



## บทที่ 2

### ดิสชาร์จพลาสมา

พลาสมา หมายถึง ก๊าซที่มีอุณหภูมิและความดันต่ำซึ่งภายในภาชนะนั้นจะมีอะตอมหรือโมเลกุลบางส่วนอยู่ในสภาพถูกไอออไนซ์ตลอดเวลา และในการรักษาระดับของการไอออไนซ์ (จำนวนไอออนบวกต่ออนุภาคของก๊าซที่เป็นกลาง) จะอาศัยอิเล็กตรอนที่ผลิตขึ้นภายในระบบเป็นตัวรับและสะสมพลังงานไฟฟ้าซึ่งป้อนจากภายนอก จนกลายเป็นอนุภาคพลังงานสูงที่สามารถกระตุ้นกระบวนการไอออไนซ์อนุภาคของก๊าซได้

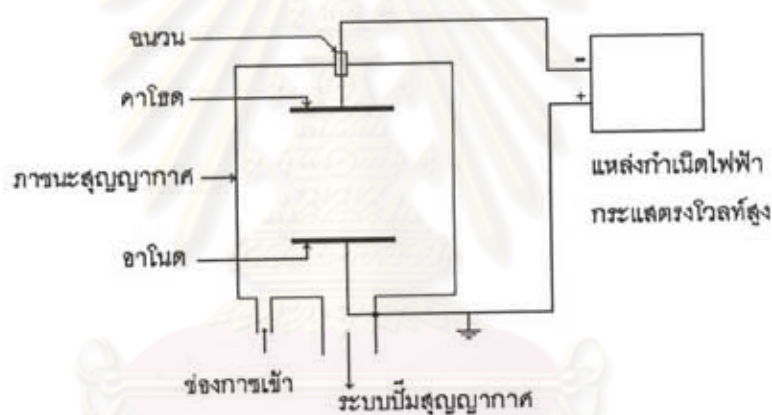
พลาสมาสามารถกำเนิดได้โดยการป้อนไฟฟ้าความต่างศักย์สูงทั้งแบบกระแสตรงหรือกระแสสลับระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้ว ซึ่งวางขนานกันและอยู่ในภาชนะซึ่งบรรจุก๊าซความดันต่ำ พลาสมาที่เกิดจากการขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้ากระแสตรง เรียกว่า ดิสชาร์จพลาสมา (DC glow discharge) หรือดิสชาร์จไดโอดพลาสมา (dc diode glow discharge) ซึ่งเป็นพลาสมาแบบพื้นฐานที่สุด ส่วนในกรณีของพลาสมาที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ โดยทั่วไปหมายถึงพลาสมาที่กำเนิดด้วยไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 13.56 เมกะเฮิรตซ์ซึ่งเป็นความถี่ย่านคลื่นวิทยุ (Radio Frequency : RF) เท่านั้น ทั้งนี้ เนื่องจากเป็นข้อตกลงขององค์การสื่อสารระหว่างประเทศ (International communication authorities) ที่กำหนดให้ใช้เฉพาะค่าความถี่นี้เพื่อป้องกันการรบกวนต่อระบบสื่อสารภายนอก ถึงแม้ว่าไฟฟ้ากระแสสลับแทบทุกความถี่สามารถใช้ขับเคลื่อนเพื่อกำเนิดพลาสมาได้ก็ตาม เรียกพลาสมาแบบที่ใช้ความถี่ย่านคลื่นวิทยุว่า อาร์เอฟพลาสมา (RF Glow Discharge)

ก๊าซที่อยู่ในสภาพพลาสมาจะประพฤติตัวคล้ายพลาสมาอุดมคติ ซึ่งภายในประกอบด้วยอิเล็กตรอน ไอออนบวก และอนุภาคของก๊าซที่เป็นกลาง มีสถานะโดยรวมเป็นกลางทางไฟฟ้าแบบกึ่งเสถียร (quasi neutrality) ความแตกต่างระหว่างมวลของอิเล็กตรอนกับไอออนบวกเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดสมบัติของพลาสมา อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคเหล่านี้ โดยเฉพาะระหว่างไอออนบวกกับพื้นผิวที่อยู่ภายใน หรือสัมผัสกับพลาสมาถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะเทคโนโลยีด้านพื้นผิวและฟิล์มบาง ได้แก่ Sputter deposition, plasma etching, plasma enhanced chemical vapor deposition(PECVD) เป็นต้น [4,5,6]

ในบทนี้ได้นำเสนอกลไกการเกิด รวมทั้งสมบัติต่างๆของดีซีโกลวดิสชาร์จที่มีความสำคัญต่อการนำไปอธิบายและทำความเข้าใจกระบวนการเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง อันเป็นเทคนิคที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้

### การกำเนิดดีซีโกลวดิสชาร์จ

ระบบดีซีโกลวดิสชาร์จอย่างง่าย ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.1 ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ววางขนานกัน คือ คาโทด(cathode) กับแอโนด (anode) อยู่ในภาชนะสุญญากาศ(vacuum chamber) ซึ่งบรรจุก๊าซความดันต่ำ เช่น นีออน อาร์กอน ออกซิเจน ก๊าซผสมระหว่างอาร์กอนกับออกซิเจน เป็นต้น ขั้วไฟฟ้าทั้งสองต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงโวลท์สูง(high voltage dc power supply) โดยคาโทดต่อกับขั้วลบ ส่วนแอโนดต่อกับขั้วบวก

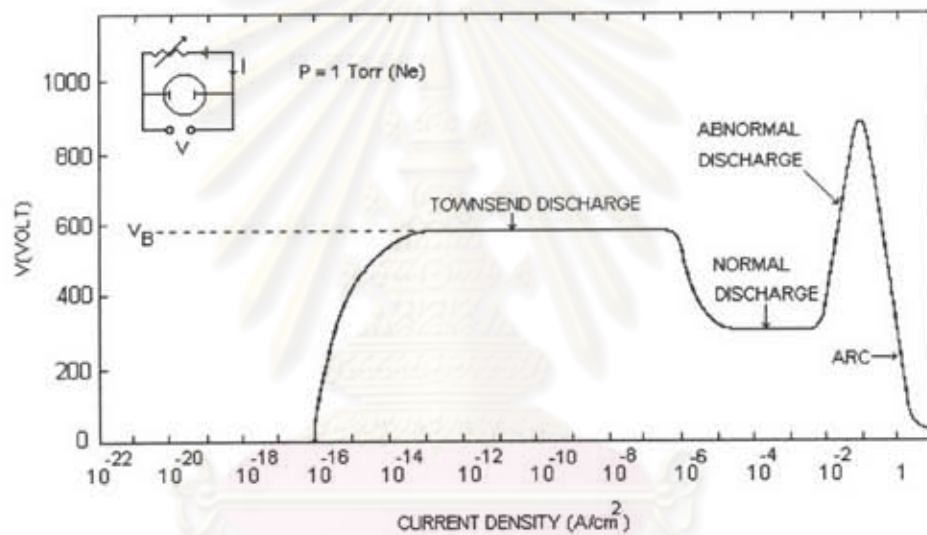


รูปที่ 2.1 ระบบดีซีโกลวดิสชาร์จอย่างง่าย

เมื่อป้อนความต่างศักย์จากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง จะได้ลักษณะส่อของกระแสและความต่างศักย์แบบฉบับ ตามสถานะต่างๆของการดีสชาร์จ แสดงดังกราฟในรูปที่ 2.2

ในช่วงเริ่มต้น บริเวณระหว่างขั้วคาโทดกับแอโนดจะมีสนามไฟฟ้าขนาด  $V/d$  โดย  $V$  เป็นความต่างศักย์ และ  $d$  เป็นระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง กระแสไฟฟ้าปริมาณเล็กน้อยที่มีในวงจร เป็นกระแสของอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electron) จำนวนหนึ่งที่หลุดจากคาโทดด้วยการกระตุ้นของรังสีที่มีอยู่ในบรรยากาศ เช่น รังสีคอสมิก รังสีอัลตราไวโอเล็ต เป็นต้น แล้วถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้าให้เคลื่อนที่ไปยังแอโนด ซึ่งถ้าหากอยู่ภายใต้เงื่อนไขความต่างศักย์และความดันก๊าซที่เหมาะสมแล้ว อิเล็กตรอนเหล่านี้จะสามารถสะสมพลังงานจนได้เพียงพอที่จะไอออไนซ์

อะตอมก๊าซในภาชนะสุญญากาศให้แตกตัวเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอนได้ ความต่างศักย์ที่เหมาะสมหมายถึง ค่าความต่างศักย์ที่สามารถเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานจลน์อย่างน้อยที่สุด เท่ากับระดับพลังงานไอออไนซ์ของอะตอมก๊าซ สำหรับความดันก๊าซที่เหมาะสม หมายถึง ความดันก๊าซซึ่งไม่ต่ำหรือสูงเกินไป ถ้าความดันก๊าซต่ำมากจนระยะอิสระเฉลี่ย(mean free path) ของอิเล็กตรอนมากกว่าระยะหว่างคาโรดกับอาโนด อิเล็กตรอนก็จะเคลื่อนที่ถึงอาโนดโดยปราศจากการชนกับอะตอมก๊าซ การไอออไนซ์จะไม่เกิดขึ้น แต่ถ้าความดันก๊าซสูงเกินไป อิเล็กตรอนจะมีระยะอิสระเฉลี่ยสั้น และไม่สามารรถสะสมพลังงานในช่วงก่อนชนกับอะตอมก๊าซให้สูงถึงจุดที่จะไอออไนซ์อะตอมของก๊าซได้ การไอออไนซ์จะไม่เกิดขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและความต่างศักย์ของดีซีโกลวดิสชาร์จในระบบที่ใช้ก๊าซนีออน ความดัน 1 Torr. [7]

เมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิชนและไอออไนซ์อะตอมของก๊าซ จะทำให้เกิดไอออนบวกและอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ในระบบ อนุภาคทั้งคู่จะถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้า โดยไอออนบวกถูกเร่งไปยังคาโรด ส่วนอิเล็กตรอนทุติยภูมิรวมทั้งอิเล็กตรอนปฐมภูมิที่เป็นตัวชนในตอนแรกถูกเร่งไปยังอาโนด ระหว่างเคลื่อนที่ไป ถ้าอิเล็กตรอนเหล่านี้สามารถสะสมพลังงานได้มากพอก็มีโอกาสไอออไนซ์อะตอมของก๊าซเพิ่มขึ้นอีก กล่าวได้ว่ากระบวนการไอออไนซ์สามารถเกิดอย่างต่อเนื่องจนกว่าอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ถึงอาโนด ขณะเดียวกันไอออนบวกที่ถูกเร่งไปยัง

คาโรด ถ้าหากว่าชนกับคาโรดด้วยพลังงานจลน์ที่สูงพอจะทำให้เกิดกระบวนการปลดปล่อย อิเล็กตรอนทุติยภูมิ(secondary electron emission)ออกจากผิวคาโรด อิเล็กตรอนส่วนนี้ เมื่อถูกเร่งไปยังอาโนดจะทำให้อะตอมของก๊าซถูกไอออไนซ์เพิ่มขึ้นอีก กระบวนการที่ต่อเนื่องทั้งหมดนี้ ทำให้ประจุไฟฟ้าในระบบเพิ่มขึ้นแบบทวีคูณ และส่งผลให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยที่ความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองยังคงที่ เรียกสภาวะนี้ว่าการพังทลาย (breakdown) ของก๊าซ ซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด ความต่างศักย์ขณะกาซพังทลาย เรียกว่า ความต่างศักย์ พังทลาย(breakdown voltage :  $V_B$ )

สถานะการดีสชาร์จตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งถึงจุดพังทลาย เรียกว่า Townsend discharge ซึ่งการเพิ่มของกระแสดีสชาร์จในช่วงนี้สามารถอธิบายได้โดยสมการ [8]

$$I = I_0 \exp(\alpha d) [1 + \gamma \exp(\alpha d) + \gamma^2 \exp(\alpha d)^2 + \dots] = I_0 \frac{\exp(\alpha d)}{[1 - \gamma \exp(\alpha d)]} \quad (2.1)$$

โดย  $I_0$  เป็นกระแสอิเล็กตรอนปฐมภูมิเนื่องจากการกระตุ้นจากภายนอก

$\alpha$  เป็นจำนวนไอออนบวกถูกผลิตขึ้นต่อหนึ่งหน่วยระยะทางของอิเล็กตรอน

และ  $\gamma$  เป็นสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิเนื่องจากการชนคาโรดด้วย ไอออนบวก

สมการนี้ทำนายการพังทลายที่  $1 - \gamma \exp(\alpha d) = 0$  ความต่างศักย์พังทลายซึ่งวัดใน หน่วยโวลท์ สัมพันธ์กับความดันกาซ และระยะระหว่างคาโรดกับอาโนด ตามสมการ [9, 10]

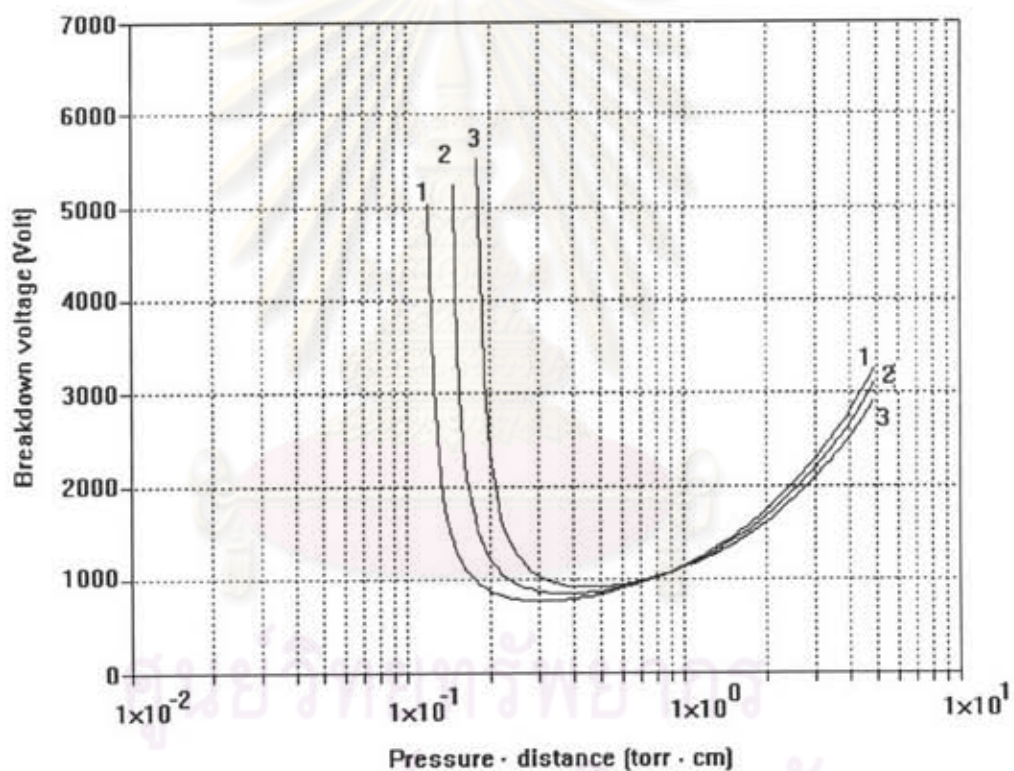
$$V_B = \frac{A(Pd)}{C + \ln(Pd)} \quad (2.2)$$

โดย A และ C เป็นค่าคงซึ่งขึ้นกับชนิดของกาซ

P เป็นความดันกาซในหน่วยทอร์

d เป็นระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าในหน่วยเซนติเมตร

จากสมการนี้สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์พังทลายกับผลคูณของความดันก๊าซและระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.3 กราฟนี้เรียกว่า เส้นโค้งของพาสเชน (Paschen curve) เส้นกราฟจะปรากฏค่าศักย์พังทลายต่ำสุดเรียกว่า จุดต่ำสุดพาสเชน (Paschen minimum) ถ้า  $d$  คงที่แล้ว การลดหรือเพิ่มความดันก๊าซจากจุดนี้จะทำให้ความต่างศักย์พังทลายสูงขึ้น เนื่องจากโอกาสที่อิเล็กตรอนชนกับอะตอมก๊าซน้อยลงเมื่อความดันก๊าซต่ำลงหรือต้องใช้ความต่างศักย์เร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงในระยะทางสั้นเมื่อความดันก๊าซเพิ่มขึ้น ส่วนก๊าซแต่ละชนิดจะให้เส้นโค้งพาสเชนแตกต่างกัน เนื่องจากความแตกต่างของระดับพลังงานไอออไนซ์และค่าภาคตัดขวางในการชนกับอิเล็กตรอน

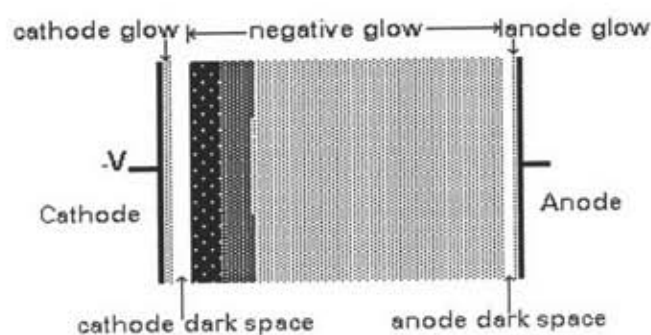


รูปที่ 2.3 เส้นโค้งพาสเชนแสดงความต่างศักย์พังทลายของก๊าซระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้วอยู่ห่างกันเป็นระยะ  $d$  (cm) ที่ความดัน  $P$  (torr) คำนวณจากสมการที่ (2.2) เส้นที่ 1 ได้จากค่า  $A=2500$  Volt/(torr x cm)  $C=2.18$  เส้นที่ 2 ได้จาก  $A=2250$  Volt/(torr x cm)  $C=1.98$  และเส้นที่ 3 ได้จาก  $A=2000$  Volt/(torr x cm)  $C=1.78$

หลังจากกาซฟังทลาย ถ้ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเพียงพอ ขบวนการเพิ่มประจุจะมีต่อไปอย่างต่อเนื่อง จนถึงจุดที่ปริมาณไอออนบวกและอิเล็กตรอนทุติยภูมิสามารถควบคุมซึ่งกันและกันได้ กล่าวคือ ปริมาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่หลุดจากผิวคาโรดสามารถเพิ่มปริมาณไอออนบวกให้มากพอสำหรับผลิตอิเล็กตรอนทุติยภูมิจำนวนเท่าเดิม ระบบจะรักษาสภาพการดิสชาร์จได้เอง (self-sustained) โดยไม่ต้องอาศัยอิเล็กตรอนปฐมภูมิที่เกิดจากการกระตุ้นของรังสีในธรรมชาติอีกต่อไป ก๊าซจะเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในสภาพของโกลวดิซชาร์จ หรือกล่าวว่า ก๊าซเกิดการโกลว (glow) ซึ่งจะเริ่มสังเกตเห็นการเรืองแสงภายในบริเวณการโกลวได้ชัดเจน ขณะเดียวกันความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะลดลง สภาพของโกลวดิซชาร์จขณะนี้ เป็นย่าน normal discharge เป็นช่วงที่การโกลวจะหนาแน่นเฉพาะตรงบริเวณเหนือขอบและส่วนที่ขรุขระของผิวคาโรด การเพิ่มกำลังจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าจะไม่ทำให้ความต่างศักย์ระหว่างคาโรดกับอานอดเพิ่มขึ้น แต่ทำให้กระแสเพิ่มขึ้นเพียงอย่างเดียวจนกระทั่งความหนาแน่นกระแสเท่ากันทั่วทั้งผิวคาโรด สังเกตได้จากการโกลวบริเวณเหนือผิวคาโรดสม่ำเสมอ หลังจากนั้นโกลวดิซชาร์จ จะเข้าสู่ย่าน abnormal discharge ซึ่งเป็นช่วงที่การเพิ่มกำลังไฟฟ้าจะส่งผลให้ทั้งกระแสและความต่างศักย์เพิ่มขึ้น และถ้ายังป้อนกำลังไฟฟ้าเพื่อให้กระแสสูงขึ้นอีกในที่สุดจะถึงจุดที่คาโรดมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนเนื่องจากความร้อน (thermionic electron emission) นอกเหนือจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ทำให้กระแสเพิ่มสูงขึ้นในขณะที่ความต่างศักย์ลดลงอย่างรวดเร็ว และเกิดการอาร์ค (arc) ขึ้น

ในทางปฏิบัติ เมื่อป้อนความต่างศักย์จนถึงค่าฟังทลายแล้ว การดิสชาร์จจะเข้าสู่สถานะที่รักษาสภาพได้เอง (กาซอยู่ในสภาพโกลว) อย่างรวดเร็ว สภาพของโกลวดิซชาร์จหลังจากกาซฟังทลายนี้จะตกอยู่ในย่าน normal discharge หรือ abnormal discharge ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นกับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับการดิสชาร์จขณะนั้น อย่างไรก็ตามสภาพของโกลวดิซชาร์จที่ใช้งานทั่วไป เช่น ในระบบสเปคเตอรัง จะอยู่ในย่าน abnormal discharge เนื่องจากเป็นช่วงที่ความหนาแน่นกระแสของการดิสชาร์จมีค่าสูง และขนาดของกระแสและความต่างศักย์ของการดิสชาร์จสามารถควบคุมหรือเปลี่ยนแปลงโดยผ่านทางแหล่งจ่ายไฟฟ้าได้ ดังนั้นโกลวดิซชาร์จที่จะกล่าวถึงต่อไป จะหมายถึงเฉพาะโกลวดิซชาร์จในย่าน abnormal discharge เท่านั้น

ในระบบดีซีโกลวดิซชาร์จที่ใช้งานทั่วไปซึ่งมีระยะระหว่างคาโรดกับอานอดไม่มากนัก (ประมาณ 4-10 เซนติเมตร) เมื่อเทียบกับระยะอิสระเฉลี่ยของอิเล็กตรอนภายในโกลวดิซชาร์จ ลักษณะเบื้องต้นที่สามารถสังเกตได้เมื่อโกลวดิซชาร์จอยู่ในสภาพรักษาการดิสชาร์จได้เอง คือ การเรืองแสงในบริเวณระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะแบ่งเป็นส่วนๆ ตามความเข้ม (แสดงดังรูปที่ 2.4)



รูปที่ 2.4 ลักษณะของดีซีโกลวดิสชาร์จขณะที่สามารถรักษาภาพการดีสชาร์จได้เอง  
(ความเข้มของการเรืองแสงแสดงถึงความเข้มของการโกลว) [11]

โครงสร้างของดีซีโกลวดิสชาร์จตามรูปที่ 2.4 ประกอบด้วยบริเวณมืด(dark space) สองบริเวณคือ cathode dark space และ anode dark space ซึ่งอยู่ใกล้กับคาโทดและแอโนดตามลำดับ cathode dark space มีบทบาทสำคัญต่อการเร่งไอออนบวกและอิเล็กตรอน เนื่องจากเป็นบริเวณที่ความต่างศักย์ซึ่งป้อนระหว่างขั้วไฟฟ้ามาตกคร่อมเกือบทั้งหมด ระหว่างบริเวณมืดทั้งสองเป็นบริเวณการเรืองแสง เรียกว่า Negative glow ซึ่งจะครอบคลุมปริมาตรส่วนใหญ่ของโครงสร้างทั้งหมด การเรืองแสงในบริเวณ Negative glow จะเข้มมากที่สุดด้านที่ติดกับ cathode dark space และจะจางลงเมื่อเข้าไปใกล้ด้าน anode dark space Negative glow ถือว่าเป็นตัวพลาสมาซึ่งมีสนามไฟฟ้าภายในเป็นศูนย์และเป็นบริเวณที่กระบวนการไอออไนส์ส่วนใหญ่เกิดขึ้น นอกจากนี้ยังมีชั้นการเรืองแสงบางๆ ใกล้กับผิวคาโทดและแอโนด เรียกว่า cathode glow และ anode glow ตามลำดับ เป็นบริเวณที่ไอออนบวกถูกทำให้เป็นกลาง (neutralized) ด้วยกระบวนการรวมตัว (recombination) กับอิเล็กตรอน กระบวนการนี้จะช่วยลดการสะสมไอออนบวกที่ผิวของขั้วไฟฟ้าทั้งสอง โดยเฉพาะที่คาโทดจะมีความสำคัญ เนื่องจากทำให้ไอออนบวกอื่นๆ ที่ถูกเร่งเข้าหาคาโทดยังสามารถเคลื่อนที่ถึงคาโทดได้

กระบวนการต่างๆ ภายในดีซีโกลวดิสชาร์จที่รักษาภาพได้เองนั้นค่อนข้างซับซ้อน หัวข้อต่างๆ ต่อไปนี้จะกล่าวถึงในรายละเอียดมากขึ้น เฉพาะส่วนที่สำคัญสำหรับการอธิบายลักษณะโดยรวมดีซีโกลวดิสชาร์จดังการพิจารณาที่ผ่านมาทั้งหมดข้างต้น และเป็นพื้นฐานของความเข้าใจเมื่อนำไปประยุกต์ใช้งาน ได้แก่ อันตรกิริยาของอนุภาคในโกลวดิสชาร์จ ลักษณะการกระจายความต่างศักย์และสนามไฟฟ้าในโกลวดิสชาร์จ รวมทั้งลักษณะส่อของกระแสและความต่างศักย์ของโกลวดิสชาร์จ และในหัวข้อท้ายสุดจะพิจารณาถึงสมบัติของดีซีโกลวดิสชาร์จเมื่ออยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก

## อันตรกิริยาของอนุภาคในโกลวดิสซาร์จและการรักษาสภาพการดิซซาร์จ

จากหัวข้อที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่า ในโกลวดิสซาร์จประกอบด้วยอนุภาคหลักสามชนิด คือ ไอออนบวก อิเล็กตรอนอิสระ และอะตอมกลางที่เป็นกลาง อันตรกิริยาของอนุภาคในโกลวดิสซาร์จในที่นี้ จะหมายความถึงอันตรกิริยาสองส่วน โดยส่วนแรกเป็นอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคเหล่านี้ด้วยกันเอง ได้แก่ การชนระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมที่เป็นกลางหรือไอออนบวก การชนระหว่างไอออนบวกกับอะตอมที่เป็นกลาง เป็นต้น และอีกส่วนหนึ่งเป็นอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคเหล่านี้กับพื้นผิวที่สัมผัสกับโกลวดิสซาร์จ ได้แก่ การชนผิวคาโรตด้วยไอออนบวก เป็นต้น

### 1. การชนกันของอนุภาคภายในโกลวดิสซาร์จ

การพิจารณาการชนกันระหว่างอนุภาคในโกลวดิสซาร์จจะใช้แบบจำลองการชนของลูกบิลเลียด (ดูภาคผนวก ก) ซึ่งแยกการชนเป็นสองลักษณะ คือ การชนแบบยืดหยุ่น และการชนแบบไม่ยืดหยุ่น [12] ขึ้นอยู่กับว่าพลังงานภายในของอนุภาคที่เกี่ยวข้องกับการชนมีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่

การชนแบบยืดหยุ่นจะมีการแลกเปลี่ยนเฉพาะพลังงานจลน์ระหว่างอนุภาคเท่านั้น โดยแบบจำลองลูกบิลเลียดสามารถแสดงได้ว่า ในการชนระหว่างอนุภาคมวล  $m_1$  กับอนุภาคมวล  $m_2$  การส่งผ่านพลังงานจลน์จากอนุภาคมวล  $m_1$  ไปยังมวลอนุภาคมวล  $m_2$  เป็นไปตามสมการ

$$\frac{E_{kt}}{E_{ki}} = \frac{4m_1m_2}{(m_1 + m_2)^2} \cos^2\theta \quad (2.3)$$

โดย  $m_1$  และ  $E_{ki}$  เป็นมวลและพลังงานจลน์ของอนุภาคที่เข้าชน  
 $m_2$  เป็นมวลของอนุภาคที่ถูกชนซึ่งตอนเริ่มต้นอยู่นิ่ง  
 $E_{kt}$  เป็นพลังงานจลน์ของอนุภาค  $m_2$  ภายหลังจากชน  
 $\theta$  เป็นมุมระหว่างความเร็วของอนุภาคที่เข้าชนกับแนวที่ต่อจุดศูนย์กลางมวลของอนุภาคทั้งสองขณะชน



อัตราส่วน  $\frac{4m_i m_t}{(m_i + m_t)^2}$  มีชื่อเรียกว่า ฟังก์ชันการส่งผ่านพลังงาน (Energy transfer function) ซึ่งมีค่าสูงสุดเมื่อ  $m_i = m_t$  และมีค่าน้อยมากเมื่อ  $m_i \ll m_t$  ดังนั้น การชนแบบยืดหยุ่น จะมีผลการส่งผ่านพลังงานจลน์ได้ดีเมื่ออนุภาคที่ชนกันมีมวลใกล้เคียงกัน เช่น ไอออนบวกกับอะตอมกลางที่เป็นกลาง หรือระหว่างอะตอมด้วยกันเอง

สำหรับการชนแบบยืดหยุ่นระหว่างอิเล็กตรอนกับไอออนบวกหรืออะตอมที่เป็นกลาง โดยมีอิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่เข้าชน เนื่องจากอิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่ามวลของไอออนบวกหรือมวลของอะตอมกลางที่เป็นกลางมาก การส่งผ่านพลังงานจลน์จากอิเล็กตรอนจึงเกิดขึ้นได้น้อยมาก อิเล็กตรอนจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราเร็ว แต่เปลี่ยนแปลงเฉพาะทิศทางเท่านั้น ในกรณีที่อิเล็กตรอนชนกับไอออนบวก อิทธิพลของสนามไฟฟ้าจากไอออนบวกเพียงแต่ทำให้อิเล็กตรอนถูกเบี่ยงเบนความเร็วออกไป กล่าวได้ว่าการชนแบบยืดหยุ่นในกรณีเช่นนี้อนุภาคที่ถูกชนไม่ได้รับผลกระทบแต่อย่างใด

ในการชนแบบไม่ยืดหยุ่นต้องเพิ่มเทอมการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของอนุภาคเข้าในสมการเงื่อนไขอนุรักษ์พลังงาน โดยแบบจำลองลูกบิลเลียดสามารถแสดงได้ว่าพลังงานจลน์ของอนุภาคที่เข้าชนถูกส่งผ่านไปเป็นพลังงานภายในของอนุภาคที่ถูกชน มีสัดส่วนตามสมการ

$$\frac{\Delta U}{E_{ki}} = \frac{m_t}{(m_t + m_i)} \cos^2 \theta \quad (2.4)$$

โดย  $\Delta U$  เป็นพลังงานภายในของอนุภาคที่ถูกชนที่เพิ่มขึ้น

สำหรับสัดส่วนการส่งผ่านพลังงานในรูปพลังงานจลน์ในการชนแบบไม่ยืดหยุ่นจะเป็นไปตามสมการ

$$\frac{E_{kt}}{E_{ki}} = \frac{m_t u_t^2}{m_i} \left[ \frac{2m_t u_t}{\frac{m_t}{m_i} (m_i + m_t) u_t^2 + 2\Delta U} \right]^2 \cos^2 \theta \quad (2.5)$$

โดย  $u_t$  เป็นอัตราเร็วหลังชนของอนุภาคที่ถูกชน

จากสมการ (2.4) ถ้า  $m_i$  มีค่าโดยประมาณเท่ากับ  $m_t$  อัตราส่วน  $\frac{\Delta U}{E_{ki}}$  จะมีค่าเท่ากับ  $(\cos^2 \theta)/2$  ถ้า  $m_i$  มีค่าน้อยกว่า  $m_t$  มากๆ อัตราส่วน  $\frac{\Delta U}{E_{ki}}$  จะมีค่าเท่ากับ  $\cos^2 \theta$  ทั้งสองกรณีมีค่าสูงสุดเมื่อ  $\cos \theta$  มีค่าเป็น 1 โดยมีค่าเท่ากับ 1/2 และ 1 ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าการ

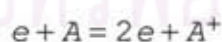
ส่งผ่านพลังงานในรูปพลังงานภายใน สามารถเกิดขึ้นได้ในการชนระหว่างอนุภาคที่มีมวลใกล้เคียงกัน เช่น ไอออนบวกกับอะตอมที่เป็นกลาง และเกิดขึ้นได้ดีในการชนระหว่างอนุภาคที่มีมวลต่างกันมากๆ เช่น อิเล็กตรอนกับไอออนบวก หรืออิเล็กตรอนกับอะตอมที่เป็นกลาง

สำหรับการส่งผ่านพลังงานในรูปพลังงานจลน์ในการชนแบบไม่ยืดหยุ่น พิจารณาจากสมการ 2.5 จะเห็นได้ว่า อัตราส่วน  $\frac{E_k}{E_k}$  มีค่าสูงสุดเท่ากับ 1 เมื่อ  $\Delta U = 0$ ,  $\cos\theta=1$  และ  $m_1 = m_2$  (ซึ่งย้อนกลับไปเป็นกรณีเดียวกันกับการชนแบบยืดหยุ่น ตามสมการ 2.3) และยังมีค่าน้อยมากเมื่อ  $m_1$  น้อยกว่า  $m_2$  มากๆ

จากการพิจารณาข้างต้นสรุปได้ว่าการชนที่จะมีบทบาทสำคัญในโกลดิสซาร์จ ได้แก่ การชนกันแบบไม่ยืดหยุ่นระหว่างอิเล็กตรอนกับไอออนบวกหรืออะตอมที่เป็นกลาง และการชนกันแบบยืดหยุ่นระหว่างไอออนบวกกับอะตอมที่เป็นกลาง หรือระหว่างอะตอมที่เป็นกลางด้วยกัน นอกจากนี้จะมีการชนแบบไม่ยืดหยุ่นระหว่างไอออนบวกกับอะตอมที่เป็นกลาง เช่น การชนแบบ symmetric charge transfer ซึ่งมีผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างอนุภาคที่ชนกัน อย่างไรก็ตามเฉพาะการชนแบบไม่ยืดหยุ่นระหว่างอิเล็กตรอนกับอนุภาคอื่นๆในโกลดิสซาร์จเท่านั้นที่เป็นตัวกำหนดลักษณะมหภาคของโกลดิสซาร์จ ส่วนการชนแบบแลกเปลี่ยนพลังงานจลน์ระหว่างอนุภาคในกลุ่มไอออนบวก หรืออะตอมที่เป็นกลางจะมีผลต่อการกระจายพลังงานของอนุภาคเหล่านี้

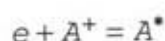
กระบวนการชนแบบไม่ยืดหยุ่นระหว่างอิเล็กตรอนกับอนุภาคอื่นๆในโกลดิสซาร์จที่สำคัญมีดังนี้

- กระบวนการไอออไนเซชัน (ionization process) เป็นกระบวนการที่ทำหน้าที่ผลิตคู่อิเล็กตรอน-ไอออนบวกในโกลดิสซาร์จ ซึ่งสำคัญต่อกระบวนการรักษาสภาพดิสซาร์จ เกิดขึ้นตามสมการ



เมื่ออิเล็กตรอน ( $e$ ) ชนอะตอม( $A$ ) ถ้าพลังงานจลน์จากอิเล็กตรอนที่ส่งผ่านไปยังอะตอม  $A$  สูงกว่าพลังงานขีดเริ่มของการไอออไนเซชันจะทำให้อะตอม  $A$  ถูกไอออไนซ์ กลายเป็นไอออนบวก  $A^+$  และอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นอีก 1 ตัว อิเล็กตรอนเหล่านี้จะมีพลังงานจลน์ขนาดหนึ่งและจะเพิ่มขึ้นจากการถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า ในที่สุดก็จะสูงพอที่จะทำให้กระบวนการไอออไนเซชันเกิดขึ้นได้อีก ทำให้มีจำนวนประจุมากพอที่โกลดิสซาร์จจะรักษาสภาพให้อยู่ได้ ซึ่งโดยทั่วไปก๊าซในสภาพโกลดิสซาร์จจะมีอัตราส่วนระหว่างจำนวนไอออนบวกต่อจำนวนอะตอมก๊าซที่เป็นกลาง หรือระดับการไอออไนซ์ประมาณ  $10^{-4}$

- กระบวนการรวมตัว (recombination process) เป็นกระบวนการย้อนกลับของการไอออไนซ์ คือ อิเล็กตรอนรวมตัวกับไอออนบวกได้อะตอมที่เป็นกลางที่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้น ดังสมการ



กระบวนการนี้จะทำให้มีการลด หรือจำกัดจำนวนคู่ของอิเล็กตรอน-ไอออนบวกในโพลีดิสชาร์จ การรวมตัวอีกแบบหนึ่งเกิดขึ้นในลักษณะ 2-stage recombination คือ เริ่มต้นจากอิเล็กตรอนไปรวมกับอะตอมที่เป็นกลางเกิดเป็นไอออนลบ แล้วไอออนลบไปชนกับไอออนบวก และถ่ายเทอิเล็กตรอนให้กับไอออนบวก ทำให้ไอออนบวกกลายเป็นกลาง

- กระบวนการกระตุ้น (Excitation) เป็นการชนของอิเล็กตรอนกับอะตอมที่เป็นกลาง ซึ่งคล้ายกับกระบวนการไอออไนซ์ แต่ในกรณีนี้พลังงานของอิเล็กตรอนไม่สูงพอที่จะไอออไนซ์อะตอมของก๊าซได้ เพียงแต่ทำให้อิเล็กตรอนในอะตอมเปลี่ยนระดับพลังงานไปอยู่ในชั้นที่สูงขึ้น โดยดูดกลืนพลังงานจำนวนหนึ่ง ทำให้อะตอมอยู่ในสภาพถูกกระตุ้น ดังสมการ



กระบวนการสำคัญอย่างหนึ่งที่จะเกิดต่อเนื่องแบบทันทีทันใดหลังกระบวนการรวมตัวหรือกระบวนการกระตุ้น คือ กระบวนการผ่อนคลาย (Relaxation process) เป็นกระบวนการที่อะตอมซึ่งอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น พยายามทำให้อิเล็กตรอนที่ถูกยกระดับพลังงานขึ้นกลับลงสู่ระดับพลังงานเดิม โดยการปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอน ดังสมการข้างล่าง



กระบวนการนี้ทำให้เห็นการเรืองแสงของโพลีดิสชาร์จ ความถี่ของแสงขึ้นกับผลต่างระหว่างพลังงานของสถานะถูกกระตุ้นกับพลังงานของสถานะสุดท้ายของอิเล็กตรอน และขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซ

กระบวนการทั้งสองอย่างข้างต้น สามารถนำไปอธิบายลักษณะโดยรวมของดีซีโพลีดิสชาร์จได้ นอกจากนี้ยังมีอันตรกิริยาแบบอื่นๆอีกในโพลีดิสชาร์จซึ่งจะไม่กล่าวถึงรายละเอียดในที่นี้ ได้แก่ Dissociation, Electron attachment, Ion-Neutral collision และ Metastable collision เป็นต้น

## 2. การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ

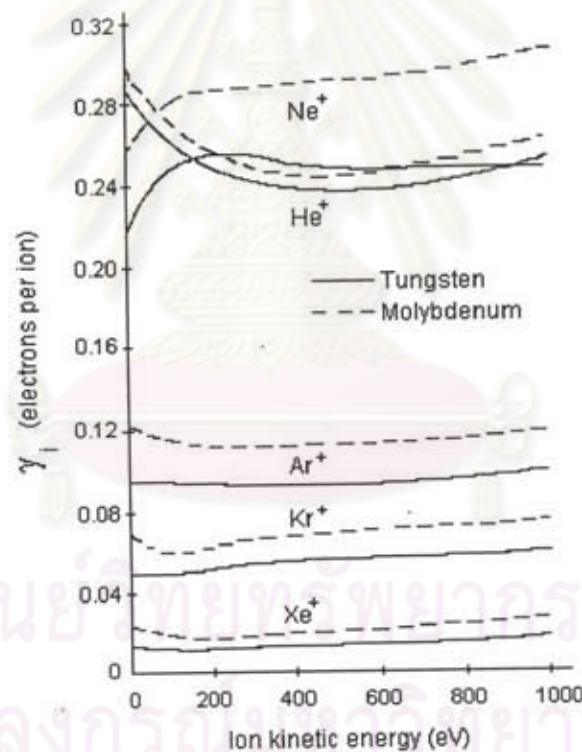
เมื่อไอออนบวกชนผิวคาโรต จะให้ผลสำคัญหลายประการ(ดูรายละเอียดในบทที่ 3 หัวข้อแรก) แต่ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเฉพาะสิ่งที่สำคัญต่อโกลวดิสซาร์จ คือ การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ[13] อิเล็กตรอนทุติยภูมิที่หลุดจากคาโรตเนื่องจากการชนด้วยไอออนบวกเป็นปัจจัยสำคัญต่อกระบวนการรักษาสภาพการดิสซาร์จ โดยทำหน้าที่รับพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนจากภายนอกและเพิ่มจำนวนอิเล็กตรอนให้กับโกลวดิสซาร์จ และเป็นตัวเริ่มต้นกระบวนการไอออไนซ์อะตอมของก๊าซ ขนาดของสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิจากคาโรต (จำนวนอิเล็กตรอนที่หลุดจากคาโรตต่อจำนวนไอออนบวกที่เข้าชน :  $\gamma$ ) มีบทบาทในการกำหนดลักษณะสัณฐานของกระแสและความต่างศักย์ของการดิสซาร์จ นอกจากนี้อิเล็กตรอนทุติยภูมิเหล่านี้ยังมีบทบาทในกระบวนการกำเนิดฟิล์มบางภายใต้สภาวะแวดล้อมของโกลวดิสซาร์จ

สัมประสิทธิ์การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิแตกต่างกันไปตามชนิดของคาโรต ซึ่งเป็นเป้า(target) ของการชน ชนิดและพลังงานของไอออนบวก ตารางที่ 2.1 แสดงค่า  $\gamma$  ของโลหะบางชนิดเมื่อถูกชนด้วยไอออนบวกของอาร์กอนพลังงาน 10, 100, และ 1000 อิเล็กตรอนโวลต์

ตารางที่ 2.1 สัมประสิทธิ์การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิเนื่องจากการชนของไอออนบวกของอาร์กอนบนเป้า 4 ชนิดคือ โมลิบดีนัม(Mo) ทังสเตน(W) ซิลิกอนระนาบ(110) และ นิเกิลระนาบ(111)

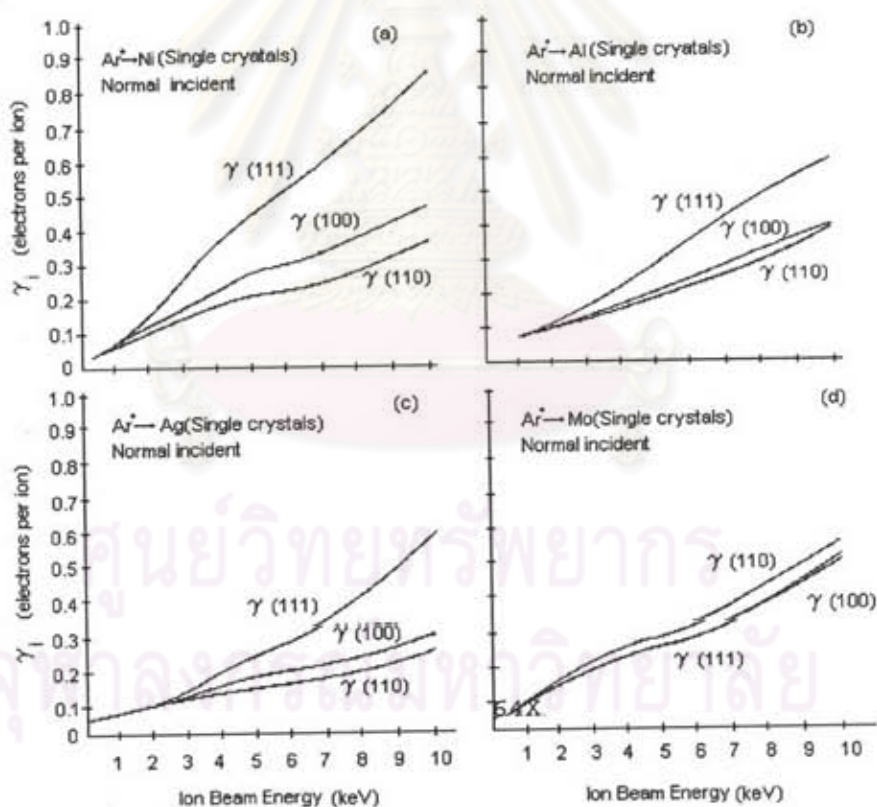
Target	Ion Energy		
	10 eV	100 eV	1000 eV
Mo	0.122	0.115	0.118
W	0.096	0.095	0.099
Si(100)	0.024	0.027	0.039
Ni(111)	0.034	0.036	0.07

จากตารางจะเห็นว่า  $\gamma$  ของโลหะต่างชนิดกันที่ถูกชนด้วยไอออนบวกชนิดเดียวกัน และมีพลังงานเท่ากัน จะแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของไอออนบวกกับสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิในการชนโลหะทั้งสแตนและโมลิบดีนัมด้วยไอออนของก๊าซเฉื่อยชนิดต่างๆ รูปนี้แสดงให้เห็นว่า  $\gamma$  ของโลหะชนิดเดียวกัน มีค่าขึ้นกับชนิดของไอออนบวก โดยถ้าพลังงานของไอออนบวกเท่ากัน  $\gamma$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมวลของไอออนบวกลดลง อย่างไรก็ตาม จากข้อมูลในตารางที่ 2.1 และ รูปที่ 2.5 แสดงว่า  $\gamma$  ของโลหะที่ถูกชนด้วยไอออนบวกชนิดเดียวกันที่มีพลังงานระหว่าง 10-1000 อิเล็กตรอนโวลท์ ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ซึ่งหลายๆกรณีอาจถือได้ว่าคงที่ เช่น  $\gamma$  ของการชนโลหะโมลิบดีนัมด้วยไอออนบวกของอาร์กอน หรือคริปทอน เป็นต้น

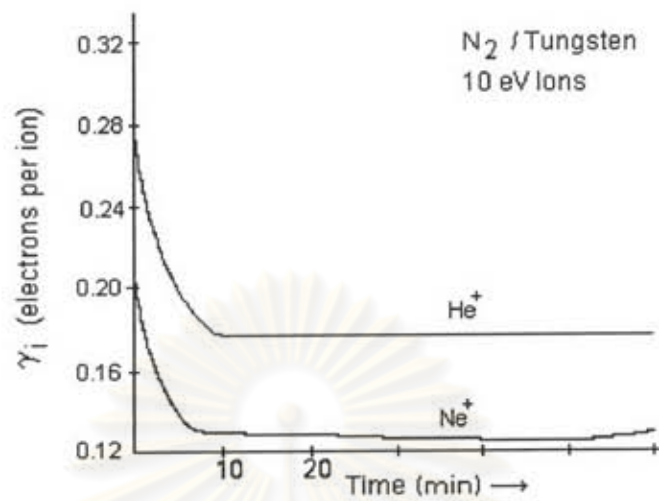


รูปที่ 2.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิจากโลหะทั้งสแตนและโมลิบดีนัม เมื่อชนด้วยไอออนบวกของก๊าซเฉื่อยพลังงาน 0-1000 อิเล็กตรอนโวลท์

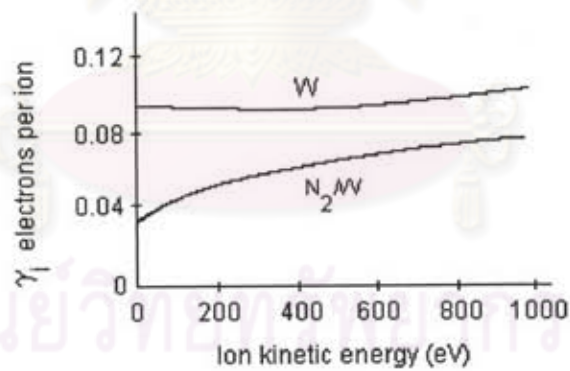
นอกจากนี้สัมประสิทธิ์ของการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิยังขึ้นอยู่กับสภาวะของพื้นผิว เช่น ลักษณะของระนาบผิวหน้า ชนิดของบรรยากาศที่ปกคลุมผิวหน้า เป็นต้น รูปที่ 2.6 แสดงค่าของ  $\gamma$  จากการชนของไอออนบวกอาร์กอนบนผิวโลหะที่มีระนาบของผิวหน้าต่าง ๆ กัน รูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นการลดลงของ  $\gamma$  ของโลหะทั้งสแตนชนิดผลึกหุขณะที่ถูกชนด้วยไอออนบวกของฮีเลียม และนิออนขนาดพลังงาน 10 อิเล็กตรอนโวลต์ แล้วผิวหน้าของโลหะทั้งสแตนบริสุทธิ์ถูกเปิดให้สัมผัสกับก๊าซไนโตรเจน การเปลี่ยนแปลงจะเข้าสู่สถานะกึ่งคงตัวใหม่ (quasi-steady state) ภายในเวลา 10 นาที ทั้งนี้เป็นผลจากการเกิดขึ้นเดี่ยว (monolayer) ของไนโตรเจนบนผิวของทั้งสแตน ส่วนรูปที่ 2.8 แสดงผลของการเปลี่ยนสภาพผิวต่อ  $\gamma$  ในการชนโลหะทั้งสแตนด้วยไอออนบวกของอาร์กอน เปรียบเทียบระหว่างผิวทั้งสแตนบริสุทธิ์กับผิวทั้งสแตนที่ปกคลุมด้วยบรรยากาศของไนโตรเจน จะเห็นได้ชัดเจนว่าการเกิดขึ้นเดี่ยวของไนโตรเจนบนผิวทั้งสแตนทำให้  $\gamma$  ลดลง



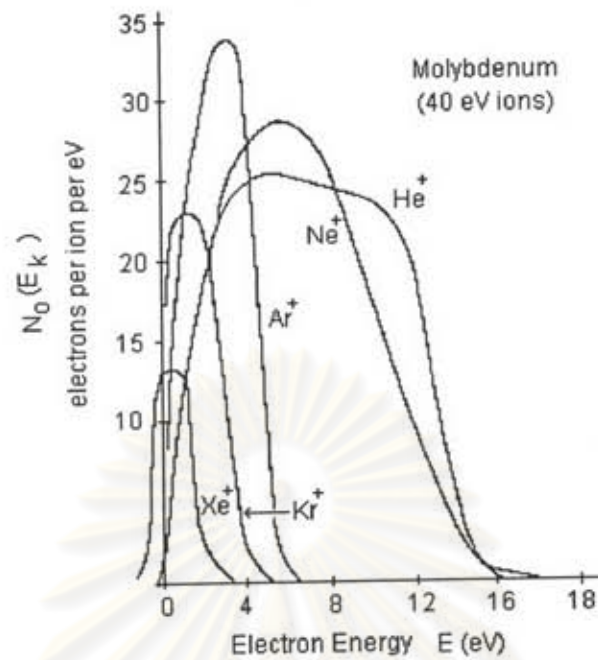
รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงของ  $\gamma$  ตามพลังงาน ในการชนของไอออนบวกของอาร์กอนบนผิวโลหะที่หันหน้าระนาบต่างๆกันคือ (111) (100) และ (110) a) นิกเกิล b) อลูมิเนียม c) เงิน d) โมลิบดีนัม



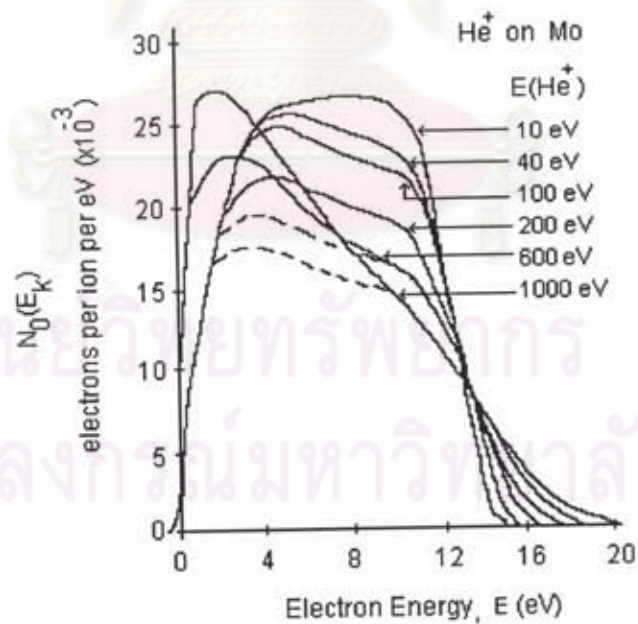
รูปที่ 2.7 สัมประสิทธิ์การปลดปล่อยอิเล็กตรอนสำหรับการชนของไอออนบวกฮีเลียมและนีออนบนผิวทังสเตน ขณะที่เกิดชั้นเดี่ยวของไนโตรเจน



รูปที่ 2.8 สัมประสิทธิ์การปลดปล่อยอิเล็กตรอนสำหรับการชนของไอออนบวกอาร์กอนบนผิวทังสเตนบริสุทธิ์ และบนผิวทังสเตนที่ปกคลุมด้วยชั้นเดี่ยวของไนโตรเจน



รูปที่ 2.9 การกระจายพลังงานของอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่หลุดจากผิวโลหะโมลิบดีนัม เนื่องจากการชนโดยไอออนบวกของกาซเฉื่อยพลังงาน 40 อิเล็กตรอนโวลท์



รูปที่ 2.10 การกระจายพลังงานของอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่หลุดจากผิวโลหะโมลิบดีนัมเนื่องจากการชนด้วยไอออนบวกของฮีเลียมพลังงานระหว่าง 10-1000 อิเล็กตรอนโวลท์



อิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดจากการชนของไอออนบวกจะมีพลังงานไม่สูงนัก โดยขึ้นอยู่กับชนิดของไอออนบวกมากกว่าพลังงานของไอออนบวก รูปที่ 2.9 ในหน้าที่ 19 แสดงการกระจายพลังงานของอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่หลุดจากผิวโลหะโมลิบดีนัม เนื่องจากถูกชนด้วยไอออนบวกของก๊าซเฉื่อยพลังงาน 40 อิเล็กตรอนโวลต์ ค่าพลังงานเฉลี่ยแตกต่างกันตามชนิดของไอออนบวก แต่ทุกกรณีก็ยิ่งต่ำกว่า 20 อิเล็กตรอนโวลต์ ส่วนรูปที่ 2.10 แสดงการกระจายพลังงานของอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่หลุดจากผิวโลหะโมลิบดีนัมเนื่องจากการชนโดยไอออนบวกของฮีเลียมพลังงานระหว่าง 10-1000 อิเล็กตรอนโวลต์ จะเห็นว่าพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนทั้งหมดมีค่าประมาณ 4-10 อิเล็กตรอนโวลต์

### 3. กลไกรักษาสภาพการดิสชาร์จ

การรักษาสภาพการดิสชาร์จโดยตัวเอง [14] ต้องมีปัจจัยประกอบสำคัญสองประการ ประการแรก โกลวดิสชาร์จต้องสามารถผลิตจำนวนคู่อิออนบวกและอิเล็กตรอนได้เพียงพอ ตามที่กล่าวไว้ในส่วนท้ายของการพิจารณากระบวนการไอออไนซ์ในหัวข้อ "การชนกันของอนุภาคในโกลวดิสชาร์จ" แล้วว่า ก๊าซในสภาพโกลวดิสชาร์จจะมีระดับการไอออไนซ์ประมาณ  $10^4$  ซึ่งโดยปกติโกลวดิสชาร์จจะมีการสูญเสียอนุภาคมีประจุตลอดเวลา เช่น การสูญเสียอิเล็กตรอนและไอออนบวกที่ผิวของภาชนะสุญญากาศ การลดลงของจำนวนคู่อิเล็กตรอน-ไอออนบวกเนื่องจากกระบวนการรวมตัว นอกจากนี้ยังมีอิเล็กตรอนที่ต้องเสียให้กับวงจรไฟฟ้าภายนอก ดังนั้น จึงต้องมีการผลิตจำนวนคู่อิออน-อิเล็กตรอนอย่างต่อเนื่องและเพียงพอที่จะชดเชยส่วนที่สูญเสียไปเพื่อรักษาระดับการไอออไนซ์

ปัจจัยอีกประการหนึ่งในกระบวนการรักษาการดิสชาร์จ คือโกลวดิสชาร์จต้องได้รับพลังงานอย่างต่อเนื่องและในปริมาณที่มากพอ สำหรับใช้ในกระบวนการผลิตไอออนบวกและชดเชยส่วนที่สูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อม ซึ่งมีทั้งในรูปของแสงและความร้อน

เงื่อนไขสำหรับการรักษาสภาพการดิสชาร์จทั้งสองประการนี้ ได้รับการตอบสนองโดยหลักการ คือ พลังงานไฟฟ้าจากภายนอกที่ป้อนให้ระบบ จะอยู่ในรูปของสนามไฟฟ้าที่จะเร่งอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่หลุดจากคาโอดเนื่องจากการชนด้วยไอออนบวก ให้เคลื่อนที่ผ่าน cathode dark space เข้าสู่บริเวณ negative glow กลายเป็นอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง (fast electron) และเป็นแหล่งของพลังงานนำเข้าหลัก (main source of input power) ให้กับโกลวดิสชาร์จ [15] สำหรับแหล่งกำเนิดการไอออไนซ์หลัก (main source of ionization) [16] จะอยู่ในบริเวณ negative glow

เกิดจากกระบวนการไอออไนซ์อะตอมก๊าซด้วยการชนของทั้ง fast electron และ thermal electron โดยอิเล็กตรอนที่มีความสามารถสูงสำหรับการไอออไนซ์ คือ Thermal electron ซึ่งมีระดับพลังงานเฉลี่ยระหว่าง 2-8 อิเล็กตรอนโวลต์ อิเล็กตรอนกลุ่มนี้ส่วนหนึ่งเป็นอิเล็กตรอนพลังงานสูงที่สูญเสียพลังงานหลังจากการชนกับอะตอมก๊าซในบริเวณ negative glow อีกส่วนหนึ่งเป็นอิเล็กตรอนที่เป็นผลจากกระบวนการไอออไนซ์ นอกจากนี้ยังมีการไอออไนซ์เพิ่มเติมมาจากกระบวนการชนอะตอมก๊าซด้วยอิเล็กตรอนและไอออนบวกในบริเวณ Cathode dark space และการไอออไนซ์ของอะตอมกึ่งเสถียร (metastable atoms) ในบริเวณ Negative glow แต่เป็นสัดส่วนที่น้อย

### การกระจายความต่างศักย์และสนามไฟฟ้าในดิสก์โกลวดิสชาร์จ

โครงสร้างของดิสก์โกลวดิสชาร์จตามรูปที่ 2.4 สามารถแยกได้เป็นสองส่วนใหญ่ๆ คือ บริเวณ negative glow ซึ่งเป็นตัวพลาสมา (bulk plasma) และบริเวณมืดที่ขอบของ negative glow ด้านที่ติดกับคาโทดและแอโนด การจัดโครงสร้างลักษณะนี้เป็นสมบัติเฉพาะของก๊าซในสภาพโกลวดิสชาร์จ ซึ่งจะมีการกระจายความต่างศักย์และสนามไฟฟ้าในแต่ละบริเวณแตกต่างกันและแตกต่างกันออกไปอย่างสิ้นเชิงเมื่อเทียบกับก๊าซก่อนการดิสชาร์จ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้โดยมองว่าโกลวดิสชาร์จเป็นพลาสมาอุดมคติ ภายในประกอบด้วยอนุภาคสามชนิดคือ อิเล็กตรอน ไอออนบวก และอะตอมก๊าซที่เป็นกลาง ประพฤติตัวแบบเดียวกันกับอนุภาคของก๊าซอุดมคติ (ideal gas particle) อิเล็กตรอนและไอออนบวกมีปริมาณเท่ากันและกระจายอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ภายในพลาสมาเป็นบริเวณปลอดสนามไฟฟ้า (field-free region) และในการพิจารณาต่อไปนี้จะเห็นได้ว่า ความแตกต่างระหว่างมวลของอิเล็กตรอนกับมวลของไอออนบวกเป็นปัจจัยประกอบสำคัญที่กำหนดสมบัติของโกลวดิสชาร์จ

เมื่อพื้นผิวซึ่งไม่เชื่อมต่อทางไฟฟ้า (electrical floating) สัมผัสกับพลาสมา พื้นผิวนั้นจะถูกชนด้วยอนุภาคแต่ละชนิดที่อยู่ในพลาสมา ฟลักซ์ของแต่ละอนุภาคซึ่งตกกระทบในทิศตั้งฉาก (สมมติว่าเป็นแนวแกน x) กับพื้นผิว กำหนดด้วยสมการ [17]

$$\phi = \int v_x dn_x \quad (2.6)$$

โดย  $v_x$ ,  $n_x$  เป็นความเร็วและความหนาแน่นของอนุภาค ตามลำดับ

จากสมการการกระจายความเร็วของอนุภาคแบบก๊าซอุดมคติ ใน 1 มิติ [18]

$$f(v_x) = \frac{1}{n} \frac{dn_x}{dv_x} = \left| \frac{m}{2\pi RT} \right|^{1/2} \exp\left(-\frac{mv_x^2}{2RT}\right) \quad (2.7)$$

โดย  $n, m$  เป็นความหนาแน่นและมวลของอนุภาค ตามลำดับ  $R$  เป็นค่าคงที่ของก๊าซ จะหาได้ว่า

$$\phi = \frac{n}{(2\pi)^{1/2}} \left| \frac{m}{RT} \right|^{1/2} \int_0^\infty v_x \exp\left(-\frac{mV_x^2}{2RT}\right) dv_x = n \sqrt{\frac{RT}{2\pi m}} \quad (2.8)$$

และเขียนให้อยู่ในรูปของอัตราเร็วเฉลี่ยของอนุภาคทั้งหมด ( $\bar{v}$ ) ได้เป็น

$$\phi = \frac{1}{4} n \bar{v} \quad (2.9)$$

โดยที่

$$\bar{v} = \left( \frac{8k_B T}{\pi m} \right)^{1/2} \quad (2.10)$$

$T$  เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์ของอนุภาคซึ่งสัมพันธ์กับพลังงานจลน์ของสมการ

$$E_k = \frac{3}{2} k_B T \quad (2.11)$$

ในกรณีที่อนุภาคที่ชนพื้นผิวเป็นอิเล็กตรอนและไอออนบวก เนื่องจากเป็นอนุภาคที่มีประจุ การชนของอนุภาคเหล่านี้จะทำให้เกิดความหนาแน่นกระแสยังผล (effective current density) ตกกระทบบนพื้นผิว ซึ่งคำนวณได้จากผลคูณของฟลักซ์กับประจุของอนุภาค ดังนั้น จากสมการ (2.9) จะเขียนสมการของความหนาแน่นกระแสอิเล็กตรอน ( $J_e$ ) และกระแสไอออนบวก ( $J_i$ ) ที่ตกกระทบบนพื้นผิว ได้ดังนี้ [19,20]

$$J_e = \frac{en_e \bar{v}_e}{4} \quad (2.12)$$

$$J_i = \frac{en_i \bar{v}_i}{4} \quad (2.13)$$

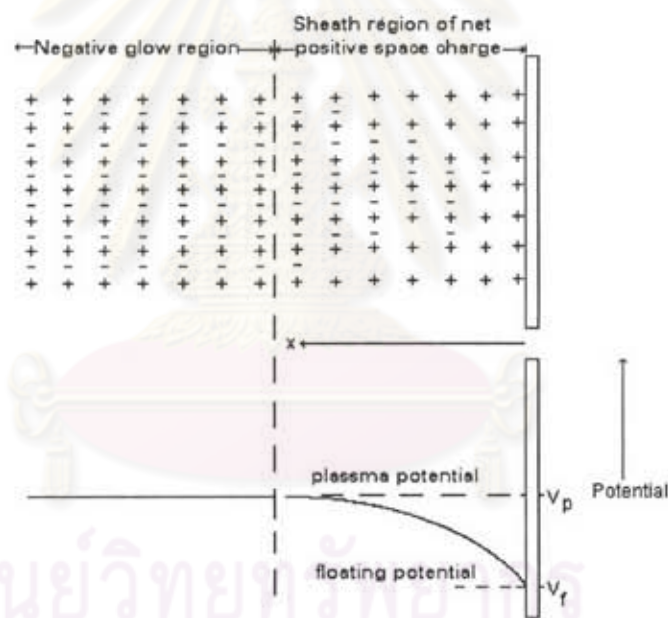
โดยที่  $e$  เป็นขนาดประจุของอิเล็กตรอน  $n_e$  และ  $\bar{v}_e$  เป็นความหนาแน่นและอัตราเร็วเฉลี่ยของอิเล็กตรอน  $n_i$  และ  $\bar{v}_i$  เป็นความหนาแน่นและอัตราเร็วเฉลี่ยของไอออนบวก

เนื่องจากพลาสมามีสภาพที่เป็นกลางทางไฟฟ้า หมายความว่า ความหนาแน่นของไอออนบวกและอิเล็กตรอนภายในพลาสมาเท่ากัน ดังนั้นความหนาแน่นกระแสอิเล็กตรอนและความหนาแน่นกระแสไอออนบวกตามสมการข้างต้น จึงแตกต่างกันที่อัตราเร็วเฉลี่ยของอนุภาคแต่ละชนิด ซึ่งจะเปรียบเทียบได้จากระดับพลังงานจลน์เฉลี่ยของอนุภาคเหล่านี้ผ่านทางสมการ (2.10) และสมการ (2.11)

แหล่งพลังงานภายนอกที่ป้อนให้กับพลาสมาในทางปฏิบัติจะอยู่ในรูปของสนามไฟฟ้าที่ไปเร่งอนุภาคมีประจุในพลาสมา ซึ่งถือว่ามีเพียงอิเล็กตรอนกับไอออนบวก เนื่องจากมวลของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยกว่ามวลของไอออนบวกมาก สนามไฟฟ้าจะส่งผลต่อการเพิ่มพลังงานจลน์ให้กับอิเล็กตรอนเป็นส่วนใหญ่ สำหรับการสูญเสียพลังงานจลน์ของแต่ละอนุภาคจะเกิดขึ้นเมื่อไปชนกับอนุภาคอื่นๆ โดยการพิจารณาฟังก์ชันการส่งผ่านพลังงานของการชนแบบยืดหยุ่น (สมการ 2.3) จะเห็นว่าอิเล็กตรอนสูญเสียพลังงานจลน์น้อยเมื่อไปชนกับไอออนบวกหรืออะตอมก๊าซที่เป็นกลาง ในขณะที่อะตอมและไอออนบวกมีโอกาสแลกเปลี่ยนพลังงานจลน์กันได้มากเมื่อชนกันเอง ดังนั้นอิเล็กตรอนจึงมีพลังงานจลน์เฉลี่ยสูงกว่าไอออนบวกหรืออะตอมที่เป็นกลาง ซึ่งโดยทั่วไปมีค่าระหว่าง 2-8 อิเล็กตรอนโวลต์ ส่วนไอออนบวกเนื่องจากสามารถรับพลังงานจลน์จากสนามไฟฟ้าได้จำนวนหนึ่ง จึงมีพลังงานจลน์เฉลี่ยสูงกว่าอะตอมของก๊าซที่เป็นกลางเล็กน้อย พลังงานจลน์เฉลี่ยของไอออนบวกมีค่าประมาณ 0.04 อิเล็กตรอนโวลต์ ขณะที่อะตอมก๊าซที่เป็นกลางพลังงานจลน์เฉลี่ยประมาณ 0.025 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งยังคงใกล้เคียงกับระดับพลังงานเฉลี่ยของก๊าซที่อุณหภูมิห้อง หรือระดับพลังงานเทอร์มอล(thermal energy) พลังงานจลน์ที่อะตอมก๊าซที่เป็นกลางได้รับ ส่วนใหญ่มาจากการชนกับไอออนบวก

จากค่าพลังงานจลน์เฉลี่ยและมวลของอนุภาคทั้ง 3 ชนิด และโดยสมการ (2.10) สมการ (2.11) สรุปได้ว่า อิเล็กตรอนมีอัตราเร็วเฉลี่ยสูงสุด รองลงมาคือ ไอออนบวก และอะตอมก๊าซที่เป็นกลางตามลำดับ สำหรับอิเล็กตรอนพลังงาน 2 อิเล็กตรอนโวลต์ และไอออนบวกของอาร์กอนพลังงาน 0.04 อิเล็กตรอนโวลต์ จะมีอัตราเร็วเฉลี่ย  $9.5 \times 10^7$  เซนติเมตรต่อวินาที และ  $5.2 \times 10^4$  เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ สมมติความหนาแน่นอิเล็กตรอนประมาณ  $10^{10}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดังนั้น จะได้  $J_e = 38$  มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และด้วยความหนาแน่นของไอออนบวกขนาดเท่ากันนี้จะได้  $J_i = 21$  ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

การพิจารณาข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ความหนาแน่นกระแสอิเล็กตรอนที่ตกกระทบกับพื้นผิวมีค่าสูงกว่าไอออนบวกมาก ดังนั้น เริ่มต้นพื้นผิวจึงถูกชาร์จด้วยประจุลบอย่างรวดเร็ว ทำให้พื้นผิวมีศักย์ไฟฟ้าลบเมื่อเทียบกับตัวพลาสมา เมื่อถึงจุดหนึ่งจะเข้าสู่สถานะคงตัวซึ่งพื้นผิวมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบมากพอที่จะผลักอิเล็กตรอน จนกระทั่งทำให้ฟลักซ์ของอิเล็กตรอนเท่ากับฟลักซ์ของไอออนบวกและได้ความหนาแน่นกระแสสุทธิ (net current density) เป็นศูนย์ ศักย์ไฟฟ้าของพื้นผิวขณะนี้เรียกว่า floating potential ( $V_f$ ) ซึ่งเป็นลบเมื่อเทียบกับศักย์ของพลาสมา (plasma potential :  $V_p$ ) ผลของ floating potential ที่ผลักอิเล็กตรอนจะทำให้บริเวณใกล้ๆ กับพื้นผิวได้รับประจุบวกสุทธิจำนวนหนึ่ง เกิดเป็นชั้นของ positive space charge และเรียกบริเวณนี้ว่า sheath region แสดงดังรูปที่ 2.11 การที่มีประจุบวกสุทธิใน sheath region ทำให้บริเวณนี้มีสนามไฟฟ้าไม่เป็นศูนย์และมีค่าขึ้นกับตำแหน่ง ( $x$ ) ที่ห่างจากพื้นผิว



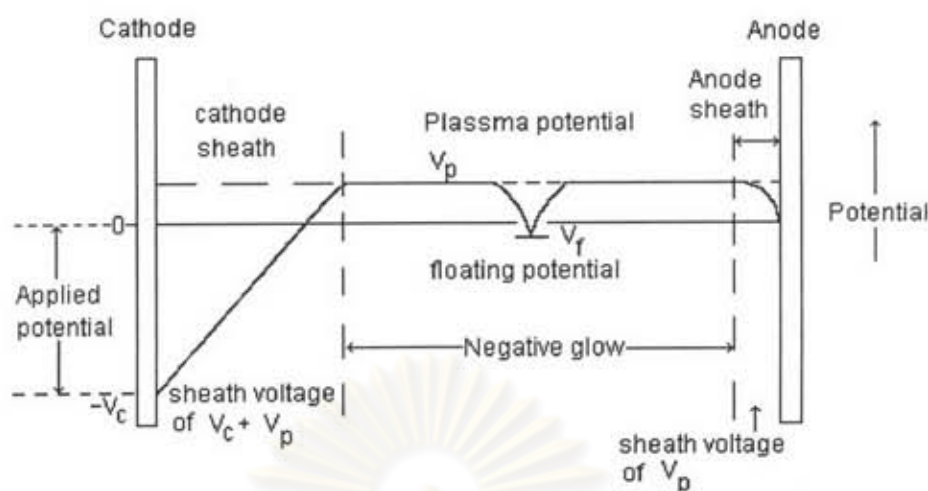
รูปที่ 2.11 แสดงชั้นของ positive space charge ใน sheath region (รูปบน) และ floating potential ( $V_f$ ) บริเวณผิวหน้าของพื้นผิวที่สัมผัสกับพลาสมา (รูปล่าง) [21]

Sheath region เป็นบริเวณที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนต่ำ กระบวนการไอออไนซ์หรือกระตุ้นอะตอมก๊าซที่เป็นกลางจึงเกิดขึ้นน้อย ทำให้การเรืองแสงเนื่องจากกระบวนการผ่อนคลายมีความเข้มต่ำ จึงมักเรียกบริเวณนี้ว่าบริเวณมืด (dark space) ความต่างศักย์ที่ตกคร่อม sheath region มีขนาดตามสมการ [22]

$$V_p - V_i = \frac{k_B T_e}{2e} \ln\left(\frac{m_i T_e}{m_e T_i}\right) \quad (2.14)$$

โดย  $T_e$  และ  $T_i$  เป็นอุณหภูมิของอิเล็กตรอนและไอออนบวกตามลำดับ

จากกลไกการเกิด sheath region บนผิวซึ่งไม่เชื่อมต่อทางไฟฟ้า ดังที่พิจารณาข้างต้น ทำให้คาดได้ว่าขอบของดิสทริบิวชันของอิเล็กตรอนและไอออนจะจัดตัวเป็น sheath region เกิดเป็นบริเวณมืด และเหลือส่วนที่เป็นตัวพลาสมา คือ negative glow อยู่ระหว่างบริเวณมืดทั้งสอง และทั้งคาโธดและแอโนดจะมีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าบริเวณ negative glow ซึ่งถือว่ามีศักย์ไฟฟ้าเท่ากันตลอด (equipotential) เนื่องจากเป็นบริเวณปลอดสนามไฟฟ้า อย่างไรก็ตามในระบบดิสทริบิวชันนั้นแอโนดต่ออยู่กับขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ซึ่งกำหนดให้เป็นระดับศักย์ไฟฟ้าศูนย์ ส่วนคาโธดได้รับการป้องกันศักย์ไฟฟ้าลบ ( $-V_c$ ) เทียบกับแอโนด ขณะเกิดการดิสชาร์จขั้วไฟฟ้าทั้งสองยังคงมีความหนาแน่นกระแสสุทธิผ่านตลอดเวลา กล่าวคือ กระแสการดิสชาร์จไม่เป็นศูนย์ภายใต้เงื่อนไขเหล่านี้ ทำให้ลักษณะของ sheath region ที่ผิวของขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ซึ่งได้แก่ความหนาและความต่างศักย์ที่ตกคร่อมจะต่างจากกรณีของผิวซึ่งไม่เชื่อมต่อทางไฟฟ้า รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะแบบฉบับของการกระจายศักย์ไฟฟ้าในดิสทริบิวชัน และระดับของ floating potential ( $V_f$ ) ที่เกิดขึ้นบนผิวซึ่งไม่เชื่อมต่อทางไฟฟ้าที่นำไปวางในบริเวณไกลวดิสชาร์จ Sheath region ที่ติดกับคาโธดและแอโนด คือ cathode sheath และ anode sheath ตามลำดับ บริเวณของ negative glow ซึ่งเป็นตัวพลาสมาจะมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากันตลอด โดยเท่ากับ  $V_f$  เมื่อเทียบกับระดับศักย์ไฟฟ้าศูนย์ที่แอโนดและเป็นระดับศักย์ไฟฟ้าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับบริเวณอื่นๆ ที่คาโธดจะมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ  $-(V_p + V_c)$  เมื่อเทียบกับตัวพลาสมา ส่วนที่แอโนดจะมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ  $-V_p$  เมื่อเทียบกับตัวพลาสมา ศักย์ไฟฟ้าที่แอโนดนี้จะสูงกว่า  $V_f$  เล็กน้อย (มีค่าเป็นลบน้อยกว่า) ซึ่งสอดคล้องกับความจริงที่ว่ายังมีกระแสอิเล็กตรอนไปถึงแอโนดได้ ในขณะที่กระแสสุทธิเป็นศูนย์บนผิวที่ไม่เชื่อมต่อทางไฟฟ้า จากรูปจะเห็นว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าส่วนใหญ่จะตกคร่อม cathode sheath Cathode sheath และ Anode sheath ก็คือ cathode dark space และ anode dark space ของโครงสร้างในรูปที่ 2.4 ตามลำดับ



รูปที่ 2.12 แสดงศักย์ไฟฟ้าในส่วนต่างๆของดีซีโกลวดิสชาร์จรวมทั้งระดับของ floating potential บนผิวที่ไม่เชื่อมต่อทางไฟฟ้าที่วางให้สัมผัสกับการดิสชาร์จ [23]

จากลักษณะการกระจายความต่างศักย์ดังรูปที่ 2.12 สรุปได้ว่าสนามไฟฟ้าในดีซีโกลวดิสชาร์จจะมีความเข้มสูงเฉพาะในบริเวณมืดที่อยู่ด้านหน้าคาโทดและอานอด หรือผิวอื่นๆ ซึ่งวางให้สัมผัสกับโกลวดิสชาร์จ ส่วนในบริเวณ negative glow สนามไฟฟ้าเป็นศูนย์เนื่องจากเป็นตัวพลาสมา สนามไฟฟ้าในบริเวณมืดเหล่านี้จะเป็นสนามที่ให้ผลในการผลักอิเล็กตรอนที่จะเคลื่อนที่จากพลาสมาเข้าหาพื้นผิว ในทางตรงข้ามจะมีผลในการเร่งไอออนบวกจากตัวพลาสมาให้ชนพื้นผิว

สนามไฟฟ้าในบริเวณ cathode dark space เป็นตัวเร่งไอออนบวกในบริเวณ negative glow ให้เคลื่อนที่เข้าชนคาโทด ขณะเดียวกันก็เป็นตัวเร่งอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่หลุดจากคาโทดเข้าสู่บริเวณ negative glow การเร่งอนุภาคทั้งคู่เป็นกลไกสำคัญในการรักษาสภาพการดิสชาร์จด้วยตัวเองของระบบ ดังกล่าวไว้ในหัวข้อ "กลไกรักษาสภาพการดิสชาร์จ" หน้า 20 ขนาดของความต่างศักย์ที่ตกคร่อม cathode dark space มีอิทธิพลโดยตรงต่อพลังงานจลน์ของไอออนบวกที่เคลื่อนที่ชนคาโทดและพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เข้าสู่ negative glow เนื่องจากไอออนบวกในบริเวณ negative glow มีพลังงานจลน์เฉลี่ยใกล้เคียงกับระดับพลังงานจลน์เฉลี่ยของก๊าซที่เป็นกลาง ดังนั้น ถ้าไม่มีการชนกับอนุภาคอื่นขณะเคลื่อนที่อยู่ใน cathode dark space ไอออนบวกจะชนคาโทดด้วยพลังงานจลน์เท่ากับพลังงานที่ได้รับจากศักย์ไฟฟ้าตกคร่อม cathode dark space ในกรณีของอิเล็กตรอนทุติยภูมิก็เช่นเดียวกัน ถ้าถือว่าขณะหลุดจากคาโทดมี

พลังงานจลน์น้อยมาก และระหว่างเคลื่อนที่ผ่าน cathode dark space ไม่มีการชนกับอนุภาคอื่นใด อิเล็กตรอนทุติยภูมิก็จะเข้าสู่บริเวณ negative glow ด้วยพลังงานเท่ากับที่ได้จากการเร่งด้วยความต่างศักย์ที่ตกคร่อม cathode dark space อิเล็กตรอนพลังงานสูงเหล่านี้จะเป็นตัวเชื่อมในการขนส่งพลังงานจากภายนอกเข้าสู่ระบบ

สำหรับ floating potential ซึ่งเกิดขึ้นบนผิวที่ไม่เชื่อมต่อทางไฟฟ้าที่วางสัมผัสกับดิสก์โกลวดิสชาร์จ เช่น วัสดุรองรับที่เป็นฉนวนซึ่งนำไปวางไว้บนอาโนด จะช่วยลดการชนของอิเล็กตรอนเร็วจากคาโทด แต่จะเร่งไอออนบวกจากบริเวณตัวพลาสมาให้ชนผิววัสดุรองรับนั้น ด้วยพลังงานจลน์เท่ากับความต่างศักย์ที่ตกคร่อม sheath region ซึ่งมีค่าระหว่าง 1-10 โวลต์หรือมากกว่า กระบวนการนี้ให้ผลในการปรับปรุงสมบัติของฟิล์มบางในระบบเคลือบฟิล์มบางแบบที่อยู่ในสภาพแวดล้อมของดิสก์โกลวดิสชาร์จ

### ลักษณะส่อกระแส ความต่างศักย์ และความดันของดิสก์โกลวดิสชาร์จ

Westwood และคณะ[24] ได้คำนวณลักษณะส่อของดิสก์โกลวดิสชาร์จ โดยพิจารณาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออนบวกที่ถูกเร่งผ่าน cathode dark space โดยตรงและได้ผลที่สอดคล้องกับการทดลองเป็นอย่างดี ในการคำนวณมีข้อสมมุติฐานและวิธีการ สรุปได้ดังนี้

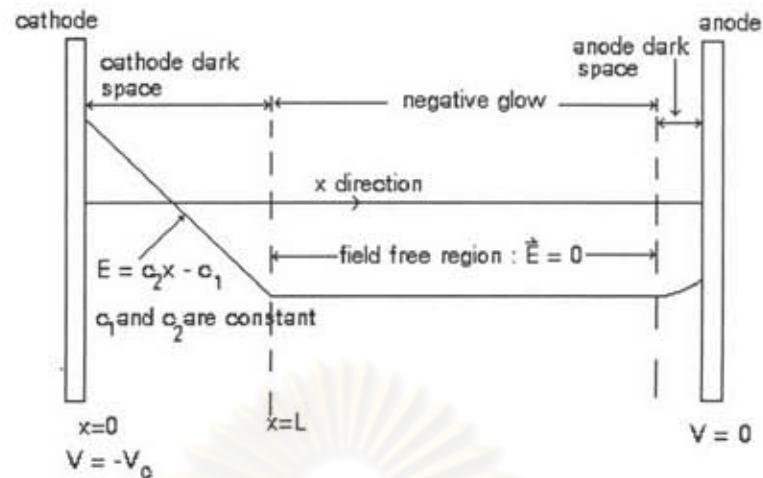
1. กำหนดให้โครงสร้างและการกระจายความต่างศักย์ของดิสก์โกลวดิสชาร์จมีลักษณะตามรูปที่ 2.12 ซึ่งคาโทดมีศักย์ไฟฟ้า  $-V_c$  ส่วนอาโนดอยู่ที่ศักย์ไฟฟ้าศูนย์ สำหรับสนามไฟฟ้าในบริเวณ cathode dark space กำหนดให้มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับระยะทางจาก cathode ดังรูปที่ 2.13 สนามไฟฟ้าในบริเวณ negative glow เป็นศูนย์ ส่วนสนามไฟฟ้าในบริเวณ anode dark space เนื่องจากมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับบริเวณ cathode dark space จะถือว่าเป็นศูนย์เช่นกัน คาโทดอยู่ที่ตำแหน่ง  $x=0$  และความยาวของ cathode dark space เท่ากับ  $L$

จากข้อสมมุตินี้สามารถหาได้ว่าความหนาแน่นประจุในบริเวณ cathode dark space เป็นค่าคงที่ไม่ขึ้นกับระยะทางจากคาโทด ( $x$ ) แต่ขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ที่ป้อนให้คาโทด ( $V_c$ ) และความยาวของ cathode dark space ( $L$ ) ดังสมการ

$$\rho(x) = 2\epsilon_0 \frac{V_c}{L^2} \quad (2.15)$$

โดย  $\epsilon_0$  เป็น free space permittivity





รูปที่ 2.13 ลักษณะสนามไฟฟ้าในดีซีโกลวดิสชาร์จ

2. ความหนาแน่นกระแสของการดิสชาร์จคำนวณได้จากผลรวมของความหนาแน่นกระแสไอออนบวกและอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่ผิวคาโทด (ตำแหน่ง  $x=0$ ) เมื่อรวมกับผลของความสัมพัทธ์ในสมการ (2.15) จะให้ความหนาแน่นกระแสรวมในเทอมของสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่คาโทดเนื่องจากการชนของไอออนบวก ( $\gamma$ ) ความยาวของ cathode dark space ( $L$ ) อัตราเร็วเฉลี่ยของอิเล็กตรอนทุติยภูมิขณะหลุดจากคาโทด ( $v_e(0)$ ) อัตราเร็วเฉลี่ยของไอออนบวกขณะชนคาโทด ( $v_i(0)$ ) และขนาดของศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับคาโทด ( $V_c$ ) ดังสมการ

$$J = (1 + \gamma) \left[ 1 + \gamma \frac{v_i(0)}{V_e(0)} \right]^{-1} v_i(0) \frac{2\epsilon_0}{L^2} V_c \quad (2.16)$$

3. ในการคำนวณอัตราเร็วเฉลี่ยของอิเล็กตรอนทุติยภูมิขณะหลุดจากคาโทด ถือว่าการปลดปล่อยอิเล็กตรอนเป็นแบบ Auger electron emission ซึ่งเกิดขึ้นตามหลังกระบวนการทำให้ไอออนบวกเป็นกลาง [25,26] อิเล็กตรอนทุติยภูมิที่ได้จะมีอัตราเร็วเฉลี่ยโดยประมาณดังสมการ

$$v_e(0) = (eV_e/m_e)^{1/2} \quad (2.17)$$

โดย  $m_e$  เป็นมวลอิเล็กตรอน และ  $V_e = e_1 - 2\phi$  โดย  $e_1$  และ  $\phi$  เป็นระดับพลังงานไอออไนซ์ของไอออนบวก และ work function ของคาโทดตามลำดับ

ส่วนการคำนวณอัตราเร็วเฉลี่ยของไอออนบวกขณะชนคาโรด จะเริ่มต้นจากพิจารณาให้แหล่งกำเนิดไอออนบวกอยู่ในบริเวณ negative glow ซึ่งติดกับขอบของ cathode dark space (ที่  $x=L$ ) ระดับพลังงานเฉลี่ยของไอออนบวกในบริเวณนี้ถือว่าเท่ากับระดับเทอร์มอลของก๊าซ ไอออนบวกเหล่านี้จะถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้าใน cathode dark space ให้เคลื่อนที่ผ่านบริเวณ cathode dark space และเข้าชนคาโรดในที่สุด ไอออนบวกที่เข้าชนคาโรดแบ่งเป็นสองกลุ่ม กลุ่มแรกเป็นไอออนบวกที่สามารถเคลื่อนที่ถึงคาโรดโดยไม่มีการชนกับอนุภาคใดๆ ดังนั้น ไอออนบวกกลุ่มนี้จะได้รับพลังงานเท่ากับ  $eV_c$  กลุ่มที่สองเป็นไอออนบวกที่เป็นผลของการชนแบบ Symmetric charge transfer ระหว่างไอออนบวกที่ถูกเร่งจาก negative glow กับอะตอมก๊าซที่เป็นกลางในบริเวณ cathode dark space [27] จากการพิจารณาอัตราเร็วเฉลี่ยของไอออนบวกทั้งสองกลุ่มนี้ จะได้อัตราเร็วเฉลี่ยของไอออนบวกขณะชนคาโรด ดังสมการ

$$v_i(0) = K(2eV_c/m_i)^{1/2} \quad (2.18)$$

โดย  $m_i$  เป็นมวลของไอออนบวก

$K$  เป็นค่าคงที่ที่ขึ้นกับความยาวของ cathode dark space ( $L$ ) และระยะอิสระเฉลี่ยของไอออนบวก( $\lambda$ ) ซึ่งทั้ง  $L$  และ  $\lambda$  ขึ้นกับความดันก๊าซ  $K$  มีค่าเป็น 1 ที่ความดันก๊าซต่ำมากๆ และมีค่า  $(\pi \frac{\lambda}{2L})^{1/2}$  ที่ความดันสูงกว่า 40 มิลลิทอร์

นำผลจากสมการ (2.17) และสมการ (2.18) แทนลงในสมการ (2.16) จะได้สมการความหนาแน่นกระแสรวมของการดิสชาร์จเป็น

$$J = (1 + \gamma) \frac{2\epsilon_0 K}{L^2} \left(\frac{2e}{m_i}\right) V_c^{3/2} \quad (2.19)$$

สมการนี้ทำนายกระแสการดิสชาร์จเป็นศูนย์เมื่อศักย์ไฟฟ้าที่คาโรดเป็นศูนย์ แต่ในทางปฏิบัติแล้วจะต้องมีความต่างศักย์ที่น้อยที่สุดซึ่งยังสามารถรักษาการดิสชาร์จให้คงอยู่ได้ โดยกระแสการดิสชาร์จจะเป็นศูนย์ถ้าศักย์ไฟฟ้าที่คาโรดต่ำกว่าค่าความต่างศักย์นี้ ดังนั้น กล่าวได้ว่าความต่างศักย์ทั้งหมดที่ป้อนให้กับโกลด์ดิสชาร์จ ส่วนหนึ่งถูกใช้ในการผลิตประจุให้เพียงพอสำหรับการรักษาสภาพการดิสชาร์จ ส่วนที่เหลือจะมีผลในการเคลื่อนที่ของประจุและทำให้เกิดกระแสของการดิสชาร์จ

ดังนั้นสมการของความหนาแน่นกระแสการดิสราร์จ ควรมีรูปทั่วไปคือ

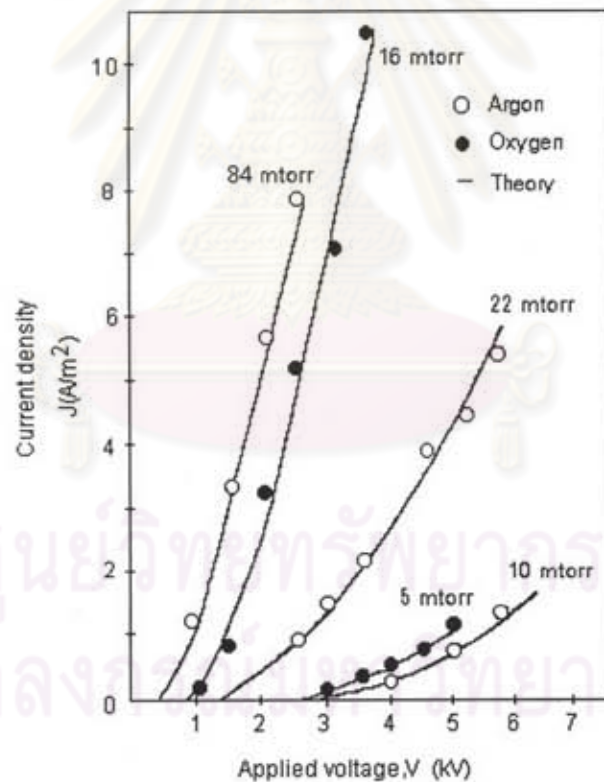
$$J = \beta(V - V_0)^{3/2} \quad (2.20)$$

โดย  $\beta = (1 + \gamma) \frac{2\epsilon_0 K}{L^2} \left(\frac{2e}{m_i}\right)^{1/2}$

$V$  เป็นความต่างศักย์ที่ป้อนจากภายนอก

และ  $V_0$  เป็นความต่างศักย์น้อยที่สุดที่ยังเกิดการดิสราร์จ

สมการนี้อธิบายผลการทดลองได้ดีแม้ในช่วงกระแสต่ำ รูปที่ 2.14 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองกับการคำนวณทางทฤษฎี ในระบบดิสราร์จของกาซอาร์กอนและออกซิเจน



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและความต่างศักย์ของดิสราร์จในบรรยากาศอาร์กอน และออกซิเจน ความดันต่างๆกัน เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณทางทฤษฎีตามสมการ  $V = BJ^{2/3} + V_0$  [24]

จะเห็นว่าข้อมูลในรูปที่ 2.14 สอดคล้องดีกับสมการ  $V = BJ^{2/3} + V_0$  สมการนี้เป็นรูปแบบหนึ่งของสมการ (2.18) โดยมี  $B = \beta^{-2/3}$  ค่า  $B$  และ  $V_0$  ที่ได้จากการวิเคราะห์ความสอดคล้อง(fitting) ของข้อมูลที่แต่ละความดัน แสดงดังตารางที่ 2.2 พร้อมทั้งผลการคำนวณ  $\beta$  จาก  $B$  ซึ่งจะเห็นว่า  $\beta$  มีค่าขึ้นกับชนิดและความดันก๊าซ โดย  $\beta$  จะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันสูงขึ้น ขณะที่  $V_0$  จะลดลงเมื่อความดันก๊าซสูงขึ้น

ตารางที่ 2.2 ค่า  $B$  และ  $V_0$  ของกราฟที่ได้จากการ fit ข้อมูลตามรูปที่ 2.14

Gas	Pressure(mTorr)	$B(VA^{-2/3} m^4)$	$V_0(kV)$	$\beta=B^{-3/2}$
Ar	10	2965	2.55	$6.2 \times 10^5$
	22	1330	1.3	$2.1 \times 10^5$
	84	514	0.4	$8.6 \times 10^5$
O <sub>2</sub>	5	2185	2.65	$9.8 \times 10^5$
	16	535	0.9	$8.1 \times 10^5$

การพิจารณาข้างต้นแสดงว่าลักษณะส่อของกระแสและความต่างศักย์ของดีซีโกลวดิสชาร์จขึ้นกับความดันก๊าซเป็นอย่างมากและเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของก๊าซที่ใช้ในระบบ

### ดีซีโกลวดิสชาร์จภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก

ระบบดีซีโกลวดิสชาร์จโดยทั่วไปต้องใช้ความต่างศักย์ในการดิสชาร์จสูง แต่ให้กระแสการดิสชาร์จต่ำ โดยเฉพาะเมื่อการดิสชาร์จเกิดขึ้นที่ความดันก๊าซต่ำ ดังเช่นตัวอย่างในรูปที่ 2.14 ของหัวที่ผ่านมา ซึ่งจะเห็นว่าสำหรับการดิสชาร์จในระบบที่ใช้ก๊าซอาร์กอนความดัน 84 มิลลิทอร์รี่ ที่ความต่างศักย์ 1000 โวลท์ จะได้กระแสการดิสชาร์จประมาณ 1 แอมแปร์ต่อตารางเมตร หรือ 0.1 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และจะต้องใช้ความต่างศักย์สูงกว่า 5000 โวลท์ สำหรับผลิตกระแสการดิสชาร์จขนาดเท่ากันนี้ เมื่อความดันของก๊าซอาร์กอนลดลงเป็น 10 มิลลิทอร์รี่ ลักษณะส่อเช่นนี้มักจะกลายเป็นข้อด้อยของดีซีโกลวดิสชาร์จเมื่อนำไปใช้งานเป็นระบบสำหรับเคลือบฟิล์มบาง เช่น ให้อัตราการเคลือบฟิล์มต่ำเนื่องจากกระแสการดิสชาร์จต่ำ เกิดปัญหาวัสดุรองรับฟิล์มมีความร้อนสูงเนื่องจากการชนของอิเล็กตรอนพลังงานสูง เป็นต้น

ลักษณะส่อที่เป็นปัญหาของดีซีโกลวดิสซาร์จดังกล่าวข้างต้นมีสาเหตุเนื่องจากในกาซที่มีความดันต่ำ อิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งหลุดจากคาโธดและถูกเร่งภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าใน cathode dark space ส่วนใหญ่สามารถไปถึงอานอดโดยไม่มีการชนกับอะตอมกาซหรืออนุภาคอื่นๆ ทำให้ปริมาณอะตอมกาซที่ถูกไอออไนซ์มีน้อย ระดับการไอออไนซ์ในโกลวดิสซาร์จจึงต่ำ (ปริมาณประจุอิสระ ซึ่งได้แก่ ไอออนบวก และอิเล็กตรอน มีน้อย) ทำให้โกลวดิสซาร์จมีสภาพนำไฟฟ้าต่ำ ส่งผลให้กระแสการดิซซาร์จต่ำ ส่วนความต่างศักย์ของการดิซซาร์จมีค่าสูง

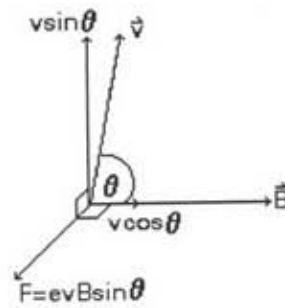
ถ้าทดลองใส่สนามแม่เหล็กความเข้มระหว่าง 100-500 เกาส์ ตรงบริเวณผิวคาโธดของดีซีโกลวดิสซาร์จซึ่งเกิดขึ้นที่ความดันคงที่ จะปรากฏการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนคือ ความเข้มของการเรืองแสงภายในโกลวดิสซาร์จมากขึ้น กระแสของการดิซซาร์จสูงขึ้น และความต่างศักย์ของการดิซซาร์จลดลง แสดงว่า สนามแม่เหล็กสามารถเพิ่มปริมาณการไอออไนซ์อะตอมของกาซ และทำให้สภาพนำไฟฟ้าของดีซีโกลวดิสซาร์จสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่ทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในบริเวณการดิซซาร์จเปลี่ยนไป ดังจะพิจารณาต่อไปนี้

ถ้าไม่รวมผลของการกระเจิงกับอนุภาคอื่นๆ เช่น อะตอมกาซ หรือ ไอออนบวก การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในดีซีโกลวดิสซาร์จที่มีการใส่สนามแม่เหล็ก สามารถกำหนดด้วยสมการ [28]

$$\vec{F} = m_e \frac{d\vec{V}}{dt} = -e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.20)$$

โดย  $e$ ,  $m_e$ , และ  $\vec{v}$  เป็นค่าประจุ มวล และความเร็วของอิเล็กตรอน ตามลำดับ

สนามไฟฟ้า( $\vec{E}$ )ในสมการ 2.20 คือสนามไฟฟ้าใน cathode dark space ซึ่งมีทิศคงที่คือ พุ่งเข้าและตั้งฉากกับผิวคาโธด ส่วนสนามแม่เหล็ก( $\vec{B}$ )สามารถแยกได้เป็นสองกรณี คือ สนามแม่เหล็กตั้งฉากและสนามแม่เหล็กแนวขนานกับผิวคาโธด เทอม  $\vec{v} \times \vec{B}$  ในสมการ (2.20) แสดงว่า จะมีแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กกระทำต่ออิเล็กตรอน ก็ต่อเมื่อ อิเล็กตรอนมีความเร็วไม่ขนานกับสนามแม่เหล็ก หรือมีองค์ประกอบย่อยของความเร็วในทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กไม่เป็นศูนย์ อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับสนามแม่เหล็ก จะทำให้มีแรงขนาด  $e v B \sin \theta$  กระทำต่ออิเล็กตรอนในทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและความเร็วของอิเล็กตรอน (ดูรูปที่ 2.15) โดย  $\theta$  เป็นมุมระหว่างความเร็วอิเล็กตรอนกับสนามแม่เหล็ก ส่วนการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในทิศขนานกับสนามแม่เหล็กจะไม่ได้รับผลกระทบใดๆ



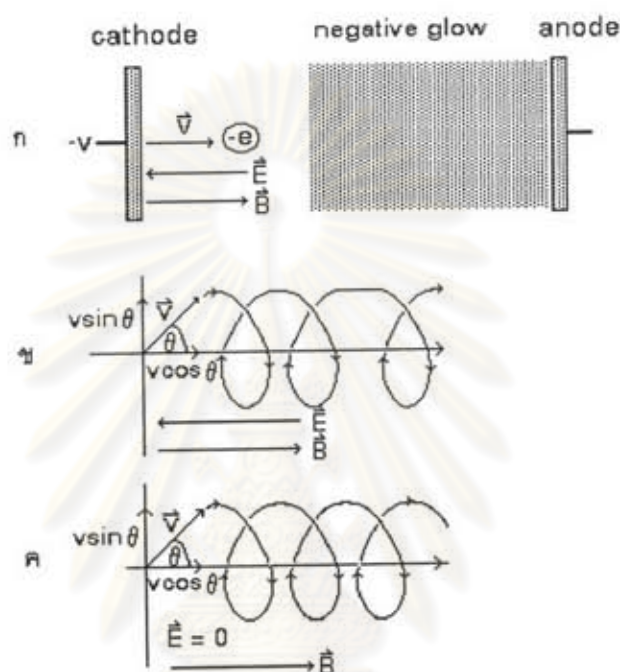
รูปที่ 2.15 ขนาดและทิศทางของแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กที่กระทำต่ออิเล็กตรอน  
ซึ่งมีความเร็ว  $v$  ทำมุม  $\theta$  กับสนามแม่เหล็ก ( $B$ ) (ความเร็วอิเล็กตรอน  
และสนามแม่เหล็กอยู่บนระนาบของหน้ากระดาษ)

### 1. สนามแม่เหล็กตั้งฉากกับผิวคาโธด

เมื่อใส่สนามแม่เหล็กขนาดความเข้มคงที่ในทิศตั้งฉากกับคาโธด สนามแม่เหล็กนี้  
จะขนานกับสนามไฟฟ้าใน cathode dark space ถ้าอิเล็กตรอนเริ่มเคลื่อนที่จากคาโธดในแนว  
ตั้งฉาก ดังรูปที่ 2.16ก ความเร็วของอิเล็กตรอนจะขนานกับสนามแม่เหล็ก ( $\theta=0$ ) ทำให้เทอม  
 $v \times B$  เป็นศูนย์ อิเล็กตรอนจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ตรงไปยังแอโนดด้วยสนามไฟฟ้าใน cathode dark  
space เพียงอย่างเดียว

ถ้าอิเล็กตรอนเริ่มเคลื่อนที่จากคาโธดด้วยความเร็ว  $v$  ทำมุม  $\theta$  กับสนามแม่เหล็ก  
อิทธิพลจากแรงขนาด  $evB \sin \theta$  ซึ่งกระทำต่ออิเล็กตรอนในทิศตั้งฉากกับระนาบของสนามแม่เหล็ก  
และความเร็วของอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนมีการโคจรเป็นวงกลมด้วยรัศมี  $m_e v \sin \theta / eB$   
รอบเส้นแรงแม่เหล็ก ขณะเดียวกันอิเล็กตรอนก็ถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าในบริเวณ cathode dark  
space ทำให้องค์ประกอบย่อยของความเร็วยุติอิเล็กตรอนในทิศขนานกับสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นตาม  
ระยะทางจากคาโธด เมื่อรวมการเคลื่อนที่ทั้งสองส่วนจะได้ลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน  
ในบริเวณ cathode dark space เป็นแบบ Helix ที่มีระยะ pitch มากขึ้นเรื่อย ๆ และเลื่อนเข้าหา  
negative glow แสดงดังรูปที่ 2.16ข

เมื่ออิเล็กตรอนเข้าสู่บริเวณ negative glow ซึ่งเป็นบริเวณที่สนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ ถ้าอิเล็กตรอนมีความเร็วไม่ขนานกับสนามแม่เหล็กแล้ว อิเล็กตรอนจะโคจรเป็นวงกลมรอบเส้นแรงแม่เหล็กด้วยรัศมี  $m_e v \sin \theta / eB$  ในขณะที่องค์ประกอบย่อยของความเร็วยังคงเคลื่อนที่ซึ่งขนานกับสนามแม่เหล็กยังคงที่ เส้นทางเคลื่อนที่รวมของอิเล็กตรอนจะเป็นแบบ helix ที่มีระยะ pitch คงที่ และเลื่อนเข้าหาแอโนด ตามรูปที่ 2.1ค



- รูปที่ 2.16 อิทธิพลของสนามไฟฟ้า( $E$ ) และสนามแม่เหล็ก( $B$ )ต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน
- อิเล็กตรอนถูกเร่งตรงไปยังแอโนดเมื่อ  $B$  ขนานกับ  $E$  และ  $\theta = 0$
  - อิเล็กตรอนโคจรเป็น helix ระยะ pitch เพิ่มขึ้น เมื่อ  $B$  ขนานกับ  $E$  และ  $\theta \neq 0$
  - อิเล็กตรอนโคจรเป็น helix ระยะ pitch คงที่ เมื่อ  $B \neq 0$ ,  $E = 0$  และ  $\theta \neq 0$

ลักษณะเส้นทางการเคลื่อนที่แบบ helix ทำให้ระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในบริเวณการดิสชาร์จเพิ่มขึ้น อิเล็กตรอนจึงมีโอกาสมากขึ้นที่จะไอออไนซ์อะตอมก๊าซ ก่อนจะเคลื่อนที่ถึงแอโนด นอกจากนี้มีผลต่อการบังคับอิเล็กตรอนที่มีความเร็วในทิศที่ตั้งฉากกับแกนของโกลวดิสชาร์จไม่ให้หลุดจากบริเวณของการดิสชาร์จ ซึ่งจะช่วยลดการสูญเสียอิเล็กตรอนให้กับผนังภาชนะสุญญากาศ และเป็นการจำกัดลำการดิสชาร์จไม่ให้กระจายออกจากบริเวณระหว่างคาโธดกับแอโนด

โกลด์ดิสชาร์จ์เพิ่มขึ้น โกลด์ดิสชาร์จ์จึงมีความเข้มของการโกลด์และมีสภาพนำไฟฟ้าสูงขึ้น ซึ่ง จะเห็นได้จากลักษณะส่อของกระแสและความต่างศักย์ของการดิสชาร์จ์เปลี่ยนแปลงไป เมื่อเทียบกับดิซ็โกลด์ดิสชาร์จ์แบบปกติ เช่น ถ้าความดันก๊าซเท่ากันจะได้กระแสของการดิสชาร์จ์สูงขึ้น ส่วนความต่างศักย์ลดลง หรือสามารถลดความดันก๊าซสำหรับการดิสชาร์จ์ได้ต่ำลง โดยที่ยังได้ กระแสการดิสชาร์จ์เท่าเดิม เป็นต้น

## 2. สนามแม่เหล็กขนานกับผิวคาโธด

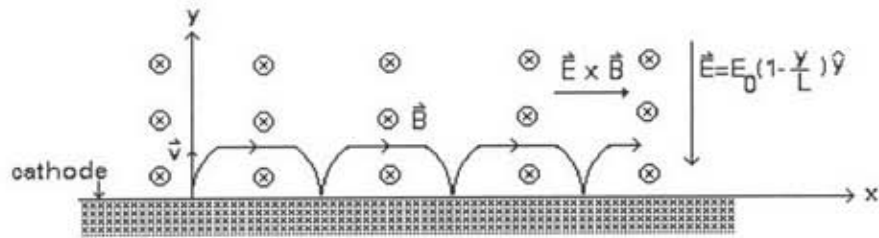
พิจารณาอิเล็กตรอนที่หลุดจากเป้าในแนวตั้งฉากด้วยอัตราเร็ว  $v$  เข้าสู่บริเวณที่มี สนามแม่เหล็กความเข้ม  $B$  ทิศพุ่งเข้ากระดาษและไม่มีสนามไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.17 อิเล็กตรอน จะเริ่มต้นเคลื่อนที่เป็นวงกลมรัศมี  $m_0 v/eB$  ซึ่งถ้าไม่มีการชนกับอนุภาคอื่นอิเล็กตรอนจะโค้งย้อน กลับสู่เป้าด้วยอัตราเร็ว  $v$  เมื่อสะท้อนกลับก็จะเริ่มเคลื่อนที่ลักษณะเดิมอีก เส้นทางเคลื่อนที่ รวมมีลักษณะเป็นครึ่งวงกลม ซึ่งเลื่อนไปบนระนาบซึ่งตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและความเร็วของ อิเล็กตรอน



รูปที่ 2.17 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนซึ่งหลุดจากผิวคาโธดด้วยความเร็ว  $v$  เข้าสู่บริเวณ ของสนามแม่เหล็ก  $B$  ซึ่งมีทิศขนานกับผิวคาโธด (พุ่งเข้าหน้ากระดาษ) และสมมุติว่าไม่มีสนามไฟฟ้า

สถานะที่ใกล้เคียงกับในระบบของดิซ็โกลด์ดิสชาร์จ์เมื่อใส่สนามแม่เหล็กแนวขนาน กับผิวคาโธดแสดงดังรูปที่ 2.18 เหนือผิวคาโธดมีสนามแม่เหล็กแนวขนานความเข้ม  $B$  คงที่ และ ทิศพุ่งเข้ากระดาษ ( $-z$ ) และสนามไฟฟ้าความเข้มสูงในบริเวณ cathode dark space ทิศพุ่งเข้าหา คาโธด ( $-y$ ) อิเล็กตรอนทุติยภูมิที่หลุดจากเป้าในทิศตั้งฉากจะเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่มีสนาม แม่เหล็กและสนามไฟฟ้าซึ่งตั้งฉากกัน





รูปที่ 2.18 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งหลุดจากผิวคาโทดด้วยความเร็ว  $\vec{v}$  เข้าสู่บริเวณของสนามแม่เหล็ก  $\vec{B}$  ซึ่งมีความเข้มคงที่และทิศขนานกับผิวคาโทด (พุ่งเข้าหน้ากระดาษ) และสนามไฟฟ้าซึ่งขนาดลดลงแบบเชิงเส้นกับระยะจากคาโทดและทิศพุ่งเข้าหาคาโทด

กำหนดให้ขนาดของสนามไฟฟ้าลดลงแบบเชิงเส้นตามระยะห่างจากคาโทด [29] ความยาวของ cathode dark space เป็น  $L$  และสนามไฟฟ้าในบริเวณ negative glow เป็นศูนย์ ถ้า  $y$  เป็นระยะห่างจากคาโทด และ  $y=0$  ที่ผิวเป้า สามารถเขียนสมการสำหรับสนามไฟฟ้าใน cathode dark space ได้ในรูป

$$E = E_0\left(1 - \frac{y}{L}\right) \quad (2.21)$$

เมื่อ  $E_0$  เป็นความเข้มสนามไฟฟ้าที่ผิวเป้า

กำหนด  $x$  เป็นระยะทางตามแนวขนานกับผิวเป้าและตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก โดย  $x=0$  ณ จุดที่อิเล็กตรอนหลุดจากเป้า

เริ่มต้นอิเล็กตรอนทุติยภูมิถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้าความเข้มสูงที่ผิวเป้าให้เคลื่อนที่ออกจากคาโทดอย่างรวดเร็ว ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบความเร็วส่วนที่ได้จากการเร่งของสนามไฟฟ้านี้ กับความเร็วของอิเล็กตรอนซึ่งเป็นผลของกระบวนการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ สามารถประมาณได้ว่าความเร็วของอิเล็กตรอนทุติยภูมิขณะหลุดจากคาโทดเป็นศูนย์ จากสมการ(2.20) แทน  $\vec{v} = \left(\frac{dx}{dt}\right)\hat{x} + \left(\frac{dy}{dt}\right)\hat{y} + \left(\frac{dz}{dt}\right)\hat{z}$ ,  $\vec{E} = -E_0\left(1 - \frac{y}{L}\right)\hat{y}$  และ  $\vec{B} = -B\hat{z}$  จะได้สมการการเคลื่อนที่ที่เป็น

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{eB}{m}\left(\frac{dy}{dt}\right) \quad (2.22)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{eE}{m} - \frac{eB}{m}\left(\frac{dx}{dt}\right) \quad (2.23)$$

และ

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = 0 \quad (2.24)$$

อินทิเกรตสมการ (2.22) จะได้

$$\frac{dx}{dt} = \frac{eB}{m} y \quad (2.25)$$

นำ  $\frac{dx}{dt}$  ในสมการ (2.25) และ E ในเทอมของ y ตามสมการสมการ (2.21) แทนลงในสมการ (2.23) จะได้สมการเชิงอนุพันธ์อันดับสองในรูป

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \omega^2 y = \frac{eE_0}{m} \quad (2.26)$$

โดย

$$\omega^2 = \frac{eE_0}{mL} + \left(\frac{eB}{m}\right)^2 \quad (2.27)$$

สมการ (2.26) มีคำตอบเป็น

$$y = \frac{eE_0}{m\omega^2} (1 - \cos \omega t) \quad (2.28)$$

แทนค่า y ตามสมการ (2.28) ลงในสมการ (2.23) จะหาได้ว่า

$$x = \frac{e^2 E_0 B t}{m^2 \omega^2} \left(1 - \frac{\sin \omega t}{\omega t}\right) \quad (2.29)$$

เนื่องจากอิเล็กตรอนหยุดยั้งหมดจากคาโรตในทิศตั้งฉาก (กำหนดให้) ดังนั้นความเร็วย่อยของอิเล็กตรอนขณะหลุดจากคาโรตตามแนวแกน z เป็นศูนย์ และจากสมการ(2.24) จะหาได้ว่า

$$z = z_0 \quad (2.30)$$

เมื่อ  $z_0$  เป็นค่าคงที่ สมการ (2.30) แสดงว่าอิเล็กตรอนไม่มีการเลื่อนตำแหน่งตามแนวแกน z (ทิศตามแนวเส้นแรงแม่เหล็ก)

ระบบสมการ(2.28), (2.29) และ (2.30)อธิบายการเคลื่อนที่แบบไซคลอยด์ (cycloidal) ของอิเล็กตรอนทุติยภูมิบนระนาบ x-y ดังนั้นถ้าอิเล็กตรอนทุติยภูมิไม่ชนกับอนุภาคอื่น และยังคงอยู่ในบริเวณ cathode dark space อิเล็กตรอนทุติยภูมิจะกระโดด (hop) ไปบนผิวเป้าเช่นเดียวกันกับกรณีที่มีเฉพาะสนามแม่เหล็ก (ตามรูปที่ 2.16) แต่ผลรวมของอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนทุติยภูมิเปลี่ยนจากวงกลมเป็นไซคลอยด์ ซึ่งเคลื่อนไปในทิศตามแกน x หรือแนวของสนาม  $\vec{E} \times \vec{B}$  (ดังรูปที่ 2.17) ถ้าอิเล็กตรอนทุติยภูมิหลุดผ่านเข้าไปในบริเวณ negative glow ซึ่งเป็นบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ ก็จะเปลี่ยนการเคลื่อนที่เป็นแนวโค้งวงกลม และย้อนกลับไปยังบริเวณ cathode dark space ในที่สุด ลักษณะเช่นนี้แสดงว่าอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกกัก (trap) ให้เคลื่อนที่ในบริเวณใกล้ๆ กับผิวเป้าเท่านั้น อย่างไรก็ตามในสภาพที่เป็นจริงอิเล็กตรอนทุติยภูมียังชนกับอนุภาคของก๊าซซึ่งจะทำให้ประสิทธิผลของการกักด้วยสนามแม่เหล็กลดลง อิเล็กตรอนทุติยภูมิสามารถเปลี่ยนทิศหลังชนและกระโดดข้ามจากเส้นแรงแม่เหล็กเส้นหนึ่งไปยังอีกเส้นหนึ่งที่อยู่ห่างจากเป้ามามากขึ้น โดยวิธีนี้อิเล็กตรอนทุติยภูมิจะลอยเลื่อน (drift) ตัดสนามแม่เหล็กอย่างช้าๆ ไปยังอานอด

ผลของสนามแม่เหล็กในแนวขนานกับคาโรดนอกจากจะทำให้ระดับการไอออไนซ์โดยรวมภายในโกลวดิสชาร์จเพิ่มขึ้นเหมือนกับในกรณีสนามแม่เหล็กตั้งฉากแล้ว ยังมีลักษณะพิเศษ คือ การพยายามกักอิเล็กตรอนทุติยภูมิให้เคลื่อนที่อยู่ในบริเวณใกล้ๆผิวเป้าจะทำให้อิเล็กตรอนมีโอกาสชนและไอออไนซ์อะตอมกาซบริเวณนั้นได้มากกว่าบริเวณอื่น การโกลวในบริเวณเหนือผิวคาโรดจึงมีความเข้มสูง นอกจากนี้สนามแม่เหล็กในแนวขนานกับคาโรดยังทำให้สภาพเคลื่อนที่ได้ของอิเล็กตรอนในแนวตั้งฉากกับเป่าลดลง ส่งผลให้สัดส่วนของกระแสอิเล็กตรอนต่อกระแสไอออนบวกในกระแสการดิสชาร์จรวมลดลงตามไปด้วย

เทคนิคเพิ่มความเข้มของการดิสชาร์จโดยการใส่สนามแม่เหล็กขนานผิวกับคาโรดถูกนำไปใช้มาก ในการกำเนิดดิซีโกลวดิสชาร์จที่ใช้ก๊าซความดันต่ำ แต่ให้กระแสการดิสชาร์จสูง โดยมีชื่อเรียกทั่วไปว่า ดิซีแมกเนตรอนโกลวดิสชาร์จ (dc magnetron glow discharge) ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานที่สำคัญ คือ ระบบเคลือบฟิล์มบางแบบดิซีแมกเนตรอนสปัตเตอริง ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในบทต่อไป