

## บทที่ 2

### ระบบการดึงไอออน

ในบทที่ 1 ได้กล่าวถึงหลักการของแหล่งกำเนิดไอออนแบบ Nielsen และวิธีการสร้างไอออนจากก๊าซและธาตุที่อยู่ในสถานะของแข็ง แต่ในบทนี้จะได้กล่าวถึงการดึงไอออนที่ต้องการออกจากพลาสมา, การปรับโพกัสลำอนุภาคไอออนให้เหมาะสมที่สุด และการส่งผ่านไอออนบีมไปยังเป้าหมายไปถึงการแยกชนิดไอออนโดยใช้แม่เหล็กวิเคราะห์มวล(analyzing magnet) ดังนั้นคุณลักษณะของพลาสมาและพารามิเตอร์ในการทำงานของแหล่งกำเนิดไอออนจะมีผลต่อคุณลักษณะของลำอนุภาคไอออนที่ถูกดึงออกมาด้วย ถ้าค่าพารามิเตอร์ของแหล่งกำเนิดไอออนเปลี่ยนไปคุณลักษณะของลำอนุภาคไอออนก็จะเปลี่ยนไปด้วย ปัญหาพื้นฐานของการดึงไอออนออกจากพลาสมาก็คือ รูปร่างของขั้วไฟฟ้าดึงที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบเทียบกับศักย์ไฟฟ้าของพลาสมาและระยะห่างระหว่างช่องทางออกพลาสมา กับขั้วไฟฟ้าดึง สมบัติของลำอนุภาคไอออนที่ต้องการได้แก่

- ไอออนต้องถูกดึงออกมาได้มากที่สุด(intense ion beam)
- ลำอนุภาคไอออนที่ถูกดึงออกมามีลักษณะเกือบเป็นลำแสงขนาน(little divergence)
- ไม่มีการเหลื่อมล้ำ(without aberration)
- ไม่ชนกับขั้วไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ปรับโพกัส

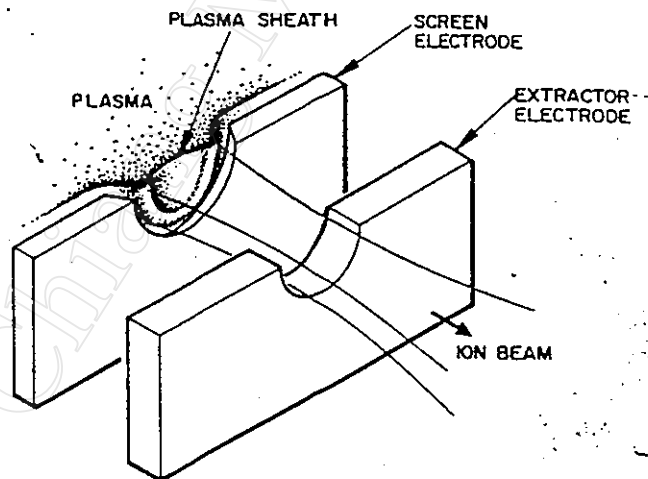
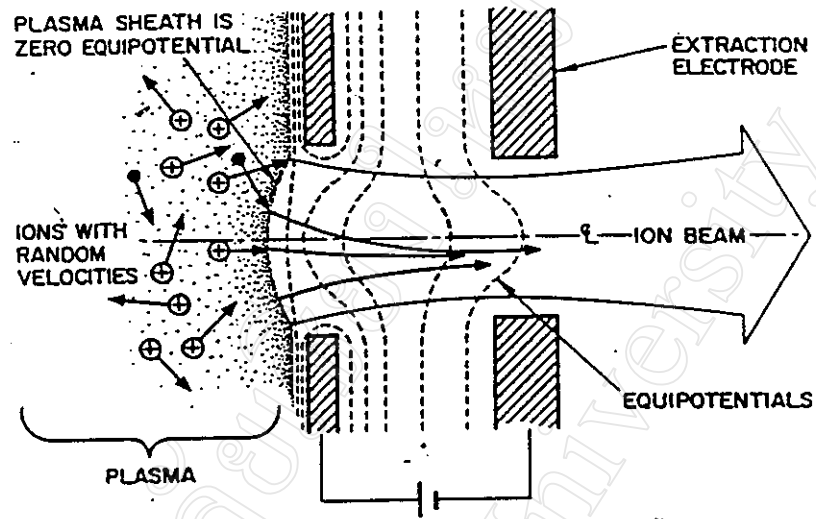
#### 2.1 การดึงไอออนออกจากพลาสมา

จากที่ได้อธิบายมาแล้วในบทที่ 1 ถึงการสร้างพลาสมาในแหล่งกำเนิดไอออนแบบ Nielsen ตามรูปที่ 1.7 อิเล็กโทรดที่อยู่ด้านตรงกันข้ามกับอิเล็กโทรดที่ทำหน้าที่เป็นแคโทดร้อน ถ้าเจาะรูขนาดเล็กๆที่อิเล็กโทรดด้านนี้เพื่อเป็นทางออกพลาสมาแล้ววางอิเล็กโทรดที่ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าดึงซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าลบเทียบกับศักย์ไฟฟ้าของพลาสมาห่างออกไปเล็กน้อย ผลของสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าดึงกับพลาสมาจะทำให้เกิด sheath และขอบพลาสมา(plasma boundary) มีรูปร่างโค้งเว้าเข้าหาพลาสมาที่เรียกว่า meniscus หรืออาจเรียกว่า scalloped plasma sheath ผลของความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าดึงกับพลาสมา ไอออนจะถูกดึงออกมาจากเฉพาะที่ขอบพลาสมาเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.1

ตำแหน่งและรูปร่างของขอบพลาสมาหรือพื้นที่ปลดปล่อยไอออน,  $S$  นี้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพลาสมา, ค่าพารามิเตอร์ของการดิสชาร์จได้แก่ ค่ากระแสใส่หลอด, กระแสดิสชาร์จ, แรงดันดิสชาร์จ และความดัน. ค่าศักย์ไฟฟ้าดึงและรูปร่างของขั้วไฟฟ้าดึง

รูปร่างขอบพลาสมา,  $S$  มีสมบัติ 2 ประการ

- (i). ขอบพลาสมาจะอยู่ที่เส้นแสดงศักย์ไฟฟ้าสมมูล(equipotential surface)  $V_s = V_p$
- (ii). สนามไฟฟ้าภายใน(internal electric field,  $E_n \cong 0$ ) มีค่าน้อยมากหรือมีค่าเป็นศูนย์ ทำให้ไม่มีแรงไฟฟ้ากระทำต่อขอบพลาสมา



รูปที่ 2.1 แสดงรูปร่างของขอบพลาสมาที่เกิดจากสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าดึง (Wilson and Brewer, 1973)

โดยเงื่อนไขทั้งสองประการจะสอดคล้องกับเงื่อนไขของ space charge effect รูปร่างของขอบพลาสมาจะปรับตัวของมันเองเพื่อให้อัตราการดึงไอออนออกไปมีค่าเท่ากับอัตราการจ่ายไอออนจากพลาสมา ภายใต้เงื่อนไขนี้ความหนาแน่นของกระแสไอออนตามเงื่อนไขของ space charge,  $J_{isc}$  จะต้องเท่ากับ ความหนาแน่นของกระแสไอออนสูงสุดที่พลาสมาจ่ายให้,  $J_{is}$

$$J_{isc} = J_{is} \tag{2.1}$$

เมื่อ  $J_{isc} = n_i e v_i$  (2.2)

โดยที่  $v_i$  คือ ความเร็วเฉลี่ยของไอออนข้าม sheath มีค่าเท่ากับ  $\frac{kT_e^{1/2}}{m_i}$

$$J_{isc} = \sqrt{\frac{2e}{m_i}} \frac{E^{3/2}}{\sqrt{d}} f \tag{2.3}$$

เมื่อ  $E_n = \frac{V_a}{d}$

โดยที่  $V_a$  คือ ศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าดึงกับพลาสมา

$d$  คือ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าดึงกับพลาสมา

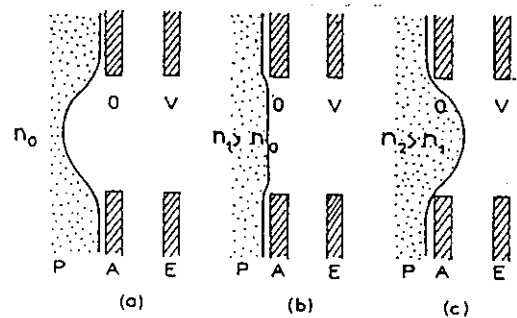
$n_i$  คือ ความหนาแน่นไอออนในพลาสมา

$f$  คือ แฟกเตอร์ที่ขึ้นอยู่กับรูปร่างของอิเล็กโทรด

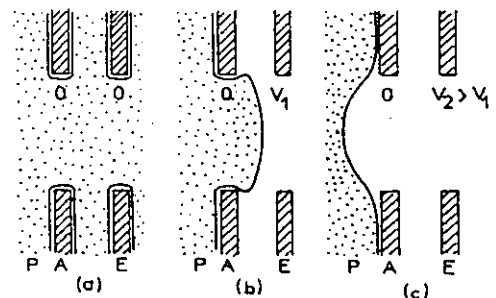
จากสมการ(2.2) จะเห็นว่า  $J_{isc}$  เป็นสัดส่วนกับปริมาณ  $n_i$  ดังนั้นถ้าพารามิเตอร์ในการดิสชาร์จมีการเปลี่ยนแปลงไปจะมีผลทำให้รูปร่างของขอบพลาสมามีการเปลี่ยนแปลงไป สำหรับแหล่งกำเนิดไอออนจำพวกก๊าซดิสชาร์จ(gas discharge ion source) จะให้กระแสไอออนค่อนข้างสูง สามารถแบ่งตามความหนาแน่นของไอออนในพลาสมาได้เป็น 2 กลุ่ม

- (i). ความหนาแน่นไอออนต่ำหรือปานกลาง ( $10^8 < n_i < 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ )
- (ii). ความหนาแน่นไอออนสูง ( $10^{10} < n_i < 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ )

รูปที่ 2.2 แสดงรูปร่างของขอบพลาสมาที่ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นไอออนในพลาสมา



รูปที่ 2.3 แสดงรูปร่างของขอบพลาสมาที่ขึ้นอยู่กับศักย์ไฟฟ้าดึง(Septier, 1967)



รูปร่างของขอบพลาสมาที่ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นไอออนในพลาสมาและศักย์ไฟฟ้าคิงแสดงในรูปที่ 2.2 และ 2.3 ผลของความหนาแน่นไอออนต่อรูปร่างของขอบพลาสมาแสดงในรูปที่ 2.2 a.) เมื่อให้ค่าพารามิเตอร์ของการดิสราร์จและศักย์ไฟฟ้าคิงมีค่าคงที่ ถ้าความหนาแน่นของไอออนต่ำ ( $n_i < 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ) ขอบพลาสมาจะโค้งเว้าเข้าหาพลาสมา (concave shape) นี่จะเป็นลักษณะของแหล่งกำเนิดไอออนที่ใช้หลักการสั้นของอิเล็กตรอนและแหล่งกำเนิดไอออนความถี่สูง เมื่อความหนาแน่นไอออนมีค่าสูงขึ้นขอบโค้งของขอบพลาสมาจะน้อยลงจนกระทั่งขอบพลาสมาแบนราบดังแสดงในรูปที่ 2.2 b.) เมื่อความหนาแน่นไอออนเพิ่มมากยิ่งขึ้นขอบพลาสมาจะนูนออกมา (convex shape) ตามรูปที่ 2.2 c.) แต่ถ้าให้ความหนาแน่นไอออนในพลาสมามีค่าคงที่ แล้วเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าคิงลักษณะของขอบพลาสมาจะมีลักษณะเปลี่ยนไปตามรูปที่ 2.3 ในกรณีไม่มีศักย์ไฟฟ้าคิงจะแสดงตามรูปที่ 2.3 a) ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าคิงต่ำๆ ขอบพลาสมาจะมีรูปร่างนูนออกมา (convex shape) ตามรูปที่ 2.3 b.) เมื่อศักย์ไฟฟ้าคิงมีค่ามากขึ้นไอออนก็จะถูกดึงออกมาได้มากขึ้นและขอบพลาสมาจะถอยเข้าไปในพลาสมาจนกระทั่งขอบพลาสมาแบนราบ และสุดท้ายเมื่อศักย์ไฟฟ้าคิงมีค่าสูงพอเหมาะขอบพลาสมาจะมีรูปร่างโค้งเว้า (concave shape) ตามรูปที่ 2.3 c.)

ดังนั้นสรุปได้ว่าแหล่งกำเนิดไอออนที่จะสามารถทำงานได้มีประสิทธิภาพมากที่สุดและมีความเสถียรที่สุดพารามิเตอร์ของแหล่งกำเนิดไอออนหรือพารามิเตอร์ของส่วนเร่งไอออนจะต้องปรับให้พอเหมาะและสอดคล้องกันตลอดการทำงาน ในความเป็นจริงเราคงไม่สามารถมองเห็นส่วนโค้งของขอบพลาสมาได้แต่เราสามารถสังเกตได้จากค่ากระแสไอออนที่วัดได้มีค่าสูงสุดและมีค่าคงที่หรือไม่ เพราะฉะนั้นในการทำงานทุกครั้งจะต้องใช้พารามิเตอร์ชุดเดิมตลอด

เนื่องจากแหล่งกำเนิดไอออนโดยตัวมันเองไม่สามารถผลิตลำอนุภาคไอออนเองได้ จึงต้องมีอิเล็กโทรดสำหรับดึงไอออน (extraction electrode) ออกจากแหล่งกำเนิดไอออนใน หัวข้อ 2.1 ได้กล่าวถึงรูปร่างของขอบพลาสมาที่ไอออนถูกดึงออกมา ซึ่งมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ของแหล่งกำเนิดไอออนและค่าศักย์ไฟฟ้าคิง ในหัวข้อต่อไปจะได้กล่าวถึงรูปร่างของอิเล็กโทรดที่ใช้ในการดึงไอออนออกมาจากแหล่งกำเนิดไอออน.

## 2.2 Pierce electrode

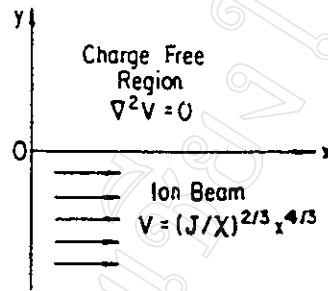
ถึงแม้ว่าไอออนที่ขอบพลาสมาจะมีพลังงานอยู่ประมาณ  $\frac{1}{2} \frac{kT_e}{e}$  หรือประมาณ 3 อิเล็กตรอนโวลต์ แต่เมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ดึงไอออนซึ่งมีค่าหลายกิโลโวลต์แล้วแทบจะไม่มีผลอะไร ดังนั้นค่าพลังงานของไอออนที่ขอบพลาสมามักจะไม่นำมาคิดด้วย ดังนั้นจึงพิจารณาได้ว่าไอออนถูกดึงออกจากขอบพลาสมาด้วยความเร็วเริ่มต้นเท่ากับศูนย์ ปัญหาก็คือ รูปร่างของอิเล็กโทรดที่ใช้ดึงไอออนจะต้องมีรูปร่างที่เหมาะสมเพื่อที่จะให้ได้ลำอนุภาคที่ขนานกัน (parallel beam)

ย้อนกลับไปดูปัญหาของกระแสไอออนที่ไหลภายใต้เงื่อนไขของ space charge limited ระหว่างระนาบคู่ขนานกัน อนุภาคประจุเคลื่อนที่ออกจากพื้นที่จ่ายไอออน (emitter) ด้วยความเร็วเริ่มต้นเท่ากับศูนย์

$\left(\frac{dV}{dx} = 0\right)$  ไปยังอีกระนาบหนึ่ง ศักย์ไฟฟ้าจะเปลี่ยนไปตามสมการ Child-Langmuir's equation (Forrester, 1988)

$$\begin{aligned} \chi &= \left(\frac{J}{\chi}\right)^{2/3} x^{1/3} \\ \chi &= \frac{4\epsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2e}{M}} \end{aligned} \quad (2.4)$$

ซึ่ง



รูปที่ 2.4 แสดงการเคลื่อนที่ของลำอนุภาคไอออนใน 2 มิติ (Forrester, 1988)

เริ่มต้นพิจารณาในกรณีของลำอนุภาคไอออนเคลื่อนที่ออกจากช่องสลิตหรือเป็นปัญหาใน 2 มิติ ตามรูปที่ 2.4 อนุภาคทั้งหมดเคลื่อนที่ออกจากระนาบ  $x=0$  โดยอนุภาคเคลื่อนที่อยู่เฉพาะในบริเวณ  $y < 0$  การอธิบายปัญหาดังกล่าวทำได้โดยการแก้สมการลาปลาซ (Laplace's equation) ใน 2 มิติเพื่อหาค่า  $(x, y)$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0 \quad (2.5)$$

โดยมีเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition)

$$\frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad \text{ที่ } y = 0$$

และ  $V(x, 0) = f(x)$  (2.6)

สำหรับอนุภาคที่เคลื่อนที่ออกจากจุดหยุดหนึ่งที่สนามไฟฟ้าเท่ากับศูนย์

$$f(x) = \left(\frac{J}{\chi}\right)^{2/3} x^{1/3} \quad (2.7)$$

เนื่องจากเป็นปัญหาใน 2 มิติ ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเชิงซ้อนได้

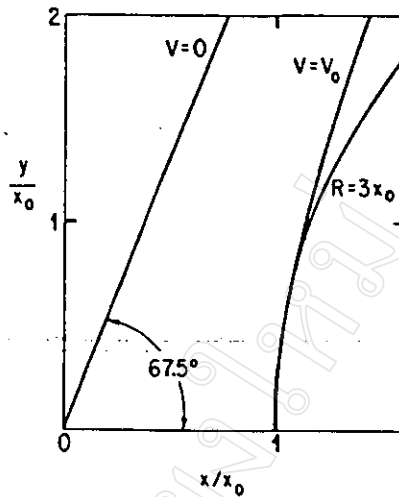
$$V + jW = f(x + jy) \quad (2.8)$$

เมื่อ  $j$  เป็นหน่วยจินตภาพมีค่าเท่ากับ  $\sqrt{-1}$

$$f(x + jy) = \left(\frac{J}{\chi}\right)^{2/3} (x + jy)^{1/3} \quad (2.9)$$

โดยทั้งส่วนจริงและส่วนจินตภาพสอดคล้องกับสมการลาปลาซ ดังนั้นไม่ว่าจะแทน  $j$  ด้วย  $-j$  จะไม่มีผลต่อค่า  $V$  เพราะฉะนั้นถ้าแทน  $y$  ด้วย  $-y$  ก็น่าจะไม่มีผลอะไร จากสมการ (2.8) และ (2.9) จะเขียนได้ว่า

$$V(x, y) = \left(\frac{J}{\chi}\right)^{2/3} (x^2 + y^2)^{1/3} \cos\left(\frac{4}{3} \tan^{-1} \frac{y}{x}\right) \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.5 แสดงเส้นศักย์ไฟฟ้าสมมูล(equipotential surfaces) ที่สอดคล้องกับ space charge limited ของลำอนุภาคจากช่องสลิต(Forrester, 1988)

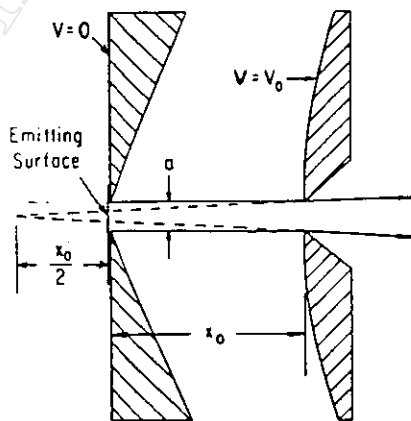
ที่  $V = 0$  ได้ว่า  $\frac{4}{3} \tan^{-1} \frac{y}{x} = \frac{\pi}{2}$  เส้นศักย์ไฟฟ้าสมมูล(equipotential) ทำมุมกับแกน x เท่ากับ  $\frac{3\pi}{8}$  หรือ 67.5 องศา ดังแสดงในรูปที่ 2.5

ถ้าให้ 
$$V_0 = V(x_0, 0) = \left(\frac{J}{\chi}\right)^{2/3} x_0^{4/3} \tag{2.11}$$

หารสมการ(2.10) ด้วยสมการ(2.11) จะได้ว่า

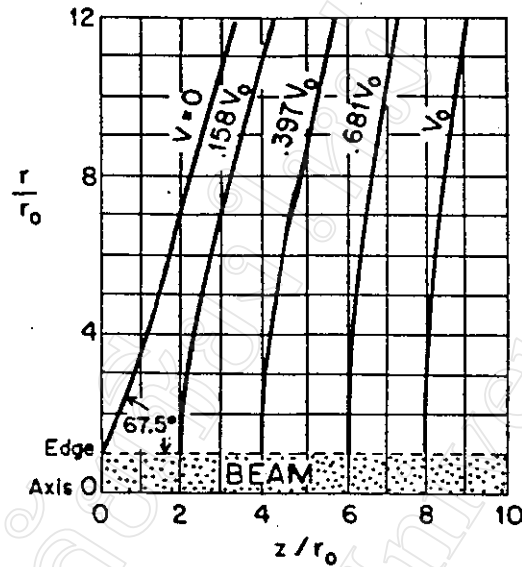
$$\frac{V}{V_0} = \left[ \left(\frac{x}{x_0}\right)^2 + \left(\frac{y}{x_0}\right)^2 \right]^{2/3} \cos \left( \frac{4}{3} \tan^{-1} \frac{y/x_0}{x/x_0} \right) \tag{2.12}$$

ในรูปที่ 2.5 จะแสดงเส้นศักย์ไฟฟ้าสมมูลตามสมการ(2.12) ที่ระยะ  $x=x_0$  เส้นศักย์ไฟฟ้าสมมูลจะสอดคล้องกับเส้นโค้งที่มีรัศมีเท่ากับ  $3x_0$  ดังนั้นรูปร่างของอิเล็กโทรด์ที่เหมาะสมสำหรับกรณีนี้จะเป็นไปตามรูปที่ 2.6

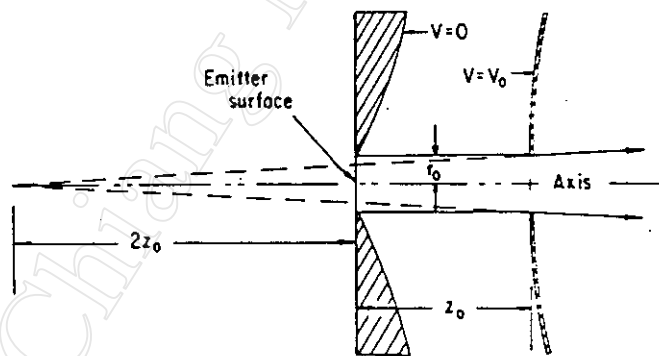


รูปที่ 2.6 รูปร่างของอิเล็กโทรด์ที่สอดคล้องกับศักย์ไฟฟ้าสมมูลในรูปที่ 2.5 (Forrester, 1988)

ในกรณีที่ทางออกเป็นรูวงกลมหรือลำอนุภาคที่ออกมาเป็นทรงกระบอกเงื่อนไขขอบเขตจะเปลี่ยนจาก  $\frac{dV}{dx} = 0$  เป็น  $\frac{dV}{dr} = 0$  การกระจายของเส้นศักย์ไฟฟ้าสมมูลและรูปร่างอิเล็กโทรมแสดงดังรูปที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ

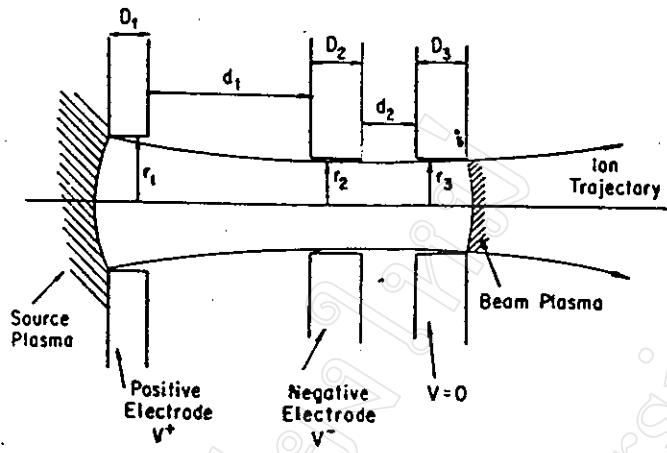


รูปที่ 2.7 แสดงเส้นศักย์ไฟฟ้าสมมูลตามเงื่อนไข space charge limited กรณีลำอนุภาควงกลม (Forrester, 1988)



รูปที่ 2.8 แสดงรูปร่างของอิเล็กโทรมที่สอดคล้องกับศักย์ไฟฟ้าสมมูลในรูปที่ 2.7 (Forrester, 1988)

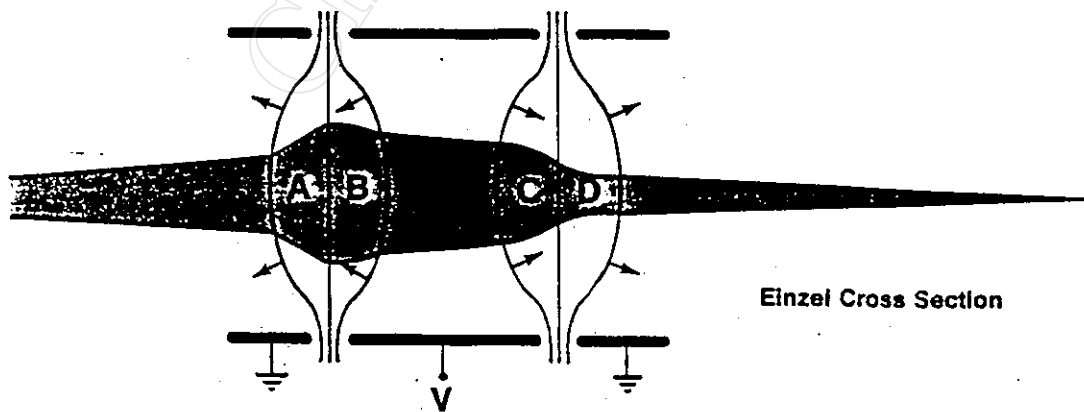
โดยปกติเพื่อให้ได้ความหนาแน่นกระแสไอออนสูงสุดและลำอนุภาคมีการกระเจิงต่ำ สัดส่วนของรัศมีรูทางออกหรือรูแอโนด (aperture),  $r_1$  ต่อระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรมของขั้วไฟฟ้าตั้ง,  $d$ , กำหนดให้มีค่าประมาณ  $\frac{r_1}{d} > 0.5$  ตามรูปที่ 2.9 ซึ่งจะทำให้สัดส่วน  $\frac{r_2}{r_1}$  ไม่มีผลต่อลำอนุภาคมากนัก แต่ปกติ  $\frac{r_2}{r_1} > 0.75$  หรือมีค่าเท่ากันเพื่อหลีกเลี่ยงการชนของลำอนุภาคกับอิเล็กโทรม



รูปที่ 2.9 การศึกษาการจัดเรียงอิเล็กโทรด์สำหรับดึงลำอนุภาคไอออน(Coupland et al., 1973)

### 2.3 Einzel lens

ในทางปฏิบัติลำอนุภาคไอออนที่ถูกดึงออกมาจะไม่ขนานกันตลอด แต่มีลักษณะบานออกจึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์สำหรับโฟกัสลำอนุภาค ที่นิยมใช้คือเลนส์ไฟฟ้าโดยใช้อิเล็กโทรด์ 3 ตัว อิเล็กโทรด์ตัวที่ 1 และตัวที่ 3 จะมีศักย์ไฟฟ้าเดียวกันโดยต่อเข้ากับกราวด์ ส่วนอิเล็กโทรด์ตัวที่ 2 ต่อเข้ากับศักย์ไฟฟ้าบวก เรียกการจัดเรียงอิเล็กโทรด์แบบนี้ว่า Einzel lens การจัดเรียงอิเล็กโทรด์และการกระจายเส้นศักย์ไฟฟ้าสมมูล(equipotential)แสดงในรูปที่ 2.10 โดยลำอนุภาคจะถูกหน่วงในช่วงระหว่างอิเล็กโทรด์ตัวที่ 1 กับอิเล็กโทรด์ตัวที่ 2 จากนั้นก็จะถูกเร่งอีกครั้งด้วยความต่างศักย์ระหว่างอิเล็กโทรด์ตัวที่ 2 และอิเล็กโทรด์ตัวที่ 3 ผลการปรับโฟกัสของ Einzel lens เกิดจากแรงเนื่องจากศักย์ไฟฟ้าที่กระทำต่ออนุภาคที่มีความเร็วต่างกัน จะเห็นว่าในบริเวณ B,C การปรับโฟกัสของลำอนุภาคจะดีกว่าบริเวณ A,D เพราะในบริเวณ B,C อนุภาคเดินทางช้ากว่าบริเวณ A,D



รูปที่ 2.10 แสดงศักย์ไฟฟ้าสมมูลและการปรับโฟกัสของ Einzel lens



## 2.4 แม่เหล็กวิเคราะห์มวล

เนื่องจาก ไอออนที่ถูกดึงออกมาจากแหล่งกำเนิด ไอออนประกอบด้วย ไอออนมากกว่าหนึ่งชนิดขึ้นไป ถึงแม้จะเป็นไอออนที่ได้จากก๊าซเฉื่อยหรือก๊าซอะตอมเดี่ยวก็ตาม นอกจากนี้ ไอออนที่สถานะประจุต่างกันแล้วยังอาจจะมีไอออนที่เกิดจากวัสดุที่ใช้ทำเป็นส่วนประกอบของแหล่งกำเนิดไอออน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ไอออนของพวกก๊าซอะตอมคู่หรือโลหะที่เป็นสารประกอบ เมื่อต้องการแยกไอออนที่ต้องการออกมาสามารถทำได้โดยอาศัยหลักการพื้นฐานทางฟิสิกส์ ในเรื่องการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กคือเมื่ออนุภาคประจุเคลื่อนที่เข้าไปในสนามแม่เหล็กโดยทำมุม  $\theta$  กับทิศของสนามแม่เหล็กจะมีแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กกระทำต่ออนุภาคประจุตามสมการ ( $F = q \vec{v} \times \vec{B} = qvB \sin \theta$ ) เมื่ออนุภาคประจุเคลื่อนที่ทำมุม  $90^\circ$  องศากับทิศของสนามแม่เหล็กแรงที่กระทำต่อสนามแม่เหล็กจะทำให้อนุภาคประจุเคลื่อนที่เป็นวงกลมรัศมีเท่ากับ  $R$

จากหลักการทางฟิสิกส์ดังกล่าวสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\vec{F}_c = \vec{F}_B \quad (2.13)$$

เมื่อ  $\vec{F}_c$  คือ แรงผ่านศูนย์กลาง

$\vec{F}_B$  คือ แรงเนื่องจากสนามแม่เหล็ก

ดังนั้นจะได้ว่า 
$$\frac{mv^2}{R} = qvB \quad (2.14)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{qB}{mv} \quad (2.15)$$

แทน  $v = \sqrt{\frac{2eV}{m}}$  ลงในสมการ(2.15) จะได้ว่า

$$\frac{1}{R} = \sqrt{\frac{q}{2}} \frac{B}{\sqrt{m}\sqrt{V}} \quad (2.16)$$

เมื่อ  $m$  คือมวลอะตอม(atomic mass)

$B$  คือสนามแม่เหล็ก

คือศักย์ไฟฟ้าแรง(extraction voltage)

$q$  คือค่าประจุมูลค่าเท่ากับ  $ne$  ;  $n = 1, 2, 3, \dots$

เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์มวล ไอออนมีทั้งแบบที่ใช้สนามไฟฟ้าและแบบที่ใช้สนามแม่เหล็ก แบบที่ใช้สนามแม่เหล็กเรียกว่า แม่เหล็กวิเคราะห์มวลไอออน(analyzing magnet) ซึ่งถือว่าเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากในการส่งผ่านไอออนที่บริสุทธิ์ไปยังเป้า

โดยสมมติว่ากึ่งกลางของลำอนุภาคไอออนเข้าและออกแม่เหล็กมีทิศตั้งฉากกับด้านข้างแม่เหล็กตามรูปที่ 2.11 โดย  $\rho$  คือรัศมีวงโคจรของไอออน,  $\phi$  คือมุมของแม่เหล็ก และ  $l$  คือระยะที่ไอออนเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก การคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กบริเวณช่องว่างขั้วสนามแม่เหล็กสามารถหาได้จากกฎของแอมป์แปร์(Ampere's law) ดังนี้

$$\oint H \cdot dl = NI \quad (2.17)$$

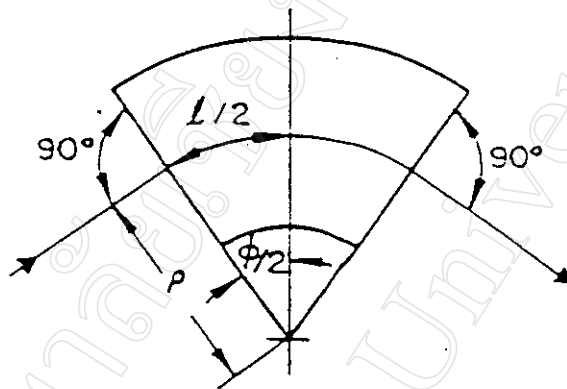
และจากความสัมพันธ์  $B = \mu H$  จะได้ว่า

$$NI = \oint \frac{B}{\mu} \cdot dl \quad (2.18)$$

$$NI = \frac{B_0 G_0}{\mu_0} + \frac{B_{Fe} L_{Fe}}{\mu_{Fe}} \quad (2.19)$$

หรือ

$$NI = \frac{B_0 G_0}{\mu_0} + \frac{B_{Fe}}{\mu_0} L_{Fe} \left( \frac{\mu_0}{\mu_{Fe}} \right) \quad (2.20)$$



รูปที่ 2.11 โคอะแกรมแสดงการทำงานของแม่เหล็กวิเคราะห์มวล (Wilson and Brewer, 1973)

ถ้าไม่พิจารณาสนามขอบ (fringing field) ด้วยเหตุที่ค่า permeability ของเหล็กมีค่าสูงมาก ๆ ดังนั้นเทอมที่สองของสมการ (2.20) จะต่ำกว่าเทอมที่หนึ่งมาก ทำให้เวลานำไปใช้งานสามารถตัดเทอมที่สองทิ้งได้แต่จะต้องบวกด้วย 5-10 เปอร์เซ็นต์ของเทอมแรกเพื่อชดเชย (Pairsuwan et al, 1993) ดังนั้นสมการ (2.20) สามารถเขียนได้ใหม่ว่า

$$NI = 1.05 \left( \frac{B_0 G_0}{\mu_0} \right) \quad (2.21)$$

เมื่อ	$B_0$ คือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่บริเวณช่องว่าง	Weber/m <sup>2</sup>
	$B_{Fe}$ คือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในเนื้อเหล็ก	Weber/m <sup>2</sup>
	$G_0$ คือระยะช่องว่างระหว่างขั้วแม่เหล็ก (pole gap)	เมตร
	$N$ คือจำนวนรอบของขดลวด	รอบ
	$I$ คือกระแสที่ไหลในขดลวด	แอมป์แปร์
	$\mu_0$ คือค่า Permeability ของสุญญากาศเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ Weber/A.m	
	$\mu_{Fe}$ คือค่า Permeability ของเหล็ก	
	$L_{Fe}$ คือ path of integration ในส่วนที่เป็นเนื้อเหล็ก	

รายละเอียดของแม่เหล็กวิเคราะห์มวลและความสัมพันธ์ระหว่าง  $m$ ,  $B$  และ  $I$  มีแสดงในภาคผนวก (ค)