

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 การเคลือบฝังผิวด้วยพลาสมา (plasma immersion ion implantation; PIII)

การเคลือบฝังผิวด้วยพลาสมา (plasma immersion ion implantation; PIII) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงผิวของวัสดุเทคนิคหนึ่งๆ ที่เริ่มเข้ามามีบทบาทต่ออุตสาหกรรมการผลิตเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ในปัจจุบัน⁽¹⁷⁾ เทคนิคดังกล่าวได้พัฒนาขึ้นเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ.1987 โดย J.R.Conrad สามารถใช้เคลือบสารลงบนวัสดุเป่าเช่นเดียวกับเทคนิคการเคลือบสารแบบเก่า เช่น การระเหยสาร (evaporation) การสปัตเตอร์ริง (sputtering) แต่มีพลังงานสูงกว่า

ในเทคนิค PIII เป่าหรือวัสดุที่จะนำมาเคลือบด้วยสารใด จะถูกนำไปวางในพลาสมาของสารนั้น ภายใต้ความดันระดับมิลลิทอร์และถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้าลบค่าสูง (ระดับหลายร้อยโวลต์ จนถึงหลายสิบล้านโวลต์)⁽¹⁸⁾ ทำให้อิเล็กตรอนในพลาสมาที่อยู่ใกล้กับผิวของเป่า ถูกสนามไฟฟ้าลบที่ไบอัสผลักออกจากเป่า ภายในระยะเวลาของความถี่พลาสมาของอิเล็กตรอน หรือเวลาที่เป็นส่วนกลับของความถี่พลาสมาของอิเล็กตรอน ($\omega_{pe}^{-1} \approx ns$)

$$\omega_{pe}^{-1} = (\epsilon_0 m_e / e^2 n_e)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

โดยเป็นเวลาที่พลาสมา สามารถกันสนามไฟฟ้าไบอัสที่รบกวนได้ เหลือไว้แต่ขีดของอนุภาคไอออน ศักย์ไฟฟ้าลบของเป่าจะเร่งให้อนุภาคไอออนเข้าชนเป่าภายในเวลา inverse ion plasma frequency ทำให้ศักย์ไฟฟ้าไบอัสเป่าลดลง (ω_{pi}^{-1})⁽¹⁷⁾ ดังรูปที่ 2.1

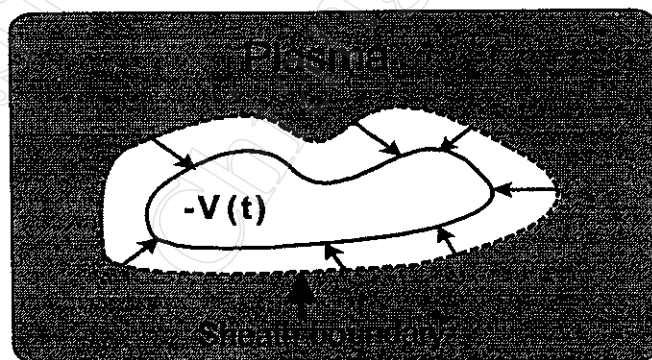
$$\omega_{pi}^{-1} = (\epsilon_0 m_i / e^2 n_i)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

ซึ่งมีระยะเวลานานกว่าเวลาที่อิเล็กตรอนถูกผลักออก เพราะอนุภาคไอออนมีมวลมากกว่าอิเล็กตรอน โดยทั่วไปศักย์ไฟฟ้าไบอัสเป่าจะมีลักษณะเป็นพัลส์ เพื่อขจัดปัญหาต่างๆ เช่น การอาร์กที่เป่า จำกัดขนาดของขีด เมื่อไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้าสูง เป็นต้น แต่สำหรับในกรณีที่พลาสมาถูกสร้างขึ้น ในลักษณะพัลส์ จะสามารถไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้าแบบดิส (DC) ได้ ในการ

ประยุกต์ใช้งานนั้นสามารถควบคุมพลังงานในการชนเป้าได้จากขนาดของศักย์ไฟฟ้าไบอัสเป้า ซึ่งในทางปฏิบัติ การไบอัสเป้ามักมีข้อจำกัดในพลังงาน เพราะเมื่อพลาสมามีความหนาแน่นสูง จะเกิดการสปาร์คที่เป้าได้ง่าย จึงทำให้มีพลังงานต่ำกว่าการเร่งอนุภาค จากระบบดึงอนุภาคของ หัวกำเนิดไอออนในระบบการเคลื่อนย้ายไอออนซึ่งมีพลังงานระดับหลายร้อยกิโลอิเล็กตรอนโวลต์ แต่ระบบ PIII ก็มีคุณสมบัติที่โดดเด่นและน่าสนใจหลายประการ คือ

- สามารถทำให้ได้ Large implantation ion flux ง่าย⁽¹⁹⁾
- สามารถควบคุมพลังงานได้ด้วยขนาดของศักย์ไบอัสเป้า⁽¹⁹⁾
- เป็นระบบ nonline-of-sight จึงสามารถปฏิบัติการร่วมกับระบบ PIII หรือ deposition แบบต่าง ๆ ได้⁽²⁰⁾

ในปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยี PIII มาประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงผิวต่างๆ ของวัสดุ เช่น การสึกหรอ (wear) ความฝืด (friction) ความแข็ง (hardness)⁽²¹⁾ การสึกกร่อน (abrasion) สภาพการนำไฟฟ้า (conductivity) และสภาพความต้านทาน (resistivity)⁽²²⁾ สำหรับ หัวกำเนิดพลาสมาที่ใช้ในระบบ PIII มีหลายชนิด เช่น RF plasma source⁽²²⁾, Microwave ion source, Glow discharge source⁽¹³⁾ แต่หัวกำเนิดที่เราให้ความสนใจคือ หัวกำเนิดพลาสมาโลหะชนิดอาร์กในสุญญากาศ หรือ เอ็ม วี วี เอ (Metal Vapor Vacuum Arc, MEVVA) เพราะมีคุณสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ ได้แก่ มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน สามารถผลิตไอออนโลหะได้หลาย species มี charge states สูง กระแสที่ผลิตได้มีค่าสูงในระดับแอมแปร์ (5-10% ของ กระแสอาร์ก) และสามารถผลิตพลาสมาของธาตุได้แทบทุกชนิดในตารางธาตุ



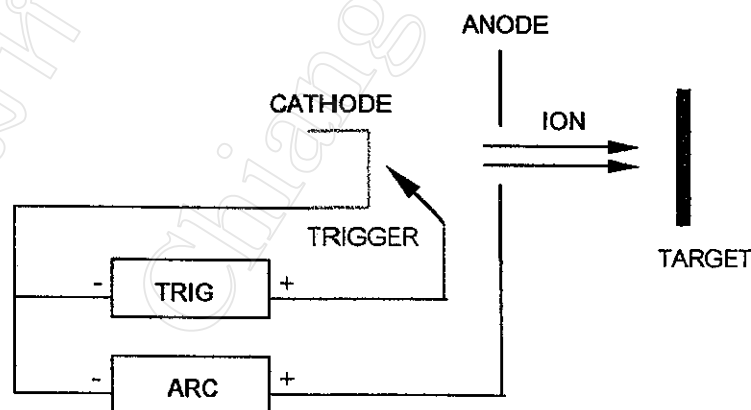
รูปที่ 2.1 แสดงทิศการเคลื่อนที่ของอนุภาคไอออนใน PIII

2.2 เครื่องกำเนิดไอออนชนิดอาร์กในสุญญากาศ (MEVVA)

หัวกำเนิด MEVVA ถูกพัฒนาขึ้นเป็นครั้งแรกโดย I.G. Brown และคณะแห่ง Lawrence Berkley Laboratory ในปี ค.ศ. 1985⁽³⁾ เพื่อใช้ผลิตพลาสมาของโลหะ มีการศึกษากลไกทางฟิสิกส์ ปรับปรุงและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จนสามารถนำไปประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลาย สำหรับ PIII แล้ว หัวกำเนิดพลาสมาเป็นส่วนประกอบหลักส่วนแรกที่จะกล่าวถึง โดยมีหลักการดังต่อไปนี้

2.2.1 หลักการของเครื่องกำเนิดพลาสมาโลหะชนิดอาร์กในสุญญากาศ (MEVVA)⁽²⁴⁾

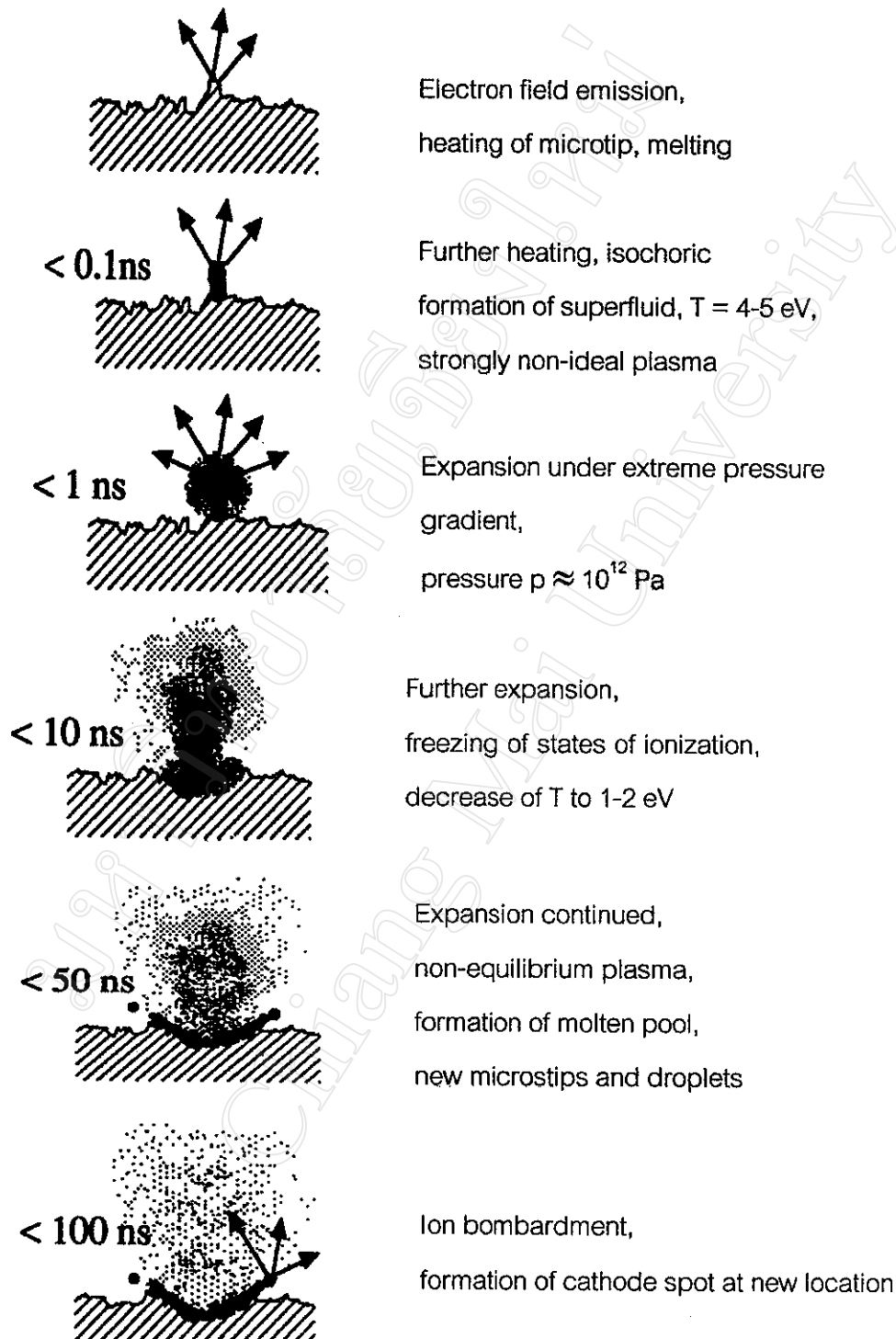
หัวกำเนิด MEVVA เป็นเครื่องผลิตพลาสมาวิธีการอาร์กผิวโลหะภายในสุญญากาศ โดยอาศัยกลไกการปลดปล่อยอิเล็กตรอนด้วยสนามไฟฟ้าแรงสูง (high field electron emission) กล่าวคือ พลาสมาจะถูกสร้างขึ้นที่ผิวแคโทดด้วยการอาร์กจากโวลต์เตจแรงสูงระหว่างขั้วแคโทด (cathode) โลหะบริสุทธิ์ กับขั้วทริกเกอร์อิเล็กโตรด (trigger electrode) ที่เป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูง ที่ถูกคั่นห่างจากกันด้วยฉนวนที่มีความหนาเพียงเล็กน้อย (1-2 mm) แล้วพลาสมาที่เกิดขึ้นบริเวณผิวแคโทดจะเพิ่มจำนวนและความหนาแน่น เมื่อมีกระแสอาร์กเกิดขึ้นระหว่างขั้วแคโทดกับแอโนดที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกหรือทรงกรวย แล้วเคลื่อนตัวผ่านรูของแอโนดซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1-2 cm ไปยังวัสดุเป้า ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างวงจรพื้นฐานของส่วนกำเนิดพลาสมาของหัวกำเนิดไอออนชนิด MEVVA พร้อมภาคจ่ายไฟต่างๆ

กระบวนการอาร์กบริเวณผิวโลหะแคโทดให้กลายเป็นพลาสมา เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นภายใต้ความดันประมาณ 10^{-4} - 10^{-8} Torr โดยเริ่มจากการจุดอาร์กด้วยสนามไฟฟ้าแรงสูง (10^6 - 10^7 V/m) แบบพัลส์ระหว่างขั้วทริกเกอร์กับผิวแคโทดซึ่งเมื่อมองในระดับจุลภาคหรือระดับไมครอนแล้วจะกล่าวได้ว่ามีผิวขรุขระและบริเวณใดที่มีลักษณะปลายแหลมยื่นออกมาจะเรียกว่า “ไมโครทิป” (microtip) สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะไปเหนี่ยวนำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนที่ปลายไมโครทิป จนเกิดความร้อนสูงจากการเสียดสีของอิเล็กตรอนกับไมโครทิปอย่างรวดเร็ว ทำให้เปลี่ยนสถานะเป็นพลาสมาภายในระยะเวลาอันสั้น (<100 ns) พลาสมาที่เกิดขึ้นจะอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าเนื่องจากพลังงานของอาร์กซ์พลาสมาที่ต่ออยู่ระหว่างขั้วโลหะแคโทดกับแอโนด จึงทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนและ ion impact ขึ้นที่บริเวณจุดเล็กๆ หลายจุดบนผิวหน้าของโลหะแคโทด เป็นผลให้จุดเล็กๆ ดังกล่าวนี้อุณหภูมิเลยจุดเดือด (2-3 eV) ภายในระยะเวลาระดับเสี้ยววินาที การที่อุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้โลหะบริเวณดังกล่าวเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวและเป็นพลาสมาในที่สุด โดยไม่ผ่านสถานะก๊าซการเปลี่ยนสถานะในลักษณะนี้จะจัดอยู่ในเฟสทรานซิชันที่เรียกว่า ไอโซคอริก (isochoric) ซึ่งถือได้ว่าเป็น fully ionize พลาสมาที่เกิดขึ้นจะไม่เป็นพลาสมาในอุดมคติเพราะพลังงานศักย์ของอนุภาคในพลาสมามีค่าน้อยกว่าพลังงานเฉลี่ยไม่มาก และเนื่องจากระดับของการไอออนไนซ์มีค่าสูง แรงคูลอมบ์ที่เกิดจากอิเล็กตรอนวงนอกของไอออนกับนิวเคลียสจึงมีค่าสูงประกอบกับความสามารถในการโผลาไรซ์ของอนุภาคจึงทำให้พลังงานในการไอออนไนซ์ลดต่ำลง ความหนาแน่นของพลาสมาจะอยู่ในระดับที่น้อยกว่าความหนาแน่นของๆ แข็งประมาณ 2 หรือ 3 เท่าและมีความดันสูง ($\sim 10^{12}$ Pa) ทำให้เกิดการระเบิดกระจายออกอย่างรวดเร็ว การกระจายออกของพลาสมาจะทำให้พลาสมาเย็นลงอย่างช้า ๆ ซึ่งหมายถึงไม่มีการชนกันอีกต่อไป (no collision) และความหนาแน่นจะลดลงในลักษณะที่แปรผกผันกับ d^2 เมื่อ d คือระยะทางจากจุดกำเนิดอิเล็กตรอนและไอออนในพลาสมาจะถูกเร่งไปยังแอโนดเนื่องจากสนามไฟฟ้า ความดันและแรงระหว่างประจุ ไอออนจะมีความเร็วสุดท้ายประมาณ 10^4 m/s ซึ่งสัมพันธ์กับพลังงานของไอออนประมาณ 100 eV (ขึ้นกับชนิดของโลหะแคโทด) กระแสอิเล็กตรอนและกระแสไอออนที่ไหลไปยังแอโนดจะมีค่าประมาณ 110% และ -10% ของกระแสอาร์กตามลำดับ โดยความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอนในพลาสมาจะมีค่ามากกว่าความหนาแน่นของกระแสไอออน 10-30 เท่า ในระยะประมาณ 20-30 ไมโครเมตรจากจุดกำเนิดความถี่ในการชนกันของอนุภาคจะลดต่ำลง ทำให้พลาสมาเริ่มเปลี่ยนจากระบบสมดุลความร้อนเป็นระบบไม่สมดุลความร้อนและอยู่ในสภาวะที่ไม่มีการไอออนไนซ์ที่เรียกว่า “frozen-in” ในสภาวะ frozen-in พลาสมาจะประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีประจุแตกต่างกันซึ่งมีอุณหภูมิที่แตกต่างกันด้วย การ freeze จะเสร็จสิ้นสมบูรณ์ภายใน

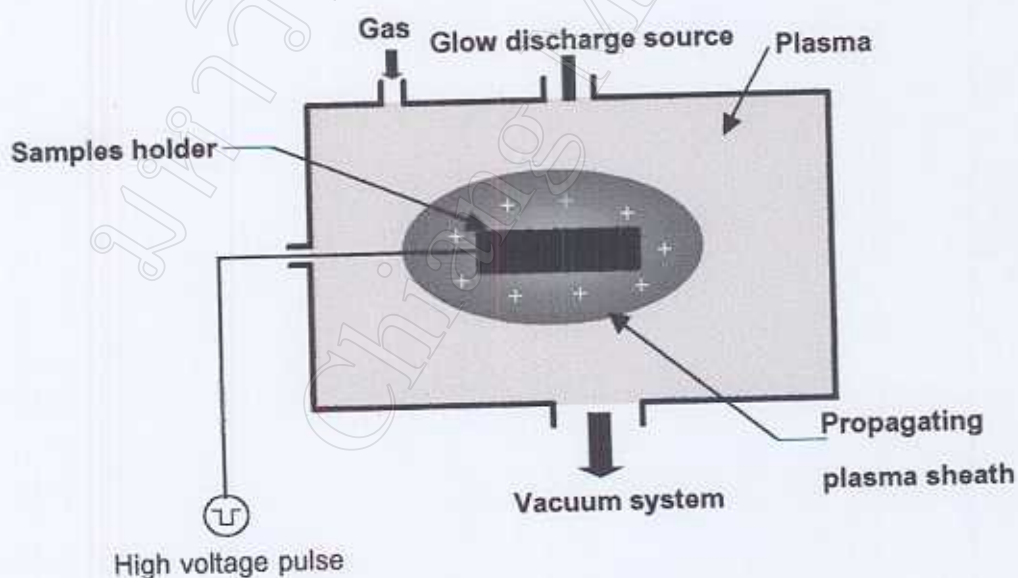
ระยะทางจากจุดกำเนิดประมาณ 100 ไมโครเมตรและพลาสมาจะกระจายออกไปเรื่อย
ดังรูปที่ 2.3



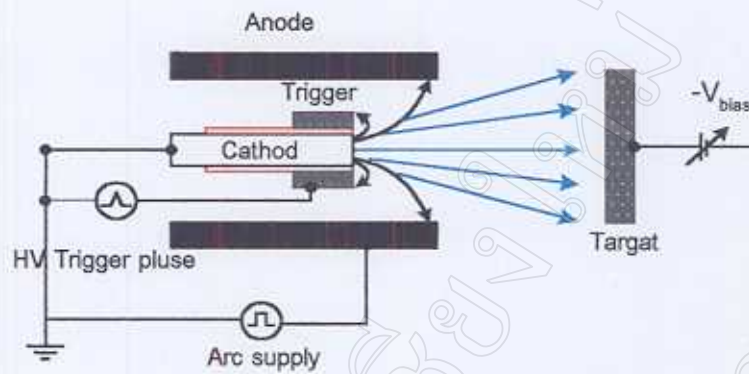
รูปที่ 2.3 แสดงปรากฏการณ์ที่เกิดบริเวณผิวแคโทดระหว่างกระบวนการทริก

2.2.2 MEVVA กับระบบ PIII

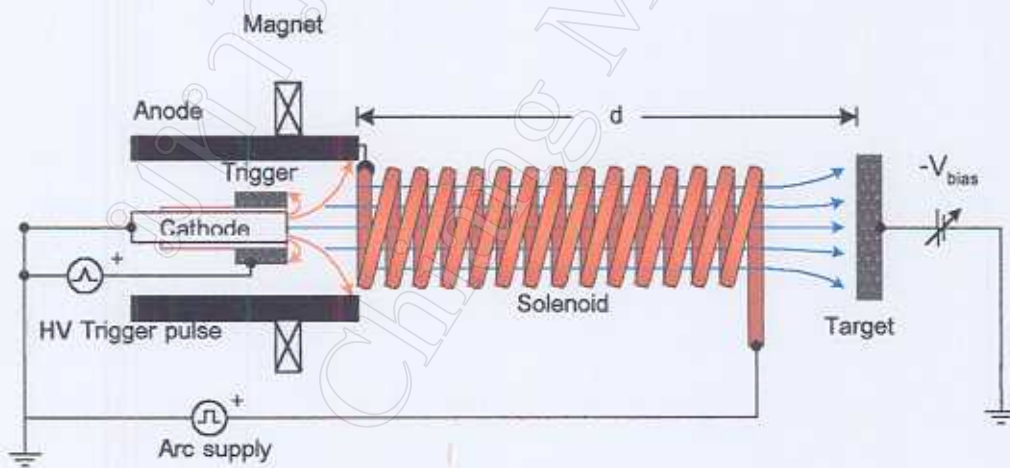
ในกรณีของระบบ PIII ที่ใช้หัวกำเนิดไอออนทั่ว ๆ ไปเช่น RF plasma source, Microwave ion source, Glow discharge source เป้าที่อยู่ในพลาสมาจะถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้าลบค่าสูงทำให้เกิดซีดจากไอออนบวกขึ้นรอบ ๆ เป้าและอนุภาคไอออนจะถูกเร่งให้เข้าชนเป้าในทุกทิศทุกทาง ดังรูปที่ 2.4 โดยพลังงานในการชนเป้าของไอออนสามารถควบคุมได้จากศักย์ไฟฟ้าที่ไบอัสเป้า สำหรับกรณีของระบบ PIII ที่ใช้ MEVVA เป็นหัวกำเนิดพลาสมาจะแตกต่างกับกรณีที่กล่าวมาแล้วเพราะพลาสมาที่ผลิตจาก MEVVA เคลื่อนที่มายังเป้าที่ไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้าลบเพียงด้านเดียวจึงทำให้เกิดซีดและการชนเป้าของไอออนเพียงด้านเดียวด้วยดังรูปที่ 2.5 และเนื่องจากการอาร์กโลหะเพื่อผลิตพลาสมาของ MEVVA ทำให้พลาสมาที่ผลิตขึ้นกระจายออกด้วยแรงดันและเกิดอนุภาคขนาดใหญ่⁽²⁵⁾ ปนมากับลำพลาสมาด้วยจึงมีการใช้แม่เหล็กโฟกัสและโซลินอยด์ตรงเพื่อช่วยเพิ่มกระแสพลาสมาและนำพลาสมาไปใช้ในระยะที่ไกลขึ้นดังรูปที่ 2.6 ตลอดจนการใช้แม่เหล็กโฟกัสและโซลินอยด์โค้งช่วยเพิ่มกระแสพลาสมา และกำจัดอนุภาคขนาดใหญ่ที่มากับลำพลาสมา ก่อนตกกระทบเป้า⁽²⁶⁾ ดังรูปที่ 2.7



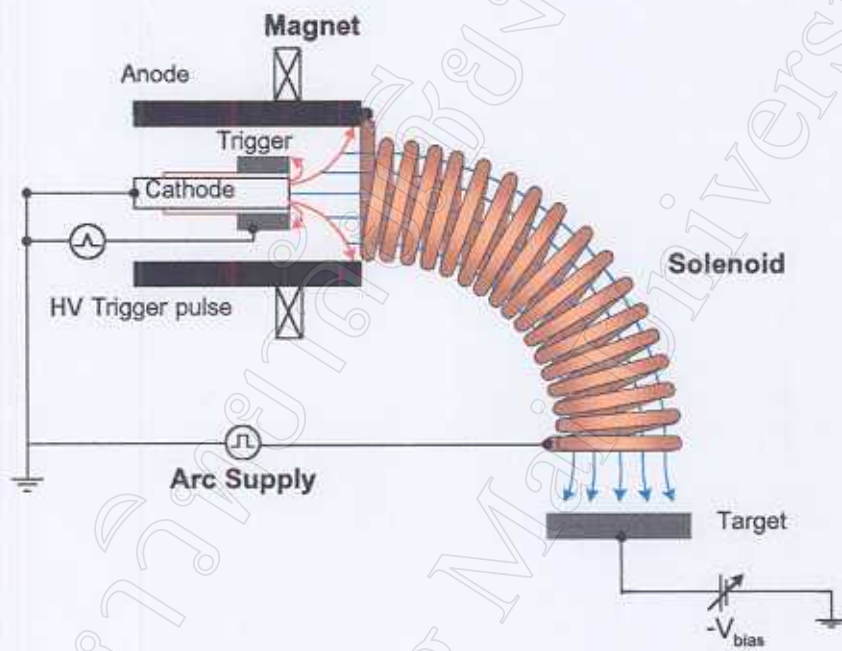
รูปที่ 2.4 แสดงระบบ PIII ที่ใช้ Glow discharge source เป็นแหล่งกำเนิดพลาสมา



รูปที่ 2.5 แสดงระบบ PIII ที่ใช้ MEVVA เป็นหัวกำเนิดพลาสมา



รูปที่ 2.6 แสดงระบบ PIII ที่ใช้ MEVVA เป็นหัวกำเนิดพลาสมาพร้อมทั้งแม่เหล็กโพกัสและโซลินอยด์ตรง



รูปที่ 2.7 แสดงระบบ PIII ที่ใช้ MEVVA เป็นหัวกำเนิดพลาสมาพร้อมทั้งแม่เหล็กไฟกัสนและโซลินอยด์โค้ง

2.3 ระบบการลำเลียงพลาสมา⁽²⁷⁾

การผลิตพลาสมาจากหัวกำเนิดพลาสมาชนิด MEVVA เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพเพราะสามารถผลิตพลาสมาได้ในปริมาณที่สูงเมื่อเทียบกับการผลิตพลาสมาจากเครื่องกำเนิดชนิดอื่นๆ สามารถผลิตพลาสมาของธาตุได้แทบทุกชนิดในตารางธาตุ และเป็นเครื่องกำเนิดที่มีโครงสร้างการทำงานที่ไม่ยุ่งยากและซับซ้อนนัก ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น แต่จากกระบวนการจุดอาร์กบริเวณผิวของแคโทด โดยอาศัยสนามไฟฟ้าแรงสูงระหว่างขั้วทริกเกอร์นั้น พบว่าทำให้มีอนุภาคนาขนาดใหญ่ (macroparticle) ระดับ 0.1-10 μm ปนเปื้อนออกมารวมอยู่ในพลาสมาด้วย ซึ่งเป็นอุปสรรคอย่างยิ่งต่อการนำพลาสมาไปประยุกต์ใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับธาตุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ (melting point) เช่น ทองแดง และอะลูมิเนียม เป็นต้น จะมีจำนวนอนุภาคนาขนาดใหญ่ปนเปื้อนออกมาจำนวนมาก ดังนั้นจึงต้องมีการเพิ่มกระบวนการลำเลียงพลาสมาผ่านขดลวดโซลินอยด์โค้ง เพื่อช่วยในการกำจัดอนุภาคนาขนาดใหญ่เหล่านี้ ซึ่งพบว่าพลาสมาที่ประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุจะเคลื่อนที่เลี้ยวโค้งไปตามสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดโซลินอยด์ได้ แต่อนุภาคนาขนาดใหญ่เป็นอนุภาคที่มีอัตราส่วนมวลต่อประจุมากจะยังคงเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงต่อไป ทำให้เราสามารถกำจัดอนุภาคนาขนาดใหญ่โดยการอาศัยสนามแม่เหล็กจากขดลวดโซลินอยด์

2.3.1 การเคลื่อนที่ของพลาสมาบริเวณผิวแคโทด⁽²⁸⁾

เมื่อมีสนามไฟฟ้าแรงสูงเกิดขึ้นบริเวณผิวแคโทดทำให้จุดเล็กๆบนผิวแคโทดนั้นเกิดการระเบิดกลายเป็นพลาสมา และสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วแคโทดกับขั้วแอโนดจะช่วยเพิ่มปริมาณการเกิดพลาสมา โดยพลาสมาเหล่านี้จะเกิดการขยายตัวออกไปในทิศทางที่ตั้งฉากกับผิวของแคโทด ด้วยความเร็วกลุ่มที่มีค่าประมาณ $1-2 \times 10^4 \text{ m/s}$ สำหรับแคโทดทุกชนิด ซึ่งพบว่าแรงที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของพลาสมา 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) จะมีการชนแบบไม่ยืดหยุ่นเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจะลดลงตามระยะ d^{-2} และถ้าหากไม่พิจารณาการเกิดหรือการตายของไอออนในพลาสมา

(acceleration or ionization/recombination) พบว่า ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (n_e) จะเป็นไปตามสมการ (2.2)

$$n_e = \gamma \frac{I_{arc}}{d^2} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

เมื่อ n_e = ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (electron density) (cm^{-3})
 I_{arc} = กระแสอาร์ก (arc current) (A)
 d = ระยะทางจากผิวแคโทด (m)
 γ = ค่าคงที่ของการอาร์ก 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 (2.3) คือ

$$p_{kin} = \gamma \frac{I_{arc}}{d^2} k T_e \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

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

$$p_{mag} = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

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 (2.4) และ (2.5) มีค่า ดังนี้

$$d_0 = \frac{1}{B} \sqrt{2\mu_0 n_{arc} k T_e} \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

เมื่อแทนค่าคงที่ต่างๆ แล้ว จะได้เป็น

$$d_0(mm) \approx \frac{3.5\sqrt{I_{arc}}}{B(mT)} \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

จากสมการ (2.7) 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 (solenoid duct)

พลาสมาประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีประจุ ดังนั้นเมื่อพลาสมาเคลื่อนที่ออกมาจากแอโนดแล้วเคลื่อนต่อไปยังท่อแม่เหล็กที่อยู่ในรูปของขดลวดโซลินอยด์ที่มีสนามแม่เหล็กภายในท่อ ทำให้อนุภาคที่มีประจุ คือ ไอออนและอิเล็กตรอน เกิดการเคลื่อนที่แบบควรรอบเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุเหล่านี้ จะเกิดจากแรงกระทำจากสนามแม่เหล็ก ตามสมการ

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

และจากสมการการเคลื่อนที่ของนิวตัน

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

จะได้ว่าอนุภาคที่มีประจุ จะเกิดการควรรอบเส้นแรงแม่เหล็ก ด้วยรัศมีความโค้ง (R)

$$R = \frac{mv}{qB} \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

และจาก Theorem of equipartition of energy

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}k_B T \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

จะได้ว่า

$$R = \frac{\sqrt{mk_B T}}{qB} \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

ค่ารัศมีการควรรของไอออนและอิเล็กตรอนของสมการ (2.12) เรียกว่า "ค่ารัศมีของลามอร์" (Larmor radius) จากค่ารัศมีของลามอร์ จะพบว่าค่ารัศมีการเคลื่อนที่ดังกล่าวจะมีค่าขึ้นกับมวล ซึ่งมวลของไอออนมีค่ามากกว่ามวลของอิเล็กตรอนทำให้ไอออนเกิดการควรรด้วยรัศมีที่มีค่ามากกว่ารัศมีการควรรของอิเล็กตรอน ตัวอย่าง เช่น กรณีใช้เหล็กเป็นแคโทดในการผลิตไอออน ซึ่งมีค่าดังแปรต่าง ๆ ดังนี้

ค่าเฉลี่ยของประจุที่เกิด (Charge state) $\bar{Q} = 1.8$

มีเลขอะตอมเป็น $Z = 26$

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

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

มวลของไอออน $m_i = Z \times m_p + (Z - \bar{Q}) \times m_e$

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

ถ้าสมมุติให้ อุณหภูมิของไอออนและอิเล็กตรอนมีค่า $kT = 3 \text{ eV}$ เท่ากัน และสนามแม่เหล็กภายนอกมีค่า 100 mT ดังนั้นจากสมการ (2.12) สามารถคำนวณหาค่ารัศมีการควงของอิเล็กตรอนและไอออน มีค่าเท่ากับ 0.2 mm และ 7 mm ตามลำดับ

จากตัวอย่างการคำนวณหารัศมีการควงของไอออนและอิเล็กตรอน พบว่ารัศมีการควงของไอออนจะมีค่ามากกว่ารัศมีการควงของอิเล็กตรอน และนอกจากนี้ยังพบว่า การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนกับไอออนมีผลมาจากสนามไฟฟ้าภายในพลาสมาที่เป็นไปตามสมการของปัวซอง (Poisson's equation) คือ

$$\text{div } E = \frac{e}{\epsilon_0} (\bar{Z}n_i - n_e) \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

เมื่อ $\bar{E}$ = 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

$$\Gamma_{\perp} = -D_{\perp} \nabla n \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

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

ส่วนในกรณีท่อโซลินอยด์โค้ง ค่าสนามแม่เหล็กจะมีค่าโดยประมาณ

$$B \approx \frac{R_0}{R} B_0 \quad \text{..... (2.15)}$$

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

ซึ่งจากสมการ (2.15) จะพบว่า สนามแม่เหล็กในท่อโค้งมีค่าไม่สม่ำเสมอ กล่าวคือ สนามแม่เหล็กบริเวณที่มีรัศมีความโค้งน้อย (โค้งด้านในของท่อ) จะมีค่ามากกว่าท่อบริเวณที่มีรัศมีความโค้งมาก (โค้งด้านนอกของท่อ) แสดงให้เห็นว่าในท่อแม่เหล็กโค้งจะมีการสูญเสียไอออนมากบริเวณโค้งด้านนอกของท่อ เพราะการแพร่ของพลาสมาบริเวณนี้จะเป็นไปอย่างรวดเร็วตามกฎของ Fick

2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างโดสและพลาสมาพารามิเตอร์⁽²⁹⁾

ในการใช้ PIII ในงานเชิงประยุกต์นั้นโดสหรือปริมาณอนุภาคไอออนที่ตกกระทบเป้าเป็นปริมาณหนึ่งที่มีความสำคัญ เพราะเป็นปริมาณที่สามารถประเมินความหนาของฟิล์มขณะทำการเคลือบฝังได้ โดยปริมาณดังกล่าวจะมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของพลาสมาซึ่งในระบบ PIII เป้าจะถูกไบแอสด้วยศักย์ไฟฟ้าลบเพื่อเป็นการเพิ่มฟลักซ์และพลังงานในการตกกระทบเป้าของอนุภาคไอออน โดยเมื่อทำการไบแอสเป้าด้วยศักย์ไฟฟ้าลบที่มีค่ามากกว่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนในพลาสมาที่อยู่ใกล้กับผิวของเป้าจะถูกผลักออกจากเป้าภายในช่วงเวลา inverse electron plasma frequency ($\sim ns$) เหลือไว้แต่ซีตรอบ ๆ เป้าที่เกิดจากอนุภาคไอออน และโดสหรือกระแสอิมพลาน J_i สามารถอธิบายได้โดยใช้กฎของ Child – Langmuir law สำหรับศักย์ไฟฟ้า V_a ที่คร่อมอยู่ระหว่างขั้วที่มีความหนา S กระแสอิมพลานจะเป็น

$$J_i = \frac{4}{9} \epsilon_0 \left(\frac{2q}{M} \right)^{1/2} \frac{V_a^{3/2}}{S^2} \quad \text{..... (2.16)}$$

เมื่อ ϵ_0 = free – space permittivity
 q = ion charge
 M = ion mass

กระแสไอออน J_i จะเกิดจากการเคลื่อนที่ของไอออนในซีด ดังนั้น

$$J_i = qn_0 \frac{ds}{dt} \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

เมื่อ n_0 = plasma density

ทำการรวมสมการ (2.16) กับ (2.17) แล้วแก้สมการจะได้

$$S(t) = S_0 \left(\frac{2}{3} \omega_{pi} t_p + 1 \right)^{1/3} \quad \dots\dots\dots (2.18)$$

เมื่อ $\omega_{pi} = \frac{\mu_0}{S_0}$ คือ ion plasma frequency

$S_0 = \sqrt{2\varepsilon_0 V_0 / qn_0}$ คือ ion – matrix sheath thickness

$\mu_0 = \sqrt{2qV_0/m}$ คือ characteristic ion velocity

ดังนั้น ไอออนโดสที่ตกกระทบพื้นที่ 1 ตารางหน่วยใน 1 พัลส์คือ

$$D = n_0 S_t \quad \dots\dots\dots (2.19)$$

ผลรวมของโดสภายในเวลา t คือ

$$D_{total} = n_0 S_t f_t t \quad \dots\dots\dots (2.20)$$

เมื่อ f คือ plusing frequency

จะได้ว่า

$$D_{total} = \left[t f n_0^{1/2} V_0^{1/2} (2\varepsilon_0)^{1/2} q^{-1/2} \right] \times \left[\frac{2}{3} \left(\frac{n_0 q^2}{\varepsilon_0 m} \right)^{1/2} t_p + 1 \right]^{1/3} \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

ในระบบทั่ว ๆ ไป implant ion parameters β จะมีค่าดังนี้

$$\beta = \frac{2}{3} \left(\frac{n_0 q^2}{\epsilon_0 m} \right)^{1/2} t_p \gg 1$$

ดังนั้น

$$D_{total} = \left(\frac{2}{3} \right)^{1/3} 2^{1/2} \epsilon_0^{1/3} t f q^{-1/6} n_0^{2/3} m^{-1/6} V_0^{1/2} t_p^{1/3} \dots\dots\dots (2.22)$$

สมการที่ (2.22) จะใช้ได้กับโดสที่มีลักษณะเป็น single species กรณีที่มีหลาย species เช่น N_2^+ / N^+ หรือ H_2^+ / H^+

$$D_{total} = \left(\frac{2}{3} \right)^{1/2} 2^{1/2} \epsilon_0^{1/3} t f q^{-1/6} N_0^{2/3} M^{-1/6} V_0^{1/2} t_p^{1/3} \dots\dots\dots (2.23)$$

เมื่อ

$$\sqrt{M} = \sum_{i=1}^L A_i \sqrt{m_i} \text{ คือ effective plasma ion mass}$$

$$N_0 = \sum_{i=1}^m B_i n_i \text{ คือ incident atom dose}$$

L คือ number of ion species

A_i คือ fraction of the ion density in the plasma bulk for species i

M_i คือ the mass of the i th ion

B_i คือ atomic number of i th ion species

N_i คือ density of i th ion species

ในกรณีของพลาสมาที่ประกอบไปด้วยไอออนที่เป็น multiple charge states เช่น T_i^+ / T_i^{2+}

$$D_{total} = \left(\frac{2}{3} \right)^{1/3} 2^{1/2} \epsilon_0^{1/3} t f q^{-1/6} N_i n_e^{-1/3} M^{-1/6} V_0^{1/2} t_p^{1/3} \dots\dots\dots (2.24)$$

เมื่อ

$$N_i = \sum_{i=1}^L n_i \text{ คือ total ion density}$$

$$n_e = \sum_{i=1}^L c_i n_i \text{ คือ plasma density}$$

$$\sqrt{M} = \sum_{i=1}^L k_i \sqrt{c_i m_i}$$

$$k_i = n_i / \sum_{i=1}^m c_i n_i \text{ คือ the fraction of the total ion density for the } i^{\text{th}} \text{ ion}$$

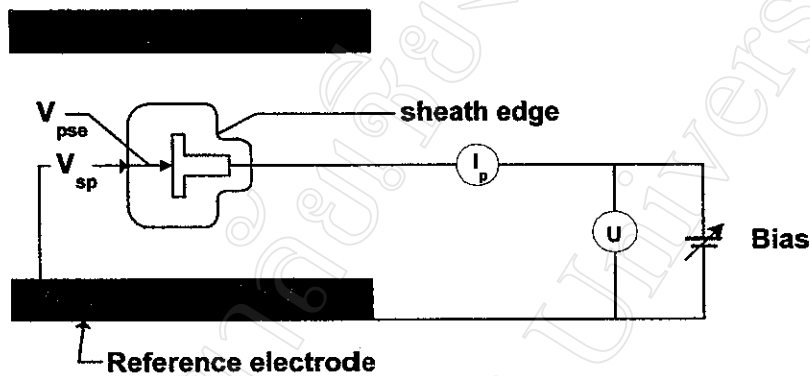
c_i คือ charge state

จากสมการที่ 2.22 incident dose ใน single pulse จะแตกต่างกันแบบอื่นๆ เพราะ implantation dose จะแปรผันแบบเป็นเชิงเส้นกับ implantation pulse โดยไม่ขึ้นกับ ion mass หรือ ion charge state

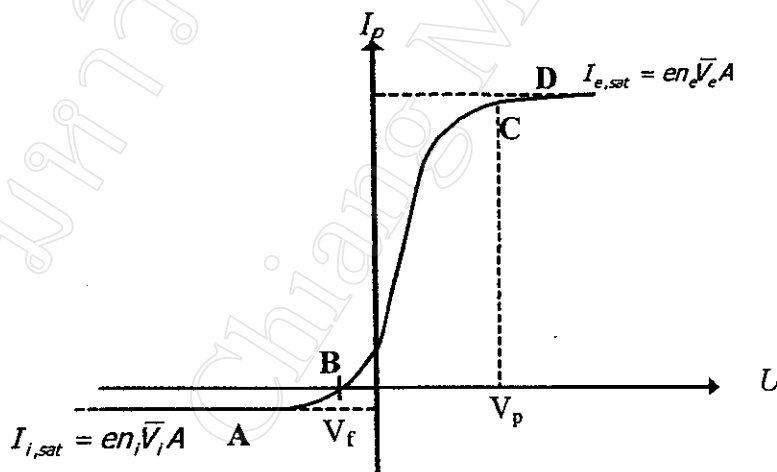
ในระบบ PIII พลาสมาพารามิเตอร์ เช่น density, species, และ charge state จะพิจารณาได้จากชนิดของแหล่งกำเนิดพลาสมาและ plasma density จะมีอิทธิพลที่เข้าใจยากต่อ incident dose ยกตัวอย่างเช่น เมื่อ plasma density สูงขึ้น incident ion flux น่าจะเพิ่มขึ้น ในลักษณะที่สัมพันธ์กันแบบเป็นเชิงเส้นดังสมการที่ 2.22 แต่ในความเป็นจริงไม่เป็นเช่นนั้น เพราะเมื่อพลังงานในการ excitation พลาสมาของ plasma source เพิ่มขึ้น plasma density จะเพิ่มขึ้น ขณะเดียวกัน atomic ion density จะเพิ่มขึ้นด้วย นั่นหมายถึง ion charge state เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งใน metal ion plasma จึงทำให้มวลใน single charge state ลดลงเป็นผลทำให้ incident ion flux และ ion dose เพิ่มขึ้น นั่นคืออาจจะสรุปได้ว่า เมื่อ plasma density เพิ่มขึ้น incident ion flux จะเพิ่มขึ้นแต่ incident ion flux ที่เพิ่มขึ้นไม่ใช่มีผลมาจาก density ที่เพิ่มขึ้นเพียงอย่างเดียว แต่เนื่องมาจาก ion charge state และมวลด้วย

2.5 การใช้ Electric Probe วัดคุณสมบัติของพลาสมา⁽³⁰⁾

ก่อนที่จะนำพลาสมาที่ผลิตขึ้นไปใช้งานเชิงประยุกต์จำเป็นต้องศึกษา พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของพลาสมา เช่น ความหนาแน่นและความเร็วของอนุภาคที่ตกกระทบเป้า อุณหภูมิหรือพลังงานของอนุภาคต่าง ๆ ที่อยู่ในพลาสมา เป็นต้น การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของพลาสมาก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะบอกถึงปริมาณของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้วได้ ซึ่งคุณสมบัติทางไฟฟ้าของพลาสมาสามารถหาได้จากกราฟ IV ของโพรบวัดกระแสที่วัดได้จากการทดลอง ด้วยการพิจารณาจากรูปที่ 2.8 ดังต่อไปนี้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.8 แสดงการวัดระบบดีซีพลาสมาของเครื่องกำเนิดไอออน

- ก. แสดงการต่อโพรบวัดกระแสและศักย์ไบอัสภายนอก
- ข. แสดงลักษณะกราฟสมบัติ IV ของโพรบวัดกระแส

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

พิจารณาความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นในรูปที่ 2.8 ก พบว่า มีค่าตามสมการ

$$U = V_{pse} + V_{sp} \quad \text{..... (2.25)}$$

พิจารณาตำแหน่งต่าง ๆ จากกราฟรูปที่ 2.8 ข พบว่า แต่ละจุดของกราฟมีความสำคัญ
 ดังนี้

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

$$I_p = en_i \bar{v}_i A \quad \text{..... (2.26)}$$

$$I_p = I_{i,sat} \quad \text{..... (2.27)}$$

โดยที่ A คือ พื้นที่ของโพรบ(ที่มีขนาดเท่ากับพื้นที่ของซีท ถ้าหากว่าขนาดของโพรบใหญ่เมื่อเทียบกับขนาดของซีท)

จุด B คือ จุดที่สามารถวัดกระแสโพรบ (I_p) ได้เท่ากับศูนย์ ซึ่งหมายถึง

$$J_i = J_e \quad \text{..... (2.28)}$$

จะเกิดขึ้นเมื่อ $U_f = V_f$ ดังนั้นสมการ (2.31) จะเขียนได้เป็น

$$V_f = V_{sp} + V_{pse} \quad \text{..... (2.29)}$$

ซึ่ง U_f = ศักย์ไบอัสที่โพรบซึ่งทำให้เกิด V_f พอดี
 V_f = ศักย์โฟลท (ภาคผนวก ก)

จุด C คือ จุดที่มีการไบอัสโพรบให้มีค่าเป็นบวกมากพอ จนทำให้ซีทที่มีอยู่เริ่มหายไปพอดี ($V_{pse} = 0$) จุดนี้เป็นจุดที่ไม่มีทั้งแรงดูดและแรงผลัก กับอิเล็กตรอนและไอออน กระแสที่วัดได้จากโพรบจะเป็นกระแสอิเล็กตรอนส่วนใหญ่เพราะอิเล็กตรอนมีความเร็วมากกว่าไอออนมาก ๆ

จุด D คือ จุดที่ค่ากระแสอิเล็กตรอนเริ่มมีค่าคงที่ หรือกระแสอิเล็กตรอนเกิดการอิ่มตัว แสดงว่าถ้าศักย์ U มีค่าเป็นบวกมากพอจะไม่มีกระแสไอออนเกิดขึ้นที่โพรบเลย ดังนั้น

$$I_p = I_{e,sat} \quad \dots\dots\dots (2.30)$$

สำหรับการคำนวณหาค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนนั้นจะใช้กราฟสมบัติ IV (รูป 2.8 ข) ในช่วง BC ซึ่งในช่วง BC นี้ $U < V_p$ ศักย์ที่โพรบจะเกิดแรงผลักต่ออิเล็กตรอนทำให้ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้าชนโพรบวัดกระแส จะเป็นไปตามการแจกแจงของโบซมานซ์ (Boltzmann distribution)

$$n'_e = n_{e0} \exp\left(\frac{-eV_{pse}}{k_B T_e}\right) \quad \dots\dots\dots (2.31)$$

ดังนั้นกระแสอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นบริเวณโพรบ มีค่า

$$I'_e = I_{e0} \exp\left(\frac{-eV_{pse}}{k_B T_e}\right) \quad \dots\dots\dots (2.32)$$

และจากสมการกระแสโพรบ ซึ่งมีค่า เท่ากับ

$$I_p = I_i + I'_e \quad \dots\dots\dots (2.33)$$

เนื่องจาก ในช่วง BC (ช่วง BC ตอนบน ๆ) ความเร็วเฉลี่ยของไอออนมีค่าน้อยกว่าความเร็วของอิเล็กตรอนมาก ($I_i \ll I'_e$) ดังนั้น $I_p \cong I'_e$ หรือ

$$I_p \cong I_{e0} \exp\left(\frac{-eV_{pse}}{k_B T_e}\right) \quad \dots\dots\dots (2.34)$$

จากสมการ (2.25) และค่า $V_{pse} < 0$ ในช่วง BC นั้น จะได้ว่า

$$V_{pse} = V_{sp} - U \quad \text{..... (2.35)}$$

แทนค่า V_{pse} จากสมการ (2.35) ในสมการ (2.34)

$$I_p \cong I_{e0} \exp\left(\frac{-e(V_{sp} - U)}{k_B T_e}\right) \quad \text{..... (2.36)}$$

$$\ln I_p \cong \ln I_{e0} + \left(\frac{eU - eV_{sp}}{k_B T_e}\right) \quad \text{..... (2.37)}$$

เนื่องจาก I_{e0} คงที่ ($I_{e0} = en_e \bar{V}_e A$) ดังนั้น จะได้

$$\frac{d \ln I_p}{dU} \cong \frac{d}{dU} \left(\frac{eU - eV_{sp}}{k_B T_e} \right) \quad \text{..... (2.38)}$$

$$\frac{d \ln I_p}{dU} \cong \frac{e}{k_B T_e} \quad \text{..... (2.39)}$$

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

$$kT_e = \frac{e}{\text{slope}} \quad \text{..... (2.40)}$$

ในทางปฏิบัติการหาค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนจากความชันมักมีความผิดพลาดสูง ประกอบกับในการประยุกต์ใช้งานของระบบ PIII มักให้ความสนใจไปที่ปริมาณอนุภาคไอออนที่ตกกระทบบเป้าหรือปริมาณกระแสไอออนอิมพัลส์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเน้นไปที่การวัดกระแสไอออนอิมพัลส์ เพื่อหาวิธีการในการเพิ่มปริมาณกระแสไอออนที่ตกกระทบบเป้า

2.6 การวัดกระแสอาร์ก

สำหรับหัวกำเนิด MEVVA นอกจากปริมาณกระแสพลาสมาแล้ว ปริมาณกระแสอาร์กก็เป็นปริมาณที่มีความสำคัญปริมาณหนึ่งที่ต้องทำการวัดเพื่อเป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพในการผลิตหรือความสามารถในการแปลงกระแสอาร์กเป็นกระแสพลาสมาของหัวกำเนิด โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและพัฒนาระบบวัดกระแสอาร์ก 3 ชนิด คือ ตัวต้านทานชนิด ฮอลล์โพรบ และหม้อแปลงทอรอยด์วัดกระแส ซึ่งมีรายละเอียดของทฤษฎีดังต่อไปนี้

2.6.1 ความต้านทานชนิด

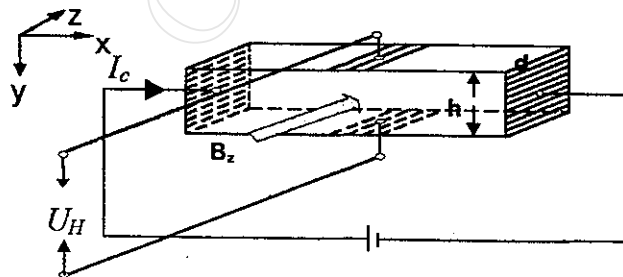
การวัดกระแสโดยใช้ความต้านทานชนิดจะเป็นวิธีการวัดชนิดสัมผัสโดยตรงกับวงจรโดยต่อความต้านทานอนุกรมและใช้กราวด์ร่วมกับระบบที่ต้องการวัด เพื่อวัดศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมตัวต้านทานแล้วนำมาคำนวณหาค่ากระแสตามกฎของโอห์มดังสมการ

$$V = IR \quad \text{..... (2.41)}$$

โดยความต้านทานชนิดที่ใช้ต้องมีค่าต่ำ เพื่อไม่ให้มีผลต่อระบบที่ต้องการวัด การใช้ตัวต้านทานเป็นตัววัดกระแสเป็นวิธีการที่เข้าใจได้ง่ายแต่มีข้อจำกัดบางประการคือ เมื่อใช้วัดกระแสพัลส์ค่าสูงมักพบปัญหาสัญญาณรบกวนรวมกราวด์และไม่สามารถใช้วัดกระแสในขณะที่กราวด์ของระบบมีศักย์ไฟฟ้าสูง (high voltage) เพราะจะทำให้ฮอสซิลโคปมีศักย์ไฟฟ้าสูงด้วย เป็นต้น

2.6.2 Hall probe

การวัดกระแสไฟฟ้าด้วยฮอลล์โพรบเป็นวิธีการวัดกระแสทางอ้อมและไม่สัมผัสโดยตรงกับวงจรของระบบที่จะทำการวัด โดยใช้หัววัดฮอลล์วัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสที่ต้องการวัดแล้วนำมาคำนวณกลับหาค่ากระแสไฟฟ้า



รูปที่ 2.9 แสดงปรากฏการณ์ของฮอลล์

จาก Hall effect เมื่อต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าเข้ากับก้อนวัสดุตัวนำที่มีขนาดเล็กมากดังรูปที่ 2.9 จะทำให้มี กระแสไฟฟ้า I_c ไหลจากขั้วบวกของแรงเคลื่อนไฟฟ้าไปยังขั้วลบของแรงเคลื่อนไฟฟ้า (ไหลในแนวแกน X ทิศทางบวก X) ถ้าประจุพาหะของก้อนวัสดุเป็นอิเล็กตรอนกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากขั้วลบของแรงเคลื่อนไฟฟ้าไปยังขั้วบวกของแรงเคลื่อนไฟฟ้า (เคลื่อนที่ในแนวแกน X ทิศทางลบ X) ดังนั้นเมื่อนำก้อนวัสดุตั้งกล่าวไปวางไว้ในสนามแม่เหล็กที่มีทิศในแนวบวก Z ซึ่งตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะทำให้เกิดแรงลอเรนส์กระทำกับอิเล็กตรอน ดังนั้น อิเล็กตรอนจึงเคลื่อนที่ขึ้นด้านบนเป็นผลให้เกิดศักย์ไฟฟ้าขึ้นระหว่างผิวด้านบนและด้านล่างของก้อนสารตัวนำ โดยศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีค่าเป็นไปตามสมการของฮอลล์ดังต่อไปนี้

$$U_H = \frac{R_H I_c B}{d} \quad \dots\dots\dots (2.42)$$

จากสมการที่ (2.42) ถ้าให้

$$K_{BO} = \frac{R_H}{d} \quad \dots\dots\dots (2.43)$$

จะได้

$$U_H = K_{BO} I_c B \quad \dots\dots\dots (2.44)$$

$$B = \frac{U_H}{K_{BO} I_c} \quad \dots\dots\dots (2.45)$$

เมื่อ

R_H = ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์

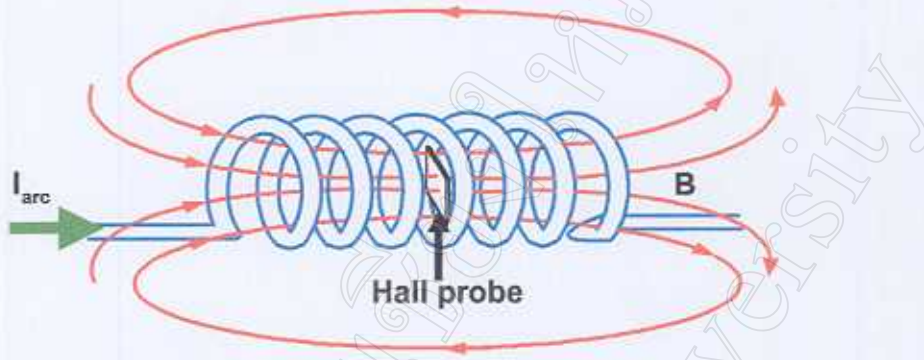
U_H = hall voltage (V)

K_{BO} = sensitivity (V/A.T)

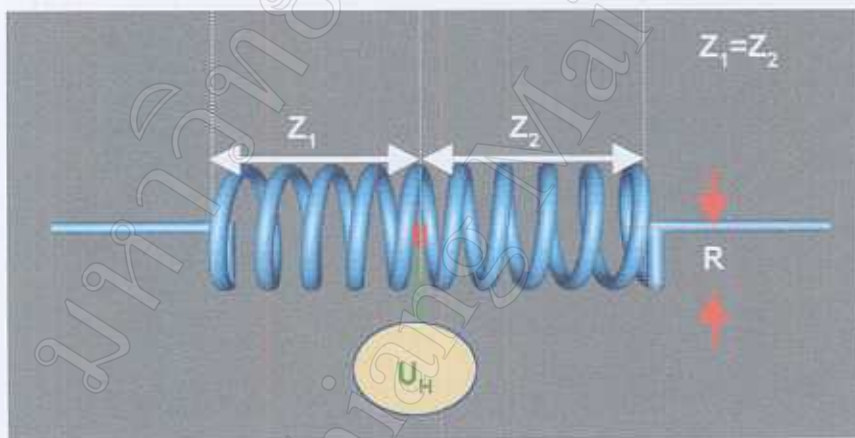
I_c = current control

จากสมการที่ 2.45 เมื่อเราทราบค่าศักย์ไฟฟ้า (U_H) จากการวัดจะทำให้เราสามารถคำนวณหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้า (B) และนำค่าความเข้มสนามไฟฟ้า (B) ที่คำนวณได้ มาคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ต้องการ ซึ่งวิธีการคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้านั้นจะขึ้นอยู่กับวิธีการในการแปลงกระแสไฟฟ้าเป็นความเข้มสนามแม่เหล็ก (B) ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองวัดกระแสอาร์กโดยนำหัววัดฮอลล์วัดความเข้มของสนาม

แม่เหล็กในแนวแกนกลางบริเวณกึ่งกลางความยาวของโซลินอยด์ที่กระแสอาร์กไหลผ่าน ดังรูปที่ 2.10 และ 2.11 แล้วนำค่าศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ที่ได้มาคำนวณหาค่ากระแสอาร์กที่ต้องการวัด ดังนี้



รูปที่ 2.10 แสดงการวัดกระแสโดยใช้หัววัดฮอลล์วัดสนามแม่เหล็กในแนวแกนกลางของโซลินอยด์



รูปที่ 2.11 แสดงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโซลินอยด์

จากรูปที่ 2.11 สามารถหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกนกลางของโซลินอยด์ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$B = \frac{\mu_0 ni}{2} \left[\frac{Z_2}{\sqrt{R^2 + Z_2^2}} - \frac{Z_1}{\sqrt{R^2 + Z_1^2}} \right] \dots\dots\dots (2.46)$$

เมื่อ

 R = รัศมีของโซลินอยด์ (m) n = จำนวนรอบต่อความยาว (turns/m) i = กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโซลินอยด์ (A) μ_0 = Permeability constant (1.26×10^{-6} Tm/A)

ดังนั้น

$$i = \frac{2B}{\mu_0 n \left[\frac{Z_2}{\sqrt{R^2 + Z_2^2}} - \frac{Z_1}{\sqrt{R^2 + Z_1^2}} \right]}$$

ถ้า $Z_1 = Z_2$

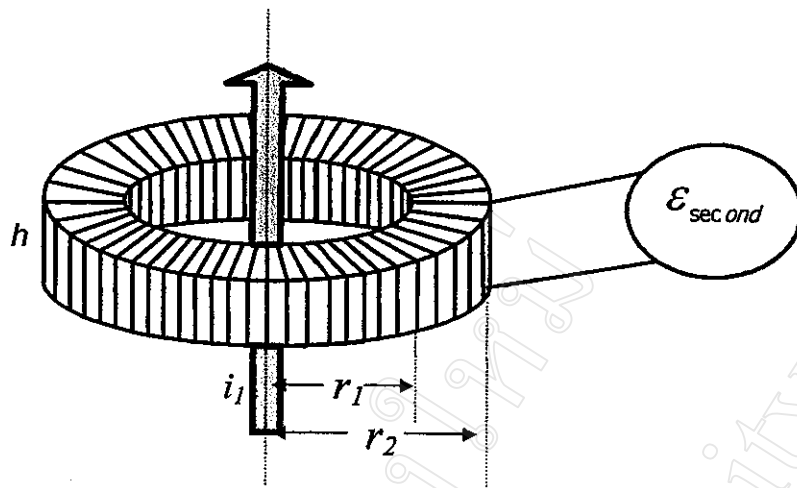
$$i = \frac{B}{\mu_0 n \left[\frac{Z_1}{\sqrt{R^2 + Z_1^2}} \right]}$$

$$i = \frac{U_H}{\mu_0 K_{BO} n I_c \left[\frac{Z_1}{\sqrt{R^2 + Z_1^2}} \right]} \dots\dots\dots (2.47)$$

การวัดกระแสด้วยฮอลล์โพรบสามารถหลีกเลี่ยงปัญหาสัญญาณรบกวนร่วมการวัดนี้ได้ แต่ยังไม่สามารถประยุกต์ใช้กับไฟฟ้าศักย์สูงมากได้ ทั้งนี้เพราะระยะห่างระหว่างหัววัดฮอลล์และโซลินอยด์ยังมีค่าไม่มากพอกับการประยุกต์ใช้ดังกล่าวได้

2.5.3 ทอรรอยด์วัดกระแส

การวัดกระแสด้วยทอรรอยด์วัดกระแสเป็นการวัดกระแสทางอ้อมและไม่สัมผัสกับระบบที่จะทำการวัดเช่นเดียวกับการวัดกระแสด้วยหัววัดฮอลล์ โดยใช้หลักการพื้นฐานของหม้อแปลงไฟฟ้าวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านทฤษฎีของทอรรอยด์แล้วนำมาอินทิเกรตหาค่ากระแสไฟฟ้าทางด้านปฐภูมิ ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงการใช้ทอรรอยด์วัดกระแสไฟฟ้า

จากทอรรอยด์ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในแกนของทอรรอยด์เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านแกนกลางจะมีค่าดังสมการดังต่อไปนี้

$$\phi = \left(\frac{\mu_0 h}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} \right) N_1 i_1 \quad \dots\dots\dots (2.48)$$

เมื่อ h = ความสูงของทอรรอยด์ (m)
 r_1 = รัศมีภายในของทอรรอยด์ (m)
 r_2 = รัศมีภายนอกของทอรรอยด์ (m)
 N_1 = จำนวนเส้นของกระแสที่ไหลผ่านแกนกลางของทอรรอยด์ (1 เส้น)

ถ้าให้ $K = \left(\frac{\mu_0 h}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} \right) \quad \dots\dots\dots (2.49)$

ดังนั้น $\phi = K i_1 \quad \dots\dots\dots (2.50)$

และจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt} \quad \dots\dots\dots (2.51)$$

ดังนั้น $\varepsilon_{\text{sec ond}} = -K N_2 \frac{di_1}{dt} \quad \dots\dots\dots (2.52)$

เมื่อ $N_2 =$ จำนวนรอบด้านทุติยภูมิ

จากสมการที่ (2.52) เมื่อได้ค่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากการวัดแล้ว สามารถนำมาอินทิเกรตหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ต้องการวัดได้ดังนี้

$$i_1 = \frac{1}{KN_2} \int \mathcal{E}_{\text{sec ond}} dt \quad \dots\dots\dots (2.53)$$

เมื่อ $K =$ ค่าคงที่ของ ทอรอยด์ โดย $K = \frac{\mu_0 h}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1}$ (Vs/A)

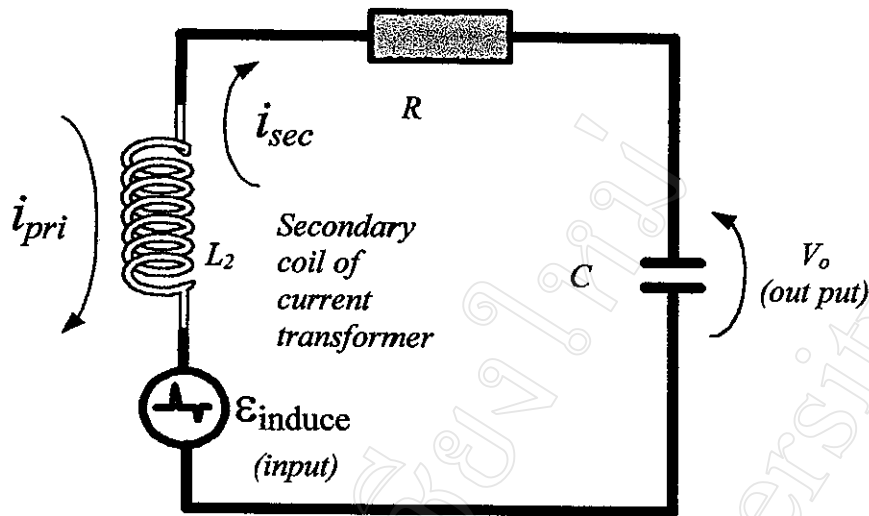
โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการอินทิเกรตแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อหาค่า กระแสอาร์กที่ต้องการวัด 2 วิธีคือการอินทิเกรตด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และการ อินทิเกรตด้วยวงจรรอาร์ซีอินทิเกรต ดังนี้

2.6.4 การอินทิเกรตด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ทำการวัดและบันทึกสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านทุติยภูมิของ ทอรอยด์ด้วยดิจิตอลออสซิลอสโคป เชื่อมต่อสัญญาณเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ด้วยการ์ด ADC แล้วทำการอินทิเกรตสัญญาณด้วยโปรแกรม Qbasic (โปรแกรม Intigrate ภาค ผนวก ข)

2.6.5 การอินทิเกรตด้วยวงจรรอาร์ซีอินทิเกรต

ในการอินทิเกรตด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีความผิดพลาดต่ำแต่มีหลายขั้นตอนทำให้ต้องใช้เวลาในการประมวลผลข้อมูลมาก ดังนั้นการอินทิเกรตด้วยวงจรรอาร์ซี อินทิเกรตจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ทำได้ โดยนำวงจรรอาร์ซีอินทิเกรตต่อเข้ากับขดลวด ด้านทุติยภูมิของทอรอยด์ดังรูป 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงวงจรอาร์ซีอินทิเกรต

จากรูปที่ 2.13 จะได้ว่า

$$N_2 \frac{d\phi}{dt} = L_2 \frac{di_2}{dt} + i_2 R + \frac{Q}{C}$$

$$N_2 \frac{d\phi}{dt} = L_2 \frac{di_2}{dt} + i_2 R + \frac{1}{C} \int_0^t i_2 dt \quad \dots\dots\dots (2.54)$$

ถ้าให้ $X_{L2} \ll R$ ดังนั้น

$$N_2 \frac{d\phi}{dt} = i_2 R + \frac{1}{C} \int_0^t i_2 dt$$

$$\frac{N_2}{R} \frac{d\phi}{dt} = i_2 + \frac{1}{RC} \int_0^t i_2 dt \quad \dots\dots\dots (2.55)$$

ถ้าให้ $RC \gg t$ ดังนั้น

$$\frac{N_2}{R} \frac{d\phi}{dt} = i_2 \quad \dots\dots\dots (2.56)$$

และ V_{out} ของวงจรคือ ศักย์ไฟฟ้าตกคร่อม C ดังนั้น

$$V_{out} = \frac{1}{C} \int_0^t i_2 dt$$

$$V_{out} = \frac{1}{RC} \int_0^t N_2 \frac{d\phi}{dt} dt \quad \dots\dots\dots (2.57)$$

จาก $\phi = KI$ ดังนั้น

$$V_{out} = \frac{1}{RC} KN_2 \int_0^t \frac{di_1}{dt} dt$$

$$i_1 = V_{out} \frac{RC}{KN_2} \quad \dots\dots\dots (2.58)$$

เมื่อได้สัญญาณ V_{out} หรือศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุแล้วสามารถนำมาคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแกนกลางของทอรอยด์ได้ดังสมการที่ 9 โดยในการออกแบบวงจรอาร์ชีนทิกเกอร์ต้องคำนึงถึงเงื่อนไขต่อไปนี้

1. ค่าของ X_L ของขดลวดทุติยภูมิต้องมีค่าน้อยกว่า R มาก ๆ เพื่อให้ X_L มีผลต่อการทำงานของวงจร (R มากกว่า X_L ประมาณ 100-500 เท่า)
2. ช่วงเวลาในการคายประจุของวงจร RC ควรจะมีค่ามากกว่าช่วงความกว้างของพัลส์ของสัญญาณที่จะวัด ($RC \geq 30$ Pulse width)

2.7 การออกแบบตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรไบอัสเป้า

ในการคำนวณหา ค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ใช้สำหรับการไบอัสแผ่นโลหะรับประจุ (โพรบ) นั้นจะต้องมีการกำหนดความต้องการพื้นฐานอยู่ 2 ประการ ประการแรก คือ กระแสไอออน หรือกระแสอิเล็กตรอนสูงสุดที่ต้องการวัดซึ่งสมนัยกับค่าประจุไฟฟ้ารวมทั้งหมดที่วิ่งเข้ามาหาโพรบ ในช่วงระยะเวลาการอาร์กตามสมการที่ 2.59 ประการที่สอง คือ ตัวเลขเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้นั้นเนื่องมาจากศักย์ไบอัสกระแสเฟืองในขณะวัด **ทั้งนี้เพราะในการทดลอง ใช้วิธี ประจุเข้าไปยังตัวเก็บประจุแทนการใช้แบตเตอรี่** ดังนั้นศักย์ไบอัสที่เปลี่ยนแปลงอาจเกิดการเสริมหรือหักล้างกันระหว่างประจุที่มาจากไอออนหรืออิเล็กตรอนภายในพลาสมา กับประจุบนแผ่น โลหะ

$$I_{i,e^-} = \frac{Q_{i,e^-}}{\tau} \quad \dots\dots\dots (2.59)$$

เมื่อ I_{i,e^-} คือ กระแสไอออนหรือกระแสอิเล็กตรอนภายในพลาสมาที่ต้องการวัด

Q_{i,e^-} คือ ประจุไฟฟ้ารวมของไอออนหรืออิเล็กตรอนภายในพลาสมา

τ คือ ความกว้างพัลส์ของกระแสอาร์ก

ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไบอัสกับค่าความจุของตัวเก็บประจุเป็นสมการที่ 2.60

$$V_{Bias} = \frac{Q_{Bias}}{C} \quad \dots\dots\dots (2.60)$$

เมื่อ V_{Bias} คือ ศักย์ที่ไบอัสให้กับตัวเก็บประจุ

Q_{Bias} คือ ประจุไฟฟ้าเกิดอยู่ในตัวเก็บประจุ

C คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุ

เมื่อมีไอออนหรืออิเล็กตรอนวิ่งเข้าชนแผ่นโลหะที่มีการไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้าตรงข้าม จะเกิดการเสริมหรือหักล้างกันทางประจุไฟฟ้า เป็นผลทำให้ค่าประจุไฟฟ้าบนแผ่นโลหะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมศักย์ไบอัสจึงเปลี่ยนตามไปด้วย แสดงค่าดังสมการที่ 2.61

$$V_{Bias}^* = \frac{Q_{Bias} \pm Q_{i,e^-}}{C} \quad \dots\dots\dots (2.61)$$

ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปคือ

$$V_{Bias} - V_{Bias^*} = \frac{Q_{Bias}}{C} - \frac{(Q_{Bias} \pm Q_{i,e^-})}{C} \quad \dots\dots\dots (2.62)$$

สำหรับเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของศักย์ไฟฟ้าที่ไบอัสโพรบสามารถหาได้ดังนี้

$$100 \times \frac{V_{Bias} - V_{Bias^*}}{V_{Bias}} = \frac{|Q_{i,e^-}|}{C} \times \frac{100}{V_{Bias}}$$

$$\varepsilon = I_{i,e^-} \frac{\tau}{CV_{Bias}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (2.63)$$

เมื่อ ε คือค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของศักย์ไฟฟ้าที่ไบอัสโพรบ
ดังนั้นถ้ากำหนดค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจะสามารถหาค่าตัวเก็บประจุที่ต้องใช้ได้ดังตัวอย่างต่อไปนี้

กำหนด $\varepsilon = 1\%$, $I_{i,e^-} = 10 \text{ A}$, $\tau = 10^{-3} \text{ s}$, $V_{Bias} = 200 \text{ V}$

$$\therefore C = \frac{10 \text{ A} \times 10^{-3} \times 100}{1 \times 200} = 5,000 \text{ } \mu\text{F}$$