

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ดีซีแมกนีตรอนสปีดเทอริง คือวิธีการเคลือบฟิล์มบางในระบบสุญญากาศ โดยอาศัยพื้นฐานทางด้านฟิสิกส์ของพลาสมาเพื่อให้เกิดกระบวนการสปีดเทอริงขึ้นมา ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญในการทำความเข้าใจในฟิสิกส์ของพลาสมา วิธีการเคลือบฟิล์มบางที่เรียกว่าสปีดเทอริง และหลักการที่เกี่ยวกับหัวดีซีแมกนีตรอนสปีดเทอริง ซึ่งจะได้อธิบายในส่วนที่มีความสอดคล้องกับงานวิจัยนี้

2.1 โกลด์ดิสชาร์จ

สถานะพลาสมาเกิดขึ้นได้โดยการทำให้อะตอมของก๊าซที่อยู่ในสถานะที่เป็นกลางทางไฟฟ้าเกิดการแตกตัวเป็นไอออน [10-11] ซึ่งสามารถทำได้โดยอาศัยการชนด้วยอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง โดยอะตอมที่ได้รับพลังงานที่เพียงพอจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากอะตอม เรียกว่าการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งพลังงานที่มีค่าน้อยที่สุดที่ทำให้อิเล็กตรอนตัวนอกสุดหลุดออกมาได้ คือ พลังงานการแตกตัวเป็นไอออน [10] โดยการแตกตัวเป็นไอออนเป็นกระบวนการสำคัญในการสร้างพลาสมาของระบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเทอริง สำหรับในกรณีของโลหะที่ได้รับพลังงานแล้วทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากผิวของโลหะ เรียกว่า การปลดปล่อยอิเล็กตรอน ซึ่งพลังงานที่มีค่าน้อยที่สุดที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาได้ คือ ค่าฟังก์ชันงาน [10]

อะตอมใดๆเมื่อถูกชนด้วยอะตอมที่เป็นกลาง ไอออนหรืออิเล็กตรอนจะเกิดการแลกเปลี่ยนของพลังงานระหว่างกัน ในกรณีที่อนุภาคที่เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมคืออิเล็กตรอน และทำให้อะตอมที่ถูกชนเกิดการแตกตัวเป็นไอออน เรียกว่า การแตกตัวเป็นไอออนเนื่องจากการชนด้วยอิเล็กตรอน (electron impact ionization) โดยที่อิเล็กตรอนจะต้องมีพลังงานจลน์มากกว่าหรือเท่ากับพลังงานการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอม [10-11] ดังสมการ

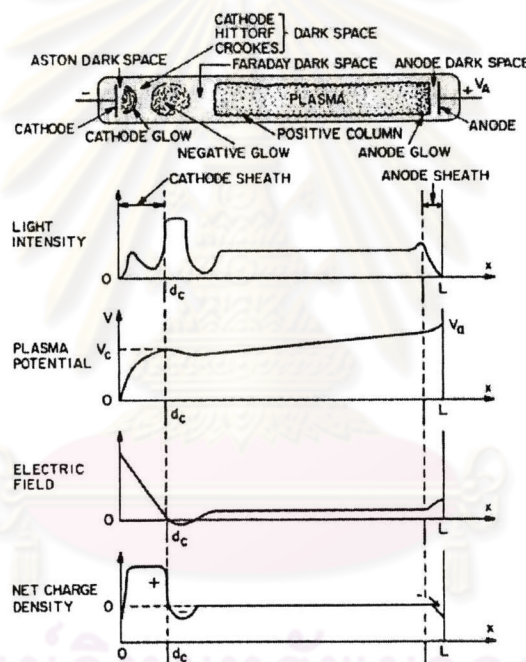
$$\frac{1}{2}mv^2 \geq W_i \quad (2.1)$$

โดย W_i คือ พลังงานการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอม

m คือ มวลของอิเล็กตรอน

v คือ ความเร็วของอิเล็กตรอน

การโกลว์ดิสชาร์จซึ่งก็คือการเรืองแสงของพลาสมา การโกลว์ทำให้เกิดขึ้นมาได้โดยการจ่ายความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดในสภาวะความดันต่ำที่มีก๊าซกระจายอยู่ภายในภาชนะสุญญากาศ ศักย์ไฟฟ้าจะตกลงอย่างรวดเร็วในบริเวณใกล้ขั้วคาโทดและมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆในพลาสมา และเปลี่ยนแปลงอีกครั้งในบริเวณใกล้ขั้วแอโนดดังแสดงในรูปที่ 2.1



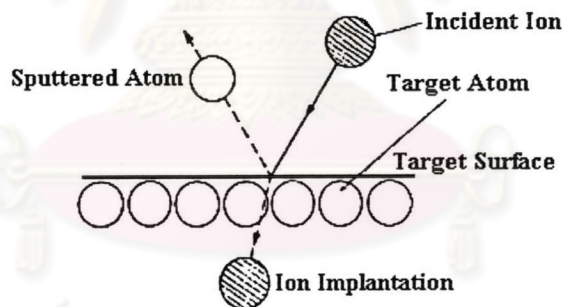
รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของการโกลว์ดิสชาร์จ [14-15]

สนามไฟฟ้าในระบบจะถูกควบคุมไปจนถึงชีท (sheath) ของแต่ละขั้วไฟฟ้า [11-14] ซึ่งชีทก็คือความหนาของบริเวณที่แยกพลาสมาออกจากขั้วไฟฟ้า [15] อาณาเขตของชีทจะผลักอิเล็กตรอนที่พยายามเคลื่อนที่ไปยังแต่ละขั้วอิเล็กโทรด อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นที่ขั้วคาโทดจะถูกเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่ตามทิศทางของสนามไฟฟ้าและเกิดการชนกับอนุภาคตัวอื่นและมีการแลกเปลี่ยนพลังงาน และจะหยุดลงเนื่องจากการแพร่กระจายและการรวมตัว การโกลว์ที่ทำให้การเรืองแสงเกิดขึ้นมาได้เนื่องจากอิเล็กตรอนมีพลังงานมากพอที่จะให้กำเนิดแสงที่สามารถมองเห็นได้ด้วยการชนแล้วทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน [11-14] อิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า

และมีการสะสมพลังงานและเกิดการชนกับอะตอมอื่นแล้วเกิดการแตกตัวเป็นไอออนโดยกระบวนการจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง อิเล็กตรอนจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นจากการปลดปล่อยออกมาจากขั้วคาโทด ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการรักษาการดิสชาร์จให้สามารถมีอยู่ต่อไปได้ [10-14] ลักษณะที่สำคัญหลายๆอย่างของโกลด์ดิสชาร์จแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.1 การเรืองแสงภายในภาชนะสุญญากาศแสดงลักษณะการจัดเรียงบริเวณที่เกิดการเรืองแสงระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทรงกลมภายในภาชนะสุญญากาศที่มีการเชื่อมต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง พอลการดิสชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสตรงถูกทำให้เกิดขึ้นและถ้าการโกลด์ดิสชาร์จสามารถรักษาไว้ได้ก็จะปรากฏบริเวณการเรืองแสงและบริเวณมืดในตำแหน่งที่แตกต่างกัน [13-14]

2.2 สเป็คเทอริง

สเป็คเทอริง เป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งในการเกิดพลาสมาเย็น (cold plasma) [9] ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่อะตอมที่ผิวเป้าถูกทำให้หลุดออกมาพร้อมกับมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ออกมาด้วย เนื่องจากการระดมยิงของอนุภาคพลังงานสูงที่ถูกเร่งให้เคลื่อนที่เข้าชนเป้า [4,9,11,16-19] ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงการเกิดการสเป็คเทอริงที่ผิวเป้า [17]

2.2.1 ยี่ลด์ของการสเป็คเทอริง (sputtering yields)

ยี่ลด์ของการสเป็คเทอริง [9,17] นิยามด้วยปริมาณอะตอมที่ถูกสเป็คเทอริงหลุดออกมาจากผิวเป้าต่อปริมาณไอออนที่เคลื่อนที่เข้าชน ดังแสดงในสมการที่ 2.2 ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานของไอออนที่ตกกระทบและอัตราส่วนระหว่างมวลของไอออนที่ตกกระทบกับอะตอมที่ถูกสเป็คเทอริง [17]

$$\text{ยี่ลด์ของการสเป็คเทอริง} = \text{อะตอมที่หลุดออกจากผิวเป้า} / \text{ไอออนที่ชนเป้า} \quad (2.2)$$

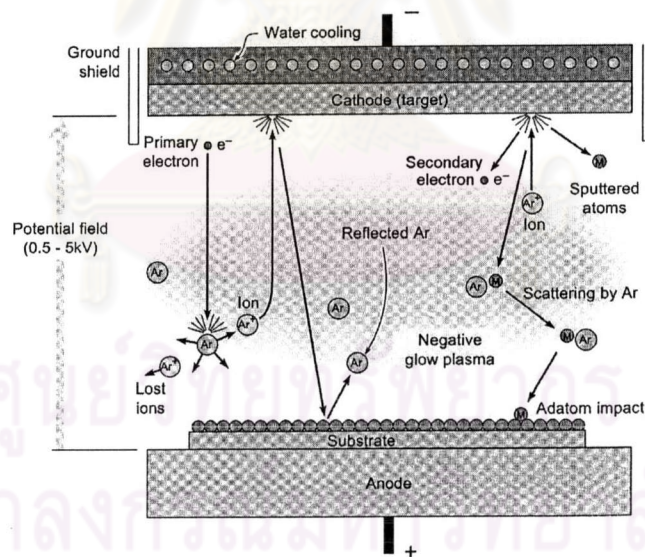
การสputtering แสดงถึงลักษณะเฉพาะโดยพลังงานขีดเริ่ม (threshold energy) ซึ่งขึ้นอยู่กับไอออนที่เคลื่อนที่เข้าชนและอะตอมที่ผิวเป้า ในตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงค่าพลังงานขีดเริ่มของธาตุชนิดต่างๆ และค่าyieldของการสputteringของธาตุชนิดต่างๆที่ถูกระดมยิงด้วยไอออนของอาร์กอนที่มีพลังงานแตกต่างกัน โดยขีดเริ่มของการสputtering (sputtering threshold) จะอยู่ในช่วง 10-40 อิเล็กตรอนโวลต์ และที่พลังงานไอออนของอาร์กอนสูงกว่าพลังงานขีดเริ่ม yieldของการสputteringจะเพิ่มขึ้นตามพลังงานของไอออนของอาร์กอน [9,11,17]

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าพลังงานขีดเริ่มและค่าyieldของธาตุชนิดต่างๆ [9,11,17]

	Threshold (eV)	Ar^+ energy (eV)				
		60	100	200	300	600
Ag	15	0.22	0.63	1.58	2.20	3.40
Al	13		0.11	0.35	0.65	1.24
Au	20		0.32	1.07	1.65	2.43
Be	15		0.074	0.18	0.29	0.80
Cr	22		0.30	0.67	0.87	1.30
Cu	17	0.10	0.48	1.10	1.59	2.30
Fe	20	0.064	0.20	0.53	0.76	1.26
Ge	25		0.22	0.50	0.74	1.22
Mo	24	0.027	0.13	0.40	0.58	0.93
Nb	25	0.017	0.068	0.25	0.40	0.65
Ni	21	0.067	0.28	0.66	0.95	1.52
Pd	20		0.42	1.00	1.41	2.39
Pt	25	0.032	0.20	0.63	0.95	1.56
Re	35		0.10	0.37	0.56	0.91
Si			0.07	0.18	0.31	0.53
Ta	26	0.01	0.10	0.28	0.41	0.62
Ti	20		0.081	0.22	0.33	0.58
V	23	0.03	0.11	0.31	0.41	0.70
W	33	0.008	0.068	0.29	0.40	0.62
Zr	22	0.027	0.12	0.28	0.41	0.75

2.2.2 ดีซีไดโอดสเป็คเทอริง

ในระบบดีซีไดโอดสเป็คเทอริงจะประกอบไปด้วยขั้วคาโทดและขั้วแอโนดวางอยู่ในระบบสุญญากาศภายใต้ความดันและศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยเป้าจะติดตั้งไว้ที่ด้านหน้าของขั้วคาโทดและแผ่นรองรับหรือชิ้นงานที่ต้องการเคลือบสารจะถูกวางอยู่ที่ขั้วแอโนด ภายในภาชนะสุญญากาศจะเต็มไปด้วยก๊าซที่ใช้ในการสเป็คเทอริง โดยการดีสชาร์จจะถูกสร้างขึ้นมาระหว่างขั้วคาโทดและขั้วแอโนด โดยอาศัยการสร้างสนามไฟฟ้าช่วยในการเร่งอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสเป็คเทอริงและเกิดการแตกตัวเป็นไอออน โดยไอออนของก๊าซที่ใช้ในการสเป็คเทอริงจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าไปยังขั้วคาโทดและพุ่งเข้าชนอะตอมที่ผิวเป้าให้หลุดออกมาและเคลือบเป็นฟิล์มบางที่แผ่นรองรับหรือชิ้นงานที่เราต้องการเคลือบ พร้อมกับมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้มีผลทำให้การโคล์ดีสชาร์จยังคงเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง เพราะว่าอิเล็กตรอนจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณที่เกิดพลาสมาและทำให้เกิดการชนกับอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสเป็คเทอริง และเกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกเพิ่มขึ้นมา ก่อนที่อิเล็กตรอนเหล่านี้จะเคลื่อนที่ไปอยู่ที่ขั้วแอโนด [4,11,16-19]



รูปที่ 2.3 แสดงการสเป็คเทอริงโดยดีซีไดโอดสเป็คเทอริง [20]

2.2.3 ดีซีแมกนิตรอนสปัตเทอริง

การกำเนิดพลาสมาในวิธีดีซีสปัตเทอริงเกิดจากการใช้สนามไฟฟ้าแรงอิล็กตรอนให้เข้าชนอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปัตเทอริงให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกและอิล็กตรอน โดยไอออนบวกจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมที่ผิวเป้าให้หลุดออกมาและมีการปลดปล่อยอิล็กตรอนทุติยภูมิออกมาภายหลังจากการชนของไอออนบวกที่ผิวเป้า ดังนั้นถ้าสามารถกักเก็บอิล็กตรอนไว้ที่หน้าผิวเป้า และเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของอิล็กตรอนให้เพิ่มขึ้น ก็จะเป็นการเพิ่มโอกาสในการชนกับอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปัตเทอริงให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกมากขึ้นและถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้เคลื่อนที่เข้าชนเป้าหมายมากขึ้น ผลคือทำให้อัตราการสปัตเทอริงสูงขึ้น ทั้งนี้การกักเก็บอิล็กตรอนและการเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของอิล็กตรอนให้เพิ่มขึ้นนั้นสามารถทำได้โดยการป้อนสนามแม่เหล็กในทิศทางที่เหมาะสมให้กับระบบดีซีสปัตเทอริง ทั้งนี้เมื่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า q เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v_{\perp} ในทิศทางตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า B จะเกิดแรงกระทำกับอนุภาคนั้น [4,11,14,16-19] ซึ่งมีค่า

$$F = Bqv_{\perp} \quad (2.3)$$

โดยแรงที่กระทำกับอนุภาคมีทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและความเร็วของการเคลื่อนที่ ซึ่งจะมีผลทำให้ประจุไฟฟ้าที่มีมวล m เกิดการเคลื่อนที่เป็นวงกลม โดยที่

$$F_B = F_C \quad (2.4)$$

โดย F_B คือ แรงเนื่องจากสนามแม่เหล็ก

F_C คือ แรงสู่ศูนย์กลางของการเคลื่อนที่

จะได้ว่า

$$qv_{\perp}B = \frac{mv_{\perp}^2}{r} \quad (2.5)$$

โดยจะได้รัศมีของการเคลื่อนที่

$$r = mv_{\perp} / Bq \quad (2.6)$$

โดยเรียกรัศมีของประจุไฟฟ้าที่มีการเคลื่อนที่เป็นวงกลมว่ารัศมีไซโคลตรอน (cyclotron radius) หรือรัศมีลาร์มอร์ (armor radius) โดยอิเล็กตรอนจะได้รับผลกระทบจากแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กนี้ แต่สำหรับไอออนซึ่งมีมวลมากจะได้รับผลกระทบของแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กนี้น้อย

และจาก $v = \omega r$ จะได้ความเร็วเชิงมุมของการเคลื่อนที่ของอนุภาคเป็น

$$\omega = \frac{|q|B}{m} \quad (2.7)$$

และเมื่อพิจารณาอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากขั้วคาโทดแล้วเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน จากสมการของลอเรนซ์

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.8)$$

โดย $e =$ ประจุของอิเล็กตรอน

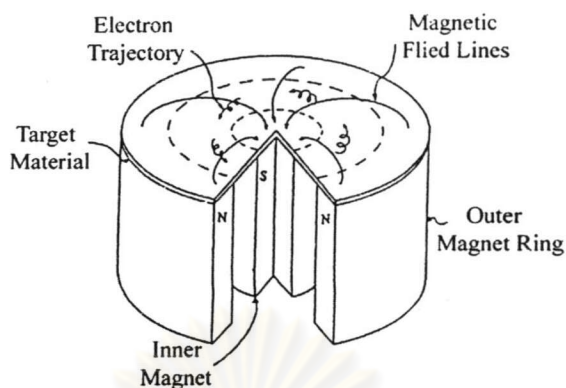
$m =$ มวลของอิเล็กตรอน

$\vec{v} =$ ความเร็วของอิเล็กตรอน

$\vec{E} =$ สนามไฟฟ้า

$\vec{B} =$ สนามแม่เหล็ก

ด้วยอิทธิพลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน จะทำให้อิเล็กตรอนถูกกักเก็บไว้ที่บริเวณผิวเป้าและมีการเคลื่อนที่เป็นรูปเกลียววงกลม ด้วยความเร็วเชิงมุม $\omega = eB/m$ ไปในเส้นทางเลื้อยลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน ($\vec{E} \times \vec{B}$ drift path) ที่เกิดขึ้น และจุดศูนย์กลางของการเคลื่อนที่เป็นวงกลมแบบเลื้อยลอยในทิศทางของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกันด้วยความเร็ว E/B [17] ถูกแสดงในรูป 2.4 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนแบบนี้จะเพิ่มโอกาสในการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับโมเลกุลของก๊าซและเกิดกระบวนการแตกตัวเป็นไอออนบวกสูงขึ้น บริเวณผิวเป้าและไอออนบวกที่เกิดขึ้นจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ชนเป้ามากขึ้น ซึ่งจะเป็นผลทำให้อัตราการสปีดเทอริงมีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีดีซีไดโอดสปีดเทอริง ส่งผลให้วิธีดีซีแมกนีตรอนสปีดเทอริงเป็นวิธีที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางกันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยและในงานอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.4 แสดงการเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมของอิเล็กตรอนที่ถูกกักเก็บไว้ที่ผิวเป้าในเส้นทางเลื่อนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน [21]

และจากความเร็ว v ที่เกิดขึ้นโดยการเร่งจากสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอที่เกิดจากการจ่ายความต่างศักย์ให้กับขั้วอิเล็กโทรด [22] จะได้ว่า

$$\frac{1}{2}mv^2 = |q|V \quad (2.9)$$

จะได้ว่า

$$v = \sqrt{\frac{2|q|V}{m}} \quad (2.10)$$

แทนค่า (2.10) ลงใน (2.6) จะได้

$$r = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mV}{|q|}} \quad (2.11)$$

โดยจะได้รัศมีของอนุภาคที่เคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของแรงลอเรนซ์

ในกรณีของอิเล็กตรอน จะได้ว่า

$$r = 0.33 \times 10^{-5} \frac{\sqrt{V}}{B} \quad (2.12)$$

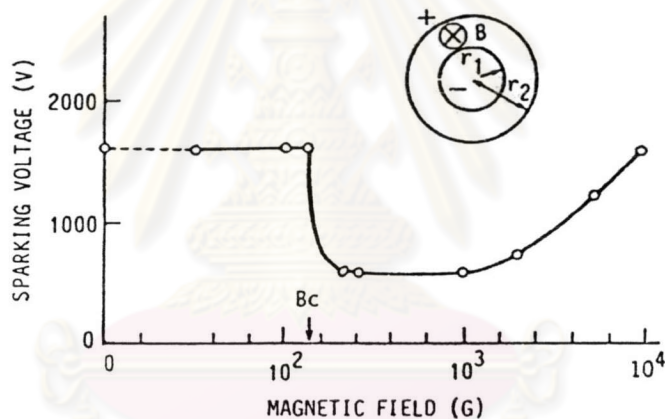
และสามารถวิเคราะห์ผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อการดิสชาร์จ ซึ่งพิจารณาได้จากสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งยุติผล (cut-off magnetic field; B_c) โดยสนามแม่เหล็กจะมีผลต่อการดิสชาร์จเมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็กมีค่ามากกว่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งยุติผล [17] ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 2.13

$$B_c = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{2mV_c}{e}} \quad \text{สำหรับขั้วอิเล็กโทรดแผ่นราบ} \quad (2.13)$$

โดย V_c คือ ความต่างศักย์ที่จ่ายระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

L คือ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

2.2.4 สนามแม่เหล็กที่มีผลต่อการดิสชาร์จ



รูปที่ 2.5 แสดงความต่างศักย์ของการดิสชาร์จกับสนามแม่เหล็กที่วัดในขั้ว

อิเล็กโทรดโคแอคเซียลทรงกระบอก [17]

ในรูปที่ 2.5 แสดงผลของสนามแม่เหล็กตามขวางกับความต่างศักย์ของการดิสชาร์จที่วัดในขั้วอิเล็กโทรดโคแอคเซียลทรงกระบอกซึ่งทำจากทองแดง โดยมีรัศมีภายใน 5 มิลลิเมตร และรัศมีภายนอก 15 มิลลิเมตร ที่ความดัน 40 มิลลิทอร์ โดยสนามแม่เหล็กที่มีค่าต่ำกว่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งยุติผล (cut-off magnetic field; B_c) อิเล็กตรอนในบริเวณขั้วคาโทดจะไปถึงขั้วแอโนดโดยปราศจากการแสดงการเคลื่อนที่เป็นรูปเกลียววงกลมระหว่างขั้วอิเล็กโทรด เนื่องจากรัศมีของการเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมมีค่ามากกว่าระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด และเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่ามากกว่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งยุติผล ความต่างศักย์ของการดิสชาร์จจะลดลงอย่างฉับพลัน ซึ่งเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมที่เป็นกลาง

และเกิดการแตกตัวเป็นไอออนเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าสูงมากๆ ความต่างศักย์ของการดิซซาร์จจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามสนามแม่เหล็ก ซึ่งถูกทำให้เกิดขึ้นโดยการเพิ่มขึ้นของการสูญเสียพลังงานของอิเล็กตรอนที่ผ่านพ้นการชนอย่างต่อเนื่อง [17]

2.3 องค์ประกอบที่สำคัญของหัวดีซีแมกนีตรอนสปีดเทอริง

สำหรับการออกแบบสร้างหัวแมกนีตรอนให้สามารถใช้ในการสปีดเทอริงได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น ควรจะคำนึงถึงองค์ประกอบที่สำคัญ ดังต่อไปนี้

2.3.1 วัสดุที่ใช้สร้างหัวดีซีแมกนีตรอน

ในการสร้างหัวดีซีแมกนีตรอนขนาดเล็กนั้น วัสดุที่เลือกใช้ควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ [16,23]

1. เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงทนทานเหมาะสมกับการสร้างชิ้นงานขนาดเล็ก สามารถกลึงขึ้นรูปได้ดังต้องการและเชื่อมประกอบได้โดยไม่เกิดการร้าวซึม
2. เป็นวัสดุที่มีการยึดเกาะของก๊าซต่ำ สามารถไล่ก๊าซบนผิววัสดุภายในระบบสุญญากาศได้โดยง่าย
3. เป็นวัสดุที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อนที่เกิดจากสารเคมี
4. เป็นวัสดุที่มีการนำไฟฟ้าที่ดี
5. เป็นวัสดุที่มีการนำความร้อนที่ดี
6. เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติไม่เป็นสารแม่เหล็ก เพราะจะไปกักกันสนามแม่เหล็กที่ผิวเป้าให้มีค่าน้อยลง

2.3.2 การให้ความเย็นที่เป้า

พลังงานที่จ่ายเข้าไปในกระบวนการสปีดเทอริงจะทำให้ไอออนบวกที่เคลื่อนที่เข้าชนผิวเป้าหมายมีพลังงานค่อนข้างสูง ซึ่งส่วนใหญ่จะเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในรูปของพลังงานความร้อนที่เป้าและความร้อนที่เกิดขึ้นที่ผิวเป้าในขณะที่เกิดการสปีดเทอริงอาจจะมีค่าสูงกว่าปกติและสามารถนำไปสู่ความเสียหายของการเชื่อมต่อระหว่างเป้าและแผ่นหลังที่เป็นขั้วไฟฟ้า เป้า และโอริง

เป็นต้น ความร้อนที่มากเกินไปนี้สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการให้ความเย็นกับเป่าด้วยน้ำหรือของเหลวที่เหมาะสมอื่นๆ และควรระวังในการรั่วซึมออกมาของน้ำ [11]

2.5.3 การควบคุมให้เกิดการสปีดเทอริงเฉพาะผิวเป่า

บริเวณของเป่าจะถูกล้อมรอบด้วยกำแพงบริเวณมืด (dark space shield) ซึ่งเรียกกันโดยทั่วไปว่ากราวด์ชีลด์ (ground shields) ประโยชน์ของกราวด์ชีลด์ก็คือควบคุมให้การระดมยิงของไอออนและการสปีดเทอริงเกิดที่เป่าเท่านั้น มิฉะนั้นแผ่นหลังของเป่าและตัวยึดเป่าอาจจะถูกสปีดเทอริงออกมาด้วยและก่อให้เกิดความไม่บริสุทธิ์ของฟิล์มที่เคลือบ ในการขัดขวางการระดมยิงของบริเวณที่ถูกป้องกัน ระยะห่างระหว่างเป่าและกราวด์ชีลด์ต้องมีค่าน้อยกว่าความหนาของบริเวณมืด (dark space thickness) เพื่อไม่ให้เกิดการโกลว์ดิสชาร์จในพื้นที่ว่างนี้ ในบางโอกาสพบว่าตำแหน่งที่เป็นขอบคมและสิ่งสกปรกชิ้นเล็กๆ จะทำให้เกิดการดิสชาร์จเฉพาะที่หรือการอาร์คเฉพาะที่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการดิสชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสตรงนั้นขอบที่คมหรือสิ่งสกปรกเล็กๆ ต้องกำจัดออกไปเสียก่อน และเนื่องจากความหนาของบริเวณมืดจะมีค่าลดลงตามความดันที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นระยะห่างระหว่างเป่าและกราวด์ชีลด์ควรมีค่าอยู่ในขีดจำกัดของความดันสูงสุดของระบบ [11] และภายใต้การจัดวางของสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า ความหนาของบริเวณมืดจะลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการจัดวางของสนามแม่เหล็กเป็นการเพิ่มอย่างสม่ำเสมอของความดันก๊าซในบริเวณดิสชาร์จดังแสดงในความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.14 [17]

ผลของสนามแม่เหล็กกับความดันยังผล (P_e) แสดงโดย

$$p_e/p \cong [1 + (\omega\tau)^2]^{1/2} \quad (2.14)$$

โดย ω คือ ความถี่ของการเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมของอิเล็กตรอน

τ คือ เวลาปลอดการชนเฉลี่ย (mean free time)

p คือ ความดันของก๊าซที่ใช้ในการดิสชาร์จ

โดย $\omega = eB/m$ และ $\tau = \lambda_0/p[2(e/m)V_0]^{1/2}$ จะได้ว่า

$$\omega\tau \cong \lambda_0 B(e/m)^{1/2} / \sqrt{2} pV_0^{1/2} \quad (2.15)$$

โดย λ_0 คือ ระยะทางปลอดการชนเฉลี่ยของอิเล็กตรอนที่ความดัน 1 ทอร์

B คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก

e/m คือ ค่าประจุต่อมวลของอิเล็กตรอน

V_0 คือ ความต่างศักย์ที่ใช้เร่งอิเล็กตรอน

และความหนาของบริเวณมืดจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเป็นฟังก์ชันกับความต่างศักย์ของการดิสชาร์จที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการแปรผันแบบเอกโปเนนเชียลของความหนาของบริเวณมืดกับความต่างศักย์ของการดิสชาร์จขึ้นอยู่กับความดันของระบบสุญญากาศ [4]

ความหนาของบริเวณมืดและความต่างศักย์ของการดิสชาร์จมีความสัมพันธ์กัน ดังแสดงในสมการที่ 2.16

$$d = cV^{-m} \quad (2.16)$$

โดย c คือ ค่าคงที่

m คือ เลขยกกำลังระหว่าง -3 และ -6 [6]

ความหนาของบริเวณมืด กระแส และความต่างศักย์ถือตามกฎของซิลด์ ซึ่งอยู่ในความสัมพันธ์ [6]

$$I \propto \frac{V^{\frac{3}{2}}}{d^2} \quad (2.17)$$

เมื่อการขึ้นกับความต่างศักย์ของบริเวณมืดถูกแทนลงในสมการ (2.16) จะได้ความสัมพันธ์ [2,4]

$$I \propto kV^n \quad (2.18)$$

โดย k คือ ค่าคงที่ของความสัมพันธ์

n คือ ตัวเลขที่แสดงความสามารถในการกักอิเล็กตรอนโดยสนามแม่เหล็ก

2.3.4 ลักษณะของสนามแม่เหล็ก

สนามแม่เหล็กในระบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเทอริงนั้นจะมีผลต่อลักษณะของพลาสมาที่เกิดขึ้นซึ่งจะสอดคล้องกับอัตราการเคลือบฟิล์มและคุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์ของฟิล์มบางที่เคลือบ โดยสามารถแบ่งลักษณะของสนามแม่เหล็กที่บริเวณผิวเป้าออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้ [1,3,24-25]

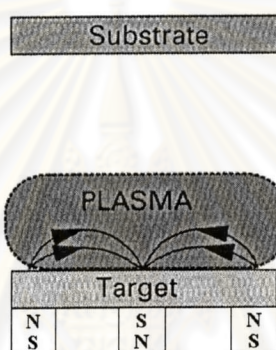
1. แม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มของสนามแม่เหล็กเท่ากับแม่เหล็กด้านนอก โดยเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดจะเชื่อมปิดระหว่างแม่เหล็กตรงกลางกับแม่เหล็กด้านนอกที่บริเวณผิวเป้า ซึ่งมีชื่อเรียกว่า แมกนีตรอนแบบสมมาตร (balanced magnetron) หรือแมกนีตรอนแบบสามัญ (conventional magnetron)

2. แม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มของสนามแม่เหล็กมากกว่าแม่เหล็กด้านนอก โดยเส้นแรงแม่เหล็กส่วนหนึ่งจะเชื่อมปิดระหว่างแม่เหล็กตรงกลางกับแม่เหล็กด้านนอก และเส้นแรงแม่เหล็กส่วนที่เหลือจะมีทิศทางไปยังผนังของภาชนะสุญญากาศ ซึ่งมีชื่อเรียกว่าแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 1 (unbalanced magnetron type1)

3. แม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มของสนามแม่เหล็กน้อยกว่าแม่เหล็กด้านนอก โดยเส้นแรงแม่เหล็กส่วนหนึ่งจะเชื่อมปิดระหว่างแม่เหล็กตรงกลางกับแม่เหล็กด้านนอก และเส้นแรงแม่เหล็กส่วนที่เหลือจะมีทิศทางไปยังแผ่นรองรับ ซึ่งมีชื่อเรียกว่า แมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 2 (unbalanced magnetron type2)

ในกรณีการดิสชาร์จของระบบดีซีแมกนีตรอนที่แม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มของสนามแม่เหล็กเท่ากับแม่เหล็กด้านนอก โดยสนามแม่เหล็กที่ใส่เข้าไปจะทำหน้าที่กักเก็บอิเล็กตรอนไว้ที่หน้าผิวเป้าและอิเล็กตรอนเหล่านี้จะมีการเคลื่อนที่เป็นรูปเกลียววงกลมในเส้นทางเลื่อนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกันด้วยแรงลอเรนซ์ ซึ่งนำไปสู่โอกาสในการชนกับอะตอมที่เป็นกลางและเกิดกระบวนการแตกตัวเป็นไอออนบวกสูงขึ้น โดยไอออนบวกที่ถูกสร้างขึ้นจากกระบวนการแตกตัวจะไม่ถูกกักโดยสนามแม่เหล็กและจะถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้าไปยังเป้าที่ขั้วคาโทด และเคลื่อนที่เข้าชนกับอะตอมที่ผิวเป้าทำให้เกิดการสปีดเทอริงของเป้าและมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาด้วย โดยอิเล็กตรอนทุติยภูมิลำนี้จะถูกเร่งกลับเข้าไปยังการดิสชาร์จ และอิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะถูกกักไว้ในเส้นทางเลื่อนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน ซึ่งเป็นผลให้เกิดการ

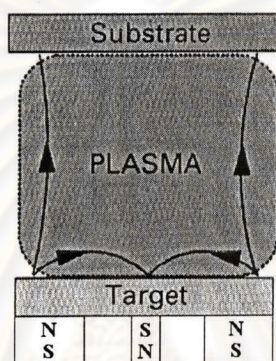
แตกตัวในปริมาณสูงขึ้นก่อนที่จะสูญเสียไป โดยจะทำให้พลาสมามีความหนาแน่นสูงในบริเวณผิวเป้า และจากการที่พลาสมามีความหนาแน่นสูงในบริเวณผิวเป้านั้น พิล์มบางที่ปลูกบนแผ่นรองรับในตำแหน่งภายในบริเวณนี้จะถูกควบคุมโดยการระดมยิงของไอออนซึ่งส่งผลกระทบต่อโครงสร้างและคุณสมบัติของฟิล์มบางที่ทำการปลูก สำหรับแผ่นรองรับที่วางอยู่นอกบริเวณนี้จะวางอยู่ในบริเวณที่ความหนาแน่นของพลาสมาต่ำ เป็นผลให้กระแสไอออนที่แผ่นรองรับมีค่าน้อยกว่า 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งไม่เพียงพอที่จะปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของฟิล์ม [3] ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะเคลือบฟิล์มให้หนาแน่นเต็มที่ในบริเวณกว้างหรือมีส่วนประกอบที่สมบูรณ์ในการใช้แมกนีตรอนแบบสมมาตร



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะของแมกนีตรอนแบบสมมาตร [3]

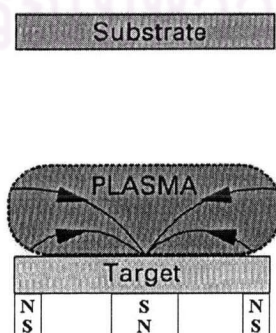
สำหรับในกรณีแม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มของสนามแม่เหล็กน้อยกว่าแม่เหล็กด้านนอก ในกรณีนี้เส้นแรงแม่เหล็กส่วนหนึ่งจะเชื่อมปิดระหว่างแม่เหล็กตรงกลางและแม่เหล็กด้านนอก และเส้นแรงแม่เหล็กส่วนที่เหลือจะมีทิศทางไปยังแผ่นรองรับ โดยอิเล็กตรอนทุติยภูมิส่วนหนึ่งที่มีพลังงานสูงที่ไม่ถูกกักเก็บไว้ในเส้นทางเลือนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกันจะเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมไปตามเส้นแรงแม่เหล็กมีทิศทางไปยังแผ่นรองรับและเกิดการชนกับอะตอมที่เป็นกลางแล้วเกิดการแตกตัวเป็นไอออนในบริเวณผิวหน้าของแผ่นรองรับ จึงเกิดไอออนบวกเพิ่มสูงขึ้นบริเวณแผ่นรองรับ ซึ่งเป็นผลให้พลาสมาจะถูกกักเก็บไว้ได้น้อยลงในบริเวณผิวเป้า แต่จะมีขนาดเพิ่มขึ้นโดยมีทิศทางไปยังแผ่นรองรับ ซึ่งเป็นผลให้กระแสไอออนมีค่าสูงโดยได้รับจากพลาสมาที่เกิดขึ้น โดยวินโดวส์และซาว์โวด์ และกลุ่มนักวิจัยที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องนี้ได้แสดงให้เห็นต่อมาว่าที่แผ่นรองรับมีความหนาแน่นของกระแสไอออน 5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรและมากกว่านั้น [3] ซึ่งอยู่ในระดับที่มีปริมาณสูงกว่ากรณีแมกนีตรอนแบบสมมาตร และเป็นการแสดงให้เห็นว่าแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 2 เป็นแหล่งกำเนิดไอออนที่มีประสิทธิภาพมากและเป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางในการเคลือบ

ฟิล์มโดยวิธีสปัตเทอริง และนอกจากนี้กระแสไอออนที่แผ่นรองรับยังเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสที่เป้า และอัตราการเคลือบเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสที่เป้า ผลลัพธ์ก็คืออัตราส่วนของไอออนต่ออะตอมที่แผ่นรองรับยังมีค่าคงที่ตามอัตราการเคลือบที่เพิ่มขึ้น และการเคลือบฟิล์มที่หนาแน่นโดยมีค่ากระแสไอออนต่อพื้นที่สูง ซึ่งมีค่ามากกว่า 2 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร [3] ของพลังงานไอออนที่ค่อนข้างต่ำ โดยมีค่าน้อยกว่า 100 อิเล็กตรอนโวลต์ [3] เป็นที่พึงปรารถนา โดยปราศจากการนำไปสู่ความเค้นที่มากกว่าปกติ (excessive stress) และความเค้นภายใน (intrinsic stress) ซึ่งทำได้โดยแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 2



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะของแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 2 [3]

สำหรับในกรณีที่แม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มของสนามแม่เหล็กมากกว่าแม่เหล็กด้านนอก ในกรณีนี้เส้นแรงแม่เหล็กส่วนหนึ่งจะเชื่อมปิดระหว่างแม่เหล็กตรงกลางและแม่เหล็กด้านนอก และเส้นแรงแม่เหล็กส่วนที่เหลือจะมีทิศทางไปยังผนังของภาชนะสุญญากาศ ซึ่งทิศทางของอิเล็กตรอนและพลาสมาจะห่างไปจากแผ่นรองรับ เป็นผลให้ความหนาแน่นของพลาสมาในบริเวณแผ่นรองรับมีค่าต่ำ ซึ่งน้อยกว่า 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร [3] การออกแบบในลักษณะนี้จะไม่เป็นที่นิยมใช้ เพราะการให้ผลของกระแสไอออนต่ำที่แผ่นรองรับ



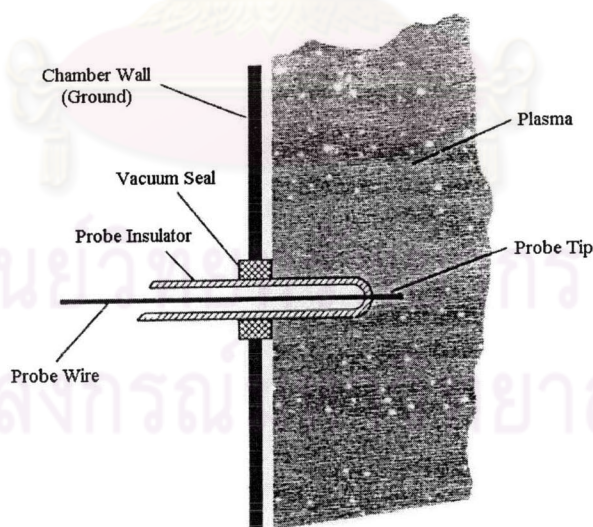
รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะของแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 1 [3]

2.4 คุณสมบัติทางพลาสมา

2.4.1 หัววัดลางมัวร์

หัววัดลางมัวร์เป็นขั้วไฟฟ้าที่ทำจากโลหะที่ปกคลุมด้วยฉนวน ยกเว้นที่ปลาย หัววัดที่สัมผัสกับพลาสมา หัววัดทำมาจากโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงดังเช่น ทังสเตน โมลิบดีนัม หรือแพททินัม โดยจะใช้หัววัดลางมัวร์ในการวิเคราะห์พลาสมา ซึ่งเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ พารามิเตอร์ของพลาสมาเย็น โดยใช้ในการตรวจสอบความหนาแน่นของพลาสมา (n_p) อุณหภูมิ ของอิเล็กตรอน (T_e) ศักย์ของพลาสมา (V_p) และศักย์ลอย (floating potential; V_f) [9,11,17]

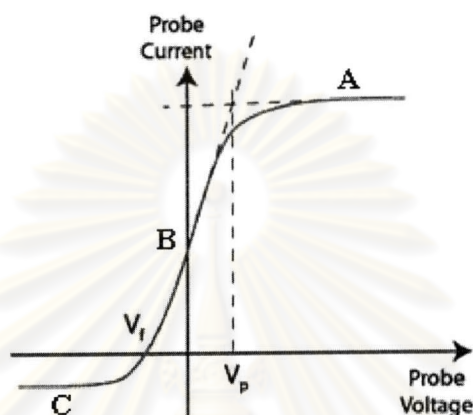
ในการใช้หัววัดลางมัวร์จะดำเนินการโดยการจ่ายความต่างศักย์ที่สามารถปรับค่า ได้จากภายนอกให้กับหัววัดที่ปลายอีกด้านหนึ่งถูกสอดเข้าไปในพลาสมา ดังแสดงในรูปที่ 2.9 เมื่อปลายของหัววัดสัมผัสกับพลาสมาจะแสดงให้เห็นถึงลักษณะเฉพาะของกระแสและ ความต่างศักย์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นที่หัววัดดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งนำมาใช้วิเคราะห์ตัวแปร ของพลาสมา สำหรับความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับหัววัดจะมีลักษณะต่อเนื่องด้วยรูปร่างฟันปลา (sawtooth-shaped) ในกรณีหัววัดเดี่ยวลางมัวร์ความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับหัววัดจะเทียบกับผนัง ของภาชนะสุญญากาศ [9]



รูปที่ 2.9 แสดงหัววัดเดี่ยวลางมัวร์ที่สอดเข้าไปในพลาสมา [9]

2.4.2 ลักษณะเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์

ในการใช้หัววัดเดี่ยววางมีวรีวิเคราะห์พารามิเตอร์ของพลาสมา จะจ่ายความต่างศักย์ให้กับหัววัดโดยที่ปลายอีกด้านหนึ่งของหัววัดสัมผัสกับพลาสมา ลักษณะเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์ที่หัววัดจะถูกแสดงออกมา ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูป 2.10 แสดงแผนภาพลักษณะเฉพาะของกระแสกับความต่างศักย์ [9]

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดมีค่าเท่ากับกับศักย์ของพลาสมาที่ตำแหน่ง V_p ซึ่งไม่มีสนามไฟฟ้าอยู่รอบๆ หัววัด ตำแหน่งนี้จึงไม่เกิดพลาสมาซีท อิเล็กตรอนและไอออนจะเคลื่อนย้ายไปยังหัววัด โดยกระแสอิเล็กตรอนจะสะสมที่หัววัดมากกว่ากระแสของไอออน ที่ตำแหน่ง V_p กระแสจะมีค่า

$$I_p = \frac{1}{4} e A n_e \left(\frac{8kT_e}{\pi m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.19)$$

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าตำแหน่ง V_p ในบริเวณ A จะเข้าสู่บริเวณกระแสอิเล็กตรอนอิ่มตัว (I_{se})

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดลดต่ำกว่าตำแหน่ง V_p ในบริเวณ B อิเล็กตรอนจะถูกผลักออกจากหัววัดเพิ่มขึ้น มีเพียงแต่อิเล็กตรอนที่มีพลังงานเพียงพอที่จะสามารถเคลื่อนที่ไปยังหัววัด กระแสอิเล็กตรอนจะมีค่า

$$I_e = e A n_e \left(\frac{kT_e}{2\pi m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{-e(V_p - V)}{kT_e} \right) \quad (2.20)$$

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดลดลงจนมาอยู่ที่ตำแหน่งของศักย์ลอย (V_f) กระแสอิเล็กตรอนและกระแสไอออนที่หัววัดจะมีค่าเท่ากัน และกระแสรวมที่หัววัดมีค่าเป็นศูนย์

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดมีค่าต่ำกว่าตำแหน่ง V_f ในบริเวณนี้จะมีสนามไฟฟ้าอยู่รอบๆหัววัดและจะสร้างพลาสมาที่ขึ้นมา อิเล็กตรอนจะถูกผลักออกไปจากหัววัดส่วนไอออนซึ่งเคลื่อนที่แบบสุ่มผ่านขอบปีที่จะถูกสะสมไว้ที่หัววัด และเข้าสู่บริเวณกระแสไอออนอิมิตัว (I_{is}) ในบริเวณ C โดยกระแสไอออน [9,17,26-28] จะมีค่า

$$I_i = -\frac{1}{2} eAn_i \left(\frac{kT_e}{m_i} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.21)$$

2.4.2.1 อุณหภูมิอิเล็กตรอน (T_e)

เมื่อหาอัตราการเปลี่ยนแปลงลอการิทึมของกระแสอิเล็กตรอนในสมการที่ (2.20) ก็จะสามารถทำการวิเคราะห์หาค่า T_e ออกมาได้ [17,26] ดังนี้

$$\frac{d \ln I_e}{dV} = \frac{e}{kT_e} \quad (2.22)$$

หรือจะหาค่า T_e จากการรวมสมการที่ (2.20) สำหรับกระแสอิเล็กตรอนและสมการที่ (2.21) สำหรับกระแสไอออน ซึ่งจะได้ว่า

$$I = -\frac{1}{2} eAn_i \left(\frac{kT_e}{m_i} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{4} eAn_e \left(\frac{8kT_e}{\pi m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{-e(V_p - V)}{kT_e} \right) \quad (2.23)$$

จากการแจกแจงความเร็วอิเล็กตรอนของแมกเวลล์-โบลซ์มันน์ ค่า $n_i = n_e = n$ จะได้ว่า [28]

$$I = \frac{1}{2} eAn \left(\frac{kT}{m_i} \right)^{\frac{1}{2}} \left[-1 + \left(\frac{2m_i}{\pi m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{-e(V_p - V)}{kT_e} \right) \right] \quad (2.24)$$

ที่ตำแหน่ง V_f กระแสที่หัววัดจะมีค่าเป็นศูนย์ ($I = 0$)

$$I = 0 = \frac{1}{2} eAn \left(\frac{kT}{m_i} \right)^{\frac{1}{2}} \left[-1 + \left(\frac{2m_i}{\pi m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{e(V_f - V_p)}{kT_e} \right) \right] \quad (2.25)$$

จะได้ว่า

$$\frac{kT_e}{e} = \frac{2(V_p - V_f)}{\ln\left(\frac{2m_i}{\pi m_e}\right)} \quad (2.26)$$

หน่วยของ kT_e/e คือโวลต์ ดังนั้นสามารถหา kT_e ได้ในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์

2.4.2.2 ความหนาแน่นพลาสมา

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (n_e) และความหนาแน่นของไอออน (n_i) ที่อยู่ในสถานะเป็นกลางทางไฟฟ้าของพลาสมาจะมีค่าเท่ากัน $n_e \approx n_i \approx n_p$ โดย n_p คือความหนาแน่นของพลาสมา (n_p) โดยสามารถหาค่าความหนาแน่นพลาสมาได้ [29-30] จากสมการ

$$n_p = \frac{I_{is}}{0.6Ae} \left(\frac{m_i}{kT_e}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.27)$$

โดย A คือ พื้นที่ของหัววัดที่สัมผัสกับพลาสมา

I_{is} คือ กระแสไอออนอิมิต์

m_i คือ มวลของไอออน

2.4.2.3 ผลของสนามแม่เหล็ก

ลักษณะเฉพาะของกระแสกับความต่างศักย์ที่ได้จากหัววัดอยู่ในกรณีที่มีการเคลื่อนที่ของอนุภาคในพลาสมาถูกควบคุมด้วยสนามไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ถ้าสนามแม่เหล็กถูกนำเข้ามาในพลาสมา อิเล็กตรอนและไอออนจะไม่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงตามทิศทางของสนามไฟฟ้า แต่จะเคลื่อนที่เป็นวงกลมเนื่องจากอิทธิพลของสนามแม่เหล็ก โดยการเคลื่อนที่เป็นวงกลมรอบเส้นแรงแม่เหล็กด้วยรัศมีลาร์มอร์ $r = mv_{\perp}/eB$ เป็นผลให้การเคลื่อนที่ของอนุภาคข้ามผ่านเส้นแรงแม่เหล็กจะถูกควบคุมอย่างรุนแรง ในขณะที่การเคลื่อนที่ตามเส้นแรงแม่เหล็กแทบจะไม่มีผลกระทบ โดยผลของสนามแม่เหล็กสามารถละเลยได้ในกรณีที่ $r \gg a$ เมื่อ a คือขนาดของหัววัด [9,17]

เนื่องจากรัศมีลาร์มอร์ของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยกว่าของไอออนด้วยอัตราส่วนของ m_e/m_i ดังนั้นอิเล็กตรอนจะได้รับผลกระทบจากสนามแม่เหล็กมากกว่าไอออน เพราะว่าโดยทั่วไป

$r_{Li} > a$ กระแสไอออนอิมิตัวแทบจะไม่ได้รับผลกระทบจากสนามแม่เหล็ก แต่ในทางกลับกัน กระแสอิเล็กตรอนอิมิตัวที่ถูกวัดโดยหัววัดที่ขนานกับสนามแม่เหล็กมีค่าลดลงอย่างมาก และ กระแสอิเล็กตรอนอิมิตัวที่วัดโดยหัววัดที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กกระแสอิเล็กตรอนอิมิตัวจะได้รับผลกระทบน้อยมาก [9,17]

2.5 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง

2.5.1 การศึกษาลักษณะโครงสร้างของผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์โดยวิธี $\theta - 2\theta$ ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์เป็นวิธีที่ใช้ในการ จำแนกลักษณะโครงสร้างของผลึก ซึ่งอาศัยรังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นค่าเดียวจากแหล่งกำเนิด ตกกระทบกับสารเคลือบ [31-33] ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ ซึ่งสารเคลือบจะหมุน เป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอ็กซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ และเมื่อรังสี เอ็กซ์ผ่านโครงสร้างของผลึกออกมาจะเกิดการแทรกสอดทั้งแบบเสริมและแบบหักล้าง โดย วิลเลียม เฮนรี แบรกก์ ได้เสนอว่าผลึกมีการจัดเรียงตัวเป็นระนาบของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อน คลื่นที่ตกกระทบโดยมีมุมที่ตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้รังสีเอ็กซ์จะแทรกสอดกันแบบเสริม มากที่สุดเมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยความแตกต่างของทางเดินคลื่น (path difference) เป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ซึ่งเรียกว่ากฎของแบรกก์ ดังสมการ

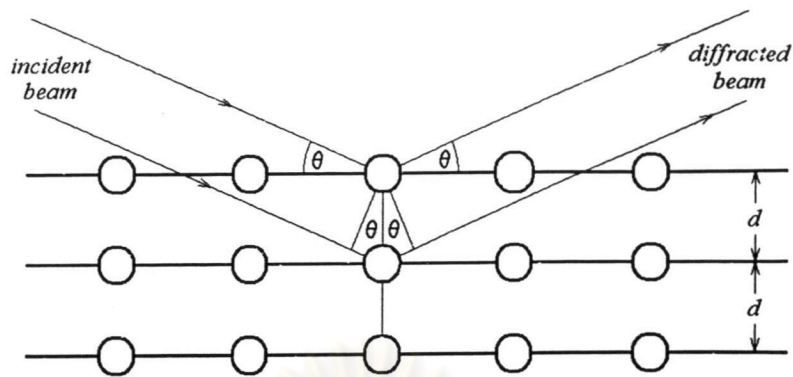
$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta \quad (2.28)$$

โดย n คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

d_{hkl} คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ

θ คือ มุมสะท้อนและมุมตกกระทบของรังสีเอ็กซ์เมื่อเทียบกับระนาบของผลึก



รูปที่ 2.11 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์ [32]

ระนาบใดที่รังสีเอ็กซ์ตกกระทบแล้วกระเจิงออกมาโดยสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่า ระนาบแบรกก์ และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับระนาบที่ขนานกับรังสีตกกระทบ เรียกว่า มุมเลี้ยวเบน ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมสะท้อน

2.5.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

รูปแบบของการเลี้ยวเบนแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์กับมุมเลี้ยวเบน ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของธาตุหรือสารแต่ละประเภท จากการเลี้ยวเบนและการแทรกสอดแบบเสริมจะทำให้ความเข้มของรังสีเอ็กซ์มีค่ามากซึ่งจะสังเกตได้จากตำแหน่งพีคในรูปแบบการเลี้ยวเบนและพีคเหล่านี้จะปรากฏที่มุมเลี้ยวเบนเดิมสำหรับธาตุหรือสารประกอบชนิดเดียวกัน และสำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันก็จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนต่างกันและจะมีตำแหน่งของพีคที่มุมของการเลี้ยวเบนแตกต่างกัน การวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกทำได้โดยการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของสารที่เคลือบกับไฟล์มาตรฐานของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผลึก ซึ่งเป็นฐานข้อมูลเกี่ยวกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของธาตุหรือสารประกอบต่างๆ [32-33] โดยการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ได้กับรูปแบบการเลี้ยวเบนจากไฟล์มาตรฐานนั้น ทำได้โดยการเปรียบเทียบตำแหน่งของระนาบที่ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนออกมา โดยการระบุระนาบจะใช้สัญลักษณ์ (hkl) ซึ่งมีชื่อเรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ [32] ซึ่งดัชนีมิลเลอร์จะเป็นส่วนกลับของจุดที่ระนาบตัดแกนผลึก เช่น ระนาบ (200) จะตัดแกนผลึก x, y, z ที่จุด $(\frac{1}{2}, \infty, \infty)$

2.5.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นเครื่องมือที่ใช้ส่องดูสารตัวอย่างที่มีขนาดเล็กมากๆ ให้เห็นภาพขยายของสารตัวอย่างอย่างชัดเจน เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิว ขนาดของเกรน รูพรุนที่เกิดขึ้น ความหนาของสารตัวอย่างที่เคลือบและองค์ประกอบทางเคมี โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะใช้อิเล็กตรอนทำหน้าที่แทนแสง และใช้แม่เหล็กไฟฟ้าควบคุมอิเล็กตรอนให้ไปรวมกันที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งบนผิวของสารตัวอย่าง ซึ่งจะได้สัญญาณภาพที่เกิดขึ้นอยู่บนหน้าจอแสดงผลโดยสามารถเลือกตำแหน่งที่จะส่องดูได้อย่างละเอียด ซึ่งระบบจะอยู่ในสภาวะสุญญากาศ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะมีประโยชน์มากในการศึกษาและวิจัยทางด้านโลหะวิทยา ทางด้านการแพทย์และทางด้านวิทยาศาสตร์อีกหลายสาขาเพราะสามารถส่องมองเห็นรูปร่างของผลึก และส่องมองรูปร่างของไวรัส แบคทีเรียซึ่งไม่สามารถใช้กล้องจุลทรรศน์ธรรมดาส่องมองเห็นได้ [34-35]



คุรุเทพยทรพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย