

## บทนำ

ในเครื่องเร่งอนุภาคต่างๆที่นำมาใช้ในงานวิจัย โดยเฉพาะทางด้านนิวเคลียร์ฟิสิกส์และในงานทางด้านอุตสาหกรรมนั้น หัวใจสำคัญจะอยู่ที่แหล่งกำเนิดไอออน(ion source) ถ้าเครื่องเร่งอนุภาคนั้นถูกนำมาใช้ในงานด้านเคลือบฝังไอออนก็จะเรียกว่า เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์(ion implanter) แหล่งกำเนิดไอออนจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณสมบัติหรือขีดความสามารถของเครื่อง ไอออนอิมพลานเตอร์นั้น เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ได้ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยและในเชิงอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก ไม่ว่าจะเป็นงานทางด้านสารกึ่งตัวนำ(semiconductor) และงานทางด้านปรับปรุงคุณภาพของผิวโลหะ โดยการเคลือบฝังไอออน

แหล่งกำเนิดไอออนมีมากมายหลายชนิดขึ้นอยู่กับเทคนิคและวิธีการสร้างไอออนหรือเทคนิคในการทำให้เกิดการแตกตัวเพื่อฟอร์มพลาสมาขึ้นมา แหล่งกำเนิดไอออนต่างชนิดกันจะมีคุณลักษณะและเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการทำงานแตกต่างกันไป ดังนั้นในการจะเลือกแหล่งกำเนิดไอออนมาใช้หรือเลือกที่จะสร้างแหล่งกำเนิดไอออนรวมไปถึงแหล่งจ่ายไฟ(power supply) และระบบควบคุมต่างๆ(control system) จำเป็นจะต้องทำการศึกษาคุณลักษณะในการทำงานของแหล่งกำเนิดไอออนชนิดนั้นก่อนเพื่อหาเงื่อนไขในการทำงานที่ดีที่สุดของแหล่งกำเนิดไอออนนั้นๆ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการทำงานที่ดี คุณลักษณะที่สำคัญอย่างหนึ่งของของแหล่งกำเนิดไอออนก็คือ กระแสไอออน แหล่งกำเนิดไอออนที่ใช้เทคนิคแตกต่างกันไปจะให้ค่ากระแสไอออนแตกต่างกันไป

เทคนิคหนึ่งที่นิยมใช้กันมากในแหล่งกำเนิดไอออนก็คือ เทคนิคการทำให้เกิดการดิสชาร์จในก๊าซที่มีความดันต่ำเพื่อให้ได้ไอออน, อิเล็กตรอนและอนุภาคไม่มีประจุเพื่อฟอร์มพลาสมาขึ้นมา ที่นิยมใช้กันมากเนื่องจากเทคนิคที่ใช้ไม่ยุ่งยากและสลับซับซ้อนมากนัก ให้ค่ากระแสไอออนค่อนข้างสูง แหล่งกำเนิดไอออนจำพวกนี้แบ่งเป็น 2 ประเภทหลักขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของอิเล็กตรอนได้แก่ แหล่งกำเนิดไอออนประเภทแคโทดเย็น(cold cathode ion source) และแหล่งกำเนิดไอออนประเภทแคโทดร้อน(hot cathode ion source) ทั้ง 2 ประเภทนี้จะมีคุณลักษณะและเงื่อนไขในการทำงานแตกต่างกัน แหล่งกำเนิดไอออนแบบ Nielsen จัดอยู่ในประเภทแหล่งกำเนิดไอออนแบบแคโทดร้อน ซึ่งแหล่งกำเนิดไอออนประเภทนี้จะมีพารามิเตอร์ที่เป็นเงื่อนไขในการทำงานหลายตัวเช่น กระแสแอโนด, แรงดันแอโนด, ความดันก๊าซและกระแสไส้หลอดเป็นต้น โดยพารามิเตอร์ทั้งหมดมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันและมีช่วงการทำงานของมันอยู่ช่วงหนึ่ง ไอออนที่ได้จากแหล่งกำเนิดไอออนประเภทนี้ส่วนใหญ่จะเป็น ไอออนจากก๊าซแต่แหล่งกำเนิดไอออนที่ใช้กับก๊าซส่วนใหญ่จะสามารถนำมาใช้สร้างไอออนจากของแข็งได้ โดยการพัฒนาอุปกรณ์บางส่วนของแหล่งกำเนิดไอออนและสามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงๆได้ หลักการก็คือการทำให้อิออนนั้นกลายเป็น ไอออนแล้วไอออนจะไหลเข้าสู่บริเวณดิสชาร์จเพื่อให้เกิดการแตกตัวของไอต่อไป แหล่งกำเนิดไอออนแบบ Nielsen สามารถสร้างไอออนจากของแข็งได้โดยการติดตั้งเตาเผาเล็กๆ(evaporation oven) ไว้ภายนอกบริเวณดิสชาร์จ

แหล่งกำเนิดไอออนแบบ Nielsen ยังได้อาศัยหลักการสั้นของอิเล็กตรอนภายใต้อิทธิพลของทั้งสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าทำให้ประสิทธิภาพในการแตกตัวหรืออัตราการสร้างไอออน(ion

production rate) มีมากขึ้น โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่เป็นวงสว่านกลับไปกลับมาระหว่างแคโทด 2 ด้านก่อนจะไหลเข้าสู่แอโนด ทำให้อิเล็กตรอนมีช่วงเวลาอยู่ในบริเวณดิสชาร์จได้นานขึ้น

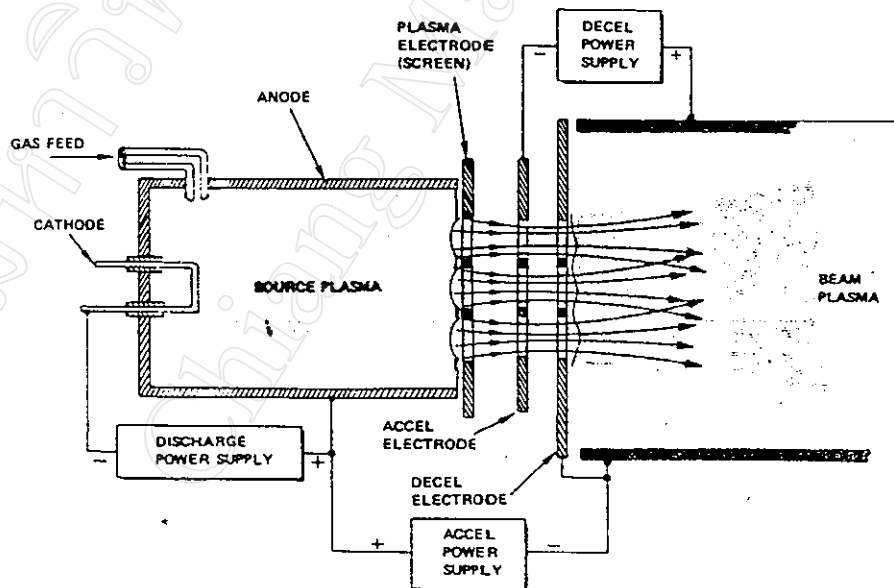
ในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ต่างๆที่เป็นเงื่อนไขในการทำงานของแหล่งกำเนิดไอออนแบบ Nielsen ของบริษัท Danfysik รุ่น 910 เพื่อให้ได้ช่วงการทำงานที่เหมาะสมโดยการสร้างไอออนจากก๊าซชนิดต่างๆเช่น ไนโตรเจน, อาร์กอนและคาร์บอนไดออกไซด์ ทั้งได้ทดลองสร้างไอออนจากของแข็งคือ โลหะแมกนีเซียม โดยการวัดกระแสไอออนที่สัมพันธ์กับพารามิเตอร์ต่างๆ ตลอดจนได้ติดตั้งแม่เหล็กวิเคราะห์มวลแบบเลี้ยวเบน 90 องศาเพื่อคัดแยกไอออนชนิดที่ต้องการไปใช้ในการเคลือบฝังไอออนต่อไป.

## บทที่ 1

### ทฤษฎีแหล่งกำเนิดไอออนแบบ Nielsen

รังสีไอออน(ion rays) ได้ถูกพบครั้งแรกโดย Goldstein ขณะที่กำลังศึกษาเรื่องการปลดปล่อยประจุของก๊าซที่ความดันต่ำ(gas discharge at low gas pressure) ต่อมา Wein ก็ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติของรังสีไอออนรวมไปถึงต้นกำเนิดลำอนุภาคไอออน(ion beam) จากอะตอมของก๊าซ แหล่งกำเนิดไอออนได้ถูกสร้างขึ้นครั้งแรกโดย Thomson แต่แหล่งกำเนิดไอออนของ Thomson มีคุณภาพไม่ค่อยดีนัก ให้ค่ากระแสไอออนต่ำและไม่มีความเสถียร หลังจากนั้นก็ได้มีการพัฒนาแหล่งกำเนิดไอออนมาเรื่อยๆ

แหล่งกำเนิดไอออนได้ถูกนำมาใช้กับเครื่องเร่งอนุภาคเพื่อใช้ในงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์มานาน โดยเฉพาะในงานวิจัยทางด้านนิวเคลียร์ฟิสิกส์ ในปีค.ศ 1963 เครื่องเคลือบฝังไอออน(ion implanter) ก็ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในงานวิจัยพวกอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ(semiconductor device) และในปีค.ศ 1970 เครื่องเคลือบฝังไอออนก็ถูกนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรม แหล่งกำเนิดไอออนถือว่าเป็นส่วนประกอบสำคัญที่สุดของเครื่องเคลือบฝังไอออน โดยเป็นส่วนที่สร้างไอออนจากก๊าซ, ของเหลวและธาตุที่เป็นของแข็งต่างๆ ประกอบด้วยชิ้นส่วนหลักสองส่วนคือ ห้องปลดปล่อยประจุ(discharge or ionization chamber) ซึ่งเป็นส่วนสร้างพลาสมา และระบบดึงไอออน(ion extraction system) เป็นระบบในการดึงไอออนออกจากพลาสมาให้มีความเร็วเพิ่มขึ้นและปรับโพกัสลำอนุภาคดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แสดง schematic ของระบบการผลิตลำอนุภาคไอออน(Forrester, 1988)

ในปัจจุบันแหล่งกำเนิดไอออนได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้หลักการปลดปล่อยประจุ(discharge) แบบต่างๆ ซึ่งอาจจำแนกได้ตามหลักการพื้นฐานทางฟิสิกส์ที่นำมาใช้ในการสร้างพลาสมา อาทิเช่น การชนด้วย

อิเล็กตรอน(electron impact), การปลดปล่อยประจุโดยการทำให้การสปาร์ก(spark discharge), หรือโดยความถี่วิทยุ(RF discharge) และการแตกตัวของประจุบนพื้นผิว(surface ionization) เป็นต้น

แหล่งกำเนิดไอออนรุ่น 910 ของบริษัท danfysik เป็นแหล่งกำเนิดไอออนแบบ Nielsen(Nielsen, 1957) ซึ่งใช้หลักการของการสั่นของอิเล็กตรอนภายใต้อิทธิพลของทั้งสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า ได้แบ่งแยกหัวข้ออธิบายดังนี้

### 1.1 กระบวนการสร้างไอออนโดยการชนด้วยอิเล็กตรอน(Electron impact ionization process)

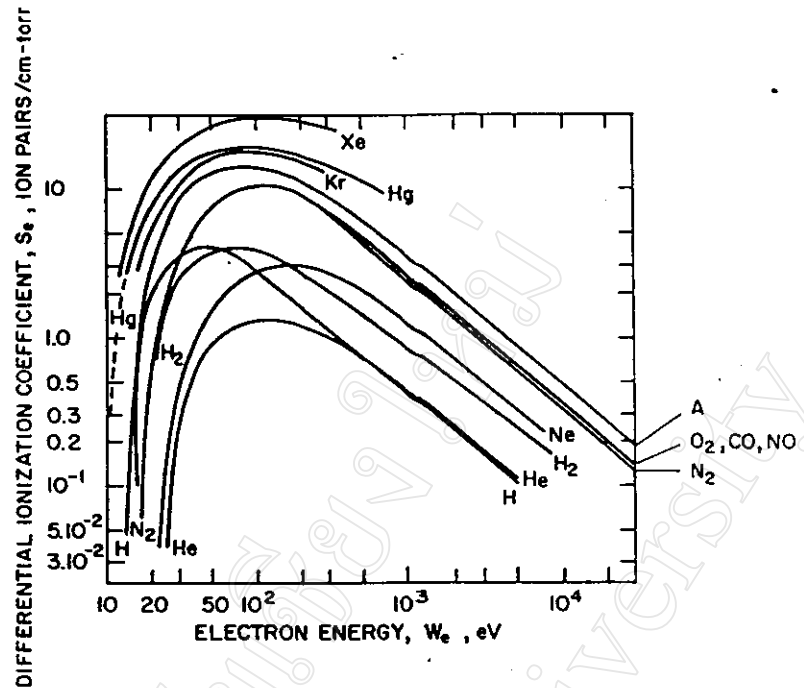
กระบวนการสร้างไอออน(ionization) ที่นำมาใช้ในการสร้างพลาสมาในแหล่งกำเนิดไอออนนั้นมีมากมาย แต่กระบวนการสร้างไอออนที่มีความสำคัญและมีประสิทธิภาพก็คือ กระบวนการสร้างไอออนโดยการชนด้วยอิเล็กตรอน(Wilson and Brewer, 1973) เพราะว่าอาศัยหลักการง่ายๆและให้ค่ากระแสไอออนสูง กระบวนการสร้างไอออนโดยการชนของอิเล็กตรอนที่ได้ถูกนำมาใช้ในทางปฏิบัติอาทิเช่น ในการปลดปล่อยประจุโดยการอาร์ค(arc discharge), โดยการใช้ความถี่คลื่นวิทยุ(RF discharge) และโดยการทำให้เกิดการสปาร์ก(spark discharge) เป็นต้น

หลักการพื้นฐานของกระบวนการสร้างไอออนโดยการชนของอิเล็กตรอนคือ อิเล็กตรอนจะถูกสร้างขึ้นและถูกเร่งให้มีพลังงานเพียงพอสำหรับทำให้อะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซเกิดการแตกตัว นั่นคืออะตอมของก๊าซได้รับการถ่ายทอดพลังงานศักย์จากการชนของอิเล็กตรอน โดยพลังงานศักย์ที่ส่งผ่านให้กับอะตอมของก๊าซมีค่าสูงกว่าค่าพลังงานในการแตกตัว,  $eV_i$  (ionization energy) ของก๊าซนั้นๆ เมื่อ  $V_i$  คือ ศักย์ไฟฟ้าในการแตกตัวของก๊าซ(ionization potential)

ในการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมของก๊าซโดยปกติการถ่ายเทโมเมนตัมสำหรับอะตอมของก๊าซจะถูกตัดทิ้งไปเพราะว่าความแตกต่างระหว่างมวลมีค่ามากเกินไป โดยมวลอะตอมของก๊าซมีค่ามากกว่ามวลของอิเล็กตรอนมากจนเกินไป ดังนั้นพลังงานจลน์ที่เพิ่มขึ้นของอะตอมของก๊าซจะไม่นำมาคิดด้วย เมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิ(primary electron)มีพลังงานมากกว่าค่าพลังงานในการแตกตัวของก๊าซก็จะทำให้อะตอมของก๊าซเกิดการแตกตัวได้ไอออนของก๊าซและอิเล็กตรอนทุติยภูมิ(secondary electron) พลังงานที่เกิดขึ้นนี้จะแสดงออกมาอยู่ในหลายรูปแบบเช่น พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนเริ่มต้นที่กระดอน(eject)ออกมา, พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่หลุดออกมา หรือการเกิดการแตกตัวครั้งที่สอง(multiple ionization) เป็นต้น

จำนวนการชนที่ทำให้เกิดการแตกตัวของอะตอมต่อหน่วยความยาวต่อหน่วยความดันเรียกว่าสัมประสิทธิ์ในการแตกตัว(differential ionization coefficient,  $S_e$ ) ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าพลังงานของอิเล็กตรอน,  $W_e$  และชนิดของก๊าซ(von Engel and Steenbeck, 1934) ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ค่าสัมประสิทธิ์ในการแตกตัว สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นได้ดังนี้

$$S_e = a(W_e - eV_i) \quad (1.1)$$



รูปที่ 1.2 กราฟแสดงประสิทธิภาพการแตกตัว ( $S_e$ ) ที่ขึ้นอยู่กับพลังงานของอิเล็กตรอน ( $W_e$ ) ที่ความดัน 1 ทรอร์ (von Engel, 1965)

เมื่อ  $a$  คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซ ดังแสดงในภาคผนวก (ก)

$W_e$  คือ พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน

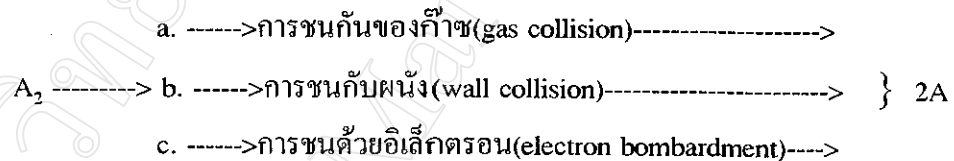
$eV$ , คือ พลังงานในการแตกตัวของก๊าซ

ตามรูปที่ 1.2 จะเห็นว่าอิเล็กตรอนที่มีพลังงานน้อยกว่าหรือมากกว่าค่าพลังงานในการแตกตัวของอะตอมหรือโมเลกุล (atomic or molecular ionization energy) มากๆ การแตกตัวไม่ค่อยมีประสิทธิภาพ ค่าพลังงานของอิเล็กตรอนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการสร้างไอออนโดยการชนของอิเล็กตรอนคืออิเล็กตรอนที่มีพลังงานเพียงไม่กี่เท่าของค่าพลังงานในการแตกตัว อิเล็กตรอนเมื่อสูญเสียพลังงานหลังจากการชนกับอะตอมของก๊าซแล้วจะมีประสิทธิภาพในการทำให้เกิดการแตกตัวเปลี่ยนไป อิเล็กตรอนเมื่อพลังงานลดลงต่ำกว่าค่าพลังงานในการแตกตัวต่ำสุด (first ionization energy) ของอะตอมจะเรียกว่า Ultimate electron แต่มีไว้จะมีเฉพาะอิเล็กตรอนที่มีพลังงานมากกว่าค่าพลังงานในการแตกตัวเท่านั้นที่สามารถทำให้เกิดการแตกตัวได้ แต่การแตกตัวของอะตอมอาจจะเกิดขึ้นได้สำหรับอิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่ำกว่าค่าพลังงานในการแตกตัว ถ้าอะตอมหรือโมเลกุลนั้นอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น (excited state) โดยการชนของอิเล็กตรอนก่อนแล้วถูกชนด้วยอิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่ำกว่าค่าพลังงานในการแตกตัวก็อาจทำให้เกิดแตกตัวได้ แต่ส่วนใหญ่เมื่ออิเล็กตรอนสูญเสียพลังงานไปเนื่องจากการชนแล้วมักจะถูกจับโดยแอโนดซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวก ดังนั้นถ้าทำให้อิเล็กตรอนสามารถอยู่ในบริเวณห้องปลดประจุ (discharge chamber) ให้นานขึ้นโอกาสที่จะเกิดการแตกตัวของก๊าซก็มีมากขึ้น วิธีการที่ได้นำมาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการแตกตัวคือการป้อนสนามแม่เหล็กในแนวแกนของห้องปลดประจุซึ่งจะได้อธิบายในหัวข้อต่อไป

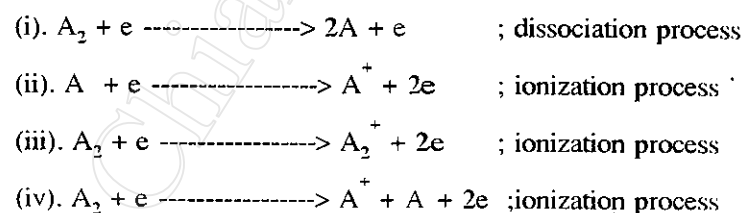
### 1.1.1 วัสดุคืบป้อนเข้าสู่แหล่งกำเนิดไอออน(Charge material)

วัสดุคืบ(charge material) ที่ป้อนให้กับแหล่งกำเนิดไอออนเพื่อสร้าง ไอออนนั้นอาจจะอยู่ในรูปของก๊าซหรือไอระเหยของของเหลวและของแข็ง ในกรณีของก๊าซสามารถแบ่งออกเป็นพวกอะตอมเดี่ยว(monoatomic) ได้แก่พวกก๊าซเฉื่อย และอีกพวกคือพวกอะตอมคู่(diatomic)เช่น อ็อกซิเจน,ฟลูออรีน, ไฮโดรเจน,ไนโตรเจน เป็นต้น ในพวกอะตอมเดี่ยวหรือก๊าซเฉื่อยพฤติกรรมไม่ซับซ้อนมากนักเพราะมันไม่ทำปฏิกิริยากับวัสดุที่ใช้ทำแหล่งกำเนิดไอออน(source component) แต่อาจจะซึม(diffuse)เข้าสู่ผนังของแหล่งกำเนิดไอออนได้ พวกอะตอมเดี่ยวหรือก๊าซเฉื่อยนี้มักถูกนำไปใช้ในการทดสอบพฤติกรรมของพลาสมาของแหล่งกำเนิดไอออน ส่วนพวกอะตอมคู่นี้ก็สามารป้อนเข้าสู่แหล่งกำเนิดไอออนได้โดยตรง แต่ไอออนที่ได้จะมีหลายชนิด ถ้าวิเคราะห์โดยการ ใช้แม่เหล็กวิเคราะห์มวล(analyzing magnet) จะได้สเปกตรัมของไอออนสองชนิดขึ้นไป ตัวอย่างเช่น ไนโตรเจนจะได้สเปกตรัมไอออนของ  $N^+$ ,  $N_2^+$  เป็นต้น ดังนั้นในพวกอะตอมคู่กระบวนการเนื่องจากการชนของอิเล็กตรอนจะมีอย่างน้อย 2 กระบวนการขึ้นอยู่กับพลังงานของอิเล็กตรอนคือ dissociation process และ ionization process

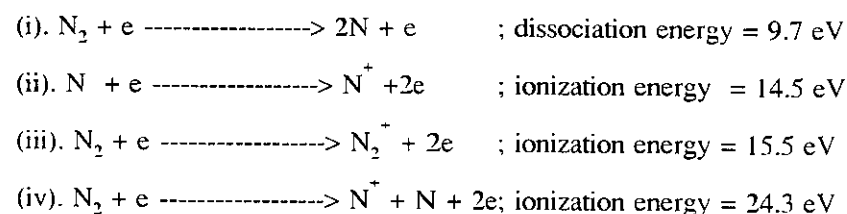
dissociation process เป็นกระบวนการที่อะตอมคู่ถูกแยกออกให้เป็นอะตอมเดี่ยว กระบวนการ dissociation ของโมเลกุลที่เกิดขึ้นในแหล่งกำเนิดไอออนปกติจะมีอยู่ 3 ทาง(Freemann and Sidenius, 1973)



แต่โดยทั่วไปกระบวนการ dissociation ที่เกิดขึ้นในแหล่งกำเนิดไอออนส่วนมากจะเกิดจากวิธีที่ 3 คือ การชนด้วยอิเล็กตรอนในกรณีนี้กระบวนการ dissociation ก็จะนำไปสู่กระบวนการแตกตัวต่อไป ดังนั้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอาจจะเป็นไปได้ดังนี้



ตัวอย่างกรณีของไนโตรเจน, $N_2$  ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการชนโดยอิเล็กตรอนได้แก่



ในกรณีเมื่อต้องการไอออนอะตอมเดี่ยว(monoatomic ion) สามารถเกิดขึ้นได้ 2 กระบวนการคือ

ก. กระบวนการ 2 ขั้น(two-step process) คือเกิดกระบวนการที่ (i) ก่อนแล้วตามด้วยกระบวนการที่ (ii)

ข. กระบวนการขั้นเดียว(one-step process) คือเกิดเพียงกระบวนการที่ (iv) เพียงอย่างเดียว ส่วนการเกิดไอออนอะตอมคู่(diatomic ion) จะเกิดเพียงกระบวนการเดียวคือกระบวนการที่ (iii) เมื่อพิจารณาจากค่าพลังงานในการแตกตัวแล้วไม่ต้องแปลกใจที่แหล่งกำเนิดไอออนส่วนมากกระแสไอออนของ  $N_2^+$  มากกว่ากระแสไอออนของ  $N^+$  (Freeman and Sidenius, 1973)

ในกรณีของของเหลวและของแข็งต้องทำให้เป็นไอระเหยก่อน ซึ่งไอระเหยนี้จะมีพฤติกรรมคล้ายกับของก๊าซอะตอมคู่แต่ปัญหาส่วนใหญ่ที่นั่นมาจากเกิดการควบแน่น(condensation) ของไอระเหย, มีการรั่วของไอระเหยและผลของการเกิดปฏิกิริยาของไอกับผนังห้องคิสซาร์จและไส้หลอด

### 1.1.2 ไส้หลอด

ส่วนใหญ่จะทำจากทังสเตน(tungsten, W) สำหรับแหล่งกำเนิดไอออนที่ใช้หลักการของแคโทดร้อน(hot cathode) ไส้หลอดจะเป็นส่วนที่จ่ายอิเล็กตรอนให้กับแหล่งกำเนิดไอออนและเป็นตัวกำหนดอายุของแหล่งกำเนิดไอออนจึงจำเป็นต้องทำความเข้าใจกับส่วนที่เป็นไส้หลอดที่ทำหน้าที่เป็นแคโทดนี้ การระเหย(evaporation) หรือการหลุดออกมาของอิเล็กตรอนจากผิวของโลหะเนื่องจากการให้พลังงานความร้อนแก่โลหะนั้นเราเรียกว่า thermionic emission (Kittel, 1966)

ในสภาวะปกติอิเล็กตรอนไม่สามารถหลุดหนีออกมาจากผิวโลหะได้ แต่เมื่อเผาไส้หลอด(heating) ก็คือการทำให้อิเล็กตรอนตัวนำ(conduction electron) มีพลังงานเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่งอิเล็กตรอนก็จะสามารถหลุดออกมาจากผิวแคโทดได้ ค่าความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอนที่ปลดปล่อยออกมา(emission current density) สามารถคำนวณได้จากสมการของ Richardson-Dushman ได้ดังนี้

$$J_{\max} = AT^2 \exp\left(-\frac{e\phi}{kT}\right) \quad (1.2)$$

เมื่อ  $A$  คือ ค่าคงที่แสดงในภาคผนวก(ก) และ  $\phi$  คือ ค่าเวริกฟังก์ชันของโลหะ(work function) พิจารณาสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อเผาไส้หลอดโดยการป้อนไฟฟ้ากระแสตรง จะได้ค่าความต้านทานของไส้หลอด,  $R_f$  และกำลังสูญเสียของไส้หลอด,  $P_f$  ดังนี้

$$R_f = \frac{V_f}{I_f} \quad \text{และ} \quad P_f = I_f \cdot V_f \quad (1.3)$$

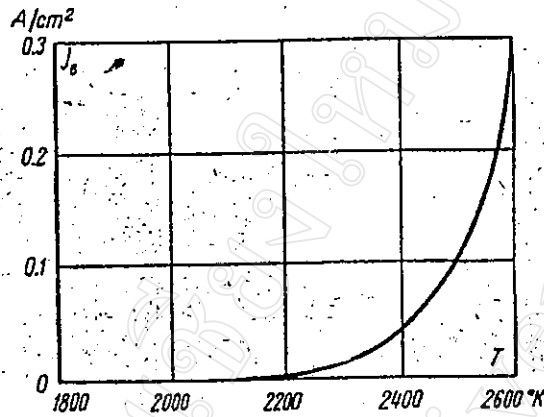
โดยที่  $I_f \cdot V_f$  คือ ค่ากระแสและศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการเผาไส้หลอด

ประสิทธิภาพของคาโทด,  $H$  นิยามได้ว่าเป็น สัดส่วนของกระแสอิเล็กตรอนที่ปลดปล่อยออกมา,  $I_e$  ต่อค่ากำลังสูญเสีย,  $P_f$

$$H = \frac{I_e}{P_f} \quad mA/W \quad (1.4)$$

เรียกสัดส่วนนี้ว่าประสิทธิภาพการปลดปล่อย,  $H$  (emission efficiency) จะเห็นว่าค่า  $J_e$ ,  $H$ ,  $T$  และอายุการใช้งานของไส้หลอดมีความสัมพันธ์กัน เมื่ออุณหภูมิของไส้หลอดเพิ่มขึ้นค่า  $J_e$  ก็จะเพิ่มขึ้นรวมทั้งค่า

$H$  ก็จะเพิ่มขึ้นแต่อายุการใช้งานจะสั้นลง แต่ถ้าลดอุณหภูมิของไส้หลอดก็จะทำให้ไส้หลอดทำงานได้นานขึ้นแต่ค่า  $J_e$  และ  $H$  จะลดลง ตัวอย่างไส้หลอดทั้งสแตนมีค่าเวิร์กฟังก์ชันเท่ากับ 4.5 โวลท์ และค่าคงที่  $A$  เท่ากับ  $70 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{K}^2$  เมื่ออุณหภูมิ,  $T$  เท่ากับ 2400 K จะได้ค่า  $J_{\max}$  เท่ากับ  $0.144 \text{ A/cm}^2$



รูปที่ 1.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอิเล็กตรอนที่ปลดปล่อยออกมากับอุณหภูมิของไส้หลอดทั้งสแตน(Zherebtsov, 1970)

เมื่อพิจารณาจากกราฟจะเห็นว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 2000 K ไม่มีการปลดปล่อยอิเล็กตรอน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นไส้หลอดสามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนได้มากขึ้น ช่วงอุณหภูมิ 2400 ถึง 2600 K เป็นช่วงที่เหมาะสมสำหรับการนำไส้หลอดทั้งสแตนไปใช้งาน โดยทั้งสแตนมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 3600 K หรือ  $3380 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ในสมการที่ (1.2) จะเห็นว่าค่า  $J_{\max}$  ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและชนิดของวัสดุที่ใช้ทำไส้หลอด ในทางปฏิบัติค่ากระแสอิเล็กตรอนที่ปลดปล่อย,  $J_e$  จะมีค่าน้อยกว่าค่ากระแสอิเล็กตรอนสูงสุด,  $J_{\max}$

$$J_e < J_{\max} \quad (1.5)$$

เนื่องจากผลของ space charge effect

## 1.2 การปลดปล่อยประจุด้วยวิธีการอาร์คที่ความดันต่ำ(Arc discharge at low pressure)

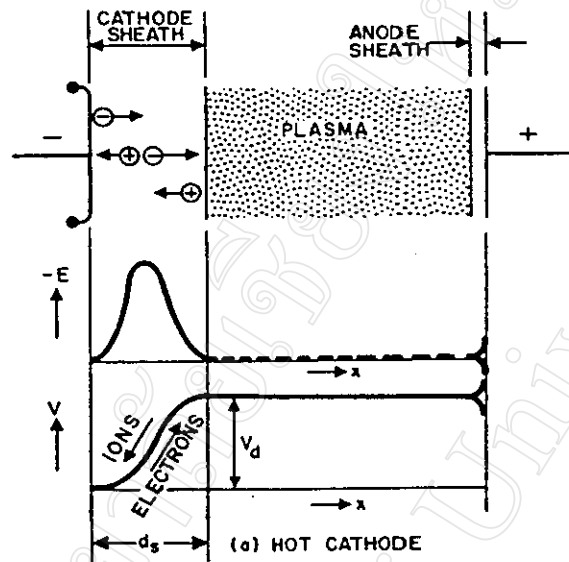
วิธีการหลักในการสร้าง ไอออนโดยการทำให้ตัวกลางซึ่งอาจจะเป็นก๊าซหรือไอระเหยแตกตัวมาๆ สามารถทำได้โดยการทำให้เกิดการปลดปล่อยประจุทางไฟฟ้า(electrical discharge) ในก๊าซ การปลดปล่อยประจุดังกล่าวเป็นผลมาจากการชนกันของอิเล็กตรอนตามที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 1.1 เพื่อให้ได้กระแสไอออนมีค่าต่อเนื่องตลอดการทำงานนั้นพลาสมาที่ได้จากการปลดปล่อยประจุนั้นจะต้องเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะเกิดขึ้นได้เพียงถ้าอิเล็กตรอนและไอออนที่สูญเสียออกจากพลาสมานั้นถูกทดแทนด้วยอิเล็กตรอนและไอออนที่สร้างจากการปลดปล่อยประจุหรืออิเล็กตรอนจากแหล่งจ่ายภายนอก ถ้าอนุภาคที่สูญเสียไปถูกชดเชยจากกระบวนการปลดปล่อยประจุของเราเรียกการปลดปล่อยประจุนั้นเป็น self-maintained discharge ซึ่งขึ้นอยู่กับกระดิสซาร์จ,  $I_0$  และมีแบบต่างๆดังนี้



$I_a < 10^{-6}$  A เรียกว่า Townsend-type discharge

$I_a < 10^{-1}$  A เรียกว่า Glow discharge

$I_a > 10^{-1}$  A เรียกว่า Arc discharge



รูปที่ 1.4 แสดงศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าระหว่างแคโทดและแอโนด(Wilson and Brewer, 1973)

เมื่ออิเล็กตรอนหลุดออกมาจากแคโทดด้วยกระแสอิเล็กตรอนที่เป็นไปตามสมการที่ (1.2) จะถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้า,  $V_d$  เมื่อจ่ายก๊าซหรือไอจำนวนน้อยๆเข้าสู่บริเวณห้องปลดประจุ(discharge chamber) ด้วยอัตราการไหลที่พอเหมาะที่จะสร้างพลาสมาได้ การปลดปล่อยประจุเนื่องจากการอาร์คก็จะเกิดขึ้นได้ หลังจากนั้นทั้งอิเล็กตรอนปฐมภูมิและอิเล็กตรอนทุติยภูมิก็อาจจะเกิดการชนกันเองหรือชนกับอะตอมของก๊าซเกิดการแตกตัวอีกครั้ง(multiple ionization) ผลจากการเกิดอัตรกิริยาเหล่านี้ทำให้อิเล็กตรอนปฐมภูมิสูญเสียพลังงานจนมีความเร็วใกล้เคียงกับความเร็วแมกซ์เวลล์(Valyi, 1977)

$$\text{ความเร็วเฉลี่ย, } \bar{v} = \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}} \quad (1.6)$$

เมื่อ  $T_e$  คือ อุณหภูมิอิเล็กตรอนเฉลี่ย(average electron temperature)

$k$  คือ ค่าคงที่ Boltzmann

$m_e$  คือ มวลอิเล็กตรอน

อิเล็กตรอนและไอออนที่สร้างขึ้นเมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสมก็จะฟอร์มอยู่ในรูปของ quasi-neutral plasma คือ สถานะของก๊าซที่มีประจุเชิงสะเทินโดยความหนาแน่นของอนุภาคภายในพลาสมาเท่ากัน( $n_e = n_i = n_0$ ) พลาสมาที่เกิดขึ้นจะไม่เกิดเต็มบริเวณห้องปลดประจุแต่ที่บริเวณผนังของห้องปลด

ประจุจะสร้างชั้นบางๆที่เรียกว่า sheath ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นได้ทั้งที่บริเวณแคโทดและแอโนดจึงเรียกว่า cathode sheath และ anode sheath ตามลำดับ

### 1.3 การเกิด sheath (sheath formation)

หลังจากพลาสมาได้ถูกฟอร์มขึ้นมา ผลเนื่องจากความต่างศักย์ที่ใส่ระหว่างแคโทดและแอโนดจะทำให้เกิดบริเวณที่เรียกว่า space-charge-limited potential รอบๆแคโทดหรือจะเรียกว่า cathode sheath ซึ่งเป็นผลมาจาก space charge effect ดังนั้นฟิสิกส์พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ดังกล่าวก็คือ ฟิสิกส์ของ space charge phenomena ซึ่งสามารถทำความเข้าใจได้โดยการแก้สมการของ Poisson (Forrester, 1988)

$$\nabla^2 V = -\rho / \epsilon_0 \quad (1.7)$$

เมื่อ  $V$  คือ ศักย์ไฟฟ้าสถิตย์

$\rho$  คือ ความหนาแน่นประจุ

$\epsilon_0$  คือ ค่า permittivity ของที่ว่าง (free space) เท่ากับ  $1/4\pi$

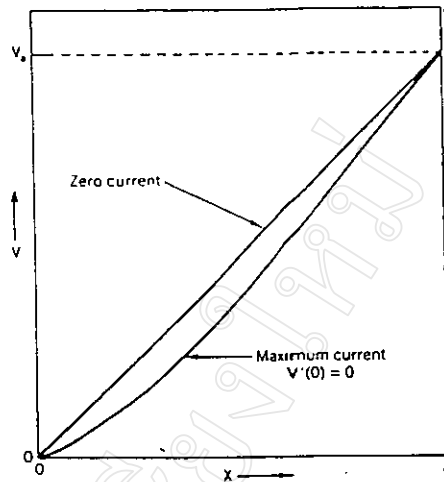
ถ้าใช้ Gaussian unit เขียนสมการ(1.7) ได้ใหม่ดังนี้

$$\nabla^2 V = -4\pi\rho \quad (1.8)$$

การหลุดออกมาของอิเล็กตรอนจากผิวโลหะ(emitter), การเคลื่อนที่ของไอออนไปยังขอบพลาสมา(plasma boundary), หรือการเร่งกระแสไอออนข้ามช่องว่างเหล่านี้ล้วนเป็นปัญหาของ space charge ดังนั้นผู้ที่ทำงานทางด้านไอออน빔ไม่ว่าจะเป็นนักฟิสิกส์หรือวิศวกรจะต้องทำการศึกษาปัญหาดังกล่าว

ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของ space charge หรือที่เรียกว่าเงื่อนไขของ space charge limited นั้นคือปรากฏการณ์ที่เกิดจากการไหลของอนุภาคประจุที่มีความหนาแน่นมากพอที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าในบริเวณที่มีกระแสไหลผ่าน เพื่อช่วยต่อความเข้าใจเราจะพิจารณาการไหลของอิเล็กตรอนระหว่างระนาบ 2 ระนาบที่ขนานกัน(plane parallel) ซึ่งเปรียบเทียบได้กับการไหลของอิเล็กตรอนจากระนาบแคโทดไปยังระนาบแอโนด โดยสมมติว่าอิเล็กตรอนถูกปลดปล่อยออกมาจากแคโทดด้วยความเร็วเริ่มต้นเท่ากับศูนย์ปัญหาดังกล่าวได้ถูกอธิบายครั้งแรกโดย Child(1911) และทำซ้ำอีกครั้งโดย Langmuir(1913)

เราจะพิจารณาปัญหาของมิติเดียวดังแสดงในรูปที่ 1.5 ซึ่งแสดงการกระจายของศักย์ไฟฟ้าระนาบทั้งสอง โดยศักย์ไฟฟ้าของตัวจ่ายอิเล็กตรอน(emitter)หรือแคโทดที่ตำแหน่ง  $x = 0$  มีค่าเท่ากับศูนย์ และของตัวจับประจุ(collector)หรือแอโนดที่ตำแหน่ง  $x = a$  ให้ค่าศักย์ไฟฟ้าไว้ที่  $V_0$  กราฟเส้นบนแสดงการกระจายของศักย์ไฟฟ้าเมื่อกระแสไหลเป็นศูนย์ เมื่อกระแสไหลมีค่าเพิ่มมากขึ้นผลของ space charge ทำให้ศักย์ไฟฟ้าลดลงตามกราฟเส้นล่างจนกระทั่งสนามไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ที่  $x = 0$  ในกรณีนี้ที่อิเล็กตรอนถูกปลดปล่อยออกมาด้วยความเร็วเริ่มต้นเป็นศูนย์ นิยามของค่ากระแสไหลสูงสุดและคำตอบของปัญหาจะสอดคล้องกัน



รูปที่ 1.5 แสดงการกระจายของศักย์ไฟฟ้า (potential distribution) ระหว่างระนาบอิเล็กโทรดคู่ขนาน (Forrester, 1988)

สำหรับปัญหาใน 1 มิติ สมการ Poisson ในสมการ (1.7) เขียนได้เป็น

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1.9)$$

ให้  $\rho = -\frac{J_e}{v}$  (1.10)

เมื่อ  $J_e$  คือ ความหนาแน่นกระแสอิเล็กตรอน

$v$  คือ ความเร็วของอิเล็กตรอน

เนื่องจากกระแสไหลในทิศทางเดียวและมีค่าสม่ำเสมอทำให้ค่า  $J_e$  ไม่ขึ้นกับระยะห่าง  $x$  และความเร็ว  $v$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$v = \sqrt{\frac{2eV}{m}} \quad (1.11)$$

เมื่อ  $m$  คือ มวลอิเล็กตรอน แทนค่า  $\rho$  และ  $v$  ลงในสมการ(1.9) จะได้ว่า

$$\frac{d^2V}{dx^2} = \frac{J_e}{\epsilon_0} \sqrt{\frac{m}{2eV}} \quad (1.12)$$

เงื่อนไขเริ่มต้นได้แก่

$$\frac{dV}{dx} = 0 \text{ และ } V = 0 \text{ ที่ตำแหน่ง } x=0 \quad (1.13)$$

จากสมการ(1.12) คูณด้านซ้ายของสมการด้วย  $2 \frac{dV}{dx} dx$  และด้านขวาของสมการด้วย  $2dV$  แล้วอินทิเกรตพร้อมด้วยเงื่อนไขเริ่มต้นในสมการ(1.13) จะได้ว่า

$$\int 2 \frac{d^2V}{dx^2} \frac{dV}{dx} dx = \frac{J_e}{\epsilon_0} \sqrt{\frac{m}{2e}} \int \frac{2}{\sqrt{V}} dV$$

$$\int 2 \frac{d}{dx} \left( \frac{dV}{dx} \right) \frac{dV}{dx} dx = \frac{J_e}{\epsilon_0} \sqrt{\frac{m}{2e}} \int \frac{2}{\sqrt{V}} dV$$

$$\left( \frac{dV}{dx} \right)^2 = 4 \frac{J_e}{\epsilon_0} \left( \frac{mV}{2e} \right)^{1/2} \quad (1.14)$$

ค่าคงที่ของการอินทิเกรตเป็นศูนย์ตามเงื่อนไขในสมการ(1.13)

$$\frac{dV}{dx} = 2 \sqrt{\frac{J_e}{\epsilon_0} \left( \frac{mV}{2e} \right)^{1/4}} \quad (1.15)$$

ในสมการ(1.15) ตัวแปร  $V$  และ  $x$  สามารถแยกอิสระต่อกันได้และอินทิเกรตสมการ(1.15) ได้ดังนี้

$$\int \frac{1}{V^{1/4}} dV = 2 \sqrt{\frac{J_e}{\epsilon_0} \left( \frac{m}{2e} \right)^{1/4}} \int dx \quad (1.16)$$

$$V = \left( \frac{m}{2e} \right)^{1/3} \left( \frac{J_e}{\epsilon_0} \right)^{2/3} \left( \frac{3x}{2} \right)^{4/3} \quad (1.17)$$

เมื่อ  $V = V_a$  ที่  $x = a$  จะได้ว่า

$$J_e = \frac{4\epsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2e}{m}} \frac{V_a^{3/2}}{a^2} \quad (1.18)$$

หรือ

$$J_e = \frac{1}{9\pi} \sqrt{\frac{2e}{m}} \frac{V_a^{3/2}}{a^2} \quad (1.19)$$

สมการ(1.18)และ(1.19)เรียกว่า สมการของ Child (Child's equation) หรือบางทีเรียกว่า สมการของ Child-Langmuir เพื่อความสะดวกสมการ(1.18) เขียนได้ใหม่ว่า

$$J_e = \chi \frac{V_a^{3/2}}{a^2} \quad (1.20)$$

โดยค่า  $\chi$  เรียกว่า ค่าคงที่ Child ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\chi = \frac{4\epsilon_0}{9} \left( \frac{2e}{m} \right)^{1/2} \quad (1.21)$$

ในกรณีของกระแสไอออนจะได้ว่า

$$J_i = \frac{4\epsilon_0}{9} \left( \frac{2e}{M} \right)^{1/2} \frac{V_a^{3/2}}{a^2} \quad (1.22)$$

เพราะฉะนั้น

$$\frac{J_e}{J_i} = \sqrt{\frac{M}{m}} \quad (1.23)$$

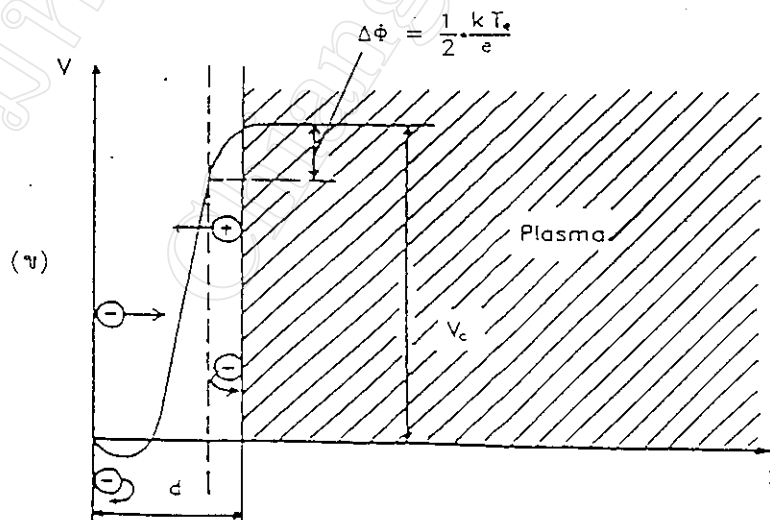
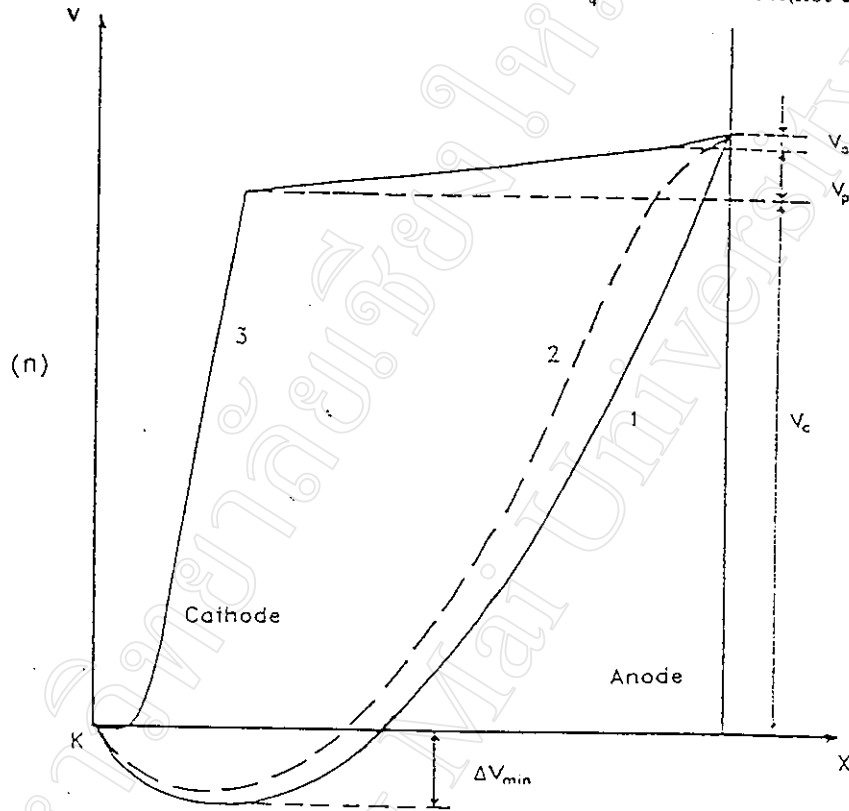
เมื่อ  $M$  คือมวลของไอออน ไอออนที่มีมวลเบาที่สุดคือโปรตอน จากสมการ(1.23) จะพบว่า

$$\frac{J_e}{J_i} \geq 200 \quad (1.24)$$

นั่นคือบริเวณภายใน sheath จะมีกระแสไหล 2 กระแสสวนทางกัน ทำให้ sheath ไม่เป็นกลางทางไฟฟ้า เมื่ออิเล็กตรอนและไอออนมีค่าเพิ่มขึ้น ศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณใกล้ๆพลาสมา ได้รับอิทธิพลจาก ion

space charge ในขณะที่ศักย์ไฟฟ้าในบริเวณ sheath ได้รับอิทธิพลจาก electron space charge การรวมตัวของไอออนที่มีความเร็วต่ำกับอิเล็กตรอนอาจเกิดขึ้นได้โดยสังเกตการเปล่งแสงที่คาโทด

เมื่อเราพิจารณารณีของหลอดสูญญากาศที่อยู่ในมีอิเล็กโทรดคู่ขนานและมีความดันก๊าซต่ำ ค่าความต่างศักย์ภายในหลอดจะไม่ใช่ไปตามสมการ(1.17) เลยทีเดียวอาจพิจารณาได้จากรูปที่ 1.6 ซึ่งจะแสดงการกระจายของศักย์ไฟฟ้าภายในหลอดที่มีการปลดประจุแบบแคโทดร้อน(hot cathode discharge)



รูปที่ 1.6 (ก) แสดงการกระจายศักย์ไฟฟ้าใน hot cathode discharge ตามความเป็นจริง; เส้นที่ 1 เมื่ออยู่ในสภาวะสูญญากาศ; เส้นที่ 2,3 เมื่อความดันก๊าซเพิ่มขึ้น

(ข) แสดงรายละเอียดของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น(Langmuir, 1929)

พิจารณารูปที่ 1.6 ก) เมื่อ  $V_p$  คือศักย์ไฟฟ้าในย่านพลาสมา,  $V_a$  คือศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำลงในย่านแอโนด,  $V_c$  คือศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำลงในย่านแคโทด และ  $d$  คือระยะห่างของ sheath สามารถอธิบายได้ว่า ไม่ใช่อิเล็กตรอนทุกตัวที่หลุดออกจากแคโทดจะสามารถทะลุผ่าน sheath เข้าสู่แอโนดได้ทุกตัว จะมีเฉพาะอิเล็กตรอนที่มีพลังงานมากกว่าค่ากัมแพงศักย์ไฟฟ้า  $e\Delta V_{\min}$  เท่านั้นที่สามารถเข้าสู่แอโนดได้นอกนั้นจะย้อนกลับเข้าสู่แคโทดหมด ซึ่งเป็นผลจาก space charge effect ที่ไม่ยอมให้กระแสอิเล็กตรอนมีค่าเพิ่มขึ้น ค่ากัมแพงศักย์ไฟฟ้า  $e\Delta V_{\min}$  จะเกิดขึ้นโดยอัตโนมัติในการเกิดการดีสชาร์จ(discharge) ดังนั้นเงื่อนไขที่ทำให้  $\frac{dV}{dx} = 0$  จะเป็นจริงที่  $x = x_{\min}$  แต่ไม่ใช่ที่  $x = 0$  ดังที่ได้พิจารณามาแล้วก่อนหน้านี้ ดังนั้นถ้าศักย์ไฟฟ้า,  $V$  ที่ป้อนเข้าไปมีค่ามากพอ นั่นคือ  $V \gg \Delta V_{\min}$  และค่า  $d \gg x_{\min}$  แล้วความหนาแน่นของกระแสตามสมการ(1.18)และ(1.19) จะเท่ากับกระแสอิเล็กตรอนที่ปลดปล่อยออกมาจากแคโทด อิเล็กตรอนทุกตัวจะไปถึงแอโนด ซึ่งกระแสอิเล็กตรอนที่ไหลดังกล่าวเรียกว่า กระแสอิ่มตัว(saturated current) ตามสมการ(1.2) ในกรณีนี้เงื่อนไขที่ทำให้  $\frac{dV}{dx} = 0$  ที่  $x = 0$  ก็จะเป็นเงื่อนไขที่ถูกต้อง ถ้าหากค่า  $V$  มีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกและสนามไฟฟ้า,  $\frac{dV}{dx} > 0$  จะเรียกการทำงานของแคโทดช่วงนี้ว่า ช่วงถูกกระตุ้น(stimulated) คราวนี้เมื่อภายในบรรจุก๊าซที่มีความดันต่ำและค่า  $V$  มีค่ามากกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าในการแตกตัว(ionization potential) ของก๊าซ ไอออนก็จะถูกสร้างขึ้นและผลของ space charge ของไอออนจะทำให้ศักย์ไฟฟ้าภายในหลอดเปลี่ยนไปดูได้จากกราฟเส้นที่ 2 ในรูปที่ 1.6 ก) และหากให้ความดันก๊าซมีค่ามากพอจะเกิดย่านที่แตกต่างกัน 3 ย่านดังแสดงในกราฟเส้นที่ 3 ความกว้างของศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณแคโทดลดลงนี้เกือบเท่ากับค่าระยะทางเคลื่อนที่อิสระ(mean free path) ของอิเล็กตรอน ดังนั้นในบริเวณนี้อิเล็กตรอนและไอออนวิ่งสวนทางกันเรียกย่านนี้ว่า double sheath เพราะครึ่งหนึ่งเป็นผลมาจาก electron space charge และอีกครึ่งหนึ่งเป็นผลมาจาก ion space charge โดยทั้งอิเล็กตรอนและไอออนถูกปลดปล่อยด้วยความเร็วเริ่มต้นเป็นศูนย์ที่ระยะห่างทั้งสอง ที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ  $V_a$

การอธิบายปัญหาดังกล่าวทำได้ 2 วิธี วิธีแรกทำได้โดยการแก้สมการ Poisson ที่ทำไว้โดย Langmuir(1929) และอีกวิธีอาศัยเทคนิคของสมดุลโมเมนตัม(momentem balance) ซึ่งทำไว้โดย Forrester (1981) ในที่นี้จะขอใช้วิธีของ Forrester เพื่อหลีกเลี่ยงความยุ่งยากในการอินทิเกรต ให้พิจารณาระนาบใดๆ ระหว่าง  $x = 0$  และ  $x = a$  เป็นแหล่งจ่ายไอออน โดยไอออนที่ปลดปล่อยออกมาจากระนาบใดๆ นั้นมีความเร็ว  $\sqrt{\frac{2e(V_a - V)}{M}}$  โดย  $V$  คือศักย์ไฟฟ้าที่ระนาบใดๆ นั้น และ  $M$  คือมวลของไอออน ดังนั้นสมดุลโมเมนตัมรวมหาได้จากการให้แรงที่กระทำบนแคโทดเท่ากับแรงที่กระทำบนระนาบที่สมมติขึ้นมาเขียนได้ดังนี้

$$\frac{J_i}{e} M \sqrt{\frac{2eV_a}{M}} = \frac{J_e}{e} m \sqrt{\frac{2eV}{m}} + \frac{J_i}{e} M \sqrt{\frac{2e(V_a - V)}{M}} - \frac{\epsilon_0 V'^2}{2} \quad (1.25)$$

ซึ่ง  $\frac{\epsilon_0 V'^2}{2}$  คือ electrostatic stress บนระนาบปลดปล่อยไอออน

เมื่อให้  $V = V_a$  ที่  $V' = 0$  สมการ(1.25) จะเขียนได้ว่า

$$\frac{J_i}{J_e} = \sqrt{\frac{m}{M}} \quad (1.26)$$

ให้กำจัด  $J_i$  ในสมการ(1.25) โดยการแทนด้วยสมการ(1.26) และให้  $\eta = \frac{V}{V_a}$  และ  $\xi = \frac{x}{a}$  ดังนั้น

$$\eta'^2 = \frac{16}{9} \left( \frac{J_e}{J_0} \right) (\sqrt{1-\eta} - 1 + \sqrt{\eta}) \left( \frac{1}{a^2} \right) \quad (1.27)$$

โดย

$$J_0 = \frac{4\epsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2e}{m}} \frac{V_a^{3/2}}{a^2} \quad (1.28)$$

ซึ่งก็คือสมการของ Child ที่สอดคล้องกับศักย์ไฟฟ้า  $V_a$  และระยะห่าง  $a$  อินทิเกรตสมการ(1.28) เมื่อ  $\eta = 0$  ที่  $\xi = 0$  จะได้ว่า

$$\int_0^\eta (\sqrt{1-s} - 1 + \sqrt{s})^{-1/2} ds = \frac{4}{3} \sqrt{\frac{J_e}{J_0}} \xi \quad (1.29)$$

จาก  $\eta = 1$  ที่  $\xi = 1$  จะได้ว่า

$$\frac{J_e}{J_0} = \frac{9}{16} \left[ \int_0^1 (\sqrt{1-s} - 1 + \sqrt{s})^{-1/2} ds \right]^2 \quad (1.30)$$

การอินทิเกรตในสมการ(1.30) ทำได้ทาง numerical จะได้ว่า

$$\frac{J_e}{J_0} = 1.865 \quad (1.31)$$

ดังนั้น

$$J_e = 1.865 J_0 = 1.865 \left( \frac{4\epsilon_0}{9} \right) \left( \frac{2e}{m} \right)^{1/2} \frac{V_a^{3/2}}{a^2} \quad (1.32)$$

$$J_i = 1.865 J_0 = 1.865 \left( \frac{4\epsilon_0}{9} \right) \left( \frac{2e}{M} \right)^{1/2} \frac{V_a^{3/2}}{a^2} \quad (1.33)$$

ถ้า  $V = V_a$  มีค่าเปลี่ยนไปจะไม่มีผลต่อกระแสไอออนแต่จะมีผลต่อค่า  $a$  นั่นคือจะทำให้ผนังของพลาสมา(plasma boundary) เคลื่อนไป ดังนั้นเราสามารถใช้สมการ(1.32)และ(1.33) หาความกว้างของ double layer,  $a$  ได้ดังนี้

$$\frac{a}{a_0} \approx 1.36 \quad (1.34)$$

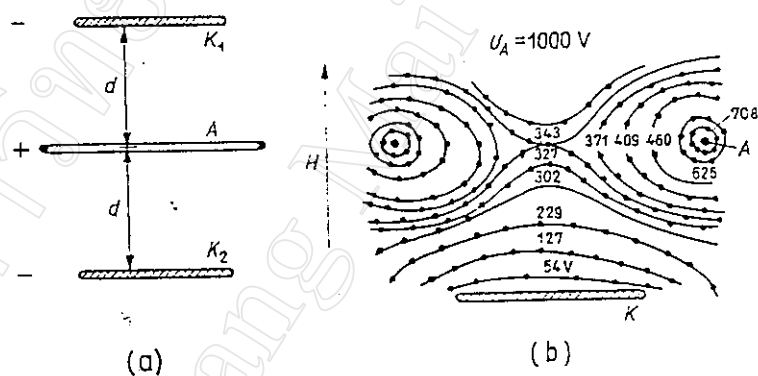
โดย  $a_0$  คือ ระยะทาง Child-Langmuir ที่สอดคล้องกับการไหลในทิศทางเดียวของ  $J_e$  หรือ  $J_i$

sheath ไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะที่แคโทดและแอโนดเท่านั้นแต่ยังเกิดขึ้นที่ผนังของหลอดคิซซาร์จ (discharge tube) ซึ่งจะสร้างชั้นบางๆที่ผนังหลอดคิซซาร์จส่วนคำอธิบายก็คล้ายๆกันคือ ในพลาสมาของการคิซซาร์จแบบอาร์คั้นอุณหภูมิของก๊าซไอออน,  $T_i$  มีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิของก๊าซอิเล็กตรอน,  $T_e$  : ( $T_i \ll T_e$ ) เพราะไอออนสูญเสียพลังงานไปมากกว่าในการชนระหว่างไอออนกับอะตอมเนื่องจากมวลของไอออนมีค่าใกล้เคียงกับมวลของอะตอม ขณะที่การชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับไอออนนั้นจะมีพลังงานเพียงเล็กน้อยที่ส่งผ่านไปให้กับไอออนเพราะมวลของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยกว่ามวลของไอออนมากๆ

ดังนั้นอิเล็กตรอนจึงมีความเร็วสูงกว่าความเร็วของไอออนทำให้อิเล็กตรอนสามารถหลบหนีออกจากพลาสมาไปยังผนังของหลอดดิสชาร์จได้มากกว่าไอออน ทำให้ผนังของหลอดดิสชาร์จมีการฟอร์มชั้นประจุลบ ผลของชั้นประจุลบดังกล่าวไอออนจะถูกเร่งไปยังผนังของหลอดดิสชาร์จขณะที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังผนังข้างล่างดังนั้นจะมีการฟอร์ม sheath ขึ้น

#### 1.4 แหล่งจ่ายไอออนแบบอาร์คดิสชาร์จที่ใช้แคโทดร้อนและการสั่นของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก

ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการปลดประจุ(discharge) หรือการเพิ่มประสิทธิภาพในการแตกตัวของก๊าซในห้องปลดประจุ เพื่อสร้างพลาสมาสามารถทำได้โดยการทำให้อิเล็กตรอนที่ปล่อยออกมาจากขบวนการแคโทดร้อนนั้นมีค่า relaxation time เพิ่มขึ้นซึ่งก็คือการทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่อยู่ภายในห้องปลดประจุได้นานขึ้นก่อนที่จะถูกจับโดยแอโนดหรือก่อนที่จะหนีออกจากพลาสมา โดยวิธีการนี้อิเล็กตรอนก็จะสั่น(oscillate)กลับไปกลับมาในบริเวณพลาสมา เรียกการสร้างพลาสมาอย่างนี้ว่า การปลดประจุด้วยการสั่นของอิเล็กตรอน(oscillating electron discharge) ซึ่งการเคลื่อนที่ดังกล่าวเป็นผลมาจากบ่อพลังงานศักย์(potential well) ที่ถูกสร้างขึ้นจากการจัดเรียงอิเล็กโทรดตามรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.7 แสดงการดิสชาร์จแบบ Penning โดยการสั่นของอิเล็กตรอน a) แสดงการจัดเรียงอิเล็กโทรด; b) แสดงการกระจายของศักย์ไฟฟ้า (Valyi, 1977)

อีกวิธีหนึ่งที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการแตกตัวและทำให้ความหนาแน่นของไอออนค่าเพิ่มขึ้นคือการใส่สนามแม่เหล็กค่าคงที่(uniform magnetic field) เข้าไปในแนวแกนห้องปลดประจุหรือในทิศทางขนานกับสนามไฟฟ้าของการปลดประจุ ซึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนและไอออนเคลื่อนที่เป็นวงกลมทิศตรงกันข้ามด้วยรัศมี

$$r_e = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mU}{e}} \quad (1.35)$$

$$r_i = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2MU}{n_e}} \quad (1.36)$$



เมื่อ  $U$  คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เร่งอิเล็กตรอน

$r_c$  คือรัศมีวงโคจรของไอออนความเร็วต่ำที่มีประจุ  $n_e$  มวล  $M$

การป้อนสนามแม่เหล็กเข้าไปในบริเวณก๊าซเกิดการแตกตัวก็เพื่อป้องกันอิเล็กตรอนหนีออกจากบริเวณดังกล่าว แต่เนื่องจากมวลของไอออนมีค่ามากกว่ามวลของอิเล็กตรอนมากๆทำให้กรณีสนามแม่เหล็กอ่อนๆจะมีผลต่อไอออนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับอิเล็กตรอน ผลของสนามแม่เหล็กที่ไปลดการสูญเสียอนุภาคประจุโดยเฉพาะอิเล็กตรอนนั้นสามารถอธิบายได้ 2 สาเหตุคือ

ก. ผลจาก collimating effect ของสนามแม่เหล็กนั้นคือการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นวงกลมด้วยรัศมีที่น้อยกว่ารัศมีของแอโนด เมื่อเพิ่มสนามแม่เหล็กเข้าไปจนถึงค่าหนึ่งจะทำให้ความเข้มข้นทั้งของอิเล็กตรอนและไอออนมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นคอลัมน์แคบๆรอบแกนห้องดิซาร์จหรือรอบแกนแอโนดทรงกระบอก โดยมีรัศมีประมาณ  $r_c$  ตามสมการ(1.35)

ข. ผลจากอัตราการแพร่(diffusion) ในแนวรัศมีลดลงตามทฤษฎีการแพร่(diffusion theory) การแพร่จะลดลงตามทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กซึ่งสอดคล้องกับสมการ(Valyi, 1977)

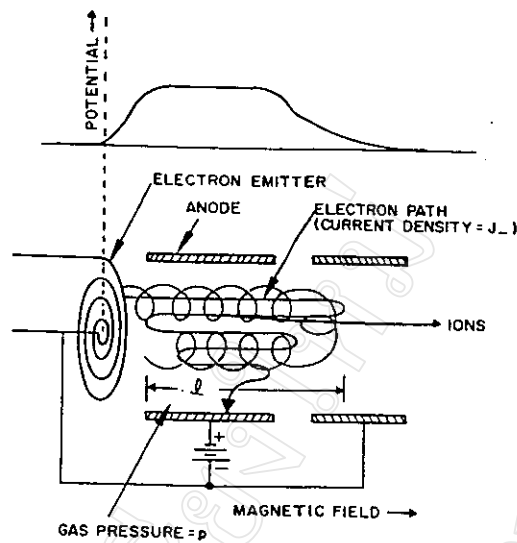
$$D_H = \frac{D_{H=0}}{H^2} \quad (1.37)$$

เมื่อ  $D_{H=0}$  คือค่าคงที่ของการแพร่

$H$  คือสนามแม่เหล็ก

ผลของการป้อนสนามแม่เหล็กเข้าไปจะทำให้ผลลัพท์คล้ายกับการเพิ่มความดันก๊าซเข้าไปในบริเวณดิซาร์จหรือการจ่ายก๊าซเข้าไปมากขึ้นคือมีผลทำให้เกิดการแตกตัวของก๊าซมากขึ้น แต่เมื่อความดันก๊าซเพิ่มมากขึ้นจะมีผลทำให้สมดุลภายในพลาสมาเปลี่ยนไปซึ่งจะทำให้พลาสมาดับไป แต่การใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปทำให้สามารถลดความดันก๊าซหรือปริมาณก๊าซให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมได้โดยปราศจากการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอนุภาคภายในสมดุลพลาสมา ดังนั้นอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าจะเคลื่อนที่เป็นวงส่ววน(helical path) รอบเส้นแรงแม่เหล็กและสั่นตามแนวแกนดิซาร์จดังแสดงในรูปที่ 1.8 ผลก็คือทำให้อิเล็กตรอนอยู่ในบริเวณดิซาร์จได้นานขึ้น

แหล่งจ่ายไอออนที่อาศัยหลักการสั้นของอิเล็กตรอนภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้ามีการจัดเรียงอิเล็กโทรดและการกระจายศักย์ไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 1.7 การจัดเรียงอิเล็กโทรดในลักษณะนี้เรียกว่า การจัดแบบ penning (Penning type) จะประกอบไปด้วยระนาบอิเล็กโทรด  $K_1, K_2$  ดังแสดงในรูปที่ 1.7a.) ซึ่งด้านหนึ่งจะทำหน้าที่เป็นแคโทดร้อนและอีกด้านเป็นแคโทดสำหรับผลิตอิเล็กตรอน(anti-cathode) โดยทั้งสองมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากันและมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบเทียบกับอิเล็กโทรด A ซึ่งมีรูปร่างเป็นวงหรือทรงกระบอก(ring-shape electrode or cylindrical anode) และสนามแม่เหล็กมีทิศตามแนวแกนของแอโนด สนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดจะจับอิเล็กตรอนเข้าไปหาอิเล็กโทรด A ซึ่งทำหน้าที่เป็นแอโนด ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่เป็นวงส่ววน(helix) รัศมีการเคลื่อนที่สูงสุดของอิเล็กตรอนจะต้องเล็กกว่ารัศมีของแอโนด ถ้าสนามแม่เหล็กมีค่าสูงพอจะทำให้



รูปที่ 1.8 ภาพแสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายใต้อิทธิพลของทั้งสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในห้องดิซาร์จ (Wilson and Brewer, 1973)

อิเล็กตรอนไม่สามารถไปชนกับแอนโนดได้ แต่จะเคลื่อนที่ไปยังอิเล็กโทรด K อีกด้านหนึ่งศักย์ไฟฟ้าลบของอิเล็กโทรด K จะผลักอิเล็กตรอนย้อนกลับ กระบวนการเช่นนี้จะเกิดซ้ำๆ จนกระทั่งจำนวนการชนมากพอที่จะไปลดพลังงานของอิเล็กตรอนจนกระทั่งไปชนและถูกจับโดยแอนโนด จำนวนการสั่นของอิเล็กตรอนจะเป็นไปตามสมการ (Valyi, 1977)

$$v = \frac{\bar{x}}{2d} \quad (1.38)$$

โดยที่

$$\bar{x} = \frac{1}{\omega_{ie} + \omega_e p} \quad (1.39)$$

เมื่อ  $\bar{x}$  คือ ระยะทางการเคลื่อนที่เฉลี่ยของอิเล็กตรอน

$\omega_{ie}, \omega_e$  คือ โอกาสของการชนแบบไม่ยืดหยุ่นและแบบยืดหยุ่น (inelastic and elastic collision)

$p$  คือ ความดันก๊าซ

$d$  คือ ระยะระหว่างแอนโนดและคาโทด

นั่นคือระยะทางเคลื่อนที่อิสระเฉลี่ย (mean free path) ของอิเล็กตรอนและจำนวนการสั่นของอิเล็กตรอนเป็นส่วนสำคัญกับโอกาสการเกิดการชนแบบยืดหยุ่นและแบบไม่ยืดหยุ่น ตัวอย่างเช่น อิเล็กตรอนพลังงาน 100 eV เมื่ออยู่ในตัวกลาง  $N_2$  ก๊าซ จะได้ว่า  $\bar{x}_{N_2} \cong 140 \text{ cm}$ ,  $\nu_{N_2} \cong 6$  ขณะที่เมื่ออยู่ในตัวกลาง  $H_2$  ก๊าซจะได้ว่า  $\bar{x}_{H_2} = 500 \text{ cm}$ ,  $\nu_{H_2} = 20$

สังเกตการกระจายของศักย์ไฟฟ้ามีค่าลดลงตามแนวรัศมีไปยังแนวแกนดิซาร์จเป็นผลทำให้ไอออนที่มีประจุบวกไหลไปยังแนวแกนดิซาร์จ ดังนั้นความเข้มข้นของไอออน (ion concentration) มีค่ามากที่สุดที่บริเวณแนวแกนดิซาร์จและสามารถเพิ่มขึ้นได้อีก โดยการเพิ่มค่าสนามแม่เหล็กเข้าไป ใน

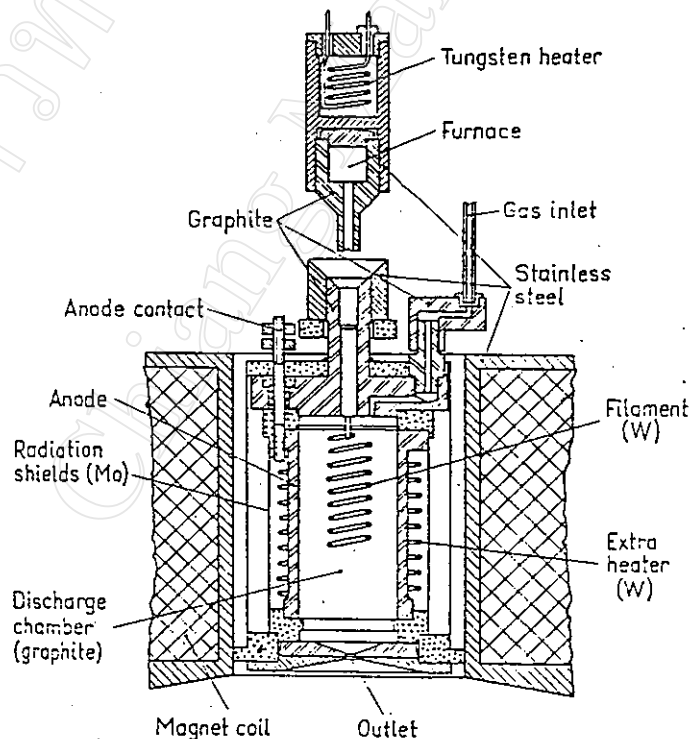
บรรดาแหล่งกำเนิดไอออนที่เป็นชนิดอาร์คดิซาร์จนั้นชนิดที่อาศัยหลักการการสั่นของอิเล็กตรอนจะให้ค่าความหนาแน่นไอออนสูงกว่าแหล่งกำเนิดไอออนชนิดอื่นประมาณ 2 เท่าหรือมากกว่า

### 1.5 การสร้างไอออนจากของแข็ง

แหล่งกำเนิดไอออนชนิดที่ใช้การดิซาร์จในก๊าซ(gas discharge ion source) ส่วนใหญ่แล้วสามารถนำมาพัฒนาใช้สร้างไอออนจากของแข็งได้ โดยการปรับปรุงชิ้นส่วนบางส่วนให้เหมาะสมคือแทนที่จะใช้ก๊าซป้อนเข้าไปก็เปลี่ยนมาใช้ไอของสารแล้วไอของสารก็จะถูกทำให้แตกตัวแล้วฟอร์มพลาสมาขึ้นมาตามกระบวนการที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น ดังนั้นปัญหาที่สำคัญสำหรับการสร้างไอออนจากของแข็งนั้นมีอยู่ 2 ประการด้วยกันคือ

- (i). การทำให้ของแข็งกลายเป็นไอที่ความดันเหมาะสมและการส่งผ่านไอไปยังห้องดิซาร์จ
- (ii). การทำให้ไอของสารนั้นแตกตัวแล้วสร้างสภาวะพลาสมาขึ้นมา

การทำของแข็งให้กลายเป็นไอนั้นสามารถทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับชนิดของแหล่งกำเนิดไอออนนั้นวิธีที่ง่ายที่สุดก็คือการนำสารที่ต้องการแยกไอออนนั้นมาเผาโดยตรงภายในเตาเผา(evaporation oven) ซึ่งอาจจะอยู่ภายในหรือภายนอกห้องดิซาร์จก็ได้โดยอาศัยความร้อนจากขดลวดอีกชุดเพื่อจ่ายความร้อน แต่วิธีนี้ก็มีข้อจำกัดอยู่มากมายอาทิเช่น สารที่ต้องการนำมาแยกไอออนนั้นจะต้องมีจุดหลอมเหลวต่ำหรือ



รูปที่ 1.9 แสดงโครงสร้างของห้องดิซาร์จและเตาเผา(oven) ของแหล่งกำเนิดไอออนแบบ Nielsen (Valyi, 1977)

ต้องการอุณหภูมิในการทำให้กลายเป็นไอไม่สูงมากนักซึ่งก็ขึ้นอยู่กับชนิดของแหล่งกำเนิดไอออนด้วยว่า แหล่งกำเนิดไอออนชนิดนั้นสามารถทำงานที่ช่วงอุณหภูมิเท่าไรและต้องเป็นธาตุที่ไม่เป็นอันตราย ส่วนวิธีอื่นๆที่นำมาใช้ในสร้างไอออนจากของแข็งนั้นก็อาทิเช่น การชนด้วยไอออนหรืออิเล็กตรอน, หรือโดยวิธีการอาร์คคิสซาร์จแล้วไอของโลหะนั้นก็ยังสามารถทำให้เกิดการแตกตัวด้วยวิธีการเช่นเดียวกัน

เตาเผา นั้นถือได้ว่าเป็นส่วนประกอบที่สำคัญสำหรับการสร้างไอออนจากของแข็งเพราะทำหน้าที่เป็นส่วนทำให้สารที่ต้องการกลายเป็นไอ สำหรับแหล่งกำเนิดไอออนแบบ Nielsen เตาเผาได้ทำการติดตั้งไว้ภายนอกห้องคิสซาร์จดังแสดงในรูปที่ 1.9 ส่วนกลไกการทำงานของแหล่งกำเนิดไอออนจะเหมือนการสร้างไอออนจากก๊าซ ในส่วนของเตาเผานั้นประกอบไปด้วยส่วนประกอบ 2 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 1.9 ส่วนบนเป็นส่วนให้ความร้อนโดยอาศัยขดลวดแทนทาลัม และอีกส่วนอยู่ด้านล่างเป็นส่วนสำหรับวางสาร (charge material) มีเกลียวสามารถยึดติดกับส่วนบนได้ การใช้เตาเผาเล็กๆ (small crucible) นี้ทำให้โลหะที่ต้องการสามารถป้อนเข้าสู่เตาเผาได้เร็วและง่าย อีกทั้งแหล่งกำเนิดไอออนแบบ Nielsen นี้ยังได้ติดตั้งประตูปิดล็อกสุญญากาศ (vacuum lock) ทำให้เวลาจะเปลี่ยนสารไม่ต้องปิดสุญญากาศทั้งหมดหรือไม่ต้องปิดปั๊มสุญญากาศ ดังนั้นแหล่งจ่ายไอออนชนิดนี้มักถูกนำไปใช้กับพวกสารกัมมันตรังสี (radioactive) สำหรับเตาปฏิกรณ์เพราะเป็นสารที่มีครึ่งชีวิตสั้น และเตาเผาที่ใช้ก็มี 2 แบบคือ ชนิดที่ทำจากสแตนเลสและชนิดที่ทำจากกราฟไฟต์ขึ้นกับอุณหภูมิที่ต้องการ ส่วนตัววัดอุณหภูมินั้นใช้เทอร์มอคัปเปิล (thermocouple) จะสัมผัสอยู่กับส่วนบนของเตาเผา

ปัญหาความมีเสถียรในการทำงานสำหรับการสร้างไอออนจากของแข็งนั้นเป็นปัญหาสำคัญที่ต้องคำนึงถึงได้แก่

- ก. ปัญหาการควบแน่นของไอโลหะ (condensation) ในท่อลำเลียง (inlet tube) และบริเวณผนังห้องคิสซาร์จ
- ข. อัตราการกลายเป็นไอของสารนั้นต้องมากกว่าอัตราการส่งผ่านไอของสารไปยังห้องคิสซาร์จ
- ค. เงื่อนไขในการส่งผ่านไอของสารไปยังห้องคิสซาร์จควรเป็นอิสระกับปริมาณของสารที่ใส่เข้าไปในเตาเผา

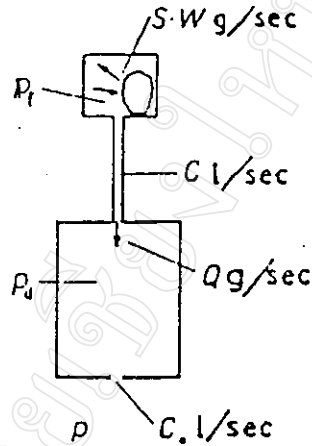
เงื่อนไขความมีเสถียรในการทำงานให้พิจารณาจากรูปที่ 1.10 คือความดันในห้องคิสซาร์จ,  $P_d$  ต้องสูงกว่าความดันวิกฤต,  $P_{min}$  (threshold pressure) เล็กน้อย (Nielsen, 1957)

$$P_d > P_{min} \quad (1.40)$$

ความดันวิกฤตหรือความดันต่ำสุด,  $P_{min}$  ขึ้นอยู่กับค่าโอกาสในการเกิดการแตกตัวและรูปร่างของห้องคิสซาร์จ สำหรับกรณีแหล่งจ่ายไอออนแบบ Nielsen ความดันต่ำสุดมีค่าประมาณ  $2 \times 10^{-4}$  mbar เมื่อเงื่อนไขในสมการ (1.40) เป็นจริงแล้วกระแสไอออนจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อความดันเปลี่ยนไปเล็กน้อยแต่โดยปกติความดันในห้องคิสซาร์จจะพยายามรักษาให้อยู่ใกล้กับค่าความดันต่ำสุดเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการทำงานสูงสุด

ให้  $P_r$  คือความดันในเตาเผา

- $P_d$  คือความดันดิสชาร์จ
- $P$  คือความดันบริเวณทางออกลำอนุภาคหรือบริเวณเร่งไอออน
- $C$  คือค่า conductance ของท่อระหว่างเตาเผากับห้องดิสชาร์จ
- $C_0$  คือค่า conductance ของช่องทางออก(anode hole)



รูปที่ 1.10 แสดงความดันในบริเวณต่างๆในแหล่งกำเนิดไอออน(Nielsen, 1957)

โดยการประมาณว่า

$$P_f \gg P_d \quad \text{และ} \quad P_d \gg P \tag{1.41}$$

จะได้อัตราการไหล, Q ดังนี้

$$Q = P_f \cdot C = P_d C_0 \quad \mu\text{/sec} \tag{1.42}$$

$$\text{หรือ} \quad Q = 5.87 \times 10^{-8} M \cdot P_f \cdot C \quad \text{g/sec} \tag{1.43}$$

โดย  $P$  มีหน่วยเป็นไมครอน(Micron),  $C$  มีหน่วยเป็นลิตรต่อวินาที(l/sec), และ  $M$  คือมวลโมเลกุลมีหน่วยเป็นกรัม

ดังนั้นถ้า  $P_d$  มีค่าคงที่ แล้ว  $Q$  จะมีค่าคงที่ด้วย

$$P_f \propto \frac{1}{C} \tag{1.44}$$

อัตราการกลายเป็นไอ,  $W$  ( $\text{g cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$ ) เขียนได้ดังนี้

$$W = D - 0.5 \log T - \frac{A}{T} \quad \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1} \tag{1.45}$$

เมื่อ  $A, D$  เป็นค่าคงที่

สามารถพิจารณาเงื่อนไขในการทำงานของเตาเผาได้เป็น 2 กรณีดังนี้

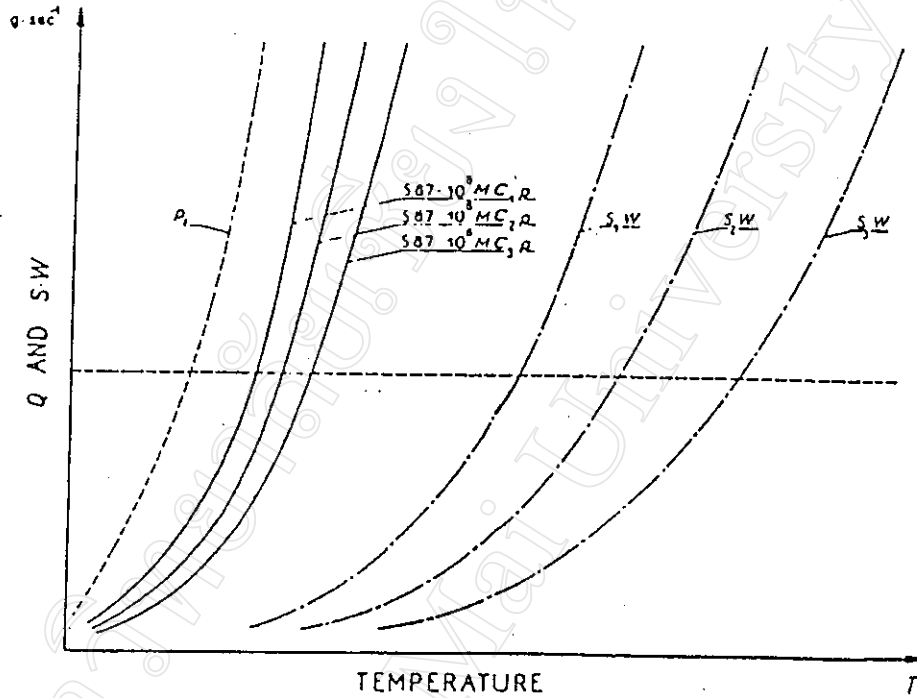
(i).  $Q \ll S \cdot W \quad \text{g} \cdot \text{sec}^{-1}$

เมื่อ  $S$  คือ พื้นที่ผิวของโลหะที่นำมาใช้แยกไอออน(charge material) สามารถคำนวณหาความดันของเตาเผาในสภาวะสมดุลความดันโดยอาศัยสมการของ Clausius-Clapeyron equation

$$\log P_f = \frac{-A}{T} + B \tag{1.46}$$

ให้ A, B เป็นค่าคงที่

พิจารณาจากกราฟรูปที่ 1.11 แสดงความสัมพันธ์ของความดันที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เส้นที่ขีดคั่นคู่กับความสัมพันธ์ตามสมการ(1.43),  $Q = C \cdot P_f$  สำหรับค่า  $C_1 > C_2 > C_3$



รูปที่ 1.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของไอกับอุณหภูมิของเตาเผา(Nielsen, 1957)

จากสมการ(1.42)และ(1.46) สามารถดิฟเฟอเรนทิเอตแล้วเขียนได้ว่า

$$\frac{dQ}{Q} = \frac{dP_f}{P_f} = \text{const} \tan t \cdot \frac{1}{T^2} dT \tag{1.47}$$

ดังนั้นท่อที่มีความเหนียวนำ(conductance, C) น้อยจะต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าเพื่อรักษาความไม่แตกต่าง(ตามกราฟรูปที่ 1.11 เส้นที่ขีด) ที่อุณหภูมิสูงๆค่าคงที่ของอุณหภูมิ(constant temperature) ในสมการ(1.47) มีค่าน้อยกว่าและสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ดีกว่า

(ii).  $Q \approx S \cdot W \quad \text{g} \cdot \text{sec}^{-1}$

ในที่นี้อัตราการระเหยกลายเป็นไอ  $S \cdot W \quad \text{g} \cdot \text{sec}^{-1}$  ทะลุผิวของโลหะจะไปจำกัดอัตราการไหล, Q และข้อจำกัดนี้จะเปลี่ยนไปตามปริมาณและสถานะของสารที่ใช้เช่นเดียวกับอุณหภูมิ ความหมายก็คือ การปรับเปลี่ยนของอุณหภูมิเป็นสิ่งที่ต้องการสำหรับกรณีนี้ เพื่อรักษาให้อัตราการไหลดีที่สุดขณะทำงาน

กรณีที่ I อุณหภูมิจะถูกรักษาให้มีค่าคงที่ ดังแสดงในกราฟรูปที่ 1.11 (เส้นจุดประ) สำหรับกรณี  $S_1 > S_2 > S_3$

จากความสัมพันธ์เบื้องต้นสามารถสรุปได้ว่า

(i). เงื่อนไขสำหรับการทำงานให้มีความเสถียรนั้น ต้องใช้ท่อแคบและยาวระหว่างเตาเผากับห้องคิสซาร์จ แต่อย่างไรก็ตามถ้าความหนึ่ยหนา, C มีค่าต่ำจนเกินไปจะทำให้ยากที่จะรักษาให้อุณหภูมิของเตาเผามีค่าสูงตามที่ต้องการได้

(ii). ถ้าต้องการให้อุณหภูมิของเตาเผาที่มีค่าคงที่จะใช้สาร(charge material) เป็นจำนวนมาก โดยค่า C เท่าเดิมเพื่อที่จะทำให้ได้อุณหภูมิมีค่าเท่าเดิม เมื่อการทำงานใกล้สิ้นสุด จำนวนสารที่ลดลงจบเงื่อนไข  $Q \ll S \cdot W$  ใช้ไม่ได้ ดังนั้นเมื่อ S ลดลงจำเป็นจะต้องเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเพื่อรักษาให้ Q มีค่าคงที่

(iii). โดยปกติถ้าใช้จำนวนสารน้อยๆก็ยากที่จะหาเงื่อนไขในการทำงานที่มีความเสถียรได้ ในที่นี้ค่า Q ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสาร, S และอุณหภูมิที่ใช้ ตัวอย่างเช่น แอนติโมนี(Antimony) ที่น้อยกว่า 5 มิลลิกรัม ผลที่ได้ออกมาค่อนข้างจะไม่ดีแต่ถ้าใช้จำนวนมากกว่า 10 มิลลิกรัมขึ้นไปจะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า เมื่ออุณหภูมิของเตาเผาที่ต้องใช้กับสารที่มีค่าต่ำกว่า  $200^\circ\text{C}$  ซึ่งก็เป็นการยากที่จะควบคุมอุณหภูมิให้ดีได้

รายละเอียดของสารประกอบที่ใช้ในการสร้างไอออนชนิดต่างๆมีแสดงไว้ในภาคผนวก (ข)