

ระบบหล่อเย็น ซึ่งทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กบนผิวเป่าสารเคลือบมีค่าต่ำ เป็นผลให้อัตราการสปีดเตอริงลดลงแม้จะทำให้ความหนาของส่วนหล่อเย็นที่ติดกับเป่าสารเคลือบบางลงก็ตาม

การจัดวางตำแหน่งแม่เหล็กนอกจากจะมีผลต่อการกักร้อนบนผิวเป่าสารเคลือบแล้ว ยังมีผลต่อความหนาของฟิล์มเคลือบ ณ ตำแหน่งต่างๆ ด้วย การจัดวางตำแหน่งแม่เหล็กที่ไม่ดีพอและการวางตำแหน่งวัสดุรองรับใกล้คาโทดมากเกินไปจะทำให้ความหนาฟิล์มเคลือบเปลี่ยนแปลงไปตามพื้นที่กักร้อนบนเป่า การจัดให้ฟิล์มเคลือบมีความหนาสม่ำเสมอ อาจทำได้โดยการจัดตำแหน่งสนามแม่เหล็กที่เหมาะสมและใช้การเคลื่อนที่ของวัสดุรองรับร่วมด้วย เพื่อให้บริเวณที่เกิดอัตราการใช้เคลือบเร็วและช้าได้กระจายสม่ำเสมอตลอดผิวหน้าวัสดุรองรับหรือชิ้นงานนั้น

การปล่อยอนุภาคจากกระบวนการสปีดเตอริง แม้ว่าอะตอมสารเคลือบจะชนกับโมเลกุลของแก๊สจนเปลี่ยนทิศทางไปมาจากจุดเริ่มต้น และถือเสมือนว่าเป็นกระบวนการแพร่ (diffusion) ลงเคลือบวัสดุรองรับในทุกทิศทางก็ตามฟิล์มที่ได้ย่อมไม่สามารถทำให้ความหนาสม่ำเสมอได้ ถ้าการปล่อยอนุภาคจากทุกจุดบนเป่าสารเคลือบไม่สม่ำเสมอกัน ทั้งนี้พบว่าในแมกนีตรอนสปีดเตอริงแบบพลาสมาวงกลม ฟิล์มเคลือบจะมีความสม่ำเสมอดีที่สุด เมื่อรัศมีภายในและภายนอกของวงพลาสมามีค่าเป็น 0.7 และ 0.8 ของระยะห่างระหว่างเป่าสารเคลือบและวัสดุรองรับตามลำดับ เมื่อแผ่นเป่าวงกลมมีขนาดใหญ่ขึ้น จำนวนวงแหวนพลาสมาของการเกิดสปีดเตอริงควรมีจำนวนเพิ่มขึ้นตามขนาดของแผ่นเป่าเพื่อให้ความหนาฟิล์มเคลือบมีความสม่ำเสมอและเพื่อการใช้งานเป่าสารเคลือบอย่างมีประสิทธิภาพ

4. การชิลด์คาโทด ปกติกระบวนการโกลด์ติสซาร์จที่จะทำให้เกิดการสปีดเตอริงทุกบริเวณของคาโทดที่ปรากฏศักย์ไฟฟ้าลบต่อไอออน ดังนั้นเพื่อป้องกันการสปีดเตอริงในบางบริเวณที่มีได้ติดเป่าสารเคลือบไว้จึงหุ้มล้อมรอบคาโทดด้วยตัวนำไฟฟ้าซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับอาโนดหรือกราวด์ เรียกว่า คาโทดชิลด์ โดยชิลด์มีระยะห่างจากคาโทดน้อยกว่าระยะคาร์คัสเปซ ในบางกรณีชิลด์จะคลุมเลขขอบของเป่าสารเคลือบ เพื่อป้องกันมิให้เกิดการสปีดเตอริงสกรูยิดเป่าสารเคลือบ ทำให้การเคลือบฟิล์มมีความบริสุทธิ์ปราศจากสารปลอมปนจากสกรูยิดเป่าสารเคลือบนั้น อย่างไรก็ตามแม้ว่าการชิลด์จะป้องกันการสปีดเตอริงในบางบริเวณได้ บริเวณขอบปลายแหลมหรือฝุ่นผงและสิ่งสกปรกที่จับอยู่ระหว่างคาโทดและชิลด์อาจเป็นสาเหตุให้เกิดการอาร์คได้

5. วัสดุที่ใช้ทำคาโทด สามารถใช้ได้หลายชนิด แต่ที่นิยมใช้มากกันที่สุดคือ เหล็กสแตนเลสและทองแดง เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีการเกาะจับของแก๊สต่ำสามารถไล่แก๊สบนผิววัสดุภายใต้สุญญากาศ (degas) ได้ง่ายและมีความดันไอต่ำ เหล็กสแตนเลสทนการกักร้อนจากสารเคมีต่างๆ ได้ดีแต่มีความนำความร้อนและไฟฟ้าที่ไม่ดี ส่วนทองแดงเป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าที่ดีแต่ทนการกักร้อนของสารเคมีไม่ดี ทั้งนี้จุดสำคัญในการสร้างคือคาโทดต้องมีความคงทนการกักร้อนและมีการนำความร้อนที่ดีบริเวณแผ่นปิดหลัง นอกจากนี้ถ้าคาโทดเป็นชนิดแมกนีตรอนแผ่นปิดหลังต้องไม่เป็นสารแม่เหล็ก มิฉะนั้นจะกั้นสนามแม่เหล็กมิให้มายังเป่าสารเคลือบ

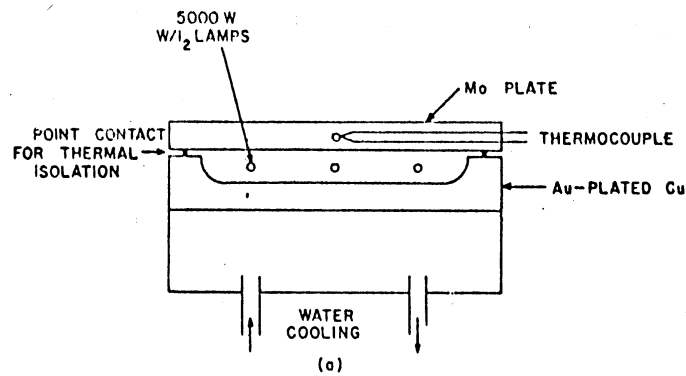
6. วัสดุเป่าสารเคลือบ ควรเป็นวัสดุที่มีความบริสุทธิ์และความหนาแน่นสูงซึ่งผลิตจากกระบวนการ hot-pressed หรือจากการ sintering ในสุญญากาศของผงวัสดุบริสุทธิ์ที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับวัสดุต้น (bulk material) มากที่สุดเพื่อมิให้เนื้อโลหะมีแก๊สจับตัวอยู่ภายในมิฉะนั้นระหว่างกระบวนการสเป็คเตอรืงผิวเป่าสารเคลือบภายใต้อุณหภูมิค่อนข้างสูงจะปลดปล่อยอะตอมของแก๊ส (degas) ซึ่งมักเป็นแก๊สออกซิเจนที่ไวต่อปฏิกิริยาอันมีผลต่อคุณภาพฟิล์ม

2.4.2 ที่วางชิ้นงาน

ในการเคลือบฟิล์มบางแบบแมกนีตรอนสเป็คเตอรืง อาโนดหรือที่วางชิ้นงานคือวัสดุชิ้นเดียวกันซึ่งอาจต่อลงกราวด์หรือแยกขั้วต่อเพื่อการป้องกันไบแอสด้วยศักย์ไฟฟ้าลบได้ ขณะที่ภาชนะสุญญากาศมักสร้างด้วยโลหะและต่อลงกราวด์เพื่อป้องกันไฟฟ้าช้อค ดังนั้นภาชนะจึงทำหน้าที่เหมือนอาโนดขนาดใหญ่ในการดึงกระแสอิเล็กตรอนจากระบบในกระบวนการโคล์ดิสซาร์จ ส่วนกระแสอิเล็กตรอนอีกส่วนหนึ่งซึ่งถูกดึงเข้าสู่ที่วางชิ้นงานพร้อมกับอะตอมพลังงานสูงจากกระบวนการสเป็คเตอรืง มีส่วนทำให้อุณหภูมิของชิ้นงานสูงขึ้น อุณหภูมิที่สูงขึ้นนี้อาจมีทั้งข้อดีและข้อเสียในการเคลือบชิ้นงานด้วยเป่าสารเคลือบต่างชนิดกันออกไป เช่นอุณหภูมิที่สูงขึ้นมีแนวโน้มทำให้อัตราการเคลือบโลหะมีค่าลดลงกว่าขณะอุณหภูมิต่ำส่วนอัตราการเคลือบแบบรีแอคทีฟสเป็คเตอรืง มีแนวโน้มทางตรงข้าม ฟิล์มเคลือบของสารบางชนิดยึดเกาะกับชิ้นงานได้ดีเมื่อควบคุมอุณหภูมิของชิ้นงานในช่วงค่าหนึ่ง และบางครั้งการที่ชิ้นงานมีอุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำลายสภาพความแข็งแรงของชิ้นงานได้เป็นต้น ดังนั้นในการออกแบบที่วางชิ้นงานหรือวัสดุรองรับควรสามารถควบคุมอุณหภูมิชิ้นงานให้เหมาะสมกับสภาพและคุณสมบัติของฟิล์มเคลือบที่ต้องการ ซึ่งส่วนใหญ่มักออกแบบให้มีทั้งระบบระบายความร้อนและเพิ่มความร้อนได้ในที่วางชิ้นงานชุดเดียวกัน (รูปที่ 2.22)

การระบายความร้อน สามารถทำได้โดยการใช้ น้ำหล่อเย็น เพราะมีราคาถูก นอกจากนี้ยังอาจใช้แก๊ส หรือไนโตรเจนเหลว ทั้งนี้ขึ้นกับอุณหภูมิและความรวดเร็วที่ต้องการใช้งาน ส่วนการเพิ่มความร้อนหรืออุณหภูมิของชิ้นงาน อาจใช้ของเหลวร้อน ขดลวดความร้อน (resistive heater) หรือหลอดรังสีความร้อน (infrared lamp) ในส่วนของการวัดอุณหภูมิอาจใช้เทอร์โมคัปเปิล อินฟราเรด สเป็คโตรมิเตอร์ (infrared spectrometer) หรือเทคนิคอื่นก็ได้ ขึ้นกับความละเอียดของการวัดที่ต้องการ

ส่วนที่วางวัสดุรองรับควรทำด้วยทองแดงหรือโมลิบดีนัมซึ่งนำความร้อนได้ดีภายใต้สุญญากาศการนำความร้อนจากที่วางชิ้นงานสู่ชิ้นงานเกิดขึ้นไม่ตื้นนัก เนื่องจากระยะปลดการชนของโมเลกุลแก๊สสูงขึ้นมาจึงจำเป็นต้องทำให้ชิ้นงานและแผ่นรองชิ้นงานสัมผัสกันได้ดีที่สุดโดยการใช้สารต่อนำความร้อน เช่น อาจใช้ไซลิโคน (silicone vacuum grease) ต่อนำความร้อนให้กับชิ้นงาน เมื่ออุณหภูมิที่ต้องการควบคุมไม่เกิน 100°C เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแต่ไม่เกิน 450°C อาจใช้ กัลเลียม (Ga), อินเดียม (In) หรือฟอสฟอริเนียมเป็นตัวต่อนำความร้อนจากที่วางชิ้นงานสู่ชิ้นงาน



รูปที่ 2.22 โครงสร้างอาโนดหรือที่วางชิ้นงาน ที่ควบคุมอุณหภูมิได้^[35]

การทำให้อาโนดหรือแผ่นรองวัสดุรองรับมีขั้วแยกจากกราวด์เพื่อป้องกันไบแอสได้ มีข้อดีหลายประการคือ (1) การป้องกันไบแอสศักย์ไฟฟ้าลบค่าสูงช่วยให้ที่วางวัสดุรองรับและวัสดุรองรับทำตัวเสมือนเป็นคาโทด โดยมีผนังภาชนะสุญญากาศเป็นอาโนดทำให้เกิดการสปีดเตอร์กักร่อน (sputtered etching) บนผิวหน้าชิ้นงานซึ่งจะเป็นการทำความสะอาดผิววัสดุรองรับก่อนการเคลือบซึ่งทำให้ฟิล์มยึดเกาะได้ดีขึ้น (2) การป้องกันไบแอสด้วยศักย์ไฟฟ้าลบเล็กน้อยแก่วัสดุรองรับ (-50 ถึง -200 V) ระหว่างการเคลือบจะช่วยการชนของอิเล็กตรอนบนผิววัสดุรองรับทำให้อุณหภูมิของวัสดุรองรับไม่สูงมากนักและลดโอกาสที่อิเล็กตรอนจะทำลายผิวฟิล์มเคลือบจากการวิ่งชน (3) การป้องกันไบแอสศักย์ไฟฟ้าลบแก่ชิ้นงานจะทำให้ปริมาณแก๊สไอปฏิกิริยาที่ตกค้างในฟิล์มมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเกิดกระบวนการสปีดเตอร์ซ้ำ (resputtering) บนผิวฟิล์ม ทำให้แก๊สไอปฏิกิริยาบางส่วนถูกสปีดเตอร์หลุดออกไปมากกว่าสารเคลือบและฟิล์มมีความบริสุทธิ์มากขึ้น การขจัดแก๊สออกมากหรือน้อยขึ้นกับแรงยึดเกาะระหว่างแก๊สไอปฏิกิริยากับวัสดุเคลือบ เมื่อเทียบกับแรงยึดเกาะกันเองของอะตอมวัสดุเคลือบจากการทดลองพบว่าการป้องกันไบแอสศักย์ไฟฟ้าลบให้กับวัสดุรองรับที่เคลือบบนแท่นทาลัม (Ta) โมลิบดีนัม (Mo) และไนโอเบียม (Nb) ปริมาณออกซิเจนในฟิล์มมีค่าต่ำกว่าขณะไม่ป้องกันไบแอสมาก แต่การไบแอสชิ้นงานเมื่อเคลือบ อลูมิเนียม (Al) และ แมกนีเซียม (Mg) ไม่สามารถลดปริมาณออกซิเจนในฟิล์มได้มากนัก เมื่อเทียบกับขณะไม่มีไบแอส เนื่องจากการยึดเกาะระหว่างออกซิเจนและอะตอมโลหะมีมากกว่าการยึดเกาะกันเองของอะตอมโลหะ

ข้อเสียของการป้องกันไบแอสศักย์ไฟฟ้าลบกับวัสดุรองรับ คือ แก๊สเฉื่อยที่ถูกจับอยู่ในฟิล์มจะเพิ่มปริมาณมากขึ้นตามกำลังสองของความต่างศักย์ไฟฟ้าไบแอส เนื่องจากไอออนของอาร์กอนมีโอกาสถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าจากไบแอสให้มีพลังงานสูงขึ้นและชนฝังตัวในฟิล์มมากขึ้นตามพลังงานที่ได้รับ แต่ปริมาณอาร์กอนในฟิล์มนี้สามารถลดลงได้เมื่ออุณหภูมิของวัสดุรองรับสูงขึ้น

2.4.3 ระบบสุญญากาศ (vacuum system)

เนื่องจากภายในระบบสุญญากาศทุกพื้นที่ที่มีโอกาสถูกชนด้วยอะตอมสารเคลือบและไอออนพลังงานสูง เป็นเหตุให้เกิดการปล่อยแก๊สออกจากพื้นผิวที่ถูกชน (outgassing) ดังนั้น ชิ้นส่วนต่างๆ ภายในระบบสุญญากาศควรมีการระบายความร้อนและต่อกราวด์ไว้เพื่อลดปริมาณการปล่อยแก๊สไว้ปฏิกิริยาจากผนังของระบบสุญญากาศ (outgas) แก๊สควรป้อนเข้าสู่ระบบและดูดผ่านเครื่องสูบตลอดเวลาเพื่อไล่แก๊สไว้ปฏิกิริยาออกจากระบบตลอดการสปีดเตอร์ทำให้ลดสารปลอมปน (contamination) ในฟิล์มที่เคลือบได้ การปล่อยปริมาณแก๊สบริสุทธิ์ของอาร์กอนไหลผ่านระบบด้วยอัตราสูง จะเป็นการช่วยเจือจางแก๊สไว้ปฏิกิริยาในระบบและลดอุณหภูมิของระบบลงเนื่องจากปริมาณแก๊สที่ถูกปล่อยจากผนังของระบบมีค่าลดลงตามเวลา จึงควรใช้แผ่นปิด (shutter) กันระหว่างคาโทด และวัสดุรองรับเพื่อกับมิให้มีการเคลือบเกิดขึ้นระหว่างช่วงแรกที่มีปริมาณแก๊สไว้ปฏิกิริยาสูง รวมทั้งให้เวลาแก่ระบบในการทำความสะอาดผิวเป้าสารเคลือบก่อนการเคลือบจริง (presputtering) จากนั้นจึงเปิดแผ่นปิดและเคลือบฟิล์มบางเมื่อภายในระบบสะอาดแล้ว

แม้ความดันแก๊สที่ใช้ในระบบสปีดเตอร์จริงจะมีค่าระหว่าง 10^{-3} - 10^{-1} mbar ก็ตามก่อนการสปีดเตอร์ทุกครั้งควรลดความดันในระบบให้อยู่ในช่วงระหว่าง 10^{-7} - 10^{-6} mbar เพื่อขจัดแก๊สที่เกาะจับบนผิวชิ้นส่วนต่างๆ และผนังภาชนะออกให้มีปริมาณน้อยที่สุด และควรมีลดความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิผิวภายในผนังภาชนะเพื่อช่วยการปล่อยแก๊สจากผนังภาชนะสุญญากาศ ในระยะแรกเมื่อความดันลดต่ำพอจึงหยุดการให้ความร้อนและทำความสะอาดผนังภาชนะสุญญากาศแทน ผนังภาชนะสุญญากาศที่ทำจากเหล็กสเตนเลสและทองแดงจะมีการปล่อยแก๊สง่ายและกันการรั่วซึมของแก๊สจากภายนอกได้ดี ผนังด้านหนึ่งของภาชนะสุญญากาศอาจทำเป็นช่องกระจกเพื่อดูกระบวนการสปีดเตอร์ภายในและเพื่อการควบคุมตำแหน่ง แผ่นปิดและชิ้นส่วนต่างๆ ภายในระบบ

เครื่องสูบที่ใช้กับระบบสปีดเตอร์ส่วนใหญ่ได้แก่ เครื่องสูบแบบแพร่ไอ (diffusion pump) ซึ่งสามารถลดความดันในระบบได้ถึง 10^{-7} mabr และมีประสิทธิภาพสูงที่ความดันต่ำ อย่างไรก็ตามที่ความดัน 10^{-3} mbar เครื่องสูบแบบแพร่ไอจะมีประสิทธิภาพลดลง ที่ความดันค่าสูงนี้อาจเป็นสาเหตุให้เกิดการฟุ้งของน้ำมันเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศตอนบนทำให้เกิดความสกปรกต่อฟิล์มเคลือบดังนั้นจึงมีขีดจำกัดของเครื่องสูบแบบแพร่ไอที่ไม่สามารถใช้กับระบบที่มีอัตราการไหลของแก๊สสูงเกินไปและการใช้ต้องระวังมิให้ความดันบริเวณทางออกของเครื่องสูบแบบแพร่ไอสู่เครื่องสูบลอโรตารี มีค่าสูงเกินกว่าที่ผู้ผลิตกำหนดเพื่อป้องกันการไหลย้อนกลับ (back streaming)

ภาชนะของระบบสุญญากาศควรมีขนาดใหญ่กว่าขนาดคาโทดพอสมควร เนื่องจากไอออนจากแก๊สเมื่ออาจรวมกับอิเล็กตรอนเป็นกลางทางไฟฟ้าได้ที่ผนังภาชนะการที่ผนังภาชนะอยู่ใกล้คาโทดเกินควรอาจทำให้ไอออนส่วนใหญ่ที่ควรถูกเร่งเข้าชนคาโทดบริเวณขอบเป้าเมื่อแพร่ผ่านพลาสมาสู่คาโทดเกิดการชนกับผนังภาชนะแล้วกลายเป็นกลางทำให้สูญเสียปริมาณไอออนที่ควรวิ่งสู่คาโทดไปส่วนหนึ่ง เรียกว่า การสูญเสียที่ผนัง (Wall losses) ทำให้อัตราการสปีดเตอร์ลดลง

2.4.4 แหล่งกำเนิดไฟฟ้า (power supply)

แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้กับระบบไดโอดสปีดเตอร์อาจใช้ไฟฟ้ากระแสตรงไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำหรือความถี่สูง โดยไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำอาจใช้ในการสปีดเตอร์ที่มี 2 คาโทด โดยมีชิ้นงานอยู่ระหว่างกลางเพื่อให้การเคลือบเกิดขึ้นทั้ง 2 ด้านของชิ้นงานในเวลาเดียวกันด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเพียงชุดเดียว สำหรับระบบแมกนีตรอนสปีดเตอร์ ความต่างศักย์ที่ใช้งานมีค่าอยู่ระหว่าง 300-800 V กระแสควรมีค่าระหว่าง 10-100 mA/cm² บนคาโทด โดยมีระบบควบคุมกระแสที่แบบปรับค่าได้ ไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงที่ใช้ อาจมีการกรองสัญญาณให้เรียบหรือไม่ก็ได้ การกรองสัญญาณจะช่วยให้การสปีดเตอร์บนผิวสารเคลือบและสภาพโกลด์ดิสชาร์จมีความสม่ำเสมอ การไม่กรองสัญญาณไฟฟ้าช่วยลดความรุนแรงการอาร์คลง แหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ควรสามารถทนต่อการเกิดไฮท์โวลต์เตจ อาร์ เอฟ ทรานเซียนส์ (high voltage rf transients) ซึ่งเกิดจากพลาสมาในระบบแมกนีตรอน รวมทั้งการอาร์คของระบบด้วย การอาร์คเพียงเล็กน้อยจากสารเจือปน และ ไดอิเล็กตริกเบรคดาวน์ (dielectric breakdown) บนเป่าสารเคลือบ ซึ่งเกิดขึ้นชั่วขณะระบบป้องกันของเครื่องควรจำกัดกระแสการอาร์คนี้ไว้ได้โดยไม่ตัดวงจรแต่การอาร์คอย่างรุนแรงอันเกิดจากการหลุดลอกของฟิล์มเคลือบจากแผ่นซิลด์คาโทดและสัผัสคาโทดให้เกิดลัดวงจร ระบบป้องกันควรมีความไวสูงในการตัดแหล่งกำเนิดออกจากวงจร แหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้กับระบบสปีดเตอร์มีหลายชนิดดังนี้

1 แหล่งกำเนิดไฟฟ้า ดีซี (DC power supply) ถ้ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ไม่เกิน 10 kW นิยมใช้หม้อแปลงไฟฟ้าออโต (auto transformer) ควบคุมความต่างศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งแปลงไฟฟ้าเป็นกระแสตรงด้วยบริดจ์เรกติฟายเออร์ (bridge rectifier) และควรมีขดลวดอินดักเตอร์ต่ออยู่เพื่อกันสัญญาณ อาร์ เอฟ สไปค์ (rf spikes) จากการอาร์คซึ่งอาจทำลายวงจรบริดจ์เรกติฟายเออร์ได้ การมีชั้นแม่เหล็ก (magnetic shunting) ในตัวทรานส์ฟอร์มเมอร์ จะทำให้ทรานส์ฟอร์มเมอร์มีค่าเอาท์พุทอิมพีแดนซ์ (output impedance) สูง เมื่อเกิดการอาร์คขึ้น กระแสจากการอาร์คจะถูกป้อนกลับสู่ทรานส์ฟอร์มเมอร์และลดค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของทรานส์ฟอร์มเมอร์ลงเป็นศูนย์อย่างรวดเร็วทำให้แหล่งกำเนิดป้องกันอันตรายตัวเองได้

เมื่อกำลังไฟฟ้าสูงขึ้นอาจใช้ชุด ซิลิคอน คอนโทรล เรกติฟายเออร์ (silicon control rectifier) ควบคุมความต่างศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของทรานส์ฟอร์มเมอร์ 3 เฟส โดยมีวงจรบริดจ์เรกติฟายเออร์ 3 เฟส (3-phase bridge rectifier) ต่ออยู่เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง นอกจากนี้ อาจมีวงจรป้อนกลับ (feed back circuit) ควบคุมความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ หรือกระแสไฟฟ้าคงที่แล้ว แต่ความต้องการตามชนิดของระบบสปีดเตอร์ เพื่อให้ระบบทำงานอย่างปลอดภัยจากการอาร์ค หรือการมีภาระเกิน (overload) รวมทั้งมีอุปกรณ์วัดละเอียด เช่น แอมมิเตอร์และโวลต์มิเตอร์ เป็นต้น ซึ่งเสริมเข้ากับระบบเพื่อความสะดวกในการใช้งาน

2. แหล่งกำเนิดไฟฟ้าความถี่สูง (RF Power supply) แหล่งกำเนิดไฟฟ้าความถี่สูงนี้ นิยมใช้ที่ความถี่ 13.56 ± 0.00678 , 27.12 ± 0.0160 และ 40.68 ± 0.020 MHz ตามข้อตกลงของ International Agreement for Unlimited Radiation ซึ่งให้การรับรองระบบโทรคมนาคมน้อยและมีการผลิตในเชิงการค้าโดยทั่วไปเครื่องกำเนิดไฟฟ้าความถี่สูงที่ผลิตขึ้นในเชิงการค้า มีค่าอิมพีแดนซ์เอาต์พุต ประมาณ 50 โอห์ม แต่กระบวนการโกลด์ดิสซาร์จมีค่าอิมพีแดนซ์สูงกว่านี้มากจึงจำเป็นต้องใช้วงจรแมชซึ่งเพื่อสามารถปรับค่าอิมพีแดนซ์ให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าส่งพลังงานสู่ระบบสปีดเตอริงอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดและในกรณีการทำไบแอสสปีดเตอริงกับระบบอาร์เอฟ จำเป็นต้องมีวงจรทูนนิ่ง (tuning network) ช่วยในการปรับเฟสของไฟฟ้าสลับที่เหมาะสมด้วยการทำไบแอสสปีดเตอริงในระบบอาร์เอฟจึงค่อนข้างมีความยุ่งยากกว่าระบบดี ซี มาก

2.4.5 ระบบป้อนแก๊ส

แก๊สที่ป้อนเข้าสู่ระบบสปีดเตอริงควรมีหลายจุดเพื่อควบคุมความดันมิให้แตกต่างกันในแต่ละส่วนที่เกิดกระบวนการสปีดเตอริง ความไม่สม่ำเสมอของแก๊สอาร์กอนจะทำให้อัตราการสปีดเตอริงที่เกิดบนผิวเป้าสารเคลือบไม่สม่ำเสมอ ซึ่งมีผลต่อความหนาฟิล์มและอายุการใช้งานของเป้าสารเคลือบ การป้อนแก๊สไวปฏิกิริยาที่ไม่สม่ำเสมอทำให้ส่วนผสมของธาตุในฟิล์มเคลือบสารประกอบมีความแตกต่างกัน การป้อนแก๊สที่ความดันต่ำในระบบสปีดเตอริงควรใช้วาล์วรูเข็มซึ่งสามารถส่งแก๊สเข้าสู่ระบบได้ทีละน้อยและควบคุมความดันได้ละเอียดพอ และไม่ควรมีป้อนแก๊สจากถังเก็บแก๊สซึ่งมีความดันสูงผ่านวาล์วรูเข็มโดยตรง ควรมีการลดลำดับความดันด้วยวาล์วปรับความดัน (regulator value) เป็นช่วงๆ และควรมีเครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊ส (gas flow meter) ต่ออยู่ก่อนถึงวาล์วรูเข็ม ท่อส่งแก๊สไม่ควรมีความยาวมากเกินไป และเมื่อต่อกับระบบสุญญากาศต้องสามารถลดความดันในท่อลงได้ต่ำถึง 1 m torr เพื่อการทำความสะอาดท่อโดยผ่านวาล์วบายพาส (bypass) ท่อควรทนความดันได้สูงถึง 200 ปอนด์/ตารางนิ้ว เป็นอย่างน้อย เมื่อต่อกับถังเก็บแก๊สความดันสูง การป้อนแก๊สเข้าสู่ระบบควรป้อนเข้าตอนบนของภาชนะสุญญากาศ เพื่อการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของแก๊สภายในระบบ ก่อนถูกดูดผ่านปั๊มซึ่งติดตั้งอยู่บริเวณตอนล่าง การป้อนแก๊สใกล้บริเวณคาโทดอาจลดความสม่ำเสมอของความดันลงบ้าง แต่เป็นการป้องกันมิให้แก๊สที่รั่วเข้าสู่ระบบตามผนังภาชนะเข้าสู่บริเวณโกลด์ดิสซาร์จได้

2.5 ลักษณะเฉพาะตัวของระบบสปัดเตอริง^{[4][21]}

2.5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส ความต่างศักย์ดิสชาร์จและความดัน

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ดิสชาร์จในระบบสปัดเตอริงจะแสดงถึงประสิทธิภาพของการเกิดไอออนในเซชัน สภาพการดิสชาร์จในระบบแมกนีตรอนที่จัดไว้ อย่างมีประสิทธิภาพจะมีความสัมพันธ์ของกระแสและความต่างศักย์ดิสชาร์จตามสมการ

$$I = kV^n \quad \text{..... (2.5)}$$

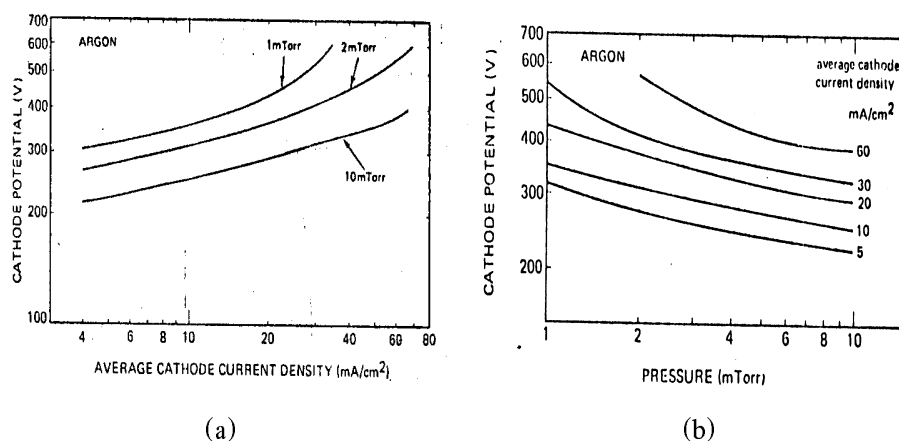
เมื่อ I คือกระแสของคาโทด

V คือความต่างศักย์ดิสชาร์จ

n คือดัชนีแสดงถึงความสามารถในการกักเก็บอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก

ทั้งนี้ n จะขึ้นกับความเข้มของสนามแม่เหล็กและการจัดรูปร่างของแนวสนามแม่เหล็ก โดยปกติ n มีค่าระหว่าง 5 ถึง 9 ในแมกนีตรอนสปัดเตอริงแบบทรงกระบอกแต่อาจแตกต่างกันไป บ้างเมื่อจัดแบบพลาเนียร์แมกนีตรอน k คือค่าคงที่ของความสัมพันธ์ ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงของกระแส ในช่วงกว้างจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ดิสชาร์จเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ดิสชาร์จ ที่ความดันต่างๆ แสดงได้ ดังรูปที่ 2.23(a) ทั้งนี้จะเห็นว่า ที่ความดัน 10 m torr จะพบว่า n เท่ากับ 4.6 และ k เท่ากับ 6×10^{-13} สำหรับคาโทดชนิดนี้ การเปลี่ยนค่าของความชันกราฟ เมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น เนื่องจากขณะที่ กระแสไฟฟ้าค่าสูงขึ้นปริมาณไอออนของแก๊สถูกจำกัดด้วยความดันในระบบทำให้ปริมาณการผลิต อิเล็กตรอนและพลังงานที่สูงขึ้นเพื่อใช้ในการสร้างอิเล็กตรอนทุติยภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการเบนโค้ง ของกระแสดังในรูป 2.23(a) การเบนโค้งนี้จะเริ่มที่กระแสสูงขึ้นถ้าความดันในระบบมีค่าสูงขึ้น ส่วน รูปที่ 2.23(b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ดิสชาร์จของคาโทดและความดันที่กระแสไฟฟ้าคงที่ที่ค่าต่างๆ การเพิ่มความดันทำให้ความหนาแน่นอะตอมแก๊สเฉื่อยเพิ่มขึ้น และยังผลให้ปริมาณ ไอออนที่ถูกผลิตมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วยอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดจากการชนของไอออนบน เป้าสารเคลือบจึงมีปริมาณสูงขึ้นทำให้ความนำไฟฟ้าของการดิสชาร์จสูงขึ้น และความต่างศักย์ดิส ชาร์จมีค่าลดลง ดังนั้นเมื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าให้มีค่าคงที่ ความต่างศักย์ดิสชาร์จจะมีค่าลดลงเมื่อ ความดันเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.23 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์คิซซาร์จของฟลานาร์

แมกนีตรอนคาโทดรูปสี่เหลี่ยม ที่ความดันค่าต่างๆ

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์คิซซาร์จ และความดันเมื่อกระแสคงที่^[36]

2.5.2 อัตราเคลือบและประสิทธิภาพการเคลือบ

อัตราการสปีดเตอร์ของเป่าสารเคลือบขึ้นกับปริมาณไอออนซึ่งแปรผันกับกระแส และพลังงานของไอออนซึ่งแปรผันกับความต่างศักย์คิซซาร์จ ซึ่งแปรผันโดยตรงกับกำลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบ ส่วนอัตราเคลือบ (R) นอกจากแปรผันโดยตรงกับอัตราการสปีดเตอร์แล้วยังขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ อีก เช่น พื้นที่ของการเกิดสปีดเตอร์ ระยะห่างระหว่างคาโทดและวัสดุรองรับ ค่ายึดเกาะ การนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำเป่าสารเคลือบความดันรวม และความดันย่อยของแก๊สไวปฏิกิริยาภายในบริเวณเป่าสารเคลือบ ค่าการนำความร้อนของเป่าสารเคลือบอาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่กำหนดขนาดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบการเคลื่อนที่ขึ้นงานระหว่างการเคลือบมีผลต่อการลดอัตราเคลือบลง ทั้งนี้ประสิทธิภาพของอัตราเคลือบ (R_E ; อัตราส่วนระหว่างอัตราเคลือบและค่ากำลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อหน่วยพื้นที่) สามารถหาได้จากสมการ

$$R_E = \frac{R}{P} \quad \dots\dots (2.6)$$

ประสิทธิภาพของการเคลือบนี้จะช่วยกำหนดสภาพดีที่สุดของกระบวนการเคลือบในระบบแมกนีตรอน ประสิทธิภาพการเคลือบทองแดงมีค่าระหว่าง 800-1200 A°-cm²/W-min และอลูมิเนียมมีค่าระหว่าง 200 -650 A°-cm²/W-min เป็นต้น ทั้งนี้ระบบแมกนีตรอนสปีดเตอร์จึงนับว่าเป็นวิธีการเคลือบที่มีประสิทธิภาพที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีสปีดเตอร์อื่นๆ สามารถให้ประสิทธิภาพสูงกว่า 60% ของค่าการคำนวณทางทฤษฎีและดีกว่า ดี ซี ฟลานาร์ สปีดเตอร์ถึง 3 เท่าตัว

2.5.3 ขีดจำกัดของอัตราเคลือบ

ปัจจัยสำคัญในการจำกัดอัตราเคลือบคือค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เป่าสารเคลือบทนได้ โดยไม่แตกหรือระเหยออก ซึ่งสัมพันธ์กับสภาพการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำเป่าสารเคลือบและ อัตราการระบายความร้อนของเป่าสารเคลือบ สัมประสิทธิ์การขยายตัวและความหนาเป่าสารเคลือบ ซึ่งเป็นตัวกำหนดความร้อนที่เป่าสารเคลือบรับได้ก่อนแตกเนื่องจากความร้อนก็เป็นปัจจัยสำคัญอีกด้วย โครงสร้างเป่าสารเคลือบที่มีความเค้นคงค้าง (residual stress) ทนต่อการสเปตเตอร์ต่ำกว่าเป่าสารเคลือบที่ผ่านกระบวนการอบอ่อน (annealing) การระบายความร้อนโดยตรงแก่เป่าสารเคลือบทำให้สามารถทนต่อการสเปตเตอร์ได้สูงกว่าการระบายความร้อนผ่านแผ่นปิดหลังของคาโทด เป็นต้น

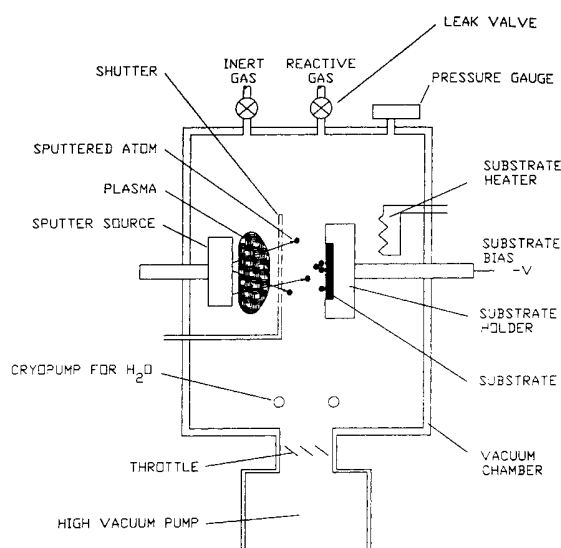
2.6 การเคลือบแบบ รีแอคทีฟ สเปตเตอร์ริง (reactive sputtering method)

2.6.1 แนวคิดเกี่ยวกับการเคลือบด้วยวิธี รีแอคทีฟ สเปตเตอร์ริง

การเคลือบด้วยวิธี รีแอคทีฟ สเปตเตอร์ริง คือ กระบวนการเคลือบด้วยวิธีสเปตเตอร์ริงที่มีการป้อนแก๊สไวปฏิกิริยา หรือ รีแอคทีฟแก๊ส เข้าสู่ระบบเพื่อให้แก๊สนั้นทำปฏิกิริยากับสารเคลือบ เกิดสารประกอบของฟิล์มที่ต้องการเคลือบลงบนวัสดุรองรับ วิธีนี้ใช้ระบบและหลักการพื้นฐานเดียวกับระบบสเปตเตอร์ริงปกติแต่มีการเพิ่มรีแอคทีฟแก๊ส ดังนั้นแก๊สที่ใช้ในระบบนี้มี 2 ชนิดคือ

1. สเปตเตอร์ริงแก๊ส (sputtering gas) เป็นแก๊สที่ทำให้เกิดกระบวนการสเปตเตอร์ริงปกติมักเป็นแก๊สเฉื่อย เช่น แก๊สอาร์กอน

2. รีแอคทีฟแก๊ส (reactive gas) เป็นแก๊สที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับอะตอมของสารเคลือบแล้วเกิดเป็นสารประกอบของฟิล์มบางที่ต้องการ เช่น แก๊สไนโตรเจน หรือแก๊สออกซิเจน



รูปที่ 2.24 ระบบการเคลือบฟิล์มบางโดยวิธี รีแอคทีฟ สเปตเตอร์ริง^[37]

การเคลือบฟิล์มของสารประกอบด้วยวิธี รีแอคทีฟ สปีดเตอริง นั้นสามารถทำได้ โดยใช้เป่าสารเคลือบที่เป็นโลหะบริสุทธิ์ (เหมือนในระบบสปีดเตอริง) และมีการป้อนรีแอคทีฟแก๊สที่ต้องการเข้าไปในระบบ เช่น การป้อนแก๊สไนโตรเจน (N_2) อาจทำให้เกิดโลหะไนไตรด์ หรือ การป้อนแก๊สอะเซทิลีน (C_2H_2) หรือ มีเทน (CH_4) อาจทำให้เกิดสารประกอบของโลหะคาร์ไบด์ เป็นต้น ปกติความดันของรีแอคทีฟแก๊สที่ใช้มีค่าค่อนข้างต่ำจนไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาในสภาวะปกติ อย่างไรก็ตามคาดกันว่าอิเล็กตรอนในพลาสมาที่มีส่วนในการกระตุ้นหรือไอออไนซ์รีแอคทีฟแก๊สให้มีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับโลหะได้สูงกว่าภาวะปกติมาก

สำหรับการเกิดฟิล์มของสารประกอบเนื่องจากการทำปฏิกิริยาของรีแอคทีฟแก๊สกับอะตอมของเป่าสารเคลือบนั้น อาจเกิดได้ใน 3 ลักษณะคือ

1. เกิดที่ผิวหน้าเป่าสารเคลือบ โดยรีแอคทีฟแก๊สทำปฏิกิริยากับอะตอมสารเคลือบที่ผิวหน้าเป่าสารเคลือบเป็นสารประกอบ จากนั้นจึงถูกสปีดเตอริงให้หลุดออกมาแล้วเคลือบลงบนแผ่นวัสดุรองรับ ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นสูงเมื่อความดันย่อยของรีแอคทีฟแก๊สในระบบมีค่าสูง เช่น การเคลือบไททานเนียมไนไตรด์พบว่าเมื่อป้อนแก๊สไนโตรเจน (ซึ่งเป็นรีแอคทีฟแก๊ส) ที่มีเพียงพอในการเกิดฟิล์มของไททานเนียมไนไตรด์ที่ผิวหน้าของเป่าสารเคลือบ ที่เรียกว่า ทาร์เกต พอยซันนิง (target poisoning) ซึ่งมีผลทำให้อัตราเคลือบลดลง (เนื่องจากยึดตัวของไททานเนียมไนไตรด์มีค่าต่ำกว่ายึดตัวของไททานเนียม)

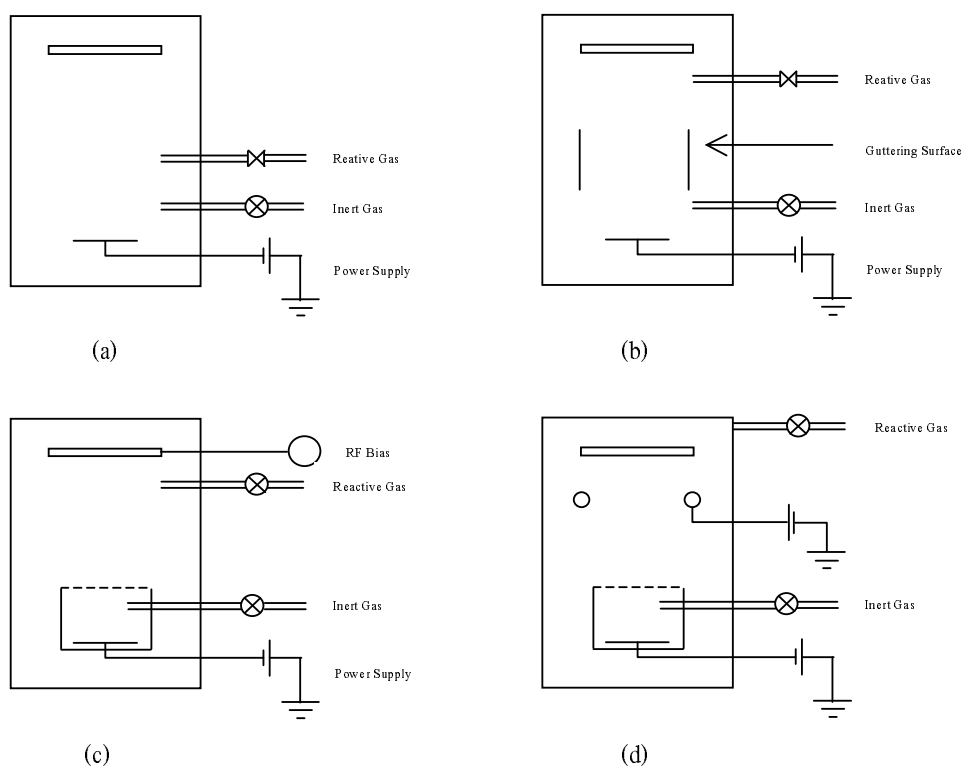
2. เกิดบริเวณที่ว่างระหว่างเป่าสารเคลือบกับวัสดุรองรับ วิธีนี้รีแอคทีฟแก๊สจะมีการทำปฏิกิริยากับอะตอมสารเคลือบที่ถูกสปีดเตอริงระหว่างทางที่วิ่งสู่แผ่นวัสดุรองรับแล้วจึงเคลือบบนวัสดุรองรับ กระบวนการนี้ในทางทฤษฎีถือว่าเกิดน้อยมากเนื่องจากสภาวะของการทำปฏิกิริยาไม่เหมาะสมตามกฎอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัม แต่ก็เป็นไปได้ที่จะเกิดขึ้นในช่วงนี้

3. เกิดที่ผิวหน้าวัสดุรองรับ วิธีนี้รีแอคทีฟแก๊สจะเข้าทำปฏิกิริยากับอะตอมของสารเคลือบบนผิวแผ่นวัสดุรองรับเป็นชั้นของฟิล์มบางของสารประกอบนั้นเคลือบบนวัสดุรองรับ

เกี่ยวกับการเคลือบด้วยวิธี รีแอคทีฟ สปีดเตอริง สุพัฒน์พงษ์และคณะ^[4] ได้ชี้ประเด็นสำคัญที่ต้องพิจารณา 2 ประเด็น คือ ความดันย่อยของรีแอคทีฟแก๊ส และ ความบริสุทธิ์ของแก๊สที่ใช้ เนื่องจากในการเคลือบด้วยวิธีนี้ ความดันย่อยของรีแอคทีฟแก๊สต้องมีค่าพอเหมาะกับการเกิดฟิล์มของสารประกอบที่ต้องการ เช่น การเคลือบสารประกอบ ferroferric oxide (Fe_3O_4) ความดันแก๊สออกซิเจนที่ใช้ในกระบวนการจะถูกจำกัดอยู่ในช่วงความดันแคบๆ ที่เหมาะสมค่าหนึ่งเท่านั้น ถ้าความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนมากเกินไปจะเกิดสารประกอบ ferric oxide (Fe_2O_3) แต่ถ้าน้อยเกินไปจะเกิดสารประกอบ Ferrous oxide (FeO) หรือ ฟิล์มของเหล็ก (Fe) แทน นอกจากนี้แก๊สที่ใช้ในกระบวนการจะต้องมีความบริสุทธิ์สูง เพราะถ้ามีแก๊สอื่นปนอยู่ด้วยจะทำให้ได้ฟิล์มไม่ตรงตามชนิดที่ต้องการ

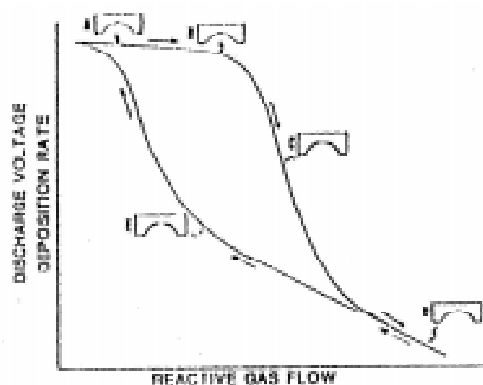
2.6.2 ปัญหาอาร์เกต พอยซันนิ่ง ของการเคลือบด้วยวิธี รีแอกทีฟ สปีดเตอริง

ปัญหาอย่างหนึ่งที่สำคัญของการเคลือบฟิล์มของสารประกอบ ด้วยวิธี รีแอกทีฟ สปีดเตอริง คือ การเกิดสารประกอบที่ผิวหน้าของเป้าสารเคลือบที่เรียกว่า อาร์เกต พอยซันนิ่ง ซึ่งทำให้อัตราการสปีดเตอริงเป้าสารเคลือบลดลง ซึ่งบางครั้งอาจทำให้กระบวนการสปีดเตอริงหยุดลง ทั้งนี้จากการศึกษาของสุพัฒน์พงษ์และคณะ^[4] พบว่าในการเคลือบแบบรีแอกทีฟ สปีดเตอริง นั้นโอกาสที่จะเกิดฟิล์มของสารประกอบที่ผิวหน้าของเป้าสารเคลือบนั้นเป็นไปได้สูงมาก โดยเฉพาะบริเวณที่มีอัตราการสปีดเตอริงต่ำ การป้องกันปัญหานี้ทำได้หลายวิธี เช่น โดยการจัดตำแหน่งและควบคุมการป้อนแก๊สให้รีแอกทีฟแก๊สเข้าทำปฏิกิริยาแล้วเกิดเป็นสารประกอบที่ผิวหน้าเป้าสารเคลือบก็เป็นวิธีหนึ่งที่ได้ผลจากการวิจัยของกลุ่มต่างๆ เช่น การป้อนรีแอกทีฟแก๊สเป็นช่วงๆ (รูปที่ 2.25(a)) หรือให้ความเข้มข้นของรีแอกทีฟแก๊สสูงบริเวณวัสดุรองรับและเจือจางที่หน้าเป้าสารเคลือบ (รูปที่ 2.25(b)) โดยแยกชุดป้อนแก๊สและใช้เครื่องสูบบแบบเกดเตอริง (gettering pump) ในการกำจัดรีแอกทีฟแก๊สบริเวณใกล้เป้าสารเคลือบ หรือ โดยใช้ตะแกรง (baffle) เพื่อช่วยลดความดันย่อยของรีแอกทีฟแก๊สบริเวณเป้าสารเคลือบและป้อนไปแอสตัชันยูนิทอาร์เอฟเพื่อเพิ่มความไวของปฏิกิริยาในการเคลือบ (รูปที่ 2.25(c)) หรือ ใช้ตะแกรงเพื่อลดปริมาณรีแอกทีฟแก๊สที่เป้าสารเคลือบและใช้ ดีซี โกลว์ดิสชาร์จ ช่วยเพิ่มปฏิกิริยาการเคลือบใกล้วัสดุรองรับ (รูปที่ 2.25(d))

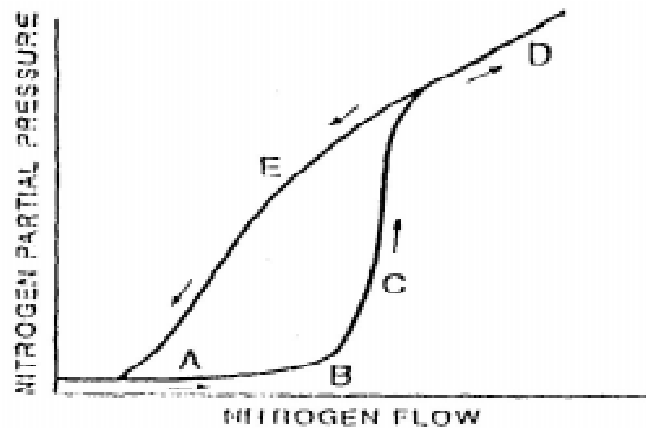


รูปที่ 2.25 เทคนิคการป้อนแก๊สไปปฏิกิริยาเพื่อลดปัญหา target poisoning
ในระบบการเคลือบด้วยวิธี รีแอกทีฟ สปีดเตอริง^[4]

นอกจากปัญหา ทาร์เกต พอยชันนิง แล้วในการเคลือบด้วยวิธี รีแอคทีฟ สปีเตอริง ยังพบปัญหาความดันย่อยของของรีแอคทีฟแก๊สซึ่งทำให้เกิดพฤติกรรมฮิสเทอรีซิส (hysteresis) ในการเคลือบด้วย ซึ่งสุพรรณพงษ์และคณะ [4] อธิบายปัญหานี้ว่า การเคลือบแบบ รีแอคทีฟ สปีเตอริง ที่ความดันแก๊สอาร์กอนคงที่ พบว่าเมื่ออัตราไหลของรีแอคทีฟแก๊สเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงดันไฟฟ้าคิซาร์จและอัตราเคลือบลดลง จากการเกิดสารประกอบบนผิวหน้าเป้าสารเคลือบและเมื่อลดอัตราไหลของแก๊สลง แรงดันไฟฟ้าคิซาร์จและอัตราเคลือบจะเพิ่มขึ้นแต่ความสัมพันธ์ของรูปกราฟจะเปลี่ยนไปไม่ซ้ำแนวเดิมจากผลของฮิสเทอรีซิส (รูปที่ 2.26) กราฟที่ได้เป็นรูปร่างที่เกิดขึ้นทั่วไปกับการเคลือบแบบรีแอคทีฟ สปีเตอริง ค่าที่แท้จริงของอัตราไหลของรีแอคทีฟแก๊ส ขึ้นกับค่าความดันย่อยของแก๊สในโตรเจนในระบบและกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ จาก A ถึง B เป็นช่วงที่เริ่มเกิดปฏิกิริยาระหว่างรีแอคทีฟแก๊สและเป้าสารเคลือบเป็นสารประกอบชั้นบางๆ บนผิวเป้าสารเคลือบ แต่เนื่องจาก รีแอคทีฟแก๊สมีปริมาณน้อย และอัตราการสปีเตอริงยังมีค่าสูงทำให้เกิดฟิล์มของสารประกอบก่อตัวอย่างช้าๆ เมื่อพ้นจุด B ผ่าน C มาถึง D ปริมาณแก๊สรีแอคทีฟ มีค่าสูงพอในการทำปฏิกิริยาจนเกิดฟิล์มสารประกอบหนาขึ้นพร้อมกับที่อัตราเคลือบที่ลดลง เนื่องจากฟิล์มสารประกอบสปีเตอริงได้ยากกว่าโลหะบริสุทธิ์ ดังนั้นความหนาของสารประกอบบนผิวเป้าสารเคลือบจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วแม้จะเพิ่มอัตราไหลขึ้นอีกไม่มากนักที่จุด D การเกิดสารประกอบจะเป็นไปด้วยอัตราสูงและให้สารประกอบที่ทำปฏิกิริยาโดยสมบูรณ์ ต่อมาเมื่อลดอัตราไหลของรีแอคทีฟแก๊สเริ่มแรกจะทำให้อัตราการสปีเตอริงสูงกว่าอัตราการเกิดสารประกอบบนผิวเป้าสารเคลือบ และเมื่อค่าอัตราไหลไว้ระยะหนึ่งจะทำให้อัตราการเกิดสารประกอบปรับตัวให้มีค่าเท่ากัน ขณะนี้ฟิล์มของสารประกอบบนผิวเป้าสารเคลือบยังคงมีค่าสูงทำให้อัตราการสปีเตอริงมีค่าต่ำกว่าในช่วงเพิ่มอัตราไหลของแก๊ส แม้ว่าอัตราไหลของแก๊สจะมีค่าเท่ากันก็ตาม แต่ประวัติของผิวเป้าสารเคลือบไม่เหมือนกัน ดังนั้นความสัมพันธ์จะเปลี่ยนตามแนว D ไปยัง E และกลับสู่ A ในอีกเส้นทางหนึ่ง



รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าคิซาร์จ และอัตราเคลือบที่ค่ากำลังไฟฟ้าและความดันแก๊สผสมคงที่ เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของรีแอคทีฟแก๊ส



รูปที่ 2.27 ฮิสเตอร์ซิสของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราไหลของแก๊สไนโตรเจน และ
ค่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนในระบบ จากการทำรีแอคทีฟ สปีดเตอริง
ของสารประกอบไนไตรด์ เมื่อค่าของกำลังไฟฟ้าและความดันรวมคงที่

จากการศึกษาของ Sproul ซึ่งได้ทดลองเคลือบฟิล์มของ TiN, ZrN และ HfN ด้วยวิธีรีแอคทีฟ สปีดเตอริง พบว่าเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราไหลของแก๊สไนโตรเจนและความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนที่เหลือในระบบ สภาพฮิสเตอร์ซิสจะปรากฏขึ้น (รูปที่ 2.27) ที่จุด A ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนมีค่าต่ำมากเรียกว่า ความดันพื้น (background pressure) เนื่องจากความดันแก๊สไนโตรเจนมีค่าต่ำกว่าจุดที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเป็นสารประกอบบนผิวเป้าสารเคลือบและบนวัสดุรองรับ เมื่ออัตราไหลของแก๊สไนโตรเจนสูงขึ้นจากจุด A สู่จุด B จะมีการใช้แก๊สไนโตรเจนบางส่วนในการทำปฏิกิริยาแล้วเกิดสารประกอบบนวัสดุรองรับ แต่ปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบบนผิวเป้าสารเคลือบยังไม่เร็วพอที่จะชนะอัตราการสปีดเตอริงของอะตอมบนเป้าสารเคลือบได้ ทำให้อัตราการสปีดเตอริงในรูปที่ 2.26 ยังคงมีค่าสูงอยู่เช่นเดิม เมื่ออัตราไหลของแก๊สไนโตรเจนสูงกว่าจุด B แก๊สไนโตรเจนที่ป้อนเข้าสู่ระบบเริ่มมีมากเกินไปกับปฏิกิริยาในขณะนั้น ทำให้มีแก๊สไนโตรเจนส่วนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาเหลือเพิ่มมากขึ้น และความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนในระบบมีค่าสูงขึ้นในช่วง BC และ D ณ จุด D นี้เมื่อเพิ่มอัตราไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อไป จะพบว่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้นแบบเส้นตรงเพราะเป็นแก๊สส่วนเกินจากความต้องการในปฏิกิริยาที่เหลือทั้งหมด เมื่อลดอัตราไหลของแก๊สไนโตรเจนลงต่ำกว่าจุด D การทำปฏิกิริยาที่ผิวของเป้าสารเคลือบซึ่งเป็น สารประกอบย่อมเป็นไปได้ยาก เพราะมีฟิล์มของสารประกอบกั้นอยู่รวมทั้งอัตราการสปีดเตอริงในช่วงนี้มีค่าต่ำ ความต้องการแก๊สไนโตรเจนในการทำปฏิกิริยาที่เป้าสารเคลือบและที่วัสดุรองรับย่อมลดน้อยลง จึงเหลือแก๊สไนโตรเจนอยู่มากภายในระบบ การเปลี่ยนแปลงนี้จะมาทับรอยเดิมอีกครั้งหนึ่งเมื่ออัตราไหลของแก๊สไนโตรเจนลดลงมาถึงจุด A ซึ่งในขณะนั้นสารประกอบไนไตรด์บนผิวเป้าสารเคลือบถูกทำลายหมดจากการสปีดเตอริง อัตราการสปีดเตอริงจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งหนึ่ง

2.6.3 การแก้ปัญหาของการเคลือบด้วยวิธี รีแอคทีฟ สปีดเตอริง^{[31][32][38][39][40][41]}

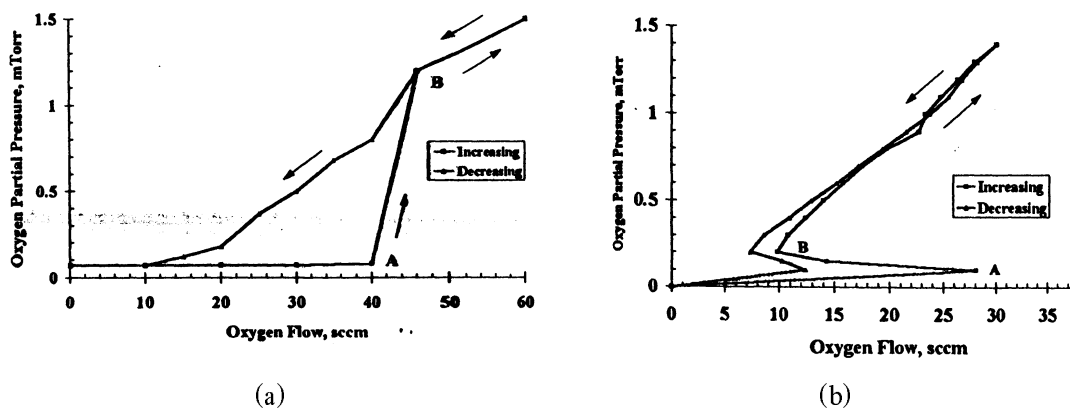
ปัญหาสำคัญของการเคลือบด้วยวิธี รีแอคทีฟ สปีดเตอริง คือ ทาร์เกต พอยชันนิง ซึ่งทำให้อัตราเคลือบลดลงและเป็นไปได้โดยไม่ต่อเนื่อง ปัญหานี้ได้รับความสนใจจากคณะผู้วิจัยของห้องปฏิบัติการวิจัยและหน่วยงานต่างๆ โดยมีการพัฒนาเทคนิคที่สำคัญหลายเทคนิคแต่ที่ได้รับความนิยมเป็นพิเศษมี 3 เทคนิค คือ (1) การใช้ระบบเคลือบแบบ อันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง (unbalanced magnetron sputtering) เพื่อเพิ่มความหนาแน่นของกระแสที่วัสดุรองรับซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการเคลือบของระบบและคุณภาพฟิล์มที่ได้ (2) การควบคุมความดันย่อย (partial pressure control) ซึ่งเป็นการควบคุมความดันย่อยของรีแอคทีฟแก๊สที่ทำปฏิกิริยากับอะตอมของสารเคลือบก่อนพอกพูนเป็นชั้นของฟิล์มบาง (3) การใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์ (pulsed direct current power) เป็นการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเป็นพัลส์แก่คาโทด ทั้งนี้ในส่วนของ อันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง ได้กล่าวไปแล้ว ดังนั้นในที่นี้จะได้กล่าวถึงเฉพาะ การควบคุมความดันย่อย และการใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์เท่านั้น

1. การควบคุมความดันย่อย โดยพื้นฐานแล้วการเคลือบฟิล์มบางโดยวิธี รีแอคทีฟ สปีดเตอริงจะต้องป้อนรีแอคทีฟแก๊สเข้าสู่ระบบเพื่อทำปฏิกิริยากับอะตอมของสารเคลือบที่หลุดจากกระบวนการสปีดเตอริงแล้วเกิดเป็นฟิล์มบางของสารประกอบเคลือบลงบนวัสดุรองรับ โดยทั่วไปปริมาณรีแอคทีฟแก๊สที่ป้อนเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศจะถูกควบคุมด้วยชุดควบคุมการไหลของแก๊ส (mass flow control) อย่างไรก็ตามการควบคุมปริมาณแก๊สวิธีนี้ทำให้เกิดปัญหาในการเคลือบบางประการ

พิจารณา รูปที่ 2.28(a) ซึ่งเป็นฮิสเตอร์ิซิสของการเคลือบสารประกอบไททาเนียม โดยใช้แก๊สอาร์กอนและแก๊สออกซิเจนในการเคลือบ ให้กำลังไฟฟ้าที่เป่าสารเคลือบคงที่เท่ากับ 8 kW และความดันรวมเท่ากับ 1.1 Pa จากนั้นเริ่มต้นการเคลือบโดยเพิ่มอัตราไหลของรีแอคทีฟแก๊ส พบว่าในช่วงแรกความดันย่อยของรีแอคทีฟแก๊สจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากรีแอคทีฟแก๊สที่ป้อนเข้าสู่ระบบถูกใช้ในการทำปฏิกิริยากับอะตอมของสารเคลือบเป็นฟิล์มบางของสารประกอบที่ต้องการเคลือบบนวัสดุรองรับตลอดเวลา อย่างไรก็ตามขณะที่กระบวนการเคลือบดำเนินไปนั้น นอกจากจะเกิดฟิล์มบางเคลือบบนวัสดุรองรับที่ต้องการแล้ว ขณะเคลือบยังมีฟิล์มไปเกิดที่ผิวหน้าเป่าสารเคลือบด้วย ซึ่งกระบวนการนี้จะนำไปจนกระทั่งปริมาณของรีแอคทีฟแก๊สในระบบมีมาก จนเกิดฟิล์มบางของสารประกอบคลุมที่ผิวหน้าของเป่าสารเคลือบทำให้อัตราการสปีดเตอริงลดลง เมื่ออัตราการสปีดเตอริงลดลงจะทำให้การใช้รีแอคทีฟแก๊สในกระบวนการลดลงด้วย ทำให้ความดันย่อยของรีแอคทีฟแก๊สเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (ความดันย่อยจะเปลี่ยนจากจุด A ไปเป็นจุด B ในรูปที่ 2.28(a)) การควบคุมปริมาณรีแอคทีฟแก๊สด้วยชุดควบคุมการไหลพบว่าการทำให้เกิดการสปีดเตอริงระหว่างจุด A กับ จุด B ก็ยังคงเป็นเรื่องยาก

ถ้าหากหน้าเป่าสารเคลือบเกิดพอยชันนิงโดยสมบูรณ์แล้วปริมาณรีแอคทีฟแก๊สใน ภาชนะสุญญากาศจะเพิ่มถึงจุด B (รูปที่ 2.28(a)) ถ้ายังมีการเพิ่มอัตราการไหลของรีแอคทีฟแก๊สต่อไป พบว่าความดันย่อยของรีแอคทีฟแก๊สจะเพิ่มอย่างเป็นเส้นตรง แต่เมื่อลดอัตราไหลของรีแอคทีฟแก๊ส ลงพบว่าความดันย่อยของรีแอคทีฟแก๊สจะไม่ลดลงตามแนวเส้นกราฟเดิมที่เพิ่มขึ้นในตอนแรกทำให้ เกิดเป็นฮิสเทอรีซิสขึ้น

สำหรับการควบคุมปริมาณรีแอคทีฟแก๊สในระบบสปีดเทอริงเพื่อทำให้ได้ฟิล์มบาง ของสารประกอบที่ต้องการและเพื่อแก้ปัญหาผลของฮิสเทอรีซิส (hysteresis effect) นั้นสามารถทำได้ หลายวิธี เช่น การควบคุมการไหลของแก๊สแบบควบคุมย้อนกลับ (feedback control) และ การควบคุม ความดันย่อย (partial pressure control) หรืออาจทำได้โดยการเพิ่มความเร็วในการสูบอากาศออกจาก ภาชนะสุญญากาศ แต่มีข้อเสียคือค่าใช้จ่ายสูง อย่างไรก็ตามการแก้ปัญหานี้สามารถทำได้โดยใช้เทคนิค การควบคุมความดันย่อยโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัด เช่น แมสสเปกโตรมิเตอร์ (mass spectrometer) หรือ เครื่องวิเคราะห์แก๊สตกค้าง (residual gas analyzer ; RGA) ซึ่งสามารถให้สัญญาณป้อนกลับสำหรับ ความดันย่อยของรีแอคทีฟแก๊สได้อย่างรวดเร็ว ทำให้สามารถควบคุมความดันย่อยของรีแอคทีฟแก๊ส ได้ทุกค่าตามต้องการ ในรูปที่ 2.28(b) จะพบว่าที่จุด B เป่าสารเคลือบจะเกิดพอยชันนิงอย่างสมบูรณ์ ทำให้การสปีดเทอริงช้าลง และเมื่อความดันย่อยของรีแอคทีฟแก๊สลดลงจนถึงจุด A พบว่าอัตราเคลือบ กลับเพิ่มขึ้น การควบคุมความดันย่อยของรีแอคทีฟแก๊สของระบบมีข้อดีคือทำให้สามารถสปีดเทอริง เป่าสารเคลือบที่เป็นสารประกอบได้ในอัตราเดียวกับเป่าสารเคลือบที่เป็นสารบริสุทธิ์ และทำให้ได้ ฟิล์มบางของสารประกอบที่มีอัตราส่วนของสารประกอบเท่ากันทุกครั้ง



รูปที่ 2.28 กราฟฮิสเทอรีซิสของการเคลือบสารประกอบของไททาเนียม^[38]

- (a) ขณะไม่มีการควบคุมความดันย่อยของรีแอคทีฟแก๊ส
- (b) ขณะที่มีการควบคุมความดันย่อยของรีแอคทีฟแก๊ส

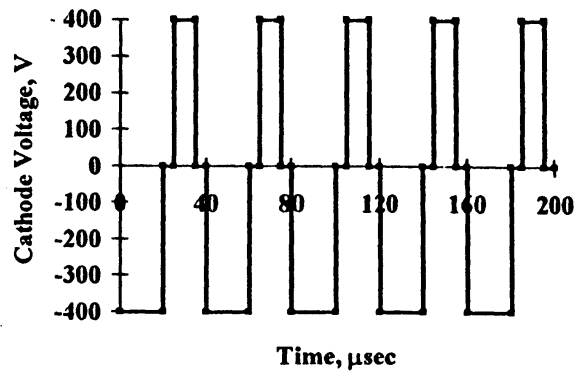
2. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์ จนถึงปัจจุบันการเคลือบฟิล์มบางของออกไซด์โดยวิธีรีแอคทีฟ สปีดเตอริง นั้นยังเป็นเรื่องที่ทำได้ยากมากเนื่องจากแก๊สออกซิเจน (ซึ่งใช้เป็นรีแอคทีฟแก๊ส) สามารถทำปฏิกิริยากับเป่าสารเคลือบแล้วเกิดพอยชันนิงที่ผิวหน้าของเป่าสารเคลือบได้ง่ายกว่าแก๊สไนโตรเจนมาก การเกิดพอยชันนิงที่ผิวหน้าของเป่าสารเคลือบได้ง่ายมากทำให้การเคลือบเป็นไปอย่างไม่ต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการอาร์คขึ้นที่ผิวหน้าเป่าสารเคลือบซึ่งอาจทำให้ฟิล์มบางที่ได้ไม่บริสุทธิ์ตามที่ต้องการ

หากพิจารณารายละเอียดของพอยชันนิงหรือฟิล์มบางที่เกิดขึ้นนี้จะพบว่า ฟิล์มบางที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของเป่าสารเคลือบนี้จะทำให้คาโทดมีลักษณะคล้ายกับเป็นดัวเก็บประจุ กล่าวคือพลาสมาและคาโทดจะทำตัวเป็นขั้วไฟฟ้าหรือตัวนำ โดยมีฟิล์มบางทำตัวเป็นสารไดอิเล็กตริก (ซึ่งเป็นฉนวนทางไฟฟ้า) ทำให้เมื่อผิวนอกของฟิล์มบางที่ผิวหน้าสารเคลือบมีประจุมากขึ้นก็จะเกิดการอาร์คขึ้น นอกจากนี้พอยชันนิงที่เกิดขึ้นยังเป็นฟิล์มบางของสารประกอบซึ่งจะสปีดเตอริงได้ยากกว่าสารบริสุทธิ์ด้วย จากเหตุผลข้างต้นทำให้อัตราการสปีดเตอริงลดลงประกอบกับการอาร์คของฟิล์มบางหน้าผิวเป่าสารเคลือบจะทำให้การสปีดเตอริงเกิดเป็นช่วงๆ ซึ่งเป็นปัญหาของระบบนี้นั่นเอง

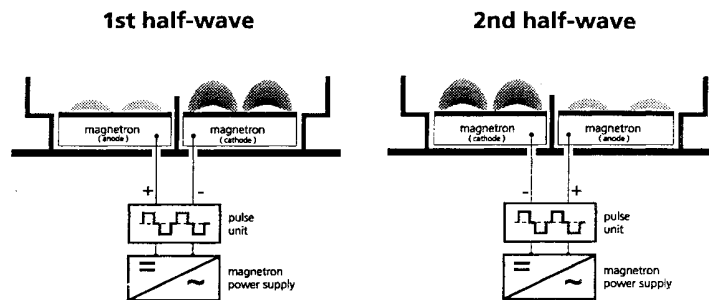
ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบอาร์ เอฟ (rf) สำหรับการทำรีแอคทีฟ สปีดเตอริงของออกไซด์ อย่างไรก็ดีแม้จะแก้ปัญหากับการอาร์คที่เป่าสารเคลือบได้แต่ก็ยังคงมีปัญหของวิธีการนี้เอง เช่น กำลังจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าจะถูกใช้ในการ สปีดเตอริงเพียงครึ่งหนึ่งเท่านั้น นอกจากนี้อัตราการเคลือบโดยวิธี อาร์ เอฟ รีแอคทีฟ สปีดเตอริง ยังต่ำกว่าอัตราการเคลือบสารบริสุทธิ์

ปัจจุบันแนวคิดในการแก้ปัญหากับพอยชันนิงนี้ พบว่ามีการพิจารณาที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบเคลือบ และมีการนำแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์ (pulsed direct current power) มาใช้ แนวคิดเกี่ยวกับแหล่งจ่ายไฟฟ้านี้ คือ การทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบมีการสลับขั้วบ้างในบางขณะ แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบนี้สามารถแบ่งเป็น 2 แบบ ตามความสูงของความต่างศักย์ด้านบวกและด้านลบ คือ

2.1 แบบสมมาตร (symmetric) หากพิจารณาแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้าลักษณะนี้จะพบว่ามีค่าสูงของพัลส์เท่ากันทั้งด้านบวกและด้านลบ แต่ความกว้างของพัลส์ทั้งสองด้านจะเป็นอิสระจากกัน (รูปที่ 2.29) ปกติแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์สมมาตรนั้นจะใช้สำหรับระบบ รีแอคทีฟ สปีดเตอริง ที่มีเป่าสารเคลือบ 2 อัน (คาโทด 2 อัน) วางข้างกัน โดยเป่าสารเคลือบทั้งคู่จะต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์ เมื่อระบบทำงานเป่าสารเคลือบทั้งคู่จะมีการสลับขั้วกันตลอดการทำงาน กล่าวคือ เป่าสารเคลือบทั้งคู่จะผลัดกันทำตัวเป็นคาโทด (ขณะที่อันหนึ่งเป็นคาโทด อีกอันหนึ่งจะเป็นแอโนด)



รูปที่ 2.29 ลักษณะแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์สมมาตร^[38]

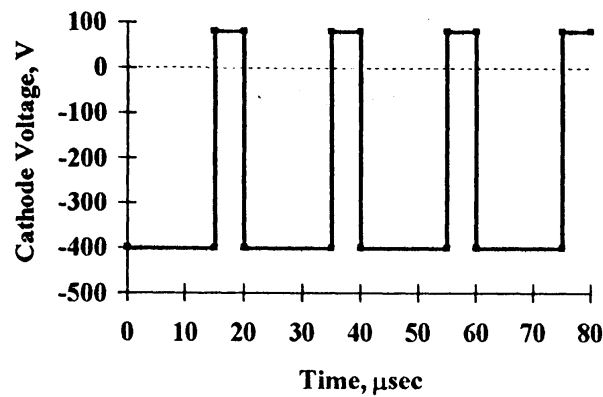


รูปที่ 2.30 ลักษณะการทำงานของระบบเคลือบแบบ 2 คาโทด
เมื่อต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์สมมาตร^[39]

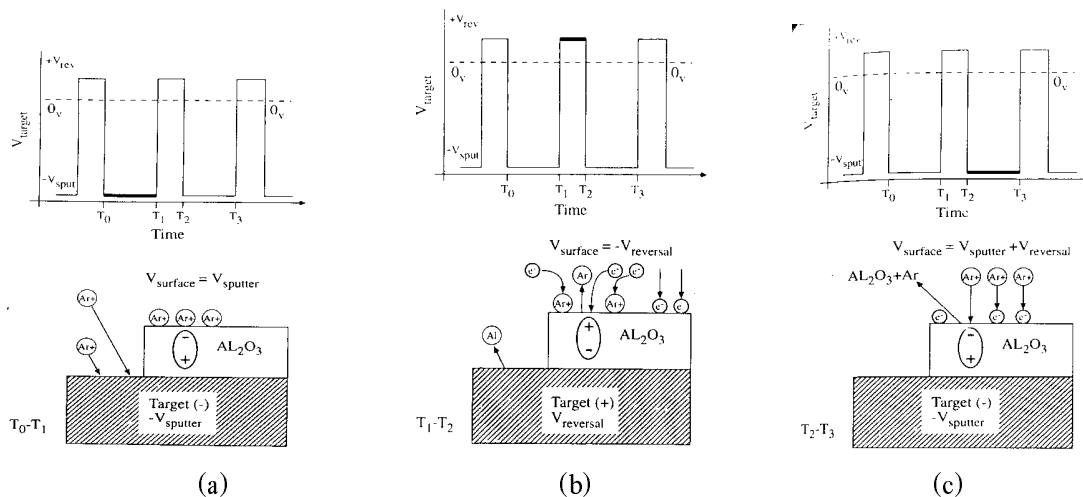
พิจารณาในรูปที่ 2.30 จะเห็นว่าขณะครึ่งรอบแรกเป่าสารเคลือบด้านขวาทำตัวเป็นคาโทด (มีศักย์เป็นลบ) ซึ่งจะทำให้มีการสปัตเตอร์แล้วได้อะตอมสารเคลือบตามปกติ ขณะเดียวกันเป่าสารเคลือบด้านซ้ายทำตัวเป็นแอโนด (มีศักย์เป็นบวก) ทำให้ไม่มีการสปัตเตอร์ที่เป่าสารเคลือบนี้แต่จะมีอิเล็กตรอนวิ่งมาชนผิวเป่าสารเคลือบซึ่งเท่ากับเป็นการทำความสะอาดผิวเป่าสารเคลือบนั่นเอง ซึ่งจะเป็นการช่วยลดการเกิดพอยชั้นนึ่งที่ผิวหน้าของเป่าสารเคลือบ

2.2 แบบอสมมาตร (asymmetric) แรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้าลักษณะนี้จะพบว่าความสูงของพัลส์ทางด้านบวกและด้านลบจะไม่เท่ากัน ปกติแล้วพัลส์ด้านลบจะสูงกว่าพัลส์ด้านบวก ปกติแล้วพัลส์ด้านลบจะกว้างกว่าพัลส์ด้านบวกซึ่งเป็นสัดส่วนกัน (รูปที่ 2.31) ปกติแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์อสมมาตรนั้นจะใช้สำหรับระบบ รีแอกทีฟ สปัตเตอร์ริง ที่มีเป่าสารเคลือบเดียว แต่การทำงานของระบบเคลือบจะมีลักษณะที่เป็นการทำงานแบบช่วงๆ (จะทำงานเฉพาะขณะที่ระบบได้รับพัลส์ลบ)

พิจารณาในรูปที่ 2.32 ซึ่งแสดงแนวคิดเกี่ยวกับการใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าลักษณะนี้ จะเห็นว่าที่ผิวหน้าของเป้าสารเคลือบมีการเกิดพอยชั้นนิงแล้ว (เป็นฟิล์มบางของ Al_2O_3) พบว่าขณะที่ อยู่ในภาวะปกติกล่าวคือระบบได้รับแรงดันไฟฟ้าด้านลบ (รูปที่ 2.32 (a)) จะเกิดการสปัตเตอร์ปกติ กล่าวคืออาร์กอนบวกยังคงวิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบในขณะที่อาร์กอนบวกที่มีพลังงานต่ำจะวิ่งเข้าจับ ที่ผิวหน้าของพอยชั้นนิง ซึ่งจะทำให้พอยชั้นนิงแสดงสภาพขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้น ต่อมาเมื่อมีการสลับขั้ว เป็นบวก (รูปที่ 2.32 (b)) ทำให้ผิวหน้าเป้าสารเคลือบมีศักย์เป็นบวกทำให้ไม่มีอาร์กอนบวกวิ่งชนแต่ จะมีอิเล็กตรอนวิ่งเข้ามาจับกับอาร์กอนที่อยู่บริเวณผิวหน้าของพอยชั้นนิงแล้วหลุดออกไป นอกจากนี้ ยังมีอิเล็กตรอนบางส่วนวิ่งชนเป้าสารเคลือบซึ่งเท่ากับเป็นการทำความสะอาดผิวเป้าสารเคลือบนั้นเอง และต่อมาเมื่อมีการสลับขั้วอีกครั้ง (รูปที่ 2.32 (c)) ซึ่งนอกจากจะเกิดการ สปัตเตอร์ปกติแล้วยัง อาจมีการสปัตเตอร์เอาพอยชั้นนิง (poisoning) ที่ผิวเป้าสารเคลือบออกด้วย เนื่องจากขณะนี้ศักย์ไฟฟ้า ระหว่างผิวเป้าสารเคลือบกับพลาสมาจะสูงกว่าปกติเล็กน้อย (ตามรูปที่ 2.32 (c) มีค่าประมาณ 500 V)



รูปที่ 2.31 ลักษณะแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์อสมมาตร^[38]



รูปที่ 2.32 ลักษณะการทำงานของระบบเมื่อค่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์อสมมาตร^[39]

2.7 สมบัติ โครงสร้าง และการใช้งานของไททาเนียมไนไตรด์^{[4][44]}

ไททาเนียมไนไตรด์เป็นสารประกอบเซรามิกส์ ซึ่งมีสมบัติเด่นที่น่าสนใจหลายประการ เช่น มีความเสถียรสูง ทนต่อการกัดกร่อนได้ดีกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมและซูเปอร์อัลลอย แต่จะเกิดการกัดกร่อนได้ด้วยสารละลายกรดแก่ $\text{HF}+\text{HNO}_3$ หรือสารละลายด่างแก่ KOH ที่อุณหภูมิสูง แต่ค่อนข้างเฉื่อยต่อปฏิกิริยาในสภาวะอื่น นอกจากนี้เมื่ออยู่ในสภาพฟิล์มบางจะมีความแข็งสูงถึง 2800 kg/m^2 ถ้าเคลือบบนแม่พิมพ์โลหะและลูกรีดโลหะจะทำให้มีอายุการใช้งานสูงขึ้น ที่สำคัญไททาเนียมไนไตรด์ยังสามารถทนต่ออุณหภูมิสูงและมีสมบัติพิเศษความเสียดทานต่ำจึงเหมาะสำหรับใช้เคลือบบนอุปกรณ์ตัดเฉาะ เช่น ดอกสว่าน มีดกลึง ซึ่งช่วยลดอัตราการสึกได้ดี นอกจากนี้ยังมีการนำไททาเนียมไนไตรด์ไปใช้เคลือบเป็นขั้วต่อตัวนำกับสารกึ่งตัวนำก่อนถึงชั้นอะลูมิเนียมเพราะนำไฟฟ้าได้และเป็นแนวกันมิให้อะลูมิเนียมแพร่ผสมกับสารกึ่งตัวนำเมื่ออุณหภูมิใช้งานสูงซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้สารกึ่งตัวนำเสื่อมสภาพ และที่สำคัญไททาเนียมไนไตรด์มีสีทองที่สวยงามคือจึงเหมาะอย่างยิ่งที่จะนำมาเคลือบเครื่องประดับ เช่น แหวน คัมพู เข็มกลัด กำไล ตัวเรือนนาฬิกา กรอบแว่นตา ฯลฯ ซึ่งจะทำให้เครื่องประดับเหล่านี้มีความสวยงามที่คงทน

2.7.1 สีและโครงสร้างสารประกอบของไททาเนียมไนไตรด์

Clarke (1977)^[42] ได้เคลือบฟิล์มไททาเนียมไนไตรด์ด้วยวิธี รีแอคทีฟ สปีดเตอริง ที่แรงดันไฟฟ้าคิซซาร์จ 1000 V และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า 100 W/cm^2 โดยเปลี่ยนอัตราส่วนผสมแก๊สไนโตรเจนและแก๊สอาร์กอนที่ค่าต่างๆ พบว่าการเคลือบให้สีต่างกันตามอัตราส่วนผสม จากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วย x-ray diffraction และ scanning electron microscope สรุปได้ว่าที่ความดันย่อยแก๊สไนโตรเจนมีค่าต่ำ สีของฟิล์มจะออกสีเงินของไททาเนียม เมื่อความดันย่อยแก๊สไนโตรเจนสูงขึ้นจะปรากฏสีเหลืองอ่อน และสารประกอบที่วิเคราะห์คือ TiN เมื่อเพิ่มความดันย่อยไนโตรเจนให้สูงขึ้นอีกสีจะเปลี่ยนเป็นสีทองและเข้มขึ้นจนเป็นสีแดงเข้ม สารประกอบคือ TiN_x เมื่อ $x>1$ แต่ไม่ได้ระบุว่า x มีค่าเท่าใดเมื่อเกิดสีทองและเปลี่ยนเป็นสีแดงเข้ม (deep rose color)

Wittmer (1985)^[43] อธิบายความสัมพันธ์ของปริมาณไนโตรเจนกับโครงสร้างผลึกของไททาเนียมไนไตรด์ ดังนี้ไททาเนียมบริสุทธิ์มีโครงสร้างแบบ hexagonal เมื่อความดันย่อยแก๊สไนโตรเจนสูงขึ้นอะตอมของไนโตรเจนจะแทรกตัวในโครงสร้างผลึกของไททาเนียมทำให้โครงสร้างผลึกเปลี่ยนจาก hexagonal ไปเป็น tetragonal เมื่ออัตราส่วนของ $\text{Ti:N} = 2:1$ เนื่องจากการแทรกตัวของไนโตรเจนมีเพียงครึ่งหนึ่งของช่องว่างทำให้โครงสร้างผลึกเปลี่ยนรูปเล็กน้อย ฟิล์มมีสีเหลืองอ่อน เมื่อปริมาณไนโตรเจนเพิ่มมากขึ้นจะเกิดสารประกอบ 2 ชนิดคือ Ti_2N และ TiN ซึ่งมีโครงสร้างแบบ tetragonal และ face-centered cubic ตามลำดับ โดยฟิล์มจะมีสีทองมากขึ้น ฟิล์มจะมีสีทองปลั่งเมื่อมีสารประกอบ TiN เพียงเฟสเดียว นั่นคือไนโตรเจนแทรกตัวเต็มช่องว่างทั้งหมดเป็น

stoichiometry และถ้าเพิ่มปริมาณไนโตรเจนมากกว่านี้สีของฟิล์มจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล น้ำตาล
บรอนซ์ ทองแดง จนกระทั่งเป็นสีแดงเมื่อมีไนโตรเจนมากเกินไป

Duh และ Doong (1993)^[44] พบว่า อัตราส่วนของแก๊สอาร์กอนต่อแก๊สไนโตรเจนมี
อิทธิพลอย่างเด่นชัดต่อเฟสและโครงสร้างของ TiN โดยที่อัตราการเคลือบจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ
ไนโตรเจนลดลง ผลของ XRD แสดงให้เห็นว่า TiN เกิดเมื่ออัตราส่วนของแก๊สอาร์กอนต่อไนโตรเจน
อยู่ในช่วง 90/10 ถึง 70/30 และที่อัตราส่วน 95/5 และ 60/40 ไม่พบเฟส TiN

Logothetidis, Alexandrou และ Kokkou (1996)^[45] ได้ศึกษาถึงผลของศักย์ไบแอส
และอัตราไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อการเกิดฟิล์มไททานเนียมไนไตรด์ พบว่าศักย์ไบแอสมีผลต่อการ
หลุดของไนโตรเจนจากผิวของฟิล์ม และที่ศักย์ไบแอสมากกว่า 120 V อะตอมของไททานเนียมจะถูกส
ปัดเตอร์ออกจากฟิล์ม ทั้งนี้จากผลของ XRD แสดงให้เห็นว่าที่อัตราไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ
2.2 sccm ฟิล์มจะมีโครงสร้างเป็น $TiN_x(111)$ และพบ $TiN_x(200)$ ที่ $2\theta=36.2^\circ$ และ 42.5° ตามลำดับ
เมื่ออัตราไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 1.7 sccm พบโครงสร้างเป็น $Ti_2N(101)$ และพบ $Ti_2N(111)$
ที่ $2\theta=34.8^\circ$ และ 39.5° ตามลำดับ การเปลี่ยนเฟสเป็น fcc เฟส TiN_x จะเกิดขึ้นเมื่ออัตราไหลของแก๊ส
ไนโตรเจนมีค่าเท่ากับ 1.9 sccm

Valvoda (1996)^[46] ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างกับสถานะการเคลือบ
ของฟิล์มไททานเนียมไนไตรด์ด้วยวิธี รีแอกทีฟ แมกนีตรอน สปีดเตอร์ริง พบว่าปริมาณของไนโตรเจน
ที่เพิ่มขึ้นทำให้ฟิล์มมีการเปลี่ยนโครงสร้างจาก hexagonal α -Ti มาเป็น cubic δ -phase ของไททานเนียม
ไนไตรด์และในบางกรณีอาจพบโครงสร้าง tetragonal ϵ - Ti_2N เกิดขึ้นด้วยซึ่งความแข็งของฟิล์มจะมี
ค่าสูงสุดเมื่อฟิล์มเคลือบมีเฉพาะโครงสร้าง cubic δ -phase ของไททานเนียมไนไตรด์เท่านั้น

Combadiere และ Machet (1996)^[47] ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิของวัสดุรองรับ
รับต่อโครงสร้างองค์ประกอบทางเคมีและลักษณะพื้นผิว (morphology) ของฟิล์มโดยการเคลือบแบบ
แมกนีตรอน สปีดเตอร์ริง พบว่าที่ความดันย่อยแก๊สไนโตรเจนคงที่ โครงสร้างของฟิล์มจะแปรตาม
อุณหภูมิ การเพิ่มความดันย่อยแก๊สไนโตรเจนฟิล์มมีแนวโน้มที่จะโตขึ้นในระนาบที่มีอะตอมหนา
แน่นที่สุดซึ่งเป็นระนาบที่ขนานกับผิวของแผ่นรองรับ เช่น (311), (111) และ (200) ที่อุณหภูมิสูงกว่า
300 °C ฟิล์มมีโครงสร้าง stoichiometric TiN ในทางตรงกันข้าม เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 300 °C อัตรา
ส่วน N/Ti จะมากกว่า ไนโตรเจนเกิดหลุดออก (desorption) จากฟิล์ม

Valkonen และ Ribbing (1986)^[48] ทดลองเคลือบฟิล์มบางของไททานเนียมไนไตรด์
ด้วยวิธี ดีซี และอาร์ เอฟ แมกนีตรอน สปีดเตอร์ริง ที่ความหนาต่างๆ ในช่วงระหว่าง 30 ถึง 310 Å
ฟิล์มในช่วงความหนาที่ปรากฏสีน้ำเงินเทา ทั้งกรณีมองจากรังสีสะท้อนและรังสีส่งผ่าน เมื่อพิจารณา
สมบัติทางแสง โดยวัดค่าการสะท้อนแสงและค่าการส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ในช่วง
กว้าง พบว่าฟิล์มของไททานเนียมไนไตรด์ มีสมบัติยอมให้แสงช่วงที่ตามองเห็นส่งผ่าน และสะท้อน
รังสีอินฟราเรดคล้ายกับฟิล์มของทองแต่มีคุณภาพด้อยกว่า เนื่องจากมีปริมาณดูดกลืนรังสีสูงกว่าทอง

2.7.2 ความต้านทานและโครงสร้างของไททาเนียมไนไตรด์

Wittmer (1985)^[49] ศึกษาสมบัติความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มไททาเนียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยวิธีต่างกัน 2 วิธี คือ การเคลือบด้วยวิธี ARE กับ วิธีสปัตเตอร์ พบว่า ค่าความต้านทานจำเพาะจากฟิล์มที่ได้จากการเคลือบด้วยวิธี ARE จะเริ่มจาก $70 \mu\Omega\text{-cm}$ เมื่อเป็นไททาเนียมบริสุทธิ์ และเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ $250 \mu\Omega\text{-cm}$ เมื่อความดันแก๊สไนโตรเจนมีค่า 2×10^{-4} torr ใกล้จุดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจาก hexagonal $\alpha\text{-Ti}$ สู่ face-centered cubic TiN หรือในช่วงเกิดสารประกอบ Ti_2N นั่นเอง การเพิ่มความดันแก๊สไนโตรเจนสูงขึ้น ทำให้ความต้านทานจำเพาะลดลงจนถึงค่าต่ำสุด $200 \mu\Omega\text{-cm}$ ที่จุดที่เกิดสารประกอบ TiN การเพิ่มความดันแก๊สไนโตรเจนต่อไป ความต้านทานจำเพาะจะมีค่าสูงขึ้น ส่วนการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอร์ค่าสูงสุดของความต้านทานจำเพาะที่สารประกอบเป็น Ti_2N และค่าต่ำสุดที่สารประกอบเป็น TiN ที่อัตราส่วนผสมแก๊สไนโตรเจนมีค่า 22 % จะเห็นได้ว่า นอกจากสีของจะช่วยบ่งบอกองค์ประกอบของสารประกอบไททาเนียมไนไตรด์แล้ว ยังอาจใช้ค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้เป็นตัวบ่งบอกองค์ประกอบของสารเคลือบได้อีกด้วย

ทั้งนี้จากสมบัติการเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีของไททาเนียมไนไตรด์ การมีอุณหภูมิหลอมตัวสูง (2950°C) มีความเสถียรสูง และเป็นกำแพงกันการแพร่ของอะตอมโลหะชนิดต่างๆ ได้ดี จึงนิยมใช้ไททาเนียมไนไตรด์เป็นตัวนำของรอยต่อในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วย เช่น การเคลือบชั้นของไททาเนียมไนไตรด์ชั้นระหว่างสารกึ่งตัวนำและขั้วต่อออลูมิเนียมจะช่วยป้องกันการแพร่ของอะตอมออลูมิเนียมผ่านเข้าสู่สารกึ่งตัวนำได้ดี ทำให้อายุการใช้งานของสารกึ่งตัวนำสูงขึ้นวิธีการเช่นนี้มีความจำเป็นมากในสารกึ่งตัวนำที่มีความหมายของแต่ละชั้นน้อยมาก เช่น รอยต่อของ Metal-oxide-Semiconductor (MOS) เป็นต้น

2.7.3 ความแข็งและทนต่อการสึกหรอของไททาเนียมไนไตรด์

Hintermann (1984)^[50] เคลือบไททาเนียมไนไตรด์ ด้วยวิธีไอออนเพลทติง บนดอกสว่านซึ่งทำจากเหล็กความเร็วสูง (high speed steel) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 mm และทดลองเจาะชิ้นงานที่มีความแข็ง 100 N/mm^2 ด้วยอัตราการเจาะและความเร็วการเจาะต่างๆ กัน เปรียบเทียบกับดอกสว่านที่ไม่ได้เคลือบ และดอกสว่านที่ถูกขัดมันผิวหลังการเคลือบ พบว่าภายหลังการเคลือบไททาเนียมไนไตรด์ ผิวแข็งขึ้น ความสามารถทนอุณหภูมิสูงขึ้น และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ลดลงของไททาเนียมไนไตรด์ช่วยให้ดอกสว่านสามารถทำงานด้วยอัตราการเจาะที่สูงขึ้นและได้ระยะทางการเจาะมากขึ้น

Wittmer (1985)^[51] ได้วัดค่าความแข็งของไททาเนียมไนไตรด์เมื่อเคลือบด้วยวิธี ARE ที่ค่าความดันแก๊สไนโตรเจนค่าต่างๆ พบว่าฟิล์มที่ได้มีความแข็งมีค่าสูงสุดเมื่อความดันแก๊สไนโตรเจนมีค่า 2×10^{-4} torr ขณะที่ฟิล์มเคลือบมีสารประกอบผสมระหว่าง Ti_2N และ TiN ซึ่งอยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกับค่าสูงสุดของความต้านทานจำเพาะมาก

Lee และ Bayer (1985)^[52] ได้เปรียบเทียบความทนทานต่อการสึกหรอของฟิล์มเคลือบไททานเนียมไนไตรด์จากการเคลือบ 4 วิธีคือ

1. วิธี อาร์ เอฟ ไดโอด รีแอคทีฟ สปีดเตอริง ที่ความดันแก๊สผสม Kr และ N₂ เท่ากับ 30 m torr แรงดันไฟฟ้าคิซาร์จ 2000 V อุณหภูมิชิ้นงาน 500 °C อัตราการเคลือบ 80 °A/min
2. วิธี ดีซี แมกนีตรอน รีแอคทีฟ สปีดเตอริง ที่ความดันแก๊สผสมของ Ar และ N₂ เท่ากับ 2.3 m torr ด้วยอัตราส่วนผสมแก๊ส Ar : N₂ เท่ากับ 4.5 ความเข้มสนามแม่เหล็ก 1200 G และอุณหภูมิชิ้นงาน 190 °C ด้วยอัตราการเคลือบ 350 °A/min
3. วิธี ARE โดยระเหยสารด้วยการอาร์คไฟฟ้า และอุณหภูมิชิ้นงาน 190 °C
4. วิธี รีแอคทีฟ ไอออน เพลทิง ที่ความดันแก๊สไนโตรเจน 2 m torr อุณหภูมิชิ้นงาน 250 °C ด้วยอัตราการเคลือบ 1900 °A/min

จากศึกษาพบว่า วิธีรีแอคทีฟ ไอออนเพลทิง ให้ผลการทดลองดีที่สุดในด้านความคงทนต่อการสึกหรอโดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความคงทนต่อการสึกหรอสัมพันธ์เท่ากับ 93 ในขณะที่การเคลือบด้วยวิธีอื่นให้ความคงทนต่ำกว่ามาก อย่างไรก็ตามวิธี ดีซี แมกนีตรอน รีแอคทีฟ สปีดเตอริง ยังคงแสดงค่าความคงทนต่อการสึกหรอสูงกว่าวิธี อาร์ เอฟ รีแอคทีฟ สปีดเตอริง ถึง 1.5 เท่า การทดลองนี้มิได้ระบุความหนาของฟิล์มเคลือบและชนิดของสารประกอบที่เกิดขึ้นในฟิล์มเคลือบ

2.7.4 สมบัติอื่นๆ ของไททานเนียมไนไตรด์และการประยุกต์ใช้งาน^[53]

ไททานเนียมไนไตรด์มีความทนทานต่อการกัดกร่อน (corrosion) สูงมาก โดยจะถูกกัดกร่อนด้วยสารละลายกรดผสม HF + HNO₃ หรือสารละลาย KOH ที่อุณหภูมิสูง และเกิดเป็นสารประกอบแอมโมเนียแต่ค่อนข้างเฉื่อยต่อปฏิกิริยาในสภาวะอื่น ไททานเนียมไนไตรด์นี้ทนการกัดกร่อนผลในการทำลายฟิล์มเคลือบแต่อย่างใด

ไททานเนียมไนไตรด์มีสัมประสิทธิ์ของความเสียดทานต่ำกว่าเหล็กประมาณ 3 เท่า (และไททานเนียมคาร์ไบด์มีค่าต่ำกว่าไททานเนียมไนไตรด์) ร่วมกับการมีเนื้อผิวแข็ง เมื่อใช้เคลือบลงบนแบรริงทำให้สามารถรับภาระโหลดได้เพิ่มขึ้น ทำงานได้ที่ความเร็วรอบสูงขึ้นโดยมีอัตราการสึกหรอต่ำมากสิ้นเปลืองน้ำมันหล่อลื่นน้อย การเคลือบลงบนอุปกรณ์ที่ใช้ในการกลึงไส ดัด เจาะ ช่วยให้ผิวที่ได้รับการกลึง ไส ดัด เจาะ มีความเรียบสูงกว่าอุปกรณ์ที่ไม่มีการเคลือบไททานเนียมไนไตรด์ เนื่องจากค่าและที่ความเสียดทานต่ำและทนอุณหภูมิสูงจึงลดแรงตัดลงทำให้สามารถทำงานที่ค่าอัตราการตัดเจาะสูงขึ้นและที่ความเร็วรอบสูงขึ้นได้ เครื่องระบบ CNC (computed numerical control) ในปัจจุบันเป็นเครื่องที่ทำงานได้ด้วยความเร็วสูง และมีความแน่นอนสูงในการตั้งระยะทำงานการใช้อุปกรณ์ที่เคลือบผิวแข็งด้วยไททานเนียมไนไตรด์สามารถทำงานตัดเจาะด้วยความเร็วรอบการหมุนสูงกว่า 10,000 รอบ/นาที และมีการสึกหรอต่ำ ทำให้ไม่ต้องตั้งเครื่องใหม่บ่อยๆ เนื่องจากการสึกหรอหรือความเสียหายที่เกิดกับอุปกรณ์

การเคลือบไททาเนียมไนไตรด์ ลงบนเกลียวชิ้นงาน สามารถรักษาความละเอียด และความเรียบของผิวเกลียวไว้ได้นาน การเคลือบลงบนเล็บมีดกลึงทั้งสแตนคาร์ไบด์และชิ้นขัดผิวรูป ทำจากเหล็กความเร็วสูงจะช่วยเพิ่มอายุการใช้งานวัสดุได้ 3-6 เท่าตัว การเคลือบดอกสว่านจะยืดอายุ การใช้งานได้ถึง 3-8 เท่า การเคลือบลงบนเหล็ก punches เพิ่มอายุการใช้งานได้ 10 เท่าตัว การเคลือบ บนชิ้น die จะเพิ่มอายุการใช้งานได้ 3-8 เท่าตัว การเคลือบดอกสว่านคว้านรู ช่วยเพิ่มอายุการใช้งาน ได้ 3-20 เท่า โดยช่วงของการยืดอายุใช้งานมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ถูกกลึง ไส่ ตัด เจาะ

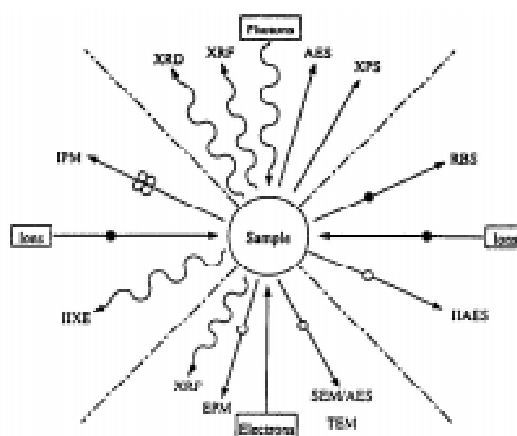
การเคลือบไททาเนียมไนไตรด์ลงบนโมลด์ทำให้ผิวโมลด์แข็งแกร่งการกัดกร่อนเนื้อ โมลด์ เช่น โมลด์ชนิด PVC ที่ใช้ในปัจุบัน ผิวเคลือบ hard chrome จะถูกกัดกร่อนจากสารเคมีใน PVC ระหว่างใช้งานค่อนข้างเร็ว การเคลือบผิวไททาเนียมไนไตรด์จะช่วยทำให้อัตราการกัดกร่อนลดลง มาก นอกจากนี้โมลด์แบบชนิด ที่เคลือบด้วยไททาเนียมไนไตรด์ และลดสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ผิวเคลือบลง 3 เท่าตัว เมื่อเทียบกับผิวเหล็ก สามารถลดแรงอัดได้ถึง 30% และช่วยให้การไหลตัวของ วัสดุในแบบชนิดดีขึ้น

ในการเคลือบเพื่อความสวยงามและการเคลือบเพื่อทนทานต่อการสึกหรอ สภาพ การเคลือบย่อมมีความแตกต่างกันออกไปบ้าง เช่น จุดหลอมตัวของสารประกอบไททาเนียมไนไตรด์ที่ ใช้กับการเคลือบเพื่อความสวยงามอาจไม่จำเป็นต้องสูงมากนัก แต่ความทนทานต่อการกัดกร่อน ใน การเคลือบเพื่อความสวยงามควรดีมาก ๆ การเคลือบจำเป็นมากต่อความสวยงามในขณะที่การ เคลือบเพื่อทนการสึกหรอ สีเคลือบไม่จำเป็นต้องสดใส คุณภาพความแข็งผิวชิ้นงานมีความสำคัญมาก กว่าขนาดเกรน (grain) ในการเคลือบเพื่อทนการสึกหรอควรใหญ่ในระดับสูงกว่า $1\text{ }\mu\text{m}$ และไม่จำเป็น ต้องขัดผิวให้มัน แต่การเคลือบเพื่อความสวยงามจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีเกรนละเอียดมากทำให้ สามารถขัดมันวาวได้ง่าย ความหนาของการเคลือบทนการสึกหรอมีค่าความหนาในช่วง $5\text{--}20\text{ }\mu\text{m}$ ขณะที่การเคลือบเพื่อความสวยงามต้องการความหนาเพียง $2\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$ หรือต่ำกว่า ดังนั้นสภาวะการ เคลือบเมื่อใช้งานต่างกันจึงเป็นปัจจัยสำคัญส่วนหนึ่งในการออกแบบระบบเคลือบเพื่อผลิตสินค้าทาง อุตสาหกรรมด้านนี้

2.8 การหาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง^[4]

“การหาลักษณะเฉพาะ” หรือ “characterization” หมายถึงการอธิบายขององค์ประกอบของวัสดุ (constitution) ในเชิงคุณภาพ โดยเน้นลักษณะเด่นที่เกี่ยวกับส่วนผสมทางเคมี (composition) โครงสร้าง (structure) และข้อบกพร่อง (defect)

ทั้งนี้องค์ประกอบทั่วไปสำหรับการวิเคราะห์ คือ ต้องมีอนุภาคจากแหล่งกำเนิดพุ่งเข้าทำอันตรกิริยา (interaction) กับชิ้นงาน ซึ่งจะทำให้เกิดสัญญาณที่มีพลังงานแตกต่างกันออกมา แล้วจึงนำสัญญาณเหล่านี้ไปวิเคราะห์ต่อไป (รูปที่ 2.33) ถ้าอนุภาคจากแหล่งกำเนิดเช่น อิเล็กตรอนหรือรังสีเอกซ์ตกกระทบชิ้นงาน อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นจะแตกต่างกันไปและให้สัญญาณเฉพาะออกมา ตัวอย่างเช่น ถ้าแหล่งกำเนิดให้รังสีเอกซ์กระทบกับอิเล็กตรอนในแกน (core level) ของอะตอมในชิ้นงาน และมีการถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมเรียกอิเล็กตรอนชุดนี้ว่า โฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron) แต่ถ้าแหล่งกำเนิดเป็นอิเล็กตรอนและเกิดอันตรกิริยาทำนองเดียวกันนี้ อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเรียกไอออไนซ์อิเล็กตรอน (ionizing electron) เป็นต้น ถ้าอิเล็กตรอนของระดับพลังงานวงในหลุดออกมาและเกิดที่ว่างขึ้น อิเล็กตรอนจากระดับพลังงานวงถัดไปกระโดดเข้าไปแทนที่ โดยเกิดการปลดปล่อยพลังงานออกมา และพลังงานนี้อยู่มีค่าในช่วงของรังสีเอกซ์เราก็จะได้สัญญาณรังสีเอกซ์ออกมา ถ้ารังสีเอกซ์นี้สามารถทำให้อิเล็กตรอนในระดับพลังงานที่ต่ำกว่าหลุดออกมาจากอะตอม อิเล็กตรอนชุดนี้เรียกว่าไอเจอิเล็กตรอน (Auger electron) เป็นต้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าแหล่งกำเนิดคืออะไรและเกิดอันตรกิริยาลักษณะใด สัญญาณต่างๆ ที่จะได้จะมีลักษณะเฉพาะสำหรับการวิเคราะห์คุณลักษณะของวัสดุ ในการศึกษาลักษณะทางโครงสร้างของวัสดุไม่สามารถกระทำได้ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์เพียงเทคนิคเดียว จึงจำเป็นต้องรู้ถึงความสามารถของแต่ละเทคนิคก่อนจะนำมาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อให้ตรงกับความต้องการ (ตารางที่ 2.5)



รูปที่ 2.33 อันตรกิริยาของอนุภาคกับวัสดุ^[54]

ตารางที่ 2.5 เทคนิคสำหรับการวิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้างของฟิล์มบาง^[55]

สมบัติของฟิล์มบาง	เทคนิคที่ใช้วิเคราะห์
ส่วนผสมของเฟส (phase composition)	X-ray หรือ electron diffraction
การกระจายของเฟส (phase distribution)	metallographic sections, SEM, TEM, optical microscopy
ขนาดเกรน (grain size)	X-ray diffraction, SEM, TEM (plus image analyser)
รูปร่างของเกรน (grain shape)	SEM, TEM (plus image analyser)
การเรียงตัว (preferred orientation)	X-ray diffraction, TEM
ลักษณะทางพื้นผิว (surface morphology)	SEM
ความพรุน (porosity)	TEM, mercury intrusion porosimetry, metallographic sections

2.8.1 เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction)

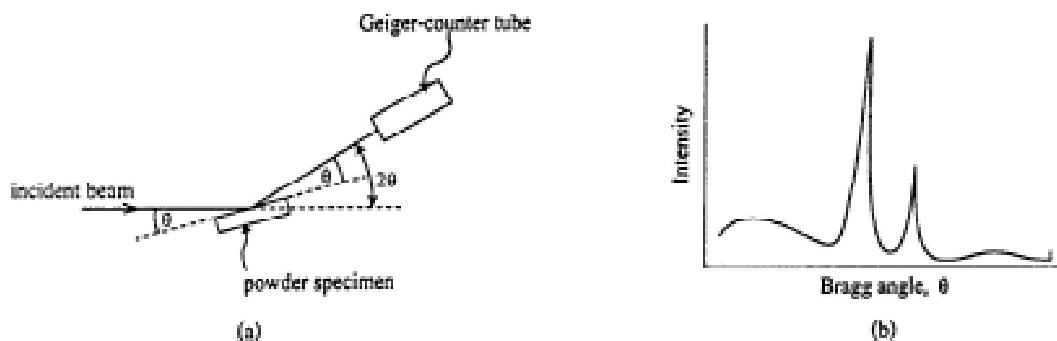
เทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (diffraction analysis) ใช้เพื่อการแยกแยะโครงสร้างของผลึก การวิเคราะห์อาศัยการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของตัวอย่างกับของมาตรฐาน เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จะอาศัยลำรังสีเอกซ์ (x-ray beam) ที่มีค่าความยาวคลื่น λ จากแหล่งกำเนิดพุ่งชนกับผลึก เกิดการเลี้ยวเบนขึ้น ความเข้มของลำรังสีที่เลี้ยวเบนออกมาจะถูกเก็บบันทึกในรูปของฟังก์ชันของมุมการเลี้ยวเบน (diffracted angle ; θ) โดยความเข้มของสัญญาณ (intensity) จะมีค่าไม่เป็นศูนย์ถ้ามุมของการเลี้ยวเบนเป็นไปตามกฎของแบรกก์ (Bragg's law)

$$\lambda = 2 d_{hkl} \sin\theta \quad \dots\dots (2.7)$$

เมื่อ d_{hkl} คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของแลตทิซที่มีดัชนีมิลเลอร์ (Miller indices) ของระนาบ hkl

โดยทั่วไปธาตุหรือสารประกอบนั้นจะประกอบด้วยอะตอมที่จัดเรียงตัวในแลตทิซ (lattice) โดยมีรูปทรงและระยะห่างเหมือนกัน และมีหน่วยเซลล์ (unit cell) เป็นหน่วยที่เล็กที่สุดที่บอกถึงโครงสร้างผลึกของธาตุหรือสารประกอบนั้นๆ การเรียงตัวอย่างสมมาตรในสามมิตินี้ทำให้ผลึกสามารถประพฤติตัวเสมือนเป็นเกรตติงของการเลี้ยวเบน (diffraction grating) เมื่อลำรังสีเอกซ์ที่มีความถี่ค่าหนึ่งชนกับอะตอม อันตรกิริยาที่กระทำกับอิเล็กตรอนในอะตอมทำให้อิเล็กตรอนสั่นด้วยความถี่เท่ากับของรังสีเอกซ์ และปล่อยรังสีเอกซ์ออกมาในทุกทิศทางโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ ถ้าการเลี้ยวเบนเกิดกับอะตอมในผลึกที่เรียงห่างกันเป็นระยะเท่าๆ กัน รังสีที่ปลดปล่อยออกมาจะเกิดการแทรกสอดกันซึ่งมีทั้งการแทรกสอดแบบเสริมและแบบหักล้าง สัญญาณจะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมได้เมื่อมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน การสะท้อนของรังสีเอกซ์จะเกิดจากอะตอมในระนาบต่างๆ ที่ขนานกันและห่างเท่าๆ กัน

เอกซ์เรย์ ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ที่หักเหจากผลึก โดยจะมีอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ประกอบอยู่ด้วย เช่น หลอดนับไกเกอร์ (Geiger counter tube) หรือ ไอออไนเซชัน แชมเบอร์ (ionization chamber) พิจารณาจากรูปที่ 2.34a จะเห็นว่าทั้งชิ้นงานและ หลอดนับไกเกอร์ จะเคลื่อนที่โดยหลอดนับไกเกอร์จะเคลื่อนที่เร็วกว่า 2 เท่าเสมอ ทำให้อุปกรณ์ตรวจจับรังสีนี้อยู่ในมุมที่เหมาะสมสำหรับการหักเหรังสีตามกฎของแบรกก์ โดยปกติแล้วเอกซ์เรย์ ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ ใช้กับชิ้นงานที่เป็นผงที่อัดแน่น สัญญาณที่ตรวจจับได้จะแสดงออกมาในรูปของ รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสี (diffraction pattern) ดังแสดงในรูปที่ 2.34b โดยความเข้มของสัญญาณขึ้นอยู่กับหลายตัวแปรด้วยกันเช่น โครงสร้างของวัสดุ ปริมาตรของวัสดุที่แผ่รังสี (volume of irradiated material) รูปทรงของการหักเห (diffraction geometry) และการวางชิ้นงาน (sample alignment) เป็นต้น



รูปที่ 2.34 (a) เอกซ์เรย์ ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer)

(b) Intensity peak ที่แสดงถึงระนาบผลึกของวัสดุในตำแหน่งที่มีการหักเหรังสี

ตำแหน่งของพีค (peak) ที่มีค่ามากที่สุดสามารถบอกถึงขนาดและรูปร่างของหน่วยเซลล์ได้ ในขณะที่ความกว้างใช้หาค่าขนาด การจัดเรียงตัว (orientation) และความเครียด (strain) ภายในเกรนของวัสดุหลายผลึก บางครั้งตำแหน่งของรูปแบบการเลี้ยวเบนที่วัดได้อาจจะเลื่อนไปด้วยค่ามุมที่สูงขึ้นเนื่องจากผลของความเค้นตกค้าง (residual stress) ในผิวเคลือบนั่นเอง ส่วนความเข้มของสัญญาณที่ได้ อาจไม่เป็นไปตามค่าใน บัตรค่ามาตรฐาน (standard card) ก็เป็นเพราะการจัดเรียงตัวในทิศทางที่ชอบ (preferred orientation) ของอะตอมในฟิล์ม

การประมาณการจัดเรียงตัวของอะตอมทั้งหมด เราจำเป็นต้องเทียบความเข้มของสัญญาณที่วัดได้กับมาตรฐาน โดยมี T^* คือ texture coefficient มีค่าเป็น

$$T^*_{h'k'l'} = (I_{h'k'l'} / I^0_{h'k'l'}) / [1/n \sum (I_{hkl} / I^0_{hkl})] \quad \dots\dots (2.8)$$

เมื่อ $h'k'l'$ คือ ดัชนีมิลเลอร์ (Miller indices) ของระนาบที่สนใจ

I คือ ความเข้มของสัญญาณที่วัดได้ (measured intensity)

I^0 คือ ความเข้มของสัญญาณ (intensity) มาตรฐาน

ถ้า T^* มีค่าเป็นหนึ่ง จะหมายถึง random texture และถ้าค่าของ T^* มากกว่านั้น จะบอกถึงระดับที่เพิ่มขึ้นของการจัดเรียงตัวในทิศทางที่ชอบ (preferred orientation) เช่น $\{111\}$ ทั้งนี้การจัดเรียงตัวในทิศทางที่ชอบของไททานเนียมไนไตรด์จะพบได้ง่ายกว่าเพราะ $T^*\{111\} = 4$

นอกจากนี้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ยังสามารถให้ข้อมูลที่บอกถึงส่วนผสมทางเคมีของเฟส (phase composition) และค่าพารามิเตอร์ของแลตทิซ (lattice parameter measurement) ที่มีความสำคัญต่อการหาค่าความเค้นหลงเหลือหรือต่อการประมาณค่าของ stoichiometry หรือส่วนผสมทางเคมีของสารละลายของแข็งได้เช่นกัน

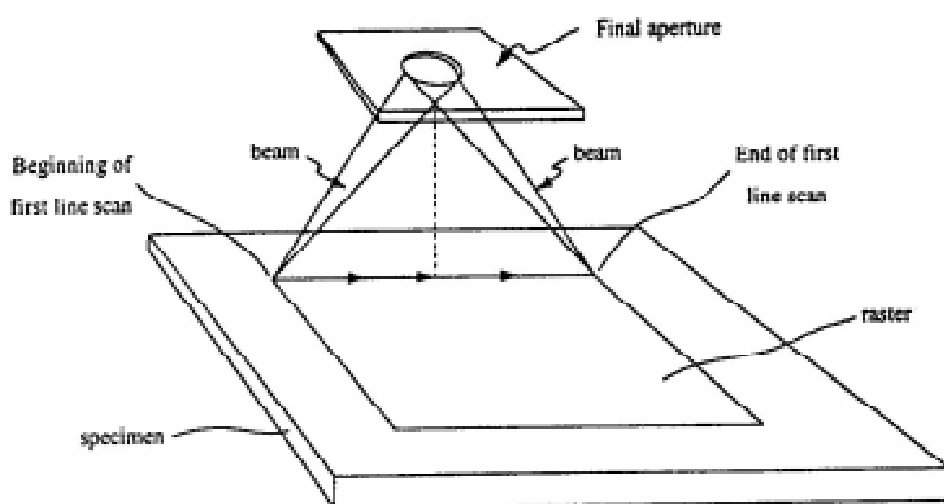
2.8.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด หรือที่เรียกว่า SEM นั้น เป็นเครื่องมือสำหรับศึกษาชิ้นงานที่ต้องการกำลังขยาย (magnification) และความชัดลึก (depth of field) สูง ชิ้นงานตัวอย่างที่จะนำมาศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนี้ส่วนใหญ่ต้องได้รับการขัดละเอียดและกัดกรดเช่นเดียวกับการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดใช้แสง กำลังขยายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะอยู่ในช่วง 1,500 ถึงมากกว่า 50,000 เท่า ส่วนความชัดลึกจะมากกว่ากล้องชนิดใช้แสงถึง 300 เท่า

โดยทั่วไปการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดอาศัยหลักการเร่งอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดด้วยศักย์ไฟฟ้าค่าสูง (ประมาณ 5-30 kV) ลำอิเล็กตรอนจะถูกโฟกัสด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดของโพรบ (probe diameter) เล็กลงเมื่อตกกระทบชิ้นงาน ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะปรากฏที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ พื้นผิวของชิ้นงานจะถูกกราดด้วยลำอิเล็กตรอนขนาดเล็กๆ เป็นพื้นที่ที่เรียกว่า ราสเตอร์ (raster) อันตรกิริยาระหว่างลำอิเล็กตรอนกับพื้นผิวชิ้นงานทำให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานออกมาหลายรูป

แบบ เช่น สัญญาณจากไอเจ็ล็กตรอน (Auger electron) สัญญาณรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่อง (continuous x-ray) และสัญญาณรังสีเอกซ์เฉพาะ (characteristic x-ray) เป็นต้น สัญญาณที่ได้เหล่านี้จะให้ข้อมูลของชิ้นงาน ณ จุดที่ไอเจ็ล็กตรอนตกกระทบ ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดมาตรฐานจะใช้สัญญาณของไอเจ็ล็กตรอนทุติยภูมิเป็นหลักในการสร้างภาพ ทั้งนี้เพราะเป็นสัญญาณที่มาจากพื้นที่ที่สัมผัสกับลำไอเจ็ล็กตรอนโดยตรง ดังนั้นความสามารถในการแยกรายละเอียด (resolution) ของภาพจึงสูงมากหรือให้รายละเอียดของภาพดีกว่า อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ (detector) จะอยู่ด้านขวาของลำไอเจ็ล็กตรอน โดยมีตะแกรงไบแอส +200 V ติดอยู่ด้านหน้า เนื่องจากสัญญาณไอเจ็ล็กตรอนทุติยภูมิมีพลังงานเพียงประมาณ 30-50 eV เท่านั้น ทำให้ไอเจ็ล็กตรอนพลังงานต่ำเหล่านี้ถูกดึงให้วิ่งไปยังอุปกรณ์ตรวจจับได้ด้วยศักย์ไบแอส 200 V

บริเวณผิวของชิ้นงานที่ใช้ในการสร้างภาพ คือ บริเวณราสเตอร์ โดยลำไอเจ็ล็กตรอนจะวิ่งกราดเป็นเส้นตรง เรียกว่า เส้นกราด (line scan) เท่ากับความกว้างของราสเตอร์ (รูปที่ 2.35) ขณะที่ลำไอเจ็ล็กตรอนเคลื่อนที่นั้น สัญญาณไอเจ็ล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกปล่อยออกมาจากพื้นผิวและถูกจับด้วย อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ โดยความเข้มของสัญญาณที่ไม่เท่ากันจะเป็นสิ่งที่ควบคุมความสว่าง (brightness) ของภาพที่จอมอนิเตอร์ เมื่อไอเจ็ล็กตรอนกราดไปจนถึงจุดสิ้นสุดของเส้น มันจะวิ่งกลับไปยังขอบเริ่มต้นอย่างรวดเร็วและเลื่อนตำแหน่งต่ำลงจากเส้นที่เพิ่งกราดไป และกราดไปเช่นนี้จนเต็มพื้นที่ที่ราสเตอร์เราจะได้ภาพของพื้นที่ที่ถูกลำไอเจ็ล็กตรอนกราดนั้น โดยปกติกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีเส้นกราดประมาณ 1000 เส้น เพื่อสร้างภาพขนาด $10 \times 10 \text{ cm}^2$ การส่องกราดที่สมบูรณ์จะเกิดภายใน 1/30 วินาที นั่นคือภาพที่ปรากฏที่หน้าจอ



รูปที่ 2.35 เส้นทางการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนบนผิวชิ้นงานในกล้อง SEM^[57]

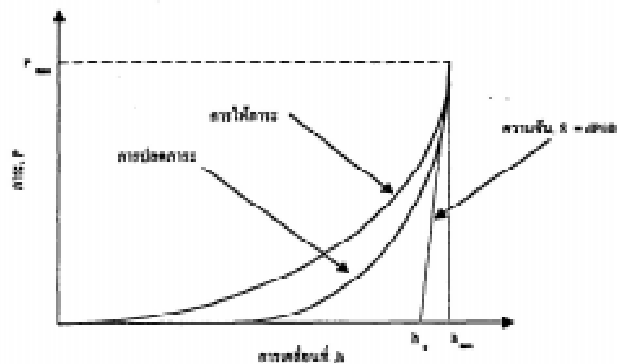
จำนวนของอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่มาถึงอุปกรณ์ตรวจจับขึ้นอยู่กับหลายตัวแปรเช่น ความลาดเอียงของพื้นผิวชิ้นงานที่สัมพันธ์กับตำแหน่งของอุปกรณ์ตรวจจับ เช่นถ้าพื้นผิวเอียงเข้าหาอุปกรณ์ตรวจจับ จำนวนอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่ไปถึงก็จะมีจำนวนมาก ภาพที่ได้จะมีความสว่างมาก ส่วนสัญญาณของอิเล็กตรอนชุดที่เกิดการกระเจิงกลับ (backscatter electron) ก็สามารถให้ข้อมูลที่แสดงลักษณะของพื้นผิวได้ แต่อุปกรณ์ตรวจจับได้รับศักย์ไบแอสเพียง -50 V ซึ่งเพียงพอที่จะผลักสัญญาณของอิเล็กตรอนทุติยภูมิ แต่ไม่มากพอที่จะผลักสัญญาณของอิเล็กตรอนชุดที่เกิดการกระเจิงกลับที่มีพลังงานสูง $16\text{--}18\text{ eV}$ อิเล็กตรอนชุดที่เกิดการกระเจิงกลับมีแนวโน้มที่จะเดินทางเป็นเส้นตรง ดังนั้น สัญญาณที่อยู่ในแนวเส้นสายตา (line-of-sight) ระหว่างจุดที่อิเล็กตรอนตกกระทบชิ้นงานกับด้านหน้าของอุปกรณ์ตรวจจับจึงถูกตรวจจับนั้นหมายถึงอิเล็กตรอนชุดที่เกิดการกระเจิงกลับแสดงลักษณะของความแตกต่างทางพื้นผิว (topographic contrast) ได้ดีกว่า

ลักษณะสำคัญของอิเล็กตรอนชุดที่เกิดการกระเจิงกลับอีกประการคือสัมประสิทธิ์การกระเจิง (scattering coefficient ; η) ซึ่ง η คือจำนวนของอิเล็กตรอนที่เกิดการกระเจิงกลับต่อจำนวนของอิเล็กตรอนตกกระทบ โดยที่ η ขึ้นอยู่กับเลขอะตอมของธาตุ (Z) ถ้า Z มีค่ามาก η จะมีค่ามากด้วย ดังนั้น อิเล็กตรอนชุดที่เกิดการกระเจิงกลับสามารถแสดงความแตกต่างของบริเวณในวัสดุที่มีเลขอะตอมของธาตุแตกต่างกันได้ แต่ถ้าชิ้นงานเป็นของผสมเนื้อเดียวกัน (homogeneous mixture) ของธาตุหลายชนิด ค่า η จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนโดยน้ำหนัก (weight fraction) ขององค์ประกอบนั้น

2.8.3 เทคนิคการกดระดับนาโนเมตร (Nanoindentation Technique)

การวัดความแข็งฟิล์มโดยวิธีการทดสอบแบบวัดรอยกด (indentation testing) ที่รู้จักกันดีคือ การวัดความแข็งวิกเกอส์และบริเนลล์ (Vickers and Brinell hardness test) แต่สำหรับเทคนิคการกดระดับนาโนเมตร (nanoindentation technique) เป็นการวัดความแข็งฟิล์มที่รอยกดไม่มาก โดยอยู่ในระดับนาโนเมตรเท่านั้น โดยขณะที่มีการกดหัวกดซึ่งเป็นเพชรจะค่อยๆ เลื่อนเข้าไปในเนื้อฟิล์มทีละน้อย ช่วงแรกจะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น (elastic deformation) หลังจากนั้นฟิล์มจะมีการเปลี่ยนรูปร่างถาวร (plastic deformation) เมื่อค่อยๆ ปลดภาระ (unload) การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นจะกลับคืนรูปเดิม (recovery) ดังรูปที่ 2.36

กราฟระหว่างภาระ (load) กับการเคลื่อนที่ (displacement) จะให้ข้อมูลของความแข็ง (hardness) สมบัติการยืดหยุ่นและการคืบ (elastic and creep properties) ของฟิล์ม ถ้าเปรียบเทียบกับ การวัดความแข็งแบบธรรมดา จะเห็นได้ว่าเทคนิคการกดระดับนาโนเมตรให้ข้อมูลที่มีความต่อเนื่องของภาระและความลึกของการกดระหว่างที่มีการให้และปลดภาระ



รูปที่ 2.36 กราฟของภาระที่เป็นฟังก์ชันของความลึกในการกด^[58]

การหาสมบัติทางกลของฟิล์มบางด้วยเทคนิคการกดระดับนาโนเมตรนี้ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายเนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีกำลังในการแยกเชิงระยะสูง (high spatial resolution) คือน้อยกว่า 1 ตารางไมครอน และมีความง่ายต่อการใช้ศึกษาสมบัติทางกลของฟิล์มภายใต้สภาวะการรับแรงแบบแรงอัด

การให้ภาระแก่อุปกรณ์การกดระดับนาโนเมตร สามารถทำได้โดยให้ภาระผ่านอุปกรณ์แม่เหล็กไฟฟ้า (คอยล์และแม่เหล็ก) ภาระที่ให้วัดได้จากค่ากระแสที่ไหลผ่านคอยล์ หรืออุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric device) ที่มีโหนดเซลล์ประกอบอยู่ อุปกรณ์ดังกล่าวมีกำลังในการแยกเชิงระยะ (resolution) สูงกว่า 0.01μ ส่วนการวัดระยะการเคลื่อนที่ของหัวกดใช้อุปกรณ์ capacitive sensor ซึ่งให้กำลังในการแยกสูงประมาณ 0.1 nm หัวกดที่ใช้คือหัวกดเพชร ชนิด Berkovich มีลักษณะเป็นปิรามิดรูปสามเหลี่ยม (triangular pyramid) ที่มีค่าความสัมพันธ์ของความลึกต่อพื้นที่ (depth-to-area relation) เท่ากับหัวกดมาตรฐานวิกเกอส์ซึ่งมีรูปร่างเป็นปิรามิดฐานสี่เหลี่ยม

การทดสอบแบบวัดรอยกด (indentation technique) เป็นเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการวัดความแข็งของฟิล์มซึ่งเคลือบติดบนวัสดุรองรับ การวัดความแข็งหมายถึงการวัดความต้องการการเปลี่ยนรูปเฉพาะที่ (local deformation) ซึ่งนิยามได้เป็น

$$H = P_{\max} / A \quad \dots\dots (2.9)$$

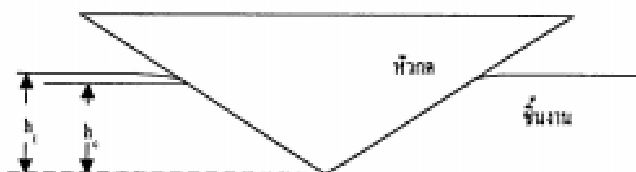
เมื่อ $P_{\max}$ คือภาระสูงสุดที่ใช้ในการกด และ A คือพื้นที่ภาพฉาย (projected area) ของรอยกดในฟิล์ม ซึ่งหาได้จากฟังก์ชันพื้นที่ $F(h)$ ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ที่กดตัดขวางของหัวกดกับความลึก h ตำแหน่งที่มีการกด (appropriate depth, h) ที่วัดจากปลายของหัวกดเข้ามา ตัวอย่างเช่น หัวกด Berkovich ที่มีปลายแหลม ซึ่งในทางอุดมคติจะมีฟังก์ชันพื้นที่เป็น $F(h) = 24.5h^2$

แต่ในความเป็นจริงปลายของหัวกดไม่ได้แหลมอย่างที่คิด ฟังก์ชันพื้นที่จึงซับซ้อนขึ้น การหาค่าความลึก ณ ตำแหน่งที่มีการกดที่ค่าภาระสูงสุด สามารถหาได้จากสมการ (2.10) คือ

$$h_e = h_{\max} - [\varepsilon P_{\max} / (dP/dh)] \quad \dots\dots (2.10)$$

แต่ละเทอมแสดงไว้ในรูปที่ 2.38 ค่าของ ε คือค่าคงที่ขึ้นอยู่กับรูปร่างทางเรขาคณิตของหัวกด สำหรับหัวกด Berkovich ค่า ε มีค่าเท่ากับ 0.75 เมื่อได้ค่า h_e ก็สามารถคำนวณหาพื้นที่ของหัวกดจากฟังก์ชันพื้นที่ $A = F(h_e)$ ค่าพื้นที่ที่ได้จะนำไปคำนวณหาความแข็งในสมการที่ (2.9)

ความลึกของรอยกดมีผลกระทบโดยตรงต่อการวัดความแข็ง ภาระที่ใช้มีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อการวัด แต่จะให้ข้อมูลของพื้นที่ภาพฉายที่ใช้ในการหาค่าความแข็งของฟิล์ม เมื่อวัดความแข็งของฟิล์มที่เคลือบบนวัสดุ บริเวณที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวรของรอยกดอาจกินพื้นที่ลงไปจนถึงเนื้อวัสดุรองรับ ความแข็งจะกลายเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนของความลึกกับความหนาของฟิล์ม และจากกฎ “A rule of thumb” ซึ่งกล่าวว่า ความลึกของการกดควรมีค่าเท่ากับ 1 ใน 10 ของความหนา จึงทำให้ในกรณีนี้ไม่ได้ค่าความแข็งที่แท้จริงของฟิล์ม ดังนั้นการลดอิทธิพลของความแข็งของวัสดุรองรับต่อของฟิล์ม การวัดความแข็งของฟิล์มที่ความลึกระดับนาโนเมตรด้วยเทคนิคการกดระดับนาโนเมตรจึงได้ผลการวัดที่ถูกต้องกว่า



รูปที่ 2.37 ลักษณะทางกายภาพของการกดภายในฟิล์มบาง^[59]

บทที่ 3

การออกแบบสร้างและทดสอบเครื่องเคลื่อน

บทนี้กล่าวถึงผลการออกแบบสร้างและทดสอบการทำงานเครื่องเคลื่อนฟิล์มบางที่สร้างขึ้นในโครงการนี้ ทั้งนี้ในระหว่างดำเนินงานในช่วงแรกของโครงการ คณะผู้วิจัยได้สร้างเครื่องเคลื่อนตามแบบที่เสนอ แต่พบว่ามีข้อบกพร่องบางประการจึงได้แก้ไขและปรับปรุงใหม่ บทนี้จะได้กล่าวถึงทั้งเครื่องเคลื่อนที่สร้างขึ้นในช่วงแรกและเครื่องเคลื่อนที่ปรับปรุงใหม่จนสำเร็จเป็นที่เรียบร้อย ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1 เครื่องเคลื่อนฟิล์มบางที่สร้างขึ้นในช่วงแรก

ในช่วงแรกของการดำเนินงานคณะผู้วิจัยได้สร้างเครื่องเคลื่อนตามแบบที่เสนอไว้ แต่ในระหว่างดำเนินงานคณะผู้วิจัยพบปัญหาเกี่ยวกับแบบของเครื่องเคลื่อนที่เสนอไว้ ทำให้คณะผู้วิจัยต้องปรับปรุงและเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเครื่องเคลื่อนที่สร้างไว้เรียบร้อยแล้วใหม่ (รูปที่ 3.1-3.3) โดยในระหว่างดำเนินงานคณะผู้วิจัยพบว่าโครงสร้างของเครื่องเคลื่อนที่ออกแบบตามที่เสนอไว้นั้นมีข้อจำกัดหลายอย่างซึ่งไม่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์หลายอย่าง เช่น แท่นวางของเครื่อง (โครงเครื่อง) มีขนาดเล็กเกินไป ทำให้อาจมีปัญหากับการรับน้ำหนักของอุปกรณ์ต่างๆ รวมถึงไม่มีพื้นที่พอสำหรับติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติม นอกจากนี้ชุดควบคุมการทำงานของเครื่องเคลื่อนซึ่งเดิมออกแบบส่วนนี้ไว้ในลักษณะเป็นชุดรวม (ซึ่งทำงานได้ค่อนข้างจำกัด) และเมื่อทดสอบการทำงานเบื้องต้นพบว่าไม่สะดวกในการทำงาน จึงจำเป็นต้องเพิ่มอุปกรณ์บางอย่าง ซึ่งเครื่องเคลื่อนที่สร้างไว้ในช่วงแรกนั้น (รูปที่ 3.1-3.3) ไม่สามารถเพิ่มอุปกรณ์และชุดควบคุมได้ คณะผู้วิจัยจึงจำเป็นต้องออกแบบส่วนควบคุมการทำงานนี้ขึ้นใหม่เพื่อให้สามารถทำงานได้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น โดยออกแบบให้ส่วนควบคุมใหม่นี้แยกออกจากกันเป็นชุดๆ ได้แก่ ชุดแสดงผลการวัดความดัน ชุดควบคุมการปล่อยแก๊สอย่างละเอียด ชุดควบคุมระบบสุญญากาศ ชุดควบคุมการเคลื่อนและชุดควบคุมระบบไฟฟ้าแรงสูง พร้อมกันนี้คณะผู้วิจัยได้ออกแบบโครงเครื่องเคลื่อนใหม่ (ซึ่งแตกต่างจากที่ออกแบบไว้ในช่วงแรก) เพื่อให้สามารถรับน้ำหนักและติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ได้มากขึ้นตามต้องการอีกด้วย (อย่างไรก็ดีการดำเนินการเปลี่ยนแปลงแก้ไขนี้ไม่มีผลต่อการดำเนินงานในภาพรวมของโครงการ)



รูปที่ 3.1 เครื่องเคลือบที่สร้างเสร็จในช่วงแรก (ก่อนปรับปรุง)



รูปที่ 3.2 เครื่องเคลือบที่สร้างเสร็จในตอนแรกขณะติดตั้งอุปกรณ์และทดสอบสุญญากาศ



รูปที่ 3.3 ชุดควบคุมและภาคจ่ายไฟฟ้าแรงสูงของเครื่องเคลือบที่สร้างในตอนแรก

3.2 การออกแบบและสร้างเครื่องเคลือบ

จากข้อจำกัดของเครื่องเคลือบที่สร้างไว้ในช่วงแรกทำให้คณะผู้วิจัยต้องออกแบบและปรับปรุงเพื่อแก้ปัญหาจนได้เครื่องเคลือบใหม่ ซึ่งมีส่วนประกอบหลัก 7 ส่วน ดังนี้คือ ภาชนะสุญญากาศ ระบบเครื่องสูบลูญญากาศ คาโทดและเป่าสารเคลือบ ระบบน้ำหล่อเย็น ระบบจ่ายไฟฟ้า ระบบป้อนแก๊ส ชุดควบคุมการทำงานของเครื่องเคลือบ (รูปที่ 3.4) มีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 3.4 เครื่องเคลือบทั้งระบบที่ออกแบบและสร้างขึ้นในโครงการนี้

3.2.1 ภาชนะสุญญากาศ

ภาชนะสุญญากาศที่ออกแบบสร้างขึ้น ทำจากเหล็กกล้าสเตนเลสหนา 3.0 mm มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 30.0 cm สูง 31.0 cm (ภาชนะสุญญากาศมีปริมาตรประมาณ 22.2 ลิตร) มีช่องหน้าต่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7.0 cm จำนวน 1 ช่อง เพื่อสังเกตการณ์ปรากฏการณ์ต่างๆ ภายในภาชนะสุญญากาศ สำหรับฝาปิดบนของภาชนะสุญญากาศออกแบบให้มีช่องสำหรับใส่ชุดเตอร์และอุปกรณ์เพิ่มเติม (รูปที่ 3.5)

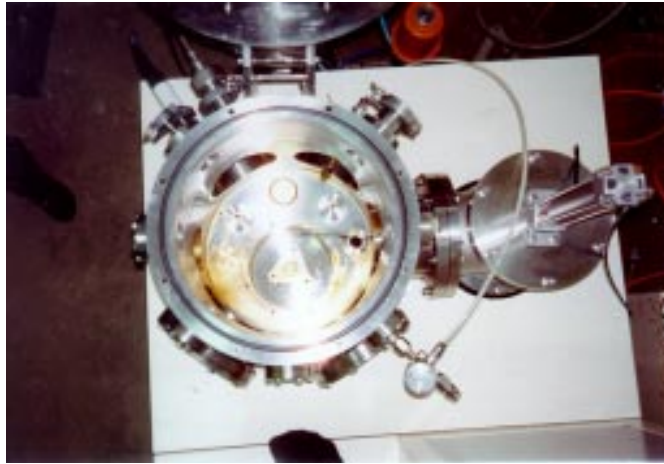
เพื่อให้สามารถติดตั้งระบบวัดความดันภายในภาชนะสุญญากาศ จึงได้ออกแบบให้ภาชนะสุญญากาศมีหน้าแปลนขนาด 4 cm (จำนวน 2 ช่อง) สำหรับใส่หัววัดความดันแบบเพนนิ่ง และหน้าแปลนขนาด 3 cm (จำนวน 2 ช่อง) สำหรับใส่หัววัดความดันแบบพิรานี

การเชื่อมต่อของภาชนะสุญญากาศกับระบบเครื่องสูบนั่น จะผ่านช่องเปิดทางด้านหลังของภาชนะสุญญากาศ ซึ่งจะต้องไปยังวาล์วสุญญากาศสูงอีกต่อหนึ่ง ช่องเปิดนี้มีขนาด 13.5 cm (ใช้ต่อจากภาชนะสุญญากาศเข้าสู่เครื่องสูบลำโพงอีกต่อหนึ่ง) สำหรับแผ่นฐาน (base plate) ของภาชนะสุญญากาศ ทำจากเหล็กกล้าสเตนเลสหนา 7.0 mm มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 34.0 cm และออกแบบมีช่องเปิดขนาด 2.5 cm จำนวน 8 ช่อง สำหรับต่ออุปกรณ์เพิ่มเติม เช่น ขั้วไฟฟ้า มอเตอร์ ฯลฯ กลางแผ่นฐานมีหน้าแปลนขนาด 13 cm สำหรับติดตั้งแท่นวางชิ้นงานซึ่งสามารถปรับระยะได้

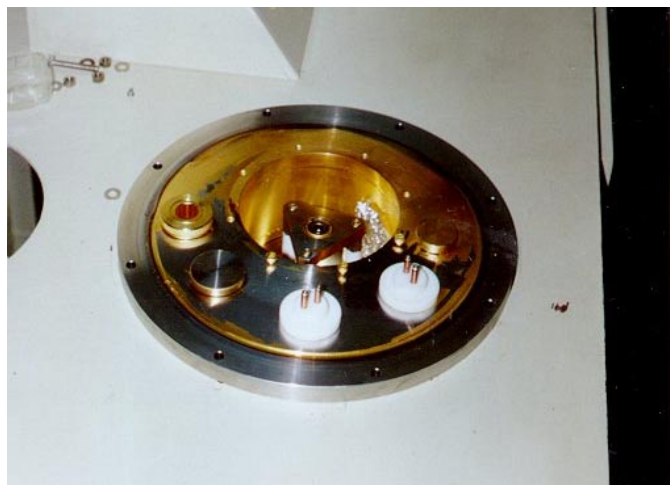
นอกจากส่วนประกอบหลักของระบบแล้วภายในภาชนะสุญญากาศยังมีอุปกรณ์ต่างๆ อีก คือ แท่นวางชิ้นงานสำหรับเคลือบ ซึ่งทำจากเหล็กกล้าสเตนเลสกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 cm ยึดติดกับแผ่นฐานซึ่งสามารถปรับระยะห่างจากผิวหน้าเป่าสารเคลือบได้ตั้งแต่ 4-10 cm (รูปที่ 3.9) ชุดให้ความร้อนแบบอินฟราเรด (รูปที่ 3.10-3.11)



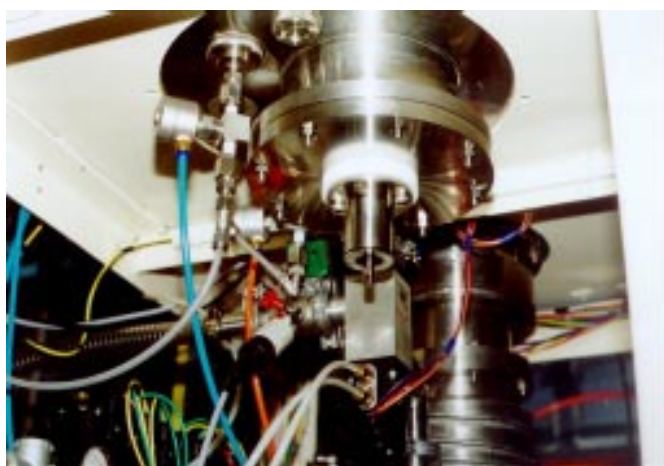
รูปที่ 3.5 ภาชนะสุญญากาศของเครื่องเคลือบ



รูปที่ 3.6 ภายในภาชนะสุญญากาศของเครื่องเคลือบ



รูปที่ 3.7 ด้านบนของแผ่นฐานของเครื่องเคลือบ



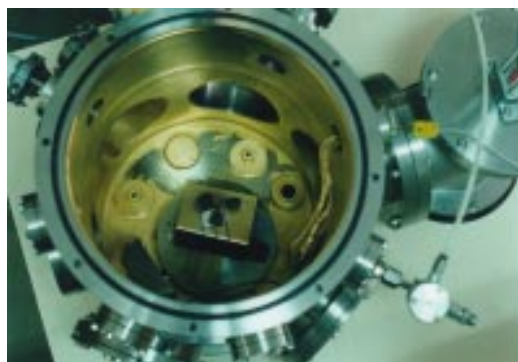
รูปที่ 3.8 ด้านล่างของแผ่นฐานของเครื่องเคลือบ ซึ่งมีชุดหมุนที่วางชิ้นงานสำหรับเคลือบ



รูปที่ 3.9 แท่นวางชิ้นงานและที่จับชิ้นพร้อมแกนสำหรับหมุน



รูปที่ 3.10 ชุดให้ความร้อนแบบอินฟราเรด



รูปที่ 3.11 ชุดให้ความร้อนแบบอินฟราเรดเมื่อติดตั้งภายในภาชนะสุญญากาศ

3.2.2 ระบบเครื่องสุญญากาศ

ระบบสุญญากาศสำหรับลดความดันในภาชนะสุญญากาศของเครื่องเคลือบที่สร้างในโครงการวิจัยนี้ประกอบด้วยเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ เครื่องสูบกลแบบโรตารี มาตรวัดความดัน อุปกรณ์วาล์วและข้อต่อต่างๆ โดยระบบสุญญากาศที่ออกแบบสร้างขึ้นนี้สามารถทำความดันในภาชนะสุญญากาศลดลงถึง 9.0×10^{-6} mbar โดยแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

1. เครื่องสูบบแบบแพร่ไอ เป็นเครื่องที่ออกแบบสร้างขึ้นใหม่ มีอัตราการสูบ (N_2) ประมาณ 280 ลิตร/วินาที พิสัยการทำงาน 10^{-2} - 10^{-6} mbar ใช้ไฟฟ้าขนาด 220 V/50 Hz 700 W โดยใช้น้ำมัน Silicone DC704 (Tetraphenyl Tetramethyl Trisiloxane) (รูปที่ 3.12)

2. เครื่องสูบกลแบบโรตารี ใช้ของ Edwards รุ่น EDM 12 แบบ 2 สถานะ อัตราการสูบประมาณ 12 ลบ.ม./ชั่วโมง (รูปที่ 3.13) ซึ่งเป็นของเดิมที่นำมาปรับปรุงใช้ใหม่

3. ระบบวัดความดัน ประกอบด้วยมาตรวัดความดัน Balzers รุ่น TPG 300 เป็นหน่วยควบคุมและแสดงผล ซึ่งมีหัววัด 2 แบบ คือ หัววัดแบบพิรานิของ Balzers รุ่น TPR010 ซึ่งสามารถวัดความดันได้ในช่วงระหว่าง 1×10^{-3} - 6×10^{-4} mabr และ หัววัดแบบเพนนิ่งของ Balzers รุ่น IKR050 ซึ่งสามารถวัดความดันได้ในช่วงระหว่าง 5×10^{-3} - 2×10^{-9} mbar

4. วาล์วและข้อต่อ สำหรับเครื่องเคลือบนี้ส่วนใหญ่จะสร้างขึ้นใหม่ทั้งหมดยกเว้นวาล์วบางตัวที่นำของที่มีอยู่เดิมมาปรับปรุงใช้ใหม่ เช่น วาล์วสุญญากาศสูง (high vacuum valves) เป็นวาล์วที่ออกแบบและสร้างขึ้นเองใหม่ซึ่งเป็นแบบเพลตวาล์ว (plate valve) (รูป 3.15) ส่วนวาล์วต่อระหว่างเครื่องสูบกลแบบโรตารีกับเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ วาล์วปล่อยอากาศเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ (air admittance valves) ท่อสุญญากาศส่วนท้าย (backing line) ท่อสุญญากาศหยาบ (roughing line) ยกเว้นวาล์วส่วนท้ายและวาล์วหยาบ เป็นของ Edwards BRV 25 PK และวาล์วปล่อยอากาศเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ (venting valve) ใช้ของ Edwards รุ่น IPVA 10 EK



รูปที่ 3.12 เครื่องสูบบแบบแพร่ไอของระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบ



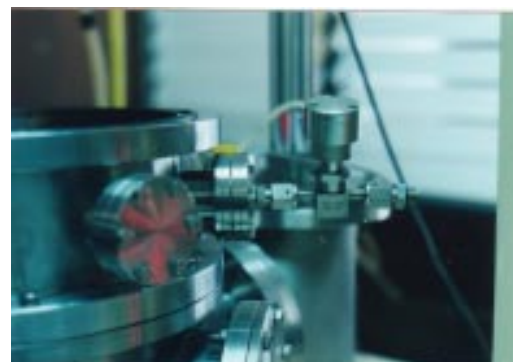
รูปที่ 3.13 เครื่องสูบลมโรตารีของระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบ



รูปที่ 3.14 การติดตั้งเครื่องสูบบแบบแฟรไอและเครื่องสูบลมโรตารีของเครื่องเคลือบ



(a)



(b)

รูปที่ 3.15 วาล์วที่ออกแบบและสร้างขึ้นใช้เองในโครงการ

(a) เฟลตวาล์วที่ต่อไปยังเครื่องสูบบแบบแฟรไอของเครื่องเคลือบ

(b) วาล์วปล่อยอากาศเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ

3.2.3 คาโทดและเป่าสารเคลือบ

คาโทดสำหรับติดตั้งเป่าสารเคลือบที่ออกแบบและสร้างขึ้นสำหรับเครื่องเคลือบในโครงการนี้ โครงสร้างส่วนใหญ่ทำจากเหล็กกล้าสเตนเลส (เพื่อป้องกันการเกิดสนิมจากระบบน้ำหล่อเย็น) ยกเว้น เทฟลอนซึ่งเป็นฉนวนไฟฟ้าและแผ่นปิดหลังคาโทดซึ่งทำจากทองแดง

คาโทดที่ออกแบบสร้างขึ้นนั้นทำจากเหล็กกล้าสเตนเลส มีลักษณะเป็นทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 114.0 mm เพื่อให้เกิดการสปัดเตอร์ที่เป่าสารเคลือบเท่านั้นจึงได้ออกแบบให้มีคาโทดชิลด์ครอบตัวคาโทดไว้อีกชั้นหนึ่ง โดยคาโทดชิลด์สร้างขึ้นจากเหล็กกล้าสเตนเลส มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 122.0 mm และเนื่องจากได้ออกแบบให้มีการระบายความร้อนของคาโทดและเป่าสารเคลือบด้วยน้ำ ดังนั้นเพื่อให้สามารถระบายความร้อนได้ดีและเพื่อป้องกันการรั่วซึมของน้ำหล่อเย็นจึงออกแบบให้มีแผ่นปิดหลังติดอยู่ด้านหลังของเป่าสารเคลือบ (ด้านหน้าดัดกลับแม่เหล็ก) ทำจากทองแดง เส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 114.0 mm โดยยึดด้วยสกรูรอบแผ่นปิดจำนวน 6 จุด สำหรับการยึดส่วนต่างๆ (แผ่นปิด แม่เหล็ก ตัวคาโทด) ให้ติดกันโดยใช้ตัวยึด (clamp) ทำจากเหล็กกล้าสเตนเลส มีลักษณะเป็นวงแหวน เส้นผ่าศูนย์กลาง 114.0 mm และยึดด้วยสกรูยาวจำนวน 6 จุด ร้อยผ่านแผ่นปิด แม่เหล็ก ตัวคาโทด

การระบายความร้อนของคาโทดและเป่าสารเคลือบ ใช้การระบายความร้อนด้วยน้ำ โดยออกแบบให้มีทางน้ำไหลผ่านเข้า-ออกอยู่ด้านบนของคาโทด (เส้นผ่าศูนย์กลาง 6.0 mm) โดยใช้ท่อสายยางขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.0 mm ยาว 8.0 m จำนวน 2 เส้น ต่อเข้าระบบน้ำหล่อเย็นซึ่งมีเครื่องสูบน้ำ (อัตราการสูบ 42 ลิตรต่อนาที) เป็นตัวทำให้เกิดการไหลเวียนของน้ำ

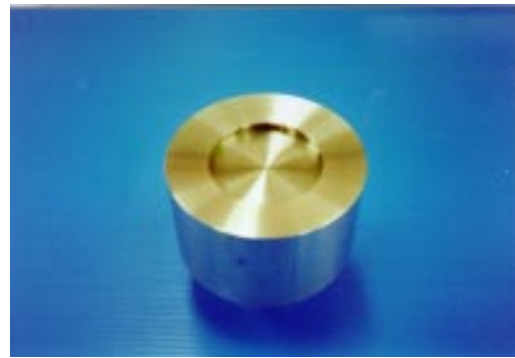
การแยกขั้วไฟฟ้า ได้ใช้เทฟลอนเป็นฉนวนไฟฟ้ากั้นระหว่างคาโทดและผนังโลหะของภาชนะสุญญากาศ เนื่องจากเทฟลอนมีสมบัติในการดูดซับความชื้นและโมเลกุลของแก๊สต่ำกว่าพลาสติกชนิดอื่น มีลักษณะเป็นรูปวงแหวนหนา 1 cm โดยมีตัวยึดทำจากเหล็กกล้าสเตนเลสยึดติดกับคาโทดและฝาปิดบน

สนามแม่เหล็กของคาโทดใช้แม่เหล็กแบบ NdFeB ในการสร้างสนามแม่เหล็ก และเพื่อให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีลักษณะไม่สมมาตรจึงใช้แม่เหล็กวางทั้งที่แกนกลางของคาโทดและรอบนอกเป็นวงแหวน โดยให้ค่าสนามแม่เหล็กวัดที่แผ่นปิดหลังบริเวณแกนกลางจะมีค่าประมาณ 1000 gauss ส่วนบริเวณวงแหวนจะมีค่าประมาณ 490 gauss

การปล่อยแก๊สอาร์กอน (สปัดเตอร์แก๊ส) ซึ่งทำหน้าที่สปัดเตอร์เป่าสารเคลือบนั้น จำเป็นจะต้องครอบคลุมและมีความสม่ำเสมอทั่วหน้าเป่าสารเคลือบ ซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อความสม่ำเสมอ (uniformity) ของฟิล์มบางที่ได้ จึงออกแบบให้มีการปล่อยแก๊สที่คาโทดชิลด์ โดยจะมีท่อนำแก๊สจากวาล์วต่อไปยังตัวคาโทดชิลด์ เพื่อให้แก๊สอาร์กอนสามารถฟุ้งกระจายอย่างสม่ำเสมอบริเวณหน้าเป่าสารเคลือบ



(a)



(b)

รูปที่ 3.16 (a) ส่วนประกอบและชิ้นส่วนต่างๆ ของคาโทด
(b) คาโทดที่ประกอบเรียบร้อยแล้ว

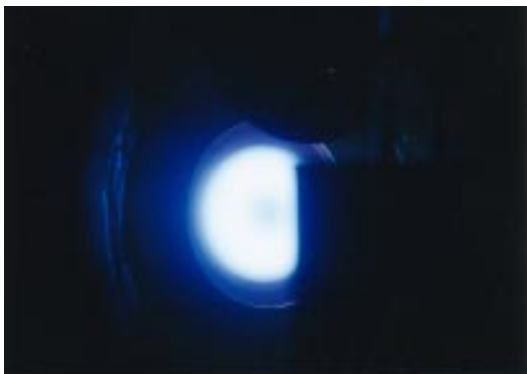


(a)



(b)

รูปที่ 3.17 (a) การติดตั้งคาโทดเมื่อมองจากด้านในภาชนะสุญญากาศ
(b) การติดตั้งคาโทดเมื่อมองจากด้านหลังเครื่องเคลือบ



รูปที่ 3.18 โกลว์ดีสชาร์จบริเวณหน้าคาโทด ขณะสปีดเทอริง

3.2.4 ระบบน้ำหล่อเย็น

ระบบน้ำหล่อเย็นของเครื่องเคลือบจะถูกใช้งาน 2 ส่วนหลัก คือ ใช้ในการหล่อเย็นคาโทดและเป่าสารเคลือบ และส่วนบนของเพดตัวผิวของเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ โดยระบบน้ำหล่อเย็นที่สร้างขึ้นประกอบด้วยเครื่องทำความเย็นและถังน้ำ โดยในส่วนเครื่องทำความเย็นประกอบด้วยคอมเพรสเซอร์ขนาด 746 W เครื่องควบคุมอุณหภูมิ ตัวขยาย (expander) และเครื่องควบแน่น (condenser) ประกอบด้วยแผงรังผึ้งและพัดลมสำหรับระบายความร้อนของท่อร้อน ท่อพักน้ำยา และตัวทำให้แห้ง (dryer) ติดต่อกันเพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้าย

ถังน้ำทำด้วยสเตนเลสมีตัวถังขนาด $32 \times 39 \times 32 \text{ cm}^3$ โดยถังน้ำเย็นจะบรรจุในส่วนบนของเครื่องทำความเย็น ด้านบนมีฝาเปิด-ปิด ที่ผนังมีท่อน้ำเย็นเชื่อมต่อกับถังบรรจุน้ำโดยท่อน้ำเย็นและผนังทั้ง 4 ตลอดจนด้านบนของถังจะหุ้มด้วยโฟมซึ่งเป็นฉนวน ด้านล่างของถังมีท่อน้ำซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องสูบน้ำและมีท่อน้ำที่ด้านบนมีท่อน้ำเข้า ท่อทุกท่อมีวาล์วสำหรับปรับอัตราการไหลของน้ำ สามารถทำความเย็นได้ในช่วง -4°C – 20°C เพื่อให้เกิดการไหลเวียนของน้ำหล่อเย็นระหว่างบริเวณที่ต้องการหล่อเย็นกับถังระบบน้ำหล่อเย็นจึงติดตั้งปั๊มน้ำขนาด 125 W 220 V 50 Hz อัตราการไหลน้ำหล่อเย็น 100-350 ลิตร/ชั่วโมง มีท่อลำเลียงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 mm



รูปที่ 3.19 ระบบน้ำหล่อเย็นของเครื่องเคลือบ

3.2.5 ระบบจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

ระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับระบบเคลือบที่พัฒนาขึ้นจะใช้สำหรับในส่วนการเคลือบเท่านั้น ซึ่งจะเป็นระบบจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงให้คาโทดมีศักย์เป็นลบ ส่วนกราวด์และแท่นวางชิ้นงานมีศักย์เป็นบวก ระบบจ่ายไฟฟ้าที่สร้างจะเป็นระบบแปลงไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง แบบฟูลเวฟ ระบบจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ขนาดอินพุต 220 V เอาท์พุทไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1-3 A มีความต่างศักย์ในช่วง 0-1,000 V (รูปที่ 3.20-3.21)



รูปที่ 3.20 ระบบจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงของเครื่องเคลือบ



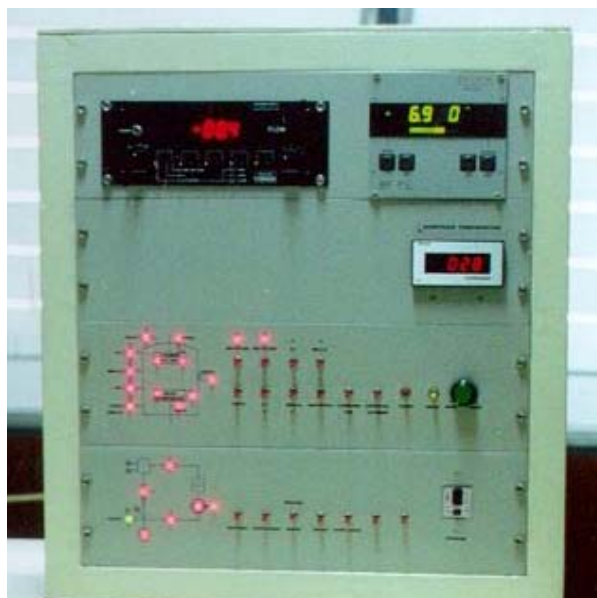
รูปที่ 3.21 หม้อแปลงไฟฟ้าของระบบจ่ายไฟฟ้าแรงสูงของเครื่องเคลือบ

3.2.6 ระบบป้อนแก๊ส

แก๊สที่ใช้ในกระบวนการเคลือบจะมี 2 ชนิดคือ แก๊สอาร์กอน (Ar) สำหรับกระบวนการสัปดาห์เตอริง และแก๊สไนโตรเจน (N_2) สำหรับกระบวนการรีแอคทีฟ โดยการป้อนแก๊สเข้าสู่เครื่องเคลือบจะถูกควบคุมอัตราไหลอย่างละเอียดด้วยเครื่องควบคุมการปล่อยแก๊สอย่างละเอียดเป็นของ Edwards ประกอบด้วยชุดควบคุมการปล่อยแก๊สรุ่น 825 mass flow controller (รูปที่ 3.22) และชุดควบคุมและแสดงผลรุ่น 1605 multi-channel flow controller and digital display (รูปที่ 3.23)



รูปที่ 3.22 ถังแก๊สและระบบป้อนแก๊สของเครื่องเคลือบ



รูปที่ 3.23 ชุดควบคุมการปล่อยแก๊ส ชุดมาตรวัดความดันและวัดอุณหภูมิ

3.2.7 ชุดควบคุมการทำงานของเครื่องเคลือบ

ชุดควบคุมการทำงานของเครื่องเคลือบ เป็นชุดสำหรับติดตั้ง สวิตช์ควบคุมการทำงาน
การทำงานของเครื่องเคลือบทั้งหมด (รูปที่ 3.24-3.28) ซึ่งคณะผู้วิจัยได้ออกแบบให้เป็นระบบควบคุม
แบบนิวเมติกส์ทั้งหมด โดยชุดควบคุมนี้จะควบคุมระบบวาล์วต่างๆ เช่น เฟดตวาล์ว วาล์วส่วนท้าย
วาล์วหยาบ วาล์วปล่อยอากาศเข้า วาล์วปล่อยแก๊ส เป็นต้น นอกจากนี้ในชุดควบคุมการทำงานจะ
ประกอบด้วย ชุดแสดงผลความดัน ชุดควบคุมการปล่อยแก๊สอย่างละเอียด ชุดควบคุมระบบ
สุญญากาศ ชุดควบคุมการเคลือบ ชุดควบคุมระบบไฟฟ้าแรงสูง



รูปที่ 3.24 ชุดควบคุมระบบการทำงานของเครื่องเคลือบ



รูปที่ 3.25 ชุดควบคุมการทำงานของระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบ



รูปที่ 3.26 ชุดควบคุมการเคลื่อนของเครื่องเคลื่อน



รูปที่ 3.27 การติดตั้งชุดควบคุมการทำงานของเครื่องเคลื่อน



รูปที่ 3.28 การติดตั้งชุดควบคุมมอเตอร์ของเครื่องเคลื่อน



รูปที่ 3.29 ตัวอย่างอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นใช้เองในโครงการ



รูปที่ 3.30 ขั้วไฟฟ้าสุญญากาศที่สร้างขึ้นใช้เองในโครงการ



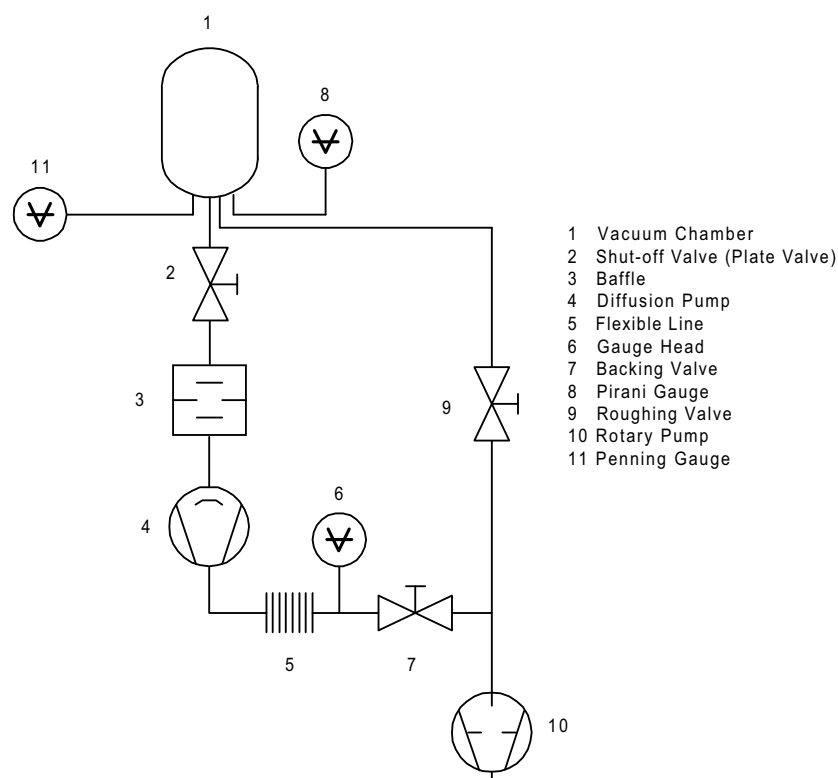
รูปที่ 3.31 ฟรีดรูปลักที่สร้างขึ้นใช้เองในโครงการ

3.3 การทดสอบระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบ

เมื่อประกอบเครื่องเคลือบเรียบร้อยแล้วจำเป็นต้องทดสอบความสามารถด้านสุญญากาศของเครื่องเคลือบก่อน ซึ่งจะทดสอบหาความดันต่ำสุดของระบบเคลือบก่อนทำการเคลือบเพื่อดูความสามารถของเครื่องเคลือบด้านสุญญากาศ

ระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบในโครงการนี้ ประกอบด้วยเครื่องสูบลสุญญากาศ 2 ชนิด คือ เครื่องสูบลแบบโรตารี และ เครื่องสูบลแบบแพร้อ โดยต่อเข้ากับภาชนะสุญญากาศตามแผนภาพระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบดังแสดงในรูปที่ 3.32 โดยเครื่องสูบลโรตารีที่ใช้จะสามารถทำให้ความดันภายในภาชนะสุญญากาศลดจากความดันปกติเป็นความดันต่ำถึง 10^{-3} mbar ซึ่งสามารถอ่านความดันได้จากหัววัดแบบพิรานี ส่วนเครื่องสูบลแบบแพร้อจะสามารถลดความดันได้ $10^{-3} - 10^{-6}$ mbar และสามารถอ่านค่าความดันได้จากหัววัดแบบเพนนิง

การทดสอบนี้ได้ทดสอบการสร้างสภาวะสุญญากาศภายในภาชนะสุญญากาศโดยใช้เครื่องสูบลแบบแพร้อที่สร้างขึ้นเอง ซึ่งมีอัตราการสูบประมาณ 280 l/s ใช้ร่วมกับเครื่องสูบลโรตารีของ Edwards รุ่น EDM12A (2 state) มีอัตราการสูบประมาณ $12 \text{ m}^3/\text{hr}$ แบ่งการทดสอบเป็น 2 ตอน คือ การสร้างสภาวะสุญญากาศในภาชนะสุญญากาศเมื่อใช้เฉพาะเครื่องสูบลโรตารี และ การสร้างสภาวะสุญญากาศในภาชนะสุญญากาศเมื่อใช้เครื่องสูบลแบบแพร้อ ซึ่งมีผลดังนี้คือ



รูปที่ 3.32 แผนภาพของระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบ

3.3.1 ความดันต่ำสุดของเครื่องเคลือบเมื่อใช้เฉพาะเครื่องสูบลมโรตารี

1) วัตถุประสงค์

เพื่อหาความดันต่ำสุดของเครื่องเคลือบเมื่อใช้เฉพาะเครื่องสูบลมโรตารี

2) วิธีทดลอง

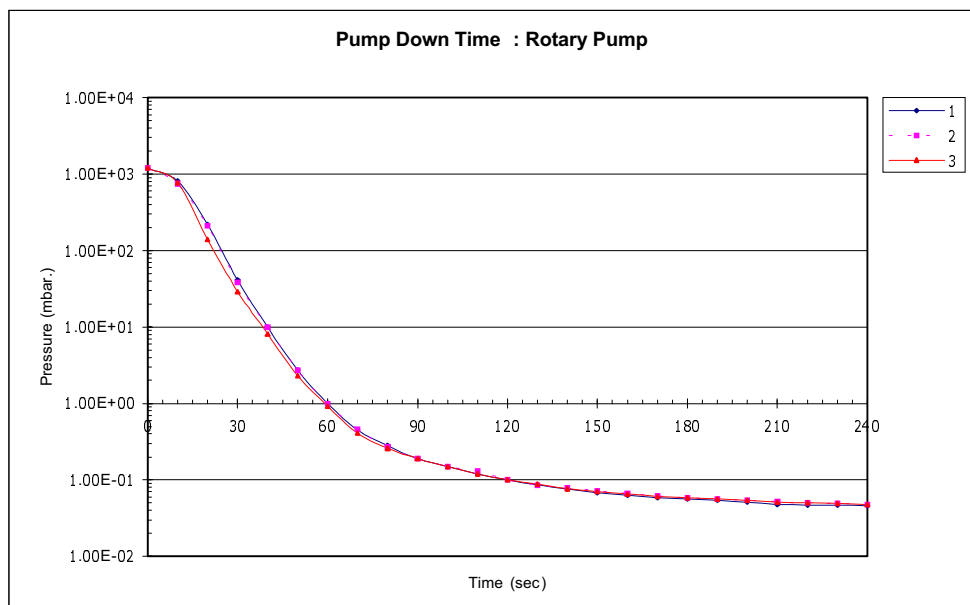
1. เริ่มจากการตรวจสอบเครื่องเคลือบ ฝาปิดและวาล์วว่าปิดเรียบร้อยหรือไม่ บันทึกความดันภายในภาชนะสุญญากาศก่อนทดลองเป็นค่าเริ่มต้น

2. เปิดเครื่องสูบลมโรตารี เปิดวาล์วหยาบ (ปีควาล์วหยาบ) เพื่อสูบลมจากภาชนะสุญญากาศ บันทึกความดันภายในภาชนะสุญญากาศทุก 10 วินาที จนความดันภายในภาชนะสุญญากาศคงที่

3. นำข้อมูลที่ได้ไปเขียนกราฟระหว่างความดันกับเวลา

3) ผลและอภิปรายผล

เมื่อใช้เฉพาะเครื่องสูบลมโรตารี พบว่าเมื่อใช้เครื่องสูบลมโรตารีสูบลมจากภาชนะสุญญากาศที่สร้างขึ้นสามารถลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศจาก 1.2×10^{-3} mbar เป็น 1.0×10^{-4} mbar ในเวลาประมาณ 1 นาที และสามารถลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศได้ประมาณ 5.7×10^{-2} mbar ในเวลาประมาณ 3 นาที ซึ่งเพียงพอสำหรับการทำสปีดเตอริงได้ (แต่จะได้ฟิล์มบางที่คุณภาพไม่ดี เนื่องจากระบบยังไม่สะอาดเพียงพอ)



รูปที่ 3.33 ผลการทดสอบระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบเมื่อใช้เฉพาะเครื่องสูบลมโรตารี

3.3.2 ความดันต่ำสุดของเครื่องเคลือบเมื่อใช้เครื่องสูบบแบบแพร่ไอ

1) วัตถุประสงค์

เพื่อหาความดันต่ำสุดของเครื่องเคลือบเมื่อใช้เฉพาะเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ

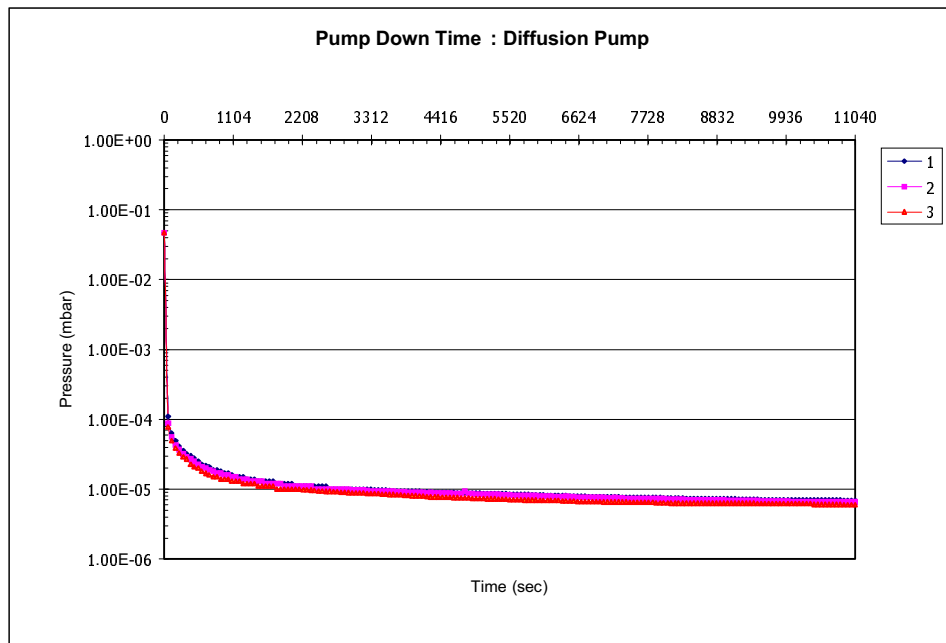
2) วิธีทดลอง

1. ตรวจสอบเครื่องเคลือบ ฝาปิดและวาล์วว่าปิดเรียบร้อยหรือไม่
2. ต้มน้ำมันของเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ
3. เปิดเครื่องสูบบกลโรตารีเพื่อสร้างภาวะสุญญากาศขั้นต้น
4. รอจนความดันภายในภาชนะสุญญากาศลดต่ำถึงประมาณ 10^{-2} mbar จึงปิดวาล์วหยาบบันทึกความดันขณะนั้นเป็นค่าเริ่มต้น
5. เปิดวาล์วท้าย เพื่อให้เครื่องสูบบแบบแพร่ไอทำงานต่อเนื่องกับเครื่องสูบบกลโรตารี เปิดเพลดวาล์ว เพื่อลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศ บันทึกความดันภายในภาชนะสุญญากาศทุก 10 วินาที จนความดันภายในภาชนะสุญญากาศคงที่
6. นำข้อมูลที่ได้ไปเขียนกราฟระหว่างความดันกับเวลา

3) ผลและอภิปรายผล

เมื่อใช้เครื่องสูบบแบบแพร่ไอ พบว่าระบบสุญญากาศที่สร้างขึ้นนั้นสามารถลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศจาก 4.7×10^{-2} mbar เป็น 1.5×10^{-5} mbar ในเวลาประมาณ 13 นาที (ตั้งแต่เปิดเพลดวาล์ว) และสามารถลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศได้ถึง 9.0×10^{-6} mbar ในเวลาประมาณ 48 นาที และถ้าสูบบอากาศต่อไปจะสามารถลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศลงไปได้ถึง 6.0×10^{-6} mbar ในเวลา 3 ชั่วโมง (180 นาที)

จากผลการทดสอบระบบสุญญากาศข้างต้นจะเห็นว่าระบบสุญญากาศที่ออกแบบสร้างขึ้นในโครงการนี้มีประสิทธิภาพที่ดี พิจารณาจากเวลาในการสูบบอากาศ จะเห็นได้ในเวลาไม่เกิน 3 นาที เราก็สามารถจะทำความดันเบื้องต้นสำหรับให้เครื่องสูบบแบบแพร่ไอทำงานต่อได้ทันที และหลังจากที่เปิดเพลดวาล์วแล้วพบว่าในเวลาประมาณ 48 นาที ความดันภายในภาชนะสุญญากาศจะอยู่ที่ 9.0×10^{-6} mbar ซึ่งจัดว่าเป็นความดันที่ต่ำมากและเพียงพอต่อการทำงานแล้ว ทั้งนี้หากพิจารณาตั้งแต่เปิดเครื่อง (เริ่มสูบบอากาศด้วยเครื่องสูบบกลโรตารี) พบว่าในการเตรียมเครื่องครั้งแรกก่อนใช้งานใช้เวลาประมาณ 50 นาที ระบบก็พร้อมที่จะทำงานได้แล้วส่วนการทำงานครั้งต่อไปจะใช้เวลาน้อยลง โดยต้องการความดันต่ำสุดประมาณ 5.0×10^{-5} mbar จะใช้เวลาประมาณ 2 นาที แต่ถ้าต้องการความดันต่ำสุดประมาณ 3.0×10^{-5} mbar จะใช้เวลาประมาณ 5 นาที และถ้าต้องการความดันต่ำสุดประมาณ 1.0×10^{-5} mbar จะใช้เวลาประมาณ 30 นาที



รูปที่ 3.34 ผลการทดสอบความดันต่ำสุดของเครื่องเคลือบเมื่อใช้เครื่องสูบแบบแพร่ไอ

3.4 การทดสอบการเคลือบฟิล์มบาง

เมื่อประกอบเครื่องเคลือบแล้ว นอกจากการทดสอบด้านสุญญากาศของเครื่องเคลือบแล้ว ข้อมูลอีกส่วนหนึ่งที่จะต้องพิจารณา คือ เครื่องเคลือบนี้สามารถเคลือบฟิล์มได้ตามต้องการหรือไม่ การศึกษาส่วนนี้เป็นการทดสอบว่าเครื่องเคลือบที่สร้างขึ้นสามารถทำงานหรือไม่ ซึ่งมีผลการศึกษาดังนี้

1) วัตถุประสงค์

เพื่อทดสอบว่าเครื่องเคลือบสร้างขึ้นสามารถเคลือบฟิล์มได้หรือไม่

2) วิธีทดลอง

1. ติดตั้งเป้าสารเคลือบ (ทอง) ที่คาโทด
2. ปรับแท่นวางวัสดุรองรับให้ห่างจากหน้าเป้าสารเคลือบ 10 cm
3. นำกระจกปิดสไลด์ไปวางไว้ในภาชนะสุญญากาศปิดฝาภาชนะสุญญากาศ
4. สร้างภาวะสุญญากาศให้ได้ความดันต่ำสุดประมาณ 5.0×10^{-5} mbar
5. ป้อนแก๊สอาร์กอนเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศให้ความดันภายในภาชนะสุญญากาศประมาณ 3.0×10^{-3} mbar
6. ทำการเคลือบ เป็นเวลา 5 นาที ขณะเคลือบสังเกตสีของโกลว์ดีสชาร์จด้วย
7. ทดสอบฟิล์มบางที่ได้โดยการเช็ดถูและชูดด้วยเล็บ
8. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนเป้าสารเคลือบเป็นไททาเนียม

3) ผลและอภิปรายผล

จากผลศึกษาพบว่าขณะเคลือบสีโกลว์ที่เป่าทองคำมีสีฟ้าอมส้ม ส่วนไททาเนียมจะมีสีฟ้าขาว โดยผลการเคลือบฟิล์มบางที่ได้เป็นที่น่าพอใจทั้งฟิล์มบางทองและฟิล์มบางไททาเนียม เมื่อสังเกตด้วยสายตาพบว่าฟิล์มบางที่ได้มีสีที่แวววาว ซึ่งเป็นสีของเป่าสารเคลือบ ไม่ปรากฏสภาพหมองคล้ำของฟิล์มบาง และเมื่อทดลองการยึดติดของฟิล์มโดยการเช็ดถูด้วยนิ้วมือและขีดด้วยเล็บ พบว่าทั้งการเช็ดถูและขีดด้วยเล็บ ไม่สามารถทำให้ฟิล์มที่ได้หลุดออก และเมื่อปล่อยให้ทิ้งไว้ในอากาศพบว่าฟิล์มที่ได้จะยังคงสภาพเหมือนเดิม

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า เครื่องเคลือบที่ออกแบบสร้างขึ้นในโครงการนี้สามารถเคลือบฟิล์มบางของทองและไททาเนียมได้ โดยผลการเคลือบฟิล์มบางที่ได้เป็นที่น่าพอใจทั้งฟิล์มบางทองและฟิล์มบางไททาเนียม

ตารางที่ 3.1 ผลการเคลือบฟิล์มบางที่เคลือบได้จากเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้น

เป่าสารเคลือบ	สีโกลว์ที่เป่า	สีและลักษณะของฟิล์มบาง	การยึดติดของฟิล์มบาง
ทอง(Au)	ฟ้าอมส้ม	สีเหลืองทอง/มันเงา	เช็ดถูไม่หลุด ทิ้งไว้ไม่เปลี่ยนแปลง
ไททาเนียม(Ti)	ฟ้าขาว	สีเงิน/มันเงา	เช็ดถูไม่หลุด ทิ้งไว้ไม่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 3.35 ฟิล์มบางทองและฟิล์มบางไททาเนียมที่เคลือบได้

3.5 การทดสอบ แมกนีตรอน คาโทดของเครื่องเคลือบ

ส่วนประกอบสำคัญอีกชิ้นหนึ่งของเครื่องเคลือบคือ แมกนีตรอนคาโทดของเครื่องเคลือบ ซึ่งในโครงการนี้ได้ออกแบบให้เป็นแบบ อันบาลานซ์ แมกนีตรอน คาโทด (unbalance magnetron cathode) สำหรับหน้าที่สำคัญของคาโทดของเครื่องเคลือบ คือ สำหรับติดตั้งเป้าสารเคลือบที่ต้องการเคลือบ และจะเป็นขั้วไฟฟ้าหนึ่งที่ทำให้เกิดโกลว์ดิสชาร์จเพื่อทำการสปัตเตอร์เป้าสารเคลือบ

การทดสอบแมกนีตรอน คาโทด ของเครื่องเคลือบจะประกอบด้วย การหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของคาโทด การทดสอบหาระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบและวัสดุรองรับที่มีการกระจายตัวของสารเคลือบดีที่สุด การทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของสารเคลือบ และการหาอัตราเคลือบของเครื่องเคลือบ ซึ่งมีผลการทดสอบมีดังนี้

3.5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์แมกนีตรอน คาโทด

1) วัตถุประสงค์

เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์แมกนีตรอน คาโทด

2) วิธีทดลอง

1. ติดตั้งเป้าสารเคลือบ (ทองแดง) ที่คาโทด
2. สร้างสุญญากาศในภาชนะสุญญากาศให้ได้ความดันต่ำสุด 5.0×10^{-5} mbar
3. ป้อนแก๊สอาร์กอนเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ โดยควบคุมให้ความดันภายในภาชนะสุญญากาศคงที่ ที่ประมาณ 3.0×10^{-3} mbar
4. เปิดแหล่งจ่ายไฟฟ้าและเพิ่มความต่างศักย์จนเกิดโกลว์ดิสชาร์จ บันทึกความต่างศักย์และกระแสเป็นค่าเริ่มต้น
5. ลดความต่างศักย์ลงครั้งละ 10 V และบันทึกกระแสที่ได้ จนกระบวนการโกลว์ดิสชาร์จหยุดลง
6. นำข้อมูลที่ได้ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์
7. คำนวณหาค่า k และ n ตามสมการ $I = kV^n$
8. ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 2 ถึง ข้อ 7 โดยเปลี่ยนความดันภายในระบบขณะทดลองเป็น 3.0×10^{-3} , 4.0×10^{-3} , 5.0×10^{-3} และ 6.0×10^{-3} mbar ลำดับ
9. เปลี่ยนเป้าสารเคลือบเป็นไททาเนียมและทำการทดลองซ้ำตามข้อ 2 ถึง ข้อ 8

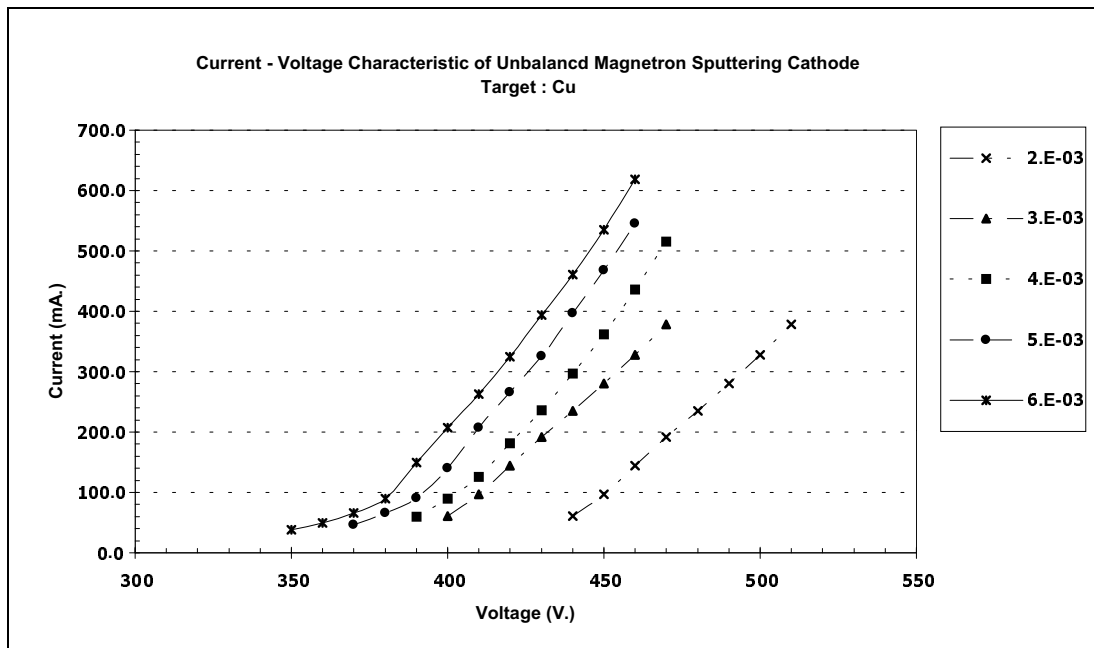
3) ผลและอภิปรายผล

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของระบบสปีดเตอริงแสดงถึงประสิทธิภาพของการเกิดไอออนในเซชันของระบบ โดยสภาพการคิซาร์จในระบบแมกนีตรอนที่จัดไว้อย่างมีประสิทธิภาพจะมีความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันคิซาร์จตามสมการ $I=kV^n$ โดยค่า n จะขึ้นกับความเข้มของสนามแม่เหล็กและการจัดรูปร่างของแนวสนามแม่เหล็ก และ k คือค่าคงที่ของความสัมพันธ์ ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงของกระแสในช่วงกว้างจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์คิซาร์จเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

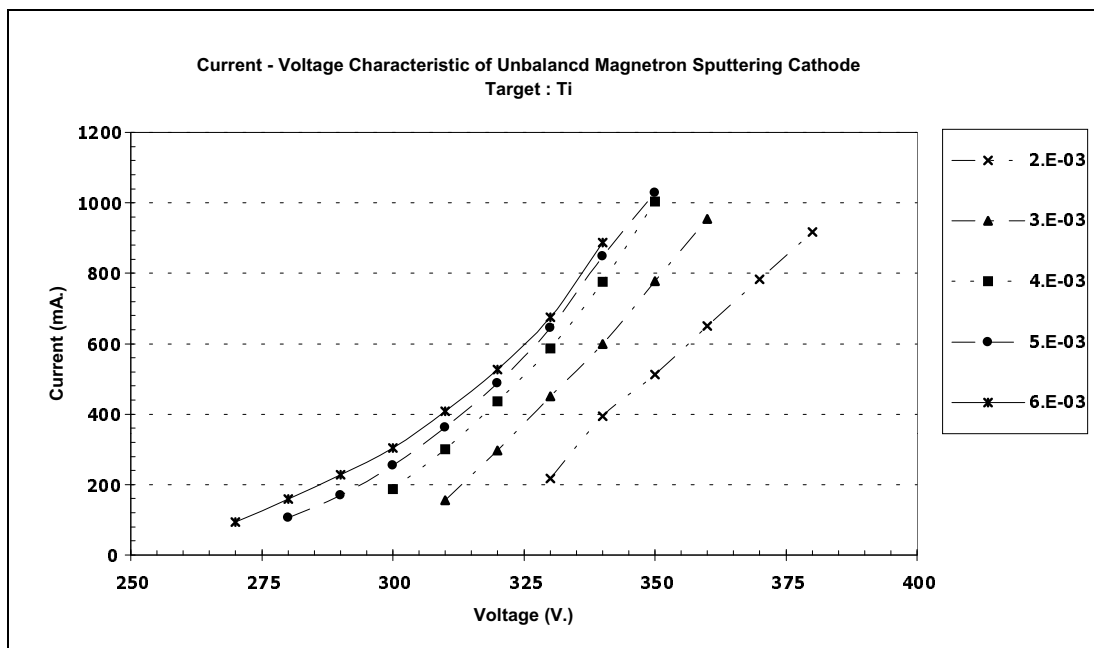
จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของระบบที่ความดันต่างๆ เมื่อใช้โททานิยมและทองแดงเป็นเป้าสารเคลือบพบว่าเมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นพบว่าความชันกราฟจะเปลี่ยนค่าไป (รูปที่ 3.36-3.37) ทั้งนี้เนื่องจากขณะที่กระแสไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นนั้นปริมาณไอออนของแก๊สจะถูกจำกัดด้วยความดันแก๊สในระบบ ซึ่งทำให้การผลิตอิเล็กตรอนและไอออนถูกจำกัดตามไปด้วย ดังนั้นโวลเตจของคาโทดจึงต้องสูงขึ้นเพื่อเร่งไอออนให้ชนคาโทดด้วยพลังงานที่สูงขึ้นสำหรับสร้างอิเล็กตรอนชุดที่สองเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการเบนโค้งของกราฟดังแสดงในรูปที่ 3.36-3.37 โดยค่า k และ ค่า n ของระบบเคลือบที่ความดันต่างๆ สำหรับเป้าสารเคลือบทั้ง 2 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่า k และ ค่า n ของเครื่องเคลือบที่ความดันต่างๆ

เป้าสารเคลือบ	ความดัน (mbar)	k	n
ทองแดง	2×10^{-3}	1.81E-30	11.96
	3×10^{-3}	3.46E-28	11.27
	4×10^{-3}	2.10E-20	12.05
	5×10^{-3}	8.43E-29	11.60
	6×10^{-3}	1.64E-15	10.68
โททานิยม	2×10^{-3}	1.13E-22	9.67
	3×10^{-3}	1.2E-27	11.72
	4×10^{-3}	6.24E-25	10.70
	5×10^{-3}	1.81E-23	10.14
	6×10^{-3}	1.99E-21	9.35



รูปที่ 3.36 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ ที่ความดันต่างๆ
เมื่อใช้ทองแดงเป็นเป้าสารเคลือบ



รูปที่ 3.37 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ ที่ความดันต่างๆ
เมื่อใช้ไททาเนียมเป็นเป้าสารเคลือบ

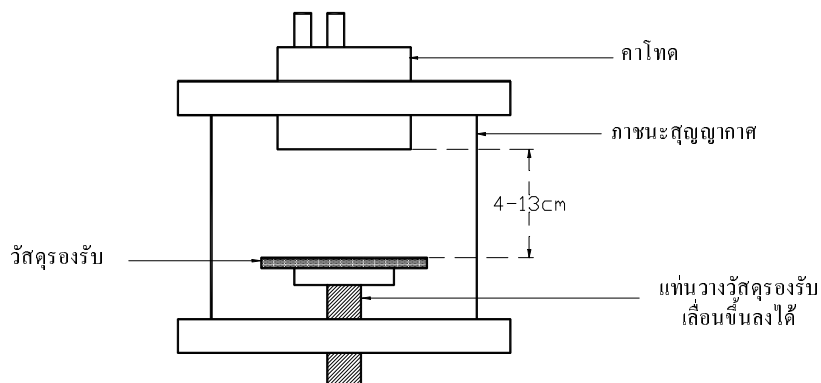
3.5.2 การทดสอบหาระยะที่มีการกระจายตัวของสารเคลือบดีที่สุด

1) วัตถุประสงค์

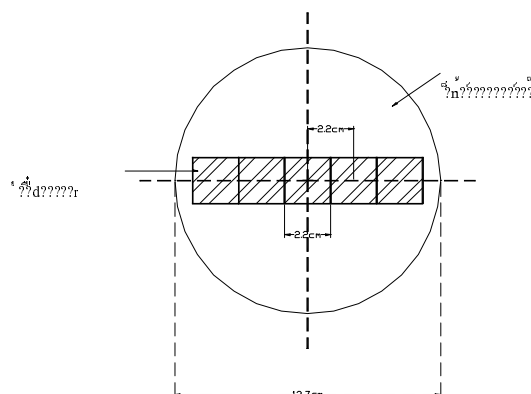
เพื่อหาระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบและวัสดุรองรับที่มีการกระจายตัวของสารเคลือบดีที่สุด

2) วิธีทดลอง

1. ติดตั้งเป้าสารเคลือบ (ทองแดง) ที่คาโทด
2. ชั่งวัสดุรองรับ (กระจกปิดสไลด์ ขนาด $2.2 \times 2.2 \text{ cm}^2$) บันทึกรวมมวลก่อนเคลือบ (จำนวน 5 แผ่น)
3. ปรับแท่นวางวัสดุรองรับให้ห่างจากหน้าเป้าสารเคลือบ 8.0 cm (รูปที่ 3.38)
4. นำกระจกปิดสไลด์ วางบนแท่นรองรับ ในภาชนะสุญญากาศ โดยจัดให้จุดศูนย์กลางของกระจกปิดสไลด์ขึ้นแรกตรงกับจุดศูนย์กลางของคาโทด (ให้เป็นตำแหน่งศูนย์) จากนั้นวางชั้นต่อไปให้ติดกันด้านซ้ายและขวาของชั้นแรก ดังแสดงในรูปที่ 3.39 ปิดฝาภาชนะสุญญากาศ



รูปที่ 3.38 แผนภาพภาชนะสุญญากาศของเครื่องเคลือบและการวางวัสดุรองรับ



รูปที่ 3.39 การวางกระจกปิดสไลด์เพื่อหาการกระจายตัวของสารเคลือบ

5. สร้างภาวะสุญญากาศในภาชนะสุญญากาศโดยให้ได้ความดันต่ำสุดประมาณ 5.0×10^{-5} mbar
6. ป้อนแก๊สอาร์กอนเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศให้ได้ความดันภายในภาชนะสุญญากาศประมาณ 3.0×10^{-3} mbar
7. เปิดแหล่งจ่ายไฟเพื่อเคลือบกระจกปิดสไลด์ เป็นเวลา 10 นาที จึงหยุดเคลื่อนนำกระจกปิดสไลด์ออกจากภาชนะสุญญากาศ
8. ชั่งกระจกปิดสไลด์ที่เคลือบฟิล์มทองแดงแล้วบันทึกเป็นมวลหลังเคลือบ
9. นำมวลของฟิล์มทองแดงที่เคลือบได้ ไปหาความหนาตามสมการ

$$d = \frac{\Delta m}{\rho_B A} \quad \dots\dots (3.1)$$

- เมื่อ d คือความหนาของฟิล์มบางทองแดง
- Δm คือผลต่างของมวลก่อนและหลังการเคลือบ
- ρ_B คือความหนาแน่นของทองแดง (8.93 g/cm^3)
- A คือพื้นที่ของกระจกปิดสไลด์ (ขนาด $2.2 \times 2.2 \text{ cm}^2$)

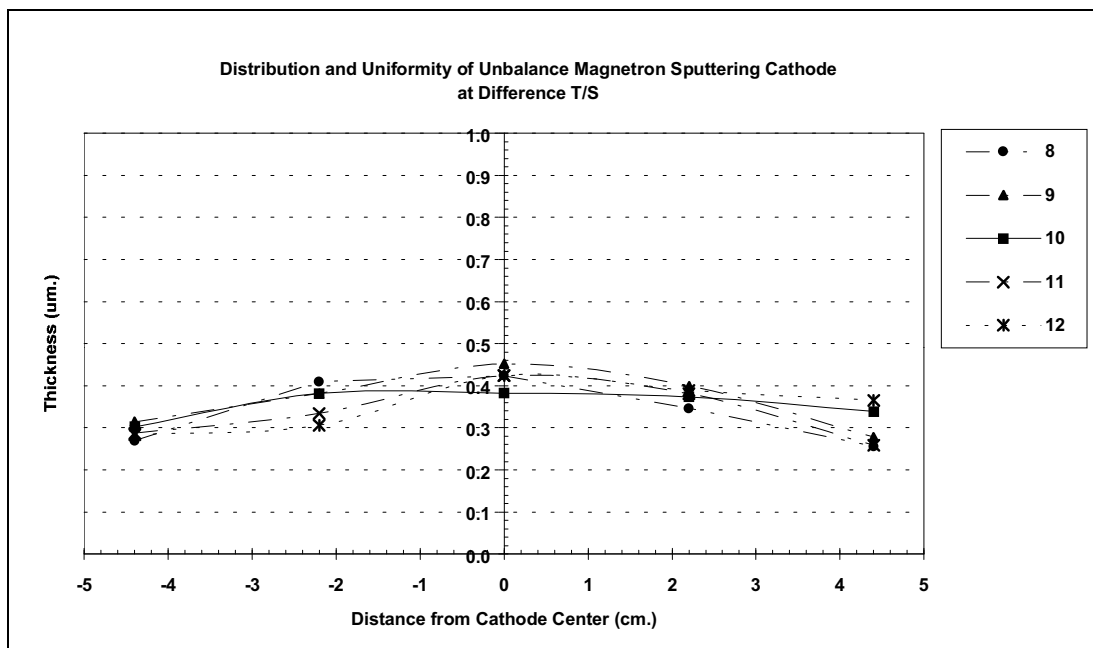
10. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 2 ถึง ข้อ 9 ด้วยกระจกปิดสไลด์ชุดใหม่ โดยแต่ละครั้งจะเพิ่มระยะห่างระหว่างเป่าสารเคลือบกับวัสดุรองรับขึ้น 1.0 cm (จนถึง 12.0 cm)
11. นำข้อมูลความหนาของกระจกปิดสไลด์ที่ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางคาโทดต่างกัน (แต่ละชุดที่ระยะห่างเป่าสารเคลือบกับวัสดุรองรับต่างกัน) ที่ได้ไปเขียนกราฟระหว่างความหนากับระยะห่างจากจุดศูนย์กลางคาโทด

3) ผลและอภิปรายผล

สมบัติสำคัญอีกอย่างหนึ่งของฟิล์มบางคือความสม่ำเสมอของฟิล์มบาง ซึ่งเกิดจากความสม่ำเสมอของเครื่องเคลือบ ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทดสอบการกระจายตัวของสารเคลือบบนวัสดุรองรับ (กระจกปิดสไลด์) ด้วยการเคลือบฟิล์มบางทองแดงบนกระจกปิดสไลด์ ที่ระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบกับวัสดุรองรับ ตั้งแต่ 8.0-12.0 cm นำความหนาของฟิล์มบางที่ได้ที่ตำแหน่งต่างๆ ของระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบกับวัสดุรองรับต่างๆ กัน มาเขียนกราฟ

จากผลการศึกษาพบว่าลักษณะการกระจายตัวของสารเคลือบที่ตกเคลือบบนวัสดุรองรับจะมีลักษณะเป็นวงกลม (ตามลักษณะของเป้าสารเคลือบ) โดยความหนาของฟิล์มที่จุดกึ่งกลางของแท่นวางจะมีความหนามากที่สุดและลดลงเมื่อระยะห่างจากจุดกึ่งกลางเพิ่มขึ้น จึงอาจกล่าวได้ว่าการกระจายตัวของสารเคลือบมีลักษณะการกระจายตัวเป็นแบบวงกลม (มีสมมาตรในแนวรัศมี) เมื่อพิจารณาความหนาของฟิล์มที่ตำแหน่งต่างๆ จากจุดศูนย์กลางคาโทดพบว่าฟิล์มจะหนาที่สุดบริเวณจุดศูนย์กลางคาโทดและเบาบางลงตามแนวรัศมี

ลักษณะการกระจายตัวของสารเคลือบนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบกับวัสดุรองรับ ซึ่งจากผลการทดลองสรุปได้ว่าระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบกับวัสดุรองรับที่มีการกระจายตัวดีที่สุด (คือมีความหนาใกล้เคียงกัน) คือที่ระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบกับวัสดุรองรับเท่ากับ 10.0 cm โดยมีพื้นที่ที่มีความสม่ำเสมอ (หรือหนาใกล้เคียงกัน) ที่บริเวณจุดกึ่งกลางของแท่นวางวัสดุรองรับ ประมาณ $4.4 \times 4.4 \text{ cm}^2$ (รูปที่ 3.40)



รูปที่ 3.40 ลักษณะการกระจายตัวของสารเคลือบที่ระยะระหว่างเป้าสารเคลือบกับวัสดุรองรับต่างๆ

3.5.3 การทดสอบการกระจายตัวของสารเคลือบ

1) วัตถุประสงค์

เพื่อหาทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของสารเคลือบเมื่อเคลือบด้วยทองและไททาเนียม

2) วิธีทดลอง

1. ติดตั้งเป่าสารเคลือบ (ทอง) ที่คาโทด
2. ชั่งวัสดุรองรับ (กระจกปิดสไลด์ ขนาด $2.2 \times 2.2 \text{ cm}^2$) บันทึกลงเป็นมวลก่อนเคลือบ (จำนวน 5 แผ่น)
3. ปรับแท่นวางวัสดุรองรับให้ห่างจากหน้าเป่าสารเคลือบ 10.0 cm
4. นำกระจกปิดสไลด์ วางบนแท่นรองรับห่างจากเป่าสารเคลือบในภาชนะสุญญากาศ โดยจัดให้จุดศูนย์กลางของกระจกปิดสไลด์ขึ้นแรกตรงกับจุดศูนย์กลางของคาโทด (ให้เป็นตำแหน่งศูนย์) จากนั้นวางขึ้นต่อไปให้ติดกันด้านซ้ายและขวาของขึ้นแรก ดังแสดงในรูปที่ 3.39 ปิดฝาภาชนะสุญญากาศ
5. สร้างภาวะสุญญากาศในภาชนะสุญญากาศโดยให้ได้ความดันต่ำสุดประมาณ $5.0 \times 10^{-5} \text{ mbar}$
6. ป้อนแก๊สอาร์กอนเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศให้ความดันภายในภาชนะสุญญากาศประมาณ $3.0 \times 10^{-3} \text{ mbar}$
7. เปิดแหล่งจ่ายไฟเพื่อเคลือบกระจกปิดสไลด์ เป็นเวลา 10 นาที จึงหยุดเคลือบนำกระจกปิดสไลด์ออกจากภาชนะสุญญากาศ
8. ชั่งกระจกปิดสไลด์ที่เคลือบฟิล์มทองแล้วบันทึกเป็นมวลหลังเคลือบ
9. นำมวลของฟิล์มทองที่เคลือบได้ ไปหาความหนาตามสมการ (3.1)
10. นำข้อมูลความหนาที่ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางคาโทดต่างกันได้ไปเขียนกราฟระหว่างความหนาที่ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางคาโทด
11. ทำการทดลองซ้ำตาม ข้อ 1 ถึง ข้อ 10 แต่เปลี่ยนเป่าเป็นไททาเนียม

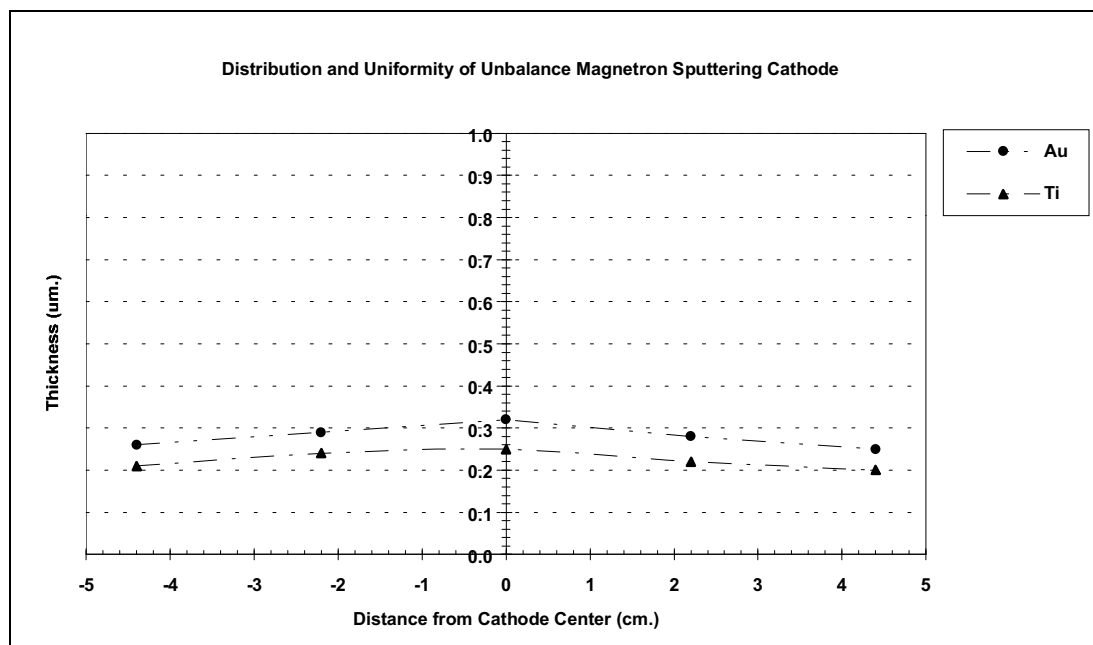
2) ผลและอภิปรายผล

จากผลการศึกษาพบว่าลักษณะการกระจายตัวของสารเคลือบที่ตกเคลือบบนวัสดุรองรับจากเป่าสอง (เป่าทองและเป่าไททาเนียม) จะมีลักษณะเหมือนกันคือมีลักษณะเป็นวงกลม โดยความหนาของฟิล์มบนวัสดุรองรับที่จุดกึ่งกลางของแท่นวางจะมีความหนาмаกที่สุดและลดลงเมื่อระยะห่างจากจุดกึ่งกลางเพิ่มขึ้น จึงอาจกล่าวได้ว่าการกระจายตัวของสารเคลือบมีลักษณะการกระจายตัวเป็นแบบวงกลม (มีสมมาตรในแนวรัศมี) เมื่อพิจารณาความหนาของฟิล์มที่ตำแหน่งต่างๆ จากจุดศูนย์กลางคาโทดพบว่าฟิล์มจะหนามากที่สุดบริเวณจุดศูนย์กลางคาโทดและเบาบางลงตามแนวรัศมี

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ที่ระยะระหว่างเป้าสารเคลือบกับวัสดุรองรับมีค่าเท่ากับ 10 cm แมกนีตรอน คาโทด ที่สร้างขึ้นนี้จะมีลักษณะการกระจายตัวที่ดีที่สุด คือ ความหนาของฟิล์มที่เคลือบได้จะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีพื้นที่ที่มีความสม่ำเสมอ (หรือฟิล์มหนาใกล้เคียงกัน) ที่บริเวณจุดกึ่งกลางของแท่นวางวัสดุรองรับ ประมาณ $4.4 \times 4.4 \text{ cm}^2$ (รูปที่ 3.41) โดยผลของการกระจายตัวของสารเคลือบนี้จะไม่ขึ้นกับชนิดของเป้าสารเคลือบที่ใช้ในการเคลือบ

ตารางที่ 3.3 ความหนาของฟิล์มทองและไททาเนียมที่ตำแหน่งต่างๆ

เป้าสารเคลือบ	ความหนาฟิล์มที่ตำแหน่งต่างๆ (um)				
	-4.4	-2.2	0	2.2	4.4
ทอง(Au)	0.26	0.29	0.32	0.28	0.25
ไททาเนียม(Ti)	0.21	0.24	0.25	0.22	0.20



รูปที่ 3.41 ลักษณะการกระจายตัวของสารเคลือบที่ตำแหน่งต่างๆ