

แมกนีตรอน



ปีการศึกษา 2532

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2532

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เรื่อง แมกนีตรอน

ผู้จัดทำ

1. นายสุรศักดิ์ คีมานพ 29.1275
2. นายอดิศักดิ์ ใจดี 29.1290



(พศ.โรมโนช ไกรฤกษ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

แมกนีตรอน (MAGNETRON)

สูตรศักดิ์ คีมานน 29.1275

อดิศักดิ์ ใจดี 29.1290

ผศ. โทโมโย โกรทฤษ อาจารย์ที่ปรึกษา

บทคัดย่อ

ปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

กล่าวถึงผลการศึกษาค้นคว้าของหลอดแมกนีตรอน

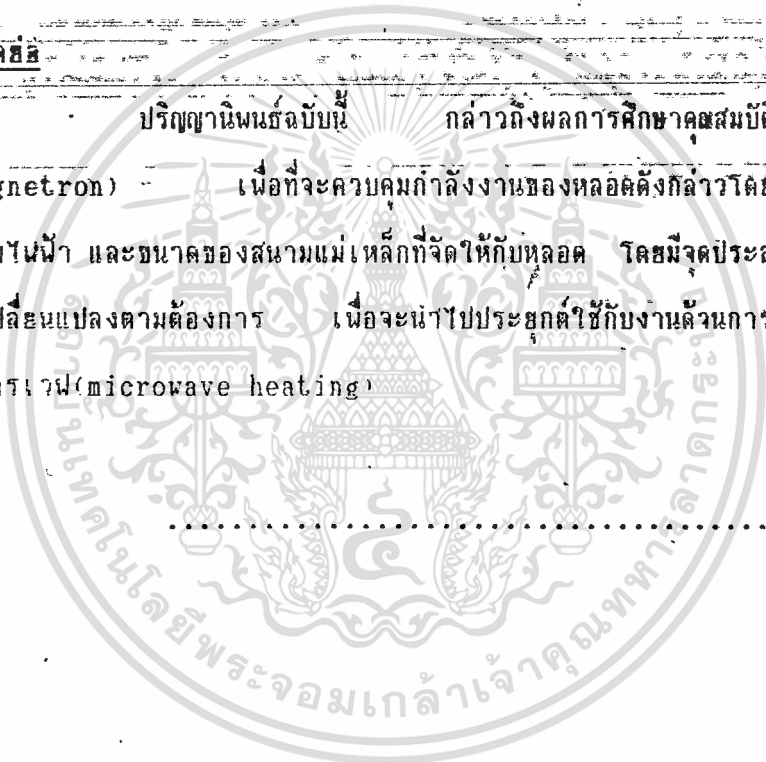
(magnetron)

เพื่อที่จะควบคุมกำลังงานของหลอดดังกล่าวโดยมีการควบคุมขนาดของ

สนามไฟฟ้า และขนาดของสนามแม่เหล็กที่จัดให้กับหลอด โดยมัจจุประสงค์ที่จะปรับกำลังงาน

ให้เปลี่ยนแปลงตามต้องการ เพื่อจะนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านการให้ความร้อนด้วยคลื่น

ไมโครเวฟ (microwave heating)



MAGNETRON

SURASAK DEEMANOP 291275

ADISAK CHAIDEE 291290

Ass.Prof. MONAI KRAIRIKSH

(ADVISOR)

ACADAMIC YEAR 1989

ABSTRACT

This thesis is intended primarily as a studying the magnetron tube characteristic, in order to control average power output of it. By varying value of electric field and intensity of magnetic field, the average power output can be controled and apply for microwave heating

.....

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	.
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎี	
2.1 ชนิดของหลอดแมกนีตรอน	3
2.2 โครงสร้างของหลอดแมกนีตรอน	4
2.3 การจัดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กให้กับหลอดแมกนีตรอน	6
2.4 ปรากฏการณ์ภายในอินเตอร์แอคชันสเปซ (Interaction space)	7
2.5 สมการแสดงปรากฏการณ์ภายในหลอด	11
2.6 โหมดของการกำเนิดสัญญาณ (Oscillation mode)	15
2.7 ความเร็วเชิงมุมของอิเล็กตรอน (Electron) ในการส่งถ่ายพลังงาน	18
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุม (Angular velocity) ของอิเล็กตรอนกับความถี่รีโซแนนซ์ของรีโซเนเตอร์	19
2.9 ความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก	20
2.10 การใช้สเตรป (Strap) ในการแยกโหมดการทำงานของหลอดแมกนีตรอน	26
บทที่ 3 แหล่งจ่ายกำลังของหลอดแมกนีตรอนที่ใช้ในโครงงาน	
3.1 การสร้างแหล่งจ่ายกำลังให้กับหลอดแมกนีตรอน	29
3.2 ภาคคีอ์สูงกับแหล่งจ่ายอีทีเตอร์	29
3.3 แหล่งจ่ายแม่เหล็กไฟฟ้า	32
3.4 การสร้างขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า	32
บทที่ 4 หลักการและแนวคิดในการปรับกำลังงานของหลอดแมกนีตรอนและการทดลอง	37

บทที่ 5 บทวิเคราะห์และสรุป

กิตติกรรมประกาศ

ภาคผนวก

หนังสืออ้างอิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

เนื่องจากได้มีการนำเอา กำลังงานของคลื่นไมโครเวฟ (microwave) มาประยุกต์ใช้กันมากในหลายสาขา เช่น ทางสาขาเคมี , การให้ความร้อน (microwave-heating) ของเตาไมโครเวฟในการทำให้อาหารสุก, การละลายอาหารที่ถูกทำให้เย็นเป็นน้ำแข็ง (frozen food) ซึ่งจะละลายได้เร็วมากเพราะพลังงานของคลื่นจะผ่านเข้าไปถึงเนื้อในของอาหาร และแผ่ความร้อนจากด้านในออกมาที่ผิวภายนอกของอาหาร ซึ่งจะละลายเร็วกว่าการให้ความร้อนที่ผิวภายนอกโดยตรง , ใช้ในการทำอาหารให้สุกสำหรับคนไข้ในโรงพยาบาลเพราะอาหารจะสุกเท่ากันตลอดทุกโมเลกุลของเนื้ออาหาร , การทำให้คอนกรีต (concrete) เสริมเหล็กมีความแข็งแรงเต็มที่ได้เร็วกว่าการปล่อยให้แห้งเต็มที่ โดยตามธรรมชาติ ซึ่งต้องใช้เวลานานอย่างน้อย 28 วัน, การเชื่อมพลาสติก(sealing of plastics), ในวงการแพทย์ เช่น เครื่องมือผ่าตัดด้วยคลื่นไมโครเวฟ เป็นต้น

ในการนำเอาคลื่นไมโครเวฟไปประยุกต์ใช้งานนั้น สิ่งที่เราได้จากคลื่นไมโครเวฟ คือ ความถี่ และ กำลังงาน สำหรับในการให้ความร้อนทุกประเภทได้ถูกกำหนดให้ใช้ ที่ความถี่ 915 เมกะเฮิรตซ์ (megahertz) และ 2450 เมกะเฮิรตซ์ ส่วนใหญ่จะใช้ 2450 เมกะเฮิรตซ์ ให้กำลังงานอยู่ในช่วง 100-2500 วัตต์ (watt) หรืออาจมากกว่านี้

ในงานแต่ละด้านที่นำเอากำลังงานของคลื่นไมโครเวฟ ไปใช้นั้นใช้ด้วยค่ากำลังงานที่ต่างกัน ตามความเหมาะสมของงานนั้นๆ เช่น เตาไมโครเวฟยังมีขนาดของกำลังงานที่ต่างกัน ตามจุดประสงค์ของการใช้งาน , การอบมันฝรั่งต้องใช้ถึง 50 กิโลวัตต์ ในการละลายพลาสติกที่เย็นเป็นน้ำแข็งใช้ 3.2 กิโลวัตต์ ที่ 2450 เมกะเฮิรตซ์ เป็นต้น และได้มีการผลิตหลอดแมกนีตรอนที่ให้กำลังงานที่ค่าต่างๆดังแสดงในตารางที่ 1.1

ดังนั้นถ้าเรามีหลอดแมกนีตรอน 1 หลอดแต่สามารถที่จะปรับการให้กำลังงานของหลอดได้หลายค่าแล้ว ย่อมจะเกิดประโยชน์มากในการใช้งาน ในโครงการงานนี้จึงได้ทำการศึกษาถึงคุณสมบัติ และ การทำงานของหลอดแมกนีตรอน เพื่อหาวิธีปรับกำลังงานของหลอดแมกนีตรอน

ในโครงการนี้ใช้หลอดแมกนีตรอนของเตาไมโครเวฟมาทำการทดลอง ซึ่งหลอดดังกล่าวถูกผลิตขึ้นเพื่อให้ความร้อน ไม่คำนึงถึงความเสถียรของควมถี่ที่ออกมา ฉะนั้นในการทดลองได้ใช้แนวคิดจาก ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบหลอดที่ใช้ในงานการสื่อสาร แต่เวลาปฏิบัติใช้หลอดแมกนีตรอนของเตาไมโครเวฟ เราจึงสังเกตผลการปรับกำลังงานจากพลังงานความร้อนที่ออกมาเป็นเกณฑ์

ในปริกฤณานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็นบทต่างๆดังนี้คือ ในบทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีทั่วไปของหลอด เช่น คุณสมบัติ , การทำงานของหลอด ในบทที่ 3 กล่าวถึงการจัดกำลังงานที่จะป้อนให้กับหลอด ในบทที่ 4 กล่าวถึงการทดลองการปรับกำลังงานที่หลอดให้ออกมา และแนวคิดในการปรับกำลังงานของหลอด และบทที่ 5 เป็นการวิเคราะห์และสรุปผลของโครงการนี้

Type No.	Manufactured by, where	P_0 (kW)	f (GHz)	e_s (kV)
QK707A	Raytheon, USA	1.0	2.45	6.3
(ES-1/15)	Italy	2.2	—	—
L-3189	Litton, USA	1.3	2.45	7.0
	KIC, Japan	—	—	6.6
7090	Phillips, Holland	0.2	2.45	1.65
7091/YJ1160	Amperex, USA	—	2.45	4.6
7292/YJ1162	Phillips, Holland	2.0	—	—
	Mullard, England	2.5	—	—
DX206	Amperex, USA	1.2	2.45	5.6
M165	NJRC, Japan	0.8	2.45	4.0
L-5001	Litton, USA	1.3	2.45	3.5
TV 1022A/B'	TV, France	1.35	2.45	2.4
Z5458'	GE, Louisville	0.5	0.915	0.50
GL-6787	GE, Schenectady	2.5	0.915	4.1
F-1112/1122	CSF, France	1.6	2.45	4.0
55125	Amperex, USA	5.0	2.45	6.5
	Phillips, Holland			
YJ1080	Phillips, Holland	2.5	2.45	4.95
MO-22	Miwag, Germany	1.1	2.45	2.35
L-3858	Litton, USA	2.5	2.45	7.0
BM125L	EEV, England	25	0.892	14.0
		20	0.915	—
EM15LS	Eimac, USA	25	0.915	14.0
		20		
L-5046	Litton, USA	10	2.450	8.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับร่างที่ 1.1 แสดงหลอดรุ่นต่างๆนี้ มีอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

หลอดแมกนีตรอน(MAGNETRON)

หลอดแมกนีตรอน เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้กำเนิดสัญญาณด้วยตัวเอง(self excited oscillator)ทำหน้าที่เปลี่ยน ดีซี อินพุตเพาเวอร์ (DC input power) ให้เป็นอาร์เอฟ เอาท์พุทเพาเวอร์ (RF output power) โดยทั่วไปหลอดแมกนีตรอนสามารถให้กำเนิดคลื่นที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 1 เซ็นติเมตร(centemetre)ถึง 30 เซ็นติเมตร ซึ่งเป็นความถี่ในย่านไมโครเวฟ(microwave)

2.1 ชนิดของหลอดแมกนีตรอน

หลอดแมกนีตรอนประกอบด้วยส่วนแอโนด(anode)กับส่วนคาโทด(cathode) การทำงานของหลอดเกิดจากการจัดให้มี สนามแม่เหล็ก(magnetic field) มีทิศทางตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า(electric field) ในพื้นที่ระหว่างแอโนดกับคาโทด โดยสนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอน(electron)ที่ถูกขับออกจากคาโทดเคลื่อนที่เป็นเส้นโค้ง(curve path) ถ้าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก(flux density)มีค่ามากพอ อิเล็กตรอนจะไม่ชนแอโนดแต่จะวกกลับไปชนคาโทด เป็นผลให้ไม่เกิดกระแสแอโนด(anode current)

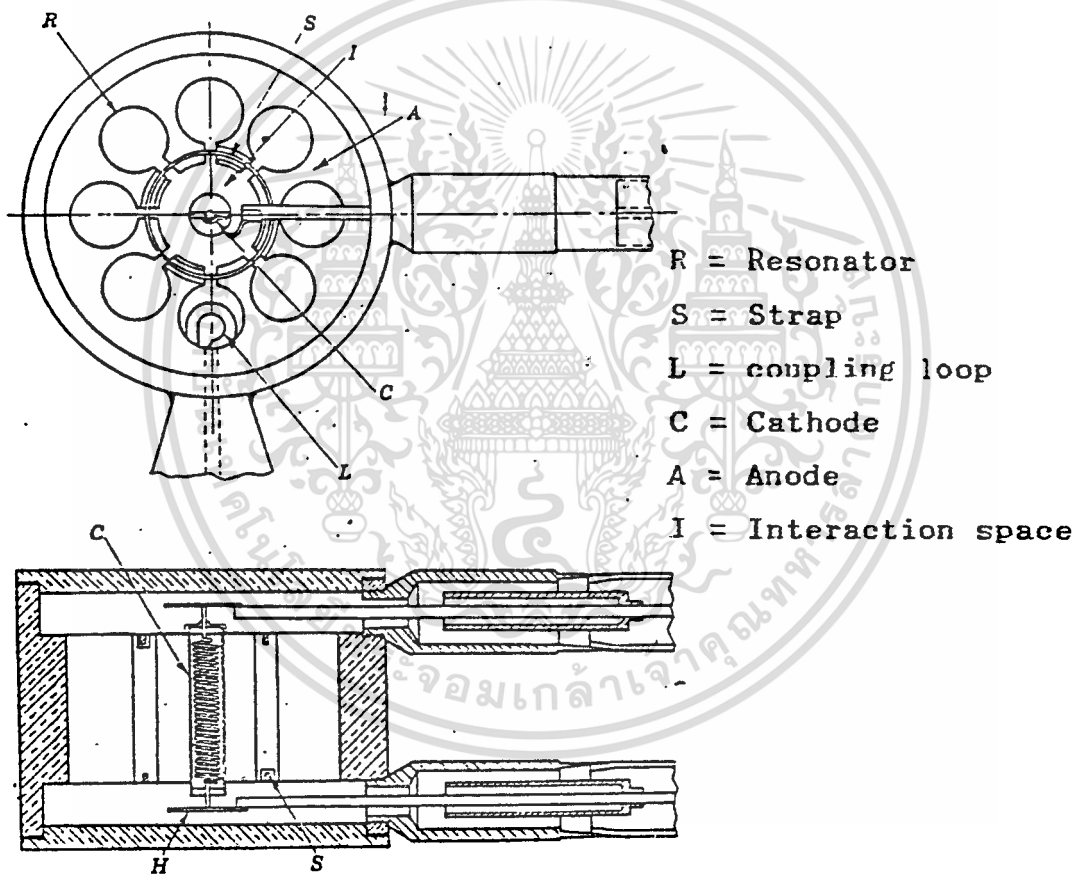
หลอดแมกนีตรอนที่พบส่วนใหญ่นี้มี 3 ชนิด ดังนี้

1. เนกาทีฟ-รีซิสแตนซ์ แมกนีตรอน(negative-resistance magnetron) จะทำงานในย่านความถี่ที่ต่ำกว่า 500 เมกะเฮิรตซ์(Megahertz)
2. ไซโครตรอน-ฟรีควเอนซี แมกนีตรอน(cycrotron-frequency magnetron) จะทำงานในย่านความถี่ที่สูงกว่า 100 เมกะเฮิรตซ์
3. ทราเวลลิง-เวฟ แมกนีตรอน(treaveling-wave magnetron) จะทำงานในย่านความถี่ที่สูงกว่า 100 เมกะเฮิรตซ์

หลอดแมกนีตรอนรุ่นแรกๆจะเป็นแบบที่ 2 แต่ปัจจุบันจะใช้แบบที่ 3 เป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากให้อาร์เอฟ เอาท์พุทที่มีความถี่คงที่และมีกำลังงานสูง

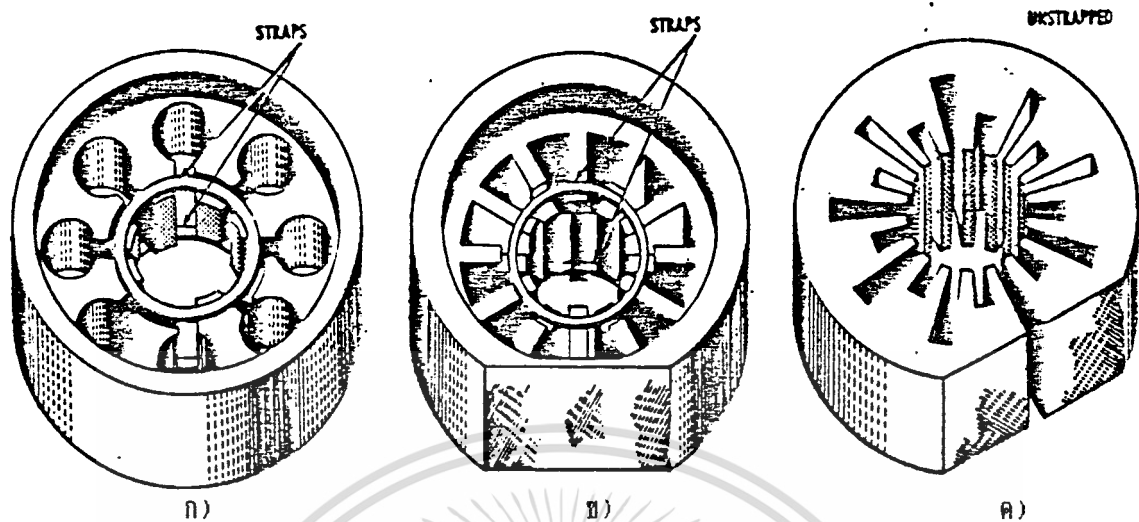
2.2 โครงสร้างของหลอดแมกนีตรอน

หลอดแมกนีตรอนเป็นหลอดสูญญากาศชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยส่วนอาโนดและคาโทด อาโนดเป็นบล็อคทองแดงทรงกระบอก ซึ่งภายในบรรจุไปด้วย รีโซแนน คาวิตี้ (resonant-cavity) จำนวนหนึ่ง ส่วนคาโทดอยู่ส่วนกลางของหลอด โครงสร้างของหลอดแสดงดังรูปที่ 2.1 และ รูปที่ 2.2

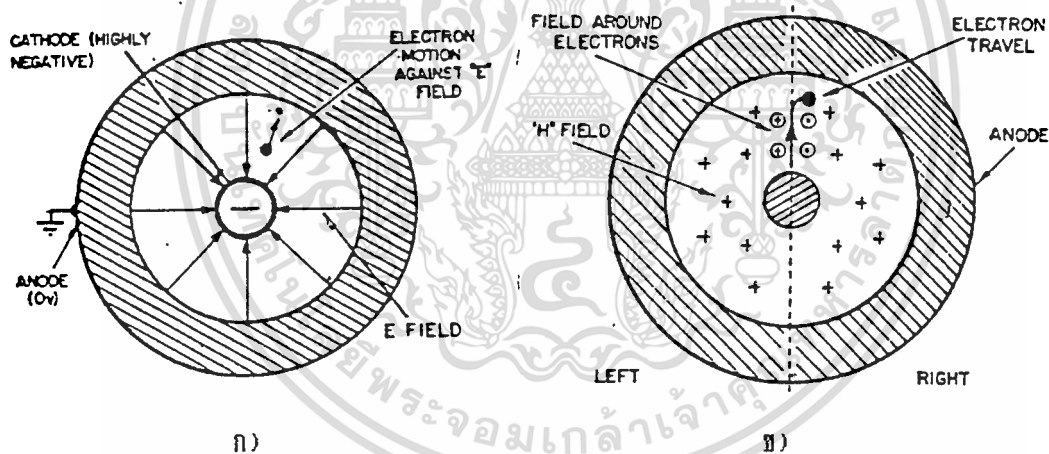


รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างและส่วนประกอบของหลอดแมกนีตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงแบบต่างๆ ของส่วนแอโนด ก)แบบโฮล แอนด์ สล็อต ข)แบบเวน
ค)แบบไร้ขึงชั้น



รูปที่ 2.3 แสดงการจัดสนามทั้งสองให้กับหลอดแมกนีตรอน ก)การจัดสนามไฟฟ้า
ข)การจัดสนามแม่เหล็ก

ตามลักษณะของโครงสร้างของหลอดที่นิยมใช้ แบ่งออกเป็นหลายแบบ ซึ่งจะแตกต่างกันตรงส่วนของแอโนด จากรูปที่ 2.2 แสดงส่วนบล็อกแอโนด(anode block) ของ ทราเวลลิง-เวฟ-แมกนีตรอน (traveling wave magnetron) มี 3 แบบ คือ

1. โฮล แอนด์ สล็อต (hole and slot)
2. ทราปิซอยดัล (trapezoidal) หรือ เวน (vane)

3. ไรซ์ ซิ่ง ซัน (rising sun)

2.3 การจัดสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก ให้กับ หลอดแมกนีตรอน

สนามไฟฟ้า ใช้สนามไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูง (high voltage) ขนาดหลายพันโวลต์ (volt) โดยจัดให้ คาโธดเป็นขั้วลบ ส่วนแอโนดต่อลงกราวด์(ground)

สนามแม่เหล็ก ใช้สนามแม่เหล็ก จากแม่เหล็กถาวร (uniform steady magnetic field) จัดให้มีทิศทางของ ฟลักซ์แม่เหล็ก ขนานกับแกนของคาโธด

การจัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก ให้กับหลอดแมกนีตรอนแสดงดังในรูปที่ 2.3

จะเห็นว่า สนามไฟฟ้ามีทิศพุ่งจากแอโนดไปยังคาโธด และตั้งฉากกับทิศของสนามแม่เหล็ก ด้วยการจัดสนามทั้งสองให้มีทิศทางตั้งฉากกัน ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นเส้นโค้งไปตามแนวแรงลัพธ์ระหว่างสนามทั้งสอง ซึ่งมีความสัมพันธ์กัน (จะกล่าวถึงในหัวข้อความสัมพันธ์ตามทฤษฎี ระหว่าง สนามไฟฟ้าและ สนามแม่เหล็ก) ดังนี้

1. จัดสนามไฟฟ้าค่าหนึ่ง ให้กับ หลอดแมกนีตรอน ที่ค่าสนามแม่เหล็กน้อยกว่าอิเล็กตรอนที่ออกจาก คาโธดทั้งหมดจะเดินทาง ไปยัง แอโนด ดังนั้นกระแส แอโนดจะมีค่าคงที่ เมื่อเพิ่มค่าสนามแม่เหล็ก กระแสแอโนดจะค่อยๆ ลดลง จนถึงค่าสนามแม่เหล็ก ค่าหนึ่ง ซึ่งทำให้กระแสแอโนด มีค่าเป็นศูนย์ เรียกว่า สนามแม่เหล็กนี้ว่า สนามแม่เหล็กวิกฤต (Hc) λ

2. จัดสนามแม่เหล็กค่าหนึ่งให้กับหลอดแมกนีตรอน ที่ค่าสนามไฟฟ้าน้อยกว่าอิเล็กตรอนที่ออกจาก คาโธด จะวิ่งวกกลับไปทีคาโธดหมด เมื่อเพิ่มค่าสนามไฟฟ้าจนมีค่ามากกว่าค่าวิกฤต (Vc) อิเล็กตรอนจะเดินทางไปถึงแอโนด และเกิดกระแสแอโนดขึ้น

ในทางปฏิบัติเราสนใจทางเดินของอิเล็กตรอน ซึ่งเกิดจากการจัดสนามทั้งสองดังนี้คือ จัดให้สนามไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่าค่าวิกฤต และ จัดให้สนามแม่เหล็กมีค่าสูงกว่าค่า

วิกฤต ตามเงื่อนไขดังกล่าว หลอดแมกนีตรอนจะทำงานได้ตามคุณสมบัติของมันคือ เปลี่ยน ดี ซี อินพุทพาวเวอร์เป็น อาร์เอฟ เอาท์พุทพาวเวอร์ การเปลี่ยนรูปของพลังงาน เปลี่ยนตรงที่ว่าง ระหว่าง คาโธด และ อานอด ที่ว่างนี้ เรียกว่า อินเตอร์แอคชั่นสเปซ (interaction space) ส่วนที่มีความสำคัญมากก็คือ รีโซแนนซ์ คาวิตี (resonant - cavity) ที่โครงสร้างของอานอด เป็นส่วนที่การสั่น (oscillator) เกิดอย่างต่อเนื่องตามคุณสมบัติของวงจรรีโซแนนซ์ (resonant circuit) เพราะว่า ภายในอินเตอร์ แอคชั่นสเปซ จะมีความถี่หลายความถี่เกิดขึ้น แต่จะมีความถี่เดียว ที่มีค่าเป็นค่าของ รีโซแนนซ์ เฟรเควนซี (resonant frequency) ของ รีโซแนนซ์ คาวิตี ที่ความถี่นี้ อีเลคตรอนจะนำเอาพลังงานที่ได้รับมาจาก สนามไฟฟ้า ดี ซี (DC field) มาให้กับ สนามไฟฟ้า เราจะนำเอาความถี่และพลังงานของสนามไฟฟ้าสลับไปใช้งาน

จะเห็นว่าทฤษฎีการทำงานของหลอดมีพื้นฐานมาจากการ เคลื่อนที่ของ อีเลคตรอน ภายในไดโอดทวิขั้วของสนามทั้งสอง ซึ่งถูกจัดขึ้นตามหลักเกณฑ์ดังนี้

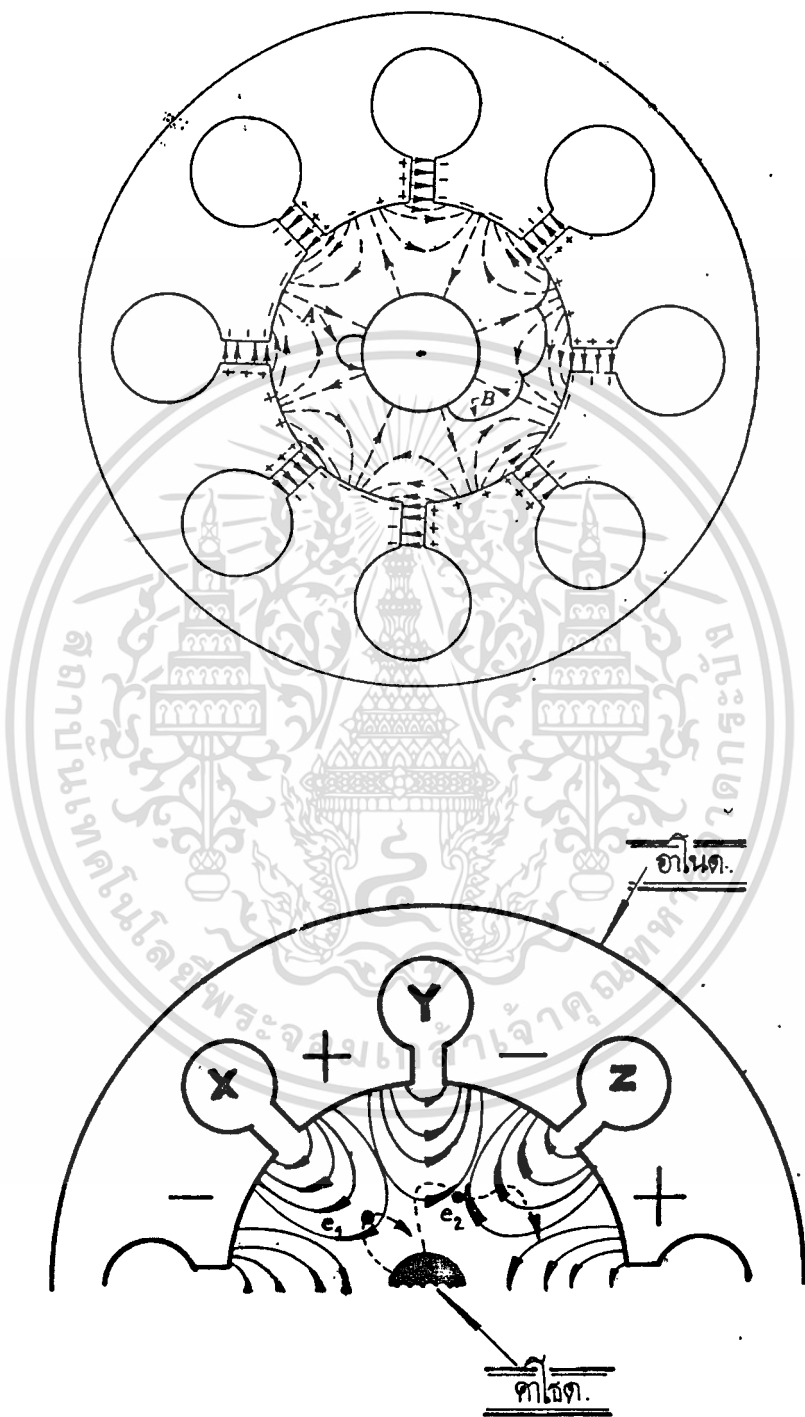
สนามไฟฟ้า จากโครงสร้างของหลอด จัดให้คาโธดเป็นขั้วลบเมื่อเทียบกับอานอด สนามไฟฟ้าจะมีทิศพุ่งจากอานอดไปคาโธด อีเลคตรอนจะเคลื่อนที่ด้านทิศของสนามไฟฟ้า ในลักษณะนี้ อีเลคตรอนจะถูกเร่งโดยสนามและได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้า

สนามแม่เหล็ก ทิศของสนามขนานกับแกนคาโธด ตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าทำให้ทางเดินของอีเลคตรอนเปลี่ยนจากเส้นตรงเป็นเส้นโค้งถ้าค่าสนามแม่เหล็กมีค่ามากก็จะโค้งมาก

2.4 ปรากฏการณ์ภายในอินเตอร์แอคชั่นสเปซ (interaction space)

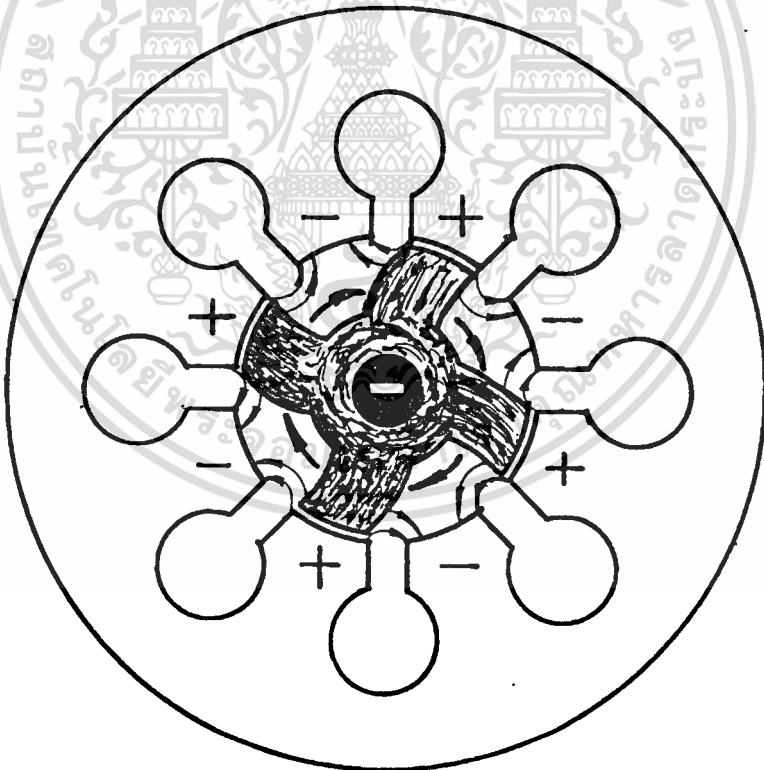
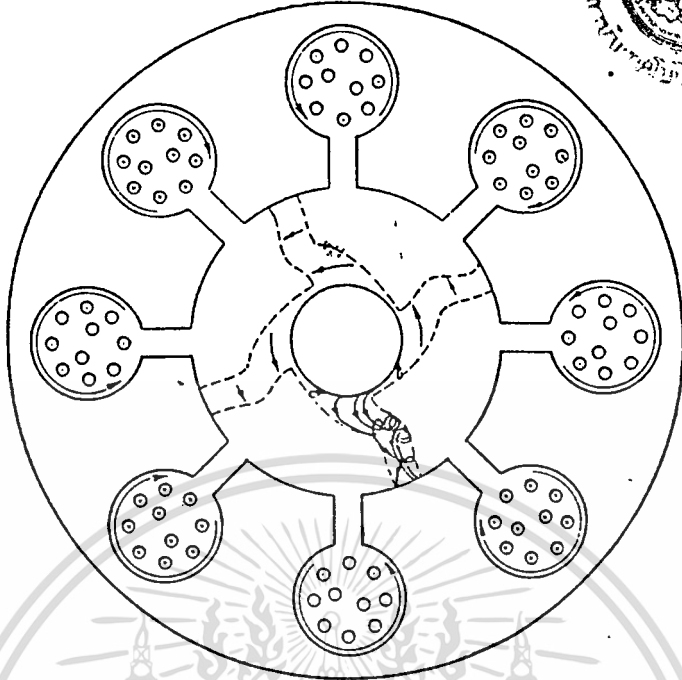
สนามไฟฟ้า ดี ซี นั้นแผ่ซ่านอยู่ระหว่างอานอดกับคาโธด ขณะที่สนามไฟฟ้า เอซี ซึ่งเกิดจาก อาร์เอฟ ออสซิลเลชัน (oscillation) อยู่ในรีโซแนนซ์คาวิตี หลังจากที่มีอีเลคตรอนหลุดออกจากคาโธด (จากการเผาไส้หลอด) จะถูกเร่งให้เคลื่อนที่โดยสนามไฟฟ้า ดี ซี ไปยังอานอด การกำเนิดสัญญาณจะถูกประคับประคองอยู่ได้ภายในหลอด เพราะว่าอีเลคตรอนได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้า ดี ซี อย่างสม่ำเสมอและให้พลังงานที่ได้รับมาให้กับสนามไฟฟ้า สลับ ในคาวิตี

ปรากฏการณ์ภายในอินเตอร์แอคชั่นสเปซแสดงด้วยรูป 2.4 ซึ่งอธิบายไว้ดังนี้



รูปที่ 2.4 แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในหลอดแมกนีตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แสดงการเคลื่อนที่ของกลุ่มอิเล็กตรอนภายในอินเตอร์แอคชันสเปซ

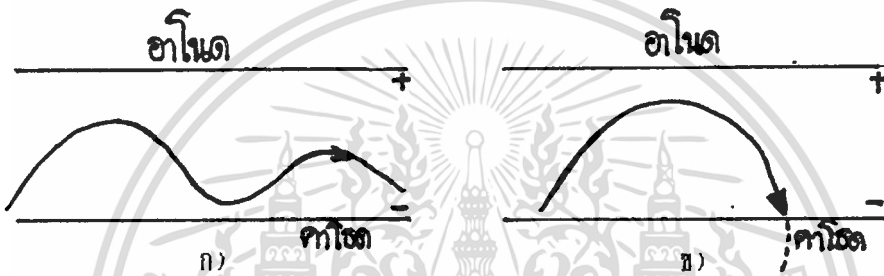
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ 026856
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 2.4 นิยามอีเล็กตรอน 1 ที่กำลังเข้าไปในสนามไฟฟ้าเอซีรอบๆ ทางเข้าของสล๊อทของควิตซ์ X ทางเดินของอีเล็กตรอน 1 จะหมุนตามเข็มนาฬิกา ซึ่งสวนทางกับทิศของสนาม ดังนั้นอีเล็กตรอน 1 จึงได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้า เอซีนั้น ทำให้มันมีความเร็วสูงขึ้น เส้นทางเดินของมันจะยิ่งโค้งมากขึ้น มันจะวกกลับไปชนคาโรตพลังงานในตัวมันมีทั้งที่เป็นของสนามไฟฟ้า คีซี และ สนามไฟฟ้า เอซีจะสูญเสียเป็นพลังงานความร้อนให้กับคาโรต ทำให้อีเล็กตรอนที่คาโรตถูกกระตุ้นให้หลุดออกมาอีกมากมาย พุ่งไปยังอาโนด สมมุติว่ามีอีเล็กตรอน 2 อยู่ในตำแหน่งดังรูป เมื่ออีเล็กตรอน 2 เข้าหาควิตซ์ Y มันจะถูกทำให้ช้าลงโดยสนามไฟฟ้า เอซี และถ่ายพลังงานในตัวมันให้กับสนามไฟฟ้า เอซี เมื่อตัวมันเคลื่อนที่ช้าลง แรงที่กระทำโดยสนามแม่เหล็กต่อตัวมันจึงมีค่าน้อยลง ทำให้ทางเดินของมันโค้งน้อย คือจะเบนไปทางอาโนด เวลาที่มันใช้ในการเดินทางจากควิตซ์ Y ไปควิตซ์ Z ใช้เวลาประมาณครึ่งคาบของ อาร์เอฟออสซิลลอลชั่น เมื่ออีเล็กตรอน 2 เคลื่อนถึงหน้าควิตซ์ Z เป็นเวลาเดียวกับสนามไฟฟ้าเอซีของควิตซ์ Z จะเปลี่ยนเป็นมีทิศเดียวกับการเคลื่อนของอีเล็กตรอน 2 อีเล็กตรอน 2 จึงถ่ายพลังงานให้กับสนามไฟฟ้าเอซีนั้น และความเร็วก็ลดลงด้วย จะเกิดในลักษณะนี้ไปเรื่อย ๆ คืออีเล็กตรอนจะให้พลังงานกับสนามไฟฟ้าเอซีของทุก ๆ ควิตซ์ที่มันผ่าน จนในที่สุดมันจะไปถึงอาโนด

ทั้งหมดนี้คือ พลังงานที่มันใช้ไปในการช่วยให้อิเล็กตรอนเกิดสัญญาณเกิดอย่างต่อเนื่องเพราะมันเอาพลังงานจากสนามไฟฟ้า คีซี มาเติมพลังงานให้กับสนามไฟฟ้า เอซี ส่วนอีเล็กตรอนที่เกิดในลักษณะอีเล็กตรอน 1 ที่เอาพลังงานไปจากสนามไฟฟ้า เอซี ไม่มีผลเสียต่อระบบ เพราะว่ามันจะพุ่งกลับคาโรตอย่างรวดเร็วมาก

การค่อย ๆ เพิ่มพูนการกระทำของอีเล็กตรอนจำนวนมากมาใน อินเตอร์แอคชั่นสเปซ (แบ่งเป็นสองส่วนคือ ส่วนที่กลับไปยังคาโรต กับส่วนที่พุ่งไปอาโนด) ทำให้รูปแบบการเคลื่อนที่คล้าย ๆ กับซี่ล้อ (spoke) ของล้อรถ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 สเปซ (spoke) จะหมุนรอบคาโรตด้วยอัตราเร็วเชิงมุมค่าหนึ่ง อีเล็กตรอนจะให้พลังงานกับสนามไฟฟ้าเอซีอย่างต่อเนื่อง ทำให้สามารถระคองการสั้นไว้ได้

ในรูปทั้งสองที่แสดงไปนั้นสมมุติว่าเซ็กเมนต์(segment) ที่อยู่สลับกัน ระหว่างคาวิตีที่มีค่าความต่างศักย์เดียวกันที่ช่วงเวลาขณะหนึ่ง ซึ่งทำให้มีสนามไฟฟ้าเอซีเกิดขึ้นของแต่ละคาวิตี รูปแบบของสนามไฟฟ้าเอซีที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้เรียกว่า โฟโหมด(π mode) เซ็กเมนต์ที่อยู่ติดกันของโฟหมดนี้จะมีเฟสต่างกัน 180 องศา โฟโหมดเป็นหนึ่งในหลายโฟหมดของการทำงาน ของหลอดนี้ แต่โฟโหมดจะให้พลังงานสูงสุด



รูปที่ 2.6 ก) แสดงทางเดินของอิเล็กตรอนซึ่งได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้า สลับ ข) แสดงทางเดินของอิเล็กตรอนซึ่งให้พลังงานกับสนามไฟฟ้า สลับ

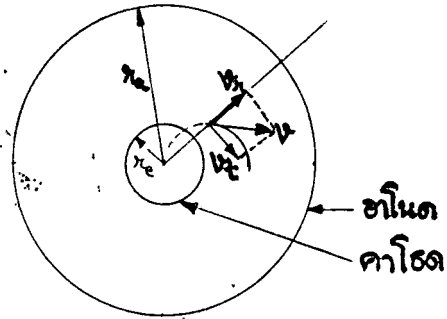
2.5 สมการแสดงปรากฏการณ์ภายในหลอด

ในหัวข้อที่ผ่านมาได้กล่าวถึงการทำงานของหลอด ซึ่งอยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ค่าสนามทั้งสองมีความสัมพันธ์กัน ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการหาความสัมพันธ์ของสนามทั้งสอง เพื่อทราบจุดการทำงานของหลอด

ในรูปที่ 2.7 อิเล็กตรอนตัวหนึ่งอยู่ระหว่างอาโนดและคาโอด ที่ระยะ r จากศูนย์กลางของหลอด อิเล็กตรอนมีความเร็ว v ซึ่งประกอบด้วยสองส่วน คือ

1. องค์ประกอบในแนวรัศมี(radial component) $v_r = dr/dt$
2. องค์ประกอบในแนวเส้นสัมผัส(tangential component) $v_\theta = rd\theta/dt$

r_e = รัศมีของอาโนด
 r_c = รัศมีของคาโทด



รูปที่ 2.7 แสดงองค์ประกอบของความเร็วของอิเล็กตรอน
 ที่อยู่ระหว่างคาโทดกับอาโนด

จะมีแรงที่กระทำต่ออิเล็กตรอนอยู่สองแรง คือ อิเล็กตริกฟอซ (electric force) มีค่าเท่ากับ eE และแมกเนติกฟอซ (magnetic force) มีค่าเท่ากับ $eV\mu_0 H$

สมการสำหรับองค์ประกอบทั้งสองของความเร็วของอิเล็กตรอน

1. สมการสำหรับองค์ประกอบตามแนวรัศมีของการเคลื่อนที่ (radial-component)

จาก; แรงในแนวรัศมี (radial force) = มวลอิเล็กตรอน (electron mass) * ความเร่งในแนวรัศมี (radial acceleration)

$$-eE - eBr\dot{\theta} = m \left[\frac{d^2 r}{dt^2} - r \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 \right] \quad (2.5.1)$$

2. สมการสำหรับองค์ประกอบตามแนวเส้นสัมผัสของการเคลื่อนที่ (tangential component) จาก

แรงบิดที่กระทำต่ออิเล็กตรอน (torque) = d โมเมนตัมเชิงมุม (angular momentum) / dt

$$\begin{aligned} r * eBdr/dt &= d(mr^2 d\theta/dt) / dt \\ eBrd\theta/dt &= d(mr^2 d\theta/dt) / dt \end{aligned} \quad (2.5.2)$$

เมื่อกำหนดอัตราเร็วเชิงมุมของอิเล็กตรอน ($d\theta/dt$) = ω_e จะคำนวณหาค่าศักยวิกฤต (critical voltage; V_c), ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤต (critical magnetic field; H_c), ความถี่การสั่นของหลอด (magnetron oscillation frequency)

2.5.1 อัตราเร็วเชิงมุมของอิเล็กตรอน (angular velocity of electrons; ω)

โดยอินทิเกรตสมการที่(2.5.2) จะได้

$$mr^2 d\theta/dt = 0.5eBr^2 + C$$

ค่า C ถูกกำหนดโดยเงื่อนไขขอบเขตเมื่อ $r = r_c, d\theta/dt = 0$ แล้ว $C = -0.5eBr_c^2$

$$\text{จะได้ } mr^2 d\theta/dt = 0.5eB(r^2 - r_c^2)$$

$$\text{หรือ } d\theta/dt = eB(1 - r_c^2/r^2) \quad (2.5.3)$$

พบว่าเมื่อ r เพิ่มขึ้น $d\theta/dt$ จะเพิ่มขึ้นด้วยเมื่อ $r = r_m$ จะได้ค่า $d\theta/dt$

สูงสุด (ω_c)

$$\omega_c = eB(1 - r_c^2/r_m^2)$$

ให้ $eB/2m = \omega_c$ คือความถี่เชิงมุมของไซโคลตรอน (cyclotron angular frequency)

$$\text{จะได้ } d\theta/dt = \omega_c (1 - r_c^2/r^2) \text{ และ } \omega_c = \omega_c (1 - r_c^2/r_m^2) \quad (2.5.4)$$

2.5.2 ค่าศักดาวิกฤตและค่าสนามแม่เหล็กวิกฤต (critical voltage and magnetic field)

ได้แสดงไปแล้วว่า หลอดจะทำงานที่ค่าสนามแม่เหล็กค่าหนึ่งถ้าใช้ $V < V_c$ หรือหลอดจะทำงานที่ค่าอาโนดโวลเทจ (anode voltage) ค่าหนึ่งถ้าใช้ $B > B_c$ เพื่อที่จะคำนวณค่าวิกฤตเหล่านี้ จะใช้ความสัมพันธ์ $mv^2 = 2eV$

$$\text{จะได้ } m[(dr/dt)^2 + r^2(d\theta/dt)^2] = 2eV \quad (2.5.5)$$

สถานะที่จะทำให้เกิดกรณีค่าวิกฤต จะสอดคล้องกับเมื่อ $r = r_m, dr/dt = 0$

$$\text{จะได้ } mr_m^2 (d\theta/dt)^2 = 2eV$$

$$\text{หรือ } mr_m^2 (e^2 B^2 / 4m^2) (r_m^2 - r_c^2) / r_m^4 = 2eV$$

$$\begin{aligned} B^2/V &= (8m/e) (r_m / (r_m^2 - r_c^2))^2 \\ &= 45.5 (r_m / (r_m^2 - r_c^2))^2 \end{aligned} \quad (2.5.6)$$

B มีหน่วยเป็นเกาส์ (gauss), V มีหน่วยเป็นโวลต์ (volt), r_m และ r_c มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

เมื่อ $r_m \gg r_c$ สมการที่(2.5.6) จะเป็น

$$B^2/V = 45.5/r_m^2 \quad (2.5.7)$$

พิจารณาสมการที่ (2.5.6) ได้ 2 กรณี ดังนี้

1. ถ้ากำหนดค่าสนามแม่เหล็กมาให้ค่าหนึ่งจะทราบว่า ค่าศักดาวิกฤตสำหรับค่าสนามแม่เหล็กค่านี้มีค่าเท่าไรจากสมการ

$$V_c = (eB^2/8m)[(r_m^2 - r_c^2)/r_m]^2 \quad (2.5.8)$$

ถ้าใช้ศักดาที่อาโนดเกินนี้แล้วหลอดจะไม่กำเนิดสัญญาณ

2. ถ้ากำหนดค่าศักดาที่อาโนดมาให้ค่าหนึ่งจะทราบค่า สนามแม่เหล็กวิกฤตได้จากสมการ

$$B_c = 2(2m/e)^{1/2} ((V)^{1/2}/r_m)(1 - r_c^2/r_m^2)^{-1} \quad (2.5.9)$$

2.5.3 ความถี่ของการสั่นของสัญญาณ (magnetron oscillation frequency)

เมื่อ $V < V_c$ จะมีอิเล็กตรอนอยู่ได้ระหว่างคาโทดและอาโนด มันจะเคลื่อนที่ไปรอบ ๆ คาโทด ด้วยอัตราเร็วเชิงมุมค่าหนึ่ง (ω) ซึ่งจะเพิ่มขึ้นตามค่า r จะพิจารณาอิเล็กตรอนที่อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างคาโทดและอาโนด คือที่ตำแหน่ง $(r_m + r_c)/2 = r$ มีอัตราเร็วเชิงมุม (ω_m) และมี v คือความเร็วที่สม่ำเสมอ (linear velocity) ดังนี้

$$v = \omega_m r = \omega_m (r_m + r_c)/2$$

- แรงที่กระทำต่ออิเล็กตรอนเพื่อให้มันเข้าใกล้อาโนด มีอยู่ 2 แรงดังนี้

1. แรงทางไฟฟ้า = $-eE$ หรือ $eV/(r_m - r_c)$

2. แรงสู่ศูนย์กลาง (centripetal force) = $m\omega_m^2 r$

- แรงที่กระทำต่ออิเล็กตรอนเพื่อให้มันเข้าใกล้คาโทด คือ

แรงจากสนามแม่เหล็ก - $e v \mu_0 H$

ด้วยเหตุผลที่ว่า อิเล็กตรอนทุกตัวจะอยู่ในสภาวะสมดุลภายใต้การกระทำของแรงทั้งสองนี้ ดังนั้น

$$eV/(r_+ - r_-) + 0.5m\omega_c^2(r_+ + r_-) - 0.5e\omega_c(r_+ + r_-)\mu_0 H = 0$$

หรือ
$$\omega_c^2 - e\mu_0 H\omega_c/m + (2eV/m)/(r_+^2 - r_-^2) = 0 \quad (2.5.10)$$

ดังนั้นที่กล่าวมาทั้งหมด เมื่อ $V < V_c$, $H > H_c$ หลอดแมกนีตรอนจะกำเนิดสัญญาณได้และมีความถี่เชิงมุม (angular frequency) ของการสั่น (ω_c) จะหาได้จากสมการที่(2.5.10)

2.6 โหมดของการกำเนิดสัญญาณ(oscillation modes)

เมื่อเกิดการออสซิลเลต ชั้นในหลอดแมกนีตรอน ลักษณะของคลื่นจะเป็นคลื่นนิ่ง(standing wave) กล่าวคือที่จุดอ้างอิงใด ๆ ในหลอดแมกนีตรอน คลื่นที่เกิดขึ้นจะมีเฟสคงที่ ดังนั้นสามารถอธิบายเป็นสมการได้ คือ

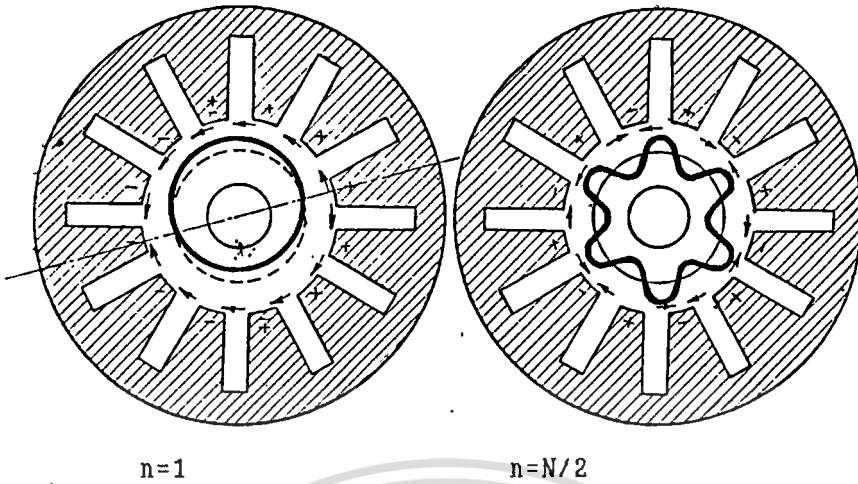
$$2\pi r_+ = n\lambda_{\text{low}} \quad n=0, 1, 2, \dots$$

เมื่อ r_+ คือ รัศมีของอาโนด

n คือ mode number

λ_{low} คือ λ ของคลื่นนิ่ง

ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงการเกิดการออสซิลเลท เป็นคลื่นนิ่ง

จากสมการดังกล่าวจะเห็นว่า ความต่างเฟสระหว่างช่องรีโซเนเตอร์ (resonant cavity) สามารถเขียนเป็นสมการต่อมาได้ คือ

$$\psi N = 2\pi n$$

เมื่อ ψ คือ ความต่างเฟสระหว่างช่องรีโซเนเตอร์

N คือ จำนวนช่องรีโซเนเตอร์ n คือ 0, 1, 2, 3, ...

ความต่างเฟสระหว่างรีโซเนเตอร์ รวมแล้วเมื่อนับครบรอบจะต้องลงตัวเป็นรอบ ๆ ไป ซึ่งจะทำให้คลื่นสามารถดำรงตัวเองเป็นคลื่นนิ่งได้ ดังยกตัวอย่างตารางของหลอดแมกนีตรอน 8 รีโซเนเตอร์

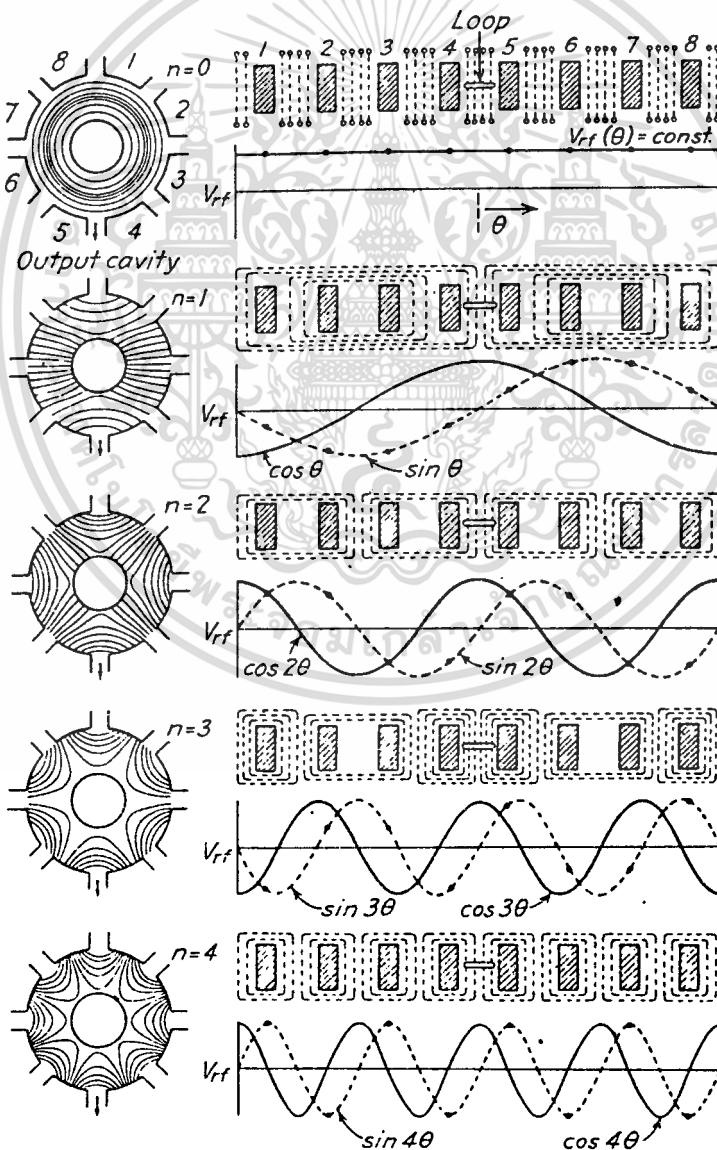
n	0	1	2	3	4	5	6	7	8
ψ	0	$\pi/4$	$\pi/2$	$3\pi/4$	π	$5\pi/4$	$3\pi/2$	$7\pi/4$	2π

ตารางที่ 2.1 แสดงความต่างเฟสระหว่างรีโซเนเตอร์ของหลอดแมกนีตรอน 8 รีโซเนเตอร์ เนื่องจากการเกิดคลื่นนิ่งในอินเตอร์แอกซ์เชียล เกิดจากการรวมกันของคลื่นที่มีเฟสเดียวกันแต่อาจจะมาจากคนละทิศทาง คือ (ตามเข็มนาฬิกา หรือ ทวนเข็มนาฬิกา)

และจากตารางที่ 2.1 จะเห็นว่าคลื่นบางโหมด มีเฟสเท่ากันแต่มีทิศตรงข้ามกัน จึงเกิดการหักล้างกัน แต่เนื่องจากมีอัมพลิจูด(amplitude)ไม่เท่ากัน ทำให้หักล้างกันไม่หมดพอดี ทั้งนี้เพราะว่าการนำเอาโลหะไปคล้อง(coupling)เอาสัญญาณออกมา มีผลทำให้คุณสมบัติของรีโซเนเตอร์ เปลี่ยนไป

ดังนั้นโดยทางทฤษฎีแล้ว ถ้า หลอดมีคาวิตี N คาวิตี จะเกิด $(N/2)+1$ โหมด เท่านั้น

การที่บางโหมดของหลอด มีอัมพลิจูดลดลงมากหรือบางครั้งไม่พบว่ามีสัญญาณออกมาเลย เนื่องจากเหตุผลดังกล่าวเรียกว่า การเกิด ดีเจเนอเรซี โหมด (degeneracy mode)

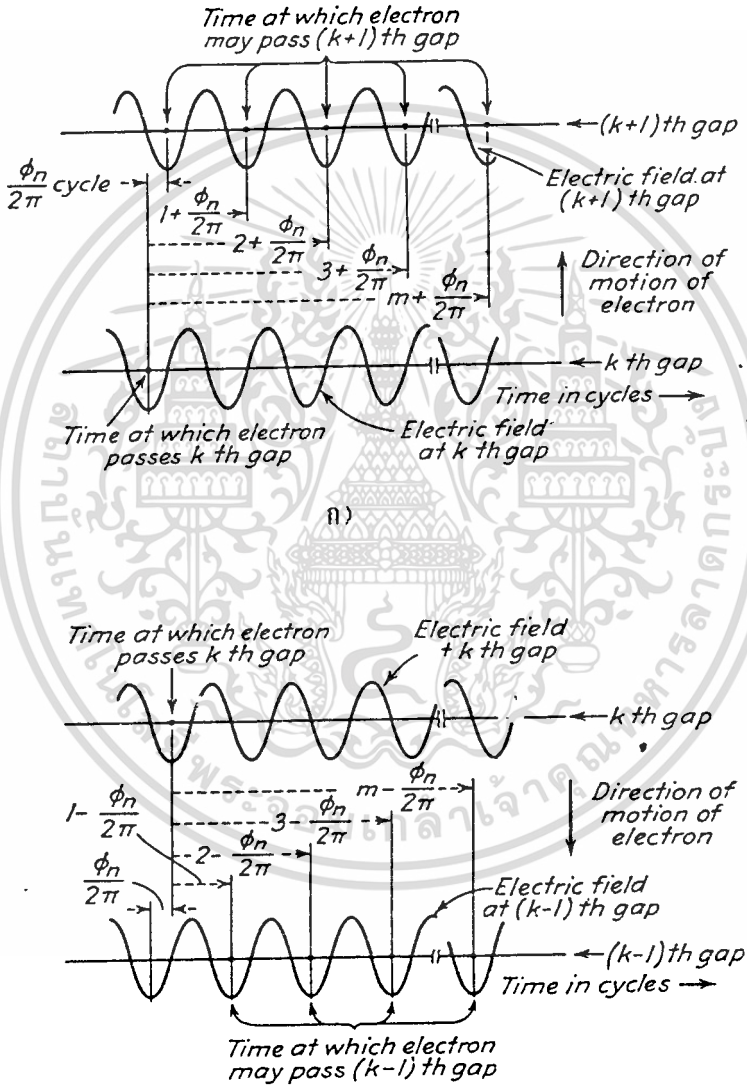


รูปที่ 2.9 แสดงคลื่นในหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ความเร็วเชิงมุมของอิเล็กตรอนในการส่งถ่ายพลังงาน

การที่อิเล็กตรอนจะสามารถส่งพลังงานไปยังสนามไฟฟ้าความถี่วิทยุ (radio-frequency field) หรือสนามไฟฟ้าสลับได้นั้น ระยะเวลาที่อิเล็กตรอนวิ่งข้ามจากกึ่งกลางของช่องรีโซเนเตอร์หนึ่งไปยังรีโซเนเตอร์ข้างเคียง ก็คือระยะเวลาระหว่างจุดอ้างอิงเดียวกันบนสนามไฟฟ้าที่ได้รับออกมาดังรูปที่ 2.10



ข)

รูปที่ 2.10 แสดงการพิจารณาความเร็วเชิงมุมของอิเล็กตรอนที่ส่งพลังงานให้กับสนามไฟฟ้าความถี่วิทยุ ก) และ ข) สมมุติว่าสปีดเบคคูลนเคลื่อนทาง (+, -)

จะเห็นว่าระยะระหว่างที่คิดเป็นรอบ ระหว่างช่องรีโซเนเตอร์เป็น $\phi_n/2\pi$ จะให้ความสัมพันธ์

$$\phi_n/2\pi + m \quad ; \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

ถ้าควาติมีจำนวนรีโซเนเตอร์ = N ช่อง

ดังนั้น ระยะ 1 รอบ = $N(\phi_n/2\pi + m)$

ดังนั้น เมื่อคำนึงถึงระยะเวลาในการข้ามช่องรีโซเนเตอร์กับระยะบนจุดอ้างอิงของโวลเตจ , ระยะ 1 รอบของการเคลื่อนที่และความถี่ของรีโซเนเตอร์ จะให้ความสัมพันธ์เป็น

$$w_n = 2\pi f_n / (N(m + \phi_n/2\pi)) \quad (2.7.1)$$

และจากความสัมพันธ์ของเฟสกับ จำนวนโหมดและจำนวนรีโซเนเตอร์

$$\phi_n/n = 2\pi/N \quad (2.7.2)$$

หรือ

$$\phi_n/2\pi = n/N$$

แทนค่าในสมการที่ (2.7.1) ได้

$$w_n = 2\pi f_n / (N(m + n/N))$$

ดังนั้น

$$w_n = 2\pi f_n / (Nm + n) \quad (2.7.3)$$

เมื่อ w_n คือ ความเร็วเชิงมุมของอิล็คตรอนเคลื่อนที่รอบคาโธด

f_n คือ ความถี่รีโซแนนซ์ (resonance) ของรีโซเนเตอร์

N คือ จำนวนช่องของรีโซเนเตอร์

m คือ $0, -1, +1, -2, +2, \dots$

n คือ โหมด นัมเบอร์ $0, -1, +1, -2, +2, \dots$

2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมของอิล็คตรอนกับความถี่รีโซแนนซ์

โดยปกติแล้วการถ่ายเทพลังงาน จากอิล็คตรอนไปยังสนามไฟฟ้าความถี่วิทยุ จะต้องจำกัดอยู่เพียงที่ความเร็วเชิงมุมบางค่าเท่านั้น ดังจะเห็นได้จากหัวข้อที่แล้วว่าต้องมี ความสอดคล้องกันของสนามไฟฟ้าความถี่วิทยุ กับความเร็วเชิงมุมของอิล็คตรอน

$$\omega_n = 2\pi f_n / \chi \quad (2.8.1)$$

เมื่อ $\chi = Nm + n$

โดย f_n คือ ความถี่รีโซแนนซ์ของรีโซเนเตอร์

N คือ จำนวนช่องรีโซเนเตอร์

m คือ $0, 1, 2, \dots$

n คือ โหมดนัมเบอร์ $0, 1, 2, \dots$

และเมื่อสังเกตพบว่า ถ้า $m=0$ จะได้ความถี่เป็นฮาร์โมนิกหลักของโหมด นัมเบอร์ที่ n นั้น ๆ ซึ่งโดยปกติการบอกลักษณะการทำงานของหลอดแมกนีตรอน จะบอกเป็นตัวเลข 3 ตัว คือ

$$\chi/n/N \quad \text{เช่น} \quad 4/4/8$$

คือเป็นฮาร์โมนิก(harmonic)ที่ 0 (ฮาร์โมนิกหลัก)ของโหมดที่ n ของหลอดแมกนีตรอน 8 คาวิตี้

จากความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงมุมของอิเล็กตรอน ควรจะมีความเร็วสัมพันธ์กับความเร็วของสนามไฟฟ้าความถี่วิทยุที่ออกมาจากรีโซเนเตอร์ ถ้าเราต้องการให้ความถี่ใดมีพลังงานเพิ่มขึ้น เราก็จัดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กให้สัมพันธ์ กันจนความเร็วเชิงมุมของอิเล็กตรอนที่นำพลังงานมาเติมให้กับสนามไฟฟ้าความถี่วิทยุ มีค่า ซิงโครนัส (synchronous) กันพอดี ดังนั้นภายหลังจากการจัดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแล้ว จะมีเพียงความถี่ที่อิเล็กตรอนนำพลังงานมาเติม หรือ ซิงโครนัสพอดีกับสนามไฟฟ้าความถี่วิทยุ ความถี่เดียวเท่านั้นที่มีพลังงานสูงอยู่

2.9 ความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

จากที่กล่าวมาข้างต้นเราทราบว่า ถ้า

$$\omega_n = \omega_n$$

เมื่อ ω_n คือ ความเร็วเชิงมุมของอิเล็กตรอน

ω_n คือ ความเร็วเชิงมุมของกลุ่มอิเล็กตรอนที่เรียกว่า สปีค(spoke)

แต่ถ้าอิเล็กตรอนจะมีความเร็วเชิงมุมเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อระยะทางที่ออกจากคาโธดเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงมีเพียงระยะหนึ่งเท่านั้นที่จะเกิดความสัมพันธ์ดังกล่าวได้สำเร็จ จึงมีผู้คิดวิธีหาความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กไว้หลายวิธี ดังจะยกตัวอย่างมา 2 วิธี คือวิธีของ พอสทัมัส(posthumous) กับ วิธีของฮาร์ทรี(hartree)

วิธีของพอสทัมัส คิดว่า ระยะที่ $w = w_0$ คือระยะที่ $r = (r_u + r_c)/2$ ดังนั้น

$$E_r = Brw + (m/e)(dr^2/d^2t - rw^2) \quad (2.9.1)$$

dr^2/d^2t เป็นความเร่งเชิงรัศมีซึ่งมีค่าน้อยมากเทียบกับ w ดังนั้นสมมติให้ w เป็นศูนย์ และแทน r ด้วย $(r_u + r_c)/2$ จะได้

$$V_u / (r_u - r_c) = [(r_u + r_c)/2]w[B - (m/e)w] \quad (2.9.2)$$

และเมื่อแทน $w = 2\pi f_n / \chi$ จะได้

$$V_u = [(r_u^2 - r_c^2) / \chi] \pi f_n [B - 2\pi m f_n / \chi e] \quad (2.9.3)$$

แทนค่า $\chi = Nm + n$ และ $f_n = c / \lambda_n$ จะได้

$$V_u = 300\pi (r_u^2 - r_c^2) / \chi \lambda_n [B - 10600 / \chi \lambda_n] \quad (2.9.4)$$

V_u = โวลเทจ อาโนด หน่วย โวลต์

r_u, r_c = รัศมีของอาโนด, คาโธด หน่วย เซนติเมตร

B = ค่าความหนาแน่นเส้นแม่เหล็ก หน่วย เกาส์

χ = $Nm + n$

λ_n = ความยาวคลื่นที่โหมด n หน่วย เซนติเมตร

เรียกสมการที่(2.9.4)ว่า สมการของพอสทัมัส(posthumous equation)

วิธีของฮาร์ทรี คิดว่า ระยะที่ $w = w_0$ อยู่ที่ขอบจรดกับอาโนดพอดี สมการที่ได้จะแตกต่างจากสมการของพอสทัมัส เล็กน้อย คือ

$$V_u = 300\pi (r_u^2 - r_c^2) / \chi \lambda_n [B - (10600 / \chi \lambda_n) (r_u^2 / (r_u^2 - r_c^2))] \quad (2.9.5)$$

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเห็นว่าถ้าค่า r_u และ r_e มีค่าสัมพันธ์กันบางค่าที่จะให้ประสิทธิภาพดีที่สุด ซึ่งภายหลัง มีผู้ค้นพบว่า

$$(2\pi/N)(r_u+r_e)/2 = (\pi/4)(r_u-r_e) \quad (2.9.6)$$

ซึ่งสามารถจัดรูปได้เป็น $(N-4)/(N+4) = r_e/r_u$ (2.9.7)

เมื่อ N คือ จำนวนช่องรีโซเนเตอร์

r_u, r_e คือ รัศมีของอาโนด, คาโทด

เมื่อนำไปแทนในสมการที่ (2.9.4) จะได้เป็น

$$V_u = [4800\pi r_u^2 N / \lambda (N+4)^2] [B-10600/\lambda] \quad (2.9.8)$$

เป็นสมการทำงานตามปกติ แต่ถ้านำไปแทนในสมการที่ (2.5.6) จะได้เป็น

$$V_u = 2.2 \cdot 10^{-2} r_u^2 B^2 [(16N)^2 / (N+4)^2] \quad (2.9.9)$$

V_u มีหน่วยเป็น โวลท์, r_u เป็นเซนติเมตร, B เป็นเกาส์.

เนื่องจากต้องใช้สนามแม่เหล็กที่มีค่ามากกว่าค่าคัทออฟ (B_c) เพื่อ

กำเนิดสัญญาณได้ จากสมการที่ (2.8.8), (2.8.9) เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง λ, N และค่าสนามแม่เหล็กที่ต่ำที่สุดซึ่งต้องสอดคล้องกับอัตราส่วน r_e/r_u และจะได้ค่าอาโนด โวลเทจ ที่ดีที่สุดในกรณีของไฟ-โทมด ($\chi=N/2$) ซึ่งเป็นโทมดที่ถูกนำมาใช้งาน จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\lambda_{B_{min}} = 2658 [(N+4)/N]^2 [1+(1-(16N/(N+4))^2)]^{1/2} \quad (2.9.10)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่น หน่วย เซนติเมตร

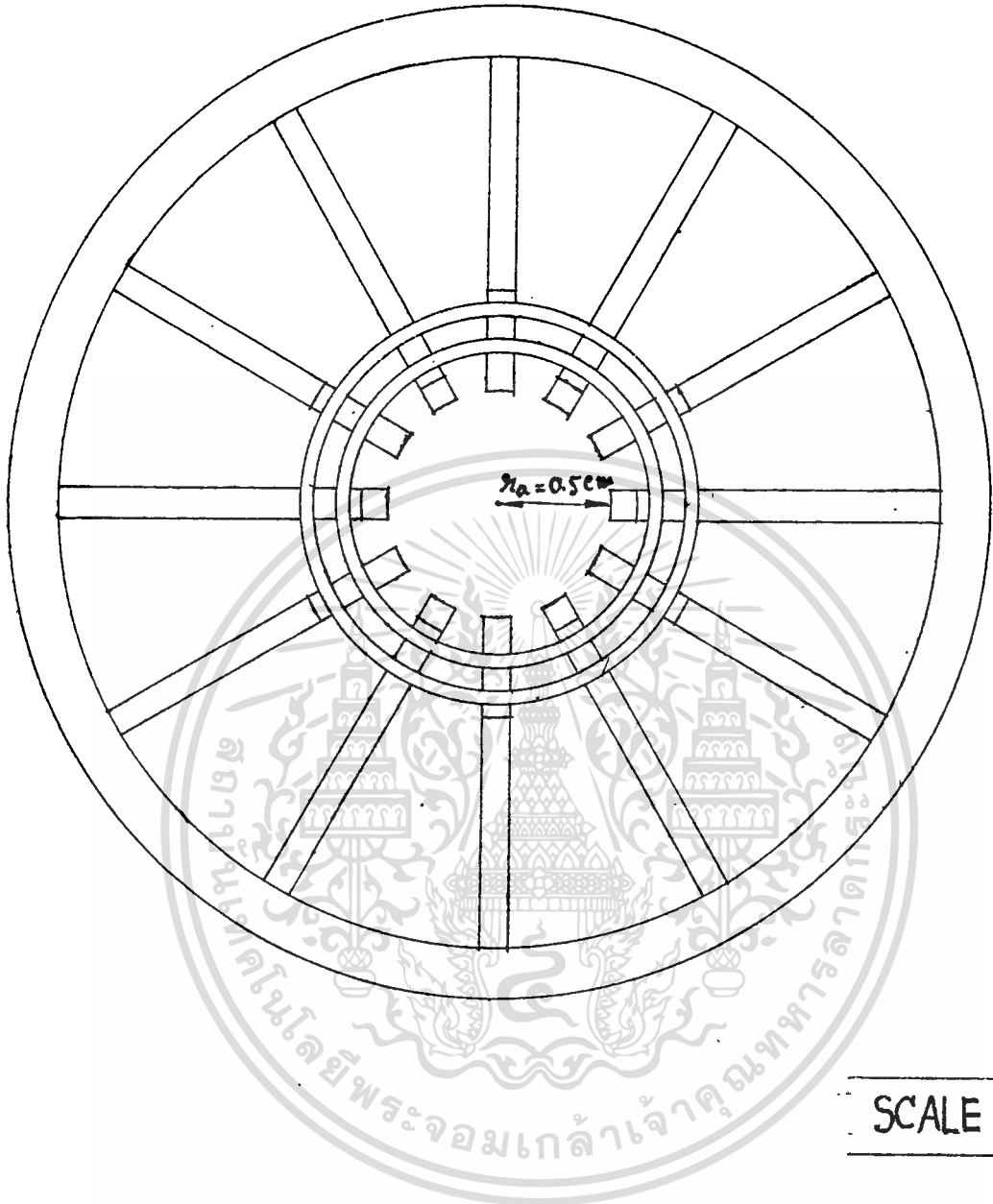
B_{min} คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ต่ำที่สุดที่จะทำให้เกิดการออสมิลเลท

หน่วย เกาส์

จะเห็นว่าค่า $\lambda_{B_{min}}$ ขึ้นกับค่าจำนวนช่องรีโซเนเตอร์ (N) แสดงในตารางที่ 2.2

N	$\lambda_{B_{min}}$ (ชม.-แก๊ซ)
2	31,800
4	10,600
6	8,800
8	7,900
10	7,400
12	7,000
18	6,500

ตารางที่ 2.2 แสดงค่า $\lambda_{B_{min}}$ สำหรับหลอดแมกนีตรอนที่จำนวนรีโซเนเตอร์ต่าง ๆ



SCALE 1:3

TOP VIEW

รูปที่ 2.11 แสดงส่วนอาโนดของหลอดที่ใช้ในโครงการนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.5.8) $V_c = (eB^2/8m)[(r_u^2 - r_c^2)/r_u]^2$

หลอดแมกนีตรอนที่ใช้ในโครงการนี้มีรายละเอียดดังนี้

$r_u = 0.5$ เซนติเมตร

$r_c = 0.1$ เซนติเมตร

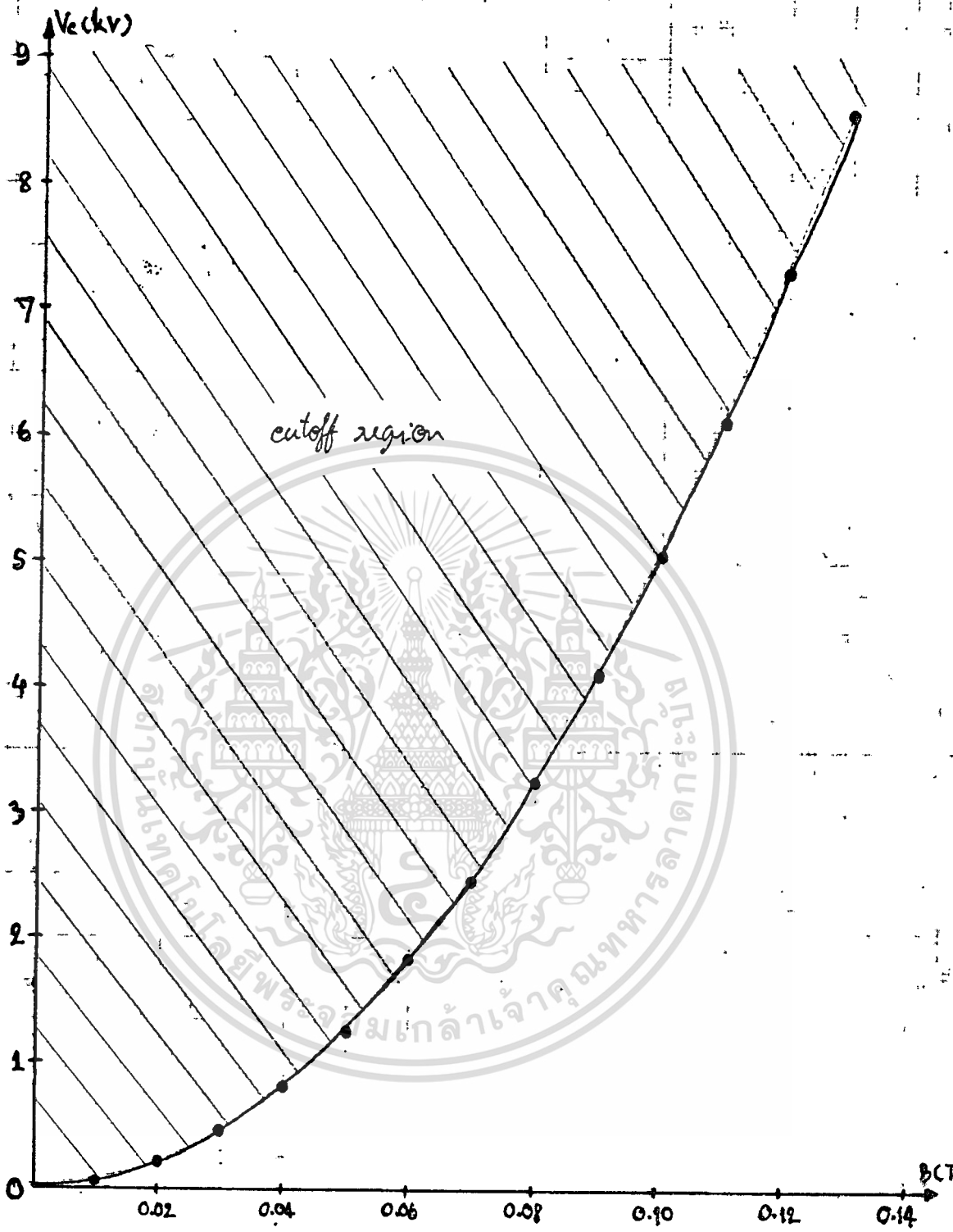
V_c มีหน่วยเป็นโวลต์

B มีหน่วยเป็นเกาส์

แทนค่าแล้วจะได้ค่า V_c, B ดังแสดงในตารางที่ 2.3

B (เกาส์)	V_c (โวลต์)
100	51
200	203
300	455
400	810
500	1265
600	1822
700	2481
800	3240
900	4101
1000	5063
1100	6126
1200	7291
1300	8557

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าสนามแม่เหล็กที่สัมพันธ์กับค่าอาโนดโวลเตจ
ตามสมการที่ (2.5.6)



กราฟแสดงสมการคัทออฟของหลอด

$$\text{จาก } V_n = \frac{300\pi(r_n^2 - r_c^2)}{\chi\lambda_n} [B - (10,600/\chi\lambda_n)(r_n^2/(r_n^2 - r_c^2))] \quad (2.9.5)$$

r_n (รัศมีของอาโนด) = 0.5 เซนติเมตร

r_c (รัศมีของคาโทด) = 0.1 เซนติเมตร

λ_n (ความยาวคลื่นโทมดที่ n) เซนติเมตร

B (ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก) เกาซ์

V_n (อาโนดโวลต์เตก) โวลต์

$\chi = Nm + n$ โดย $N =$ จำนวนของควิวิต

$n =$ เลขประจำโทมด (0; 1, 2, ..., N-1)

$m =$ เลขที่ของฮาร์โมนิกในแต่ละโทมด (0, -1, +1, ...)

หลอดที่ใช้มีจำนวนของควิวิตเท่ากับ 12 ขณะหลอดทำงาน เมื่อคัปปลิ่งสัญญาณที่ได้มาเข้าเครื่องสเปคตรัมอานาไลเซอร์ (spectrum analyzer) จะเห็นสัญญาณปรากฏที่ความถี่ที่เป็นฟิวเดเมนทัล (fundamental, $m=0$) ซึ่งมีค่าต่าง ๆ ดังนี้

ที่	2.450 GHz (จิกกะเฮิร์ต)	(π -mode, $n=6, m=0$)	$\lambda_6 = 12.24$ cm.
	2.650 GHz	($n=5, m=0$)	$\lambda_5 = 11.30$ cm.
	2.750 GHz	($n=4, m=0$)	$\lambda_4 = 10.90$ cm.
	2.800 GHz	($n=3, m=0$)	$\lambda_3 = 10.70$ cm.

เนื่องจากหลอดที่ใช้ เป็นแบบเวเน มีสแตป 2 วง (double-ring-stap) โทมด π จะแยกจากโทมดอื่นอย่างชัดเจน เพื่อไม่เกิดการทับซ้อนกันของโทมด π กับโทมดอื่น เพราะต้องการใช้งานที่โทมด π ดังนั้นจากสมการที่ (2.9.5) (สมการของฮาร์ทรี) เราจะสามารถหาค่าสนามทั้งสองที่โทมดต่าง ๆ ของหลอดได้ดังนี้

n	m	N	\bar{x}_n (ซม.)	สมการของฮาร์ทรี
6	0	12	12.24	$V_{\bar{x}} = 3.08B - 464$
5	0	12	11.30	$V_{\bar{x}} = 4.00B - 780$
4	0	12	10.90	$V_{\bar{x}} = 5.20B - 1312$
3	0	12	10.70	$V_{\bar{x}} = 7.00B - 2420$

ตารางที่ 2.4 แสดงสมการของโหนดต่าง ๆ ของการให้กำเนิดสัญญาณ

จากสมการของฮาร์ทรี ค่าของสนามทั้งสองที่สัมพันธ์กันที่โหนดต่าง ๆ แสดง

ดังตารางที่ 2.5

2.10 การใช้สเตรป(strap)ในการแยกโหนดการทำงานของหลอดแมกนีตรอน

ในหลอดแมกนีตรอนธรรมดาไม่มีสเตรป ริง การเกิดออสซิลเลชันที่ความถี่ต่าง ๆ จะมีค่าขึ้นอยู่กับ คุณสมบัติของรีโซแนนท์คาวิตี้ ซึ่งในบางครั้งค่าดังกล่าวอาจทำให้เกิดการออสซิลเลชันที่ความถี่ใกล้เคียงกันมากจนบางครั้งความถี่อาจจะมีผลทำให้ความถี่ใกล้เคียงไม่สามารถนำไปใช้งานได้ จึงมีวิธีการแยกความถี่ออกจากกันมี 2 วิธี

1. การใช้สเตรปริง

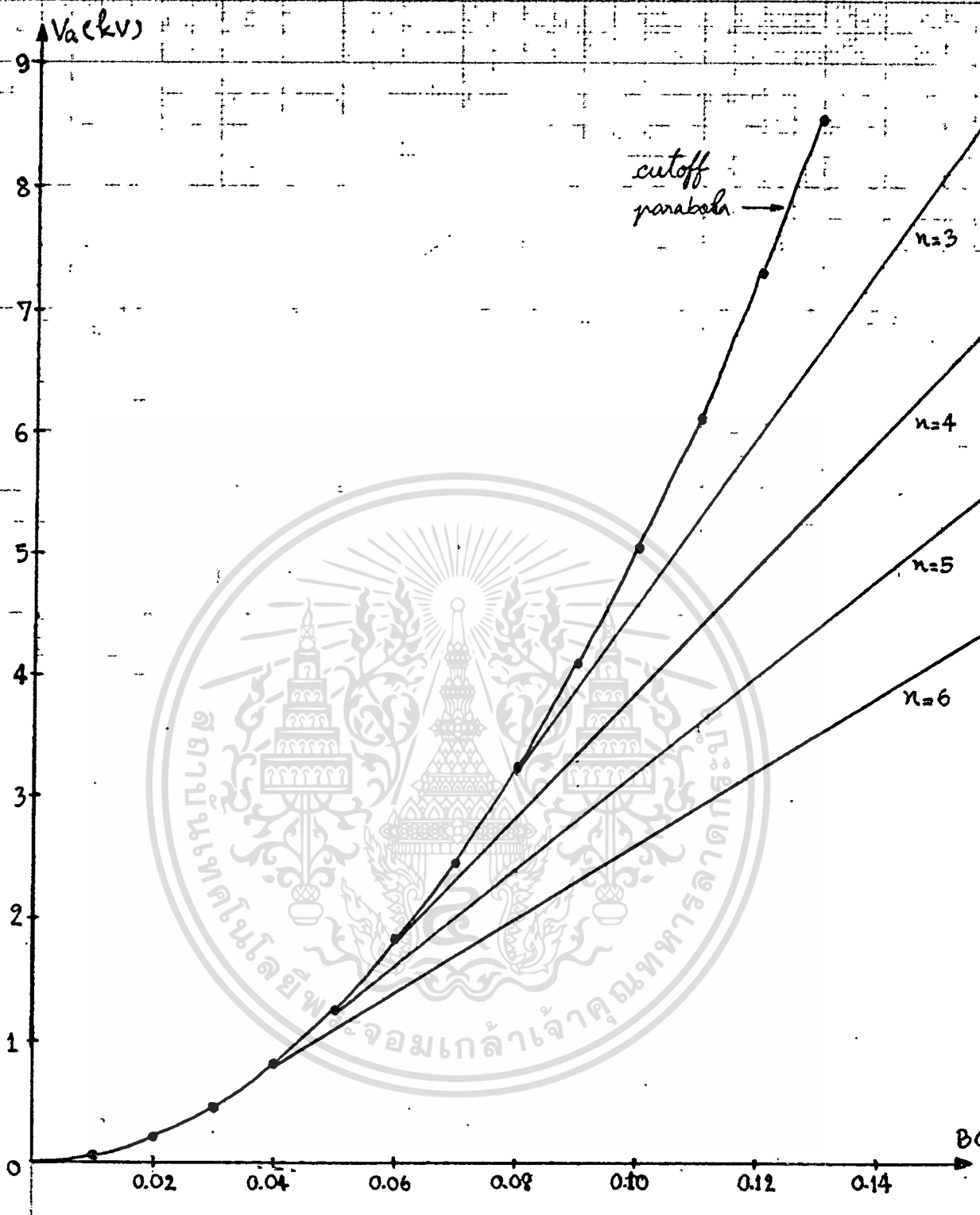
2. การเปลี่ยนแปลงรูปร่างในรีโซแนนท์คาวิตี้

วิธีการที่ 2 ต้องทำการเปลี่ยนแปลงจากทางแมคคานิคจากภายนอก ซึ่ง

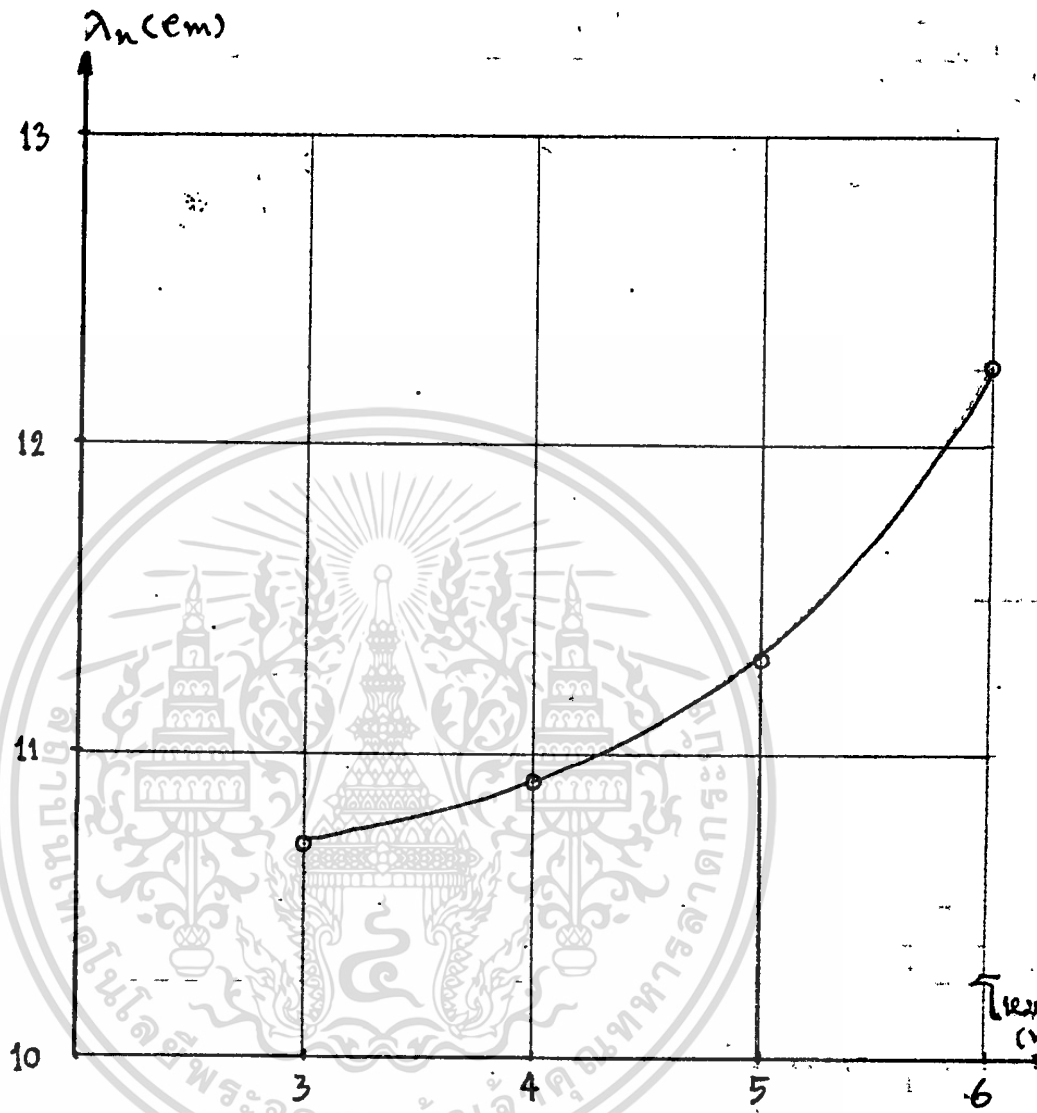
เป็นเรื่องที่เข้าใจยาก ดังนั้นจึงกล่าวถึงเฉพาะวิธีที่ 1 เท่านั้นซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันกว้างขวางและง่ายกว่าดังรูปที่ 2.12

B(เกี้ยว)	V _n (โวลท์)			
	n=3	n=4	n=5	n=6
200			20	153
300		248	420	461
400	380	768	820	769
500	1080	1288	1220	1077
600	1780	1808	1620	1385
700	2480	2328	2020	1693
800	3180	2848	2420	2001
900	3880	3368	2820	2309
1000	4580	3888	3220	2617
1100	5280	4408	3620	2925
1200	5980	4928	4020	3233
1300	6680	5448	4420	3541
1400	7380	5968	4820	3849
1500	8080	6488	5220	4157

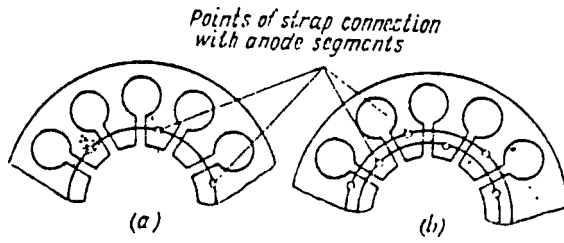
ตารางที่ 2.5 แสดงค่าอาโนดโวลเทจและค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก
ที่สัมพันธ์กันตามสมการของฮาร์ทรี่



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอาโนดโวลเตจ (V_a)
กับค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (B) ที่โหนดต่าง ๆ ตาม
สมการของฮาร์ทรี่



กราฟแสดงค่าความยาวคลื่นที่โหมดต่าง ๆ ของหลอดที่ใช้ในโครงการนี้



ก)

ข)

รูปที่ 2.12 แสดงชนิดของสเตร็ป ก) สเตร็ปวงเดี่ยว ข) สเตร็ปสองวง

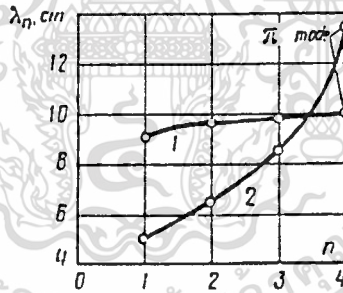
การใช้สเตร็ปเป็นการช่วยให้ภายในคาวิตี้มีค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) เปลี่ยนไป ซึ่งอธิบายเป็นสมการง่าย ๆ ดังนี้ พฤติสมการของรีโซแนนท์คาวิตี้จะเป็น

$$f = (LC)^{-1/2}$$

แต่เมื่อใส่สเตร็ปแล้วสมการดังกล่าวจะกลายเป็น

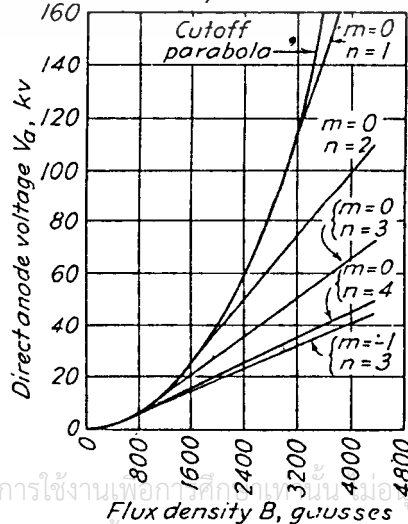
$$f = (L(C+C_{strap}))^{-1/2}$$

โดยที่ C_{strap} = ค่าความจุไฟฟ้าของสเตร็ปซึ่งสามารถประมาณเป็นกราฟง่าย ๆ ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงโหมดต่าง ๆ ของหลอดที่รีโซแนนท์ 10 cm.8 คาวิตี้

1-ไม่ได้ใช้สเตร็ป, 2-ใช้สเตร็ป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.14 ฮาร์ตรีโดอะแกรม (hartree diagram)

บทที่ 3

แหล่งจ่ายกำลังของหลอดแมกนีตรอนที่ใช้ในโครงการงาน และการสร้างแม่เหล็กไฟฟ้า

3.1 การสร้างแหล่งจ่ายให้กับหลอดแมกนีตรอน

เนื่องจากโครงการนี้จัดทำเพื่อศึกษาวิจัยคุณสมบัติของหลอดแมกนีตรอน ในเรื่องของการเปลี่ยนแปลงพลังงานเอาพุท (power output) กับพารามิเตอร์ (parameter) ที่ใช้เป็นตัวควบคุมการทำงานของหลอด ซึ่งแหล่งจ่ายของหลอดแมกนีตรอนในสภาพทำงานปกติจะประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 3 ตัวคือ

1. แหล่งจ่ายศักย์ต่าสูง (high voltage supply) ใช้ในการจ่ายให้แก่คาโทดและแอโนด เพื่อดึงอิเล็กตรอนออกจากคาโทดเข้าหาแอโนด

2. แหล่งจ่ายฮีตเตอร์ (heater) เพื่อทำให้ไส้หลอดร้อนเพื่อให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากคาโทด

3. แหล่งจ่ายสนามแม่เหล็ก ซึ่งปกติจะใช้เป็นแม่เหล็กถาวร แต่ในโครงการนี้จะใช้แม่เหล็กไฟฟ้าเข้าช่วย เพื่อเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก ดังจะอธิบายในหัวข้อต่อไป จากหลักการเบื้องต้นเราจึงแบ่งการสร้างแหล่งจ่ายออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ

1. ภาคศักย์สูงกับแหล่งจ่ายฮีตเตอร์
2. ภาคของแม่เหล็กไฟฟ้า

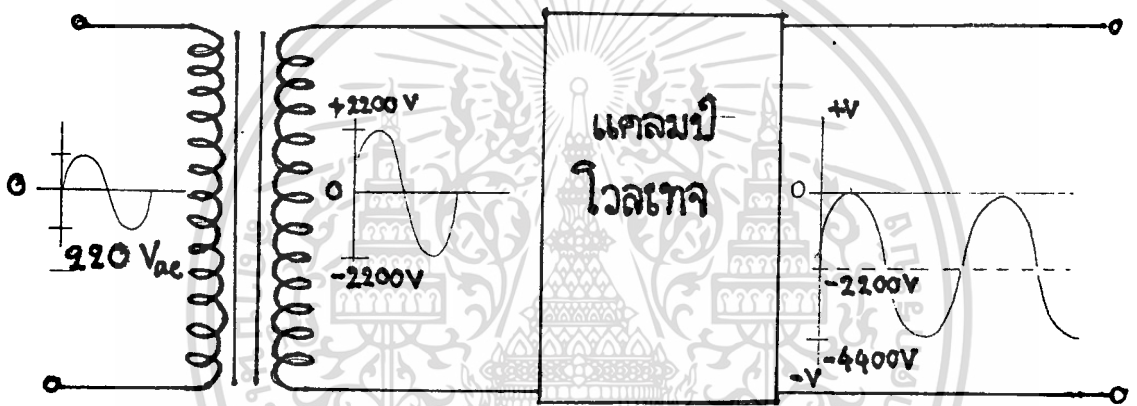
3.2 ภาคศักย์สูงกับแหล่งจ่ายฮีตเตอร์

ภาคนี้เรามีวงจรของเตาไมโครเวฟ ซึ่งสามารถจ่ายให้กับหลอดได้สอดคล้องกับความต้องการของโครงการพอดี ดังจะนำมาอธิบายดังนี้

จากรูปที่ 3.1 วงจรประกอบด้วยส่วนประกอบใหญ่ ๆ 2 ส่วนคือส่วนคิกซ์สูง และส่วนอีทเตอร์

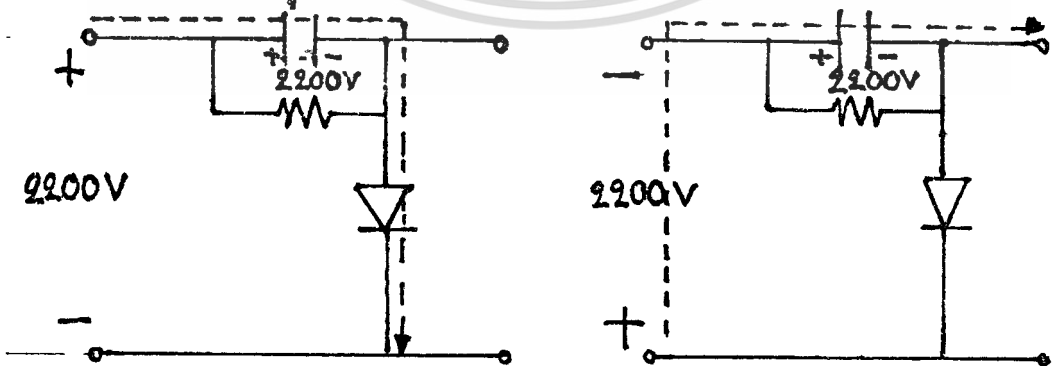
ส่วนคิกซ์สูง ประกอบด้วยหม้อแปลง ไทม์เมอร์(timer) แคลมป์โวลต์เตก หลอดไฟฟ้า

การทำงาน เมื่อไฟฟ้าซึ่งมีขนาด 220 V ผ่านหม้อแปลงซึ่งเป็นหม้อแปลงขึ้นโดยมี อัตราส่วนการแปลงขึ้น = 10 เท่า ดังนั้นจะมี V_{rms} ประมาณ 2200 V ซึ่งเมื่อ ผ่านวงจรแคลมป์โวลต์เตกแล้วจะทำให้มีขนาดเพิ่มเป็น 2 เท่า คือประมาณ 4400 V ส่ว อยู่ที่ -2200 V แสดงได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงสัญญาณแต่ละช่วงของแหล่งจ่ายภาคคิกซ์สูง

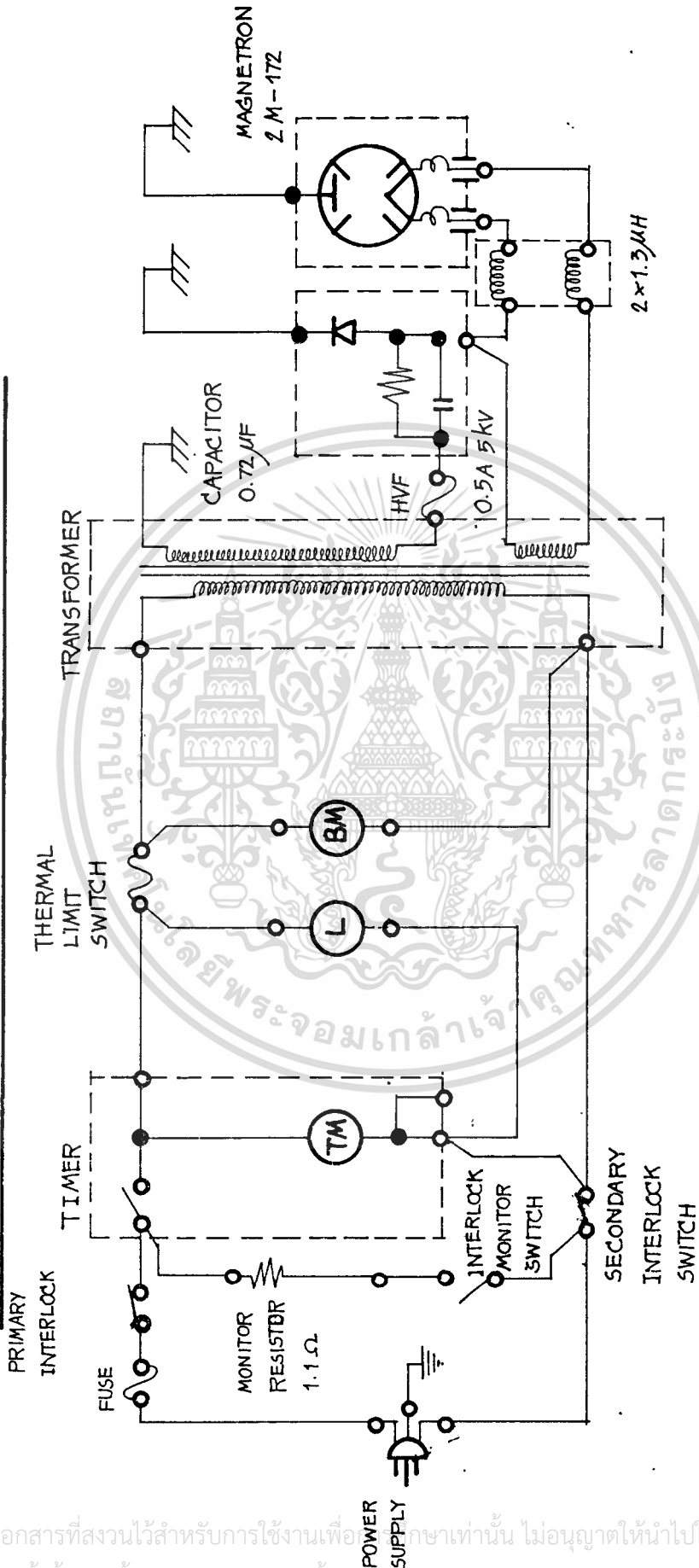
การทำงานของวงจรแคลมป์ทำงานในลักษณะชาร์จ(charge) และดิสชาร์จ (discharge)แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงการทำงานของแคลมป์โวลเทจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CIRCUIT DIAGRAM FOR MICROWAVE OVEN.



TM : TIMER MOTOR.

BM : BLOWER MOTOR.

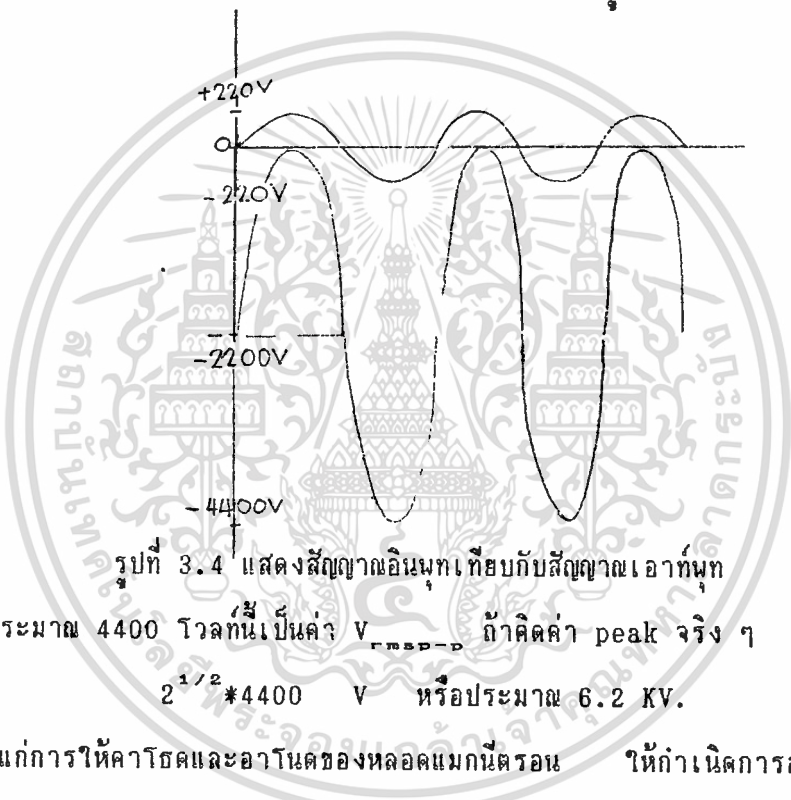
L : CAVITY LIGHT.

HVF : HIGH VOLTAGE FUSE.

รูปที่ 3.1 แสดงวงจรแม่เหล็กภายในที่จ่ายพลังงานให้กับสายส่งและแหล่งจ่ายไฟฟ้าของหลอดไมโครเวฟ.

เมื่อไฟบวกเข้ามาทางอินพุต ตัวเก็บประจุ (capacitor) จะได้รับการชาร์จ โดยผ่านทางไดโอด (diode) ทำให้มีโวลเทจตกคร่อมตัวเก็บประจุอยู่ประมาณ 2200 V เมื่อไฟลบเข้ามาทางอินพุต ตัวเก็บประจุซึ่งมีโวลเทจ ตกคร่อมอยู่ประมาณ 2200 V จะไม่สามารถดิสชาร์จผ่านไดโอดได้อีก แต่จะสามารถดิสชาร์จผ่านทางเอาต์พุตได้ โดยที่เอาต์พุตจะมองเห็นเป็น

โวลทคร่อมไดโอด + ค่าอินพุตโวลท์เดทขณะนั้น = 2200+2200 ประมาณ 4400 V การทำงานสามารถเขียนเป็นกราฟของสัญญาณไฟฟ้า ได้เป็นดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงสัญญาณอินพุตเทียบกับสัญญาณเอาต์พุต

ซึ่งค่า V ประมาณ 4400 โวลท์นั้นเป็นค่า V_{peak} ถ้าคิดค่า peak จริง ๆ จะได้เท่ากับ $2^{1/2} * 4400$ V หรือประมาณ 6.2 KV.

ซึ่งเพียงพอแก่การให้คาโธดและแอนโธดของหลอดแมกนีตรอน ให้กำเนิดการอออสซิลเลทได้

3.3 แหล่งจ่ายกระแสให้ขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า

แสดงดังรูปที่ 3.5

3.4 การสร้างขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า

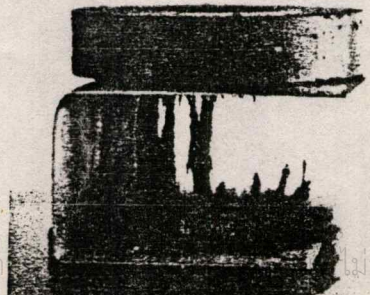
เนื่องจากต้องการจะปรับค่าสนามแม่เหล็ก ที่จัดให้กับหลอดจึงต้องทำแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น เพื่อง่ายต่อการปรับ โดยใช้หลักการปรับกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวดโซลินอยด์ (solenoid) เนื่องจากพื้นที่ที่จะใส่ขดลวดโซลินอยด์มีพื้นที่จำกัด ทำให้มีขดลวดจำนวนน้อยรอบทำให้ได้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าไม่มากพอที่จะทำให้หลอดทำงานได้ ต้องใส่แม่เหล็กถาวรเข้าไปด้วยเพื่อได้ค่าสนามแม่เหล็กเพียงพอกับความต้องการ แล้วจึงเอาขดลวดไปครอบแม่เหล็กถาวรไว้อีกทีเพื่อปรับ เพิ่ม, ลด ขนาดของสนามแม่เหล็ก โดยอาศัยหลักการเสริมและหักล้างของเส้นแรงแม่เหล็กดังในรูปที่ 3.6



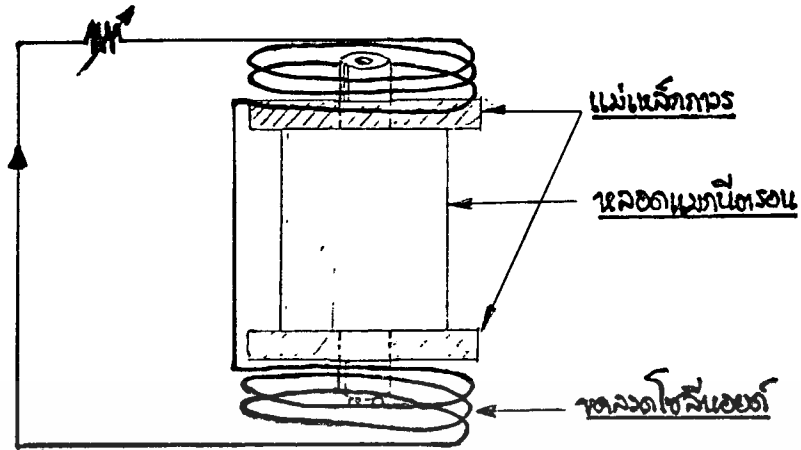
รูปที่ 3.6 แสดงการเสริมและหักล้างกันได้ของเส้นแรงแม่เหล็ก

จากรูปที่ 3.6 กระแสไฟฟ้าที่ไหลในลวดจะให้สนามแม่เหล็กมีทิศทางเช่นเดียวกับ ก) ในลักษณะนี้สนามแม่เหล็กทางด้านบนจะเพิ่มมากขึ้น แต่ทางด้านล่างจะลดลง โดยทฤษฎีดังกล่าวจึงนำมาใช้ในการปรับค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กได้ในโครงงานนี้

เนื่องจากลักษณะหลอดจึงออกแบบขดลวดโซลินอยด์ได้ดังรูปที่ 3.7



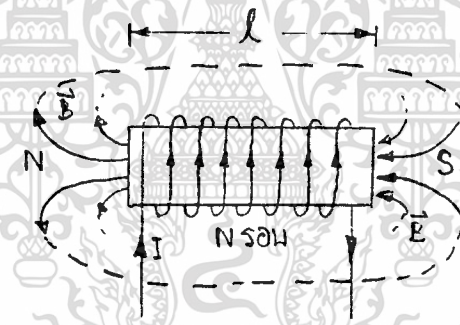
รูปที่ 3.6.1 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวร



รูปที่ 3.7 แสดงการออกแบบขดลวดโซลินอยด์เพื่อให้เกิดการเสริม

และหักล้างของเส้นแรงแม่เหล็ก

ต่อไป เป็นการหาทิศทางของสนามแม่เหล็กและขนาดของสนามแม่เหล็กที่เกิดการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดโซลินอยด์ดังในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แสดงขดลวดโซลินอยด์

หาค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) จากสูตร

$$B = \mu NI / l \tag{3.4.1}$$

โดย B: คือค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (tesla, L)

μ คือค่าเพอร์เมียบิลิตีของตัวกลาง (Hm^{-1})

I คือกระแสไฟฟ้า (แอมแป)

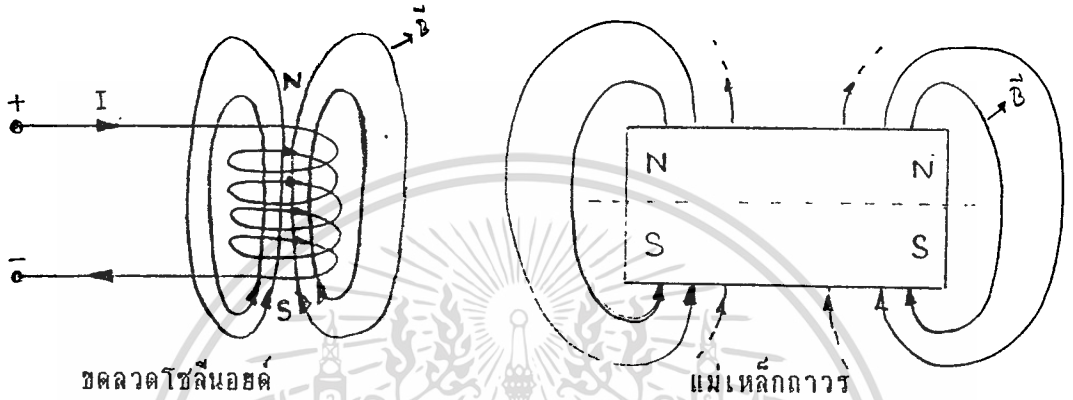
l คือความยาวของขดลวด (เมตร)

ในการทดลองใช้โซลินอยด์แกนอากาศซึ่งมี $\mu_0 = 400\pi \text{ nHm}^{-1}$ ดังนั้นจะได้

$$B = \mu_0 NI/l \quad (3.4.2)$$

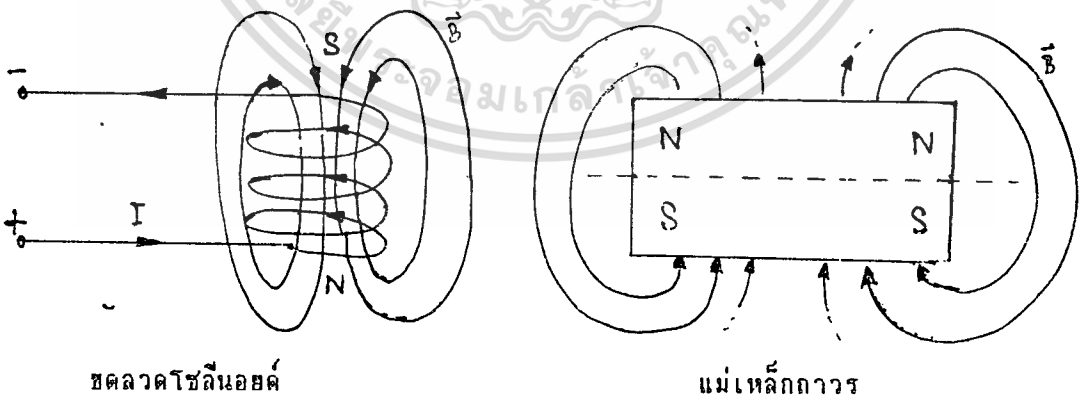
เป็นค่าของสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นโดยขดลวดโซลินอยด์ เพื่อนำไปเสริมหรือหักล้างกับค่าสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร นิยามเป็น 2 กรณี ดังนี้

1. การจัดให้สนามแม่เหล็กของขดลวดเสริมกับสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร



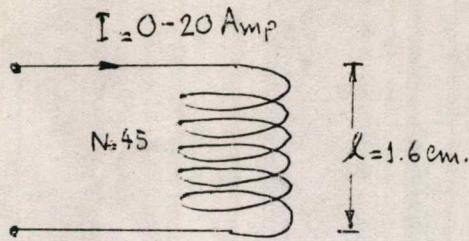
รูปที่ 3.9 แสดงการจัดให้สนามแม่เหล็กเสริมกัน

2. การจัดให้สนามแม่เหล็กของขดลวดหักล้างกับสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร



รูปที่ 3.10 แสดงการจัดให้สนามแม่เหล็กหักล้างกัน

ขดลวดโซลินอยด์ที่ออกแบบไว้มีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 3.11 แสดงขดลวดโซลินอยด์แกนอากาศที่ใช้ในโครงงานนี้

เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดยาวเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของแม่เหล็กถาวร

จากสูตร $B = \mu_0 NI/l$ จะให้ค่าสนามแม่เหล็กที่ $I = 0 \text{ Amp}$ $B_{min} = 0 \text{ T}$

ที่ $I = 20 \text{ Amp}$ $B_{max} = 0.071 \text{ T}$

เมื่อเวลาใช้งานโซลินอยด์จะไปครอบบนแม่เหล็กถาวรและตัวหลอด ซึ่งจะมีค่า μ ที่มีค่ามากกว่า μ_0 จะทำให้ได้ค่า B สูงกว่าที่คำนวณ (เนื่องจากค่า μ ของอากาศมีค่าต่ำกว่าค่า μ ของตัวกลางชนิดอื่น ๆ)



แม่เหล็กถาวร

โซลินอยด์

แม่เหล็กถาวรที่มีประอบกับโซลินอยด์

รูปที่ 3.12 แสดงแม่เหล็กถาวรกับขดลวดโซลินอยด์

ขดลวดโซลินอยด์ที่ออกแบบไว้นำมาหาค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่
ค่ากระแสต่าง ๆ ตามสูตร

$$B = \mu_0 NI/l$$

โดยที่ $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$

$N = 45$ รอบ

$l = 1.6 \times 10^{-2}$ เมตร

$I = 0-20$ แอมแปร์

กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	B (เกาส์) จากสูตร
2	71
4	141
6	212
8	282
10	353
12	424
14	494
16	565
18	635
20	706

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กจากการคำนวณ

บทที่ 4

การปรับกำลังงานของหลอดแมกนีตรอนและการทดลอง

4.1 การปรับกำลังงานของหลอดแมกนีตรอน

จากทฤษฎีของหลอดแมกนีตรอน ได้กล่าวแล้วว่าในการให้กำเนิดสัญญาณของหลอดนั้นจะต้องจัดสนามไฟฟ้าให้มีทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก ด้วยค่าที่สัมพันธ์กันตามสมการของฮาร์ทรี่ดังนี้

$$V_u = 300\pi[(r_u^2 - r_c^2)/\lambda][B - (10600/\lambda)(r_u^2/(r_u^2 - r_c^2))]$$

ซึ่งประกอบด้วยหลายโหนดด้วยกัน ในแต่ละโหนดนั้นค่า V_u, B ซึ่งเป็นปริมาณที่เราป้อนให้กับหลอด(input power)สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามสมการของฮาร์ทรี่ และหลอดจะยังให้กำเนิดสัญญาณได้ถ้าค่าทั้งสองยังสัมพันธ์กันตามสมการของฮาร์ทรี่ จากสมการจะเห็นว่าค่าทั้งสองนั้นแปรเปลี่ยนตามกัน คือเมื่อเพิ่ม, ลดค่าใดค่าหนึ่ง อีกค่าก็จะเพิ่ม, ลดตาม การเพิ่ม, ลดค่าทั้งสองตามสมการเท่ากับเป็นการเพิ่ม, ลดค่ากำลังงาน ที่จัดให้กับหลอด(input power) ดังนั้นกำลังงานที่ออกจากหลอด(output power)ก็ควรจะเพิ่ม, ลดไปด้วย เนื่องจากแหล่งจ่ายภาคคีอัสสูงให้กับหลอดที่ใช้ในโครงงานนี้ ไม่ได้ให้ค่าออกมาเพียงค่าเดียวเพื่อให้หลอดทำงาน แต่จะจ่ายค่าคีอัสให้กับหลอดตั้งแต่ค่าศูนย์โวลทไปจนถึงค่าลบหกพันกว่าโวลท(ได้กล่าวแล้วในเรื่องแหล่งจ่ายภาคคีอัสสูง) . ด้วยความถี่ 50 รอบ/วินาที ส่วนค่าความเข้มสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวร ซึ่งให้ค่าที่แน่นอนเพียงค่าเดียว(เป็นค่าสำหรับไฟ โหนด)ไม่เปลี่ยนแปลง ด้วยการจัดค่าสนามทั้งสองให้กับหลอดในลักษณะนี้ทำให้หลอดให้กำเนิดสัญญาณที่มีกำลังงานต่างกันที่ความถี่ต่าง ๆ หรือหมายถึง หลอดจะให้กำเนิดสัญญาณหลายโหนด ในเวลาเดียวกัน(ซึ่งดูได้จากเครื่องสเปคตรัมอนาไลเซอร์) แต่ละโหนดมีความถี่และกำลังงานที่ไม่เท่ากัน หมายถึงแต่ละโหนดสามารถส่งถ่ายกำลังงานออกมาต่างกัน การเกิดในลักษณะนี้สอดคล้องกับสมการของฮาร์ทรี่ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอาโนดโวลทตรงกับค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ดังนั้นถ้าจัดค่าสนามทั้งสองที่จะให้กับหลอดโดยค่าทั้งสองเป็นไปตามสมการของฮาร์ทรี่แล้ว เท่ากับว่าเราสามารถปรับเปลี่ยน

โหนดการทำงานของหลอดได้ ผลที่ตามมาคือเราสามารถปรับเปลี่ยนกำลังงานที่ออกจากหลอดได้ เพราะว่าแต่ละโหนดสามารถส่งกำลังงานออกมาต่างกัน ดังนั้นถ้าทำให้หลอดที่ใช้ในโครงงานนี้ทำงานที่โหนดต่าง ๆ ในเวลาต่างกัน เราก็จะได้กำลังงานของแต่ละโหนดออกมา แต่เนื่องจากว่าแหล่งจ่ายภาคศักย์สูงที่ให้ค่าศักย์คงที่นั้นทำได้ยาก และการที่ต้องใช้แหล่งจ่ายภาคศักย์สูงที่ให้ค่าศักย์ที่ต่อเนื่องจากค่าศูนย์ ไปจนถึงค่าลบหนักกว่าโวลท ทำให้หลอดให้กำเนิดสัญญาณทุกโหนดในเวลาเดียวกัน กำลังงานที่ออกจากหลอดจึงเป็นค่ากำลังงานร่วมของทุกโหนด สัญญาณที่ออกมาจะเป็นคลื่นต่อเนื่อง (continuous wave) ดังนั้นการที่จะปรับกำลังงานที่ออกจากหลอดที่ใช้ในโครงงานนี้ จึงเปลี่ยนเฉพาะค่าความเข้มสนามแม่เหล็กแต่เพียงอย่างเดียว เพราะค่าอาโนดโวลทเตจมีการเปลี่ยนแปลงทุกค่าอยู่แล้ว และเป็นการปรับกำลังงานรวมของทุกโหนด ไม่ใช่เฉพาะโหนดหนึ่งโหนดใดของการทำงานจากสมการของฮาร์ตรี สามารถสรุปแนวทางที่จะปรับกำลังงานของหลอดแมกนีตรอนตามทฤษฎีได้ดังนี้

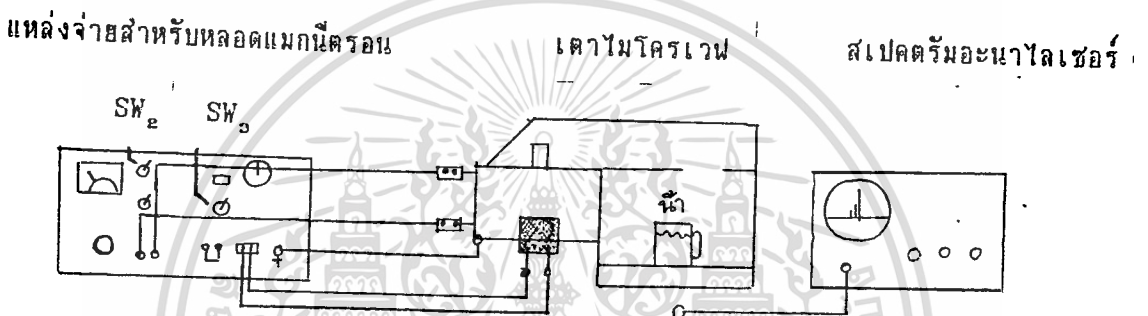
1. การเปลี่ยนโหนดการทำงาน ทำให้กำลังงานของหลอดเปลี่ยนไปเพราะสมการของฮาร์ตรีสำหรับแต่ละโหนด จะแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.4 ดังนั้นค่าอาโนดโวลทเตจหนึ่งค่ากับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กหนึ่งค่า สำหรับโหนดการทำงานหนึ่งโหนด ก็จะทำให้กำลังงานที่ออกจากหลอดหนึ่งค่า ซึ่งจะไม่เท่ากันในแต่ละโหนด
2. ภายในโหนดการทำงานเดียวกัน จะมีสมการของฮาร์ตรีสำหรับโหนด แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามทั้งสอง เมื่อเปลี่ยนค่าใดค่าใดหนึ่งอีกค่าจะแปรเปลี่ยนตาม การส่งถ่ายกำลังงานจะเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นเมื่อเปลี่ยนค่าสนามทั้งสองตามสมการของฮาร์ตรีของโหนดนั้น เท่ากับว่ากำลังงานที่ออกจากหลอดก็จะเปลี่ยนไปด้วย

การทดลองที่ 4.2.1 เรื่องการวัดความถี่และแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง

แปลงความแรงของสัญญาณ

วัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาถึงความถี่และแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงความแรงของสัญญาณที่หลอดแมกนีตรอนให้ออกมาว่าจะเปลี่ยนแปลงอย่างไรเมื่อเพิ่มหรือลดความเข้มของสนามแม่เหล็กภายในหลอด

วิธีการทดลอง 1 ต่ออุปกรณ์ตามรูป 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงการต่ออุปกรณ์ตามการทดลอง 4.2.1

2. เปิดสเปกตรัมอะนาไลเซอร์วัดสัญญาณในย่าน 2-5 GHz

3. เปิดสวิตช์ 3 ตั้งเวลาโดยปีคิโทมิเมอร์พอประมาณ ไฟ H.V. on จะ

สว่างรอสักครู่จะเห็นมีสัญญาณเกิดขึ้นที่สเปกตรัมอะนาไลเซอร์แล้วปรับเพื่อดูสัญญาณให้ชัดเจน

4. ยกสวิตช์ 2 ขึ้น และเพิ่มกระแสไฟน้ำ บันทึกค่าระดับของสัญญาณที่

ความถี่ต่าง ๆ กดสวิตช์ 2 ลง และเพิ่มกระแสไฟน้ำ บันทึกค่าระดับของสัญญาณที่

ความถี่ต่าง ๆ

ผลการทดลอง แสดงดังตารางที่ 4.1, 4.2

กระแส	ความถี่ (MHz)				
	2450	2650	2750	4000	5150
2	-8	-33	-53	-21	-36
4	-8	-36	-55	-31	-38
6	-9	-38	-60	-34	-40
8	-10	-38	-	-36	-44
10	-12	-40	-	-38	-44
12	-14	-44	-	-38	-46
14	-20	-50	-	-40	-52
16	-26	-55	-	-45	-
18	-35	-	-	-50	-
20	-35	-	-	-52	-

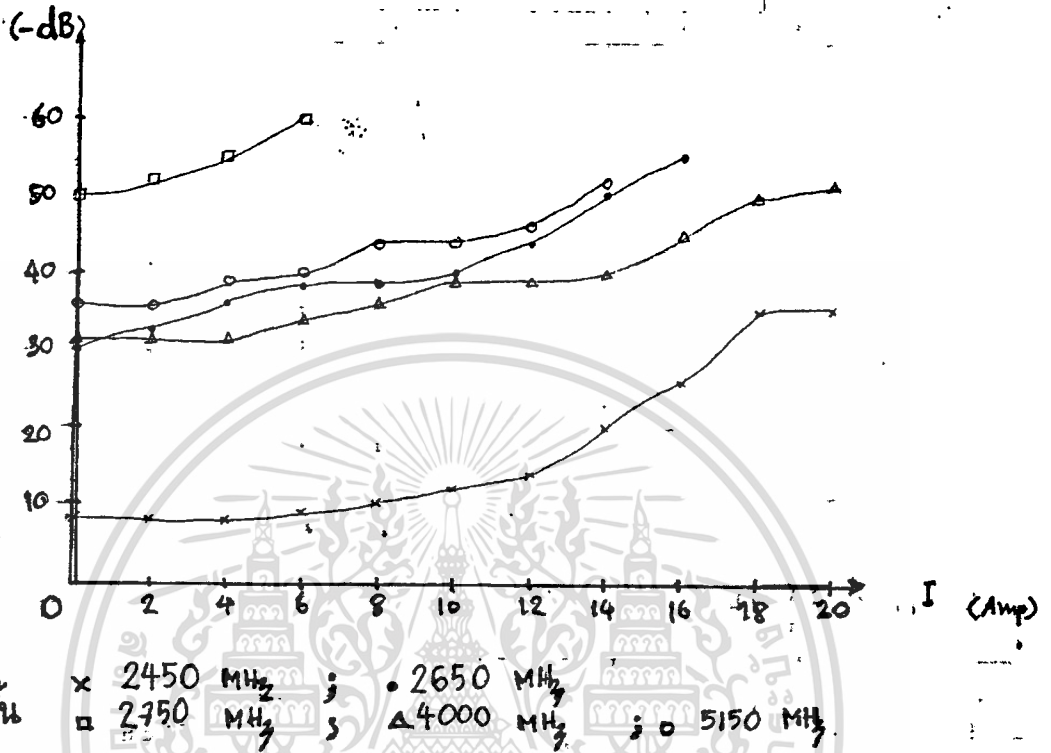
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าระดับสัญญาณที่ความถี่ต่าง ๆ เมื่อสนามแม่เหล็กลดลง

กระแส	ความถี่ (MHz)				
	2450	2650	2750	4000	5150
2	-7	-30	-48	-32	-28
4	-7	-30	-48	-30	-27
6	-7	-28	-48	-30	-26
8	-7	-28	-47	-28	-25
10	-7	-28	-47	-28	-24
12	-7	-27	-45	-28	-24
14	-6	-27	-45	-28	-24
16	-6	-26	-43	-26	-24
18	-6	-26	-43	-26	-24
20	-6	-24	-43	-26	-24

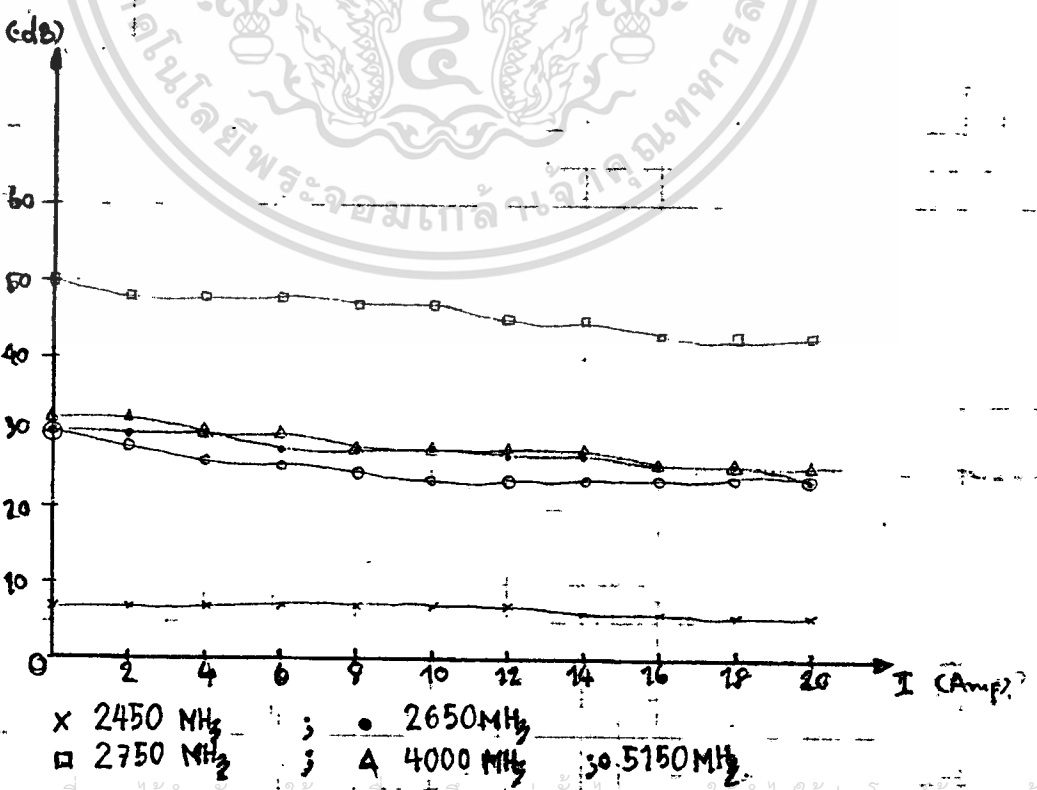
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าระดับของสัญญาณที่ความถี่ต่าง ๆ เมื่อค่าสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับสัญญาณ
กับกระแสแม่เหล็กไฟฟ้า



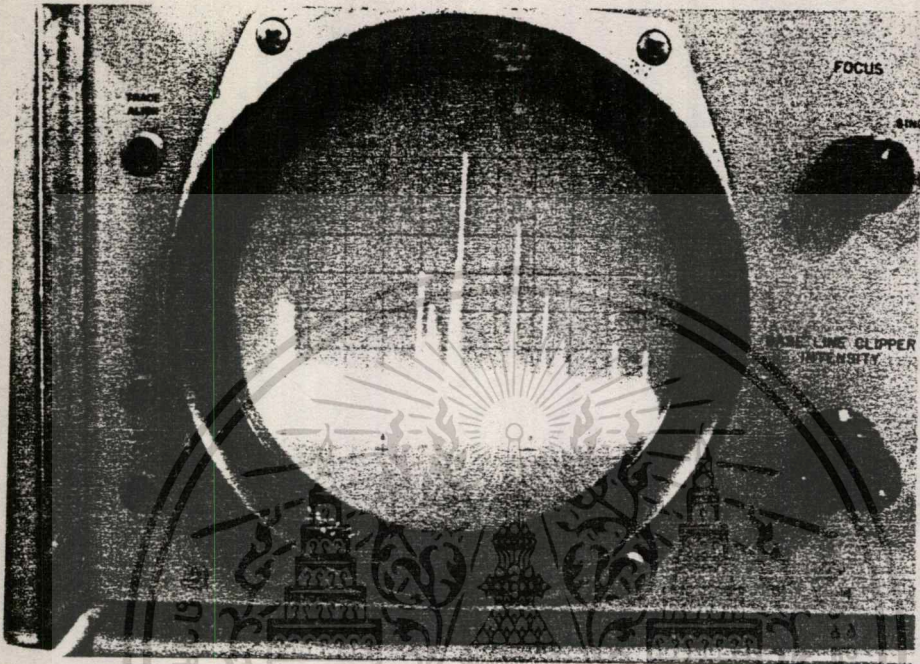
ยก SW2 ขึ้น



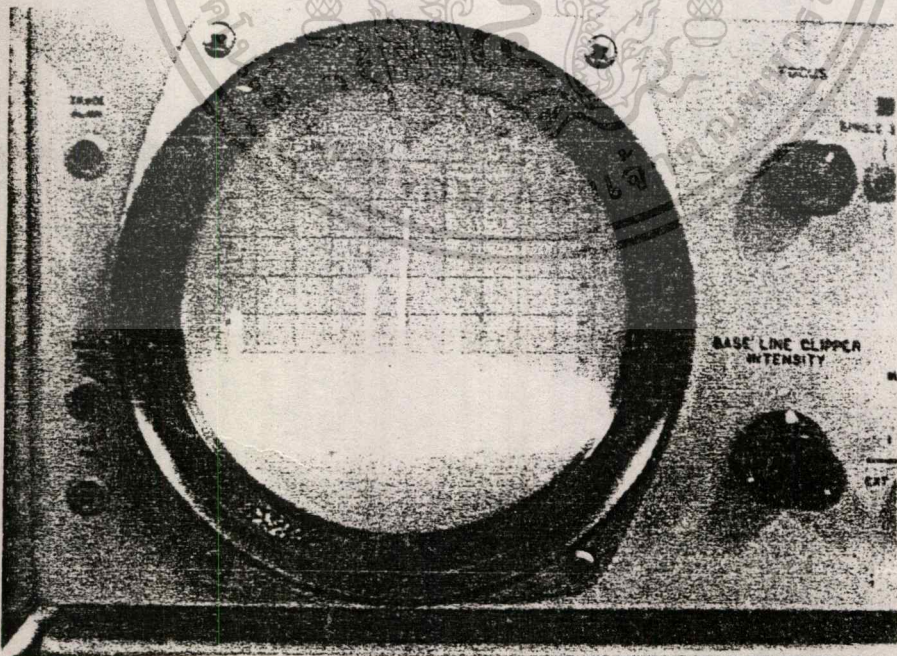
กด SW2 ลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต่อยอดอ้างอิง หรือเผยแพร่เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่าการลดสนามแม่เหล็กซึ่งทำได้ โดยการป้อนกระแสแม่เหล็กไฟฟ้าให้มีทิศทางข้ามกับแม่เหล็กถาวร จะทำให้กำลังงานเฉลี่ยที่ออกจากหลอดมีค่าต่ำลง ซึ่งจะทำให้การพิสูจน์ในการทดลองต่อไป



แสดงระดับของสัญญาณขณะเมื่อเปิดเครื่อง



แสดงระดับสัญญาณเมื่อมีการลดค่าสนามแม่เหล็ก

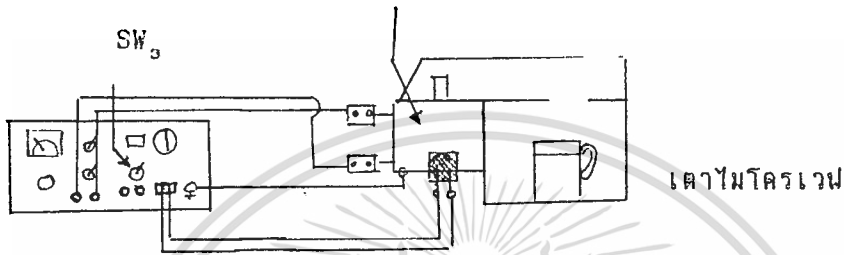
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 4.2.2 เรื่องการวัดการเปลี่ยนแปลงพลังงานทางอ้อมจากน้ำ

วัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงพลังงานเมื่อเปลี่ยนค่าสามแม่เหล็ก โดยอาศัยคุณสมบัติของน้ำ

วิธีทดลอง 1. ต่ออุปกรณ์ตามรูปที่ 4.2

แหล่งจ่ายสำหรับหลอดแมกนีตรอน หลอดแมกนีตรอน



รูปที่ 4.2 แสดงการต่ออุปกรณ์ตามการทดลองที่ 4.2.2

2. นำน้ำปริมาณหนึ่งใส่แก้วน้ำ วัดอุณหภูมิก่อนนำไปใส่ในเตาไมโครเวฟ
3. เปิดแหล่งจ่ายหลอดแมกนีตรอนตามการทดลองที่ 4.2.1
4. ยกสวิตช์ 3 ขึ้น ค่อย ๆ เพิ่มกระแส รอจนเทอร์โมเมอร์ติง จึงวัดอุณหภูมิเข้า แล้ว

บันทึกผล

5. ทำเช่นเดียวกับข้อที่ 4 แต่กดสวิตช์ 3 ลง

ผลการทดลองข้อที่ 4 (ลดสามแม่เหล็ก)

กระแส (amps)	อุณหภูมิ (c)	$T_2 - T_1$ (K)	พลังงาน (watt)
0	49	20	167.2
5	39	10	83.2
10	33	4	33.4
15	30	1	8.4
20	29.5	0.5	4.2

ตารางที่ 4.3 แสดงพลังงานที่น้ำได้รับที่ค่าสามแม่เหล็กต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น. อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองข้อที่ 5 (เพิ่มสนามแม่เหล็ก)

กระแส (amps)	อุณหภูมิ (c)	$T_2 - T_1$ (K)	พลังงาน (watt)
0	47	18	150.5
5	49	20	167.2
10	51	22	184.0
15	60	31	260.0
20			

ตารางที่ 4.4 แสดงพลังงานที่น้ำได้รับที่ค่าสนามแม่เหล็กต่าง ๆ

*พลังงานสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$W = M * C * (T_2 - T_1) / t \quad (4.2.1)$$

- เมื่อ W = พลังงานที่สามารถคำนวณได้ (วัตต์)
 M = ปริมาณน้ำ (กิโลกรัม)
 C = ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (จูล/กิโลกรัม/เคลวิน)
 T_1, T_2 = อุณหภูมิน้ำ ($T_1 = 29$ c, T_2 คืออุณหภูมิที่ออกจากเตาไมโครเวฟ) (เคลวิน)
 t = เวลา (วินาที)

ซึ่งในการทดลองนี้ ให้ปริมาณน้ำ = 240 ช.ม.

เวลา = 120 วินาที

การทดลองที่ 4.2.3 เรื่อง การวัดค่าสนามแม่เหล็กถาวรและสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

วัตถุประสงค์ เพื่อทราบความเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กและให้ทราบว่า การนำแม่เหล็กถาวรกับแม่เหล็กไฟฟ้ามาทำงานร่วมกันได้ในระดับหนึ่ง

วิธีทดลอง 1. ต่ออุปกรณ์ดังรูป 4.3

แหล่งจ่ายสำหรับหลอดแมกนีตรอน



รูปที่ 4.3 แสดงการวัดค่าสนามแม่เหล็กจากชดเชยชิลินอยด์

2. ปรับเกาส์มิเตอร์โดยการนำโพรบไปวางไว้ในซีโร เกาส์ (zero gauss) แล้วปรับปุ่มไฟน์จูน (fine tune) จนกว่าเข็มของมิเตอร์จะชี้ที่ 0 ในการวัดพยายามให้ปลายของโพรบอยู่ใกล้และตั้งฉากกับเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งจะทำให้ได้ค่าสูงสุด
3. เปิดสวิตช์ 1 เพิ่มกระแสและบันทึกค่าจากเกาส์มิเตอร์
4. เปลี่ยนชดเชยชิลินอยด์ เป็นชนิดที่มีแม่เหล็กถาวรอยู่ภายใน แล้วทำเหมือนเดิม

บันทึกผลการทดลอง

ผลการทดลองเมื่อวัดค่าสนามแม่เหล็กจากชดเชยชิลินอยด์

กระแส (amps)	ค่าสนามแม่เหล็ก (เกาส์)
2	20
4	40
6	65
8	90
10	110
12	130
14	150
16	180
18	200
20	220

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

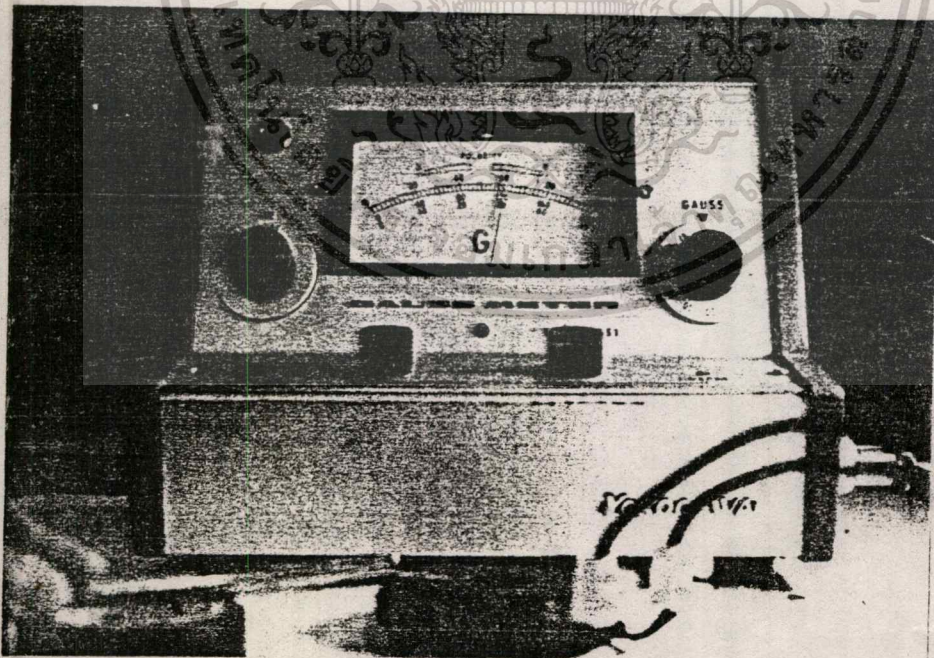
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ออกทั้งหมดมีเหตุอันสมควร และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าสนามแม่เหล็กจากชดเชยชิลินอยด์ที่ออกแบบไว้ดังรูปที่ 3.11

ผลการทดลองวัดค่าสนามแม่เหล็กจากขดลวดโซลินอยด์ที่มีแม่เหล็กถาวรอยู่ด้วย โดยจัดให้
มีการเสริมกันของสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 3.9

กระแส (amps)	ค่าสนามแม่เหล็ก (เกาส์)
2	1016
4	1032
6	1048
8	1060
10	1080
12	1090
14	1110
16	1130
18	1140
20	1160

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าสนามแม่เหล็กที่วัดได้จากขดลวดโซลินอยด์ประกอบกับแม่เหล็กถาวร



การวัดแม่เหล็กถาวรพร้อมโซลินอยด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองที่ 4.2.1 และ 4.2.2 พบว่าการลดค่าสนามแม่เหล็กสามารถทำให้เพาเวอร์ที่ออกมาจากหลอดแมกนีตรอนมีค่าลดลงมากพอสมควร คือ ประมาณ 27 dB จากการทดลองที่ 4.2.1 และลดลงจาก 167.2 วัตต์ เป็น 4 วัตต์ คือ ลดลงประมาณ 163.2 วัตต์ จากการทดลองที่ 4.2.2

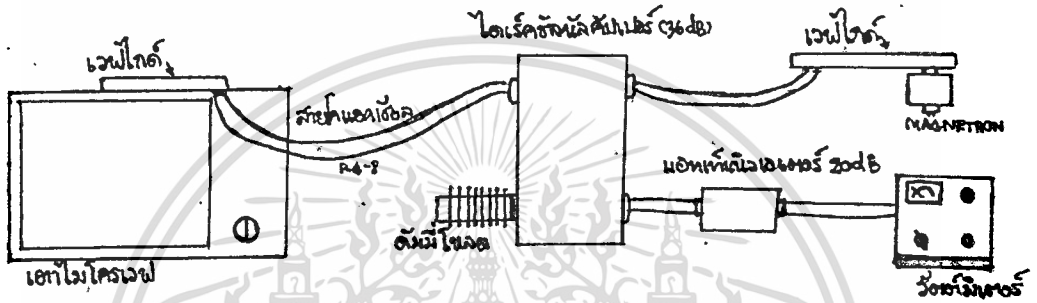
ซึ่งสามารถสรุปว่าพลังงานเฉลี่ยที่ออกจากหลอดแมกนีตรอนสามารถควบคุมได้ในที่นี้ อาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าของสนามไฟฟ้า



การทดลองที่ 4.2.4 เรื่องการวัดการเปลี่ยนแปลงพลังงานของหลอดแมกนีตรอนเมื่อปรับค่าสนามแม่เหล็กที่ป้อนให้กับหลอด

วัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงพลังงานของหลอดแมกนีตรอนโดยการวัดค่าพลังงานโดยตรงด้วยวัตต์มิเตอร์

วิธีทดลอง ต่อกับการดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงการต่อการวัดพลังงานโดยตรงจากหลอดแมกนีตรอน

บันทึกค่าพลังงานที่วัดได้จากการเพิ่มค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก

กระแส (amps)	ค่าที่อ่านจากวัตต์มิเตอร์ (mW)	พลังงานที่ออกจากหลอด (W)
0	0.10	39.81
5	0.11	43.19
10	0.12	47.77
15	0.13	51.75
20	0.14	55.73

หมายเหตุ ค่าแอกเท็นเนเตอร์ (attenuator) 56 dB

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าพลังงานที่ออกจากหลอดแมกนีตรอนเมื่อเพิ่มค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก

บันทึกค่าพลังงานที่วัดได้จากการลดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก

กระแส (amps)	ค่าที่อ่านจากวัตต์มิเตอร์ (๓พ)	พลังงานที่ออกจากหลอด (W)
0	0.10	39.81
5	0.07	27.88
10	0.03	11.94
15	0.01	3.98
20	0.00	0.00

หมายเหตุ ค่าแอกเท็นนิวเอเตอร์ 56 dB

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าพลังงานที่ออกจากหลอดแมกนีตรอนเมื่อลดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก

จากผลการทดลองจะเห็นว่าเราสามารถควบคุมพลังงานที่ออกจากหลอดแมกนีตรอนได้ด้วยการเปลี่ยนค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กและค่าสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้กับหลอด สำหรับการทดลองนี้ได้ปรับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในช่วง 1000-1250 เกาส์ ส่วนค่าสนามไฟฟ้ามักมีการเปลี่ยนแปลงในช่วง 0-6000 โวลท์

บทที่ 5

บทวิเคราะห์และสรุป

เนื่องจากหลอดแมกนีตรอนที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นหลอดที่ใช้ให้ความร้อนในเตาไมโครเวฟซึ่งไม่ต้องการความแน่นอนในการสร้างความถี่ ทำให้เมื่อกำหนดการทดลองเราจึงสามารถสรุปได้เพียงแนวโน้มของการเกิดเท่านั้น ภายในหลอดแมกนีตรอนส่วนสำคัญมากคือ ส่วนของคาโทด ที่ปล่อยอิเล็กตรอนออกมา โดยการให้ความร้อนซึ่งเป็นข้อเสียข้อหนึ่งของหลอดแมกนีตรอน เพราะอุปกรณ์ที่ทำงานด้วยความร้อนจะต้องคงทนและสารที่ใช้สร้างจะต้องมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อผ่านการใช้งานไปช่วงระยะเวลาหนึ่ง หลังจากนั้นมันจะเสื่อม และให้ผลไม่ตรงตามที่คิดไว้เท่าใดนัก ยิ่งถ้าหลอดราคาถูกอายุการใช้งานของคาโทดจะต่ำลงตามสัดส่วนด้วย

จากการทดลองสิ่งที่สังเกตได้สิ่งหนึ่งก็คือ เมื่อเปิดเครื่องใช้ในครั้งแรกช่วงเวลาหนึ่งแล้ว เปิดเครื่องทดลองใหม่พบว่า ระดับความแรงของสัญญาณที่อ่านได้จากสเปกตรัม แอนาไลเซอร์ จะมีค่าต่ำลงกว่าเดิมประมาณ 3-4 dB ซึ่งคาดว่าเกิดจากการที่คาโทด ของหลอดได้รับความร้อนและมีอายุการใช้งานนานแล้วทำให้เริ่มเสื่อมลง ในการทดลองการเพิ่มและลดความเข้มของสนามแม่เหล็ก พบว่าเมื่อเพิ่มค่าสนามแม่เหล็กระดับของสัญญาณจะมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อลดค่าสนามแม่เหล็กระดับของสัญญาณจะมีค่าต่ำลง แต่จะมีความร้อนเกิดขึ้นที่ตัวหลอดมากกว่ากรณีการเพิ่มค่าสนามแม่เหล็ก

การลดค่าสนามแม่เหล็กที่มีผลทำให้ระดับของสัญญาณต่ำลง ยังมีผลทำให้ความถี่ในโหนดเปลี่ยนไปคือมีค่าเปลี่ยนไปจากโหนดนั้นที่โหนดของตัวเอง แต่ก็มีค่าเพียงเล็กน้อย และยังคงทำงานอยู่ภายในโหนดของตัวเองเช่นเดิม ทั้งนี้เป็นเพราะว่าเราเปลี่ยนแปลงค่าสนามแม่เหล็กไม่มากนักและแหล่งจ่ายทางด้านศักย์สูงมีค่าเปลี่ยนแปลง ดังได้กล่าวมาแล้วทำให้อาโนดโวลเตจมีค่า ตั้งแต่ 0 ถึงประมาณ 4400 V การเกิดการออสซิลเลตจึงเกิดทุกโหนดและทุกค่าในโหนดของมันเองด้วย แต่ก็ยังสามารถสอดคล้องกับค่าที่คำนวณจากการทำงานของมันได้

จะเห็นว่าจากการทดลองลดพลังงานของหลอดแมกนีตรอนโดยการลดค่าสนามแม่เหล็ก

และสนามแม่เหล็กที่เหมาะสม ซึ่งในที่นี้อาศัยการลดค่าสนามแม่เหล็กเนื้องอย่างเดียว เพื่อให้พลังงานเฉลี่ยมีค่าลดลง การที่เราไม่ทำสนามไฟฟ้าให้มีค่าเปลี่ยนแปลงตามต้องการ คือเป็นสนามไฟฟ้าโดยตรงและสามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้นั้น เพราะว่าอุปกรณ์ที่ใช้ทำแหล่งจ่าย ศักย์สูงมี ราคาแพงมาก และหาซื้อได้ยากเราจึงอาศัยวงจรเดิมซึ่งให้ค่าศักดาเป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงสม่ำเสมอและทำแหล่งจ่ายกระแสแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นแทน เพื่อควบคุมค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้เปลี่ยนแปลงได้ตามต้องการ ก็จะทำให้ผลคล้าย ๆ กันก็คือ สามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลง ของการเกิดการออสมิเลททุกคาบเวลาของ สัญญาณไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายศักย์สูง จากการสังเกต เมื่อเปิดเครื่องทุกครั้งการออสมิเลทซึ่งหลอดแมกนีตรอนใน โทมคต่าง ๆ จะเกิดเฉพาะตัวที่มีความถี่ต่ำกว่าโตมิแนทในโทมคทุกโทมค ตัวที่มีความถี่สูง เท่าโตมิแนทในโทมคต่าง ๆ จะมีค่าน้อยมากหรือไม่พบเลย การลดสนามแม่เหล็กลงมีส่วนทำให้ระดับของสัญญาณมีขนาดลดต่ำลงจนถึงระดับหนึ่ง แล้วเปลี่ยนจากโตมิแนทในโทมคของมัน ไปยังตัวที่มีความถี่ต่ำกว่าซึ่งมีระดับสัญญาณต่ำกว่า ทำให้ระดับพลังงานเฉลี่ยของหลอดแมกนีตรอนลดลง

ส่วนการเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็ก เราพบว่ามีการเพิ่มขึ้นของระดับสัญญาณน้อยเมื่อเทียบกับการลดความเข้มสนามแม่เหล็ก ซึ่งเกิดจากการที่ไม่มีตัวที่มีความถี่สูงกว่าโตมิแนทในโทมคต่าง ๆ ทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง โทมคไปยังตัวที่มีระดับสัญญาณต่าง ๆ กัน

ส่วนทางด้านการวัดค่าสนามแม่เหล็กโดยใช้เกาส์มิเตอร์นั้น เราพบว่าโพรบของเกาส์มิเตอร์ที่ใช้อยู่ตรงปลายมีขนาดเล็กและมีบางส่วนลอคบ้าง เนื่องจากการลอคนี้เองจึงทำให้ค่าที่ได้ไม่ค่อยตรงตามที่คำนวณไว้สัก และอีกอย่างหนึ่งคือในสารแม่เหล็กอันหนึ่งหรือแม่เหล็กไฟฟ้าอันหนึ่ง การใช้โพรบตัวเดียวกันก็อาจวัดค่าสนามแม่เหล็กได้ไม่เท่ากัน เนื่องจากระยะห่างและการวางหน้าโพรบที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กทำให้การวัดไม่ดีเท่ากัน เพราะปลายโพรบไม่ได้เป็นวัสดุแข็งแต่เป็นสายไฟสองเส้นที่สามารถโค้งงอได้ทำให้ระยะห่างเปลี่ยนแปลงได้เช่นกัน การเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยมีผลทำให้เข็มของเกาส์มิเตอร์เปลี่ยนแปลงไปมก

กติการมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้ สำเร็จได้โดยได้รับคำแนะนำและความช่วยเหลือ
เป็นอย่างดีจาก

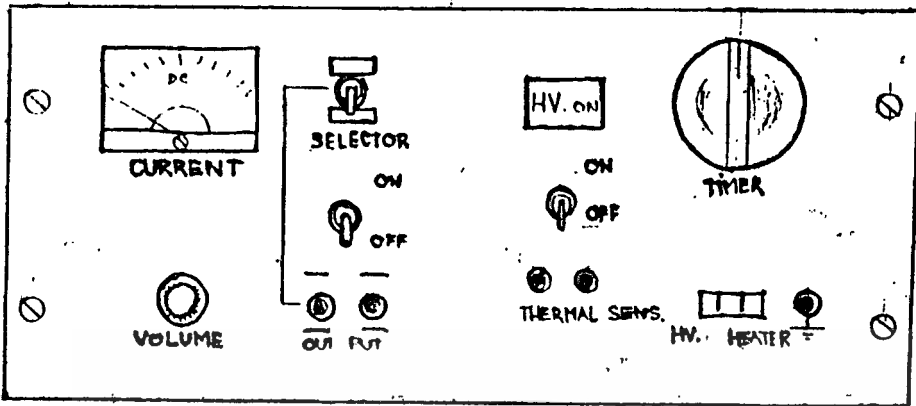
ผศ. โทมัส	โกรฤกษ์	อาจารย์ที่ปรึกษา
อาจารย์ สมผล	โกศลวิตร	
อาจารย์ กิตติชัย	พาณิชย์ประมวงค์	

และเพื่อนนักศึกษาทุกท่าน โดยเฉพาะภาควิชาไฟฟ้ากำลังที่ให้ความช่วยเหลือ
เป็นอย่างดีมาตลอด ซึ่งผู้จัดทำขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก



รูปหน้าปัทม์แห่งจ่ายของหลอดแมกนีตรอน ที่สร้างขึ้น

การใช้งาน

เนื่องจากแห่งจ่ายนี้เป็นแห่งจ่ายที่แบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

1. แห่งจ่ายกระแส
2. แห่งจ่ายศักย์สูง

แห่งจ่ายกระแส อยู่ทางซีกซ้ายประกอบด้วย

สวิทช์ ปิด, เปิด เป็นสวิทช์ที่ใช้ปิด เปิดแห่งจ่ายกระแส

สวิทช์ ซีเล็คเตอร์ เป็นสวิทช์ที่เอาไว้ใช้เลือกขั้วให้กระแส

เวลาใช้งานทุกครั้งให้ลดกระแสลงจนเป็น 0

วอลุ่ม ใช้เพิ่มกระแส ลดกระแส

ขั้วต่อออกเพื่อนำไปใช้งาน

แห่งจ่ายศักย์สูง ประกอบด้วย

สวิทช์ปิด เปิด ใช้ปิด เปิด ส่วนศักย์สูง

ไทม์เมอร์ ใช้ตั้งเวลาการเปิด ปิด

เทอร์มัล เซนเซอร์ ถ้าใช้ให้ต่อที่หลอดกับเทอร์โมสแตท ถ้าไม่ใช้ให้ชอร์ตเอาไว้เสมอ

H.V., heater เป็นส่วนที่ต่อออกใช้งาน

กราวด์ เป็นส่วนที่ต่อองคให้หลอดทุกครั้งเมื่อใช้งาน

การใช้งานทั้งสองส่วนสามารถแยกใช้งานได้พร้อมกัน หรือแยกใช้งานส่วนใดส่วนหนึ่งก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

1. REICH, ORDUNG, KRAUSS, SKALNIK " Microwave Theory and Techniques " D. Van Nostrand Company, INC. Princeton, New Jersey, Toronto, New York, 1953, pp 708-787.
2. ERNEST C. OKRESS " Microwave Power Engineering " Volume 1,2 Academic press, New York and London, 1968.
3. GEORGE R. COLLINS "Microwave magnetrons" McGraw Hill Book Company, INC. New York, Toronto, London. Radiation Laboratory M.I.T. Cambridge 1948.
4. VICTOR F. VELEY PhD "Modern Microwave Technology" ISBN 0-13-595414-2
5. REICH, SKALNIK, ORDUNG, KRAUSS "Microwave principles" D. Van Nostrand company, INC New York 1957 pp 307-350
6. JOHN D. KRAUS "Electromagnetics" Third Edition Mc Graw Hill Book. 1984 pp 162-164
7. "Very High-Frequency Technique" Volume 1. McGraw-Hill Book Company, INC. U.S.A. 1947 pp 473-554