

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึงทฤษฎีเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ซึ่งประกอบด้วย กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง การก่อเกิดฟิล์มบาง การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปีดเทอริง กระบวนการโกล์ดดิซซาร์จ ระบบเคลือบแบบดีซีสปีดเทอริง ระบบเคลือบแบบดีซี แมกนีตรอน สปีดเทอริงระบบเคลือบแบบอานาไลซิสแมกนีตรอนสปีดเทอริงการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีรีแอคทีฟสปีดเทอริงสมบัติเชิงรังสีของวัสดุการหาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางออลูมิเนียมไนไตรด์ และ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง

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

ปัจจุบันมีการนำฟิล์มบางมาประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ มากมาย เช่นงานด้านอิเล็กทรอนิกส์ เช่น สารกึ่งตัวนำ ฟิล์มตัวนำ และฟิล์มตัวต้านทาน หรืองานด้านทัศนศาสตร์ เช่น เลนส์ กระจกสะท้อนแสง กระจกสะท้อนความร้อน เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้วิธีการเคลือบฟิล์มบางในการเตรียมสารตัวอย่างสำหรับการศึกษาสมบัติทางกายภาพของวัสดุในรูปของฟิล์มบาง ซึ่งสมบัติบางอย่างไม่สามารถวัดได้เมื่ออยู่ในสภาพเป็นก้อน (Bulk) เพราะฉะนั้นข้อมูลเหล่านี้มีประโยชน์อย่างมากต่อการพัฒนาวัสดุเพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรม

การเคลือบฟิล์มบางเป็นกระบวนการที่ทำให้สารเคลือบตกเคลือบลงบนผิววัสดุรองรับที่ต้องการซึ่งสามารถทำได้ทั้งกระบวนการทางเคมีหรือกระบวนการทางฟิสิกส์โดยพื้นฐานแล้ว กระบวนการเคลือบฟิล์มบางมีขั้นตอนสำคัญ 3 ขั้นตอน (Smith, 1995) ดังนี้คือ

1. การสร้างสารเคลือบ (Source) โดยทั่วไปแล้วสารเคลือบอาจอยู่ในรูปของของแข็งของเหลว ไอ หรือแก๊ส ก็ได้ แต่สารเคลือบขณะทำการเคลือบนั้นจำเป็นต้องอยู่ในรูปของไอระเหยเท่านั้น ซึ่งวิธีการที่ทำให้สารเคลือบกลายเป็นไอระเหยสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การให้ความร้อนหรือการระดมยิงด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูง เป็นต้น

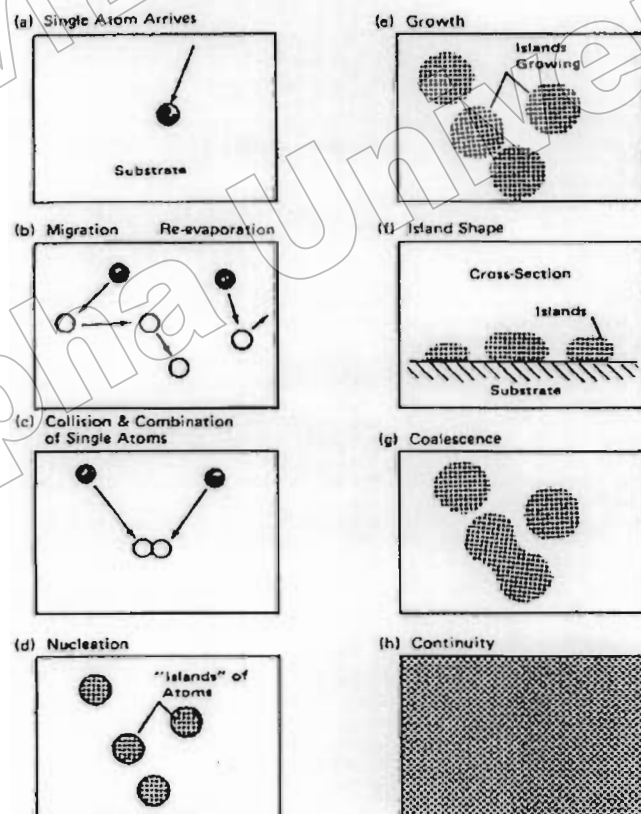
2. การเคลื่อนย้ายสารเคลือบมายังวัสดุรองรับ (Transport) ในภาวะสุญญากาศ ไอระเหยของสารเคลือบอาจมีการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ไปยังวัสดุรองรับ หรืออาจจะเคลื่อนที่ไปในลักษณะของไหล ซึ่งจะทำให้ไอระเหยของสารเคลือบมีการชนกับอนุภาคอื่นภายในภาชนะสุญญากาศ นอกจากนี้ไอระเหยอาจจะเคลื่อนที่ไปยังวัสดุรองรับในลักษณะของพลาสมาก็ได้

3. การสะสมพอกพูน (Deposition) เป็นขั้นตอนการพอกพูนของสารเคลือบและโตขึ้นจนกลายเป็นชั้นของฟิล์มบางบนวัสดุรองรับขั้นตอนนี้จะขึ้นกับเงื่อนไขของวัสดุรองรับหรือการทำปฏิกิริยาของสารเคลือบกับวัสดุรองรับความสะอาดของผิววัสดุรองรับ ตลอดจนพลังงานที่ใช้ในการเคลือบ

### การก่อเกิดฟิล์มบาง

การเกิดฟิล์มบางจากกระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ Chapman (1980) ได้อธิบายไว้ดังนี้เมื่อสารเคลือบจากแหล่งกำเนิดสารเคลือบเคลื่อนที่มาถึงวัสดุรองรับสารเคลือบที่กระทบผิววัสดุรองรับส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของอะตอมหรือ โมเลกุล (ภาพที่ 2-1 (a)) โดยพลังงานพันธะ (Bonding Energy) ระหว่างอะตอมของสารเคลือบกับวัสดุรองรับและอุณหภูมิของวัสดุรองรับจะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการแพร่ (Diffusion) ของสารเคลือบบนผิววัสดุรองรับ อะตอมของสารเคลือบจะตกกระทบผิววัสดุรองรับในตำแหน่งที่เรียกว่าตำแหน่งการดูดซับ (Adsorption Site) ทำให้เกิดการเกาะติดหรือถ้ามีพลังงานมากพอก็อาจจะโคดข้ามกำแพงพลังงานไปยังบริเวณที่อยู่ติดกันหรือหลุดออกจากตำแหน่งนั้นไป (ภาพที่ 2-1 (b)) ในช่วงเวลาหนึ่งอะตอมสารเคลือบอาจเกิดการระเหยกกลับและเกิดการรวมตัวกันระหว่างอะตอมที่มีการแพร่ด้วยกันเมื่ออะตอมของสารเคลือบรวมตัวกันอาจเกิดเป็นอะตอมคู่ (ภาพที่ 2-1 (c)) ซึ่งมีความเสถียรมากกว่าอะตอมเดี่ยว (Single Atom) ซึ่งการรวมตัวกันของอะตอมนั้นจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอะตอมเดี่ยวและอัตราเคลือบ (Deposition Rate) อะตอมคู่อาจรวมตัวกับอะตอมเดี่ยวอื่นแล้วกลายเป็นสามอะตอม (Triplets) หรือสี่อะตอม (Quadruplets) หรืออื่น ๆ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า

สภาวะการเกิดนิวเคลียส (ภาพที่ 2-1(d)) ทำให้ได้กลุ่มอะตอมกึ่งเสถียร (Quasi-Stable Islands) จากนั้นกลุ่มอะตอมจะเริ่มโตขึ้นเรียกว่าการโตเป็นกลุ่มก้อน (Island Growth) ขนาดของกลุ่มอะตอมจะใหญ่ขึ้น โดยมีจำนวนอะตอมเท่าเดิมหรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (ภาพที่ 2-1(e) และ 2-1(f)) การโตของกลุ่มอะตอมนี้จะเกิดขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งขอบของแต่ละกลุ่มอะตอมชนกันเรียกว่าการรวมกันเป็นก้อนของกลุ่มอะตอม (Agglomeration หรือ Coalescence) (ภาพที่ 2-1(g)) จากการศึกษาด้วยเทคนิค Transmission Electron Microscopy (TEM) พบว่าขณะที่กลุ่มอะตอมรวมกันเป็นก้อน อะตอมจะมีพฤติกรรมคล้ายของเหลว (Liquid-Like Behaviour) และมีการจัดเรียงทิศทางในเชิงผลึกวิทยา (Crystallographic Orientation) ด้วยการรวมกันเป็นก้อนของกลุ่มอะตอมจะเกิดขึ้นจนกระทั่งเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่อง (ภาพที่ 2-1(h)) แต่ในบางกรณีการเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่องจะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์เมื่อฟิล์มมีความหนาโดยเฉลี่ยประมาณ  $0.04 - 0.05 \mu\text{m}$  ลักษณะผิวของฟิล์มบางขณะเกิดการรวมกลุ่มอะตอมจะคล้ายเนินเขาและหุบเขา



ภาพที่ 2-1 การก่อเกิดฟิล์มบาง (Chapman, 1980)

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

ถ้าอะตอมที่ผิวของวัสดุรองรับมีพลังงานเพียงพอ อะตอมเหล่านั้นจะเคลื่อนที่เพื่อเลือกเข้าไปอยู่ในตำแหน่งที่มีพลังงานต่ำกว่าเสมอทั้งนี้ความสามารถในการเคลื่อนที่ (Mobility) ของอะตอมจะเพิ่มขึ้นถ้าอุณหภูมิที่ผิววัสดุรองรับสูงขึ้น นอกจากนี้การลดอัตราเคลือบยังสามารถช่วยให้การโตของผลึกเกิดได้ดียิ่งขึ้นเพราะอะตอมมีเวลาในการโตมากพอ ดังนั้นถ้าอุณหภูมิของวัสดุรองรับสูงและมีอัตราเคลือบต่ำจะได้ฟิล์มที่มีขนาดของเกรนใหญ่ขึ้นมีข้อบกพร่องในเกรนน้อยลง และได้ฟิล์มที่มีความหนาแน่นมากพอสำหรับการเชื่อมต่อกันอย่างสมบูรณ์ในทางกลับกันถ้าอุณหภูมิวัสดุรองรับต่ำแต่อัตราเคลือบสูงก็จะให้ผลลักษณะเดียวกัน

### การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริง

การเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริงเป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางที่เกิดจากสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงการเคลือบด้วยวิธีนี้เกิดขึ้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงวิ่งเข้าชนวัสดุรองรับและมีการพอกพูนและโตเป็นฟิล์มบางในที่สุด กระบวนการสปัตเตอริงคือการทำให้อะตอมหลุดจากผิวของวัสดุโดยการชนของอนุภาคพลังงานสูงแล้วมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและ โมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิวสารเคลือบ โดยอนุภาคที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้และเนื่องจากไอออนที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงในการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริงจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่าวิธีการระเหยสารมากดังนั้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบวิ่งเข้ากระทบแผ่นวัสดุรองรับก็จะฝังตัวแน่นลงในเนื้อวัสดุที่ต้องการเคลือบมากกว่าวิธีระเหยสารดังนั้นการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริงจะทำให้การยึดเกาะระหว่างสารเคลือบกับวัสดุรองรับดีกว่า (พิเชษฐ ลิมสุวรรณ และธนา รัตน์, 2547; Chapman, 1980)

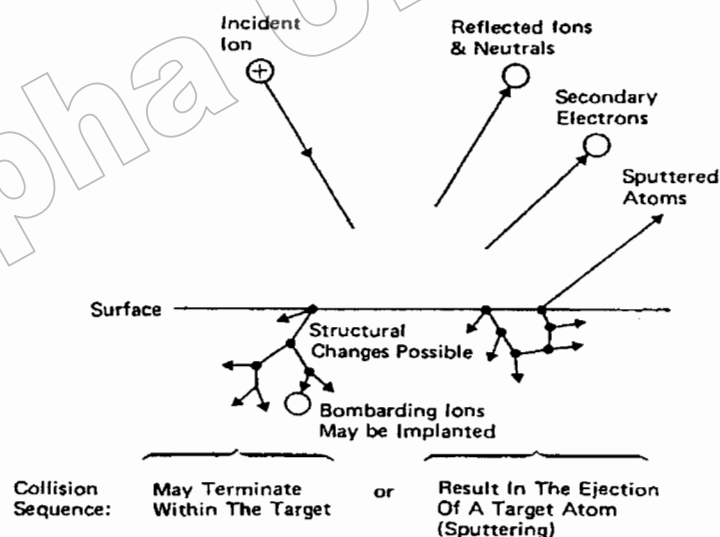
เมื่อผิวหน้าของวัสดุถูกระดมยิงด้วยอนุภาคลังงานสูงจะทำให้เกิดการสึกกร่อนและมีอนุภาคที่ผิวหน้าของวัสดุนั้นหลุดมา เนื่องจากการชนของอนุภาคลังงานสูงกับอนุภาคที่ผิวหน้าวัสดุ ปรากฏการณ์ที่อนุภาคผิวหน้าวัสดุหลุดออกมานี้เรียกว่า สปีดเตอร์ (Sputter) หรือสปีดเตอริง (Sputtering) ปัจจุบันมีการนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางเช่น 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 1 keV สำหรับไอออนของแก๊สอาร์กอนที่ฝังตัวในทองแดง

1.4 การเปลี่ยนโครงสร้างของผิวสารเคลือบ (Target Material Structural Rearrangements) การชนของไอออนบนผิวสารเคลือบทำให้เกิดการเรียงตัวของอะตอมที่ผิวสารเคลือบใหม่และเกิดความบกพร่องของผลึก (Lattice Defect)

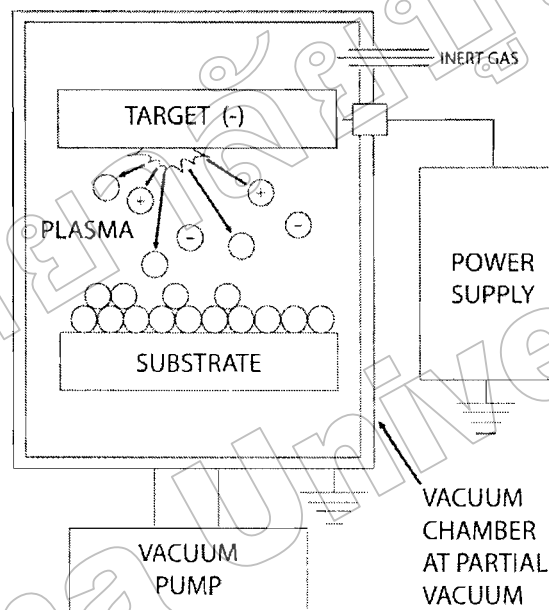
1.5 การสปัตเตอร์ (Sputter) การชนของไอออนอาจทำให้เกิดกระบวนการชนกันแบบต่อเนื่องระหว่างอะตอมของเป้าอันทำให้เกิดการปลดปล่อยอะตอมจากเป้าสารเคลือบซึ่งเรียกว่ากระบวนการสปัตเตอร์

2. กระบวนการสปัตเตอร์เป็นกระบวนการที่อะตอมผิวหน้าของวัสดุถูกทำให้หลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูง โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุดังกล่าว กระบวนการนี้อาจเกิดขึ้นเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ ดังนั้นสิ่งที่จำเป็นในกระบวนการสปัตเตอร์ คือ

2.1 เป้าสารเคลือบ ทำหน้าที่เป็นเป้าให้อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนจนมีการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลือบลงเคลือบบนวัสดุรองรับ

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

2.3 การผลิตอนุภาคพลังงานสูง อนุภาคพลังงานสูงในระบบสปัตเตอริงนี้จะต้องถูกผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้กระบวนการเคลือบสารเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจนได้ความหนาฟิล์มบางตามต้องการ ทั้งนี้สามารถทำได้หลายวิธี เช่นการใช้ลำอนุภาคจากปืนไอออนที่มีปริมาณการผลิตไอออนในอัตราสูงหรือผลิตจากกระบวนการโกลว์ดิสชาร์จ เนื่องจากปืนไอออนมีราคาค่อนข้างสูงและให้ไอออนในพื้นที่แคบ กระบวนการสปัตเตอริงทั่วไปในระดับอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้กระบวนการโกลว์ดิสชาร์จในการผลิตอนุภาคพลังงานสูง



ภาพที่ 2-3 ลักษณะของเครื่องเคลือบสุญญากาศด้วยวิธีสปัตเตอริง

3. ค่าyield ของสปัตเตอริง (Sputtering Yield;  $S$ ) คือค่าเฉลี่ยปริมาณการหลุดของอะตอมเป้าสารเคลือบต่อปริมาณการชนของไอออน 1 อนุภาคมีหน่วยเป็นอะตอมต่อไอออนโดยการวัดค่า yield นี้สามารถทำได้โดยการหาน้ำหนักหรือความหนาที่ลดลงของเป้าสารเคลือบหรือหาได้จากวัสดุทั้งหมดที่ถูกสปัตเตอร์หรืออาจหาได้จากการตรวจวัดสปัตเตอร์อะตอม (Sputter Atom) ขณะที่ยังฟุ้งกระจาย (พิเศษฐ ถิมสุวรรณ และธนัสถา รัตนะ, 2547) ค่า yield ของกระบวนการสปัตเตอริงจะเปลี่ยนไปตามภาวะต่าง ๆ ดังนี้

3.1 เปลี่ยนแปลงตามพลังงานไอออนการชนของอนุภาค 2 อนุภาคในแนวเดียวกัน  
การถ่ายเทพลังงานระหว่างอนุภาคจะเป็นไปตามสมการที่ 2-1

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

|                  |                                  |
|------------------|----------------------------------|
| เมื่อ $\Delta E$ | คือพลังงานที่ถ่ายเทระหว่างอนุภาค |
| $m$              | คือมวลอะตอมที่ถูกระเบิด          |
| $M$              | คือมวลของอะตอมที่วิ่งเข้าชน      |

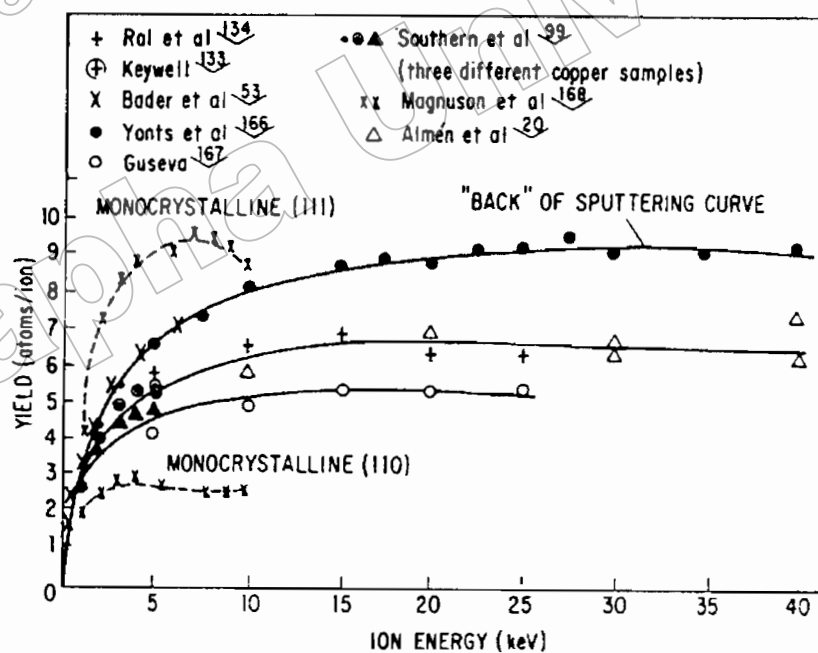
เมื่อพลังงานไอออนมีค่าต่ำมากค่าขีดจำกัดจากระบวนการสปีดเทอริงจะมีค่าเป็นศูนย์  
เนื่องจากไม่สามารถเอาชนะแรงยึดเกาะระหว่างอะตอมบนเป้าสารเคลื่อนที่ได้เมื่อไอออนมีพลังงาน  
สูงขึ้นเกินกว่า  $4H$  ( $H$  คือค่าพลังงานเฉลี่ยที่ใช้ในการระเหิด 1 อะตอมจากผิวสารเคลื่อน)  
ถ้าพลังงานไอออนสูงมากพอในการทำให้เกิดกระบวนการชนอย่างต่อเนื่องระหว่างอะตอม  
สารเคลื่อนและเริ่มมีการปลดปล่อยอะตอมสารเคลื่อนเรียกพลังงานค่านี้ว่าพลังงานขีดเริ่ม  
(Threshold Energies) ซึ่งเปลี่ยนแปลงไประหว่างคู่การชนของอนุภาค (ตารางที่ 2-1)

เมื่อไอออนชนมีพลังงานสูงขึ้นขีดจำกัดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลใน  
ช่วงแรกและเปลี่ยนเป็นการเพิ่มแบบเชิงเส้นจากนั้นจึงมีการอิ่มตัว (Saturation) ของค่าขีด  
เมื่อพลังงานไอออนมีค่าสูงมากทั้งนี้เนื่องจากไอออนพลังงานสูงมีโอกาสนในการฝังตัวบนผิวเป้าสาร  
เคลื่อนสูงขึ้นทำให้ขีดจำกัดของสารเคลื่อนมีค่าคงที่จากนั้นจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มพลังงาน  
ไอออนให้สูงมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 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 ยิลด์ของทองแดงที่ถูกชนด้วยไอออนจากแก๊สอาร์กอนที่พลังงานต่าง ๆ

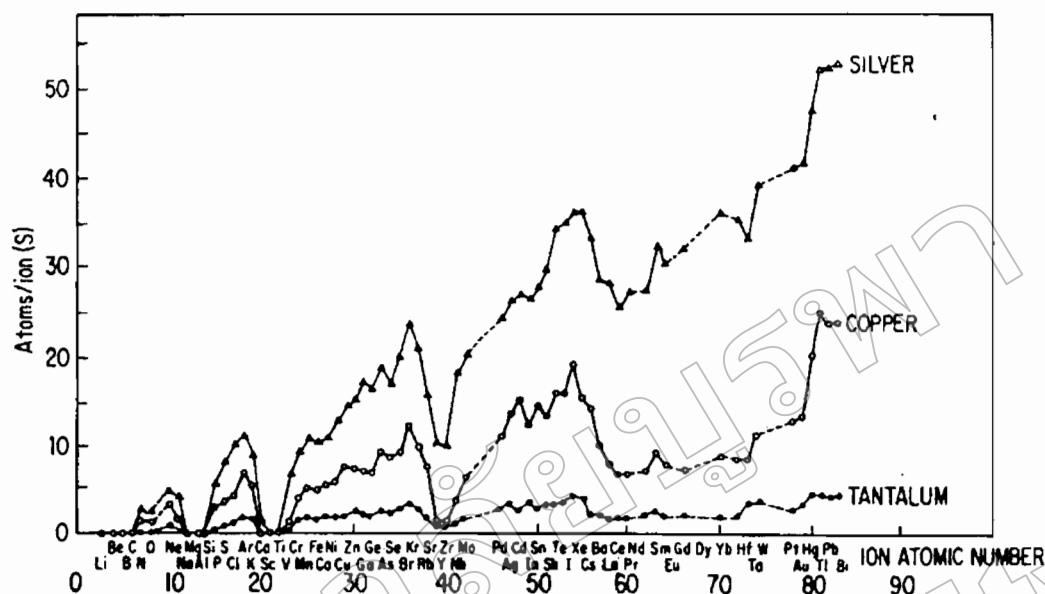
(Maissel & Glang, 1970)

3.2 เปลี่ยนแปลงตามระนาบผลึกของผิวเป้าสารเคลือบจากการทดลองพบว่าเมื่อใช้เป้าสารเคลือบที่เป็นผลึกเดี่ยวค่าyieldจะมีความมากที่สุดเมื่อไอออนชนเป้าในแนวระนาบที่มีอะตอมหนาแน่นที่สุดและมีค่าต่ำในระนาบที่มีอะตอมเบาบางในทองแดงซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ FCC (Face Centered Cubic) พบว่าการชนบนระนาบ (111) ซึ่งมีความหนาแน่นอะตอมสูงสุดyieldจะมีความค่าสูงสุดเมื่อใช้ค่าพลังงานไอออนในการชนค่าเดียวกันส่วนระนาบที่มีความหนาแน่นอะตอมต่ำ ไอออนมีแนวโน้มวิ่งฝังตัวในเป้าสารเคลือบมากขึ้น

3.3 เปลี่ยนแปลงตามชนิดของไอออนที่ชนเป้าสารเคลือบค่าyieldจากเป้าสารเคลือบชนิดเดียวกันเมื่อใช้ไอออนต่างชนิดกันวิ่งชนจะมีค่าแตกต่างกันออกไปแม้สมการที่ 2-1 แสดงให้เห็นว่าการถ่ายเทพลังงานระหว่าง 2 อนุภาคที่ชนกันจะมีค่าสูงสุดเมื่อมวลของอะตอมทั้งสองมีค่าเท่ากันแต่จะตอมบนเป้าสารเคลือบยึดเกาะกับอะตอมข้างเคียงจึงทำตัวเสมือนมีมวลยังผลสูงกว่ามวลของอะตอมเดี่ยวจึงพบว่าyieldมีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้ไอออนที่มีมวลสูงกว่ามวลของอะตอมเป้าสารเคลือบภาพที่ 2-5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าyieldพบว่ามีค่าสูงสุดเป็นช่วง ๆ ณ ตำแหน่งที่ใช้ไอออนจากแก๊สเฉื่อยคือแก๊ส Ne, Ar, Kr, และXe ซึ่งเป็นอะตอมที่มีอิเล็กตรอนครบ 8 ในวงนอกสุด

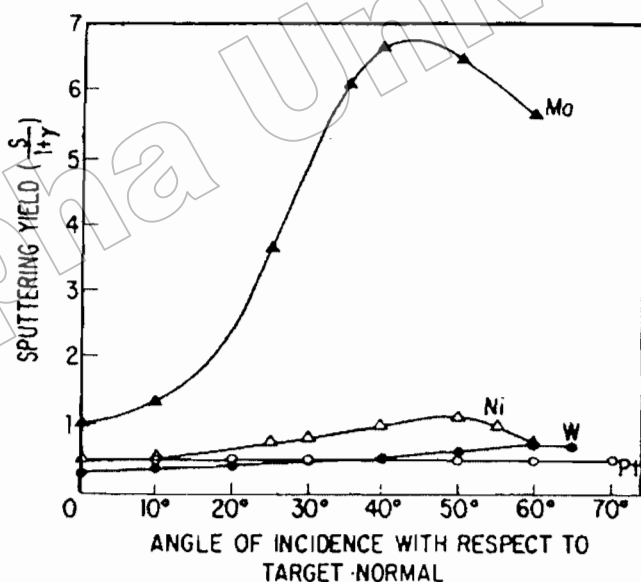
3.4 เปลี่ยนแปลงตามมุมตกกระทบของไอออนบนเป้าสารเคลือบจากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มมุมเอียงของการชนจากไอออนบนเป้าหมายมากขึ้นyieldจะมีความสูงขึ้นตามมุมที่เอียงเนื่องจากอะตอมสารเคลือบที่หลุดออกมาเปลี่ยนจากการกระเจิงกลับ (Back Scattering) เป็นการกระเจิงไปข้างหน้า (Forward Scattering) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ต้องการจำนวนครั้งของการชนระหว่างอะตอมน้อยกว่าทำให้yieldสูงขึ้นจนถึงจุดหนึ่งซึ่งมีค่าสูงสุดที่องศาการเอียงมากกว่า  $45^\circ$  จากนั้นyieldจะมีความลดลงเมื่อมุมสูงขึ้นและเป็นศูนย์เมื่อมุมเอียงมีค่า  $90^\circ$  โดยขณะนั้นพื้นที่การชนเมื่อมองจากไอออนมีค่าเป็นศูนย์ (ภาพที่ 2-6)

4. ความเร็วและพลังงานของอะตอมที่ถูกสปัตเตอร์หลุดออกจากผิวหน้าเป้าสารเคลือบด้วยวิธีการสปัตเตอร์มีพลังงานจลน์ค่อนข้างสูงและมากกว่าพลังงานของอะตอมที่หลุดออกด้วยวิธีการระเหิดสารประมาณ 50 - 100 เท่าอะตอมมีการกระจายพลังงานแบบ Maxwellian โดยที่พลังงานส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่า 10 eV และอีกส่วนหนึ่งมีพลังงานระหว่าง 10 - 40 eV ถ้าไอออนที่ใช้มีพลังงานสูงขึ้นพลังงานเฉลี่ยของอะตอมจากสปัตเตอร์จึงจะมีความสูงขึ้นเมื่อไอออนที่วิ่งชนมีพลังงานเกิน 1 keV พลังงานเฉลี่ยของอะตอมจากการสปัตเตอร์จะไม่เพิ่มขึ้นและเป้าที่มีค่าyieldสูงมีแนวโน้มทำให้พลังงานเฉลี่ยของอะตอมที่หลุดออกมามีค่าต่ำเนื่องจากไอออนที่วิ่งชนเมื่อเฉลี่ยพลังงานให้กับอะตอมที่หลุดออกมาจำนวนมากอะตอมแต่ละตัวจะรับพลังงานเฉลี่ยจากไอออนได้น้อยลง



ภาพที่ 2-5 การเปลี่ยนแปลงค่าyield ของเป้าทองแดง (Cu) , เงิน (Ag) และแทนทาลัม (Ta)

เมื่อใช้ ไอออนพลังงาน 45 keV จากธาตุที่มีเลขอะตอมค่าต่างๆ (Maissel & Glang, 1970)



ภาพที่ 2-6 การเปลี่ยนแปลงของ yield เมื่อใช้ ไอออนของปรอทพลังงาน 200 eV ชนเป้าหมาย (Ni),

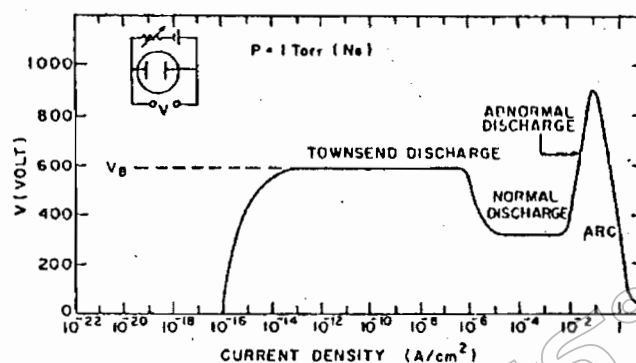
โมลิบดีนัม (Mo), ทังสเตน (W) และทองคำขาว (Pt) ที่มุมการตกกระทบค่าต่าง ๆ

(วัดเทียบกับแนวตั้งฉากกับเป้า) (Maissel & Glang, 1970)

## กระบวนการโกลว์ดิซชาร์จ

พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ และธนัสถา รัตน์ะ (2547) ได้อธิบายกระบวนการโกลว์ดิซชาร์จไว้ดังนี้เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขั้วอิเล็กโตรด 2 ขั้ว ที่วางห่างกันเป็นระยะ  $d$  ภายใต้ความดันประมาณ 1.33 mbar ของแก๊สนีออน พบว่าช่วงแรก que เพิ่มแรงดันทางไฟฟ้าจะมีกระแสไหลในวงจรน้อยมาก กระแสส่วนนี้เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออนของแก๊สที่เกิดขึ้นตลอดเวลาในบรรยากาศเนื่องจากการชนของรังสีคอสมิกและถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้า กระแสนี้จะมีค่าค่อนข้างคงที่เพราะอัตราการเกิดประจุขึ้นอยู่กับความเข้มของรังสี เมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นใกล้ค่าแรงดันไฟฟ้าทะลาย (Breakdown Voltage;  $V_B$ ) พลังงานของประจุที่ถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้นจนสามารถชนโมเลกุลของแก๊สทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอนซึ่งถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าให้มีการชนและเกิดการไอออไนซ์เพิ่มขึ้น ส่วนของไอออนบวกจะถูกเร่งเข้าชนคาโทด จนเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) เรียกกระบวนการช่วงนี้ว่า ทาวนด์เซนต์ดิซชาร์จ (Townsend Discharge)

เมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นถึงแรงดันไฟฟ้าทะลายจะเกิดกระบวนการถล่ม (Avalanche) ทำให้ปริมาณไอออนบวกวิ่งเข้าชนคาโทดมากขึ้นและมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิมากขึ้น ซึ่งจะถูกร่งให้วิ่งเข้าหาอโนดขณะเดียวกันอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้ก็จะมีการชนกับโมเลกุลของแก๊สทำให้เกิดไอออนมากขึ้น สุดท้ายไอออนบวกที่เพิ่มขึ้นมากขึ้นนี้จะวิ่งเข้าชนคาโทดแล้วเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิเพิ่มขึ้นตามมาด้วย และชนโมเลกุลแก๊สทำให้เกิดผลิตไอออนเพิ่มขึ้น ทำให้กระแสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีปริมาณไอออนมากเพียงพอที่จะผลิตอิเล็กตรอนได้ในจำนวนคงที่ ช่วงนี้ระบบสามารถรักษาสภาพดิซชาร์จได้ด้วยตนเองโดยไม่ต้องอาศัยแหล่งกำเนิดจากรังสีภายนอกในการผลิตไอออน ช่วงนี้แก๊สภายในระบบจะเกิดการเรืองแสงขึ้น แรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดลดค่าลงและกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเรียก การเรืองแสงปกติ หรือ นอร์มอลโกลว์ (Normal Glow) สภาวะนี้อัตราการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิต่ออัตราการชนของไอออนมีค่าค่อนข้างต่ำ คือประมาณ 0.1 สำหรับเป่าคาโทดที่ทำจากวัสดุทั่วไป โดยในช่วงเริ่มต้นของการเรืองแสงหรือโกลว์ การชนของไอออนบนคาโทดจะปรับตัวเองให้เกิดขึ้นในบางบริเวณ แนวทางเรืองแสงอาจเลื่อนไปมาได้และการชนของไอออนบนคาโทด ไม่มีความสม่ำเสมอโดยจะมีความเข้มของบริเวณการเรืองแสงตามแนวขอบหรือมุมของคาโทดที่มีสนามไฟฟ้าสูงเพื่อรักษาสภาพการโกลว์ (Self-Sustaining) บางบริเวณไว้ เมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นตามแนวการชนของไอออนจะค่อย ๆ ขยายตัว เพิ่มพื้นที่จนครอบคลุมตลอดผิวคาโทด จนกระทั่งมีค่าความหนาแน่นกระแสเท่ากันตลอดโดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดคงที่

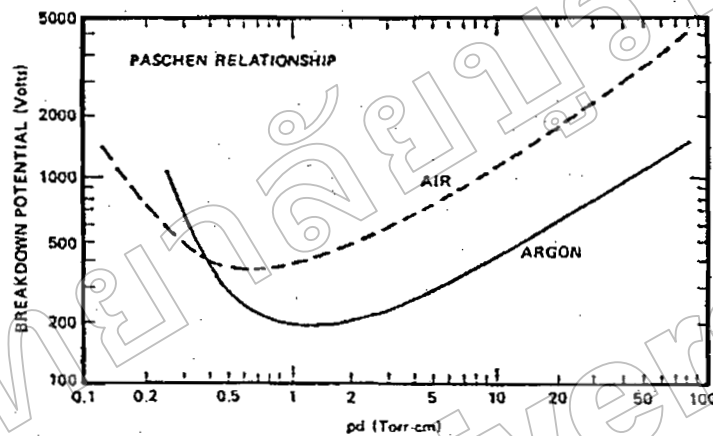


ภาพที่ 2-7 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดของ  
กระบวนการเกิด ดีซี โกลว์ดีสชาร์จ ในหลอดสุญญากาศบรรจุแก๊สนีออน  
(Vossen & Kerns, 1978)

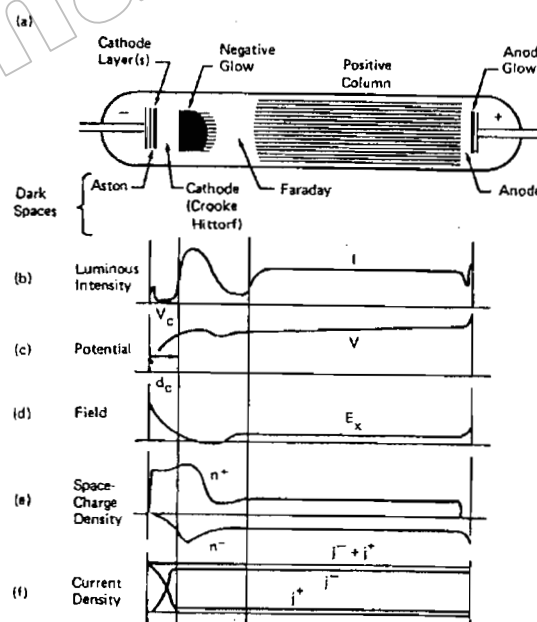
หลังจากการชนของไอออนครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดของคาโทดแล้ว การเพิ่มกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบจะทำให้ทั้งแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น เรียกว่า ช่วงการเรืองแสงผิดปกติ เปล่งแสงจ้าขึ้น หรือ แอบนอร์มอล โกลว์ (Abnormal Glow) เป็นช่วงที่ใช้กับระบบสปีดเตอริง และอีกหลาย ๆ ระบบของกระบวนการเกี่ยวข้องกับ โกลว์ดีสชาร์จ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

ค่าแรงดันไฟฟ้าจะลายในกระบวนการ โกลว์ดีสชาร์จจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปกับระยะทาง  $d$  ระหว่างอิเล็กโตรดและระยะปลอดการชนระหว่างอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และโมเลกุลของแก๊ส (ระยะปลอดการชนของอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะแปรผกผันกับความดัน และมีค่ามากกว่าระยะปลอดการชนของการชนกันเองระหว่างโมเลกุลแก๊ส) ปกติอิเล็กตรอนทุติยภูมิแต่ละตัวมีความสามารถในการผลิตไอออนบวกได้ระหว่าง 10 ถึง 20 ตัว เพื่อให้เกิดกระบวนการถล่มในช่วงของนอร์มอล โกลว์ถ้าความดันต่ำเกินไป (ระยะปลอดการชนยาวขึ้น) หรือระยะทาง  $d$  มีค่าน้อยเกินไป อิเล็กตรอนทุติยภูมิจะไม่สามารถผลิตไอออนได้มากพอก่อนการชนกับอะโนด ถ้าความดันสูงเกินไป (ระยะปลอดการชนสั้นลง) หรือระยะ  $d$  มากเกินไป อิเล็กตรอนทุติยภูมิไม่สามารถเพิ่มพลังงานให้กับตัวเองในสนามไฟฟ้าได้มากพอสำหรับการไอออไนซ์ เมื่อเกิดการชนพลังงาน

จะถูกถ่ายทอดให้โมเลกุลแก๊สในรูปการกระตุ้น (Excite) ขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงขึ้นทำให้ไม่สามารถผลิตไอออนบวกได้มากเพียงพอเช่นกัน ดังนั้นทั้งสองกรณีจะต้องใช้แรงดันทางไฟฟ้าทะลาค่อนข้างสูงโดยมีจุดหนึ่งระหว่างนี้ที่ใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าทะลาคต่ำสุดตามกฎของปาส์เซน (Pachen's law) ซึ่งแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าทะลายและผลคูณระหว่างความดันแก๊ส ( $P$ ) และระยะระหว่างอิเล็กโตรด ( $d$ ) (ภาพที่ 2-8)



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



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

ในระบบปิดเตอริงทั่วไปสถานะของการเกิดโกลว์ดิซาร์จจะกระทำในช่วงที่ผลคูณของความดันกับระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด ( $P \times d$ ) ซึ่งมีค่าต่ำกว่าจุดต่ำสุดของกราฟมาก (เนื่องจากการเคลือบฟิล์มที่ความดันต่ำทำให้ฟิล์มที่ได้มีคุณภาพดีการแทรกตัวของแก๊สในเนื้อฟิล์มน้อยและลดปริมาณสารปลอมปนในฟิล์ม) จึงต้องการแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นค่อนข้างสูง บางครั้งจึงมีความจำเป็นต้องใช้การเพิ่มความดันชั่วขณะเพื่อให้เริ่มการดิซาร์จได้ที่แรงดันไฟฟ้าต่ำ

ส่วนต่าง ๆ ของกระบวนการ โกลว์ดิซาร์จ แสดงดังภาพที่ 2-9 โดยช่วงแรกคือช่วงมืดแอสตัน (Aston Dark Space) เป็นบริเวณที่อิเล็กตรอนถูกปล่อยจากคาโทดด้วยพลังงานต่ำประมาณ 1 eV ซึ่งไม่สามารถไอออไนซ์โมเลกุลแก๊สได้ ทำให้เกิดเป็นช่วงมืดถัดจากผิวคาโทด บริเวณที่มีการเปล่งแสงออกมาด้วยความเข้มสูงมากเรียกว่า คาโทด โกลว์ (Cathode Glow) เป็นบริเวณที่ไอออนของแก๊สจากการดิซาร์จ และไอออนของอะตอมสารเคลือบซึ่งถูกผลิตขึ้นบริเวณคาโทดมีการรวมตัวเป็นกลางกับอิเล็กตรอนใกล้ผิวคาโทดด้วยกระบวนการต่างๆ ทำให้เกิดแสงซึ่งเป็นความถี่เฉพาะของสารที่ทำคาโทดและของแก๊สที่ใช้ เช่นถ้าคาโทดเป็นทองแดงจะมีสีเขียว ทองคำมีสีส้มแดง แก๊สอาร์กอนมีสีน้ำเงินฟ้า และแก๊สไนโตรเจนมีสีม่วงเป็นต้น

ถัดจากคาโทดโกลว์เรียกว่าช่วงมืดครุคหรือช่วงมืดคาโทด (Crook or Cathode Dark Space) พลังงานของอิเล็กตรอนมีค่าสูงกว่าพลังงานในการ ไอออไนซ์โมเลกุลของแก๊สเมื่อถูกเร่งผ่านสนามไฟฟ้าในระยะปลอดการชนออกมา ทำให้บริเวณปลอดการชนไม่มีการไอออไนซ์เกิดขึ้น จึงไม่เกิดการปลดปล่อยแสงในช่วงนี้และกลายเป็นบริเวณมืด ถัดจากระยะปลอดการชนอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะสูญเสียพลังงานส่วนใหญ่โดยการ ไอออไนซ์โมเลกุลแก๊สไอออนบวกที่เกิดขึ้นเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าอิเล็กตรอนมากทำให้ระยะปลอดการชนของอิเล็กตรอนมีการสะสมของไอออนบวกอยู่มาก (Positive Space Charge) ศักย์ไฟฟ้าเกือบทั้งหมดตกคร่อมบริเวณคาโทดคาร์คสเปซนี้ทำให้สนามไฟฟ้าบริเวณนี้สูงขึ้นมากและมากเกินไปสำหรับการเร่งอิเล็กตรอนชนและไอออไนซ์โมเลกุลแก๊สในเวลาถัดมาทำให้ภายหลังการเกิดนอร์มอลโกลว์ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขั้วอิเล็กโตรดมีค่าลดลงตามกราฟภาพที่ 2-8 ส่วนอิเล็กตรอนเมื่อเล็ดจากบริเวณที่ผลิตไอออนของคาร์คสเปซแล้วจะมีพลังงานลดลง ดังนั้นพลังงานที่เหลือจึงเพียงใช้ในการกระตุ้นโมเลกุลของแก๊สและเกิดการเรืองแสงขึ้น แม้อิเล็กตรอนจะเป็นอนุภาคที่เคลื่อนที่ได้เร็วแต่พลังงานที่เหลือน้อยมาก รวมทั้งประจุบวกและประจุสะสมของไอออนทางด้านซ้ายมือในบริเวณคาร์คสเปซทำให้อิเล็กตรอนใช้เวลาในการเคลื่อนที่ผ่านช่วงเรืองแสงนี้นานขึ้นและเกิดการสะสมประจุลบบริเวณนี้จึงเรียกว่า เนกาทีฟโกลว์ (Negative Glow)

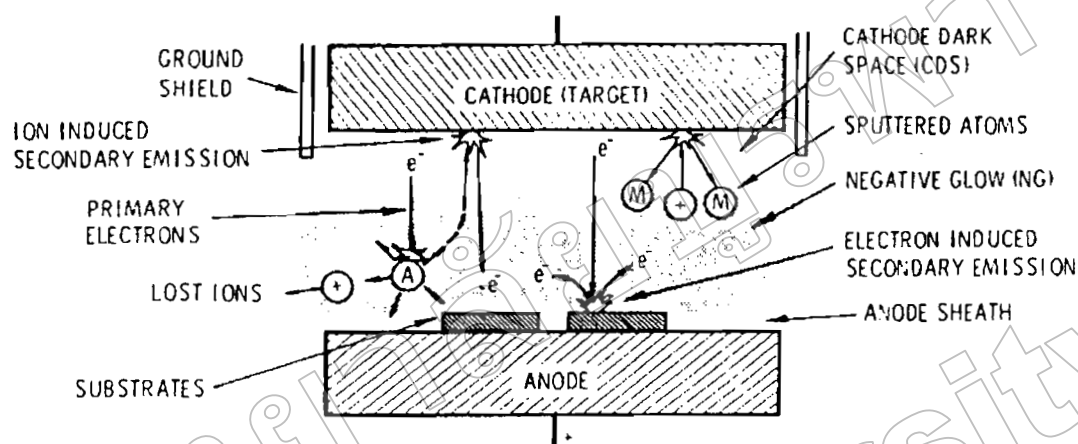
จากนั้นอิเล็กตรอนจะมีพลังงานลดลงจนไม่สามารถกระตุ้น โมเลกุลแก๊สให้เปลี่ยนไปอยู่ในระดับพลังงานสูงได้ ทำให้เกิดบริเวณมืดอีกช่วงหนึ่งเรียกว่า ช่วงมืดฟาราเดย์ (Faraday Dark Space) ถัดจากช่วงนี้กระบวนการที่เกิดขึ้นคล้ายกับการคายประจุของทาวนด์ซึ่งมีปริมาณอิเล็กตรอนค่อนข้างคงที่ถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าค่าต่ำ ๆ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

เนื่องจากการรักษาสภาวะ โกลว์ดีสชาร์จขึ้นกับปริมาณของอิเล็กตรอนที่ถูกผลิตขึ้นบริเวณคาโทดจากการชนของไอออนที่ถูกผลิตบริเวณแคโทด โกลว์ จึงพบว่าการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งแอโนดเพียงเล็กน้อยจะไม่มีผลต่อกระบวนการ โกลว์ดีสชาร์จ เมื่อเลื่อนแอโนดเข้าหาคาโทด จนพื้นช่วงมืดฟาราเดย์เข้าสู่แคโทด โกลว์จะถึงช่วงคาโทดคาร์คัสเปซ ทำให้ปริมาณไอออนที่ถูกผลิตจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิมีปริมาณน้อยลง การรักษาสภาพ โกลว์ดีสชาร์จไว้จำเป็นต้องใช้แรงดัน ไฟฟ้าที่สูงขึ้นซึ่งจะส่งผลถึงปริมาณ ไอออนที่ถูกผลิตสูงขึ้นด้วย การ โกลว์ในลักษณะนี้จะเรียกว่า ออปสตรัคโกลว์ (Obstructed Glow) และเมื่อเลื่อนแอโนดเข้าใกล้คาโทดต่อมาจนพื้นขอบของ คาโทดคาร์คัสเปซ ซึ่งมีระยะสั้นกว่าระยะปลดการชนของอิเล็กตรอน จะไม่มีการผลิตไอออนเกิดขึ้นและกระบวนการคายประจุไว้ได้ และถ้าหากมีสิ่งสกปรกบริเวณคาโทดการอาร์คอาจเกิดขึ้นได้โดยไม่เกิดการ โกลว์ดีสชาร์จก็ได้

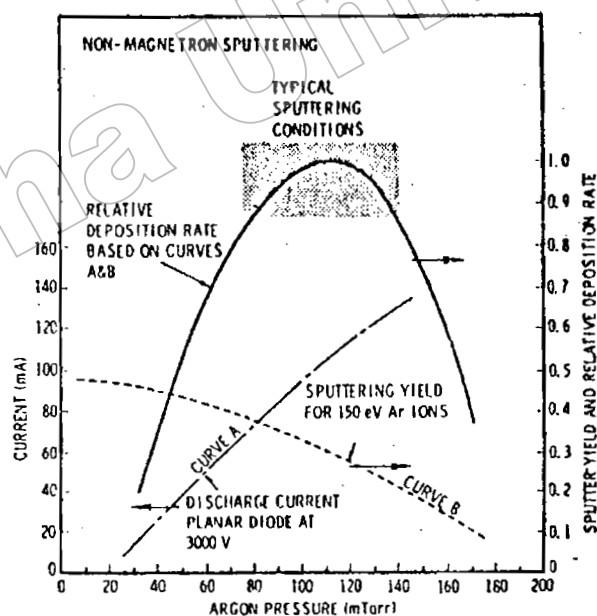
### ระบบเคลือบแบบ ดีซี สปีดเตอร์ริง

ภาพที่ 2-10 แสดงระบบเคลือบแบบดีซีสปีดเตอร์ริงอย่างง่ายที่สุด (พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ และธนัสนา รัตนะ, 2547; Bunshah, 1982; Smith, 1995) ซึ่งประกอบด้วยคาโทดคือแผ่นเป้าสารเคลือบและแอโนด คือ ที่วางวัสดุรองรับหรือชิ้นงานที่ต้องการเคลือบปกปิดระยะระหว่างคาโทดและวัสดุรองรับจะอยู่ระหว่าง 4 - 10 cm เพื่อป้องกันการสูญเสียอะตอมสารเคลือบที่ผนังของภาชนะสุญญากาศโดยทั่วไประยะคาร์คัสเปซอยู่ระหว่าง 1 - 4 cm โดยแอโนดจะอยู่บริเวณแคโทด โกลว์ ส่วนอุปกรณ์ทำงานจะอยู่ในช่วงเอบนอร์มอล โกลว์ดีสชาร์จแก๊สที่ใช้เป็นแก๊สเฉื่อยซึ่งให้ฮิลด์สูงและไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคลือบ (ปกติใช้แก๊สอาร์กอน) ขณะเกิด โกลว์ดีสชาร์จที่ความดันค่าหนึ่ง กระบวนการไอออนไนซ์จะรักษาสภาพ โกลว์ดีสชาร์จไว้ทราบที่ระยะคาร์คัสเปซไม่มากกว่าระยะระหว่างคาโทดและแอโนดเมื่อความดันลดลงหรือแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดสูงขึ้นระยะปลดการชนของอิเล็กตรอนจะสูงขึ้นทำให้ระยะคาร์คัสเปซขยายตัวออกและแหล่งผลิตไอออนในระบบมีปริมาณน้อยกระแสลดลงและอะตอมที่ถูกสปีดเตอร์มีปริมาณลดลงตามปริมาณของ

ไอออนและกระแสไฟฟ้าในระบบที่ความดันต่ำกว่า  $10^{-2}$  mbar ระยะคาร์ดสเปซจะยาวกว่าระยะระหว่างอิเล็กโตรดและกระแสไฟฟ้าลดลงสู่ศูนย์ทำให้กระบวนการผลิตไอออนสิ้นสุดลงและไม่มีอะตอมหลุดออกจากเป้าสารเคลือบเนื่องจากการสปัตเตอร์อีก



ภาพที่ 2-10 ระบบเคลือบแบบ คีซี สปัตเตอร์ริง (Bunshah, 1994)



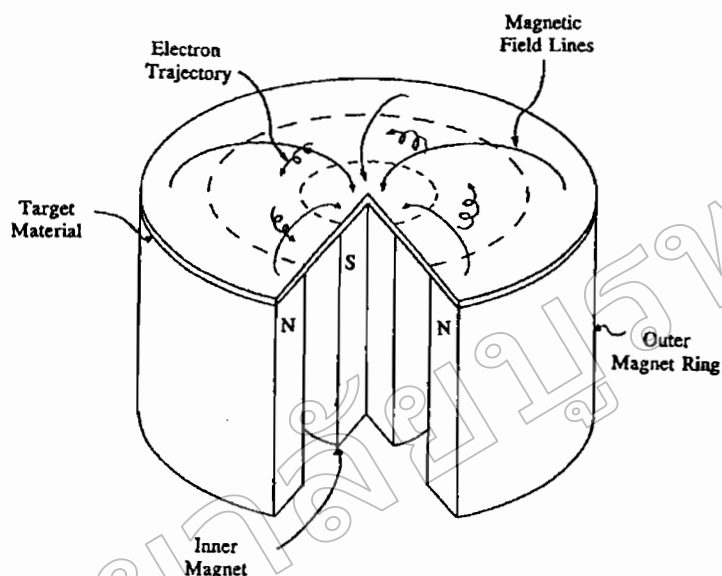
ภาพที่ 2-11 ผลของความดันในระบบที่มีผลต่ออัตราเคลือบค่า Yield และกระแสไฟฟ้าในระบบสปัตเตอร์ริงของนิเกิลที่ใช้แรงดันไฟฟ้า 3,000 V ระหว่างขั้วอิเล็กโตรดที่วางห่างกัน 4.5 cm (Vossen & Kerns, 1978)

ขณะที่ความดันสูงขึ้นระยะคาร์คสเปจจะหดสั้นลงบริเวณการผลิตไอออนมีปริมาตรสูงขึ้นกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรเพิ่มขึ้นและกระบวนการสปัตเตอริงเกิดขึ้นในอัตราสูงตามความดัน ดังภาพที่ 2-11 เส้นกราฟ A ขณะที่ความดันภายในระบบสูงขึ้นระยะปลดการชนระหว่างโมเลกุลของแก๊สมีค่าลดลงอะตอมสารเคลือบที่หลุดออกจากเป้าจะส่งผ่านเคลือบบนวัสดุรองรับได้ยากจากการชนกับ โมเลกุลของแก๊สและสะท้อนกลับสู่เป้าสารเคลือบหรือสูญเสียสู่ผนังภาชนะสุญญากาศทำให้ค่าของอัตราการสปัตเตอริงมีค่าลดลงแต่เมื่อความดันสูงขึ้น ดังภาพที่ 2-12 เส้นกราฟ B ผลรวมระหว่างอิเล็กตรอนและกระแสไอออนจะทำให้อัตราการเคลือบมีค่าสูงสุดที่ความดันค่าหนึ่งทั้งนี้พบว่าการสปัตเตอริงเกิดเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า 3,000 V ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่วางห่างกัน 4.5 cm ในแก๊สอาร์กอนการเคลือบจะหยุดที่ความดันมีค่าต่ำกว่า  $2.6 \times 10^{-4}$  mbar และที่ความดันสูงกว่า  $1.6 \times 10^{-5}$  mbar โดยอัตราเคลือบจะมีค่าสูงสุดและลดลงเมื่อความดันสูงเกินค่านี้ดังนั้นบริเวณที่เหมาะสมกับกระบวนการสปัตเตอริงคือบริเวณที่ให้อัตราเคลือบสูงและประสิทธิภาพดีที่สุดจากภาพที่ 2-11 พบว่าความดันที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบคือ  $1.0 \times 10^{-5}$  mbar ความหนาแน่นกระแสประมาณ  $1.0 \text{ mA/cm}^2$  ด้วยอัตราเคลือบ  $0.036 \text{ } \mu\text{m/min}$  ซึ่งเป็นอัตราเคลือบที่ค่อนข้างต่ำในขณะที่ใช้แรงดันไฟฟ้าค่อนข้างสูง (พิเชษฐ ถัมสุวรรณ และธณัฐธา รัตนะ, 2547)

### ระบบเคลือบแบบ ดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอริง

อัตราการเกิดสปัตเตอริงนั้นจะขึ้นกับผลคูณระหว่างอิเล็กตรอนและปริมาณไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบดังนั้นการเพิ่มอัตราการสปัตเตอริงนั้นนอกจากจะทำได้โดยการเพิ่มอิเล็กตรอนแล้วยังทำได้โดยการเพิ่มปริมาณไอออนที่วิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบซึ่งในระบบดีซีสปัตเตอริงปกตินั้นทำได้เพียงการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดหรือเพิ่มความดันซึ่งจะมีขีดจำกัดสูงสุดที่ความหนาแน่นกระแสประมาณ  $1 \text{ mA/cm}^2$  และความดันประมาณ  $1.33 \times 10^{-5}$  mbar นอกจากนี้ยังพบว่าในระบบดีซีสปัตเตอริงทั่วไปอะตอมของแก๊สที่จะเกิดการไอออไนซ์มีค่าน้อยกว่า 1% นอกจากนี้ยังมีข้อเสียเมื่อความดันสูงขึ้นจะทำให้ปริมาณแก๊สที่แทรกตัวในฟิล์มบางที่ได้มีค่าสูงด้วย (พิเชษฐ ถัมสุวรรณ และธณัฐธา รัตนะ, 2547)

ต่อมาได้มีการพัฒนาระบบใหม่เรียกว่าระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง (พิเชษฐ ถัมสุวรรณ และธณัฐธา รัตนะ, 2547; Smith, 1995) ซึ่งเป็นการใช้สนามแม่เหล็กช่วยโดยจ่ายสนามแม่เหล็กให้มีทิศทางกับผิวหน้าเป้าสารเคลือบและมีทิศทางฉากกับสนามไฟฟ้าซึ่งจะช่วยเพิ่มระยะทางเดินของอิเล็กตรอนให้ยาวขึ้นโดยอำนาจของสนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นทางโค้ง (ภาพที่ 2-12) ทำให้การไอออไนซ์เนื่องจากการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมแก๊สมีค่าสูงขึ้นซึ่งจะทำให้อัตราการสปัตเตอริงสูงขึ้นด้วย



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

ทั้งนี้จากการศึกษาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กพบว่าถ้าอิเล็กตรอนมีทิศทางการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กอิทธิพลของสนามแม่เหล็กจะทำให้อนุภาคประจุนั้นเคลื่อนที่ในแนววงกลม (ภาพที่ 2-13 (a)) ด้วยรัศมี

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

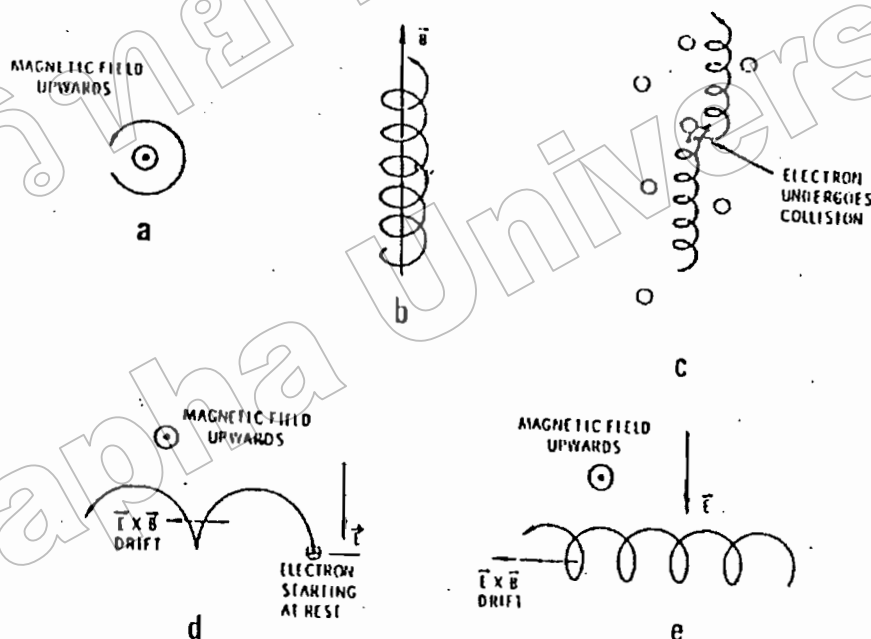
เมื่อ  $W$  คือพลังงานของอิเล็กตรอนในหน่วย eV  
 $B$  คือความเข้มสนามแม่เหล็กในหน่วย gauss  
 หมุนด้วยความถี่ไซโคลตรอน  $\nu = 2.8 \times 10^6$  Hz

ถ้าพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กมีค่า 10 eV และสนามแม่เหล็กมีค่าความเข้ม 100 gauss รัศมีการหมุนมีค่าเท่ากับ 0.1 cm ด้วยความถี่การหมุนเท่ากับ  $2.8 \times 10^6$  Hz ภาพที่ 2-13 (b) แสดงอิเล็กตรอนมีความเร็วส่วนหนึ่งในแนวนานกับสนามแม่เหล็ก อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่หมุนควงรอบแนวสนามแม่เหล็กด้วยจำนวนเส้นแรงคงที่ค่าหนึ่งระหว่างนี้ ถ้าอิเล็กตรอนชนกับอะตอมแก๊สภาพที่ 2-13 (c) แนวการหมุนควงรอบสนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนไป

ถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ภายในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกันอำนาจของสนามทั้งสองนอกจากจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในแนวโค้งแล้วยังสามารถทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเรียกว่าการเคลื่อนที่แบบลอยเลื่อน (Drift motion) มีค่าเท่ากับ

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

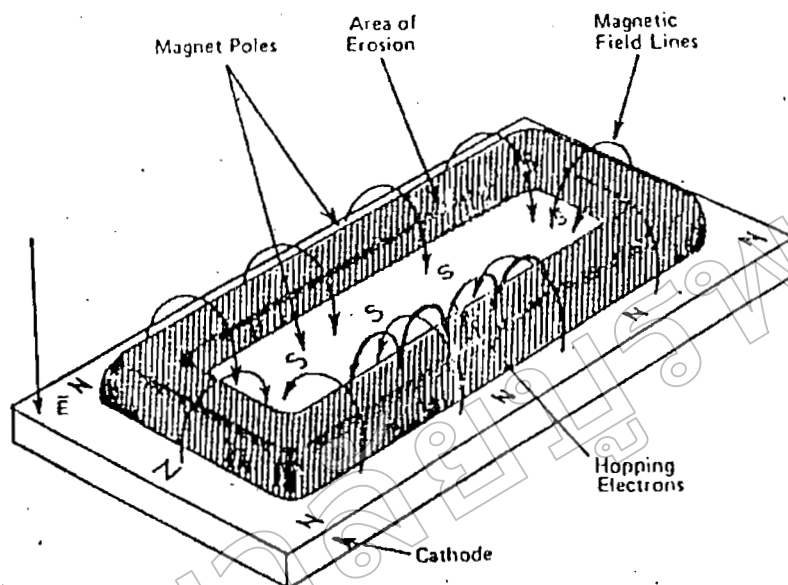
เมื่อ  $E$  คือสนามไฟฟ้าหน่วยเป็น V/cm  
 $B$  คือความเข้มสนามแม่เหล็กในหน่วย gauss



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

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

ระบบสปัตเตอริงที่ใช้สนามแม่เหล็กช่วยเพิ่มปริมาณไอออนนั้นถ้าสนามแม่เหล็กมีทิศทางขนานกับสนามไฟฟ้าจะเรียกว่าสนามตามยาว (Longitudinal Field) จะทำให้ประสิทธิภาพการเพิ่มไอออนไม่สูงนักแต่ไม่ทำให้แนวการเกิดโกลด์ิสซาร์จเปลี่ยนแปลงไปและยังสามารถรักษาความสม่ำเสมอของฟิล์มบางไว้ได้ดีกรณีของสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าเรียกว่าสนามตามขวาง (Transverse Field) โดยกระบวนการเพิ่มปริมาณไอออนเกิดขึ้นดังนี้หลังจากที่ไอออนบวกชนกับเป้าสารเคลือบและเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองออกมาอิเล็กตรอนชุดที่สองจะเคลื่อนที่ในลักษณะเดียวกับภาพที่ 2-13 (d) ทำให้อิเล็กตรอนถูกกักอยู่ในบริเวณสนามแม่เหล็กโกลด์ิสซาร์จและเคลื่อนที่แบบลอยเลื่อนตามแนวผิวหน้าของคาโทด (ภาพที่ 2-14) ทำให้อิเล็กตรอนมีโอกาสนชนกับโมเลกุลแก๊สบริเวณผิวหน้าเป้าสารเคลือบมากขึ้นจนเพิ่มปริมาณไอออนสูงมากโกลด์ิสซาร์จเคลือบอิเล็กตรอนตัวใดที่ไม่ชนโมเลกุลของแก๊สจะเดินทางเป็นวงโค้งเข้าชนเป้าสารเคลือบและผลิตอิเล็กตรอนชุดที่สองมากขึ้นเป็นผลทำให้อิออนถูกผลิตในปริมาณสูงมากและเกิดโกลด์ิสซาร์จทำให้เกิดสเปซชาร์จจากไอออนบวกสูงที่ผิวคาโทดซึ่งอาจสั้นกว่าระยะปลอดการชนในดีซีสปัตเตอริงที่ความดันใช้งานมากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเกือบทั้งหมดจะตกคร่อมบริเวณนี้และมีค่าสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณคาร์คสเปซในดีซีสปัตเตอริงขณะไม่มีสนามแม่เหล็กมากทำให้ความต้องการแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดของระบบแมกนีตรอนสปัตเตอริงลดลงทั่วไปมีค่าประมาณ  $300 - 800 \text{ V}$  ถ้าใช้สนามแม่เหล็กกับแมกนีตรอนทรงกระบอกจะเรียกว่าแมกนีตรอนสปัตเตอริงทรงกระบอก (Cylindrical Magnetron Sputtering) และถ้าใช้สนามแม่เหล็กกับระบบดีซีสปัตเตอริงที่ใช้เป้าแบบแผ่นราบจะเรียกว่าพลาเนียร์แมกนีตรอนสปัตเตอริง (Planar Magnetron Sputtering)



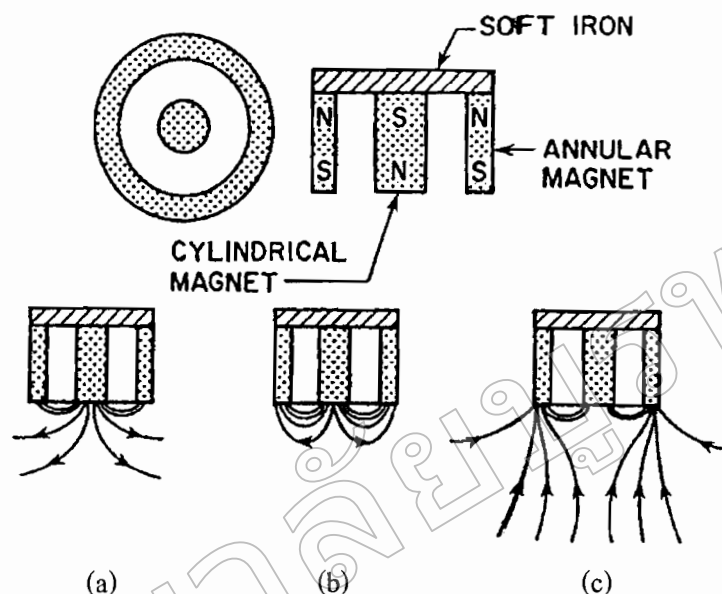
ภาพที่ 2-14 การจัดสนามแม่เหล็กและแนวการกัดกร่อนของเป่าสารเคลื่อนในระบบพลาสมา  
แมกนีตรอน สปีดเตอริง (Chapman, 1980)

ประสิทธิภาพการเพิ่มไอออนที่สูงมากในระบบแมกนีตรอนและพลาสมาที่เกิดขึ้นจะเพิ่มมากขึ้นบริเวณเป่าสารเคลื่อนทำให้อัตราการสปีดเตอริงของระบบนี้มีค่าสูงขณะที่ความดันในระบบจะมีค่าต่ำแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าเกือบคงที่ที่ทุกค่าของอัตราการสปีดเตอริงแมกนีตรอน สปีดเตอริงทรงกระบอกทั่วไปมีอัตราการสปีดเตอริงสูงกว่า  $1.0 \mu\text{m}/\text{min}$  และมีอัตราเคลื่อนสูงกว่า  $0.2 \mu\text{m}/\text{min}$  ความหนาแน่นกระแสที่ผิวคาโทดประมาณ  $20.0 \text{ mA}/\text{cm}^2$  แรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าระหว่าง  $300 - 800 \text{ V}$  ที่ความดันประมาณ  $5.33 \times 10^{-5} \text{ mbar}$  ประสิทธิภาพการเคลื่อนสูงขึ้นกว่า 10 เท่าตัวนอกจากนี้ยังสามารถขยายสเกลให้กับระบบสปีดเตอริงขนาดใหญ่ได้ง่ายเมื่อออกแบบใช้งานร่วมกับไดรฟ์ไฮดรอลิกสปีดเตอริงระบบสามารถเคลื่อนได้ที่ความดันต่ำถึง  $10^{-5} \text{ mbar}$

### ระบบเคลือบแบบ อัมบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง

ในการเคลือบฟิล์มพบว่าถ้าระดมยิงไอออนระหว่างการเกิดฟิล์มจะเป็นการเปลี่ยนแปลงฟิล์มหลายอย่างเช่นพฤติกรรมการเกิดนิวเคลียส (Nucleation Behaviour) สัณฐานวิทยา (Morphology) องค์ประกอบ (Composition) ทิศทางการจัดเรียงตัวและสมบัติเชิงกลเป็นต้น ในกรณีแมกนีตรอนสปีดเตอริงไอออนที่ใช้ในการระดมยิงวัสดุรองรับจะมาจากประจุไฟฟ้าที่อยู่รอบวัสดุรองรับซึ่งทำได้โดยการจ่ายศักย์ลบประมาณ 1 - 500 V ให้กับวัสดุรองรับอย่างไรก็ดีความหนาแน่นกระแสที่ฟิล์มหรือผิวหน้าของวัสดุรองรับสำหรับระบบดีซีแมกนีตรอนปกติจะมีค่าต่ำประมาณ 0.05 - 0.10 ไอออน/อะตอมสารเคลือบ แต่การใช้งานจริงต้องมีค่าสูงกว่านี้ (Rohde & Munz, 1991)

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



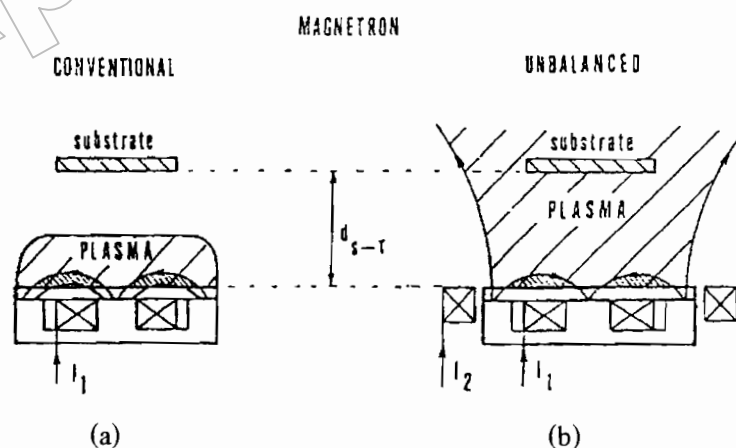
ภาพที่ 2-15 ลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กของระบบอันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง

(Rickerby & Matthews, 1991)

ระบบอันบาลานซ์แมกนีตรอนสปีดเตอริงได้รับการคิดค้นและตีพิมพ์เผยแพร่โดย Window และ Savvides ครั้งแรกในปี ค.ศ.1986 โดยทั้งสองพบว่าการติดตั้งแม่เหล็กที่คาโทดของระบบสปีดเตอริงปกตินั้นถ้าหากทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กด้านใดด้านหนึ่งมากหรือน้อยกว่าอีกด้านหนึ่งแล้วสนามแม่เหล็กที่คาโทดจะมีลักษณะไม่สมมาตรทำให้ปริมาณไอออนที่วิ่งเข้าชนหรือระดมยิงวัสดุรองรับนั้นมีปริมาณเพิ่มขึ้นมากกว่าปกติซึ่งจะมีผลต่อคุณภาพของฟิล์มโดยตรงการจัดแม่เหล็กของระบบนี้อาจแบ่งเป็น 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 ที่ระบบเคลือบใช้อันบาลานซ์ฟลักซ์แมกนีตรอนเดี่ยวและขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า 2 ขดเคลือบไททานเนียมไนไตรด์ที่ระยะเป้าสารเคลือบและวัสดุรองรับประมาณ 200.0 mm โดยใช้ความต่างศักย์ไบแอสในช่วง -5 ถึง -100 V พบว่าสามารถทำให้ได้ความหนาแน่นกระแสสูงถึง  $6.0 \text{ mA/cm}^2$  ซึ่งสูงมากพอสำหรับใช้ในงานอุตสาหกรรม (Munz, 1991)

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



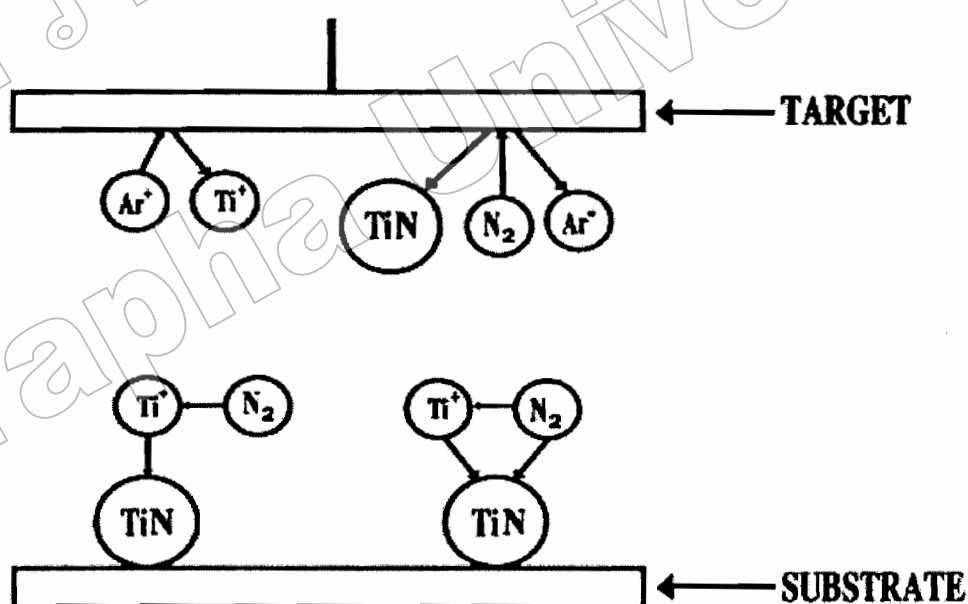
ภาพที่ 2-16 ลักษณะพลาสมาของระบบสปัตเตอริง (Munz, 1991)

(a) ระบบบาลานซ์แมกนีตรอนสปัตเตอริง

(b) ระบบอานบาลานซ์แมกนีตรอนสปัตเตอริง

### การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธี รีแอคทีฟส ปัตเตอร์ริง

สำหรับกระบวนการรีแอคทีฟสปัตเตอร์ริง (Reactive Sputtering) มติ ห่อประทุม (2548) ได้อธิบายไว้ว่าเป็นกระบวนการสปัตเตอร์ริงที่มีการป้อนแก๊สไวปฏิกิริยา (Reactive Gas) เข้าสู่ระบบ เพื่อให้เกิดสารประกอบของฟิล์มตกเคลือบบนชิ้นงานหรือวัสดุรองรับการสปัตเตอร์ที่มีเป้าสารเคลือบเป็นโลหะบริสุทธิ์ โดยการป้อนแก๊สไวปฏิกิริยา จะทำให้เกิดสารประกอบต่าง ๆ ของโลหะได้ เช่น การป้อนแก๊สไนโตรเจนอาจทำให้เกิดโลหะไนไตรด์ถ้าป้อนแก๊สอะเซทิลีน ( $C_2H_2$ ) หรือมีเทน ( $CH_4$ ) อาจเกิดเป็นสารประกอบของโลหะคาร์ไบด์ เป็นต้น โดยปกติความดันแก๊สไวปฏิกิริยาที่ใช้ค่อนข้างต่ำจนไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาในสภาวะปกติอย่างไรก็ตามคาดกันว่าอิเล็กตรอนในพลาสมาที่มีส่วนในการกระตุ้นหรือไอออไนซ์แก๊สไวปฏิกิริยาให้มีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับโลหะได้สูงกว่าสภาวะปกติ โดยแก๊สไวปฏิกิริยา เช่น แก๊สไนโตรเจน ( $N_2$ ) อาจรวมตัวกันกับโลหะ เช่น ไททาเนียม (Ti) แล้วเกิดเป็นสารประกอบไททาเนียมไนไตรด์ (TiN) ตามภาพที่ 2-17 ได้เป็น 3 ลักษณะ ดังนี้



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

1. แก๊สไวปฏิกิริยาเช่นแก๊สไนโตรเจนทำปฏิกิริยากับอะตอมไททาเนียมที่ผิวหน้าเป่าของสารเคลือบกลายเป็นสารประกอบไททาเนียมไนไตรด์แล้วถูกสปีดเตอร์ให้หลุดออกแล้วตกเคลือบลงบนแผ่นวัสดุรองรับ ปฏิกิริยาส่วนนี้เกิดขึ้นสูงเมื่อความดันย่อยของแก๊สไวปฏิกิริยาในระบบมีค่าสูง พบว่า ในการเคลือบไททาเนียมไนไตรด์บนฟิล์มเคลือบที่เป่าสารเคลือบ ส่วนที่มีอัตราการสปีดเตอร์ต่ำจะปรากฏฟิล์มของสีทองไททาเนียมบริเวณนั้น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Target Poisoning มีผลทำให้อัตราการเคลือบลดลง

2. แก๊สไวปฏิกิริยาเช่นแก๊สไนโตรเจนรวมตัวกับอะตอมไททาเนียมที่ถูกสปีดเตอร์ในระหว่างทางวิ่งสู่แผ่นวัสดุรองรับแล้วตกเคลือบบนแผ่นวัสดุรองรับ กระบวนการนี้ในทางทฤษฎีถือว่าเกิดได้น้อยมากเนื่องจากสถานะของการทำปฏิกิริยาไม่เหมาะสมตามกฎอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัม แต่เป็นไปได้ว่าการรวมตัวของสารประกอบจะเกิดในช่วงนี้

3. แก๊สไวปฏิกิริยาเช่นแก๊สไนโตรเจนรวมตัวกับไททาเนียมบนผิววัสดุรองรับหรือชิ้นงาน การทำรีแอคทีฟสปีดเตอริง โดยทั่วไปความดันแก๊สไวปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดสารประกอบที่ต้องการมีค่าต่ำกว่าช่วงที่เกิดขบวนการโกลว์ดีสชาร์จ ในกระบวนการจึงใช้แก๊สไวปฏิกิริยากับแก๊สเฉื่อยทำให้รักษาสภาวะโกลว์ดีสชาร์จไว้ได้ ในเวลาเดียวกันช่วยให้อัตราเคลือบสูงขึ้น ในการทำรีแอคทีฟสปีดเตอริง ยังมีสิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือความดันย่อยของแก๊สไวปฏิกิริยาต้องมีค่าพอเหมาะกับการเกิดฟิล์มสารประกอบที่ต้องการ เช่น การเคลือบสารประกอบ Ferroferric Oxide ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) ความดันแก๊สออกซิเจนที่ใช้ในรีแอคทีฟสปีดเตอริง ถูกจำกัดในช่วงความดันแคบมาก ถ้าความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนมากไปจะเกิดสารประกอบของ Ferric Oxide ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ถ้าน้อยเกินไปจะเกิดสารประกอบ Ferrous Oxide ( $\text{FeO}$ ) หรือฟิล์มของเหล็ก ( $\text{Fe}$ )

## สมบัติเชิงรังสีของวัสดุ

เมื่อรังสีของแสงตกกระทบผิวหน้าของวัสดุจะเกิดปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับสมบัติทางแสงของวัสดุดังนี้ (Haitjema, 1989; ไชยรัตน์ สุรินทร์, 2536)

1. การดูดกลืนการส่งผ่านแสงและช่องว่างพลังงานค่าการดูดกลืนแสงและการส่งผ่านแสงของวัสดุจะขึ้นอยู่กับช่องว่างพลังงาน (Energy Gap;  $E_g$ ) และความสามารถที่จะเจือสารในสารกึ่งตัวนำเพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนในแถบการนำ (Conduction Band) และโฮลในแถบวาเลนซ์ (Valence Band) พิจารณาค่าช่องว่างพลังงานของวัสดุที่เป็นตัวกำหนดค่าการดูดกลืนและการส่งผ่าน โดยที่การเปลี่ยนสภาพจากวัสดุโปร่งแสงมาเป็นสภาพดูดกลืนนั้น เกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนของวัสดุดูดกลืนพลังงานแสงและเปลี่ยนสภาวะจากพลังงานแถบวาเลนซ์ไปเป็นแถบการนำ ทำให้เกิดโฮลขึ้นในแถบวาเลนซ์ เรียกการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานนี้ว่า Interband Transition อิเล็กตรอนในแถบการนำจะประพัตต์คล้ายอิเล็กตรอนอิสระซึ่งจะส่งผลต่อค่าการสะท้อนแสง วัสดุดังกล่าวนี้จะทึบแสงที่ค่าพลังงานนั้น แต่ถ้าคลื่นแสงที่เข้ามานั้นมีพลังงานไม่เพียงพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนของวัสดุเปลี่ยนสภาวะจากแถบวาเลนซ์ไปเป็นแถบการนำ วัสดุดังกล่าวก็จะยอมให้คลื่นแสงที่มีพลังงานไม่เพียงพอที่ผ่านไปได้ นั่นคือวัสดุจะโปร่งแสง ความยาวคลื่นแสงของจุดเปลี่ยนสภาวะ (Thresholds Wavelength,  $\lambda_g$ ) และค่าช่องว่างพลังงานจะมีความสัมพันธ์กันตามสมการที่ 2-4

$$\lambda_g (\mu m) = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24}{E_g (eV)} \quad (2-4)$$

เมื่อ  $\lambda_g$  คือความยาวคลื่นแสงที่จุดเปลี่ยนสภาวะ ( $\mu m$ )

$E_g$  คือค่าช่องว่างพลังงาน (eV)

พิจารณาวัสดุที่มีค่า  $E_g$  ตั้งแต่ 1.6 eV ลงมา จากความสัมพันธ์ตามสมการจะได้ค่าของ  $\lambda_g$  ตั้งแต่ 0.78  $\mu m$  ขึ้นไป วัสดุดังกล่าวจะทึบต่อแสงที่ตามองเห็นทั้งหมด ส่วนวัสดุที่มีค่า  $E_g$  ตั้งแต่ 3.3 eV ขึ้นไปจะได้ค่าของ  $\lambda_g$  ตั้งแต่ 0.37  $\mu m$  ลงมา วัสดุดังกล่าวจะโปร่งแสงต่อแสงที่ตามองเห็นทั้งหมด ผลของค่าช่องว่างพลังงานดังกล่าวจึงมีความสำคัญต่อการศึกษาวัสดุต่าง ๆ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ ให้เป็นประโยชน์ต่อไป

2. สัมประสิทธิ์การดูดกลืนพิจารณาสนามไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ในทิศ Z มีอิเล็กทริกคิสเพลสเมนต์ในทิศ X เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\bar{E} = E_x e^{i(\omega t - \tilde{k}Z)} \quad (2-5)$$

เมื่อ  $E_x$  คือ แอมพลิจูดของสนามไฟฟ้า

$\omega$  คือ ความถี่เชิงมุมของคลื่น ( $\omega = 2\pi f$ )

$\tilde{k}$  คือ เลขคลื่นเชิงซ้อน (Complex Wavenumber)

$t$  คือ เวลา

$i$  คือ จำนวนเชิงซ้อน ( $i^2 = -1$ )

จากสมการแมกเวลล์ สามารถเขียนสมการของเลขคลื่นเชิงซ้อนได้เป็น

$$\tilde{k} = \left( \frac{\omega}{c} \right) \sqrt{\mu \tilde{\epsilon}} \quad (2-6)$$

เมื่อ  $\mu$  คือ ค่าความซึมซับทางแม่เหล็ก (Magnetic Permeability)

$\tilde{\epsilon}$  คือ สภาพยอมทางไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพัทธ์

(Complex Relative Dielectric Permittivity)

$c$  คือ ความเร็วคลื่น

ค่าของ  $\tilde{\epsilon}$  จะขึ้นกับความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และมีอิทธิพลต่อการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กของวัสดุ ตามสมการที่ 7

$$\vec{D} = \epsilon_0 \tilde{\epsilon} \vec{E} \quad (2-7)$$

เมื่อ  $\epsilon_0$  คือ สภาพยอมทางไฟฟ้าในสุญญากาศ (Vacuum Permittivity)

นอกจากความสัมพันธ์ดังกล่าวแล้ว กรณีวัสดุที่เป็นตัวนำ  $\tilde{\epsilon}$  จะมีความสัมพันธ์กับ ดัชนีหักเหเชิงซ้อน (Complex Refractive Index,  $\tilde{n}$ )

$$\tilde{\epsilon} = \tilde{n}^2 \quad (2-8)$$

โดยที่  $\tilde{n} = n - ik \quad (2-9)$

เมื่อ  $n$  คือ ดัชนีหักเห (Refractive Index)

$k$  คือ สัมประสิทธิ์การดับสูญ (Extinction Coefficient)

ค่า  $n$  และ  $k$  จะขึ้นกับความยาวคลื่นของแม่เหล็กไฟฟ้า นำสมการที่ 2-6 ถึง 2-9 แทนใน สมการที่ 2-5 จะได้ความสัมพันธ์ใหม่เป็น

$$\vec{E} = E_x e^{i\left(\omega t - \frac{\omega}{c}nz\right)} e^{-\frac{\omega}{c}kz} \quad (2-10)$$

เนื่องจากความเข้มจะแปรตามกำลังสองของสนามไฟฟ้า ดังสมการที่ 2-11

$$I_{(z)} = |\vec{E}|^2 \quad (2-11)$$

$I_{(z)}$  เป็นความเข้มสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งจากผิววัสดุถึงไป  $z$  โดยที่  $z=0$  จะได้

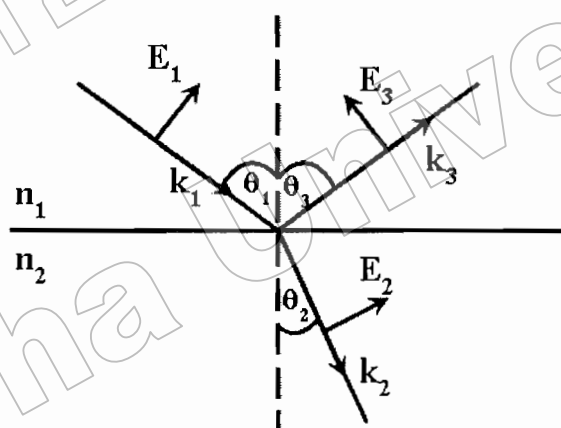
$$\begin{aligned} I_{(z)} &= I_{(0)} e^{-2kz \frac{\omega}{c}} \\ &= I_{(0)} e^{-\alpha z} \end{aligned} \quad (2-12)$$

โดยที่  $\alpha = \frac{2k\omega}{c} = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (2-13)$

ค่า  $\alpha$  เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (Absorption Coefficient) เป็นสมบัติของวัสดุที่แสดงถึงการลดทอนความเข้มของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ระยะทางหรือความลึกจากผิวของวัสดุที่ทำให้ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าลดลงเป็น  $\frac{1}{e}$  เท่าของค่าเดิมเรียกว่า ความลึกผิว (Skin Depth;  $\delta$ ) ซึ่งเป็นส่วนกลับของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนมีสมการเป็น

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \frac{c}{2k\omega} = \frac{\lambda}{4\pi k} \quad (2-14)$$

3. การส่งผ่านและการสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่รอยต่อของวัสดุกรณีรอยต่อวัสดุ 2 ชนิด ที่มีดัชนีหักเหต่างกัน เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบรอยต่อระหว่างวัสดุดังกล่าว แสดงดังภาพที่ 2-17



ภาพที่ 2-18 เส้นทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านรอยต่อของวัสดุ 2 ชนิดที่มีดัชนีหักเหต่างกัน (Haitjema, 1989)

พิจารณาการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะพบว่าที่รอยต่อของวัสดุจะมีเฟสของคลื่นตกกระทบ คลื่นสะท้อน และคลื่นส่งผ่าน เท่ากัน สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 2-15

$$k_1 \sin(\theta_1) = k_2 \sin(\theta_2) = k_3 \sin(\theta_3) \quad (2-15)$$

ที่ตัวกลางดัชนีหักเห  $n_1$  จะได้  $k_1 = k_3$  ทำให้ได้  $\theta_1 = \theta_2$  ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ามุมตกกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเท่ากับมุมสะท้อน จากกฎของสเนลล์ (Snell's Law) ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบและมุมหักเห ตามสมการที่ 2-16

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2) \quad (2-16)$$

ค่าการสะท้อนและการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่รอยต่อเราสามารถพิจารณาจากแอมพลิจูดของคลื่น พิจารณาที่ความต่อเนื่องขององค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉาก (Vertical) และ แนวสัมผัส (Tangential) กับรอยต่อ จากสมการแมกเวลล์ได้ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์เชิงแอมพลิจูด (Amplitude Coefficient) ของคลื่นสะท้อน ( $r$ ) และคลื่นส่งผ่าน ( $t$ ) เมื่อเทียบกับคลื่นตกกระทบ ดังนี้

$$r_s = \frac{E_{3s}}{E_{1s}} = \frac{n_1 \cos(\theta_1) - n_2 \cos(\theta_2)}{n_1 \cos(\theta_1) + n_2 \cos(\theta_2)} \quad (2-17)$$

$$r_p = \frac{E_{3p}}{E_{1p}} = \frac{n_2 \cos(\theta_1) - n_1 \cos(\theta_2)}{n_1 \cos(\theta_1) + n_2 \cos(\theta_2)} \quad (2-18)$$

$$t_s = \frac{E_{2s}}{E_{1s}} = \frac{2 n_1 \cos(\theta_1)}{n_1 \cos(\theta_1) + n_2 \cos(\theta_2)} \quad (2-19)$$

$$t_p = \frac{E_{2p}}{E_{1p}} = \frac{2 n_1 \cos(\theta_1)}{n_1 \cos(\theta_1) + n_2 \cos(\theta_2)} \quad (2-20)$$

เมื่อ  $r_s$  คือ สัมประสิทธิ์แอมพลิจูดการสะท้อนของคลื่นในทิศตั้งฉากกับผิวระนาบรอยต่อ

$r_p$  คือ สัมประสิทธิ์แอมพลิจูดการสะท้อนของคลื่นในทิศขนานกับผิวระนาบรอยต่อ

$t_s$  คือ สัมประสิทธิ์แอมพลิจูดการส่งผ่านของคลื่นในทิศตั้งฉากกับผิวระนาบรอยต่อ

$t_p$  คือ สัมประสิทธิ์แอมพลิจูดการส่งผ่านของคลื่นในทิศขนานกับผิวระนาบรอยต่อ

จากกฎของสเนลล์และสมการที่ 2-17 ถึง 2-20 สามารถหาค่าของ  $\theta_2$  ได้ในเทอมของ  $n_1$ ,  $n_2$  และ  $\theta_1$  ดังสมการที่ 2-21

$$\cos \theta_2 = \frac{(n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1)^{1/2}}{n_2} \quad (2-21)$$

กรณีวัสดุที่มีดัชนีหักเหเชิงซ้อน และคิดค่ามุม  $\theta$  เป็นเชิงซ้อน เราสามารถแทนค่า  $\tilde{n}$  และ  $\tilde{\theta}$  ลงในสมการ 2-17 ถึง 2-20 ซึ่งจะได้สัมประสิทธิ์เชิงซ้อนของแอมพลิจูดคลื่นสะท้อน ( $\tilde{r}$ ) และสัมประสิทธิ์เชิงซ้อนของแอมพลิจูดคลื่นส่งผ่าน ( $\tilde{t}$ )

การหาความสะท้อน (Reflectance;  $R$ ) และความส่งผ่าน (Transmittance;  $T$ ) จากสัมประสิทธิ์เชิงแอมพลิจูด เนื่องจากกำลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะแปรตามกำลังสองของแอมพลิจูด เราสามารถหาค่าดังกล่าวได้ในกรณีของการสะท้อนในแนวตั้งฉากของผิววัสดุ ( $\theta_i = 0$ ) โดยกำหนดให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่จากตัวกลางสุญญากาศ ( $n_1 = 1$ ) ตกกระทบผิววัสดุที่มีดัชนีหักเหเชิงซ้อน  $\tilde{n}_2 = n_2 - ik_2$  สัมประสิทธิ์กำลังงานของการสะท้อนหาได้จากสมการที่ 2-22

$$R = |\tilde{r}_p \tilde{r}_p^*| = |\tilde{r}_s \tilde{r}_s^*| = \left| \frac{\tilde{n}_2 - 1}{\tilde{n}_2 + 1} \right|^2 = \frac{(n_2 - 1)^2 + k_2^2}{(n_2 + 1)^2 + k_2^2} \quad (2-22)$$

ทำนองเดียวกันความส่งผ่านหาได้จากสมการที่ 2-23

$$R = |\tilde{t}_p \tilde{t}_p^*| = |\tilde{t}_s \tilde{t}_s^*| \quad (2-23)$$

ความสัมพันธ์ของความสะท้อนและความส่งผ่านแสดงดังสมการที่ 24

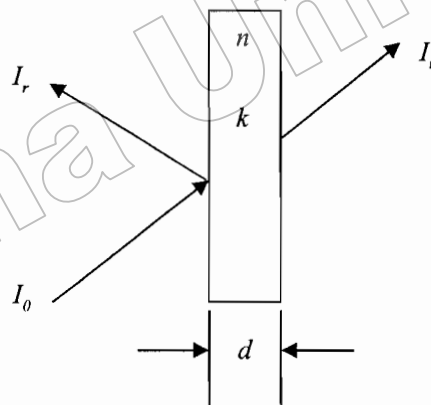
$$T + R + \alpha = 1 \quad (2-24)$$

เมื่อ  $\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์กำลังงานของการดูดกลืนรังสีของวัสดุ สมการ (2-24) นี้สามารถเรียกได้เป็นกฎการอนุรักษ์พลังงาน

4. การคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง และช่องว่างพลังงาน จากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสามารถคำนวณได้โดยตรงจากสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (มติ ห่อประชุม, 2548) พิจารณาแสงตกกระทบบนสารตัวอย่างในแนวตั้งฉาก แสดงดังภาพที่ 2-19 ให้ความเข้มของแสงที่ตกกระทบบนเป็น  $I_0$  ความเข้มของแสงที่ทะลุผ่านเป็น  $I_t$  และความเข้มของแสงสะท้อนที่สะท้อนกลับเป็น  $I_r$  ความเข้มแสงที่ทะลุผ่านและสะท้อนกลับ สามารถเขียนในรูปของความส่งผ่านและความสะท้อน ตามลำดับดังสมการที่ 2-25 และสมการที่ 2-26

$$T = \frac{I_t}{I_0} = \frac{(1-R)^2 \exp(-\alpha d)}{(1+R)^2 \exp(-2\alpha d)} \quad (2-25)$$

$$R = \frac{I_r}{I_0} = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (2-26)$$



ภาพที่ 2-19 การส่งผ่านแสงและการสะท้อน

เมื่อความหนาของสารตัวอย่าง ( $d$ ) ที่พอเหมาะจะทำให้ปริมาณ  $R^2 \exp(-2\alpha d)$  มีค่าน้อยกว่า 1 มาก สมการที่ 2-25 จึงลดรูปเหลือ

$$T = (1 - R)^2 \exp(-\alpha d) \quad (2-27)$$

การเปลี่ยนแปลงพลังงานของโฟตอนที่ตกกระทบเนื้อสารจะมีผลต่อสัมประสิทธิ์การสะท้อนน้อยมากซึ่งสามารถประมาณ  $(1-R)^2$  เป็นค่าคงที่ ดังนั้นจากสมการที่ 2-27 สามารถเขียนสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left( \frac{I_0}{I_t} \right) = \alpha' + c \quad (2-28)$$

เมื่อ  $c$  คือ ค่าคงที่ เกิดจากการประมาณให้สัมประสิทธิ์การสะท้อนคงที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนสูงกว่ความเป็นจริง ในการทดลองจะต้องนำสัมประสิทธิ์การดูดกลืนพื้นหลัง (Background Absorption Coefficient,  $\alpha_0$ ) ที่เกิดขึ้นจากข้อบกพร่องมาลบออกจากค่า  $\alpha$  เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้อง

ปรากฏการณ์ดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ เป็นอันตรกิริยาระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับสารกึ่งตัวนำ นิยามให้ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง คือปริมาณความเข้มแสงที่ลดลงต่อหน่วยระยะทางดังสมการที่ 2-29

$$\alpha = - \left( \frac{1}{I_t} \right) \frac{dI}{dx} \quad (2-29)$$

เมื่อ  $I$  คือความเข้มแสงที่ระยะทาง  $x$  ใด ๆ ในตัวกลาง

พิจารณากรณีแสงเอกรงค์ (Monochromatic Light) เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีแกน  
โพลาไรเซชันแบบระนาบ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสามารถเขียนได้เป็น

$$E = E_0 \exp[iK \cdot r - \omega t] \quad (2-30)$$

$$H = H_0 \exp[iK \cdot r - \omega t] \quad (2-31)$$

เมื่อ  $E$  คือ สนามไฟฟ้าอัมพลิจูด  $E_0$

$H$  คือ สนามแม่เหล็กอัมพลิจูด  $H_0$

$\omega$  คือ ความถี่เชิงมุม (Angular Frequency)

$T$  คือ เวลา

$K$  คือ เวกเตอร์คลื่น (Wave Vector) มีทิศทางตั้งฉากกับ  $E$  กับ  $H$  เขียนได้เป็น

$$K = K_1 + K_2$$

ซึ่ง  $K_1$  และ  $K_2$  คือ เวกเตอร์จริง (Real Part) และ เวกเตอร์จินตภาพ (Imaginary Part)

สมการที่ 2-30 และสมการที่ 2-31 จะเป็นผลเฉลยของสมการของแมกซ์เวลล์ ค่าสภาพซึม  
ได้ทางแม่เหล็ก (Magnetic Permeability)  $\mu = 1$  ถ้า

$$K \cdot K = \mu_0 \epsilon_0 \epsilon \omega^2 = \frac{\epsilon \omega^2}{c^2} \quad (2-32)$$

เมื่อ  $\epsilon$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน (Complex Dielectric Constant)

สำหรับตัวกลางที่มีดัชนีหักเหเป็นปริมาณเชิงซ้อน คือ

$$N = n + ik \quad (2-33)$$

เมื่อ  $n$  คือ ค่าจริงของดัชนีหักเหของตัวกลาง

$k$  คือ ค่าจินตภาพหรือสัมประสิทธิ์การดับสูญของดัชนีหักเหของตัวกลางสำหรับ  
ระนาบคลื่นเอกพันธ์ จะได้

$$|K_1| = \frac{n\omega}{c} \quad (2-34)$$

$$|K_2| = \frac{k\omega}{c} \quad (2-35)$$

เมื่อ  $c$  คือ ความเร็วแสง

สำหรับการส่งผ่านพลังงานต่อหน่วยเวลาคือ

$$\bar{S} = \frac{nc\epsilon_0}{2} (E^* E) k_E \quad (2-36)$$

เมื่อ  $k_E$  คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยของ  $K_1$  และ  $K_2$

แทนสมการที่ 2-30 ลงในสมการที่ 2-36 จะได้

$$\bar{S} = \frac{nc\epsilon_0}{2} (E_0^* E_0) k_E \exp(-2K_2 r) \quad (2-37)$$

จะเห็นได้ว่าการส่งผ่านพลังงานเฉลี่ยต่อเวลาลดลงด้วยแฟกเตอร์  $\exp(-2K_2 r)$  ตลอดระยะทาง  $d$  ซึ่ง  $I$  เปลี่ยนตาม  $\bar{S}$  ดังนั้นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของตัวกลางคือ

$$\alpha = 2|K_2| = \frac{2k\omega}{c} = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (2-38)$$

เมื่อ  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นแสงในสุญญากาศ

จากสมการที่ 2-38 จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของตัวกลางขึ้นกับความยาวคลื่นและสัมประสิทธิ์การดับสูญ ที่ความถี่แสงเดียวกันในตัวกลางต่างชนิดกัน การดูดกลืนแสงก็จะต่างกัน การดูดกลืนแสงเป็นสมบัติเฉพาะตัวของตัวกลางแต่ละชนิด

การคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานสามารถหาได้จากสมการที่ 2-39

(มตี หอประชุม, 2548)

$$B(h\nu - E_g)^m = \alpha h\nu \quad (2-39)$$

เมื่อ  $B$  คือ ค่าคงที่

$h\nu$  คือ พลังงานแสง

$E_g$  คือ ช่องว่างพลังงาน

$m$  คือ ค่าคงที่โดยมีค่าขึ้นกับ Transition Mode ของสารกึ่งตัวนำ โดยที่

$m = 1/2$ : การย้ายพลังงานแบบตรงแบบยอมรับได้ (Direct Allowed),

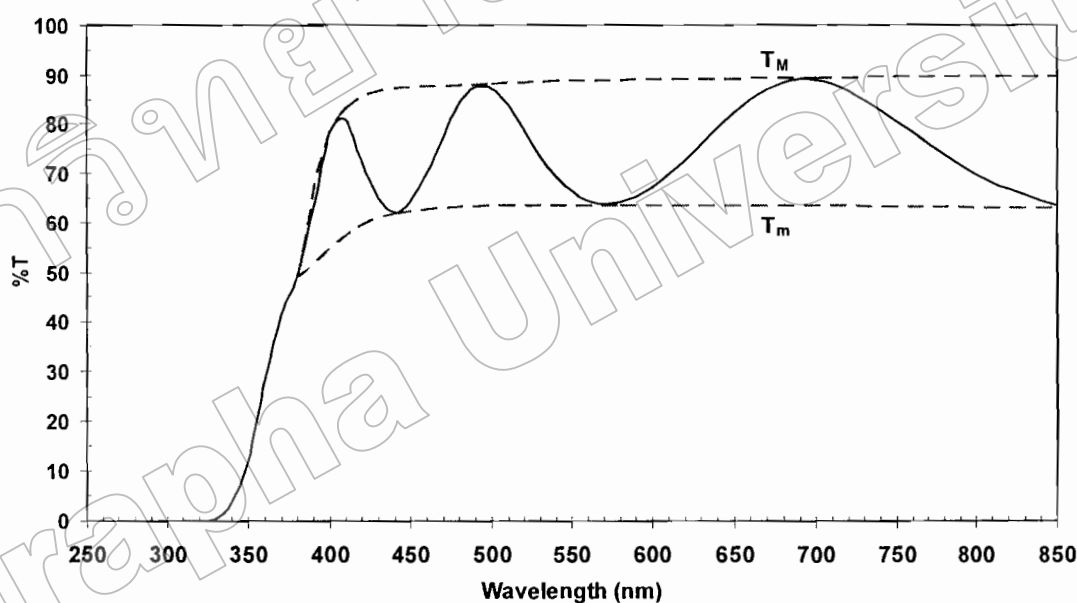
$m = 3/2$ : การย้ายพลังงานแบบตรงแบบต้องห้าม (Direct Forbidden),

$m = 2$ : การย้ายพลังงานแบบชนิดไม่ตรงแบบยอมรับได้ (Indirect Allowed),

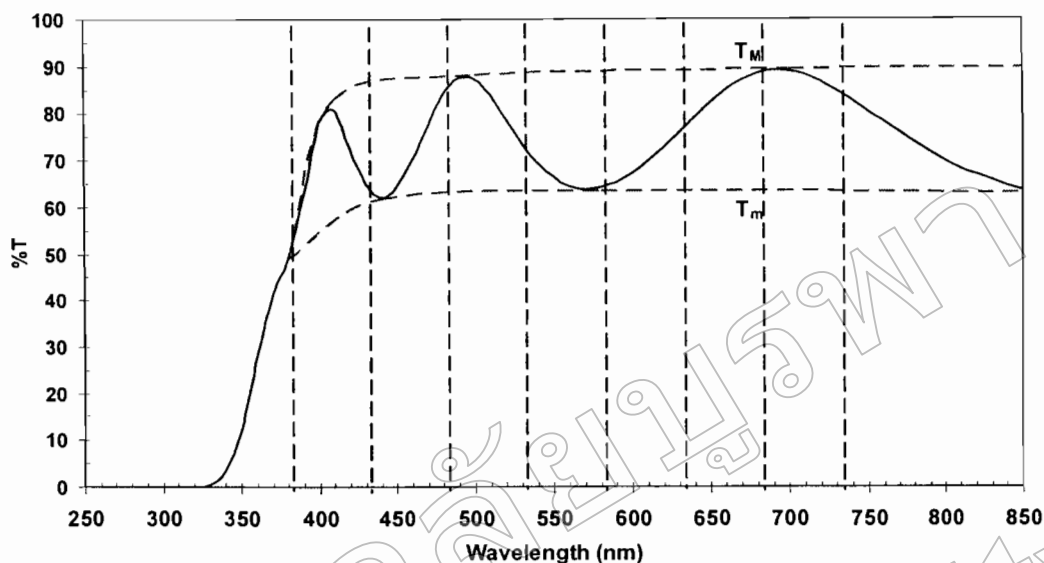
$m = 1$ : การย้ายพลังงานแบบชนิดไม่ตรงแบบต้องห้าม (Indirect Forbidden)

5. การคำนวณดัชนีหักเหและสัมประสิทธิ์การดูดกลืน จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงเป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยากนัก ซึ่งพัฒนาขึ้นโดย Swanepoel (1983) โดยอาศัยแนวคิดพื้นฐานจากงานวิจัยของ Manifacier et al. (1976) ที่อาศัยเพียงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงในการคำนวณเท่านั้นที่เรียกว่า Envelope

การคำนวณดัชนีหักเหและสัมประสิทธิ์การดูดกลืน ด้วยวิธี Envelope Method เริ่มจากการสร้างซอง (Envelope) ของสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางซึ่งวัดจากเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์โดยการลากเส้นผ่านค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของสเปกตรัมการส่งผ่านแสงตลอดช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการคำนวณค่า และจากซองที่สร้างขึ้นนี้จะทำให้สามารถหาค่าการส่งผ่านแสงสูงสุด ( $T_M$ ) และ ต่ำสุด ( $T_m$ ) ของความยาวคลื่นที่ต้องการได้แสดงดังภาพที่ 2-20



ภาพที่ 2-20 ตัวอย่างของคลุ่มสเปกตรัมการส่งผ่านแสงสำหรับการคำนวณดัชนีหักเหสัมประสิทธิ์การดูดกลืน โดยลากเส้นผ่านค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของสเปกตรัม



ภาพที่ 2-21 ตัวอย่างเส้นตั้งฉากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงสำหรับการคำนวณดัชนีหักเห และสัมประสิทธิ์การดับสูญที่ความยาวคลื่นที่สนใจ

ดัชนีหักเห ( $n$ ) และสัมประสิทธิ์การดับสูญ ( $k$ ) ของฟิล์มบางหาจากวิธี Envelope โดยใช้ข้อมูลจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงในการคำนวณ (จินดาวรรณ ธรรมปรีชา, 2553) ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

#### 1 การหาดัชนีหักเห

1.1 นำฟิล์มบางที่เคลือบบนกระจกสไลด์ไปทำการวัดเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

1.2 นำเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงไปเขียนกราฟ โดยให้แกน  $x$  เป็นแกนของความยาวคลื่น และแกน  $y$  เป็นแกนของเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสง

1.3 สร้างซองครอบสเปกตรัมการส่งผ่านแสงโดยการลากเส้นผ่านค่าสูงสุด ( $T_M$ ) และค่าต่ำสุด ( $T_m$ ) ของสเปกตรัมการส่งผ่านแสงตลอดช่วงความยาวคลื่นที่สนใจดังภาพที่ 2-20

1.4 ลากเส้นตรงตั้งฉากกับแกน  $x$  ที่ความยาวคลื่นที่สนใจให้ตัดกับซองที่สร้างขึ้นเพื่อหาค่า  $T_M$  และ  $T_m$  ดังภาพที่ 2-21

1.5 นำค่า  $T_M$  และ  $T_m$  ที่ได้ไปแทนในสมการ 2-40

$$N = 2s \frac{T_M - T_m}{T_M T_m} + \frac{s^2 + 1}{2} \quad (2-40)$$

$$\text{เมื่อ } s = \frac{1}{T_s} + \sqrt{\frac{1}{T_s^2} - 1} \quad (2-41)$$

เมื่อ  $s$  คือดัชนีหักเหของกระจกสไลด์ และ  $T_s$  เป็นเปอร์เซ็นต์ค่าการส่งผ่านแสงของกระจกสไลด์ ( $\lambda > 350 \text{ nm}$ ).

1.6 นำค่า  $N$  ที่ได้จากสมการ 2-40 ไปแทนในสมการ 2-42 จะได้ดัชนีหักเห ( $n$ ) ของแต่ละความยาวคลื่นในช่วงที่สนใจ

$$n = \sqrt{N + \sqrt{N^2 - s^2}} \quad (2-42)$$

## 2. การหาสัมประสิทธิ์การดับสูญ ( $k$ )

2.1 สัมประสิทธิ์การดูดกลืน ( $\alpha_{(\lambda)}$ ) คำนวณได้จากสมการที่ 2-43

โดย  $d$  เป็นความหนาของฟิล์ม

$$\alpha_{(\lambda)} = -\frac{1}{d} \ln x \quad (2-43)$$

$$\text{เมื่อ } x = \frac{F - \sqrt{F^2 - (n^2 - 1)^3 (n^2 - s^4)}}{(n - 1)^3 (n - s^4)} \quad (2-44)$$

$$F = \frac{8n^2 s}{T_i} \quad (2-45)$$

$$\text{และ } T_i = \frac{2T_M T_m}{T_M + T_m} \quad (2-46)$$

2.2 แทนค่า  $\alpha$  จากสมการที่ 2-43 ในสมการที่ 2-47 จะได้สัมประสิทธิ์การดับสูญ ( $k$ ) ของแต่ละความยาวคลื่นในช่วงที่สนใจ

$$k = \frac{\alpha \lambda}{4\pi} \quad (2-47)$$

## 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 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับการแยกแยะ โครงสร้างของสารที่ใช้ในการเคลือบโดยการวิเคราะห์อาศัย การเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนกับมาตรฐาน JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) ของสารนั้น ดังนั้นเทคนิค XRD เป็นเทคนิคสำหรับวัดค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ที่สะท้อนจากผลึก ใช้หลักการของการเลี้ยวเบนของคลื่นโดยพบว่ารังสีเอกซ์เลี้ยวเบนได้เมื่อให้ตกกระทบผลึกซึ่ง Bragg ได้เสนอแนวคิดที่เราสามารถมองผลึกประกอบด้วยชั้น (Layer) หรือ ระนาบ (Plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมที่ตกกระทบเท่ากับมุม สะท้อนทั้งนี้คลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่าง ๆ ดังกล่าวจะมีความเข้มสูง ถ้ารังสีเอกซ์ 1 และ 2 ตกกระทบทำมุม  $\theta$  กับระนาบของผลึก A และ B สนามไฟฟ้าของรังสีเอกซ์จะก่อให้เกิดแรงดูดอมไป กระทำบนอิเล็กตรอนที่ P กับ Q ให้สั่นด้วยความถี่เดียวกับรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบ และอิเล็กตรอน นั้นแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นรังสีเอกซ์ออกไปทุกทิศทางแต่ในทิศทาง 1' และ 2' ซึ่งเสมือน รังสีเอกซ์สะท้อนออกจากระนาบของผลึกจะไปแทรกสอดแบบเสริมกัน (In Phase) แม้ว่า แบบจำลองที่กล่าวมาจะไม่ถูกต้องในทางกายภาพ เนื่องจากแท้จริงแล้วระนาบของอะตอมไม่ได้ สะท้อนคลื่นแต่วิธีนี้ก็ใช้ได้ทางเรขาคณิต พิจารณา

$$\delta = n\lambda \quad (2-48)$$

เมื่อ  $\delta$  คือ ความแตกต่างของระยะที่คลื่นเดินทาง

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่น

$n$  คือ จำนวนเต็มใด ๆ

จากภาพที่ 2-22

$$\delta = SQ + QT = 2SQ \quad (2-49)$$

จากรูปตรีโกณมิติพื้นฐาน

$$\delta = 2PQ \sin \theta \quad (2-50)$$

โดย  $PQ$  คือระยะห่างระหว่างระนาบ  $d_{hkl}$

$$\delta = 2d \sin \theta \quad (2-51)$$

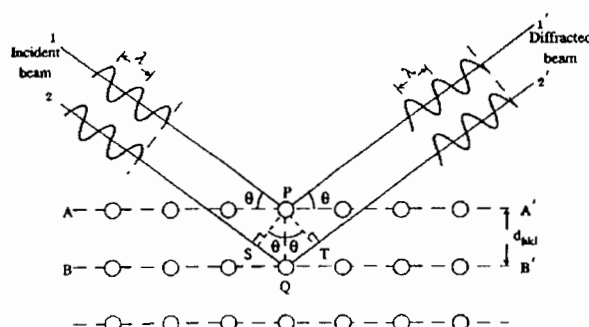
จากสมการ (2-44) เท่ากับ (2-47) จะได้

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (2-52)$$

เรียกสมการที่ 2-52 นี้ว่า สมการการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากผลึก (Bragg's law)

โดยที่  $\lambda$  เป็นความยาวคลื่น  $n$  เป็นลำดับของการสะท้อน  $d_{hkl}$  เป็นระยะห่างระหว่างระนาบ ( $hkl$ ) และ  $\theta$  เป็นมุมตกกระทบและมุมสะท้อนเมื่อวัดจากแนวระนาบที่กำลังพิจารณา

ในภาพที่ 2-22 เป็นแบบจำลองสำหรับการพิสูจน์กฎของแบรกก์ อะตอมเรียงตัวเป็นระเบียบโดยมีระยะห่างระหว่างอะตอมใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ( $\sim 10^{-10} \text{ m}$ ) จะทำหน้าที่เป็นเสมือน เกรตติ้งเลี้ยวเบนแต่จะเป็นเกรตติ้งเลี้ยวเบนแบบ 3 มิติ



ภาพที่ 2-22 แบบจำลองการเรียงตัวของอะตอม (กมล เอี่ยมพนากิจ, 2547)

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

ตำแหน่งของพีก ที่มีค่ามากที่สุดสามารถบอกถึงขนาดและรูปร่างของหน่วยเซลล์ได้ ในขณะที่ความกว้างใช้หาค่าขนาด การจัดเรียงตัว (Orientation) และความเครียด (Strain) ภายในเกรนของวัสดุหลายผลึก โดยอาศัย Scherrer equation ดังสมการที่ 2-53

$$L = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (2-53)$$

เมื่อ  $L$  คือ ขนาดของผลึกฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์

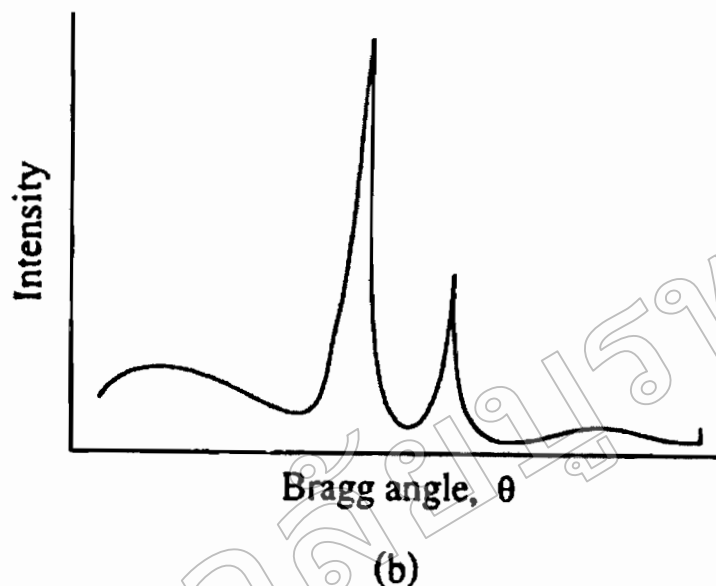
$k$  คือ ค่าคงที่เท่ากับ 0.94

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

$\beta$  คือ ความกว้างครึ่งหนึ่งของพีกที่มีค่าความเข้มสูงสุด

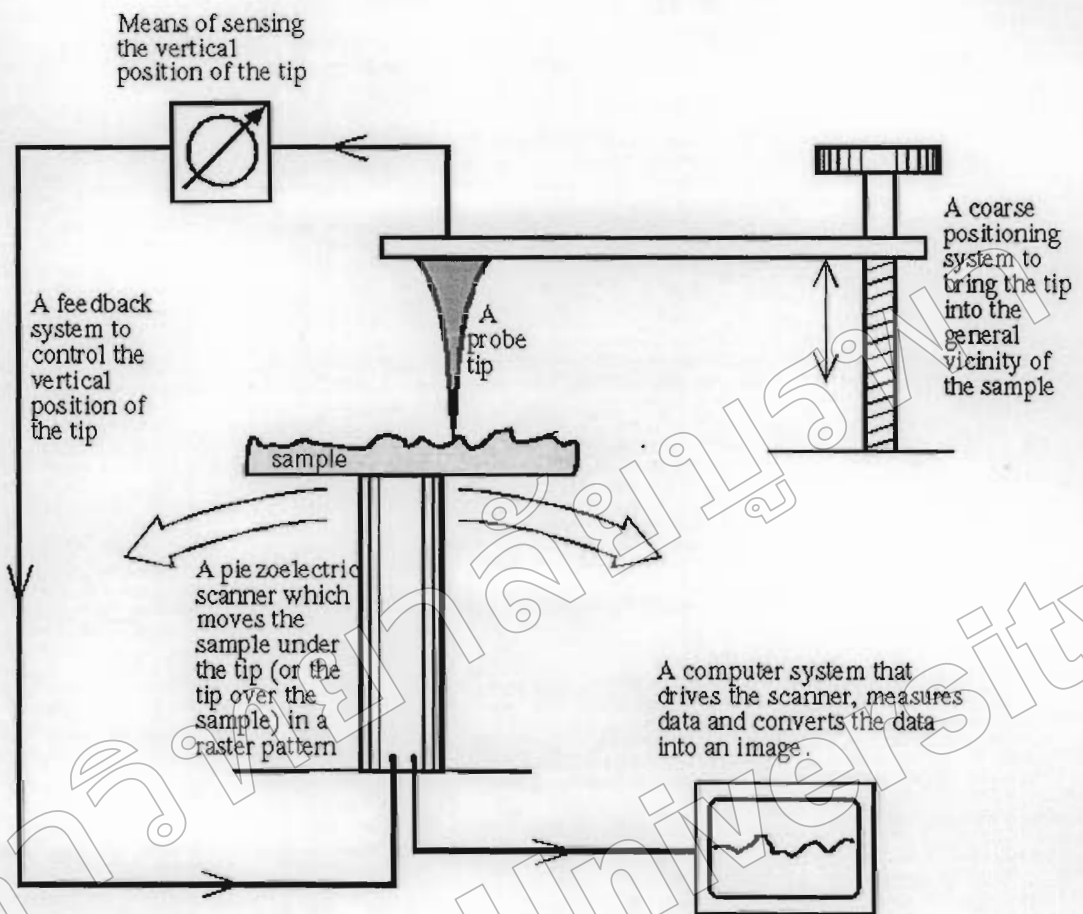
$\theta$  คือ ครึ่งหนึ่งของมุมตรงจุดศูนย์กลางพีก

บางครั้งตำแหน่งของรูปแบบการเลี้ยวเบนที่วัดได้อาจจะเลื่อนไปด้วยค่ามุมที่สูงขึ้นเนื่องจากผลของความเค้นคงค้าง (Residual Stress) ในผิวสารเคลือบนั้นเอง ส่วนความเข้มของสัญญาณที่ได้อาจไม่เป็นไปตามค่ามาตรฐาน JCPDS เพราะเกิดการการจัดเรียงตัวในทิศทางที่ชอบ (Preferred Orientation) ของอะตอมในฟิล์มนอกจากนี้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ยังสามารถให้ข้อมูลที่บอกถึงส่วนผสมทางเคมีของเฟส (Phase Composition) และค่าพารามิเตอร์ของแลตทิซ (Lattice Parameter)



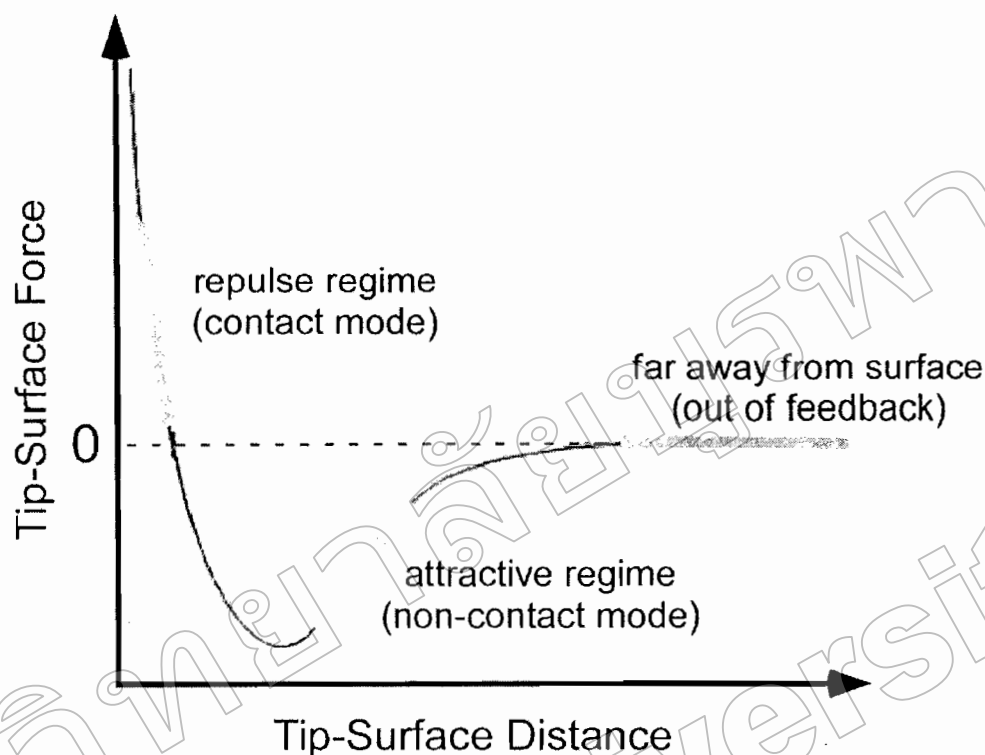
ภาพที่ 2-23 ความเข้มของฟลักที่แสดงถึงระนาบผลึกของวัสดุในตำแหน่งที่มีการสะท้อนรังสี (มตี ห่อประทุม, 2548)

2. การศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยเครื่อง Atomic Force Microscopy (AFM) ลักษณะเฉพาะสำคัญอีกอย่างหนึ่งของฟิล์มบางคือการศึกษาลักษณะพื้นผิวและความหนาเทคนิคที่นิยมใช้ในการศึกษาความหนาและลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางในระดับนาโน คือ Atomic Force Microscopy (AFM) ซึ่ง จตุพร วุฒิกนกกาญจน์ (2542) ได้อธิบายหลักการทำงานของเครื่อง AFM ไว้ดังนี้ เทคนิค Atomic Force Microscopy เป็นการสร้างภาพของผิววัสดุจากแรงกระทำระหว่างผิววัสดุกับหัวตรวจวัดที่ทำจากเข็มขนาดเล็ก (Probe Tip) และเป็นเทคนิคหนึ่งในกลุ่มของ Scanning Probe Microscopy (SPM) ซึ่งเป็นกลุ่มเทคนิคที่สามารถใช้ในการศึกษาสภาพพื้นผิวของวัสดุประเภทต่างๆ ได้ หลักการพื้นฐานคือ การใช้เข็มตรวจวัดขนาดเล็กที่ทำจากซิลิคอนไนไตรด์ (Silicon Nitride;  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) เคลื่อนที่กราด (Scan) ไปทั่วบริเวณต่างๆ ของผิววัสดุ โดยมีหัวเพียโซอิเล็กทริกสแกนเนอร์ (Piezoelectric Scanner) เป็นตัวควบคุม สภาพผิวที่แตกต่างกันไปจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกับเข็มตรวจวัดแตกต่างกันไป โดยตัวคานมีเข็มเกาะติดอยู่จะมีการ โค้งงอ (Bending) ปริมาณการ โค้งงอนี้สามารถตรวจวัดได้โดยใช้โฟโตดีเทคเตอร์ (Photo Detector) ดังภาพที่ 2-24 ภาพที่ได้จากเทคนิคนี้จะสอดคล้องตามสภาพพื้นผิวในแต่ละบริเวณที่ตรวจสอบ ในเทคนิค AFM นี้ สิ่งที่ทำให้คานที่มีเข็มเกาะอยู่เกิดการ โค้งงอขึ้นก็คือ แรงกระทำระหว่างอะตอม ซึ่งอาจจะเป็นแรงดึงดูดหรือแรงผลักก็ได้ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างเข็มปลายแหลมกับพื้นผิว ดังแสดงในภาพที่ 2-25



ภาพที่ 2-24 องค์ประกอบหลักของเครื่องมือ Scanning Probe Microscope

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

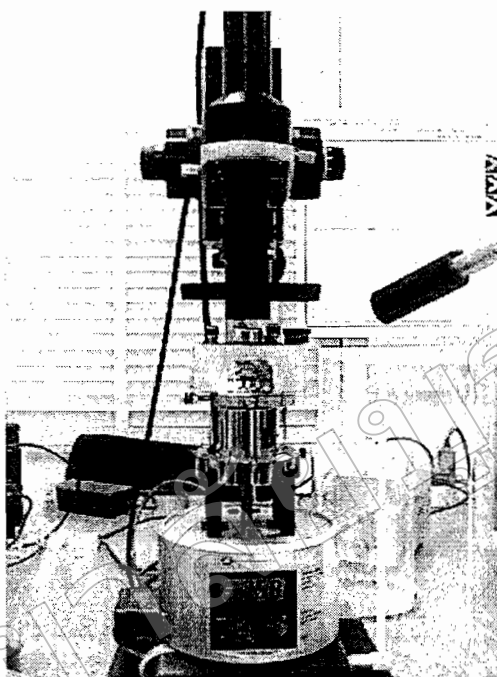


ภาพที่ 2-25 ลักษณะของแรงกระทำระหว่างอะตอมที่เกิดขึ้นในระยะห่างระหว่างวัตถุต่าง ๆ

([www.science.siu.edu/chemistry/zang/afm.html](http://www.science.siu.edu/chemistry/zang/afm.html))

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

ภาพที่ 2-26 แสดงให้เห็นถึงเครื่อง Atomic Force Microscope รุ่น NanoScope IIIa บริเวณตรงกลางเป็นบริเวณที่ใช้วางชิ้นงาน โดยมีเข็มวัดวางอยู่ด้วย ส่วนที่บริเวณด้านบนของเครื่องมือจะมีกล้องจุลทรรศน์วิดีโอ (Video Microscope) ติดตั้งไว้ เพื่อใช้สำหรับดูตำแหน่งของเข็มที่จะทำการวางลงบนบริเวณต่าง ๆ บนผิว ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์วิดีโอนี้จะแสดงทางจอโทรทัศน์ นอกจากนี้ในบริเวณด้านบน จะมีแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์และโฟโตดีเทคเตอร์ที่ใช้วัดการโค้งงอของคานยื่น



ภาพที่ 2-26 เครื่อง AFM แบบ Multimode ([http://rclsgi.eng.ohio-state.edu/nlim/page\\_01.htm](http://rclsgi.eng.ohio-state.edu/nlim/page_01.htm))

ลักษณะการเก็บข้อมูลด้วยเทคนิค AFM สามารถใช้เก็บข้อมูลได้ 4 แบบ (Mode) ที่สำคัญดังนี้คือ

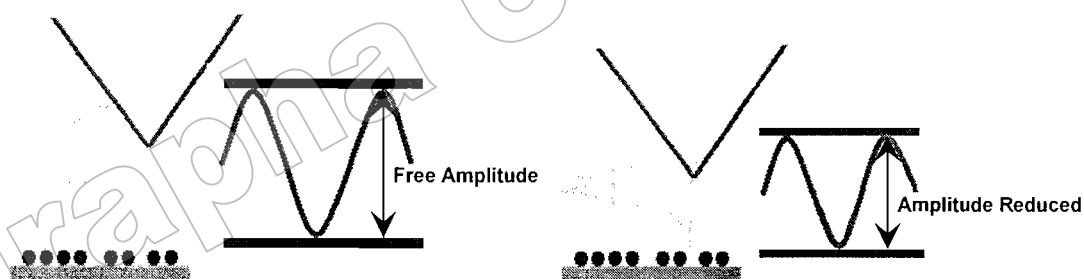
1. แบบสัมผัส (Contact Mode) เป็นการศึกษาสภาพผิวชิ้นงาน โดยการขยับให้เข็มไถล (Slide) ไปบนผิวงานซึ่งจะทำให้มีแรงผลักระหว่างเข็มกับผิวงานจะอยู่ใกล้กันมาก แรงผลักนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพผิวซึ่งจะทำให้มีการโก่งงอ (Deflection) ของคานยื่น (Cantilever) ที่มีเข็มยึดเกาะอยู่ที่ปลาย โดยปริมาณการโก่งงอจะเปลี่ยนแปลงสอดคล้องเป็นไปตามลักษณะของผิวงาน

อย่างไรก็ตาม เทคนิคแบบ แบบสัมผัสนี้มีข้อเสียคือ การลากให้เข็มตรวจวัดเคลื่อนที่ไถลข้ามไปยังบริเวณต่าง ๆ บนผิวงาน อาจจะทำให้พื้นผิววัสดุที่กำลังศึกษาต่างไปจากสภาพเดิมที่แท้จริง หรืออาจเกิดความเสียหายขึ้นแก่ผิวงานได้ ยกตัวอย่างเช่น ภายได้สภาวะบรรยากาศปกติซึ่งมีอากาศและความชื้นในอากาศ อาจจะทำให้เกิดหยดน้ำหรือสิ่งสกปรกบนผิวงาน ซึ่งเมื่อเข็มวัดเคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวที่มีชั้นบาง ๆ ของหยดน้ำและสิ่งสกปรกดังกล่าว จะทำให้มีแรงดึงไฟฟ้าสถิตและแรงดึงดูดดึงดูดให้ตัวคานที่มีเข็มยึดเกาะอยู่ที่ปลายเคลื่อนที่ลงมาสัมผัสกับชั้นดังกล่าว ทำให้แรงระหว่างเข็มกับผิวงานที่เกิดขึ้นโดยรวมเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ ยังอาจทำให้ผิวงานถูกทำลาย เช่น เกิดการฉีกขาดจากการลากเข็มไปบนผิวงาน

2. แบบไม่สัมผัส (Non-Contact Mode) เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวข้างต้น จึงได้มีการพัฒนาเทคนิคแบบแบบไม่สัมผัส ขึ้นมา โดยในที่นี้ ตัวเข็มปลายแหลมจะถูกยกขึ้นมาให้มีระยะห่างเหนือผิวงานสูงมากขึ้น คือประมาณ 10 - 100 Å จึงไม่มีปัญหาเรื่องการทำลายโครงสร้างผิวงาน โดยในกรณีนี้ แรงกระทำระหว่างตัวคานที่มีเข็มปลายแหลมยึดเกาะอยู่กับผิวงานจะเป็นลักษณะแรงดึงดูด ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามรูปทรงของสภาพผิวงานเช่นเดียวกัน

วิธีนี้มีข้อจำกัดเกี่ยวกับความละเอียดของภาพที่เกิดขึ้น นั่นคือ แรงดึงดูดประเภทแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals) ที่เกิดขึ้นในกรณีนี้จะเป็นแรงที่อ่อนกว่าเมื่อเทียบกับแรงผลักระหว่างที่เกิดขึ้นในกรณีของ 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 2-27 ลักษณะการสั่นของคานที่มีเข็มติด

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

ภาพที่ 2-27 แสดงการสั่นของคานในสภาวะอิสระหรือตอนเริ่มต้นที่ยังไม่เกิดการสัมผัส และขยับเคลื่อนที่ไปบนผิวงาน จะเห็นได้ว่าแอมพลิจูดจะยังสูงอยู่เมื่อเทียบกับแอมพลิจูดที่เกิดจากการสั่นของคานเมื่อมีการแตะสัมผัส (Tapping) ลงบนผิวงาน เนื่องจากในการสัมผัสกันนั้นจะมีการสูญเสียพลังงานของการสั่น ทำให้แอมพลิจูดของการสั่น (Oscillation Amplitude) ลดลง ซึ่งค่าที่ลดลงนี้จะใช้เป็นตัววัดและบอกถึงลักษณะของสภาพพื้นผิวที่มีความสูงต่ำแตกต่างกันไป

ตัวอย่างเช่น เมื่อเข็มตรวจวัดเคลื่อนที่ผ่านบริเวณผิวงานที่มีความนูนสูงขึ้นมา ตัวคานก็จะมีส่วนที่หรือแอมพลิจูดในการสั่นลดลง ในทางตรงข้าม เมื่อเข็มปลายแหลมเคลื่อนที่ผ่านบริเวณผิวที่มีการยุบตัวหรือมีความลึกลงไป ตัวคานก็จะมีส่วนที่ในการสั่นเพิ่มขึ้น และมีแอมพลิจูดสูงขึ้น (เข้าใจคือแอมพลิจูดสูงสุดในสภาพที่ยังไม่มีการทำการสแกน) แอมพลิจูดของการสั่นที่เปลี่ยนแปลงไปก็จะถูกวัดโดยแอมพลิจูดดีเทกเตอร์ (Amplitude Detector) แล้วส่งผลเข้าไปยังตัวควบคุม ซึ่งจะทำการวัดสัญญาณพร้อมทั้งปรับระยะระหว่างเข็มกับผิวงาน เพื่อรักษาให้ค่าแอมพลิจูดของการสั่นให้คงที่ต่อไป จนกว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดของการสั่นตามสภาพพื้นผิวในบริเวณถัดไป

#### 4. แบบ โมดูลชัน (Force Modulation Mode) ของแรงสำหรับพื้นผิวของวัสดุที่มี

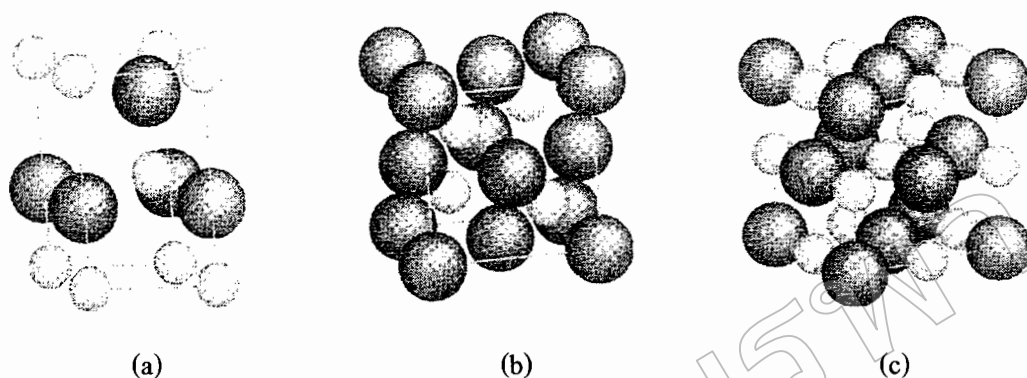
องค์ประกอบหลายเฟส พบว่าเทคนิค-AFM ในวิธีแบบ แบบ โมดูลชันของแรง จะเป็นที่นิยมใช้มาก โดยเทคนิคนี้จะเป็นการวัดและสร้างภาพของพื้นผิวชิ้นงานที่มีความแตกต่างของความแข็งเกร็ง (Stiffness) ในแต่ละเฟสสูง โดยในกรณีนี้ตัวเข็มจะสแกนไปในลักษณะที่มีการสั่นในแนวตั้งฉากกับผิววัสดุด้วยแอมพลิจูดเล็กน้อย แต่จะมีความเร็วในการสั่นที่สูงกว่าการเคลื่อนที่สแกนของเข็ม และเมื่อตัวเข็มถูกนำเข้ามาแตะสัมผัสกับผิววัสดุก็จะเกิดแรงต่อต้านจากผิวของวัสดุที่เกิดจากการสั่นและทำให้ตัวคานงอ และถ้าหากว่าเราให้แรงที่ทำให้ตัวคานสั่นคงที่ พื้นผิวบริเวณที่แข็งกว่าจะทำให้เกิดการต่อต้านต่อการสั่นในแนวตั้งของตัวคานมากกว่า และจึงทำให้ตัวคานงอมากกว่า ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดที่เกิดจากการ โกงงอของตัวคานจึงนำมาใช้วัดเปรียบเทียบความแข็งที่บริเวณต่าง ๆ ของผิวงาน

หลักการของวิธีแบบแทปปิงกับแบบ โมดูลชันของแรงคล้ายกันที่มีการสั่นของเข็มในแนวตั้งพร้อมกับมีการสแกนไปบนผิวชิ้นงาน อย่างไรก็ตามทั้ง 2 เทคนิค จะมีความแตกต่างกันคือ ในกรณีแบบโมดูลชันของแรง จะสั่นด้วยความเร็วสูงกว่า (สูงกว่าความเร็วในการสแกน) และการวัดแอมพลิจูดที่เกิดจากการบิดงอของคาน เป็นการวัดเนื่องจากผลของแรงด้านการสั่น เมื่อมีการสัมผัสของเข็มกับผิวงานในขณะที่ แบบแทปปิง จะเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของการสั่นของคานที่เปลี่ยนแปลงไป (ลดลง) เนื่องมาจากมีการสูญเสียพลังงานไปเมื่อมีการสัมผัสผิวงานที่มีระดับความสูงต่ำแตกต่างกัน

## อะลูมิเนียมไนไตรด์

อะลูมิเนียมไนไตรด์ (AlN) เป็นสารประกอบที่ประกอบขึ้นจากธาตุ 2 ชนิด ได้แก่ อะลูมิเนียม (Al) และธาตุไนโตรเจน (N) มีแถบพลังงานกว้าง ทำให้สามารถจัดสารประกอบชนิดนี้ให้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดที่มีช่องว่างแถบพลังงานกว้างได้เมื่อเจือสารประกอบนี้ด้วยธาตุที่มีพลังงานต่ำ เช่น ธาตุคาร์บอน สารประกอบนี้มีค่าช่องว่างแถบพลังงานเป็น 6.2 eV ที่ 300 K เมื่อเป็นโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล นอกจากนี้ยังสามารถจัดให้อะลูมิเนียมไนไตรด์เป็นฉนวนไฟฟ้าและยังถูกนำเสนอให้เป็นสารไดอิเล็กตริกแนวใหม่ สำหรับการประยุกต์ใช้งานในทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้งานแบบอุณหภูมิและกำลังไฟฟ้าสูง เนื่องจากพบว่าสารนี้มีเสถียรภาพเชิงความร้อนสูงเมื่อปลูกลงบนซิลิคอนและซิลิคอนคาร์ไบด์ อะลูมิเนียมไนไตรด์ได้ถูกนำมาใช้เป็นชั้นกันชนในการปลูกผลึกสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ๆ อีกด้วย ตัวอย่างเช่น การปลูกสารแกเลียมไนไตรด์ (GaN) พบข้อดีไม่เฉพาะในเรื่องการเกิดปรากฏการณ์ไม่เข้ากันได้เชิงผลึก (Lattice Mismatch) ที่น้อยมากแล้วยังพบว่ายังเกิดขึ้นเชื่อมโยงระหว่างผลึกระหว่าง GaN และ AlN จำนวนมากด้วย สมบัติการเป็นสารกึ่งตัวนำที่ฐานสัณฐานช่องว่างแถบพลังงานตรงของอะลูมิเนียมไนไตรด์ทำให้ถูกเลือกใช้เป็นสารสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในย่านความถี่อัลตราไวโอเล็ต (UV) และยังพบว่าสามารถประยุกต์ใช้สารนี้ในการสร้างจอแสดงผลชนิดเพอร์สแตมในย่านความถี่สูงด้วย

สารประกอบอะลูมิเนียมไนไตรด์ถูกพบว่ามีโครงสร้างผลึกอย่างน้อย 3 รูปแบบ ได้แก่ โครงสร้างแบบเฮกซะโกนัลแบบเวอร์ตไซต์ (Wurtzite) ที่พบจำนวนมาก โครงสร้างลูกบาศก์แบบซิงค์เบลนด์ (Zinc Blende) และ โครงสร้างลูกบาศก์แบบร็อกซอลต์ (Rock Salt) ดังภาพที่ 2-27 ความแตกต่างกันในโครงสร้างผลึกทั้ง 3 รูปแบบ ส่งผลให้เกิดความแตกต่างในสมบัติทางไฟฟ้าและความแข็งแรงเชิงกล โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ ถูกทำนายว่าเป็นสารที่มีช่องว่างแถบพลังงานทางอ้อมมีค่าต่ำ (ประมาณ 5.1 eV) แต่มีความแข็งแรงสูง โครงสร้างแบบร็อกซอลต์ เป็นโครงสร้างที่มีความดันสูง ส่วนโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ถูกพบได้ยาก สารละลายของแข็งของอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่มีโครงสร้างแบบร็อกซอลต์ กับไททาเนียมไนไตรด์ เป็นสารที่น่าสนใจโดยเฉพาะการนำสารละลายของแข็งนี้มาประยุกต์ใช้ในงานการเคลือบแข็ง



ภาพที่ 2-28 ลักษณะโครงสร้างผลึกของอลูมิเนียมไนไตรด์ (Tungasmita, 2001)

(a) Wurtzite AlN

(b) Zinc Blende AlN

(c) Rock Salt AlN

การสังเคราะห์สารประกอบอลูมิเนียมไนไตรด์สามารถเตรียมได้จากเทคนิคการปลูกผลึกหลายเทคนิค ตัวอย่างเช่น การเตรียมสารนี้จากการเคลื่อนย้ายลำไอของโมเลกุลในสถานะแก๊ส (GSMBE) หรือการเตรียมโดยเทคนิคการปลูกสารด้วยไอเคมีชนิดปฏิกิริยาโลหะกับออร์แกนิก (MOCVD) เทคนิคการระเหิดและควบแน่น และเทคนิครีแอคทีฟสปีดเตอริง ทั้งแบบ RF และ DC อย่างไรก็ตามการเตรียมสารนี้จากเทคนิคต่าง ๆ คุณภาพของสารที่เตรียมได้ยังไม่สามารถระบุได้ว่าเทคนิคใดมีเตรียมได้ดีกว่ากัน

## งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Oliveira, Massi, Santos, Otani, Maciel, and Mansano (2001) ได้เคลือบอลูมิเนียมไนไตรด์บนแผ่นซิลิกอน (P-Type silicon) โดยวิธีรีแอคทีฟดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริงในบรรยากาศของแก๊สผสมระหว่าง ไนโตรเจนและอาร์กอน เพื่อศึกษาผลของการให้ความร้อนแก่แผ่นซิลิกอนและ อัตราส่วนของแก๊สผสม จากการวิเคราะห์ด้วย XRD พบว่าปัจจัยทั้งสองมีผลต่อโครงสร้างของฟิล์ม การเคลือบโดยไม่ให้ความร้อนได้ฟิล์มที่มีโครงสร้างอสัณฐานและผลึกเมื่อวิเคราะห์ฟิล์มที่โครงสร้างเป็นผลึกด้วย XRD พบว่ารังสีเลี้ยวเบนเข้มมากที่มุม  $2\theta = 33^\circ$  ซึ่งอาจเป็นรังสีเลี้ยวเบนจากระนาบ (100) ที่มีระยะระหว่างระนาบ  $d_{100} = 2.69 \times 10^{-10}$  รังสีเลี้ยวเบนเข้มมากที่มุมนี้แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างมีความเป็นระเบียบสูง ต่างจากฟิล์มที่เป็น ออสัณฐานซึ่งพบรังสีเข้มพอ ๆ กันที่หลายมุม การเคลือบโดยใช้ไนโตรเจน 60% พร้อมกับให้ความร้อนแก่แผ่นซิลิกอน (อุณหภูมิ  $200^\circ\text{C}$ ) ได้ฟิล์มที่โครงสร้างเป็นระเบียบสูงและเป็นผลึกมากกว่าฟิล์มที่ได้จากการเคลือบโดยไม่ให้ความร้อนที่อัตราส่วนของไนโตรเจนเดียวกัน

Zhang et al. (2005) สนใจการประยุกต์ใช้อลูมิเนียมไนไตรด์เป็นชั้นรองพื้นในกระบวนการสร้างอุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังและความถี่สูงและ ได้ใช้วิธี รีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง เคลือบอลูมิเนียมบนซิลิกอนระนาบ (111) และ ระนาบ (100) โดยใช้กำลังการคายประจุต่างกัน จากข้อมูล XRD พบว่าฟิล์มบนซิลิกอน (111) ปรากฏยอดของรังสีเลี้ยวเบนจากระนาบ (002) ยอดนี้มีค่า FWHM น้อยกว่ายอดที่ได้จากระนาบเดียวกันของฟิล์มบนซิลิกอน (100) เมื่อวิเคราะห์ลักษณะการสั่นด้วย FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) พบว่าความเค้นของฟิล์มที่เคลือบบนซิลิกอนระนาบ (111) มีค่าน้อยกว่าฟิล์มบนซิลิกอน (100) ค่าความเค้นนี้เป็นผลจากความเข้ากันไม่ได้ระหว่างโครงผลึกของฟิล์มและวัสดุรองรับ และ พบว่าความเค้นของฟิล์มบนซิลิกอน (111) ขึ้นอยู่กับกำลังการคายประจุอย่างมาก ความเค้นนี้เกิดจากความไม่สมบูรณ์ และความเข้ากันไม่ได้ระหว่างสมบัติทางความร้อนของฟิล์มและวัสดุรองรับ

Venkataraj, Severin, Drese, Koerfer, and Wuttig (2006) ได้ใช้วิธี รีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอริง เคลือบอลูมิเนียมไนไตรด์บนซิลิกอนระนาบ (100) และแก้ว โดยแปรค่าอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนในช่วง 0 ถึง 8 sccm และ รักษาความดันขณะเคลือบไว้ที่  $8 \times 10^{-3}$  mbar โดยปล่อยแก๊สอาร์กอนเข้าไปชดเชยด้วยอัตราไหลที่เหมาะสม จากเทคนิค RBS พบว่าฟิล์มที่ได้จากการเคลือบที่อัตราการไหลของไนโตรเจน 4.75 sccm มีสัดส่วนของธาตุเป็น  $\text{Al}_x\text{N}_y$  และจากข้อมูล XRD พบว่าฟิล์มเริ่มเป็นผลึกที่อัตราการไหล 4.75 sccm ขึ้นไป จากการวิเคราะห์ สเปกตรัมการส่งผ่านแสง และวิธี Ellipsometry พบว่าฟิล์มอลูมิเนียมไนไตรด์มีค่าดัชนีหักเหของแสงที่ความยาวคลื่น 533 nm ประมาณ 1.9

Figuerola, Salas, and Oseguera (2005) ใช้วิธีรีแอคทีฟลิซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงเคลือบอลูมิเนียมไนไตรด์บนอลูมิเนียมอัลลอย (7076-T6) ที่รองพื้นด้วยฟิล์มที่แตกต่างกันสามชนิดคือฟิล์มโครเมียม ฟิล์มไททาเนียม และฟิล์มอลูมิเนียม เพื่อศึกษาผลของความดันขณะเคลือบและชนิดของฟิล์มรองพื้นจากการสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่า การรองพื้นด้วยไททาเนียมและอลูมิเนียมทำให้ฟิล์มอลูมิเนียมไนไตรด์ยึดเกาะได้ดีกว่ารองพื้นด้วยโครเมียม ภาพตัดขวางของพื้นผิวของฟิล์มอลูมิเนียมไนไตรด์ที่ได้จาก SEM แสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่ได้มีโครงสร้างเป็นคอลัมน์ยอดแหลมคล้ายโคมเรียงตัวกันสองแบบคือ Z1 และ ZT (Tromton et al., 1989) ฟิล์มที่ใช้รองพื้นมีผลต่อการเรียงตัวนี้ คอลัมน์ของฟิล์มอลูมิเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบนฟิล์มรองพื้นอลูมิเนียมเรียงตัวหนาแน่น (โครงสร้างแบบ ZT) กว่าคอลัมน์ของฟิล์มที่เคลือบบนฟิล์มรองพื้นโครเมียมและไททาเนียม (โครงสร้างแบบ Z1) และยังพบว่า การเคลือบบนฟิล์มรองพื้นเหล่านี้ปรากฏโครงสร้างชั้นของคอลัมน์ (Columnar-Layered) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่ปรากฏเมื่อเคลือบบนกระจกและชั้นของคอลัมน์นี้ชั้นสุดท้ายหนาที่สุด ภาพถ่ายด้านบนจาก SEM แสดงให้เห็นลักษณะผิวที่มีรอยบุ๋มรูปครึ่งวงกลมซึ่งเกิดจากคอลัมน์บางคอลัมน์การเรียงตัวในระนาบ (002) (Figuerola et al., 2004) ขนาดของรอยบุ๋มนี้เพิ่มความดันขณะเคลือบ เช่นเดียวกับความหยาบของผิวที่เพิ่มความดันขณะเคลือบ เมื่อเคลือบที่ความดันต่ำได้ฟิล์มบางและผิวเรียบกว่าเคลือบที่ความดันสูง สเปกตรัม XRD ที่ได้จากทั้งสิบสองตัวอย่างปรากฏยอดในตำแหน่งที่สอดคล้องกับโครงสร้างผลึกแบบ Wurtzite และแสดงให้เห็นว่าเป็นผลึกที่เรียงตัวแบบผสมคือเรียงอยู่ในระนาบ (101) (100) และ (002) ระนาบเหล่านี้มีสัดส่วนพอ ๆ กัน ไม่มีระนาบใดเด่นชัด สัดส่วนของระนาบเหล่านี้เปลี่ยนตามความดันขณะเคลือบสเปกตรัม XRD ของฟิล์มที่เคลือบด้วยความดันสูง ( $0.8 \times 10^{-3}$  mbar) ปรากฏยอดที่แสดงว่ามีอลูมิเนียมอยู่ในเนื้อฟิล์ม

Moreira, Doi, Souza, and Diniz (2010) ได้เคลือบอลูมิเนียมไนไตรด์บนซิลิกอนระนาบ (100) โดยใช้วิธีรีแอคทีฟลิซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงในบรรยากาศของแก๊สผสมระหว่างไนโตรเจน กับอาร์กอน พบว่าสามารถเคลือบให้เกิดฟิล์มอลูมิเนียมระนาบ (002) ที่มีผิวหยาบน้อย โดยควบคุมความเข้มของแก๊สไนโตรเจนและกำลังที่เป่าและสามารถเคลือบฟิล์มที่มีลักษณะเช่นนี้ได้เร็วถึง 70 nm/min นอกจากนี้ยังพบอีกว่าการเพิ่มกำลังที่เป่าทำให้การไนไตรด์อลูมิเนียมไม่สมบูรณ์ (ปรากฏเฟสของอลูมิเนียมไนไตรด์ในสเปกตรัม XRD ของฟิล์ม)

Auger, Vazquez, Jergel, Sanchez, and Albelia (2006) ได้ใช้วิธี รีแอกติฟ ดีจี แมกนีตรอนสปัตเตอริง เคลือบอลูมิเนียมไนไตรด์ลงบนซิลิกอนระนาบ (100) ที่อัตราการเคลือบ 5 nm/min โดยใช้เวลาเคลือบนานไม่เท่ากัน สเปกตรัม XRD แสดงให้เห็นว่าฟิล์มทั้งหมดที่ได้จากการเคลือบเป็นผลึกหลายระนาบ (Polycrystalline) เมื่อนำค่าความหยาบ  $\sigma$  จากข้อมูล AFM และเวลาในการเคลือบมาวิเคราะห์พบว่า ความหยาบมีความสัมพันธ์กับเวลาสองแบบ คือ ในช่วงเวลาเริ่มเคลือบจนถึงนาที่ที่ 40 ความหยาบแปรผันตรงกับเวลา สเปกตรัม XRD ของฟิล์มที่ได้จากการเคลือบในช่วงเวลานี้แสดงให้เห็นว่าเริ่มมีระนาบ (002) ในช่วงเวลาหลัง 40 นาที่จนถึงนาที่ที่ 200 ความหยาบผิวยังสัมพันธ์กับเวลาในแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นคือ  $\sigma \propto t^{0.37}$  สเปกตรัม XRD ของฟิล์มที่ได้จากการเคลือบในช่วงเวลานี้แสดงให้เห็นว่าระนาบ (002) เพิ่มขึ้น ผลการวิเคราะห์ XRD และ AFM แสดงให้เห็นว่าในระหว่างการเคลือบฟิล์มทั้งสองแบบ ในช่วงต้น (< 40 นาที่) เป็นการโตแบบไม่เสถียร ความหยาบเพิ่มขึ้นเร็วกว่าในช่วงเวลาหลัง (> 40 นาที่) ซึ่งเป็นการ โตแบบเสถียร ลักษณะของการโตที่กล่าวมานี้มีความเชื่อมโยงกับความเปราะบางของฟิล์ม

Khoshtman and Kordeesch (2005) ศึกษาการวัดและการวิเคราะห์ค่าคงที่ทางแสงและคุณสมบัติโพลาไรซ์ของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่มีโครงสร้างแบบออสันฐาน (a-AlN) ที่เคลือบด้วยวิธี อาร์เอฟ รีแอกติฟ แมกนีตรอน สปัตเตอริง บนแผ่นซิลิกอน (111) และกระจกที่เป็นวัสดุรองรับ ค่าคงที่ทางแสงวิเคราะห์จาก Ellipsometric spectra ที่ความยาวคลื่น 300 - 1400 nm โดยใช้ Cauchy-Urbach Model จากการทดลองพบดัชนีหักเหและสัมประสิทธิ์การดับสูญของฟิล์มมีค่าอยู่ในช่วง 1.80 - 2.11 และ  $8.6 \times 10^{-3}$  -  $1.5 \times 10^{-5}$  ตามลำดับ การวิเคราะห์ของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่น 200 - 1400 nm, แถบพลังงานของฟิล์มบางที่มีโครงสร้างแบบ a-AlN มีค่าเท่ากับ  $5.84 \pm 0.05$  eV จากมุมการสะท้อนแสงของ P-Polarized อนุমানมุม Brewster เท่ากับ  $61^\circ$  และมุมหลักเท่ากับ  $64^\circ$  การวัดคุณสมบัติโพลาไรซ์พบว่ามีการส่งผ่านแสงสูงและดูดกลืนแสงต่ำมากในช่วงแสงที่ตามองเห็นและอินฟราเรดใกล้สำหรับฟิล์มบางที่มีโครงสร้างแบบ a-AlN ส่วนการวิเคราะห์ด้วย XRD ได้ยืนยันลักษณะ โครงสร้างแบบออสันฐานของฟิล์มที่ศึกษา

Lee, Placido, Cochran, and Kirk (2002) ศึกษาฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบนกระจกที่เป็นวัสดุรองรับด้วยวิธี อาร์เอฟ แมกนีตรอน สปัตเตอริง ซึ่งมีระนาบ (002) สูง จากการวิเคราะห์ด้วย XRD แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ระนาบ (002) Preferred Orientation ส่วนระนาบอื่น ๆ เริ่มเกิดขึ้นเมื่อฟิล์มที่เคลือบได้มีความหนาเพิ่มขึ้น ก็เริ่มมีระนาบอื่น ๆ เกิดขึ้น ลักษณะพื้นผิวของ c-axis Texture ของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์วิเคราะห์ด้วย SEM ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $d_{33}$  ฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์วัดโดยใช้ Piezoresponse Microscopy โดยมีค่าเท่ากับ 15 : 08 pm/V

Joo, Kim, Kim, and Kim (2000) พิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบน  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  ที่เป็นวัสดุรองรับด้วยวิธี อาร์เอฟ แมกนีตรอน สเปดเตอริง ถูกศึกษาด้วยเครื่อง Spectroscopic Ellipsometry (SE) ดัชนีหักเหและความหนาแต่ละชั้นถูกวิเคราะห์จาก Spectroscopic Ellipsometry ด้วย Multi-Layer Model และ Effective Medium Approximation ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายชั้นฟิล์มของฟิล์มที่มีหลายชั้น ที่มีความหนารวมแล้วมากถึง  $2.5\ \mu\text{m}$  ดัชนีหักเหของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์อยู่ในช่วงของ 1.98 - 2.15 ซึ่งเป็นค่าสำหรับฟิล์มอลูมิเนียมไนไตรด์ที่มีโครงสร้างแบบ Polycrystalline ข้อดีระหว่างผลของ Spectroscopic Ellipsometry กับ XRD, AFM, และ SEM เกี่ยวกับโครงสร้าง ความหยาบผิว และความหนาของฟิล์ม ถูกยืนยันด้วยเครื่อง Spectroscopic Ellipsometry

Shukla and Khare (2008) ศึกษาความสัมพันธ์ของความดันของแก๊สไนโตรเจนต่อโครงสร้างผลึกและพื้นผิวของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยวิธี Pulsed Laser โดยใช้เป้าอลูมิเนียมไนไตรด์ในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจน ที่อุณหภูมิห้อง ฟิล์มที่เคลือบได้วิเคราะห์ด้วย AFM, SEM, XRD, และ FTIR สำหรับศึกษาโครงสร้างและลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม จากผลการวิจัยพบว่าที่ความดันแก๊สไนโตรเจนสูง ๆ ฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ชอบที่จะเกิดระนาบ (101) ในขณะที่ความดันแก๊สไนโตรเจนต่ำ ๆ ฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ชอบที่จะเกิดระนาบ (002) อย่างไรก็ตาม PL Spectra ของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยวิธี Pulsed Laser สัมพันธ์กับโครงสร้างผลึกและเวลาที่เคลือบ สรุปแล้วความดันของแก๊สไนโตรเจนมีผลต่อ FTIR Spectra ของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์