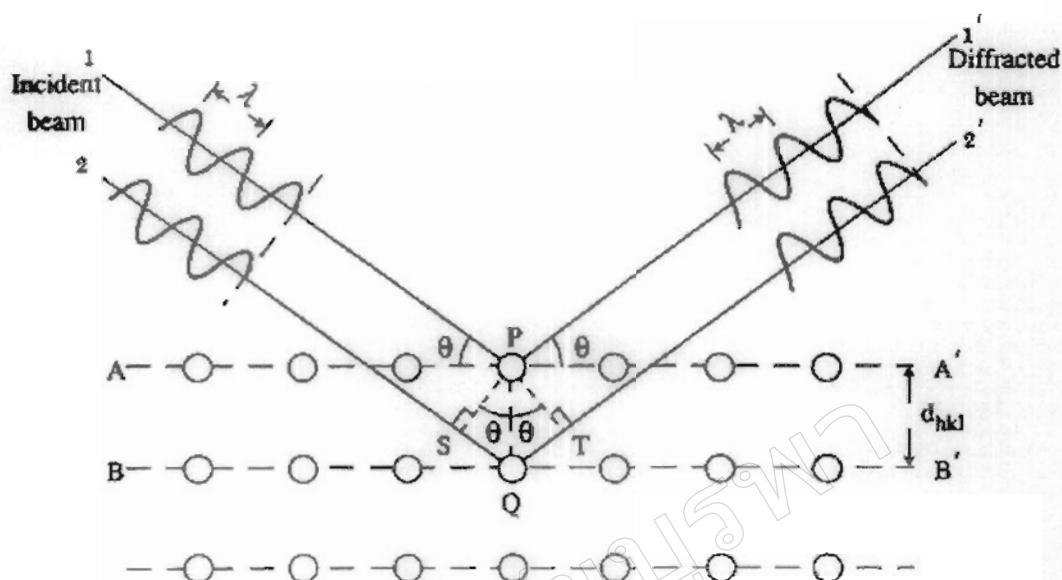
โดย PQ คือระยะห่างระหว่างระนาบ d_{hkl}

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

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 (hkl) และ θ เป็นมุมตกกระทบและมุมสะท้อนเมื่อวัดจากแนวระนาบที่กำลังพิจารณา



ภาพที่ 2-18 แบบจำลองการเรียงตัวของอะตอม (กมล เอี่ยมพนากิจ, 2547)

ในภาพที่ 2-18 เป็นแบบจำลองสำหรับการพิสูจน์กฎของแบรกก์ อะตอมเรียงตัวเป็นระเบียบโดยมีระยะห่างระหว่างอะตอมใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ($\sim 10^{-10}$ m) จะทำหน้าที่เป็นเสมือน เกรตติ้งเลี้ยวเบนแต่จะเป็นเกรตติ้งเลี้ยวเบนแบบ 3 มิติ

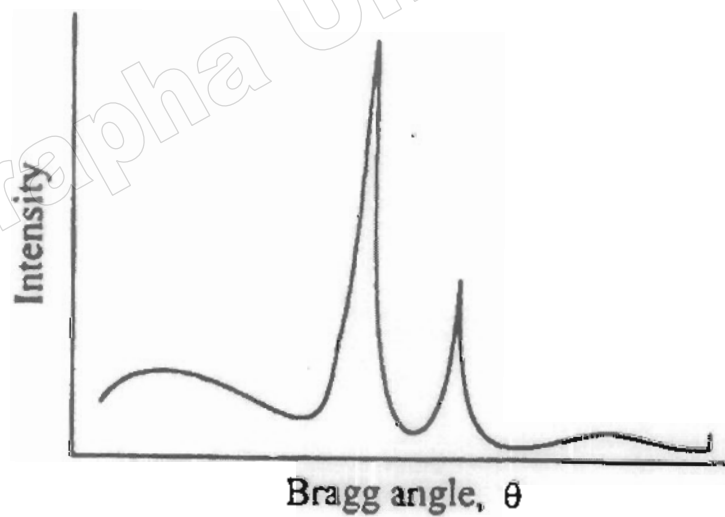
สัญญาณที่ตรวจจับได้แสดงในรูปแบบของการเลี้ยวเบนรังสี (Diffraction Pattern) ความเข้มของสัญญาณขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น โครงสร้างของวัสดุปริมาตรของวัสดุที่แผ่รังสี (Volume of Irradiated Material) รูปทรงของการหักเห (Diffraction Geometry) และการวางชิ้นงาน (Sample Alignments) เป็นต้น

ตำแหน่งของพีค ที่มีค่ามากที่สุดสามารถบอกถึงขนาดและรูปร่างของหน่วยเซลล์ได้ ในขณะที่ความกว้างให้หาค่าขนาด การจัดเรียงตัว (Orientation) และความเครียด (Strain) ภายในเกรนของวัสดุหลายผลึก กรณีของการศึกษาขนาดของผลึกจากรายงานการวิจัยของ Kim, Hahn, Oh, and Kim (2002) ได้ทำการศึกษาค่าขนาดของผลึกไททาเนียมไดออกไซด์ที่อบฟิล์มบางด้วยอุณหภูมิต่าง ๆ 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 ($\text{CuK}\alpha = 1.5406 \text{ \AA}$)
 β คือ ความกว้างครึ่งหนึ่งของพีคที่มีค่าความเข้มสูงสุด
 θ คือ ครึ่งหนึ่งของมุมตรงจุดศูนย์กลางพีค

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



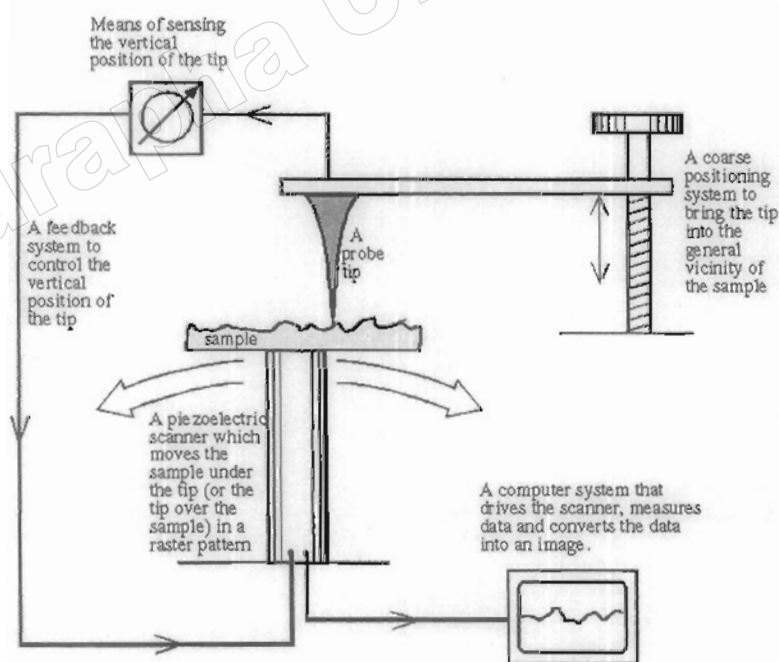
(b)

ภาพที่ 2-19 ความเข้มของพีคที่แสดงถึงระนาบผลึกของวัสดุในตำแหน่งที่มีการสะท้อนรังสี (มติ ห่อประทุม, 2548)

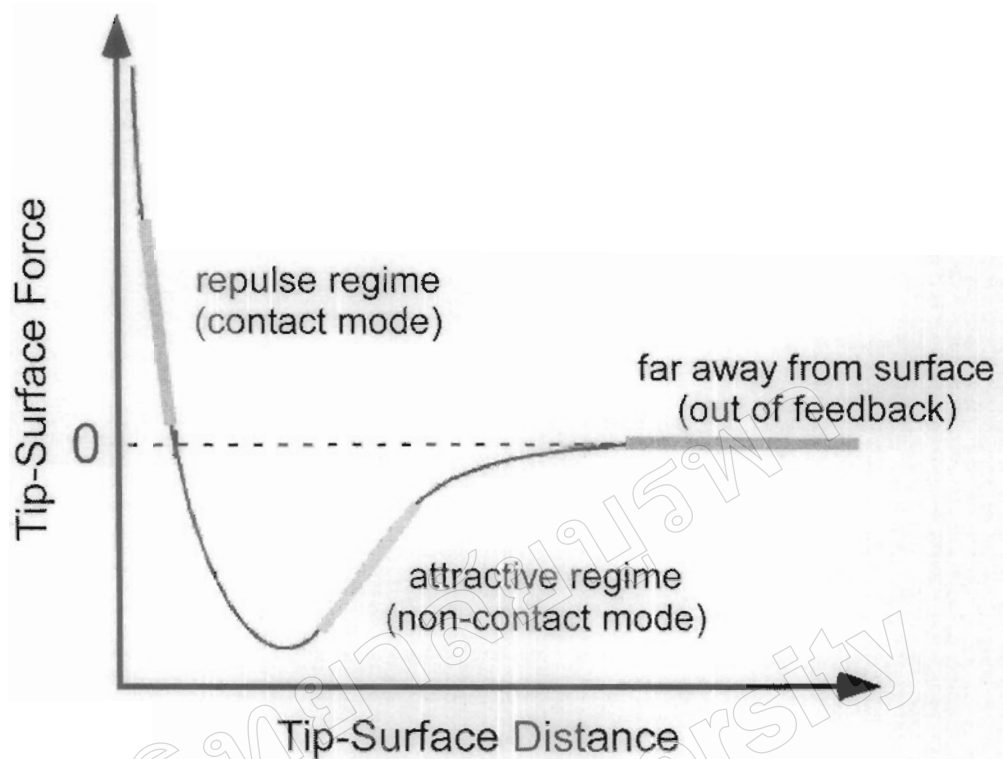
2. การศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยเครื่อง Atomic Force Microscopy (AFM) ลักษณะเฉพาะสำคัญอีกอย่างหนึ่งของฟิล์มบางคือการศึกษาลักษณะพื้นผิวและความหนาเทคนิคที่นิยมใช้ในการศึกษาความหนาและลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางในระดับนาโน คือ Atomic Force Microscopy (AFM) ซึ่ง จตุพร วุฒิกนกกาญจน์ (2542) ได้อธิบายหลักการทำงานของเครื่อง AFM ไว้ดังนี้

เทคนิค Atomic Force Microscopy เป็นการสร้างภาพของผิววัสดุจากแรงกระทำระหว่างผิววัสดุกับตัวตรวจวัดที่ทำจากเข็มขนาดเล็ก (Probe Tip) และเป็นเทคนิคหนึ่งในกลุ่มของ Scanning Probe Microscopy (SPM) ซึ่งเป็นกลุ่มเทคนิคใช้ในการศึกษาสภาพพื้นผิวของวัสดุประเภทต่าง ๆ ได้

หลักการพื้นฐานคือ การใช้เข็มตรวจวัดขนาดเล็กที่ทำจากซิลิคอนไนไตรด์ (Silicon Nitride, Si_3N_4) เคลื่อนที่กราด (Scan) ไปทั่วบริเวณต่าง ๆ ของผิววัสดุ โดยมีตัวเพียโซอิเล็กทริกสแกนเนอร์ (Piezoelectric Scanner) เป็นตัวควบคุม สภาพผิวที่แตกต่างกัน ไปจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกับเข็มตรวจวัดแตกต่างกันไป โดยตัวคานามีเข็มเกาะติดอยู่จะมีการโค้งงอ (Bending) ปริมาณการโค้งงอนี้สามารถตรวจวัดได้โดยใช้โฟโตดีเทกเตอร์ (Photo Detector) ดังภาพที่ 2-20 ภาพที่ได้จากเทคนิคนี้จะสอดคล้องตามสภาพพื้นผิวในแต่ละบริเวณที่ตรวจสอบ ในเทคนิค AFM นี้ สิ่งที่ทำให้คานามีเข็มเกาะอยู่เกิดการโค้งงอขึ้นก็คือ แรงกระทำระหว่างอะตอม ซึ่งอาจจะเป็นแรงดึงดูดหรือแรงผลักก็ได้ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างเข็มปลายแหลมกับพื้นผิว ดังแสดงในภาพที่ 2-21

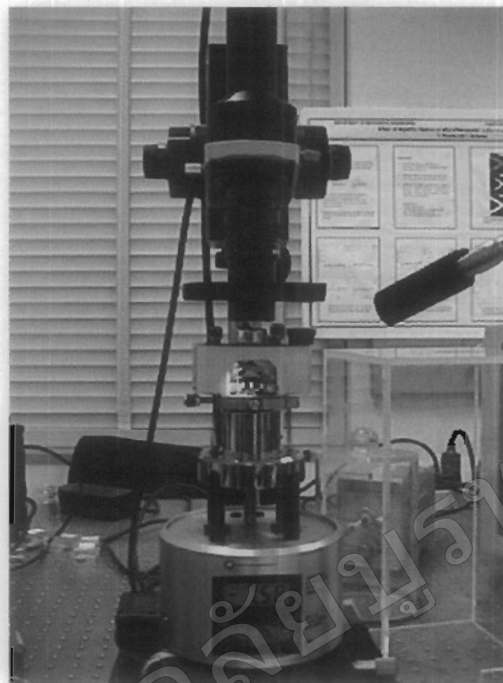


ภาพที่ 2-20 องค์ประกอบหลักของเครื่องมือ Scanning Probe Microscope
(อดิศร บุรณวงศ์, 2551)



ภาพที่ 2-21 ลักษณะของแรงกระทำระหว่างอะตอมที่เกิดขึ้นในระยะห่างระหว่างวัตถุต่าง ๆ (อดิศร นูรณวงศ์, 2551)

ภาพที่ 2-22 แสดงให้เห็นถึงเครื่อง Atomic Force Microscope รุ่น NanoScopella บริเวณตรงกลางเป็นบริเวณที่ใช้วางชิ้นงาน โดยมีเข็มวัดวางอยู่ด้วย ส่วนที่บริเวณด้านบนของเครื่องมือจะมีกล้องจุลทรรศน์วิดีโอ (Video Microscope) ติดตั้งไว้ เพื่อใช้สำหรับดูตำแหน่งของเข็มที่จะทำการวางลงบนบริเวณต่าง ๆ บนผิว ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์วิดีโอนี้แสดงทางจอภาพ นอกจากนี้ในบริเวณด้านบน จะมีแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์และโฟโตดีเทคเตอร์ที่ใช้วัดการโค้งงอของคานขึ้น



ภาพที่ 2-22 เครื่อง AFM แบบ Multimode (อดิสร บุรณวงศ์, 2551)

ลักษณะการเก็บข้อมูลด้วยเทคนิค AFM สามารถใช้เก็บข้อมูลได้ 4 แบบ (Mode) ที่สำคัญดังนี้คือ

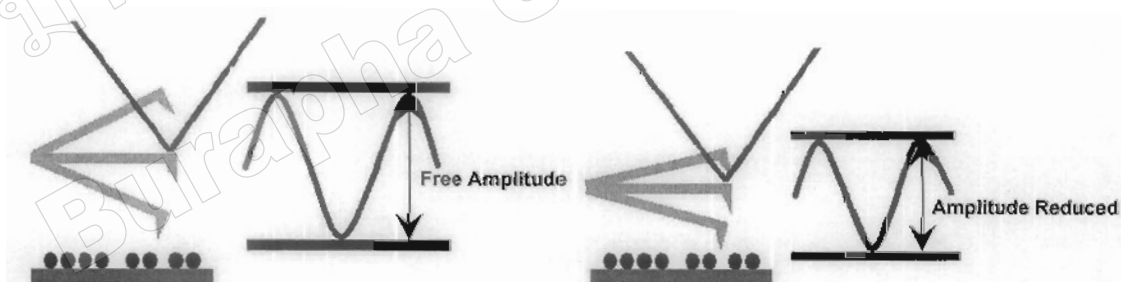
1. แบบสัมผัส (Contact Mode) เป็นการศึกษาสภาพผิวชิ้นงาน โดยการขยับให้เข็มไคล (Slide) ไปบนผิวงานซึ่งทำให้มีแรงผลักเกิดขึ้น เนื่องจากเข็มกับผิวงานอยู่ใกล้กันมาก แรงผลักนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพผิวซึ่งทำให้มีการ โค้งงอ (Deflection) ของคานยื่น (Cantilever) ที่มีเข็มยึดเกาะอยู่ที่ปลาย โดยปริมาณการ โค้งงอเปลี่ยนแปลงสอดคล้องเป็นไปตามลักษณะของผิวงาน

อย่างไรก็ตาม เทคนิคแบบ แบบสัมผัสนี้มีข้อเสียคือ การลากให้เข็มตรวจวัดเคลื่อนที่ไคล ข้ามไปยังบริเวณต่าง ๆ บนผิวงาน อาจทำให้พื้นผิววัสดุที่ศึกษาต่างไปจากสภาพเดิมที่แท้จริง หรือ อาจเกิดความเสียหายขึ้นแก่ผิวงานได้ ยกตัวอย่างเช่น ภายใต้อากาศบรรจุอากาศปกติซึ่งมีอากาศและความชื้นในอากาศ อาจเกิดหยดน้ำหรือสิ่งสกปรกบนผิวงาน ซึ่งเมื่อเข็มวัดเคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิว ที่มีชั้นบาง ๆ ของหยดน้ำและสิ่งสกปรกดังกล่าว จะทำให้มีแรงดึงไฟฟ้าสถิตและแรงดึงผิวดึงให้ตัว คานที่มีเข็มยึดอยู่ที่ปลายเคลื่อนที่ลงมาสัมผัสกับชั้นดังกล่าว ทำให้แรงระหว่างเข็มกับผิวงานที่เกิดขึ้น โดยรวมเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ ยังอาจทำให้ผิวงานถูกทำลาย เช่น เกิดการขีดข่วนจากการลากเข็มไปบนผิวงาน

2. แบบไม่สัมผัส (Non-Contact Mode) เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวข้างต้น จึงมีการพัฒนาเทคนิคแบบไม่สัมผัส ขึ้นมา โดยตัวเข็มปลายแหลมจะถูกยกขึ้นให้มีระยะห่างเหนือผิวงานสูงมากขึ้น คือประมาณ 10-100Å จึงไม่มีปัญหาเรื่องการทำลายโครงสร้างผิวงาน โดยในกรณีนี้ แรงกระทำระหว่างตัวคานที่มีเข็มปลายแหลมยึดเกาะอยู่กับผิวงานจะเป็นลักษณะแรงดึงดูด ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามรูปทรงของสภาพผิวงานเช่นเดียวกัน

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

3. แบบแตะปึง (Tapping Mode) เป็นเทคนิคที่รวมเอาลักษณะของการวัดทั้งในแบบของแบบสัมผัส และแบบไม่สัมผัส เข้าด้วยกัน กล่าวคือ ยังคงให้มีการสัมผัสกันระหว่างเข็มกับผิวงาน ในระยะที่ใกล้กันมาก เหมือนกับกรณีของแบบสัมผัส เพื่อให้เกิดภาพที่ชัดเจน ในขณะเดียวกัน ก็จะมีการสั่นหรือขยับเข็มปลายแหลมให้เคลื่อนที่ขึ้นลงไปพร้อม ๆ กับการเคลื่อนที่สแกนไปยังบริเวณต่าง ๆ บนผิวงาน ดังนั้นจึงเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาการลากไถลเข็มปลายแหลม ซึ่งจะทำให้เกิดการทำลายสภาพของผิวงานได้ เหมือนในแบบสัมผัส



ภาพที่ 2-23 ลักษณะการสั่นของคานที่มีเข็มติด (อดิสร บวรณรงค์, 2551)

ภาพที่ 2-23 แสดงการสั่นของคานในสถานะอิสระหรือตอนเริ่มต้นที่ยังไม่เกิดการสัมผัส และขยับเคลื่อนที่ไปบนผิวงาน จะเห็นได้ว่าแอมพลิจูดยังสูงอยู่เมื่อเทียบกับแอมพลิจูดที่เกิดจากการสั่นของคานเมื่อมีการแตะสัมผัส (Tapping) ลงบนผิวงาน เนื่องจากการสัมผัสกันนั้นมีการสูญเสียพลังงานของการสั่น ทำให้แอมพลิจูดของการสั่น (Oscillation Amplitude) ลดลง ซึ่งค่าที่ลดลงนี้ใช้เป็นตัววัดและบอกถึงลักษณะของสภาพพื้นผิวที่มีความสูงต่ำแตกต่างกันไปตัวอย่างเช่น เมื่อเข็มตรวจวัดเคลื่อนที่ผ่านบริเวณผิวงานที่มีความนูนสูงขึ้นมา ตัวคานก็จะมีพื้นที่หรือแอมพลิจูดใน

การสั่นลดลง ในทางตรงข้าม เมื่อเข็มปลายแหลมเคลื่อนที่ผ่านบริเวณผิวที่มีการยุบตัวหรือมีความลึกลงไป ตัวคานาก็จะมีพื้นที่ในการสั่นเพิ่มขึ้น และมีแอมพลิจูดสูงขึ้น (เข้าใจคือแอมพลิจูดสูงสุดในสภาพที่ยังไม่มีการทำการสแกน) แอมพลิจูดของการสั่นที่เปลี่ยนแปลงไปก็จะถูกวัดโดย แอมพลิจูดดีเทคเตอร์ (Amplitude Detector) แล้วส่งผลเข้าไปยังตัวควบคุมซึ่งจะทำการวัดสัญญาณพร้อมทั้งปรับระยะระหว่างเข็มกับผิวงาน เพื่อรักษาให้ค่าแอมพลิจูดของการสั่นให้คงที่ต่อไป จนกว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดของการสั่นตามสภาพพื้นผิวในบริเวณถัดไป

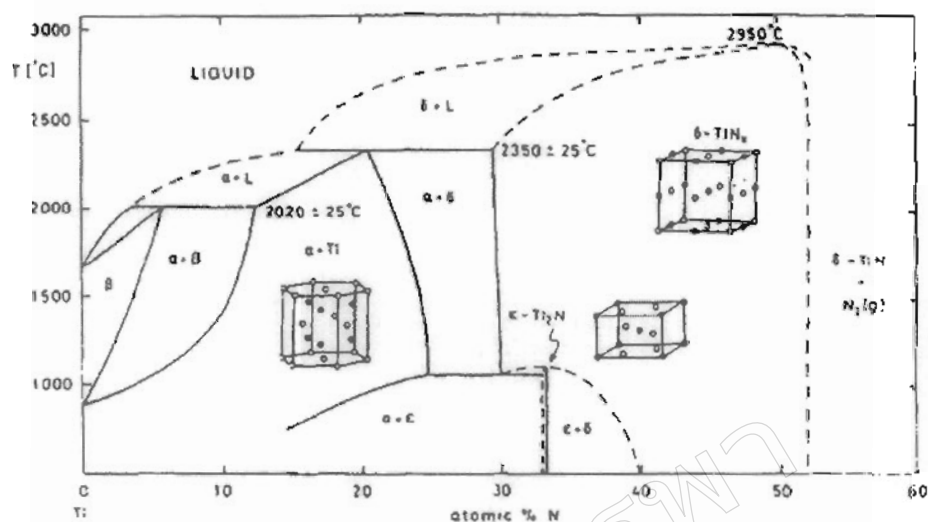
4. แบบ โมดูลชัน (Force Modulation Mode) ของแรงสำหรับพื้นผิวของวัสดุที่มีองค์ประกอบหลายเฟส พบว่าเทคนิค AFM ในวิธีแบบ แบบ โมดูลชันของแรง จะเป็นที่นิยมใช้มาก โดยเทคนิคนี้เป็นการวัดและสร้างภาพของพื้นผิวชิ้นงานที่มีความแตกต่างของความแข็งแกร่ง (Stiffness) ในแต่ละเฟสสูง โดยในกรณีนี้ตัวเข็มจะสแกนไปในลักษณะที่มีการสั่นในแนวตั้งจากกับผิววัสดุด้วยแอมพลิจูดเล็กน้อย แต่จะมีความเร็วในการสั่นที่สูงกว่าการเคลื่อนที่สแกนของเข็ม และเมื่อตัวเข็มถูกนำเข้ามาแตะสัมผัสกับผิววัสดุก็จะเกิดแรงต่อต้านจากผิวของวัสดุที่เกิดจากการสั่นและทำให้ตัวคานงอ และถ้าหากว่าเราให้แรงที่ทำให้ตัวคานสั่นคงที่ พื้นผิวบริเวณที่แข็งแกร่งกว่าจะทำให้เกิดการต่อต้านต่อการสั่นในแนวตั้งของตัวคานมากกว่า และจึงทำให้ตัวคานงอมากกว่า ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดที่เกิดจากการโค้งงอของตัวคานจึงนำมาใช้วัดเปรียบเทียบความแข็งที่บริเวณต่าง ๆ ของผิวงาน

หลักการของวิธีแบบแทปปีงกับแบบ โมดูลชันของแรงคล้ายกันที่มีการสั่นของเข็มในแนวตั้งพร้อมกับมีการสแกนไปบนผิวชิ้นงาน อย่างไรก็ตามทั้ง 2 เทคนิค จะมีความแตกต่างกันคือ ในกรณีแบบ โมดูลชันของแรง จะสั่นด้วยความเร็วสูงกว่า (สูงกว่าความเร็วในการสแกน) และการวัดแอมพลิจูดที่เกิดจากการบิดงอของคาน เป็นการวัดเนื่องจากผลของแรงต้านการสั่น เมื่อมีการสัมผัสของเข็มกับผิวงานในขณะที่ แบบแทปปีง จะเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของการสั่นของคานที่เปลี่ยนแปลงไป (ลดลง) เนื่องจากมีการสูญเสียพลังงานไปเมื่อมีการสัมผัสผิวงานที่มีระดับความสูงต่ำแตกต่างกัน

ไทเทเนียมไนไตรด์

ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) เป็นสารประกอบชนิดหนึ่งระหว่างธาตุไทเทเนียม (Ti) ซึ่งเป็นโลหะทรานซิชันในหมู่ 4 (IVB) กับธาตุไนโตรเจน (N) สารประกอบไทเทเนียมไนไตรด์นั้นถูกพบว่ามีสมบัติที่น่าสนใจหลายประการเนื่องจากสามารถแสดงลักษณะเฉพาะของความเป็นสารประกอบโคเวเลนต์และความเป็นโลหะออกมา เช่น ความเป็นสารประกอบโคเวเลนต์จะทำให้สารประกอบไทเทเนียมไนไตรด์ มีความแข็งและจุดเดือดจุดหลอมเหลวสูง ทนต่อการกัดกร่อน และการกัดกร่อน ส่วนความเป็นโลหะนั้นทำให้สามารถนำไฟฟ้าได้ดี มีความมันวาว และถ้าตัดส่วนระหว่างไทเทเนียมและไนโตรเจนเป็น 1:1 สารประกอบนี้จะแสดงสมบัติที่น่าสนใจอีกอย่างหนึ่งออกมาคือมีสีทอง เนื่องจากมีความสามารถในการสะท้อนแสงที่มีสเปกตรัมในบริเวณย่านแสงสีแดงได้ดีกว่าในย่านแสงสีม่วง (Roquiny et al., 1999) ซึ่งจากสมบัติดังกล่าวนี้ทำให้มีการนำสารประกอบไทเทเนียมไนไตรด์มาประยุกต์ใช้โดยนำมาเคลือบเป็นฟิล์มบางบนชิ้นงานเพื่อเพิ่มความแข็งแรง ชี้อายุการใช้งาน ประยุกต์ใช้เป็นชั้นป้องกันการแพร่ (Diffusion Barriers) ในอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (Kwak et al., 1999) รวมถึงโซลาร์เซลล์ (Smith et al., 2001) หรือใช้เคลือบเครื่องประดับ (Vaz et al., 2004) เป็นต้น

จากแผนภาพเฟสไดอะแกรม (Phase Diagram) ของสารประกอบไทเทเนียมไนไตรด์ ดังแสดงในภาพที่ 2-24 พบว่าไทเทเนียมไนไตรด์จะมีโครงสร้างผลึกอย่างน้อย 3 รูปแบบ ได้แก่ โครงสร้างแบบเฮกซะโกนัล (Hexagonal) โครงสร้างลูกบาศก์แบบร็อกซอลต์ (rock salt) และโครงสร้างแบบเตตระโกนัล (Tetragonal) ซึ่งความแตกต่างกันในโครงสร้างผลึกทั้ง 3 รูปแบบเกิดจากปริมาณการเจือปนของไนโตรเจนเช่น ในเฟส α -Ti ที่มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนัลจะมีปริมาณไนโตรเจนเจือปนอยู่ไม่เกิน 15% ส่วนเฟส δ -TiN ที่มีโครงสร้างลูกบาศก์แบบร็อกซอลต์จะมีอัตราส่วนของไนโตรเจนต่อไทเทเนียมระหว่าง 0.5 ถึง 1.1 หรือในเฟส ϵ -Ti₂N ที่มีโครงสร้างแบบเตตระโกนัลจะมีปริมาณไนโตรเจนเจือปนอยู่ประมาณ 33-34% (Jiang, Tao, & Li, 1995) และนอกจากนี้ยังพบว่าความแตกต่างกันทางโครงสร้างนี้ยังส่งผลให้เกิดความแตกต่างในสมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติทางกลของสารด้วย ดังแสดงในตารางที่ 2-2



ภาพที่ 2-24 เฟสไดอะแกรมของสารประกอบไทเทเนียมไนไตรด์
(Molarius, Korhonen, & Ristolainen, 1985)

ตารางที่ 2-2 สมบัติของ TiN และ Ti ที่อุณหภูมิห้อง (Pierson, 1996; Oyama, 1996; Toth, 1971)

Property	TiN	Ti
Structure	Fcc(NaCl)	Hcp
Space Group	Fm3m	P6 ₃ /mmc
Range of Composition	TiN _{0.6-1.1}	N/A
Color	Golden	Grey
Density	5.40 g/cm ³	4.51 g/cm ³
Melting Point	2950°C	1940°C
Specific Heat	37.0 J/mol.K	25.0 J/mol.K
Thermal conductivity	30 Watt/m.K	13 Watt/m.K
Thermal expansion	9.36x10 ⁻⁶ /K	11x10 ⁻⁶ /K
Electrical Resistivity (bulk)	20 ± 10 μΩ.cm	39 μΩ.cm
Hall Constant	-6.7x10 ¹¹ m ³ /C	-7.7x10 ¹¹ m ³ /C
Vickers Hardness	21-24 Gpa	0.55-2.5 Gpa
Young Modulus	590 Gpa	120 Gpa
Modulus of elasticity	612 Gpa	110 Gpa

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Valvoda (1995) ได้ศึกษาเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างระดับไมโครเมตรและพิโคเมตรของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เตรียมได้จากวิธี แมกนีตรอน สเป็คเตอริง โดยตัวแปรที่ศึกษาคือ อุณหภูมิ ความดันและพลังงานการระดมชนของไอออน ผลการทดลองพบว่าเมื่อเงื่อนไขในการเคลือบเปลี่ยนไป โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางเปลี่ยนไปด้วยซึ่งเป็นลักษณะพิเศษที่ทำให้สารประกอบไทเทเนียมไนไตรด์ที่เตรียมได้จากการเคลือบแตกต่างจากไทเทเนียมไนไตรด์ที่เป็น Bulk Material

Pecz et al. (1995) ได้ศึกษาลักษณะโครงสร้างเฉพาะของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เตรียมได้โดยวิธี รีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอน สเป็คเตอริง บนแผ่นซิลิกอนที่มีระนาบ (001) โดยศึกษาโครงสร้างของฟิล์มด้วยเทคนิค XTEM และ SE จากผลการทดลองพบว่าฟิล์มบางมีโครงสร้างเป็นไทเทเนียมไนไตรด์ เมื่ออัตราการไหลของไนโตรเจนอยู่ระหว่าง 1.9 ~ 3 sccm และที่อัตราการไหลของไนโตรเจนอยู่ที่ 1.7 sccm พบว่าฟิล์มบางมีโครงสร้างเป็น Ti_2N

Meng and dos Santos (1997) ได้ศึกษาฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบนแผ่นแก้วโดยวิธี รีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอน สเป็คเตอริง ที่ความดันแก๊สไนโตรเจนค่าต่าง ๆ ซึ่งผลของแก๊สไนโตรเจนที่มีต่อโครงสร้าง สมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าของฟิล์มบางศึกษาและวิเคราะห์จากการวัดค่า XRD, SEM, Optical Reflectance และค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง จากการศึกษาพบว่า ขนาดความเข้มของระนาบ (111) ลดลงเมื่อเพิ่มความดันของแก๊สไนโตรเจน ส่วนค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางสัมพันธ์กับโครงสร้างของฟิล์มบาง โดยที่ฟิล์มบางที่มีความเข้มของระนาบ (111) สูงก็จะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูง

Tarniowy, Mania, and Rekas (1997) ศึกษาถึงผลของการปรับสภาพฟิล์มบางด้วยความร้อนที่มีต่อโครงสร้าง สมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มอสัณฐานไทเทเนียมไนไตรด์ที่เตรียมโดยวิธี รีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอน สเป็คเตอริง ซึ่งโครงสร้างและส่วนประกอบทางเคมีศึกษาโดยเทคนิค XRD, EDX และ electron microscopy ผลการทดลองพบว่า โครงสร้างที่เป็นอสัณฐานของฟิล์มบางประกอบด้วย TiN และ Ti_2N จะเปลี่ยนเป็นโครงสร้างผลึกเมื่อปรับสภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 673 K ขึ้นไป และนอกจากนั้น สมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงก็เปลี่ยนตามไปอีกด้วย

Roquiny, Bodart, and Terwagne (1999) ได้ศึกษาฟิล์มบาง TiN_x ที่เคลือบโดยวิธีรีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอน สเปคโตรริง ที่อุณหภูมิต่ำกว่า $100^\circ C$ บนวัสดุรองรับที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ สมบัติทางกายภาพของฟิล์ม เช่น โครงสร้างและส่วนประกอบทางเคมีถูกศึกษาและวิเคราะห์จากการวัดสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง ผลการศึกษาพบว่าเมื่อความดันของแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้น สีของฟิล์มบางเปลี่ยนจากสีเทาเป็นสีทองและสีน้ำตาลแดงในที่สุด การเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มอธิบายได้โดยใช้ Drude Model เมื่อพันธะโลหะของไทเทเนียมในฟิล์มบางลดลง เส้นสเปกตรัมของแสงที่สะท้อนออกมาขยับไปทางด้านแสงสีแดง จนกระทั่งเมื่ออัตราส่วนผสมของไทเทเนียมในฟิล์มบางลดลงเหลือน้อยที่สุด นั่นคือเมื่ออัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนมากกว่า 4 sccm สีของฟิล์มบางมีแดง

Niyomsoan, Grant, Olson, and Mishra (2002) ได้ศึกษาถึงการแปรเปลี่ยนสีของฟิล์มบางไทเทเนียมและเซอร์โคเนียมไนไตรด์ที่เตรียมได้จากกระบวนการ Cathodic Arc Evaporation ที่มี การควบคุมความหนาของฟิล์มให้คงที่อยู่ที่ $0.5\ \mu m$ โดยศึกษาอัตราส่วนระหว่างไนโตรเจนและธาตุทรานซิชันเหล่านี้รวมถึงปริมาณการเจือปนของออกซิเจนด้วย สีของฟิล์มศึกษาโดยการสะท้อนคลื่นแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ โดยแสงที่สะท้อนออกมาถูกนำไปเทียบกับระบบสี $L^*a^*b^*$ ผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างแก๊สไนโตรเจนและโลหะทรานซิชันเหล่านี้ ฟิล์มสะท้อนแสงสีทองลดลงแต่สะท้อนสีเหลืองเพิ่มขึ้น และเมื่อทำการเพิ่มปริมาณเจือปนของแก๊สออกซิเจน สีของฟิล์มมีสีเหลืองขึ้น การเปลี่ยนสีของฟิล์มเมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างแก๊สไนโตรเจนและโลหะทรานซิชันและเพิ่มปริมาณเจือปนของแก๊สออกซิเจนเป็นไปในทิศทางเดียวกัน นั่นคือเปลี่ยนจากสีทองเป็นสีเหลืองขึ้น

Yukimura, Muraho, Kumagai, Saito, Kohata, and Maruyama (2003) ได้ศึกษาผลของความดันที่มีต่อโครงสร้างของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เตรียมโดยวิธี Plasma Based Ion Implantation & Deposition (PBII&D) ที่อัตราเคลือบสูง โดยที่พลาสมาถูกสร้างขึ้นจากการอาร์ค (Arc) ในแก๊สไนโตรเจนของขั้วคาโทด (Cathod) ที่ทำจากไทเทเนียม ตัวแปรที่ศึกษาคือความดันของแก๊สไนโตรเจน ผลการศึกษาพบว่า สีทองและระนาบผลึก (200) ของฟิล์มบางเกิดขึ้นที่ความดันแก๊สไนโตรเจนระหว่าง 5.6 ถึง $8.5\ Pa$ นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มมีความเป็นผลึกสูง (high crystallinity) และมีความแข็งจุลภาค (Microhardness) สูงอีกด้วย

Jeyachandran, Narayandass, Mangalaraj, Areva, and Mielczarski (2007) ได้ศึกษาโครงสร้างสมบัติทางแสงของฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์ที่เตรียมโดยวิธี ดีซี รีแอคทีฟ แมกนีตรอน สเปคโตรริง ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคือความดันแก๊สไนโตรเจน (ความเข้มข้น 0.5 ~ 34 %) และความหนา สมบัติทางโครงสร้าง แสง ไฟฟ้า และส่วนประกอบทางเคมี ศึกษาด้วยเทคนิคการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า, สเปคโตรโฟโตมิเตอร์, Spectroscopic Ellipsometry (SE), XPS, XRD, SEM และ Optical Microscopy ผลการศึกษาพบว่าความหนาของฟิล์มค่าหนึ่งสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มเปลี่ยนไปเมื่อความดันแก๊สไนโตรเจนเปลี่ยน (0.5 – 34%) และที่ความดันแก๊สไนโตรเจนค่าหนึ่ง ๆ สมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มจะเปลี่ยนไปเมื่อฟิล์มที่เตรียมได้มีความหนาต่างกันเช่นกัน

Subramanian, Ashok, and Jayachandran (2008) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิของวัสดุรองรับที่มีต่อโครงสร้างของฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ที่เตรียมบนวัสดุรองรับที่เป็นเหล็กอ่อนด้วยวิธี ดีซี รีแอคทีฟ แมกนีตรอน สเปคโตรริง โครงสร้างของฟิล์มบางศึกษาโดยเทคนิค XRD และ SEM ผลการศึกษาพบว่าผลึกมีระนาบที่มีพื้นที่แยกจากกันได้ชัดเจน 3 ระนาบคือระนาบ (111), (200) และ (222) และภาคตัดขวางของ ฟิล์มบางแสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางที่โครงสร้างแบบคอลัมน์ (Columnar)

Barhai, Kumari, Banerjee, Pabi, and Mahapatra (2010) ศึกษาฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์และไทเทเนียมออกไซด์ไนไตรด์ที่เคลือบด้วยวิธี ดีซี รีแอคทีฟ แมกนีตรอน สเปคโตรริง ที่อัตราไหลของแก๊สและช่วงเวลาการเคลือบคงที่ โดยที่ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคือค่าความหนาแน่นกระแสของพลาสมาซึ่งกำหนดให้อยู่ในระหว่าง 10 ~ 40 mA/cm² ซึ่งโครงสร้างของฟิล์มศึกษาโดยใช้เทคนิค XRD, XPS, Nanoindentation และ Colorimetric Analysys จากผลการทดลองพบว่าฟิล์มบางปรากฏสีเช่น สีทอง น้ำเงิน ชมพู และเขียวต่างกันออกไปเมื่อเคลือบด้วยค่าความหนาแน่นของกระแสพลาสมาต่างกัน ที่ความหนาแน่นกระแสต่ำ ๆ ฟิล์มมีสีออกทองและสัดส่วนระหว่างไทเทเนียมและไนโตรเจนเป็นเลขจำนวนเต็ม เมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแสขึ้นเรื่อย ๆ สีของฟิล์มเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน ชมพูและเขียวตามลำดับ และสัดส่วนระหว่างไทเทเนียมและไนโตรเจนไม่เป็นเลขจำนวนเต็มทำให้ฟิล์มที่เกิดขึ้นสารประกอบไทเทเนียมออกไซด์ไนไตรด์ในที่สุด