

บทที่ 2

พลาสมาโกลวดิสชาร์จ

สภาพโกลวดิสชาร์จ คือ สภาพที่อะตอมหรือโมเลกุลอยู่ในสภาพที่ถูกไอออไนซ์ตลอดเวลา โดยมีอิเล็กตรอนเป็นตัวรับและสะสมพลังงานจากระบบภายนอกที่เป็นตัวกระตุ้น ทำให้กระบวนการไอออไนซ์เกิดขึ้นในระบบอย่างต่อเนื่อง สภาพเช่นนี้จะประพุดิตัวเสมือนพลาสมาอุดมคติโดยมีสถานะเป็นกลางทางไฟฟ้าแบบกึ่งเสถียร(quasi neutrality)

กระบวนการเกิดพลาสมาโกลวดิสชาร์จ สามารถกระทำได้โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าความต่างศักย์สูงระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้วภายในภาชนะความดันต่ำ แรงดันไฟฟ้าที่ใช้สามารถใช้ได้ทั้งกระแสตรงและกระแสสลับ รูปแบบที่ง่ายที่สุดคือแบบกระแสตรงเรียกว่า ดิซีโกลวดิสชาร์จ(DC glow discharge) และแบบกระแสสลับความถี่ที่ใช้ขับเคลื่อนเพื่อที่จะทำให้เกิดการโกลวดิสชาร์จจะอยู่ในช่วงความถี่วิทยุ(Radio frequency:RF)สามารถใช้ได้ทุกความถี่ แต่เนื่องจากจะมีการรบกวนระบบสื่อสารภายนอกจึงเลือกใช้ความถี่ 13.56 เมกกะเฮิร์ตซ์ ตามข้อตกลงขององค์การสื่อสารระหว่างประเทศ(International communication authorities) เรียกการโกลวแบบนี้ว่า อาร์เอฟโกลวดิสชาร์จ (RF glow discharge) ความรู้ด้านโกลวดิสชาร์จสามารถที่จะนำไปประยุกต์ในทางด้าน วิศวกรรมพื้นผิวและเทคโนโลยีฟิล์มบาง เช่น sputtering deposition , plasma etching , plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) เป็นต้น[5,6,7]

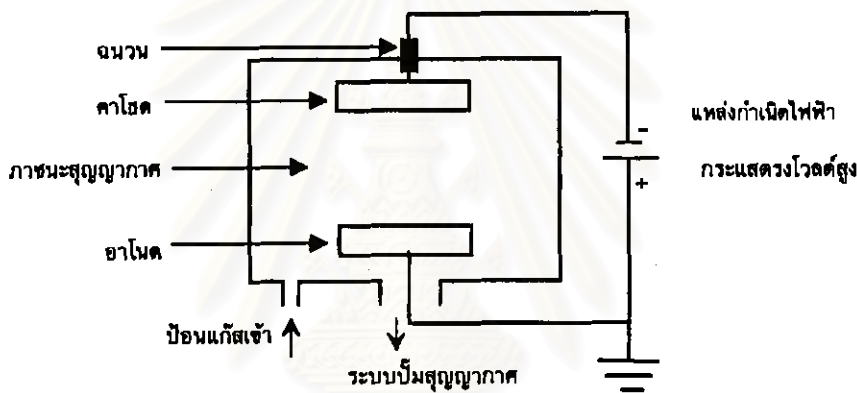
ดิซีโกลวดิสชาร์จ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงระบบดิซีโกลวดิสชาร์จซึ่งเป็นรูปแบบการโกลวดิสชาร์จอย่างง่าย เพื่อที่จะให้เข้าใจถึงพื้นฐานของกระบวนการโกลวดิสชาร์จแบบอื่นๆ

1. กลไกการเกิด

ระบบดีซีโกลวดิสชาร์จ จะประกอบด้วยระบบแบบง่าย ๆ คือ มีขั้วคาโทด(cathode) และแอโนด(anode)วางขนานกันในภาชนะสุญญากาศ(vacuum chamber)ที่บรรจุแก๊สความดันต่ำ เช่น อาร์กอน นีออน ซีนอน คริปทอน หรือเป็นแก๊สผสมระหว่างอาร์กอนกับออกซิเจน เป็นต้น

เมื่อต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงโวลต์สูง(high voltage DC power supply) โดยที่ขั้วคาโทดต่อกับขั้วลบและแอโนดต่อกับขั้วบวก ดังรูป 2.1



รูปที่ 2.1 ระบบดีซีโกลวดิสชาร์จแบบง่าย

ระบบในรูป 2.1 เมื่อป้อนความต่างศักย์ให้กับขั้วไฟฟ้าทั้งสอง จะได้สนามไฟฟ้าขนาด V/d ซึ่ง V คือ ความต่างศักย์ และ d คือ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง เมื่อมีกระแสไฟฟ้าปริมาณน้อยๆ ซึ่งเกิดจากการที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิ(primary electron)จำนวนหนึ่งหลุดจากผิวขั้วคาโทดด้วยการกระตุ้นของรังสีตามธรรมชาติ เช่น รังสีคอสมิก รังสีอัลตราไวโอเล็ต เป็นต้น จากนั้นจะถูกเร่งไปยังแอโนดโดยสนามไฟฟ้าในสภาวะความต่างศักย์ และความดันที่เหมาะสม อิเล็กตรอนเหล่านี้จะมีการสะสมพลังงานจลน์เพื่อที่จะไปไอออไนซ์อะตอมของแก๊สตัวอื่นให้แตกตัวเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอน ค่าความต่างศักย์ที่เหมาะสมนี้จะเป็ความต่างศักย์ที่เร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานจลน์อย่างน้อยเท่ากับพลังงานไอออไนซ์ของอะตอมแก๊ส ความดันที่เหมาะสมคือความดันที่ไม่ต่ำและไม่สูงเกินไป เนื่องจากความดันมีผลต่อระยะอิสระเฉลี่ย (mean free path) ของอิเล็กตรอน ถ้าความดันต่ำเกินไประยะอิสระเฉลี่ยของอิเล็กตรอนจะมากกว่าระยะระหว่างขั้วแอโนดกับโคโทด ทำให้ไม่มีการชนกับอะตอมแก๊สอื่น ก็จะไม่เกิดการไอออไนซ์

และถ้าความดันสูงเกินไป ระยะเวลาเฉลี่ยก็จะน้อย ทำให้ไม่สามารถเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานจนพอที่จะไปไอออไนซ์อะตอมของแก๊สอื่นได้เช่นกัน

เมื่ออะตอมของแก๊สถูกชนโดยอิเล็กตรอนปฐมภูมิ ทำให้เกิดไอออนบวกและอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ไอออนบวกจะถูกเร่งไปยังขั้วคาโทดและอิเล็กตรอนจะถูกเร่งต่อไปยังขั้วแอโนด ทั้งอิเล็กตรอนปฐมภูมิและทุติยภูมิจะมีการสะสมพลังงานต่อไปเพื่อที่จะไปไอออไนซ์อะตอมแก๊สตัวอื่นในระหว่างถูกเร่งไปที่ขั้วแอโนดอย่างต่อเนื่อง ขณะเดียวกันไอออนบวกจะถูกเร่งไปที่ขั้วคาโทด ถ้ามีพลังงานมากพอ การชนผิวคาโทดของไอออนบวกจะทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) จากผิวคาโทด และถูกเร่งต่อไปยังขั้วแอโนด กระบวนการเช่นนี้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นลูกโซ่ ส่งผลให้เกิดประจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในระบบแบบทวีคูณ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วขณะที่ความต่างศักย์คงที่ เรียกว่า สภาวะการพังทลาย (breakdown) และเรียกความต่างศักย์ขณะนั้นว่า ความต่างศักย์พังทลาย (breakdown voltage : V_B)

กระบวนการที่เกิดขึ้นจนถึงจุดพังทลายเรียกว่า Townsend discharge การเพิ่มของกระแสในระบบเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [8]

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

เมื่อ I_0 คือ กระแสอิเล็กตรอนปฐมภูมิจากการกระตุ้นภายนอก

α คือ จำนวนไอออนบวกที่เกิดขึ้นต่อหน่วยระยะทางของอิเล็กตรอน

γ คือ สัมประสิทธิ์การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิของผิวคาโทดอันเนื่องมาจากการชนของไอออนบวก

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ที่เพิ่มขึ้นแสดงในรูปที่ 2.2 เมื่อพิจารณาสมการที่ 2.1 สามารถทำนายการพังทลาย $(1 - \gamma \exp(\alpha d)) = 0$ ความต่างศักย์พังทลายที่วัดในหน่วยโวลต์จะสัมพันธ์กับความดันแก๊สและระยะระหว่างขั้วคาโทดและแอโนดตามสมการ [9]

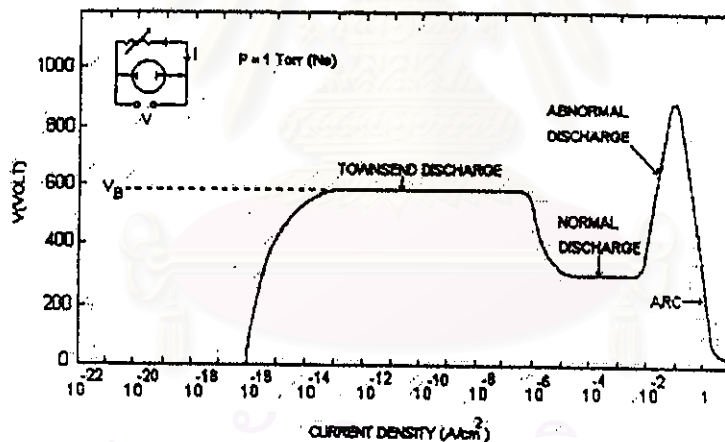
$$V_B = \frac{A(Pd)}{C + \ln(Pd)} \quad (2.2)$$

เมื่อ A และ C คือ ค่าคงที่ขึ้นกับชนิดของแก๊ส

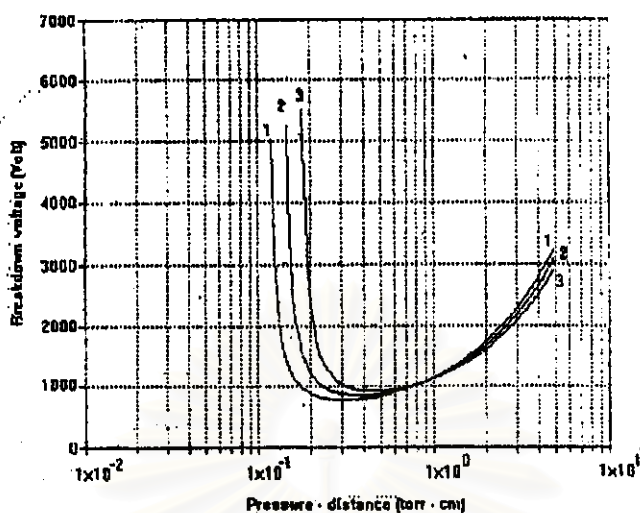
P คือ ความดันแก๊สในหน่วยทอร์ (torr)

d คือ ระยะห่างระหว่างขั้วคาโทดและแอโนด

สมการที่ 2.2 สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ได้ดังรูป 2.3 เส้นโค้งที่ได้เรียกว่าเส้นโค้งพาสเชน (Paschen curve) เส้นโค้งจะให้ค่าต่ำสุดที่ค่าศักย์พังหลายต่ำสุด เรียกว่า จุดต่ำสุดพาสเชน จากกราฟเมื่อให้ d คงที่ การลดหรือเพิ่มความดันแก๊สจะทำให้ความต่างศักย์พังหลายสูงขึ้น เนื่องจากอิเล็กตรอนจะชนกับอะตอมของแก๊สน้อยลงเมื่อความดันของแก๊สลดต่ำลง และจะต้องใช้ความต่างศักย์สูงขึ้นเพื่อเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงเมื่อความดันแก๊สเพิ่มสูงขึ้น แก๊สแต่ละชนิดจะให้เส้นโค้งพาสเชนที่แตกต่างกันเนื่องจากความแตกต่างระหว่างระดับพลังงานไอออนไนซ์และภาคตัดขวางของการชนกับอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นกระแสและความต่างศักย์
ของระบบดีซีโกลวดิสชาร์จที่ใช้แก๊สนีออน ความดัน 1 Torr [10]



รูปที่ 2.3 เส้นโค้งพาสเซนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์พังทลายของแก๊สกับความดัน
ในหน่วย Torr ที่ระยะ d cm

จากรูปที่ 2.2 เมื่อความต่างศักย์เพิ่มขึ้นจนถึงจุดพังทลายแล้ว ถ้ายังมีกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบอย่างเพียงพอ กระบวนการเพิ่มของกระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งถึงจุดที่ไอออนบวกและอิเล็กตรอนสามารถควบคุมกันเองได้ โดยที่อิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดจากผิวคาโทดสามารถทำให้เกิดไอออนบวกเพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิในปริมาณเท่าเดิม ระบบก็จะเข้าสู่สภาวะการรักษาสภาพดีสชาร์จ์ได้เอง (self-sustained) โดยไม่ต้องอาศัยอิเล็กตรอนปฐมภูมิอีกต่อไป แก๊สภายในระบบก็จะเปลี่ยนสถานะอยู่ในสภาพโกลวดิสชาร์จ์ ซึ่งจะเริ่มเห็นการเรืองแสงภายในบริเวณการโกลวได้ชัดเจน และขณะเดียวกันความต่างศักย์ก็จะลดลง เรียกสภาวะการโกลวเช่นนี้ว่า normal discharge ในช่วงนี้การโกลวจะอยู่บริเวณเหนือขอบและบริเวณผิวขรุขระของผิวคาโทด การเพิ่มกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายจะไม่ส่งผลต่อความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองแต่จะเพิ่มกระแสเพียงอย่างเดียว เมื่อมีความหนาแน่นกระแสทั่วทั้งผิวคาโทดจะเริ่มมีการโกลวบริเวณผิวคาโทดอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นกระบวนการโกลวจะเข้าสู่ย่าน abnormal discharge ช่วงนี้การเพิ่มกำลังไฟฟ้าจะทำให้กระแสและความต่างศักย์เพิ่มมากขึ้น หากมีการป้อนกำลังไฟฟ้าต่อไปอีกจนกระทั่งถึงจุดที่คาโทดปลดปล่อยอิเล็กตรอนเนื่องมาจากความร้อน (thermionic electron emission) นอกเหนือจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ การเพิ่มของกระแสนี้จะเพิ่มสูงขึ้นแต่ความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะลดลงอย่างรวดเร็วเป็นช่วงที่เกิดการอาร์ก (arc) ขึ้นในระบบ

ในสภาพความเป็นจริงเมื่อป้อนกำลังไฟฟ้าจนถึงช่วงที่เกิดการพังทลายแล้ว การดิสรชาร์จะเข้าสู่สภาพการไกลดิสรชาร์อย่างรวดเร็ว ซึ่งอาจจะตกอยู่ในช่วง normal discharge หรือ abnormal discharge ก็ได้ขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบในขณะนั้น การใช้งานในสภาพการไกลดิสรชาร์จะโดยปกติจะอยู่ในช่วง abnormal discharge เช่นในระบบสปัตเตอริง(sputtering) ซึ่งในช่วงนี้ความหนาแน่นกระแสของการดิสรชาร์มีค่าสูงและสามารถควบคุมได้จากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยตรง

2. การกระจายความต่างศักย์ สนามไฟฟ้า และกระแสในสภาพดิสรชาร์ไกลดิสรชาร์

เมื่อพิจารณาสภาพไกลดิสรชาร์จะเห็นว่าประกอบด้วยอนุภาคสามชนิดคือ อิเล็กตรอน ไอออนบวก และอะตอมของแก๊สที่เป็นกลาง จึงพอจะกล่าวได้ว่าเป็นพลาสมาอุดมคติ การที่มีพื้นผิวที่ไม่เชื่อมต่อกับไฟฟ้า(electrical floating)วางสัมผัสกับพลาสมา พื้นผิวจะถูกชนด้วยอนุภาคที่มีอยู่ในพลาสมา ฟลักซ์ของแต่ละอนุภาคจะตกกระทบในแนวตั้งฉากกับพื้นผิว(เพื่อให้ง่ายในการพิจารณาจะคิดเฉพาะในแนวแกน x) ซึ่งสามารถอธิบายโดยอาศัยสมการทฤษฎีจลน์ของแก๊ส ดังนั้น ฟลักซ์ของอนุภาคสามารถเขียนได้ดังสมการ[11,12]

$$\Phi = \frac{1}{4}n\bar{v}_{ave} \quad (2.3)$$

จากสมการความเร็วเฉลี่ยของอนุภาคแบบแก๊สอุดมคติ

$$\bar{v}_{ave} = \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}} \quad (2.4)$$

T เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์ของอนุภาคซึ่งสัมพันธ์กับพลังงานจลน์[13]

$$E_k = \frac{3}{2}k_B T \quad (2.5)$$

การชนผิวของอิเล็กตรอนและไอออนบวกจะทำให้เกิดความหนาแน่นกระแสยังผล(effective current density)อันเนื่องมาจากอนุภาคเหล่านี้มีประจุ ซึ่งสัมพันธ์กับสมการ[14,15]

$$J = q\Phi = \frac{nqv_{ave}}{4} \quad (2.6)$$

เมื่อ J เป็นความหนาแน่นกระแสยังผลของอนุภาคที่มีประจุ q มีความหนาแน่น n และมีความเร็วเฉลี่ย v_{ave} ดังนั้นจะได้สมการความหนาแน่นกระแสยังผลของอิเล็กตรอน(ele)และไอออนบวก(ion)ตามลำดับดังนี้

$$J_{ele} = \frac{n_{ele}e v_{ave,ele}}{4} \quad (2.7)$$

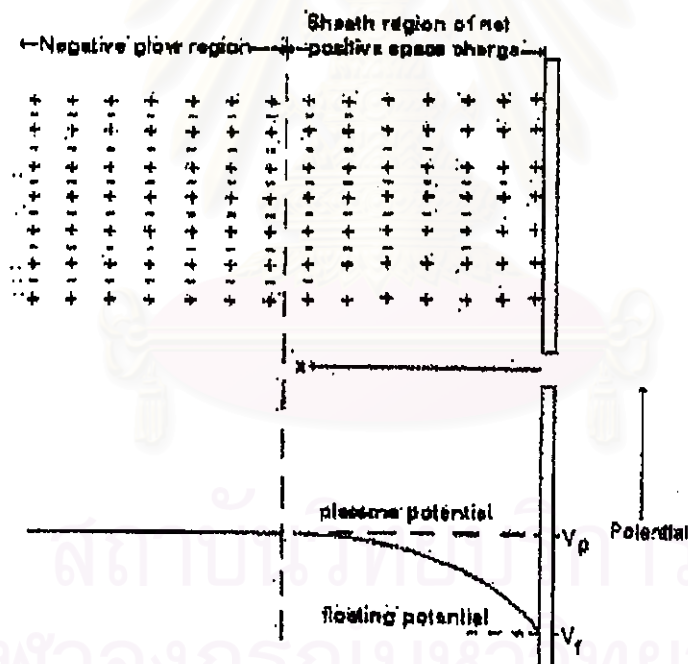
$$J_{ion} = \frac{n_{ion}e v_{ave,ion}}{4} \quad (2.8)$$

สำหรับแก๊สอาร์กอนความดัน 10 มิลลิทอร์ จะมไอออนบวกและอิเล็กตรอนประมาณ 10^{10} อนุภาคต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จากสมการที่ 2.3 - 2.8 จะเห็น ความแตกต่างระหว่างไอออนบวกและอิเล็กตรอนจากตารางที่ 2.1[14,15]

| | v_{ave} (cm/sec) | E_k (eV) | J (mA/cm ²) |
|------------|--------------------|------------|---------------------------|
| อิเล็กตรอน | 9.5×10^7 | 2 | 38 |
| ไอออนบวก | 5.2×10^4 | 0.04 | 2.1×10^{-2} |

ตารางที่ 2.1 ความแตกต่างระหว่าง ความเร็วเฉลี่ย พลังงานจลน์ และความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอนและไอออนบวก สำหรับแก๊สอาร์กอนความดัน 10 mTorr , อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ซึ่งจากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ตกกระทบกับพื้นผิวมีค่าสูงกว่าไอออนบวก ดังนั้นพื้นผิวจึงถูกชาร์จโดยอิเล็กตรอนอย่างรวดเร็วทำให้พื้นผิวมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบเมื่อเทียบกับพลาสมา เมื่อถึงจุดที่ซึ่งพื้นผิวถูกชาร์จโดยอิเล็กตรอนจำนวนมากพอที่จะทำให้พื้นผิวมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบมากพอที่จะผลักอิเล็กตรอนด้วยกัน ทำให้ฟลักซ์ของอิเล็กตรอนเท่ากับฟลักซ์ของไอออนบวกความหนาแน่นกระแสสุทธิ(net current density)เป็นศูนย์ เรียกศักย์ไฟฟ้าของพื้นผิวขณะนี้ว่า floating potential (V_f) floating potential ที่เป็นลบจะผลักอิเล็กตรอน ทำให้บริเวณใกล้ๆ พื้นผิวมีประจุลบอยู่ บริเวณพื้นเกิดเป็นชั้นของ positive space charge เรียกบริเวณนี้ว่า sheath region ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.4 การที่มีประจุบวกในบริเวณ sheath region ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่ไม่เป็นศูนย์และขึ้นกับตำแหน่ง (x) ที่ห่างจากพื้นผิว



รูปที่ 2.4 ชั้น positive space charge ใน sheath region (รูปบน) และ floating potential (V_f) บริเวณผิวหน้าของพื้นผิวที่สัมผัสกับพลาสมา(รูปล่าง)[16]

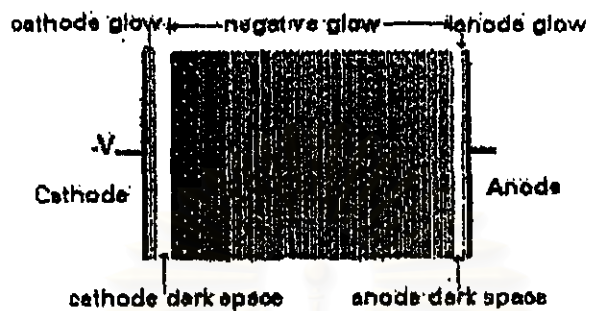
เนื่องจากบริเวณ sheath region เป็นบริเวณที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนต่ำ กระบวนการไอออไนซ์ของแก๊สจะมีโอกาสเกิดขึ้นได้น้อย ทำให้มีความเข้มแสงบริเวณนี้ต่ำเรียกว่าบริเวณมืด(dark space) ซึ่งความต่างศักย์ตกคร่อม sheath region จะเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [17]

$$V_p - V_f = \frac{k_B T_{ele}}{2e} \ln \left(\frac{m_{ion} T_{ele}}{m_{ele} T_{ion}} \right) \quad (2.9)$$

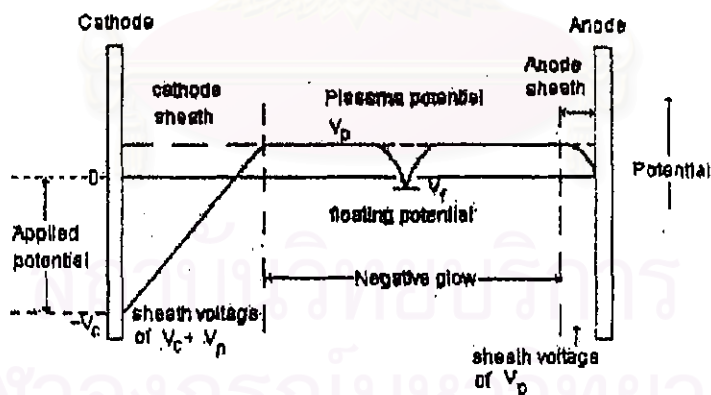
เมื่อ T_{ele} และ T_{ion} เป็นอุณหภูมิของอิเล็กตรอนและไอออนบวกตามลำดับ

m_{ele} และ m_{ion} เป็นมวลของอิเล็กตรอนและไอออนบวกตามลำดับ

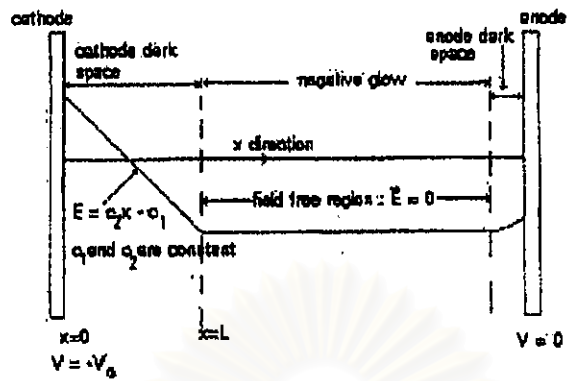
สำหรับตัวอย่าง floating potential ที่เกิดขึ้นบนผิวที่ไม่เชื่อมต่อทางไฟฟ้าที่วางสัมผัสกับพลาสมา เช่น วัสดุรองรับที่เป็นฉนวนซึ่งนำไปวางบนขั้วคาโทดของระบบสปัตเตอร์ ซึ่งจะช่วยลดการชนของอิเล็กตรอนเร็วจากคาโทด แต่จะเร่งไอออนบวกจากบริเวณตัวพลาสมา(bulk plasma)ให้ชนวัสดุรองรับด้วยพลังงานจลน์อันเกิดจากความต่างศักย์ตกคร่อม sheath region โดยปกติจะมีค่าประมาณ 1-10 โวลต์ จากความรู้เรื่อง sheath region เราสามารถนำไปอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในสภาพโกลดิสซาร์จ โดยพิจารณาแบบอย่างง่ายในระบบดีซีโกลดิสซาร์จดังรูป 2.5 จะเห็นว่ามีองค์ประกอบหลัก 3 ส่วนใหญ่คือ cathode dark space , negative glow และ anode dark space นอกจากนี้ยังมีบริเวณที่มีการเรืองแสงบางบริเวณผิวของขั้วคาโทดและคาโนดอันเกิดจากการที่ไอออนบวกถูกทำให้เป็นกลาง (neutralized) โดยกระบวนการรวมตัว(recombination)กับอิเล็กตรอนซึ่งจะช่วยลดการสะสมตัวของไอออนบวกบริเวณผิวของขั้วทั้งสอง ในบริเวณ cathode dark space ซึ่งเป็นแถบมืดด้านที่อยู่ใกล้กับขั้วคาโทด บริเวณนี้เป็นบริเวณที่ความต่างศักย์ที่ป้อนให้กับระบบมาตกคร่อมเกือบทั้งหมดและยังเป็นบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าความเข้มสูงดังรูป 2.6-2.7 สนามไฟฟ้าบริเวณนี้เนื่องจากไอออนบวกในบริเวณ negative glow จะมีพลังงานจลน์เฉลี่ยใกล้เคียงกับระดับพลังงานจลน์เฉลี่ยของอะตอมแก๊สที่เป็นกลาง ดังนั้นถ้าไม่มีการชนกับอนุภาคอื่นขณะเคลื่อนที่อยู่ใน cathode dark space ไอออนบวกจะชนคาโทดด้วยพลังงานจลน์เท่ากับพลังงานที่ได้รับจากศักย์ไฟฟ้าตกคร่อม cathode dark space สำหรับอิเล็กตรอนหยุดนิ่งที่หลุดจากคาโทด ในขณะที่หลุดถ้าถือว่ามีความเร็วพลังงานจลน์น้อยมากและระหว่างเคลื่อนที่ผ่าน cathode dark space ไม่มีการชนกับ อนุภาคอื่นก็จะเข้าสู่บริเวณ negative glow ด้วยพลังงานจลน์ที่ถูกเร่งโดยศักย์ไฟฟ้าตกคร่อม cathode dark space อิเล็กตรอนหยุดนิ่งก็จะกลายเป็นอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง (fast electron) ซึ่งจะเป็นตัวรับพลังงานจากภายนอกส่งให้กับระบบ



รูปที่ 2.5 องค์ประกอบของดีซีโกลวดิสชาร์จขณะที่สามารถรักษาสภาพการดีสชาร์จได้เอง (บริเวณที่เข้มแสดงความหนาแน่นการโกลว)[18]



รูปที่ 2.6 ศักย์ไฟฟ้าในส่วนต่างๆของดีซีโกลวดิสชาร์จ รวมทั้งระดับของ floating potential บนผิวที่ไม่เชื่อมต่อทางไฟฟ้าที่วางสัมผัสกับสภาพโกลวดิสชาร์จ



รูปที่ 2.7 ลักษณะสนามไฟฟ้าในสภาพดิสชาร์จ

ในปี ค.ศ. 1982 Wastwood และคณะ[19] ได้ทำการคำนวณหาสมการความหนาแน่นกระแสในบริเวณ cathode dark space โดยพิจารณาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออนบวกที่ถูกเร่งผ่าน cathode dark space โดยตรง เมื่อให้ขั้วคาโทดมีศักย์ไฟฟ้า $-V_0$ และสนามไฟฟ้าได้กำหนดให้มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับระยะทางจาก cathode dark space ดังรูป 2.7 โดยที่คาโทดอยู่ที่ตำแหน่ง $x=0$ ความยาวของ cathode dark space เท่ากับ L จะได้สมการความหนาแน่นกระแสการดิสชาร์จดังนี้

$$J = \beta(V - V_0)^{\frac{3}{2}} \quad (2.10)$$

เมื่อ V คือ ความต่างศักย์ที่ป้อนจากภายนอก

V_0 คือ ความต่างศักย์น้อยที่สุดที่ยังเกิดการดิสชาร์จ และ

$$\beta = (1 + \gamma) \frac{2\epsilon_0 K}{L^2} \left(\frac{2e}{m_{ion}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.11)$$

เมื่อ γ คือ สัมประสิทธิ์การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิของคาโทด

m_{ion} คือ มวลของไอออนบวก

K คือ ค่าคงที่ขึ้นกับ cathode dark space (L) และระยะเฉลี่ยของไอออนบวก(l) ซึ่งทั้ง L และ l ขึ้นกับความดันแก๊ส จะมีค่าเป็น 1 เมื่อความดันแก๊สต่ำมากๆ

และมีค่าเป็น $\left(\pi \frac{l}{2L}\right)^2$ ที่ความดันสูงกว่า 40 mTorr

ในบริเวณ negative glow เป็นบริเวณที่ครอบคลุมปริมาตรส่วนใหญ่ของโครงสร้างทั้งหมด บริเวณนี้จะเห็นการเรืองแสงชัดเจน แต่จะเข้มมากที่สุดบริเวณที่ใกล้กับ cathode dark space และจะจางลงเมื่อใกล้กับ anode dark space บริเวณนี้ถือว่าเป็นพลาสมาอุณหภูมิต่ำที่มีสนามไฟฟ้าภายในเป็นศูนย์ ศักย์ไฟฟ้าภายใน (V_p) เท่ากันตลอดและมีค่าเป็นบวกน้อยๆ การไอออไนส์ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นบริเวณนี้ ในบริเวณ anode dark space บริเวณนี้จะมีศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์เมื่อเทียบกับบริเวณ negative glow (V_p) สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณนี้น้อยมากเมื่อเทียบกับบริเวณ cathode dark space จึงถือว่ามีสนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ในบริเวณนี้

3. ปัจจัยที่มีผลต่อการรักษาสภาพโกลวดิสชาร์จ

เพื่อที่จะให้กระบวนการโกลวดิสชาร์จที่เกิดขึ้นดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง จำนวนอิเล็กตรอนและไอออนบวกที่เกิดขึ้นในระบบเป็นสิ่งสำคัญต่อการที่จะทำให้ระบบสามารถรักษาสภาพการโกลวดิสชาร์จได้เอง ปัจจัยที่จะก่อให้เกิดกระบวนการเหล่านี้แบ่งเป็น

3.1) การให้พลังงานที่มากพอแก่ระบบอย่างต่อเนื่อง

เนื่องจากกระบวนการผลิตไอออนบวกและการสูญเสียพลังงานของระบบให้กับสิ่งแวดล้อม ทั้งในรูปของแสงและความร้อนจำเป็นต้องอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากภายนอกให้กับระบบ ซึ่งจะอยู่ในรูปของสนามไฟฟ้าในบริเวณ cathode dark space เพื่อที่จะใช้เร่งอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดจากการชนผิวด้านแคโทดของไอออนบวกให้เข้าสู่บริเวณ negative glow การเคลื่อนที่ผ่าน cathode dark space จะทำให้อิเล็กตรอนทุติยภูมิกลายเป็นอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง (fast electron) และเป็นตัวนำเอาพลังงานจากแหล่งภายนอกเข้าสู่แหล่งกำเนิดการไอออไนส์หลัก (main source of ionization) [20] ซึ่งจะอยู่ในบริเวณ negative glow

ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าอิเล็กตรอนพลังงานสูงเหล่านี้เป็นแหล่งพลังงานนำเข้าหลัก(main source of input power) [21]ให้กับสภาพโกลดิสซาร์จ

3.2) กระบวนการชน

ในสภาพโกลดิสซาร์จกระบวนการชนเป็นปัจจัยสำคัญที่จะทำให้กระบวนการโกลวเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากกระบวนการชนจะเป็นปัจจัยสำคัญในการผลิตอิเล็กตรอนและไอออนบวกให้กับระบบกระบวนการชนในสภาพโกลดิสซาร์จออกเป็นสองส่วนคือ

3.2.1) กระบวนการชนกันเองระหว่างอนุภาค

ในสภาพโกลดิสซาร์จจะประกอบด้วยอนุภาคหลักๆสามกลุ่มคือ อิเล็กตรอน ไอออนบวก และอะตอมของแก๊สที่เป็นกลาง กลไกการชนของอนุภาคเหล่านี้สามารถอธิบายได้โดยอาศัยแบบจำลองการชนของลูกบิลเลียด[22] โดยแยกการชนออกเป็นสองลักษณะคือ การชนแบบยืดหยุ่น และการชนแบบไม่ยืดหยุ่น ซึ่งจะแตกต่างกันที่การเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายในของอนุภาค การชนแบบยืดหยุ่น เป็นการชนที่มีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะพลังงานจลน์ของอนุภาคเท่านั้น จากแบบจำลองของลูกบิลเลียดเมื่ออนุภาคมวล m_1 วิ่งชนกับอนุภาคมวล m_2 การส่งผ่านพลังงานจลน์จากอนุภาคมวล m_1 ไปยังอนุภาคมวล m_2 จะได้สัดส่วนของพลังงานจลน์ในการชนเป็นไปตามสมการ

$$\frac{E_{k2}}{E_{k1}} = \frac{4m_1m_2}{(m_1+m_2)^2} \cos^2\theta \quad (2.12)$$

เมื่อ m_1 และ E_{k1} คือ มวลและพลังงานจลน์ของอนุภาคที่เข้าชน

m_2 คือ มวลขณะอยู่นิ่งของอนุภาคที่ถูกชน

E_{k2} คือ พลังงานจลน์ของอนุภาคที่ถูกชน ภายหลังการชน

θ คือ มุมระหว่างทิศที่เข้าชนกับแนวต่อศูนย์กลางของอนุภาคทั้งสองขณะชน

เรียกอัตราส่วน $\frac{4m_i m_t}{(m_i + m_t)^2}$ ว่าฟังก์ชันการส่งผ่านพลังงาน (Energy transfer function) มีค่าสูงสุดเมื่อ $m_i = m_t$ และต่ำสุดเมื่อ $m_i \ll m_t$ จะเห็นว่าการชนแบบนี้จะส่งผ่านพลังงานจลน์ได้ดีเมื่ออนุภาคมีมวลใกล้เคียงกันเช่น ไอออนบวกกับอะตอมที่เป็นกลาง หรือระหว่างอะตอมด้วยกันเอง สำหรับการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับไอออนบวกหรืออะตอมแก๊สที่เป็นกลางความแตกต่างระหว่างมวลของอิเล็กตรอนกับอนุภาคทั้งสองแตกต่างกันมาก การส่งผ่านพลังงานจลน์จะเกิดขึ้นน้อยมากอิเล็กตรอนจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วเลย แต่จะเปลี่ยนเฉพาะทิศทางเท่านั้นในกรณีนี้ที่ชนกับไอออนบวก อันเกิดจาก อิทธิพลของสนามไฟฟ้าของไอออนบวก อนุภาคที่ถูกชนจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด

การชนแบบไม่ยืดหยุ่น จะมีการเพิ่มเงื่อนไซในรูปของการเปลี่ยนแปลงพลังงาน ภายในของอนุภาคเข้าในสมการเงื่อนไซการอนุรักษ์พลังงาน จากแบบจำลองลูกบิลเลียดจะเห็นว่าอนุภาค ที่เข้าชนมีการส่งผ่านพลังงานจลน์ไปเป็นพลังงานภายในของอนุภาคที่ถูกชน มีสัดส่วนดังสมการ

$$\frac{\Delta U}{E_{ki}} = \frac{m_t}{(m_i + m_t)} \cos^2 \theta \quad (2.13)$$

เมื่อ ΔU คือพลังงานภายในที่เพิ่มขึ้นของอนุภาคที่ถูกชน และสัดส่วนพลังงานจลน์ของการชนคือ

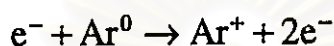
$$\frac{E_{kt}}{E_{ki}} = \frac{m_t u_i^2}{m_i} \left[\frac{2m_t u_t}{\frac{m_t}{m_i} (m_i + m_t) u_i^2 + 2\Delta U} \right]^2 \cos^2 \theta \quad (2.14)$$

เมื่อ u_t คืออัตราเร็วของอนุภาคที่ถูกชนภายหลังการชน กรณีที่ $m_i = m_t$ อัตราส่วน $\frac{\Delta U}{E_{ki}}$ จะเท่ากับ $(\cos^2 \theta)/2$ และกรณีที่ $m_i \ll m_t$ อัตราส่วน $\frac{\Delta U}{E_{ki}}$ จะเท่ากับ $\cos^2 \theta$ เมื่อ $\cos \theta$ มีค่าเป็น 1 ทั้งสองกรณีจะมีค่าสูงสุดที่ 1/2 และ 1 ตามลำดับ ในกรณีที่มวลทั้งสองห่างกันมากการส่งผ่านพลังงานจะกระทำได้ดีเช่น กรณีอิเล็กตรอนกับ ไอออนบวก หรือกับอะตอมที่เป็นกลาง และยังเกิดขึ้นได้กับกรณีที่มีมวลใกล้เคียงกัน

เมื่อพิจารณาสมการที่ 2.14 อัตราส่วน $\frac{E_{kt}}{E_{ki}}$ จะให้ค่าสูงสุดเมื่อ $\Delta U = 0$, $\cos \theta = 1$ และ $m_i = m_t$ และจะมีค่าน้อยมากเมื่อ $m_i \ll m_t$ จะเห็นว่ากรณีที่มีบทบาทสำคัญในสภาพ โกลดติสซาร์จได้แก่ การชนแบบยืดหยุ่นของไอออนบวกกับอะตอมที่เป็นกลางหรือระหว่างอะตอมด้วยกันจะมี ผลทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานจลน์ระหว่างอนุภาค ซึ่งจะมีผลต่อการกระจายพลังงานสำหรับอนุภาค

เหล่านี้ สำหรับการชนแบบไม่ยืดหยุ่นระหว่างไอออนบวกกับอะตอมของแก๊สที่เป็นกลางจะมีผลทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนเรียกว่าการชนแบบ *symetric charge transfer* ส่วนการชนแบบไม่ยืดหยุ่นของอิเล็กตรอนกับไอออนบวกหรืออะตอมที่เป็นกลางจะเป็นการชนที่มีบทบาทสำคัญต่อการเกิดกระบวนการต่างๆ ในสภาพโพลติสซาร์จเช่น

- กระบวนการไอออไนซ์(Ionization process) เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและไอออนบวกในสภาพโพลติสซาร์จซึ่งเป็นกระบวนการที่สำคัญต่อการรักษาสภาพติสซาร์จ มีรูปแบบดังนี้

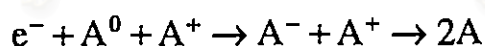


เมื่ออะตอมแก๊ส(Ar^0)ถูกชนโดยอิเล็กตรอน(e^-)ที่มีพลังงานจลน์มากกว่าระดับพลังงานไอออไนซ์ของอะตอมแก๊ส จะทำให้อะตอมแก๊สถูกไอออไนซ์กลายเป็นไอออนบวก(Ar^+) และอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นอีก 1 ตัว อิเล็กตรอนเหล่านี้จะมีพลังงานจลน์สูงพอที่ทำให้กระบวนการไอออไนซ์เกิดขึ้นอีก ทำให้เกิดประจุมากพอที่จะรักษาสภาพติสซาร์จได้

- กระบวนการรวมตัว(Recombination process) เป็นกระบวนการย้อนกลับของกระบวนการไอออไนซ์ เกิดจากการที่อิเล็กตรอนรวมตัวกับไอออนบวกได้อะตอมที่เป็นกลางที่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้น

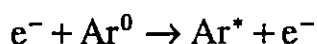


และอีกแบบหนึ่งคือเกิดจากการที่อิเล็กตรอนรวมตัวกับอะตอมที่เป็นกลางเกิดเป็นไอออนลบ แล้วจึงไปชนกับไอออนบวกและถ่ายเทอิเล็กตรอนให้กับไอออนบวก ทำให้ไอออนบวกและไอออนลบเป็นกลาง เรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ว่า 2 - stage recombination

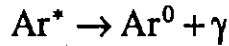


กระบวนการรวมตัวทั้งสองกระบวนการนี้จะทำให้มีการลดหรือจำกัดคู่อิเล็กตรอนและไอออนบวกสภาพโพลติสซาร์จ

- กระบวนการกระตุ้น(Excitation process) เป็นกระบวนการที่อะตอมที่เป็นกลางถูกชนโดยอิเล็กตรอน แต่พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนไม่สูงพอที่จะทำให้อะตอมของแก๊สที่เป็นกลางถูกไอออไนซ์ ทำได้เพียงกระตุ้นให้อิเล็กตรอนในอะตอมแก๊สเปลี่ยนระดับพลังงานไปอยู่ในชั้นที่สูงขึ้น ทำให้อะตอมอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น



- กระบวนการผ่อนคลาย(Relaxation process) เป็นกระบวนการที่อะตอมซึ่งอยู่ในสถานะถูกกระตุ้นพยายามทำให้อิเล็กตรอนที่ถูกยกระดับพลังงานขึ้นกลับลงสู่สถานะพลังงานเดิม โดยปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอน



กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นทันทีทันใดหลังจากกระบวนการรวมตัวหรือกระบวนการกระตุ้น โดยกระบวนการนี้จะทำให้เห็นการเรืองแสงขึ้นในบริเวณที่มีการโกลว ความถี่ของแสงขึ้นกับระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่ลดลงมาและขึ้นกับชนิดของแก๊ส

นอกจากนี้ยังมีกระบวนการชนกันระหว่างอนุภาคในสภาพโกลวดิสชาร์จ ซึ่งจะไม่กล่าวถึงรายละเอียดเช่น[23]

- Dissociation, $e^- + \text{CF}_4^0 \rightarrow e^- + \text{CF}_3^* + \text{F}^*$
- Dissociative Ionization, $e^- + \text{CF}_4^0 \rightarrow 2e^- + \text{CF}_3^+ + \text{F}^*$
- Electron Attachment, $e^- + \text{SF}_6^0 \rightarrow \text{SF}_6^-$
- Dissociative Attachment, $e^- + \text{N}_2^0 \rightarrow \text{N}^+ + \text{N}^- + e^-$
- Symmetrical charge Transfer, $\text{A} + \text{A}^+ \rightarrow \text{A}^+ + \text{A}$
- Asymmetrical charge Transfer, $\text{A} + \text{B}^+ \rightarrow \text{A}^+ + \text{E}$
- Metastable-Neutral, $\text{A}^* + \text{B} \rightarrow \text{B}^+ \text{A} + e^-$
- Metastable-Metastable Ionization,

$$\text{A}^* + \text{A}^* \rightarrow \text{A} + \text{A}^+ + e^-$$

สำหรับ 4 กระบวนการแรกสามารถที่จะนำไปใช้อธิบายภาพโดยรวมของสภาพโกลวดิสชาร์จได้ และสำหรับ 8 กระบวนการหลังเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นสภาพโกลวดิสชาร์จแบบอื่นๆ เช่นที่เกิดขึ้นในระบบ reactive sputtering, plasma etching, PECVD เป็นต้น

3.2.2) การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิของผิวคาโธด

เมื่อไอออนบวกวิ่งชนผิวคาโธดจะทำให้เกิดปรากฏการณ์หลายอย่างแต่กระบวนการหนึ่งที่สำคัญต่อการรักษาสภาพการโกลวคือ การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ เพราะอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะเป็นตัวรับพลังงานไฟฟ้าจากภายนอกแล้วป้อนให้กับระบบ ทั้งเป็นตัวเพิ่มคู่อิเล็กตรอนและไอออนบวกให้กับสภาพโกลวดิสชาร์จ และเป็นตัวเริ่มกระบวนการไอออนไนซ์ ตัวที่มีบทบาทในการกำหนดลักษณะของกระแสและความต่างศักย์ในสภาพโกลวดิสชาร์จก็คือ สัมประสิทธิ์การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิจากผิวคาโธด(จำนวนอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากผิวคาโธดต่อการชนของไอออนบวกหนึ่งครั้ง : γ) ปัจจัยที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิมีดังนี้

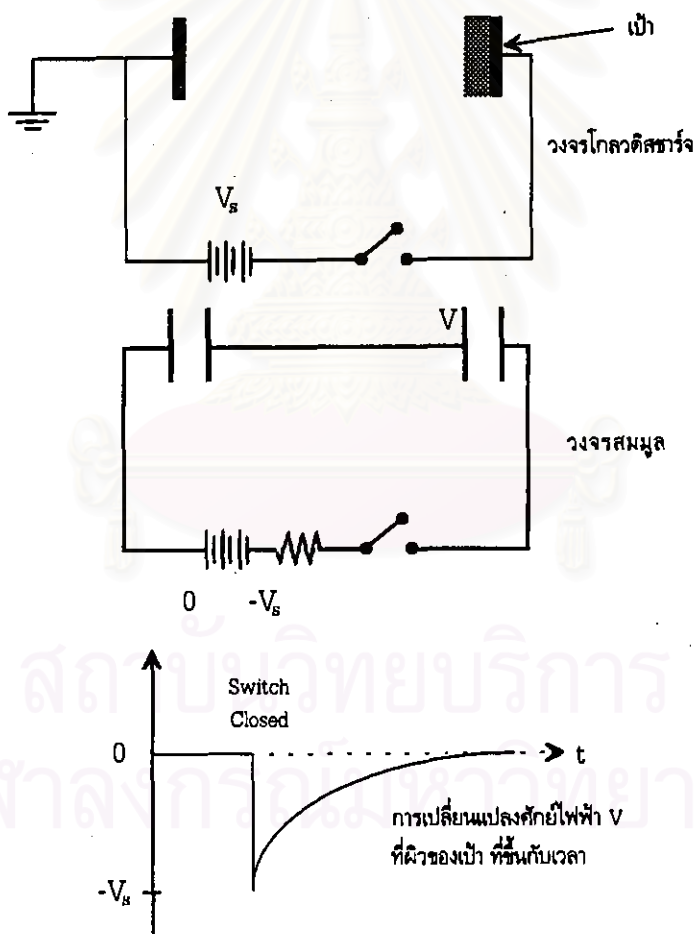
- ชนิดของคาโธดที่ถูกชน
 - ชนิดและพลังงานของไอออนบวก
 - สภาพ และ ระนาบของผิวหน้า
 - ชนิดของบรรยากาศที่ปกคลุมผิวหน้า การลดลงของ γ เกิดจากชั้นเดี่ยว

(monolayer)ของแก๊สที่ถูกปกคลุมผิวหน้าคาโธด

- อิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดขึ้นจากการชนของไอออนบวกจะมีพลังงานไม่สูงมากนัก ขึ้นกับชนิดของไอออนบวกมากกว่าพลังงานของไอออนบวก

อาร์เอฟโกลวดิสชาร์จ

จากกรณีศึกษาโกลวดิสชาร์จ ถ้าใช้ขั้วคาโธดที่เป็นฉนวน(เป่า)แทนขั้วคาโธดที่เป็นโลหะ โดยจะเห็นว่าสามารถเขียนแทนด้วยวงจรไฟฟ้าสมมูล(equivalent circuit)ดังรูป 2.8 บริเวณขั้วฉนวนกับพลาสติกจะถูกแทนด้วยตัวเก็บประจุในวงจร ซึ่งค่าความจุคือจำนวนประจุที่เก็บต่อความต่างศักย์ตกคร่อมระหว่างแผ่นตัวเก็บประจุ($C=Q/V$) ในขณะเริ่มต้นตัวเก็บประจุทั้งสองยังไม่มีประจุอยู่ภายใน ความต่างศักย์เป็นศูนย์

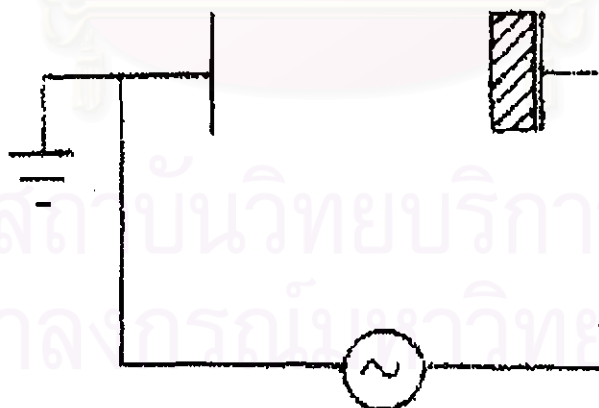


รูปที่ 2.8 การสะสมประจุของเป่าที่เป็นฉนวน

เมื่อเชื่อมวงจร แหล่งจ่ายไฟจะเริ่มป้อนความต่างศักย์(V_p)ให้กับระบบกระบวนการโกลวดิสชาร์จก็จะเริ่มขึ้น บริเวณเป้าก็จะถูกชนโดยไอออนบวกและเริ่มเป็นบวกเพิ่มขึ้น เพราะเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนในการทำให้ไอออนเป็นกลางบริเวณผิวของเป้าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวคาโทดจะเพิ่มขึ้นจาก $-V_p$ ไปสู่ 0 ถ้ากระแสที่เข้าสู่เป้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับศักย์ไฟฟ้าแล้วการเพิ่มของศักย์ไฟฟ้าจะเป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียล สุดท้ายกระบวนการโกลวดิสชาร์จก็จะหยุดลง

1. กลไกการเกิด[24]

การแก้ปัญหาการหยุดลงของการโกลวกระทำได้โดยใช้ไฟกระเสลับในการขับเคลื่อนสภาพโกลวดิสชาร์จ แสดงดังรูปที่ 2.9 ไอออนบวกจะถูกเร่งเข้าชนเป้าด้วยศักย์ไฟฟ้าที่เป็นบวกในครึ่งรอบคลื่นแรก และจะถูกทำให้เป็นลบโดยการชนของอิเล็กตรอนในคลื่นครึ่งรอบหลัง กรณีที่ใช้ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ความถี่ยานี้ไม่มีผลต่อการทำให้เป้ามักมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบได้ เพราะเมื่อไอออนบวกชนเป้าจะใช้เวลาน้อยมากที่ทำให้เป้าถูกชาร์จให้เป็นบวก หากใช้ความถี่ที่สูงเกินไป อิเล็กตรอนก็จะไม่ตอบสนองต่อศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป ทำให้ไม่สามารถทำให้เป้ามักมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบได้ ความถี่ที่เหมาะสมในการขับเคลื่อนสภาพโกลวดิสชาร์จจะอยู่ในช่วงความถี่วิทยุ(radio frequency:RF) 1-100 เมกะเฮิร์ตซ์ การใช้งานจริงจะใช้ที่ความถี่ 13.56 เมกะเฮิร์ตซ์ เพื่อให้รับกวนระบบการสื่อสารภายนอก[25]

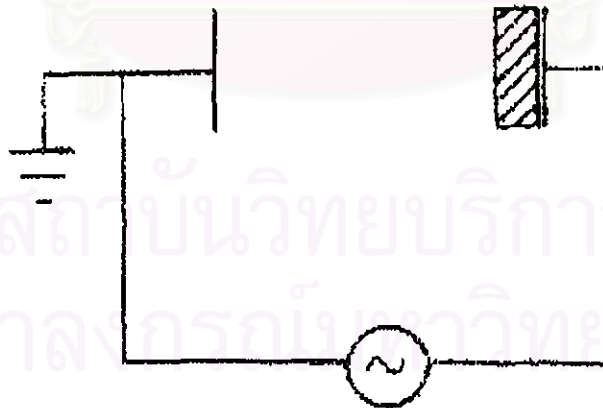


รูปที่ 2.9 การป้อนแรงดันไฟกระเสลับให้กับสภาพโกลวดิสชาร์จ

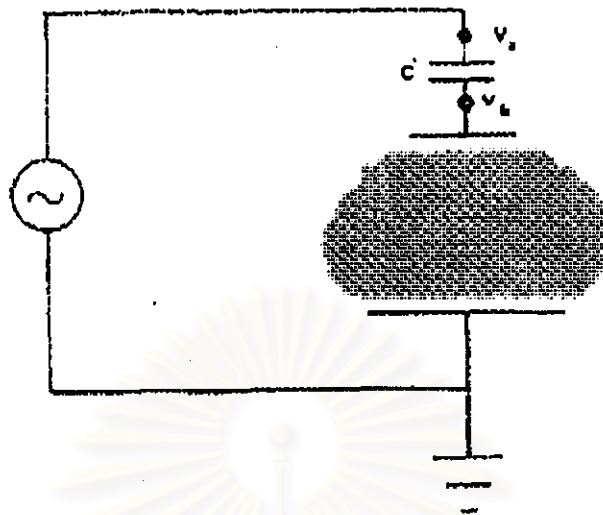
เมื่อเชื่อมวงจร แหล่งจ่ายไฟจะเริ่มป้อนความต่างศักย์(V_0)ให้กับระบบกระบวนการโกลดิสซาร์จก็
จะเริ่มขึ้น บริเวณเป้าก็จะถูกชนโดยไอออนบวกและเริ่มเป็นบวกเพิ่มขึ้น เพราะเกิดการสูญเสีย
อิเล็กตรอน ในการทำให้ไอออนเป็นกลางบริเวณผิวของเป้าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวคาโทดจะเพิ่มขึ้นจาก $-V_0$ ไปสู่ 0
ถ้ากระแสที่เข้าสู่เป้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับศักย์ไฟฟ้าแล้วการเพิ่มของศักย์ไฟฟ้าจะเป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียล
สุดท้ายกระบวนการโกลดิสซาร์จก็จะหยุดลง

1. กลไกการเกิด[24]

การแก้ปัญหาการหยุดลงของการโกลดิสซาร์จทำได้โดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับในการขับเคลื่อนสภาพ
โกลดิสซาร์จ แสดงดังรูปที่ 2.9 ไอออนบวกจะถูกเร่งเข้าชนเป้าด้วยศักย์ไฟฟ้าที่เป็นบวกในครึ่งรอบคลื่น
แรก และจะถูกทำให้เป็นลบโดยการชนของอิเล็กตรอนในคลื่นครึ่งรอบหลัง กรณีที่ใช้ความถี่ 50 เฮิรตซ์
ความถี่ย่านนี้ไม่มีผลต่อการทำให้เป้ามียุติศักย์ไฟฟ้าเป็นลบได้ เพราะเมื่อไอออนบวกชนเป้าจะใช้เวลาน้อยมาก
ที่ทำให้เป้าถูกซาร์จให้เป็นบวก หากใช้ความถี่ที่สูงเกินไป อิเล็กตรอนก็จะไม่ตอบสนองต่อศักย์ไฟฟ้าที่
ป้อนเข้าไป ทำให้ไม่สามารถทำให้เป้ามียุติศักย์ไฟฟ้าเป็นลบได้ ความถี่ที่เหมาะสมในการขับเคลื่อนสภาพโกลดิส
ซาร์จจะอยู่ในช่วงความถี่วิทยุ(radio frequency:RF) 1-100 เมกะเฮิรตซ์ การใช้งานจริงจะใช้ที่ความถี่
13.56 เมกะเฮิรตซ์ เพื่อมิให้รบกวนระบบการสื่อสารภายนอก[25]

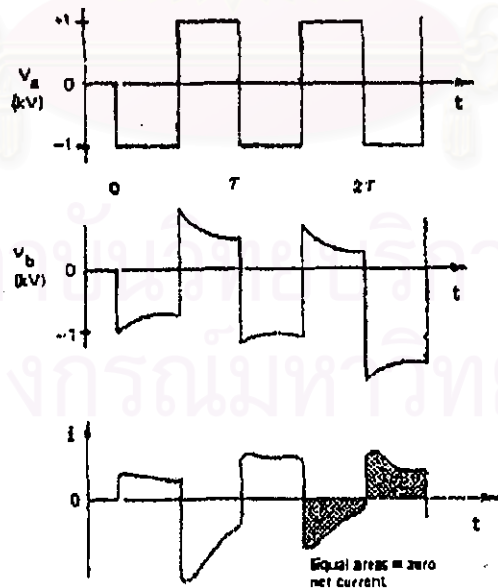


รูปที่ 2.9 การป้อนแรงดันไฟกระแสสลับให้กับสภาพโกลดิสซาร์จ



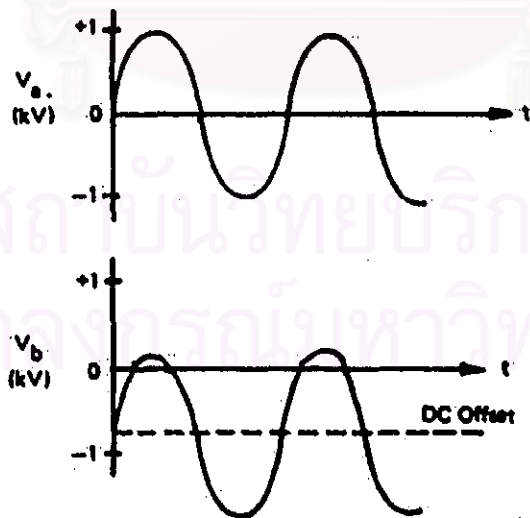
รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลของสภาพโกลดิสซาร์จความถี่สูง

จากรูปที่ 2.9 เขียนวงจรใหม่แสดงดังรูปที่ 2.10 ตัวเก็บประจุ C เป็นตัวเก็บประจุเนื่องมาจาก เป้าคานวนมีการสะสมประจุ หรืออาจมองเป็นตัวเก็บประจุที่วางอยู่หลังเป้าที่เป็นตัวนำ V_c คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ ป้อนให้กับระบบ V_L คือ ศักย์ไฟฟ้าบริเวณเป้า



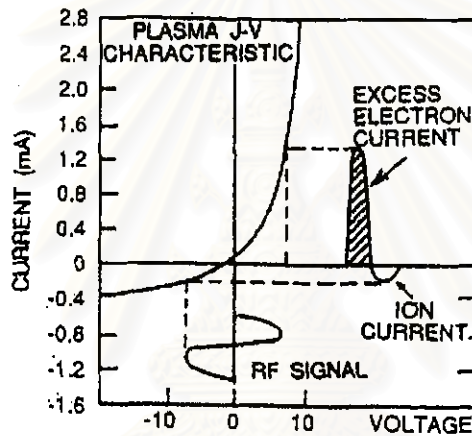
รูปที่ 2.11 รูปคลื่นความต่างศักย์และกระแสของเป้า เมื่อวงจรรูปที่ 2.10 ถูกป้อนด้วยคลื่นศักย์ไฟฟ้ารูปสี่เหลี่ยม

พิจารณารณที่ป้อนคลื่นความต่างศักย์รูปสี่เหลี่ยมเข้าในวงจร ขนาดความต่างศักย์ จากยอดถึงยอด 2 kV แสดงดังรูป 2.11 ในขณะเริ่มต้น ที่เวลา $t=0$ ตัวเก็บประจุอยู่ในสภาพที่ไม่มีประจุ $V_a = -1$ kV V_b จะอยู่ที่ -1 kV เช่นกัน กระบวนการโกลดิสชาร์จจะเริ่มขึ้น เป้าเริ่มที่จะถูกชนโดย ไอออนบวก ตัวเก็บประจุ(เป้า)เริ่มที่จะมีการสะสมประจุทำให้ V_b เริ่มเพิ่มขึ้นสู่ศูนย์ หากสัญญาณคลื่น ความต่างศักย์รูปสี่เหลี่ยม ที่ป้อนเข้าสู่วงจรมีความถี่สูงพอ ซึ่งอยู่ประมาณ 1 เมกะเฮิรตซ์ V_b ก็จะไม่ถูกชาร์จ มากเกินไป ซึ่งจะหยุดที่เวลา $\tau/2$ สมมุติให้หยุดที่ -800 V เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ $V_a = 2$ kV จะทำให้ $V_b = +1200$ V ประจุบวกบนเป้าจะถูกทำให้เป็นกลางโดยอิเล็กตรอน ทำให้ V_b ลดลงสู่ศูนย์ เนื่องจาก อิเล็กตรอนมีสภาพเคลื่อนที่ได้มากกว่าไอออนบวกมาก ทำให้มองเห็นว่า V_b ลดลงอย่างรวดเร็ว สมมุติว่า V_b อยู่ที่ 100 V เมื่อสิ้นสุดรอบคลื่นแรกที่เวลา τ และถ้า V_a กลับเป็น -2 kV อีก V_b จะลดลงไปอยู่ที่ -1900 V และจะเริ่มเพิ่มขึ้นอีก แต่จะไม่มากเพราะปริมาณไอออนบวกมีน้อยมาก เมื่อเริ่มรอบคลื่นใหม่ ประมาณ 2-3 รอบคลื่นอย่างต่อเนื่อง คลื่นศักย์ไฟฟ้า V_b ลดลงเป็นลบ ในขณะนั้นเป้าจะถูกชนด้วยไอออน บวกที่มีพลังงานสูง และถูกทำให้เป็นกลางด้วยกลุ่มอิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่ำ ปริมาณกระแสไอออนบวกและ อิเล็กตรอนแสดงดังรูปที่ 2.11 จะเห็นว่าเมื่อระบบอยู่ในสภาพโกลดิสชาร์จที่คงตัวแล้ว ปริมาณกระแสสุทธิ ของไอออนบวกและอิเล็กตรอนจะเท่ากัน และหักล้างกันเป็นศูนย์ในรอบคลื่นพอดี รูปแบบของคลื่น ศักย์ไฟฟ้ารูปสี่เหลี่ยมแสดงเพียงกลไกที่ทำให้เกิดสภาพโกลดิสชาร์จภายใต้แรงดันไฟกระแสสลับของเป้าที่ เป็นฉนวนเท่านั้น ในทางปฏิบัติจะใช้คลื่นรูปไซน์ป้อนให้กับระบบ รูปแบบสัญญาณที่ได้เมื่อระบบอยู่ใน สถานะคงตัวแสดงในรูปที่ 2.12

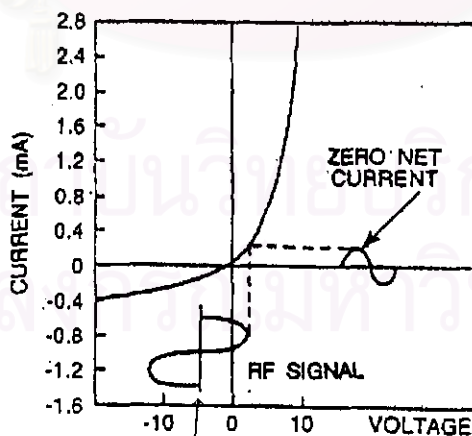


รูปที่ 2.12 รูปคลื่นความต่างศักย์ ที่แหล่งกำเนิด (V_a) และ ที่เป้า (V_b)
เมื่อวงจรรูปที่ 2.10 ถูกป้อนด้วยคลื่นศักย์ไฟฟ้ารูปไซน์

ค่าศักย์ไฟฟ้า V_p จะมีคลื่นสัญญาณที่เป็นรูปไซน์มีค่าเฉลี่ยเป็นลบอยู่ที่ dc offset voltage ลักษณะเช่นนี้เป็นการไบแอสตัวเอง(self-bias) ของเป้า ความต่างศักย์ที่มีการไบแอสตัวเองจะมีค่าอยู่ประมาณครึ่งคลื่นรูปไซน์ที่ป้อนให้กับระบบ จะเห็นว่า V_p จะเป็นบวกในสัดส่วนที่น้อยมากในทุกรอบคลื่น ทำให้ไอออนบวกชนเป้าอย่างต่อเนื่องเหมือนกับกรณีคลื่นรูปสี่เหลี่ยม ผลจากการไบแอสตัวเองของเป้าพิจารณาได้จากเส้นโค้ง I-V ของพลาสมาที่แสดงปริมาณกระแสไอออนบวกและอิเล็กตรอน รูปที่ 2.13(ก) แสดงปริมาณของอิเล็กตรอนส่วนเกินอันเนื่องมาจากการชนเป้าจนวนที่ไม่มีกรไบแอสตัวเองของไอออนบวก อิเล็กตรอนส่วนเกินที่เกิดขึ้นในพลาสมาเกิดจากการที่อิเล็กตรอนมีสภาพเคลื่อนที่ได้มากกว่าไอออนบวก เมื่อเป้ามมีการไบแอสตัวเองทำให้พลาสมาเป็นกลางทางไฟฟ้า(กระแสสุทธิเป็นศูนย์)แสดงดังรูปที่ 2.13(ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.13 การไบแอสตัวเองของเป้าที่เป็นฉนวน

2. วงจรแมชชิง(matching networks)[26]

ในสภาพอาร์เอฟโกลวดิสซาร์จ การป้อนกำลังไฟฟ้าให้กับระบบกระทำไม่ได้เต็มที่ เนื่องจากตัวระบบมีความขัดภายใน(internal impedance) การมีวงจรแมชชิงระหว่างแหล่งกำเนิดอาร์เอฟกับสภาพโกลวดิสซาร์จ แสดงดังรูป 2.14 จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งกำลังให้กับระบบ และยังช่วยป้องกันแหล่งกำเนิดอาร์เอฟ



รูปที่ 2.14 วงจรแมชชิงในระบบอาร์เอฟสปีดเตอร์ริง

เพื่อให้เข้าใจหลักการทำงานของวงจรแมชชิง พิจารณาวงจรไฟฟ้ากระแสตรงแสดงดังรูปที่ 2.15(ก) แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงมีแรงเคลื่อนไฟฟ้า E และความต้านทานภายใน r ต่อกับความต้านทานโหลดปรับค่าได้ R (วงจรแมชชิงและสภาพโกลวดิสซาร์จ) กระแสที่ไหลภายในวงจรเท่ากับ $E/(r+R)$ และ สามารถเขียนกำลังไฟฟ้า P ในรูปของความต้านทานโหลด R ได้ดังนี้

$$P = \frac{E^2 R}{(r+R)^2} \quad (2.15)$$

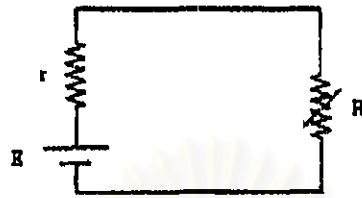
ค่ากำลังไฟฟ้า P แปรตามค่าความต้านทานโหลด R ซึ่งสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด P_{\max} หาได้จากการทำอนุพันธ์อันดับหนึ่ง

$$\frac{dP}{dR} = \frac{E^2(r+R)^2 - 2(r+R)E^2R}{(r+R)^2} \quad (2.16)$$

เมื่ออนุพันธ์อันดับหนึ่งเป็นศูนย์ ได้ค่าของ $R=r$ ดังนั้นวงจรจะสามารถส่งกำลังได้สูงสุดเมื่อความต้านทานภายในแหล่งกำเนิดเท่ากับ ความต้านทานโหลด

ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับเทียบกับ ทฤษฎีการส่งกำลังสูงสุดของวงจรไฟฟ้ากระแสตรง ถ้าวงจรรูปที่ 2.15(ข) แหล่งกำเนิดมีความขัดภายใน(ความขัดขาออก) $a+jb$ โอห์ม ในทำนองเดียวกันจะได้

ความขัดโหด Z เป็น $a-jb$ โอห์ม (มีค่าเท่ากับสังยุคของความขัดภายใน) ในการส่งกำลังสูงสุด สังยุคของความขัดเป็นตัวกำหนดความต้านทานสุทธิ ซึ่งจะเท่ากับแหล่งกำเนิดเช่นเดียวกับกรณีไฟฟ้ากระแสตรง



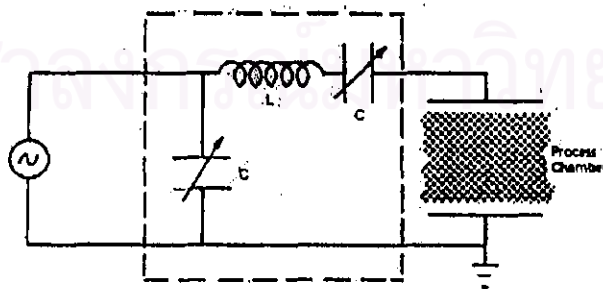
(ก)



(ข)

รูปที่ 2.15 (ก) วงจรสมมูลไฟฟ้ากระแสตรง (ข) วงจรสมมูลอาร์เอฟของรูปที่ 2.15

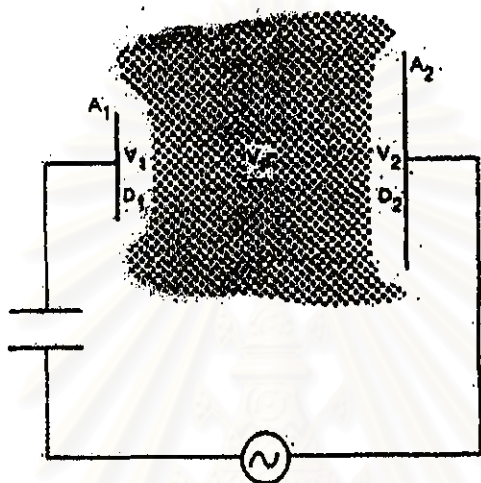
เพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้มีกระแสอาร์เอฟไหลในวงจรมากเกินไป แหล่งกำเนิดจะถูกออกแบบให้มีใช้งานกับความต้านทานโหลด 50 โอห์ม หากคิดว่าความขัดของโหลดเท่ากับความขัดขาออกของแหล่งกำเนิด คำว่า โหลด ในที่นี้คือ สภาพติสซาร์จรวมกับวงจรแมชซึ่งปรับค่าได้ ทั้งสองส่วนจะทำงานสัมพันธ์กัน วงจรแมชซึ่งถูกวางไว้ใกล้กับสภาพติสซาร์จ เพื่อลดการสูญเสียกำลังโดยทำให้เกิดการไหลของกระแสปริมาณมากระหว่างบริเวณทั้งสอง วงจรแมชซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 วงจรอาร์เอฟแมชซึ่ง

3. การกระจายความต่างศักย์ในอาร์เอฟโกลวดิสชาร์จ(27)

พิจารณาระบบประกอบด้วยขั้วสองขั้วมีพื้นที่ A_1 และ A_2 มีความต่างศักย์ตกคร่อม และ ความหนา sheath เป็น V_1 และ V_2 , D_1 และ D_2 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การกระจายความต่างศักย์ในสภาพอาร์เอฟโกลวดิสชาร์จ

ปริมาณความหนาแน่นกระแสของไอออนบวกมวล m_1 ที่เคลื่อนผ่านบริเวณแถบมืดเข้าสู่ขั้วไฟฟ้า เขียนได้ดังสมการ

$$J = \frac{KV^{\frac{3}{2}}}{m^{\frac{1}{2}}D^2} \quad (2.17)$$

K คือ ค่าคงที่

เมื่อความหนาแน่นกระแสของไอออนบวกที่วิ่งเข้าหาขั้วไฟฟ้าทั้งสองมีปริมาณเท่ากัน

$$\frac{V_1^{\frac{3}{2}}}{D_1^2} = \frac{V_2^{\frac{3}{2}}}{D_2^2} \quad (2.18)$$

ค่าความจุของบริเวณแถบมีดเป็นปฏิภาคโดยตรงกับพื้นที่ของขั้วอิเล็กโทรด และเป็นปฏิภาคผกผันกับความหนาของแถบมีด เขียนได้เป็น

$$C \propto \frac{A}{D} \quad (2.19)$$

ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าอาร์เอพกับความจุ ระหว่างสองแถบมีดเป็น

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{C_2}{C_1} \quad (2.20)$$

รวมสมการที่ 2.19 และ 2.20 จะได้

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{A_2 D_1}{D_2 A_1} \quad (2.21)$$

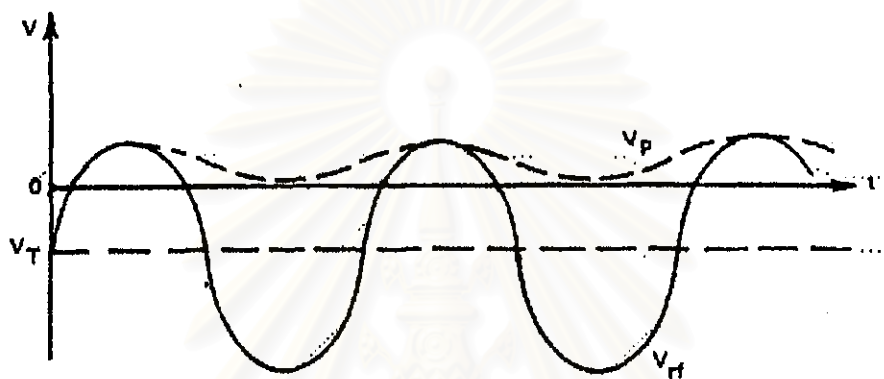
แทนค่าในสมการที่ 2.18 จะได้

$$\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\frac{3}{2}} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 = \left(\frac{A_1 V_1}{A_2 V_2}\right)^2 \quad (2.22)$$

จากสมการที่ 2.22 ขั้วไฟฟ้าขนาดเล็กจะมีความต่างศักย์ตกคร่อม sheath สูงกว่าขั้วไฟฟ้าขนาดใหญ่ กำลังสี่ของสมการแสดงให้เห็นว่าศักย์ไฟฟ้าตกคร่อม sheath ขึ้นกับ ความไม่สมมาตรของระบบ ความต่างศักย์ตกคร่อม sheath สามารถปรับเปลี่ยนได้โดยเปลี่ยนขนาดพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า เช่นในกรณีที่ภาชนะสุญญากาศถูกทำให้ศักย์เป็นศูนย์ก็จะได้ระบบเป็นขั้วไฟฟ้าขนาดใหญ่

ในระบบอาร์เอพโกลาดิสซาร์จแสดงดังรูปที่ 2.14 เมื่อป้อนความต่างศักย์อาร์เอพให้กับระบบ $V_{rf} = V_{rf0} \sin \omega t$ ที่สถานะคงตัว ความต่างศักย์ของเป้าที่มีการไบแอสตัวเอง V_T ความต่างศักย์ของพลาสมาสามารถเขียนได้ดังสมการ[28]

$$\bar{V}_p = \frac{V_{rf0} + V_T}{2} \quad (2.23)$$



รูปที่ 2.18 ความต่างศักย์ของระบบอาร์เอฟ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สภาพโกลดิสซาร์จภายใต้สนามแม่เหล็ก

การเกิดสภาพโกลดิสซาร์จในสภาพความดันต่ำ จำเป็นต้องใช้ความต่างศักย์ในการดิสซาร์จสูงแต่ให้กระแสดิสซาร์จต่ำ ลักษณะเช่นนี้เป็นข้อด้อยในการนำไปใช้งานในระบบสปีดเตอริง คือจะให้อัตราการเคลือบที่ต่ำ เนื่องจากกระแสดิสซาร์จต่ำทำให้วัสดุรองรับมีอุณหภูมิสูง เนื่องจากการชนของอิเล็กตรอนพลังงานสูง ข้อด้อยที่เกิดขึ้น เกิดจากความดันที่ต่ำทำให้อิเล็กตรอนถูกเร่งไปยังแอโนดโดยมีการชนกับอะตอมอื่นน้อยมาก

การใส่สนามแม่เหล็กในสภาพโกลดิสซาร์จ สามารถเพิ่มการไอออไนซ์อะตอมของแก๊สให้สูงขึ้น และยังทำให้สภาพนำไฟฟ้าของสภาพโกลดิสซาร์จเพิ่มสูงขึ้นอีกด้วย เพราะสนามแม่เหล็กจะทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสภาพโกลดิสซาร์จเปลี่ยนไป สนามแม่เหล็กที่ให้กับสภาพโกลดิสซาร์จแบ่งเป็น

1. สนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับผิวคาโทด

เมื่อใส่สนามแม่เหล็กความเข้มคงที่ขนานกับสนามไฟฟ้าใน cathode dark space อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากคาโทดในทิศตั้งฉากจะถูกแรงกระทำเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กบังคับให้เคลื่อนที่รอบเส้นแรงแม่เหล็ก หากรวมแรงของสนามไฟฟ้าในบริเวณ cathode dark space ที่กระทำกับอิเล็กตรอนด้วยแล้ว อิเล็กตรอนเคลื่อนออกจากคาโทดแบบ helix ที่มีระยะ pitch เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ แสดงดังรูปที่ 2.19(ก) เมื่อเข้าสู่บริเวณ negative glow เป็นบริเวณที่สนามไฟฟ้าเป็นศูนย์อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่เข้าหาแอโนดแบบ helix ที่มีระยะ pitch คงที่ แสดงดังรูปที่ 2.19(ข)

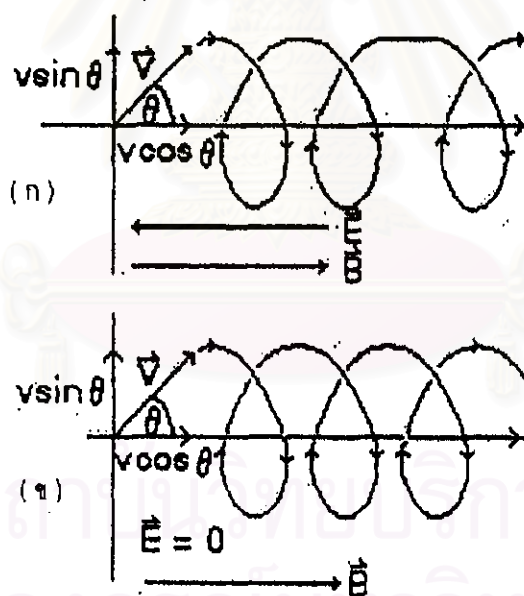
ลักษณะการเคลื่อนที่แบบ helix ทำให้อิเล็กตรอนมีระยะทางเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้มีโอกาที่จะไอออไนซ์อะตอมของแก๊สเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยบังคับอิเล็กตรอนไม่ให้หลุดจากบริเวณดิสซาร์จเป็นการลดการสูญเสียอิเล็กตรอนให้กับภาชนะสุญญากาศ และจำกัดการดิสซาร์จให้อยู่ในบริเวณคาโทดกับแอโนด

2. สนามแม่เหล็กในแนวขนานกับผิวคาโทด

พิจารณาอิเล็กตรอนหลุดจากคาโทดในแนวตั้งฉากสู่บริเวณที่มีสนามแม่เหล็กขนานกับคาโทด เมื่อไม่มีสนามไฟฟ้าในบริเวณคาโทด อิเล็กตรอนจะถูกแรงกระทำจากสนามแม่เหล็กบังคับให้เคลื่อนที่เป็นวงกลม ย้อนกลับสู่คาโทดอีก เมื่อสะท้อนกลับก็จะเริ่มเคลื่อนที่ในลักษณะเดิมอีก การเคลื่อนที่ทั้งหมดเป็นรูปครึ่งวงกลมเลื่อนไปบนผิวคาโทดในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและความเร็วเริ่มต้นของอิเล็กตรอนแสดงดังรูปที่ 2.20(ก)

ภายใต้สภาวะเดียวกันหากพิจารณาแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าในบริเวณ cathode dark space ทิศพุ่งเข้าสู่คาโทด แรงดังกล่าวจะเปลี่ยนการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากแบบครึ่งวงกลมเป็นแบบไซคลอยด์ (cycloidal) อิเล็กตรอนจะกระโดด(hop)ไปบนผิวคาโทดในทิศ $\vec{E} \times \vec{B}$ แสดงดังรูปที่ 2.20(ข) ถ้าอิเล็กตรอน หลุดเข้าสู่บริเวณ negative glow ซึ่งเป็นบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ ก็จะเคลื่อนเป็นรูปวงกลมย้อนกลับเข้าสู่บริเวณ cathode dark space ในที่สุด กระบวนการเช่นนี้ทำให้เกิดการกักอิเล็กตรอนบริเวณผิวคาโทด อิเล็กตรอนก็จะสามารถไอออไนซ์อะตอมแก๊สบริเวณนี้มากกว่าบริเวณอื่น และยังทำให้การเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับผิวคาโทดลดลงเป็นผลให้สัดส่วนกระแสอิเล็กตรอนต่อกระแสไอออนบวกลดลงด้วย

ในความเป็นจริง อิเล็กตรอนจะมีการเปลี่ยนทิศหลังจากการชนกับอนุภาคอื่นๆภายในสภาพโกลวดิสชาร์จ ทำให้เกิดการกระโดดข้ามเส้นแรงแม่เหล็กไปยังอีกเส้นหนึ่งที่ห่างจากคาโทดเพิ่มมากขึ้น ด้วยเหตุนี้ อิเล็กตรอนสามารถที่จะลอยเลื่อนตัดสนามแม่เหล็กช้าๆ เข้าสู่ขั้วแอโนด



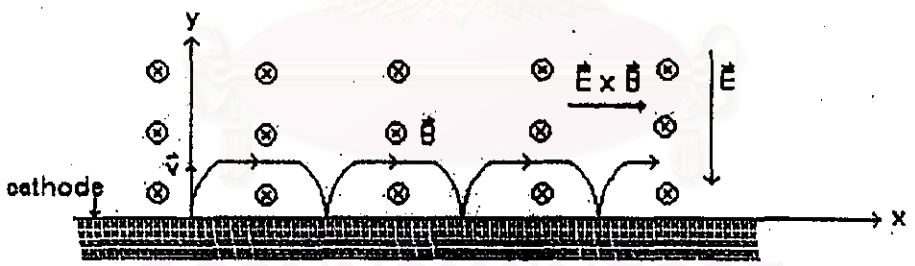
รูปที่ 2.19 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายใต้สนามแม่เหล็กในสภาพโกลวดิสชาร์จ[29]

(ก) บริเวณ cathode dark space

(ข) บริเวณ negative glow



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.20 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายใต้สนามแม่เหล็กที่มีทิศทางเข้าสู่กระดาษ บริเวณผิวหน้าคาโทด (ก) ไม่มีสนามไฟฟ้า (ข) มีสนามไฟฟ้าที่พุ่งเข้าสู่ผิวหน้าคาโทด[30]