

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึงทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ซึ่งประกอบด้วย การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปีดเทอริง กระบวนการสปีดเทอริง กระบวนการ โกล์ดดิสชาร์จ การก่อเกิดฟิล์มบาง โครงสร้างของฟิล์มบาง ระบบเคลือบแบบ คีซี สปีดเทอริง ระบบเคลือบแบบ คีซี แมกนีตรอน สปีดเทอริง ระบบเคลือบแบบ อันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเทอริง สมบัติเชิงรังสี ของวัสดุ การหาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง ไททานเนียมไดออกไซด์

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปีดเทอริง

การเคลือบฟิล์มบาง (Thin Film) ในศตวรรษแรกๆแรกทำโดย Bunsen และ Grove ในปี ค. ศ. 1852 โดยพื้นฐานแล้ว การเคลือบฟิล์มบางก็คือ การนำเอาอะตอมของสารเคลือบมาเรียงกันบนวัสดุรองรับ (Substrate) จนเกิดเป็นชั้นของฟิล์มบาง ซึ่งฟิล์มบางที่เกิดขึ้นนั้นจะบางมาก อาจอยู่ในระดับนาโนเมตรถึงไมโครเมตร ปัจจุบันมีการนำฟิล์มบางมาประยุกต์ใช้กับงานด้านต่าง ๆ ได้แก่ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น สารกึ่งตัวนำ ฟิล์มตัวนำ และฟิล์มตัวต้านทาน หรืออุปกรณ์ทางแสง เช่น เลนส์ กระจกสะท้อนแสง กระจกสะท้อนความร้อน เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้วิธีการเคลือบฟิล์มบางในการเตรียมสารตัวอย่างสำหรับการศึกษาสมบัติทางกายภาพของวัสดุในรูปของฟิล์มบาง ซึ่งสมบัติบางอย่างไม่สามารถวัดได้เมื่ออยู่ในสภาพเป็นก้อน (Bulk) เพราะฉะนั้น ข้อมูลเหล่านี้จะมีประโยชน์อย่างมากต่อการพัฒนาวัสดุเพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่อไป

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

1. การสร้างสารเคลือบ โดยทั่วไปแล้วสารเคลือบอาจอยู่ในรูปของ ของแข็ง ของเหลว ไอ หรือ แก๊ส ก็ได้ แต่สารเคลือบขณะทำการเคลือบนั้นจำเป็นต้องอยู่ในรูปของไอระเหยเท่านั้น ซึ่งวิธีการที่ทำให้สารเคลือบเกิดเป็นไอระเหยได้คือ การให้ความร้อนหรือการระดมยิงด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูง

2. การเคลื่อนย้ายสารเคลือบมายังวัสดุรองรับ (Transport) ในภาวะสุญญากาศ ไอระเหยของสารเคลือบอาจจะมีการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ไปยังวัสดุรองรับ หรืออาจจะเคลื่อนที่ไปในลักษณะของของไหล ซึ่งจะทำให้ไอระเหยของสารเคลือบมีการชนกับอนุภาคอื่นภายในภาชนะสุญญากาศ นอกจากนี้ไอระเหยอาจจะเคลื่อนที่ไปยังวัสดุรองรับในลักษณะของพลาสมา

3. การควบแน่น พอกพูนและโตขึ้นจนกลายเป็นชั้นฟิล์มบางบนวัสดุรองรับ ส่วนของการควบแน่นและพอกพูนของชั้นฟิล์มบางนั้น จะขึ้นกับเงื่อนไขของวัสดุรองรับหรือการทำปฏิกิริยาของสารเคลือบกับวัสดุรองรับ ความสะอาดของผิววัสดุรองรับ ตลอดจนพลังงานที่ใช้ในการเคลือบ

การเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริง เป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางที่เกิดจากสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริง (ความดันประมาณ 10^{-3} - 10^{-1} mbar) การเคลือบด้วยวิธีนี้เกิดขึ้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงวิ่งเข้าชนวัสดุรองรับและมีการพอกพูนและโตเป็นฟิล์มบางในที่สุด กระบวนการสปัตเตอริง คือ การทำให้อะตอมหลุดจากผิวของวัสดุ โดยการชนของอนุภาคพลังงานสูง โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและ โมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิวสารเคลือบ กระบวนการนี้อ่อนกว่าที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ และเนื่องจากไอออนที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงในการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริงจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่าวิธีการระเหยสารมาก ดังนั้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบวิ่งเข้ากระทบแผ่นวัสดุรองรับก็จะฝังตัวแน่นลงในเนื้อวัสดุที่ต้องการเคลือบมากกว่าวิธีการระเหยสาร ดังนั้นการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริงจะทำให้การยึดเกาะระหว่างสารเคลือบกับวัสดุรองรับดีกว่า (สุพัฒน์พงษ์ คำรงค์รัตน์, พิเศษฐ ลิ้มสุวรรณ และพิชญ เจริญสมศักดิ์, 2529; Chapman, 1980)

กระบวนการสปัตเตอริง

เมื่อผิวหน้าของวัสดุถูกระดมยิง (Bombarded) ด้วยอนุภาคพลังงานสูงจะทำให้เกิดการสึกกร่อนและมิอนุภาคที่ผิวหน้าของวัสดุนั้นหลุดออกมา เนื่องจากการชนของอนุภาคพลังงานสูงกับอนุภาคที่ผิวหน้า ปรากฏการณ์ที่อนุภาคของสารเคลือบที่ผิวหน้าวัสดุหลุดออกมานี้เรียกว่าสปัตเตอริง (Sputter) หรือ สปัตเตอริง (Sputtering) กระบวนการสปัตเตอริงนี้ถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อ 100 กว่าปีที่ผ่านมา โดย Grove ซึ่งในขณะนั้นสปัตเตอริงเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดความเสียหายกับคาโทดและกริดในหลอดคิซซาร์จแต่ปัจจุบันมีการนำกระบวนการนี้มาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางเช่น การทำความสะอาดผิวหน้า (Surface Cleaning) การกัดเซาะ (Etching) การวิเคราะห์ชั้นผิวหน้าของวัสดุ (Surface Layer Analysis) และการเคลือบฟิล์มบาง

1. อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ เมื่อไอออนพลังงานสูงวิ่งชนผิวหน้าวัสดุจะเกิดปรากฏการณ์ต่าง ๆ ดังนี้ (สุพัฒน์พงษ์ คำรงค์รัตน์, พิเศษฐ ลิ้มสุวรรณ และพิชญ เจริญสมศักดิ์, 2529; Chapman, 1980) (ภาพที่ 2-1)

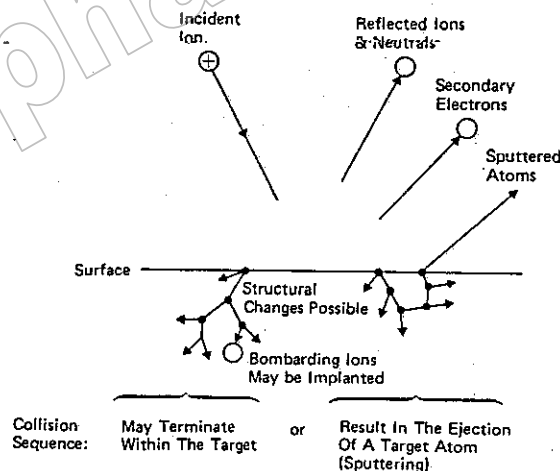
1.1 การสะท้อนที่ผิวหน้าของไอออน (Reflected Ions and Neutrals) ไอออนอาจสะท้อนกลับจากผิวหน้าซึ่งส่วนใหญ่จะสะท้อนออกมาในรูปของอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้าอันเกิดจากการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่บริเวณผิวของเป้าสารเคลือบ

1.2 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สอง (Secondary Electron Emission) จากการชนของไอออนอาจทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองจากเป้าสารเคลือบ ถ้าไอออนนั้นมีพลังงานสูงพอ

1.3 การฝังตัวของไอออน (Ion Implantation) ไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบนั้น ไอออนอาจฝังตัวลงในสารเคลือบ โดยความลึกของการฝังตัวจะแปรผันโดยตรงกับพลังงานไอออนซึ่งมีค่าประมาณ 10 อังสตรอม/ พลังงาน ไอออน 1 keV สำหรับ ไอออนของแก๊สอาร์กอนที่ฝังตัวในแผ่นทองแดง

1.4 การเปลี่ยนโครงสร้างของผิวสารเคลือบ การชนของไอออนบนผิวสารเคลือบทำให้เกิดการเรียงตัวของอะตอมที่ผิวสารเคลือบใหม่และเกิดความบกพร่องของโครงสร้างผลึก (Lattice Defect) เราเรียกการจัดตัวใหม่ของโครงสร้างผิวหน้านี้ว่า Altered Surface Layers

1.5 การสปีดเตอร์ การชนของไอออนอาจทำให้เกิดกระบวนการชนแบบ ต่อเนื่องระหว่างอะตอมของเป้าสารเคลือบอันทำให้เกิดการปลดปล่อยอะตอมจากเป้าสารเคลือบ ซึ่งเรียกว่า กระบวนการสปีดเตอร์ริง



ภาพที่ 2-1 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวของหน้าเป้าสารเคลือบ (Chapman, 1980)

2. กระบวนการสปีดเตอร์ริง เป็นกระบวนการที่อะตอมผิวหน้าของวัสดุถูกทำให้หลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูง โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่าง

อนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิวหน้าของวัสดุดังกล่าว กระบวนการนี้ออนุภาคที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ (สุพรรณพงษ์ ดำรงรัตน์ และคณะ, 2529; Chapman, 1980) สิ่งที่น่าจะเป็นในกระบวนการสปัตเตอริง คือ

2.1 เป้าสารเคลื่อน ทำหน้าที่เป็นเป้าให้อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนจนมีการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลื่อนลงเคลื่อนบนวัสดุรองรับ

2.2 อนุภาคพลังงานสูง ซึ่งจะวิ่งเข้าชนเป้าสารเคลื่อน แล้วทำให้อะตอมของเป้าสารเคลื่อนหลุดออกมา ปกติอนุภาคพลังงานสูงนี้อาจเป็นกลางทางไฟฟ้า เช่น นิวตรอน หรืออะตอมของธาตุต่าง ๆ แต่การทำให้อนุภาคที่เป็นกลางมีพลังงานสูงเกิน 10 eV เพื่อใช้ในกระบวนการสปัตเตอริงทำได้ค่อนข้างยาก วิธีการหนึ่งที่มีนิยมคือการเร่งอนุภาคประจุภายใต้สนามไฟฟ้า ซึ่งสามารถควบคุมระดับพลังงานให้อ่อนได้ตามต้องการ อิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุชนิดหนึ่งที่เกิดได้ง่ายและสามารถเร่งให้มีพลังงานสูงภายใต้สนามไฟฟ้าได้แต่อิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่าอะตอมของสารเคลื่อนมากทำให้การถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมต่ออะตอมสารเคลื่อน เป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพและไม่สามารถทำให้กระบวนการสปัตเตอริงเกิดขึ้นได้ตามทฤษฎีทางฟิสิกส์การชนระหว่าง 2 อนุภาคที่มีการส่งถ่ายพลังงานและโมเมนตัมดีที่สุด จะเกิดขึ้นเมื่อมวลของอนุภาคทั้งสองมีค่าเท่ากันดังนั้นเราจึงเลือกการเร่งไอออนของแก๊สในสนามไฟฟ้าเป็นอนุภาควิ่งชนเป้าสารเคลื่อนซึ่งให้อัตราการปลดปล่อยเป้าสารเคลื่อนสูงเพียงพอกับความต้องการ

2.3 การผลิตอนุภาคพลังงานสูง อนุภาคพลังงานสูงในระบบสปัตเตอริงนี้จะต้องถูกผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้กระบวนการเคลื่อนสารเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจนได้ความหนาฟิล์มบางตามต้องการ ทั้งนี้สามารถทำได้หลายวิธีเช่นการใช้ลำอนุภาคจากปืนไอออนที่มีปริมาณการผลิตไอออนในอัตราสูงหรือผลิตจากกระบวนการโกลด์ดิสชาร์จ เนื่องจากปืนไอออนมีราคาค่อนข้างสูงและให้ไอออนในพื้นที่แคบ กระบวนการสปัตเตอริงทั่วไปในระดับอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้กระบวนการโกลด์ดิสชาร์จในการผลิตอนุภาคพลังงานสูง

3. ค่าyieldของสปัตเตอริง (Sputtering Yield: S) คือ ค่าเฉลี่ยปริมาณการหลุดของอะตอมเป้าสารเคลื่อนต่อปริมาณการชนของไอออน 1 อนุภาค มีหน่วยเป็น อะตอมต่อไอออน โดยการวัดค่าyieldนี้ สามารถทำได้โดยการหาน้ำหนักหรือความหนาที่ลดลงของเป้าสารเคลื่อน หรือหาได้จากวัสดุทั้งหมดที่ถูกสปัตเตอริง หรืออาจหาได้จากการตรวจวัดสปัตเตอริงอะตอม (Sputter Atom) ขณะที่ยังพุ่งกระจาย (สุพรรณพงษ์ ดำรงรัตน์ และคณะ, 2529) ค่าyieldของกระบวนการสปัตเตอริงจะเปลี่ยนไปตามภาวะต่าง ๆ ดังนี้

3.1 เปลี่ยนแปลงตามพลังงานไอออน การชนในแนวเดียวกันของอนุภาค 2 อนุภาค การถ่ายเทพลังงานระหว่างอนุภาคจะเป็นไปตามสมการที่ 1

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

เมื่อ ΔE คือ พลังงานที่ถ่ายเทระหว่างอนุภาค

m คือ มวลอะตอมที่ถูกชน

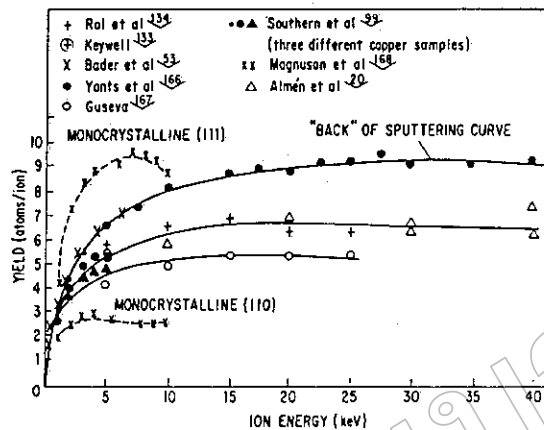
M คือ มวลของอะตอมที่วิ่งเข้าชน

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

ตารางที่ 2-1 พลังงานขีดเริ่มของเป้าสารเคลือบชนิดต่าง ๆ (สุพรรณพงษ์ คำรงรัตน์ และคณะ, 2529)

	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

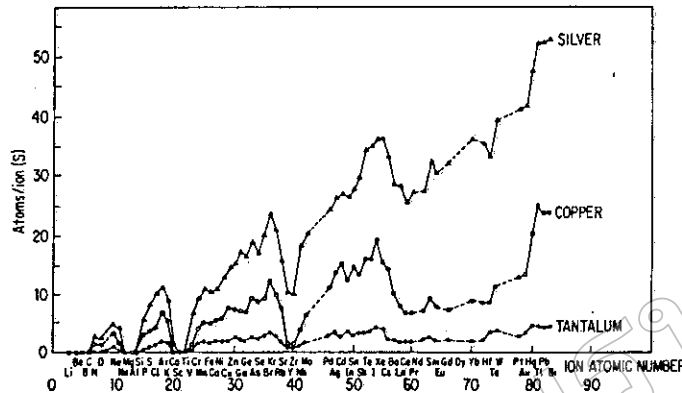


ภาพที่ 2-2 ยิลด์ของทองแดงที่ถูกชนด้วยไอออนจากแก๊สอาร์กอนที่พลังงานต่าง ๆ (สุพรรณพงษ์ ดำรงรัตน์ และคณะ, 2529)

เมื่อ ไอออนชนมีพลังงานสูงขึ้นยิลด์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ในช่วงแรกและเปลี่ยนเป็นการเพิ่มแบบเชิงเส้นจากนั้นจึงมีการอิ่มตัว (Saturation) ของค่ายิลด์ เมื่อพลังงานไอออนมีค่าสูงมาก ทั้งนี้เนื่องจากไอออนพลังงานสูงมีโอกาสในการฝังตัวบนผิวเป้า สารเคลือบสูงขึ้น ทำให้ยิลด์ของสารเคลือบมีค่าคงที่ จากนั้นจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มพลังงาน ไอออนให้สูงมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2-2

3.2 เปลี่ยนแปลงตามระนาบผลึกของผิวเป้าสารเคลือบ จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้ เป้าสารเคลือบที่เป็นผลึกเดี่ยวค่ายิลด์จะมีค่ามากที่สุดเมื่อไอออนชนเป้าในแนวระนาบที่มีอะตอมหนาแน่นที่สุด และมีค่าต่ำในระนาบที่มีอะตอมเบาบาง ในทองแดงซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ FCC (Face Centered Cubic) พบว่า การชนบนระนาบ (111) ซึ่งมีความหนาแน่นอะตอมสูงสุด ยิลด์จะมีค่าสูงสุดเมื่อใช้ค่าพลังงานไอออนในการชนค่าเดียวกัน ส่วนระนาบที่มีความหนาแน่นอะตอมต่ำ ไอออนมีแนวโน้มฝังตัวในเป้าสารเคลือบมากขึ้น

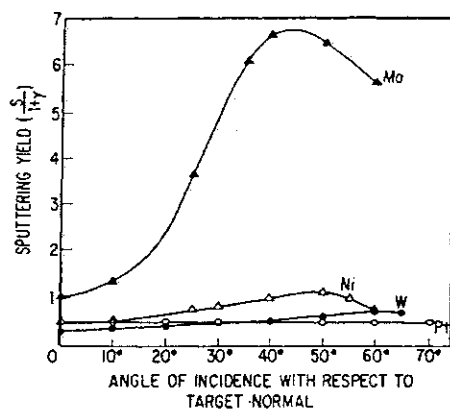
3.3 เปลี่ยนแปลงตามชนิดของไอออนที่ชนเป้าสารเคลือบ ค่ายิลด์จากเป้าสารเคลือบชนิดเดียวกัน เมื่อใช้ไอออนต่างชนิดกันวิ่งชนจะมีค่าแตกต่างกันออกไป แม้สมการที่ 1 แสดงให้เห็นว่าการถ่ายเทพลังงานระหว่าง 2 อนุภาคที่ชนกันจะมีค่าสูงสุดเมื่อมวลของอะตอมทั้งสองมีค่าเท่ากัน แต่อะตอมบนเป้าสารเคลือบยึดเกาะกับอะตอมข้างเคียงจึงทำตัวเสมือนมีมวลยังผลสูงกว่ามวลของอะตอมเดี่ยวจึงพบว่ายิลด์มีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้ไอออนที่มีมวลสูงกว่ามวลของอะตอมเป้าสารเคลือบ ภาพที่ 2-3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่ายิลด์พบว่ามีค่าสูงสุดเป็นช่วง ๆ ณ ตำแหน่งที่ใช้ไอออนจากแก๊สเฉื่อย คือแก๊ส Ne, Ar, Kr, และ Xe ซึ่งเป็นอะตอมที่มีอิเล็กตรอนครบ 8 ในวงนอกสุด สาเหตุของการเกิดจุดสูงสุดของค่ายิลด์เป็นช่วง ๆ นี้ยังไม่มีคำอธิบายที่ชัดเจน



ภาพที่ 2-3 การเปลี่ยนแปลงค่าอิเล็กตรอนของเป้าทองแดง (Cu), เงิน (Ag) และแทนทาลัม (Ta)

เมื่อใช้ไอออนพลังงาน 45 keV จากธาตุที่มีเลขอะตอมค่าต่าง ๆ (สุพัฒน์พงษ์ คำรงรัตน์ และคณะ, 2529)

3.4 เปลี่ยนแปลงตามมุมตกกระทบของไอออนบนเป้าสารเคลือบ จากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มมุมเอียงของการชนจากไอออนบนเป้าหมายมากขึ้นอิเล็กตรอนจะมีค่าสูงขึ้นตามมุมที่เอียง เนื่องจากอะตอมสารเคลือบที่หลุดออกมาเปลี่ยนจากการกระเจิงกลับ (Back Scattering) เป็นการกระเจิงไปข้างหน้า (Forward Scattering) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ต้องการจำนวนครั้งของการชนระหว่างอะตอมน้อยกว่าทำให้อิเล็กตรอนสูงขึ้นจนถึงจุดหนึ่งซึ่งมีค่าสูงสุดที่องศาการเอียงมากกว่า 45° จากนั้นอิเล็กตรอนจะมีค่าลดลงเมื่อมุมสูงขึ้น และเป็นศูนย์เมื่อมุมเอียงมีค่า 90° โดยขณะนั้นพื้นที่การชนเมื่อมองจากไอออนมีค่าเป็นศูนย์ ภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2-4 การเปลี่ยนแปลงของอิเล็กตรอนเมื่อใช้ไอออนของปรอทพลังงาน 200 eV ชนเป้านิกเกิล (Ni), โมลิบดีนัม (Mo), ทังสเตน (W) และทองคำขาว (Pt) ที่มุมการตกกระทบค่าต่าง ๆ (วัดเทียบกับแนวชนตั้งฉากบนเป้า) (สุพัฒน์พงษ์ คำรงรัตน์ และคณะ, 2529)

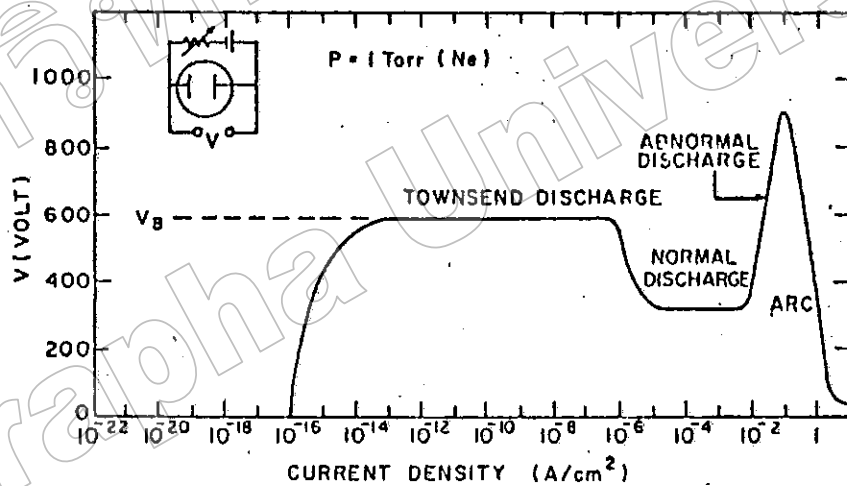
4. ความเร็วและพลังงานของอะตอมที่ถูกสปัตเตอร์หลุดออกจากผิวหน้าเป้าสารเคลือบ ด้วยวิธีการสปัตเตอร์มีพลังงานจลน์ค่อนข้างสูงและมากกว่าพลังงานของอะตอมที่หลุดออกด้วยวิธีการระเหยสารประมาณ 50-100 เท่า อะตอมมีการกระจายพลังงานแบบ Maxwellian โดยที่พลังงานส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่า 10 eV และอีกส่วนหนึ่งมีพลังงานระหว่าง 10-40 eV ถ้าไอออนที่ใช้มีพลังงานสูงขึ้น พลังงานเฉลี่ยของอะตอมจากสปัตเตอร์จึงมีค่าสูงขึ้นจนเมื่อไอออนที่วิ่งชนมีพลังงานเกิน 1 keV พลังงานเฉลี่ยของอะตอมจากการสปัตเตอร์จะไม่เพิ่มขึ้นและเป้าที่มีค่าอิเล็กต์สูงมีแนวโน้มทำให้พลังงานเฉลี่ยของอะตอมที่หลุดออกมามีค่าต่ำ เนื่องจากไอออนที่วิ่งชนเมื่อเฉลี่ยพลังงานให้กับอะตอมที่หลุดออกมาจำนวนมาก อะตอมแต่ละตัวจะรับพลังงานเฉลี่ยจากไอออนได้น้อยลง

กระบวนการโกลว์ดิสชาร์จ

ไอออนพลังงานสูงที่จำเป็นต้องใช้ในกระบวนการสปัตเตอร์จึงนั้น สามารถสร้างจากวิธีต่าง ๆ วิธีหนึ่งที่นิยม คือ สร้างจากกระบวนการโกลว์ดิสชาร์จ (Glow Discharge) ซึ่ง สุปัตน์พงษ์ คำจรรัตน์ และคณะ (2529) ได้อธิบายเกี่ยวกับการเกิด โกลว์ดิสชาร์จ ไว้ดังนี้ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขั้วอิเล็กโตรด 2 ขั้ว ที่วางห่างกันเป็นระยะ d ภายใต้ความดันประมาณ 1.33 mbar ของแก๊สไนออน พบว่า ช่วงแรกที่เพิ่มแรงดันไฟฟ้าจะมีกระแสไหลในวงจรน้อยมาก กระแสส่วนนี้เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออนของแก๊สที่เกิดขึ้นตลอดเวลาในบรรยากาศเนื่องจากการชนของรังสีคอสมิกและถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้า กระแสนี้มีค่าค่อนข้างคงที่ เพราะอัตราการเกิดประจุขึ้นกับความเข้มของรังสี เมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นใกล้ค่าแรงดันไฟฟ้าทะลาย (Breakdown Voltage: VB) พลังงานของประจุที่ถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้นจนสามารถชนโมเลกุลของแก๊สให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอน ซึ่งจะถูกรังภายใต้สนามไฟฟ้าให้มีการชนและเกิดการไอออไนซ์เพิ่มขึ้น ส่วนของไอออนบวกจะถูกรังเข้าชนคาโทดจนเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สอง เรียกกระบวนการช่วงนี้ว่า ทาวนด์เซนดดิสชาร์จ (Townsend Discharge)

ต่อมาเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มถึงศักย์ไฟฟ้าทะลายก็จะเกิดกระบวนการถล่ม (Avalanche) ทำให้ปริมาณไอออนบวกวิ่งเข้าชนคาโทดมากขึ้นและมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองออกมามากขึ้นด้วยซึ่งจะถูกเร่งให้วิ่งเข้าหาอานโนดขณะเดียวกันอิเล็กตรอนชุดที่สองนี้ก็จะชนกับโมเลกุลของแก๊สทำให้เกิดไอออนออกมามากขึ้น ซึ่งสุดท้ายไอออนบวกที่เพิ่มมากขึ้นนี้ก็จะวิ่งเข้าชนคาโทดแล้วเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองเพิ่มขึ้นตามมาด้วยและชนโมเลกุลแก๊สทำให้เกิดผลผลิตไอออนเพิ่มขึ้นทำให้กระแสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีปริมาณไอออนมากเพียงพอที่จะผลิต

อิเล็กตรอนได้ในจำนวนคงที่ ช่วงนี้ระบบสามารถรักษาสภาพคิซซาร์จได้ด้วยตัวเองโดยไม่ต้องอาศัยแหล่งกำเนิดรังสีจากภายนอกในการผลิตไอออนช่วงนี้เกิดขึ้นในระบบเกิดการเรืองแสงแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดลดค่าลงและกระแสเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เรียกการเรืองแสงปกติหรือออร์มอล โกลว์ (Normal Glow) สถานะนี้อัตราการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองต่ออัตราการชนของไอออนมีค่าค่อนข้างต่ำ คือประมาณ 0.1 สำหรับเป้าคาโทดที่ทำจากวัสดุทั่วไป โดยในช่วงเริ่มต้นของการเรืองแสงหรือ โกลว์ การชนของไอออนบนคาโทดจะปรับตัวเองให้เกิดขึ้นในบางบริเวณ แนวการเรืองแสงอาจเลื่อนไปมาได้และการชนของไอออนบนคาโทด ไม่มีความสม่ำเสมอโดยจะมีความเข้มของบริเวณการเรืองแสงตามแนวขอบหรือมุมของคาโทดที่มีสนามไฟฟ้าสูงเพื่อรักษาสภาพการ โกลว์ (Self-Sustaining) บางบริเวณไว้ เมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นแนวการชนของไอออนจะค่อย ๆ ขยายตัวเพิ่มพื้นที่จนครอบคลุมตลอดผิวคาโทด จนกระทั่งมีค่าความหนาแน่นกระแสเท่ากันตลอด โดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดคงที่



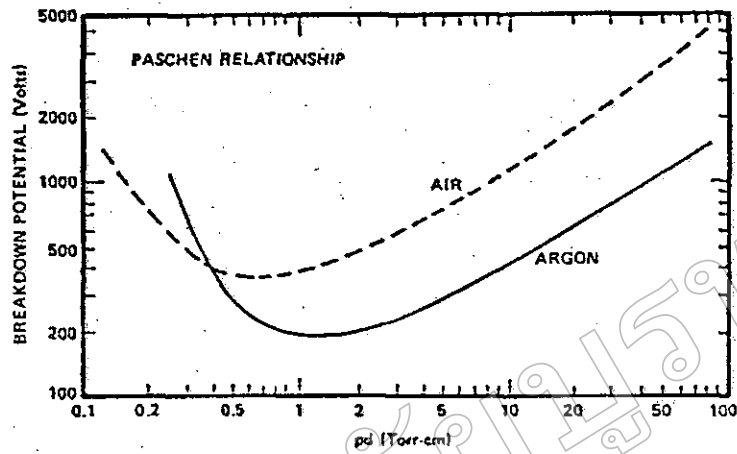
ภาพที่ 2-5 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดของกระบวนการเกิด คิซซาร์ โกลว์คิซซาร์จ ในหลอดสุญญากาศบรรจุแก๊สนีออน (สุพัฒน์พงษ์ คำรงค์รัตน์ และคณะ, 2529)

หลังการชนของไอออนครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดของคาโทดแล้ว การเพิ่มกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบจะทำให้ทั้งแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเรียกว่า ช่วงการเรืองแสงผิดปกติ การเปล่งแสงจ้าขึ้น หรือ แอบนออร์มอล โกลว์ (Abnormal Glow) เป็นช่วงที่ใช้กับระบบสปีดเตอริงและอีกหลาย ๆ ระบบของกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับ โกลว์คิซซาร์จ ในช่วงนี้ถ้าไม่มีการระบายความร้อนให้กับคาโทด เมื่อความหนาแน่นกระแสของคาโทดเพิ่มขึ้นสูงประมาณ 0.1 A/cm^2

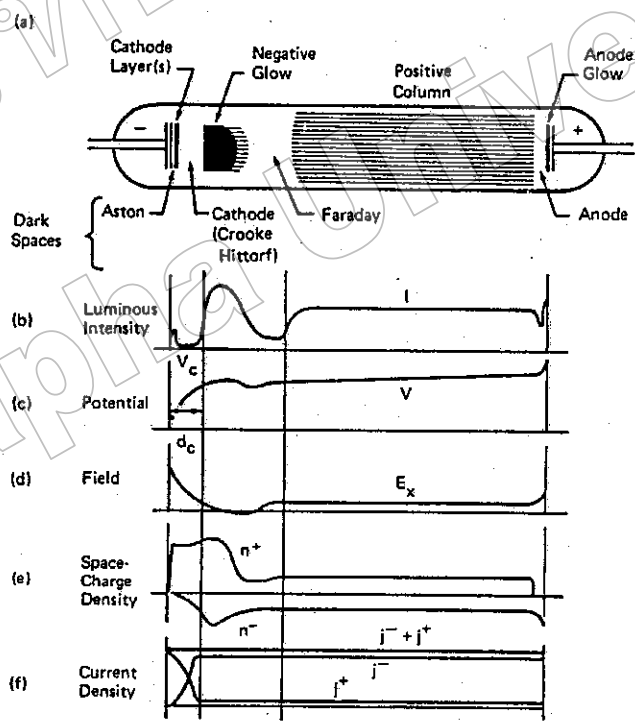
ความร้อนที่เกิดจากการชนของไอออนบวกบนผิวคาโทดจะมากจนเกิดกระบวนการปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบเทอร์มิออนิกเสริมกับการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชนิดที่สอง ตามด้วยกระบวนการถล่มอีกครั้งหนึ่ง ทำให้ความนำไฟฟ้าของแก๊สในระบบสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดตกลง ขณะที่กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสูงและเปล่งประกายจ้าของการอาร์ค (Arc Discharge) ดังภาพที่ 2-5

ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ละลายในกระบวนการ โกลว์ดิสชาร์จมีค่าเปลี่ยนแปลงไปกับระยะทาง d ระหว่างอิเล็กโตรด และระยะปลอดการชนระหว่างอิเล็กตรอนชนิดที่สองและ โมเลกุลของแก๊ส (ระยะทางปลอดการชนของอิเล็กตรอนชนิดที่สองนี้แปรผกผันกับความดันแก๊สและมีค่ามากกว่าระยะทางปลอดการชนของการชนกันเองระหว่าง โมเลกุลแก๊ส) ปกติอิเล็กตรอนชนิดที่สองแต่ละตัวควรมีความสามารถในการผลิตไอออนบวกได้ระหว่าง 10 ถึง 20 ตัว เพื่อให้เกิดกระบวนการถล่มในช่วงของนอร์มอล โกลว์ ถ้าความดันแก๊สต่ำเกินไป (ระยะปลอดการชนยาวขึ้น) หรือระยะทาง d มีค่าน้อยเกินไป อิเล็กตรอนชนิดที่สองจะไม่สามารถผลิตไอออนได้มากพอก่อนการชนกับอะโนด ถ้าความดันแก๊สสูงเกินไป (ระยะปลอดการชนสั้นลง) หรือระยะ d มากเกินไป อิเล็กตรอนชนิดที่สองไม่สามารถเพิ่มพลังงานให้กับตัวเองในสนามไฟฟ้าได้มากพอสำหรับการไอออไนซ์แก๊ส เมื่อเกิดการชนพลังงานจะถูกถ่ายเทให้โมเลกุลแก๊สในรูปการกระตุ้น (Excite) ขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงขึ้นทำให้ไม่สามารถผลิตไอออนบวกได้มากเพียงพอเช่นกันดังนั้นทั้งสองกรณีจะต้องใช้แรงดันไฟฟ้าที่ละลายที่มีค่าค่อนข้างสูง โดยมีจุดหนึ่งระหว่างนี้ที่ใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ละลายต่ำที่สุด ตามกฎของปาส์เชน (Paschen's Law) ซึ่งแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ละลายและผลคูณระหว่างความดันแก๊ส (p) และระยะระหว่างอิเล็กโตรด (d) (ภาพที่ 2-6)

ในระบบสปีดเตอริงทั่วไปสภาวะของการเกิด โกลว์ดิสชาร์จ จะกระทำในช่วงที่ผลคูณของความดันกับระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด (pxd) ซึ่งมีค่าต่ำกว่าจุดต่ำสุดของกราฟมาก (เนื่องจากการเคลือบฟิล์มที่ความดันต่ำทำให้ฟิล์มที่ได้มีคุณภาพดี การแทรกตัวของแก๊สในเนื้อฟิล์มน้อยและลดปริมาณสารปลอมปนในฟิล์ม) จึงต้องการแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นค่อนข้างสูง บางครั้งจึงมีความจำเป็นต้องใช้การเพิ่มความดันชั่วคราวเพื่อให้เริ่มการดิสชาร์จได้ที่แรงดันไฟฟ้าต่ำ



ภาพที่ 2-6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าทะลุและผลคูณระหว่างความดัน (p) และระยะระหว่างอิเล็กโทรด (d) (สุพัฒน์พงษ์ ดำรงรัตน์ และคณะ, 2529)



ภาพที่ 2-7 โกลว์ดีสชาร์จ ของหลอดแก๊สนีออนยาว 50 cm ที่ความดัน 1.33 mbar (Chapman, 1980)

สำหรับลักษณะของพลาสมาที่เกิดขึ้นในกระบวนการ โกลว์ดีสชาร์จ ดังภาพที่ 2-7 ซึ่ง Chapman (1980) ได้อธิบายแต่ละส่วนดังนี้ ช่วงแรกคือช่วงมืดแอสตัน (Aston Dark Space) เป็นบริเวณที่อิเล็กตรอนถูกปล่อยออกจากคาโทด ด้วยพลังงานต่ำประมาณ 1 eV ซึ่งไม่สามารถไอออไนซ์โมเลกุลของแก๊สได้ทำให้เกิดเป็นช่วงมืดขึ้น ถัดออกมาจากผิวคาโทดเป็นบริเวณที่มี

การเปล่งแสงออกมาด้วยความเข้มสูงมาก เรียกว่า คาโทด โกลว์ (Cathode Glow) เป็นบริเวณที่ไอออนของแก๊สจากการดิสชาร์จ และไอออนของอะตอมสารเคลือบซึ่งถูกผลิตขึ้นบริเวณคาโทด มีการรวมตัวเป็นกลางกับอิเล็กตรอนใกล้ผิวคาโทดด้วยกระบวนการต่าง ๆ ทำให้เกิดการปลดปล่อยแสง ซึ่งเป็นความถี่เฉพาะของสารที่ทำคาโทดและของแก๊สที่ใช้เช่นเมื่อคาโทดเป็นทองแดง การเรืองแสงของคาโทด โกลว์จะมีสีเขียว ทองคำมีสีส้มแดง แก๊สอาร์กอนมีสีน้ำเงินฟ้า และแก๊สไนโตรเจนมีสีม่วงแดงเป็นต้น

ถัดจากคาโทด โกลว์ เรียกว่าช่วงมืดครุค หรือช่วงมืดคาโทด (Crook or Cathode Dark Space) พลังงานของอิเล็กตรอนมีค่าสูงกว่าพลังงานในการไอออไนซ์โมเลกุลของแก๊สเมื่อถูกเร่งผ่านสนามไฟฟ้าในระยะทางเฉลี่ยปลดการชนออกมา ทำให้บริเวณปราศจากการชนนั้นไม่มีกระบวนการกระตุ้นหรือไอออไนเซชันเกิดขึ้น การปลดปล่อยแสงจึงไม่เกิดขึ้นในช่วงนี้ และกลายเป็นบริเวณมืด ระยะระยะปลดการชนออกไปอิเล็กตรอนชุดที่สองจะสูญเสียพลังงานส่วนใหญ่โดยการไอออไนซ์โมเลกุลของแก๊สและไอออนบวกที่เกิดขึ้นเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าอิเล็กตรอนมาก ทำให้ระยะปลดการชนของอิเล็กตรอนมีการสะสมของไอออนบวกอยู่มาก (Positive Space Charge) ศักย์ไฟฟ้าเกือบทั้งหมดตกคร่อมบริเวณคาโทดคาร์คสเปซนี้ทำให้สนามไฟฟ้าบริเวณนี้สูงขึ้นมากและมากเกินไปในการเร่งอิเล็กตรอนชนและไอออไนซ์โมเลกุลของแก๊สในเวลาถัดมาจึงทำให้ภายหลังการเกิดออร์มอลโกลว์แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขั้วอิเล็กโตรดมีค่าลดลงตามกราฟในภาพที่ 2-6 ส่วนอิเล็กตรอนเมื่อเลยจากบริเวณผลิตไอออนของคาร์คสเปซแล้วจะมีพลังงานลดลง ดังนั้นพลังงานที่เหลือจึงเพียงใช้ในการกระตุ้นโมเลกุลของแก๊สและเกิดการเรืองแสงขึ้นแม้อิเล็กตรอนจะเป็นอนุภาคที่เคลื่อนที่ได้เร็วแต่พลังงานที่เหลือน้อยมารวมทั้งประจุบวกจากประจุสะสมของไอออนด้านซ้ายมือในบริเวณคาร์คสเปซทำให้อิเล็กตรอนใช้เวลาในการเคลื่อนที่ผ่านช่วงเรืองแสงนี้นานขึ้นและเกิดการสะสมประจุลบบริเวณนี้จึงเรียกรวมบริเวณนี้ว่า เนกาทีฟ โกลว์ (Negative Glow)

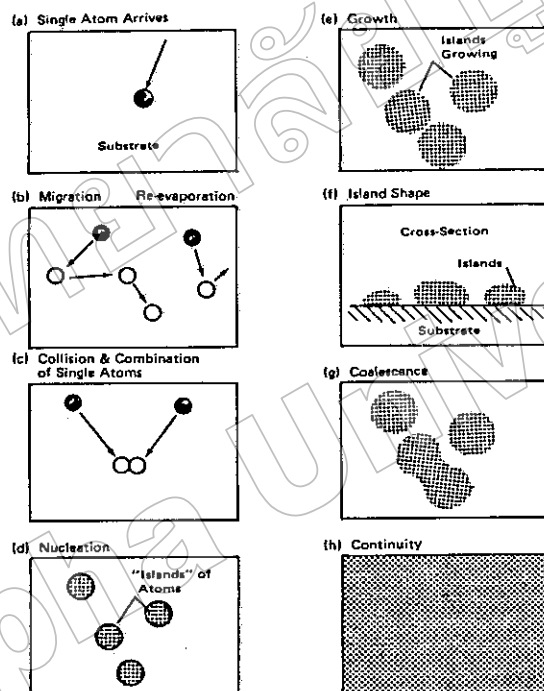
หลังจากนั้นอิเล็กตรอนจะมีพลังงานลดลงมากจนไม่สามารถแม้แต่จะกระตุ้นโมเลกุลของแก๊สให้เปลี่ยนไปอยู่ในระดับพลังงานสูงขึ้นได้ทำให้เกิดบริเวณมืดอีกช่วงหนึ่งเรียกว่า ช่วงมืดฟาราเดย์ (Faraday Dark Space) ถัดจากช่วงนี้กระบวนการที่เกิดขึ้นจะคล้ายกับการดิสชาร์จของทาวนด์เซนด ซึ่งมีปริมาณอิเล็กตรอนค่อนข้างคงที่ถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าค่าต่ำ ๆ ทำให้อิเล็กตรอนถูกเร่งเข้าสู่แอโนดและมีพลังงานสูงพอสำหรับการกระตุ้นโมเลกุลของแก๊สหรือไอออไนซ์แก๊สได้และเกิดการเรืองแสงขึ้นที่บริเวณนี้อีกครั้งหนึ่ง อิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่เร็วจะถูกกวาดเข้าสู่แอโนดโดยเร็วทำให้สภาวะพลาสมาบริเวณนี้มีประจุบวกสูงกว่าจึงเรียกว่า ลำเรืองแสงศักย์ไฟฟ้าบวก (Positive Glow Column)

เนื่องจากการรักษาสถานะโกลว์ดิซซาร์จขึ้นกับปริมาณของอิเล็กตรอนที่ถูกผลิตขึ้น บริเวณคาโทดจากการชนของไอออนที่ถูกผลิตบริเวณแอโนดที่โกลว์ จึงพบว่า การเปลี่ยนแปลง ตำแหน่งแอโนดเพียงเล็กน้อยจะไม่มีผลต่อกระบวนการโกลว์ดิซซาร์จ และเมื่อเลื่อนแอโนดเข้าหา คาโทดจนพ้นช่วงมีดฟาราเดย์และเข้าสู่แอโนดที่โกลว์จนเข้าสู่ช่วงคาโทดคาร์คสเปซ ทำให้ปริมาณ ไอออนที่ถูกผลิตจากอิเล็กตรอนชุดที่สองมีปริมาณน้อยลง การรักษาสภาพโกลว์ดิซซาร์จไว้ จำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นในการเร่งไอออนเข้าชนคาโทดด้วยพลังงานสูงและเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองปริมาณสูงขึ้นซึ่งจะส่งผลถึงปริมาณไอออนที่ถูกผลิตสูงขึ้นด้วยการโกลว์ลักษณะนี้เรียกว่า Obstructed Glow เมื่อเลื่อนแอโนดเข้าใกล้คาโทดต่อมาจนพ้นขอบของ คาโทด คาร์คสเปซ ซึ่งมีระยะทางสั้นกว่าระยะทางปลอดการชนของอิเล็กตรอนจะไม่มีการผลิต ไอออนเกิดขึ้นและกระบวนการโกลว์ดิซซาร์จสิ้นสุด แม้จะเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นอีกก็ไม่สามารถ คงสภาพโกลว์ดิซซาร์จไว้ได้ และถ้าหากมีสิ่งสกปรกบริเวณคาโทดก็อาจการอาร์คเกิดขึ้นได้โดย ไม่เกิดการโกลว์ดิซซาร์จก็ได้

การก่อเกิดฟิล์มบาง

การเกิดฟิล์มบางจากกระบวนการเคลื่อนฟิล์มบางในสุญญากาศ Chapman (1980) ได้ อธิบายไว้ดังนี้ สารเคลือบที่กระทบผิววัสดุรองรับส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของอะตอมหรือ โมเลกุล (ภาพที่ 2-8 (a)) โดยที่พลังงานพันธะ (Bonding Energy) ระหว่างอะตอมของสารเคลือบกับวัสดุ รองรับและอุณหภูมิของวัสดุรองรับ จะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการแพร่ของสารเคลือบบน ผิววัสดุรองรับ อะตอมของสารเคลือบจะตกกระทบผิววัสดุในตำแหน่งที่เรียกว่าตำแหน่งการดูดจับ (Adsorption Site) และเกิดจะทำให้เกิดการเกาะติดหรือถ้ามีพลังงานมากพอก็อาจกระโดดข้าม กำแพงพลังงานไปยังบริเวณที่อยู่ติดกันหรือหลุดออกจากตำแหน่งนั้นไป (ภาพที่ 2-8 (b)) ในช่วง เวลาหนึ่งอะตอมสารเคลือบอาจเกิดการระเหยกกลับ และเกิดการรวมตัวกันระหว่างอะตอมที่มี การแพร่ด้วยกัน เมื่ออะตอมของสารเคลือบรวมตัวกันอาจเกิดเป็นอะตอมคู่ (ภาพที่ 2-8 (c)) ซึ่งมีความเสถียรมากกว่าอะตอมเดี่ยว ซึ่งการรวมตัวกันของอะตอมนั้นจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของ อะตอมเดี่ยวและอัตราเคลือบ (Deposition Rate) อะตอมคู่อาจรวมตัวกับอะตอมเดี่ยวอื่นแล้ว กลายเป็นสามอะตอม (Triplets) หรือ สี่อะตอม (Quadruplets) หรืออื่น ๆ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า สถานะการเกิดนิวเคลียส (ภาพที่ 2-8 (d)) ทำให้ได้กลุ่มอะตอมกึ่งเสถียร (Quasi-Stable Islands) จากนั้นกลุ่มอะตอมจะเริ่มโตขึ้นเรียกว่า การโตเป็นกลุ่มก้อน (Island Growth) ขนาดของกลุ่ม อะตอมจะใหญ่ขึ้น โดยมีจำนวนอะตอมเท่าเดิม หรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (ภาพที่ 2-8 (e) และ 2-8 (f)) การ โตของกลุ่มอะตอมนี้จะเกิดขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งแต่ละกลุ่มชนกัน เรียกว่า การรวมกันเป็นก้อน

ของกลุ่มอะตอม (Agglomeration หรือ Coalescence) (ภาพที่ 2-8 (g)) จากการศึกษาด้วยเทคนิค Transmission Electron Microscopy (TEM) พบว่า ขณะที่กลุ่มอะตอมรวมกันเป็นก้อนอะตอมจะมีพฤติกรรมคล้ายของเหลว (Liquid-Like Behaviour) และมีการจัดเรียงทิศทางในเชิงผลึกวิทยา (Crystallographic Orientation) ด้วย การรวมกันเข้าเป็นก้อนของกลุ่มอะตอมจะเกิดขึ้นจนกระทั่งฟิล์มเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่อง (ภาพที่ 2-8 (h)) แต่ในบางกรณีการเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่องจะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์เมื่อฟิล์มมีความหนาโดยเฉลี่ยประมาณ $0.04-0.05 \mu\text{m}$ ลักษณะผิวของฟิล์มบางขณะเกิดการรวมกลุ่มอะตอมจะดูคล้ายเนินเขาและหุบเขา



ภาพที่ 2-8 การก่อเกิดฟิล์มบาง (Chapman, 1980)

เมื่อพิจารณาการเกิดฟิล์มในสถานะที่เป็นกลุ่มอะตอม (Island) พบว่าอาจเป็นกลุ่มของผลึกเดี่ยวหรือกลุ่มของผลึกคู่หรือมากกว่านั้น ซึ่งกลุ่มอะตอมเหล่านี้จะตกเคลือบลงบนวัสดุรองรับที่เป็นวัสดุหลายผลึก ทิศทางการจัดเรียงตัว (Orientation) ของแต่ละกลุ่มอะตอมนั้นจะเป็นแบบสุ่ม (Random) ทำให้ได้ฟิล์มบางที่มีโครงสร้างเป็นหลายผลึกด้วย แต่ถ้ากลุ่มอะตอมเหล่านี้ตกเคลือบลงบนวัสดุรองรับที่เป็นผลึกเดี่ยว การจัดเรียงตัวของฟิล์มก็จะมีลักษณะเป็นผลึกเดี่ยว และเรียกการเกิดฟิล์มแบบผลึกเดี่ยวประเภทนี้ว่า เอพิแทกซี (Epitaxy)

ถ้าอะตอมที่ผิวของวัสดุรองรับมีพลังงานเพียงพอ อะตอมเหล่านั้นจะเคลื่อนที่เพื่อเลือกเข้าไปอยู่ในตำแหน่งที่มีพลังงานต่ำกว่าเสมอ และความสามารถในการเคลื่อนที่ (Mobility) ของ

อะตอมจะเพิ่มขึ้น ถ้าอุณหภูมิที่ผิววัสดุรองรับสูงขึ้น นอกจากนี้การลดอัตราเคลือบยังสามารถช่วยให้การโตของผลึกเกิดได้ดียิ่งขึ้น เพราะอะตอมมีเวลาในการโตมากพอ ดังนั้นถ้าอุณหภูมิของวัสดุรองรับสูงและมีอัตราเคลือบต่ำจะได้ฟิล์มที่มีขนาดของเกรนใหญ่ขึ้น มีข้อบกพร่องในเกรนน้อยลง และได้ฟิล์มที่มีความหนาเหมาะสำหรับการเชื่อมต่อกันอย่างสมบูรณ์ ในทางกลับกัน ถ้าอุณหภูมิวัสดุรองรับต่ำแต่อัตราเคลือบสูงก็จะให้ผลลักษณะเดียวกัน

โครงสร้างของฟิล์มบาง

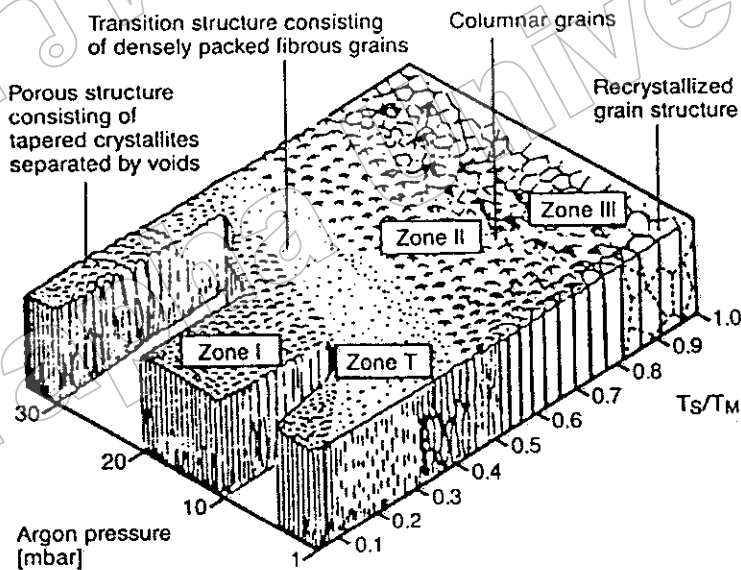
โครงสร้างของฟิล์มบางจะเป็นไปตามเงื่อนไขของอัตราส่วนระหว่างอุณหภูมิเคลือบกับอุณหภูมิหลอมเหลว (T/T_m) ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ตามลักษณะ โครงสร้างและสมบัติทางกายภาพ (ชีวารัตน์ ม่วงพัฒน์, 2544) ดังภาพที่ 2-9

1. บริเวณ 1 (Zone 1) เป็นการเคลือบ ที่เกิดในช่วงอุณหภูมิต่ำ และความดันแก๊สขณะเคลือบมีค่าสูง อะตอมที่อยู่บนผิวแผ่นรองรับจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำ ทำให้เกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มเล็กๆ กระจุกกระจาย และเกิดเป็น โครงสร้างผลึกที่มีลักษณะเรียวยาวแบบ Tapers Crystallites จากนิวเคลียสที่มีปริมาณจำกัด ทำให้เกิดความหนาแน่นของ โครงสร้างต่ำ มีช่องว่างขนาดความกว้างในระดับร้อยอังสตรอม ที่ T/T_m เท่ากับ 0-0.1 ที่ความดัน 1 mtor ถ้าความดันแก๊สสูง บริเวณนี้จะขยายกว้างสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น และทำให้ขนาดของผลึกเพิ่มขึ้น ถ้า T/T_m เพิ่มขึ้น เนื่องจากที่ความดันสูงความหนาแน่นของแก๊สในแชมเบอร์มีมากขึ้น อนุภาคจะเคลื่อนที่ตกลงมาได้ยากขึ้น ทำให้อนุภาคของผิวเคลือบตกลงมาได้ น้อย และขณะที่ตกอาจรวมตัวกับอนุภาคอื่น ทำให้อนุภาคที่ตกลงมามีขนาดใหญ่ และมีเวลานานขึ้น ในการเคลื่อนที่เพื่อฟอร์มตัวเป็นนิวเคลียส จึงทำให้ช่องว่างระหว่างเกรนมีขนาดใหญ่เกิดขึ้น ผิวเคลือบที่ขรุขระมักจะเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของการโตของนิวเคลียส โดยอุณหภูมิที่มีผลต่อการ โตของฟิล์มมักจะมาจากไอออนที่ระดมยิงเป็นส่วนใหญ่

2. บริเวณ T (Zone T) เป็นบริเวณต้นแบบสำหรับการเคลือบฟิล์มด้วยระบบสปัตเตอร์ โดยที่ T/T_m อยู่ในช่วง 0.1-0.5 ที่ความดันแก๊สระหว่างเคลือบ 1 mtor เกิดในช่วงระหว่างบริเวณ 1 และบริเวณ 2 อะตอมที่อยู่บนผิวแผ่นรองรับจะมีปริมาณมากขึ้น และได้รับพลังงานการชน อุณหภูมิของแผ่นรองรับจะเพิ่มขึ้น ค่า Surface Mobility ก็เพิ่มขึ้น และ โครงสร้างในบริเวณ 1 ก็จะเข้าสู่บริเวณ T ซึ่งจะเริ่มมีเกรนยาว (Fibrous Grain) เต็มพื้นที่ และขอบเกรนมีความหนาแน่นสูงขึ้น จึงมีการแพร่ของอะตอมผ่านขอบเกรนที่ไม่แข็งแรงนั้นเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน จนกลายเป็นคอลัมน์นำต่อไป โดยปราศจากช่องว่างบริเวณที่ขอบ

3. บริเวณ 2 (Zone II) ที่บริเวณ 2 จะมีค่า T/T_m อยู่ระหว่าง 0.5-0.8 ที่ความดันแก๊สระหว่างเคลือบ 1 mtor จะเกิดการแพร่ที่รอยต่อระหว่างขอบเกรน จนเกิดเป็น โครงสร้างคอลลัมน์นา ที่เกิดจากการอยู่กันอย่างหนาแน่นของผลึกทั้งหลาย ขนาดของเกรนและความหนาของฟิล์มจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิในการเคลือบและอัตราการเคลือบเพิ่ม (มีผลต่อ Surface Mobility ของอะตอม) และขนาดของคอลลัมน์นา จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากการแพร่ที่บริเวณรอยต่อระหว่างขอบคอลลัมน์นา

4. บริเวณ 3 (Zone III) บริเวณนี้อุณหภูมิสูงสุด T/T_m อยู่ระหว่าง 0.8-1.0 ที่ความดันแก๊สระหว่างเคลือบ 1 mtor การแพร่จะมีค่าสูง และส่งผลต่อ โครงสร้างสุดท้าย โครงสร้างที่ได้จะเป็นเกรนที่มีด้านเท่ากันหมด ขนาดของ คอลลัมน์นา จะมีขนาดใหญ่ และความหนาแน่นเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิสูงอาจทำให้เกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) เนื่องมาจากพลังงานสะสมของความเครียด (Stored Strain Energy) ที่เกิดขึ้นตั้งแต่ตอนเคลือบ เกรนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้จะเปลี่ยนจาก คอลลัมน์นา เป็นผลึกเดี่ยว

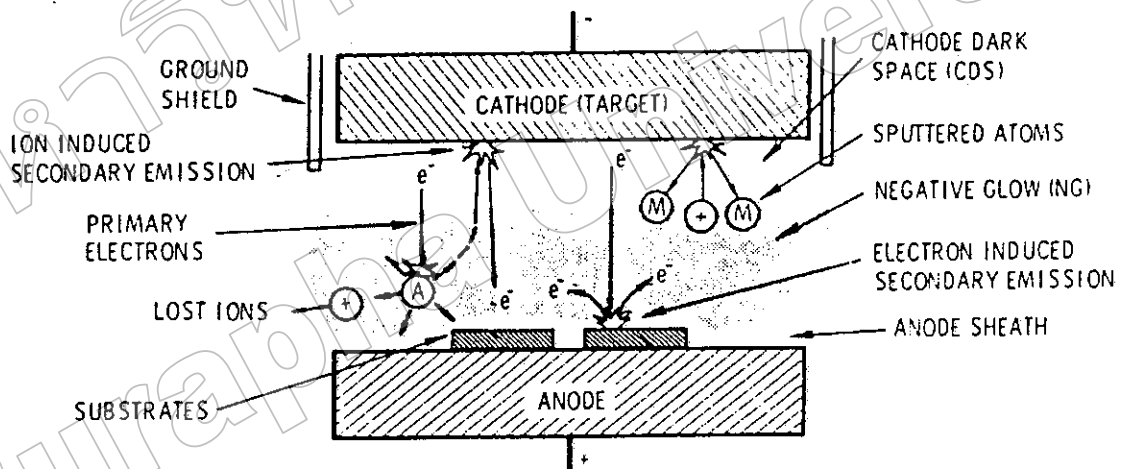


ภาพที่ 2-9 โครงสร้างของการเกิดฟิล์มในรูปแบบต่าง ๆ (ชีวารัตน์ ม่วงพัฒน์, 2544)

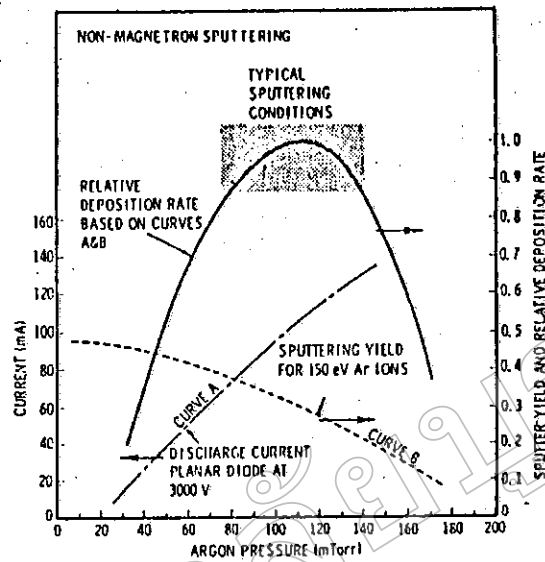
ระบบเคลือบแบบ ดีซี สปีดเตอริง

ระบบเคลือบแบบ ดีซี สปีดเตอริง แบบง่ายที่สุดแสดงได้ดังภาพที่ 2-10 (สุพัฒน์พงษ์ ดำรงรัตน์ และคณะ, 2529; Bunshan, 1994; Smith, 1995) ประกอบด้วยคาโทด คือ แผ่นเป้าสารเคลือบและอโนดใช้เป็นที่วางวัสดุรองรับหรือชิ้นงานที่ต้องการเคลือบ ปกติระยะระหว่างคาโทด

และวัสดุรองรับจะอยู่ระหว่าง 4-10 cm เพื่อป้องกันการสูญเสียอะตอมสารเคลือบที่ผนังของภาชนะสุญญากาศ โดยทั่วไประยะคาร์คัสเปซ อยู่ระหว่าง 1.0-4.0 cm โดยอาโนดจะอยู่บริเวณเนกาทีฟ โกลว์ ส่วนอุปกรณ์ทำงานจะอยู่ในช่วงแอมบอร์มอล โกลว์ดิสชาร์จ แก๊สที่ใช้เป็นแก๊สเฉื่อยซึ่งให้ขีดสูงและไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคลือบ (ปกติใช้แก๊สอาร์กอน) ขณะเกิดโกลว์ดิสชาร์จที่ความดันค่าหนึ่ง กระบวนการไอออไนเซชันจะรักษาสภาพโกลว์ดิสชาร์จไว้ตราบที่ระยะคาร์คัสเปซไม่มากกว่าระยะระหว่างคาโทดและอาโนด เมื่อความดันลดลงหรือแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดสูงขึ้น ระยะปลดการชนของอิเล็กตรอนจะสูงขึ้น ทำให้ระยะคาร์คัสเปซขยายตัวออกและแหล่งผลิตไอออนในระบบมีปริมาณน้อยกระแสลดลงและอะตอมที่ถูกสปัตเตอร์มีปริมาณลดลงตามปริมาณของไอออนและกระแสไฟฟ้าในระบบ ที่ความดันต่ำกว่า 10^{-2} mbar ระยะคาร์คัสเปซจะยาวกว่าระยะระหว่างอิเล็กโตรด และกระแสไฟฟ้าลดลงสู่ศูนย์ ทำให้กระบวนการผลิตไอออนสิ้นสุดลงและไม่มีอะตอมหลุดออกจากเป้าสารเคลือบเนื่องจากการสปัตเตอร์อีก



ภาพที่ 2-10 ระบบสปัตเตอร์แบบ ดีซี สปัตเตอร์ (สุพัฒน์พงษ์ ดำรงรัตน์ และคณะ, 2529)



ภาพที่ 2-11 ผลของความดันในระบบที่มีผลต่ออัตราเคลือบ ค่าyield และกระแสไฟฟ้าในระบบ สปีดเตอร์ริงของนิกเกิลที่ใช้แรงดันไฟฟ้า 3,000 V ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่วางห่างกัน 4.5 cm (สุพรรณพงษ์ ดำรงรัตน์ และคณะ, 2529)

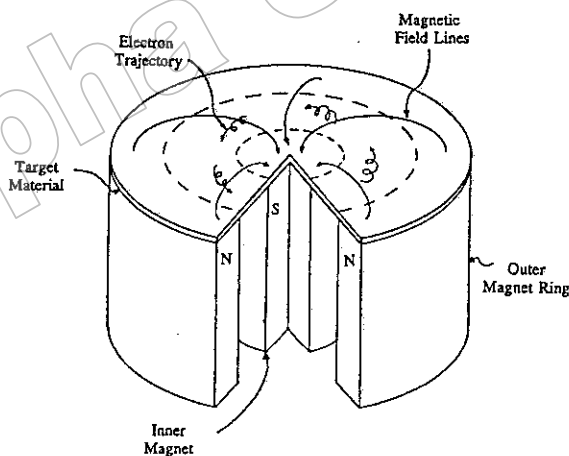
ขณะที่ความดันสูงขึ้นระยะคาร์คัสเปซจะหดสั้นลงบริเวณการผลิตไอออนมีปริมาณสูงขึ้น กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรเพิ่มขึ้นและกระบวนการสปีดเตอร์ริงเกิดขึ้นในอัตราสูงตามความดัน ดังภาพที่ 2-11 เส้นกราฟ A ขณะที่ความดันภายในระบบสูงขึ้นระยะปลอดการชนระหว่างโมเลกุลของแก๊สมีค่าลดลง อะตอมสารเคลือบที่หลุดออกจากเป้าจะส่งผ่านเคลือบบนวัสดุรองรับได้ยากจากการชนกับ โมเลกุลของแก๊สและสะท้อนกลับสู่เป้าสารเคลือบหรือสูญเสียสู่ผนังภาชนะสุญญากาศทำให้ค่าของyield จากการสปีดเตอร์ริงมีค่าลดลง แต่เมื่อความดันสูงขึ้น ดังภาพที่ 2-11 เส้นกราฟ B ผลรวมระหว่างyield และกระแสไอออนจะทำให้อัตราการเคลือบมีค่าสูงสุดที่ความดันค่าหนึ่ง ทั้งนี้พบว่า การสปีดเตอร์ริงเกิดเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า 3,000 V ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่วางห่างกัน 4.5 cm ในแก๊สอาร์กอน การเคลือบจะหยุดที่ความดันมีค่าต่ำกว่า 2.6×10^{-4} mbar และที่ความดันสูงกว่า 1.6×10^{-5} mbar โดยอัตราเคลือบจะมีค่าสูงสุดและลดลงเมื่อความดันสูงเกินค่านี้นั้นบริเวณที่เหมาะสมกับกระบวนการสปีดเตอร์ริงคือบริเวณที่ให้อัตราเคลือบสูงและประสิทธิภาพดีที่สุด จากภาพที่ 2-10 พบว่า ความดันที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบคือ 1.0×10^{-5} mbar ความหนาแน่นกระแสประมาณ 1.0 mA/cm^2 ด้วยอัตราเคลือบ $0.036 \text{ } \mu\text{m/min}$ ซึ่งเป็นอัตราเคลือบที่ค่อนข้างต่ำในขณะที่ใช้แรงดันไฟฟ้าค่อนข้างสูง (สุพรรณพงษ์ ดำรงรัตน์ และคณะ, 2529)

ระบบเคลือบแบบ ดีซี แมกนีตรอน สปีดเตอริง

อัตราการเกิดสปีดเตอริงนั้นจะขึ้นกับผลคูณระหว่างอัตราเร็วและปริมาณไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบ ดังนั้นการเพิ่มอัตราการสปีดเตอริงนั้นนอกจากจะทำให้โดยการเพิ่มอัตราเร็วแล้วยังทำได้โดยการเพิ่มปริมาณไอออนที่วิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ ซึ่งในระบบ ดีซี สปีดเตอริง ปกตินั้น ทำได้เพียงการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด หรือเพิ่มความดัน ซึ่งจะมีขีดจำกัดสูงสุดที่ ความหนาแน่นกระแสประมาณ 1 mA/cm^2 และความดันประมาณ $1.33 \times 10^{-5} \text{ mbar}$ นอกจากนี้ยังพบว่า ในระบบดีซี สปีดเตอริง ทั่วไปอะตอมของแก๊สที่จะเกิดการไอออไนซ์มีค่าน้อยกว่า 1% นอกจากนี้ยังมีข้อเสียเมื่อความดันสูงขึ้นจะทำให้ปริมาณแก๊สที่แทรกตัวในฟิล์มบางที่ได้มีค่าสูงด้วย (สุพัฒน์พงษ์

ดํารงรัตน์ และคณะ, 2529)

ต่อมาได้มีการพัฒนาระบบใหม่ เรียกว่า ระบบดีซี แมกนีตรอน สปีดเตอริง (สุพัฒน์พงษ์ ดํารงรัตน์ และคณะ, 2529; Bunshan, 1994; Smith, 1995) ซึ่งเป็นการใช้สนามแม่เหล็กช่วย โดยจ่ายสนามแม่เหล็กให้มีทิศทางกับผิวหน้าเป้าสารเคลือบและมีทิศตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าซึ่งจะช่วยเพิ่มระยะทางเดินของอิเล็กตรอนให้ยาวขึ้น โดยอำนาจของสนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นทางโค้ง (ภาพที่ 2-12) ทำให้การไอออไนซ์เนื่องจากการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมแก๊สเฉื่อย มีค่าสูงขึ้นซึ่งจะทำให้อัตราการสปีดเตอริงสูงขึ้นด้วย



ภาพที่ 2-12 การเคลื่อนที่ของอนุภาคอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก (สุพัฒน์พงษ์ ดํารงรัตน์ และคณะ, 2529)

ทั้งนี้จากการศึกษาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก พบว่าถ้าอิเล็กตรอนมีทิศทางการเคลื่อนที่ที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก อิทธิพลของสนามแม่เหล็กจะทำให้อนุภาคประจุนั้นเคลื่อนที่ในแนววงกลม (ภาพที่ 2-13 (a)) ด้วยรัศมี

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

เมื่อ W คือ พลังงานของอิเล็กตรอนในหน่วย eV

B คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กในหน่วย Gauss หมุนด้วยความถี่ไซโคลตรอน

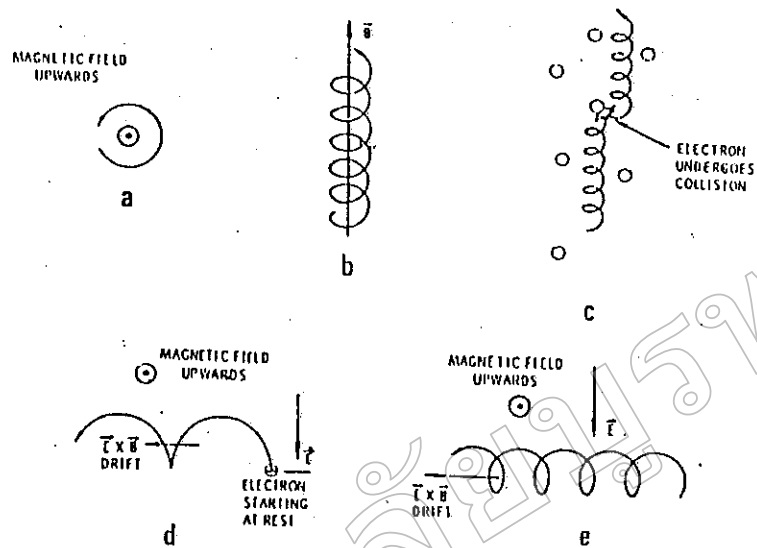
$$\nu = 2.8 \times 10^6 \text{ Hz}$$

ถ้าพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กมีค่า 10 eV และสนามแม่เหล็กมีค่าความเข้ม 100 Gauss รัศมีการหมุนมีค่าเท่ากับ 0.1 cm ด้วยความถี่การหมุนเท่ากับ 2.8×10^6 Hz ภาพที่ 2-13 (b) แสดงอิเล็กตรอนมีความเร็วส่วนหนึ่งในแนวขนานกับสนามแม่เหล็กอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่หมุนควงรอบแนวสนามแม่เหล็กด้วยจำนวนเส้นแรงคงที่ค่าหนึ่งระหว่างนี้ถ้าอิเล็กตรอนชนกับอะตอมแก๊ส ภาพที่ 2-13 (c) แนวการหมุนควงรอบสนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนไป ถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ภายในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกัน อำนาจของสนามทั้งสองนอกจากจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในแนวโค้งแล้วยังสามารถทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเรียกว่า Drift Motion มีค่าเท่ากับ

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

เมื่อ E คือ สนามไฟฟ้าหน่วยเป็น V/cm

B คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กในหน่วย Gauss

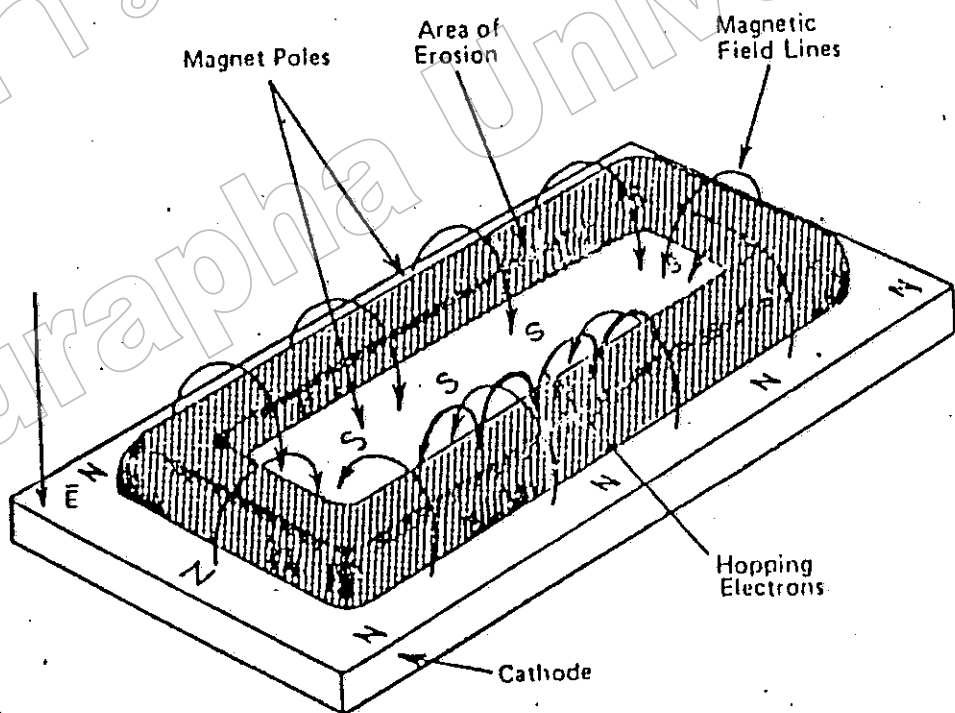


ภาพที่ 2-13 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามต่าง ๆ โดยที่ a, b, c เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กอย่างเดียว ส่วน d และ e เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าร่วมกันในลักษณะต่าง ๆ (สุพัฒน์พงษ์ ดำรงรัตน์ และคณะ, 2529)

กรณีสนามไฟฟ้าบริเวณคาร์บอกซีมีค่าประมาณ $1,000 \text{ V/cm}$ และสนามแม่เหล็กมีค่าประมาณ 100 Gauss จะให้ค่า Drift Velocity เท่ากับ 107 m/s ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูงกรณีพลังงานเริ่มต้นของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้า การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะเป็นรูป Cycloid ดังภาพที่ 2-13 (d) ถ้าอิเล็กตรอนมีพลังงานเริ่มต้นสูงกว่าพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้า การเคลื่อนที่แบบ Drift Motion จะอยู่ในแนววงกลมซ้อนกัน ดังแสดงในภาพที่ 2-13 (e) พฤติกรรมที่ปรากฏต่ออิเล็กตรอนนี้จะเด่นชัดมาก ถึงแม้จะใช้สนามแม่เหล็กมีค่าน้อย ๆ ระหว่าง $50\text{-}500 \text{ Gauss}$ แต่จะมีผลในการเบี่ยงเบนแนวทางการเคลื่อนที่ของไอออน (ซึ่งมีมวลสูงกว่าอิเล็กตรอนมาก) อย่างไม่เด่นชัด

ระบบสปีดเตอริงที่ใช้สนามแม่เหล็กช่วยเพิ่มปริมาณไอออนนั้น ถ้าสนามแม่เหล็กมีทิศทางขนานกับสนามไฟฟ้าจะเรียกว่า สนามตามยาว (Longitudinal Field) จะทำให้ประสิทธิภาพการเพิ่มไอออนไม่สูงนักแต่ไม่ทำให้แนวการเกิดโกลด์คิสซาร์จเปลี่ยนแปลงไปและยังสามารถรักษาความสม่ำเสมอของฟิล์มบางไว้ได้ดี กรณีของสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าเรียกว่า สนามตามขวาง (Transverse Field) โดยกระบวนการเพิ่มปริมาณไอออนเกิดขึ้นดังนี้ หลังจากไอออนบวกชนกับเป้าสารเคลือบและเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองออกมา อิเล็กตรอนชุดที่สอง

จะเคลื่อนที่ในลักษณะเดียวกับภาพที่ 2-13 (d) ทำให้อิเล็กตรอนถูกกักอยู่ในบริเวณสนามแม่เหล็กใกล้ คาโทด และ Drift ตามแนวผิวหน้าของคาโทด (ภาพที่ 2-14) ทำให้อิเล็กตรอนมีโอกาสชนกับโมเลกุลแก๊สบริเวณผิวหน้าเป้าสารเคลือบมากขึ้นจนเพิ่มปริมาณไอออนสูงมากใกล้ผิวเป้าสารเคลือบ อิเล็กตรอนตัวใดที่ไม่ชนโมเลกุลของแก๊สจะเดินทางเป็นวงโค้งเข้าชนเป้าสารเคลือบและผลิตอิเล็กตรอนชุดที่สองมากขึ้นเป็นผลทำให้ไอออนถูกผลิตในปริมาณสูงมากและเกิดใกล้ผิวคาโทด ทำให้เกิดสเปซชาร์จจากไอออนบวกสูงที่ผิวคาโทด ซึ่งอาจสั้นกว่าระยะปลอดการชนใน ดีซี สปีดเตอริงที่ความดันใช้งานมาก แรงเคลื่อนไฟฟ้าเกือบทั้งหมดจะตกคร่อมบริเวณนี้และมีค่าสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณคาร์คสเปซใน ดีซี สปีดเตอริง ขณะไม่มีสนามแม่เหล็กมากทำให้ความต้องการแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดของระบบแมกนีตรอนสปีดเตอริง ลดลงทั่วไปมีค่าประมาณ 300-800 V ถ้าใช้สนามแม่เหล็กกับแมกนีตรอนทรงกระบอกจะเรียกว่า แมกนีตรอนสปีดเตอริงทรงกระบอก (Cylindrical Magnetron Sputtering) และถ้าใช้สนามแม่เหล็กกับระบบ ดีซี สปีดเตอริงที่ใช้เป็นแบบแผ่นราบจะเรียกว่า พลานาร์แมกนีตรอนสปีดเตอริง (Planar Magnetron Sputtering)



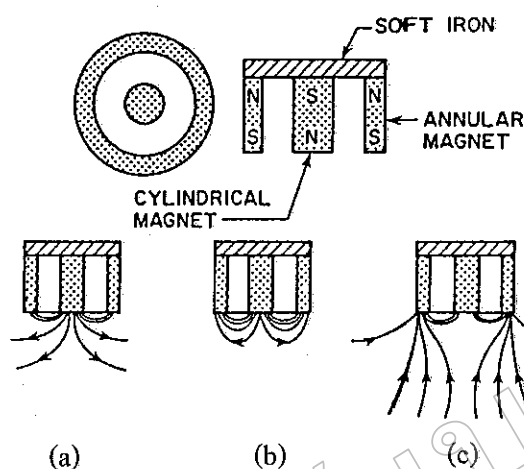
ภาพที่ 2-14 การจัดสนามแม่เหล็กและแนวการกักตร้อนของเป้าสารเคลือบในระบบพลานาร์แมกนีตรอน สปีดเตอริง (สุพัฒน์พงษ์ ดำรงรัตน์ และคณะ, 2529)

ประสิทธิภาพการเพิ่มไอออนที่สูงมากในระบบแมกนีตรอนและพลาสมาที่เกิดขึ้นจะเพิ่มมากบริเวณเป้าสารเคลือบทำให้อัตราการสปีดเตอร์ของระบบนี้มีค่าสูง ขณะที่ความดันในระบบจะมีค่าต่ำแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าเกือบคงที่ที่ทุกค่าของอัตราการสปีดเตอร์ แมกนีตรอน สปีดเตอร์จึงทรงกระบอกทั่วไป มีอัตราการสปีดเตอร์สูงกว่า $1.0 \mu\text{m}/\text{min}$ และมีอัตราเคลือบสูงกว่า $0.2 \mu\text{m}/\text{min}$ ความหนาแน่นกระแสที่ผิวคาโทด ประมาณ $20.0 \text{ mA}/\text{cm}^2$ แรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าระหว่าง $300\text{-}800 \text{ V}$ ที่ความดันประมาณ $5.33 \times 10^{-5} \text{ mbar}$ ประสิทธิภาพการเคลือบสูงเกินกว่า 10 เท่าตัว นอกจากนี้ยังสามารถขยายสเกลใช้กับระบบสปีดเตอร์ขนาดใหญ่ได้ง่ายเมื่อออกแบบใช้งานร่วมกับไตรโอดสปีดเตอร์ ระบบสามารถเคลือบได้ที่ความดันต่ำถึง 10^{-5} mbar

ระบบเคลือบแบบ อัมบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอร์

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

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



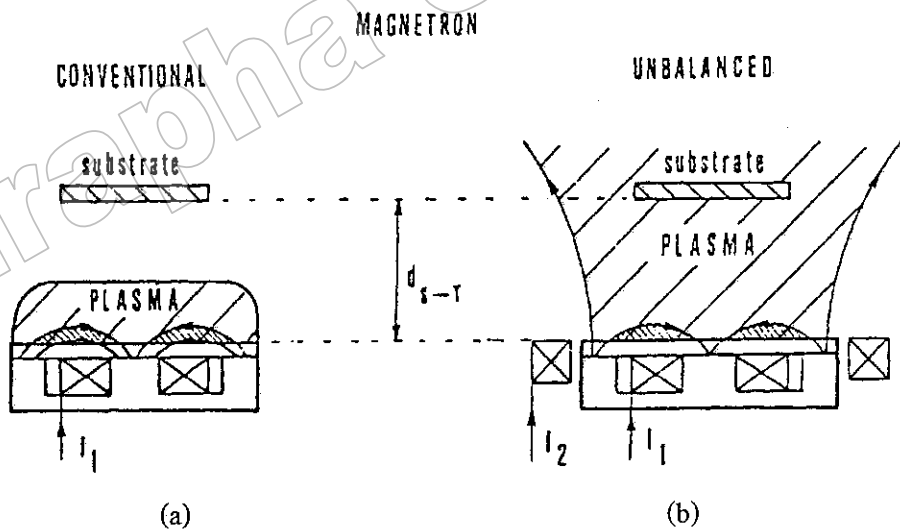
ภาพที่ 2-15 ลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กของระบบอันบัลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง (Rickerby & Matthews, 1991)

ระบบอันบัลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง ได้รับการคิดค้นและตีพิมพ์เผยแพร่โดย Window และ Savvides ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1986 โดยทั้งสองพบว่า การติดตั้งแม่เหล็กที่คาโทด ของระบบสปีดเตอริงปกติ นั้น ถ้าหากทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กด้านใดด้านหนึ่งมากกว่าหรือน้อยกว่าอีกด้านหนึ่ง แล้วสนามแม่เหล็กที่คาโทดจะมีลักษณะไม่สมมาตร ทำให้ปริมาณไอออนที่วิ่งเข้าชนหรือระดมยิงวัสดุรองรับนั้นมีปริมาณเพิ่มขึ้นมากกว่าปกติซึ่งจะมีผลต่อคุณภาพของฟิล์ม โดยตรงการจัดแม่เหล็กของระบบนี้อาจแบ่งเป็น 3 แบบ คือ ความเข้มสนามของแม่เหล็กที่ด้านในมากกว่าด้านนอก (ภาพที่ 2-15 (a)) หรือกลับกัน (ภาพที่ 2-15 (c)) หรือใกล้เคียงกัน (ภาพที่ 2-15 (b))

ถ้าใช้การจัดแม่เหล็กตามภาพที่ 2-15 (a) ไอออนที่ระดมยิงวัสดุรองรับจะมีค่าต่ำ (อัตราส่วนไอออน/อะตอมสารเคลือบประมาณ 0.25: 1) ส่วนการจัดแม่เหล็กตามภาพที่ 2-15 (c) ไอออนที่ระดมยิงวัสดุรองรับจะมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้อัตราส่วนไอออน/อะตอมสารเคลือบมีค่าสูงขึ้นคือประมาณ 2: 1 (เมื่อใช้ความต่างศักย์ไบแอสต่ำ) ปัจจุบันมีนักวิจัยหลายกลุ่มที่นำแนวคิดนี้ไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย ซึ่งมีทั้งที่ใช้แม่เหล็กแบบถาวรและแม่เหล็กไฟฟ้า จากการศึกษาของ Musil และ Kadlec ที่ระบบเคลือบไอออนบัลานซ์พลาสมาแมกนีตรอนเดี่ยวและขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า 2 ขด เคลือบไททานเนียมไนไตรด์ที่ระยะเป้าสารเคลือบและวัสดุรองรับประมาณ 200.0 mm โดยใช้ความต่างศักย์ไบแอสในช่วง -5 ถึง -100 V พบว่า สามารถทำให้ได้ความหนาแน่นกระแสสูงถึง 6.0 mA/cm² ซึ่งสูงมากพอสำหรับใช้ในงานอุตสาหกรรม (Munz, 1991)

หากพิจารณาเปรียบเทียบระบบสปีดเตอริงทั้ง 3 ระบบจะพบว่า ในกรณีระบบสปีดเตอริงปกติ นั้นอิเล็กตรอนที่เกิดจากการไอออไนซ์จะวิ่งไปจับที่อาโนด โดยไม่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ

สปีดเตอร์เลย ดังนั้นเพื่อให้ระบบสปีดเตอร์มีประสิทธิภาพมากขึ้นจึงมีแนวคิดที่จะนำอิเล็กตรอนเหล่านี้เข้ามาช่วยในกระบวนการสปีดเตอร์ซึ่งทำได้โดยการใช้สนามแม่เหล็กช่วยจึงเกิดระบบแมกนีตรอน สปีดเตอร์ ซึ่งเป็นที่ใช้สนามแม่เหล็กช่วยทำให้เกิดอิเล็กตรอนบริเวณหน้าคาโทดเพิ่มขึ้นเนื่องจากอิเล็กตรอนเหล่านี้จะมีส่วนช่วยทำให้กระบวนการสปีดเตอร์คงอยู่อย่างต่อเนื่องจากอำนาจของสนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นทางโค้งทำให้เกิดการไอออนไนซ์อะตอมแก๊สเฉื่อยสูงขึ้น นอกจากนี้สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้ายังทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบมีลักษณะเป็นการชนแบบซำ ๆ ต่อเนื่องกันทำให้เกิดอิเล็กตรอนชุดที่สองออกมาในปริมาณมากขึ้นซึ่งทำให้เกิดการสปีดเตอร์มากตามไปด้วย แต่ก็ยังมีอิเล็กตรอนบางส่วนที่มีพลังงานสูง ซึ่งสามารถจะหลุดออกจากอำนาจของสนามแม่เหล็กนี้ได้ ซึ่งจะวิ่งเข้าหาขั้วอานอดโดยทันที สำหรับในระบบอานบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอร์นั้น อิเล็กตรอนพลังงานสูงที่หลุดออกจากสนามแม่เหล็ก จะถูกยึดไว้ด้วยเส้นแรงแม่เหล็กส่วนเกินของระบบแล้วเคลื่อนที่เป็นทางโค้งไปตามเส้นแรงแม่เหล็กเข้าชนกับอะตอมของแก๊สเฉื่อย และเกิดการไอออนไนซ์เป็นพลาสมาชุดที่สองบริเวณผิวหน้าของวัสดุรองรับทำให้ความหนาแน่นกระแสที่วัสดุรองรับมีค่าสูงมากกว่าในระบบแมกนีตรอน สปีดเตอร์ ปกติมาก (ประมาณ $5.0-10.0 \text{ mA/cm}^2$ ปกติมีค่าน้อยกว่า 1.0 mA/cm^2) โดยพลาสมาที่เกิดขึ้นนี้จะมีส่วนช่วยในการเคลือบฟิล์มที่เรียกว่า Ion-Assisted Deposition ซึ่งจะให้ฟิล์มบางที่ได้นั้นมีความหนาแน่นสูงและมีการยึดติดดีมาก (Munz, 1991)



หมายเหตุ (a) ระบบบาลานซ์แมกนีตรอน สปีดเตอร์

(b) ระบบอานบาลานซ์แมกนีตรอน สปีดเตอร์

ภาพที่ 2-16 ลักษณะพลาสมาของระบบสปีดเตอร์ (Munz, 1991)

สมบัติเชิงรังสีของวัสดุ

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

1. การดูดกลืน การส่งผ่านแสง และช่องว่างพลังงาน

ค่าการดูดกลืนแสงและการส่งผ่านแสงของวัสดุจะขึ้นอยู่กับช่องว่างพลังงาน (Energy Gap, E_g) และความสามารถที่จะเจือสารในสารกึ่งตัวนำเพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนในแถบการนำ (Conduction Band) และโฮลในแถบวาเลนซ์ (Valence Band) พิจารณาค่าช่องว่างพลังงานของวัสดุที่เป็นตัวกำหนดค่าการดูดกลืนและการส่งผ่าน โดยที่การเปลี่ยนสภาพจากวัสดุโปร่งแสงมาเป็นสภาพดูดกลืนนั้น เกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนของวัสดุดูดกลืนพลังงานแสงและเปลี่ยนสภาวะจากพลังงานแถบวาเลนซ์ไปเป็นแถบการนำ ทำให้เกิดโฮลขึ้นในแถบวาเลนซ์ เรียกการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานนี้ว่า Interband Transition อิเล็กตรอนในแถบการนำจะประพุดติตัวคล้ายอิเล็กตรอนอิสระซึ่งจะส่งผลกระทบต่อค่าการสะท้อนแสง วัสดุดังกล่าวนี้จะทึบแสงที่ค่าพลังงานนั้น แต่ถ้าคลื่นแสงที่เข้ามามีพลังงานไม่เพียงพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนของวัสดุเปลี่ยนสภาวะจากแถบวาเลนซ์ไปเป็นแถบการนำ วัสดุดังกล่าวก็จะยอมให้คลื่นแสงที่มีพลังงานไม่เพียงพอนั้นผ่านไปได้นั้นคือวัสดุจะโปร่งแสง ความยาวคลื่นแสงของจุดเปลี่ยนสภาวะ (Thresholds Wavelength, λ_g) และค่าช่องว่างพลังงานจะมีความสัมพันธ์กันตามสมการที่ 4

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

เมื่อ λ_g คือ ความยาวคลื่นแสงที่จุดเปลี่ยนสภาวะ (μm)

E_g คือ ค่าช่องว่างพลังงาน (eV)

พิจารณาวัสดุที่มีค่า E_g ตั้งแต่ 1.6 eV ลงมา จากความสัมพันธ์ตามสมการจะได้ค่าของ λ_g ตั้งแต่ 0.78 μm ขึ้นไป วัสดุดังกล่าวจะทึบต่อแสงที่ตามองเห็นทั้งหมด ส่วนวัสดุที่มีค่า E_g ตั้งแต่ 3.3 eV ขึ้นไปจะได้ค่าของ λ_g ตั้งแต่ 0.37 μm ลงมา วัสดุดังกล่าวจะโปร่งแสงต่อแสงที่ตามองเห็นทั้งหมด ผลของค่าช่องว่างพลังงานดังกล่าวจึงมีความสำคัญต่อการศึกษาวัสดุต่าง ๆ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ ให้เป็นประโยชน์ต่อไป

2. สัมประสิทธิ์การดูดกลืน

พิจารณาสนามไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ในทิศ Z มีอิเล็กตริกดิสเพลสเมนต์ในทิศ X เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\vec{E} = E_x e^{i(\omega t - \tilde{k}z)} \quad (5)$$

เมื่อ E_x คือ แอมพลิจูดของสนามไฟฟ้า

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

\tilde{k} คือ เลขคลื่นเชิงซ้อน (Complex Wavenumber)

t คือ เวลา

i คือ จำนวนเชิงซ้อน ($i^2 = -1$)

จากสมการแมกเวลล์ สามารถเขียนสมการของเลขคลื่นเชิงซ้อนได้เป็น

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

เมื่อ μ คือ ค่าความซึมซาบทางแม่เหล็ก (Magnetic Permeability)

$\tilde{\epsilon}$ คือ สภาพยอมทางไฟฟ้าเชิงซ้อนสัมพัทธ์ (Complex Relative Dielectric Permittivity)

c คือ ความเร็วคลื่น

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

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

เมื่อ ϵ_0 คือ สภาพยอมทางไฟฟ้าในสุญญากาศ (Vacuum Permittivity)

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

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

โดยที่

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

เมื่อ n คือ ดัชนีหักเห (Refractive Index)

k คือ สัมประสิทธิ์การดับสูญ (Extinction Coefficient)

ค่า n และ k จะขึ้นกับความยาวคลื่นของแม่เหล็กไฟฟ้า นำสมการที่ 6 ถึง 9 แทนในสมการที่ 5 จะได้ความสัมพันธ์ใหม่เป็น

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

เนื่องจากความเข้มจะแปรตามกำลังสองของสนามไฟฟ้า ดังสมการที่ 11

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

$I(z)$ เป็นความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งจากผิวของวัสดุถึง z และที่ $z=0$ จะได้

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

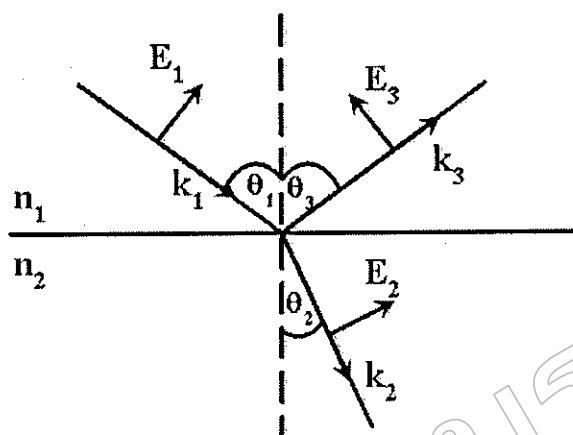
โดยที่
$$\alpha = \frac{2k\omega}{c} = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (13)$$

ค่า α เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (Absorption Coefficient) เป็นสมบัติของวัสดุที่แสดงถึงการลดทอนความเข้มของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ระยะทางหรือความลึกจากผิวของวัสดุที่ทำให้ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าลดลงเป็น $\frac{1}{e}$ เท่าของค่าเดิมเรียกว่า ความลึกผิว (Skin Depth, δ) ซึ่งเป็นส่วนกลับของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนมีสมการเป็น

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

3. การส่งผ่านและการสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่รอยต่อของวัสดุ

กรณีรอยต่อวัสดุ 2 ชนิด ที่มีดัชนีหักเหต่างกัน เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบรอยต่อระหว่างวัสดุดังกล่าว แสดงดังภาพที่ 2-17



ภาพที่ 2-17 เส้นทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านรอยต่อของวัสดุ 2 ชนิดที่มีดัชนีหักเหต่างกัน (Haitjema, 1989)

พิจารณาการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะพบว่าที่รอยต่อของวัสดุจะมีเฟสของคลื่นตกกระทบ คลื่นสะท้อน และคลื่นส่งผ่าน เท่ากัน สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 15

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

ที่ตัวกลางดัชนีหักเห n_1 จะได้ $k_1 = k_3$ ทำให้ได้ $\theta_1 = \theta_3$ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า มุมตกกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเท่ากับมุมสะท้อน จากกฎของสเนลล์ (Snell's Law) ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบและมุมหักเห ตามสมการที่ 16

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

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

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

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

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

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

เมื่อ r_s คือ สัมประสิทธิ์แอมพลิจูดการสะท้อนของคลื่นในทิศตั้งฉากกับผิวระนาบรอยต่อ
 r_p คือ สัมประสิทธิ์แอมพลิจูดการสะท้อนของคลื่นในทิศขนานกับผิวระนาบรอยต่อ
 t_s คือ สัมประสิทธิ์แอมพลิจูดการส่งผ่านของคลื่นในทิศตั้งฉากกับผิวระนาบรอยต่อ
 t_p คือ สัมประสิทธิ์แอมพลิจูดการส่งผ่านของคลื่นในทิศขนานกับผิวระนาบรอยต่อ
 จากกฎของสเนลล์และสมการที่ (17) ถึง (20) สามารถหาค่าของ θ_2 ได้ในเทอมของ n_1 , n_2
 และ θ_1 ดังสมการที่ 21

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

กรณีวัสดุที่มีดัชนีหักเหเชิงซ้อน และคิดค่ามุม θ เป็นเชิงซ้อน เราสามารถแทนค่า k และ
 θ ลงในสมการ (17) ถึง (20) ซึ่งจะได้สัมประสิทธิ์เชิงซ้อนของแอมพลิจูดคลื่นสะท้อน (\tilde{r}) และ
 สัมประสิทธิ์เชิงซ้อนของแอมพลิจูดคลื่นส่งผ่าน (\tilde{t})

การหาความสะท้อน (Reflectance, R) และความส่งผ่าน (Transmittance, T) จาก
 สัมประสิทธิ์เชิงแอมพลิจูด เนื่องจากกำลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะแปรตามกำลังสองของ
 แอมพลิจูด เราสามารถหาค่าดังกล่าวได้ในกรณีของการสะท้อนในแนวตั้งฉากของผิววัสดุ ($\theta_1 = 0$)
 โดยกำหนดให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่จากตัวกลางสูญญากาศ ($n_1 = 1$) ตกกระทบผิววัสดุมีดัชนี
 หักเหเชิงซ้อน $\tilde{n}_2 = n_2 - ik_2$ สัมประสิทธิ์กำลังงานของการสะท้อนหาได้จากสมการที่ 22

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

ทำนองเดียวกันความส่องผ่านหาได้ดังสมการที่ 23

$$T = \left| \tilde{t}_p \tilde{t}_p^* \right| = \left| \tilde{t}_s \tilde{t}_s^* \right| \quad (23)$$

ความสัมพันธ์ของความสะท้อนและความส่องผ่านแสดงดังสมการที่ 24

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

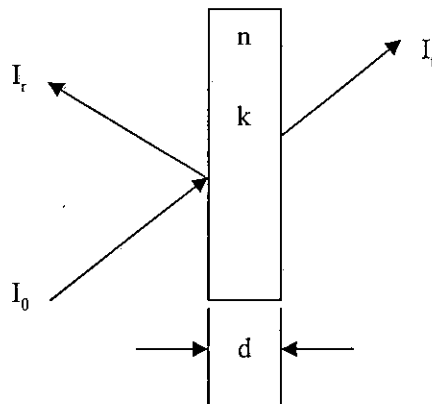
เมื่อ α คือ สัมประสิทธิ์กำลังงานของการดูดกลืนรังสีของวัสดุ
สมการ (24) นี้สามารถเรียกได้เป็นกฎการอนุรักษ์พลังงาน

4. การคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง และช่องว่างพลังงาน จากสัมประสิทธิ์
การส่องผ่านแสง

สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสามารถคำนวณได้โดยตรงจากสัมประสิทธิ์การส่องผ่าน
(มติ ห่อประชุม, 2548) พิจารณาแสงตกกระทบสารตัวอย่างในแนวตั้งฉาก แสดงดังภาพที่ 2-18 ให้
ความเข้มของแสงที่ตกกระทบเป็น I_0 ความเข้มของแสงที่ทะลุผ่านเป็น I_t และความเข้มของแสง
สะท้อนที่สะท้อนกลับเป็น I_r ความเข้มแสงที่ทะลุผ่านและสะท้อนกลับ สามารถเขียนในรูปของ
ความส่องผ่านและความสะท้อน ตามลำดับดังสมการที่ 25 และสมการที่ 26

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

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



ภาพที่ 2-18 การส่องผ่านแสงและการสะท้อน

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

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

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

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

เมื่อ c คือ ค่าคงที่ เกิดจากการประมาณให้สัมประสิทธิ์การสะท้อนคงที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนสูงกว่ำความเป็นจริง ในการทดลองจะต้องนำสัมประสิทธิ์การดูดกลืนพื้นหลัง (Background Absorption Coefficient, α_0) ที่เกิดขึ้นจากข้อบกพร่องมาลบออกจากค่า α เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้อง

ปรากฏการณ์ดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ เป็นอันตรกิริยาระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับสารกึ่งตัวนำ นิยามให้ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง คือปริมาณความเข้มแสงที่ลดลงต่อหน่วยระยะทางดังสมการที่ 29

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

เมื่อ I คือ ความเข้มแสงที่ระยะทาง x ใด ๆ ในตัวกลาง

พิจารณากรณีแสงเอกรงค์ (Monochromatic Light) เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีแกนโพลาไรเซชันแบบระนาบ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสามารถเขียนได้เป็น

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

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

เมื่อ E คือ สนามไฟฟ้าอัมพลิจูด E_0

H คือ สนามแม่เหล็กมีอัมพลิจูด H_0

ω 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 คือเวกเตอร์จริง (Real Part) และเวกเตอร์จินตภาพ (Imaginary Part)

ตามลำดับ

สมการที่ 30 และสมการที่ 31 จะเป็นผลเฉลยของสมการของแมกซ์เวลล์ ค่าสภาพซึมได้ทางแม่เหล็ก (Magnetic Permeability) $\mu = 1$ ถ้า

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

เมื่อ ϵ คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน (Complex Dielectric Constant)

สำหรับตัวกลางที่มีดัชนีหักเหเป็นปริมาณเชิงซ้อน คือ

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

เมื่อ n คือ ค่าจริงของดัชนีหักเหของตัวกลาง

k คือ ค่าจินตภาพหรือสัมประสิทธิ์การดับสูญของดัชนีหักเหของตัวกลางสำหรับระนาบคลื่นเอกพันธ์ จะได้

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

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

เมื่อ c คือ ความเร็วแสง

สำหรับการส่งผ่านพลังงานต่อหน่วยเวลาคือ

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

เมื่อ k_E คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยของ K_1 และ K_2
แทนสมการที่ 30 ลงในสมการที่ 36 จะได้

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

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

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

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นแสงในสุญญากาศ
จากสมการที่ 38 จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของตัวกลางขึ้นกับความยาวคลื่นและสัมประสิทธิ์การดับสูญ ที่ความถี่แสงเดียวกันในตัวกลางต่างชนิดกัน การดูดกลืนแสงก็จะต่างกัน การดูดกลืนแสงเป็นสมบัติเฉพาะตัวของตัวกลางแต่ละชนิด

กรณีของไททานเนียม ไดออกไซด์ การคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานสามารถหาได้จากสมการที่ 39 (มตี. ห่อประชุม, 2548)

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

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),

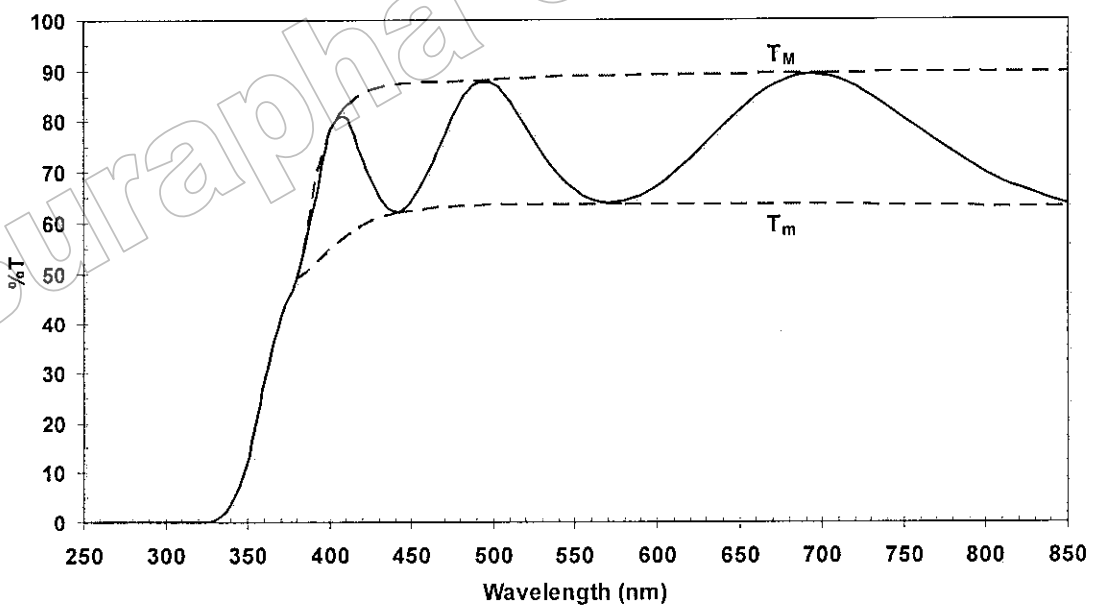
$m = 2$: การย้ายพลังงานแบบชนิดไม่ตรงแบบยอมรับได้ (Indirect Allowed),

$m = 1$: การย้ายพลังงานแบบชนิดไม่ตรงแบบต้องห้าม (Indirect Forbidden)

จากการทดลองและการคำนวณในงานวิจัยที่ผ่านมาสรุปได้ว่า โททาเนียมไดออกไซด์มีแถบช่องว่างพลังงานชนิดตรงแบบต้องห้าม และสามารถแตกย่อยออกไปเป็นช่องพลังงานชนิดไม่ตรงแบบยอมรับได้ ซึ่งการเปลี่ยนสภาพเป็นช่องพลังงานไม่ตรงแบบยอมรับนี้ มีอิทธิพลต่อการดูดซับคลื่นแสงมากกว่าขอบการดูดซับเพียงชนิดเดียว อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของแถบพลังงานต้องห้ามมีไม่มากนัก ดังนั้นจึงกำหนดให้ $m = 2$ ในสมการที่ 39

5. การคำนวณดัชนีหักเหและสัมประสิทธิ์การดับสูญ จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง การหาดัชนีหักเหและสัมประสิทธิ์การดับสูญของฟิล์มบางสามารถทำได้หลายวิธีแต่มีวิธีหนึ่งที่ไม่ยุ่งยากนัก ซึ่งพัฒนาขึ้นโดย Swanepoel (1983) โดยอาศัยแนวคิดพื้นฐานจากงานของ Manifacier et al. (1976) ที่อาศัยเพียงสเปกตรัมการส่งผ่านแสง ในการคำนวณเท่านั้นที่เรียกว่า Envelope Method

การคำนวณดัชนีหักเหและสัมประสิทธิ์การดับสูญ ด้วยวิธี Envelope Method เริ่มจากการสร้างซอง (Envelope) กลุ่มสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางซึ่งวัดจากเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยการลากเส้นผ่านค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของสเปกตรัมการส่งผ่านแสงตลอดช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการคำนวณค่า และจากซองที่สร้างขึ้นนี้จะทำให้สามารถหาค่าการส่งผ่านแสงสูงสุด (T_M) และ ต่ำสุด (T_m) ของความยาวคลื่นที่ต้องการ ได้ แสดงดังภาพที่ 2-19



ภาพที่ 2-19 ตัวอย่างของคลุ่มสเปกตรัมการส่งผ่านแสงสำหรับใช้ในการคำนวณดัชนีหักเหสัมประสิทธิ์การดับสูญ โดยลากเส้นผ่านค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของสเปกตรัม

การหาค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง (n) สามารถหาได้จากสมการ (Swanepoel, 1983)

$$n = \sqrt{N + \sqrt{N^2 - n_2^2}} \quad (40)$$

เมื่อ

$$N = 2n_2 \frac{T_M - T_m}{T_M T_m} + \frac{n_2^2 + 1}{2}$$

T_M คือ ค่าการส่งผ่านสูงสุด

T_m คือ ค่าการส่งผ่านสูงสุดและต่ำสุดตามลำดับ

n_2 คือ ดัชนีหักเหของวัสดุรองรับ

การหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของฟิล์มบาง (k) สามารถหาได้จากสมการ

$$k = \frac{\alpha(\lambda)\lambda}{4\pi} \quad (41)$$

เมื่อ $\alpha(\lambda)$ คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของฟิล์มบาง ซึ่งหาได้จากสมการ

$$\alpha(\lambda) = \frac{-\ln X}{d} \quad (42)$$

โดยที่ค่า d คือความหนาของฟิล์มบาง และ

$$X = \frac{P + \sqrt{P^2 + 2QT(1 - X_2 X_3)}}{Q} \quad (43)$$

เมื่อ $T = \sqrt{T_M T_m}$

$$P = (X_1 - 1)(X_2 - 1)(X_3 - 1)$$

$$Q = 2T(X_1 X_2 + X_1 X_3 - 2X_1 X_2 X_3)$$

$$X_1 = \left[\frac{1-n}{1+n} \right]^2$$

$$X_2 = \left[\frac{n-n_2}{n+n_2} \right]^2$$

$$X_3 = \left[\frac{n_2-1}{n_2+1} \right]^2$$

การหาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง

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

1. การศึกษาโครงสร้างด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

ลักษณะเฉพาะสำคัญอย่างหนึ่งของฟิล์มบางคือการศึกษาโครงสร้างผลึก หรือ เฟส ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (Diffraction Analysis) ซึ่ง กมล เอี่ยมพนากิจ (2547) ได้อธิบายหลักการของเทคนิคนี้ไว้ดังนี้ การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับการแยกแยะ โครงสร้างของสารที่ใช้ในการเคลือบ โดยการวิเคราะห์อาศัยการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนกับมาตรฐาน JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) ของสารนั้น ดังนั้น X-Ray Diffraction เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ที่สะท้อนจากผลึก ใช้หลักการของการเลี้ยวเบนของคลื่นโดยพบว่ารังสีเอกซ์เลี้ยวเบนได้เมื่อให้ตกกระทบผลึก ซึ่ง Bragg ได้เสนอแนวคิดที่เราสามารถมองผลึกประกอบด้วยชั้น (Layer) หรือ ระนาบ (Plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมที่ตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้คลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่าง ๆ ดังกล่าวจะมีความเข้มสูงถ้ารังสีเอกซ์ 1 และ 2 ตกกระทบทำมุม θ กับระนาบของผลึก A และ B สนามไฟฟ้าของรังสีเอกซ์จะก่อให้เกิดแรงกลอมน์กระทำบนอิเล็กตรอนที่ P กับ Q ให้สั้นด้วยความถี่เดียวกับรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบ และอิเล็กตรอนนั้นแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นรังสีเอกซ์ออกไปทุกทิศทางแต่ในทิศทาง $1'$ และ $2'$ ซึ่งเสมือนรังสีเอกซ์สะท้อนออกจากระนาบของผลึกจะไปแทรกสอดแบบเสริมกัน (In Phase) แม้ว่าแบบจำลองที่กล่าวมาจะไม่ถูกต้องในทางกายภาพ เนื่องจากแท้จริงแล้วระนาบของอะตอมไม่ได้สะท้อนคลื่นแต่วิธีนี้ก็ใช้ได้ทางเรขาคณิต พิจารณา

$$\delta = n\lambda \quad (44)$$

เมื่อ δ คือ Path Difference

λ คือ Wavelength

n คือ Integral of Wavelength

จากภาพที่ 2-20

$$\delta = SQ + QT = 2SQ \quad (45)$$

จากรูปตรีโกณมิติพื้นฐาน

$$\delta = 2PQ \sin \theta \quad (46)$$

โดย PQ คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ d_{hkl}

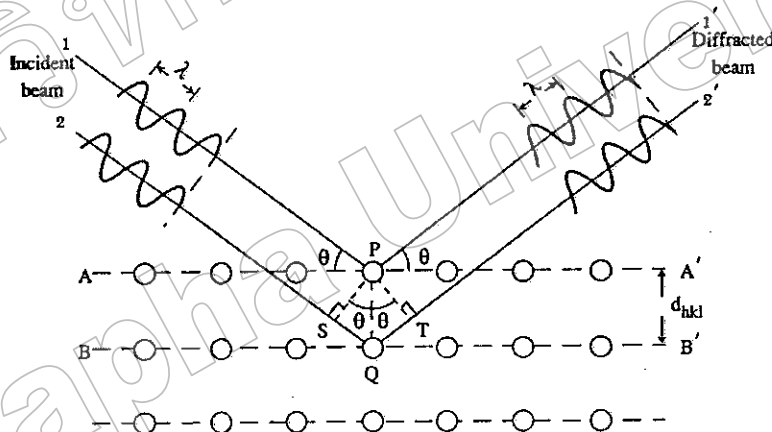
$$\delta = 2d \sin \theta \quad (47)$$

จากสมการ (44) เท่ากับ (47) จะได้

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (48)$$

เรียกสมการที่ (48) นี้ว่า สมการการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากผลึก (Bragg's Law)

โดยที่ λ เป็นความยาวคลื่น n เป็นลำดับของการสะท้อน d_{hkl} เป็นระยะห่างระหว่างระนาบ (hkl) และ θ เป็นมุมตกกระทบและมุมสะท้อนเมื่อวัดจากแนวระนาบที่กำลังพิจารณา



ภาพที่ 2-20 แบบจำลองการเรียงตัวของอะตอม (กมล เอี่ยมพนากิจ, 2547)

ในภาพที่ 2-20 เป็นแบบจำลองสำหรับการพิสูจน์กฎของแบรกก์ อะตอมเรียงตัวเป็นระเบียบโดยมีระยะห่างระหว่างอะตอมใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ($\sim 10^{-10}$ m) จะทำหน้าที่เป็นเสมือนเกรตติง เลี้ยวเบนแต่จะเป็นเกรตติงเลี้ยวเบนแบบ 3 มิติ

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

ตำแหน่งของพีก ที่มีค่ามากที่สุดสามารถบอกถึงขนาดและรูปร่างของหน่วยเซลล์ได้ ในขณะที่ความกว้างให้ค่าขนาด การจัดเรียงตัว (Orientation) และความเครียด (Strain) ภายในเกรนของวัสดุหลายผลึก กรณีของการศึกษาขนาดของผลึกจากรายงานการวิจัยของ Kim et al. (2002) ได้ทำการศึกษามาตรฐานของผลึกไททาเนียมไดออกไซด์ที่อบฟิล์มบางด้วยอุณหภูมิต่าง ๆ โดยอาศัย Scherrer Equation ดังสมการที่ 49

$$L = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (49)$$

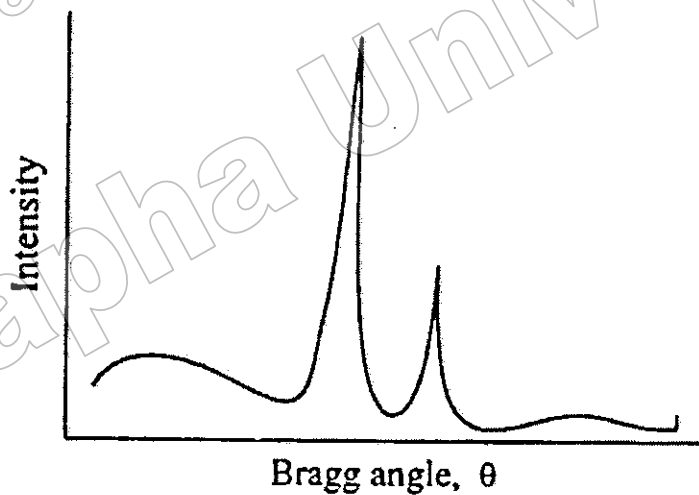
เมื่อ L คือ ขนาดของผลึกฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์

k คือ ค่าคงที่เท่ากับ 0.94

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

β คือ ความกว้างครึ่งหนึ่งของพีกที่มีค่าความเข้มสูงสุด

θ คือ ครึ่งหนึ่งของมุมตรงจุดศูนย์กลางพีก



(b)

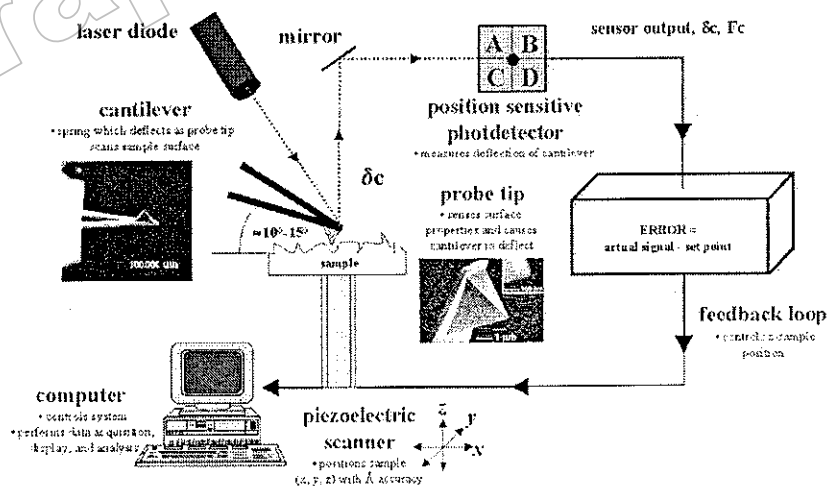
ภาพที่ 2-21 ความเข้มของพีกที่แสดงถึงระนาบผลึกของวัสดุในตำแหน่งที่มีการสะท้อนรังสี (กมล เอี่ยมพนากิจ, 2547)

บางครั้งตำแหน่งของรูปแบบการเลี้ยวเบนที่วัดได้อาจจะเลื่อนไปด้วยค่ามุมที่สูงขึ้น เนื่องจากผลของความเค้นหลงเหลือ (Residual Stress) ในผิวสารเคลือบนั้นเอง ส่วนความเข้มของสัญญาณที่ได้อาจไม่เป็นไปตามค่ามาตรฐาน JCPDS เพราะเกิดการการจัดเรียงตัวในทิศทางที่ชอบ

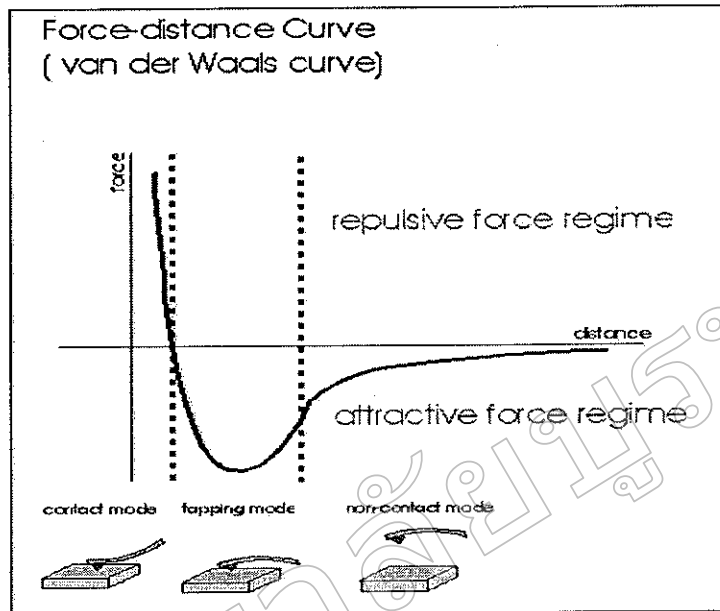
(Preferred Orientation) ของอะตอมในฟิล์มนอกจากนี้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ยังสามารถให้ข้อมูลที่บอกถึงส่วนผสมทางเคมีของเฟส (Phase Composition) และค่าพารามิเตอร์ของแลตทิซ (Lattice Parameter Measurement)

2. การศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยเครื่อง Atomic Force Microscopy (AFM)

ลักษณะเฉพาะสำคัญอีกอย่างหนึ่งของฟิล์มบางคือ ความหนาและลักษณะพื้นผิว เนื่องจากฟิล์มบางที่เตรียมได้นั้นจะบางมากรวมถึงขนาดของเกรนและพื้นผิวในระดับนาโน ปัจจุบันการศึกษาคความหนาและลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางจะใช้เครื่องมือเฉพาะที่เรียกว่า AFM ซึ่ง จตุพร วุฒิกนกกาญจน์ (2542) ได้อธิบายหลักการการทำงานของเครื่อง AFM ไว้ดังนี้ เทคนิค Atomic Force Microscopy เป็นการสร้างภาพของผิววัสดุจากแรงกระทำระหว่างผิววัสดุกับ ตัวตรวจวัดที่ทำจากเข็มขนาดเล็ก (Probe Tip) และเป็นเทคนิคหนึ่งในกลุ่มของ Scanning Probe Microscopy (SPM) ซึ่งเป็นกลุ่มเทคนิคที่สามารถใช้ในการศึกษาสภาพพื้นผิวของวัสดุประเภทต่างๆ ได้ หลักการพื้นฐานคือ การใช้เข็มตรวจวัดขนาดเล็กที่ทำจากซิลิคอนไนไตรด์ (Silicon Nitride, Si_3N_4) เคลื่อนที่กราด (Scan) ไปทั่วบริเวณต่างๆ ของผิววัสดุ โดยมีตัวเพียโซอิเล็กทริกสแกนเนอร์ (Piezoelectric Scanner) เป็นตัวควบคุม สภาพผิวที่แตกต่างกันไปจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกับ เข็มตรวจวัดแตกต่างกันไป โดยตัวคานที่มีเข็มเกาะติดอยู่จะมีการ โค้งงอ (Bending) ปริมาณ การโค้งงอนี้สามารถตรวจวัดได้โดยใช้โฟโตดีเทคเตอร์ (Photo Detector) ดังภาพที่ 2-22 ภาพที่ได้จากเทคนิคนี้จะสอดคล้องตามสภาพพื้นผิวในแต่ละบริเวณที่ตรวจสอบ ในเทคนิค AFM นี้ สิ่งที่ทำให้คานที่มีเข็มเกาะอยู่เกิดการ โค้งงอขึ้นก็คือ แรงกระทำระหว่างอะตอม ซึ่งอาจจะเป็นแรงดึงดูดหรือแรงผลักก็ได้ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างเข็มปลายแหลมกับพื้นผิว ดังแสดงในภาพที่ 2-23



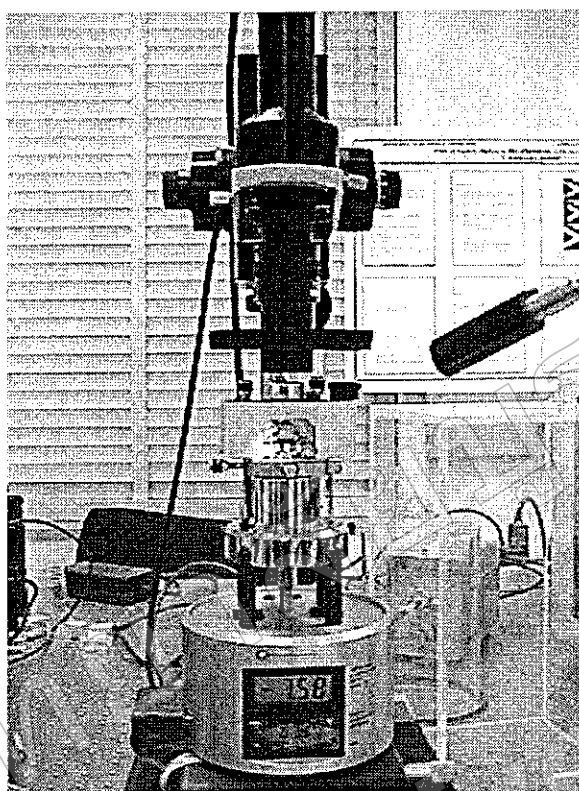
ภาพที่ 2-22 องค์ประกอบหลักของเครื่องมือ Scanning Probe Microscope (Nano Physics Group, 2006).



ภาพที่ 2-23 ลักษณะของแรงกระทำระหว่างอะตอมที่เกิดขึ้นในระยะห่างระหว่างวัตถุต่าง ๆ
(University of Houston, 2006)

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

ภาพที่ 2-24 แสดงให้เห็นถึงเครื่อง Atomic Force Microscope รุ่น NanoScope IIIa บริเวณตรงกลางเป็นบริเวณที่ใช้วางชิ้นงาน โดยมีเข็มวัดวางอยู่ด้วย ส่วนที่บริเวณด้านบนของเครื่องมือจะมีกล้องจุลทรรศน์วิดีโอ (Video Microscope) ติดตั้งไว้เพื่อใช้สำหรับดูตำแหน่งของเข็มที่จะทำการวางลงบนบริเวณต่าง ๆ บนผิว ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์วิดีโอนี้จะแสดงทางจอโทรทัศน์ นอกจากนี้ในบริเวณด้านบน จะมีแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์และโฟโตดีเทคเตอร์ที่ใช้วัดการโค้งงอของคานยื่น



ภาพที่ 2-24 เครื่อง AFM แบบ Multimode (The Ohio State University, 2006)

การเก็บข้อมูลด้วยเทคนิค AFM นั้นสามารถเก็บข้อมูลได้ 4 ลักษณะ (Mode) ดังนี้คือ

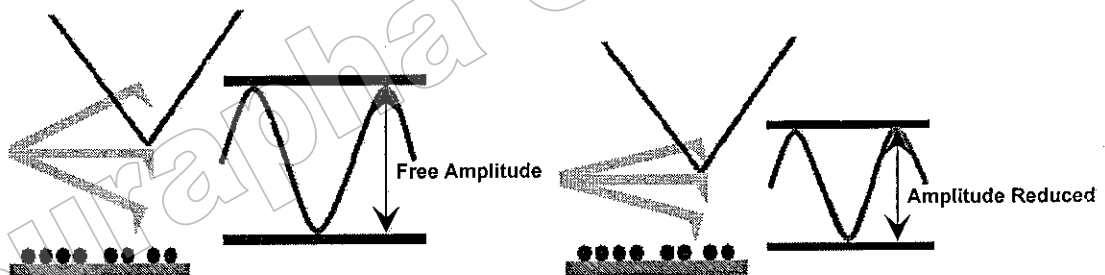
1. Contact Mode เป็นการศึกษาสภาพผิวชิ้นงาน โดยการขยับให้เข็มไจล (Slide) ไปบนผิวงานซึ่งจะทำให้มีแรงผลึกเกิดขึ้น เนื่องจากเข็มกับผิวงานจะอยู่ใกล้กันมาก แรงผลึกนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพผิว ซึ่งจะทำให้มีการโก่งงอ (Deflection) ของคานยื่น (Cantilever) ที่มีเข็มยึดเกาะอยู่ที่ปลาย โดยปริมาณการโก่งงอจะเปลี่ยนแปลงสอดคล้องเป็นไปตามลักษณะของผิวงาน

ข้อจำกัดของเทคนิคแบบ Contact Mode คือ การลากให้เข็มตรวจวัดเคลื่อนที่ไจลข้ามไปยังบริเวณต่าง ๆ บนผิวงาน อาจจะทำให้พื้นผิววัสดุที่กำลังศึกษาต่างไปจากสภาพเดิมที่แท้จริง หรืออาจเกิดความเสียหายขึ้นแก่ผิวงานได้ ยกตัวอย่างเช่น ภายใต้อากาศปรกติซึ่งมีอากาศและความชื้นในอากาศ อาจเกิดหยดน้ำหรือสิ่งสกปรกบนผิวงาน ซึ่งเมื่อเข็มวัดเคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวที่มีชั้นบาง ๆ ของหยดน้ำและสิ่งสกปรกดังกล่าว จะทำให้มีแรงดึงไฟฟ้าสถิตและแรงดึงผิวดึงให้ตัวคานที่มีเข็มยึดอยู่ที่ปลายเคลื่อนที่ลงมาสัมผัสกับชั้นดังกล่าว ทำให้แรงระหว่างเข็มกับผิวงานที่เกิดขึ้นโดยรวมเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ ยังอาจทำให้ผิวงานถูกทำลาย เช่น เกิดการฉีกขาดจากการลากเข็มไปบนผิวงาน

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

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

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



ภาพที่ 2-25 ลักษณะการสั่นของคานที่มีเข็มติด (Nanocraft Exploring Nanospace, 2006)

ภาพที่ 2-25 แสดงการสั่นของคานในสถานะอิสระหรือตอนเริ่มต้นที่ยังไม่เกิดการสัมผัสและขยับเคลื่อนที่ไปบนผิวงาน จะเห็นได้ว่าแอมพลิจูดจะยังสูงอยู่เมื่อเทียบกับแอมพลิจูดที่เกิดจากการสั่นของคานเมื่อมีการแตะสัมผัส (Tapping) ลงบนผิวงาน เนื่องจากว่าในการสัมผัสกันนั้นจะมีการสูญเสียพลังงานของการสั่น ทำให้แอมพลิจูดของการสั่น (Oscillation Amplitude) ลดลง ซึ่งค่าที่ลดลงนี้จะใช้เป็นตัววัดและบอกถึงลักษณะของสภาพพื้นผิวที่มีความสูงต่ำแตกต่างกันไป ยกตัวอย่างเช่น เมื่อเข็มตรวจวัดเคลื่อนที่ผ่านบริเวณผิวงานที่มีความนูนสูงขึ้นมา ตัวคานก็จะมีพื้นที่

หรือแอมพลิจูดในการสั่นลดลง ในทางตรงข้าม เมื่อเข็มปลายแหลมเคลื่อนที่ผ่านบริเวณผิวที่มีการขูดหรือมีความลึกลงไป ตัวคานาก็จะมีพื้นที่ในการสั่นเพิ่มขึ้น และมีแอมพลิจูดสูงขึ้น (เข้าใจคือแอมพลิจูดสูงสุดในสภาพที่ยังไม่มีการทำการสแกน) แอมพลิจูดของการสั่นที่เปลี่ยนแปลงไปก็จะถูกวัด โดยแอมพลิจูดดีเทคเตอร์ (Amplitude Detector) แล้วส่งผลเข้าไปยังตัวควบคุม ซึ่งจะทำการวัดสัญญาณพร้อมทั้งปรับระยะระหว่างเข็มกับผิวงาน เพื่อรักษาให้ค่าแอมพลิจูดของการสั่นให้คงที่ต่อไป จนกว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดของการสั่นตามสภาพพื้นผิวในบริเวณถัดไป

4. Force Modulation Mode สำหรับพื้นผิวของวัสดุที่มีองค์ประกอบหลายเฟส พบว่าเทคนิค AFM ในวิธีแบบ Force Modulation Mode จะเป็นที่นิยมใช้มาก โดยเทคนิคนี้จะเป็นการวัดและสร้างภาพของพื้นผิวชิ้นงานที่มีความแตกต่างของความแข็งแรง (Stiffness) ในแต่ละเฟสสูง โดยในกรณีนี้ตัวเข็มจะสแกนไปในลักษณะที่มีการสั่นในแนวตั้งฉากกับผิววัสดุด้วยแอมพลิจูดเล็กน้อย แต่จะมีความเร็วในการสั่นที่สูงกว่าการเคลื่อนที่ที่สแกนของเข็ม และเมื่อตัวเข็มถูกนำเข้ามาแตกสัมผัสกับผิววัสดุก็จะเกิดแรงต่อต้านจากผิวของวัสดุที่เกิดจากการสั่นและทำให้ตัวคานงอ และถ้าหากเราให้แรงที่ทำให้ตัวคานสั่นลงที่ พื้นผิวบริเวณที่แข็งกว่าจะทำให้เกิดการต่อต้านต่อการสั่นในแนวตั้งของตัวคานมากกว่า และจึงทำให้ตัวคานงอมากกว่า ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดที่เกิดจากการโค้งงอของตัวคานจึงนำมาใช้วัดเปรียบเทียบความแข็งที่บริเวณต่าง ๆ ของผิวงาน

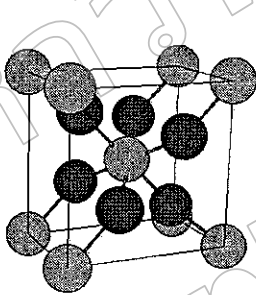
หลักการของวิธี Tapping Mode กับ Force Modulation Mode คล้ายกันที่มีการสั่นของเข็มในแนวตั้งพร้อมกับมีการสแกนไปบนผิวชิ้นงาน อย่างไรก็ตามทั้ง 2 เทคนิค จะมีความแตกต่างกัน คือ ในกรณี Force Modulation Mode จะสั่นด้วยความเร็วสูงกว่า (สูงกว่าความเร็วในการสแกน) และการวัดแอมพลิจูดที่เกิดจากการบิดงอของคาน เป็นการวัดเนื่องจากผลของแรงต้านการสั่น เมื่อมีการสัมผัสของเข็มกับผิวงาน ในขณะที่ Tapping Mode จะเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของการสั่นของคานที่เปลี่ยนแปลงไป (ลดลง) เนื่องมาจากมีการสูญเสียพลังงานไปเมื่อมีการสัมผัสผิวงานที่มีระดับความสูงต่ำแตกต่างกัน

ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide)

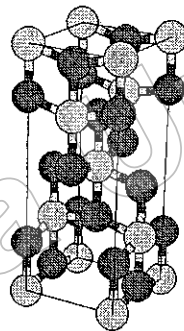
โครงสร้างของไททาเนียมไดออกไซด์เกิดจากอะตอมของไททาเนียมจับกับอะตอมของออกซิเจน ซึ่งการจับกันมีอยู่ด้วยกันหลายลักษณะ เพราะไททาเนียมมีประจุเป็น Ti^0 , Ti^{2+} , Ti^{3+} และ Ti^{4+} ส่วนออกซิเจนมีประจุเป็น O_2^- ทำให้มีโอกาสรวมกันเป็น TiO ที่มีโครงสร้างเป็นเฟสเซ็นเตอร์คิวบิก (Face Center Cubic, fcc) (TiO_x ($0.9 \leq x \leq 1.5$)) ซึ่งเป็นฟิล์มที่มีความแข็งมาก Ti_2O_3 มี

โครงสร้างเป็นไตรโกนอล (Trigonal) และ TiO_2 มีโครงสร้างเป็นเตตระโกนอล (Tetragonal) ซึ่งเป็นฟิล์มที่มีดัชนีหักเหสูง เป็นต้น โครงสร้างเหล่านี้มีการจับตัวกันด้วยพันธะผสมของไอออนิก (Ionic) โควาเลนต์ (Covalent) และพันธะโลหะ (Metallic) ฟิล์มเหล่านี้มีลักษณะที่โปร่งแสง และจากการศึกษาสีของฟิล์มจะเปลี่ยนตามโครงสร้าง นั่นคือเปลี่ยนตามปริมาณออกซิเจนที่ให้ โดยค่อย ๆ เปลี่ยนจากสีเหลืองทอง (Golden Yellow) คือ TiO_{1-x} ($0 \leq x \leq 0.25$) ไปเป็นน้ำตาล (Brown) ไปเป็นสีน้ำเงินเข้ม (Dark Blue) และไปเป็นโปร่งใสไม่มีสี (Transparent) คือ TiO_{1-x} ($0.95 \leq x \leq 1$) (Bally et al., 1998)

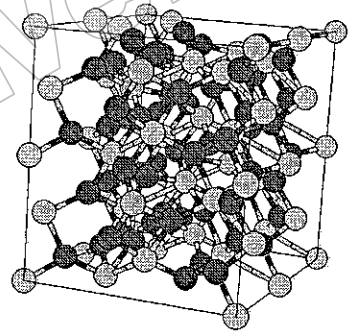
โดยทั่วไปแล้วไททานเนียมไดออกไซด์ตามธรรมชาติมีเฟสอยู่ 3 เฟส คือ เฟสรูไทล์ (Rutile) มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) เฟสอนาเทส (Anatase) มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) และ เฟสบรูไกท์ (Brookite) มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์ทอโรมบิก (Orthorhombic) แต่สำหรับในกรณีฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์ปกติจะไม่พบเฟสบรูไกท์จะพบเพียงเฟสอนาเทส รูไทล์และอสัณฐาน (Amorphous) เท่านั้น (Löbl et al., 1994)



(a)



(b)



(c)

หมายเหตุ (a) = เฟสรูไทล์

(b) = เฟสอนาเทส

(c) = เฟสบรูไกท์

ภาพที่ 2-26 เฟสของไททานเนียมไดออกไซด์ (Center for Computational Materials Science, 2002)

การเตรียมฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์ ต้องทำการเปลี่ยนค่าตัวแปรหลายค่า แล้วนำฟิล์มบางที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD เพื่อศึกษารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และเปรียบเทียบตำแหน่งของพีคที่เกิดขึ้นกับแฟ้มข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึกผง (Joint Committee on Powder Diffraction Standard, JCPDS) ของไททานเนียมไดออกไซด์

Pattern: 71-1169		Radiation = 1.540600				
TiO ₂ (Anatase; Titanium Oxide)		d(Å)	Intensity (%)	h	k	l
Lattice: Body-centered tetragonal		3.53718	100	1	0	1
S.G.: I41/amd (141)		Mol. Weight = 79.90		2.45057	6	1 0 3
a = 3.80400		Volume(CD) = 139.12		2.40350	18	0 0 4
c = 9.61400		Dx = 2.615		2.34733	7	1 1 2
z = 4		Dm = 3.670		1.90200	22	2 0 0
		Flccr = 4.50		1.71604	12	1 0 5
				1.67518	13	2 1 1
ICSD COLLECTION CODE: 009855				1.50261	2	2 1 3
REMARKS FROM ICSD: REM TEM 1073.				1.49149	9	2 0 4
TEST FROM ICSD: Calc. density unusual but tolerable.				1.37659	4	1 1 6
TEMPERATURE FACTOR: IIF				1.34492	4	2 2 0
SAMPLE SOURCE OR LOCALITY: Specimen from				1.28181	5	1 0 7
Bisatol, Wallis, Switzerland.				1.27411	6	2 3 5
				1.25711	2	3 0 1
				1.20178	11	0 0 8
				1.17906	11	3 0 3
				1.17367	3	2 2 4
				1.16695	1	3 1 2

*Calculated from ICSD using POWD-12-- (1997) primary reference:

*Z. Kristallogr., Kristallgeom., Kristallphys., Kristallchem., volume 136, page 273, (1972)

ภาพที่ 2-27 ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึกไททานเนียมไดออกไซด์เฟสอนาเทส

Pattern: 73-1765		Radiation = 1.540600				
TiO ₂ (Rutile; Titanium Oxide)		d(Å)	Intensity (%)	h	k	l
Lattice: Tetragonal		3.24491	100	1	1	0
S.G.: P42/mnm (136)		Mol. Weight = 79.90		2.48387	46	1 0 1
a = 4.58900		Volume(CD) = 62.21		2.29450	6	2 0 0
c = 2.95400		Dx = 4.266		2.18442	17	1 1 1
z = 2		Flccr = 3.45		2.05226	5	2 1 0
				1.68543	45	2 1 1
				1.62346	14	2 2 0
ICSD COLLECTION CODE: 024277				1.47700	6	0 0 2
TEST FROM ICSD: No R value given.				1.45117	6	3 1 0
TEST FROM ICSD: At least one IF missing.				1.42268	11	2 2 1
				1.35823	13	3 0 1
				1.34429	7	1 1 2
				1.30349	1	3 1 1
				1.27276	11	3 2 0
				1.24194	1	2 0 2
				1.19881	1	2 1 2
				1.16588	3	3 2 1
				1.14725	2	4 0 0
				1.11300	1	4 1 0
				1.09221	4	2 2 2

*Calculated from ICSD using POWD-12-- (1997) primary reference:

*Z. Kristallogr., Kristallgeom., Kristallphys., Kristallchem., volume 104, page 338, (1942)

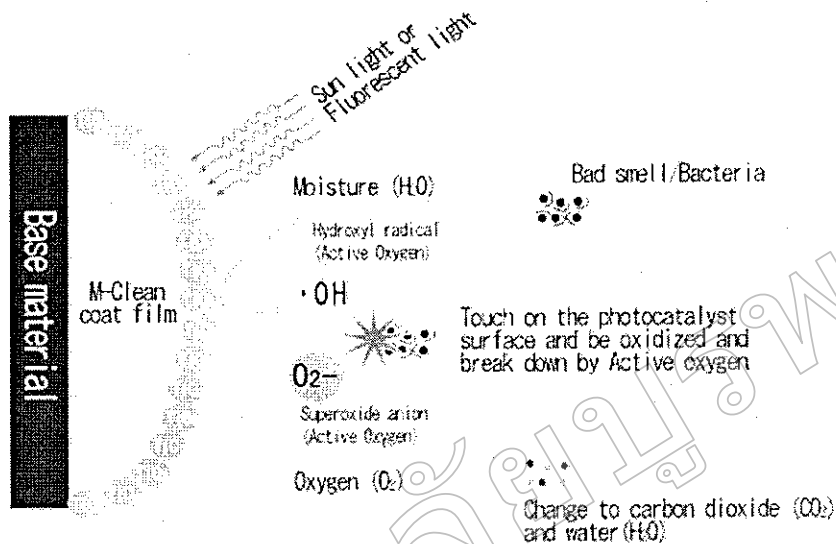
ภาพที่ 2-28 ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึกไททานเนียมไดออกไซด์เฟสรูไทล์

ทั้งนี้จากสมบัติที่ดีของไททาเนียมไดออกไซด์ทำให้มีการนำไททาเนียมไดออกไซด์ไปประยุกต์ใช้ในงานต่าง ๆ มากมายแต่ที่ได้รับความสนใจมากคือการนำมาเคลือบกระจกเพื่อกระจกมีสมบัติเป็น ตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง (Photocatalyst) และมีสภาพชอบน้ำ (Hydrophilicity) เกิดขึ้น ซึ่งทั้งสองนี้เป็นสมบัติสำคัญของกระจกทำความสะอาดตัวเอง (Self Cleaning Glass) สำหรับสมบัติทั้งสองของไททาเนียมไดออกไซด์มีดังนี้ (มติ ห่อประชุม, 2548)

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง ปัจจุบันการเคลือบผิววัสดุด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแสง เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศญี่ปุ่น เกาหลี ยุโรป และอเมริกา มีผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่เคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาไวแสงถูกผลิตออกมาขายเป็นจำนวนมาก ทั้งนี้เพราะพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไวแสงของไททาเนียมไดออกไซด์สามารถเกิดคุณสมบัติที่สามารถทำลายสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ ในอากาศ น้ำ ไม่ว่าจะเป็นกลิ่นควันบุหรี่ กลิ่นเหม็น แก๊สพิษ เชื้อโรค หรือคราบสกปรกต่าง ๆ เมื่อมีแสงอาทิตย์หรือแสงไฟภายในห้องมากระทบ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เคลือบผิวด้วยไททาเนียมไดออกไซด์มีความสะอาด ปลอดภัยและมีความสวยงามมากขึ้น ซึ่งทำให้ช่วยลดค่าใช้จ่ายและเวลาในการทำความสะอาดผลิตภัณฑ์ และยังทำให้สภาพแวดล้อมต่าง ๆ ภายในที่อยู่อาศัยสะอาดมากขึ้น อย่างไรก็ตามในส่วนของประเทศไทยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการเคลือบผิววัสดุด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาไวแสงในส่วนของภาคอุตสาหกรรม และการวิจัยยังถือเป็นเรื่องใหม่ และอยู่ในระยะเริ่มต้นของการพัฒนา

หลักการการทำงานของ ตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง อธิบายได้ดังนี้คือ ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวชนิดเอ็น (n-Type) เมื่อได้รับแสงที่มีพลังงานเท่ากับหรือสูงกว่าแถบพลังงานต้องห้าม (E_g) อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ (Valence Band) จะถูกกระตุ้นให้ขึ้นไปอยู่ที่แถบการนำ (Conduction Band) และทิ้งช่องว่างหรือโฮล (Hole) ไว้ในแถบวาเลนซ์ ซึ่งจะได้เป็นคู่ของอิเล็กตรอนกับโฮล (e_{cb}⁻ - h_{vb}⁺) เมื่อไททาเนียมไดออกไซด์ที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงดังกล่าวสัมผัสกับน้ำหรือออกซิเจน จะเกิดปฏิกิริยา คือ โฮลจะออกซิไดซ์น้ำได้เป็น Hydroxyl Radical ส่วนอิเล็กตรอนจะเพิ่มเข้าไปยังโมเลกุลออกซิเจนเกิดเป็น Super Oxide (O₂⁻)

อิเล็กตรอนและโฮลที่ได้จากกระบวนการข้างแรก จะทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ และตัวรีดิวซ์ให้กับฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ ส่วน Super Oxide และ Hydroxyl Radical ที่ได้ในขั้นต่อมา จะทำหน้าที่ในการย่อยสลายอินทรีย์ต่าง ๆ ให้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังภาพที่ 2-29 หลักการนี้ถูกนำไปใช้ในการพัฒนากระจกทำความสะอาดตัวเอง



ภาพที่ 2-29 ผลที่ได้จากการกระตุ้นอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตและกระบวนการสลายสารประกอบอินทรีย์บนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ถูกกระตุ้น (Marusyo Sangyo Co., Ltd., 2006)

2. สภาพขอบนน้ำ ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตเมื่อสัมผัสกับน้ำจะได้หมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลนี้จะช่วยให้ไททาเนียมไดออกไซด์มีสมบัติการขบ น้ำ เมื่อไททาเนียมไดออกไซด์ไปเคลือบบนกระจกเป็นฟิล์มบาง จะทำให้น้ำที่มาสัมผัสเกิดการฟอร์มตัวเป็นชั้นฟิล์มของน้ำบาง ๆ โดยจะเกิดการจับตัวเป็นหยด ลักษณะดังกล่าวจึงมีการนำมาใช้งานกับกระจกห้องน้ำหรือกระจกบังลมหน้า และหลังของรถยนต์เพื่อป้องกันการเกิดฝ้า เป็นต้น ไททาเนียม ไดออกไซด์มีโครงสร้างผลึก 3 ลักษณะ คือ อนาเทส รูไทล์ และบรูไกท์ แต่โครงสร้างผลึกที่สนใจมีอยู่เพียง 2 โครงสร้างคืออนาเทสและรูไทล์ โดยที่รูไทล์มีโครงสร้างที่เสถียรกว่าและมีดัชนีหักเหที่สูงกว่าอนาเทสและมีการนำไปใช้ในงานด้านการเคลือบทางแสง ส่วนอนาเทสนำมาใช้ในงานด้านการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง ทั้งนี้ผิวฟิล์มที่มีความขรุขระระดับหนึ่งนั้นจะช่วยส่งเสริมการเกิด Photocatalytic

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ส่วนนี้เป็นเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ โดยจะเน้นในส่วนของผลของความร้อนที่มีต่อสมบัติทางแสงของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ โดยจะกล่าวถึงการเตรียมฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ ผลของอุณหภูมิต่อค่าคงที่ทางแสงและ

ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบาง และการหาดัชนีหักเหและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของฟิล์มบาง โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. การเตรียมฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์

Lapostolle et al. (2000) ศึกษาโครงสร้างและสมบัติเชิงกลของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีรีแอคทีฟ สเปคเตอริง จากการศึกษพบว่า ฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีรีแอคทีฟ ดีซี สเปคเตอริง ที่เคลือบบนเหล็กกล้า (HSS Substrate) จะมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน ขึ้นกับสัดส่วนของแก๊ส Ar-O₂ ที่ใช้ในการเคลือบ โดยผลของโครงสร้างและสมบัติทางกลของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์จะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน (Oxygen Flow Rate) จะได้ฟิล์มบาง TiO_x (0.9 < x < 1.5) ซึ่งมีโครงสร้างแบบ fcc และมีค่าความแข็ง (Hardness) ในระดับที่น่าสนใจ ผลการศึกษาพบว่าองค์ประกอบทางเคมีและค่าความเค้นภายใน (Internal Stress) ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน ค่าความต่างศักย์ไบแอสให้กับวัสดุรองรับ และตำแหน่งของวัสดุรองรับ เมื่อเทียบกับแกนของสนามแม่เหล็ก (Magnetron Axis) ซึ่งค่าความเค้นภายในจะส่งผลต่อสมบัติทางกลของฟิล์ม ซึ่งวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค High-Load Vicker Indentation และการทดสอบการขีดถูด้วยเทคนิค Single Pass และ Multi-Pass Scratch Testing

Zeaman and Takabayashi (2002) ศึกษาผลของความดันรวมและความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนต่อโครงสร้างและสมบัติโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic) ของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีการให้ความร้อนแก่วัสดุรองรับ เพื่อศึกษาผลึกของฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีสมบัติเป็นโฟโตคะตะไลติก โดยเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีรีแอคทีฟ อาร์ เอฟ แมกนีตรอน สเปคเตอริง (Reactive r.f. Magnetron Sputtering) บนกระจกที่อุณหภูมิห้อง โดยเป้าไททาเนียมบริสุทธิ์จะถูกสเปคเตอร์ ภายใต้อุณหภูมิระหว่างอาร์กอนและออกซิเจน จากการศึกษาพบว่าความดันรวมและความดันของแก๊สออกซิเจนนั้นจะมีผลต่อการเกิดเฟส ความเป็นผลึก ลักษณะพื้นผิวและสมบัติโฟโตคะตะไลติกนำฟิล์มที่ได้มาศึกษาลักษณะเฉพาะด้วย X-Ray Diffractometer, Scanning Electron Microscopy และ Scanning Probe Microscopy สมบัติโฟโตคะตะไลติก ทดสอบโดยการวัดค่าการสลายของเมทิลีน บลู (Methylene Blue) ภายใต้อุณหภูมิห้อง ผลการทดลอง สามารถเคลือบฟิล์มบางที่มีเฟสอนาเทส เฟสอนาเทส/เฟสรูไทล์ หรือรูไทล์ได้ ในสถานะที่ไม่มีการให้ความร้อน การเกิดฟิล์มจะขึ้นกับความดันรวมและความดันย่อยของแก๊สออกซิเจน นอกจากนี้ความดันรวมยังมีอิทธิพลต่อการเกิดลักษณะพื้นผิวอีกด้วย ฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ เฟสอนาเทสมีความขรุขระที่ผิวสูงมาก ซึ่งจะก่อตัว ที่ความดันสูง และฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์เฟสอนาเทสที่มีลักษณะพื้นผิวเช่นนี้ จะมีสมบัติโฟโตคะตะไลติกที่ดี

2. ผลของอุณหภูมิต่อค่าคงที่ทางแสงและลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบาง

Li et al. (2000) ศึกษาอิทธิพลของการอบอ่อนที่มีต่อโครงสร้างและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน ที่เตรียมด้วยวิธีอาร์เอฟ แมกนีตรอนสปัตเตอริง ซึ่งมีหลักฐานที่แน่นอนแล้วว่าฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เป็นเฟสอนาเทสเพียงเฟสเดียวจะอยู่ระหว่าง 250-800 °C ค่าการดูดกลืนของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์จะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิในการอบอ่อนมีค่าลดลง

Leprince-Wang and Yu-Zhang (2001) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบด้วยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron-Beam Evaporation) ด้วยเครื่อง Atomic Force Microscopy และ Transmission Electron Microscopy โดยการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 250 °C และมีอัตราการเคลือบเท่ากับ 0.05 nm/s จากการศึกษาทำให้ทราบว่าพื้นผิวของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์มีความหยาบมากขึ้นเมื่อฟิล์มมีความหนาเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้สมบัติทางแสงเปลี่ยนไป และมีการเปรียบเทียบระหว่างสมบัติทางแสง ความขรุขระและการเปลี่ยนสภาพพื้นผิวของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์

Ben Amor et al. (2002) ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ ที่ทำการเตรียมด้วยวิธี เอชซี แมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบความถี่กลางมีการศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิที่ให้แก่ตัวสุรองรับระหว่างทำการเคลือบ และอุณหภูมิในการอบฟิล์มต่อสมบัติของฟิล์มพบว่าฟิล์มที่เคลือบโดยไม่มีการให้ความร้อนแก่ตัวสุรองรับจะมีการจัดเรียงโครงสร้างแบบอสัณฐาน และจะมีความเป็นผลึกมากขึ้นเมื่อให้ความร้อนแก่ตัวสุรองรับที่ 350 °C ศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฟสของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ด้วย X-Ray Diffractometer และ Fourier Transformed Infrared (FT-IR) ศึกษาโครงสร้างระดับไมโครเมตรด้วย Scanning Electron Microscopy เพื่อศึกษาความแตกต่างของโครงสร้างแบบคอลัมน์ (Column) และการรวมกันของคอลัมน์ ศึกษาค่าคงที่ทางแสงเช่น ดัชนีหักเห สัมประสิทธิ์การดับสูญ และแถบพลังงานด้วย Ultraviolet-Visible Spectrometer โดยใช้เทคนิค Envelope Method พบว่า ค่าคงที่ทางแสงจะมีความแตกต่างกันในช่วงกว้าง และความแตกต่างนี้จะเกี่ยวข้องอย่างมากกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์

Mardare and Rusu (2002) ศึกษาฟิล์มบางไททาเนียมออกไซด์บนควอทซ์ (Quartz) ที่เคลือบด้วยวิธีดีซีสปัตเตอริง โดยที่ฟิล์มที่ได้มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน หลังจากการให้ความร้อนที่ 673, 873 และ 1173 K เป็นเวลา 12, 2 และ 3 ชั่วโมงตามลำดับ พบว่าโครงสร้างของฟิล์มมีความเป็นผลึกมากขึ้น โดยเป็นผลึกผสมระหว่างเฟสอนาเทสและเฟสรูไทล์ ลักษณะพื้นผิวและมีความเป็นเฟสเพิ่มมากขึ้นตามเงื่อนไขการอบอ่อน เฟสรูไทล์จะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเท่ากับ

1173 K โดยเพิ่มขึ้นถึง 75% ขณะที่ผลที่จะตามมาหลังจากที่โครงสร้างและลักษณะพื้นผิวเปลี่ยนแล้วยังส่งผลให้สมบัติทางแสงของฟิล์มเปลี่ยนแปลงตามด้วย

Mardare and Rusu (2002) ศึกษาผลของการให้ความร้อนที่มีต่อค่าคงที่ทางแสง พบว่าฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบด้วยวิธี อาร์ เอฟ สปีดเตอริง ฟิล์มบางที่ได้มีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน เมื่อนำไปอบที่ช่วงอุณหภูมิ 50-360 °C และช่วงอุณหภูมิ 360-400 °C แล้ววิเคราะห์ด้วยวิธี Ellipsometrical พบว่าในช่วงอุณหภูมิ 50-360 °C ดัชนีหักเห มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จาก 2.15-2.17 (ที่ความยาวคลื่น 552 nm) และเพิ่มเป็น 2.21 เมื่ออบที่อุณหภูมิในช่วง 360-400 °C สัมประสิทธิ์การดูดกลืนมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับดัชนีหักเห ส่วนความหนาแน่นของฟิล์มบางจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิมากกว่า 360 °C ฟิล์มบางจะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากอสัณฐาน เป็น โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นผลึกมากขึ้น จากงานวิจัยนี้สรุปได้ว่า อุณหภูมิมีผลต่อการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างและลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์

Hou et al. (2003) ศึกษาผลของอบอ่อนค่าคงที่ทางแสง พบว่าฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบด้วยวิธีเอซี แมกนีตรอน สปีดเตอริงแบบความถี่กลาง มีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งมีขนาดของเกรน (Grains) ประมาณ 30-50 nm เมื่อทำการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 300 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เริ่มมีโครงสร้างแบบอนาเทสปรากฏขึ้น เมื่อทำการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โครงสร้างของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์จะเปลี่ยนเป็นโครงสร้างแบบอนาเทสอย่างสมบูรณ์ เมื่อทำการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โครงสร้างของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์จะเปลี่ยนเป็น โครงสร้างแบบรูไทล์อย่างสมบูรณ์ เมื่อทำการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1,100 °C ขนาดของเกรนจะเพิ่มขึ้นเป็นระดับไมโครเมตร ส่วนดัชนีหักเหของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์หลังจากผ่านการอบอ่อนจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์จะมีค่าลดลงส่วนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 500 °C จะทำให้ฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์มีสมบัติทางแสงดีที่สุด

Tigau (2005) ศึกษาผลของอุณหภูมิวัสดุรองรับที่มีต่อสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง Sb_2S_3 ที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน ฟิล์มบาง Sb_2S_3 เตรียมโดยวิธีระเหยสาร บนกระจกที่ทำความสะอาด โดยการนำไปผ่านความร้อนในช่วง 300-473 K ใช้ X-Ray Diffractometer และ Atomic Force Microscopy ในการหาโครงสร้างและลักษณะผิวของฟิล์มบาง ค่าคงที่ทางแสงของฟิล์มหาได้จาก การวิเคราะห์ข้อมูลการส่งผ่านแสงนอกเหนือจากความยาวคลื่นในช่วง 400-1400 nm การวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนทางอ้อมซึ่งได้จากการประมาณค่าของแถบพลังงานที่ตรงกัน ซึ่งพบว่าแถบพลังงานจะลดลงเนื่องจากอุณหภูมิของวัสดุรองรับ จาก 1.67 eV ที่ 300 K เป็น 1.48 eV ที่ 473 K

3. วิธีการหาค่าดัชนีหักเหและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของฟิล์มบาง

Manificier et al. (1976) เสนอวิธีการคำนวณหาค่าคงที่ทางแสงและความหนาจากรูปแบบริ้วการแทรกสอด (Interference Fringe Pattern) ของสเปกตรัมการส่งผ่านของฟิล์มบางไดอิเล็กทริกที่มีความใส ซึ่งเคลือบอยู่บนวัสดุรองรับที่ไม่มีการดูดกลืน (Non-Absorbing) ประเด็นสำคัญที่น่าสนใจของวิธีการหาค่าคงที่ทางแสงของฟิล์มบางที่เสนอนี้คือ เป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนสามารถหาได้โดยตรงและแม่นยำเหมือนกับวิธี Iteration

Swanepoel (1983) หาค่าคงที่และความหนาของฟิล์มจากริ้วการแทรกสอดของสเปกตรัมการส่งผ่านเมื่อความหนาของฟิล์มและความยาวคลื่นมีขนาดเท่ากัน ค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มจะเป็นฟังก์ชันของดัชนีหักเห สัมประสิทธิ์การดูดกลืน ความหนา และดัชนีหักเหของวัสดุรองรับ

Del Pozo and Diaz (1991) เปรียบเทียบวิธีการคำนวณค่าคงที่ทางแสงและความหนาของฟิล์ม โดยการวัดค่าสเปกตรัมทางแสง ซึ่งเป็นเทียบเคียงระหว่าง วิธีการที่ถูกปรับปรุงด้วยการสร้างแบบจำลองและการทดลอง ของฟิล์มเจอร์เมเนียม (Germanium) ที่มีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน ซึ่งมีความหนาหลายค่า ความหนาฟิล์มวัดด้วยเครื่องวัดความเรียบ (Mechanical Profilometer) และลักษณะเฉพาะและช่วงในการประยุกต์ใช้ ด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองและการทดลองทางแสง

Dimitrova et al. (1997) ศึกษาการเตรียมฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ด้วยวิธีรีแอคทีฟ คีซีแมกนีตรอน สปีดเตอริง โดยใช้ความหนาของฟิล์มที่ 326-366 nm ใช้วัสดุรองรับเป็นแก้วและโพแทสเซียมคลอไรด์ ตัวแปรในการเคลือบ (ความดันย่อยของไนโตรเจน ความดันรวม ความต่างศักย์และเวลา) ถูกนำมาจับคู่กันและดูผลที่ได้ ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะส่งผลต่อโครงสร้างและสมบัติทางแสงของฟิล์ม ซึ่งสามารถหาได้จาก X-Ray Diffractometer, Scanning Electron Microscopy และ Spectrophotometer ผลการทดลองยืนยันได้ว่าฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ มีโครงสร้างการเรียงตัวของผลึกเป็นรูป Hexagonal แกน c จะพลิกขึ้นเมื่อมีการลดความเข้มข้นของไนโตรเจน การเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่ความดันย่อยของไนโตรเจนต่ำ จะทำให้ฟิล์มที่ได้มีค่าคงที่ทางแสงที่ดีกว่า มีดัชนีหักเหสูงกว่าและมีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนมีค่าต่ำลง ฟิล์มบางทั้งหมดที่ทำการเคลือบเป็นฟิล์มบางใสมีค่าการส่งผ่านแสงเฉลี่ยประมาณ 83%

Soliman and Ibrahim (1997) คำนวณหาค่าคงที่ทางแสงและความหนาของฟิล์มบาง โดยใช้สเปกตรัมการส่งผ่านเพียงอย่างเดียว โดยฟิล์มบางที่ใช้เป็นฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium Sulfo-Selenide) ที่เตรียมด้วยวิธีระเหยสาร การใช้เทคนิคนี้จะมีความแม่นยำไม่ต่างกันเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น จากผลการคำนวณทำให้ทราบว่า ฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์มีแถบพลังงานเปลี่ยนแปลงสัดส่วน และค่าของแถบพลังงานจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณซัลเฟอร์

Mergel et al. (2000) ศึกษาความหนาแน่นและดัชนีหักเหของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน โดยการเตรียมด้วยวิธีระเหยสารแบบรีแอคทีฟ (Reactive Evaporation) ที่อุณหภูมิ 300 °C และเปลี่ยนค่าความดันและอัตราการเคลือบ ซึ่งดัชนีหักเหและความหนาของฟิล์มสามารถคำนวณได้จากค่าการส่งผ่านสเปกตรัม ส่วนความหนาแน่นจะลดลงเมื่อความกว้างของระยะปลดการชนเฉลี่ยระหว่างการเคลือบมีค่าน้อยกว่าระยะห่างระหว่างหน้าเป้ากับวัสดุรองรับ โดยสมการที่ใช้ในการอธิบายดัชนีหักเหและความหนาแน่นเป็นของ Clausius-Mosotti

Karunagaran et al. (2003) ศึกษาการหาค่าคงที่ทางแสงของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบโดยวิธีดีซี แมกนีตรอน สปีดเตอริง ด้วยเทคนิค Spectroscopic Ellipsometry ที่ช่วงพลังงาน 1.2-5.5 eV ที่อุณหภูมิห้อง สามารถวัดค่า Dielectric-Function Spectra ของโครงสร้างที่จุดวิกฤตของพลังงาน (E_1 , $E_1+\Delta$ และ E_2) ได้อย่างชัดเจนเนื่องจากแถบภายในของการส่งผ่าน (Interband Transitions) ความขรุขระของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่วัดได้จากเครื่อง AFM มีค่าเท่ากับ 5.8 nm ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์มีค่าต่ำกว่าไททาเนียมไดออกไซด์ที่เป็นก้อน (Bulk) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าไดอิเล็กทริกกับค่าคงที่ทางแสง เช่น ดัชนีหักเห สัมประสิทธิ์การดูดกลืน สัมประสิทธิ์การดูดกลืน และการตกกระทบปกติของการสะท้อน สามารถหาได้จากข้อมูลซึ่งได้จากการวัดและวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Spectroscopic Ellipsometry

Miao et. al. (2003) ศึกษาฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์เฟสอนาเทสและเฟสรูไทล์ที่เคลือบบนซิลิกอนเวเฟอร์ด้วยวิธี เอซี แมกนีตรอน สปีดเตอริงแบบความถี่ค่ากลาง โดยมี การควบคุมตัวแปรอย่างชัดเจน จากการศึกษาด้วย X-Ray Diffractometer (XRD) และ Transmission Electron Microscopy (TEM) และสมบัติทางแสงโดย Spectroscopic Ellipsometry (SE) พบว่าโครงสร้างแบบอนาเทสและรูไทล์ มีการคลาดเคลื่อนของแลตทิซ (Lattice) และดัชนีหักเหมีค่าสูงกว่าฟิล์มอื่นที่เคยผ่านมา ทั้งนี้สันนิษฐานว่ามาจากความหนาแน่นของโครงสร้างจากการสปีดเตอริงฟิล์ม ค่าขอบการดูดกลืนคำนวณได้จาก $Tauc Plot$ โดยใช้การคำนวณจากค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน ค่าที่ได้มีค่าสูงกว่า Bulk โดยเหตุผลของค่าที่มากขึ้นของฟิล์มเกิดจากความเครียดตามแกน

มณี ห่อประชุม (2548) ศึกษาผลของเงื่อนไขในการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธี ดีซี รีแอคทีฟ สปีดเตอริง บนกระจกและแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ โดยทำการเคลือบฟิล์มบางที่อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนและเวลาที่ใช้ในการเคลือบแตกต่างกัน ผลการศึกษาพบว่า เมื่อให้อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเป็น 8 sccm ฟิล์มบางจะแสดงสมบัติการเป็นผลึก

ได้ดีที่สุด จากนั้นนำฟิล์มไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโตรอิลิปโซมิเตอร์ (Spectroscopic Ellipsometer) พบว่าการเคลือบฟิล์มบางโดยใช้เวลาในการเคลือบ 60 นาที ฟิล์มบางจะแสดงสมบัติทางแสงได้ดีที่สุด โดยที่จะให้ดัชนีหักเหเท่ากับ 2.55 ที่ความยาวคลื่น 550 nm และเมื่อนำฟิล์มบางไปอบที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่า ที่อุณหภูมิ 300 °C ฟิล์มบางสามารถเปลี่ยนโครงสร้างจากอสัณฐานเป็นเฟส ออราเทส และที่ 500 °C ฟิล์มบางจะเริ่มมีเฟสเป็นรูไทล์

มหาวิทยาลัยบูรพา
Burapha University