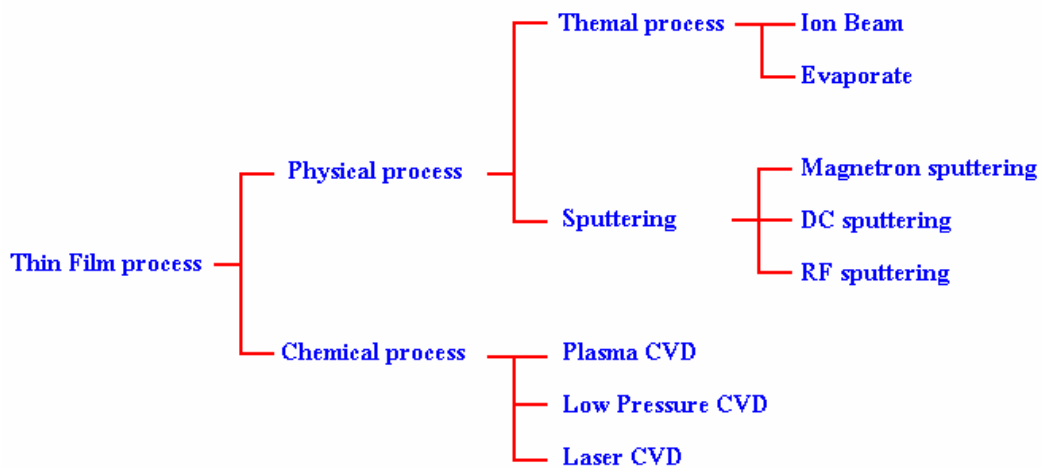


บทที่ 4

การสร้างฟิล์มบางอินทรีย์ออกไซด์

4.1 การปลูกฟิล์มบางด้วยระบบสเป็คเตอร์ริง

การสร้างฟิล์มบางโดยกระบวนการเคลือบฟิล์ม (Thin film deposition) นั้น มีอยู่หลายเทคนิคที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบัน โดยถ้าแบ่งตามกลไกการก่อตัวของชั้นฟิล์มบาง สามารถแบ่งออกได้ 2 เทคนิค คือ กระบวนการเคลือบฟิล์มบางทางกายภาพ (Physical Vapor Deposition: PVD) และกระบวนการเคลือบฟิล์มบางทางเคมี (Chemical Vapor Deposition: CVD) ดังแสดงภาพรวมในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 เทคโนโลยีการสร้างฟิล์มบาง

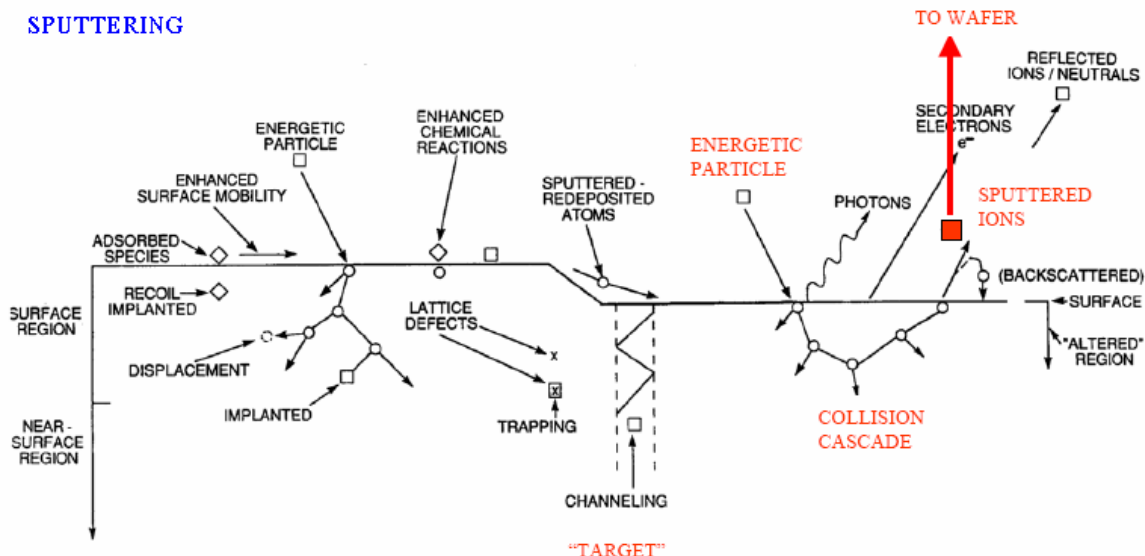
4.1.1 ทฤษฎีการปลูกฟิล์มบางด้วยระบบสเป็คเตอร์ริง

การสเป็คเตอร์ริง (Sputtering) คือ ขบวนการที่อะตอมผิวหน้าของวัสดุถูกทำให้หลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูง โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงาน และโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุ การสเป็คเตอร์ริงมีกระบวนการที่สำคัญ ดังนี้

1. อาศัยการดิสชาร์จไฟฟ้าของก๊าซอาร์กอน (Ar) ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน
2. จากนั้นทำการเร่งไอออน ให้วิ่งชนเป้าสารเคลือบ (Target) ที่ต่ออยู่กับขั้วลบของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง
3. เป้าสารเคลือบที่ถูกชนด้วยไอออนของก๊าซ อะตอมของเป้าสารเคลือบจะหลุดออกมา และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงมายังแผ่นฐานรองในทิศทางทุกทาง จากพลังงานของอนุภาคสาร

เคลื่อนที่หลุดมานั้นมีค่าสูงมาก ดังนั้นอนุภาคสารเคลือบที่ได้จากการสปีดเตอร์ริงที่ตกกระทบแผ่นฐานรองจะเกิดการฝังตัวลงในเนื้อแผ่นฐานรอง

4.1.2 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ

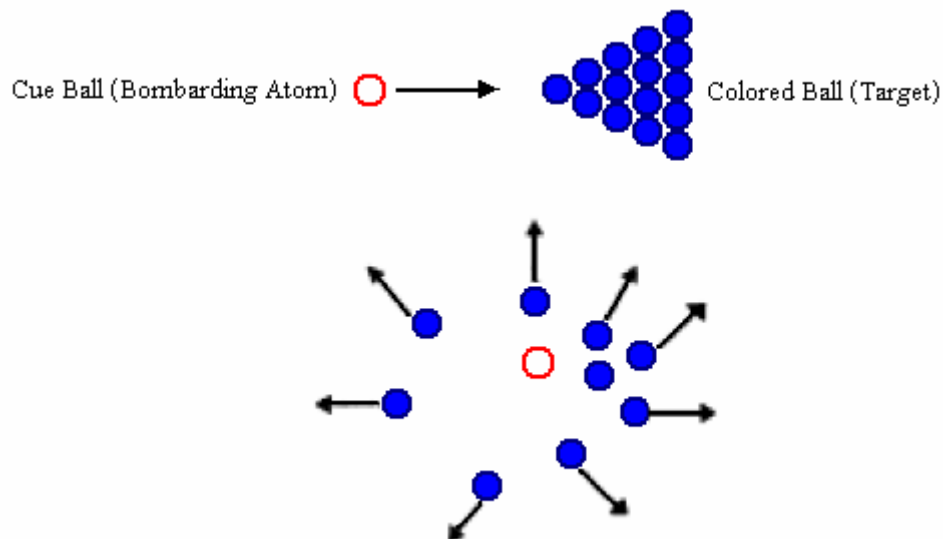


รูปที่ 4.2 กลไกการเคลือบฟิล์มด้วยระบบสปีดเตอร์ริง

เมื่อเป้าสารเคลือบที่เป็นของแข็งถูกชนโดยไอออนจะเกิดปรากฏการณ์ดังรูปที่ 4.2 สามารถอธิบายพฤติกรรมของไอออนในลักษณะต่างๆ กัน ดังนี้

1. ไอออนที่สะท้อนกลับจากผิวหน้า ส่วนใหญ่จะมีค่าเป็นกลางทางไฟฟ้า เนื่องจากการรวมตัวกันกับอิเล็กตรอนบริเวณผิวหน้าของเป้าสารเคลือบ
2. การชนของไอออน ทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนลำดับที่สอง (Secondary electron) ออกจากเป้าสารเคลือบ เมื่อไอออนมีพลังงานสูงพอ
3. ไอออนที่ฝังตัวลงในผิวสารเคลือบ (Ion implantation) มีค่าประมาณ 10 อังสตรอมต่อพลังงานไอออน 1 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV) สำหรับไอออนของก๊าซอาร์กอนที่ฝังตัวในเป้าสารเคลือบที่เป็นทองแดง
4. การชนของไอออนบนผิวสารเคลือบ ทำให้เกิดการเรียงตัวของอะตอมที่ผิวสารเคลือบใหม่ และเกิดความบกพร่องของโครงสร้างผลึก (Lattice defect) เราเรียกการจัดเรียงตัวใหม่ของโครงสร้างผิวนี้นี้ว่า Altered Surface Layers

การเกิดปรากฏการณ์ในแต่ละแบบนี้จะขึ้นอยู่กับชนิด และพลังงานของไอออนบวกที่เข้าชน สำหรับในกรณีการเกิดสปัตเตอร์ริงจะเกิดได้ดีในช่วงพลังงานของไอออนบวกประมาณ 0.1 ถึง 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์

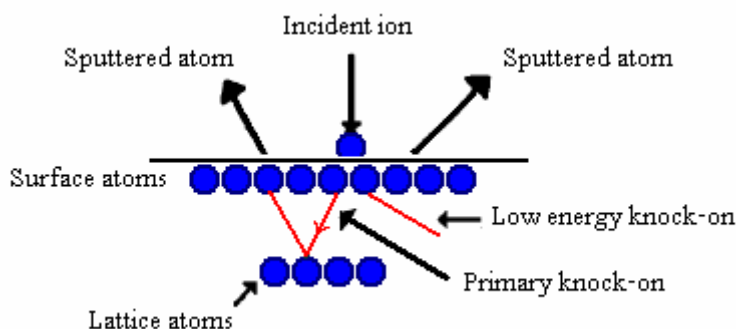


รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบลักษณะการชนของลูกบิลเลียดกับการสปัตเตอร์ริง

กลไกของการสปัตเตอร์ริงอาจเปรียบเทียบได้กับการชนของลูกบิลเลียด ดังรูปที่ 4.3 พิจารณาให้อนุภาคทั้งหมดเป็นทรงกลมแข็ง โดยให้ไอออนบวกเป็นลูกขาว (Cue Ball) และให้อะตอมที่ผิวเป้าสารเคลือบเป็นลูกสี (Colored Ball) ที่เรียงกันเป็นระเบียบ การชนของลูกขาวจะทำให้ลูกสีกระทบกันเป็นทอดๆ แล้วกระเจิงออกทุกทิศทุกทางรวมทั้งในทิศทางย้อนกลับ ซึ่งเปรียบได้กับอะตอมถูกสปัตเตอร์ออกจากเป้าในความเป็นจริงจะมีแรงระหว่างอะตอมซึ่งจะแตกต่างจากกรณีของลูกบิลเลียด แต่แบบการจำลองการชนนี้ก็สามารถอธิบายได้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด

การที่ไอออนบวกชนเป้าสารเคลือบ แล้วมีการถ่ายทอดโมเมนตัมให้กับอะตอมของผิวเป้าสารเคลือบที่อยู่เบื้อง เป็นกลไกที่นำไปสู่การสปัตเตอร์อะตอมออกจากผิวของเป้าซึ่งดังรูปที่ 4.4 ในการชนไอออนบวกจะชนผิวของเป้า 2 หรือ 3 อะตอมเกือบพร้อม ๆ กัน อะตอมที่ถูกชนตอนแรกยังไม่ถูกสปัตเตอร์ แต่เป็นอะตอมข้างเคียงอะตอมที่ถูกชนการชนจะมีสองลักษณะคือ แบบแรก อะตอมถูกชนในลักษณะ Low energy knock-on องค์ประกอบของโมเมนตัมส่วนใหญ่จะอยู่ในแนวขนานกับผิวของเป้า มีการเคลื่อนตัวในแนวเฉียงด้านข้างกระแทกอะตอมที่ผิวของเป้า ซึ่งมีอยู่ให้หลุดออกเป็นการชนเพียงครั้งเดียว แบบที่สอง อะตอมถูกชนในลักษณะ Primary knock-on องค์ประกอบของโมเมนตัมส่วนใหญ่จะอยู่ในแนวพุ่งเข้าสู่เป้า อะตอมจะเคลื่อนตัวลงไปชนกับอะตอมในชั้นถัดไปทำให้ตัวมันเองสะท้อนกลับไปกระแทกอะตอมที่ผิวของเป้าให้หลุดออก หรือมี

การชนต่อไปอย่างต่อเนื่องจนทำให้อะตอมอื่นได้รับโมเมนตัมในทิศเปลี่ยนไปมากกว่า 90 องศา เมื่อเทียบกับโมเมนตัมของไอออนบวกที่เข้าชน อะตอมเหล่านี้ก็จะกระแทกอะตอมที่ผิวของเป้าให้หลุดออกในที่สุด



รูปที่ 4.4 การถ่ายทอดโมเมนตัมในกระบวนการสปีดเตอร์ริง

4.1.3 ค่าyieldของการสปีดเตอร์ริง (Sputtering yield: S)

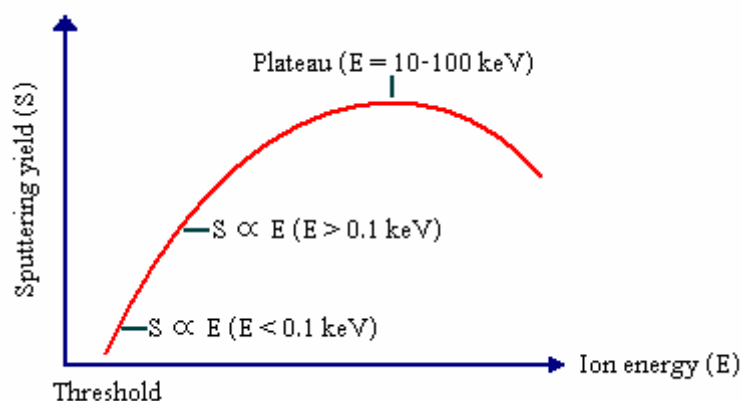
ค่าyieldของการสปีดเตอร์ริงคือ ค่าเฉลี่ย ปริมาณการหลุดออกของอะตอมเป้าสารเคลือบ ต่อ ปริมาณการชนของไอออน 1 อนุภาค (มีหน่วยเป็น อะตอมต่อไอออน) ค่าyieldแปรเปลี่ยนไปตามสภาวะต่าง ๆ ในขบวนการสปีดเตอร์ริง ดังนี้

4.1.3.1) ค่าyieldแปรเปลี่ยนไปตาม ค่าพลังงานของไอออน คือไอออนต้องมีพลังงานมากกว่า พลังงานเทรชโฮลด์ (Threshold energies หมายถึง พลังงานที่เริ่มมีการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลือบในสภาวะที่มีการชนอย่างต่อเนื่องของไอออนกับผิวเป้าสารเคลือบ) ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามคู่การชนของอนุภาค เมื่อทำการเพิ่มพลังงานของไอออนค่าyieldจะเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียล ในช่วงแรก ๆ และจะเปลี่ยนเป็นเชิงเส้น จากนั้นจะอิ่มตัวเมื่อพลังงานของไอออนมาก เนื่องจากไอออนพลังงานสูงมีโอกาสฝังตัวบนผิวเป้าสารเคลือบสูงขึ้นทำให้ค่าyieldของสารเคลือบมีค่าคงที่ จากนั้นจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มพลังงานของไอออนให้สูงมากขึ้น

4.1.3.2) ค่าyieldแปรเปลี่ยนไปตาม ระบายผลึกของผิวเป้าสารเคลือบ พบว่าค่าyieldสูงเมื่อไอออนชนเป้าในระนาบที่มีอะตอมหนาแน่น ส่วนระนาบที่มีความหนาแน่นอะตอมต่ำ ไอออนมีแนวโน้มฝังตัวในเป้าสารเคลือบ

4.1.3.3) ขึ้นอยู่กับมวลของไอออนที่วิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ คือจากที่เราทราบว่าอนุภาค สอง อนุภาคที่มีมวลเท่ากันจะสามารถถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมได้ดีที่สุด แต่อะตอมบนเป้าสารเคลือบยึดเกาะกับอะตอมข้างเคียงจึงทำตัวเสมือนมีมวลประสิทธิภาพสูงกว่ามวลอะตอมเดี่ยว ๆ ดังนั้นเมื่อต้องการทำให้ค่าyieldสูงเราต้องใช้ไอออนที่มีมวล สูงกว่า มวลอะตอมของเป้า (จึงเลือกใช้ไอออนจากก๊าซเฉื่อย)

4.1.3.4) ค่าyieldเปลี่ยนแปลงไปตาม มุมตกกระทบของไอออนที่ทำบนผิวหน้าของ เป้าสารเคลือบ คือมุมตกกระทบยิ่งมากยิ่งมีค่าyieldสูงจนถึงมุมที่มากกว่า 45 องศาเล็กน้อย (เนื่องจากอะตอมสารเคลือบที่หลุดออกมาเปลี่ยนจากการกระเจิงแบบ Back scattering เป็น Forward scattering) จากนั้นเมื่อเพิ่มมุมตกกระทบค่าyieldจะลดลงจนเป็นศูนย์ เมื่อมุมตกกระทบมีค่า 90 องศา

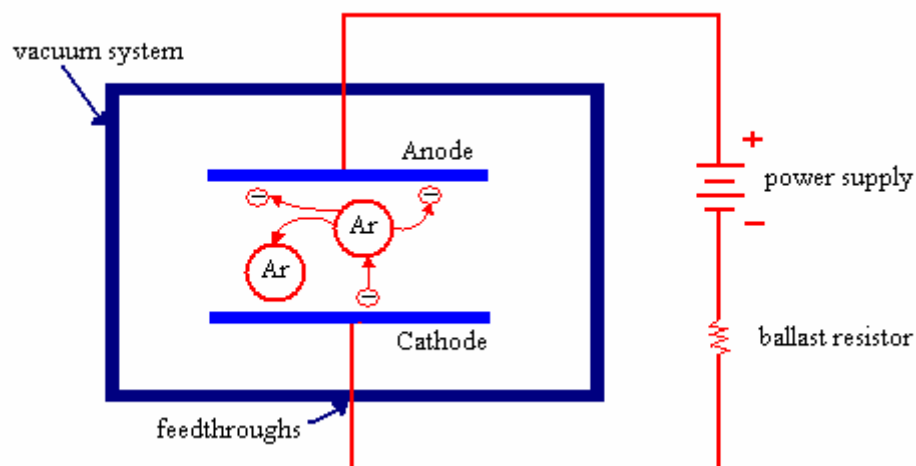


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราสputtering (ค่าyield) กับพลังงานไอออนบวก

4.2 การไอออไนซ์ของก๊าซ (Gas Ionize)

4.2.1 การเกิดพลาสมา (Plasma)

ก๊าซต่างๆ ที่อยู่ในสถานะสุญญากาศเมื่อเกิดการแตกตัว หรือเกิดการไอออไนซ์จะประกอบด้วยอนุภาคที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบ จึงทำให้ก๊าซที่ไอออไนซ์อยู่ในสถานะของพลาสมา กระบวนการที่ทำให้ก๊าซเกิดการไอออไนซ์ และมีสถานะของพลาสมาอยู่หลายวิธี สำหรับวิธีการพื้นฐานอันหนึ่งซึ่งเป็นวิธีที่ทำให้เกิดพลาสมา และรักษาสถานะของพลาสมาเอาไว้ให้คงที่เพื่อใช้ในกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับฟิล์มบาง คือ การจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงดันสูงให้กับขั้วโลหะที่เป็นขั้วอิเล็กโทรด ที่ถูกจัดวางไว้ในสถานะที่มีก๊าซบรรจุอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 การจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองจะเป็นผลทำให้ก๊าซที่บรรจุอยู่ภายในสถานะเกิดการดิซชาร์จ หรืออาจจะเรียกว่าก๊าซเกิดการไอออไนซ์ หรือเกิดการแตกตัว การจัดขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองจะมีลักษณะที่คล้ายกับการจัดขั้วของไดโอด โดยที่ขั้วหนึ่งเป็นขั้วคาโทดและขั้วที่เหลือเป็นอโนด และมักจะเรียกการเกิดพลาสมาด้วยวิธีนี้ว่าไดโอดพลาสมา สำหรับการจัดอุปกรณ์ที่จะทำให้เกิดพลาสมาอาจจะจัดในลักษณะของดีซีไดโอด (DC diode), อาร์เอฟไดโอด (RF diode), หรือ แบบแมกนีตรอน (Magnetron) เป็นต้น



รูปที่ 4.6 การดิซชาร์จของก๊าซในดีซีไดโอด (DC diode)

กระบวนการเกิดพลาสมาดังกล่าวข้างต้น อาศัยการไอออไนซ์อะตอมของก๊าซที่ถูกชนด้วยอิเล็กตรอนชุดที่สอง ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากไอออนบวกชนกับขั้วคาโทดซึ่งมีศักดาไฟฟ้าเป็นลบ หลังจากที่ขั้วคาโทดถูกชนแล้วจึงปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองออกมา อิเล็กตรอนเหล่านี้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร่งผ่านเข้าไปในบริเวณของพลาสมา จนกระทั่งอิเล็กตรอนได้รับพลังงานที่มีค่าสูงพอที่จะทำให้อะตอมของก๊าซที่มีสภาพเป็นกลางที่มีอยู่เป็นจำนวนมากเกิดการไอออไนซ์ อิเล็กตรอนที่มีพลังงานไม่เพียงแต่จะทำให้ก๊าซเกิดการไอออไนซ์ และกระตุ้น (Excitation) อะตอมของก๊าซที่อยู่ในระดับพลังงานต่ำสุดเท่านั้น แต่ยังทำให้เกิดความร้อนที่อิเล็กตรอนเหล่านั้นด้วย

กระบวนการก๊าซดิซชาร์จ (Gas discharge process) และการเกิดสถานะของพลาสมา (Plasma) เป็นการทำให้ก๊าซแตกตัวเป็นไอออนโดยใช้สนามไฟฟ้ามีขั้นตอนตามลำดับ ดังนี้

เริ่มให้แรงดันค่าน้อยๆ พบว่ากระแสไหลในวงจรน้อยมาก เป็นกระแสอันเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน และไอออนของก๊าซที่เกิดขึ้นตลอดเวลาในบรรยากาศ ซึ่งเกิดจากการชนของรังสีคอสมิก (อัตราการเกิดประจุขึ้นกับความเข้มของรังสี)

เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นจนมีค่าเข้าใกล้แรงดันพังทลาย (Breakdown voltage) พลังงานของประจุที่ถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้นจนสามารถชนโมเลกุลของก๊าซทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวก และไอออนลบ ซึ่งไอออนเหล่านี้จะถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าให้วิ่งชนโมเลกุลของก๊าซต่อไปอีก จึงเกิดการไอออไนซ์เพิ่มขึ้น ไอออนบวกจะถูกเร่งเข้าชนคาโทด (Cathode) จนเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนลำดับสอง (Secondary electron)

เพิ่มแรงดันจนถึงค่าแรงดันพังทลาย จะเกิดกระบวนการการถล่ม (Avalanche) ขึ้น คือ ไอออนบวกวิ่งไปชนขั้วคาโทดทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สอง (ของสารเคลือบ) แล้วอิเล็กตรอนจะถูกสนามไฟฟ้าเร่งให้ไปชนโมเลกุลของก๊าซเกิดการไอออไนซ์เพิ่มขึ้นจนทำให้มี

ไอออนมากพอสำหรับผลิตอิเล็กตรอนได้เป็นจำนวนที่คงที่ (ช่วงนี้ระบบรักษาสภาพดิสชาร์จได้ด้วยตัวเองไม่ต้องพึ่งแหล่งกำเนิดรังสีจากภายนอก) กระบวนการช่วงนี้เรียกว่าทาวนด์ดิสชาร์จ (Townsend discharge) จากนั้นเมื่อกระแสดิสชาร์จจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่าๆ หนึ่งจึงเกิดการเรืองแสงขึ้น แรงดันไฟฟ้าที่คร่อมขั้วมีค่าลดลง กระแสเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เรียกช่วงนี้ว่าการเรืองแสงปกติ (Normal glow) ค่าขีดจำกัดจะต่ำในช่วงเริ่มต้นของการเรืองแสง หรือโถ้วการชนของไอออนบนคาโทดจะปรับตัวเองให้เกิดขึ้นในบางบริเวณ แนวการเรืองแสงอาจเลื่อนตำแหน่งไปมาได้ และการชนของไอออนบนคาโทดจะไม่มีผลเสมอ โดยมักจะมีความเข้มของบริเวณการเรืองแสงตามแนวขอบหรือมุมของคาโทดที่มีสนามไฟฟ้าสูง เพื่อรักษาสภาพพลาสมาโถ้วดิสชาร์จ (Self-sustaining plasma) บางบริเวณไว้ เมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นแนวการชนของไอออนจะค่อยๆ ขยายตัวเพิ่มพื้นที่จนครอบคลุมตลอดผิวคาโทด จนกระทั่งมีความหนาแน่นกระแสเท่ากันตลอดโดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดคงที่ (ช่วงการเรืองแสงปกติที่ค่าแรงดันไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลงนี้ เราสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในการสร้างหลอดควบคุมแรงดันไฟฟ้าคงที่ Voltage Regulator Tube)

หลังจากที่การชนของไอออนครอบคลุมพื้นที่ของคาโทดแล้ว การเพิ่มกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบจะทำให้ทั้งแรงดัน และกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น การเรืองแสงจะสว่างจ้าขึ้นผิดปกติ เรียกช่วงนี้ว่าการเรืองแสงผิดปกติเปล่งจ้าขึ้น (Abnormal glow) ซึ่งเป็นช่วงที่นิยมใช้ในระบบสเปกโตรริง ช่วงนี้ถ้าไม่มีการระบายความร้อนให้กับคาโทดเมื่อความหนาแน่นกระแสของคาโทดเพิ่มขึ้นสูงประมาณ 0.1 แอมแปร์ ต่อตารางเซนติเมตร ความร้อนที่เกิดจากการชนของไอออนบนผิวคาโทดจะเกิดขึ้นมากจนเกิดขบวนการปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบ เทอร์มิออนิก (Thermo ionic electron emission) เสริมกับการปลดปล่อยอิเล็กตรอนลำดับที่สอง และขบวนการอะวาเลนซ์ ทำให้ความนำไฟฟ้าของก๊าซในระบบสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว แรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดตกลงมากในขณะที่กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสูง และเปล่งแสงสว่างจ้าของการอาร์ค (Arc discharge)

4.2.2 กระบวนการชนในบริเวณที่ก๊าซเกิดการแตกตัว

หลักการทำให้ก๊าซเกิดการไอออไนซ์ และมีสถานะเป็นพลาสมาดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น ก๊าซที่เกิดการไอออไนซ์จะมีความดันตั้งแต่ 1 มิลลิทอร์ (mTorr) ขึ้นไป แหล่งกำเนิดเริ่มต้นของการเกิดไอออไนซ์ คือ การชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอม แต่เนื่องจากการชนกันดังกล่าวจะมีทั้งการชนแบบยืดหยุ่น (Elastic collision) และการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic collision) ซึ่งการชนแบบยืดหยุ่นระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมของก๊าซหรือไอออน จะมีการถ่ายเทพลังงานจากอิเล็กตรอนไปยังอะตอมหรือไอออนที่ถูกชนมีค่าต่ำ ทั้งนี้เพราะว่ามวลของอิเล็กตรอนกับมวลของอะตอมหรือไอออนมีค่าแตกต่างกันค่อนข้างมาก

ในขณะที่ก๊าซแตกตัวและมีสถานะเป็นพลาสมา จะมีการชนแบบไม่ยืดหยุ่นเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก การชนแบบไม่ยืดหยุ่นระหว่างอิเล็กตรอนและอะตอมจะทำให้ก๊าซเกิดการไอออไนซ์ แสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้



โดยที่ G^0 คือ อะตอมของก๊าซที่อยู่ในระดับพลังงานต่ำสุด (Ground state)
 G^+ คือ ไอออนของก๊าซที่มีประจุบวก

ถ้าให้อะตอมของก๊าซที่ถูกชนเป็นก๊าซอาร์กอน (Ar) แล้วเกิดการไอออไนซ์ ดังนั้นความสัมพันธ์ (4.3) เขียนได้ดังนี้

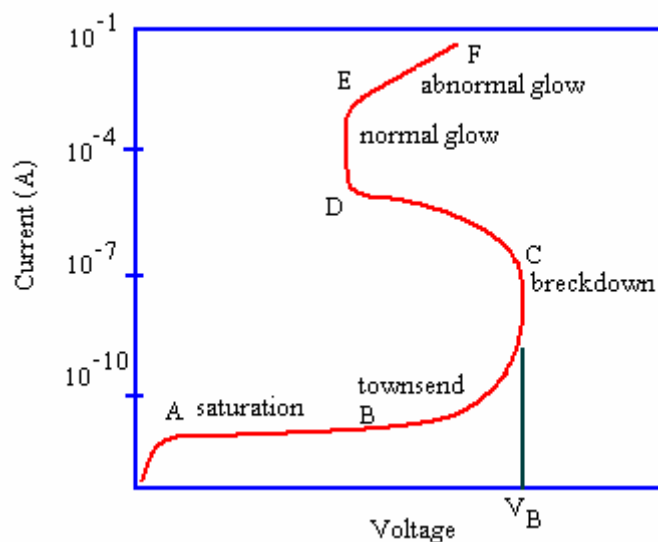


จากความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการ (4.3) หรือ (4.4) จะพบว่าอะตอมที่เป็นกลางหนึ่งอะตอมเมื่อเกิดไอออไนซ์ จะได้ไอออนหรืออนุภาคที่มีประจุบวกหนึ่งตัวพร้อมกันนั้นจะเกิดอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งตัว และถ้าต้องการให้มีไอออนเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าอาจจะทำได้โดยกำจัดอิเล็กตรอนตัวที่เพิ่มขึ้นมาให้หมดไป แต่การกำจัดอิเล็กตรอนตัวที่เพิ่มขึ้นมาจะต้องให้พลังงานกับอิเล็กตรอนที่มากพอสมควร และโดยปกติทั่วไปไอออนที่อยู่ในสถานะที่มีประจุไฟฟ้าที่มากกว่า $2+$ ขึ้นไป จะไม่สามารถสังเกตเห็นได้

กระบวนการปกติที่เกิดขึ้นในพลาสมา คือการกระตุ้นอะตอมหรือไอออนที่อยู่ในระดับพลังงานต่ำสุด เพื่อให้อะตอมหรือไอออนไปอยู่ในระดับที่มีพลังงานสูงขึ้นหรือที่เรียกว่าอยู่ในสถานะกระตุ้นพร้อมทั้งมีประจุไฟฟ้าเกิดขึ้นบนอะตอมหรือไอออนเหล่านั้น ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้



อะตอมหรือไอออนที่อยู่ในสถานะกระตุ้นจะมีช่วงเวลา (Lifetime) ที่อยู่ในสถานะดังกล่าวเป็นช่วงเวลาสั้นมากๆ หลังจากนั้นจะมีการสลายตัวพร้อมกับปลดปล่อยโฟตอนออกมา ลักษณะเช่นนี้เป็นคุณลักษณะของพลาสมา และเป็นจุดเริ่มต้นที่จะอธิบายเรื่องโกลว์ดิซาร์จของก๊าซ



รูปที่ 4.7 คุณลักษณะการ โกลว์ดิสชาร์จของก๊าซ

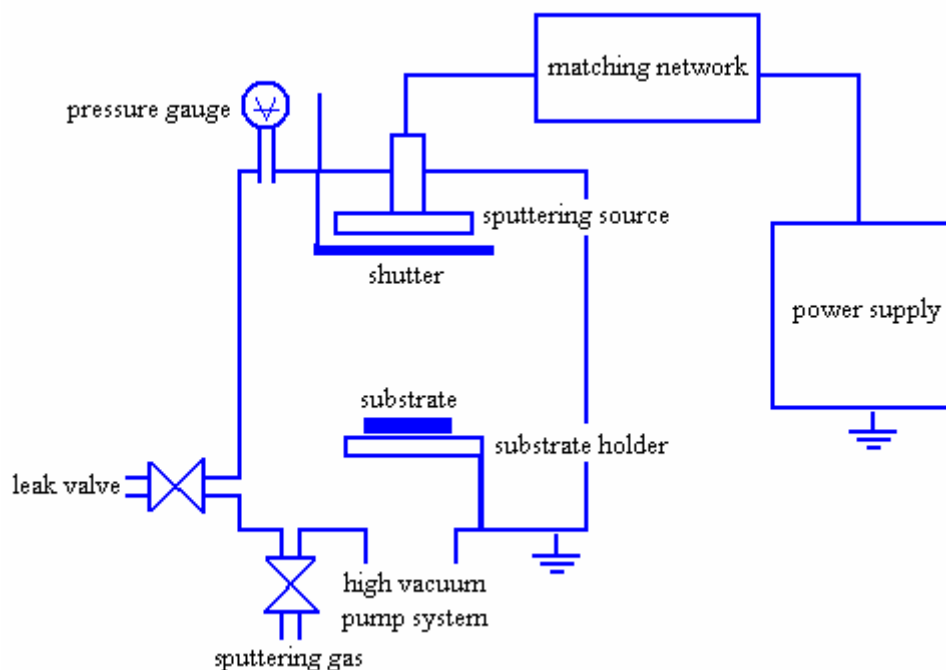
คุณลักษณะที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการดิสชาร์จของก๊าซที่ความดัน 1 ทอร์ (Torr) และระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดเท่ากับ d แสดงได้ดังรูปที่ 4.7

4.3 โครงสร้างระบบการสปัตเตอร์ริง

ปัจจุบันระบบการสปัตเตอร์ริงมีการพัฒนาหลายรูปแบบ โดยมีชื่อเรียกแตกต่างกันไป ขึ้นกับเทคนิค และรูปที่แบบการดัดแปลงการใช้งาน แต่อย่างไรก็ตามระบบเหล่านี้มีโครงสร้าง ดังรูปที่ 4.8

โครงสร้างโดยทั่วไปของระบบการสปัตเตอร์ริง ประกอบด้วย

1. ภาชนะสุญญากาศ (Vacuum chamber) สำหรับบรรจุก๊าซของการดิสชาร์จ แล้วติดตั้งส่วนมากจะทำจากวัสดุจำพวก แก้ว หรือ สแตนเลส เป็นต้น
2. ระบบปั๊มสุญญากาศ (High vacuum pump) มีความสามารถปั๊มความดันลงได้ต่ำกว่า 10^{-6} ทอร์ (Torr) โดยทั่วไปเป็นระบบผสมระหว่างปั๊มแบบโรตารี (Rotary pump) กับปั๊มแพร่ไอน้ำมัน (Diffusion pump) หรือปั๊มแบบโรตารีกับปั๊มเทอร์โบโมเลคิวลา (Turbo pump)
3. หัวตรวจวัดความดัน (Pressure gauge) แสดงผลได้ในย่านความดันต่ำ และความดันใช้งาน
4. วาล์วปล่อย (Leak valve) เป็นวาล์วสำหรับปล่อยให้อากาศไหลเข้าภายในภาชนะสุญญากาศ



รูปที่ 4.8 ลักษณะทั่วไปของระบบสปัตเตอร์ริง

5. แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์ (Sputter source) ประกอบด้วยเป้าและแท่นยึด สำหรับระบบแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงภายในจะบรรจุแม่เหล็กไว้ใต้เป้า

6. แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power supply) ที่ใช้งานในระบบการสปัตเตอร์ริงแบบอาร์เอฟ สปัตเตอร์ริง จะเป็นกระแสไฟฟ้าสลับ (RF power supply) ที่ความถี่ 13.56 เมกะเฮิรตซ์ (MHz)

7. แผ่นกั้น (Shutter) ถูกใช้สำหรับเปิด หรือปิดฟลักซ์ของอะตอมที่หลุดจากแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์

8. แท่นรองรับ (Substrate holder) สำหรับวางวัสดุฐานรอง

9. แหล่งก๊าซสปัตเตอร์ (Sputtering gas) จะต้องเป็นก๊าซที่ไม่ทำปฏิกิริยากับเป้าสารเคลือบ และฟิล์มที่เกิดขึ้น หรือแม้แต่ส่วนประกอบอื่นๆ ในสถานะสุญญากาศ นอกจากนี้ต้องไม่เป็นพิษ และควรมีมวลมากพอที่สามารถทำให้เกิดอัตราการสปัตเตอร์ริงที่สูง ที่นิยมใช้กันอยู่โดยทั่วไป คือ ก๊าซอาร์กอน (Ar) เนื่องจากเป็นก๊าซที่เป็นพิษ ราคาถูก และหาได้ง่าย แต่ก็ยังไม่ใช้ก๊าซเฉื่อยที่มีมวลมากที่สุด

10. วงจรแมตซิง (Matching network) สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า และป้องกันความเสียหายของแหล่งกำเนิด ในกรณีของระบบการสปัตเตอร์แบบอาร์เอฟ สปัตเตอร์ริง

11. ตัวทำความร้อน (Heater) สำหรับเพิ่มอุณหภูมิวัสดุรองรับพร้อมด้วยระบบวัด และควบคุมอุณหภูมิจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า

4.4 อัตราการเคลือบฟิล์มของระบบสเป็คเตอร์ริง

อัตราการเคลือบฟิล์มของระบบการสเป็คเตอร์ริง หมายถึงความหนาของชั้นฟิล์มที่ได้จากการสเป็คเตอร์ริง ต่อหน่วยของเวลาการสเป็คเตอร์ริง ขึ้นอยู่กับปริมาณอะตอมของเป้าสารเคลือบที่ถูกสเป็คเตอร์ริง และสภาพของการชนกับอะตอมเหล่านี้ไปยังวัสดุฐานรอง อัตราการเคลือบฟิล์มจะสัมพันธ์กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ ค่ากระแสไฟฟ้า, ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า, อัตราการไหลของก๊าซเฉื่อย, ระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบกับวัสดุฐานรอง, และความดันภายในภาชนะสุญญากาศในสถานะของการโกล์ดดิซาร์จ

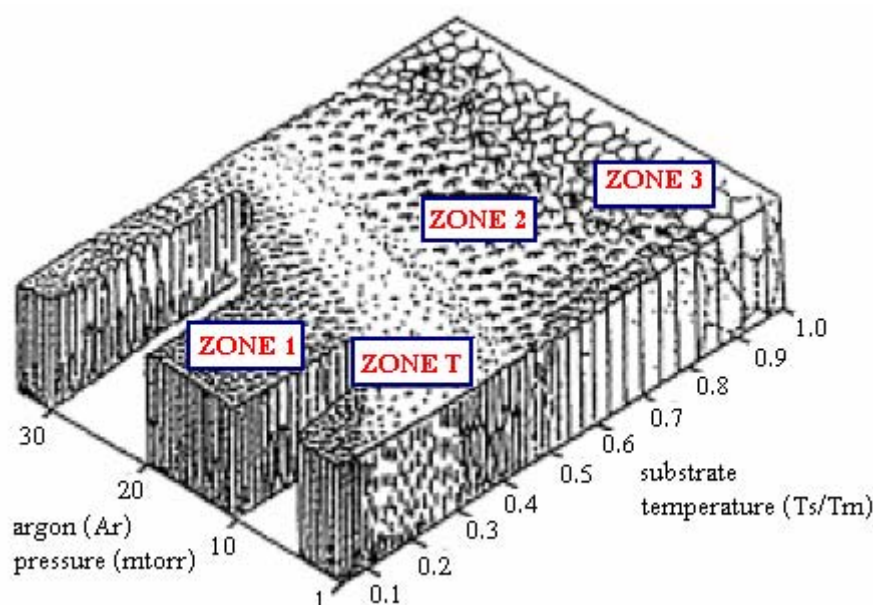
เนื่องจากกระแสไฟฟ้า ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และความดันก๊าซ เป็นปริมาณที่ขึ้นต่อการวัดผลกระทบของตัวแปรตัวใดตัวหนึ่งนั้นไม่สามารถทำได้ ในทางปฏิบัติจึงละเอียดหรือไม่ให้ความสำคัญกับตัวแปรที่มีผลน้อยที่สุด ด้วยการกำหนดตัวแปรคงที่และทำการศึกษาผลจากตัวแปรอีกตัวที่สนใจ เช่น ทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบฟิล์ม เปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ความคงที่ค่าๆ หนึ่ง กำลังไฟฟ้าในที่นี้เป็นการรวมผลของค่ากระแสไฟฟ้า และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของการดิซาร์จเข้าด้วยกัน เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในระบบการสเป็คเตอร์ริง แบบอาร์เอฟ สเป็คเตอร์ริง (RF sputtering) ซึ่งสามารถนำมาเชื่อมความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบฟิล์มได้ดังสมการ (4.6)

$$R \propto \frac{P}{P'/l} \quad (4.6)$$

โดยที่ P คือ กำลังไฟฟ้า
 P' คือ ความดัน
 l คือ ระยะจากเป้าสารเคลือบกับวัสดุฐานรอง

4.5 โครงสร้างระดับไมครอนของฟิล์มบาง

โครงสร้างระดับไมครอนของฟิล์มบางจากการเคลือบฟิล์มบางด้วยระบบการสเป็คเตอร์ริง นั้น แบ่งออกเป็น 4 โซน ตามอัตราส่วน T_s/T_m และความดันก๊าซ เมื่อ T_s เป็นอุณหภูมิของวัสดุฐานรอง และ T_m เป็นจุดหลอมเหลวของวัสดุต้นกำเนิดฟิล์ม แสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แบบจำลองโครงสร้าง (zone model) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างฟิล์มบางจากการสปีดเตอร์ริงลงบนวัสดุฐานรอง และความดันก๊าซอาร์กอน

โครงสร้างโซนที่หนึ่ง ($T_s/T_m < 0.3$) ประกอบด้วย แท่งเกรนเรียว (Tapered column grain) เรียงกันอย่างหลวมๆ ระหว่างเกรนเหล่านี้มีช่องว่าง (void) ค่อนข้างมาก มีลักษณะผิวหน้าขรุขระ ลักษณะโครงสร้างภายในไม่ชัดเจน

โครงสร้างโซนที่สอง ($0.3 \leq T_s/T_m \leq 0.5$) ประกอบด้วย column grain อัดกันค่อนข้างแน่น และอุณหภูมิวัสดุฐานรองระดับนี้ทำให้มีการเติมอะตอมในที่ว่างเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ ความกว้างของเกรนจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของวัสดุฐานรอง และสามารถขยายได้ตลอดตามแนวความหนาของฟิล์ม โครงสร้างแบบนี้มีความแข็งแรงเชิงกลสูง

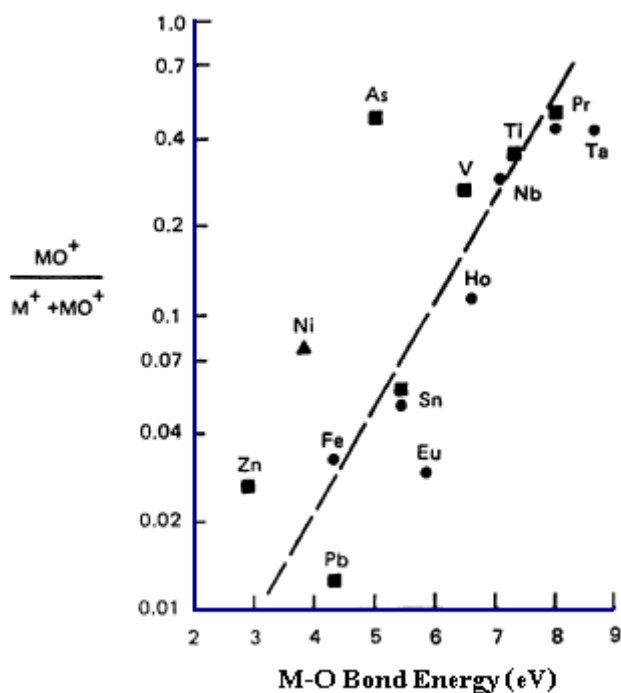
โครงสร้างโซนที่สาม ($0.5 < T_s/T_m$) ประกอบด้วย ขนาดเม็ดเกรนที่มีความสม่ำเสมอ และมีคุณสมบัติใกล้เคียงกันทั้งเนื้อสาร

โครงสร้างโซนที่ ($T_s/T_m = 0$) ประกอบด้วย poorly defined fibrous grains อัดกันแน่นโดยไม่มีช่องว่าง เนื่องจากฟิล์มที่มีโครงสร้างในแบบโซนที่หนึ่ง ที่เคลือบลงบนวัสดุฐานรองที่มีความเรียบ ฟิล์มจะมีความมีผิวเรียบ และความหนาแน่นสูง

4.6 การสปีดเตอร์เป้าสารเคลือบประเภทสารประกอบ

การสปีดเตอร์เป้าสารเคลือบที่เป็นสารประกอบ ตัวอย่างเช่น สารจำพวกโลหะออกไซด์ต่างๆ เป้าสารเคลือบมีโอกาสที่จะถูกสปีดเตอร์เป็นได้ทั้งอะตอมหรือโมเลกุล โดยที่ความสัมพันธ์

ระหว่างจำนวนไอออนของอะตอมโลหะ และอะตอมของโมเลกุลคู่ของโลหะออกไซด์ (MO^+) ต่อไอออนทั้งหมดที่ถูกสปีเตอร์ออกมา สามารถเขียนได้ดังสมการ (4.7)



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของไอออนโมเลกุลคู่ (MO^+/M^++MO^+) กับพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะของโลหะออกไซด์

$$\eta = \frac{MO^+}{(M^+ + MO^+)} \quad (4.7)$$

โดยที่ η คือ จำนวนไอออนของอะตอมโลหะและโลหะออกไซด์

M^+ คือ ไอออนของอะตอมโลหะ

MO^+ คือ ไอออนของโมเลกุลคู่ของโลหะออกไซด์

จากรูปที่ 4.10 โลหะเบาที่มีมวลเป็นสัดส่วนที่น้อยเมื่อเทียบกับออกซิเจนจะเห็นได้ในบริเวณใกล้เส้นประ และยังแสดงให้เห็นว่าไอออนโมเลกุลขนาดใหญ่จะขึ้นกับพันธะของโลหะออกไซด์

4.7 การก่อตัวเป็นฟิล์มจากการสปีดเตอร์ของสารประกอบ

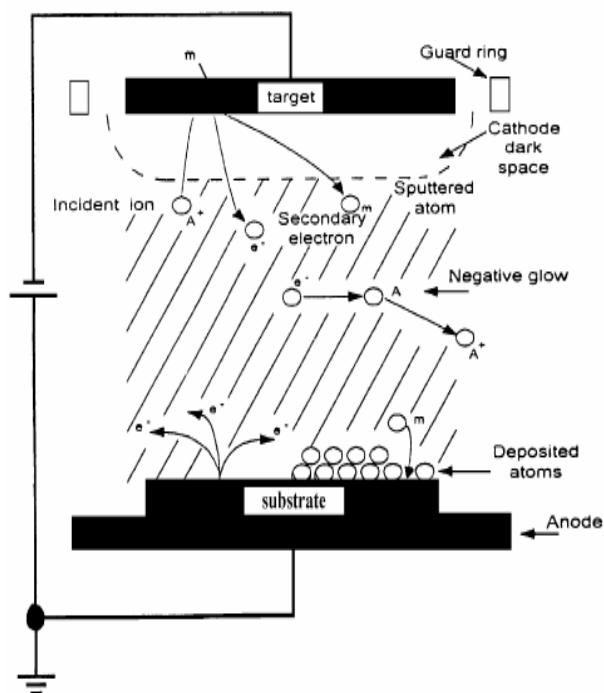
การสปีดเตอร์เป่าสารเคลือบที่เป็นสารประกอบที่เป็นโลหะออกไซด์ หรือสารประกอบอื่นๆ นั้น การสปีดเตอร์ของเป่าสารเคลือบจะได้โมเลกุลที่ออกมาไม่สมบูรณ์ ทำให้องค์ประกอบของฟิล์มที่ได้มีความแตกต่างจากเป่าสารเคลือบ เนื่องจากการขาดหายของอะตอมก๊าซภายในฟิล์ม และลักษณะการชนอะตอมส่งผ่านไปยังวัสดุฐานรอง เช่น กรณีของการสปีดเตอร์ริงเป่าสารเคลือบที่เป็นควอทซ์ ในบรรยากาศก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ ฟิล์มที่ได้จะมีการขาดหายของอะตอมออกซิเจน ซึ่งสามารถทำให้อะตอมของออกซิเจนครบถ้วนได้ด้วยการสปีดเตอร์ริง ในบรรยากาศก๊าซผสมอาร์กอนต่อออกซิเจน ก๊าซที่ป้อนเข้าไปในห้องสปีดเตอร์ริงจะถูกไอออไนซ์และจับบนฟิล์มทำให้องค์ประกอบของฟิล์มมีความสมบูรณ์มากขึ้น

4.8 ระบบ ดีซี สปีดเตอร์ริง

ระบบการสปีดเตอร์ริงแบบ ดีซี สปีดเตอร์ริง (DC sputtering) ลักษณะโครงสร้างโดยทั่วไปจะประกอบด้วยคู่ของอิเล็กโทรดที่วางขนานกัน ด้านหนึ่งของอิเล็กโทรดจะเป็นขั้วคาโทดและอีกด้านเป็นแอโนด บริเวณคาโทดจะมีเป่าสารเคลือบและระบบน้ำหล่อเย็น ส่วนบริเวณแอโนดจะประกอบด้วยฐานรองและระบบน้ำหล่อเย็น เมื่อควบคุมความดันของก๊าซอาร์กอนภายในระบบที่ 0.1 ทอร์ และทำการป้อนไฟฟ้ากระแสตรง โดยต่ออนุกรมกับความต้านทาน 1 ถึง 10 กิโลโอห์ม ศักดาระหว่างขั้วอิเล็กโทรดจะมีค่าประมาณ 1 ถึง 10 กิโลโวลต์ ทำให้เกิดการดีสชาร์จผ่านตัวกลางที่เป็นบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย และก๊าซอาร์กอนที่เกิดการไอออไนซ์ดีสชาร์จจะถูกเร่งพุ่งชนคาโทดที่เป็นเป่าสารเคลือบ และเกิดเป็นชั้นฟิล์มขึ้นที่แอโนดหรือวัสดุฐานรอง

4.8.1 เงื่อนไขที่เหมาะสมของการปลูกฟิล์มโลหะด้วยระบบ ดีซี สปีดเตอร์ริง

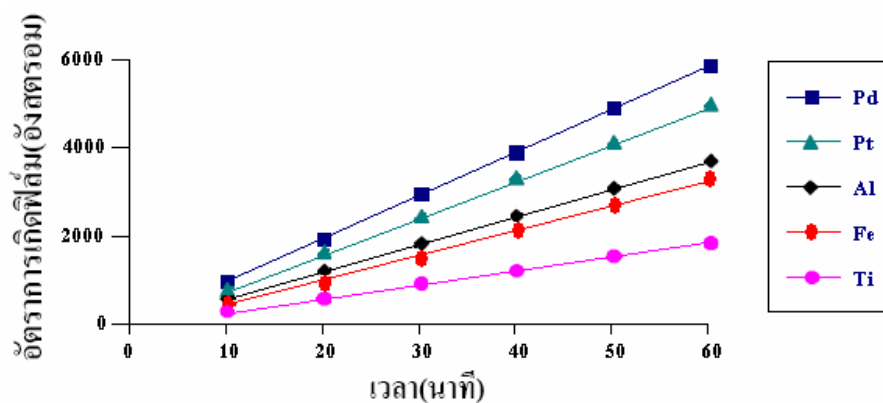
1. กำลังไฟฟ้า Fe และ Al มีค่า 110 วัตต์ ส่วน Pd, Pt, และ Ti มีค่า 25 วัตต์
2. ระยะห่างระหว่างเป่าสารกับฐานรอง 3.5 เซนติเมตร
3. เป่าสารเคลือบเป็น Fe, Al, Pd, Pt, และ Ti
4. ก๊าซที่ใช้คือก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์



รูปที่ 4.11 ระบบดีซี สปีดเตอร์ริง

4.8.2 อัตราการเคลือบฟิล์มบาง Fe, Al, Pd, Pt, และ Ti

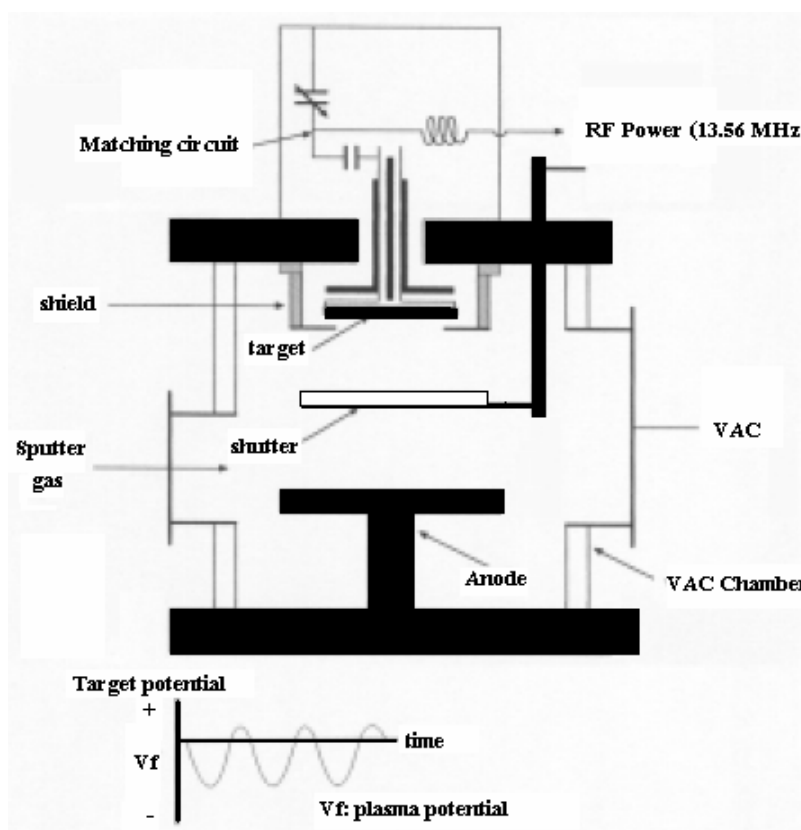
อัตราการเคลือบฟิล์มจากการสปีดเตอร์ริงฟิล์มโลหะชนิดต่างๆ ด้วยระบบการสปีดเตอร์ริงแบบ ดีซี สปีดเตอร์ริง ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซ ประกอบด้วย อัตราการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียม (Al) เท่ากับ 62 อังสตรอม ต่อนาทีก, อัตราการเคลือบฟิล์มบางเหล็ก (Fe) เท่ากับ 53 อังสตรอม ต่อนาทีก, อัตราการเคลือบฟิล์มบางพลาเดียม (Pd) เท่ากับ 96 อังสตรอม ต่อนาทีก, อัตราการเคลือบฟิล์มบางแพลทินัม (Pt) เท่ากับ 83 อังสตรอม ต่อนาทีก, และอัตราการเคลือบฟิล์มบางไททานเนียม (Ti) เท่ากับ 31 อังสตรอม ต่อนาทีก



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาฟิล์ม Al, Fe, Pd, Pt, และ Ti กับเวลาการสปีดเตอร์ริง

4.9 ระบบ อาร์เอฟ สปีดเตอร์ริง

หลักการ คือ ใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้าสลับความถี่ 13.56 MHz เพื่อกระตุ้นให้ก๊าซภายในระบบแตกตัวเป็นไอออนมากขึ้น ทำให้สามารถปลูกฟิล์มบางที่มีความดันต่ำกว่าระบบปลูกฟิล์มบางแบบ ดี ซี สปีดเตอร์ริง และยังสามารถเคลือบสารไดอิเล็กตริก (Dielectric) ได้ เนื่องจากถ้าเป็น ดี ซี สปีดเตอร์ริง จะเกิดการสะสมประจุบวกที่เป้าจนที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับอาโนดจะทำให้ขบวนการสปีดเตอร์ริงสิ้นสุด แต่ อาร์ เอฟ สปีดเตอร์ริงอีกครั้งไซเคิลต่อมาจะมีการพาอิเล็กตรอนเข้าสู่ผิวไดอิเล็กตริกทำให้ผิวหน้าเป็นกลางเหมือนเดิม



รูปที่ 4.13 ระบบอาร์เอฟ สปีดเตอร์ริง

การเกิดการดีสชาร์จในระบบอาร์เอฟ สปีดเตอร์ริง ความดันมีค่าต่ำประมาณ 10^{-2} ทอร์ เมื่อสนามไฟฟ้าจากการชนกันระหว่างโมเลกุลก๊าซและอิเล็กตรอนลำดับสองจะเกิดขึ้นจำนวนมาก ในระบบอาร์เอฟ สปีดเตอร์ริงนั้น Blocking Capacitor จะต่ออยู่ระหว่างวงจร RF Matching กับเป้าสารเคลือบ การป้อนไฟกระแสตรงจะมีค่าครึ่งหนึ่งของศักดาขอคลื่นถึงคลื่นของแหล่งจ่ายพลังงาน คลื่นความถี่วิทยุ ค่าสภาพต้านทานของน้ำหล่อเย็นที่ขั้วคาโทดจะมีค่าสูงพอที่จะรักษาสภาพความเป็นฉนวนไว้ได้

4.9.1 ส่วนประกอบของระบบ SPF-RF sputtering



รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายเครื่องสปีเตอร์ริงแบบ อาร์เอฟ สปีเตอร์ริง (ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์)

ส่วนประกอบของระบบ SPF-RF sputtering ประกอบด้วย

1. ปัมสุญญากาศ เพื่อใช้ลดความดันของก๊าซภายในระบบให้มีความดันต่ำ และเพื่อให้ระบบมีความสะอาด อันเนื่องมาจากการขึ้นและการเอาที่ก๊าซ (out gassing) ที่มีอยู่เดิมในระบบ โดยในระบบนี้จะประกอบด้วยระบบปั๊ม 2 ชนิด คือ ปั๊มโรตารี (Rotary Pump) ที่ความดันใช้งานในช่วง 1 ถึง 10^{-3} Torr และดิฟฟิวชันปั๊ม (Oil Diffusion Pump) ความดันใช้งานในช่วง 10^{-3} ถึง 10^{-8} Torr
2. แคมเบอร์ (Chamber) หรือห้องสปีเตอร์ริง ทำจากโลหะผสมระหว่างเหล็กกับสแตนเลส มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร
3. ขั้วคาโทด (Cathode) มีโครงสร้างแบบ Planar ถูกออกแบบและสร้างด้วยโลหะผสมระหว่างเหล็กกับสแตนเลส มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร
4. ระบบนำหล่อเย็น (Cooling Water) เพื่อควบคุมอุณหภูมิบริเวณขั้วคาโทด, วัสดุฐานรอง, ดิฟฟิวชันปั๊ม, และบริเวณ O-ring ต่าง ๆ

5. แหล่งจ่ายพลังงานคลื่นความถี่วิทยุ (รุ่น 922-9502A) สามารถจ่ายพลังงานเอาต์พุต 450 วัตต์, คลื่นความถี่ 13.56 MHz, และอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม

6. เกจวัดความดัน มี 2 ชนิด คือ Low Vacuum Gauge ใช้วัดความดันในช่วง 10^{-1} ถึง 10^{-4} Torr และ B-A Vacuum Gauge แบบ NI-10D Wide-range Ionization Gauge ใช้วัดความดันในช่วง 10^{-4} ถึง 10^{-11} Torr

7. ระบบควบคุมก๊าซ ประกอบด้วยท่อก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ และก๊าซผสมอาร์กอนกับออกซิเจน ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซโดย Mass Flow Controller

4.9.2 ขั้นตอนการปลูกฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ด้วยระบบอาร์เอฟ สปีดเตอร์ริง

ขั้นตอนของการปลูกฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ (In_2O_3) ด้วยระบบการสปีดเตอร์ริงแบบอาร์เอฟ สปีดเตอร์ริง มีดังนี้

1. ตรวจสอบเช็ควาล์วทุกตัวอยู่ในตำแหน่งปิด
2. เปิดระบบน้ำหล่อเย็น
3. เปิดระบบปั๊ม ด้วยการเปิด Main Power และเปิดสวิตช์ Diffusion Pump
4. เปิด Roughing วาล์ว เพื่อควบคุมความดันภายในห้องสปีดเตอร์ริงที่ 10^{-1} ถึง 10^{-3} Torr
5. ปิด Roughing วาล์ว และเปิด Fore ling วาล์ว
6. เปิด Main วาล์ว เพื่อควบคุมความดันที่ 10^{-3} ถึง 10^{-7} Torr
7. ทำการเติม Liquid N_2 ที่บริเวณ Liquid N_2 Trap โดยทำการเติมทุกๆ 30 นาที
8. ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซเฉื่อยที่ 10 sccm เข้าห้องสปีดเตอร์ริง
9. ปรับ Main วาล์ว เพื่อควบคุมความดันภายในห้องสปีดเตอร์ริงที่ 1.5×10^{-3} Torr
10. เปิด RF Generator และเปิด Transmission switch
11. ปรับกำลังงานที่ 120 วัตต์ และปรับระบบ RF matching
12. เมื่อระบบต่างๆ อยู่ในสถานะคงที่ ทำการ Pre-sputtering เป็นเวลา 30 นาที
13. ทำการสปีดเตอร์ริงฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ตามเวลาที่กำหนด

4.9.3 เงื่อนไขที่เหมาะสมของการปลูกฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ด้วยระบบ อาร์เอฟ สปีดเตอร์ริง

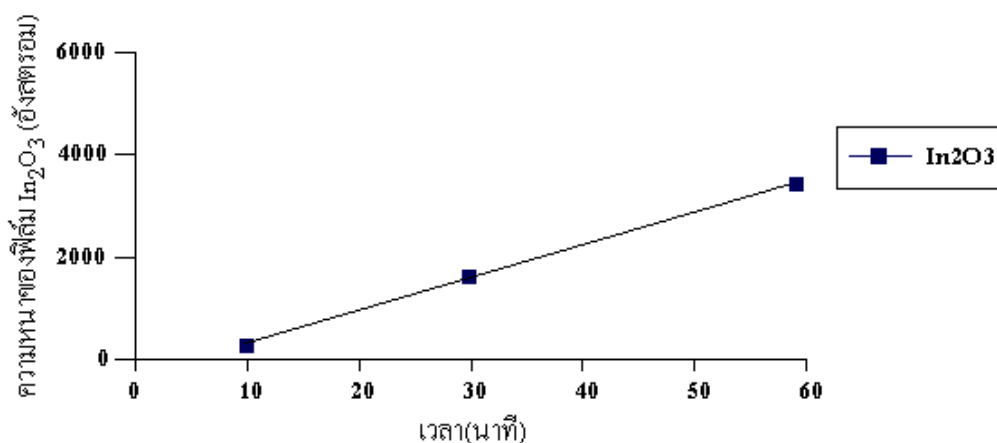
ระบบการสปีดเตอร์ริงแบบ อาร์เอฟ สปีดเตอร์ริง ที่ใช้ในการปลูกชั้นฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ มีเงื่อนไขการสปีดเตอร์ริงที่เหมาะสม ดังนี้

1. แหล่งจ่ายพลังงานคลื่นความถี่วิทยุ 13.56 MHz
2. กำลังงานความถี่คลื่นวิทยุ 120 วัตต์

3. ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมเป้าสาร 1.5 กิโลวัตต์
4. ระยะห่างระหว่างเป้าสารกับฐานรอง 3.5 เซนติเมตร
5. เป้าสารอินเดียมออกไซด์ 99.999 เปอร์เซนต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร
6. แก๊สเฉื่อยเป็นแก๊ซอาร์กอนบริสุทธิ์

4.9.4 อัตราการเคลือบฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์

อัตราการเคลือบฟิล์มจากการสปัตเตอร์ริงฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ ด้วยระบบการสปัตเตอร์ริงแบบ อาร์เอฟ สปัตเตอร์ริง ในบรรยากาศแก๊ซอาร์กอนบริสุทธิ์ ฟิล์มที่ได้จากการเตรียมจะถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างหัวตรวจวัดแก๊ซต่อไป โดยมีอัตราการเคลือบฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ (In_2O_3) เท่ากับ 66 อังสตรอม ต่อนาที



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาฟิล์ม In_2O_3 กับเวลาการสปัตเตอร์ริง