

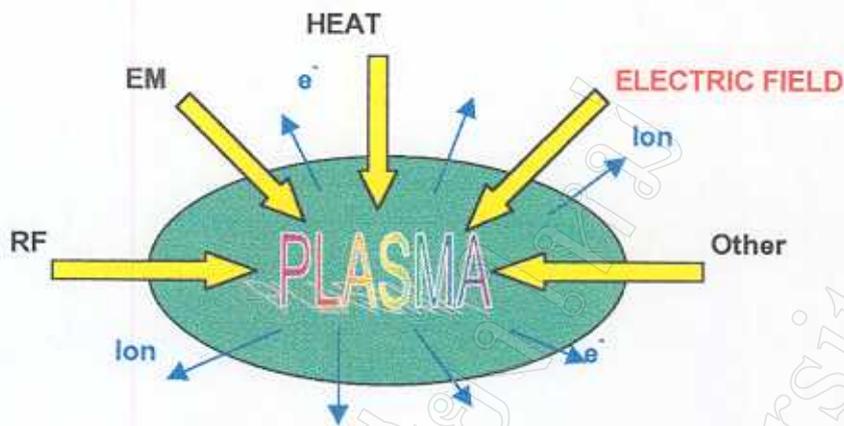
บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 บทนำ

วัตถุประสงค์ของการออกแบบเครื่องกำเนิดไอออน คือ การนำไปประยุกต์ใช้ในเครื่องไอออนอิมพลานเตชัน (Ion Implantation) เพื่อประยุกต์ใช้งานด้านอุตสาหกรรม สำหรับปรับปรุงคุณภาพผิวของวัสดุ ทำให้คุณสมบัติทางกลดีขึ้น เช่น มีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น หรือสามารถทนทานต่อการทำงานที่อุณหภูมิสูงได้ดีขึ้น ทั้งนี้ขึ้นกับไอออนที่ทำการอิมพลานต์เข้าไป การอิมพลานต์ทำให้ขนาดและรูปร่างของวัสดุไม่มีเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากเป็นกระบวนการที่อาศัยหลักการยิงอนุภาคที่มีประจุหรือไอออนที่มีพลังงานสูง ซึ่งเปรียบเสมือน “กระสุนปืน” ปล่อยให้ฝังตัวใต้ผิวของวัสดุ ภายใต้ความดันสุญญากาศ โดยกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้เป็นปฏิกิริยาทางฟิสิกส์ (physical reaction) ซึ่งเป็นวิธีที่ให้ความแม่นยำค่อนข้างสูง สำหรับงานวิจัยนี้อยู่ในช่วงของการบุกเบิกและศึกษาถึงวิธีการให้กำเนิดไอออนหรือการออกแบบให้มีหัวจ่ายพลาสมาขึ้นมาทดสอบใช้งานเบื้องต้น ซึ่งในปัจจุบันพบว่า การให้กำเนิดไอออนสามารถทำได้หลายวิธี ดังรูปที่ 2.1 เช่น

- RF (radio frequency) เป็นกระบวนการที่อาศัยคลื่นวิทยุเป็นตัวกระตุ้นอะตอมของก๊าซให้เกิดการแตกตัว
- EM (electromagnetic wave) เป็นกระบวนการที่อาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นตัวไอออนไนซ์ก๊าซเช่นเดียวกับ RF แต่มีความยาวคลื่นสั้นกว่า เช่น ไมโครเวฟ
- Heat เป็นกระบวนการที่อาศัยความร้อนปลดปล่อยอิเล็กตรอน เพื่อทำการไอออนไนซ์ก๊าซการทำให้อิออนไนซ์เป็นไอออน (ionization)
- ELECTRIC FIELD เป็นกระบวนการที่อาศัยกลไกการปลดปล่อยอิเล็กตรอนด้วยสนามไฟฟ้าแรงสูง (high field electron emission) และเกิดการแตกตัวไปพร้อมๆ กัน

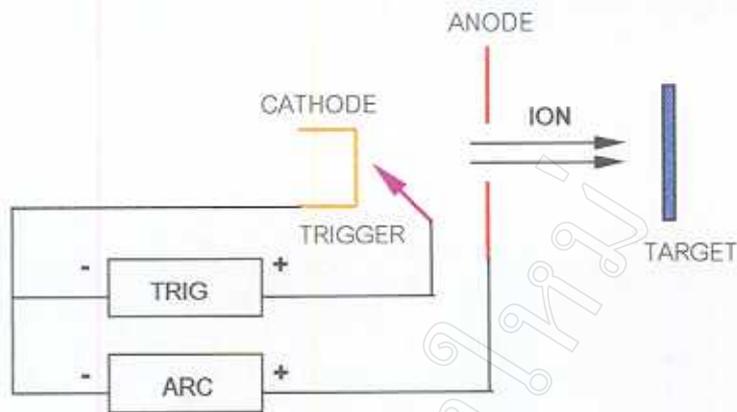


รูปที่ 2.1 แสดงแผนผังกระบวนการต่างๆ ที่ใช้ผลิตพลาสมาโดยการทำให้ก๊าซแตกตัวเป็นไอออนจากแหล่งพลังงานชนิดต่างๆ

เครื่องกำเนิดไอออนชนิดอาร์คในสุญญากาศ หรือ เอ็ม อี วี วี เอ (Metal Vapor Vacuum Arc, MEVVA) เป็นเครื่องกำเนิดไอออนที่ผลิตไอออนโดยอาศัยสนามไฟฟ้า (electric field) ความเข้มสูง ซึ่งเป็นกระบวนการอาร์คของผิวโลหะภายในสุญญากาศ สามารถผลิตกระแสไอออนได้ปริมาณสูงในเรอีนแอมแปร์ และมีค่ากระแสไอออนสูงถึง 5 % ของกระแสอาร์ค จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่หรือจำนวนมากได้ นอกจากนี้ยังมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน แต่สามารถผลิตไอออนของธาตุได้แทบทุกชนิดในตารางธาตุ (ภาคผนวก ก)

2.2 หลักการของเครื่องกำเนิดไอออนชนิดอาร์คในสุญญากาศ (MEVVA)

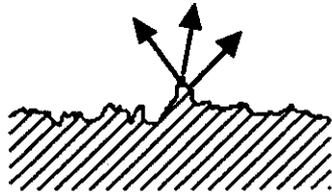
เครื่องกำเนิดไอออนชนิด MEVVA (เอ็ม อี วี วี เอ) เป็นวิธีการอาร์คผิวโลหะภายในสุญญากาศ โดยอาศัยกลไกการปลดปล่อยอิเล็กตรอนด้วยสนามไฟฟ้าแรงสูง (high field electron emission) กับการเกิดไอออนไนซ์ไปพร้อมๆ กัน กล่าวคือ พลาสมาจะถูกสร้างขึ้นที่ผิวแคโทดด้วยการอาร์คจากโวลต์เตจแรงสูงระหว่างขั้วแคโทด (cathode) โลหะบริสุทธิ์ กับขั้วทริกเกอร์อิเล็กโตรด (trigger electrode) ที่เป็นโลหะที่มีจุดแหลมแหลวสูง วางแยกห่างจากกันด้วยระยะเพียงเล็กน้อย แล้วพลาสมาที่เกิดขึ้นบริเวณผิวแคโทดจะเพิ่มจำนวนและความหนาแน่น เมื่อมีกระแสอาร์คเกิดขึ้นระหว่างขั้วแอโนดที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกหรือทรงกรวย กับขั้วแคโทด แล้วเคลื่อนตัวผ่านรูของแอโนดซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1-2 ซม. ไปยังวัสดุเป้า ดังรูปที่ 2.2



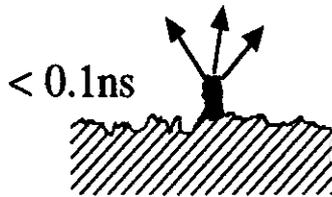
รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างวงจรพื้นฐานของส่วนกำเนิดพลาสมาของเครื่องกำเนิดไอออนชนิด MEVVA พร้อมภาคจ่ายไฟต่างๆ

กระบวนการอาร์คบริเวณผิวแคโทดโลหะให้กลายเป็นพลาสมา เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นภายใต้ความดันประมาณ 10^{-6} - 10^{-8} Torr โดยเริ่มจากการจุดอาร์คด้วยสนามไฟฟ้าแรงสูง (10^6 - 10^7 V/m) แบบพัลส์ระหว่างขั้วทริกเกอร์กับผิวแคโทดที่ไม่เรียบในระดับไมครอนบริเวณพื้นที่เล็กๆ ที่เป็นปลายแหลมยื่นออกมาที่เรียกว่า "ไมโครทิป" (microtip) สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะไปเหนี่ยวนำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนที่ผิวไมโครทิป จนเกิดความร้อนจากการเสียดสีของอิเล็กตรอนกับไมโครทิปอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการขยายตัวแล้วระเหย (ระเบิด) อย่างรุนแรง และไอโลหะที่พุ่งออกมาภายใต้สนามแรงสูงนี้จะเกิดการไอออไนซ์กลายเป็นไอของโลหะ ซึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้เปรียบเสมือนกับมีปรากฏการณ์ฟ้าผ่าลงบนจุดไมโครทิปบนผิวแคโทด และมีการระเบิดในทิศทางพุ่งออกจากผิวแคโทด ดังแสดงในรูปที่ 2.3 แต่เนื่องจากพลาสมาที่ได้จากกระบวนการทริก เกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาอันสั้น (<100 ns) จึงมีการอาศัยสนามไฟฟ้าแรงสูงที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วแคโทดและแอโนดจากเครื่องจ่ายไฟอาร์คช่วยทำให้การอาร์คดำเนินอย่างต่อเนื่องและยาวนานขึ้น โดยพลาสมาที่เกิดจากกระบวนการทริกจะไปเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลในวงจรอาร์คในเรือนหลายร้อยแอมแปร์ จากการไหลของอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนด เป็นผลทำให้พลาสมาที่ได้มีจำนวนและความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและมีช่วงเวลาของการเกิดยาวนานขึ้น (ในเรือน ms) ซึ่งปรากฏการณ์ไอออนไนซ์ที่เกิดขึ้นภายใต้สนามไฟฟ้าแรงสูงทั้งจากการทริกและอาร์คจะเป็นชนิด fully ionize ดังนั้นพลาสมาที่เกิดขึ้นจึงมีลักษณะการเกิดแบบเป็นพัลส์ตามกระแสอาร์คที่มีลักษณะเป็นพัลส์นั่นเอง

จากกระบวนการการเกิดพลาสมาด้วยวิธีอาร์คในสูญญากาศดังกล่าวนี้ พบว่าแนวทางในการออกแบบหัวจ่ายพลาสมาของเครื่องกำเนิดไอออนชนิดเอ็ม อี วี วี เอ จะต้องมีส่วนประกอบหลัก คือ ขั้วทริกเกอร์ ขั้วแคโทด ขั้วทริกเกอร์ ภาคจ่ายไฟอาร์ค และภาคจ่ายไฟทริกเกอร์ ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งงานวิจัยนี้ก็จะเป็นการออกแบบภาคจ่ายไฟทั้งสอง โดยจะกล่าวถึงในหัวข้อเครื่องมือที่ออกแบบขึ้นใช้งาน ต่อไป

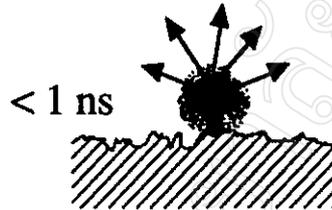


Electron field emission,
heating of microtip, melting



< 0.1 ns

Further heating, isochoric
formation of superfluid, $T = 4-5$ eV,
strongly non-ideal plasma



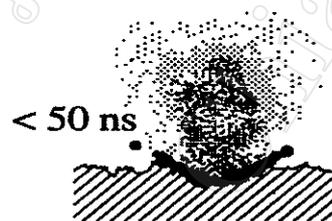
< 1 ns

Expansion under extreme pressure gradient,
pressure $p \approx 10^{12}$ Pa
non-ideal plasma, opaque



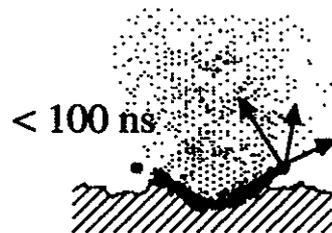
< 10 ns

Further expansion,
freezing of states of ionization,
decrease of T to 1-2 eV



< 50 ns

Expansion continued,
non-equilibrium plasma,
formation of molten pool,
new microtips and droplets



< 100 ns

Ion bombardment,
formation of cathode spot at new location

รูปที่ 2.3 แสดงปรากฏการณ์ที่เกิดบริเวณผิวแคโทดระหว่างกระบวนการทริก

2.3 กระบวนการเคลื่อนที่ของพลาสมาผ่านขดลวดโซลินอยด์¹⁰

การผลิตพลาสมาจากเครื่องกำเนิดไอออนชนิด เอ็ม อี วี วี เอ เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ การให้พลาสมาสูงเมื่อเทียบกับการผลิตพลาสมาจากเครื่องกำเนิดชนิดอื่นๆ และยังสามารถผลิต ไอออนของธาตุแทบทุกชนิดในตารางธาตุได้ นอกจากนี้เครื่องกำเนิดชนิดนี้เป็นเครื่องกำเนิดที่มี โครงสร้างการทำงานที่ไม่ยุ่งยากและซับซ้อนนัก ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น แต่จากกระบวนการจุด อาร์คบริเวณผิวของแคโทด โดยอาศัยสนามไฟฟ้าแรงสูงระหว่างขั้วทริกเกอร์นั้น พบว่าทำให้มี อนุภาคขนาดใหญ่ (macroparticle) ปนเปื้อนออกมารวมอยู่ในพลาสมาด้วย ซึ่งเป็นอุปสรรค อย่างยิ่งต่อการนำพลาสมาไปประยุกต์ใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับธาตุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ (melting point) เช่น ทองแดง และอลูมิเนียม เป็นต้น จะมีจำนวนอนุภาคขนาดใหญ่ปนเปื้อนออก มาจำนวนมาก ดังนั้นจึงต้องมีการเพิ่มกระบวนการลำเลียงพลาสมาผ่านขดลวดโซลินอยด์โค้ง เพื่อช่วยในการกำจัดอนุภาคขนาดใหญ่เหล่านี้ ซึ่งพบว่าพลาสมาที่ประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุ จะเคลื่อนที่เลี้ยวโค้งไปตามสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดโซลินอยด์ได้ แต่อนุภาคขนาดใหญ่ เป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุจะยังคงเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงต่อไป ทำให้เราสามารถกำจัดอนุภาคขนาด ใหญ่โดยการอาศัยขดลวดโซลินอยด์¹⁰

2.3.1 การเคลื่อนที่ของพลาสมาบริเวณผิวแคโทด

เมื่อมีสนามไฟฟ้าแรงสูงเกิดขึ้นบริเวณผิวแคโทดทำให้จุดเล็กๆ บนผิวแคโทดนั้น เกิดการระเหิดกลายเป็นไอของโลหะ และสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วแคโทดกับขั้วแอโนดทำให้ ไอของโลหะเหล่านั้นเกิดการแตกตัวกลายเป็นพลาสมา โดยพลาสมาเหล่านี้จะเกิดการ ขยายตัวออกไปในทิศทางที่ตั้งฉากกับผิวของแคโทด ด้วยความเร็วกลุ่มที่มีค่าประมาณ $1-2 \times 10^4$ m/s สำหรับแคโทดทุกชนิด ซึ่งพบว่าแรงที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการเคลื่อน ที่ของพลาสมา มีดังนี้

- แรงจากสนามไฟฟ้า (forces of space charge electric field)
- การขยายตัวเนื่องจากความดัน (pressure gradients)
- แรงเสียดทานระหว่างอิเล็กตรอนและไอออน (electron-ion friction)

หากไม่พิจารณาถึงแรงจากสนามแม่เหล็กภายนอก พบว่าในระยะทาง $d = 50-200 \mu\text{m}$ จากผิวแคโทดบริเวณที่เกิดพลาสมา (cathode spot) จะไม่มีการชนแบบไม่ยืดหยุ่นเกิดขึ้นมากนัก และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจะลดลงตาม ระยะ d^{-2} และถ้าหากไม่พิจารณาการเกิดหรือการตายของไอออนในพลาสมา (acceleration or ionization/recombination) พบว่า ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (n_e) จะเป็นไปตามสมการ (2.1)

$$n_e = \gamma \frac{I_{arc}}{d^2} \quad (2.1)$$

- เมื่อ n_e = ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (electron density) (cm^{-3})
 I_{arc} = กระแสอาร์ค (arc current) (A)
 d = ระยะทางจากผิวแคโทด (m)
 γ = ค่าคงที่ของการอาร์ค 1 ครั้ง (single-spot arc) ($\text{A}^{-1}\text{-m}^{-1}$)
 $= 10^{13} \text{ A}^{-1}\text{-m}^{-1}$

ความดันที่เกิดขึ้น (kinetic pressure; p_{kin}) มีค่าโดยประมาณตามสมการที่ (2.1) คือ

$$p_{kin} = \gamma \frac{I_{arc}}{d^2} k T_e \quad (2.2)$$

- เมื่อ k = Boltzmann constant (J/K)
 $= 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
 T_e = electron temperature (K)

เมื่อพิจารณาถึงผลของสนามแม่เหล็กภายนอกด้วย จะพบว่าความดันที่เป็นผลมาจากสนามแม่เหล็ก (magnetic pressure; p_{mag}) มีค่าตามสมการ

$$p_{mag} = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (2.3)$$

- เมื่อ B = ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (magnetic field strength) (Tesla)
 μ_0 = permeability of free space (V s/A m)
 $= 4\pi \times 10^{-7} \text{ V s/A m}$

ระยะที่ค่าความดัน kinetic pressure มีค่าเท่ากับ magnetic pressure (d_0) ที่ได้จากสมการที่ (2.2) และ (2.3) มีค่า ดังนี้

$$d_0 = \frac{1}{B} \sqrt{2\mu_0 \gamma I_{arc} k T_e} \quad (2.4)$$

เมื่อแทนค่าคงที่ต่างๆ แล้ว จะได้เป็น

$$d_0(\text{mm}) \approx \frac{3.5\sqrt{I_{\text{arc}}}}{B(\text{mT})} \quad (2.5)$$

จากสมการ (2.5) พบว่าที่กระแสอาร์คค่าหนึ่ง ค่า d_0 จะมีค่าขึ้นกับค่าสนามแม่เหล็กภายนอกเพียงอย่างเดียว และจากค่า d_0 ที่ได้ พบว่า

- ที่ระยะ $d < d_0$ พลาสมาจะเคลื่อนที่ด้วยแรงจาก pressure gradient เพียงอย่างเดียว โดยสนามแม่เหล็กจะไม่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของพลาสมาเลย
- ที่ระยะ $d > d_0$ พลาสมาจะมีการเคลื่อนที่ตามผลของสนามแม่เหล็ก แทนการเคลื่อนที่จาก pressure gradient

สรุปได้ว่า การเคลื่อนที่ของพลาสมาบริเวณใกล้ผิวของแคโทดเกิดขึ้น ด้วยปัจจัยที่สำคัญ 2 ปริมาณ คือ pressure gradient และ magnetic pressure ก่อนที่จะถูกส่งผ่านเข้าสู่ขดลวดโซลินอยด์ ที่ทำหน้าที่เป็นเสมือนตัวกรองอนุภาคขนาดใหญ่ออก (macroparticle filter)

2.3.2 การเคลื่อนที่ของพลาสมาในท่อแม่เหล็ก

พลาสมาประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีประจุ ดังนั้นเมื่อพลาสมาเคลื่อนที่ออกมาจากแอโนดแล้วเคลื่อนต่อไปยังท่อของขดลวดโซลินอยด์ที่มีสนามแม่เหล็กภายในท่อ ทำให้อนุภาคที่มีประจุ คือ ไอออนและอิเล็กตรอน เกิดการเคลื่อนที่แบบควรรอบเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุเหล่านี้ จะเกิดจากแรงกระทำจากสนามแม่เหล็ก ตามสมการ

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (2.6)$$

และจากสมการการเคลื่อนที่ของนิวตัน

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (2.7)$$

จะได้ว่าอนุภาคที่มีประจุ จะเกิดการควงรอบเส้นแรงแม่เหล็ก ด้วยรัศมีความโค้ง (R)

$$R = \frac{mv}{qB} \quad (2.8)$$

และจาก Theorem of equipartition of energy

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}k_B T \quad (2.9)$$

จะได้ว่า

$$R = \frac{\sqrt{mk_B T}}{qB} \quad (2.10)$$

ค่ารัศมีการควงของไอออนและอิเล็กตรอนของสมการ (2.10) เรียกว่า “ค่ารัศมีของลามอร์” (Larmor radius) จากค่ารัศมีของลามอร์ จะพบว่าค่ารัศมีการเคลื่อนที่ดังกล่าวจะมีค่าขึ้นกับมวล ซึ่งมวลของไอออนมีค่ามากกว่ามวลของอิเล็กตรอนทำให้ไอออนเกิดการควงด้วยรัศมีที่มีค่ามากกว่ารัศมีการควงของอิเล็กตรอน ตัวอย่าง เช่น กรณีใช้ทองแดงเป็นแคโทดในการผลิตไอออน ซึ่งมีค่าตัวแปรต่างๆ ดังนี้

$$\text{ค่าเฉลี่ยของประจุที่เกิด (Charge state) } \bar{Q} = 2.2$$

$$\text{มีเลอะตอมเป็น } Z = 29$$

$$\text{มวลของอิเล็กตรอน } m_e = 9.10 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$\text{มวลของโปรตอน } m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\text{Boltzmann constant } k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

ถ้าสมมุติให้ อุณหภูมิมีค่า $kT = 3 \text{ eV}$ และสนามแม่เหล็กภายนอกมีค่า 100 mT ดังนั้นจากสมการ (2.10) สามารถคำนวณหารัศมีการควงของอิเล็กตรอนและไอออน มีค่าเท่ากับ 1.25 มม. และ 180 มม. ตามลำดับ

จากตัวอย่างการคำนวณหารัศมีการควงของไอออนและอิเล็กตรอน พบว่ารัศมีการควงของไอออนจะมีค่ามากกว่ารัศมีการควงของอิเล็กตรอนมาก และมีค่ามากกว่าค่ารัศมีของท่อโซลินอยด์ อาจทำให้ไอออนไม่สามารถเคลื่อนที่มาถึงบริเวณปลายท่อได้ แต่จากการวัดกระแสที่ปลายท่อโซลินอยด์ พบว่าสามารถวัดได้ทั้งค่ากระแสอิเล็กตรอนและกระแสไอออน แสดงว่าไอออนไม่ได้เคลื่อนที่ภายใต้สนามแม่เหล็กแต่เพียงอย่างเดียว ยัง

มีแรงอื่นที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของไอออน ซึ่งพบว่าแรงนั้น คือ แรงระหว่างประจุของไอออนกับอิเล็กตรอน ทำให้ไอออนสามารถเคลื่อนที่ไปตามท่อแม่เหล็กได้ และนอกจากนี้ยังพบว่า การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนกับไอออนมีผลมาจากสนามไฟฟ้าภายในพลาสมาที่เป็นไปตามสมการของปัวซอง (Poisson's equation) คือ

$$\text{div} E = \frac{e}{\epsilon_0} (\bar{Z}n_i - n_e) \quad (2.11)$$

เมื่อ \vec{E} = สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น
 \bar{Z} = mean charge state of ion (ในภาคผนวก ก)
 n_i, n_e = ความหนาแน่นของไอออนและอิเล็กตรอนตามลำดับ

สนามไฟฟ้างกล่าวทำให้ไอออนและอิเล็กตรอนมีการเคลื่อนที่แบบ $\vec{E} \times \vec{B}$ drift โดยสนามไฟฟ้าจะมีทิศจากผนังท่อเข้าสู่จุดศูนย์กลางท่อ ทำให้ไอออนและอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปตามท่อแม่เหล็กได้ แต่อย่างไรก็ตามก็ยังคงมีการสูญเสียไอออนบางส่วนไปบริเวณผนังท่อจากการแพร่ของพลาสมาเข้าสู่ผนังท่อด้วย การสูญเสียไอออนดังกล่าวเป็นไปตามกฎของ Fick (Fick's law) คือ

$$\Gamma_{\perp} = -D_{\perp} \nabla n \quad (2.12)$$

เมื่อ Γ_{\perp} = ฟลักซ์การแพร่ของพลาสมาในแนวตั้งฉากกับผนังท่อ
 D_{\perp} = สัมประสิทธิ์การแพร่ของ Bohm (Bohm's formula)
 $= \frac{k_B T_e}{16B}$

ส่วนในกรณีท่อโซลินอยด์โค้ง ค่าสนามแม่เหล็กจะมีค่าโดยประมาณ

$$B \approx \frac{R_0}{R} B_0 \quad (2.13)$$

เมื่อ B_0 = สนามแม่เหล็กบริเวณ $R = R_0$
 R_0 = รัศมีของท่อโซลินอยด์
 R = รัศมีความโค้งของท่อ

ซึ่งจากสมการ (2.13) จะพบว่า สนามแม่เหล็กในท่อโค้งมีค่าไม่สม่ำเสมอ กล่าวคือ สนามแม่เหล็กบริเวณที่มีรัศมีมีความโค้งน้อย (โค้งด้านในของท่อ) จะมีค่ามากกว่าท่อบริเวณที่มีรัศมีมีความโค้งมาก (โค้งด้านนอกของท่อ) แสดงให้เห็นว่าในท่อแม่เหล็กโค้งจะมีการสูญเสียไอออนมากกว่าบริเวณโค้งด้านนอกของท่อ เพราะการแพร่ของพลาสมาบริเวณนี้จะเป็นไปอย่างรวดเร็วตามกฎของ Fick

2.4 ศักย์พลาสมาและโพรบวัดกระแส¹¹

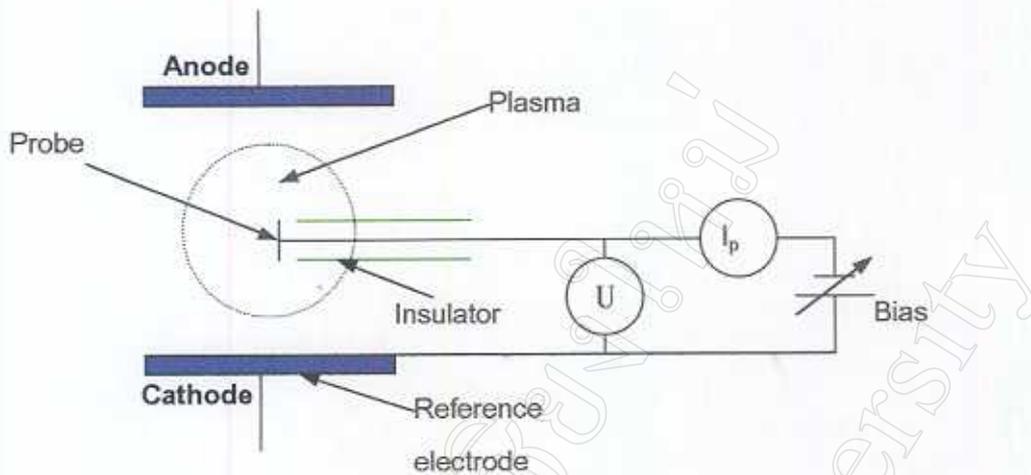
คุณลักษณะสำคัญที่นิยมใช้เป็นพารามิเตอร์ในการบ่งบอกคุณสมบัติเบื้องต้นของพลาสมาที่ได้จากหัวจ่ายพลาสมา คือ

ก. ความหนาแน่นของพลาสมา (plasma density, n) หรือจำนวนอนุภาคต่อหน่วยปริมาตร มีหน่วยเป็น cm^{-3} ซึ่งมีด้วยกัน 2 ปริมาณ คือ ความหนาแน่นของไอออน (n_i) กับความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (n_e)

ข. อุณหภูมิของพลาสมา (plasma temperature, T) มีหน่วยเป็น เคลวิน (K) เป็นปริมาณที่บ่งบอกให้ทราบถึงพลังงานของพลาสมา ดังนั้นบางครั้งจึงนิยมบอกในเทอมของ kT เมื่อ k คือ ค่าคงที่ของโบซมานซ์ ซึ่งประกอบด้วย อุณหภูมิของไอออน (T_i) กับอุณหภูมิของอิเล็กตรอน (T_e) เช่นกัน

จากพารามิเตอร์ทั้ง 2 ที่กล่าวไปแล้วนั้นไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรงจากการทดลอง แต่สามารถหาค่าจากผลของการทดลองวัด ศักย์ของพลาสมา ซึ่งศักย์ของพลาสมาสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ “ศักย์โฟลท” (floating potential, V_f) .เป็นค่าศักย์ที่เกิดขึ้นเมื่อนำโลหะตัวนำเข้าไปวางไว้ในพลาสมา (โดยตัวนำที่ใส่เข้าไปนี้ไม่มีผลกระทบพลาสมาส่วนใหญ่) ทำให้บริเวณผิวโลหะมีศักย์ลบเกิดขึ้นเมื่อเทียบกับศักย์พลาสมาบริเวณที่เป็นกลาง(neutral area) และศักย์ของพลาสมาอีกปริมาณ คือ “ศักย์พลาสมา” (plasma potential หรือ space potential, V_{sp}) ซึ่งเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการเปรียบเทียบศักย์ของพลาสมาบริเวณที่เป็นกลาง (neutral area) กับผนังแชมเบอร์ ที่ปกติจะถือว่ามีศักย์เป็นศูนย์ (กราวด์)

การวัดศักย์ของพลาสมาทั้งสองปริมาณ สามารถวัดได้โดยใช้โพรบวัดกระแสแบบ Langmuir probe หรือ electrical probe ด้วยการยื่นโพรบที่เป็นโลหะตัวนำเข้าไปในพลาสมา (โพรบที่ใช้ควรจะรบกวนพลาสมาน้อยที่สุด) แล้วเชื่อมโยงสายจากโพรบเข้ากับวงจรวัดกระแส (I_p) และความต่างศักย์ที่แปรค่าได้ (U) ดังรูปที่ 2.4 ทำการทดลองวัดค่ากระแส (I_p) ที่ค่าความต่างศักย์ (U) ค่าต่างๆ แล้วนำผลการทดลองที่ได้มาสร้างกราฟลักษณะสมบัติ VI ของพลาสมา และจากกราฟดังกล่าวจะสามารถหาค่าความหนาแน่น (n) และอุณหภูมิ (T) ของพลาสมาได้ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.4 แสดงไออะแกมของโพรบวัดกระแสชนิดขั้วเดียว (single probe) และวงจรไบอัสภายนอก ในระบบพลาสมาดีซี

2.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์โพลกับอนุกรมของพลาสมา

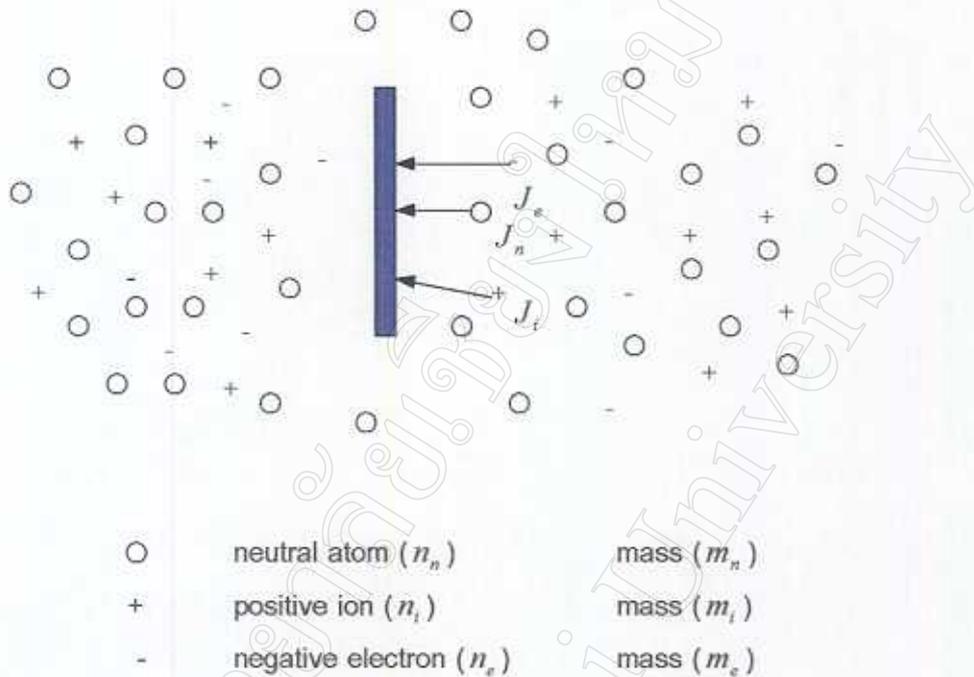
ในการศึกษาเกี่ยวกับศักย์ของพลาสมาโดยใช้โพรบวัดกระแส เพื่อให้ทำให้ง่ายขึ้น จะทำการศึกษาโดยอาศัยสมมุติฐานเกี่ยวกับพลาสมา ดังต่อไปนี้

1. ในพลาสมาจะต้องมีความเป็นกลางอย่างสม่ำเสมอ (homogeneous) และขอบเขตของพลาสมาไม่มีขนาดสิ้นสุด (infinite)
2. การแจกแจงความเร็วของอนุภาคในพลาสมาเป็นแบบแมกเวล-โบซมานน์ (Maxwell-Boltzmann distribution) (ภาคผนวก ข)

$$f(v) = 4\pi N \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} v^2 \exp\left(\frac{-mv^2}{2k_B T}\right) \quad (2.14)$$

3. ไม่มีการชนกัน (no collision) ระหว่างอนุภาคในบริเวณใกล้เคียงกับโพรบ
4. อนุภาคที่พุ่งชนโพรบจะถูกไม่สะท้อนกลับออกมาหรือไม่มีการปลดปล่อยอนุภาคอื่นออกมาเนื่องจากการชน
5. พลาสมาส่วนใหญ่จะไม่ถูกรบกวนโดยโพรบ
6. ไม่มีสนามแม่เหล็กกรุนแรงในพลาสมา

พิจารณา เมื่อนำโลหะตัวนำเข้าไปวางในพลาสมา จะมีอนุภาค 3 ชนิด คือ อิเล็กตรอน ไอออน และอนุภาคที่เป็นกลางเคลื่อนที่เข้าชนโลหะตัวนำ ดังรูป 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคทั้ง 3 ชนิด เข้าชนโลหะตัวนำ

จากรูปที่ 2.5 พบว่า อนุภาคทั้ง 3 ชนิดเคลื่อนที่ตกกระทบโพรบ ต่อพื้นที่ ต่อหนึ่งหน่วยเวลา ด้วยฟลักซ์ (*flux*) มีค่าเท่ากับ

$$flux = \frac{n\bar{v}}{4} \quad (2.15)$$

เมื่อ $\bar{v} = \left(\frac{8kT}{\pi m}\right)^{1/2} \quad (2.16)$

= อัตราเร็วเฉลี่ย (mean speed) ของอนุภาค (ภาคผนวก ข)

n = ความหนาแน่นของอนุภาค

พบว่า ฟลักซ์ของอนุภาคที่เป็นกลาง มีค่าเท่ากับ

$$neutral\ flux = \frac{n_n \bar{v}_n}{4} \quad (2.17)$$

และความหนาแน่นของกระแส (current density, J) ของอิเล็กตรอนและไอออน มีค่า

$$J = \text{charge} \times \text{flux} \quad (2.18)$$

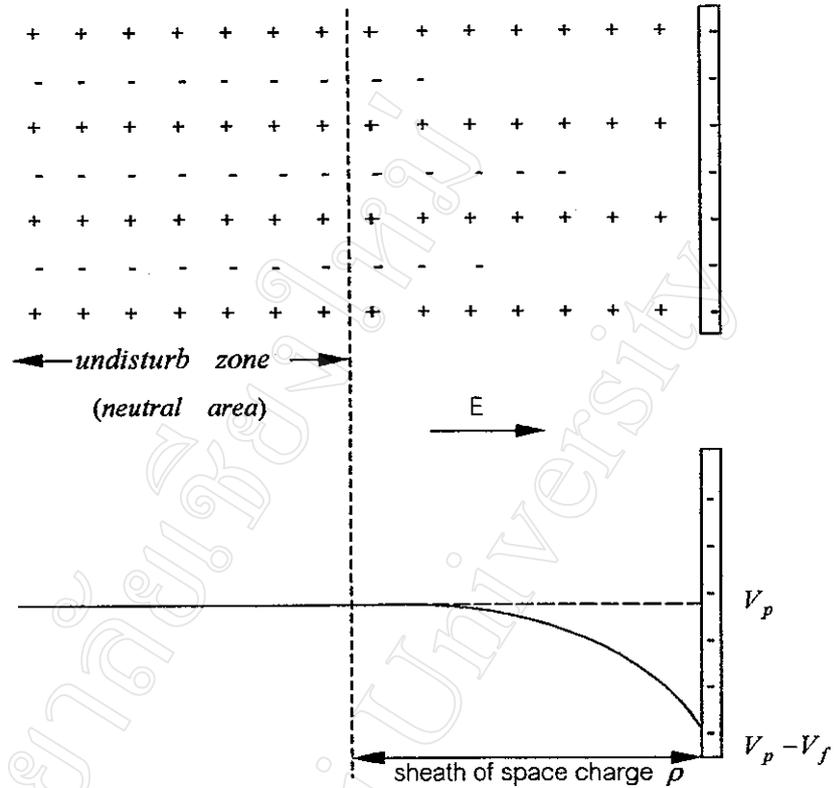
ion current density ; $J_i = \frac{en_i \bar{v}_i}{4} \quad (2.19)$

electron current density ; $J_e = \frac{en_e \bar{v}_e}{4} \quad (2.20)$

ในทางปฏิบัติ อนุภาคที่มีผลต่อปริมาณการวัดทางไฟฟ้า คือ อิเล็กตรอนกับไอออน เท่านั้น และเนื่องจากมวลของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยกว่ามวลของไอออน ($m_e < m_i$) ดังนั้นอิเล็กตรอนจะวิ่งเข้าชนโลหะตัวนำด้วยอัตราเร็วที่สูงกว่าไอออน (ตามสมการ 2.16) ทำให้มีประจุลบขึ้นที่ผิวโลหะตัวนำ และเกิดการผลักอิเล็กตรอนตัวที่วิ่งเข้ามาที่หลัง จนกระทั่งเข้าสู่ภาวะสมดุล ซึ่งพบว่า ที่สภาวะสมดุลนี้ จะมีประจุบวก (space charge) กระจายอยู่อย่างหนาแน่นรอบๆ ผิวตัวนำ และเบาบางลงที่ระยะห่างจากโลหะตัวนำออกไป ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่มีทิศพุ่งเข้าหาโลหะตัวนำ ซึ่งบริเวณที่เกิดสนามศักย์นี้ เรียกว่า "พลาสมาชีท" (plasma sheath) ดังรูป 2.6 โดยสนามศักย์นี้มีความสัมพันธ์กับ space charge density (ρ) ตามสมการของปัวซอง

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.21)$$

- เมื่อ V = ความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นในพลาสมาชีท
 ρ = ความหนาแน่นของประจุต่อหน่วยปริมาตร
 ϵ_0 = permittivity of vacuum
 = 8.85×10^{-12} F/m



รูปที่ 2.6 แสดงชีพของพลาสมาที่เกิดขึ้นบริเวณผิวโลหะตัวนำที่วางในพลาสมา (รูปบน) และความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นระหว่างพลาสมาและผิวโลหะตัวนำ (รูปล่าง)

ศักย์ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวโลหะตัวนำเมื่อเทียบกับขอบชีพของพลาสมาที่จุดสมมูลนี้ คือ “ศักย์ฟลอต” (floating potential, V_f) และศักย์ที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้าชนโลหะตัวนำมีจำนวนลดลง โดยความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้าชนโลหะตัวนำได้ที่จุดสมมูลนี้ มีค่าเป็นไปตามสมการโบซมานซ์ (Boltzmann distribution) คือ

$$n_e = n_{e0} \exp\left(\frac{-eV_f}{k_B T_e}\right) \quad (2.22)$$

เมื่อ n_e = ความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่วิ่งชนผิวโลหะตัวนำ ที่จุดสมมูล
 n_{e0} = ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนบริเวณ neutral area
 T_e = อุณหภูมิของอิเล็กตรอน (electron temperature)

ที่ตำแหน่งสมดุลนี้ จะมีค่ากระแสลัพท์เป็นศูนย์ ดังนั้น

$$J_i = J_e \quad (2.23)$$

จากสมการความหนาแน่นกระแส (สมการ (2.19) และ (2.20))

$$n_i \bar{v}_i = n_e \bar{v}_e \quad (2.24)$$

แทนค่า n_e จากสมการ (2.22)

$$n_i \bar{v}_i = n_{e0} \exp\left(\frac{-eV_f}{k_B T_e}\right) \bar{v}_e \quad (2.25)$$

แทนค่าอัตราเร็วเฉลี่ยจากสมการ (2.16) จะได้

$$n_i \sqrt{\frac{8kT_i}{\pi m_i}} = n_{e0} \exp\left(\frac{-eV_f}{k_B T_e}\right) \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}} \quad (2.26)$$

จาก $n_i = n_{e0}$ ดังนั้น

$$\sqrt{\frac{8kT_i}{\pi m_i}} = \exp\left(\frac{-eV_f}{k_B T_e}\right) \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}} \quad (2.27)$$

take ln และจัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$V_f = \frac{k_B T_e}{2e} \ln\left(\frac{m_i T_e}{m_e T_i}\right) \quad (2.28)$$

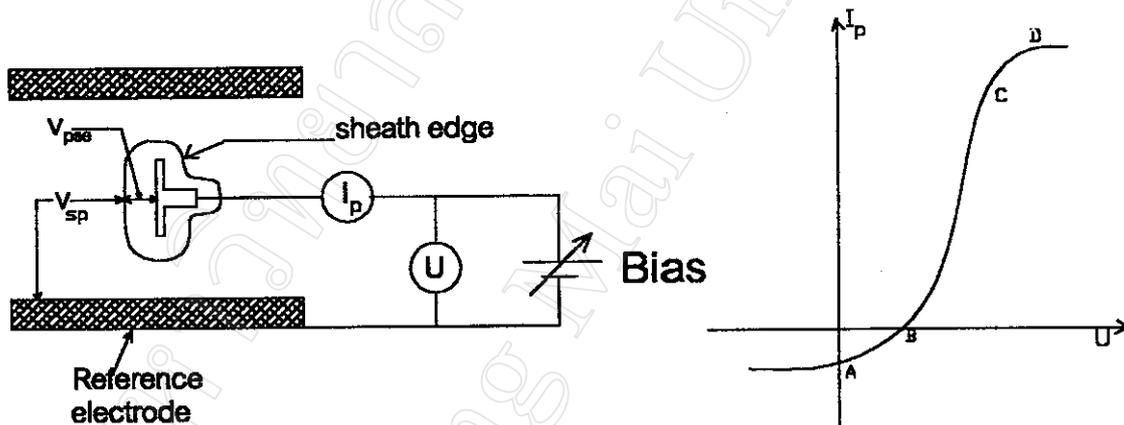
สำหรับเครื่องกำเนิดไอออนชนิดอาร์คทั้งหลาย จะมีค่า $T_i \cong T_e$ เช่น ในเครื่องกำเนิดไอออนชนิด เอ็ม อี วี วี เอ ดังนั้น สามารถประเมินอุณหภูมิของอิเล็กตรอน (T_e) ในเทอมของ kT_e (มีหน่วยเป็น eV) ได้ ตามสมการ

$$kT_e \cong 2eV_f \ln\left(\frac{m_e}{m_i}\right) \quad (2.29)$$

แต่อย่างไรก็ตามในการหาค่าศักย์โฟลทด้วยวิธีนี้ จะต้องทราบค่าศักย์พลาสมา (V_{sp}) ด้วย จึงไม่ค่อยสะดวกในการนำวิธีไปใช้งาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีการประเมินค่าอุณหภูมิของด้วยวิธีวัดศักย์สัมผัส ดังหัวข้อต่อไป

2.4.2 การประเมินค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในทางปฏิบัติ¹²

วิธีการประเมินค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนอีกวิธีหนึ่ง คือ การคำนวณจากคุณสมบัติ VI ของโพรบวัดกระแสที่วัดได้โดยตรงจากการทดลอง ด้วยการพิจารณาจากรูปที่ 2.7 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.7 แสดงการวัดระบบดีซีพลาสมาของเครื่องกำเนิดไอออน

- แสดงการต่อโพรบวัดกระแสและศักย์ไบอัสภายนอก
- แสดงลักษณะกราฟสมบัติ VI ของโพรบวัดกระแส

โดย V_{sp} = ความต่างศักย์ตกคร่อมขั้วอ้างอิงและขอบซีท
 V_{pse} = ความต่างศักย์ตกคร่อมขั้วโพรบเทียบกับขอบซีท (มีค่าเป็นลบ)
 I_p = กระแสโพรบ = $(I_i + I_e)$
 U = ศักย์ไบอัสจากภายนอก = $V_{sp} + V_{pse}$

พิจารณาความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นในรูปที่ 2.7 ก พบว่า มีค่าตามสมการ

$$U = V_{pse} + V_{sp} \quad (2.30)$$

พิจารณาค่าแห่งต่างๆ จากกราฟรูปที่ 2.7 ข พบว่าแต่ละจุดของกราฟมีความสำคัญ ดังนี้

จุด A คือ จุดที่กระแสเริ่มมีการอิ่มตัว แสดงว่ามีการไบอัสโพรบด้วยศักย์ U ที่ทำให้ V_{pse} ของพลาสมามีค่าเป็นลบมากพอ ($eV_{pse} \gg kT_e$) จึงทำให้กระแสโพรบที่วัดได้เป็นกระแสที่เกิดจากกระแสไอออนเพียงอย่างเดียว ดังนั้น

$$I_p = en_i \bar{v}_i A \quad (2.31)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่ของโพรบ(ที่มีขนาดเท่ากับพื้นที่ของซีท)

จุด B คือ จุดที่สามารถวัดกระแสโพรบ(I_p)ได้เท่ากับศูนย์ ซึ่งหมายถึง

$$J_i = J_e \quad (2.32)$$

จะเกิดขึ้นเมื่อ $V_{pse} = V_f$ ดังนั้นสมการ (2.31) จะเขียนได้เป็น

$$U_f = V_{sp} + V_f \quad (2.33)$$

ซึ่ง $U_f =$ ศักย์ไบอัสที่โพรบซึ่งทำให้เกิด V_f พอดี

จุด C คือ จุดที่มีการไบอัสโพรบให้มีค่าเป็นบวกมากพอ จนทำให้ซีทที่มีอยู่เริ่มหายไปพอดี ($V_{pse} = 0$)

จุด D คือ จุดที่ค่ากระแสอิเล็กตรอนเริ่มมีค่าคงที่ หรือกระแสอิเล็กตรอนเกิดการอิ่มตัว แสดงว่าไม่มีกระแสไอออนเกิดขึ้นที่โพรบเลย ดังนั้น

$$I_p = I_{e0} \quad (2.34)$$

ส่วนการนำไปประยุกต์ใช้งานนั้น จะให้ความสนใจกราฟสมบัติ VI (รูป 2.7 ข) ในช่วง BC และในช่วง BC นี้ ความต่างศักย์ (V_{pse}) มีค่าประมาณคงที่อยู่ ดังนั้น ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้าชนโพรบวัดกระแส จะเป็นไปตามการแจกแจงของโบซมานซ์ (Boltzmann distribution)

$$n'_e = n_{e0} \exp\left(\frac{-eV_{pse}}{k_B T_e}\right) \quad (2.35)$$

ดังนั้นกระแสอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นบริเวณโพรบ มีค่า

$$I'_e = I_{e0} \exp\left(\frac{-eV_{pse}}{k_B T_e}\right) \quad (2.36)$$

และจากสมการกระแสโพรบ ซึ่งมีค่า เท่ากับ

$$I_p = I_i + I'_e \quad (2.37)$$

เนื่องจาก ในช่วง BC ความเร็วเฉลี่ยของไอออนมีค่าน้อยกว่าความเร็วของอิเล็กตรอนมาก ดังนั้น $I_p \cong I'_e$ หรือ

$$I_p \cong I_{e0} \exp\left(\frac{-eV_{pse}}{k_B T_e}\right) \quad (2.38)$$

จากสมการ (2.31) และค่า $V_{pse} < 0$ ในช่วง BC นั้น จะได้ว่า

$$V_{pse} = V_{sp} - U \quad (2.39)$$

แทนค่า V_{pse} จากสมการ (2.39) ในสมการ (2.38)

$$I_p \cong I_{e0} \exp\left(\frac{-e(V_{sp} - U)}{k_B T_e}\right) \quad (2.40)$$

$$\ln I_p \cong \ln I_{e0} + \left(\frac{eU - eV_{sp}}{k_B T_e} \right) \quad (2.41)$$

$$\frac{d \ln I_p}{dU} \cong \frac{d}{dU} \left(\frac{eU - eV_{sp}}{k_B T_e} \right) \quad (2.42)$$

เนื่องจาก V_{sp} มีค่าประมาณคงที่ ดังนั้น จะได้

$$\frac{d \ln I_p}{dU} \cong \frac{e}{k_B T_e} \quad (2.43)$$

ค่า $\frac{d \ln I_p}{dU}$ คือ ค่าความชันของกราฟระหว่าง I_p กับ U ที่พล็อตในกราฟกึ่งล็อก (semi-log) นั่นเอง ดังนั้นถ้าทำการพล็อตกราฟคุณสมบัติ VI ที่ได้ในกราฟกึ่งล็อก จะสามารถหาค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในรูปของ kT_e ได้ตามสมการ

$$kT_e = \frac{e}{\text{slope}} \quad (2.44)$$

ส่วนการหาค่าความหนาแน่นของอนุภาคต่าง ๆ (n) นั้น จากทฤษฎีพบว่ามีความจำเป็นต้องทราบค่ากระแสอิเล็กตรอนบริเวณที่อิมิตัว (I_{e0}) แต่จากการทดลองของงานวิจัยนี้ยังไม่สามารถหาค่า I_{e0} ได้ เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องจ่ายไฟที่ใช้ในการไบอัสไฟรอนนั้นไม่สามารถปรับค่าได้สูงจนกระทั่งทราบค่า I_{e0} ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงไม่ได้มีการหาค่าความหนาแน่นของอนุภาค