# บทที่ 3

## การเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสปัตเตอริง

เมื่อของแข็งถูกชนด้วยอนุภาคพลังงานสูง แล้วทำให้อะตอมที่ผิวหน้าของของแข็งนั้นหลุดออก เรียกกระบวนการนี้ว่า สปัตเตอริง(Sputtering) โดยจะเรียกของแข็งที่ถูกชนว่า เป้าของการสปัตเตอร์ (sputtering target) และเรียกอนุภาคตัวชนว่า ตัวสปัตเตอร์ (sputtering species)

กระบวนการสปัตเตอร์ปัจจุบันมีบทบาทสำคัญต่อเทคโนโลยีเคลือบฟิล์มบาง ทั้งในระดับงานวิจัยและระดับอุตสาหกรรม เมื่อกล่าวถึงการสปัตเตอร์โดยทั่วไปจะรู้จักกันในความหมายว่าเป็นวิธีเคลือบฟิล์มบาง ซึ่งอาศัยกระบวนการสปัตเตอร์ที่เกิดขึ้นในโกลวดิสชาร์จโดยมีไอออนบวกเป็นตัวสปัตเตอร์ และมีวัสดุที่ใช้ทำคาโธดเป็นเป้าของการสปัตเตอร์

ในบทนี้ส่วนแรกจะนำเสนอกลไกเบื้องต้นของการสปัตเตอร์เนื่องจากการชนผิวหน้าของของแข็งด้วยไอออนบวก จากนั้นเป็นหลักการทั่วไปของการเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสปัตเตอริง และในส่วนท้ายจะอธิบายถึงระบบเคลือบฟิล์มบางแบบดีซีแมกนิตรอนสปัตเตอริง ซึ่งเป็นระบบเคลือบฟิล์มบางที่จะสร้างขึ้นในงานวิจัยนี้

### ทฤษฎีเบื้องต้นของสปัตเตอริง

#### 1. อันตรกริยาระหว่างไอออนบวกกับพื้นผิว

เมื่อไอออนบวกชนกับผิวเป้าซึ่งเป็นของแข็ง ปรากฏการณ์ต่างๆที่สามารถเกิดขึ้นได้มีดังต่อไปนี้ (ดูรูปที่ 3.1 ประกอบ) [30]

ก. ไอออนบวกที่เข้าชนถูกสะท้อนกลับ และอาจถูกทำให้เป็นกลางขณะชน

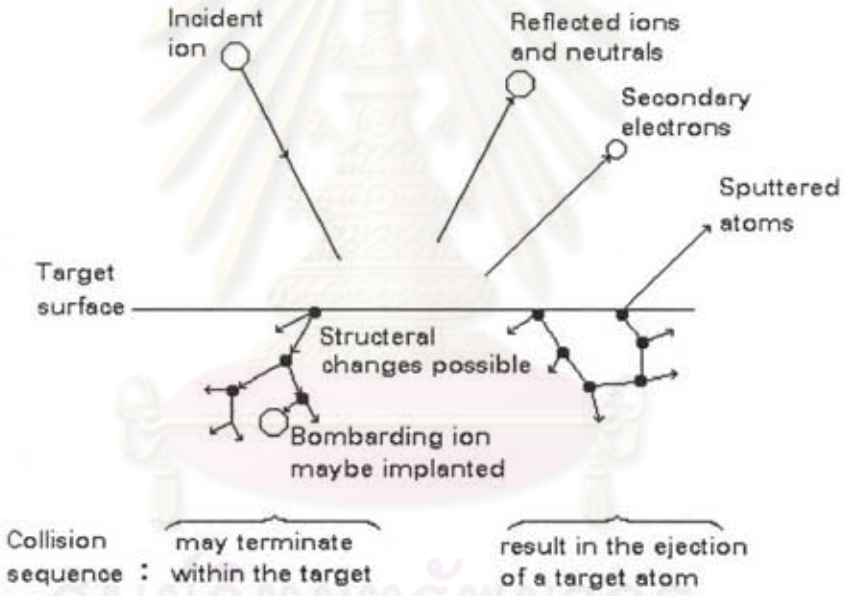
ข. ทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron emission)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค. ไอออนที่เข้าชนอาจฝังตัวในเป้า เป็นปรากฏการณ์ฝังไอออน (ion implantation) ซึ่งได้รับการไปใช้อย่างกว้างขวางในเทคโนโลยีวงจรรวม ในขั้นตอนการเจือซิลิกอนที่ต้องควบคุมปริมาณและความลึกของสารเจือที่แม่นยำ เทคโนโลยีเคลือบแข็ง เป็นต้น

ง. ทำให้มีการจัดโครงสร้างใหม่ที่ผิวเป้า ซึ่งสามารถเกิดได้หลายลักษณะ ได้แก่ การเกิดที่ว่าง การเลื่อนตำแหน่งของอะตอม ตลอดจนถึงการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนองค์ประกอบและการเปลี่ยนแปลงระดับและการกระจายของประจุไฟฟ้า

จ. ทำให้มีการชนต่อเนื่อง(collision cascade) ระหว่างอะตอมของเป้าแล้วทำให้อะตอมบริเวณผิวเป้าถูกกระแทกให้หลุดออก เป็นปรากฏการณ์สปัตเตอริง (Sputtering )




รูปที่ 3.1 กลไกที่เกิดขึ้นเมื่อไอออนบวกชนกับผิวเป้า

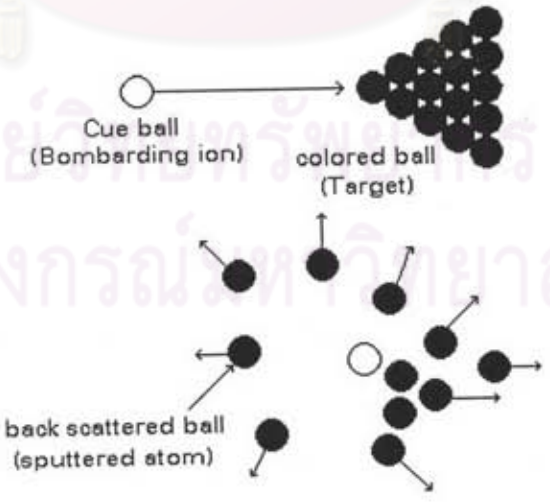
ความน่าจะเป็นที่จะเกิดปรากฏการณ์แต่ละแบบขึ้นกับชนิดของอะตอมที่ผิวเป้า ชนิดและพลังงานของไอออนบวกที่ชน สำหรับการสปัตเตอร์จะเกิดได้ดีในช่วงพลังงานของไอออนบวกระหว่าง 100 อิเล็กตรอนโวลท์ ถึง 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ ที่พลังงานไอออนบวกสูงกว่านี้การฝังไอออนจะเกิดได้ดีกว่า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2. กลไกสปัตเตอริง

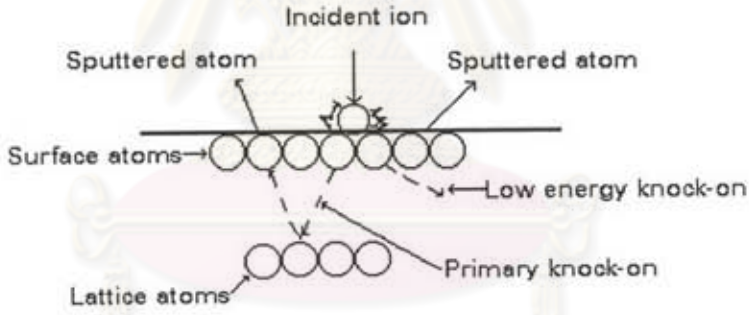
สปัตเตอริงเป็นผลของลำดับขั้นการชน (collision cascade) ระหว่างอะตอมของเป้าที่เกิดขึ้นต่อเนื่องหลังจากการชนผิวเป้าด้วยไอออนบวก [31] อะตอมซึ่งเกี่ยวข้องกับการชนเป็นส่วนที่อยู่ลึกจากผิวเป้าไม่เกิน 10 อังสตรอม อะตอมของผิวเป้าซึ่งถูกสปัตเตอร์จะเป็นขั้นสุดท้ายในลำดับการชน ในการพิจารณาการชนระหว่างอนุภาคที่เกี่ยวข้องแต่ละคู่ ทั้งระหว่างไอออนบวกกับอะตอมของเป้าและระหว่างอะตอมของเป้าด้วยกัน ยึดถือตามแบบจำลองการชนแบบยืดหยุ่นของแบบจำลองลูกบิลเลียด ซึ่งอธิบายด้วยฟังก์ชันการส่งผ่านพลังงาน $\frac{4m_1m_2}{(m_1+m_2)^2}$ โดย $m_1$ และ $m_2$ เป็นมวลของอนุภาคที่เข้าชนและถูกชนตามลำดับ (ดูภาคผนวก ก) ระหว่างการชนโมเมนตัมจะถูกส่งผ่านจากอนุภาคที่เข้าชนไปยังอนุภาคที่ถูกชน ในทิศของแนวลากที่ผ่านจุดศูนย์กลางมวลของอนุภาคทั้งสองในขณะที่สัมผัสกัน

การสปัตเตอร์มักได้รับการเปรียบเทียบกับการเล่นบิลเลียด แสดงดังรูปที่ 3.2 โดยพิจารณาให้อนุภาคทั้งหมดเป็นทรงกลมแข็ง และเปรียบเสมือนไอออนบวกเป็นลูกขาว(cue ball) และอะตอมที่ผิวเป้าเสมือนกับลูกสี(colored ball) ที่เรียงกันเป็นระเบียบ การชนของลูกขาว (ไอออนบวก) ทำให้ลูกสี(อะตอม) กระทบกันเป็นทอดๆแล้วสามารถกระเจิงออกทุกทิศทางรวมทั้งทิศทางที่ย้อนกลับกับลูกขาว (เข้าหาผู้เล่น) ซึ่งเทียบได้กับอะตอมที่ถูกสปัตเตอร์ออกจากผิวเป้า แม้ว่าในกระบวนการที่เกิดขึ้นจริงแรงดึงดูดภายในระหว่างอะตอมจะต่างกับกรณีของลูกบิลเลียด แต่แบบจำลองนี้ก็สามารถใช้อธิบายได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง




รูปที่ 3.2 การสปัตเตอร์เปรียบเทียบกับการเล่นบิลเลียด

กลไกถ่ายทอดโมเมนตัมที่สามารถนำไปสู่การสปัตเตอร์อะตอมออกจากผิวเป้าซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.3 เริ่มต้นจากไอออนบวกชนเป้าแล้วส่งผ่านโมเมนตัมให้กับอะตอมของผิวเป้าซึ่งอยู่นิ่ง ไอออนบวกจะกระทบกับอะตอมของผิวเป้า 2 หรือ 3 อะตอมเกือบพร้อมๆกัน อะตอมซึ่งถูกชนในขั้นแรกนี้จะไม่เป็นอะตอมที่ถูกสปัตเตอร์ แต่เป็นตัวการทำให้อะตอมที่อยู่ใกล้เคียงหลุดจากผิวเป้าโดยการชนต่อเนื่องที่ตามมา อะตอมที่ถูกไอออนบวกชนในลักษณะ low energy knock-on จะได้รับองค์ประกอบของโมเมนตัมในแนวขนานผิวเป้าเป็นส่วนใหญ่ จึงเคลื่อนตัวออกในแนวเฉียงด้านข้าง และสามารถกระแทกอะตอมที่ผิวเป้าซึ่งอยู่รอบๆให้หลุดจากผิวเป้าได้จากการชนเพียงลำดับแรก ส่วนอะตอมที่ถูกไอออนบวกชนในลักษณะ primary knock-on ซึ่งได้รับองค์ประกอบของโมเมนตัมในทิศพุ่งเข้าสู่เป้าเป็นส่วนใหญ่ จะเคลื่อนตัวลึกลงไปชนกับอะตอมในชั้นถัดไป ซึ่งตัวมันเองอาจสะท้อนกลับไปกระแทกอะตอมที่ผิวเป้าให้หลุดออก หรือทำให้เกิดการชนต่อเนื่องไปอีกหลายๆขั้น จนกระทั่งทำให้มีอะตอมอื่นได้รับโมเมนตัมในทิศที่เปลี่ยนไปมากกว่า 90 องศาเมื่อเทียบกับโมเมนตัมของไอออนบวกตกกระทบ อะตอมเหล่านี้สามารถเคลื่อนที่ย้อนกลับไปกระแทกอะตอมที่ผิวให้หลุดออกในที่สุด




รูปที่ 3.3 การถ่ายทอดโมเมนตัมในกระบวนการสปัตเตอริง

### 3. อัตราสปัตเตอริง

พารามิเตอร์ที่อธิบายกระบวนการสปัตเตอร์เชิงปริมาณ คือ อัตราสปัตเตอริง (sputtering yield:S) ซึ่งนิยามในเทอมของจำนวนอะตอมของเป้าที่หลุดออกต่อการชนด้วยไอออนบวก 1 อนุภาค เนื่องจากกระบวนการสปัตเตอริงเกี่ยวข้องกับการชนระหว่างอะตอมของเป้าและไอออนบวก ดังนั้นอัตราสปัตเตอริงจึงขึ้นกับชนิดของเป้าชนิดของไอออนบวก พลังงานและทิศทางของไอออนบวกขณะตกกระทบเป้า

สมมุติให้ไอออนบวกตกกระทบตั้งฉากบนเป้าระนาบ ซึ่งมีแถวของอะตอมเรียงกันแบบสุ่ม และจากแบบจำลองการชนแบบยืดหยุ่น จะได้อัตราสปัตเตอริงในช่วงความสัมพันธ์เชิงเส้นกับพลังงานของไอออนบวก ($E_i$ < 1 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ ) ตามสมการ [32]

$$S = \frac{3\alpha}{4\pi^2}\frac{4m_i m_t E_i}{(m_i + m_t)^2 E_b} \qquad (3.1)$$

และอัตราสปัตเตอริงในช่วงที่พลังงานของไอออนบวกสูงกว่า 1 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ ตามสมการ

$$S = 3.56\alpha\frac{(Z_i Z_t)(m_i m_t)}{(Z_i^{2/3} + Z_t^{2/3})(m_i + m_t)E_b} S_n(E_i) \qquad (3.2)$$

โดย $m_i$ และ $E_i$ เป็นมวลและพลังงานจลน์ของไอออนบวก

$m_t$ และ $E_b$ เป็นมวลของอะตอมเป้า และพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมที่ผิวเป้าหรือพลังงานการระเหิด(heat of sublimation)

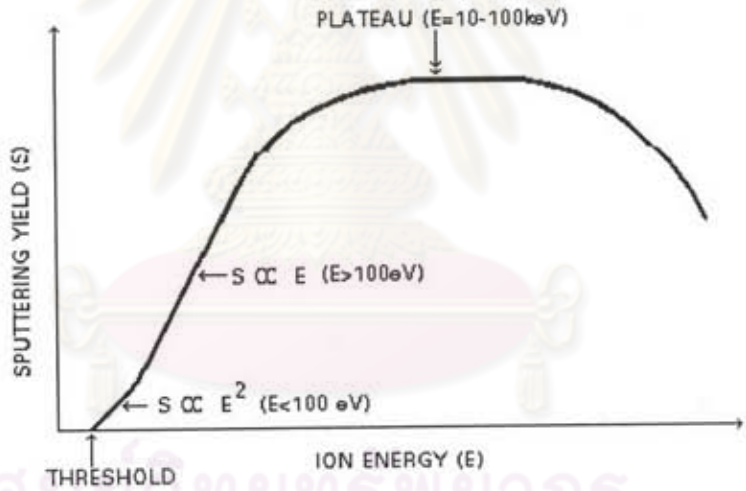
$Z_i$ และ $Z_t$ เป็นเลขอะตอมของไอออนบวกและอะตอมของเป้า

$\alpha$ เป็นพารามิเตอร์ซึ่งวัดประสิทธิภาพการส่งผ่านโมเมนตัมในขณะการชน และมีค่าขึ้นกับอัตราส่วน $m/m_i$ โดย $\alpha$ จะเท่ากับ 0.17 เมื่ออัตราส่วน $m/m_i$ เท่ากับ 0.1 และจะเพิ่มขึ้นเป็น 1.4 เมื่ออัตราส่วน $m/m_i$ เท่ากับ 10

$S_n(E_i)$ คือ reduced stoping power เป็นพารามิเตอร์ซึ่งวัดการสูญเสียพลังงานของไอออนบวกต่อหนึ่งหน่วยระยะทาง และเป็นฟังก์ชันกับพลังงานของไอออนบวก รวมทั้งมวลและเลขอะตอมของอนุภาคที่เกี่ยวข้อง เมื่อพลังงานของไอออนบวกสูงอัตราสปัตเตอริงค่อนข้างจะคงที่ เนื่องจาก $S_n(E_i)$ มีแนวโน้มเป็นอิสระจากพลังงานของไอออนบวก

สมการทั้งสองข้างต้น แสดงให้เห็นถึง ลักษณะความสัมพันธ์ของอัตราสปัตเตอร์กับพารามิเตอร์ต่างๆของไอออนบวกและเป้าที่เกี่ยวข้องในกระบวนการสปัตเตอร์ และสรุปได้ว่าไอออนบวกส่งผลต่ออัตราสปัตเตอริงผ่านทางพลังงานจลน์ ($E_i$)และมวล ($m_i$) ส่วนเป้าส่งผลผ่านทางมวลของอะตอม($m_t$)และพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอม($E_b$) สำหรับในช่วงพลังงานของไอออนบวกสูง อัตราสปัตเตอริงจะได้รับผลจากเลขอะตอมของอนุภาคทั้งสองด้วย

รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะแบบฉบับของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราสปัตเตอร์กับพลังงานของไอออนบวก[33] จากรูปจะเห็นว่าเป้าเริ่มถูกสปัตเตอร์เมื่อพลังงานของไอออนบวกสูงถึงค่าพลังงานขีดเริ่ม (threshold energy) ของการสปัตเตอร์ เมื่อพลังงานของไอออนบวกมีค่าใกล้กับพลังงานขีดเริ่ม ($E_i$<100 อิเล็กตรอนโวลท์) อัตราสปัตเตอร์จะแปรผันตามพลังงานของไอออนบวกยกกำลังสอง แล้วเปลี่ยนเป็นเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นในช่วงพลังงานของไอออนบวกระหว่าง 0.1 ถึง 1 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ หลังจากนี้อัตราสปัตเตอร์จะเพิ่มช้าลงและคงที่ในช่วงพลังงานของไอออนบวกระหว่าง 10 ถึง 100 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ ถ้าเพิ่มพลังงานของไอออนบวกต่อไปอีกอัตราสปัตเตอร์จะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากไอออนบวกที่ชนเป้าด้วยพลังงานสูงจะฝังตัวลึกและสูญเสียพลังงานอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะลดโอกาสทำให้อะตอมเป้าถูกสปัตเตอร์ ถ้าหากว่าพิจารณาจาก ด้านการใช้พลังงานแล้ว การสปัตเตอร์จะมีประสิทธิภาพที่สุดในช่วงที่พลังงานของไอออนบวกน้อยกว่า 1 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์




รูปที่ 3.4 ลักษณะแบบฉบับของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราสปัตเตอร์กับพลังงานไอออนบวก

ตารางที่ 3.1 [34] แสดงพลังงานขีดเริ่มของการสปัตเตอร์โลหะด้วยไอออนบวกของ Ne, Ar, Kr, Xe และ H พร้อมด้วยพลังงานการระเหิด (heat of sublimation:H) ของโลหะแต่ละชนิด ซึ่งมีข้อสังเกตุ คือ พลังงานขีดเริ่มส่วนใหญ่มีค่าระหว่าง 10-30 อิเล็กตรอนโวลท์ และมีค่าคิดเป็นประมาณ 4 เท่าของพลังงานการระเหิด ถ้าไม่คำนึงถึงการสูญเสียพลังงานจลน์ของไอออนบวกในรูปอื่น เช่น พลังงานความร้อนแล้ว ค่าของพลังงานขีดเริ่มน่าจะเป็นสิ่งที่ยืนยันการเกิดลำดับขั้นการชนระหว่างอะตอมของเป้าก่อนที่อะตอมที่ผิวเป้าจะถูกสปัตเตอร์

ตารางที่ 3.1 พลังงานขีดเริ่มของการสปัตเตอร์ (อิเล็กตรอนโวลท์)
(H คือ พลังงานสำหรับการระเหิด)

| โลหะ | ไอออนบวก | | | | | H |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ne | Ar | Kr | Xe | Hg | |
| Be | 12 | 15 | 15 | 15 | - | - |
| Al | 13 | 13 | 15 | 16 | 18 | - |
| Ti | 22 | 20 | 17 | 18 | 25 | 4.40 |
| V | 21 | 23 | 25 | 28 | 25 | 5.28 |
| Cr | 22 | 22 | 18 | 20 | 23 | 403 |
| Fe | 22 | 20 | 25 | 23 | 25 | 4.12 |
| Co | 20 | 25 | 22 | 22 | - | 4.40 |
| Ni | 23 | 21 | 25 | 20 | - | 4.41 |
| Cu | 17 | 17 | 16 | 15 | 20 | 3.53 |
| Ge | 23 | 25 | 22 | 18 | 25 | 4.07 |
| Zr | 23 | 22 | 18 | 25 | 30 | 6.14 |
| Nb | 27 | 25 | 26 | 32 | - | 7.71 |
| Mo | 24 | 24 | 28 | 27 | 32 | 6.15 |
| Rh | 25 | 24 | 25 | 25 | - | 5.98 |
| Pd | 20 | 20 | 20 | 15 | 20 | 4.08 |
| Ag | 12 | 15 | 15 | 17 | - | 3.35 |
| Ta | 25 | 26 | 30 | 30 | 30 | 8.02 |
| W | 35 | 33 | 30 | 30 | 30 | 8.80 |
| Re | 35 | 35 | 25 | 30 | 35 | - |
| Pt | 27 | 25 | 22 | 22 | 25 | 5.60 |
| Au | 20 | 20 | 20 | 18 | - | 3.90 |
| Th | 20 | 24 | 25 | 25 | - | 7.70 |
| U | 20 | 23 | 25 | 22 | 27 | 9.57 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.2 [35] แสดงข้อมูลอัตราสปัตเตอร์ของเป้าโลหะชนิดต่างๆ เมื่อถูกชนด้วยไอออนบวกของนิออนและอาร์กอนซึ่งมีพลังงานจลน์ระหว่าง 0- 600 eV ในทิศตั้งฉาก จากตารางจะเห็นว่าอัตราสปัตเตอร์ของโลหะแต่ละชนิดจะเพิ่มขึ้นเมื่อพลังงานไอออนบวกสูงขึ้น และถ้าพลังงานของไอออนบวกเท่ากัน อัตราสปัตเตอร์จะเพิ่มขึ้นตามมวลของไอออนบวกซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มของพารามิเตอร์ $\alpha$ ตามอัตราส่วน $m/m_1$ ในสมการ (3.1)

ตารางที่ 3.2 อัตราสปัตเตอริงของโลหะซึ่งชนด้วยไอออนบวกของนิออนและอาร์กอน

| Target | $Ne^+$ | | | | $Ar^+$ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 100eV | 200eV | 300eV | 600eV | 100eV | 200eV | 300eV | 600eV |
| Be | 0.012 | 0.10 | 0.26 | 0.56 | 0.074 | 0.18 | 0.29 | 0.80 |
| Al | 0.031 | 0.24 | 0.43 | 0.83 | 0.11 | 0.35 | 0.65 | 1.24 |
| Si | 0.034 | 0.13 | 0.25 | 0.54 | 0.07 | 0.18 | 0.31 | 0.53 |
| Ti | 0.08 | 0.22 | 0.30 | 0.45 | 0.081 | 0.22 | 0.33 | 0.58 |
| V | 0.06 | 0.17 | 0.036 | 0.55 | 0.11 | 0.31 | 0.41 | 0.70 |
| Cr | 0.18 | 0.49 | 0.73 | 1.05 | 0.30 | 0.67 | 0.87 | 1.30 |
| Fe | 0.18 | 0.38 | 0.62 | 0.97 | 0.20 | 053 | 0.76 | 1.26 |
| Co | 0.084 | 0.41 | 0.64 | 0.99 | 0.15 | 0.57 | 0.81 | 1.36 |
| Ni | 0.22 | 0.46 | 0.65 | 1.34 | 0.28 | 0.66 | 0.95 | 1.52 |
| Cu | 0.26 | 0.84 | 1.20 | 2.00 | 0.48 | 1.10 | 1.59 | 2.30 |
| Ge | 0.12 | 0.32 | 0.48 | 0.82 | 0.22 | 0.50 | 0.74 | 1.22 |
| Zr | 0.054 | 0.17 | 0.27 | 0.42 | 0.12 | 0.28 | 0.41 | 0.75 |
| Nb | 0.051 | 0.16 | 0.23 | 0.42 | 0.068 | 0.25 | 0.40 | 0.65 |
| Mo | 0.10 | 0.24 | 0.34 | 0.54 | 0.13 | 0.40 | 0.58 | 0.93 |
| Ru | 0.078 | 0.26 | 0.38 | 0.67 | 0.14 | 0.41 | 0.68 | 1.30 |
| Rh | 0.081 | 0.36 | 0.52 | 0.77 | 0.19 | 0.55 | 0.86 | 1.46 |
| Pd | 0.14 | 0.59 | 0.82 | 1.32 | 0.42 | 1.00 | 1.41 | 2.39 |
| Ag | 0.27 | 1.00 | 1.30 | 1.98 | 0.63 | 1.58 | 2.20 | 3.40 |
| Hf | 0.057 | 0.15 | 0.22 | 0.39 | 0.16 | 0.35 | 0.48 | 0.83 |
| Ta | 0.056 | 0.13 | 0.18 | 0.30 | 0.10 | 0.28 | 0.41 | 0.62 |
| W | 0.038 | 0.13 | 0.18 | 0.32 | 0.068 | 0.29 | 0.40 | 0.62 |
| Re | 0.04 | 0.15 | 0.24 | 0.42 | 0.10 | 0.37 | 0.56 | 0.91 |
| Pt | 0.12 | 0.31 | 0.44 | 0.70 | 0.20 | 0.63 | 0.95 | 1.56 |
| Au | 0.20 | 0.56 | 0.84 | 1.18 | 0.32 | 1.07 | 1.65 | 2.43 |

เนื่องจากสปัตเตอริงเป็นกระบวนการเชิงจลน์ ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมมากกว่าที่จะเป็นกระบวนการเชิงเคมีหรือเชิงความร้อน ดังนั้นวัสดุแทบทุกชนิดจึงสามารถนำมาสปัตเตอร์ได้ ถ้าสังเกตุจากข้อมูลอัตราสปัตเตอริงของโลหะข้างต้นจะเห็นว่า อัตราสปัตเตอร์มีค่ารอบๆ 1 และแตกต่างกันในระดับขนาดไม่เกิน 10 เท่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างโลหะต่างชนิดกัน ลักษณะเช่นนี้ตรงกันข้ามกับกระบวนการระเหย (evaporation process) ซึ่งสำหรับโลหะต่างชนิดกันแล้ว ที่อุณหภูมิเดียวกันอัตราการระเหยอาจสูงกว่ากันถึงระดับขนาด 1000 เท่า หรืออาจทำให้โลหะชนิดหนึ่งระเหยได้แต่โลหะอีกชนิดหนึ่งยังไม่ระเหย จากลักษณะที่ครอบคลุมวัสดุอย่างกว้างขวางเช่นนี้ ทำให้สปัตเตอริงเป็นที่น่าสนใจในการประยุกต์ใช้งาน

### 4. เทคนิคสปัตเตอริงและการประยุกต์

การพิจารณาเกี่ยวกับการสปัตเตอร์ที่ผ่านมานั้น ยังไม่มีการกล่าวถึงแหล่งกำเนิดของไอออนบวกซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญของการกำเนิดกระบวนการ เทคนิคสปัตเตอริงสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท ตามลักษณะแหล่งกำเนิดไอออนบวก ประเภทแรกเป็นการสปัตเตอร์ที่ใช้กลไกผลิตและเร่งไอออนบวกโดยตรงภายในโกลวดิสชาร์จ เรียกว่า โกลวดิสชาร์จสปัตเตอริง (glow discharge sputtering) จากบทที่ 2 เราได้เห็นแล้วว่า ภายในดีซีโกลวดิสชาร์จจะมีกระบวนการผลิตและเร่งไอออนบวกของกาซที่ใช้สำหรับการดิสชาร์จให้ชนกับผิวคาโธดตลอดเวลา พลังงานจลน์ของไอออนบวกขณะชนคาโธดมีค่าโดยประมาณเท่ากับพลังงานเนื่องจากการเร่งด้วยความต่างศักย์ของการดิสชาร์จ ซึ่งแปรค่าได้ตั้งแต่ไม่กี่ร้อยโวลท์จนระดับพันโวลท์ โดยขึ้นกับลักษณะสอของการดิสชาร์จ พลังงานระดับนี้สูงเพียงพอที่จะทำให้ไอออนบวกสามารถสปัตเตอร์ผิวคาโธดได้ ดังนั้นเราสามารถใช้ระบบดีซีโกลวดิสชาร์จเป็นระบบสปัตเตอร์ได้ทันที เมื่อกำหนดให้คาโธดของการดิสชาร์จทำหน้าที่เป็นเป้าของการสปัตเตอร์ในขณะเดียวกัน สำหรับในอาร์เอฟโกลวดิสชาร์จก็สามารถใช้สำหรับการสปัตเตอร์ได้เช่นกัน โดยอาศัยการเร่งไอออนบวกด้วย negative dc bias ซึ่งเกิดขึ้นที่ขั้วของการดิสชาร์จ

เทคนิคสปัตเตอริงในดีซีโกลวดิสชาร์จ เรียกว่า ดีซีโกลวดิสชาร์จสปัตเตอริง (dc glow discharge sputtering) หรือดีซีไดโอดสปัตเตอริง(dc diode sputtering) ส่วนเทคนิคสปัตเตอริงในอาร์เอฟโกลวดิสชาร์จ เรียกว่า อาร์เอฟโกลวดิสชาร์จสปัตเตอริง(RF glow discharge sputtering) หรืออาร์เอฟไดโอดสปัตเตอริง (RF diode sputtering) สำหรับเทคนิคสปัตเตอริงที่ใช้โกลวดิสชาร์จซึ่งทำงานภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก เรียกว่า ดีซี หรือ อาร์เอฟแมกนิตรอนสปัตเตอริง (DC or RF magnetron sputtering) ขึ้นกับว่าโกลวดิสชาร์จนั้นเป็นแบบดีซีหรืออาร์เอฟ

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



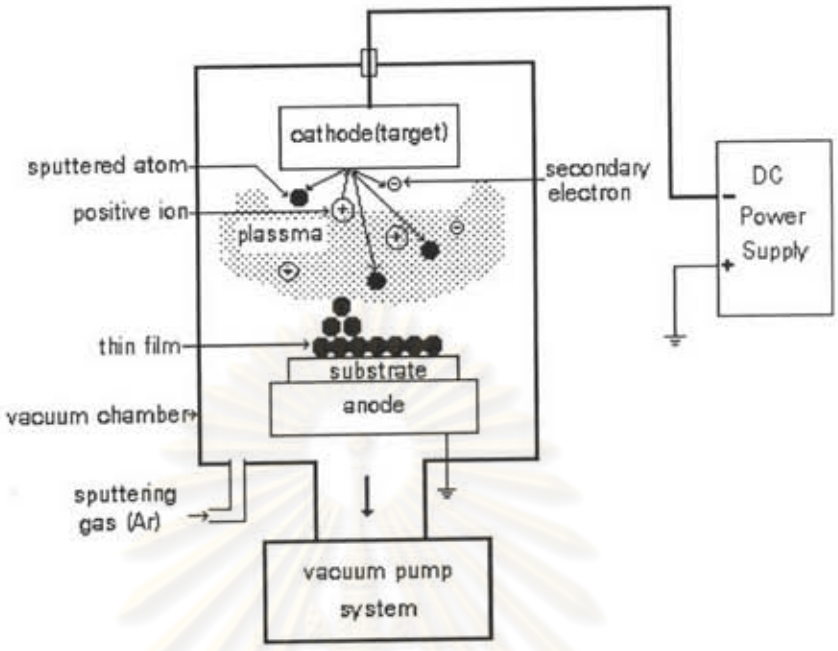
เทคนิคสปัตเตอริงอีกประเภทหนึ่งจะใช้วิธีเร่งไอออนบวกจากแหล่งกำเนิดภายนอกไปชนเป้าซึ่งอยู่ในภาชนะสุญญากาศ เรียกว่า สปัตเตอริงโดยลำไอออน (Ion beam sputtering) สิ่งที่เทคนิคนี้ต่างจากแบบแรก คือ เป้ากับแหล่งกำเนิดไอออนบวกจะแยกส่วนกัน โดยเป้าจะอยู่ในภาชนะสุญญากาศ โดยไม่สัมผัสกับโกลวดิสชาร์จและไม่ได้รับผลใดๆจากกระบวนการผลิตไอออนบวก

สปัตเตอริงได้รับการประยุกต์ใช้ในสองลักษณะคือ การกัดเซาะผิว(surface etching) และการเคลือบฟิล์มบาง (thin film deposition) [36] กรณีแรกผลที่ต้องการคือผิววัสดุภายหลังถูกสปัตเตอร์ ได้แก่ การทำความสะอาด ลักษณะของผิวหน้าผลึก เป็นต้น กรณีหลังเป็นการใช้ประโยชน์อะตอมที่ถูกสปัตเตอร์ออกจากผิววัสดุ โดยนำแผ่นวัสดุรองรับ (substrate) ไปรับและสะสมอะตอมที่หลุดจากเป้าในตำแหน่งที่เหมาะสม อะตอมเหล่านี้สามารถเคลื่อนที่ชนวัสดุรองรับและจับกันเป็นฟิล์มบางเคลือบบนผิวของวัสดุรองรับนั้น เทคนิคนี้เรียกว่า การเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสปัตเตอริง (sputtering deposition) ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้งานที่สำคัญของสปัตเตอริงในปัจจุบัน

## การเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสปัตเตอริง

### 1. หลักการเบื้องต้น

การเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสปัตเตอริงต่อไปนี้ จะหมายถึงการเคลือบฟิล์มบางในระบบโกลวดิสชาร์จเท่านั้น และเพื่อความสะดวกสำหรับอธิบายกลไกเคลือบฟิล์มจะอ้างถึงระบบเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสปัตเตอริงแบบพื้นฐานที่สุด คือ ระบบดีซีไดโอดสปัตเตอริง(dc diode sputtering system) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.5 ประกอบด้วยเป้าสำหรับสปัตเตอร์ซึ่งทำจากวัสดุต้นกำเนิดฟิล์มบาง เป้าทำหน้าที่เป็นคาโธดและต่อกับขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนวัสดุรองรับฟิล์มจะวางไว้ที่อาโนดและห่างจากคาโธดประมาณ 4-10 เซนติเมตร ส่วนประกอบทั้งหมดบรรจุในภาชนะสุญญากาศที่ถูกปั๊มตลอดเวลา กาซสำหรับเป็นตัวสปัตเตอร์ ได้แก่ กาซอาร์กอน จะถูกเติมเข้าในภาชนะสุญญากาศ จนได้ระดับความดันใช้งาน (ระหว่าง 30-120 มิลลิทอรร์) จากนั้นป้อนความต่างศักย์จากแหล่งจ่ายไฟฟ้าจนกระทั่งเกิดโกลวดิสชาร์จ (ในกรณีนี้คือ ดีซีโกลวดิสชาร์จ) ระหว่างเป้ากับอาโนด และสามารถรักษาสภาพที่กระแสและความต่างศักย์ของการดิสชาร์จคงที่ค่าหนึ่ง




รูปที่ 3.5 ระบบดีซีไดโอดสปัตเตอริง

ระหว่างที่ระบบรักษาสภาพการดิสชาร์จได้ด้วยตัวเอง ไอออนบวกที่ผลิตขึ้นในบริเวณ negative glow ถูกเร่งเข้าไปชนคาโธด(เป้า) ในขณะที่อิเล็กตรอนถูกเร่งเข้าหาอาโนด

เมื่อไอออนบวกชนเป้าทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่จะเกี่ยวเนื่องและนำไปสู่การเคลือบฟิล์มบาง คือ การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และการสปัตเตอร์อะตอมของเป้า การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิมีบทบาทในกลไกรักษาสภาพการดิสชาร์จ คือ ทำให้การดิสชาร์จเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่วนอะตอมเป้าที่ถูกสปัตเตอร์จะเคลื่อนที่ออกจากเป้าในทิศทางแบบสุ่ม โดยส่วนหนึ่งสามารถไปถึงวัสดุรองรับและเริ่มก่อตัวเป็นฟิล์มบางขึ้น และโดยอาศัยการดิสชาร์จที่เกิดขึ้นต่อเนื่อง ในที่สุดจะได้ฟิล์มบางของวัสดุต้นกำเนิดฟิล์มที่มีเนื้อฟิล์มต่อเนื่องเคลือบบนผิวของวัสดุรองรับนั้น

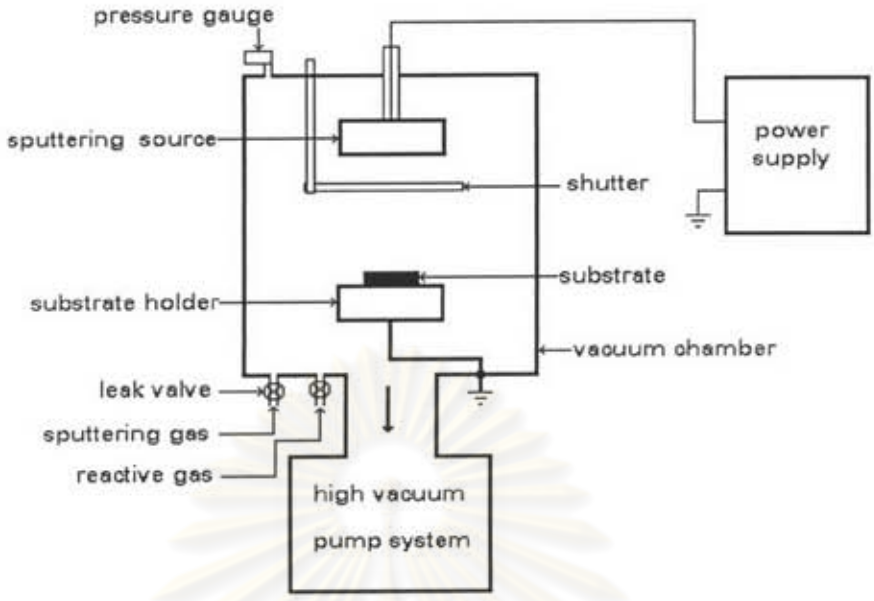
จากสมบัติเฉพาะตัวของกระบวนการสปัตเตอร์ที่เป็นกระบวนการเชิงกล ซึ่งผลิตอนุภาคต้นกำเนิดฟิล์มบางที่มีพลังงานจลน์สูงเมื่อเทียบกับกระบวนการระเหย(evaporation) และสามารถกระทำได้กับวัสดุหลายๆประเภท ทำให้การเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสปัตเตอริงมีข้อดี ได้แก่

- ได้ฟิล์มที่มีความสม่ำเสมอสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเคลือบบนพื้นที่ขนาดใหญ่
- ได้ฟิล์มที่มีผิวเรียบ ยึดแน่นกับวัสดุรองรับ และควบคุมความหนาได้
- ได้ฟิล์มที่มีสมบัติใกล้เคียงกับสมบัติของวัสดุต้นกำเนิดฟิล์มที่อยู่ในรูป bulk และมีเสถียรภาพดี
- ใช้งานได้กว้างขวางกับวัสดุหลายๆ ชนิด ทั้งโลหะ สารผสมหรือวัสดุที่เป็นฉนวน
- ให้อัตราเคลือบฟิล์มสูงเมื่อเทียบกับวิธีระเหย
- มีศักยภาพสูงในการขยายผลจากระดับงานวิจัยในระบบขนาดเล็กไปสู่การผลิตระดับอุตสาหกรรม

## 2. โครงสร้างระบบเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสปัตเตอริง

ในปัจจุบันระบบเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสปัตเตอริงหลายๆแบบได้รับการพัฒนาขึ้น ส่วนใหญ่มีชื่อเรียกตามลักษณะของโกลวดิสชาร์จที่ใช้ ได้แก่ ระบบดีซีไดโอดสปัตเตอริง ระบบอาร์เอฟสปัตเตอริง ระบบดีซีแมกนิตรอนสปัตเตอริง ระบบอาร์เอฟแมกนิตรอนสปัตเตอริง เป็นต้น นอกจากนี้อาจมีชื่อเรียกตามสภาพการทำงานเฉพาะที่เพิ่มเติมหรือดัดแปลงขึ้นนอกเหนือจากหลักการพื้นฐานของโกลวดิสชาร์จ ได้แก่ ระบบสปัตเตอริงแบบรีแอคทีฟ(reactive sputtering) ระบบเสปัตเตอริงแบบไบแอส (bias sputtering) เป็นต้น อย่างไรก็ตามระบบเหล่านี้มีโครงสร้างมาตรฐานสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3.6 [37]

- ภาชนะสุญญากาศ (vacuum chamber) สำหรับบรรจุกาซของการดิสชาร์จและติดตั้งส่วนประกอบอื่น ๆ วัสดุสำหรับทำภาชนะสุญญากาศ ได้แก่ แก้ว เหล็กสเตนเลส หรือโลหะผสม ที่ผ่านการทดสอบความทนต่อสุญญากาศ
- ระบบปั๊มสุญญากาศ (high vacuum pump system)ซึ่งสามารถปั๊มลดความดันในภาชนะสุญญากาศ ก่อนที่จะเริ่มการเคลือบฟิล์มได้ถึงระดับ $10^{-6}$ ทอรร์ หรือต่ำกว่า โดยทั่วไปจะเป็นระบบที่ทำงานร่วมกันระหว่างปั๊มแบบโรตารี่กับปั๊มแพร่ไอน้ำมัน หรือระบบผสมระหว่างปั๊มแบบโรตารี่กับปั๊มเทอร์โบโมเลคิวลา
- หัววัดความดันกาซ(pressure guage)ในภาชนะสุญญากาศพร้อมด้วยระบบวัดและแสดงผล ทั้งในย่านความดันต่ำ และความดันขณะใช้งาน




รูปที่ 3.6 ลักษณะทั่วไปของระบบเคลือบฟิล์มบางโดยการสปัตเตอร์

- แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์(sputtering source)ประกอบด้วยเป้าของการสปัตเตอร์ พร้อมกับแท่นยึด แบ่งตามชนิดของโกลวดิชาร์จได้เป็น 2 แบบคือ แหล่งกำเนิดแบบ DC กับ แหล่งกำเนิดแบบ RF แต่ละแบบแยกย่อยเป็น non-magnetron หรือ magnetron

- แหล่งจ่ายไฟฟ้า(power supply) เพื่อกำเนิดโกลวดิสชาร์จ โดยทั่วไปมีสองชนิดคือ ชนิดกระแสตรง(dc power supply) สำหรับระบบที่ใช้ดีซีโกลวดิสชาร์จ กับชนิดกระแสสลับความถี่ 13.56 MHz (RF power supply) สำหรับระบบที่ใช้อาร์เอฟโกลวดิสชาร์จ

- หน้ากาก (shutter)ใช้สำหรับเปิดปิดฟลักซ์ของอะตอมที่หลุดจากแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์ เพื่อควบคุมความหนาของฟิล์มบาง และสำหรับกั้นฟลักซ์ของอะตอมในขั้นตอนการสปัตเตอร์เพื่อทำความสะอาดผิวหน้าของเป้า

- แท่นวางวัสดุรองรับ(substrate holder) สำหรับวางวัสดุรองรับฟิล์มและเป็นอาโนดของการดิสชาร์จ(เฉพาะในกรณีของดีซีโกลวดิสชาร์จ)

- แหล่งกาซตัวสปัตเตอร์(sputtering gas) สมบัติของกาซสำหรับเป็นตัวสปัตเตอร์ คือ ไม่ทำปฏิกิริยากับเป้าหรือฟิล์มบางที่เกิดขึ้น หรือส่วนประกอบอื่นๆภายในภาชนะสุญญากาศ และ ระบบปั๊มสุญญากาศ นอกจากนี้ต้องเป็นกาซไม่เป็นพิษ และควรมีมวลมากเพื่อสามารถให้อัตราสปัตเตอร์สูง กาซอาร์กอนแม้จะไม่ใช่กาซเฉื่อยซึ่งอะตอมมีมวลมากที่สุด แต่เนื่องจากไม่เป็นพิษ จัดหาง่ายและราคาถูก จึงเป็นที่ใช้กันทั่วไป

นอกจากนี้อาจมีส่วนประกอบเพิ่มเติมสำหรับระบบที่มีจุดประสงค์การทำงานเฉพาะอย่าง เช่น เพื่อการปรับปรุงสมบัติของฟิล์มบาง ส่วนประกอบเหล่านี้ได้แก่

- ตัวทำความร้อน(heater) สำหรับเพิ่มอุณหภูมิวัสดุรองรับพร้อมด้วยระบบวัดและควบคุมอุณหภูมิ
- แหล่งจ่ายไฟฟ้าไบแอส สำหรับป้อนความต่างศักย์ให้กับวัสดุรองรับในกรณีของระบบสปัตเตอริงแบบไบแอส
- เครื่องวิเคราะห์กาซ หรือ optical emission monitor สำหรับวัด partial pressure และ ฟลักซ์ของอะตอมซึ่งถูกสปัตเตอร์
- แหล่งกำเนิดไอออนบวกที่แยกส่วนจากระบบโกลวดิสชาร์จ ใช้สำหรับกระแทกฟิล์มในระหว่างที่กำลังเคลือบ
- แหล่งกาซไวปฏิกิริยา(reactive gas) ได้แก่ ออกซิเจน ไนโตรเจน สำหรับระบบสปัตเตอร์แบบรีแอคทีฟ
- ระบบควบคุมการทำงานอัตโนมัติ

อาจกล่าวได้ว่า ระบบเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสปัตเตอริงส่วนใหญ่มีโครงสร้างหลักเหมือนกัน คือ ภาชนะสุญญากาศ และระบบสุญญากาศ และในทางปฏิบัติเมื่อมีการกล่าวถึงระบบสปัตเตอริง มักจะไม่เอ่ยถึง โครงสร้างเหล่านี้ แต่จะหมายความถึงรูปแบบของแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์และแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามากกว่า ระบบที่ทันสมัยในปัจจุบันมักออกแบบให้เป็นระบบเอนกประสงค์ คือ สามารถปรับเปลี่ยนให้ทำงานได้หลายๆ แบบโดยการสับเปลี่ยนเฉพาะแหล่งกำเนิดของการสปัตเตอร์ เป้าของการสปัตเตอร์หรือแหล่งจ่ายไฟฟ้า ส่วนโครงสร้างหลักอื่นๆยังคงเดิม

### 3. อัตราเคลือบฟิล์ม

การเพิ่มความหนาของฟิล์มต่อหนึ่งหน่วยเวลาหรืออัตราเคลือบฟิล์ม น่าจะเป็นสิ่งแรกที่เป็นจุดสนใจเมื่อมีการเคลือบฟิล์มบางหรือใช้งานระบบเคลือบฟิล์มบาง พิจารณาจากกลไกและสภาพแวดล้อมของการเคลือบฟิล์ม กล่าวได้ว่า ในระบบเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสปัตเตอริงจะมีอัตราเคลือบฟิล์มขึ้นกับปริมาณของอะตอมของเป้าซึ่งถูกสปัตเตอร์ และสภาพการขนส่งอะตอมเหล่านี้ไปยังวัสดุรองรับ เราจะได้อัตราเคลือบฟิล์มสูงถ้าอะตอมของเป้าถูก

สปัตเตอร์ออกมามากและสามารถเคลื่อนที่ไปยังวัสดุรองรับได้สะดวก อัตราเคลือบฟิล์มจะสัมพันธ์กับสภาวะของโกลวดิสชาร์จ คือ กระแส และความต่างศักย์และความดันกาซ ตลอดจนลักษณะของระบบเคลือบฟิล์ม เช่น ระยะระหว่างเป้ากับวัสดุรองรับ เป็นต้น

กระแสของการดิสชาร์จเป็นตัวชี้ปริมาณของไอออนบวกที่ชนเป้า ซึ่งจะส่งผลถึงปริมาณของอะตอมที่ถูกสปัตเตอร์ และต่อเนื่องถึงปริมาณอะตอมที่สามารถไปถึงวัสดุรองรับ ดังนั้น อัตราเคลือบฟิล์มจึงขึ้นกับกระแสการดิสชาร์จ

ความต่างศักย์ของการดิสชาร์จเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดพลังงานของไอออนบวกขณะชนเป้าขณะเดียวกันพลังงานไอออนบวกจะส่งผลต่ออัตราสปัตเตอร์ ในหัวข้อ "อัตราสปัตเตอริง" หน้า 43 ได้แสดงข้อมูลให้เห็นว่า ในช่วงพลังงานของไอออนบวกระหว่าง 100-1000 อิเล็กตรอนโวลท์ อัตราสปัตเตอร์จะสูงขึ้นแบบเชิงเส้น ดังนั้นการเพิ่มความต่างศักย์จะมีผลให้อัตราเคลือบฟิล์มสูงขึ้นในที่สุด อย่างไรก็ตามการเพิ่มความต่างศักย์ ก็อาจเป็นสาเหตุที่ไปลดอัตราเคลือบฟิล์ม โดยเฉพาะในระบบที่มีความดันกาซสำหรับการสปัตเตอร์ต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากไอออนบวกพลังงานสูงสามารถทำให้อะตอมจากการสปัตเตอร์ที่ไปกระทบเป้ามีพลังงานจลน์สูงพอที่จะสปัตเตอร์ฟิล์มได้

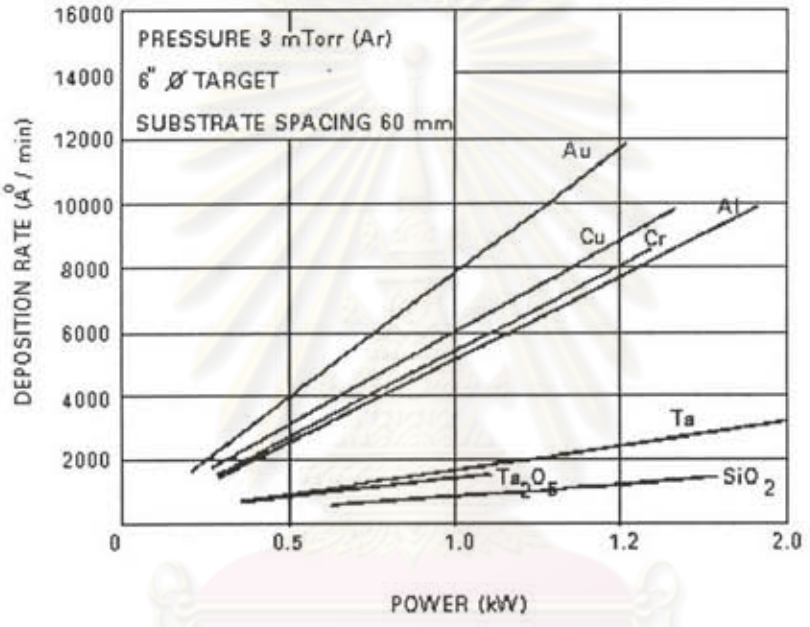
อะตอมซึ่งถูกสปัตเตอร์จะชนกับโมเลกุลของกาซในระหว่างเคลื่อนที่ออกจากเป้าไปยังวัสดุรองรับ โดยที่ความถี่ของการชนสูงขึ้นเมื่อความดันกาซเพิ่มขึ้น ผลการชนคือ ทำให้อะตอมเหล่านี้กระเจิงและเปลี่ยนทิศทาง อะตอมของเป้าที่ถูกสปัตเตอร์สามารถเคลื่อนที่ถึงวัสดุรองรับโดยตรงเมื่อความดันกาซต่ำ และจะอยู่ในลักษณะการแพร่ที่ความดันสูง ดังนั้นการเพิ่มความดันกาซจะลดโอกาสที่อะตอมเคลื่อนที่ถึงวัสดุรองรับ ทำให้อัตราเคลือบฟิล์มลดลง การเพิ่มระยะห่างจากเป้าถึงวัสดุรองรับ จะส่งเสริมผลของการกระเจิงของอะตอมที่ถูกสปัตเตอร์กับอะตอมกาซ [38] ทำให้อัตราเคลือบฟิล์มลดลง

แม้ว่ากระแส ความต่างศักย์ และความดันกาซของการดิสชาร์จ ต่างก็มีอิทธิพลต่ออัตราเคลือบฟิล์ม แต่เนื่องจากเป็นปริมาณซึ่งขึ้นต่อกัน ดังนั้นการสังเกตุผลกระทบของตัวแปรตัวใดตัวหนึ่งต่ออัตราเคลือบฟิล์มอย่างอิสระจึงไม่สามารถทำได้ ในทางปฏิบัติมักเลือกที่จะละเลยตัวแปรที่มีผลน้อยที่สุด ควบคุมตัวแปรอีกตัวให้คงที่ให้คงที่แล้วจึงศึกษาผลจากตัวแปรที่สนใจ เช่น วัดอัตราเคลือบฟิล์มในเทอมความสัมพันธ์กับกระแสการดิสชาร์จที่ความดันคงที่ นอกจากนี้อาจวัดอัตราเคลือบฟิล์มในเทอมความสัมพันธ์กับกำลังไฟฟ้าที่ความดันคงที่ ซึ่งจะเป็นการรวมผลของกระแสและความต่างศักย์ของการดิสชาร์จเข้าด้วยกัน วิธีนี้ใช้มากโดยเฉพาะในระบบอาร์เอฟสปัตเตอริง

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเคลือบฟิล์มบาง(R) กับกระแส (I) และ ความต่างศักย์ (V) ของการดิสชาร์จ ความดันกาซ(P) และระยะจากเป้าถึงวัสดุรองรับ(l) สามารถเขียนโดยประมาณในรูป

$$R\alpha\frac{IV}{Pl}$$

ความสัมพันธ์นี้สอดคล้องกับข้อมูลจากการทดลองส่วนใหญ่ ซึ่งแสดงว่าอัตราเคลือบฟิล์มบางขึ้นกับกำลังไฟฟ้าแบบเชิงเส้น ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.7



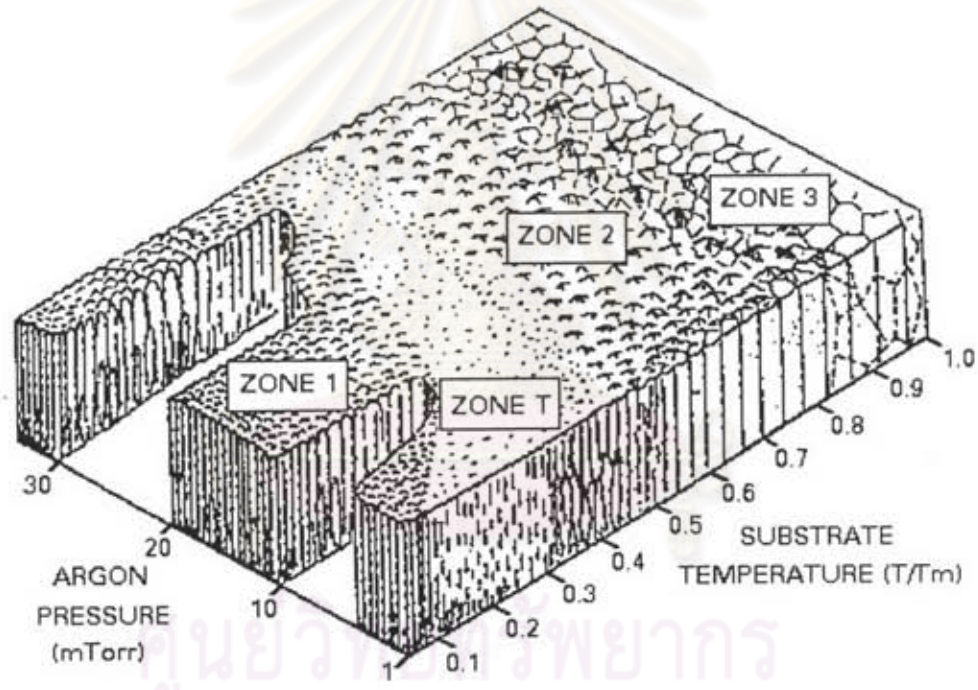

รูปที่ 3.7 อัตราเคลือบฟิล์มในระบบสปัตเตอร์แบบแมกนิตรอนระนาบ [39]

## 4. โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบาง (microstructure of thin film)

เมื่ออะตอมของการเคลือบตกกระทบวัสดุรองรับ สภาพเคลื่อนที่ได้ของอะตอมเหล่านี้ในขณะก่อตัวเป็นฟิล์มบางจะเป็นตัวแปรสำคัญที่กำหนดโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบางในขั้นสุดท้าย [40] ฟิล์มบางจะเกิดโครงสร้างสมบูรณ์หรือมีความบกพร่องน้อย ถ้าอะตอมของการเคลือบสามารถเคลื่อนที่หรือแพร่ได้ดี เนื่องจากไปเพิ่มโอกาสการจัดเรียงอย่างเป็นระเบียบ

ในระบบเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสปัตเตอริง สภาพเคลื่อนที่ได้ของอะตอมบนผิววัสดุรองรับและผิวฟิล์มที่กำลังก่อตัวจะได้รับอิทธิพลจาก ธรรมชาติและอุณหภูมิของวัสดุรองรับ และอิทธิพลจากสภาพแวดล้อมของโกลวดิสชาร์จ ซึ่งทำให้ฟิล์มที่กำลังก่อตัวถูกชนด้วยของอนุภาคต่างๆ ตลอดเวลา เช่น อะตอมจากการสปัตเตอร์ อิเล็กตรอน อะตอมกาซที่เป็นกลาง และโดยเฉพาะอย่างยิ่งการชนของไอออนบวก

โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบางจากการสปัตเตอร์ สามารถแบ่งได้เป็น 4 โซน ตามอัตราส่วน $T_s/T_m$ และความดันกาซอาร์กอน โดย $T_s$ เป็นอุณหภูมิของวัสดุรองรับ และ $T_m$ เป็นจุดหลอมเหลวของวัสดุต้นกำเนิดฟิล์ม [41] แสดงดังรูปที่ 3.8




รูปที่ 3.8 แบบจำลองโซน(Zone model)แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิของวัสดุรองรับและความดันกาซอาร์กอน ที่มีต่อโครงสร้างของฟิล์มบางของโลหะที่เคลือบโดยวิธีสปัตเตอริง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โครงสร้างโซน 1 ประกอบด้วยแท่ง grain เรียว(tapered column grain) เรียงกันอย่างหลวมๆ ระหว่าง grain เหล่านี้มีช่องว่าง (viod) ค่อนข้างมาก ฟิล์มโครงสร้างแบบนี้เกิดขึ้นเมื่ออัตราส่วน $T_s/T_m$ มีค่าน้อยกว่า 0.3 ความดันสูงกว่า 10 มิลลิทอรร์ เนื่องจากอุณหภูมิระดับนี้สภาพเคลื่อนที่ได้ของอะตอมบนผิววัสดุรองรับหรือผิวฟิล์มที่กำลังก่อตัวน้อยมาก และไม่สามารถขจัดอิทธิพลการบัง (shadowing effect) ทำให้อะตอมของการเคลือบส่วนใหญ่เกาะติดตรงจุดสูงของผิวหน้าฟิล์มและมีส่วนน้อยที่สามารถเข้าถึงส่วนที่เป็นหลุม(Valleys) ปรากฏการณ์เช่นนี้จะมากขึ้นในกรณีที่มุมตกกระทบของอะตอมของการคลือบเป็นมุมเอียง สิ่งที่สามารถลดการเคลื่อนที่ได้ของอะตอมบนผิวฟิล์มหรือเบนทิศตกกระทบของอะตอมออกจากแนวตั้งฉากจะเป็นปัจจัยส่งเสริมการเติบโตของฟิล์มโครงสร้างโซน 1 ได้แก่ ความขรุขระของวัสดุรองรับ การเพิ่มความดันกาซ เป็นต้น ฟิล์มซึ่งมีโครงสร้างโซน 1 มีผิวหน้าขรุขระ เสถียรภาพต่ำ โครงสร้างภายในของผลึกไม่ชัดเจน(poorly defined) และสมบัติต่างจาก สมบัติของ Bulk มาก

โครงสร้างโซน 2 ประกอบด้วย column grains อัดกันค่อนข้างแน่น เกิดขึ้นเมื่อ $T_s/T_m$ มีค่าระหว่าง 0.3-0.5 อุณหภูมิวัสดุรองรับระดับนี้ทำให้อะตอมของการเคลือบสามารถแพร่บนผิวฟิล์มได้มากขึ้นและเป็นพารามิเตอร์เด่นของการปลูกฟิล์ม การเติมอะตอมในที่ว่างเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิผล ขนาดความกว้างของ grain เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิวัสดุรองรับและอาจขยายขนาดได้ยาวตลอดตามแนวความหนาของฟิล์ม ฟิล์มบางในโครงสร้างโซน 2 แสดงความแกร่งเชิงกลสูง

โครงสร้างโซน 3 เกิดขึ้นเมื่อ $T_s/T_m$ สูงกว่า 0.5 ซึ่งเป็นระดับที่ทำให้ bulk diffusion มีอิทธิพลสำคัญต่อโครงสร้างขั้นสุดท้ายของฟิล์ม ฟิล์มจะบางประกอบด้วย grain สม่ำเสมอและมีสมบัติใกล้เคียงกับ bulk

โครงสร้างโซน T (transition) ประกอบด้วย poorly defined fibrous grains อัดกันแน่นโดยไม่มีช่องว่างตรงรอยต่อ ลักษณะโครงสร้างแบบนี้นิยามได้ว่าเป็นรูปแบบจำกัด(limit form) ของฟิล์มในโครงสร้างโซน 1 ที่เคลือบบนวัสดุรองรับที่มีความเรียบอนันต์และอัตราส่วน $T_s/T_m$ เป็นศูนย์ การเคลือบในช่วงอุณหภูมิเดียวกันสามารถเปลี่ยนโครงสร้างจากโซน 1 เป็นโครงสร้างโซน T ได้ ถ้าอะตอมของการเคลือบตกกระทบตั้งฉากบนวัสดุรองรับซึ่งมีผิวเรียบและมีพลังงานจลน์ขณะตกกระทบสูง หรือมีปัจจัยเสริมการแพร่ของอะตอมบนผิวฟิล์มให้สูงพอจนสามารถเอาชนะความขรุขระของผิววัสดุรองรับและการจับกลุ่มของอะตอมตอนเริ่มต้น ลักษณะเด่นของฟิล์มบางโครงสร้างโซน T คือ เป็นฟิล์มผิวเรียบ ความหนาแน่นสูง

โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบางที่เคลือบภายใต้สภาวะแวดล้อมของโกลวดิสชาร์จจะได้รับอิทธิพลอย่างมากจากการกระแทกฟิล์มด้วยอนุภาคต่างๆที่มีในโกลวดิสชาร์จ ที่สำคัญคือการกระแทกของไอออนบวก(Ion bombardment) สมบัติของฟิล์มบางที่เหมาะสมกับการใช้งานหลายๆด้าน เป็นผลของการกระแทกฟิล์มด้วยไอออนบวก ได้แก่ สภาพต้านทานไฟฟ้า ความแข็งและความเค้นภายใน สภาพสะท้อนแสง ความหนาแน่นและการยึดแน่นแน่นกับวัสดุรองรับ

โดยปกติวัสดุรองรับซึ่งไม่เชื่อมต่อทางไฟฟ้าหรือเป็นฉนวนที่สัมผัสกับโกลวดิสชาร์จจะถูกชนด้วยไอออนบวกตลอดเวลา เนื่องจากถูกประจุ (charged)ให้มีความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นลบเมื่อเทียบกับศักย์ของพลาสมา (ดูหัวข้อ "การกระจายความต่างศักย์และสนามไฟฟ้าในดีซีโกลวดิสชาร์จ" บทที่ 2) ความต่างศักย์นี้สามารถเร่งไอออนบวกจากบริเวณพลาสมาของโกลวดิสชาร์จให้ชนผิวฟิล์มที่กำลังก่อตัวด้วยพลังงานจลน์ระหว่าง 5-30 eV การชนผิวฟิล์มที่กำลังก่อตัวด้วยไอออนบวกเป็นกลไกในระบบสปัตเตอริงที่ทำให้เกิดฟิล์มโครงสร้างอัดแน่นโซน T เนื่องจากพลังงานจลน์ของไอออนบวกที่ถ่ายทอดให้กับอะตอมบนผิวฟิล์ม จะทำให้สภาพเคลื่อนที่ได้ของอะตอมเหล่านี้สูงขึ้น ไอออนบวกที่ชนสามารถกัดเซาะฟิล์มบริเวณที่ขรุขระและเกลี่ยอะตอมให้ลงส่วนบริเวณที่เป็นหลุม หรือสามารถกระแทกอะตอมให้ฝังในเนื้อฟิล์ม(recoil implantation) จึงมักพบว่าการเคลือบฟิล์มบางในระบบสปัตเตอร์ที่อุณหภูมิของวัสดุรองรับต่ำ จะได้ฟิล์มโครงสร้างโซน T แทนโครงสร้างโซน 1

ระดับพลังงานจลน์ของไอออนบวกที่กระแทกฟิล์มสามารถเพิ่มได้โดยตรงด้วยการป้อนศักย์ไฟฟ้าลบแยกต่างหากให้กับวัสดุรองรับ เทคนิคนี้ใช้กันมากในการปรับสมบัติของฟิล์มบางให้เข้าใกล้กับ Bulk เรียกว่า เทคนิคการไบแอส(Bias technique) ซึ่งเป็นที่มาของระบบสปัตเตอริงแบบไบแอส การไบแอสจะมีขอบเขตจำกัดคือ ความต่างศักย์ที่ป้อนให้กับวัสดุรองรับต้องไม่ทำให้พลังงานของไอออนบวกสูงถึงขนาดที่ทำให้ฟิล์มถูกสปัตเตอร์ หรือเกิดการฝังตัวของไอออนบวกในเนื้อฟิล์ม โดยทั่วไปใช้ระหว่าง -30 ถึง -300 โวล์ท

ความดันกาซเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อโครงสร้างของฟิล์มบาง อะตอมของกาซที่เป็นกลางซึ่งเป็นอนุภาคส่วนใหญ่ในโกลวดิสชาร์จ เป็นตัวทำให้เกิดการกระเจิงของอะตอมจากการสปัตเตอร์และอนุภาคอื่นๆ ที่เดินทางไปยังวัสดุรองรับ ส่งผลในการลดพลังงานจลน์และกระจายทิศทางตกกระทบของอนุภาคเหล่านั้น [38] ลดอิทธิพลจากการชนของไอออนบวก ดังนั้นการเคลือบฟิล์มภายใต้ความดันกาซสูงจึงมักจะได้ฟิล์มบางที่มีโครงสร้างโซน 1 การลดความดันกาซจะส่งเสริมการเกิดฟิล์มโครงสร้าง อัดแน่นแบบโซน T หรือแม้แต่โครงสร้างโซน 2 หรือโซน 3

**ระบบสปัตเตอริงแบบดีซีแมกนิตรอน**

ระบบดีซีแมกนิตรอนสปัตเตอริงเป็นระบบเคลือบฟิล์มบางแบบหนึ่งที่พัฒนามาจากระบบดีซีไดโอดสปัตเตอริง โดยมีส่วนเพิ่มเติม คือ การใส่สนามแม่เหล็กแนวขนานที่บริเวณเหนือคาโธด(เป้า) ผลจากสนามแม่เหล็กนี้ทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่หลุดจากคาโธดเปลี่ยนไป โดยจะถูกบังคับให้เคลื่อนที่เป็นรูปไซคลอยด์ กระโดดไปบนผิวคาโธดตามแนวของสนาม $\vec{E}x\vec{B}$ และค่อยๆเลื่อนตัดสนามแม่เหล็กเข้าหาอาโนดอย่างช้าๆโดยอาศัยชนกับอนุภาคของกาซ ดังรายละเอียดที่เสนอไว้ในหัวข้อสุดท้ายของบทที่ 2 ลักษณะการพยายามกักอิเล็กตรอนทำให้อิเล็กตรอนมีโอกาสจะไอออไนซ์อะตอมกาซได้มากขึ้น ซึ่งส่งผลต่อสมบัติของโกลวดิสชาร์จและทำให้โกลวดิสชาร์จแบบดีซีแมกนิตรอนมีข้อได้เปรียบหลายประการ เมื่อเทียบกับแบบดีซีไดโอด เช่น สามารถลดความดันกาซสำหรับสร้างการดิสชาร์จได้ถึงระดับต่ำกว่า 10 มิลลิทอรร์ สามารถลดความต่างศักย์และเพิ่มกระแสของการดิสชาร์จที่ความดันกาซเท่ากัน เพิ่มอัตราการสปัตเตอร์และอัตราการเคลือบฟิล์ม เป็นต้น

**1. อิทธิพลของสนามแม่เหล็กต่อลักษณะส่อของการดิสชาร์จ**

การเพิ่มโอกาสสร้างการไอออไนซ์ของอิเล็กตรอนเนื่องจากสนามแม่เหล็กขนานกับคาโธดสามารถทำให้การดิสชาร์จสามารถเกิดได้ในช่วงความดันต่ำเมื่อเทียบกับดีซีโกลวดิสชาร์จ ซึ่งอาจพิจารณาในเชิงคุณภาพได้ว่า เป็นการเพิ่มความดันกาซยังผล (effective gas pressure: Pe) ให้กับอิเล็กตรอน โดยคำนวนได้จากสมการ [42]

$$P_e = P[1 + (\omega\tau)^2]^{1/2} \qquad (3.3)$$

โดย P เป็นความดันจริง

$\omega$ เป็นความถี่ไซโคลตรอนของอิเล็กตรอน

$\tau$ เป็นเวลาอิสระเฉลี่ยของอิเล็กตรอน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จาก $$\omega = \frac{eB}{m}$$

และ $$\tau = \frac{\lambda_0}{P[\frac{2e}{m}V_a]^{1/2}}$$

โดย $(e/m_e)$ เป็นค่าประจุต่อมวลของอิเล็กตรอน

$\lambda_0$ และ $V_a$ เป็นระยะทางอิสระเฉลี่ยของอิเล็กตรอนที่ 1 torr และ ความต่างศักย์ของการดิสชาร์จตามลำดับ

จะได้

$$\omega\tau = (\frac{e}{m})^{1/2}\frac{\lambda_0 B}{(2V_a)^{1/2}P} \qquad (3.4)$$

แทนค่า $\omega\tau$ จากสมการ (3.4) ในสมการ (3.3) จะได้

$$P_e = [P^2 + (\frac{e}{m})\frac{\lambda_0^2 B^2}{2V_a}]^{1/2} \qquad (3.5)$$

สำหรับกาซอาร์กอนความดัน $1\times10^{-5}$ ทอรร์ $\lambda_0=5\times10^{-2}$ เซนติเมตร $V_a=1000$ โวลท์ และสนามแม่เหล็กขนาด 100 เกาส์ โดยสมการ (3.5) คำนวนความดันยังผลได้เป็น $5\times10^{-2}$ ทอรร์ หมายความว่า ความน่าจะเป็นของการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมของกาซที่ความดัน $1\times10^{-5}$ ทอรร์ ในสนามแม่เหล็กขนาด 100 เกาส์ จะเท่ากับที่ความดัน $5\times10^{-2}$ ทอรร์ เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็ก หรือกล่าวได้ว่า ที่ความดันกาซและความต่างศักย์เท่ากันสนามแม่เหล็ก 100 เกาส์ สามารถเพิ่มโอกาสการไอออไนซ์ได้สูงกว่าเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กประมาณ 5000 เท่า

จากการคำนวนข้างต้นจะเห็นว่า สนามแม่เหล็กแนวขนานช่วยให้การดิสชาร์จสามารถเกิดขึ้นได้ที่ความดันต่ำมาก โดยทั่วไปสามารถลดความดันได้ต่ำกว่า 10 มิลลิทอรร์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มสนามแม่เหล็กที่ใช้ด้วย ระดับการไอออไนซ์ที่สูงขึ้นเนื่องจากสนามแม่เหล็กจะทำให้สภาพนำไฟฟ้าของโกลวดิสชาร์จสูงขึ้น ส่งผลให้กระแสการดิสชาร์จสูงขึ้นและความต่างศักย์ของการดิสชาร์จลดลงเมื่อใช้ความดันกาซและกำลังไฟฟ้าเท่าเดิม ข้อสังเกตุในสมการ (3.5) คือ ถ้าความเข้มสนามแม่เหล็กคงที่แล้ว การเพิ่มความต่างศักย์ของการดิสชาร์จจะมีผลในการลดลงของความดันยังผลของอิเล็กตรอน

## 2. อิทธิพลของสนามแม่เหล็กต่ออัตราเคลือบฟิล์ม

การกักอิเล็กตรอนในบริเวณใกล้ผิวเป้าโดยสนามแม่เหล็กแนวขนานทำให้การโกลว์มีความเข้มมากใกล้ๆกับผิวเป้า ไอออนบวกที่ถูกผลิตจากการโกลว์ในบริเวณนี้ส่วนใหญ่จะถูกเร่งผ่าน cathode sheath และชนเป้าด้วยพลังงานจากความต่างศักย์ทั้งหมดของการดิสชาร์จ ซึ่งโดยทั่วไปมีค่าระหว่าง 200-1000 โวลท์ ค่านี้สอดคล้องกับพลังงานของไอออนบวก 200-1000 อิเล็กตรอนโวลท์ ซึ่งเป็นระดับที่ให้การสปัตเตอร์มีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับวัสดุหลายชนิด เช่น อลูมิเนียม ทองแดง เป็นต้น นอกจากนี้เนื่องจากสภาพเคลื่อนที่ได้ของอิเล็กตรอนในทิศตั้งฉากกับเป้าลดลง กระแสการดิสชาร์จที่วัดได้ส่วนใหญ่จึงเป็นกระแสของไอออนบวกที่ชนกับคาโธด ซึ่งทั้งขนาดพลังงานจลน์ของไอออนบวกขณะชนเป้าที่เหมาะสมและสัดส่วนกระแสไอออนบวกที่เพิ่มขึ้น ทำให้ได้อัตราการสปัตเตอร์สูง

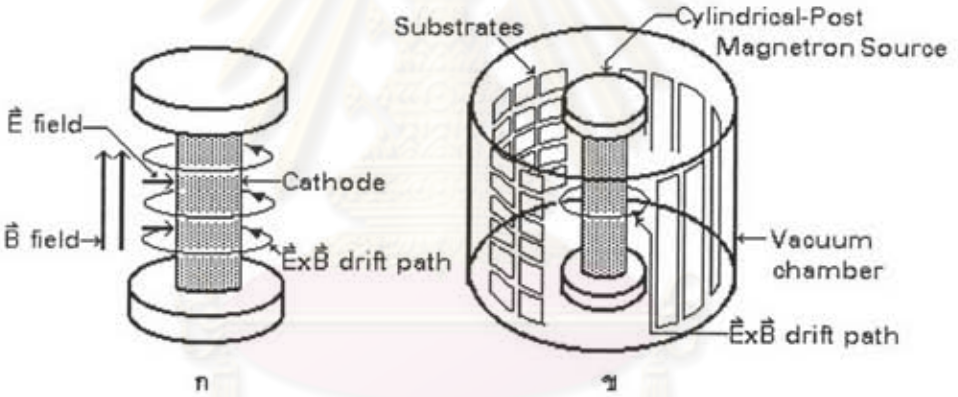
เนื่องจากการดิสชาร์จสามารถเกิดขึ้นที่ความดันกาซต่ำ อะตอมที่ถูกสปัตเตอร์จากเป้ามีการกระเจิงน้อยมาก ส่วนใหญ่จะไปถึงวัสดุรองรับโดยตรง ลักษณะเช่นนี้เมื่อรวมกับการที่อัตราการสปัตเตอร์สูงดังเหตุผลข้างต้น ทำให้ระบบเคลือบฟิล์มบางแบบดีซีแมกนิตรอนสปัตเตอริงมีอัตราการเคลือบฟิล์มสูงมาก สามารถเพิ่มถึงระดับ 1 ไมครอนต่อนาที (ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.7) ซึ่งคิดเป็นประมาณ 10 เท่าของอัตราเคลือบที่ได้จากระบบดีซีไดโอดทั่วๆไป

## 3. ประเภทของระบบดีซีแมกนิตรอนสปัตเตอริง

เมื่อกล่าวถึงประเภทของระบบดีซีแมกนิตรอนสปัตเตอริง มักจะหมายถึง รูปแบบของแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์ (sputtering source) ในระบบนั้น แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบดีซีแมกนิตรอนรูปแบบต่างๆได้รับการพัฒนาขึ้น โดยมีหลักการพื้นฐานเดียวกันที่มุ่งใช้ประโยชน์จากการกักอิเล็กตรอนด้วยสนามแม่เหล็กแนวขนานกับผิวเป้า พิจารณาได้จากการจัดวางแนวของสนามแม่เหล็กบนผิวเป้าจะอยู่ในลักษณะเหมือนกัน คือ ทำให้แนวของสนาม $\vec{E}x\vec{B}$ เป็นเส้นทางปิดบนผิวเป้าเพื่อให้การกักอิเล็กตรอนมีประสิทธิผลสูงสุด

แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบดีซีแมกนิตรอนสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ แมกนิตรอนทรงกระบอก (cylindrical magnetron ) กับแมกนิตรอนระนาบ (planar magnetron)

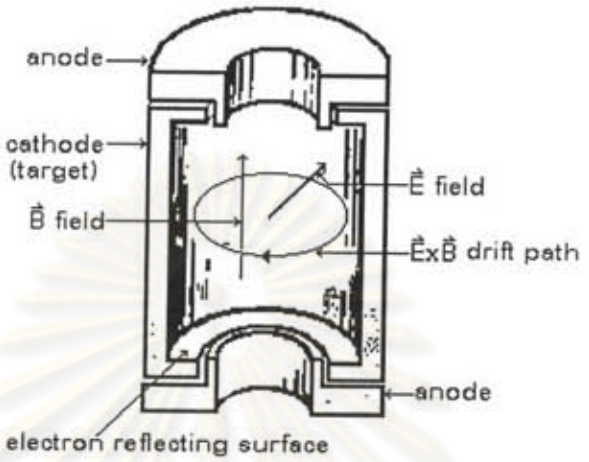
แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบดีซีแมกนิตรอนทรงกระบอก แบ่งได้เป็นสองแบบ แบบแรกเรียกว่า cylindrical-post magnetron มีลักษณะดังรูปที่ 3.9ก เป้าเป็นทรงกระบอกซึ่งวางอยู่ในแนวแกนกลางของภาชนะสุญญากาศ สนามแม่เหล็กขนาดความเข้มสม่ำเสมอวางตัวในแนวขนานกับผิวเป้าตามแนวแกนของทรงกระบอก ส่วนสนามไฟฟ้าอยู่ในแนวรัศมีของทรงกระบอก การวางตัวของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าแบบนี้จะทำให้แนวของสนาม $\vec{E}x\vec{B}$ เป็นเส้นทางปิดวนรอบผิวเป้า โดยอยู่บนระนาบที่ตั้งฉากกับแกนทรงกระบอก การกักอิเล็กตรอนจะเกิดขึ้นสม่ำเสมอทั่วผิวเป้าซึ่งเป็นผลดีคือ ทำให้ความเข้มของการดิสชาร์จ ตลอดจนบริเวณการสปัตเตอร์ครอบคลุมบนผิวเป้าเท่าๆ กันทุกส่วน จึงสามารถใช้ประโยชน์เป้าได้เต็มพื้นที่ แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบแมกนิตรอนรงกระบอก จะให้อะตอมที่ถูกสปัตเตอร์กระจายออกไปทุกด้านรอบเป้า แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบนี้จึงเหมาะสำหรับการเคลือบฟิล์มบางบนวัสดุรองรับ ขนาดเล็กจำนวนมากพร้อมๆกัน วัสดุรองรับจะวางบนผนังของภาชนะสุญญากาศ (ดูรูปที่ 3.9 ข)




รูปที่ 3.9 ก. แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบ cylindrical-post magnetron
ข. ระบบเคลือบฟิล์มที่ใช้ cylindrical-post magnetron

แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบดีซีแมกนิตรอนทรงกระบอกอีกแบบหนึ่ง คือ cylindrical-hollow magnetron แสดงดังรูปที่ 3.10 มีลักษณะเป็นส่วนกลับของ cylindrical-post magnetron โดยเป้าจะเป็นทรงกระบอกกลวงและใช้ผิวด้านในของทรงกระบอกเป็นบริเวณที่ถูกสปัตเตอร์ สนามแม่เหล็กจะวางตัวแนวขนานกับผิวด้านในตามแนวแกนของทรงกระบอก ส่วนสนามไฟฟ้าจะตั้งฉากกับผิวด้านในของทรงกระบอกและพุ่งเข้าหาผนังของทรงกระบอก แนวของสนาม $\vec{E}x\vec{B}$จะวนเป็นวงกลมบนระนาบที่ตั้งฉากกับแกนทรงกระบอก วัสดุรองรับฟิล์มจะวาง

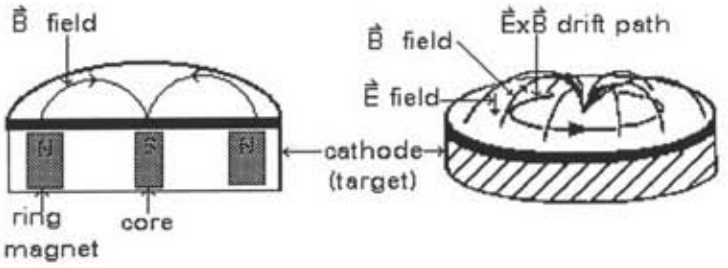
อยู่ภายในทรงกระบอก แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบ cylindrical-hollow magnetron จะให้ฟลักซ์ของอะตอมซึ่งถูกสปัตเตอร์เท่ากัน ณ ทุกๆจุดภายในทรงกระบอก ทำให้เหมาะสำหรับการเคลือบฟิล์มบางบนวัสดุรองรับที่มีรูปร่างซับซ้อน




รูปที่ 3.10 แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบ cylindrical-hollow magnetron

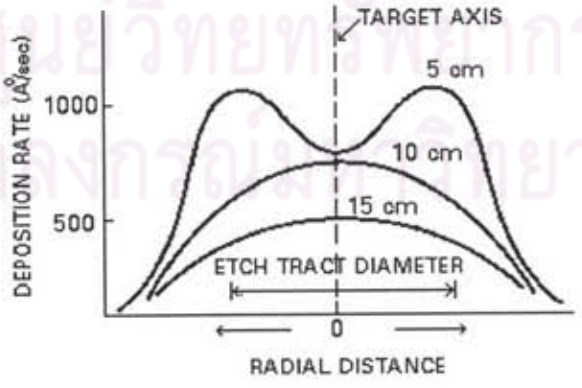
สำหรับแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบดีซีแมกนิตรอนระนาบแบ่งเป็นสองแบบ คือ แบบวงกลม (circular plarnar magnetron) กับแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า(rectanguular plarnar magnetron)

แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบดีซีแมกนิตรอนระนาบวงกลม ซึ่งมีลักษณะแสดงดังรูปที่ 3.11 ประกอบด้วยแผ่นเป้าวงกลม ด้านหลังประกบด้วยแม่เหล็กในลักษณะที่ให้ขั้วแม่เหล็กขั้วหนึ่งอยู่ตรงตำแหน่งจุดศูนย์กลางเป้า ส่วนขั้วแม่เหล็กอีกขั้วหนึ่งอยู่ในแนวขนานกับเส้นรอบวง ในทางปฏิบัติมักใช้แม่เหล็กฐาวรแบบวงแหวนและมีแกนกลาง(ดูรูปที่ 3.11ก) ซึ่งจะได้เส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดพุ่งตัดเป้าร่วมกันที่จุดศูนย์กลางแล้วโค้งกระจายออกไปเหนือผิวเป้าตามแนวรัศมี และพุ่งตัดเป้าอีกครั้งที่ขั้วแม่เหล็กด้านใกล้กับขอบนอก สนามแม่เหล็กส่วนที่ประมาณได้ว่าขนานกับเป้าจะปกคลุมเป้าเป็นพื้นที่วงแหวน ซึ่งอยู่ระหว่างจุดศูนย์กลางเป้ากับแนวที่เส้นแรงแม่เหล็กพุ่งตัดเป้าด้านใกล้กับขอบนอก เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กวางตัวตามแนวรัศมีและสนามไฟฟ้ามีทิศพุ่งเข้าสู่เป้า ดังนั้นแนวของสนาม $\vec{E}x\vec{B}$ จะวนเป็นวงกลมบนระนาบที่ขนานกับผิวเป้า(ดูรูปที่ 3.11ข) อิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งหลุดจากเป้าเนื่องจากการชนของไอออนบวกจะถูกกักในบริเวณพื้นที่วงแหวน ทำให้ได้ความเข้มของการดิสชาร์จและการสปัตเตอร์เป้าเกิดขึ้นมากกว่าบริเวณอื่น



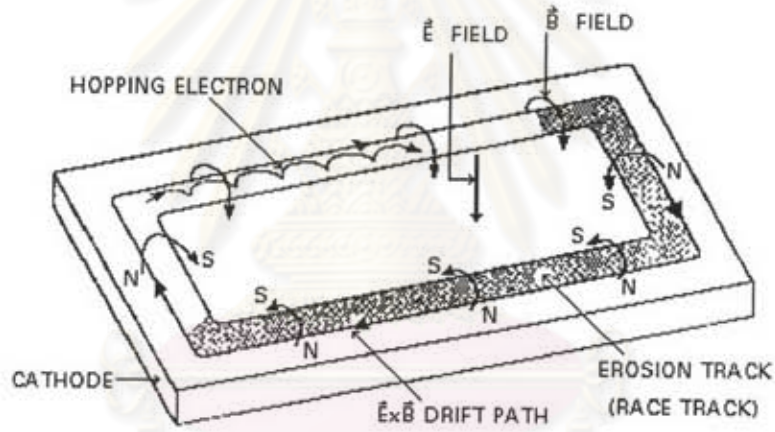

รูปที่ 3.11 แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบ circular-planar magnetron
ก. ภาพภาคตัดขวางแสดงการวางแม่เหล็กและแนวเส้นแรงแม่เหล็ก
ข. แสดงแนวของ $\vec{E}x\vec{B}$ บนผิวเป้า

ลักษณะการโกลวรูปวงแหวนทำให้แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบแมกนิตรอนระนาบวงกลมมีข้อเสีย คือ เกิดความไม่สม่ำเสมอของการกัดเซาะเป้า โดยทั่วไปเป้าของแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบนี้จะถูกกัดเซาะเป็นร่องตามแนววงแหวนของการกักอิเลคตรอน ทำให้ไม่สามารถใช้ประโยชน์เป้าได้เต็มพื้นที่ นอกจากนี้ยังส่งผลให้การกระจายความหนาของฟิล์มบางตามแนวรัศมีบนระนาบของวัสดุรองรับซึ่งวางขนานกับระนาบของเป้า มีลักษณะที่ขึ้นกับระยะระหว่างเป้ากับวัสดุรองรับฟิล์ม [43,44] แสดงดังรูปที่ 3.12 ถ้าวัสดุรองรับไม่ห่างจากเป้ามากนัก การกระจายความหนาจะสะท้อนลักษณะการกัดเซาะเป้า คือ ฟิล์มมีความหนามากในบริเวณที่ตรงกับวงแหวนการกัดเซาะเป้า เมื่อเลื่อนวัสดุรองรับฟิล์มห่างจากเป้ามากขึ้น ความหนาของฟิล์มที่ได้จะกระจายสม่ำเสมอมากขึ้น ฟิล์มบางที่มีความหนาที่สม่ำเสมอจะได้จากการจัดระยะระหว่างเป้าที่เหมาะสมและต้องหมุนหรือเลื่อนวัสดุรองรับผ่านเป้า [45]

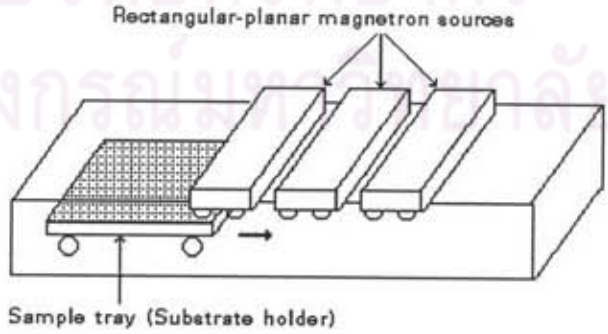



รูปที่ 3.12 การกระจายความหนาของฟิล์มบางจากแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบแมกนิตรอนระนาบวงกลม บนระนาบของวัสดุรองรับที่ห่างจากผิวเป้าระยะต่างๆกัน [46]

แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบดีซีแมกนิตรอนระนาบสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะคล้ายกับแบบระนาบวงกลม แต่เปลี่ยนจากเป้าวงกลมเป็นเป้าสี่เหลี่ยมผืนผ้า แสดงดังรูปที่ 3.13 การจัดวางแม่เหล็กจะอยู่ในลักษณะที่ให้แนวของสนาม $\vec{E}x\vec{B}$ บนผิวเป้ารวมทั้งแนวการกัดเซาะเป้าปรากฏเหมือนกับลู่ของสนามแข่งรถ (race tract) แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบนี้เหมาะสำหรับการเคลือบฟิล์มบางบนพื้นที่ระนาบขนาดใหญ่ โดยการออกแบบให้ด้านยาวของแนวการกัดเซาะยาวกว่าขนาดความกว้างของวัสดุรองรับและเลื่อนวัสดุรองรับผ่านเป้าขณะเคลือบฟิล์ม จะทำให้ได้ฟิล์มบางที่มีความสม่ำเสมอสูงโดยไม่ขึ้นกับระยะห่างจากเป้า ระบบที่ใช้ในด้านอุตสาหกรรมมีลักษณะดังรูปที่ 3.14 เป้าของแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์ที่ผ่านการใช้งานนานๆ มักจะถูกกัดเซาะเป็นร่องลึกเฉพาะแนวของลู่ การออกแบบแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์ให้สามารถเปลี่ยนแท่งของวัสดุที่ใช้เป็นเป้าเฉพาะในบริเวณของการกัดเซาะ หรือสามารถเลื่อนแม่เหล็กด้านหลังเป้าเพื่อเปลี่ยนแนวของการกัดเซาะ จะช่วยให้สามารถใช้ประโยชน์เป้าได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

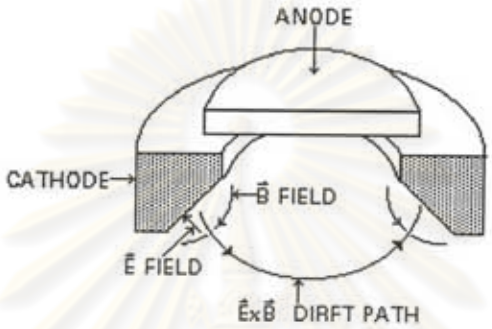



รูปที่ 3.13 แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบ rectangular-planar magnetron




รูปที่ 3.14 ระบบเคลือบฟิล์มบางบนพื้นที่ขนาดใหญ่ ซึ่งใช้แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบ rectangular-planar magnetron เป็นชุด

นอกจากแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แมกนิตรอนทรงกระบอกและแมกนิตรอนระนาบแล้ว ยังมีแหล่งกำเนิดแบบแมกนิตรอนที่มีเป้าเป็นรูปกรวย (conical magnetron) ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีในชื่อ S-GUN มีลักษณะแสดงดังรูปที่ 3.5 สนามแม่เหล็กจะจัดให้ขนานกับผิวเป้าไปตามแนวเอียงของกรวย ทำให้แนวของสนาม $\vec{E}x\vec{B}$ เป็นวงกลมซึ่งอยู่บนระนาบที่ตั้งฉากกับแกนของกรวย แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบนี้จะให้การกระจายของอะตอมที่ถูกสปัตเตอร์ออกจากเป้าใกล้เคียงกับการกระจายของอะตอมจากแหล่งกำเนิดการระเหยแบบวงแหวน




รูปที่ 3.15 ภาพภาคตัดขวางของแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบ conical magnetron หรือ S-GUN [47]

### 4. ลักษณะส่อกระแสและความต่างศักย์ของระบบสปัตเตอริงแบบดีซีแมกนิตรอน

W.D. Westwood และคณะ [48] ได้แสดงว่า ข้อมูลเชิงการทดลองของลักษณะส่อของกระแส ความต่างศักย์ และความดันกาซของโกลว์ดิสชาร์จ ในระบบสปัตเตอริงแบบดีซีแมกนิตรอนหลายๆแบบ สอดคล้องกับความสัมพันธ์ในรูป

$$I = \beta(V - V_0)^2 \qquad (3.6)$$

โดย I เป็นกระแสของการดิสชาร์จ

V เป็นความต่างศักย์ของการดิสชาร์จ

$V_0$ เป็นความต่างศักย์ที่ต่ำที่สุดสำหรับรักษาสภาพการดิสชาร์จ

$\beta$ เป็นค่าคงที่ที่ขึ้นชนิดและความดันกาซ ความเข้มสนามแม่เหล็ก และชนิดของเป้า

นอกจากนี้พวกเขาได้อภิปรายว่า ความสัมพันธ์ตามสมการ (3.6) ได้มาจากสมมุติฐานที่กำหนดให้กระแสของอิเล็กตรอนจากคาโธดที่เคลื่อนที่ผ่านบริเวณสนามแม่เหล็กซึ่งวางตัวขนานกับเป้า มีลักษณะเป็นแบบ space-charge-limitted-current เนื่องจากอิเล็กตรอนถูกกำหนดสภาพเคลื่อนที่ได้โดยสนามแม่เหล็กและการกระเจิงกับอนุภาคของกาซในโกลวดิสชาร์จ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

สำหรับสมการทั่วไปของความหนาแน่นกระแสแบบ space-charge-limitted ระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้ว อยู่ในรูป

$$J = \frac{a\varepsilon vV}{L^2} \tag{3.7}$$

โดย V เป็นความต่างศักย์ที่ตกคร่อมระหว่างขั้ว

L เป็นระยะระหว่างขั้วไฟฟ้า a เป็นค่าคงที่ และ ε เป็นค่าคงที่ไดอิเลคตริค

ในแมกนิตรอนโกลวดิสชาร์จอิเล็กตรอนที่หลุดจากเป้าจะสามารถเคลื่อนที่ห่างออกจากเป้าเข้าสู่บริเวณ negative glow และไปถึงอาโนดได้โดยอาศัยการกระเจิงกับอะตอม หรือไอออนบวกเท่านั้น มิฉะนั้นแล้วอิเล็กตรอนจะถูกกักไว้ที่บริเวณเป้าโดยสนามแม่เหล็กที่ขนานกับเป้า สภาพเคลื่อนที่ได้ของอิเล็กตรอนในแนวตั้งฉากกับผิวเป้า ($\mu_T$) เป็นไปตามสมการ

$$\mu_T = \mu_0 / (1 + \frac{\omega_c^2}{\upsilon}) \tag{3.8}$$

โดย $\mu_0$ เป็นสภาพเคลื่อนที่ได้ของอิเล็กตรอน ขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก

$\omega_c$ เป็นความถี่ไซโคลตรอน ของอิเล็กตรอน ($\omega_c = eB/m_e$)

$\upsilon$ เป็นความถี่ของการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมกาซที่เป็นกลาง

ความถี่ของการชน $\upsilon$ ขึ้นกับความเร็ว และระยะทางอิสระเฉลี่ยของอิเล็กตรอนในกาซ จากการทดลองสามารถคำนวนได้ว่า $\upsilon$ มีค่าประมาณ $5 \times 10^7$ P โดย P เป็นความดันกาซในหน่วยปาสคาล เมื่อแทนค่า v และความถี่ไซโคลตรอน $\omega_c$ จะได้

$$\mu_T = \mu_0/[1+1.24x10^7(B/P)^2] \qquad (3.9)$$

โดย B มีหน่วยเป็นเทสลา จากสมการจะเห็นว่า ถ้า B=0 แล้ว $\mu_T = \mu_0$ และถ้า P มีค่าน้อย $\mu_T$ มีค่าใกล้ 0 แสดงให้เห็นว่าการชนของอิเล็กตรอนกับอะตอมของกาซ มีความสำคัญต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนข้ามสนามแม่เหล็ก

ขนาดยังผลของสนามแม่เหล็กในระบบดีซีแมกนิตรอนสปัตเตอริง มีค่าประมาณ 0.03 เทสลา (300 เกาส์) โดยการคำนวนจะพบว่าในช่วงความดันของการทดลองระหว่าง 0.1 ถึง 10 ปาสคาล อัตราส่วน $\mu_T/\mu_0$ เพิ่มจาก $10^{-6}$ เป็น $10^{-2}$ แสดงว่าสภาพเคลื่อนที่ได้ของอิเล็กตรอนในทิศตั้งฉากกับคาโธดมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับกรณีไม่มีสนามแม่เหล็ก ($\mu_T/\mu_0$= 1) และถูกควบคุมโดยการชนกับอะตอมกาซ สำหรับอัตราส่วนของสภาพเคลื่อนที่ได้ของไอออนบวกต่ออิเล็กตรอนในทิศตั้งฉากกับคาโธดในการดิสชาร์จที่ไม่มีสนามแม่เหล็กมีค่าประมาณ $5x10^{-3}$ ซึ่งนับว่าต่ำมาก ทั้งนี้เนื่องจากไอออนบวกมีมวลมากกว่าอิเล็กตรอนมาก ผลของสนาม $\vec{E}x\vec{B}$ ในระบบแมกนิตรอนมีผลให้สภาพเคลื่อนที่ได้ของอิเล็กตรอนผ่านบริเวณ cathode dark space ลดลงไปใกล้เคียงหรือต่ำกว่าสภาพเคลื่อนที่ได้ของไอออนบวก โดยเฉพาะในช่วงความดันกาซต่ำ

เนื่องจากอิเล็กตรอนมีสภาพการเคลื่อนที่ได้ที่กำหนดด้วยการชน ซึ่งคล้ายกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระในของแข็ง ความเร็วของอิเล็กตรอนจะเป็นความเร็วลอยเลื่อนกำหนดโดยสมการ

$$v = \mu_T E = \mu_T V/L \qquad (3.10)$$

โดย $\mu_T$ เป็นสภาพเคลื่อนที่ได้ของอิเล็กตรอนในทิศตั้งฉากกับเป้า

E เป็นสนามไฟฟ้า

L เป็นความยาวของ cathode dark space

V เป็นความต่างศักย์ตกคร่อม L

แทนค่า v จากสมการ (3.10) ในสมการ space charge limitted current จะได้

$$J = bV^2 \qquad (3.11)$$

โดย $b = a\varepsilon\mu_T/L^3$

อย่างไรก็ตามสมการนี้ยังไม่ให้ความเป็นจริงที่ว่าต้องมีความต่างศักย์ต่ำที่สุดค่าหนึ่งที่จะรักษาสภาพการดิสชาร์จ และกระแสการดิสชาร์จจะเป็นศูนย์เมื่อความต่างศักย์ต่ำกว่านี้ ดังเช่นในกรณีของระบบดีซีไดโอด ซึ่งความต่างศักย์ยังผลที่ทำให้เกิดกระแสของการดิสชาร์จ คือ $V-V_0$ (ดูบทที่ 2 หัวข้อ "ลักษณะส่อของกระแส ความต่างศักย์ และความดันของดีซีโกลวดิสชาร์จ" ) ดังนั้นสมการ (3.11) ควรอยู่ในรูป

$$J = b(V - V_0)^2 \qquad (3.12)$$

โดย $V_0$ เป็นความต่างศักย์สำหรับรักษาสภาพดิสชาร์จ กระแสอิเล็กตรอนรวมได้จากการอินทิเกรตสมการนี้ทั่วทั้งผิวเป้า

ในทางปฏิบัติกระแสการดิสชาร์จที่วัดได้ คือ ผลรวมของกระแสไอออนบวกกับกระแสอิเล็กตรอนทุติยภูมิ เนื่องจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิเหล่านี้ได้จากการที่ไอออนบวกชนเป้า ดังนั้นจึงสามารถประมาณได้ว่ากระแสการดิสชาร์จรวมเป็นปฏิภาคโดยตรงกับกระแสอิเล็กตรอนในสมการ (3.12 ) ดังนั้นจะได้สมการของกระแสการดิสชาร์จรวมในรูป

$$I = \beta(V - V_0)^2 \qquad (3.13)$$

ซึ่งก็คือสมการ (3.6) ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นหัวข้อนี้

ในตารางที่ 3.3 ได้แสดงค่า $\beta$ และ $V_0$ ซึ่ง W.D. Westwood และคณะได้จากการวิเคราะห์การสอดคล้อง (fitting) ของข้อมูลจากการทดลองกับสมการ (3.12) โดยใช้ข้อมูลลักษณะส่อของกระแส และความต่างศักย์ของโกลวดิสชาร์จ ซึ่งวัดจากระบบสปัตเตอริงแบบดีซีแมกนิตรอนระนาบสี่เหลี่ยมผืนผ้า และ Research-S gun ที่มีเป้าชนิดต่างๆ คือ Al, $Cd_2Sn$, CdSe และ Cr ที่กาซอาร์กอนความดันต่างๆกัน ในระบบการทดลองนี้ ใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบจ่ายกระแสคงที่ (constant current dc power supply) ความต่างศักย์ของการดิสชาร์จวัดในช่วงกระแสการดิสชาร์จระหว่าง 0.5 - 8 A สำหรับแต่ละค่าของความดันกาซ จากตารางจะเห็นว่า $\beta$ ขึ้นกับความดันอย่างมาก โดยมีค่าสูงขึ้นเมื่อความดันกาซอาร์กอนสูงขึ้น ส่วน $V_0$ ลดลงตามความดัน แนวโน้มนี้จะเหมือนกันสำหรับเป้าทุกชนิด แต่ค่าของ $\beta$ และ $V_0$ จะแตกต่างกันไปสำหรับเป้าแต่ละชนิด และขึ้นกับรูปแบบของแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์ด้วย

ตารางที่ 3.3 ค่า $\beta$ และ $V_0$ ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ลักษณะส่อกระแส และความต่างศักย์ ของโกลวดิสชาร์จในระบบดีซีแมกนิตรอนสปัตเตอริงแบบ rectangular-planar magnetron และ Research-S Gun ที่ความดันกาซอาร์กอนต่างๆกัน

| Target | P(Pa) | $V_0$(Volt)) | $\beta$(A/kV$^2$) | Magnetron type |
|---|---|---|---|---|
| Al | 0.33 | 280 | 75 | rectangular-planar |
| | 0.57 | 270 | 148 | rectangular-planar |
| | 0.95 | 245 | 200 | rectangular-planar |
| Al | 0.13 | 400 | 39 | Reasearch-S Gun |
| | 0.43 | 373 | 63 | Reasearch-S Gun |
| | 1.55 | 335 | 105 | Reasearch-S Gun |
| $Cd_2Sn$ | 0.25 | 220 | 26 | rectangular-planar |
| | 0.4 | 180 | 33 | rectangular-planar |
| | 1.0 | 175 | 53 | rectangular-planar |
| | 1.4 | 175 | 78 | rectangular-planar |
| CdSe | 0.25 | 390 | 45 | rectangular-planar |
| | 0.5 | 390 | 75 | rectangular-planar |
| | 1.0 | 390 | 120 | rectangular-planar |
| Cr | 0.6 | 330 | 750 | rectangular-planar |
| | 1.2 | 320 | 1460 | rectangular-planar |
| | 1.9 | 300 | 2,000 | rectangular-planar |

อย่างไรก็ตามในรายงานของ W.D. Westwood และคณะ ตามที่เสนอไว้ข้างต้น ยังไม่ปรากฏการรายงานในเชิงของการศึกษาเกี่ยวกับผลของความเข้มสนามแม่เหล็ก ที่มีต่อลักษณะส่อของกระแส และความต่างศักย์ของการดิสชาร์จแต่อย่างใด ซึ่งจากการพิสูจน์หาความสัมพันธ์ตามสมการ (3.13) จะเห็นแล้วว่าความเข้มสนามแม่เหล็กเป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญ การศึกษาผลของสนามแม่เหล็กต่อลักษณะส่อของการดิสชาร์จจะเป็นหัวข้อหนึ่งที่ผู้ทำงานวิจัยนี้มองว่าเป็นจุดที่น่าสนใจ ซึ่งจะมีประโยชน์มากต่อการสร้างและพัฒนาระบบสปัตเตอริงแบบดีซีแมกนิตรอน ในการทำวิจัยจึงได้รวมหัวข้อการศึกษานี้ไว้เป็นส่วนหนึ่งด้วย

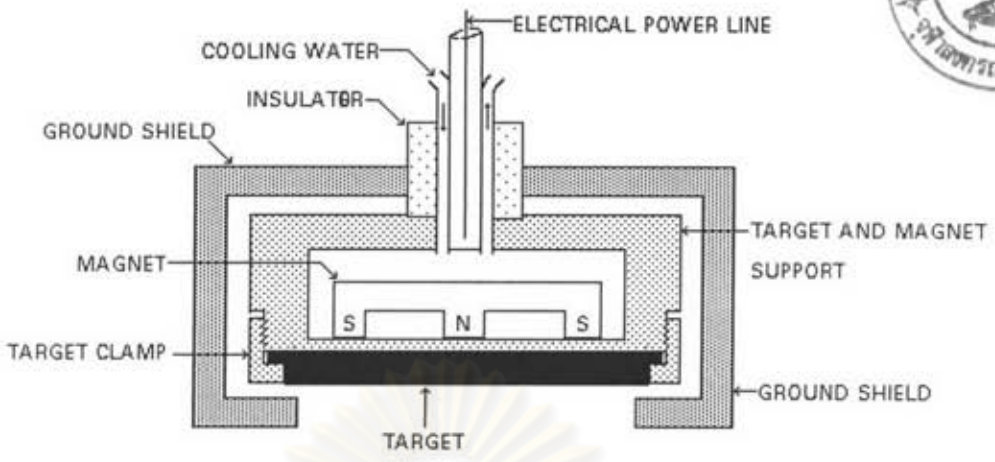
## รายละเอียดเชิงปฏิบัติการของระบบสปัตเตอริงแบบดีซีแมกนิตรอน

ก่อนที่จะเข้าสู่เรื่องของการออกแแบบและจัดสร้างระบบในบทต่อไป จะขอสรุปข้อมูลเชิงเทคนิคบางประการเกี่ยวกับระบบเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสปัตเตอริง ซึ่งจะได้นำไปเป็นแนวคิดสำหรับการออกแบบระบบที่จะใช้สำหรับงานวิจัยนี้

### 1. แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์

พิจารณาแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบดีซีแมกนิตรอนระนาบวงกลม[25] ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.16 จะเห็นว่าส่วนของขอบเป้าด้านข้าง แหวนประกบเป้า(target clamp) และส่วนรองรับ (support) ที่ประกบกับเป้าด้านหลัง จะถูกล้อมรอบด้วย grounded shield จุดประสงค์ของการติดตั้ง grounded shield คือ เพื่อที่จะจำกัดการชนของไอออนบวกให้เกิดขึ้นเฉพาะด้านหน้าเป้าเท่านั้น มิฉะนั้นแล้วผิวของส่วนประกอบอื่นๆซึ่งเชื่อมต่อทางไฟฟ้ากับเป้าจะถูกสปัตเตอร์ด้วยและส่งผลให้ฟิล์มบางที่ได้มีสารเจือปน ในการป้องกันผิวส่วนอื่นที่ไม่ใช่เป้าไม่ให้ถูกไอออนบวกชน ระยะระหว่างผิวเหล่านั้นกับ grounded shield จะต้องน้อยกว่าความยาวของ cathode dark space เพื่อป้องกันการเกิดโกลวดิสชาร์จในช่องว่างเหล่านี้ขึ้น

นอกจากนี้ในรูปที่ 3.16 จะเห็นว่ามีระบบน้ำหล่อเย็น ทั้งนี้เพราะว่าเป้าหรือคาโธดของการสปัตเตอร์จะถูกชนด้วยกระแสไอออนบวกที่มีความเข้มและพลังงานค่อนข้างสูง ประกอบกับการสปัตเตอร์จัดได้ว่าเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานด้อยประสิทธิภาพ พลังงานที่ตกกระทบเป้าส่วนใหญ่จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปความร้อน จึงทำให้เป้าขณะถูกสปัตเตอร์มีอุณหภูมิสูง (อาจสูงถึง 400 °C) ซึ่งจะมีผลเสีย ได้แก่ ทำให้อัตราการสปัตเตอร์ลดลง ลดความเข้มหรือทำลายสภาพแม่เหล็กในกรณีที่ใช้แม่เหล็กฐาวรประกบหลังเป้า ทำลายส่วนประกอบที่เป็นยาง เป็นต้น ดังนั้น การออกแบบแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์ให้สามารถถ่ายเทความร้อนออกจากเป้าได้ดีจึงมีความจำเป็น




รูปที่ 3.16 ภาพภาคตัดขวางของแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบแมกนิตรอนระนาบวงกลม

## 2. กาซสำหรับการสปัตเตอร์และระบบสุญญากาศ

ในการสปัตเตอร์โลหะจะใช้กาซอาร์กอนความบริสุทธิ์ระหว่าง 99.99 ถึง 99.999 เปอร์เซนต์ ป้อนผ่านวาล์วซึ่งปรับอัตราไหลของกาซได้ จุดที่จะปล่อยกาซในภาชนะสุญญากาศควรอยู่ใกลกับผิวเป้ามากที่สุด

ในกรณีของ Reactive sputtering เพื่อเคลือบฟิล์มบางของสารประกอบระหว่างโลหะซึ่งเป็นเป้ากับกาซไวปฏิกิริยา เช่น กาซออกซิเจน โดยทั่วไปใช้วิธีผสมกาซไวปฏิกิริยากับกาซอาร์กอนด้วยความเข้มข้นระหว่าง 5-50 เปอร์เซนต์ กาซที่ผสมเข้าไปมีผลกระทบอย่างมากต่อลักษณะสอของการดิสชาร์จ การเปลี่ยนสมบัติของเป้า รวมทั้งสมบัติของฟิล์มบางที่ได้ ส่วนผสมกาซที่เหมาะสมนั้นไม่แน่นอน ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ระบบที่ใช้ ชนิดของเป้า และที่สำคัญขึ้นกับว่าทำให้ได้ฟิล์มที่มีสมบัติตามต้องการหรือไม่

ระบบสุญญากาศควรสามารถสร้างสุญญากาศได้ระดับต่ำสุดประมาณ $10^{-5}$ ทอรร์ เป็นอย่างน้อยโดยเฉพาะการเคลือบฟิล์มที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง ภายในภาชนะสุญญากาศควรปราศจากไอน้ำ ในกรณีที่ใช้ระบบปั๊มที่มีปั๊มแพร่ไอน้ำมันต้องเพิ่มระบบกับดักไนโตรเจนเหลวคั่นระหว่างภาชนะสุญญากาศกับปั๊ม เพื่อจับไอน้ำมันไม่ให้เข้าไปในภาชนะสุญญากาศ ซึ่งอาจทำให้ฟิล์มปนเปื้อนน้ำมันได้

### 3. แท่นวางวัสดุรองรับ

อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุรองรับเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่สำคัญต่อกระบวนการเกิดฟิล์มบาง อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติแล้ว การวัดหรือควบคุมอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุรองรับโดยตรงไม่สามารถทำได้สะดวก ในระบบสปัตเตอริงหรือระบบเคลือบฟิล์มบางอื่นๆโดยทั่วไปจะใช้วิธีวางวัสดุรองรับบนแท่นวาง ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้และประมาณว่าอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุรองรับถูกควบคุมตามไปด้วย และมักอ้างถึงอุณหภูมิแท่นวางวัสดุรองรับว่าเป็นอุณหภูมิของวัสดุรองรับ ซึ่งจะถูกต้องหรือใกล้เคียงในบางกรณีเท่านั้น ทั้งนี้ขึ้นกับการนำความร้อนระหว่างวัสดุรองรับกับแท่นวาง และช่วงเวลาสำหรับการปรับสู่สภาวะสมดุลทางความร้อน

แท่นวางวัสดุรองรับจะประกอบด้วยระบบระบายความร้อน ซึ่งส่วนใหญ่เป็นระบบน้ำไหลเวียนแบบวงจรปิด แหล่งกำเนิดความร้อน และระบบวัดและควบคุมอุณหภูมิ ข้อควรระวังในการติดตั้งส่วนประกอบเหล่านี้เข้าไปที่สำคัญ คือ ต้องไม่ทำให้ระบบสุญญากาศรั่วหรือเพิ่มความสกปรกให้กับระบบสุญญากาศ และไม่ทำให้ลัดวงจรไฟฟ้า

### 4. การเลือกสภาวะการสปัตเตอร์

สภาวะของการสปัตเตอร์ หมายถึง สภาพของโกลว์ดิสชาร์จขณะเคลือบฟิล์มบาง รวมทั้งสภาพแวดล้อมของวัสดุรองรับ ตัวแปรที่ใช้กำหนดสภาวะของการสปัตเตอร์ ได้แก่ ความดันกาซ กระแส และความต่างศักย์ของการดิสชาร์จ อุณหภูมิวัสดุรองรับ และความต่างศักย์ไบแอส (กรณีของสปัตเตอริงแบบไบแอส) หลักกว้างๆของการเลือกสภาวะของการสปัตเตอร์ คือ เพื่อให้ได้อัตราเคลือบฟิล์มบางซึ่งมีโครงสร้างและสมบัติของฟิล์มบางตามต้องการ

เนื่องจากสภาวะการสปัตเตอร์ในขณะเคลือบฟิล์ม มีความสำคัญต่อการควบคุมสมบัติของฟิล์มบางที่ได้ ตลอดจนเป็นพารามิเตอร์ที่จะใช้ในการวิเคราะห์และอภิปรายสมบัติของฟิล์มบางที่ได้ ดังนั้นจึงต้องวัดและแสดงค่าของพารามิเตอร์เหล่านี้ตลอดเวลาที่สปัตเตอร์