

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึงทฤษฎีเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง การก่อเกิดฟิล์มบาง การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปีดเทอริง กระบวนการ โกลด์ดิซซาร์จ ระบบเคลือบแบบดีซี สปีดเทอริง ระบบเคลือบแบบดีซี แมกนีตรอน สปีดเทอริง ระบบเคลือบแบบอานาลาซซ์ แมกนีตรอน สปีดเทอริง การเคลือบฟิล์มบาง ด้วยวิธีรีแอคทีฟ สปีดเทอริง การหาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ และ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง

การเคลือบฟิล์มบาง (Thin Film) ในสุญญากาศครั้งแรกทำโดย Bunsen และ Grove ในปี ค.ศ.1852 โดยพื้นฐานแล้วแนวคิดเกี่ยวกับ การเคลือบในสุญญากาศหรือการเคลือบฟิล์มบาง คือ การเรียงตัว (Fabricated) โดยการเคลือบ (Deposition) ของสารเคลือบในลักษณะอะตอมเดี่ยว บนวัสดุรองรับ (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” ก็ได้ ขึ้นกับลักษณะการใช้งานเป็นสำคัญ (Bunshah, 1994)

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

การเคลือบฟิล์มบางเป็นกระบวนการที่ทำให้สารเคลือบตกเคลือบลงบนผิววัสดุรองรับที่ต้องการซึ่งสามารถทำได้ทั้งกระบวนการทางเคมีหรือกระบวนการทางฟิสิกส์โดยพื้นฐานแล้วกระบวนการเคลือบฟิล์มบางมีขั้นตอนสำคัญ 3 ขั้นตอน (Smith, 1995) ดังนี้ คือ

1. การสร้างสารเคลือบ (Source) โดยทั่วไปแล้วสารเคลือบอาจอยู่ในรูปของ ของแข็ง ของเหลว ไอ หรือแก๊ส ก็ได้ แต่สารเคลือบขณะทำการเคลือบนั้นจำเป็นต้องอยู่ในรูปของไอระเหยเท่านั้น ซึ่งวิธีการที่ทำให้สารเคลือบกลายเป็นไอระเหยสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การให้ความร้อนหรือการระดมยิงด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูง เป็นต้น

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

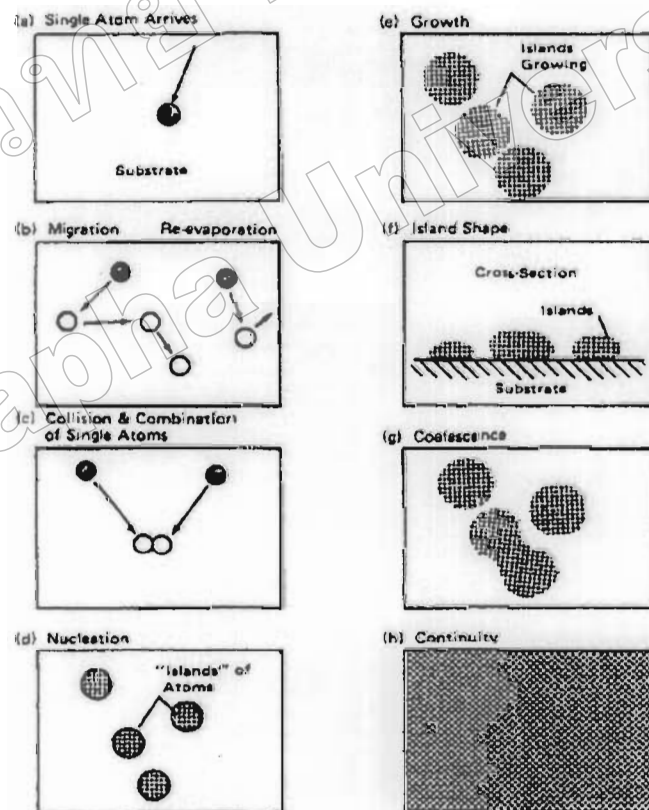
3. การสะสมพอกพูน (Deposition) เป็นขั้นตอนการพอกพูนของสารเคลือบและโตขึ้นจนกลายเป็นชั้นของฟิล์มบางบนวัสดุรองรับขั้นตอนนี้จะขึ้นกับเงื่อนไขของวัสดุรองรับหรือการทำปฏิกิริยาของสารเคลือบกับวัสดุรองรับความสะอาดของผิววัสดุรองรับ ตลอดจนพลังงานที่ใช้ในการเคลือบ

การก่อเกิดฟิล์มบาง

การเกิดฟิล์มบางจากกระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ Chapman (1980) ได้อธิบายไว้ดังนี้ เมื่อสารเคลือบจากแหล่งกำเนิดสารเคลือบเคลื่อนที่มาถึงวัสดุรองรับ สารเคลือบที่กระทบผิววัสดุรองรับส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของอะตอมหรือโมเลกุล (ภาพที่ 2-1 (a)) โดยพลังงานพันธะ (Bonding Energy) ระหว่างอะตอมของสารเคลือบกับวัสดุรองรับและอุณหภูมิของวัสดุรองรับจะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการแพร่ (Diffusion) ของสารเคลือบบนผิววัสดุรองรับ อะตอมของสารเคลือบจะตกกระทบผิววัสดุรองรับในตำแหน่งที่เรียกว่าตำแหน่งการดูดซับ (Adsorption Site) ทำให้เกิดการเกาะติดหรือถ้ามีพลังงานมากพอก็อาจกระโดดข้ามกำแพงพลังงานไปยังบริเวณที่อยู่ติดกันหรือหลุดออกจากตำแหน่งนั้นไป (ภาพที่ 2-1 (b)) ในช่วงเวลาหนึ่งอะตอมสารเคลือบอาจเกิดการระเหยกกลับและเกิดการรวมตัวกันระหว่างอะตอมที่มีการแพร่ด้วยกัน เมื่ออะตอมของสารเคลือบรวมตัวกันอาจเกิดเป็นอะตอมคู่ (ภาพที่ 2-1 (c)) ซึ่งมีความเสถียรมากกว่าอะตอมเดี่ยว (Single Atom) ซึ่งการรวมตัวกันของอะตอมนั้นจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอะตอมเดี่ยวและอัตราการเคลือบ (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 จนกระทั่งขอบของแต่ละกลุ่มอะตอมชนกัน เรียกว่าการรวมกันเป็นก้อนของกลุ่มอะตอม (Agglomeration หรือ Coalescence) (ภาพที่ 2-1 (g))

จากการศึกษาด้วยเทคนิค Transmission Electron Microscopy (TEM) พบว่าขณะที่กลุ่มอะตอมรวมกันเป็นก้อนอะตอมจะมีพฤติกรรมคล้ายของเหลว (Liquid-Like Behaviour) และมีการจัดเรียงทิศทางในเชิงผลึกวิทยา (Crystallographic Orientation) ด้วยการรวมกันเป็นก้อนของกลุ่มอะตอมจะเกิดขึ้นจนกระทั่งเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่อง (ภาพที่ 2-1 (h)) แต่ในบางกรณีการเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่องจะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์เมื่อฟิล์มมีความหนาโดยเฉลี่ยประมาณ $0.04 - 0.05 \mu\text{m}$ ลักษณะผิวของฟิล์มบางขณะเกิดการรวมกลุ่มอะตอมจะดูคล้ายเนินเขาและหุบเขา



ภาพที่ 2-1 การก่อเกิดฟิล์มบาง (Chapman, 1980)

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

ถ้าอะตอมที่ผิวของวัสดุรองรับมีพลังงานเพียงพอ อะตอมเหล่านั้นจะเคลื่อนที่เพื่อเลือกเข้าไปอยู่ในตำแหน่งที่มีพลังงานต่ำกว่าเสมอทั้งนี้ความสามารถในการเคลื่อนที่ (Mobility) ของอะตอมจะเพิ่มขึ้นถ้าอุณหภูมิที่ผิววัสดุรองรับสูงขึ้นนอกจากนี้การส่ออัตราเคลือบยังสามารถช่วยให้การโตของผลึกเกิดได้ดียิ่งขึ้นเพราะอะตอมมีเวลาในการโตมากพอ ดังนั้นถ้าอุณหภูมิของวัสดุรองรับสูงและมีอัตราเคลือบต่ำจะได้ฟิล์มที่มีขนาดของเกรนใหญ่ขึ้นมีข้อบกพร่องในเกรนน้อยลง และได้ฟิล์มที่มีความหนาแน่นมากพอสำหรับการเชื่อมต่อกันอย่างสมบูรณ์ในทางกลับกันถ้าอุณหภูมิวัสดุรองรับต่ำแต่อัตราเคลือบสูงก็จะให้ผลลักษณะเดียวกัน

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริง

การเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริงเป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางที่เกิดจากสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริง การเคลือบด้วยวิธีนี้เกิดขึ้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงวิ่งเข้าชนวัสดุรองรับและมีการพอกพูนและโตเป็นฟิล์มบางในที่สุด กระบวนการสปัตเตอริงคือการทำให้อะตอมหลุดจากผิวของวัสดุโดยการชนของอนุภาคพลังงานสูงแล้วมีการแตกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิวสารเคลือบ โดยอนุภาคที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้และเนื่องจาก ไอออนที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงในการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริงจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่าวิธีการระเหยสารมากดังนั้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบวิ่งเข้ากระทบแผ่นวัสดุรองรับก็จะฝังตัวแน่นลงในเนื้อวัสดุที่ต้องการเคลือบมากกว่าวิธีการระเหยสารดังนั้นการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริงจะทำให้การยึดเกาะระหว่างสารเคลือบกับวัสดุรองรับดีกว่า (พิเชษฐ ลิมสุวรรณ และธนาภา รัตนะ, 2547; Chapman, 1980)

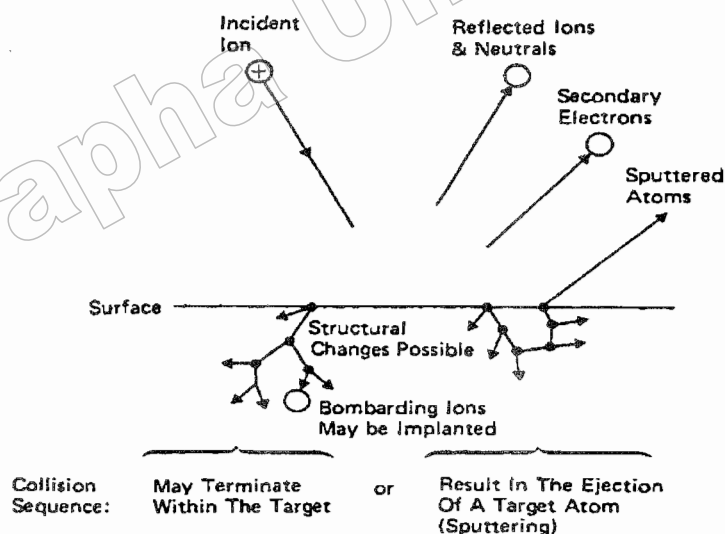
เมื่อผิวหน้าของวัสดุถูกระดมยิงด้วยอนุภาคพลังงานสูงจะทำให้เกิดการสึกกร่อนและมีอนุภาคที่ผิวหน้าของวัสดุนั้นหลุดมา เนื่องจากการชนของอนุภาคพลังงานสูงกับอนุภาคที่ผิวหน้าวัสดุ ปรากฏการณ์ที่อนุภาคผิวหน้าวัสดุหลุดออกมานี้เรียกว่า สปีดเตอร์ (Sputter) หรือสปีดเตอริง (Sputtering) ปัจจุบันมีการนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางเช่น 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) ไอออนอาจสะท้อนกลับจากผิวหน้าซึ่งส่วนใหญ่จะสะท้อนออกมาในรูปของอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้า อันเกิดจากการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิวเป้าสารเคลือบ

1.2 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Emission) จากการชนของไอออนอาจทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิจากเป้าสารเคลือบถ้าไอออนนั้นมีพลังงานสูงพอ



ภาพที่ 2-2 อันตรกิริยาระหว่างไอออนกับพื้นผิววัสดุ (Chapman, 1980)

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

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

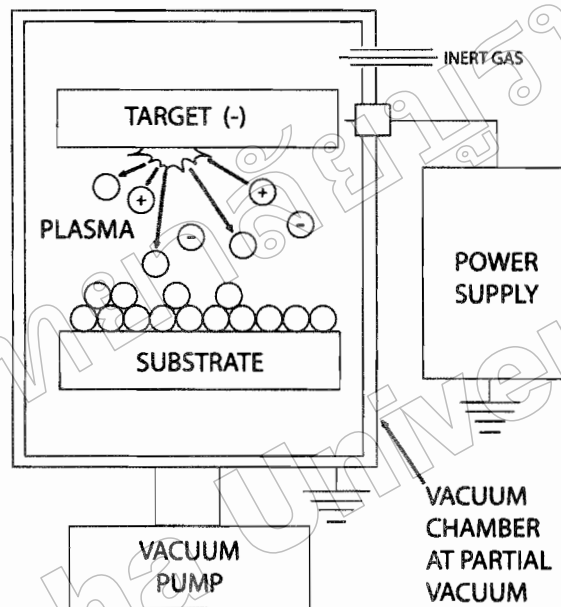
1.5 การสปัตเตอร์ (Sputter) การชนของไอออนอาจทำให้เกิดกระบวนการชนกันแบบต่อเนื่องระหว่างอะตอมของเป้าอันทำให้เกิดการปลดปล่อยอะตอมจากเป้าสารเคลือบ ซึ่งเรียกว่ากระบวนการสปัตเตอร์

2. กระบวนการสปัตเตอร์เป็นกระบวนการที่อะตอมผิวหน้าของวัสดุถูกทำให้หลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูง โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุดังกล่าว กระบวนการนี้อาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ ดังนั้นสิ่งที่จำเป็นในกระบวนการสปัตเตอร์ คือ

2.1 เป้าสารเคลือบ ทำหน้าที่เป็นเป้าให้อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนจนมีการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลือบลงเคลือบบนวัสดุรองรับ

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

2.3 การผลิตอนุภาคพลังงานสูง อนุภาคพลังงานสูงในระบบสปัตเตอริงนี้จะต้องถูกผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้กระบวนการเคลือบสารเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจนได้ความหนาฟิล์มตามต้องการ ทั้งนี้สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้ลำอนุภาคจากปืนไอออนที่มีปริมาณการผลิตไอออนในอัตราสูงหรือผลิตจากกระบวนการโกลว์ดีสชาร์จ เนื่องจากปืนไอออนมีราคาค่อนข้างสูงและให้ไอออนในพื้นที่แคบ กระบวนการสปัตเตอริงทั่วไปในระดับอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้กระบวนการโกลว์ดีสชาร์จในการผลิตอนุภาคพลังงานสูง



ภาพที่ 2-3 ลักษณะของเครื่องเคลือบสุญญากาศด้วยวิธีสปัตเตอริง

3. ค่าyield ของสปัตเตอริง (Sputtering Yield; S) คือ ค่าเฉลี่ยปริมาณการหลุดของอะตอมเป้าสารเคลือบต่อปริมาณการชนของไอออน 1 อนุภาคมีหน่วยเป็นอะตอมต่อไอออนโดยการวัดค่าyieldนี้สามารถทำได้โดยการหาน้ำหนักหรือความหนาที่ลดลงของเป้าสารเคลือบหรือหาได้จากวัสดุทั้งหมดที่ถูกสปัตเตอริงหรืออาจหาได้จากการตรวจวัดสปัตเตอริงอะตอม (Sputter Atom) ขณะที่ยังฟุ้งกระจาย (พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ และธนัสถา รัตนะ, 2547) ค่าyieldของกระบวนการสปัตเตอริงจะเปลี่ยนไปตามภาวะต่าง ๆ ดังนี้

3.1 เปลี่ยนแปลงตามพลังงานไอออนการชนของอนุภาค 2 อนุภาคในแนวเดียวกัน
การถ่ายเทพลังงานระหว่างอนุภาคจะเป็นไปตามสมการที่ 2-1

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

เมื่อ ΔE	คือพลังงานที่ถ่ายเทระหว่างอนุภาค
m	คือมวลอะตอมที่ถูกชน
M	คือมวลของอะตอมที่วิ่งเข้าชน

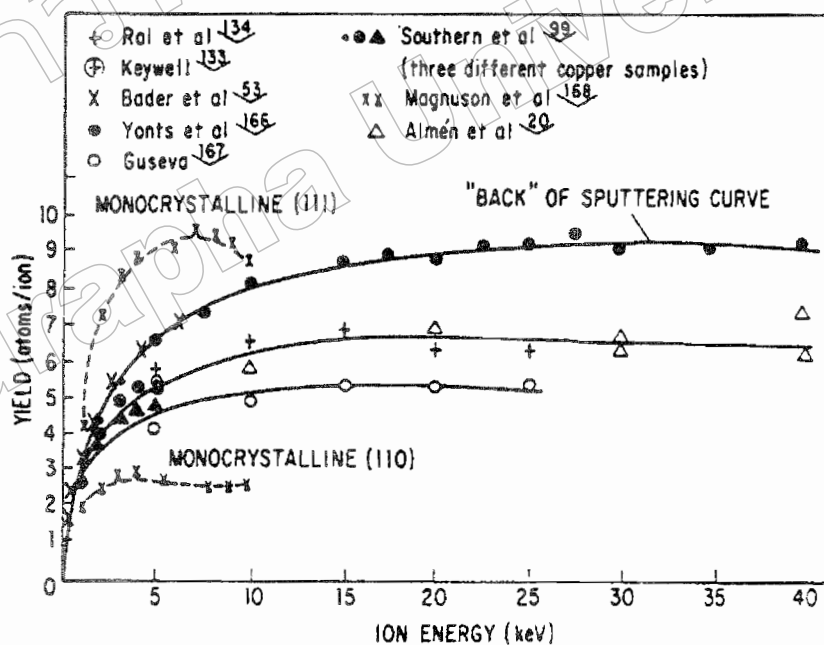
เมื่อพลังงานไอออนมีค่าต่ำมากค่าขีดจำกัดจากระบวนการสปีตเตอร์ริงจะมีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากไม่สามารถเอาชนะแรงยึดเกาะระหว่างอะตอมบนเป้าสารเคลือบได้เมื่อไอออนมีพลังงานสูงขึ้นเกินกว่า $4H$ (H คือ ค่าพลังงานเฉลี่ยที่ใช้ในการระเหิด 1 อะตอมจากผิวสารเคลือบ) ถ้าพลังงานไอออนสูงมากพอในการทำให้เกิดกระบวนการชนอย่างต่อเนื่องระหว่างอะตอมสารเคลือบและเริ่มมีการปลดปล่อยอะตอมสารเคลือบเรียกพลังงานค่านี้ว่าพลังงานขีดเริ่ม (Threshold Energies) ซึ่งเปลี่ยนแปลงไประหว่างคู่การชนของอนุภาค (ตารางที่ 2-1)

เมื่อไอออนชนมีพลังงานสูงขึ้นขีดจำกัดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ในช่วงแรกและเปลี่ยนเป็นการเพิ่มแบบเชิงเส้นจากนั้นจึงมีการอิ่มตัว (Saturation) ของค่าขีด เมื่อพลังงานไอออนมีค่าสูงมากทั้งนี้เนื่องจากไอออนพลังงานสูงมีโอกาสดับตัวบนผิวเป้าสารเคลือบสูงขึ้น ทำให้ขีดของสารเคลือบมีค่าคงที่ จากนั้นจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มพลังงานไอออนให้สูงมากขึ้น 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 ยี่ลัดของทองแดงที่ถูกชนด้วยไอออนจากแก๊สอาร์กอนที่พลังงานต่าง ๆ

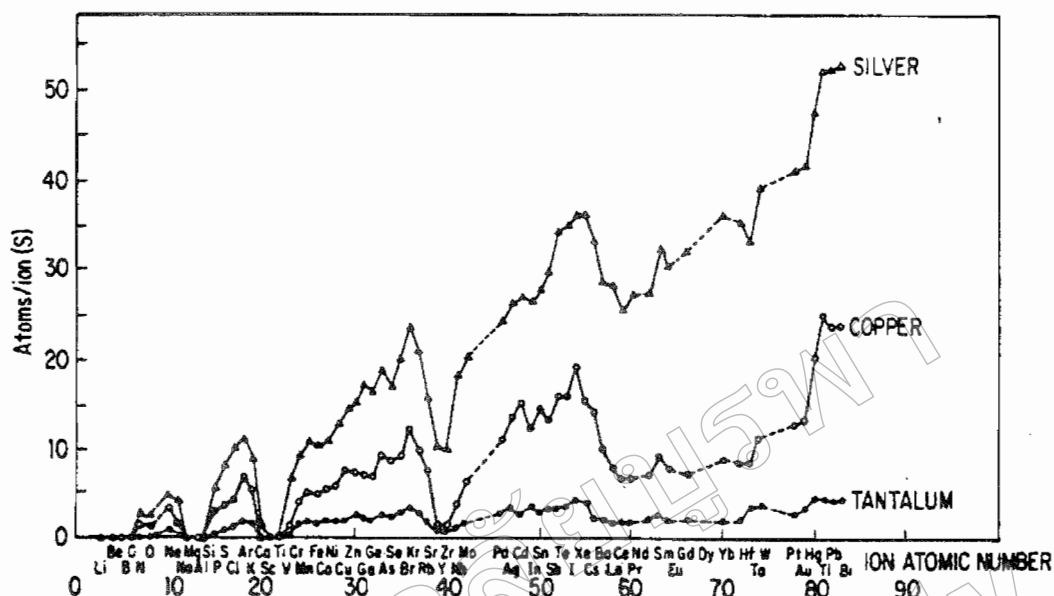
(Maissel & Glang, 1970)

3.2 เปลี่ยนแปลงตามระนาบผลึกของผิวเป้าสารเคลือบจากการทดลองพบว่าเมื่อใช้เป้าสารเคลือบที่เป็นผลึกเดี่ยวค่าyieldจะมีความมากที่สุดเมื่อ ไอออนชนเป้าในแนวระนาบที่มีอะตอมหนาแน่นที่สุดและมีค่าต่ำในระนาบที่มีอะตอมเบาบางในทองแดงซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ FCC (Face Centered Cubic) พบว่าการชนบนระนาบ (111) ซึ่งมีความหนาแน่นอะตอมสูงสุดyieldจะมีความมากที่สุดเมื่อใช้ค่าพลังงานไอออนในการชนค่าเดียวกันส่วนระนาบที่มีความหนาแน่นอะตอมต่ำ ไอออนมีแนวโน้มวิ่งฝังตัวในเป้าสารเคลือบมากขึ้น

3.3 เปลี่ยนแปลงตามชนิดของไอออนที่ชนเป้าสารเคลือบค่าyieldจากเป้าสารเคลือบชนิดเดียวกันเมื่อใช้ไอออนต่างชนิดกันวิ่งชนจะมีความแตกต่างกันออกไป ถึงแม้ว่าสมการที่ 2-1 แสดงให้เห็นว่าการถ่ายเทพลังงานระหว่าง 2 อนุภาคที่ชนกันจะมีความสูงสุดเมื่อมวลของอะตอมทั้งสองมีค่าเท่ากันแต่อะตอมบนเป้าสารเคลือบยึดเกาะกับอะตอมข้างเคียงจึงทำตัวเสมือนมีมวลยังผลสูงกว่ามวลของอะตอมเดี่ยว จึงพบว่าyieldมีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้ไอออนที่มีมวลสูงกว่ามวลของอะตอมเป้าสารเคลือบภาพที่ 2-5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าyieldพบว่ามีความสูงสุดเป็นช่วง ๆ ณ ตำแหน่งที่ใช้ไอออนจากแก๊สเฉื่อยคือแก๊ส Ne, Ar, Kr, และXe ซึ่งเป็นอะตอมที่มีอิเล็กตรอนครบ 8 ในวงนอกสุด

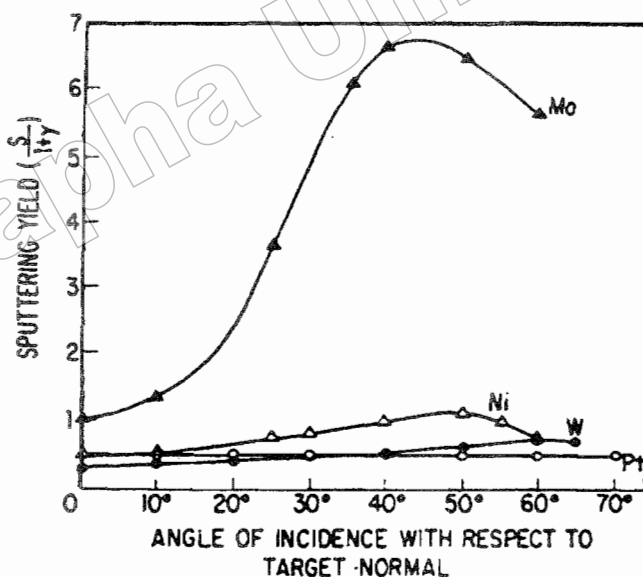
3.4 เปลี่ยนแปลงตามมุมตกกระทบของไอออนบนเป้าสารเคลือบจากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มมุมเอียงของการชนจากไอออนบนเป้าหมายขึ้นyieldจะมีความสูงขึ้นตามมุมที่เอียงเนื่องจากอะตอมสารเคลือบที่หลุดออกมาเปลี่ยนจากการกระเจิงกลับ (Back Scattering) เป็นการกระเจิงไปข้างหน้า (Forward Scattering) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ต้องการจำนวนครั้งของการชนระหว่างอะตอมน้อยกว่าทำให้yieldสูงขึ้นจนถึงจุดหนึ่งซึ่งมีความสูงสุดที่องศาการเอียงมากกว่า 45° จากนั้นyieldจะมีความลดลงเมื่อมุมสูงขึ้นและเป็นศูนย์เมื่อมุมเอียงมีค่า 90° โดยขณะนั้นพื้นที่การชนเมื่อมองจากไอออนมีค่าเป็นศูนย์ (ภาพที่ 2-6)

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



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

เมื่อใช้ไอออนพลังงาน 45 keV จากธาตุที่มีเลขอะตอมค่าต่าง ๆ (Maissel & Glang, 1970)

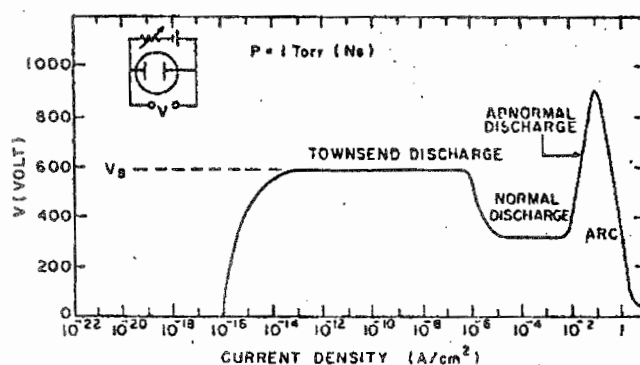


ภาพที่ 2-6 การเปลี่ยนแปลงของyield เมื่อใช้ไอออนของปรอทพลังงาน 200 eV ชนเป้าหมาย (Ni), โมลิบดีนัม (Mo), ทังสเตน (W) และทองคำขาว (Pt) ที่มุมการตกกระทบค่าต่าง ๆ (วัดเทียบกับแนวตั้งฉากกับเป้า) (Maissel & Glang, 1970)

กระบวนการโกลว์ดิซชาร์จ

พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ และธนัศรา รัตนะ (2547) ได้อธิบายกระบวนการโกลว์ดิซชาร์จไว้ดังนี้ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขั้วอิเล็กโตรด 2 ขั้ว ที่วางห่างกันเป็นระยะ d ภายใต้ความดันประมาณ 1.33 mbar ของแก๊สนีออน พบว่าช่วงแรก que เพิ่มแรงดันทางไฟฟ้าจะมีกระแสไหลในวงจรน้อยมาก กระแสส่วนนี้เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออนของแก๊สที่เกิดขึ้นตลอดเวลาในบรรยากาศเนื่องจากการชนของรังสีคอสมิกและถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้า กระแสนี้จะมีค่าค่อนข้างคงที่เพราะอัตราการเกิดประจุนขึ้นกับความเข้มของรังสี เมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นใกล้ค่าแรงดันไฟฟ้าทะลาย (Breakdown Voltage; V_B) พลังงานของประจุที่ถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้นจนสามารถชนโมเลกุลของแก๊สทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอน ซึ่งถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าให้มีการชนและเกิดการไอออไนซ์เพิ่มขึ้น ส่วนของไอออนบวกจะถูกเร่งเข้าชนคาโทด จนเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) เรียกกระบวนการช่วงนี้ว่า ทาวนด์เซนดดิซชาร์จ (Townsend Discharge)

เมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นถึงแรงดันไฟฟ้าทะลายจะเกิดกระบวนการอวาลันช์ (Avalanche) ทำให้ปริมาณไอออนบวกวิ่งเข้าชนคาโทดมากขึ้นและมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิมากขึ้น ซึ่งจะถูกร่งให้วิ่งเข้าหาแอโนดขณะเดียวกันอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้ก็จะมีการชนกับโมเลกุลของแก๊สทำให้เกิดไอออนมากขึ้น สุดท้ายไอออนบวกที่เพิ่มขึ้นมากขึ้นจะวิ่งชนคาโทดแล้วปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการผลิตไอออนเพิ่มขึ้นทำให้กระแสเพิ่มอย่างรวดเร็วจนมีปริมาณไอออนมากเพียงพอที่จะผลิตอิเล็กตรอนได้ในจำนวนคงที่ ช่วงนี้ระบบสามารถรักษาสภาพดิซชาร์จได้ด้วยตนเองโดยไม่ต้องอาศัยแหล่งกำเนิดจากรังสีภายนอกในการผลิตไอออน ช่วงนี้แก๊สภายในระบบจะเกิดการเรืองแสงขึ้น แรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดลดค่าลงและกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเรียก การเรืองแสงปกติ หรือ นอร์มอลโกลว์ (Normal Glow) สถานะนี้อัตราการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิต่ออัตราการชนของไอออนมีค่าค่อนข้างต่ำ คือประมาณ 0.1 สำหรับเป้าคาโทดที่ทำจากวัสดุทั่วไป โดยในช่วงเริ่มต้นของการเรืองแสงหรือโกลว์ การชนของไอออนบนคาโทดจะปรับตัวเองให้เกิดขึ้นในบางบริเวณ แนวทางเรืองแสงอาจเลื่อนไปมาได้และการชนของไอออนบนคาโทด ไม่มีความสม่ำเสมอโดยจะมีความเข้มของบริเวณการเรืองแสงตามแนวขอบหรือมุมของคาโทดที่มีสนามไฟฟ้าสูงเพื่อรักษาสภาพการโกลว์ (Self-Sustaining) บางบริเวณไว้ เมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นตามแนวการชนของไอออนจะค่อย ๆ ขยายตัว เพิ่มพื้นที่จนครอบคลุมตลอดผิวคาโทด จนกระทั่งมีค่าความหนาแน่นกระแสเท่ากันตลอดโดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดคงที่

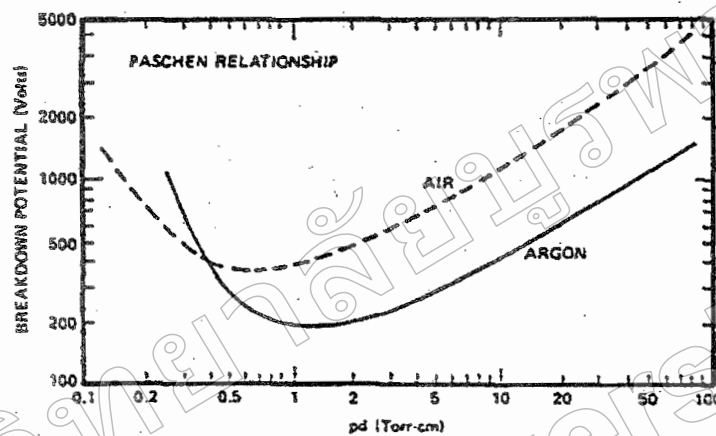


ภาพที่ 2-7 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดของ กระบวนการเกิด ดีซี โกลว์ดิสชาร์จ ในหลอดสุญญากาศบรรจุแก๊สนีออน (Vossen & Kerns, 1978)

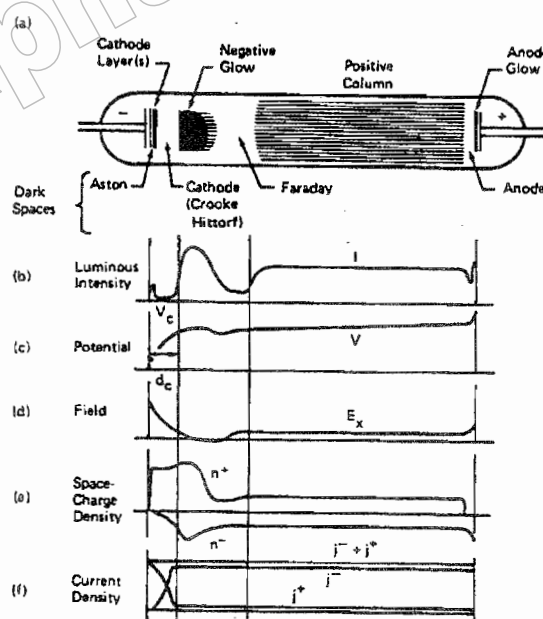
หลังจากการชนของไอออนครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดของคาโทดแล้ว การเพิ่มกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบจะทำให้ทั้งแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น เรียกว่า ช่วงการเรืองแสงผิดปกติ เปล่งแสงจ้าขึ้น หรือ แอบนอร์มอลโกลว์ (Abnormal Glow) เป็นช่วงที่ใช้กับระบบสปีดเตอริง และอีกหลาย ๆ ระบบของกระบวนการเกี่ยวข้องกับ โกลว์ดิสชาร์จ ช่วงนี้ถ้าไม่ระบายความร้อนให้กับคาโทด เมื่อความหนาแน่นของกระแสของคาโทดเพิ่มขึ้นสูงประมาณ 0.1 A/cm^2 ความร้อนที่เกิดจากการชนของไอออนบวกบนผิวคาโทดมีมากขึ้น จนเกิดการปล่อยอิเล็กตรอนแบบเทอร์มิออนิก (Thermionic Electron Emission) เสริมกับการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิและติดตามด้วยกระบวนการถล่มอีกครั้งหนึ่ง ทำให้ความนำไฟฟ้าของแก๊สในระบบสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดตกลงมากขณะที่กระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นและเปล่งประกายจ้าของการอาร์ค (Arc Discharge) ภาพที่ 2-7

ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ละลายในกระบวนการ โกลว์ดิสชาร์จจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปกับระยะทาง d ระหว่างอิเล็กโทรดและระยะปลดการชนระหว่างอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และ โมเลกุลของแก๊ส (ระยะปลดการชนของอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้ จะแปรผกผันกับความดันและมีค่ามากกว่าระยะปลดการชนของการชนกันเองระหว่างโมเลกุลแก๊ส) ปกติอิเล็กตรอนทุติยภูมิแต่ละตัวมีความสามารถในการผลิตไอออนบวกได้ระหว่าง 10 ถึง 20 ตัว เพื่อให้เกิดกระบวนการถล่มในช่วงของนอร์มอลโกลว์ถ้าความดันต่ำเกินไป (ระยะปลดการชนยาวขึ้น) หรือระยะทาง d มีค่าน้อยเกินไป อิเล็กตรอนทุติยภูมิจะไม่สามารถผลิตไอออนได้มากพอก่อนการชนกับอะโนด ถ้าความดันสูงเกินไป (ระยะปลดการชนสั้นลง) หรือระยะ d มากเกินไป อิเล็กตรอนทุติยภูมิไม่สามารถเพิ่มพลังงานให้กับตัวเองในสนามไฟฟ้าได้มากพอสำหรับใช้ในการไอออไนซ์ เมื่อเกิดการชนพลังงาน

จะถูกถ่ายทอดให้โมเลกุลแก๊สในรูปการกระตุ้น (Excite) ขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงขึ้นทำให้ไม่สามารถผลิตไอออนบวกได้มากเพียงพอเช่นกัน ดังนั้นทั้งสองกรณีจะต้องใช้แรงดันทางไฟฟ้าทะลาคอนข้างสูง โดยมีจุดหนึ่งระหว่างนี้ที่ใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าทะลาคต่ำสุดตามกฎหมายของปาสเชน (Paschen's law) ซึ่งแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าทะลาคและผลคูณระหว่างความดันแก๊ส (P) และระยะระหว่างอิเล็กโตรด (d) (ภาพที่ 2-8)



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



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

ในระบบสปีดเตอริงทั่วไปสภาวะของการเกิดโกลว์ดิซาร์จจะกระทำในช่วงที่ผลคูณของความดันกับระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด (Pxd) ซึ่งมีค่าต่ำกว่าจุดต่ำสุดของกราฟมาก (เนื่องจากการเคลือบฟิล์มที่ความดันต่ำทำให้ฟิล์มที่ได้มีคุณภาพดีการแทรกตัวของแก๊สในเนื้อฟิล์มน้อยและลดปริมาณสารปลอมปนในฟิล์ม) จึงต้องการแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นค่อนข้างสูง บางครั้งจึงมีความจำเป็นต้องใช้การเพิ่มความดันชั่วขณะเพื่อให้เริ่มการดิซาร์จได้ที่แรงดันไฟฟ้าต่ำ

ส่วนต่าง ๆ ของกระบวนการโกลว์ดิซาร์จ แสดงดังภาพที่ 2-9 โดยช่วงแรกคือ ช่วงมืดแอสตัน (Aston Dark Space) เป็นบริเวณที่อิเล็กตรอนถูกปล่อยจากคาโทดด้วยพลังงานต่ำประมาณ 1 eV ซึ่งไม่สามารถไอออไนซ์โมเลกุลแก๊สได้ ทำให้เกิดเป็นช่วงมืดถัดจากผิวคาโทด บริเวณที่มีการเปล่งแสงออกมาด้วยความเข้มสูงมากเรียกว่า คาโทด โกลว์ (Cathode Glow) เป็นบริเวณที่ไอออนของแก๊สจากการดิซาร์จ และไอออนของอะตอมสารเคลือบซึ่งถูกผลิตขึ้นบริเวณคาโทดมีการรวมตัวเป็นกลางกับอิเล็กตรอนใกล้ผิวคาโทดด้วยกระบวนการต่าง ๆ ทำให้เกิดแสง ซึ่งเป็นความถี่เฉพาะของสารที่ทำคาโทดและของแก๊สที่ใช้ เช่น ถ้าคาโทดเป็นทองแดงจะมีสีเขียว ทองคำมีสีส้มแดง แก๊สอาร์กอนมีสีน้ำเงินฟ้า และแก๊สไนโตรเจนมีสีม่วงเป็นต้น

ถัดจากคาโทดโกลว์เรียกว่าช่วงมืดครุคหรือช่วงมืดคาโทด (Crook or Cathode Dark Space) พลังงานของอิเล็กตรอนมีค่าสูงกว่าพลังงานในการไอออไนซ์โมเลกุลของแก๊สเมื่อถูกเร่งผ่านสนามไฟฟ้าในระยะปลอดการชนออกมา ทำให้บริเวณปลอดการชนไม่มีการไอออไนซ์เกิดขึ้น จึงไม่เกิดการปลดปล่อยแสงในช่วงนี้และกลายเป็นบริเวณมืด ถัดจากระยะปลอดการชนอิเล็กตรอนทุกตัวจะสูญเสียพลังงานส่วนใหญ่โดยการไอออไนซ์โมเลกุลแก๊ส ไอออนบวกที่เกิดขึ้นเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าอิเล็กตรอนมากทำให้ระยะปลอดการชนของอิเล็กตรอนมีการสะสมของไอออนบวกอยู่มาก (Positive Space Charge) ศักย์ไฟฟ้าเกือบทั้งหมดตกคร่อมบริเวณคาโทดคาร์คสเปซนี้ ทำให้สนามไฟฟ้าบริเวณนี้สูงขึ้นมากและมากเกินไปสำหรับการเร่งอิเล็กตรอนชนและไอออไนซ์โมเลกุลแก๊สในเวลาถัดมาทำให้ภายหลังการเกิดนอร์มอลโกลว์ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขั้วอิเล็กโตรดมีค่าลดลงตามกราฟภาพที่ 2-8 ส่วนอิเล็กตรอนเมื่อเลยจากบริเวณที่ผลิตไอออนของคาร์คสเปซแล้วจะมีพลังงานลดลง ดังนั้นพลังงานที่เหลือจึงเพียงใช้ในการกระตุ้นโมเลกุลของแก๊ส และเกิดการเรืองแสงขึ้น แม้อิเล็กตรอนจะเป็นอนุภาคที่เคลื่อนที่ได้เร็วแต่พลังงานที่เหลือน้อยมาก รวมทั้งประจุบวกและประจุสะสมของไอออนทางด้านซ้ายมือในบริเวณคาร์คสเปซทำให้อิเล็กตรอนใช้เวลาในการเคลื่อนที่ผ่านช่วงเรืองแสงนี้นานขึ้นและเกิดการสะสมประจุลบบริเวณนี้ จึงเรียกว่า เนกาทีฟโกลว์ (Negative Glow)

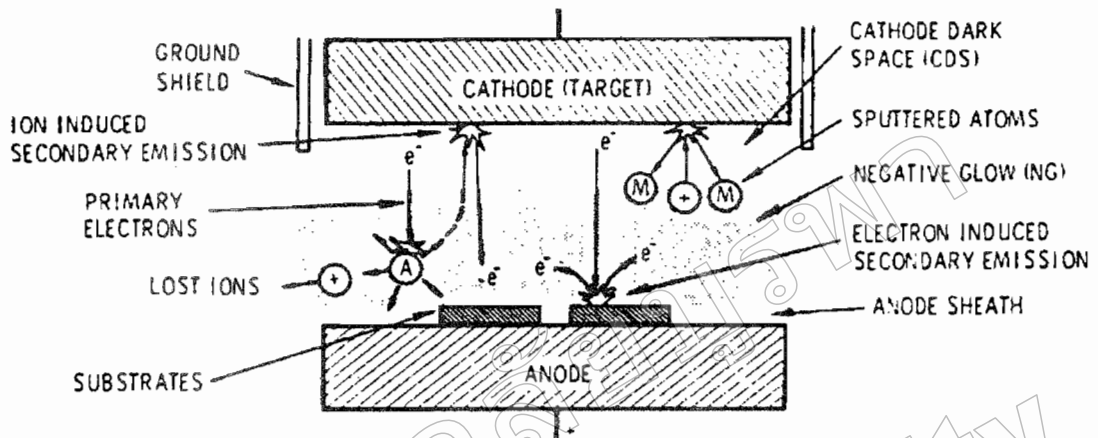
พลังงานของอิเล็กตรอนจะลดลงจนไม่สามารถกระตุ้น โมเลกุลแก๊สให้อยู่ในระดับพลังงานสูงได้ ทำให้เกิดบริเวณมืดเรียกว่า ช่วงมืดฟาราเดย์ (Faraday Dark Space) ถัดจากช่วงนี้ กระบวนการที่เกิดขึ้นคล้ายการคายรังสีของทาวน์เซนด์ซึ่งมีปริมาณอิเล็กตรอนค่อนข้างคงที่ถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าค่าต่ำ ๆ ทำให้อิเล็กตรอนถูกเร่งเข้าสู่แอโนด และมีพลังงานสูงพอสำหรับ ไอออนไนซ์และเกิดการเรืองแสงขึ้นที่บริเวณนี้อีกครั้งหนึ่ง อิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่เร็วจะถูกกวาดเข้าสู่แอโนดอย่างรวดเร็วทำให้พลาสมาบริเวณนี้มีประจุบวกสูงกว่าจึงเรียกว่า ลำเรืองแสงศักย์ไฟฟ้าบวก (Positive Glow Column)

เนื่องจากการรักษาสภาวะ โกลว์ดีสชาร์จขึ้นกับปริมาณของอิเล็กตรอนที่ถูกผลิตขึ้น บริเวณคาโทดจากการชนของไอออนที่ถูกผลิตบริเวณเนกาทีฟ โกลว์ จึงพบว่าการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งแอโนดเพียงเล็กน้อยจะไม่มีผลต่อกระบวนการ โกลว์ดีสชาร์จ เมื่อเลื่อนแอโนดเข้าหาคาโทด จนพ้นช่วงมืดฟาราเดย์เข้าสู่เนกาทีฟ โกลว์จนถึงช่วงคาโทดคาร์คสเปซ ทำให้ปริมาณ ไอออนที่ถูกผลิตจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิมีปริมาณน้อยลง การรักษาสภาพ โกลว์ดีสชาร์จไว้ จำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นซึ่งจะส่งผลถึงปริมาณ ไอออนที่ถูกผลิตสูงขึ้นด้วย การ โกลว์ ในลักษณะนี้จะเรียกว่า ออบสตรัคต์ โกลว์ (Obstructed Glow) และเมื่อเลื่อนแอโนดเข้าใกล้คาโทด ต่อมาจนพ้นขอบของคาโทดคาร์คสเปซ ซึ่งมีระยะสั้นกว่าระยะปลอดการชนของอิเล็กตรอน จะไม่มีการผลิต ไอออนเกิดขึ้นและกระบวนการดีสชาร์จไว้ได้ และถ้าหากมีสิ่งสกปรกบริเวณคาโทด การอาร์คอาจเกิดขึ้นได้โดยไม่เกิดการ โกลว์ดีสชาร์จก็ได้

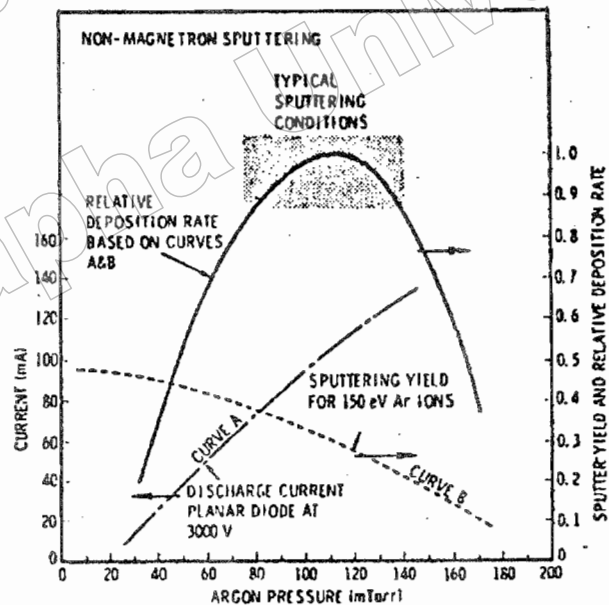
ระบบเคลือบแบบ ดีซี สปีดเตอร์ริง

ภาพที่ 2-10 แสดงระบบเคลือบแบบดีซีสปีดเตอร์ริงอย่างง่ายที่สุด (พิเศษฐ ลิ้มสุวรรณ และธนิตธา รัตนะ, 2547; Bunshah, 1982; Smith, 1995) ประกอบด้วย คาโทด คือ แผ่นเป้าสารเคลือบ และแอโนด คือ ที่วางวัสดุรองรับต้องการเคลือบ ปกติระยะระหว่างคาโทดและวัสดุรองรับอยู่ระหว่าง 4 - 10 cm เพื่อป้องกันการสูญเสียอะตอมสารเคลือบที่ผนังของภาชนะสุญญากาศ โดยทั่วไประยะคาร์คสเปซอยู่ระหว่าง 1 - 4 cm โดยแอโนดจะอยู่บริเวณเนกาทีฟ โกลว์ส่วนอุปกรณ์ทำงานจะอยู่ในช่วงแอนนอร์มอล โกลว์ดีสชาร์จ แก๊สที่ใช้เป็นแก๊สเฉื่อย (ปกติใช้แก๊สอาร์กอน) ขณะเกิด โกลว์ดีสชาร์จที่ความดันค่าหนึ่งกระบวนการ ไอออนไนเซชันจะรักษาสภาพ โกลว์ดีสชาร์จไว้ตราบที่ระยะคาร์คสเปซไม่มากกว่าระยะระหว่างคาโทดและแอโนด เมื่อความดันลดลงหรือแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดสูงขึ้นระยะปลอดการชนของอิเล็กตรอนจะสูงขึ้นทำให้ระยะคาร์คสเปซขยายตัวออกและแหล่งผลิตไอออนในระบบมีปริมาณน้อยกระแสลดลง และอะตอมที่ถูกสปีดเตอร์มีปริมาณลดลงตามปริมาณของ ไอออนและกระแสไฟฟ้าในระบบที่ความดันต่ำกว่า

10^{-2} mbar ระยะคาร์ดสเปซจะยาวกว่าระยะระหว่างอิเล็กโตรดและกระแสไฟฟ้าลดลงสู่ศูนย์ทำให้กระบวนการผลิตไอออนสิ้นสุดลงและไม่มีอะตอมหลุดออกจากเป้าสารเคลือบเนื่องจากการสปัตเตอร์อีก



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



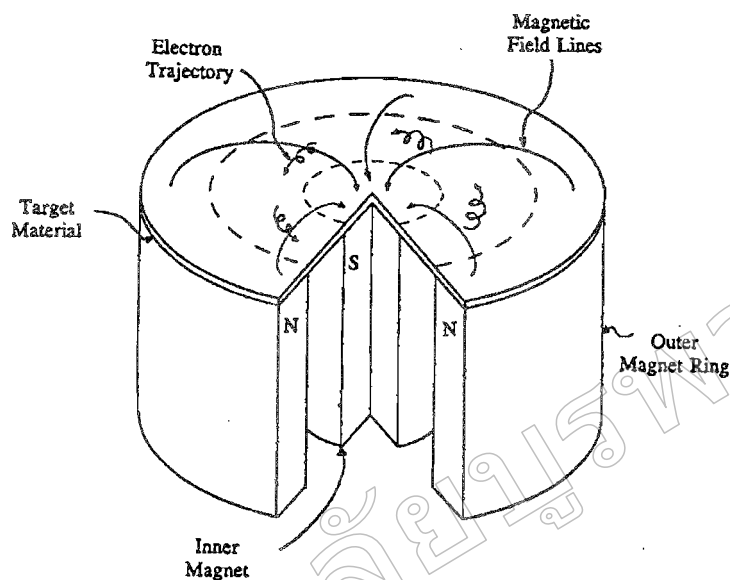
ภาพที่ 2-11 ผลของความดันในระบบที่มีผลต่ออัตราเคลือบค่าyield และกระแสไฟฟ้าในระบบสปัตเตอร์ริงของนิเกิลที่ใช้แรงดันไฟฟ้า 3,000 V ระหว่างขั้วอิเล็กโตรดที่วางห่างกัน 4.5 cm (Vossen & Kerns, 1978)

ขณะที่ความดันสูงขึ้นระยะคาร์คสเปจจะหดสั้นลงบริเวณการผลิตไอออนมีปริมาตรสูงขึ้นกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรเพิ่มขึ้นและกระบวนการสปัตเตอริงเกิดขึ้นในอัตราสูงตามความดัน ดังภาพที่ 2-11 เส้นกราฟ A ขณะที่ความดันภายในระบบสูงขึ้นระยะปลดการชนระหว่างโมเลกุลของแก๊สมีค่าลดลงอะตอมสารเคลือบที่หลุดออกจากเป้าจะส่งผ่านเคลือบบนวัสดุรองรับได้ยากจากการชนกับโมเลกุลของแก๊สและสะท้อนกลับสู่เป้าสารเคลือบหรือสูญเสียสู่ผนังภาชนะสุญญากาศทำให้ค่าของอัตราการสปัตเตอริงมีค่าลดลงแต่เมื่อความดันสูงขึ้น ดังภาพที่ 2-11 เส้นกราฟ B ผลรวมระหว่างอิเล็กตรอนและกระแสไอออนจะทำให้อัตราการเคลือบมีค่าสูงสุดที่ความดันค่าหนึ่งทั้งนี้พบว่าการสปัตเตอริงเริ่มเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า 3,000 V ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่วางห่างกัน 4.5 cm ในแก๊สอาร์กอนการเคลือบจะหยุดที่ความดันมีค่าต่ำกว่า 2.6×10^{-4} mbar และที่ความดันสูงกว่า 1.6×10^{-5} mbar โดยอัตราเคลือบจะมีค่าสูงสุดและลดลงเมื่อความดันสูงเกินค่านี้ ดังนั้นบริเวณที่เหมาะสมกับกระบวนการสปัตเตอริงคือบริเวณที่ให้อัตราเคลือบสูงและประสิทธิภาพดีที่สุดจากภาพที่ 2-11 พบว่าความดันที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบคือ 1.0×10^{-5} mbar ความหนาแน่นกระแสประมาณ 1.0 mA/cm^2 ด้วยอัตราเคลือบ $0.036 \text{ } \mu\text{m/min}$ ซึ่งเป็นอัตราเคลือบที่ค่อนข้างต่ำในขณะที่ใช้แรงดันไฟฟ้าค่อนข้างสูง (พิเชษฐ ลิมสุวรรณ และธณัฐธา รัตนะ, 2547)

ระบบเคลือบแบบ ดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอริง

อัตราการเกิดสปัตเตอริงนั้นจะขึ้นกับผลคูณระหว่างอิเล็กตรอนและปริมาณไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบดังนั้นการเพิ่มอัตราการสปัตเตอริงนั้นนอกจากจะทำได้โดยการเพิ่มอิเล็กตรอนแล้วยังทำได้โดยการเพิ่มปริมาณไอออนที่วิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบซึ่งในระบบดีซี สปัตเตอริง ปกตินั้นทำได้เพียงการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดหรือเพิ่มความดันซึ่งจะมีขีดจำกัดสูงสุดที่ความหนาแน่นกระแสประมาณ 1 mA/cm^2 และความดันประมาณ 1.33×10^{-5} mbar นอกจากนี้ยังพบว่าในระบบดีซี สปัตเตอริง ทั่วไปอะตอมของแก๊สที่จะเกิดการไอออไนซ์มีค่าน้อยกว่า 1% นอกจากนี้ยังมีข้อเสียเมื่อความดันสูงขึ้นจะทำให้ปริมาณแก๊สที่แทรกตัวในฟิล์มบางที่ได้มีค่าสูงด้วย (พิเชษฐ ลิมสุวรรณ และธณัฐธา รัตนะ, 2547)

ต่อมาได้มีการพัฒนาระบบใหม่เรียกว่าระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง (พิเชษฐ ลิมสุวรรณ และธณัฐธา รัตนะ, 2547; Smith, 1995) ซึ่งเป็นการใช้สนามแม่เหล็กช่วยโดยจ่ายสนามแม่เหล็กให้มีทิศขนานกับผิวหน้าเป้าสารเคลือบและมีทิศตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า ซึ่งจะช่วยให้ระยะทางเดินของอิเล็กตรอนให้ยาวขึ้น โดยอำนาจของสนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นทางโค้ง (ภาพที่ 2-12) ทำให้การไอออไนซ์เนื่องจากการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมแก๊สเฉื่อยมีค่าสูงขึ้นซึ่งจะทำให้อัตราการสปัตเตอริงสูงขึ้นด้วย



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

ทั้งนี้จากการศึกษาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก พบว่าถ้าอิเล็กตรอนมีทิศทางการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กอิทธิพลของสนามแม่เหล็กจะทำให้อนุภาคประจุนั้นเคลื่อนที่ในแนววงกลม (ภาพที่ 2-13 (a)) ด้วยรัศมี

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

เมื่อ W คือพลังงานของอิเล็กตรอนในหน่วย eV

B คือความเข้มสนามแม่เหล็กในหน่วย gauss

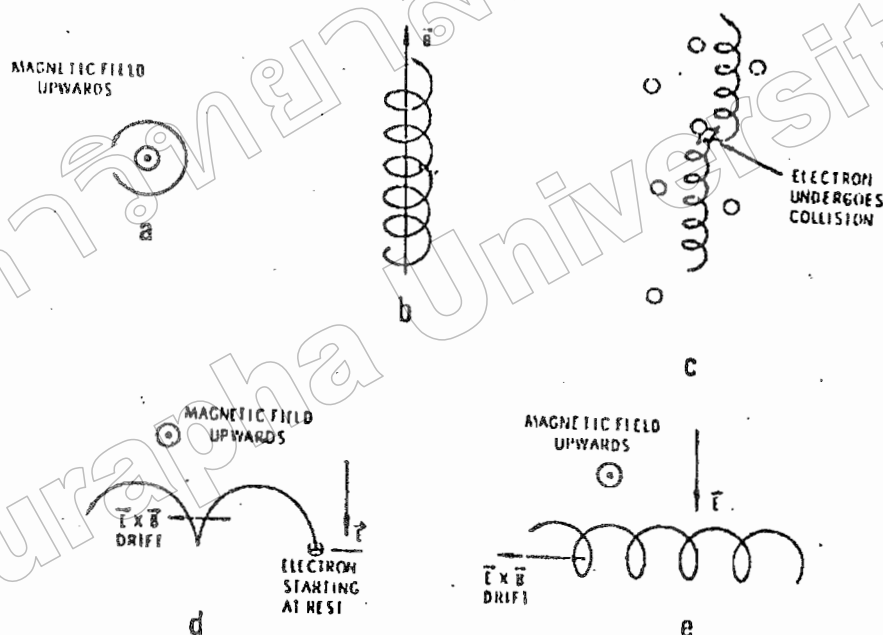
หมุนด้วยความถี่ไซโคลตรอน $\nu = 2.8 \times 10^6$ Hz

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

ถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ภายในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกันอำนาจของสนามทั้งสองนอกจากจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในแนวโค้งแล้วยังสามารถทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเรียกว่าการเคลื่อนที่แบบลอยเลื่อน (Drift motion) มีค่าเท่ากับ

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

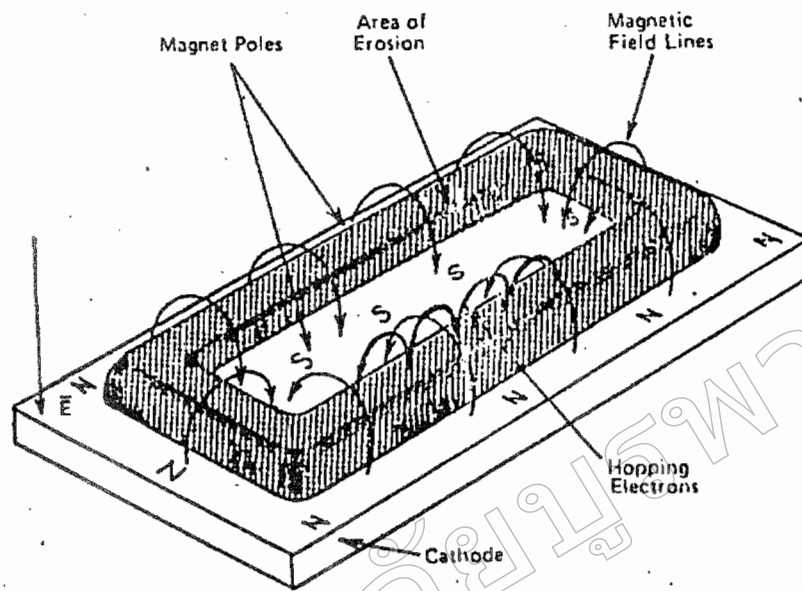
เมื่อ E คือสนามไฟฟ้าหน่วยเป็น V/cm
 B คือความเข้มสนามแม่เหล็กในหน่วย gauss



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

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

ระบบสปัตเตอริงที่ใช้สนามแม่เหล็กช่วยเพิ่มปริมาณไอออนนั้นถ้าสนามแม่เหล็กมีทิศทางขนานกับสนามไฟฟ้าจะเรียกว่าสนามตามยาว (Longitudinal Field) จะทำให้ประสิทธิภาพการเพิ่มไอออนไม่สูงนักแต่ไม่ทำให้แนวการเกิดโกลด์สซาร์จเปลี่ยนแปลงไปและยังสามารถรักษาความสม่ำเสมอของฟิล์มบางไว้ได้กรณีของสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าเรียกว่าสนามตามขวาง (Transverse Field) โดยกระบวนการเพิ่มปริมาณไอออนเกิดขึ้นดังนี้ หลังจากไอออนบวกชนกับเป้าสารเคลือบและเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองออกมาอิเล็กตรอนชุดที่สองจะเคลื่อนที่ในลักษณะเดียวกับภาพที่ 2-13 (d) ทำให้อิเล็กตรอนถูกกักอยู่ในบริเวณสนามแม่เหล็กใกล้คาโทดและเคลื่อนที่แบบลอยเลื่อนตามแนวผิวหน้าของคาโทด (ภาพที่ 2-14) ทำให้อิเล็กตรอนมีโอกาสนชนกับโมเลกุลแก๊สบริเวณผิวหน้าเป้าสารเคลือบมากขึ้นจนเพิ่มปริมาณไอออนสูงมากใกล้ผิวเป้าสารเคลือบอิเล็กตรอนตัวใดที่ไม่ชนโมเลกุลของแก๊สจะเดินทางเป็นวงโค้งเข้าชนเป้าสารเคลือบและผลิตอิเล็กตรอนชุดที่สองมากขึ้นเป็นผลทำให้ไอออนถูกผลิตในปริมาณสูงมากและเกิดโกลด์สซาร์จทำให้เกิดสเปซชาร์จจากไอออนบวกสูงที่ผิวคาโทดซึ่งอาจสั้นกว่าระยะปลอดการชนในดีซีสปัตเตอริงที่ความดันใช้งานมากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเกือบทั้งหมดจะตกคร่อมบริเวณนี้ และมีค่าสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณคาร์คสเปซในดีซีสปัตเตอริงขณะไม่มีสนามแม่เหล็กมาก ทำให้ความต้องการแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดของระบบแมกนีตรอนสปัตเตอริงลดลง ทั่วไปมีค่าประมาณ $300 - 800 \text{ V}$ ถ้าใช้สนามแม่เหล็กกับแมกนีตรอนทรงกระบอกจะเรียกว่า แมกนีตรอนสปัตเตอริงทรงกระบอก (Cylindrical Magnetron Sputtering) และถ้าใช้สนามแม่เหล็กกับระบบดีซีสปัตเตอริงที่ใช้เป้าแบบแผ่นราบจะเรียกว่า พลาเนร์แมกนีตรอนสปัตเตอริง (Planar Magnetron Sputtering)



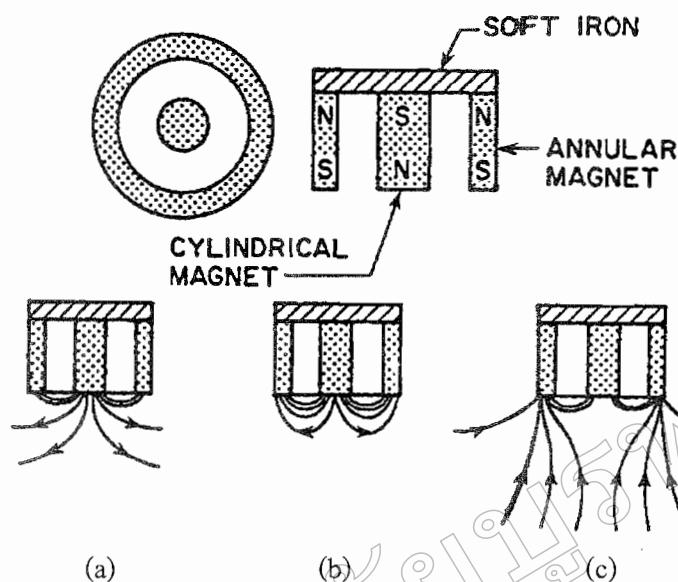
ภาพที่ 2-14 การจัดสนามแม่เหล็กและแนวการกัดกร่อนของเป้าสารเคลือบในระบบพลาสมาแมกนีตรอน สปีดเตอร์ริง (Chapman, 1980)

ประสิทธิภาพการเพิ่มไอออนที่สูงมากในระบบแมกนีตรอนและพลาสมาที่เกิดขึ้นจะเพิ่มมากบริเวณเป้าสารเคลือบ ทำให้อัตราการสปีดเตอร์ของระบบนี้มีค่าสูงขณะที่ความดันในระบบจะมีค่าต่ำ แรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าเกือบคงที่ในทุกค่าของอัตราการสปีดเตอร์ แมกนีตรอนสปีดเตอร์ริงทรงกระบอกทั่วไปมีอัตราการสปีดเตอร์สูงกว่า $1.0 \mu\text{m}/\text{min}$ และมีอัตราเคลือบสูงกว่า $0.2 \mu\text{m}/\text{min}$ ความหนาแน่นกระแสที่ผิวคาโทดประมาณ $20.0 \text{ mA}/\text{cm}^2$ แรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าระหว่าง $300 - 800 \text{ V}$ ที่ความดันประมาณ $5.33 \times 10^{-5} \text{ mbar}$ ประสิทธิภาพการเคลือบสูงขึ้นกว่า 10 เท่าตัวนอกจากนี้ยังสามารถขยายสเกลให้กับระบบสปีดเตอร์ริงขนาดใหญ่ได้ง่ายเมื่อออกแบบใช้งานร่วมกับไดรฟ์ไฮดรอสปีดเตอร์ริงระบบสามารถเคลือบได้ที่ความดันต่ำถึง 10^{-5} mbar

ระบบเคลือบแบบ อันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง

ในการเคลือบฟิล์มพบว่าถ้าระดมยิงไอออนระหว่างกาเกิดฟิล์มจะเป็นการเปลี่ยนแปลงฟิล์มหลายอย่างเช่นพฤติกรรมกาเกิดนิวเคลียส (Nucleation Behaviour) สัณฐานวิทยา (Morphology) องค์ประกอบ (Composition) ทิศทางการจัดเรียงตัวและสมบัติเชิงกล เป็นต้น ในกรณีแมกนีตรอนสปีดเตอริงไอออนที่ใช้ในการระดมยิงวัสดุรองรับจะมาจากประจุไฟฟ้าที่อยู่รอบวัสดุรองรับซึ่งทำได้โดยการจ่ายศักย์ลบประมาณ 1 - 500 V ให้กับวัสดุรองรับ อย่างไรก็ตาม ใอย่างไก็ดี ความหนาแน่นกระแสที่ฟิล์มหรือผิวหน้าของวัสดุรองรับสำหรับระบบดีซีแมกนีตรอน ปกติจะมีค่าต่ำประมาณ 0.05 - 0.10 ไอออน/อะตอมสารเคลือบ แต่การใช้งานจริงต้องมีค่าสูงกว่านี้ (Rohde & Munz, 1991)

สำหรับการเคลือบแข็ง (Hard coating) ฟิล์มบางที่ต้องการนั้นต้องมีช่องว่าง (Voids) ในเนื้อฟิล์มน้อยที่สุดซึ่งจะทำให้ฟิล์มบางที่ได้นั้นมี ความทนต่อการกัดกร่อน (Corrosion) และทนต่อการขัดสี (Wear Resistance) มากยิ่งขึ้น โดยการลดช่องว่างในเนื้อฟิล์มนี้สามารถทำได้โดยการเพิ่มความต่างศักย์ไบแอสให้กับวัสดุรองรับแต่ก็จะทำให้เกิดความเค้นและความบกพร่อง (Defects) ภายในเกรน (Grain) ของฟิล์มมากขึ้นเมื่อความต่างศักย์ไบแอสเพิ่มขึ้นด้วยซึ่งจะทำให้คุณภาพของฟิล์มและการยึดติดของฟิล์มกับวัสดุรองรับลดลงปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไอออน (อัตราส่วนของไอออน/อะตอมสารเคลือบ) ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้ระบบเคลือบแบบอันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง (Unbalanced Magnetron Sputtering) (Rohde & Munz, 1991; Sproul, 1992)



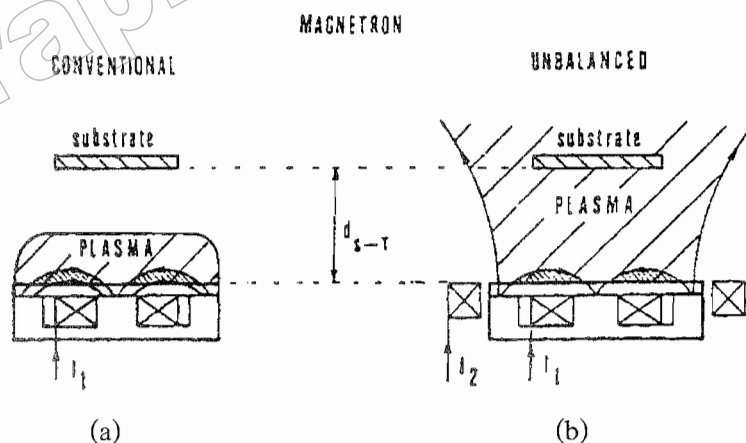
ภาพที่ 2-15 ลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กของระบบอานาล็อก แมกนีตรอน สปีดเตอร์ริง

(Rickerby & Matthews, 1991)

ระบบอานาล็อก แมกนีตรอน สปีดเตอร์ริง ได้รับการคิดค้นและตีพิมพ์เผยแพร่โดย Window และ Savvides ครั้งแรกในปี ค.ศ.1986 โดยทั้งสองพบว่าการติดตั้งแม่เหล็กที่คาโทดของระบบสปีดเตอร์ริงปกตินั้นถ้าหากทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กด้านใดด้านหนึ่งมากกว่าหรือน้อยกว่าอีกด้านหนึ่งแล้วสนามแม่เหล็กที่คาโทดจะมีลักษณะไม่สมมาตรทำให้ปริมาณไอออนที่วิ่งเข้าชนหรือระดมยิงวัสดุรองรับนั้นมีปริมาณเพิ่มขึ้นมากกว่าปกติซึ่งจะมีผลต่อคุณภาพของฟิล์มโดยตรงการจัดแม่เหล็กของระบบนี้อาจแบ่งเป็น 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/อะตอมสารเคลือบมีค่าสูงขึ้น คือประมาณ 2 : 1 (เมื่อใช้ความต่างศักย์ไบแอสต่ำ) ปัจจุบันมีนักวิจัยหลายกลุ่มที่นำแนวคิดนี้ไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายซึ่งมีทั้งที่ใช้แม่เหล็กแบบถาวรและแม่เหล็กไฟฟ้าจากการศึกษาของ Musil และ Kadlec ที่ระบบเคลือบใช้อานาล็อกพลาสมาแมกนีตรอนเดี่ยวและขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า 2 ขด เคลือบไททาเนียมไนไตรด์ที่ระยะเป้าสารเคลือบและวัสดุรองรับประมาณ 200.0 mm โดยใช้ความต่างศักย์ไบแอสในช่วง -5 ถึง -100 V พบว่าสามารถทำให้ได้ความหนาแน่นกระแสสูงถึง 6.0 mA/cm^2 ซึ่งสูงมากพอสำหรับใช้ในงานอุตสาหกรรม (Munz, 1991)

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



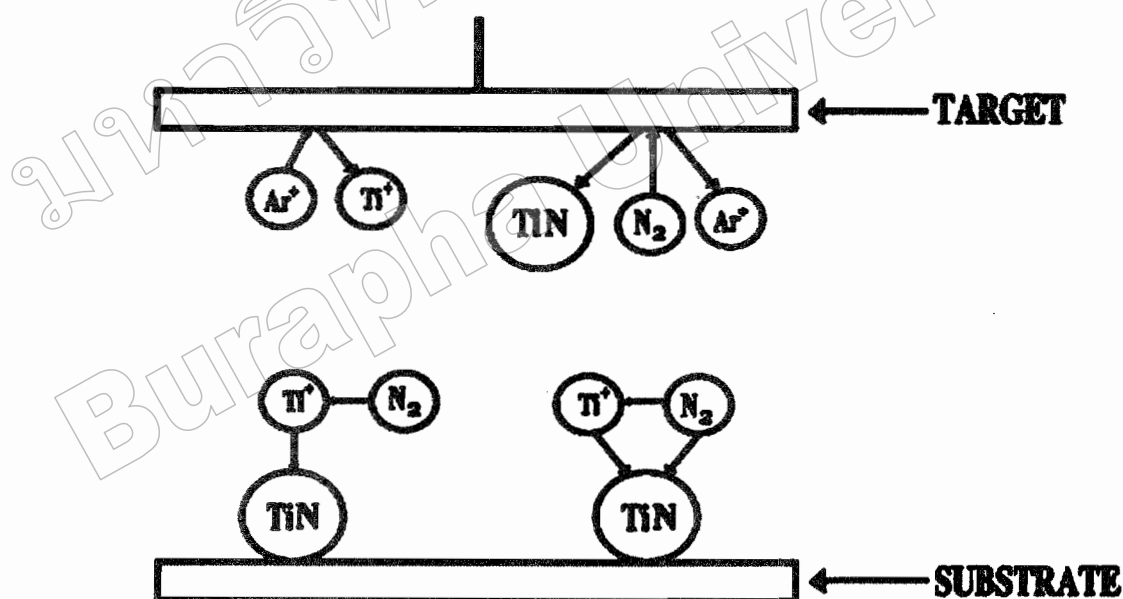
ภาพที่ 2-16 ลักษณะพลาสมาของระบบสปัตเตอริง (Munz, 1991)

(a) ระบบบาลานซ์ แมกนีตรอน สปัตเตอริง

(b) ระบบอัมบาลานซ์ แมกนีตรอน สปัตเตอริง

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธี รีแอคทีฟ สเปตเตอริง

สำหรับกระบวนการรีแอคทีฟสเปตเตอริง (Reactive Sputtering) มติ ห่อประชุม (2548) ได้อธิบายไว้ว่าเป็นกระบวนการสเปตเตอริงที่มีการป้อนแก๊สไวปฏิกิริยา (Reactive Gas) เข้าสู่ระบบ เพื่อให้เกิดสารประกอบของฟิล์มตกเคลือบบนชิ้นงานหรือวัสดุรองรับการสเปตเตอริงที่มีเป้าสารเคลือบเป็นโลหะบริสุทธิ์ โดยการป้อนแก๊สไวปฏิกิริยา จะทำให้เกิดสารประกอบต่าง ๆ ของโลหะได้ เช่น การป้อนแก๊สไนโตรเจนอาจทำให้เกิดโลหะไนไตรด์ถ้าป้อนแก๊สอะเซทิลีน (C_2H_2) หรือ มีเทน (CH_4) อาจเกิดเป็นสารประกอบของโลหะคาร์ไบด์ เป็นต้น โดยปกติความดันแก๊สไวปฏิกิริยาที่ใช้ค่อนข้างต่ำจนไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาในสภาวะปกติ อย่างไรก็ตาม คาดกันว่าอิเล็กตรอนในพลาสมาที่มีส่วนในการกระตุ้นหรือไอออไนซ์แก๊สไวปฏิกิริยาให้มีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับโลหะได้สูงกว่าสภาวะปกติ โดยแก๊สไวปฏิกิริยา เช่น แก๊สไนโตรเจน (N_2) อาจรวมตัวกันกับโลหะ เช่น ไททาเนียม (Ti) แล้วเกิดเป็นสารประกอบไททาเนียมไนไตรด์ (TiN) ตามภาพที่ 2-17 ได้เป็น 3 ลักษณะ ดังนี้



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

1. แก๊สไวปฏิกิริยา เช่น แก๊สไนโตรเจนทำปฏิกิริยากับอะตอมไทเทเนียมที่ผิวหน้าเป่าของสารเคลือบ กลายเป็นสารประกอบไทเทเนียมไนไตรด์แล้วถูกสปีดเตอร์ให้หลุดออกแล้วตกเคลือบลงบนแผ่นวัสดุรองรับ ปฏิกิริยาส่วนนี้เกิดขึ้นสูงเมื่อความดันย่อยของแก๊สไวปฏิกิริยาในระบบมีค่าสูง พบว่า ในการเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์บนฟิล์มเคลือบที่เป่าสารเคลือบ ส่วนที่มีอัตราการสปีดเตอร์ต่ำจะปรากฏฟิล์มของสีทองไทเทเนียมบริเวณนั้น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Target Poisoning มีผลทำให้อัตราการเคลือบลดลง

2. แก๊สไวปฏิกิริยา เช่น แก๊สไนโตรเจนรวมตัวกับอะตอมไทเทเนียมที่ถูกสปีดเตอร์ในระหว่างทางวิ่งสู่แผ่นวัสดุรองรับแล้วตกเคลือบบนแผ่นวัสดุรองรับ กระบวนการนี้ในทางทฤษฎีถือว่าเกิดได้น้อยมากเนื่องจากสถานะของการทำปฏิกิริยาไม่เหมาะสมตามกฎอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัม แต่เป็นไปได้ที่การรวมตัวของสารประกอบจะเกิดในช่วงนี้

3. แก๊สไวปฏิกิริยา เช่น แก๊สไนโตรเจนรวมตัวกับไทเทเนียมบนผิววัสดุรองรับหรือชิ้นงาน การทำรีแอคทีฟสปีดเตอริง โดยทั่วไปความดันแก๊สไวปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดสารประกอบที่ต้องการมีค่าต่ำกว่าช่วงที่เกิดขบวนการโกลด์ดิสซาร์จ ในกระบวนการจึงใช้แก๊สไวปฏิกิริยากับแก๊สเฉื่อยทำให้รักษาสภาวะโกลด์ดิสซาร์จไว้ได้ ในเวลาเดียวกันช่วยให้อัตราเคลือบสูงขึ้น ในการทำรีแอคทีฟสปีดเตอริง ยังมีสิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือความดันย่อยของแก๊สไวปฏิกิริยาต้องมีค่าพอเหมาะกับการเกิดฟิล์มสารประกอบที่ต้องการ เช่น การเคลือบสารประกอบ Ferroferric Oxide (Fe_3O_4) ความดันแก๊สออกซิเจนที่ใช้ในรีแอคทีฟสปีดเตอริง ถูกจำกัดในช่วงความดันแคบมาก ถ้าความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนมากเกินไปจะเกิดสารประกอบของ Ferric Oxide (Fe_2O_3) ถ้าน้อยเกินไปจะเกิดสารประกอบ Ferrous Oxide (FeO) หรือฟิล์มของเหล็ก (Fe)

การหาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง

ลักษณะเฉพาะหรือสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มบาง สามารถวิเคราะห์หรือหาได้จากเทคนิคต่าง ๆ หลายเทคนิค ในงานวิจัยนี้จะศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางต่อไปนี้ โครงสร้างผลึก เฟส ลักษณะพื้นผิว และความหนา ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ดังนี้

1. การศึกษาโครงสร้างด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD)

ลักษณะเฉพาะสำคัญอย่างหนึ่งของฟิล์มบางคือการศึกษาโครงสร้างผลึก หรือ เฟส ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (Diffraction Analysis) กรมหลวงราชบุรีดิเรกฤทธิ์ (2547) อธิบายหลักการของเทคนิคนี้ไว้ดังนี้ การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับการแยกแยะโครงสร้างของสารที่ใช้ในการเคลือบโดยการวิเคราะห์อาศัยการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนกับมาตรฐาน JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) ของสารนั้น ดังนั้นเทคนิค XRD เป็นเทคนิคสำหรับวัดค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ที่สะท้อนจากผลึก ใช้หลักการของการเลี้ยวเบนของคลื่นโดยพบว่ารังสีเอกซ์เลี้ยวเบนได้เมื่อให้ตกกระทบผลึกซึ่ง Bragg ได้เสนอแนวคิดที่เราสามารถมองผลึกประกอบด้วยชั้น (Layer) หรือ ระนาบ (Plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมที่ตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนทั้งนี้คลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่าง ๆ ดังกล่าวจะมีความเข้มสูง ถ้ารังสีเอกซ์ 1 และ 2 ตกกระทบทำมุม θ กับระนาบของผลึก A และ B สนามไฟฟ้าของรังสีเอกซ์จะก่อให้เกิดแรงกระตุ้น กระทำบนอิเล็กตรอนที่ P กับ Q ให้สั่นด้วยความถี่เดียวกับรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบ และอิเล็กตรอนนั้นแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นรังสีเอกซ์ออกไปทุกทิศทางแต่ในทิศทาง 1' และ 2' ซึ่งเสมือนรังสีเอกซ์สะท้อนออกจากระนาบของผลึกจะไปแทรกสอดแบบเสริมกัน (In Phase) แม้ว่าแบบจำลองที่กล่าวมาจะไม่ถูกต้องในทางกายภาพ เนื่องจากแท้จริงแล้วระนาบของอะตอมไม่ได้สะท้อนคลื่นแต่วิธีนี้ก็ใช้ได้ทางเรขาคณิต พิจารณา

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

เมื่อ δ คือ ความแตกต่างของระยะที่คลื่นเดินทาง

λ คือ ความยาวคลื่น

n คือ จำนวนเต็มใด ๆ

จากภาพที่ 2-18

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

จากรูปตรีโกณมิติพื้นฐาน

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

โดย PQ คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ d_{hkl}

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

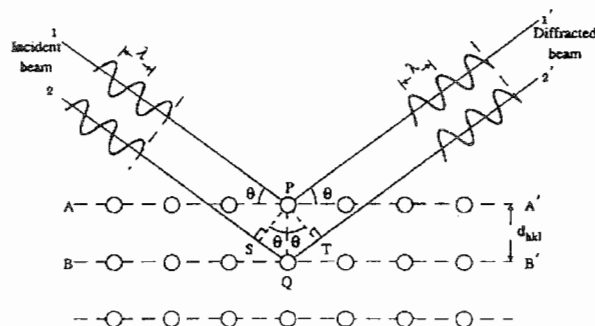
จากสมการ (2-4) เท่ากับ (2-7) จะได้

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

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

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

ในภาพที่ 2-18 เป็นแบบจำลองสำหรับการพิสูจน์กฎของแบรกก์ อะตอมเรียงตัวเป็นระเบียบ โดยมีระยะห่างระหว่างอะตอมใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ($\sim 10^{-10}$ m) จะทำหน้าที่เป็นเสมือนเกรตติงเลี้ยวเบน แต่จะเป็นเกรตติงเลี้ยวเบนแบบ 3 มิติ



ภาพที่ 2-18 แบบจำลองการเรียงตัวของอะตอม (กมล เอี่ยมพนากิจ, 2547)

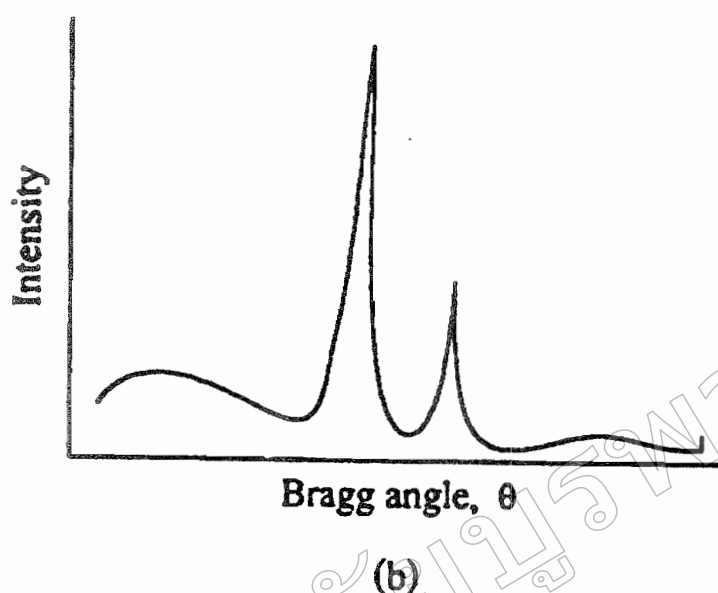
สัญญาณที่ตรวจจับได้จะแสดงออกมาในรูปแบบของการเลี้ยวเบนรังสี (Diffraction Pattern) ความเข้มของสัญญาณขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกันเช่น โครงสร้างของวัสดุ ปริมาตรของวัสดุที่แผ่รังสี (Volume of Irradiated Material) รูปทรงของการหักเห (Diffraction Geometry) และการวางชิ้นงาน (Sample Alignments) เป็นต้น

ตำแหน่งของพีคที่มีค่ามากที่สุด สามารถบอกถึงขนาดและรูปร่างของหน่วยเซลล์ได้ ในขณะที่ความกว้างใช้หาค่าขนาด การจัดเรียงตัว (Orientation) และความเครียด (Strain) ภายในเกรนของวัสดุหลายผลึก โดยอาศัย Scherrer equation ดังสมการที่ 2-9

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

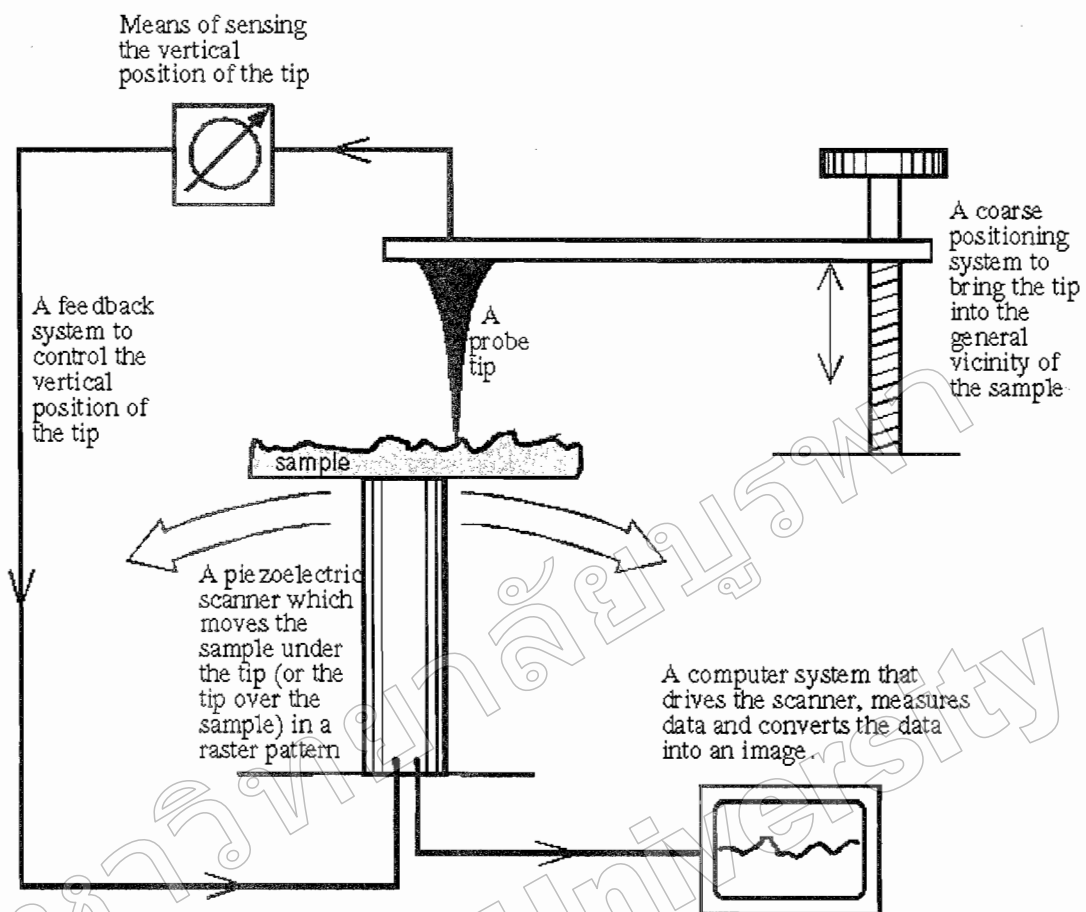
- เมื่อ L คือ ขนาดของผลึกฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์
 k คือ ค่าคงที่เท่ากับ 0.94
 λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ($\text{CuK}\alpha = 1.5406 \text{ \AA}$)
 β คือ ความกว้างครึ่งหนึ่งของพีคที่มีค่าความเข้มสูงสุด
 θ คือ ครึ่งหนึ่งของมุมตรงจุดศูนย์กลางพีค

บางครั้งตำแหน่งของรูปแบบการเลี้ยวเบนที่วัดได้อาจจะเลื่อนไปด้วยค่ามุมที่สูงขึ้น เนื่องจากผลของความเค้นคงค้าง (Residual Stress) ในผิวสารเคลือบนั้นเอง ส่วนความเข้มของสัญญาณที่ได้ อาจไม่เป็นไปตามค่ามาตรฐาน JCPDS เพราะเกิดการการจัดเรียงตัวในทิศทางที่ชอบ (Preferred Orientation) ของอะตอมในฟิล์ม นอกจากนี้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ยังสามารถให้ข้อมูลที่บอกถึงส่วนผสมทางเคมีของเฟส (Phase Composition) และค่าพารามิเตอร์ของแลตทิซ (Lattice Parameter)



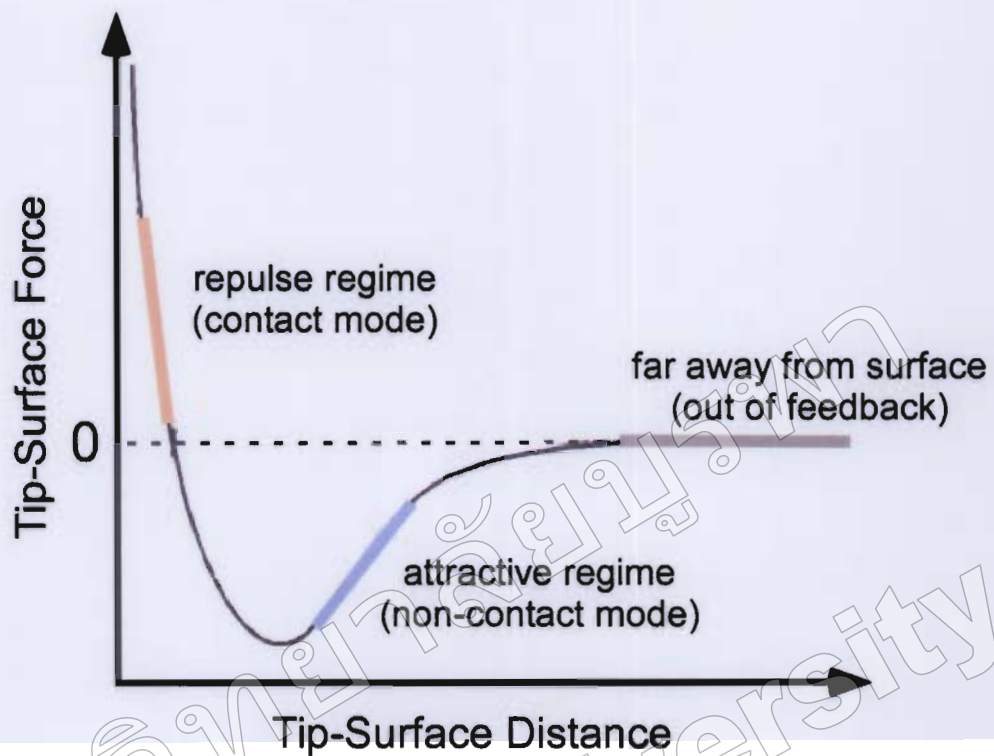
ภาพที่ 2-19 ความเข้มของฟลักซ์ที่แสดงถึงระนาบผลึกของวัสดุในตำแหน่งที่มีการสะท้อนรังสี (มติ ห่อประชุม, 2548)

2. การศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยเครื่อง Atomic Force Microscopy (AFM) ลักษณะเฉพาะสำคัญอีกอย่างหนึ่งของฟิล์มบางคือการศึกษาลักษณะพื้นผิวและความหนาเทคนิคที่นิยมใช้ในการศึกษาความหนาและลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางในระดับนาโน คือ Atomic Force Microscopy (AFM) ซึ่ง จตุพร วุฒิกนกกาญจน์ (2542) ได้อธิบายหลักการทำงานของเครื่อง AFM ไว้ดังนี้ เทคนิค Atomic Force Microscopy เป็นการสร้างภาพของผิววัสดุจากแรงกระทำระหว่างผิววัสดุกับตัวตรวจวัดที่ทำจากเข็มขนาดเล็ก (Probe Tip) และเป็นเทคนิคหนึ่งในกลุ่มของ Scanning Probe Microscopy (SPM) ซึ่งเป็นกลุ่มเทคนิคที่สามารถใช้ในการศึกษาสภาพพื้นผิวของวัสดุประเภทต่างๆ ได้ หลักการพื้นฐานคือ การใช้เข็มตรวจวัดขนาดเล็กที่ทำจากซิลิคอนไนไตรด์ (Silicon Nitride; Si_3N_4) เคลื่อนที่กราด (Scan) ไปทั่วบริเวณต่างๆ ของผิววัสดุ โดยมีตัวเพียโซอิเล็กทริกสแกนเนอร์ (Piezoelectric Scanner) เป็นตัวควบคุม สภาพผิวที่แตกต่างกันไปจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกับเข็มตรวจวัดแตกต่างกันไป โดยตัวคานมีเข็มเกาะติดอยู่จะมีการโค้งงอ (Bending) ปริมาณการโค้งงอนี้สามารถตรวจวัดได้โดยใช้โฟโตดีเทคเตอร์ (Photo Detector) ดังภาพที่ 2-20 ภาพที่ได้จากเทคนิคนี้จะสอดคล้องตามสภาพพื้นผิวในแต่ละบริเวณที่ตรวจสอบ ในเทคนิค AFM นี้ สิ่งที่ทำให้คานที่มีเข็มเกาะอยู่เกิดการ โค้งงอขึ้นก็คือ แรงกระทำระหว่างอะตอมซึ่งอาจจะเป็นแรงดึงดูดหรือแรงผลักก็ได้ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างเข็มปลายแหลมกับพื้นผิวดังแสดงในภาพที่ 2-21



ภาพที่ 2-20 องค์ประกอบหลักของเครื่องมือ Scanning Probe Microscope

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

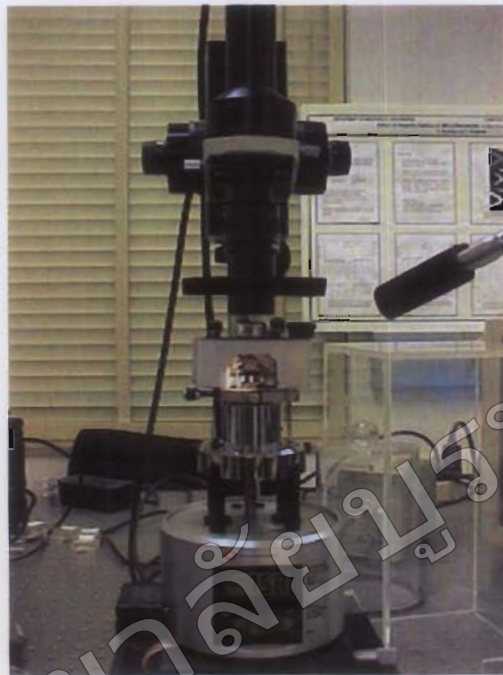


ภาพที่ 2-21 ลักษณะของแรงกระทำระหว่างอะตอมที่เกิดขึ้นในระยะห่างระหว่างวัตถุต่าง ๆ

(<http://www.science.siu.edu/chemistry/zang/afm.html>)

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

ภาพที่ 2-22 แสดงให้เห็นถึงเครื่อง Atomic Force Microscope รุ่น NanoScopellla บริเวณตรงกลางเป็นบริเวณที่ใช้วางชิ้นงานโดยมีเข็มวัดวางอยู่ด้วย ส่วนที่บริเวณด้านบนของเครื่องมือจะมีกล้องจุลทรรศน์วิดีโอ (Video Microscope) ติดตั้งไว้เพื่อใช้สำหรับดูตำแหน่งของเข็มที่จะทำการวางลงบนบริเวณต่าง ๆ บนผิว ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์วิดีโอนี้จะแสดงทางจอโทรทัศน์ นอกจากนี้ในบริเวณด้านบน จะมีแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์และโฟโตดีเทคเตอร์ที่ใช้วัดการโค้งงอของคานขึ้น



ภาพที่ 2-22 เครื่อง AFM แบบ Multimode (http://relsg.eng.ohio-state.edu/nlim/page_01.htm)

ลักษณะการเก็บข้อมูลด้วยเทคนิค AFM สามารถใช้เก็บข้อมูลได้ 4 แบบ (Mode) ที่สำคัญดังนี้คือ

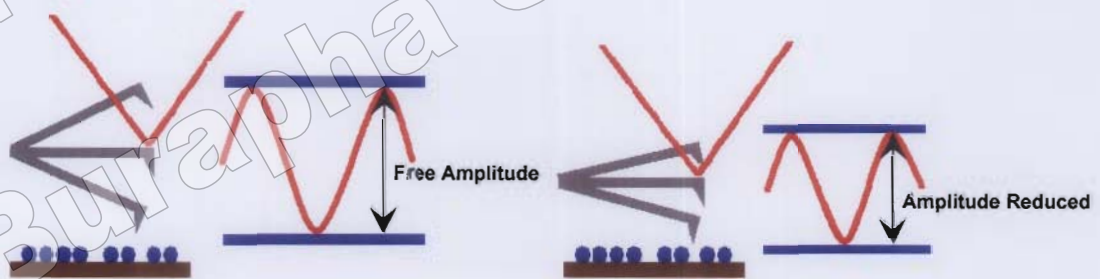
1. **แบบสัมผัส (Contact Mode)** เป็นการศึกษา**สภาพผิว**ชิ้นงาน โดยการขยับให้เข็มไทดล (Slide) ไปบน**ผิวงาน**ซึ่งจะทำให้มีแรงผลักเกิดขึ้น เนื่องจากเข็มกับผิวงานจะอยู่ใกล้กันมาก แรงผลักนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตาม**สภาพผิว**ซึ่งจะทำให้**มีการโก่งงอ (Deflection)** ของคานอื่น (Cantilever) ที่มี**เข็มยึด**เกาะอยู่ที่ปลาย โดยปริมาณการ**โก่งงอ**จะเปลี่ยนแปลงสอดคล้องเป็นไปตามลักษณะของผิวงาน

อย่างไรก็ตาม เทคนิคแบบ แบบสัมผัส**นี้มีข้อเสีย**คือ การลากให้เข็มตรวจวัดเคลื่อนที่ไทดลข้ามไปยังบริเวณต่าง ๆ บนผิวงาน อาจจะ**ทำให้พื้นผิววัสดุ**ที่กำลังศึกษาต่างไปจากสภาพเดิมที่แท้จริง หรือ**อาจเกิดความเสียหาย**ขึ้นแก่ผิวงานได้ ยกตัวอย่าง เช่น ภายใต้อากาศปรายอากาศปกติ ซึ่งมีอากาศและความชื้นในอากาศ อาจจะเกิดหยดน้ำหรือ**สิ่งสกปรก**บนผิวงาน ซึ่งเมื่อเข็มวัดเคลื่อนที่ไปสัมผัสกับ**ผิวที่มีชั้นบาง ๆ** ของหยดน้ำและสิ่งสกปรกดังกล่าว จะทำให้มีแรงดึงไฟฟ้าสถิตและ**แรงดึงผิว**ดึงให้ตัวคานที่มีเข็มยึดอยู่ที่ปลายเคลื่อนที่ลงมาสัมผัสกับชั้นดังกล่าว 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) ที่เกิดขึ้นในกรณีนี้จะเป็นแรงที่อ่อนกว่าเมื่อเทียบกับแรงผลักที่เกิดขึ้นในกรณีของ Contact Mode ดังนั้นการตรวจสอบอาจไว (Sensitive) ต่อสิ่งแปลกปลอมที่อยู่บนผิวงาน เช่น หยดน้ำที่เกาะอยู่บนผิว

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



ภาพที่ 2-23 ลักษณะการสั่นของคานที่มีเข็มติด

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

ภาพที่ 2-23 แสดงการสั่นของคานในสภาวะอิสระหรือตอนเริ่มต้นที่ยังไม่เกิดการสัมผัส และขยับเคลื่อนที่ไปบนผิวงาน จะเห็นได้ว่าแอมพลิจูดจะยังสูงอยู่เมื่อเทียบกับแอมพลิจูดที่เกิดจากการสั่นของคานเมื่อมีการแตะสัมผัส (Tapping) ลงบนผิวงาน เนื่องจากในการสัมผัสกันนั้นจะมีการสูญเสียพลังงานของการสั่น ทำให้แอมพลิจูดของการสั่น (Oscillation Amplitude) ลดลง ซึ่งค่าที่ลดลงนี้จะใช้เป็นตัววัดและบอกถึงลักษณะของสภาพพื้นผิวที่มีความสูงต่ำแตกต่างกันไป

ตัวอย่างเช่น เมื่อเข็มตรวจวัดเคลื่อนที่ผ่านบริเวณผิวงานที่มีความนูนสูงขึ้นมา ตัวคานก็จะมีส่วนที่หรือแอมพลิจูดในการสั่นลดลง ในทางตรงข้าม เมื่อเข็มปลายแหลมเคลื่อนที่ผ่านบริเวณผิวที่มีการยุบตัวหรือมีความลึกลงไป ตัวคานก็จะมีส่วนที่ในการสั่นเพิ่มขึ้น และมีแอมพลิจูดสูงขึ้น (เข้าใกล้แอมพลิจูดสูงสุดในสภาพที่ยังไม่มีการทำการสแกน) แอมพลิจูดของการสั่นที่เปลี่ยนแปลงไปก็จะถูกวัดโดยแอมพลิจูดดีเทคเตอร์ (Amplitude Detector) แล้วส่งผลเข้าไปยังตัวควบคุม ซึ่งจะทำการวัดสัญญาณพร้อมทั้งปรับระยะระหว่างเข็มกับผิวงาน เพื่อรักษาให้ค่าแอมพลิจูดของการสั่นให้คงที่ต่อไป จนกว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดของการสั่นตามสภาพพื้นผิวในบริเวณถัดไป

4. แบบ โมดูลेशन (Force Modulation Mode) ของแรงสำหรับพื้นผิวของวัสดุที่มีองค์ประกอบหลายเฟส พบว่าเทคนิค AFM ในวิธีแบบ แบบ โมดูลेशनของแรง จะเป็นที่นิยมใช้มาก โดยเทคนิคนี้จะเป็นการวัดและสร้างภาพของพื้นผิวชิ้นงานที่มีความแตกต่างของความแข็งเกร็ง (Stiffness) ในแต่ละเฟสสูง โดยในกรณีนี้ตัวเข็มจะสแกนไปในลักษณะที่มีการสั่นในแนวตั้งฉากกับผิววัสดุด้วยแอมพลิจูดเล็กน้อย แต่จะมีความเร็วในการสั่นที่สูงกว่าการเคลื่อนที่สแกนของเข็ม และเมื่อตัวเข็มถูกนำเข้ามาแตะสัมผัสกับผิววัสดุก็จะเกิดแรงต่อต้านจากผิวของวัสดุที่เกิดจากการสั่นและทำให้ตัวคานงอ และถ้าหากว่าเราให้แรงที่ทำให้ตัวคานสั่นลงที่ พื้นผิวบริเวณที่แข็งกว่า จะทำให้เกิดการต่อต้านต่อการสั่นในแนวตั้งของตัวคานมากกว่า และจึงทำให้ตัวคานงอมากกว่า ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดที่เกิดจากการ โกงงอของตัวคานจึงนำมาใช้วัดเปรียบเทียบความแข็งที่บริเวณต่าง ๆ ของผิวงาน

หลักการของวิธีแบบแทปปีงกับแบบ โมดูลेशनของแรงคล้ายกันที่มีการสั่นของเข็มในแนวตั้งพร้อมกับมีการสแกนไปบนผิวชิ้นงาน อย่างไรก็ตามทั้ง 2 เทคนิค จะมีความแตกต่างกัน คือ ในกรณีแบบ โมดูลेशनของแรง จะสั่นด้วยความเร็วสูงกว่า (สูงกว่าความเร็วในการสแกน) และการวัดแอมพลิจูดที่เกิดจากการบิดงอของคาน เป็นการวัดเนื่องจากผลของแรงด้านการสั่น เมื่อมีการสัมผัสของเข็มกับผิวงานในขณะที่ แบบแทปปีง จะเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของการสั่นของคานที่เปลี่ยนแปลงไป (ลดลง) เนื่องจากมีการสูญเสียพลังงานไปเมื่อมีการสัมผัสผิวงานที่มีระดับความสูงต่ำแตกต่างกัน

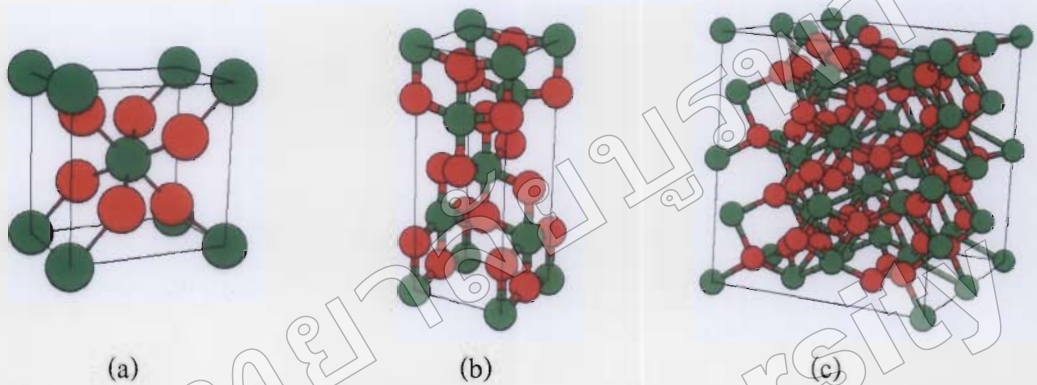
ไทเทเนียมไดออกไซด์

โครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide; TiO_2) เกิดจากอะตอมของไทเทเนียมจับกับอะตอมของออกซิเจน ซึ่งการจับกันมีอยู่ด้วยกันหลายลักษณะ เพราะไทเทเนียมมีประจุเป็น Ti^0 , Ti^{2+} , Ti^{3+} และ Ti^{4+} ส่วนออกซิเจนมีประจุเป็น O_2^- ทำให้มีโอกาสรวมกันเป็น TiO ที่มีโครงสร้างเป็นเฟสเซ็นเตอร์ คิวบิก (Face Center Cubic, FCC) (TiO_x ($0.9 \leq x \leq 1.5$)) ซึ่งเป็นฟิล์มที่มีความแข็งแรงมาก Ti_2O_3 มีโครงสร้างเป็นไตรโกนอล (Trigonal) และ TiO_2 มีโครงสร้างเป็นเตตระโกนอล (Tetragonal) ซึ่งเป็นฟิล์มที่มีดัชนีหักเหสูง เป็นต้น โครงสร้างเหล่านี้มีการจับตัวกันด้วยพันธะผสมของไอออนิก (Ionic) โคเวเลนต์ (Covalent) และพันธะโลหะ (Metallic) ฟิล์มเหล่านี้มีลักษณะที่โปร่งแสง และจากการศึกษาของฟิล์มจะเปลี่ยนตามโครงสร้าง นั่นคือเปลี่ยนไปตามปริมาณออกซิเจนที่ให้ โดยจะค่อย 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, 1998)

Jin et al. (2003) อธิบายว่าไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารประกอบออกไซด์ชนิดหนึ่ง ที่ได้รับความสนใจจากกลุ่มวิจัยทั่วโลกในการศึกษาวิจัยและพัฒนา เนื่องจากเป็นสารประกอบออกไซด์ที่มีสมบัติที่น่าสนใจหลายประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสมบัติทางแสง เช่น สมบัติการส่งผ่านแสง มีค่าดัชนีหักเหสูง มีเสถียรภาพทางเคมี จากสมบัติต่าง ๆ ที่โดดเด่นนี้ ทำให้มีการนำไทเทเนียมไดออกไซด์ไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง ทั้งในงานด้านทัศนศาสตร์และการเคลือบเพื่อปกป้องผิว รวมทั้งงานทางด้านเส้นใยแก้วนำแสง ตลอดจนรวมถึงการใช้เคลือบกระจกที่มีสมบัติเป็นโฟโตคะตะไลติกด้วย

Zeman and Takabayashi (2002) รายงานว่า โดยทั่วไปแล้วไทเทเนียมไดออกไซด์จะแบ่งออกเป็น 3 เฟส ได้แก่ เฟสรูไทล์ (Rutile) เฟสอนาเทส (Anatase) และเฟสบรูไกท์ (Brookite) ซึ่งเฟสอนาเทสและเฟสรูไทล์มีโครงสร้างผลึก (Crystal Structure) เป็นแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) ส่วนเฟสบรูไกท์มีโครงสร้างเป็นแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) เฟสของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างชนิดกันจะมีประโยชน์ในการใช้งานที่แตกต่างกัน เช่น ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสอนาเทส จะมีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านเกี่ยวกับการป้องกันสิ่งแวดล้อม เช่น กระจกที่มีสมบัติโฟโตคะตะลิส ส่วนฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ในเฟสรูไทล์ จะมีความสามารถในการทำอุปกรณ์ที่ใช้ในร่างกาย เช่น ลิ้นหัวใจเทียม เป็นต้น

การเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ สามารถทำได้หลายวิธีและขึ้นอยู่กับเงื่อนไขต่าง ๆ ในกระบวนการเตรียมฟิล์ม จากนั้นนำฟิล์มบางที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD เพื่อศึกษารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และเปรียบเทียบตำแหน่งของพีคที่เกิดขึ้นกับฐานข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผลิตภัณฑ์ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Joint Committee on Powder Diffraction Standard, JCPDS)



ภาพที่ 2-24 เฟสของไทเทเนียมไดออกไซด์ (<http://cst-www.nrl.navy.mil/lattice/struk.picts/c4.s.png>)

(a) เฟสรูไทล์

(b) เฟสอนาเทส

(c) เฟสบรูไกท์

ตารางที่ 2-2 ข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสอนาเทส

Pattern: 71-1169				Radiation = 1.540600				
TiO ₂ (Anatase/ Titanium Oxide)				d (Å)	Intensity (%)	h	k	l
Lattice: Tetragonal				3.53718	100	1	0	1
S.G.:P42/ mnm (136)		Mol. Weight = 79.90		2.45087	6	1	0	3
a = 3.80400	z = 4	Volume [CD] = 139.12		2.40350	18	0	0	4
c = 9.61400		Dx = 3.815		2.34733	7	1	1	2
		Dm = 3.870		1.90200	22	2	0	0
		I/ Icor = 4.80		1.71604	13	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 usual but tolerable.				1.37659	4	1	1	6
TEMPERATURE FACTOR: ITF				1.34492	4	2	2	0
SEMPLE SOURCE OR LOCALITY: Specimen from				1.29181	<1	1	0	7
Binnatal, Wallis, Switzerland.				1.27411	6	2	1	5
				1.25711	2	3	0	1
				1.20175	<1	0	0	8
				1.17906	<1	3	0	3
				1.17367	3	2	2	4

*Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997)

*Kristallogr, Kristallgeom, Kristallphys, and Kristallchem (1972)

ตารางที่ 2-3 ข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผลึกไทเทเนียม ไดออกไซด์เฟสรูไทล์

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	z = 2	Volume [CD] = 62.21		2.29450	6	2	0	0
c = 2.95400		Dx = 4.266		2.18442	17	1	1	1
		I/ Icor = 3.45		2.05226	5	2	1	0
				1.68543	45	2	1	1
				1.62246	14	2	2	0
				1.47700	6	0	0	2
ICSD COLLECTION CODE: 024277				1.45117	6	3	1	0
TEST FROM ICSD: No R Value given.				1.42208	<1	2	2	1
TEST FROM ICSD: At least one TF missing.				1.35835	13	3	0	1
				1.34429	7	1	1	2
				1.30249	1	3	1	1
				1.27276	<1	3	2	0
				1.24194	1	2	0	2
				1.19881	1	2	1	2
				1.16888	3	3	2	1
				1.14725	2	4	0	0
				1.11300	1	4	1	0
				1.09221	4	2	2	2

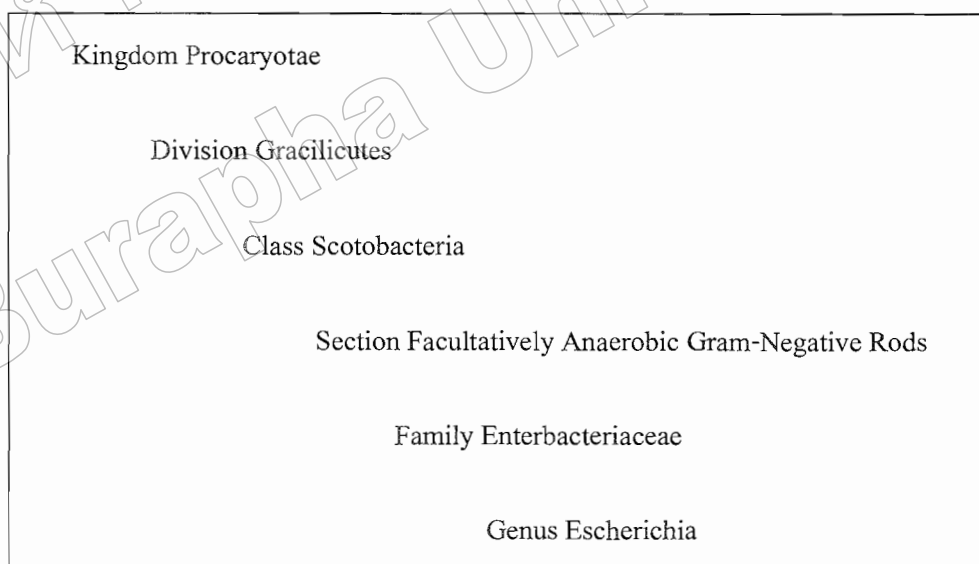
*Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997)

*Kristallogr, Kristallgeom, Kristallphys, and Kristallchem (1942)

เชื้อ *Escherichia coli*

เชื้อ *Escherichia coli* หรือ *E. coli* เป็นแบคทีเรียชนิดหนึ่งที่ทำให้เกิดโรค พบได้ในบริเวณลำไส้เล็กตอนปลายและลำไส้ใหญ่ ทั้งของคนและสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ซึ่ง โดยเชื้อ *E. coli* จัดเป็นแบคทีเรียที่อยู่ใน Enterobacteriaceas Family ดังภาพที่ 2-25

ทั้งนี้เชื้อ *E. coli* ที่ทำให้เกิดโรค แบ่งออกเป็น 5 ชนิด คือ Enterotoxigenic *E. coli* (ETEC), Enteropathogenic *E. coli* (EPEC), Enteroinvasive *E. coli* (EIEC), Enteroaggregative *E. coli* (EAaggEC) และ Enterohemorrhagic *E. coli* (EHEC) สำหรับลักษณะของเชื้อ *E. coli* มีลักษณะเป็นแท่งตรง โดยปกติแล้วเชื้อ *E. coli* จะถูกทำลายหมดสิ้นที่อุณหภูมิ 60° C ระยะเวลา 30 นาที เชื้อ *E. coli* เป็นเชื้อแบคทีเรียที่ไม่สร้างสปอร์ สามารถเจริญได้ทั้งในที่มืดและไม่มีออกซิเจน และย้อมติดสีแกรมลบ (Gram-Negative) เจริญเติบโตได้ดีในอาหารเลี้ยงเชื้อธรรมดาที่อุณหภูมิ 37° C แต่ก็สามารถเจริญได้ที่อุณหภูมิระหว่าง 8 - 47° C ส่วนโครงสร้างทางซีรัมวิทยา (Serology) มีลักษณะเป็นแอนติเจน (Antigenicity) ถ้าแยกตามความแตกต่างของลักษณะทางแอนติเจน จะสามารถแยกเชื้อ *E. coli* ได้ 4 ชนิด คือ แอนติเจน O (Cell Wall) แอนติเจน K (Capsular) แอนติเจน H (Flagellar) และแอนติเจน F (Fimbrial) (Tsuang et al., 2008)



ภาพที่ 2-25 Enterobacteriaceas Family ของเชื้อ *E. coli*

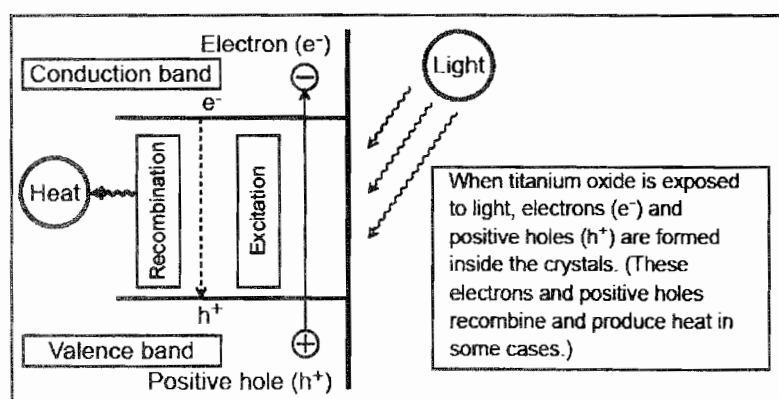
กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis) เป็นกระบวนการดูดซับโฟตอนที่มีพลังงานมากกว่าแถบพลังงาน (Band Gap) ของสารกึ่งตัวนำ ทำให้อิเล็กตรอนอิสระในแถบวาเลนซ์ (Valence Band) เคลื่อนย้ายจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบตัวนำ เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบตัวนำ (Conduction Band) จะเกิดโฮล (Hole, h^+) นอกจากนี้ยังอาจมีปฏิกิริยาระหว่างอะตอมข้างเคียงของสารกึ่งตัวนำ และเรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่า “ปฏิกิริยาการใช้แสง”

หลักการของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ

1. การฉายแสง (Irradiation Process) เมื่ออนุภาคสารกึ่งตัวนำที่ถูกอนุภาคของแสง ซึ่งมีพลังงานเท่ากับหรือสูงกว่าช่องว่างพลังงาน (E_g) ตกกระทบผิวหน้าอนุภาคสารกึ่งตัวนำ ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้น เปลี่ยนที่อยู่จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบตัวนำ ทำให้เกิดสภาวะขาดแคลนอิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์ เรียกว่าโฮล (Hole) ซึ่งอิเล็กตรอนและโฮล มีบทบาทในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันรีดักชัน โดยอิเล็กตรอนสามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับไฮดรอกซิลทำให้เกิดการลดออกซิเดชันสเตต

2. การเกาะหรือดูดติดผิว (Adsorption Process) เป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุล หรือคอลลอยด์ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือก๊าซให้มาเกาะจับและติดบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายสารจากของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของของแข็งหรือคอลลอยด์ เรียกว่าตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) การเกาะจับของ โมเลกุลบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา อาจเกิดขึ้นด้วยแรงทางกายภาพหรือด้วยแรงเคมีหรือทั้งสองอย่างรวมกัน ส่วนในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส การดูดซับจะเกิดจากแรงทางเคมีเป็นหลัก (Skorb et al., 2008)



ภาพที่ 2-26 การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chiu et al. (2007) ศึกษาผลของอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติโฟโตคะตะไลติกของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบด้วย วิธีดีซี รีแอคทีฟ แมกนีตรอน สเปคโตรริง อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนอยู่ในช่วง 0 - 20 ml/min และให้ศักย์ไบแอสกับ วัสดุรองรับเท่ากับ - 50 V พบว่าฟิล์มบางที่เคลือบได้มีโครงสร้างผลึกส่วนใหญ่เป็นแบบอนาเทส และมีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ปนอยู่เล็กน้อย และเมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้นทำให้ฟิล์มบางมีความเป็นผลึกลดลง เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น ความหนาแน่นลดลง ความหยาบผิวมีค่าเพิ่มขึ้น และที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 20 ml/min พบว่า เกรนมีขนาดเล็กและจัดเรียงตัวกันอยู่หนาแน่น ทั้งนี้การเพิ่มอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนทำให้แถบพลังงานมีค่าลดลงโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 3.15 – 3.35 eV ฟิล์มบางแสดงสมบัติโฟโตคะตะไลติกมากขึ้นและลดลง โดยที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 5 ml/min ฟิล์มบางแสดงสมบัติโฟโตคะตะไลติกได้ดีที่สุด

Prabakar et al. (2008) ศึกษาการเพิ่มอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีดีซี รีแอคทีฟ แมกนีตรอน สเปคโตรริง จากนั้นนำฟิล์มบางที่เคลือบได้มาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD วัดความหนาด้วยเครื่อง Surface Profiler วัดค่าการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องสเปคโตรมิเตอร์และทดสอบสมบัติโฟโตคะตะไลติกด้วยเทคนิค FPR จากการศึกษาพบว่าฟิล์มที่เคลือบได้มีโครงสร้างผลึกส่วนใหญ่เป็นแบบอนาเทส โดยมีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ปนอยู่เล็กน้อย และเมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้น พบว่าฟิล์มมีความเป็นผลึกมากขึ้นและลดลง มีการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงขึ้นและมีการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่ำลง มีค่าแถบพลังงานอยู่ระหว่าง 2.8 – 3.1 eV โดยที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 2 sccm ฟิล์มบางมีค่าแถบพลังงานต่ำที่สุดและการดูดกลืนแสงเปลี่ยนจากความยาวคลื่น 390 nm เป็น 490 nm.

Amin, Pazouki, and Hosseinnia (2009) ได้ศึกษาความสามารถในการต่อต้านเชื้อ *Escherichia coli* (*E. coli*) ของวัสดุนาโนคอมโพสิตไทเทเนียมไดออกไซด์กับเงิน (TiO_2 -Ag Nanocomposite) ที่เตรียมด้วยวิธีโซลเจล และนำชิ้นงานไปเผาที่อุณหภูมิ 300° C และ 500° C จากผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าชิ้นงานที่ไม่ได้ถูกเผา มีโครงสร้างแบบออสเทนไนต์ บนระนาบ (101) ที่มุม 25.3° และระนาบ (211) ที่มุม 55° นอกจากนี้ยังพบฟลักของเงิน บนระนาบ (111), (211) และ (220) ที่มุม 38.1°, 44.5° และ 64.4° ตามลำดับ ส่วนชิ้นงานที่เผา ณ อุณหภูมิ 500° C มีการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างแบบออสเทนไนต์เป็นโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสอย่างเด่นชัด สำหรับการทดสอบความสามารถในการต่อต้านเชื้อ *E. coli* โดยการฉายแสงอัลตราไวโอเลต พบว่า

ชิ้นงานที่เผา ณ อุณหภูมิ 300° C มีความต้านทานเชื้อ *E. coli* ได้ดีกว่าชิ้นงานไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ หรือชิ้นงานที่เผา ณ อุณหภูมิ 500° C

Caballero, Whitehead, Allen, and Verran (2009) ได้ศึกษาการยับยั้งการเจริญของเชื้อ *E. coli* โดยการฉายแสงฟลูออเรสเซนซ์ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนเยื่อกรอง (Membrane Filter) โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่มีความเข้มข้นในช่วง 520 - 15,590 mg m⁻² และใช้แสงในช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็นได้และอัลตราไวโอเลต (290 - 400 nm) ความเข้มแสง 0.05 - 0.12 W m⁻² เป็นเวลานาน 120 นาที พบว่าอัตราการเจริญของเชื้อ *E. coli* บนฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ลดลง ซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 520 mg m⁻² สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อ *E. coli* ได้ดีที่สุด และที่ความเข้มข้นสูงกว่า 6,236 mg m⁻² การเจริญของเชื้อ *E. coli* ลดลง

Krishna, Sun, and Chen (2011) ได้เตรียมฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งเคลือบฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์บนสแตนเลส 316L ที่เป็นวัสดุรองรับ ด้วยวิธีนอน-รีแอคทีฟแมกนีตรอน สปีดเตอริง และศึกษาผลของชั้นรองพื้นไทเทเนียม (Ti-Underlayer) ที่มีต่อโครงสร้างของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยพิจารณาจากสมบัติไตรโบโลยี (Tribological) และการกัดกร่อน (Corrosion) พบว่าชั้นรองพื้นไทเทเนียมมีผลต่อโครงสร้างของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์อย่างมาก ถ้าไม่มีชั้นนี้ก็จะเกิดฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบอนาเทส แต่ถ้ามีชั้นรองพื้นไทเทเนียม ฟิล์มจะมีโครงสร้างแบบรูไทล์ นอกจากนี้ ความหนาของชั้นรองพื้นจะมีผลต่อความเป็นผลึกแบบรูไทล์ และพบว่าชั้นรองพื้นไทเทเนียมที่มีความหนา 0.44 µm ใช้เวลาเคลือบนาน 60 นาที จะมีความแข็งสูง ยึดเกาะได้ดี ทนทานต่อการสึกกร่อนได้ดีที่สุด

Wang, Tang, Li, and Ma (2011) ศึกษาการเจือไนโตรเจนในชั้นเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ (N-TiO₂) บนสแตนเลส (304 Austenitic Stainless Steel; SS) ด้วยกระบวนการออกซิเดชัน โดยการทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจนที่ถูกเคลือบเกิดออกซิเดชันโดยใช้เทคนิคพลาสมา และได้ศึกษาโครงสร้าง ทดสอบการกัดกร่อน และการต้านเชื้อแบคทีเรีย พบว่าบริเวณผิวสแตนเลสที่เป็นวัสดุรองรับทั้งหมดถูกเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจน และจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ฟิล์มจะมีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส และการเจือไนโตรเจนมีผลทำให้ฟิล์มต้านทานการผุกร่อนได้ดีขึ้น ส่วนการทดสอบการฆ่าเชื้อ *S. aureus* โดยการฉายแสงพบว่าฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เจือไนโตรเจนมีความสามารถในการฆ่าเชื้อ *S. aureus* ได้ดีมากเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ได้เคลือบฟิล์ม