



การทำงานของพลาสมาโฟกัสขนาดพลังงาน

๓ กิโลจูลในก๊าซชนิดต่างๆ

Operation of a 3 Kilojoule Plasma Focus
in Various Gases

กิตติโชติ ลิ้มลักษณ์เลิศ

Kittichot Limlukturt

วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Master of Science Thesis in Physics

Prince of Songkla University

2538

4586

79527

28 A. 2. 38

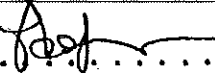
(1)

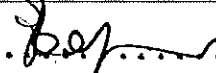
เลขที่ Qc.711.6 กบ3 2538 0.2
Bib Key 116964

ชื่อวิทยานิพนธ์ การทำงานของพลาสมาไฟด์สขนาดพลังงาน ๑ กิโลจูลในก๊าซ
ชนิดต่างๆ
ผู้เขียน นายกิตติโชติ ลีมลักษณ์เลิศ
สาขาวิชา ฟิสิกส์


คณะกรรมการที่ปรึกษา

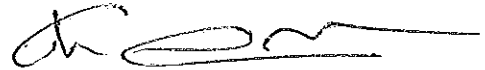
คณะกรรมการสอบ

ประธานกรรมการ

ประธานกรรมการ


(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยวิทย์ ศีลาวัชานาโย) (รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยวิทย์ ศีลาวัชานาโย)

กรรมการ

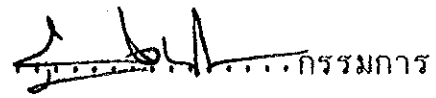
กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธวัช ชิตตระการ)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธวัช ชิตตระการ)

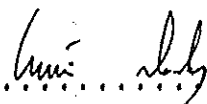
กรรมการ

(ดร.ประการ คุรุหงษา)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ บุญเหลือ พงศ์ดารา)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์



(ดร.ไพรัตน์ สงวนไพร)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์ การทำงานของพลาสมาไฟด์สขนาดพลังงาน 3 กิโลจูลในก๊าซ
ชนิดต่างๆ
ผู้เขียน นายกิตติโชติ ลิมลักษณ์เลิศ
สาขาวิชา ฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2537

บทคัดย่อ

พลาสมาไฟด์ส เป็น พลาสมาที่ถูกเร่งอยู่ในท่อโคเอกเซียล โดยที่แผ่นกระแสจะถูกเร่งจนสามารถที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟด์ส และจะทำให้เกิดเป็นพลาสมาที่มี อุณหภูมิ และความหนาแน่นสูง โดยจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขและตัวแปรอยู่หลายอย่างด้วยกัน พลาสมาไฟด์สสามารถที่จะเป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอน, รังสีเอกซ์, อิเล็กตรอน และลำของไอออน

ในวิทยานิพนธ์นี้ จะมีเงื่อนไขที่มีความสัมพันธ์กับการเกิดปฏิกิริยาพลาสมาไฟด์สและที่จะศึกษานี้จะมี การอัดประจุไฟฟ้า, ก๊าซ และความดัน โดยจะอัดประจุที่ 14 กิโลโวลต์ ซึ่งจะให้พลังงานประมาณ 3 กิโลจูล แก่ระบบซึ่งจะมี หัววัดกระแสไฟฟ้า และหัววัดศักย์ไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ในการศึกษาปฏิกิริยาไฟด์ส ในก๊าซชนิดต่างๆ และที่ความดันต่างๆกัน โดยผลการทดลองบางส่วน จะได้ผลดังนี้ ก๊าซไฮโดรเจน 3 มิลลิบาร์ , ก๊าซไนโตรเจน 0.5 มิลลิบาร์, ก๊าซฮีเรียม 2 มิลลิบาร์ ซึ่งผลที่ได้นี้ก็จะเป็นพื้นฐานในการศึกษาขั้นต่อไปในอนาคต

Thesis Title Operation of a 3 Kilojoule Plasma
 Focus in Various Gases
Author Kittichot Limlukturt
Major Programme Physics
Academic Year 1994

Abstract

Plasma focus is a plasma accelerator in coaxial configuration plasma current sheet is accelerated and focussed to create high temperature , high density parameters , plasma focus can generate neutron , X-rays , electron and ion beams.

In this project , conditions relevant to plasma focus reaction will be studied such as capacitor charging voltage , gases , and pressure . At charging voltage 15 kilovolt , the energy input into the system is 3 kilojoule . High voltage probe and current probe are used to study focus actions in various gas at different pressures , normally , H_2 at 3 mabar , N_2 at 0.5 mabar , He at 2 mbar . This experimentally should be useful in further study.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ใช้เวลาในการทำการทดลองประมาณ 2 ปีเต็มด้วยกัน และต้องอาศัยความร่วมมือของบุคคลหลายๆฝ่ายด้วยกัน ที่จะมาคอยช่วยแก้ไขปัญหาต่างๆ โดยเฉพาะ อาจารย์ ชัยวิทย์ ศิลาวชิราไณย์ ผู้ซึ่งให้ทั้งข้อมูล และช่วยแก้ปัญหาคณิตศาสตร์ และเทคนิคการทำต่างๆ ตั้งแต่เริ่มทำการทดลอง นาย นิพนธ์ธรรม สถาพร นักศึกษาปริญญาโทรุ่นเดียวกันที่ คอยช่วยคิด และช่วยดูแลควบคุมระบบบางส่วนในการทดลอง และตลอดจนถึง ฝ่ายช่าง ฝ่ายธุรการ ที่คอยให้ความสะดวกในหลายเรื่องทั้งก่อนและหลังการทำวิทยานิพนธ์

จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

นายกิตติโชติ ลีมีลักษณ์เลิศ

-ลำดับการทดลอง	46
วงจรแอลซีอาร์ (LCR circuit)	46
4 ผลและการอภิปรายผล	48
5 บทสรุป	71
วิเคราะห์ข้อมูล	71
สรุปผล	79
ข้อเสนอแนะ	80
บรรณานุกรม	81
ภาคผนวก	82
ประวัติผู้เขียน	106

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1. แสดงการคายประจุ	5
2. เฟสความเร่งตามแกน	6
3. เฟสการอัดแกนรัศมี	6
4. พฤติกรรมของแผ่นกระแสและพลาสมา	8
5. วงจรสมมาตรของท่อโฟคัส	9
6. ผลของการจำลองการเกิดพลาสมาโฟคัสของ ลีย์ และวีระชัย, ชัยวิทย์	19
7. แสดงวงจรของระบบอัดประจุคาปาซิเตอร์ที่กระแส คงที่	22
8. เครื่องควบคุมการอัดประจุ	23
9. แสดงผังการทำงานของระบบทริกเกอร์	25
10. วงจรพัลส์แรงต่ำ	26
11. กล้องวงจรไฟฟ้าแรงต่ำที่ประกอบเสร็จแล้ว	26
12. สัญญาณพัลส์แรงต่ำ	27
13. วงจรพัลส์แรงสูงแบบ เอสซีอาร์	28
14. กล้องวงจรพัลส์แรงสูงที่ประกอบเสร็จแล้ว	28
15. วงจรภาคขยายสัญญาณพัลส์แรงสูง	29
16. รูปท่อพลาสมาโฟคัส	30
17. ส่วนประกอบของท่อพลาสมาโฟคัส	31
18. ภาพถ่ายของท่อพลาสมาโฟคัส	32
19. การต่อสปาร์กแก๊ป เข้ากับตัวเก็บประจุ	32
20. แสดงออสซิลโลสโคปที่ใช้ในการวิจัย	34
21. แสดงภาพจำลองหัววัดกระแสไฟฟ้า	35
	(7)

ภาพประกอบ	หน้า
22. แสดงภาพถ่ายหัววัดกระแสไฟฟ้า	38
23. สัญญาณสอบเทียบหัววัดกระแสไฟฟ้า	39
24. การต่อวงจรของหัววัดศักย์ไฟฟ้าแรงสูง	41
25. ภาพถ่ายหัววัดศักย์ไฟฟ้าแรงสูง	42
26. แสดงตำแหน่งการวางชุดวัดนิวตรอน	44
27. แสดงการแจกแจงพลังงานของ อินเดียมฟอยล์แอค	45
ตีเว้น	
28. ฟังก์ชันจัดระบบการถ่ายภาพพลาสมาโฟกัส	45
29. แสดงวงจรแอลซีอาร์ของพลาสมาโฟกัสและตำแหน่ง ของหัววัดไฟฟ้า	46
30. แสดงกระแส (I) เทียบกับ เวลา (T)	49
31. แสดงแผ่นกระแส (Z) เทียบกับ เวลา (T)	50
32. แสดงความเร็วของแผ่นกระแส (V) เทียบกับเวลา (T)	51
33. แสดงจำนวนประจุ (Q) เทียบกับเวลา (T)	51
34. แสดงรัศมีของคลื่นกระแทกต่อรัศมีของขั้วใน ($K_s =$ r_p/a) เทียบกับ เวลา (T)	52
35. แสดงรัศมีของลูกสูบแม่เหล็ก (แผ่นกระแส)ต่อขั้วใน ($K_p = r_p/a$) เทียบกับ เวลา (T)	52
36. แสดงกระแสไฟฟ้าในเฟสความเร่งตามแกน (I) เทียบกับ เวลา (T)	53
37. แสดงดิฟเฟอเรนเชียลของกระแสในเฟสการอัดตาม แกน ($R = di/dt$) เทียบกับ เวลา (T)	53
38. สัญญาณของหัววัดศักย์ไฟฟ้า และหัววัดกระแสไฟฟ้า ของแก๊สอาร์กอน	56
	(8)

ภาพประกอบ	หน้า
39. ภาพถ่ายการทำงานพลาสมาโฟกัสของแก๊สอาร์กอน	57
40. สัญญาณของหัววัดศักย์ไฟฟ้า และหัววัดกระแสไฟฟ้า ของแก๊สฮีเลียม	59
41. ภาพถ่ายการทำงานพลาสมาโฟกัสของแก๊สฮีเลียม	60
42. สัญญาณของหัววัดศักย์ไฟฟ้า และหัววัดกระแสไฟฟ้า ของแก๊สดิวทีเลียม	62
43. ภาพถ่ายการทำงานพลาสมาโฟกัสของแก๊สดิวทีเลียม	63
44. สัญญาณของหัววัดศักย์ไฟฟ้า และหัววัดกระแสไฟฟ้า ของแก๊สไนโตรเจน	65
45. ภาพถ่ายการทำงานพลาสมาโฟกัสของแก๊สไนโตรเจน	66
46. สัญญาณของหัววัดศักย์ไฟฟ้า และหัววัดกระแสไฟฟ้า ของแก๊สไฮโดรเจน	68
47. ภาพถ่ายการทำงานพลาสมาโฟกัสของแก๊สไฮโดรเจน	69
48. ความดันสำหรับการเกิดโฟกัสในแก๊สชนิดต่างๆ	71, 72
49. เวลาที่เกิดโฟกัสของแก๊สแต่ละชนิด	73
50. ความดันแก๊สอาร์กอนที่เกิดปฏิกิริยาโฟกัส	75
51. สัญญาณการเกิดโฟกัสของแก๊สอาร์กอนที่ความดันต่างๆกัน	76
52. กราฟเปรียบเทียบผลที่ได้กับเอกสารอ้างอิง (A.J. Smiht 1986)	78
53. ผลการทดลองจากแก๊สหลายชนิด (A.J. Smiht 1986)	79

บทที่ 1

บทนำ

บทนำต้นเรื่อง

เครื่องมือพลาสมาโฟกัส เป็นเครื่องมือที่แสดงถึงพลาสมาที่ร้อนจัด และพลาสมาที่มีความหนาแน่นสูง ประดิษฐ์ขึ้นครั้งแรกโดย Mather (ค.ศ. 1964) และ Filipov (1962) เครื่องมือชนิดนี้จะให้ค่าของความหนาแน่น (n) คูณกับเวลา (T) ที่อ้อนรวมกันเกิดปฏิกิริยาฟิวชันสูง ช่วงเวลาในการเกิดการโฟกัสใช้เวลาประมาณ 10 นาโนวินาที และเมื่อทำให้เกิดการโฟกัสโดยใช้แก๊สดีวเทียม (D) จะทำให้อ้อนของ D รวมตัวเกิดปฏิกิริยาฟิวชันและได้นิวตรอน เครื่องมือนี้จะแสดงให้เห็นว่าถ้าใช้พลังงาน 100 จูลจะให้นิวตรอน 10^5 ตัว และเครื่องมือชนิดนี้เมื่อทำการทดลองในห้องทดลองขนาดเล็กอาจใช้พลังงานเพียง 10 กิโลจูล ก็สามารถให้นิวตรอนได้ 10^3 ตัวต่อการเกิดปฏิกิริยาฟิวชัน 1 ครั้ง ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน (E) ที่ให้กับจำนวนนิวตรอน (N) อย่างง่าย ๆ คือ

$$N \propto E^2 \quad \dots (1)$$

เครื่องมือนี้ นอกจากจะเป็นพลาสมาที่ร้อนจัดมีความหนาแน่นสูงและให้นิวตรอนเนื่องจากปฏิกิริยาฟิวชันแล้วยังจะปล่อยรังสีเอ็กซ์ จำนวนมาก และยังมีลำของอิเล็กตรอน เครื่องมือชนิดนี้มีโครงสร้างง่าย ๆ ที่สามารถใช้ศึกษาในห้องทดลองจำนวนมากทั่วโลก และเป็นครั้งแรกที่ได้มีการวิจัยในประเทศไทยตลอดช่วงเวลาทั้งก่อนและหลังการทำวิจัยได้มีการทำกิจกรรมที่เกี่ยวกับการวิจัยจริง ดังนี้

1. ก่อนการทำการทดลองนี้ได้ทำการจำลองการเกิดพลาสมาไฟคัลบน ไมโครคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรมของ ดร. เคนส์ เวสสัน (Dr. Ken Wesson)

2. ทำการทดลองระบบวัตไฟฟ้า ซึ่งก่อนการทดลองพลาสมาไฟคัล เราจำเป็นต้องออกแบบอุปกรณ์ในการวัดทั้ง 2 ชนิด คือ หัววัดศักย์ไฟฟ้า และหัววัดกระแสไฟฟ้า ในขั้นตอนแรกก็ได้ออกแบบหัววัดทั้งสองเพื่อทดลองกับ วงจรหลอดแฟลช ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดแสงของ วิทยานิพนธ์ที่มีชื่อว่า เทคนิค การถ่ายภาพแบบซีโรเรเนความเร็วสูงโดยใช้หลอดแฟลช โดยวงจรจะคล้าย กับ พลาสมาไฟคัล ซึ่งผลที่ออกมาก็ได้ผลที่ดี ซึ่งหัววัดทั้ง 2 สามารถที่จะทำ งานได้ดี และผลงานนี้ได้เสนอในวารสารสงขลานครินทร์ (2538) แล้ว

3. ในระหว่างการทำกรทดลองได้ออกแบบเตรียมระบบวัด นิวตรอน เพื่อที่จะวัดจำนวนนิวตรอนที่จะเกิดจากปฏิกิริยาไฟคัลเมื่อใช้ก๊าซดิวทีเรียม และ เพื่อเตรียมศึกษาวิจัยขั้นต่อไปโดยจะมีรายละเอียดในบทที่ 2

4. หลังจากทดลองเสร็จเรียบร้อยแล้วก็ได้มีการนำไปเสนอในการ สัมมนาที่เชียงใหม่ได้ใช้ หัวเรื่องว่า เครื่องเร่งพลาสมาอเนกประสงค์ขนาด 3 กิโลจูล

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาเทคนิคการวัดพัลส์ของไฟฟ้าแรงสูง
2. เพื่อศึกษาการทำงานของอุปกรณ์พลาสมาไฟคัล
3. เพื่อศึกษาการไฟคัลโดยสังเกตจากสัญญาณของหัววัดศักย์ไฟฟ้า (High voltage probe) และหัววัดกระแสไฟฟ้า (Rogowski coil)

บทที่ 2

ทฤษฎีการเคลื่อนที่ของพลาสมาไฟคัส

ตอนที่ 1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พลาสมาไฟคัส ถูกสร้างขึ้นมาเป็นพลาสมาที่ร้อนจัด และมีความหนาแน่นสูงซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาฟิวชันให้นิวตรอนได้ เครื่องมือชนิดนี้เป็นเครื่องมือง่าย ๆ ซึ่งอาจจะสร้างโดยไม่จำเป็นต้องพึ่งเทคโนโลยีขั้นสูงมาก ส่วนมากแนวความคิดเกี่ยวกับ ทฤษฎีของเครื่องมือชนิดนี้ ก็จะแตกต่างกัน สำหรับเฟสความเร่งตามแกน (axial acceleration phase) ไม่ค่อยมีปัญหาในด้านการคำนวณการเคลื่อนที่ แต่วิธีการคำนวณการเคลื่อนที่ของเฟสการอัดแกนรัศมี (radial pinching) นั้นไม่ถนัดซึ่งเฟสนี้ทำให้ทฤษฎีที่ใช้แตกต่างกัน พ็อตเตอร์ (Potter, Phys. Fluids, 14, 1911(1971)) ได้เขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ใน 2 มิติ ขึ้นซึ่งสามารถใช้อธิบายรายละเอียดของ เฟสความเร่งตามแกน ได้ดีเท่ากับ เฟสการอัดแกนรัศมี อย่างไรก็ตามกฎนี้มีความซับซ้อนมาก และมีการตรวจสอบความถูกต้องอีกครั้งโดยเฟสความเร่งตามแกน สามารถตรวจสอบด้วยแบบจำลองสโนว์พลาว (snowplow) อย่างง่าย ๆ ได้ เนื่องจากมันเกิดอย่างรวดเร็ว แล้วหายไปทำให้ไม่สามารถยืนยันรัศมีสมดุลถึงเสถียรได้ในที่สุด ซาคูราห์ (M. Zakauillah, T.J. Baig and G. Murtaza in Research with Small Plasma Experiments, World Scientific Singapore (in press)) ได้พัฒนาแบบจำลอง 2 มิติ พร้อมกับตัวแปรมาตรฐานที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบเครื่องมือสมการพื้นฐานของแบบจำลอง สโนว์พลาว ถูกสร้างขึ้นสำหรับพลาสมาไฟคัสแบบจำลองนี้เป็นที่รู้จักกันดี และเมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับเฟสการอัดตามรัศมี จะกำหนดให้รัศมีของพินช์ เท่ากับ ศูนย์ โดยครอบคลุมเทอมของ การหน่วงความดัน

ที่มีการเปลี่ยนแปลงความพยายามด้านอื่น ๆ คือการเข้ามาตราฐานต่ำสุดของรัศมี เช่น รัศมีลาร์เมอร์อย่างไรก็ตาม ลี (Lee 1981) ได้แสดงให้เห็นว่าวิถีเหล่านี้ไม่สอดคล้องกับพลังงาน และควรจะใช้แบบจำลองดุลพลังงานแทน ซึ่งจะช่วยให้จุดปลายของเส้นทาง การเคลื่อนที่ถูกต้อง และทำให้รัศมีสมมูลถึงเสถียร ถูกต้องการรวมแบบสโนว์พลาสมา กับแบบจำลองดุลพลังงานจะทำให้เส้นทางการเคลื่อนที่สอดคล้องกับพลังงานอย่างสมบูรณ์

อย่างไรก็ตาม แบบจำลองสโนว์พลาสมา ก็เป็นโครงสร้าง ของ

แบบจำลองที่จำเป็น พืดเตอร์ ได้แนะนำแบบจำลอง สลัก (slug) ซึ่งใช้ประยุกต์ในกรณีพิเศษที่กระแส และความยาว ฟินซ์ คงที่กล่าวคือได้ใช้แบบจำลองนี้กับการหดตัวของ ฟินซ์ เพื่อแสดงชั้นการหดตัวใน เฟสการอัดแกนรัศมีของ พลาสมาไฟคัส ความยาวของฟินซ์และกระแสพลาสมาจะสอดคล้อง กับการเปลี่ยนแปลงของตัวมันเอง

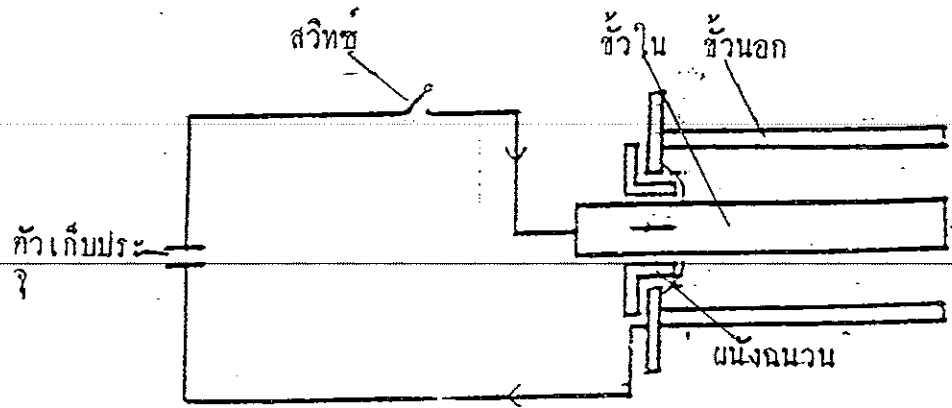
ตอนที่ 2 การเคลื่อนที่ของพลาสมาไฟคัส

เครื่องมือพลาสมาไฟคัสอาจพิจารณาการทำงานในเฟสต่างๆได้ 4 เฟส ด้วยกันคือ

1 เบรคดาวน์และการคายประจุข้ามผิว (Breakdown and discharge)

รูปร่างของเครื่องมือพลาสมาไฟคัส แสดงในภาพประกอบ 30 เครื่องมือประกอบด้วยขั้วใน (cathode) และขั้วนอก (anode) ที่มีแกนร่วมกัน แยกกันโดยฉนวน แหล่งจ่ายไฟคือตัวเก็บประจุไฟฟ้า (capacitor) ซึ่งอัดประจุ ด้วยความต่างศักย์ และสวิตช์จะต่อกับขั้วในเมื่อปิดสวิตช์พร้อมกับเงื่อนไขต่างๆเหล่านี้ถูกปรับให้เหมาะสม ไฟฟ้าจะคายประจุ (discharge) ข้ามผิวของฉนวนระหว่างขั้วใน ทำให้กระแสออกมาจากขั้วในและไหลไปยังขั้วนอก ทุกทิศทุกทาง เนื่องจากมันสมมาตร และจากแรง $\mu \times B$ ทำให้ผิวของกระแส

เคลื่อนที่ไปข้างหน้า

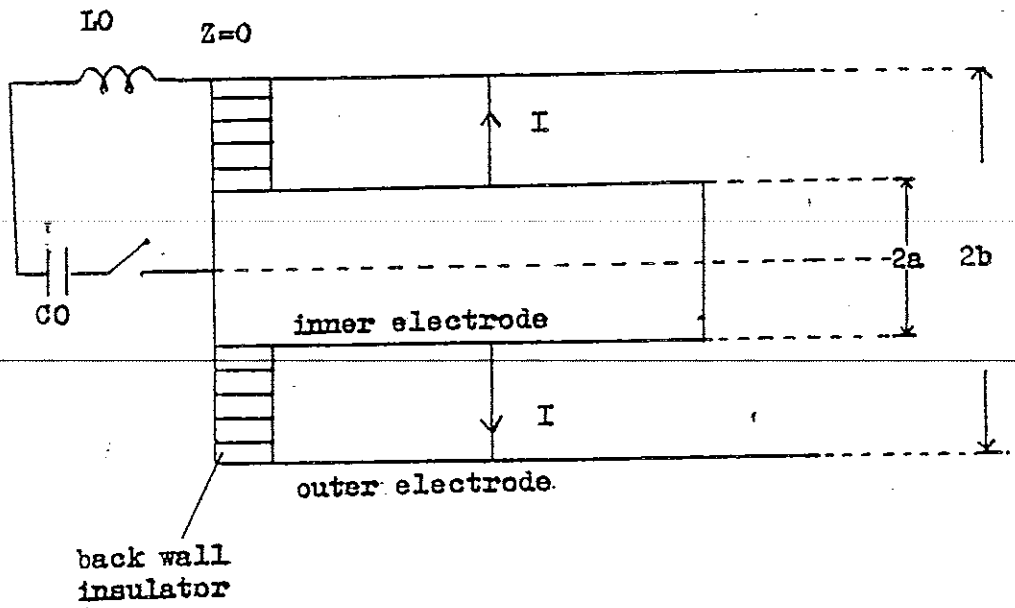


ภาพประกอบ 1 แสดงการคายประจุ

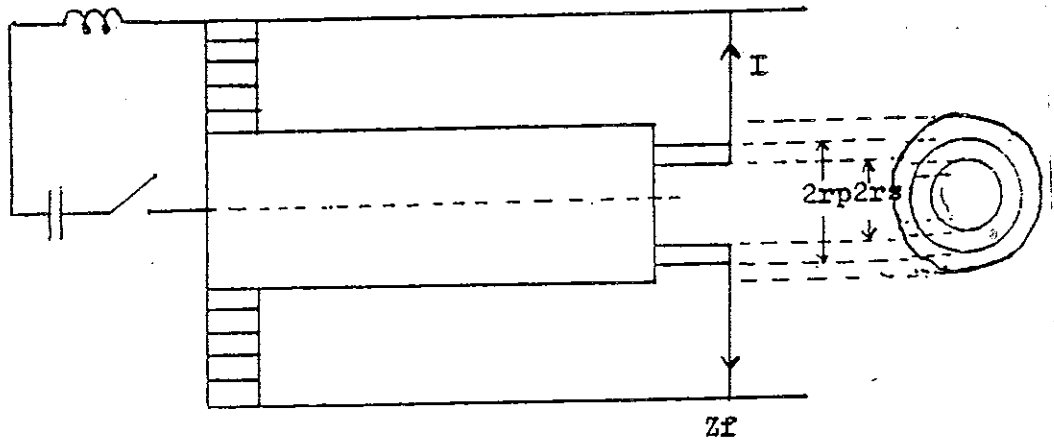
2 เฟสความเร่งตามแกน (Axial acceleration) ซึ่งลักษณะการทำงานของเครื่องมือในเฟสนี้จะคล้ายกับการทำงานของเครื่องมือที่เกิดคลื่นกระแทก เนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic shock tube) มาก

3 เฟสการอัดแกนรัศมี (radial compression) ซึ่งพฤติกรรมของพลาสมา อาจจะถูกอัดเป็นพินช์ พร้อมกับความยาวของพินช์ซึ่งเพิ่มขึ้นตามรัศมีของพินช์ที่ลดลง 2 เฟสของพลาสมานี้อาจพิจารณาจาก แบบจำลอง สโนว์โพล ซึ่งแผ่นกระแสพลาสมา (current sheet) จะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าเมื่อสิ้นสุด 2 เฟส เครื่องมือนี้จะทำงานต่อไปยังเฟส 3 ซึ่งเป็นพลาสมาเฟสที่มีความหนาแน่นสูง เฟสนี้จะเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ และจะทำงานต่อไปยังเฟสที่ 4 ซึ่งเป็นกระบวนการที่สนามแม่เหล็กมีความยุ่งเหยิงก็คือลำของพินช์ จะขยายออกล้มพินช์กับเส้นผ่านศูนย์กลาง นิวตรอนจำนวนมากจะเกิดขึ้น

เนื่องจากการเปลี่ยนจากเฟสที่ 3 ไปเป็นเฟสที่ 4



ภาพประกอบ 2 เฟสความเร่งตามแกน



ภาพประกอบ 3 เฟสการอัดแกนรัศมี

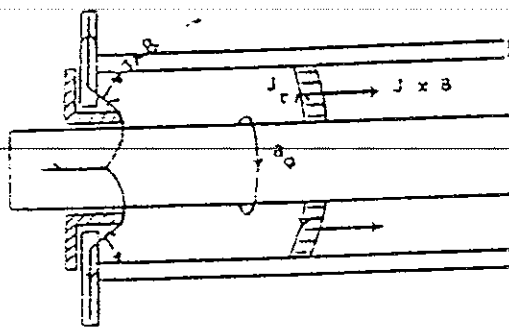
ภาพประกอบ 1 และ 2 แสดงการเคลื่อนที่ของพลาสมาโฟกัสทั้ง 2 เฟส

แบบจำลองนี้เมื่อปิดสวิตช์ ตัวเก็บประจุไฟฟ้า (V_0) จะจ่ายไฟ แล้วเกิดการกระโดดข้ามผนังฉนวน (backwall insulator) ทำให้เกิดเป็นแผ่นกระแสอยู่รอบแกน (ขั้วใน) อย่างสมมาตรมันจะเคลื่อนที่จาก ฉนวนฉนวน และถูกขับไปตามข้างหน้าด้วยแรง $J \times B$ ในทิศ Z เมื่อมาถึงตำแหน่ง $Z = Z_0$ ต่อไปจะเป็นการเริ่มต้นของ เฟลส์รัศมี ขบวนการที่เกิดขึ้น เฟลส์อัดแกนรัศมีแสดง ในภาพประกอบ 3

สำหรับ เฟลส์ความเร่งตามแกน เราจะมาพิจารณาจากแบบจำลองสโนว์โพล เมื่อ แผ่นกระแส อยู่ที่ตำแหน่ง Z มันจะสะสมมวลทั้งหมดที่มีมวลที่ตำแหน่ง Z นี้ วิธีนี้เป็นการประมาณโดยไม่เพิ่มปัญหาพื้นฐานของเฟลส์ความเร่งตามแกน อย่างไรก็ตามใน เฟลส์การอัดแกนรัศมี ถ้าใช้แบบจำลองสโนว์โพลแล้วมันจะไปเพิ่มแรงอัดที่รัศมีเป็นศูนย์ ถ้าการอัดไม่ถูกทำให้สิ้นสุดอย่างถูกต้อง โดยสมดุลพลังงานอย่างไรก็ตามถ้าใช้แบบจำลอง สลัก (พร้อมโครงสร้าง) คลื่นกระแทกจะแยกออกจากลูกสูบแม่เหล็ก และจะมีผลต่อชั้นความหนาของพลาสมาที่จำกัดนี้ ชั้นพลาสมาจะถูกขับเข้าไปข้างในตามแนวรัศมีบนผิวหน้าของขั้วใน โดยแรง $J \times B$ และชั้นพลาสมานี้จะหดตัว (เพราะว่าจะมีแรงอัด ที่ปลายเปิดปลายหนึ่งในแบบจำลอง สลัก) เมื่อคลื่นกระแทกกระทบแกนโพตัส ลูกสูบแม่เหล็ก จะหยุดและก่อดัวให้สมดุลแบบสมดุลกึ่งเสถียร อย่างไรก็ตามเมื่อตรวจสอบโดยใช้สมดุลพลังงาน ได้ชี้ให้เห็นว่าลูกสูบแม่เหล็กยังมีการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องอีกเล็กน้อย ดังนั้นในที่สุดรัศมีสมดุลกึ่งเสถียรควรจะถูกกำหนดด้วย ดุลพลังงานซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีว่า นิวตรอนจำนวนมาก ถูกสร้างใน เฟลส์เบรคดาว์น และการคายประจุข้ามผิวตามอธิบายใน รัศมีสมดุลกึ่งเสถียร อย่างไรก็ตามยังไม่มีทฤษฎีอธิบายเฟลส์โดยอธิบายความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของ เฟลส์ความเร่งตามแกน และ เฟลส์การอัดแกนรัศมี และหวังว่าในที่สุดความเข้าใจ Z เฟลส์นี้จะนำไปสู่ความเข้าใจใน เฟลส์เบรคดาว์น และการคายประจุข้ามผิว

เมื่อกระแสไหลออกจากขั้วใน ไปยังขั้วนอก ในแนวรัศมี

และมีสมมาตร ทำให้เกิดเป็นแผ่นบางๆของกระแส (lift-out phase) และเคลื่อนที่ไปข้างหน้าทางปลายท่อด้วยแรง $J \times B$ แผ่นกระแสก็จะพาแก๊สที่บรรจุ ที่มันพบแรงไปทางปลายท่อ ภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 4 พฤติกรรมของแผ่นกระแสและพลาสมา

4 เฟสที่พลาสมามีความหนาแน่นสูง และ เฟสการเกิดไฟคัส (pinching phase)

ลำพลาสมาซึ่งมีความหนาแน่นสูง จะก่อดัชนีแกนของท่อไฟคัส บริเวณผิวหน้าของขั้วใน และเคลื่อนที่มารวมกันที่จุดศูนย์กลางของขั้วใน ทำให้ลำพลาสมามีความชันเป็นศูนย์คือจะเป็นเส้นตรงกับแกนของไฟคัส แต่มันไม่เสถียรกล่าวคือหลังจากนั้นลำพลาสมาจะแตกหักบนผิวหน้าของขั้วในอย่างรวดเร็ว ซึ่งก็คือจะเปลี่ยนมากเป็นเฟสที่พลาสมามีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่มาก

ตอนที่ 3 ทฤษฎีเฟสความเร่งตามแกน-แบบจำลอง สโนว์พลาเว

1 สมการของการเคลื่อนที่

ในเฟสความเร่งตามแกน พิจารณาว่าแผ่นกระแสจะกวาดมวลทั้งหมดที่มันพบไปด้วย ดังนั้นตำแหน่ง z มวลที่ถูกพามาโดยแผ่นกระแส คือ

$$\rho_0 \{ r(b^2 - a^2)z \} \dots (2)$$

ρ_0 = ความหนาแน่นของแก๊สเริ่มต้น

a = รัศมีของขั้วใน

b = รัศมีของขั้วนอก

z = ตำแหน่งของแผ่นกระแส

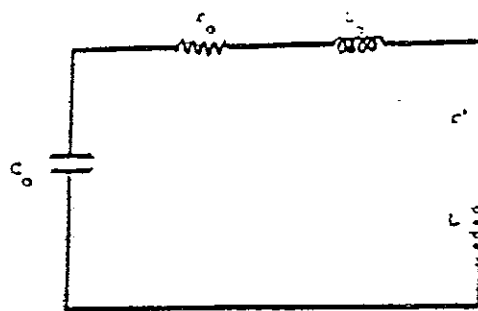
และอัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมของ แผ่นกระแส คือ

$$\frac{d \{ r \rho_0 (b^2 - a^2) z dz \}}{dt} = \frac{\mu I^2 \ln b}{4\pi z} \dots (3)$$

พจน์ด้านขวามือ คือแรงของสนามแม่เหล็กของแผ่นกระแส ซึ่งอินทิเกรตเหนือแผ่นกระแสระหว่าง $r = b$ ถึง $r = a$ ในสมการนี้ z และ I จะเป็นฟังก์ชันของเวลา กำหนดกระแส I สมการของวงจรถูกสร้างขึ้น

2 สมการกระแสไฟฟ้า

วงจรสมมาตรของท่อโฟกัส แสดงโดยแผนภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 5 วงจรสมมาตรของท่อโฟกัส

ตัวเก็บประจุ (C_0), ความเหนี่ยวนำ (L_0) และความต้านทาน (r_0) ขององค์ประกอบภายนอกซึ่งจะกำหนดไว้ความต้านทาน (r) และความเหนี่ยวนำ

(L) ของพลาสมาตามลำดับสมมติว่า ความต้านทานภายใน (r_o) และความต้านทานภายนอก (r) เล็กมากจึงไม่สนใจนำมาคำนวณเราอาจใช้กฎข้อที่ 2 ของเคอร์ชอฟ เขียนสมการของศักย์ไฟฟ้า สำหรับวงจร

$$\frac{d \{ (L_o + L) I \}}{dt} = V_o - \int_0^z \frac{I dt}{C_o} \quad \dots(4)$$

I = กระแสของแผ่นกระแส

V_o = ศักย์ไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

ซึ่ง ความเหนี่ยวนำของพลาสมา อาจเขียนเป็นฟังก์ชันของ z

$$L = \frac{\mu \ln b z}{2\pi a} \quad \dots(5)$$

$$dI = \frac{V_o - \int_0^z \frac{I dt}{C_o} - \frac{\mu \ln b I dz}{2\pi z}}{\{ L_o + \frac{\mu \ln b z}{2\pi a} \}} \quad \dots(6)$$

สมการที่ (3) และ (6) เป็น 2 สมการที่กำหนดพฤติกรรมของ z และ

3 นอร์มอลไลเซชัน

สมการที่ (3) และ (6) อาจเขียนใน รูปแบบ นอร์มอลไลเซชัน เพื่อจุดประสงค์ดังนี้

a) เพื่อให้ระบบของสมการง่ายขึ้นตั้งนั้นอาจจะมองเห็นฟังก์ชันพื้นฐานได้ชัดเจน

b) เพื่อแนะนำตัวแปรมาตรฐาน ซึ่งจะช่วยให้มองเห็นการทำงานของคลื่นกระแทก ได้ง่ายขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรมาตรฐาน ตัวแปรมาตรฐาน ที่ถูกต้องจะสัมพันธ์กับอัตราส่วนซึ่งครอบคลุมการทำงานของคลื่นกระแทก

สำหรับเฟสของพลาสมาโพคัลมี z อัตราส่วนที่เข้าประเด็นนี้

1) อัตราส่วนของช่วงเวลาการคายประจุของตัวเก็บประจุต่อช่วงเวลาการเคลื่อนที่ของ แผ่นกระแส จาก $z = 0$ ถึง $z = z_0$

2) อัตราส่วนของ ความเหนียวนำ (L_0) ต่อ ความเหนียวนำสูงสุดของพลาสมาใน เฟสความเร่งตามแกน

c) เพื่อบรรจุมสมการ สำหรับลักษณะเฉพาะของเวลาที่เคลื่อนที่จาก $z = 0$ ถึง $z = z_0$ ซึ่งจะถูก ทำให้อยู่ในรูปแบบของนอร์มอลไลเซชัน ชั้นแรกในนอร์มอลไลเซชัน คือเลือกปริมาณอ้างอิงที่ถูกต้อง เพื่อ นอร์มอลไลซ์ ตัวแปร

ซึ่ง z_0 คือความยาวของเฟส axial

$$t_0 = (L_0 C_0)^{1/2}$$

และ $I_0 = V_0 / (L_0 C_0)^{1/2}$ กระแสสูงสุด ของวงจร $L_0 - C_0$

พร้อมกับการ นอร์มอลไลเซชัน สมการที่ (3) จะกลายเป็น

$$\frac{d^2 \xi}{dT^2} = \alpha^2 \xi^2 - \frac{d\xi}{dT} \quad \dots (7)$$

ซึ่งตัวแปรมาตรฐานตัวแรก จะถูกแนะนำตามอัตราส่วนของ 2 ลักษณะเฉพาะของเวลา t_0 และ t_a

$$\alpha = t_o/t_a \quad \dots(8)$$

และ t_a เป็นลักษณะเฉพาะของเวลาที่เคลื่อนที่ตามแกน (axial) ถูกกำหนด
ดังนี้

$$t_a = \frac{\{ 4\pi^2 (b^2 - a^2) \}^{1/2} z_o \rho_o^{1/2}}{\mu \ln b} \frac{1}{a} \quad \dots(9)$$

ในลักษณะคล้ายๆกัน สมการวงจรถueกลายเป็น

$$\frac{di}{dT} = \frac{1 - \int idT - \rho i \frac{d\zeta}{dT}}{1 + \rho} \quad \dots(10)$$

ซึ่งตัวแปรมาตรฐานตัวที่สอง เป็นอัตราส่วนของ 2 ความเหนี่ยวนำ

$$\rho = \frac{\mu \ln b z_o}{2\pi a L_o} \quad \dots(11)$$

สมการที่ 7 และ 10 อาจอินทิเกรต ให้คำตอบของ α และ ρ
เงื่อนไขเริ่มต้น คือ

$$T = 0, \quad i = 0, \quad \frac{d\zeta}{dT} = 0, \quad \frac{d^2\zeta}{dT^2} = \sqrt{(\alpha^2/3)}, \quad i = 0$$

$$\frac{di}{dT} = 1, \quad \text{และ} \quad \int idT = 0$$

สมการที่ 7 และ 10 อาจจะอินทิเกรตเพื่อเลือกค่า α และ β โดยใช้วิธี ลินีเยร์ (Linear) ของ อูลเลอร์ (Euler) ซึ่งให้ค่าที่ถูกต้องเพียงพอสำหรับช่วงเวลา $= 0.001$

การอินทิเกรตจะหยุดลงที่ $z = z_0$

ตอนที่ 4 ทฤษฎีความเร่งตามแกน

1 การเคลื่อนที่ในแนวความเร่งตามแกน

ภาพประกอบ 2 แสดงเรขาคณิตของการอัดลำนพลาสมาที่เวลา (t) แผ่นกระแสเคลื่อนที่จาก a ถึงตำแหน่ง r_0 และขับเคลื่อนกระแทกของมันไปที่ตำแหน่ง r_1 ก๊าซทั้งหมดที่พบกับคลื่นกระแทกจะถูกกวาดมาจาก a ถึง r_1 คือจะถูกบรรจุอยู่ระหว่าง r_0 และ r_1 นี่คือรูปแบบ "สลัก" ของพลาสมาเงื่อนไขของ สลัก จะเป็นฟังก์ชันของ r และไม่พิจารณาเมื่อค่า r ไม่สม่ำเสมอที่เวลา t ใดๆ อย่างไรก็ตามแผ่นกระแสที่กระโดดข้าม ถูกสมมุติว่า บาง ดังนั้นสมการ กระโดดข้าม (shock-jump) จึงถือว่าเป็นสมการกระโดดข้าม

ในเฟสการอัดแก๊สที่มี ลูกสูบแม่เหล็ก จะรู้จักกันว่าเป็น การอัดที่มีความเร็วสูง (supersonic) ดังนั้นความเร็วเสียงใน สลัก จึงมากกว่าความเร็วอนุภาค ภายใต้เงื่อนไขนี้อาจสมมุติว่าความดันพลาสมา (P) ซึ่งมีค่าสม่ำเสมอจะสามารถข้ามสลักได้ดังนั้นความดันพลาสมาอาจจะสัมพันธ์กับสมการ shock-jump และกับความเร็ว คลื่นกระแทก $V_0 = dr_0/dt$ ตาม

$$P = \frac{2\rho_0 V_0^2}{(\gamma+1)} \quad \dots (12)$$

ยิ่งไปกว่านั้นที่ ลูกสูบแม่เหล็ก เราอาจให้ความดัน P เท่ากับความดัน P_0

$$p = p_b \quad \dots (13)$$

p_b = ความดันเนื่องจากสนามแม่เหล็ก

$$\text{ซึ่ง } p_b = \frac{\mu I^2}{8\pi^2 r_p^2} \quad \dots (14)$$

ดังนั้นจากสมการที่ 12 และ 14 เราจะมี

$$V = \frac{dr_p}{dt} = - \frac{[\mu(\delta+1)]^{1/2} * I}{p_b} \quad \dots (15)$$

ซึ่ง สัญลักษณ์ (-) จะชี้ถึงการเคลื่อนที่เข้าข้างในตามแนวรัศมี

2 การเคลื่อนที่ของเฟสการอัดตามแนวแกน

เพราะว่า แรงอัดกระทำที่ปลายหนึ่งซึ่งเปิดอยู่เราจึงคาดหวังว่าคลื่นกระแทกตามแกนจะแผ่ขยายในทิศ z ยิ่งไปกว่านั้นเราอาจสันนิษฐานว่าแรงดันจะขับเคลื่อนกระแทกทางรัศมี เหมือนกับขับเคลื่อนกระแทกตามแกน ดังนั้นระยะทางการเคลื่อนที่ของคลื่นตามแกน (z_p) จึง เพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงอัด

$$\frac{dz_p}{dt} = - \frac{dr_p}{dt} \quad \dots (16)$$

3 สมการวงจร

สมการวงจรสำหรับระบบใน เฟสพินซ์ อาจจะถูกเขียนตามสมการที่ 4

$$L = \frac{\mu \ln b z_o}{2r a} + \frac{\mu \ln b z_f}{2r r_p} \quad \dots (17)$$

ซึ่งทั้ง z_f และ r_p เปลี่ยนแปลงดังนั้นสมการวงจรวางอาจเขียนได้เป็น

$$\{L_o + \frac{\mu (\ln b) z_o}{2r a} + \frac{\mu (\ln b) z_f}{2r r_p}\} \frac{dI}{dt} \quad \dots (18)$$

$$+ \frac{i \mu (\ln b) dz_f}{2r r_p dt} - \frac{I \mu z_f dr_p}{2r r_p dt} = V_o - \int \frac{I dt}{C_o}$$

4 การเคลื่อนที่ของลูกสูบแม่เหล็กทางรัศมี

สมการที่ 15, 16 และ 18 ยังไม่เพียงพอที่จะแก้ปัญหาเนื่องจากมี 4 ตัวแปรคือ r_p, r_o, z_f และ I ถูกกำหนดเป็นฟังก์ชันของเวลา สมการที่ 6 อาจเกิดขึ้นโดยการประยุกต์กฎของการขยายแบบอะเดียบาติก เพื่อกำหนดมวลของก๊าซใน สลัก

$$PV^\gamma = \text{ค่าคงที่} \quad \dots (19)$$

$$\text{หรือ} \quad \frac{\delta dV}{V} + \frac{dP}{P} = 0 \quad \dots (20)$$

ซึ่ง γ คืออัตราส่วนความร้อนจำเพาะของพลาสมา

$$\text{ปริมาตรของสลัก (V) คือ } V = \pi(r_o^2 - r_p^2)z_f \quad \dots (21)$$

เพื่อจะขจัด V จากสมการที่ 16 เราต้องดิฟเฟอเรนเชียลสมการที่

1. เพื่อทำ dv ตามฟังก์ชันของ dr_u, dr_p และ dz_r ดังนั้นการดิฟเฟอเรนเชียล dr_u, dr_p และ dz_r จึงใช้ประยุกต์เพื่อกำหนดมวลของก๊าซตัวอย่างเช่นเมื่อ ลูกสูบแม่เหล็กเคลื่อนที่โดย dr_u จะยังไม่มี การเพิ่มมวลของขึ้น ภายในปริมาตร $V+dV$ อย่งไรก็ตามเมื่อ กระโดดข้ามจาก r_u ถึง r_u+dr_u มันจะยอมให้เพิ่มมวลของก๊าซ (ได้รับจำนวนก๊าซเพิ่มขึ้น) ภายในปริมาตรใหม่ $V+dV$ มวลใหม่ของก๊าซถูกอัดโดยอัตราส่วน $(\delta+1)/(\delta-1)$ และมวลที่เพิ่มขึ้นจะอยู่ในส่วนที่เพิ่มขึ้นของปริมาตร ดังนั้นการเพิ่มปริมาตรจึงเหมาะที่จะใช้เพื่อเป็นจุดเริ่มต้นหามวลของก๊าซในปริมาตร V ซึ่งการประยุกต์นี้ทำให้ dz_r เพิ่มมากขึ้น

ดังนั้นการประยุกต์ กฎของอะเดียเบติก ของสมการที่ 20 ในสแลก เราต้องดิฟเฟอเรนเชียลสมการที่ 21 ในรูปแบบนี้

$$dV = 2r(r_p dr_p - \frac{2}{\delta+1} r_u dr_u) z_r + (r_p^2 - r_u^2) \frac{2r dz_r}{\delta+1} \dots (22)$$

$$\frac{dV}{V} = \frac{2(r_p dr_p - \frac{2}{\delta+1} r_u dr_u) z_r + (r_p^2 - r_u^2) \frac{2 dz_r}{\delta+1}}{z_r (r_p^2 - r_u^2)} \dots (23)$$

เราอาจจะจัด dP/P จากสมการที่ 20 โดยเขียนจากสมการที่ 12 และ 15

$$\frac{dP}{P} = \frac{2dv_u}{V_u} = 2 \left(\frac{dI}{I} - \frac{dr_p}{r_p} \right) \dots (24)$$

แทน สมการที่ 23 และ 24 ภายในสมการที่ 20 แล้วจัด

รูปใหม่ และเราจะใช้กฎของออดีเตียบาคีในรูปแบบ.

$$\frac{dr_p}{dt} = \frac{\frac{2}{\delta+1} \frac{r_p}{r_p} \frac{dr_p}{dt} - \frac{r_p}{\delta I} \frac{1-r_p^2}{r_p^2} \frac{dI}{dt} - \frac{1}{\delta+1} \frac{r_p}{z_f} \frac{1-r_p^2}{r_p^2} \frac{dz_f}{dt}}{(\delta-1)/\delta + (1/\delta)r_p^2/r_p^2} \dots (25)$$

5 นอร์มอลไลเซชัน

4 สมการ (15), (16), (18) และ (25) ซึ่งอาจอินทิเกรตเพื่อหา r_p, r_p, z_f และ I สำหรับเฟสนี้ตามขบวนการนอร์มอลไลเซชัน ภายหลังจัดรูปใหม่ และสร้างสมการแสดงแบบจำลอง สลัก ทั่วๆ ไปในรูปแบบของนอร์มอลไลเซชัน

$$\frac{d\alpha_p}{dT} = -\alpha_p \alpha_1 / \alpha_p \dots (26)$$

$$\frac{d\psi_f}{dT} = \frac{-d\alpha_p}{dT} \dots (27)$$

$$\frac{d\alpha_p}{dT} = \frac{\frac{2}{\delta+1} \frac{\alpha_p}{\alpha_p} \frac{d\alpha_p}{dT} - \frac{\alpha_p}{\delta I} \frac{1-\alpha_p^2}{\alpha_p^2} \frac{dI}{dT} - \frac{1}{\delta+1} \frac{\alpha_p}{\psi_f} \frac{1-\alpha_p^2}{\alpha_p^2} \frac{d\psi_f}{dT}}{(\delta-1)/\delta + (1/\delta)r_p^2/r_p^2} \dots (28)$$

$$\frac{dI}{dT} = \frac{1 - \int \rho dT + \frac{\beta_1}{F} (\ln \alpha_p / C) \frac{d\psi_f}{dT} + \frac{\beta_1 \psi_f}{F} \frac{d\alpha_p}{dT}}{(1 + \beta - (\beta_1/F)(\ln \alpha_p / \psi_f) \psi_f)} \dots (29)$$

ซึ่ง $c = b/a$ และ $F = Z_0/a$ ตัวแปรมาตรฐานตัวใหม่สำหรับ
พินช์เฟส คือ

$$\alpha_1 = \{(\gamma+1)(c^2-1)\}^{1/2} F / (2 \ln c) \text{ and } \rho_1 = \rho / \ln C \dots (30)$$

ดังนั้นในทางตรงกันข้าม α และ ρ จะช่วยทำให้เฟสตามแกน (axial)
ง่ายขึ้นส่วน α_1 และ ρ_1 ในเฟสรัศมี (radial) เป็นอัตราส่วนของเวลา

การคายประจุ ของตัวเก็บประจุ ต่อ เวลาการเคลื่อนที่ในเฟสการอัด
แกนรัศมี (radial pinch) และ อัตราส่วนของความเหนียวภายใน ต่อ
ความเหนียวของ พินช์

เฟสการอัดแนวรัศมี จะเริ่มต้นหลังจากสิ้นสุดเฟสตามแกน คือเมื่อ
 $t = t_*$

$$= 1, i = t_*, \alpha_* = I, \alpha_{**} = 1, \text{ and } \rho_* = 0$$

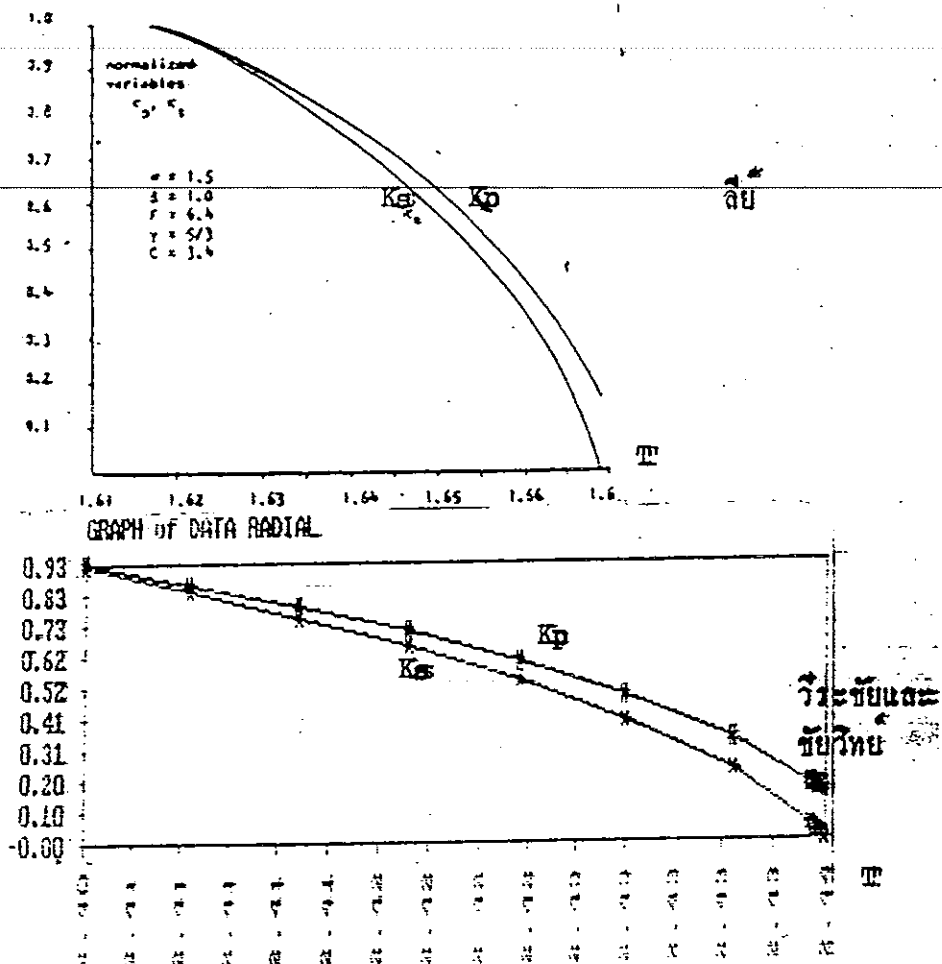
เฟสการอัดแนวรัศมี สิ้นสุดเมื่อ $K_* = 0$ ซึ่ง คลื่นกระโดด เข้า
ใกล้แกนไฟคัส และตำแหน่งของ K_* แทนด้วย K_{**} ซึ่งเป็นรัศมีสม
ดุลกึ่งเสถียรสำหรับ พินช์เฟสของพลาสมาไฟคัส

6 การอินทิเกรต

การอินทิเกรตสมการที่ (7) และ (10) แทนในสามการที่ (18) ถึง
(29) เป็นการใช้วิธีประมาณแบบเชิงเส้น อย่างง่ายๆซึ่งถูกตรวจสอบอีกครั้ง
โดยวิธี รังเงร์-กุตตาร์ และพบว่ามันจะให้ค่าที่ถูกต้องเพียงพอเมื่อทำการคํ
นวนซ้ำใหม่ 1000 รอบ

7 การจำลองภาพด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer modelling)

ลี (Lee 1988) ได้เขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยภาษาเบสิก เพื่อจำลองแบบพลาสมาสตร และ วีระชัย และชัยวิทย์ ได้เขียนโปรแกรมเดียวกันโดยใช้ภาษา ปาลกาล เมื่อเปลี่ยนค่าหลายชนิด ซึ่งจะได้ผลเช่นเดียวกันดังภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 6 ผลของการจำลองการเกิดพลาสมาไฟคัสของ ลี และวีระชัย, ชัยวิทย์

ต่อมา เวสสัน (Wesson 1995) ได้ใช้ ซอฟแวร์ (MUFFET) จำลองพลาสมาไฟคัสทั้งหมด ได้ผลรวดเร็วมากและสมบูรณ์ และผลจะแสดงใน บทที่

การจำลองแบบนี้จะช่วยให้การวางแผนทดลอง เช่นถ้าหากเปลี่ยนค่า

คาปาซิเตอร์, โวลท์ที่ใช้อัดประจุ หรือก๊าซ ก็สามารถคำนวณหาพารามิเตอร์
ของพลาสติกได้ล่วงหน้า และเปรียบเทียบถึงผลการทดลองได้ การทดลอง
โฟลด์มีอันตรายมาจาก รังสี, ไฟฟ้าแรงสูง และการระเบิดของก๊าซ การจำ
ลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์จะช่วยป้องกันปัญหาหลายประการได้ล่วงหน้า

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

การวิจัยนี้จำเป็นต้องใช้วัสดุและอุปกรณ์ในการวิจัยดังแสดงในรายการต่อไปนี

วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ แสดงได้ดังรายการต่อไปนี้คือ

- 1 ท่อเหล็กกล้าหลายขนาด ใช้สำหรับทำท่อพลาสมาไฟคัส และแขนต่อจากท่อเพื่อต่อ หัววัดความดันพิรานี (pirani gate), ท่อป้อนก๊าซ, ท่อใส่ก๊าซ และท่อเป็นช่องหน้าต่างซึ่งรายละเอียดจะแสดงดังภาพประกอบที่ 16
- 2 สายเคเบิล(cable) ใช้เพื่อต่อไฟฟ้าแรงสูงในระบบวงจรซึ่งจะใช้สายเคเบิลเบอร์ UR67-1m 100 puff และสายไฟเส้นในจะหุ้มด้วยฉนวนที่มีความต้านทานโวลท์ได้ถึง 14 กิโลโวลท์ และได้นำสายเส้นในไปทำเป็นส่วนประกอบของ หัววัดกระแสไฟฟ้า
- 3 ลวดทองแดงเส้นเล็ก ใช้สำหรับพันหัววัดกระแสไฟฟ้า
- 4 ตัวต้านทานหลายความต้านทาน ใช้ทั้งในระบบวงจรพลาสมาไฟคัสและระบบวัดไฟฟ้า
- 5 ตะกั่วเชื่อม สำหรับเชื่อมวงจรอิเล็กทรอนิกส์

อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้แบ่งอุปกรณ์ต่างๆแยกตามประเภทของแต่ละการทดลอง ซึ่งสามารถแยกได้ดังนี้

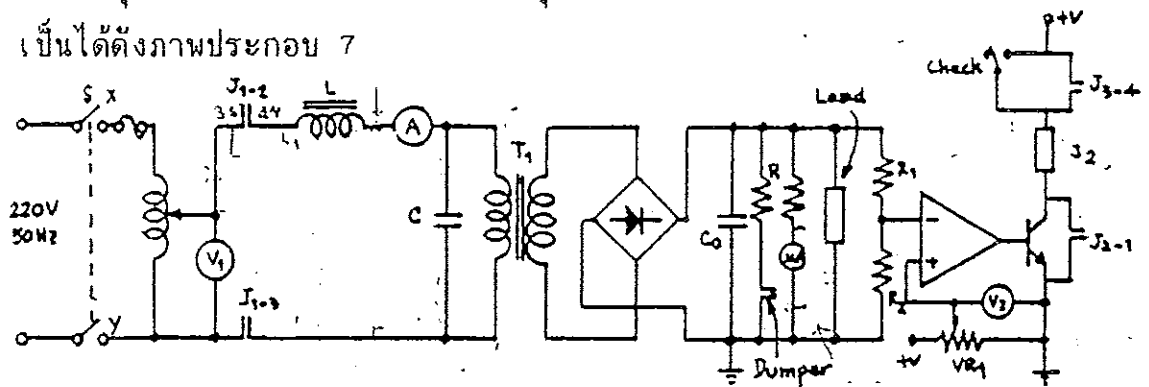
- ตอนที่ 1 ระบบคาปาซิเตอร์ และอัดประจุ

- ตอนที่ 2 ระบบทริกเกอร์ และสวิตช์ (หรือระบบควบคุมอิเล็กทรอนิกส์)
 ตอนที่ 3 ท่อพลาสมาไฟคัส และระบบสูญญากาศ
 ตอนที่ 4 ระบบวัดไฟฟ้า
 ตอนที่ 5 ระบบวัดนิวตรอน
 ตอนที่ 6 การถ่ายภาพพลาสมาไฟคัส
 ตอนที่ 7 ลำดับการทดลอง

ตอนที่ 1 ระบบคาปาซิเตอร์ และอัดประจุ

ตัวต้นกำลังไฟฟ้าแบบ พัลส์ (pulse) สำหรับอัดประจุให้แก่คาปาซิเตอร์ชนิดเก็บพลังงาน (energy storage capacitor) กำลังสูง ยี่ห้อ Maxwell ขนาด 30 ไมโครฟารัด (μF) 15 กิโลโวลท์ (kV) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้กับวงจร Passive ธรรมดา ทำให้การทดลองได้ผลไม่แน่นอนซึ่งการใช้งานจะขึ้นอยู่กับความชำนาญของผู้ใช้และโอกาสที่ตัวเก็บประจุจะเสียหายจะมีโอกาสมาก ดังนั้นจึงใช้

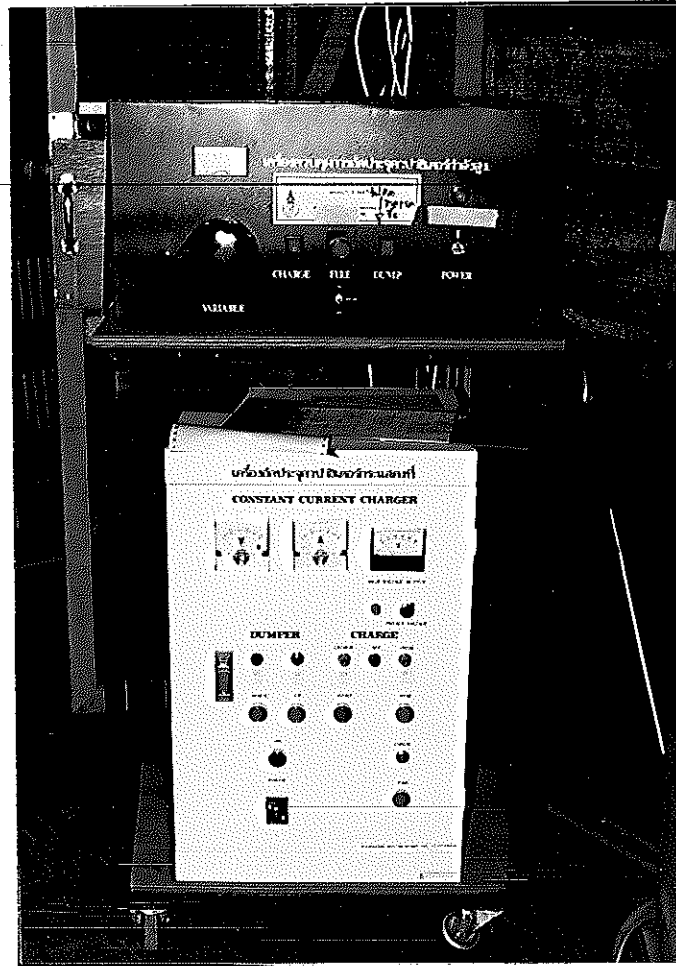
เครื่องอัดประจุแบบคาปาซิเตอร์กระแสคงที่ (แรงค์ สุวรรณณี วารสาร ม.อ 2538) ระบบกระแสคงที่ตัวการสูญเสียพลังงานเท่ากับ $I^2 R$ ซึ่งเมื่อเทียบกับ $(1/2)NCV^2$ กระแสที่ต้องใช้ $i = cd \, dv/dt$ เมื่อ dv/dt เป็นอัตราอัดประจุคาปาซิเตอร์ ระบบอัดประจุคาปาซิเตอร์ที่กระแสคงที่ อาจจะแสดงเป็นได้ดังภาพประกอบ 7



ภาพประกอบ 7 แสดงวงจรของระบบอัดประจุคาปาซิเตอร์ที่กระแสคงที่

กระแสที่อัดหาได้โดยเลือกค่า C_1 ให้

$$i = C_0 \frac{dE_0}{dt} = C_1 [LE_{peak} - E_0] f = \frac{E}{X_{c1}} \dots (31)$$



ภาพประกอบ 8 เครื่องควบคุมการอัดประจุ

การทำงานของเครื่องอัดประจุกระแสคงตัวจะเป็นไปตามลำดับขั้น

1. เปิดสวิตช์ (S) ซึ่งเป็น ระบบไฟหลัก (main power) อยู่ตำแหน่ง เปิด (on) หลอดไฟ1 (L_1) ติดสว่าง และ หลอดไฟ2 (L_2) และ หลอดไฟ1 สีเขียวแสดงตำแหน่ง หัวดัมพ์ยกลง (Dumper down) และ ตำแหน่งไม่อัดประจุ (charge off) ติดสว่างด้วย

2. กดปุ่ม หัวต้มพยับขึ้น (Dumper up) เพื่อยกหัวต้มพยับขึ้นทำให้ไฟหลอดไฟ 2 ดับและพร้อมที่จะอัดประจุ

3. ปรับความต่างศักย์ขาเข้า (variac input volt) ที่จะอัดประจุขา ตัวเก็บประจุ

4. กดปุ่ม อัดประจุ (charge on) หลอดไฟ 4 (L_4) สีแดงจะสว่างขึ้นจนถึง ศักย์ไฟฟ้า ที่ต้องการ อัดประจุไฟฟ้า

5. กดปุ่ม ยิง (Fire) วงจรทรานซิสเตอร์ของสวิตช์ไฟฟ้าแรงสูงจะทำงานตัวอัดประจุ ก็จะปล่อยประจุให้แก่ พลาสมาไฟคัส ทันทีภายในเวลา ไมโครวินาที

6. กดปุ่ม หัวต้มพยับลง ตัว ต้มพยับ ซึ่งทำด้วยทองแดงก็จะตกบนแผ่นสวิตช์ไฟฟ้าแรงสูงเพื่อปลดปล่อยประจุที่ค้างอยู่ผ่าน R ด้วยเวลา $t = RC$ (ประมาณ 1 วินาที)

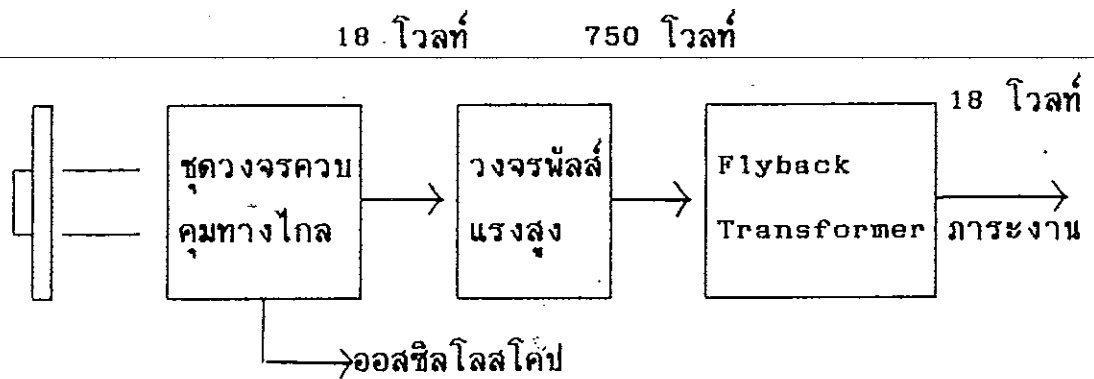
หมายเหตุ เมื่อเปิดสวิตช์ s ไฟฟ้า 220 โวลต์ จะจ่ายเข้าจุดควบคุมหลอดไฟและป้ายเตือนภัย (ไฟฟ้าแรงสูง) สีแดงจะสว่างขึ้นทั้งภายใน และนอกห้องปฏิบัติการพลาสมาเทคโนโลยี

ก่อนการทดลอง ได้ทำการสอบเทียบการอัดประจุ โดยจะเป็นค่า ศักย์ไฟฟ้าที่ตัวอัดประจุ กับ มิเตอร์ไฟฟ้าที่ชื่อ มิเตอร์วัดศักย์ไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Voltmeter) โดยได้รับการเอื้อเฟื้อโดยภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ม.อ หาดใหญ่ และได้ทำการ สอบเทียบมิเตอร์ที่ใช้อ่านเวลาอัดประจุด้วย ดังนั้นจึงทำให้มั่นใจได้ว่า ในการทดลองการอัดประจุจะได้ศักย์ไฟฟ้าในการอัดประจุตรงตามที่ต้องการ

ตอนที่ 2 ระบบทรานซิสเตอร์ และสวิตช์ (หรือระบบควบคุมอิเล็กทรอนิกส์)

วงจรพัลส์ไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งได้ออกแบบ (ณรงค์ สุวรรณมุณี วารสาร ม.อ 2532) เพื่อใช้ทรานซิสเตอร์งานทดลอง พลาสมาไฟคัส โดยวงจรนี้จะประ

กอบด้วยชุดควบคุมทางไกล (18 โวลต์) และพัลส์แรงสูง (750 โวลต์) ซึ่งจะ
ถูกขยายต่อโดยหม้อแปลงที่ใช้ในทรานส์ฟอร์ม (Flyback Transformer) ให้มี
แรงสูงถึง 20 กิโลโวลต์ ใช้ตัว ซิลิคอนคอนโทรลเรกติไฟเออร์ (SCR) เป็น
สวิตช์ จากการทดลองใช้งานพบว่าสามารถทำให้เกิดสปาร์คไฟฟ้าในอากาศ
พร้อมสปาร์คแก๊ป

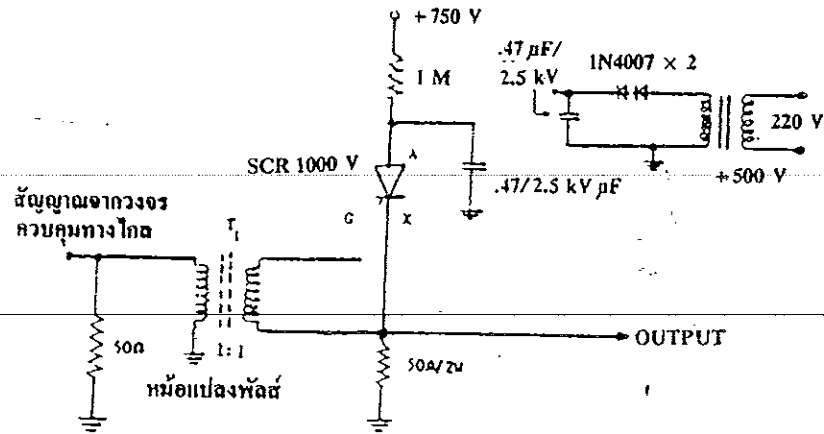


ภาพประกอบ 9 แสดงผังการทำงานของระบบทริกเกอร์

ได้ออกแบบวงจรโดยยึดหลักให้ได้ สัญญาณพัลส์ที่ต้องการ ใช้วัสดุ
ราคาถูกหาง่าย และซ่อมบำรุงได้ง่าย

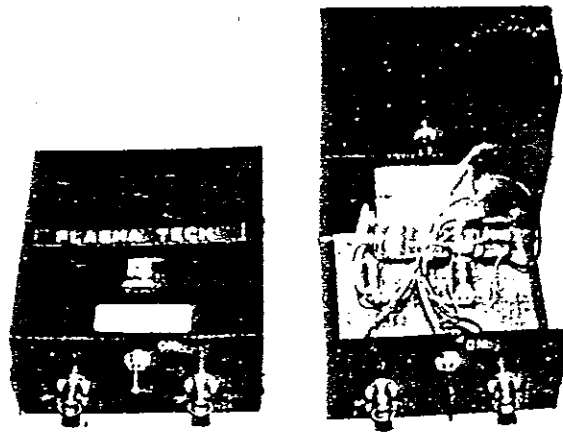
1. วงจรควบคุมทางไกล

วงจรนี้ประกอบบนแผงบรรจุกล่องโลหะ ขั้วต่อสัญญาณจะใช้ปลั๊กแบบ
บีเอ็นซี (BNC) เพื่อใช้กับสายไฟฟ้าแบบโคแอกเซียล 50 โอห์ม กล่องวงจรนี้จะ
ใช้ส่วนควบคุมหลัก (Master Control box) และส่งสัญญาณไปทริกเกอร์
ออสซิลโลสโคปด้วย สัญญาณที่ส่งออกไปจะมีความเร็วอยู่ในช่วงไมโครวินาที
และ 15 โวลต์ ก่อนที่สัญญาณจะถูกส่งต่อไป ซึ่งจะมียังวงจรดังภาพประกอบ



ภาพประกอบ 10 วงจรพัลส์แรงต่ำ

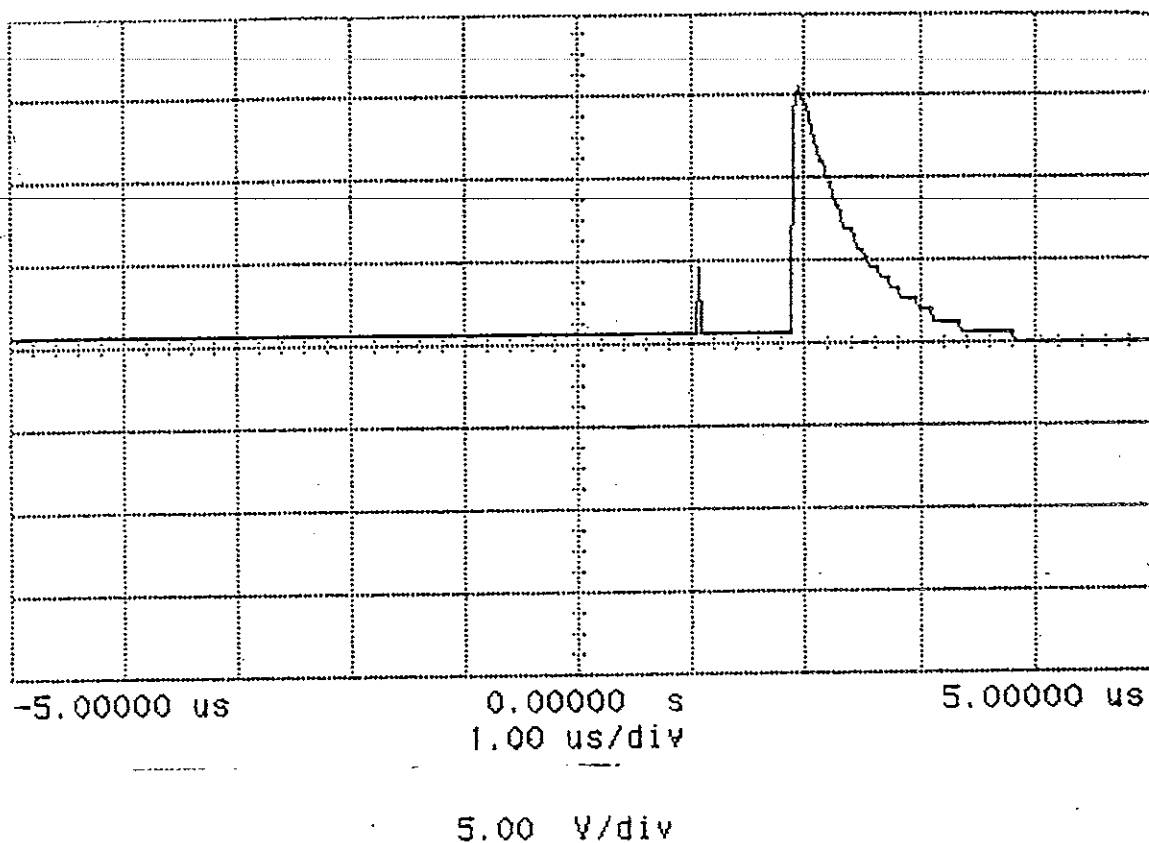
จะมีภาพกล่องวงจรพัลส์แรงต่ำตั้งภาพประกอบ 11



ภาพประกอบ 11 กล่องวงจรไฟฟ้าแรงต่ำที่ประกอบเสร็จแล้ว

ซึ่งจะมีลักษณะของพัลส์สัญญาณที่วัดได้จากเครื่องออสซิลโลสโคปดังภาพ

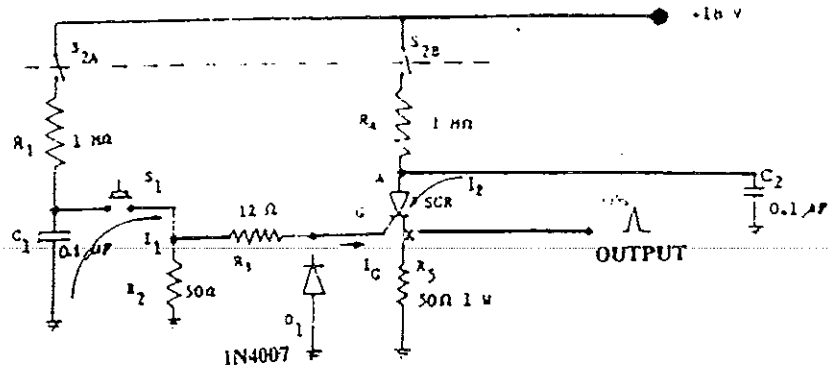
ประกอบ 12



ภาพประกอบ 12 สัญญาณพัลส์แรงต่ำ

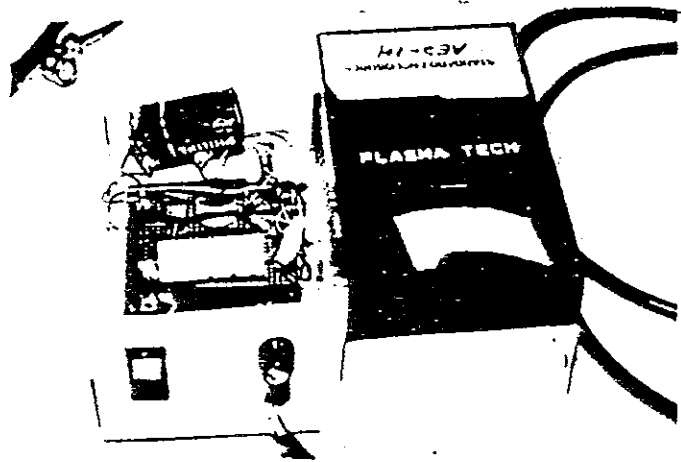
2. ชุดพัลส์แรงสูง

เนื่องจากสัญญาณไฟฟ้า 18 โวลต์ ยังคงต่ำเกินไปสำหรับการทริก เกอร์สวิตช์สปาร์กแก๊ป จึงจำเป็นต้องมีวงจรภาคแรงสูงซึ่งจะแปลง พัลส์ จาก 18 โวลต์ ไปเป็น 750 โวลต์ โดยมีวงจрдังภาพประกอบ 13



ภาพประกอบ 13 วงจรพัลส์แรงสูงแบบ SCR

จะมีลักษณะของกล่องวงจรพัลส์ไฟฟ้าแรงสูงดังภาพประกอบ 14

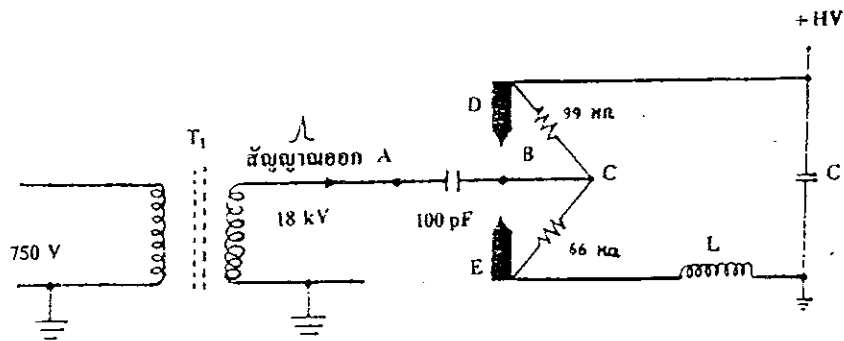


ภาพประกอบ 14 กล่องวงจรพัลส์แรงสูงที่ประกอบเสร็จแล้ว

3. วงจรไฟฟ้าแรงสูง

เป็นภาคขยายสัญญาณ 750 เป็นไฟฟ้าแรงสูง 18 กิโลโวลต์ โดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้ในโทรทัศน์ (flyback transformer) สัญญาณ

พัลส์แรงสูง 18 กิโลโวลต์ จะต่อกับภาระงาน (load) ที่ตำแหน่ง A ในภาพประกอบ 12 แสดงภาระงานซึ่งประกอบด้วยสะพานไฟฟาสปาร์กแก๊ป แบบ Swinging Cascade และตัวเก็บประจุไฟฟ้าเก็บพลังงาน (energy storage capacitor) C 100 pF เป็นตัวเก็บประจุแบบ ไอโซเลชัน (isolation capacitor) ซึ่งทำด้วยสายไฟฟ้าโคแอกเซียลแบบ UR no M67 (40 KV DC 50 โอห์ม) ใช้ป้องกันมิให้กระแสจาก ตัวเก็บประจุไฟฟ้า (C) ไหลย้อนกลับไปยังวงจรพัลส์แรงสูง สำหรับสปาร์กแก๊ปแบบ สวิตซ์ซึ่ง แคทเคช จะมีช่องว่างระหว่างทริกเกอร์ B กับขั้วไฟฟ้า เป็นอัตราส่วน 3 : 2 จึงต้องใช้ตัวต้านทานแบ่งค่าศักย์ในอัตราส่วน 99 : 66 เมกกะโอห์ม เมื่อมีสัญญาณพัลส์แรงสูงส่งไปยังขั้วทริกเกอร์ B จะทำให้เกิดสปาร์กกระหว่างขั้ว B กับขั้วคาโทด D ของสปาร์กแก๊ป พลาสมาในสปาร์กแก๊ปจะนำกระแสไฟฟ้าที่ ปล่อยจากตัวเก็บประจุ C (ซึ่งจะถูกอัดประจุรอไว้แล้ว กระแสไหลจากขั้วคาโทด D ผ่านขั้ว B ไปยังขั้วคาโทด E ของสปาร์กแก๊ป และผ่านไปยัง ภาระงานคือ พลาสมาไฟคัส ไปลงกราวด์ ค่าอิมพีแดนซ์ ($1/\omega C$) ของ 100 pF จะ ป้องกันมิให้กระแสไหลย้อนกลับ ซึ่งวงจรไฟฟ้าแรงสูงมีดังภาพประกอบ 15



ภาพประกอบ 15 วงจรภาคขยายสัญญาณพัลส์แรงสูง

ตอนที่ 3 ท่อพลาสมาไฟคัล และระบบสูญญากาศ

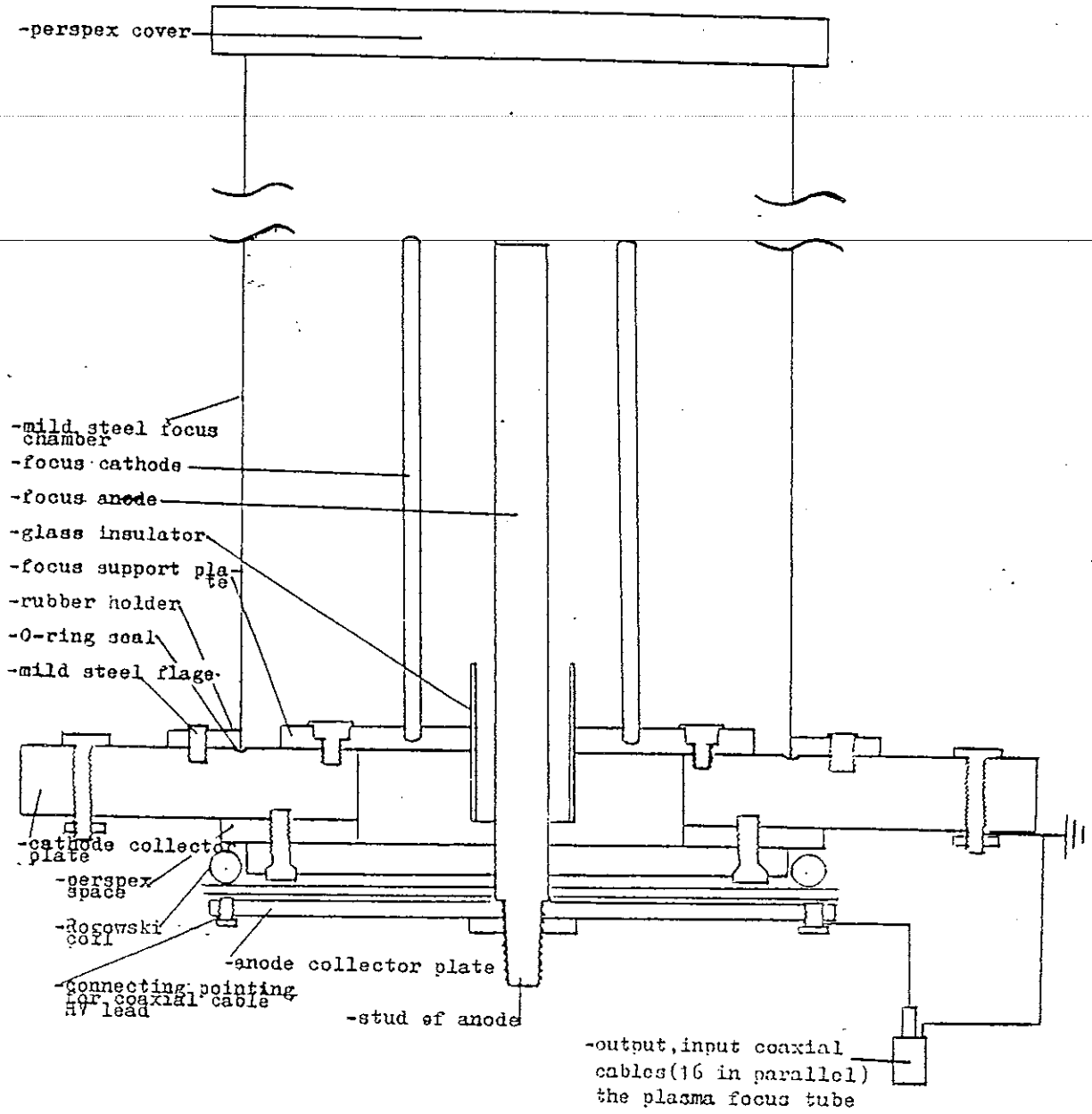
1. ท่อพลาสมาไฟคัล

โดยการทดลอง จะเป็นท่อที่ทำด้วย เหล็ก ภายนอกของท่อจะชุบด้วยโครเมียม และได้ทำการต่อท่อเล็กๆออกจากท่อพลาสมาไฟคัลเพื่อใส่ก๊าซ, ท่อเลียบหัววัด พิรานี (Pirani Gauge) และ เป็นหน้าต่างสำหรับสังเกตปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น โดยที่หน้าต่างและฝาปิดท่อที่ทำการทดลองนี้ได้ใช้ แผ่นเพอร์สเป็ก (Perspex) เป็นตัวปิดซึ่งมีรายละเอียดขนาดดังภาพประกอบ 16 รายละเอียดของขั้วไฟฟ้าภายในดังภาพประกอบ 17 ภาพประกอบ 18 ซึ่งเป็นภาพถ่ายจริงของท่อพลาสมาไฟคัล และ การต่อสปาร์กแก๊ปเข้ากับตัวเก็บประจุดังภาพประกอบ 19



ท่อทองแดง

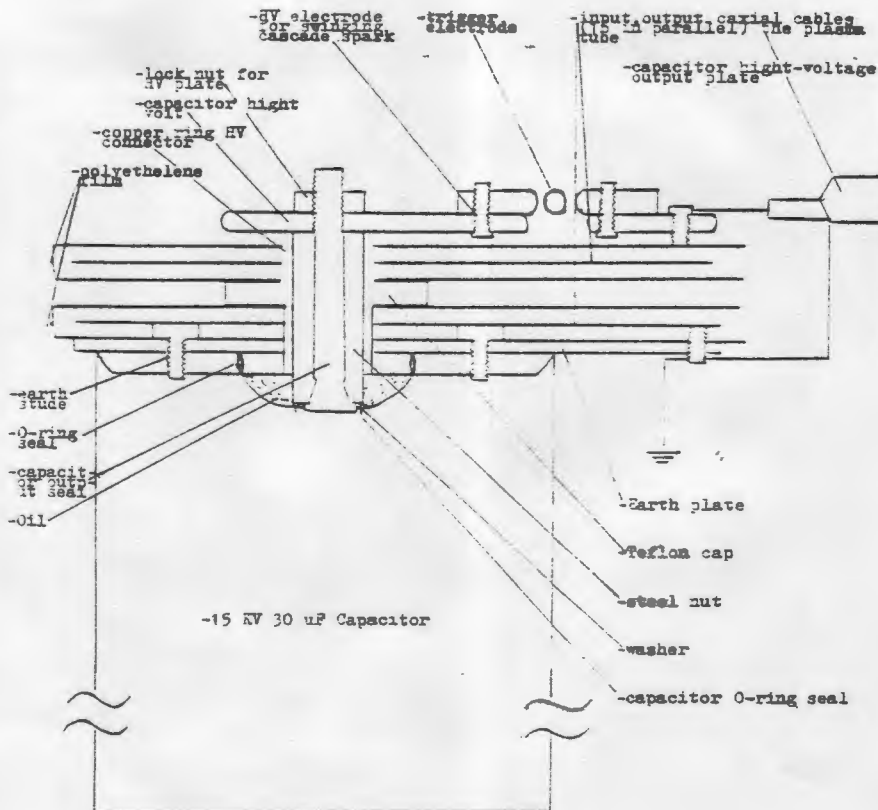
หน้าต่าง
ภาพประกอบ 16แผ่นเพอร์สเป็ก
รูปท่อพลาสมาไฟคัล



ภาพประกอบ 17 ส่วนประกอบของท่อพลาสมาไฟกัส



ภาพประกอบ 18 ภาพถ่ายของท่อพลาสมาไฟคัส



ภาพประกอบ 19 การต่อสปาร์กแก๊ปเข้ากับตัวเก็บประจุ

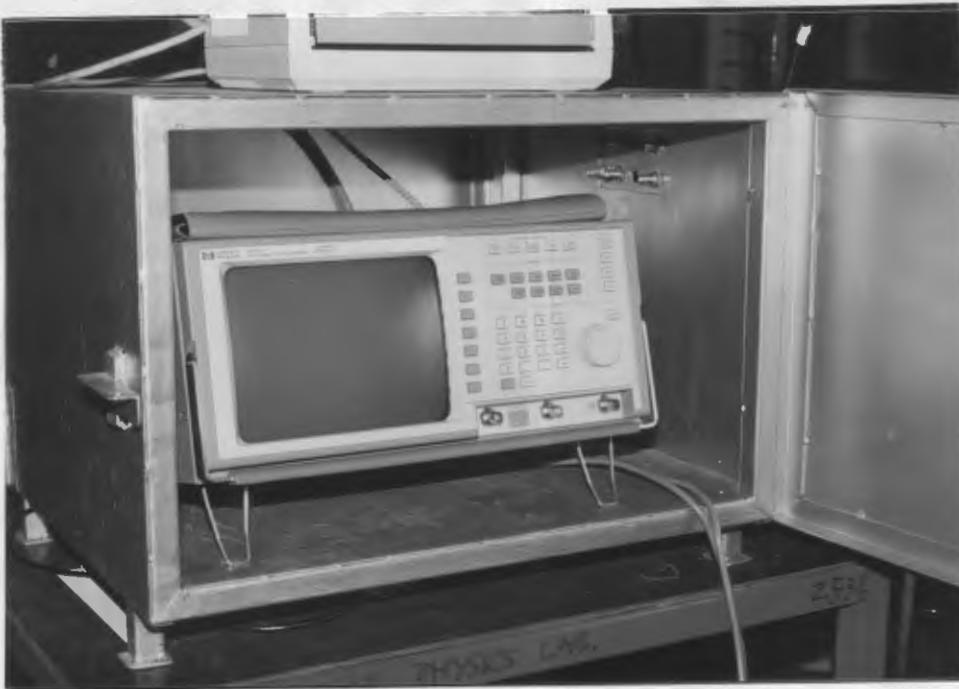
2. ระบบสุญญากาศ

ในการทดลองเราได้ใช้ ดิฟิวชันปั๊มแบบ โรตารีปั๊ม (Rotary Pump) การปั๊มสามารถปั๊มได้ 2800 l/s โดยการต่อท่ออยู่ทางด้านข้างค่อนไปด้านบนตามภาพประกอบ 15 คือค่อนไปทางด้านบนของ ท่อพลาสมาไฟคัส จะเชื่อมด้วย ข้อต่อแบบบอลวาล์ว โดยจะมีปลายเปิดทั้งสองข้าง และทั้งปลายทั้งสองของวาล์วจะใช้ แหวนยาง(O-ring) เป็นตัวเชื่อมต่อกันไม่ให้เกิดการรั่วของก๊าซ โดยปลายข้างหนึ่งจะต่อเข้ากับตัวท่อเล็กที่ต่อออกมาจาก ท่อพลาสมาไฟคัส ส่วนอีกปลายข้างหนึ่งก็ต่อเข้ากับสายยางที่ต่อกับ โรตารีปั๊ม โดยก่อนการทดลองต้องทำการปั๊มอากาศภายในท่อพลาสมาไฟคัสอยู่นานหลายสัปดาห์เพื่อที่จะปั๊มไอน้ำที่มีอยู่ภายในท่อให้หมดไป และทำให้ระบบสุญญากาศสะอาดมากเพื่อ ให้ได้ผลการทดลองที่ดีและถูกต้อง ระบบสุญญากาศและสามารถปั๊มได้ต่ำสุดถึง 2.0×10^{-2} มิลลิบาร์ แสดงให้เห็นถึงความสะอาดภายในท่อไฟคัสว่ามีมากพอสมควร โดยใช้เครื่องเทอร์โมคอปเปิลเกจ (Thermocouple gauge) เป็นตัวอ่านค่าความดันภายในท่อพลาสมาไฟคัส ซึ่งความดันปกติก่อนเปิดปั๊มประมาณ 1.25 มิลลิบาร์ และหลังจากเปิดปั๊ม 2.2×10^{-2} มิลลิบาร์ โดยใช้เวลาในการปั๊มประมาณ 3 ชั่วโมง

ตอนที่ 4 ระบบวัดไฟฟ้า

1. เครื่องมือวัดสัญญาณการทดลอง

จะเป็น ออสซิลโลสโคป (oscilloscope)เชิงตัวเลข (Digital) ที่สามารถเก็บข้อมูลได้ รุ่น HP 54502 ซึ่งสามารถแยกแยะคลื่นที่ระดับความถี่ 400 เมกกะเฮิรตซ์ (MHz) ความไว 250 เมกกะแอมป์ต่อวินาที (MSa/s) (ยี่ห้อ HEWLETT PACKARD) เพื่อใช้เก็บข้อมูลสัญญาณพัลส์ที่ส่งมาจากเครื่องมือวัดกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า แสดงตั้งภาพประกอบ 20



ภาพประกอบ 20 แสดงออสซิลโลสโคปที่ใช้ในการวิจัย

2. เครื่องมือส่งผ่านข้อมูล (Scopelink interfacing)

เป็นเครื่องมือที่เป็นตัวกลางในการติดต่อระหว่าง ไมโครคอมพิวเตอร์ กับ ออสซิลโลสโคป เพื่อที่จะนำข้อมูลบนหน้าจอของสโคป ไปยัง ไมโครคอมพิวเตอร์ โดยอาศัย โปรแกรม สโคปลิงค์ (Scopelink) เป็นตัวจัดการข้อมูล ทำให้ง่ายต่อการเก็บ และการวิเคราะห์ข้อมูล

การจัดระบบสโคปลิงค์ (Setup Scopelink)

ระบบจะต้องประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้

- ไมโครคอมพิวเตอร์ (IBM AT 286)

- การ์ด (HP27209A HP-IB card)

- กราฟฟิกอแดปเตอร์ (Graphics Adapter) การ์ด (IBM

Hercules Graphics Card (HGC))

- ระบบดำเนินงาน (Operating System) จะต้องมี ดอส

เวอร์ชัน 2.0 ขึ้นไปจึงจะใช้ร่วมกับโปรแกรมได้

-หน่วยความจำ (memory) อย่างน้อยที่สุดต้อง 512 กิโลไบต์ ขึ้นไป
ส่วนของ ฮาร์ดแวร์ (HARDWARE) ประกอบด้วย

-การ์ด (HP 27209A HP-IB card) เลียบอยู่กับเครื่อง
ไมโครคอมพิวเตอร์

-มีสายต่อระหว่าง ออสซิลโลสโคป กับ ไมโครคอมพิวเตอร์ ซึ่ง
สายนี้ มีหมายเลข 10833A

-มี โปรแกรมที่มีชื่อว่า สโคปลิงค์ (Scopelink) เป็นตัวเชื่อม

เมื่อทำการจัดระบบเสร็จแล้ว ต่อไปเป็นการจัดระบบในส่วนของ
โปรแกรม ทั้งโปรแกรมในเครื่องออสซิลโลสโคป และโปรแกรมสโคปลิงค์
เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์

-ในโปรแกรมของ ออสซิลโลสโคป เราต้องจัดระบบ ยูนิตลิสต์ โดย
การเปลี่ยนจาก แสดงอย่างเดียว (talk only) ไปยัง แอดเดรส (address)-
และ จัดระบบแอดเดรส (set address) ให้เป็น 7

3. เครื่องมือป้องกันสัญญาณรบกวน

ในการทดลองใช้กรงฟาราเดย์ (Faraday cage) ขนาดประ
มาณ $1.5 * 2$ ตารางเมตร เป็นเครื่องมือที่ทำหน้าป้องกันคลื่นรบกวน
เนื่องจากส่วนใหญ่ในการทดลองจะมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจำนวนมาก ถ้าหากไม่
มีเครื่องมือชนิดนี้ ก็จะไปรบกวนเครื่องมือวัดของระบบ และได้ทำการทดลอง
ลองว่าสามารถป้องกันความถี่ได้เท่าไรโดยใช้ วิทยุ (รุ่น Aiwa J505)
ปรากฏว่าเมื่ออยู่ภายใน ฟาราเดย์เคชย์ แล้วไม่สามารถรับคลื่นวิทยุภายนอก
ได้เลย ซึ่งอยู่ในช่วง 88 เมกกะเฮิรต ถึง 107.75 เมกกะเฮิรต

4. อุปกรณ์วัดไฟฟ้า

ที่ใช้ในการทดลองจะมีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิดคือ

4.1 อุปกรณ์วัดกระแสไฟฟ้า (Rogowski coil)

4.2 อุปกรณ์วัดศักย์ไฟฟ้า (High voltage probe)

ในการทดลอง พลาสมาไฟคัส สิ่งที่ต้องการศึกษามีอยู่ 2 สัญญาณด้วยกันคือ สัญญาณศักย์ไฟฟ้า (High voltage signal) และสัญญาณกระแสไฟฟ้า (current signal) ในการทดลองจำเป็นต้องออกแบบอุปกรณ์การวัด เพื่อให้เหมาะสมกับการทดลองระบบที่ใช้วัดจึงมีด้วยกัน 2 ระบบคือ

-ระบบวัดกระแสไฟฟ้า (Rogowski coil)

-ระบบวัดศักย์ไฟฟ้า (High voltage probe)

4.1 อุปกรณ์วัดกระแสไฟฟ้า (Rogowski coil)

ก่อนการทดลองจะต้องคำนวณค่าของกระแสไฟฟ้า หรือ อาจจะประมาณค่าของกระแสไฟฟ้าจากเอกสารที่อ้างอิงได้ ซึ่งจากการค้นคว้าก็จะได้ค่าประมาณของกระแสไฟฟ้าสูงสุด คือ 180 กิโลแอมป์ ที่ 15 กิโลโวลต์ หัววัดกระแส จะเป็นแบบ แปลงกระแส (Current transformer) มีสูตรการคำนวณหา ดังนี้

$$V_{out} = R * I / N \quad \dots (32)$$

V_{out} = ค่าความต่างศักย์ที่ต้องการให้เข้า ออสซิลโลสโคป

R = ค่าความต้านทานที่ต้องใช้ในการต่อวงจร

I = ค่าประมาณของกระแสไฟฟ้าสูงสุดของระบบ

N = ค่าของจำนวนรอบของลวดทองแดงในการพัน

ค่า ศักย์ไฟฟ้าเข้า ต้องการให้ไม่เกิน 15 โวลต์ เพื่อที่จะไม่ทำให้ออสซิลโลสโคปช้ำรูด และสามารถที่จะจัดการกับสัญญาณ 15 โวลต์ได้ง่ายขึ้นโดย

ไม่มีอันตราย

ค่า $R = 10$ มิลลิโอห์ม ซึ่งในการทดลองได้ใช้ 20 มิลลิโอห์ม
2 ตัวมาต่อ ขนานกัน

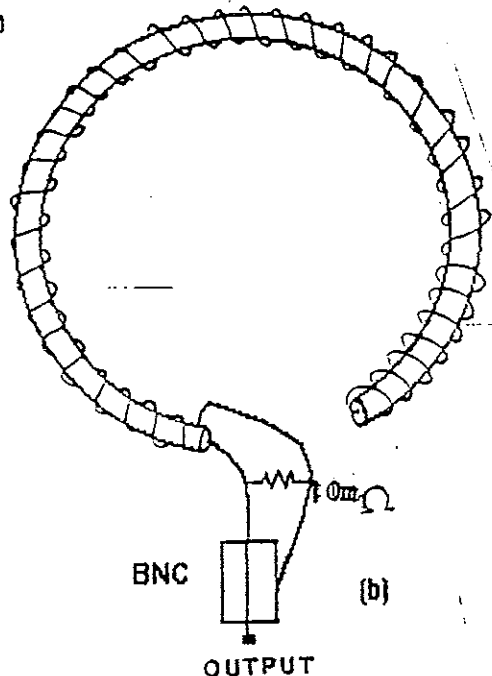
ค่า $I = 180$ กิโลแอมป์ ซึ่งค้นคว้าจากเอกสารอ้างอิง

ค่า $N = 170$ รอบ ประมาณค่าความเป็นไปได้จากสูตร

แทนค่าในสมการ 32

$$\begin{aligned} V_{out} &= 10 \times 10^{-3} \text{ mohm} * 180 \times 10^3 \text{ กิโลแอมป์} / 170 \text{ รอบ} \\ &= 10.6 \text{ โวลท์} \end{aligned}$$

โดยภาพประกอบ 21 แสดงภาพจำลองของ หัววัดกระแสไฟฟ้า และ
ภาพประกอบ 22 เป็นภาพถ่ายจริงของหัววัดกระแสไฟฟ้าของหัววัดกระแสไฟฟ้า
ตัวจริงในการทดลอง



ภาพประกอบ 21 แสดงภาพจำลองหัววัดกระแสไฟฟ้า



ภาพประกอบ 22 แสดงภาพถ่ายหัววัดกระแสไฟฟ้า

หลังจากนั้นเราจะต้องทำการ สอบเทียบ (calibrated Rogowski coil) โดยอุปกรณ์พลาสมาไฟคัล เพื่อหา ค่าคงที่ (constant) ของหัววัดกระแสไฟฟ้า ที่ใช้ มีสูตรการหาค่าดังนี้

$$I_o = \tau C_o V_o (1 + f) / T \quad \dots (33)$$

- โดยที่
- I_o = ค่าคำนวณกระแสจากสัญญาณการทดลอง
 - C_o = ค่าตัวเก็บประจุ 30 ไมโครฟารัด
 - V_o = ค่าความต่างศักย์ที่ใช้ในการอัดประจุ 12 กิโลโวลท์
 - f = ค่าผลรวมของอัตราส่วนของแอมปริจูดของสัญญาณ
 - T = ค่าคาบของสัญญาณการทดลอง

$$f = (1/4) * \{A1/A2 + A2/A3 + A3/A4 + A4/A5 + A5/A6\} \quad \dots (34)$$

$$\text{ค่า } K = I_o / V_1 \quad \dots (35)$$

K = ค่า คงที่ของหัววัดกระแส

V_1 = ค่าแอมป์ริจูดแรกของสัญญาณที่ทดลอง

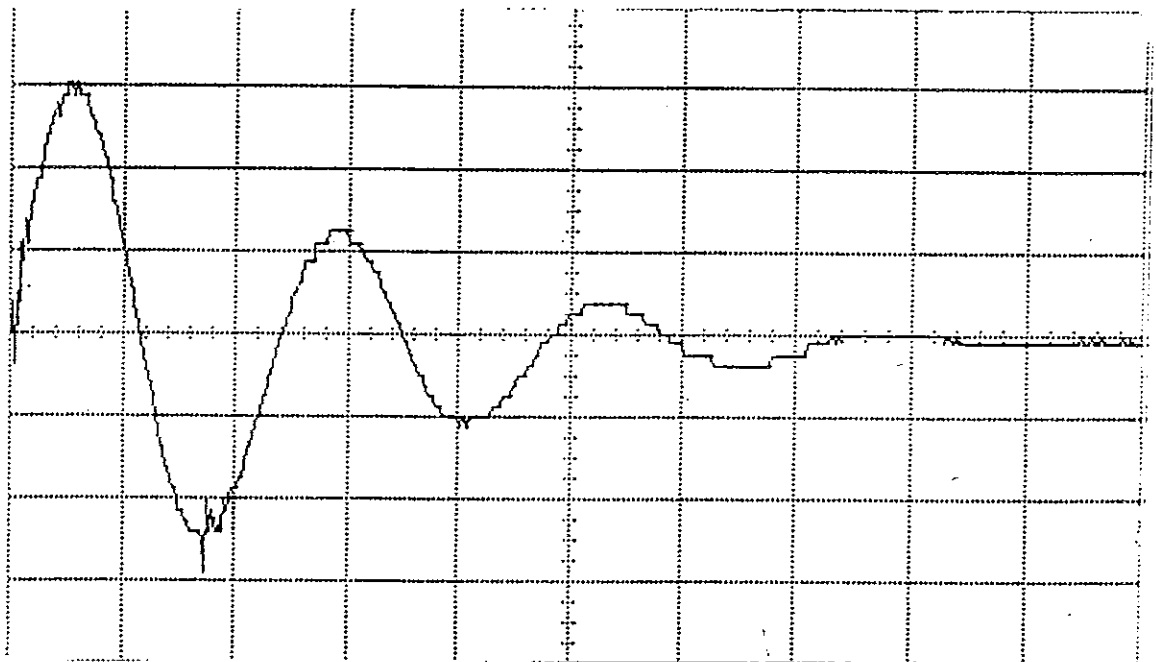
ซึ่งก่อนการทดลองเราได้ทำการจัดระบบวัดไว้ดังนี้

ระบบการอัดประจุไฟฟ้าใช้ความต่างศักย์ = 12 kV

สัญญาณก่อนเข้าออสซิลโลสโคปลดทอนลงมา = 1 : 5 เท่า

สายสัญญาณของ หัววัดกระแสไฟฟ้า ป้องกันสัญญาณรบกวนจากสนามแม่เหล็กจาก พลาสมาไฟคัส ก็ได้ใช้ทองแดงหุ้มสายไว้ ซึ่งทองแดงนี้ลอกออกมาจากสายไฟฟ้าแรงสูง

หัววัดกระแสไฟฟ้า ก็จะคล้องอยู่รอบขั้ว แอโนด (anode) ซึ่งต่อไปก็จะเป็นบริเวณที่วัดจริง และสัญญาณที่ได้จะเป็นดังภาพประกอบ 23



ภาพประกอบ 23 สัญญาณการสอบเทียบหัววัดกระแสไฟฟ้า

แทนค่าในสมการ 34

$$f = (1/4) * (180/700 + 700/820 + 820/1750 + 1750/2100)$$

$$= 0.603$$

แทนค่าในสมการ 33

$$i_0 = 3.14 * 30 * 10^{-6} \text{ Farad} * 12 * 10^3 \text{ volt} * (1 + 0.603) / 12 * 10^{-6} \text{ sec}$$

$$= 94.29 \text{ KA}$$

แทนค่าในสมการ 35

$$K = 94.29 \text{ KA} / 2.1 \text{ volt}$$

$$= 44.9 \text{ KA/volt}$$

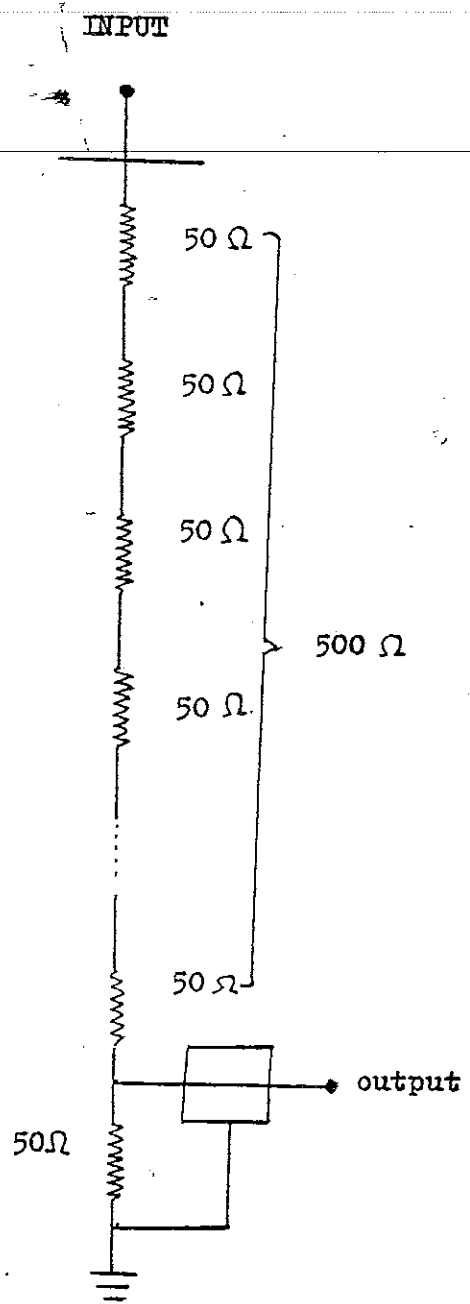
ดังนั้นจะได้ค่า

ค่าคงที่การสอบเทียบของหัววัดกระแส (K) = 44.9 กิโลแอมแปร์/โวลท์

3.2 อุปกรณ์วัดศักย์ไฟฟ้า (High voltage probe)

เนื่องจากการวัดพัลส์ของศักย์ไฟฟ้าแรงสูง ระหว่างการปลดปล่อยประจุ (discharge) ของตัวเก็บประจุ ผ่านไปยังพลาสมาโพลัส เราจะ สามารถที่จะวัดพัลส์ของศักย์ไฟฟ้าแรงสูง ได้ด้วยการแบ่งศักย์ไฟฟ้า (voltage divider) หรือที่รู้จักโดยทั่วไปคือ หัววัดศักย์ไฟฟ้า (High voltage

probe) ในการออกแบบจะประกอบด้วย ตัวต้านทาน (resistor) 1 กิโลโอห์ม ต่อขนานกัน 2 ตัวและนำมาต่ออนุกรมกัน 10 ชุด และอีก 1 ชุดมาต่อระหว่างชุดที่ 9 และชุดที่ 10 โดยรายละเอียดจะต่อดัง ภาพประกอบรูป 24 และภาพประกอบ 25 หัววัดศักย์ไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้ทำการทดลองจริง



ภาพประกอบ 24 แสดงการต่อวงจรของหัววัดศักย์ไฟฟ้าแรงสูง



ภาพประกอบ 25 ภาพถ่ายหัววัดคิกซ์ไฟฟ้าแรงสูง

ก่อนการทดลองได้มีการทดสอบหัววัดไฟฟ้าแรงสูงว่าสามารถใช้งาน
ได้หรือไม่ ซึ่งถ้าหากสามารถใช้งานได้แล้ว หัววัดชนิดนี้ก็จะสามารถลดทอน
สัญญาณก่อนเข้า ออสซิลโลสโคปได้ถึง 1:100 เท่า กล่าวคือ ถ้ามี
ความต่างศักย์ผ่านหัววัด 1000 โวลต์ ก็จะทำให้ลดลงเหลือ 10 โวลต์
เท่านั้น และการทดสอบมีด้วยกัน 2 ระบบคือ

-ระบบโวลต์กระแสตรง

-ระบบโวลต์กระแสสลับ

ผลการทดสอบเมื่อวัดกระแสตรง เมื่อปรับ ตัวกำเนิดโวลต์กระแสตรง
500 โวลต์ โดยนำ หัววัดมาต่อคร่อม และสัญญาณเข้า ออสซิลโลสโคป ก็ทำ
ให้สัญญาณบนหน้าจอยกขึ้นไป 5 โวลต์ เป็นไปตามการคาดคะเน

ผลการทดสอบเมื่อวัดกระแสสลับ เมื่อปรับ ตัวกำเนิดโวลต์กระแสสลับ
300 โวลต์ โดยนำหัววัดมาต่อคร่อม โดยสัญญาณต่อเข้า ออสซิลโลสโคป
และเมื่ออ่านค่าสัญญาณบนหน้าจอก็ได้ 3 โวลต์ (แอมป์รีจูดล่างถึงแอมป์รีจูดบน)

ตอนที่ 5 ระบบวัดนิวตรอนสัมพัทธ์ใช้ G-M

ระบบหัววัดไกเกอร์มูลเลอร์ จะประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักๆคือ

1 ส่วนของ การ์ด ที่จะติดต่อกับ ไมโครคอมพิวเตอร์ (Hardware interfacing) ซึ่งจะต้องใช้ การ์ดที่มีชื่อว่า เกมส์พอร์ต (game port)

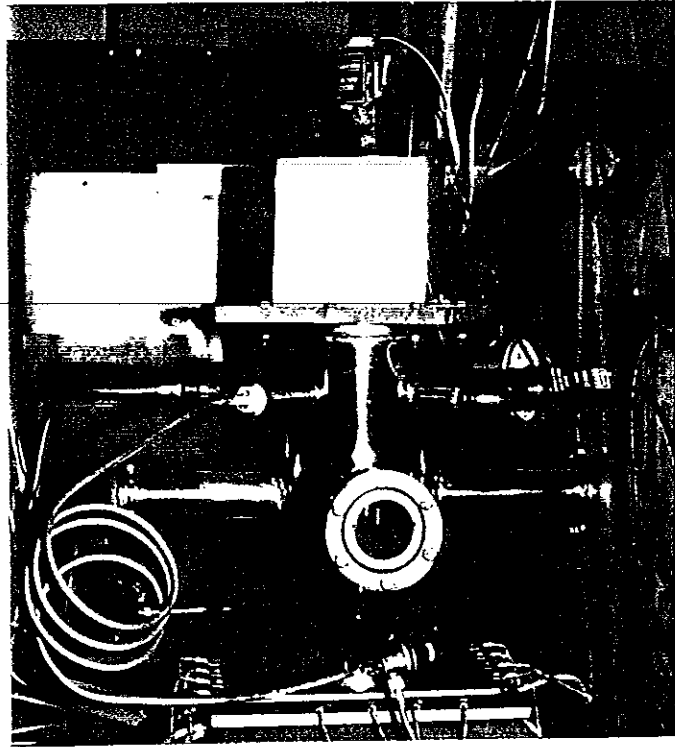
เป็นตัวเสียบบน ไมโครคอมพิวเตอร์

2 ระบบหัววัด จะมีวงจรของฮาร์ดแวร์อยู่กับหัววัดและจะมีสายที่จะมาต่อได้กับ เกมส์พอร์ต

3 ระบบโปรแกรม (software) จะมีโปรแกรมที่จะสามารถเชื่อมโยงหัววัดให้ติดต่อกับ ไมโครคอมพิวเตอร์ได้ และตลอดจนสามารถนำผลมาแสดงได้บนหน้าจอไมโครคอมพิวเตอร์

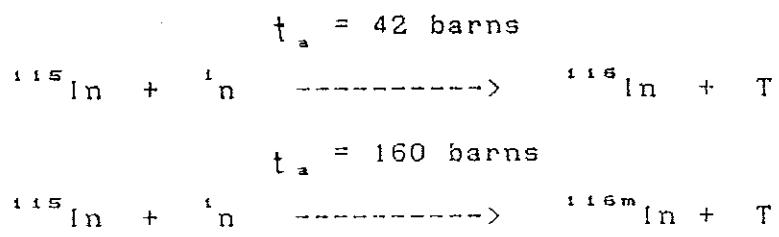
ปกติแล้วหัววัดไกเกอร์มูลเลอร์ ไม่สามารถที่จะวัดนิวตรอนได้โดยตรง แต่สามารถวัดได้โดยทางอ้อมคือวิธี แอคติเวชันเทคนิค (Activation Technique) ซึ่งอาศัย อนุภาคนิวตรอนที่เกิดจากพลาสมาฟิวส์เมื่อใช้ ก๊าซดิวทีเรียม (D_2) ซึ่งอนุภาคนิวตรอน ที่เกิดขึ้นในตอนแรกจะเป็น ฟาสต์นิวตรอน ซึ่งจะมีพลังงานสูงมาก จึงจำเป็นต้องลดระดับพลังงานของอนุภาคนิวตรอนให้อยู่ในระดับพลังงานต่ำลงมาคือ เทอร์มอลนิวตรอน (Thermal Neutron) ซึ่งจะต้องให้ อนุภาคนิวตรอนที่เป็น ฟาสต์นิวตรอนถูกหน่วงโดย อาศัย ไฮโดรเจนมอดิเรเตอร์ (Hydrogen moderator) ซึ่งใช้ แท่งพาราฟิน จะต้องคำนวณ หาความหนา จะได้ประมาณ 4 เซนติเมตร เมื่อผ่านแท่งพาราฟินพลังงานของนิวตรอนก็จะลดลงเป็น เทอร์มอล นิวตรอน แล้วจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ได้ โดยอนุภาคนิวตรอนที่ลดระดับพลังงานลงมา เป็นเทอร์มอลนิวตรอน จะวิ่งชนอินเดียมฟอสฟอรัส ทำให้เกิด อนุภาคเบต้า (β) ขึ้นมาจากนั้นก็ทำการวัดโดย หัววัดไกเกอร์มูลเลอร์ และข้อมูลที่ได้อีกจะสามารถนำไปคำนวณกลับเพื่อหาค่าของจำนวนนิวตรอนได้ โดยตัว

กลางแต่ละชนิดจะมีครึ่งชีวิตที่แตกต่างกัน โดยมีการจัดวางตำแหน่งของชุด
วัดนิวตรอนกับพลาสติก ฟอสฟอไรต์ ดังภาพประกอบ 26



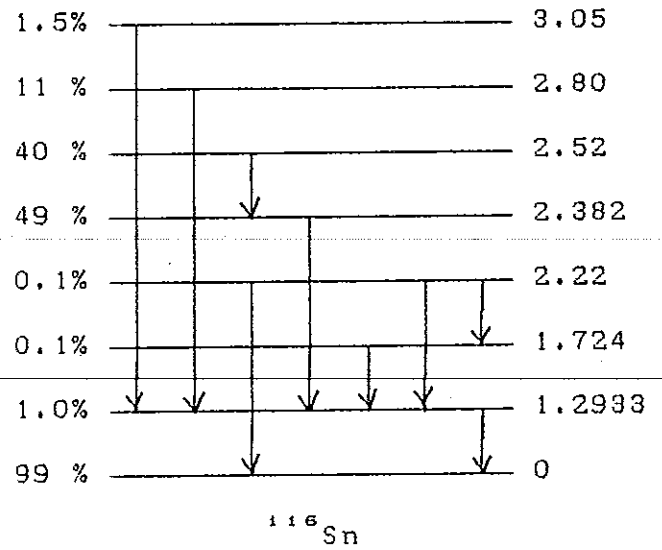
ภาพประกอบ 26 แสดงตำแหน่งการวางชุดวัดนิวตรอน

ในการจัดระบบวัดนิวตรอนนี้จะเตรียมตัวกลางคือ อินเดียมฟอสฟอไรต์ เบอร์ ^{115}In มีความหนา 0.127 มิลลิเมตร (2.3 กรัม = 50*50 มิลลิเมตร, 9.2 กรัม = 100*100 มิลลิเมตร) เพราะจะมีค่าครึ่งชีวิตที่เหมาะสมคือ 54 นาที มีการแจกแจงพลังงานหลังจากเกิด แอคติเวชัน ของอินเดียมฟอสฟอไรต์ ดังภาพประกอบ 23 มีสมการปฏิกิริยาดังนี้



^{116m}In (54 mins) 0.06 g

^{116}In (14 mins)

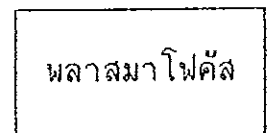
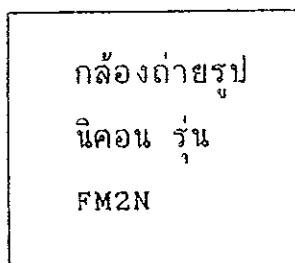


ภาพประกอบ 27 แสดงการแจกแจงพลังงานของ อินเดียมฟอซอร์ แอคทีเวชั่น

ตอนที่ 6 การถ่ายภาพด้วยพลาสมาไฟคัล

ใช้กล้องยี่ห้อ นิคอน (Nikon รุ่น FM2N) ที่ระยะ 1.5 เมตร โดยเปิดรูรับแสง 3.5 และความไว ชัตเตอร์ (shutter) ไปที่ บี (B) เพื่อสามารถเปิดรับแสงได้ตลอด โดยถ่ายในห้องมืด และอาศัยแสงที่มาจากพลาสมาไฟคัลเท่านั้น มีแสดงดัง ภาพประกอบ 28

1.5 เมตร



ภาพประกอบ 28 ฉิ่งการจัดระบบการถ่ายภาพพลาสมาไฟคัล

ตอนที่ 7 ลำดับการทดลอง

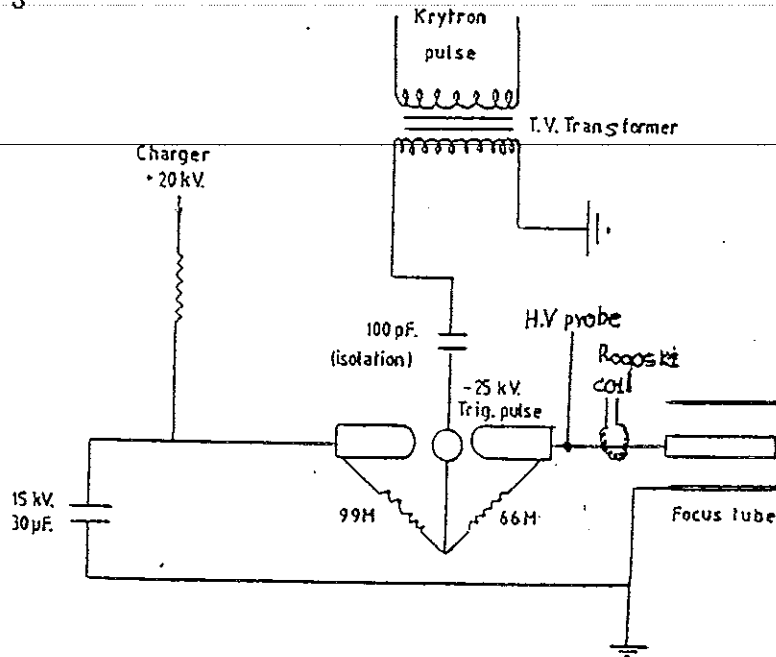
จะต้องใช้ผู้ทำการทดลอง 2 คน ตลอดการทดลองและมีลำดับการทดลองดังต่อไปนี้

1. ตรวจสอบวงจร และระบบป้องกันภัย
2. เดินปัม จนถึงประมาณ 10^{-2} มิลลิบาร์
3. เปิดเครื่องอัดประจุ และต่อระบบหัววัดให้เข้ากับออสซิลโลสโคป
4. เติมแก๊ส (ยกเว้นกรณี ก๊าซดิวทีเรียม ต้องปิดปัมก่อน) ปรับจนได้ความดันแก๊สตามที่ต้องการ แล้วจึงปิด ระบบวัดความดัน ก่อนการทดลอง
5. เตรียมความพร้อมของสโคปในการรับสัญญาณ (reset Oscilloscope)
6. ทำการอัดประจุ 14 กิโลโวลต์ (charge)
7. ทำการยิง (Fire)
8. ปลดปล่อยประจุลงกราวด์ (dump)
9. เริ่มต้นใหม่

วงจรแอลซีอาร์ (LCR circuit)

รายละเอียดของวงจรพลาสมาไฟค์สที่ได้สร้างขึ้นมา แสดงได้ดังภาพประกอบ 24 พร้อมทั้งตำแหน่งของอุปกรณ์วัดไฟฟ้า ส่วนประกอบของวงจรนี้จะประกอบไปด้วย ตัวเก็บประจุ 30 ไมโครฟารัด ทนค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 15 กิโลโวลต์ ถูกอัดประจุในลักษณะเต็มคลื่นสัญญาณ (Full-wave) โดยตัวแปลงกระแสขนาด 30 กิโลโวลต์ และใช้ช่องว่างประกาย (Sparkgap) เป็นสวิตซ์ไฟฟ้าแรงสูงซึ่งจะถูกกระตุ้นโดยพัลส์ไฟฟ้าแรงสูงขนาด 600 โวลต์ และจะแปลงขนาดของ โวลต์ ขึ้นประมาณ 1:17 เท่า โดยหม้อแปลงทีวี (TV transformer) และเพื่อเป็นการป้องกันการลัดวงจรของ

ศักย์ไฟฟ้าจากการเกิดปฏิกิริยาพลาสมาไฟคัลส จึงต้องต่อตัวเก็บประจุแบบไอโซเลท ขนาด 100 พิโคฟาร์ต (pf) และเพื่อไอโซเลท วงจรทริกเกอร์จากกระแสของวงจรแอลซีอาร์ (LCR circuit) และค่าอัตราส่วน ของระยะห่างระหว่างช่องว่างประกาย (Sparkgap) จาก ศูนย์กลางมีค่าเท่ากับ 2 ต่อ 3



ภาพประกอบ 29 แสดงวงจร แอลซีอาร์ ของพลาสมาไฟคัลส และตำแหน่งของหัววัดไฟฟ้า

ความยาวของท่อไฟคัส 16 เซนติเมตร (cm)

และใช้เครื่องคอมพิวเตอร์คำนวณหาค่า

แอลฟา (α) คือ ค่านอร์มอลไลของกระแส

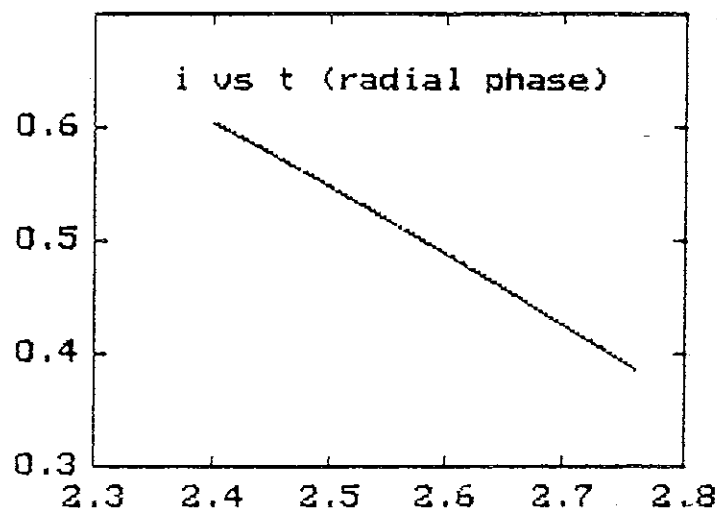
และเบตา (β) คือ ค่านอร์มอลไลของการเคลื่อนที่ของพลาสมา

จะได้ค่า

$$\alpha = 0.68$$

$$\beta = 0.35$$

ค่าที่ใช้เป็นข้อมูลในโปรแกรมของ Dr. Ken ก็คือ ค่า แอลฟา และ เบตา เมื่อแทนค่าลงไปแล้วได้ผลดังภาพประกอบ 30, 31, 32, 33, 34, 35, และ 36 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 30 แสดงกระแส (i) เทียบกับ เวลา (T)

เริ่มต้นกระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจาก ปรากฏการณ์ผิว (skin effect) และ ฉนวนผนัง (back wall insulator) กล่าวคือ ปรากฏการณ์ผิว เป็นผลมาจากกระแสสูงเผาขั้วแล้วให้อิเล็กตรอนทำงาน และไปชนกับอะตอมของก๊าซต่อไป ส่วน ฉนวนผนัง ทำให้กระแสไม่สามารถไหลผ่านจากขั้วในไปขั้วนอกได้ แต่จะมีคลื่นกระแทกเกิดขึ้น เมื่อคลื่นกระแทก

บทที่ 4

ผลและการอภิปรายผล

บทนี้แสดงผลการวิจัยและการอภิปรายผลการวิจัย โดยผลส่วนใหญ่จะเป็น สัญญาณที่วัดได้จากหัววัด และภาพถ่ายขณะการทดลอง โดยจะค่าที่ได้จากการคำนวณของแต่ละคลื่นสัญญาณส่วนของวิเคราะห์และวิจารณ์จะได้กล่าวไว้ในบทต่อไป

ผลและการอภิปรายผลแบ่งออกเป็นตอนๆดังต่อไปนี้

ตอนที่ 1 การจำลองการเกิด พลาสมาไฟกัส (Simulation of Plasma Focus)

ตอนที่ 2 ผลของการทดลองจริง (Experimental Results)

ตอนที่ 1 การจำลองการเกิด พลาสมาไฟกัส (Simulation of Plasma Focus)

การจำลองการเกิด พลาสมาไฟกัส ก่อนการทดลองได้ทำการจำลองการเกิดพลาสมาไฟกัสบนไมโครคอมพิวเตอร์ โปรแกรมที่ใช้เขียนโดย Dr.Wesson Ken และภาษาที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมคือภาษาปาสคาล โดยรายละเอียดของโปรแกรมจะอยู่ในภาคผนวก ในการให้ข้อมูลแก่ โปรแกรม จะใช้ข้อมูลที่ใช้อยู่ในปฏิบัติการจริง

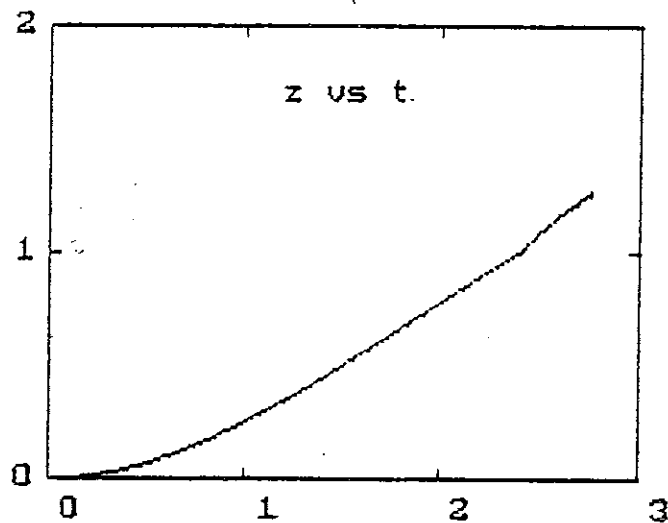
ก๊าซใช้คือที่เตรียม

ความดัน(P) 3.45 มิลลิบาร์ , ความต่างศักย์ 15 กิโลโวลท์ (KV),
ตัวเก็บประจุ 30 ไมโครฟารัด (μF), ค่าความเหนี่ยวนำ 110
นาโนเฮนรี่ (nH)

รัศมีของขั้วไฟฟ้าภายใน(inner electrode) 9.5 เซนติเมตร(cm)

รัศมีของขั้วไฟฟ้าภายนอก(outer electrode) 32 เซนติเมตร(cm)

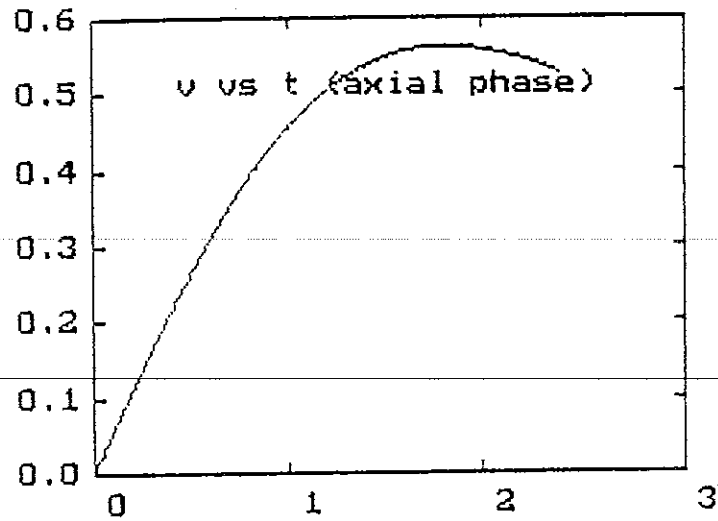
เคลื่อนที่ไปข้างหน้าทำให้ด้านหลังของมันมีอุณหภูมิสูงอะตอมบางส่วนจะแตกตัวและเนื่องจากศักย์ไฟฟ้าที่ใช้มีค่าสูงดังนั้นจะเร่งอิเล็กตรอนและไอออนไปข้างหน้าอย่างรวดเร็วเกิดการแตกตัวเพิ่มมากขึ้นทำให้กระแสสามารถกระโดดข้ามผนังฉนวนเกิดเป็นแผ่นกระแสและเคลื่อนที่ไปข้างหน้า แผ่นกระแสนี้จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ผิว และขับเคลื่อนกระแสแตกตลอดเส้นทางที่เคลื่อนที่ผ่าน ทำให้จำนวนก๊าซที่แตกตัวมีเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ กระแสที่ไหลผ่านระหว่างขั้วจึงเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุด แล้วจึงลดลง



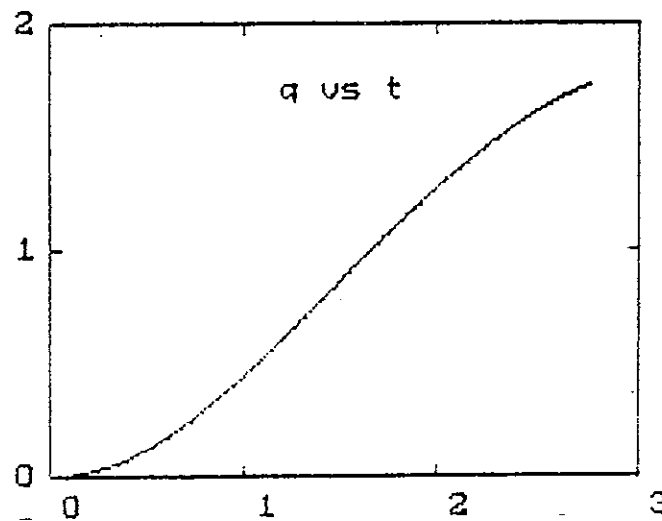
ภาพประกอบ 31 แสดงแผ่นกระแส (Z) เทียบกับเวลา (T)

เนื่องจากกระแสที่ไหลระหว่างขั้วยังมีปริมาณน้อยในช่วงต้นๆ และแรงที่ขับเคลื่อนแผ่นกระแสคือ $J * B$ ดังนั้นทำให้ช่วงแรกของระยะทางของแผ่นกระแสเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และในช่วงหลังระยะทางจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเพราะว่ากระแสมีปริมาณมากขึ้น

จากภาพประกอบ 27 เนื่องจากแผ่นกระแสถูกขับเคลื่อนด้วยแรง $J * B$ ดังนั้นความเร็วของแผ่นกระแสจะเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสเพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้กราฟรูปนี้คล้ายกับกราฟของกระแส

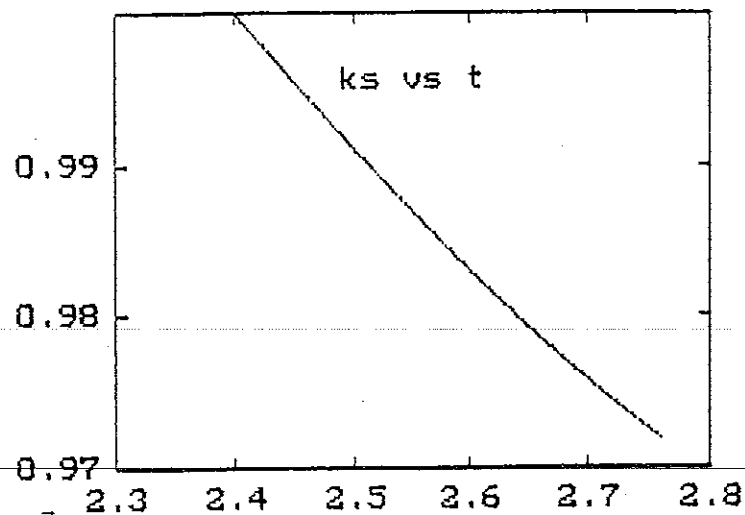


ภาพประกอบ 32 แสดงความเร็วของแผ่นกระแส (v) เทียบกับเวลา (t)



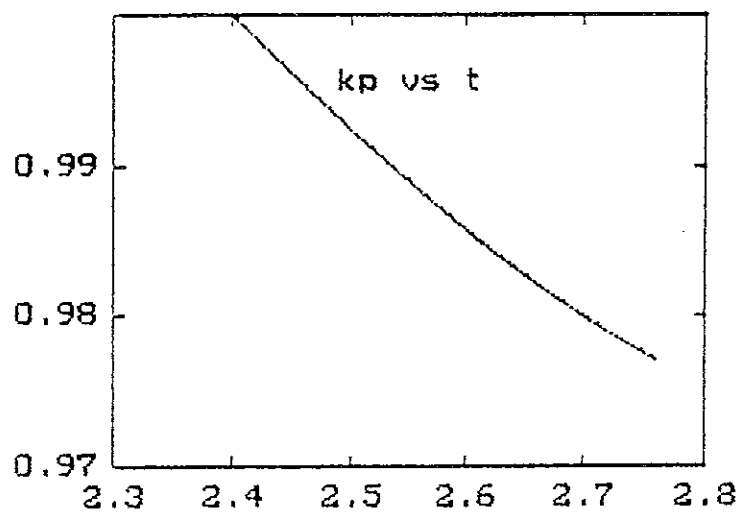
ภาพประกอบ 33 แสดงจำนวนประจุ (q) เทียบกับ เวลา (t)

อะตอมของก๊าซนั้นกระจายไปทั่วท่อโฟลล์ เมื่อแผ่นกระแสเคลื่อนที่ไป
ข้างหน้านั้นจะไอออนไนส์ให้ก๊าซแตกตัวมากขึ้นตามระยะทางที่เคลื่อนที่ ดังนั้น
จำนวนประจุจึงมีเพิ่มขึ้น ตามรูปภาพประกอบ 33



ภาพประกอบ 34 แสดงรัศมีของคลื่นกระแทกต่อรัศมีของหัวใน
($K_s = r_p/a$) เทียบกับเวลา (T)

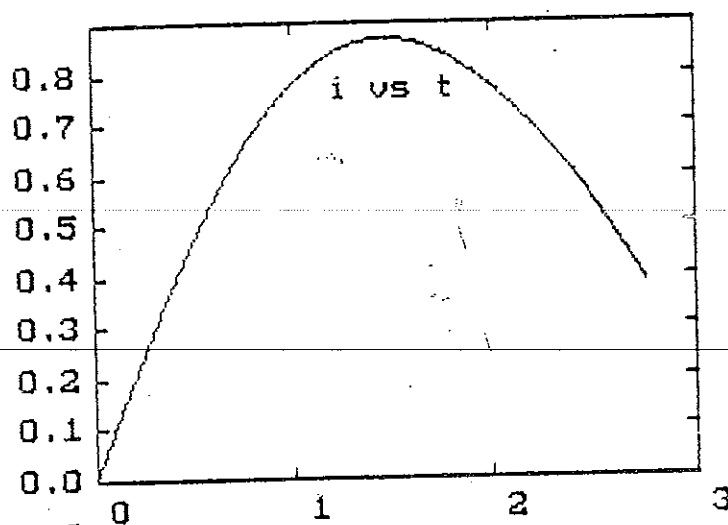
เมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้นรัศมีของคลื่นกระแทกจะลดลง



ภาพประกอบ 35 แสดงรัศมีของลูกสูบแม่เหล็ก (แผ่นกระแส) ต่อ
รัศมีหัวใน ($K_p = r_p/a$) เทียบกับ เวลา (T)

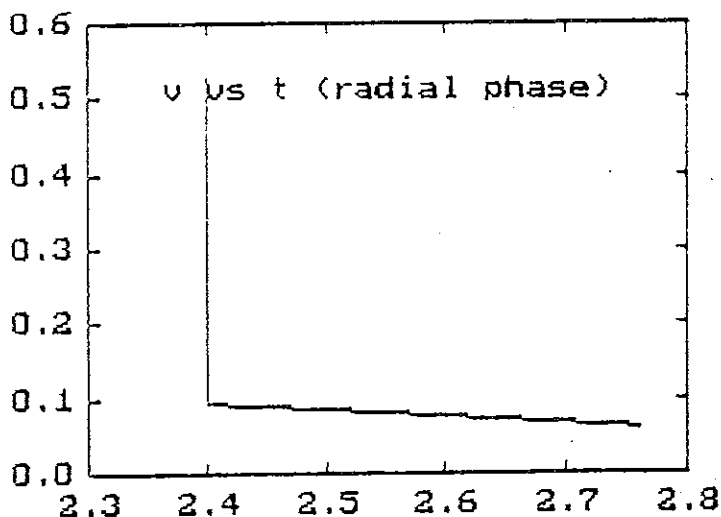
ซึ่งผลเป็นเช่นเดียวกับ รัศมีของคลื่นกระแทกต่อรัศมีหัวใน แต่รัศมี
ของคลื่นกระแทก จะลดลงเร็วกว่าเนื่องจากความดันของ ลูกสูบแม่เหล็ก

จะไปอัดให้คลื่นกระแทกเคลื่อนที่เพิ่มเร็วขึ้น



ภาพประกอบ 36 แสดงกระแสไฟฟ้าในเฟสความเร่งตามแกน (I) เทียบกับ เวลา (T)

จากเฟสความเร่งตามแกน เมื่อกระแสเพิ่มขึ้นถึงค่า สูงสุด และจะลดลง ในเฟสการอัดแกนรัศมีมีกระแสยังคงลดลงต่อไป และเมื่อใกล้จุดโฟกัสจะลดลงเร็วขึ้น



ภาพประกอบ 37 แสดงดิฟเฟอเรนเชียลของกระแสในเฟสการอัดตามแกน ($R=di/dt$) เทียบกับ เวลา (T)

ช่วงแรก ดิฟเฟอเรนเชียลของกระแส ลดลงช้ามาก คือค่อนข้างคงที่ จนถึงไฟค์สจะลดลงอย่างรวดเร็ว

ตอนที่ 2 ผลของการทดลองจริง (Experimenatal results)

ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะมีด้วยกันอยู่ 4 ส่วนด้วยกันคือ

1. ผลที่ได้จากออสซิลโลสโคป โดยจะมีค่าของ สัญญาณที่ได้จาก หัววัดกระแสไฟฟ้า (Rogowski coil signal) และหัววัดศักย์ไฟฟ้า (Hight voltage signal)

2. ผลที่ได้จากการคำนวณ ค่าของสัญญาณที่ได้จาก หัววัดกระแสไฟฟ้า

3. ภาพถ่ายระหว่างการทำทดลองของก๊าซชนิดต่างๆ

ในการคำนวณผลการทดลองจะมีสูตรดังต่อไปนี้

คำนวณหาค่ากระแสสูงสุด

$$I = K * V \quad \dots (36)$$

ซึ่ง K = ค่าคงที่ของ หัววัดกระแสไฟฟ้า ที่ได้คำนวณไว้ในบทที่ 3
(KA/volt)

V = ค่าแอมป์รีจูดที่อ่านได้จาก สัญญาณหัววัดกระแสไฟฟ้า (volt)

I = ค่าของกระแสที่ไหลผ่านหัว แอนโอด (KA)

คำนวณหาค่ากระแสเหนี่ยวนำ

$$L = T^2 / (4\pi^2 C) \quad \dots (37)$$

ซึ่ง T = ระยะเวลาที่ได้จาก สัญญาณหัววัดกระแสไฟฟ้า 1 คาบ (sec)

C = ค่าคงที่ของตัวเก็บประจุ (Farad)

r = ค่าคงที่ของแฟลงค์ 22/7

L = ค่ากระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น (Henry)

คำนวณหาค่าความต้านทานภายในวงจร

$$r = -2 * \ln(f(L/C)) \quad \dots (38)$$

ซึ่ง f = ผลบวกของอัตราส่วนของ แอมป์ริจูดของ สัญญาณสอบเทียบของหัววัดกระแสไฟฟ้า (Rogowski Calibrate signal)

$$= 1/4 * (V_5/V_4 + V_4/V_3 + V_3/V_2 + V_2/V_1)$$

L = ค่ากระแสเหนี่ยวนำที่คำนวณได้จากสมการ 2

r = ค่าความต้านทานภายในวงจร

คำนวณหาค่า ความเร็วของแผ่นกระแส (Shock speed)

$$dz/dt = 16 \text{ cm} / (t(\text{pinch time}) - 3) \quad \dots (39)$$

$t(\text{pinch time})$ = ระยะเวลาเริ่มต้นเกิด พลาสมาไฟคัส

dz/dt = ค่าความเร็วของแผ่นกระแส (Shock speed)

1. ผลของการทดลอง

1.1 ก๊าซ อาร์กอน (Ar)

ความดัน (P) = 1 มิลลิบาร์ (mbar)

ความต่างศักย์ (V_{charge}) = 14 กิโลโวลท์ (KV)

การลดทอนสัญญาณ (attenuate)

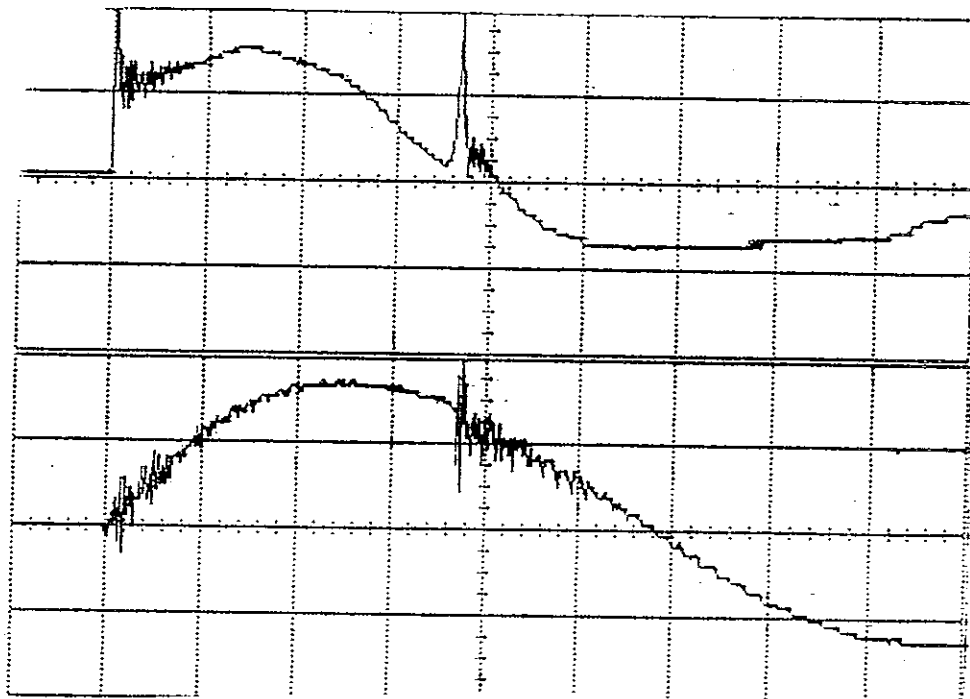
สัญญาณหัววัดคัลย์ไฟฟ้า (HV) = 1 : 1000

สัญญาณหัววัดกระแสไฟฟ้า = 1 : 5

สัญญาณช่อง 1 สัญญาณหัววัดคัลย์ไฟฟ้า 4 โวลต์/ช่อง, คอปปี้ง
1 เมกกระโอห์ม

สัญญาณช่อง 2 สัญญาณหัววัดกระแสไฟฟ้า 1.5 โวลต์/ช่อง, คอปปี้ง
1 เมกกะโอห์ม

ผลการทดลอง ได้สัญญาณดังภาพประกอบ 38

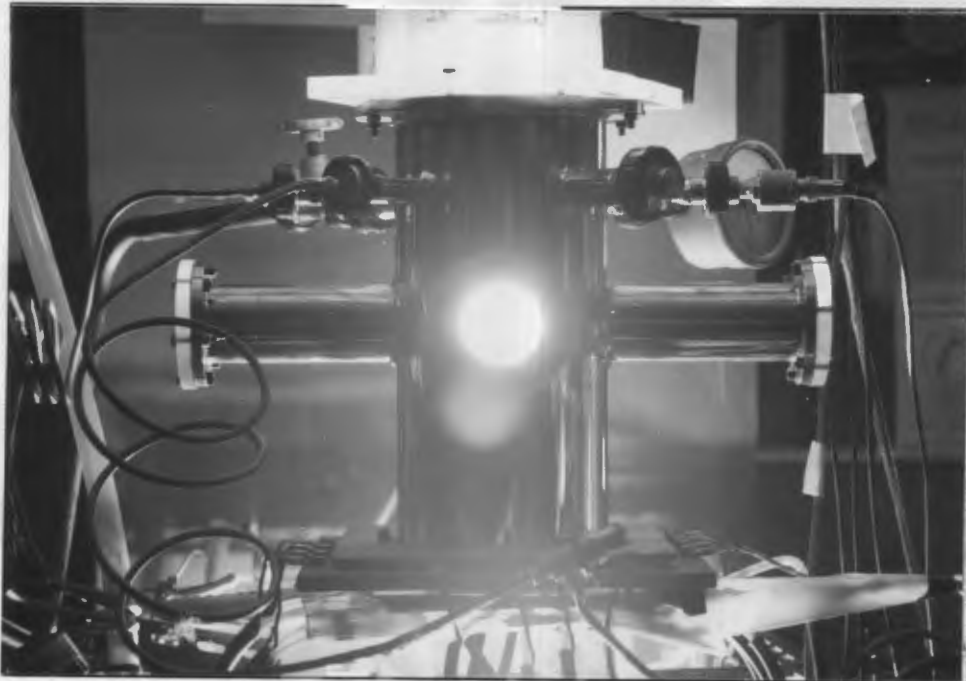


ภาพประกอบ 38 สัญญาณของหัววัดคัลย์ไฟฟ้า และหัววัดกระแสไฟฟ้า
ของก๊าศอาร์กอน

จากสัญญาณจะเห็นได้ว่า เมื่อเริ่มต้นคัลย์ไฟฟ้าจะมีค่าสูงอ่านได้ประมาณ 4 กิโลโวลต์แต่กระแสไฟฟ้าจะเป็น ศูนย์ และจากรยะเวลา 1.5 ไม

โครวินาที กระแสจะเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ศักย์ไฟฟ้าก็ยังคงที่ หลังจากนั้นในช่วง 1.5 ถึง 4.5 ไมโครวินาทีเมื่อศักย์ไฟฟ้าก็จะลดลงอย่างรวดเร็ว แต่กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุด (Peak) จนกระทั่งเวลา 4.5 ไมโครวินาทีก็เกิดปฏิกิริยาไฟคัล (Pinching Phase) เกิดขึ้นทั้ง สองสัญญาณ โดยจะสังเกตเห็นว่าสัญญาณ จากหัววัดศักย์ไฟฟ้า จะเห็นได้ชัดเจนกว่าหัววัดกระแสไฟฟ้า หลังจากนั้นกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าก็จะลดลงอย่างรวดเร็ว และมีภาพถ่ายระหว่างการทดลองพลาสมาไฟคัลของ ก๊าซอาร์กอน ดังภาพประกอบ

39



ภาพประกอบ 39 ภาพถ่ายการทำงานพลาสมาไฟคัลของ
ก๊าซอาร์กอน

จากการสังเกตจากภาพถ่ายจะเห็นได้ว่าการไอออนไนเซชันของ
ก๊าซอาร์กอนจะเปล่งแสงสีม่วง

ผลการคำนวณค่าจากสัญญาณจะได้ค่าต่างๆดังต่อไปนี้

กระแสเหนี่ยวนำ (L_o) = 109 นาโนเฮนรี่ (nH)

ความต้านทานวงจร (r_o) = 3.42 โอห์ม (ohm)

กระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_o) = 122.65 กิโลแอมป์ (KA)

เวลาการเกิดไฟคัส(Pinching time) = 3.2 ไมโครวินาที(μ sec)

ความเร็วของแผ่นกระแส(shock speed) = 5 เซนติเมตร/ไมโครวินาที

1.2 ก๊าซ ฮีเลียม (He)

ความดัน (P) = 2 มิลลิบาร์ (mbar)

ความต่างศักย์ (V_{charge}) = 14 กิโลโวลต์ (KV)

การลดทอนสัญญาณ (attenuate)

สัญญาณหัววัดศักย์ไฟฟ้า (HV) = 1 : 1000

สัญญาณหัววัดกระแสไฟฟ้า = 1 : 5

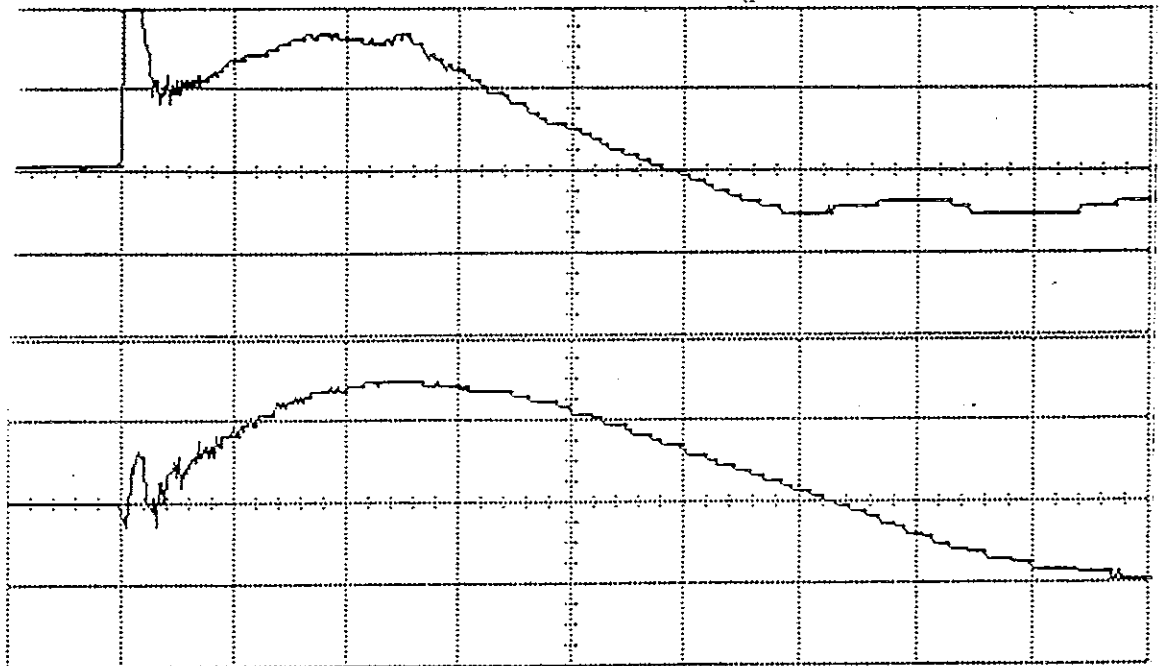
สัญญาณช่อง 1 สัญญาณหัววัดศักย์ไฟฟ้า 4 โวลต์/ช่อง, คอปปี้ง

1 เมกกระโอม

สัญญาณช่อง 2 สัญญาณหัววัดกระแสไฟฟ้า 1.5 โวลต์/ช่อง, คอปปี้ง

1 เมกกะโอม

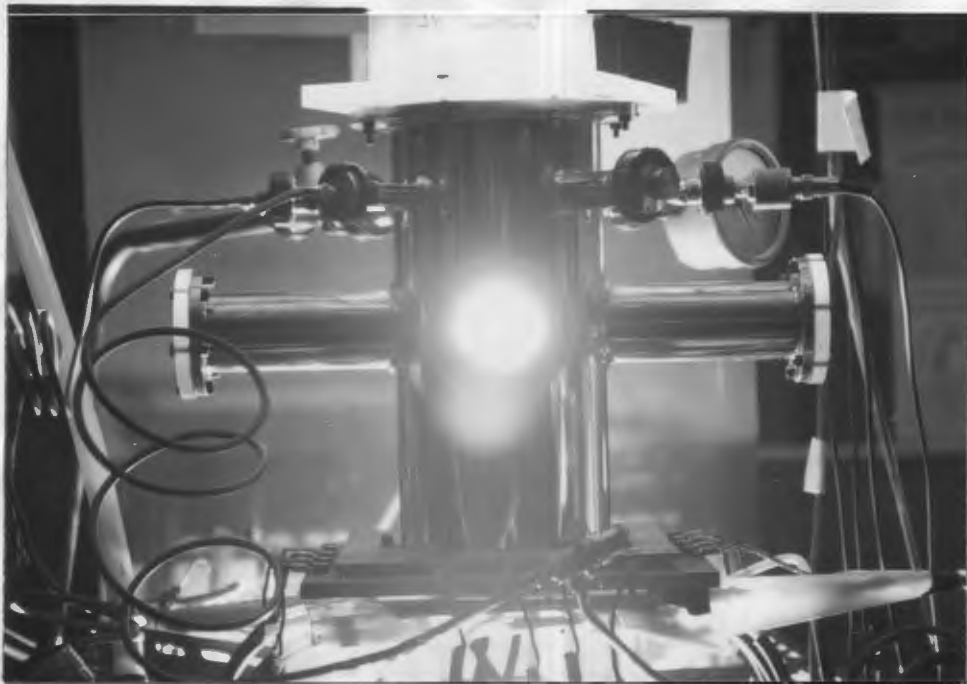
ผลการทดลองได้สัญญาณดังภาพประกอบ 40



ภาพประกอบ 40 สัญญาณของหัววัดศักย์ไฟฟ้า และหัววัดกระแสไฟฟ้า
ของก๊าซฮีเลียม

จากสัญญาณจะเห็นได้ว่า เมื่อเริ่มต้นคักย์ไฟฟ้าจะมีค่าสูงอ่านได้ประมาณ 4 กิโลโวลท์แต่กระแสไฟฟ้าจะเป็น ศูนย์ และจากรยะเวลา 1.5 ไมโครวินาที กระแสจะเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่คักย์ไฟฟ้ายังคงที่ หลังจากนั้นในช่วง 1.5 ถึง 2 ไมโครวินาทีเมื่อคักย์ไฟฟ้าก็จะลดลงอย่างรวดเร็ว แต่กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุด (Peak) จนกระทั่งเวลา 2.5 ไมโครวินาทีก็เกิดปฏิกิริยาไฟคัส (Pinching Phase) เกิดขึ้นทั้ง สองสัญญาณ โดยจะสังเกตเห็นว่าสัญญาณ จากหัววัดคักย์ไฟฟ้า จะเห็นได้ชัดเจนกว่าหัววัดกระแสไฟฟ้า หลังจากนั้นกระแสไฟฟ้าและคักย์ไฟฟ้าก็จะลดลงอย่างรวดเร็ว และมีภาพถ่ายระหว่างการทดลองพลาสมาไฟคัสของ ก๊าซฮีเลียม ดังภาพประกอบ

41



ภาพประกอบ 41 ภาพถ่ายการทำงานพลาสมาไฟคัสของ
ก๊าซฮีเลียม

จากการสังเกตจากภาพถ่ายจะเห็นได้ว่าการไอออนไนเซชันของ
ก๊าซฮีเลียมจะเปล่งแสงสีฟ้า

ผลการคำนวณค่าจากสัญญาณจะได้ค่าต่างๆดังต่อไปนี้

กระแสเหนี่ยวนำ (L_o) = 112.8 นาโนเฮนรี่ (nH)

ความต้านทานวงจร (r_o) = 1.67 โอห์ม (ohm)

กระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_o) = 112.50 กิโลแอมป์ (KA)

เวลาการเกิดไฟคัส (Pinching time) = 2.5 ไมโครวินาที (μsec)

ความเร็วของแผ่นกระแส (shock speed) = 7.25 เซนติเมตร/ไมโครวินาที

1.3 ก๊าซ ดิวทีเลียม (D_2)

ความดัน (P) = 4 มิลลิบาร์ (mbar)

V_{charge} = 14 กิโลโวลต์ (KV)

การลดทอนสัญญาณ (attenuate)

สัญญาณหัววัดศักย์ไฟฟ้า (HV) = 1 : 1000

สัญญาณหัววัดกระแสไฟฟ้า = 1 : 5

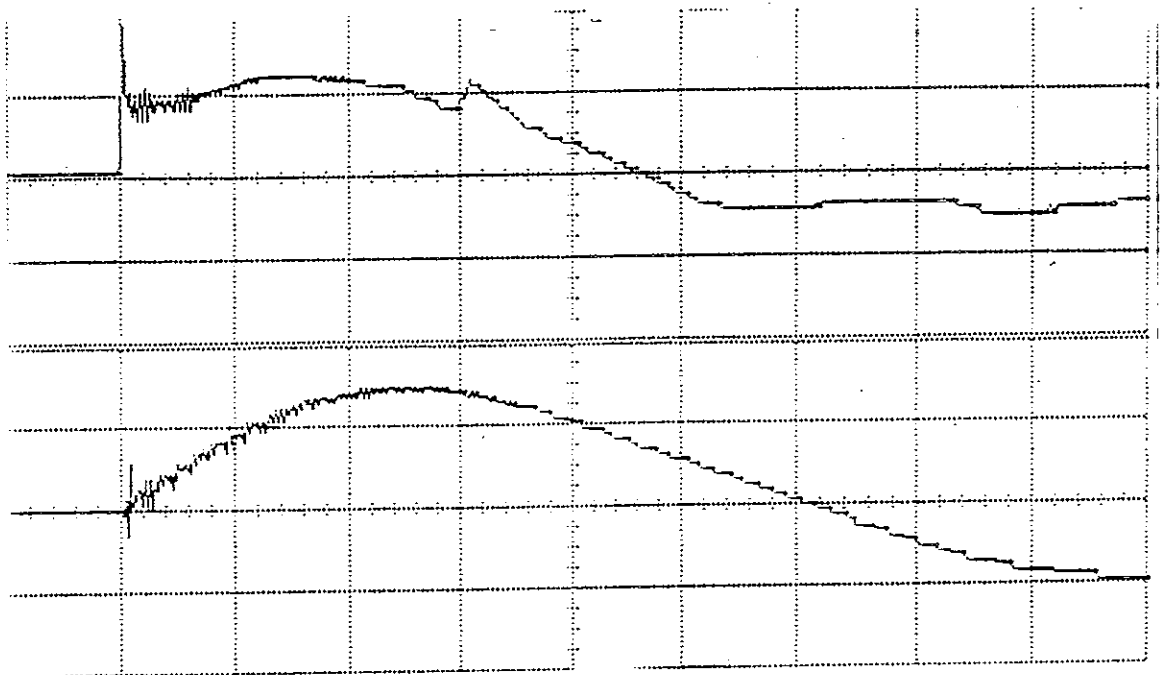
สัญญาณช่อง 1 สัญญาณหัววัดศักย์ไฟฟ้า 4 โวลต์/ช่อง, คอปป์

1 เมกกระโอห์ม

สัญญาณช่อง 2 สัญญาณหัววัดกระแสไฟฟ้า 1.5 โวลต์/ช่อง, คอปป์

1 เมกกะโอห์ม

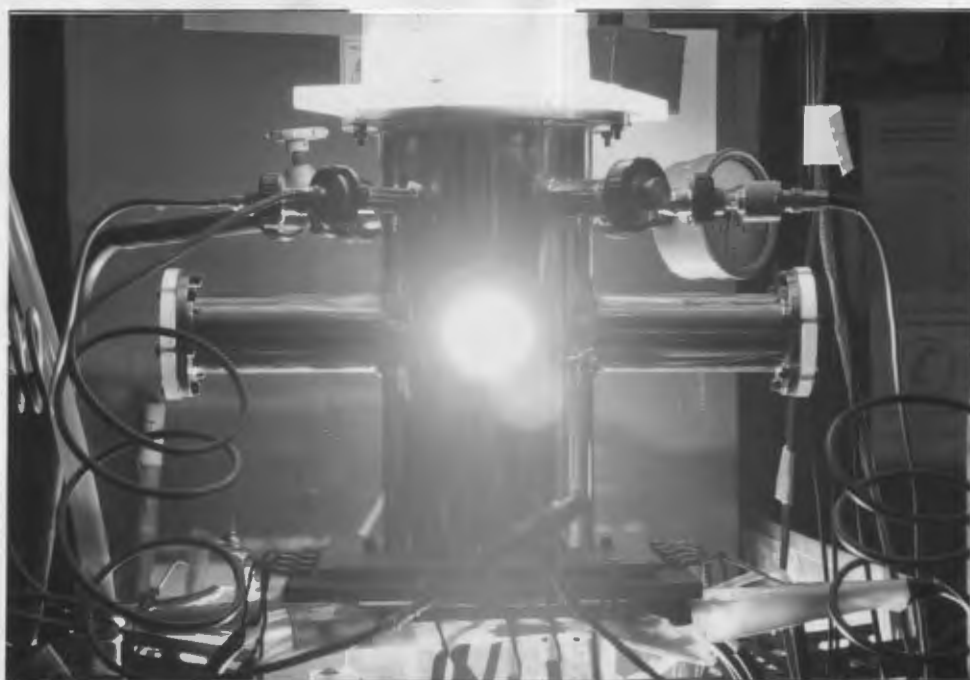
ผลการทดลองได้สัญญาณดังภาพประกอบ 42



ภาพประกอบ 42 สัญญาณของหัววัดศักย์ไฟฟ้า และหัววัดกระแสไฟฟ้า
ของก๊าซดิวทีเลียม

จากสัญญาณจะเห็นได้ว่า เมื่อเริ่มต้นคักย์ไฟฟ้าจะมีค่าสูงอ่านได้ประมาณ 4 กิโลโวลต์แต่กระแสไฟฟ้าจะเป็น ศูนย์ และจากรยะเวลา 1.5 ไมโครวินาที กระแสจะเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่คักย์ไฟฟ้ายังคงที่ หลังจากนั้นในช่วง 1.5 ถึง 3 ไมโครวินาทีเมื่อคักย์ไฟฟ้าก็จะลดลงอย่างรวดเร็ว แต่กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุด (Peak) จนกระทั่งถึงเวลา 3.2 ไมโครวินาทีก็เกิดปฏิกิริยาโฟคัล (Pinching Phase) เกิดขึ้นทั้งสองสัญญาณ โดยจะสังเกตเห็นว่าสัญญาณ จากหัววัดคักย์ไฟฟ้า จะเห็นได้ชัดเจนกว่าหัววัดกระแสไฟฟ้า หลังจากนั้นกระแสไฟฟ้าและคักย์ไฟฟ้าก็จะลดลงอย่างรวดเร็ว และมีภาพถ่ายระหว่างการทดลองพลาสมาโฟคัลของ ก๊าซดิวทีเลียม ดังภาพประกอบ

43



ภาพประกอบ 43 ภาพถ่ายการทำงานพลาสมาโฟคัลของ
ก๊าซดิวทีเลียม

จากการสังเกตจากภาพถ่ายจะเห็นได้ว่าการไอออนไนเซชันของ
ก๊าซดิวทีเลียมจะเปล่งแสงสีส้ม

ผลการคำนวณค่าจากสัญญาณจะได้ค่าต่างๆดังต่อไปนี้

กระแสเหนี่ยวนำ (L_o) = 109 นาโนเฮนรี่ (nH)

ความต้านทานวงจร (r_o) = 1.41 โอห์ม (ohm)

กระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_o) = 102.20 กิโลแอมป์ (KA)

เวลาการเกิดไฟคัส(Pinching time) = 3.2 ไมโครวินาที(μ sec)

ความเร็วของแผ่นกระแส(shock speed) = 5.925 เซนติเมตร/ไมโครวินาที

1.4 ก๊าซ ไนโตรเจน (N_2)

ความดัน (P) = 0.5 มิลลิบาร์ (mbar)

V_{charge} = 14 กิโลโวลต์ (KV)

การลดทอนสัญญาณ (attenuate)

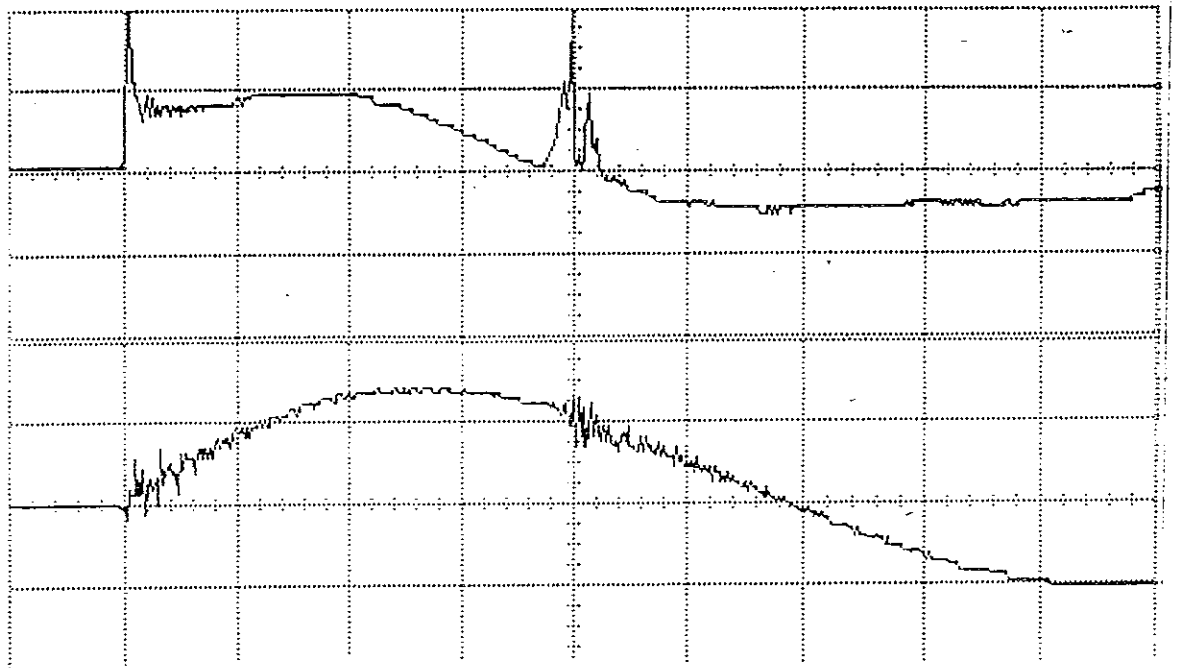
สัญญาณหัววัดคัลย์ไฟฟ้า (HV) = 1 | 1000

สัญญาณหัววัดกระแสไฟฟ้า = 1 | 5

สัญญาณช่อง 1 สัญญาณหัววัดคัลย์ไฟฟ้า 4 โวลต์/ช่อง, คอปปีง
1 เมกกระโอห์ม

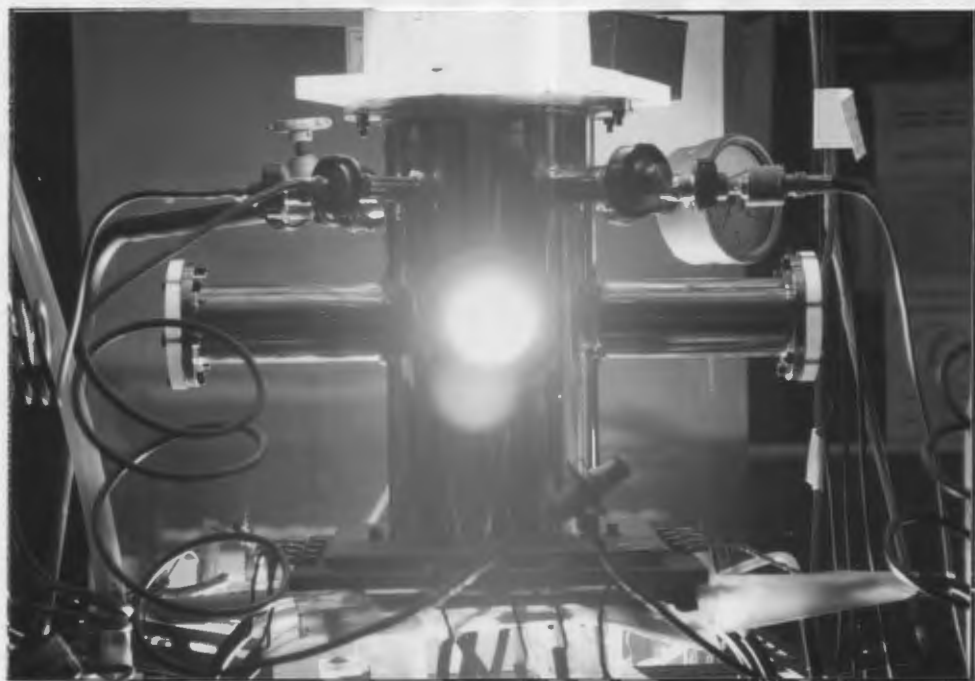
สัญญาณช่อง 2 สัญญาณหัววัดกระแสไฟฟ้า 1.5 โวลต์/ช่อง, คอปปีง
1 เมกกะโอห์ม

ผลการทดลองได้สัญญาณดังภาพประกอบ 44



ภาพประกอบ 44 สัญญาณของหัววัดคัลย์ไฟฟ้า และหัววัดกระแสไฟฟ้า
ของก๊าซไนโตรเจน

จากสัญญาณจะเห็นได้ว่า เมื่อเริ่มต้นคักย์ไฟฟ้าจะมีค่าสูงอ่านได้ประมาณ 4 กิโลโวลต์แต่กระแสไฟฟ้าจะเป็น ศูนย์ และจากรยะเวลา 1.5 ไมโครวินาที กระแสจะเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่คักย์ไฟฟ้ายังคงที่ หลังจากนั้นในช่วง 1.5 ถึง 4.5 ไมโครวินาทีเมื่อคักย์ไฟฟ้าก็จะลดลงอย่างรวดเร็ว แต่กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุด (Peak) จนกระทั่งเวลา 4.8 ไมโครวินาทีก็เกิดปฏิกิริยาไฟคัล (Pinching Phase) เกิดขึ้นทั้ง สองสัญญาณ และในการทดลองกับก๊าซ ไนโตรเจน นี้มักจะเกิดกรณีไฟคัลซ้ำกัน 2 ครั้ง (double plasma focus) โดยจะสังเกตเห็นว่าสัญญาณ จากหัววัดคักย์ไฟฟ้า จะเห็นได้ชัดเจนกว่าหัววัดกระแสไฟฟ้า หลังจากนั้นกระแสไฟฟ้าและคักย์ไฟฟ้าก็จะลดลงอย่างรวดเร็ว และมีภาพถ่ายระหว่างการทดลองพลาสมาไฟคัลของก๊าซไนโตรเจน ดังภาพประกอบ 45



ภาพประกอบ 45 ภาพถ่ายการทำงานพลาสมาไฟคัลของ
ก๊าซไนโตรเจน

จากการสังเกตจากภาพถ่ายจะเห็นได้ว่าการไอออนไนเซชันของ
ก๊าซไนโตรเจนจะเปล่งแสงสีฟ้า

ผลการคำนวณค่าจากสัญญาณจะได้ค่าต่างๆดังต่อไปนี้

กระแสเหนี่ยวนำ (L_o) = 109 นาโนเฮนรี่ (nH)

ความต้านทานวงจร (r_o) = 1.67 โอห์ม (ohm)

กระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_o) = 104.50 กิโลแอมป์ (KA)

เวลาการเกิดไฟคัส (Pinching time) = 3.8 ไมโครวินาที (μsec)

ความเร็วของแผ่นกระแส (shock speed) = 4.57 เซนติเมตร/ไมโครวินาที

1.5 ก๊าซ ไฮโดรเจน (H_2)

ความดัน (P) = 3 มิลลิบาร์ (mbar)

V_{charge} = 14 กิโลโวลต์ (KV)

การลดทอนสัญญาณ (attenuate)

สัญญาณหัววัดคัลย์ไฟฟ้า (HV) = 1 : 1000

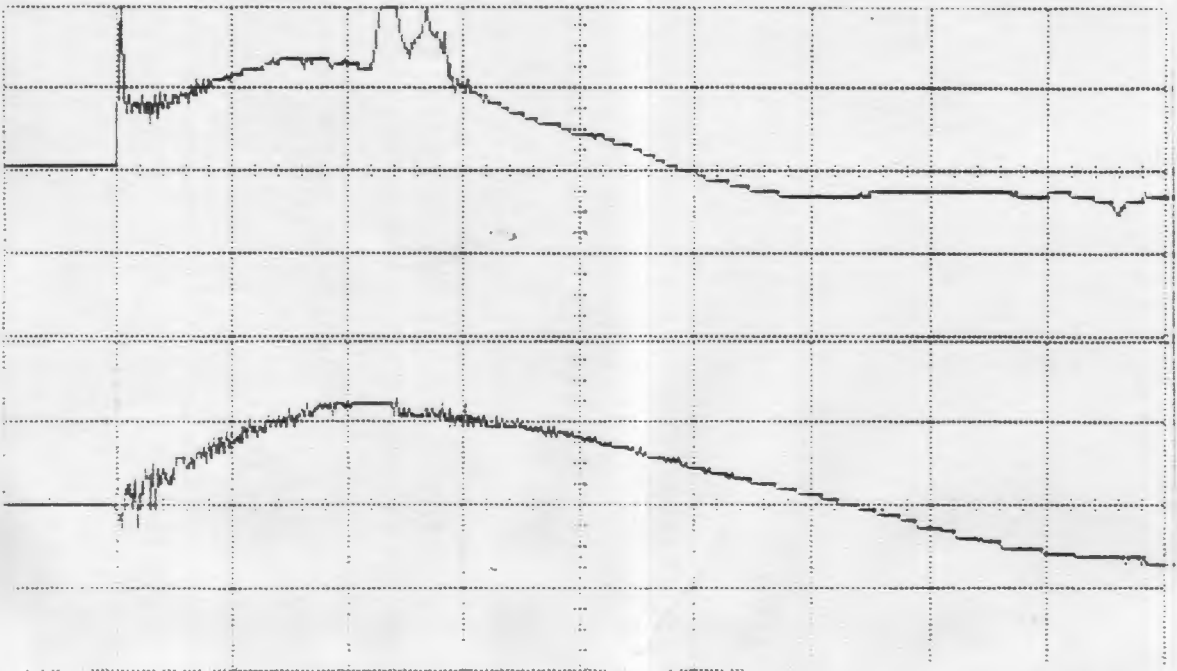
สัญญาณหัววัดกระแสไฟฟ้า = 1 : 5

สัญญาณช่อง 1 สัญญาณหัววัดคัลย์ไฟฟ้า 4 โวลต์/ช่อง, คอปปีง
1 เมกกระโอห์ม

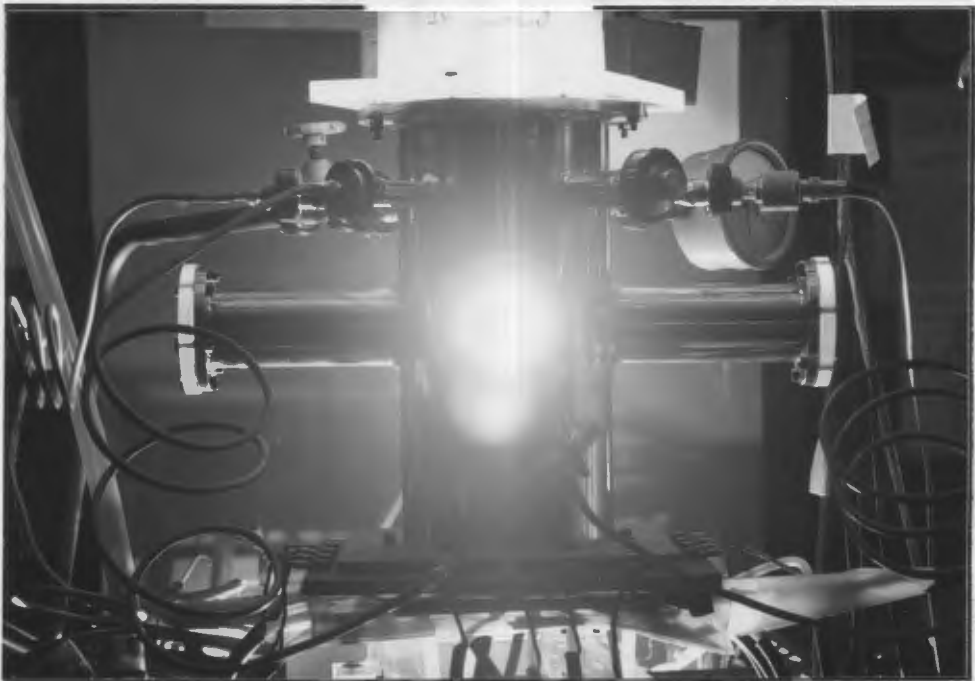
สัญญาณช่อง 2 สัญญาณหัววัดกระแสไฟฟ้า 1.5 โวลต์/ช่อง, คอปปีง
1 เมกกะโอห์ม

ซึ่งผลการทดลองได้สัญญาณดังภาพประกอบ 46

ภาพประกอบที่ 46 จากสัญญาณจะเห็นได้ว่า เมื่อเริ่มต้นคัลย์ไฟฟ้าจะมีค่าสูงอ่านได้ประมาณ 4 กิโลโวลต์แต่กระแสไฟฟ้าจะเป็น ศูนย์ และจากระยะเวลา 1.5 ไมโครวินาที กระแสจะเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่คัลย์ไฟฟ้ายังคงที่ หลังจากนั้นในช่วง 1.5 ถึง 2 ไมโครวินาทีเมื่อคัลย์ไฟฟ้าก็จะลดลงอย่างรวดเร็วแต่กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุด (Peak) จนกระทั่งเวลา 2.2 ไมโครวินาที ก็เกิดปฏิกิริยาไฟคัล (Pinching Phase) เกิดขึ้นทั้งสองสัญญาณ การทดลองกับก๊าซ ไฮโดรเจน นี้มักจะเกิดกรณีไฟคัลซ้ำกัน 2 ครั้ง (double plasma focus) โดยจะสังเกตเห็นว่าสัญญาณ จากหัววัดคัลย์ไฟฟ้า จะเห็นได้ชัดเจนกว่าหัววัดกระแสไฟฟ้า หลังจากนั้นกระแสไฟฟ้าและคัลย์ไฟฟ้าก็จะลดลงอย่างรวดเร็วและมีภาพถ่ายระหว่างการทดลองพลาสมาไฟคัลของ ก๊าซไฮโดรเจน ดังภาพประกอบ 47



ภาพประกอบ 46 สัญญาณของหัววัดศักย์ไฟฟ้า และหัววัดกระแสไฟฟ้า
ของก๊าซไฮโดรเจน



ภาพประกอบ 47 ภาพถ่ายการทำงานพลาสมาโพคัสของ
ก๊าซไฮโดรเจน

จากการสังเกตจากภาพถ่ายจะเห็นได้ว่าการไอออนไนเซชันของ
ก๊าซไฮโดรเจนจะเปล่งแสงสีแดง เนื่องจากสเปกตรัม H_α

ผลการคำนวณค่าจากสัญญาณจะได้ค่าต่างๆดังต่อไปนี้

กระแสเหนี่ยวนำ (L_0) = 109 นาโนเฮนรี่ (nH)

ความต้านทานวงจร (r_0) = 1.51 โอห์ม (ohm)

กระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_0) = 92.60 กิโลแอมป์ (KA)

เวลาการเกิดไฟคัส (Pinching time) = 2.2 ไมโครวินาที (μsec)

ความเร็วของแผ่นกระแส (shock speed) = 8.42 เซนติเมตร/ไมโครวินาที

บทที่ 5

บทสรุป

ในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย ซึ่งได้แสดงไว้
ในบทที่ 4 รวมไปถึงข้อเสนอแนะในการวิจัยและปัญหา ซึ่งแบ่งเป็นตอนๆ
ได้ดังต่อไปนี้

ตอนที่ 1 วิเคราะห์ข้อมูล

ตอนที่ 2 สรุปผล

ตอนที่ 3 ข้อเสนอแนะ

ตอนที่ 1 วิเคราะห์ข้อมูล

1. วิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลอง

ในการทดลองจริงนั้น การเกิดไฟคัส ของแต่ละก๊าซนั้นไม่ได้เกิด
เฉพาะที่ความดันในบทที่ 4 เท่านั้นแต่จะเกิดในช่วงความดันที่แตกต่างๆกันขึ้น
กับชนิดก๊าซ ซึ่งผลที่ในบทที่ 4 เป็นความดันที่เหมาะสมในการเกิดพลาสมา
มาไฟคัสมากที่สุดในระบบการทดลองในห้องทดลอง โดยผลที่ได้จะสามารถ
แสดงได้ดังภาพประกอบ 43

ก๊าซ gas	มวลโม เลกุล Atomic weight	ช่วงความดัน (มิลลิบาร์)	
		ช่วงการเกิด ไฟคัสที่ดี	ช่วงการเกิด ไฟคัสดีที่สุด
ไฮโดรเจน	2	1.33-8.00	2.0-4.0

ก๊าซ gas	มวลโม เลกุล Atomic weight	ช่วงความดัน (มิลลิบาร์)	
		ช่วงการเกิด ไฟค์สที่ดี	ช่วงการเกิด ไฟค์สดีที่สุด
ดิวทีเลียม	4	1.33-6.66	3.5-4.5
ฮีเลียม	4	0.93-4.67	1.5-2.0
ไนโตรเจน	28	0.30-3.00	0.5-1.0
อาร์กอน	40	0.40-2.67	1.0-2.0

ภาพประกอบ 48 ความดันสำหรับการเกิดไฟค์สในก๊าซชนิดต่างๆ

จะเห็นได้ว่าก๊าซที่มีมวลโมเลกุลน้อยเช่น ไฮโดรเจน, ดิวทีเลียม และ ฮีเลียม จะต้องใช้ช่วงของความดันสูงกว่า ก๊าซ ไนโตรเจน และอาร์กอน เพราะ ในการเกิดไฟค์สต้องอาศัยปริมาณของก๊าซที่พอจะเกิดพลาสมา เช่น ถ้าใช้ ก๊าซไฮโดรเจน ที่ความดันต่ำไปปริมาณของ ก๊าซไฮโดรเจน ที่อยู่ในท่อพลาสมาก็น้อยไปด้วย (ความดันต่างๆในภาพประกอบ 48 จะเป็นค่าความดันของก๊าซแต่ละชนิดในท่อพลาสมาไฟค์ส) จะทำให้การไอออนไนซ์ของก๊าซก็จะน้อยและทำให้ไม่เกิดการไฟค์ส ในทางตรงข้ามกัน เมื่อใช้ก๊าซที่มีมวลโมเลกุลสูง ก็ต้องใช้ความดันก๊าซที่ต่ำลงมาอีก เช่นถ้าใช้ ก๊าซอาร์กอน ที่ความดันสูงไปก็จะทำให้ ปริมาณของก๊าซอาร์กอนภายในท่อพลาสมาไฟค์สมากเกินไปด้วยก็จะทำให้การไอออนไนซ์ของก๊าซ ไม่สมบูรณ์ก็จะทำให้ไม่เกิดปฏิกิริยาไฟค์ส เช่นเดียวกัน

สำหรับก๊าซแต่ละชนิดนั้นจะใช้ช่วงเวลาที่เกิดปฏิกิริยาไฟค์ส (pinch)

ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับ มวลโมลกุลของก๊าซแต่ละชนิด และความดันที่เหมาะสม ดังภาพประกอบ 43 และจะแสดงผลของก๊าซแต่ละชนิดกับเวลาที่เกิดปฏิกิริยา ไฟคัส ดังภาพประกอบ 44

ก๊าซ gas	มวลโมเลกุล atomic weight	เวลาที่เกิดปฏิกิริยาไฟคัส (ไมโครวินาที) Pinching time (μ sec)
ไฮโดรเจน	2	2.2
ดิวทีเลียม	4	3.2
ฮีเลียม	4	2.5
ไนโตรเจน	28	3.8
อาร์กอน	40	3.2

ภาพประกอบ 49 เวลาที่เกิดไฟคัสของก๊าซแต่ละชนิด

ซึ่งผลจากภาพประกอบ 44 จะเห็นว่าก๊าซที่มีมวลโมเลกุลน้อยส่วนใหญ่ จะมีใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาไฟคัสน้อยกว่า ก๊าซที่มีมวลโมเลกุล กล่าวคือ ก๊าซที่มีมวลโมเลกุลน้อยจะมีความเร็วของแผ่นกระแสซึ่งเคลื่อนที่ด้วยแรง $J \times B$ สูงมากทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟคัสได้เร็ว ซึ่งจะเร็วกว่าก๊าซที่มีมวลโมเลกุลมาก เพราะก็ต้องใช้แรงในการเคลื่อนมากด้วยดังนั้นจึงใช้เวลาในการเกิดไฟคัสมากกว่า สำหรับผลของก๊าซดิวทีเลียมนั้นอาจคลาดเคลื่อนบ้าง เพราะว่าในการถ่าย ก๊าซดิวทีเลียม เข้าไปในท่อพลาสมาไฟคัสนั้น เมื่อเราต้องการความดันเท่าใดเราก็ถ่ายก๊าซ เข้าไปจนกระทั่งถึงค่าที่ต้องการ จากนั้นจึงปิดระบบทั้งหมดของท่อพลาสมา ที่ทำเช่นนี้เพราะก๊าซดิวทีเลียมมีราคาแพงมาก

จากนั้นรีบทำการทดลองทำให้ผลที่ได้คลาดเคลื่อน จึงจะแตกต่างกับก๊าซอื่นคือ ก๊าซชนิดอื่นจะมีความดันที่แน่นอนเพราะใช้ระบบแบบให้ก๊าซไหลตลอดเวลาทำให้ ปริมาณก๊าซในท่อพลาสมาจะกระจายอยู่ทั่วท่อทำให้ง่ายต่อการเกิดปฏิกิริยาพลาสมา ไฟคัส

2. วิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองเกี่ยวกับเอกสารอ้างอิง

การทำงานของพลาสมาไฟคัสตามหลักทฤษฎีจะขึ้นอยู่กับตัวแปร 2 ตัวคือ เวลาในการเคลื่อนที่ตามแนวแกนสมมาตร และอัตราส่วนของรัศมี โดยจะมีเงื่อนไขจาก สโนว์พลาว่า ดังนี้

$$t_u = \left| \frac{4r(b^2 - a^2)}{\mu \ln b/a} \right| \cdot \rho_0^{1/4} * Z_0 \quad \dots (36)$$

t_u = เวลาในการเคลื่อนที่ตามแนวแกนสมมาตร

b/a = อัตราส่วนของรัศมีขั้วนอกและขั้วในของ

$$= 0.95 \text{ เซนติเมตร} / 3.4 \text{ เซนติเมตร} = 0.279$$

Z_0 = ความยาวของขั้ว = 16 เซนติเมตร

I_0 = กระแสสูงสุดของวงจร = 145 กิโลแอมป์

ซึ่งจะ

$$t_u^2 = 1.006 * 10^{-8} \rho^{1/2} \quad \dots (37)$$

ส่วนการอัดของพลาสมาขั้นสุดท้ายของพลาสมาไฟคัส จะขึ้นอยู่กับค่า ความแรงของปฏิกิริยาไฟคัส ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนของค่าความร้อนที่ เกิดขึ้น เมื่อกระแสคงที่และช่วงความยาวของ พินช์ (pinch) คงที่ด้วย

$$r_p/r_o = \exp\{-\delta/2(\delta-1)\} \quad \dots(38)$$

r_p/r_o = ค่าอัตราส่วนของการอัดของพลาสมา (compression ratio)

δ = ค่าอัตราส่วนของความร้อนที่เกิดขึ้นของก๊าซ (effective specific heat ratio of the filling gas)

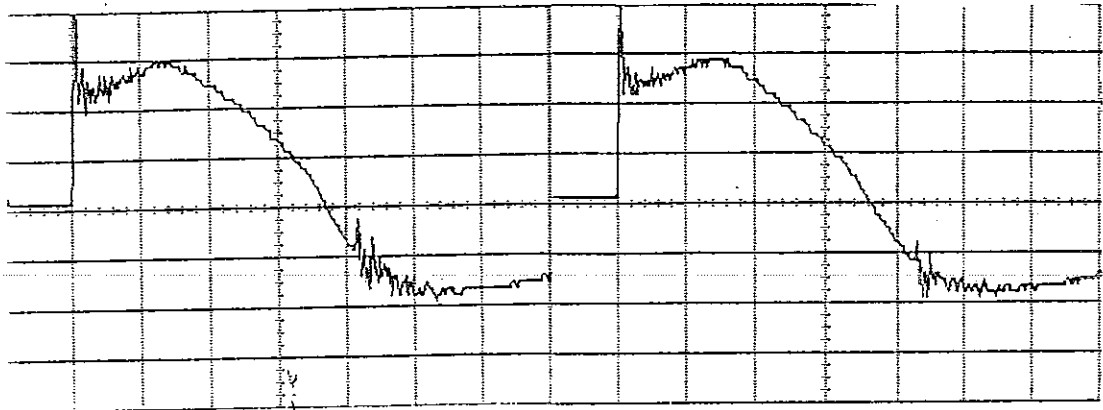
อุณหภูมิในการทำการทดลอง ของก๊าซไฮโดรเจน และ ดิวทีเรียม จะมีค่าการแตกตัวของอะตอมสูงสุดซึ่งจะให้ค่า

$$\delta = 5/3 \quad \text{และ} \quad r_p/r_o = 0.29$$

ซึ่งจากผลที่ได้ทำการทดลองสามารถที่จะคำนวณหาค่า ช่วงเวลาในการเคลื่อนที่ในแกนสมมาตร (τ_z) จากสมการ 36 ในการทดลองนี้เราได้ทำการทดลองโดยใช้ ก๊าซอาร์กอน เป็นหลักเพื่อที่จะนำผลไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากเอกสารอ้างอิง โดยได้ทำการทดลองที่หลายความดัน เพื่อหาความดันที่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาการฟิวชั่น ซึ่งก็จะได้ผลดังภาพประกอบ 46 ซึ่งจะได้ ความดันที่เกิดปฏิกิริยาฟิวชั่นดังภาพประกอบ 45

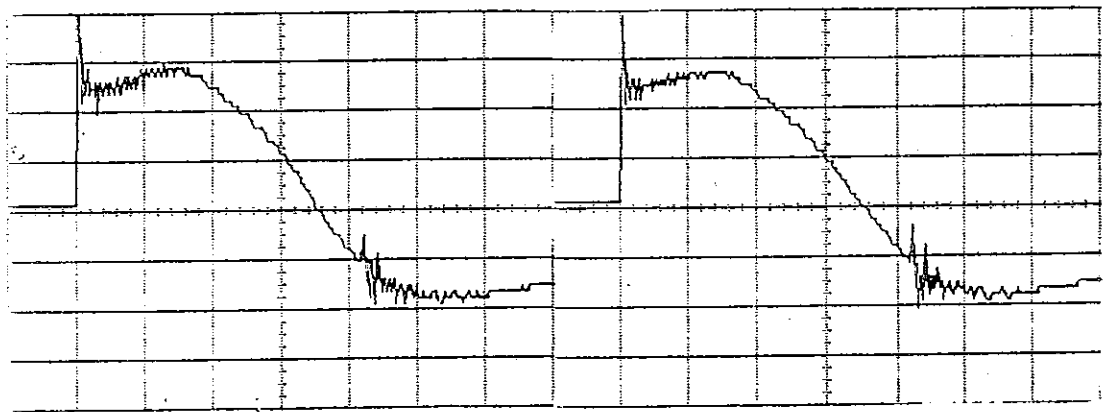
Ar	mbar				
	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5
	.7	.75	1	1.25	1.5

ภาพประกอบ 50 ความดันก๊าซอาร์กอนที่เกิดปฏิกิริยาฟิวชั่น



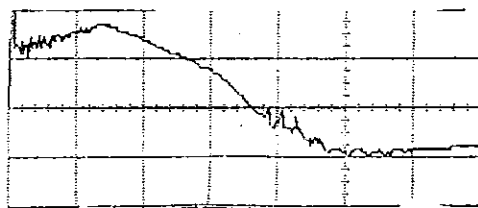
0.75 mbar

1 mbar



1.25 mbar

1.75 mbar



0.7 mbar

ภาพประกอบ 46 ภาพสัญญาณการเกิดไฟคัสของก๊าซอาร์กอนที่
ความดันต่างๆกัน

จากผลการทดลองสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นของก๊าซอาร์กอน
ที่ความดันแตกต่างกันได้จาก

$$PV = nRT \quad \dots (39)$$

P = ความดันก๊าซ (pascal)

V = ปริมาตร (m^3)

R = ค่าที่ 8.31

n = จำนวนโมล

T = อุณหภูมิขณะทดลอง ($^{\circ}K$) = $300^{\circ}K$

$$PV = (m/M)RT$$

$$P = \rho RT/M$$

จะได้ $\rho = PM/RT \quad \dots (40)$

ρ = ความหนาแน่นของก๊าซ

M = มวลโมเลกุลของก๊าซ

ซึ่งจากสมการที่ 40 จะได้ค่าของความหนาแน่นที่ความดันต่างๆกันดังนี้

$$\rho_1 = 11.2 \times 10^{-4}, \rho_2 = 16 \times 10^{-4}, \rho_3 = 22.07 \times 10^{-4}$$

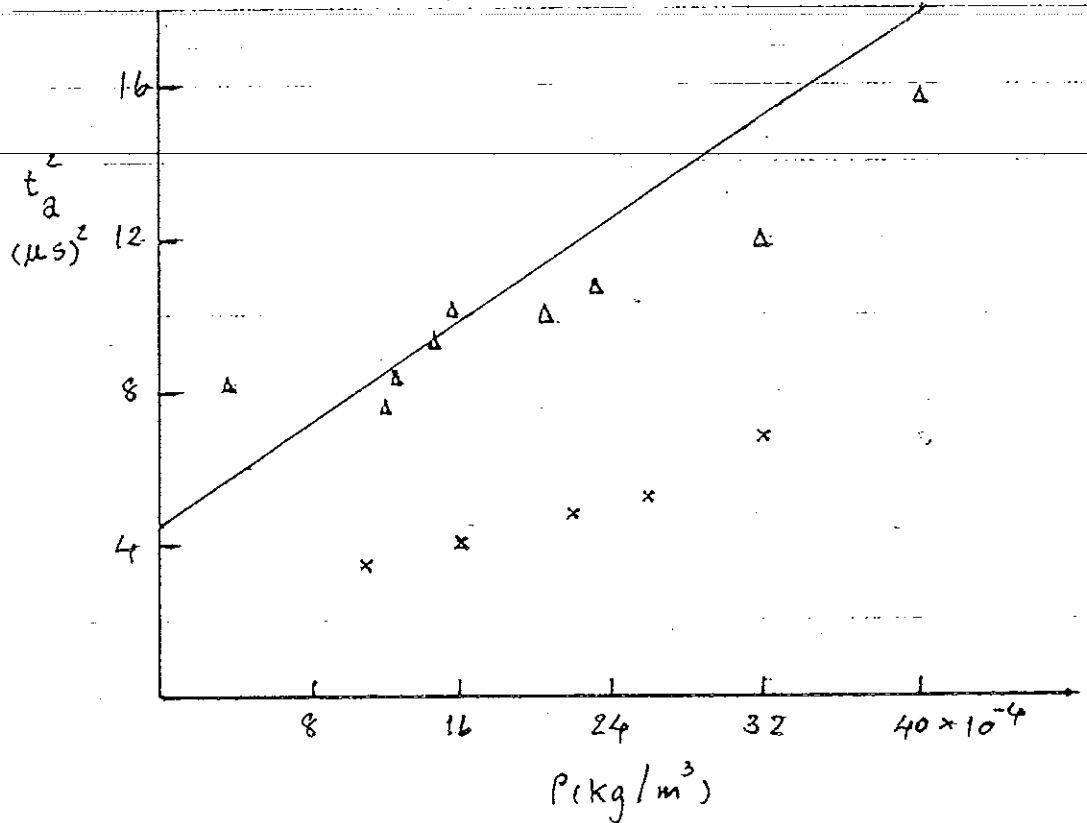
$$\rho_4 = 26.5 \times 10^{-4}, \rho_5 = 32 \times 10^{-4}$$

นำค่าที่คำนวณได้ไปแทนในสมการ 37 จะได้

$$t_{a1}^2 = 3.34 \times 10^{-12}, t_{a2}^2 = 4 \times 10^{-12}, t_{a3}^2 = 4.7 \times 10^{-12},$$

$$t_{a4}^2 = 5.15 \times 10^{-12} \text{ , } t_{a5}^2 = 5.67 \times 10^{-12}$$

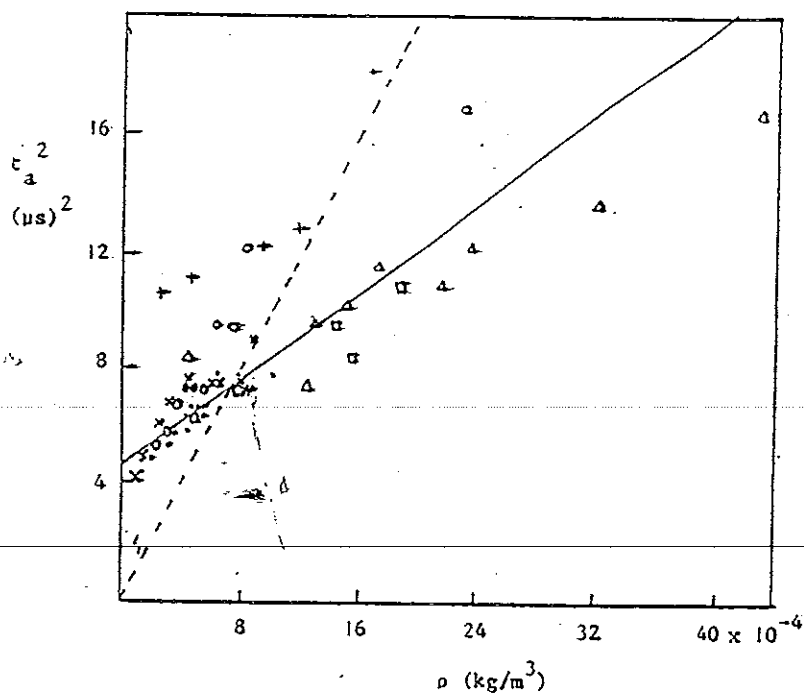
ซึ่งสามารถนำไปพล็อตกราฟเทียบจากข้อมูลที่ได้จากเอกสารอ้างอิงได้ดังนี้



ภาพประกอบที่ 51 กราฟเปรียบเทียบผลที่ได้กับเอกสารอ้างอิง (A.J Smith 1986)

โดยที่ คือผลที่ได้จากเอกสารอ้างอิง และ คือผลที่ได้จากการทดลอง

ภาพประกอบที่ 48 เป็นภาพของก๊าซหลายชนิดที่ได้เคยมีการทดลองจาก สมิทท์ (A.J Smith 1986)



Dependence of time of occurrence of focus on density for various gases: \square air, \triangle argon, $+$ carbon dioxide, $*$ deuterium, \times helium, \circ hydrogen.

ภาพประกอบ 52 ผลการทดลองจากก๊าซหลายชนิด (A.J Smith 1986)

ตอนที่ 2 สรุปผล

สิ่งที่ได้ทำมาตลอดการวิจัย คือ

1. ได้ทดสอบการทำงานของระบบพลาสมาโฟกัส ตั้งแต่ระบบสูญญากาศ ระบบทริกเกอร์ ระบบอัดประจุไฟฟ้า ระบบวัดไฟฟ้า และเชื่อมโยงออสซิลโลสโคปกับไมโครคอมพิวเตอร์ ทดสอบการทำงานของไกเกอร์มูลเลอร์ และสามารถใช้งานได้ดีพอสมควร
2. ได้ทดลองพลาสมาโฟกัสโดยใช้ก๊าซชนิดต่างๆพบว่า จะขึ้นอยู่กับความดัน และมวลโมเลกุลของก๊าซ ซึ่งจะใช้เวลาในการเกิดโฟกัสที่แตกต่างกัน
3. สังเกตเห็นการเกิดโฟกัสซ้ำกัน (double focus) ในก๊าซไนโตรเจน , ก๊าซไฮโดรเจน และอาร์กอน ในการทดลองส่วนใหญ่
4. เนื่องจากปัญหาจนวนไม่ทนแรงดันสูง คราบสกปรกที่ จนวน

(insulator) ทำให้อัตราแรงเมื่อทดลองใน ก๊าซดิวทีเลียม ไม่สูงเต็มที่จึง ไม่เกิดนิวตรอนที่สามารถตรวจจับโดย ไกเกอร์มูลเลอร์ (GM)

5. ปัญหาที่ประสบและได้แก้ไข

5.1 กรณีลอบเทียบศักย์ไฟฟ้า

5.2 ปัญหาทริกเกอร์ไม่ทำงาน

5.3 ปัญหาฉนวนที่คาปาซิเตอร์ชำรุด

อย่างไรก็ตามได้แก้ไขปัญหาทุกระบบ รวมทั้งการติดตั้งอินเตอร์เฟส,

และหัววัดไกเกอร์

6. ผลจากการคำนวณเมื่อเทียบกับเอกสารอ้างอิงปรากฏว่าได้ผลที่ใกล้เคียงกันพอสมควร

ตอนที่ 3 ข้อเสนอแนะ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงข้อเสนอแนะเพิ่มเติมเพื่อเป็นแนวทางสำหรับผู้วิจัยคนอื่นที่สนใจแนวทางในการวิจัยนี้ซึ่งจะกล่าวเป็นข้อๆดังนี้

1. ควรจะมีความรู้พื้นฐานทางอิเล็กทรอนิกส์

2. เนื่องจากในระหว่างการทดลองจะมีเสียงดังมากควรจะมีการออกแบบอุปกรณ์เพื่อลดเสียงที่ดังออกมา จะได้ทำการทดลองได้ตลอดเวลา

3. ควรจะมีเครื่องมือวัดศักย์ไฟฟ้า หรือมิเตอร์ไฟฟ้าแรงสูง เพื่อตัดปัญหาในการอัดประจุไฟฟ้า จะได้แน่ใจว่าได้ความต่างศักย์ที่เราต้องการ

4. ถ้าต้องการศึกษานิวตรอนที่เกิดขึ้นจากพลาสมาโพสิตรอนควรมีความรู้พื้นฐานทางด้านนิวเคลียร์พอสมควร

บรรณานุกรม

- Silawatshananaï,C., Sataporn,N. and Limluktart, k. 1994.
 "Triggered Air Flashlamp for Schlieren Photography",
 Songklanakarín J. Sci.Technol 16(1994) ,93-105
-
- Suwanmanee, N., Tirawanichkul, Y., Thaisayam, V. and
 Silavatshananaï,C. 1989.
 "Pulse Trigger Circuit for plasma and laser
 Experiment",
Songklanakarín J. Sci. Technol. 11(1989X , 49-53.
- Sataporn, N., limluktart, K. and Silawatshananaï, C.1994.
 "Flashlamp as Light Source", J.Thai physics(to be
 published)
- S.Lee in laser and Plasma Technology, p.37,64 and 387,
 edited by S.Lee, B.C.Tan, C.S.Wong and A.C.Chew,
 World Scientific Singapore (1985).
- A.J. Smith and A.V. Gholap in laser and Plasma Techonology,
 P.105,115 (1985))
- S.Lee, Plasma Phys., 25,571 (1983)
- S.Lee, J. Appl, Phys., 54,3603 (1983)

ภาคผนวก ก

โปรแกรมจำลองการเกิดพลาสมาโฟกัส (Dr. Ken Wesson)

Focus; {Program to simulate the axial and radial
phases of a plasma focus experiment -

Hercules OPT 1.50

USES

Crt, Dos, Graph, Printer, MUPPETKW;

CONST

maxNumData: Integer=600; {Maximum number of data
points}

m: Real=1;

gamma: Real=5.0/3.0;

VAR

t, q, z, j, v: DataVector; {q is charge, z is axial
distance, j is the current, and v the axial velocity}

tr, ks, kp, vr, jr: DataVector; {the radial variables}

dks: Real;

alpha, beta, alpha1, beta1, f, c: Real; {parameters in
the equations}

getData, plot, totalPoints, radialPoints: Integer;

numData: Integer;

phase: Integer; {1=axial, 2=radial}

dt1, dt2: Real; {time steps}

IC: Screen; {data screen}

```
act:Char; {control character}
```

```
plotMenu,morePlotsMenu,solveMenu:MenuType;
```

```
done,error:Boolean;
```

```
{*-----Physics Procedures-----*}
```

```
PROCEDURE Force(q,j,z,v,t:Real; VAR f1,f2,f3,f4:Real);
```

```
VAR
```

```
t1,t2,t3,t4,t5,t6,t7,t8,t9,ks,kp,zf:Real;
```

```
BEGIN
```

```
  if(phase=1)then {Axial phase equations}
```

```
    BEGIN
```

```
      f1:=j;
```

```
      f2:=(1-q-beta*j*v)/(1+beta*z);
```

```
      f3:=v;
```

```
      if(z=0)then
```

```
        f4:=alpha*0.816
```

```
      else
```

```
        f4:=(alpha*alpha*j*j-v*v)/z;
```

```
    END
```

```
  else {Radial phase equations - q and j are  
        unchanged,z and v are now ks and kp}
```

```
    BEGIN
```

```
      ks:=z;
```

```
      kp:=v;
```

```
      zf:=1-ks;
```

```

f1:=j;
f3:=-alpha*alpha1*j/kp;
t1:=1-ks*ks/(kp*kp);
t2:=1-t1/gamma;
t3:=2/(gamma+1)*ks/kp*f3;
if(zf=0)then zf:=0.00001;
t4:=1/(gamma+1)*kp/zf*f3;

t5:=1/gamma*kp/j;
if(kp/c)<0 then
  BEGIN
    if(NOT error)then
      BEGIN
        Message('Whoops! Kp is
        negative!Aborting calcula
        tion. ');
        Sound(200);
        Delay(400);
        NoSound;
        pause;
        Message(' ');
        error:=true;
      END;
      kp:=c;
    END;
    t6:=beta1/f*ln(kp/c);
    t7:=1+beta+t6*zf;

```

```

t8:=1-q-t6*j*f3;
t9:=beta1/f*j*zf/kp;
f2:=(t8+t9/t2*(t3+t1*t4))/(t7+t1*t5*t9
/t2);
f4:=(t3-t1*(t5*f2-t4))/t2;
dks:=f3;

```

```

END;

```

```

END;

```

```

{*-----Mathematics Procedures-----*}

```

```

PROCEDURE StepRK2_4(y10,y20,y30,y40,t0,dt:Real;

```

```

VAR y11,y21,y31,y41,t1:Real);

```

```

VAR

```

```

f1,f2,f3,f4:Real;

```

```

y1h,y2h,y3h,y4h,th:Real;

```

```

BEGIN

```

```

Force(y10,y20,y30,y40,t0,f1,f2,f3,f4);

```

```

y1h:=y10+dt*f1/2;

```

```

y2h:=y20+dt*f2/2;

```

```

y3h:=y30+dt*f3/2;

```

```

y4h:=y40+dt*f4/2;

```

```

Force(y1h,y2h,y3h,y4h,th,f1,f2,f3,f4);

```

```

y11:=y10+dt*f1;

```

```

y21:=y20+dt*f2;

```

```

y31:=y30+dt*f3;

```

```
        y41:=y40+dt*f4;  
        t1:=t0+dt;  
END;
```

```
PROCEDURE StepRK4_4(y10,y20,y30,y40,t0,dt:Real;
```

```
VAR y11,y21,y31,y41,t1:Real);
```

```
VAR
```

```
    f1,f2,f3,f4:Real;  
    k11,k21,k31,k41:Real;  
    k12,k22,k32,k42:Real;  
    k13,k23,k33,k43:Real;  
    th:Real;
```

```
BEGIN
```

```
    Force(y10,y20,y30,y40,t0,f1,f2,f3,f4);
```

```
    k11:=dt*f1;
```

```
    k21:=dt*f2;
```

```
    k31:=dt*f3;
```

```
    k41:=dt*f4;
```

```
    th:=t0+dt/2;
```

```
    Force(y10+k11/2,y20+k21/2,y30+k31/2,y40+k41/2,th,
```

```
    f1,f2,f3,f4);
```

```
    k12:=dt*f1;
```

```
    k22:=dt*f2;
```

```
    k32:=dt*f3;
```

```
    k42:=dt*f4;
```

```
    Force(y10+k12/2,y20+k22/2,y30+k32/2,y40+k42/2,th,
```

```

    f1, f2, f3, f4);

    k13:=dt*f1;

    k23:=dt*f2;

    k33:=dt*f3;

    k43:=dt*f4;

    t1:=t0+dt;

    Force(y10+k13,y20+k23,y30+k33,y40+k43,t0,f1,f2,
    f3,f4);

    y11:=y10+k11/6+k12/3+k13/3+dt*f1/6;
    y21:=y20+k21/6+k22/3+k23/3+dt*f2/6;
    y31:=y30+k31/6+k32/3+k33/3+dt*f3/6;
    y41:=y40+k41/6+k42/3+k43/3+dt*f4/6;

    END;

```

```

{*-----Data Input Procedures-----*}

```

```

PROCEDURE MakeDataScreen;

```

```

    BEGIN

```

```

        DefineInputPort(0.2,0.8,0,0.935);

```

```

        _A[01]:= '    "PLASMA FOCUS SIMULATION"          ';

```

```

        _A[02]:= '                                          ';

```

```

        _A[03]:= '    "DEVICE DIMENSIONS"                ';

```

```

        _A[04]:= '          "Inner radius = " 0.1+        ';

```

```

        _A[05]:= '          "Outer radius = " 0.3+        ';

```

```

        _A[06]:= '                                          ';

```

```

        _A[07]:= '    "PLASMA PARAMETERS"                ';

```



```

_AC[08]:="Circuit to plasma time scale ratio";
_AC[09]:='          "alpha = " 1.5++          ';
_AC[10]:="Plasma to circuit inductance ratio";
_AC[11]:='          "beta  = " 1.0++          ';
_AC[12]:='          ';
_AC[13]:='          "NUMERICAL PARAMETERS"          ';
_AC[14]:="Time step for axial phase " 0.01++';
_AC[15]:="Time step for radial phase " 0.001+';
_AC[16]:='          ';
LoadScreen(IC,16);

```

```
END;
```

```
PROCEDURE GetScreenData;
```

```
BEGIN
```

```
ClearMuppetPort;
```

```
Message('Type <ENTER> to plot, <ESC> to quit');
```

```
Accept(IC); {Displays screen}
```

```
f:=1/Valu(IC,1);
```

```
c:=Valu(IC,2)*f;
```

```
alpha:=Valu(IC,3);
```

```
beta:=Valu(IC,4);
```

```
dt1:=Valu(IC,5);
```

```
dt2:=Valu(IC,6);
```

```
END;
```

```
{*-----Menu Procedures-----*}
```

```
PROCEDURE SetUpPlotMenu; {menu seen after the first  
plots}
```

```
BEGIN
```

```
WITH plotMenu DO
```

```
BEGIN
```

```
n:=3;
```

```
choices[1]:='New Data';
```

```
choices[2]:='More plots';
```

```
choices[3]:='QUIT';
```

```
choice:=2;
```

```
END;
```

```
END;
```

```
PROCEDURE SetUpMorePlotsMenu; {menu seen after the  
second plots}
```

```
BEGIN
```

```
WITH morePlotsMenu DO
```

```
BEGIN
```

```
n:=3;
```

```
choices[1]:='New Data';
```

```
choices[2]:='Go back';
```

```
choices[3]:='QUIT';
```

```
choice:=1;
```

```
END;
```

```
END;
```

```
{*-----Graphics Procedures-----*}
```

```
PROCEDURE GraphSetUp; {define 4 small windows for  
displaying graphs}
```

```
BEGIN
```

```
GraphBackColor:=Black;
```

```
DefineViewport(1,0.1,0.45,0.5,0.9);
```

```
DefineViewport(2,0.1,0.45,0.05,0.45);
```

```
DefineViewport(3,0.55,0.9,0.5,0.9);
```

```
DefineViewport(4,0.55,0.9,0.05,0.45);
```

```
END;
```

```
PROCEDURE PlotIt(viewport,color:Integer;x,y:DataVector;  
nameLabel:BigStr);
```

```
VAR
```

```
xmin,xmax,ymin,ymax:Real;
```

```
BEGIN
```

```
SetColor(White);
```

```
OpenViewport(viewport);
```

```
AutoScale(viewport,x,y,numData);
```

```
PlotData(x,y,numData);
```

```
SetColor(White);
```

```
PutLabel(Inside,nameLabel);
```

```
END;
```

```
PROCEDURE DoPlots;
```

```
  BEGIN
```

```
    numData:=totalPoints;
```

```
    ClearMuppetPort;
```

```
    PlotIt(1,lightGreen,t,q,'q vs t');
```

```
    PlotIt(2,yellow,t,z,'z vs t');
```

```
    PlotIt(3,lightGreen,t,j,'i vs t');
```

```
    numData:=totalPoints-radialPoints;
```

```
    PlotIt(4,yellow,t,v,'v vs t (axial phase)');
```

```
    plot:=1;
```

```
  END;
```

```
PROCEDURE DoMorePlots;
```

```
  BEGIN
```

```
    numData:=radialPoints;
```

```
    ClearMuppetPort;
```

```
    PlotIt(1,lightGreen,tr,ks,'ks vs t');
```

```
    PlotIt(2,yellow,tr,vr,'v vs t (radial phase)');
```

```
    PlotIt(3,lightGreen,tr,kp,'kp vs t');
```

```
    PlotIt(4,yellow,tr,jr,'i vs t (radial phase)');
```

```
    plot:=2;
```

```
  END;
```

```
{*-----Solution Procedures-----*}
```

```
PROCEDURE Initialise; {Set the initial conditions}
```

```

t[1]:=0;

z[1]:=0;

q[1]:=0;

j[1]:=0;

v[1]:=0;

ks[1]:=1;

kp[1]:=1;

alpha:=Sqrt((gamma+1)*(c*c-1))*f/(2*ln(c));

beta:=beta/ln(c);

error:=false;

END;

PROCEDURE Solve; {Do the integrations, checking a
                 termination condition in each case}

VAR
    i, isave: Integer;
    factor1, factor2: Real;

BEGIN
    i:=1;

    factor1:=beta/(2*alpha*alpha);

    factor2:=2*(gamma-1)/gamma;

    getData:=0;

    phase:=1;

    REPEAT

        BEGIN

```

```

        i:=i+1;
        StepRK4_4(q[i-1],j[i-1],z[i-1],v[i-1],t
        [i-1],dt1,
                q[i],j[i],z[i],v[i],t[i]);
    END;
UNTIL ((z[i]>1) OR (i>maxNumData));
phase:=2;
dks:=-alpha*alpha1*j[i];
isave:=i;
kp[i]:=1;
ks[i]:=1;
tr[1]:=t[i];
vr[1]:=v[i];
jr[1]:=j[i];
REPEAT
    BEGIN
        i:=i+1;
        StepRK4_4(q[i-1],j[i-1],ks[i-1],kp[i-1],
        t[i-1],dt2,
                q[i],j[i],ks[i],kp[i],t[i]);
        z[i]:=(1-ks[i])/f+1;
        v[i]:=-dks;
        tr[i-isave+1]:=t[i];
        kp[i-isave+1]:=kp[i];
        ks[i-isave+1]:=ks[i];
        vr[i-isave+1]:=v[i];
    END

```

```

END;

UNTIL ((ks[i]<0) OR (i>maxNumData) OR
(error=true));
totalPoints:=i;
radialPoints:=i-isave+1;

if(error)then
    radialPoints:=radialPoints-1;

IF(i>maxNumData)THEN {alert the user that the
termination condition was not met}
    BEGIN
        Message('Could not complete integration
- press a key to see partial results');
        Sound(400);
        Delay(200);
        NoSound;
        Pause;
        Message('');
    END
ELSE
    ks[i-isave+1]:=0;
END;

```

```

PROCEDURE HandleMenuChoice;

```

```

BEGIN

```

```

    WHILE((getData<>1) AND (done=FALSE)) DO

```

```

        IF(plot=1)THEN
            BEGIN
                Menu(plotMenu);
                CASE plotMenu.choice OF
                    1:getData:=1;
                    2:DoMorePlots;
                    3:done:=TRUE;
                END;
            END
        ELSE
            BEGIN
                Menu(morePlotsMenu);
                CASE morePlotsMenu.choice OF
                    1:getData:=1;
                    2:DoPlots;
                    3:done:=TRUE;
                END;
            END
        END;

    {*-----Main Program-----*}

    BEGIN
        MUPPETinit;
        done:=FALSE;
        ForceMonochrome;
    
```



```
MakeDataScreen;
GraphSetUp;
SetUpPlotMenu;
SetUpMorePlotsMenu;
REPEAT
    GetScreenData;
    IF EscapedFrom(IC) THEN Break;
    Message('Calculating solution...');
    Initialise;
    Solve;
    DoPlots;
    HandleMenuChoice;
UNTIL done=TRUE;
MUPPETdone;
END.
```

ภาคผนวก ข
การอินเทอร์เฟซสโคป

HP 546XX RS-232 Cabling and Connections

=====

for HP 54651A RS-232 Interface Module

HP 54656A Test Automation Module

HP 54658A Measurement/Storage Module

Interface problems with RS-232 can be caused by improper configuration of the interface (i.e. baud rate, handshaking) or improper cable connections.

Configuring the RS-232 Interface

=====

To ensure proper operation of the interface, you must configure the scope from the front panel using the Print/Utility menu. If you are using ScopeLink to control the oscilloscope, the "Connect to" softkey must be set to "Computer". The baud rate must match the baud rate used on the computer interface (specified in the ScopeLink Setup menu) and the handshake mode should be set to XON. The following cables are available from HP for connecting a computer to any of the HP 546XX RS-232 Option modules.

Cable Part Numbers:

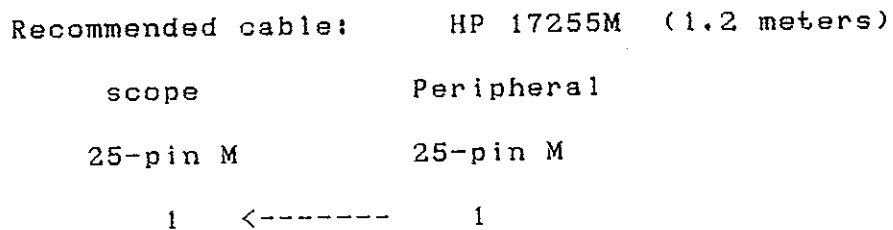
Scope to printer/plotter	HP 13242G	(5 meters)
(HP Vectra 25-pin serial port)	or	

	HP 17255M	(1.2 meters)
Scope to IBM 25-pin serial port	HP 92219J	(5 meters)
	or	
	HP 17255D	(1.2 meters)
Scope to 9-pin serial port	HP 24542G	(3 meters)

The HP 54651A RS-232 Interface Module and HP 54658A Module have 25-pin RS-232 connectors. The HP 54656A Test

Automation Module has a 9-pin connector. A 9-pin to 25-pin adapter cable is provided with the HP 54656A to provide compatibility with the other modules. If you choose to supply your own cable, you must make sure that the proper RS-232 connections are made. To help resolve cable problems, the RS-232 cable connections are shown below. In addition, please note that the pins used for communication are 2, 3, and ground (typically 7). The HP 54600 pulls the other pins to the needed value, but if the your cable has the other pins connected incorrectly, the interface will not function properly.

1.Oscilloscope to Printer/Plotter (Vectra 25-pin connector)



2	----->	3
3	<-----	2
5	<-----	20
6	<-----	20
7	<----->	7
20	----->	5
20	----->	6

Recommended cable: HP 13242G (5.0 meters)
also 17255M

scope		Peripheral
25-pin M		25-pin M
1	<----->	1
2	----->	3
3	<-----	2
4	----->	8
5	<-----	20
6	<-----	20
7	<----->	7
8	<-----	4
12	<-----	19
12	<-----	11
11	----->	12
19	----->	12
20	----->	5
20	----->	6

2. Oscilloscope to Controller (IBM PC/XT 25-pin connector)

Recommended cable: HP 17255D (1.2 meters)

PC		scope	
25-pin F		25-pin M	
1	<----->	1	
2	----->	3	
3	<-----	2	
5	<-----	20	
6	<-----	20	
7	<----->	7	
20	----->	5	
20	----->	6	

Recommended cable: HP 92219J (5.0 meters)

PC		scope	
25-pin F		25-pin M	
1	<----->	1	
2	----->	3	
3	<-----	2	
7	<----->	7	
5	<-----	20	
6	<-----	20	

3. Oscilloscope to Controller (9 pin connector)

Recommended cable: HP 24542G (3.0 meters)

PC		scope	
9-pin F		25-pin M	
1	<-----	4	
2	<-----	2	

3	----->	3
4	----->	5
4	----->	6
5	<----->	7
6	<----->	20
8	<----->	20
7	----->	8

ภาคผนวก ค
การอินเตอร์เฟสไคเกอร์มูลเลอร์

-- ADDENDA --

6/29/93

LabNet, Inc.

LabNet Geiger Interface (LGI)

IBM Version 2.0

Copyright 1992, LabNet, Inc.

IBM is a registered trademark of the International Business Machines Corp.

1. Hercules Graphics Adapter

The GC2 program has been modified to operate with both CGA and Hercules graphics. To have the program operate properly with Hercules graphics the Hercules graphics device drivers must be installed prior to running the GC2 program. To do this simply type MSHERC.COM at the DOS prompt and then press the enter key. The following should be seen on the screen: Hercules Resident Video Support Routines. Version 1.10 This statement indicates that the drivers have been properly installed. If you will be running the GC2 program frequently with Hercules graphics we suggest that you create a batch file that will run MSHERC.COM and then the GC2.EXE program automatically. The name of that file might be RUNGC2.BAT and include the following two lines:

MSHERC.COM

GC2.EXE

To create this batch file, you may use the EDLIN program that is included with your DOS distribution disk or any word processing program that will save a file in an ASCII format. Refer to your DOS manuals for instructions on creating a batch file and for operating the EDLIN

program. The MSHERC.COM program is provided by the Microsoft Corporation as part of their QuickBasic development environment. Microsoft is a registered trademark of Microsoft Corporation. QuickBasic is a registered trademark of the Microsoft Corporation. Hercules is a registered trademark of Hercules Computer Technology, Inc.

2. Game port adapters

Because of the diversity of game port adapters currently on the market, it is possible that the LGI will not function with every adapter. The LGI has been tested successfully with many different adapters including multifunction boards containing game port adapters. Cases of apparent failure are almost always related to adapter idiosyncrasy. If the LGI unit does not seem to count properly even though the green LED is scintillating, check the adapter documentation for configuration options. If no configuration options exists, and the green LED seems to scintillate in response to a

source while the screen reads very high values, a different game port adapter card may be required. Inexpensive compatible game port adapter cards may be purchased from a variety of sources including:

PASCO Scientific

10101 Foothills Blvd.

Rosemont, CA 95678

Voice: 1-800-772-8700

FAX #: 1-916-786-8905

Part: SE-6590

Cost: Contact PASCO Scientific for current pricing

Vernier Software

2920 S.W. 89th Street

Portland, OR 97225

Voice: 1-503-297-5317

FAX #: 1-503-297-1760

Part: IBM Game Port Card (IGP)

Cost: \$30.00

See the trouble shooting section below for more information.

3. Data File Names

File names can be a maximum of eight (8) characters long. The only characters that are accepted by the LGI program are:

- A. All upper or lower case letters
- B. All numbers

C. The "-" (dash character)

D. The "_" (underline or underscore character)

4. CHANGE File Path

For changing the file path to a different disk drive or subdirectory the following characters may be used:

A. All upper or lower case letters

B. All numbers

C. The "-" (dash character)

D. The "_" (underline or underscore character)

E. The "\" (backslash)

F. The ":" (colon)

5. Trouble-shooting

If the LGI program does not detect an operational game port adapter card properly installed in the IBM or compatible microcomputer or the LGI unit is not properly attached to the game port adapter card, then the readings will be zero. If zero readings occur then check the following:

A. Check that the LGI unit is attached to the game port adapter card and that the line cord on the LGI unit is attached to a live 120 VAC socket.

B. On the LGI unit -

1. The Neon light should be on when the unit is plugged into a 120 VAC outlet.

2. With the unit attached to the game port adapter

card, the green LED light should flash when a radioactive source is placed near the tube.

C. Check for proper installation of the game port adapter card. Refer to the instructions included with the card for correct settings if any are available for the card.

D. With cards that have two game ports, try the other port. Generally the "top" port is the correct one to use.

E. With computers that have multispeed settings try the lowest speed available.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายกิตติโชติ ลิ่มลักษณ์เลิศ

วัน เดือน ปีเกิด 22 ตุลาคม 2512

วุฒิ

ชื่อสถาบัน

ปีที่สำเร็จการศึกษา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์)

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

2534