บทที่ 3

วัสดุและวิธีการวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

3.1.1วัสดุที่ใช้สำหรับทำขั้วอิเล็กโทรดและกล่องนำก๊าซมีดังนี้

3.1.1.1 สเตนเลสรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ยาว 15 เซนติเมตร จำนวน 2 แท่ง

3.1.1.2 อะลูมิเนียมเทป 1 ม้วนสำหรับเป็นตัวนำไฟฟ้า

3.1.1.3 สเตนเลสกลวงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร

3.1.1.4 น๊อตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร จำนวน 4 ตัว

3.1.1.5 แผ่นอะคริลิกสำหรับทำเป็นกล่องนำก๊าซไนโตรเจนขนาด

-0.5X2X2 cm^3 จำนวน 2 ชิ้น

-0.5X14X1 cm^3 จำนวน 2 ชิ้น

-0.5X14X2 cm^3 จำนวน 2 ชิ้น

3.1.2 วัสดุที่ใช้สำหรับทำสปาร์คแกป

3.1.2.1 แผ่นอะคริลิกสำหรับทำกล่องกันแสงจากสปาร์คแกปขนาด

-0.5X7X8 cm^3 1 ชิ้น

-0.5X6X7 cm^3 2 ชิ้น

-0.5X7X8 cm^3 2 ชิ้น

-0.5X8X10 cm^3 1 ชิ้น

3.1.2.2 ขั้วทริกเกอร์ทองเหลืองเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร

3.1.2 3. ขั้วของสปาร์คแกปประกอบด้วยน๊อตหมวกจำนวน 2 ตัว และ น๊อตขนาด 10 มิลลิเมตร

3.1.2.4. น๊อตยึดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร จำนวน 8 ตัว

3.1.2.5 เศษแผ่นอะลูมิเนียมบางขนาด 3X3 เซนติเมตร^2 จำนวน 2 ชิ้น

3.1.3 อุปกรณ์ชุดจ่ายไฟแรงสูง

3.1.3.1หม้อแปลงปรับค่าได้ (Variace Transformer) ตั้งแต่ 0-260 โวลท์ กระแส 2.5 แอมแปร์

3.1.3.2 หม้อแปลงนีออน (Neon Transformer) มีแรงดันขาเข้า 230 โวลท์ 50 เฮิรตซ์ แรงดันขาออก 15 กิโลโวลท์ 30 มิลลิแอมแปร์

3.1.3.3 ไดโอด 1N4007 จำนวน 120 ตัว

3.1.3.4 ตัวต้านทาน 10 เมกกะโอห์ม จำนวน120 ตัว

3.1.3.5 ตัวต้านทานแบบ wire wound 300 กิโลโอห์ม 200 วัตต์ ยี่ห้อ IRH 2ตัว

3.1.3.5 ตัวเก็บประจุ 30 กิโลโวลท์ 0.5 ไมโครฟารัด 0.02 ไมโครเฮนรี ยี่ห้อ Maxwell

3.1.4 อุปกรณ์สำหรับควบคุมจังหวะการทำงานของสปาร์คแกป ประกอบด้วยชุดพัลส์แรงต่ำ พัลส์แรงสูง และหม้อแปลงทีวี

พัลส์แรงต่ำ 18 โวลท์

3.1.4.1 เอส ซี อาร์ เบอร์ T106D1 1 ตัว

3.1.4.2 ไดโอดเบอร์ 1N4007 1 ตัว (1kV,1A)

3.1.4.3 ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโทรไลต์เบอร์ 2A104K 2 ตัว

3.1.4.4 ตัวต้านทาน ขนาด 1 เมกกะโอห์ม 2 ตัว 1/4 วัตต์

ขนาด 50 โอห์ม 2 ตัว 1/4 วัตต์

ขนาด 12 โอห์ม 1 ตัว 1/4 วัตต์

3.1.4.5 แบตตารี่ 9 โวลท์ 2 ก้อน

3.1.4.6 สวิตซ์แบบกดติดปล่อยดับ

พัลส์แรงสูง 750 โวลท์

3.1.4.7 เอส ซี อาร์ เบอร์ BTA10 (600 V 4A) 1 ตัว

3.1.4.8 ตัวเก็บประจุ ขนาด 0.47 ไมโครฟารัด แรงดัน1 กิโลโวลท์ 2 ตัว

3.1.4.9 หม้อแปลงแรงดันขาเข้า 200 โวลท์ แรงดันขาออก 500 โวลท์ 1 ตัว

3.1.4.10 ไดโอดเบอร์ 1N4007 2 ตัว

3.1.4.11 ตัวต้านทานขนาด 1 เมกกะโอห์ม 1ตัว 1 วัตต์

ขนาด 50 โอห์ม 1 ตัว 1 วัตต์

3.1.4.12 หม้อแปลงพัลส์ขนาด 1:1 1 ตัว

หม้อแปลงทีวีขนาด 20 กิโลโวลท์

3.1.5 อุปกรณ์อื่น ๆ

3.1.5.1 ตัวเก็บประจุแบบ Doorknob ขนาด 20 กิโลโวลท์ 2.4 นาโนฟารัด 5 ตัว

3.1.5.2 ตัวเก็บประจุแบบโคเอกเซียลขนาด 100 พิโคฟารัด

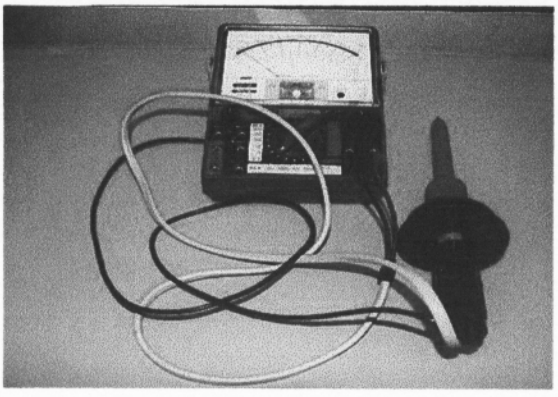
3.1.5.3 แผ่นอะลูมิเนียมขนาด 30X20 ตารางเซนติเมตร สำหรับทำเป็นกราวน์

3.1.5.4 ตัวต้านทาน 1 เมกกะโอห์ม 1 วัตต์ 4 ตัว

3.1.5.5 กาวแท่งสำหรับปืนยิงกาวรุ่น GS-5806

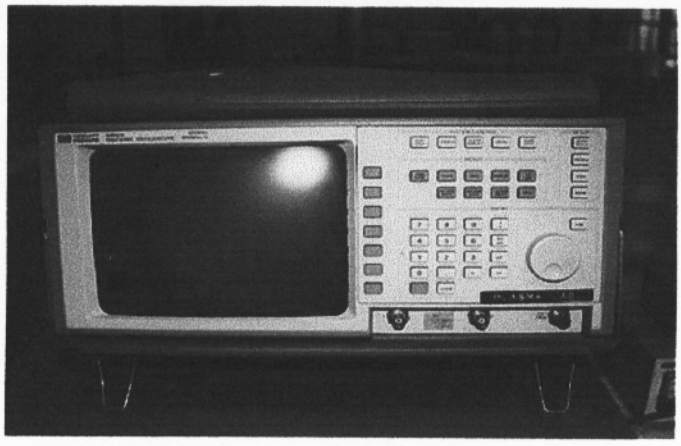
3.1.6 อุปกรณ์ที่เกี่ยวกับเครื่องมือวัด

3.1.6.1 มิเตอร์วัดไฟฟ้าแรงดันสูง (CRT HIGH VOLTAGE PROBE) Model 863 ของบริษัท KAISE COPORATION ดังแสดงในภาพประกอบที่ 16



ภาพประกอบที่ 16 แสดงมิเตอร์วัดไฟฟ้าแรงดันสูง

3.1.6.2 ดิจิตอลออสซิลโลสโคป (Digital Oscilloscope) รุ่น 54502 A ความไว 400 เมกกะแซมเปิ้ลต่อวินาที ความถี่ 400 เมกกะเฮิรตซ์ ดังแสดงในภาพประกอบที่17

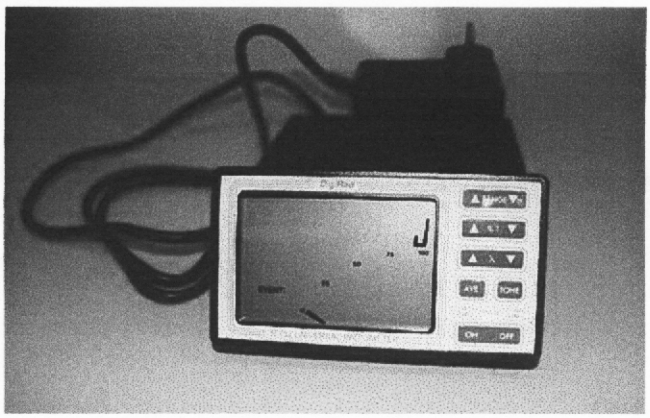


ภาพประกอบที่ 17 แสดงอุปกรณ์เครื่องดิจิตอลออสซิลโลสโคป

3.1.6.3 หัววัดพลังงานแสงเลเซอร์ P-444 และเครื่องวัดพลังงาน R-752 ของบริษัท Terahertz Technology Incooporation ดังแสดงในภาพประกอบที่ 18 และ19

หัววัดพลังงานของแสงจากเลเซอร์ไนโตรเจนสามารถวัดพลังงานได้ในช่วง 10 ไมโครจูลถึง 1จูลตอบสนองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงรังสีอัลตราไวโอเลตถึงรังสีอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่น 350-2,000 นาโนเมตร มีความเร็วในการตอบสนองของสัญญาณที่มีเวลาช่วงขาขึ้นน้อยกว่า 2 นาโนวินาที ภายในหัววัดชนิดนี้จะมีสารพวกเฟอร์โรอิเล็กตริก (Ferro electric) เมื่อมีแสงตกกระทบจะทำให้สารนี้มีอุณหภูมิสูงขึ้นและจะนำกระแส ซึ่งปริมาณกระแสที่เกิดขึ้นนี้จะขึ้นกับอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ภาพประกอบที่ 18 แสดงหัววัดพลังงาน P-444



ภาพประกอบที่ 19 แสดงเครื่องอ่านค่าพลังงาน R-752

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน ของการวิจัยแบ่งตามลำดับดังนี้

3.2.1 การออกแบบและสร้างเลเซอร์ไนโตรเจนแบบกระตุ้นตามขวางที่ความดันบรรยากาศ

3.2.1.1 ขั้วไฟฟ้า

3.2.1.2 ระบบควบคุมการทำงานของสปาร์คแกป

3.2.1.3 ชุดจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง 0-15 กิโลโวลท์

3.2.1.4 ตัวเก็บประจุแบบ Doorknob

3.2.1.5 ระบบเก็บก๊าซไนโตรเจน

3.2.2 ประกอบแต่ละส่วนให้สมบูรณ์โดยการใช้วงจรบล็อกไลน์

3.2.3 ทดสอบการทำงานของระบบ

3.2.4 ศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าพลังงานของเลเซอร์

3.2.4.1 แรงดันไฟฟ้า

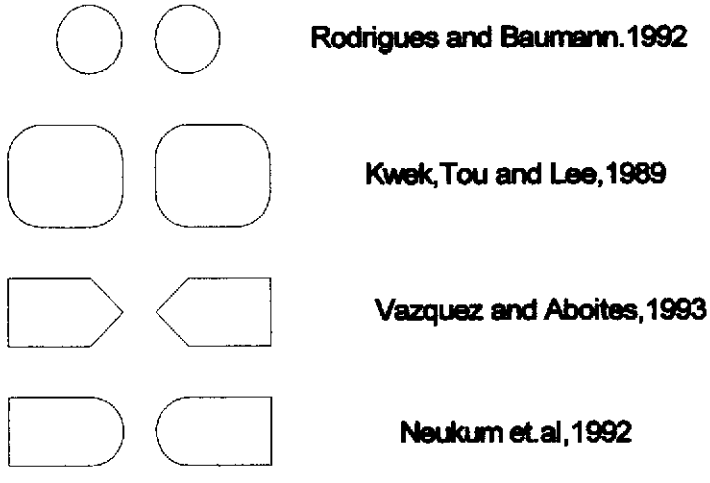
3.2.4.2 อัตราส่วนของตัวเก็บประจุ

3.2.4.3 อัตราการไหลของก๊าซ

ในการออกแบบเลเซอร์ไนโตรเจนที่ความดันบรรยากาศแบบกระตุ้นตามขวาง ในงานวิจัยนี้ได้เปลี่ยนตัวเก็บประจุที่ทำจากอะลูมิเนียมฟอยล์ประกบกับแผ่นอะลูมิเนียมเนียม โดยมีแผ่นไมลาร์อยู่ตรงกลาง ข้อดีคือราคาถูก สร้างง่าย โครงสร้างไม่ซับซ้อน (ยุทธนา, 1989) แต่จะมีค่าความจุไม่แน่นอน และไม่ทนทานต่อไฟฟ้าแรงดันสูง โดยเฉพาะเมื่อทดลองหลายครั้งแล้วบริเวณขอบของอลูมิเนียมฟอยล์ที่ถูกดิสชาร์ตจะมีรอยไหม้ เพื่อเป็นการปรับปรุงจุดนี้จึงเลือกตัวเก็บประจุแบบเซรามิกส์ทนแรงดันสูง (Highvoltage ceramic doorknob capacitor) ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุแบบมาตรฐาน เพื่อให้ระบบมีความทนทาน ความจุมีค่าแน่นอน อีกทั้งยังได้ระบบที่กระทัดรัดขึ้นด้วย

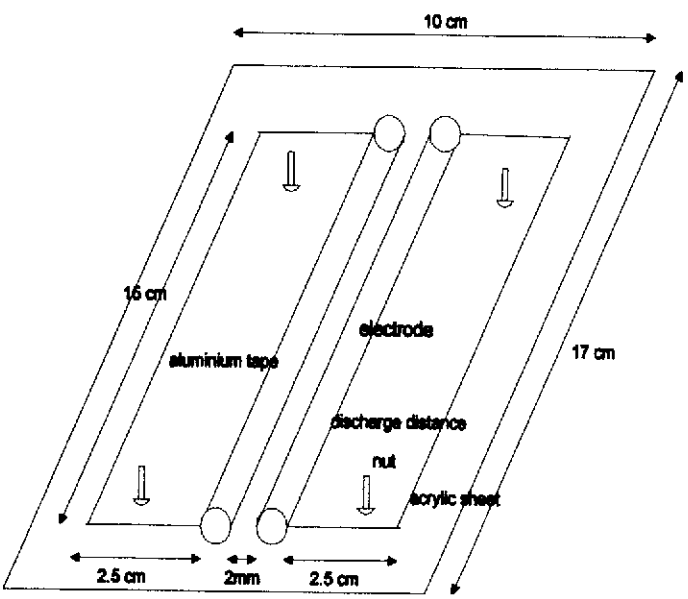
3.2.1.1 **ขั้วไฟฟ้าและช่องเลเซอร์**

วัสดุที่จะนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้า ได้แก่ อะลูมิเนียม สเตนเลส ทองเหลือง เนื่องจากมีความทนทานต่อไฟฟ้าแรงดันสูง รูปร่างของขั้วไฟฟ้าที่ใช้กันมีหลายรูปแบบ เช่น รูปสามเหลี่ยม (Vazquez and Aboites,1993) รูปวงกลม (Rodrigues and Baumann,1992) รูปสี่เหลี่ยม (Kwek ,Tou and Lee, 1989) โดยแต่งขอบให้มน เป็นต้น



ภาพประกอบที่ 20 แสดงขั้วไฟฟ้ารูปแบบต่าง ๆ

รูปแบบขั้วไฟฟ้าทั้งสี่รูปแบบสามารถใช้งานได้ ตามอ้างอิงที่อยู่ด้านซ้ายมือดังภาพประกอบที่ 20 สิ่งที่จะต้องคำนึงถึงก็คือจะต้องทำให้สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วทั้งสองมีความสม่ำเสมอมากที่สุด ดังนั้นระยะห่างที่วางขนานกันจะต้องเท่ากันตลอดแนว และผิวหน้าของขั้วจะต้องมีความเรียบที่สุดเท่าที่จะทำได้ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกขั้วไฟฟ้าแบบวงกลมเพราะทำได้ง่ายที่สุดโดยใช้แท่งสเตนเลสเส้นรูปทรงกระบอกตัน แล้วตัดให้ได้ความยาวที่ต้องการจากนั้นนำไปกลึงให้เรียบร้อยก็จะได้ขั้วไฟฟ้าตามต้องการ ส่วนแบบที่เหลือนั้นจะหาวัสดุได้ยาก นอกจากนี้ยังต้องใช้ฝีมือในการทำอีกด้วยในแบบที่สองนั้นในการกัดให้ได้รูปสี่เหลี่ยมตามต้องการจะไม่ยาก แต่ปัญหาอยู่ที่ว่าในตอนที่จะต้องลบเหลี่ยมนั้นจะต้องลบด้วยกระดาษทรายซึ่งในตอนนี้เองจะทำให้ความสูงต่ำของขั้วไม่เท่ากันเนื่องจากแรงที่ขัดด้วยมือจะไม่เท่ากัน ส่วนแบบที่สามนั้นก็จะยากขึ้นไปอีกเพราะต้องทำให้ปลายแหลมมีความสมมาตร ส่วนแบบสุดท้ายคือแบบที่จะต้องทำให้ผิวเป็นผิวโค้งซึ่งไม่สามารถกัดด้วยเครื่องกัดธรรมดาได้ จะต้องมีเครื่องต้นแบบตัดด้วยลวดไฟฟ้าซึ่งควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ (CNC Controller)ดังนั้นจึงเลือกขั้วไฟฟ้าเป็นแบบรูปวงกลม ที่ทำจากโลหะไร้สนิมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ยาว 15 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพประกอบที่ 21



ภาพประกอบที่ 21 แสดงรูปขั้วไฟฟ้าที่ทำจากสเตนเลส

การหาความยาวของขั้วไฟฟ้าได้ใช้หลักการของคลื่นนิ่ง (ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2)ประมาณค่าความยาวของขั้วไฟฟ้า โดยค่าความยาวนั้นจะเป็นจำนวนเท่าของครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น

จาก $$L=\frac{n\lambda}{2}\text{----------(10)}$$

แทนค่า $n=9x10^5$, เป็นตัวเลขจำนวนเต็มที่ลองกำหนดขึ้น

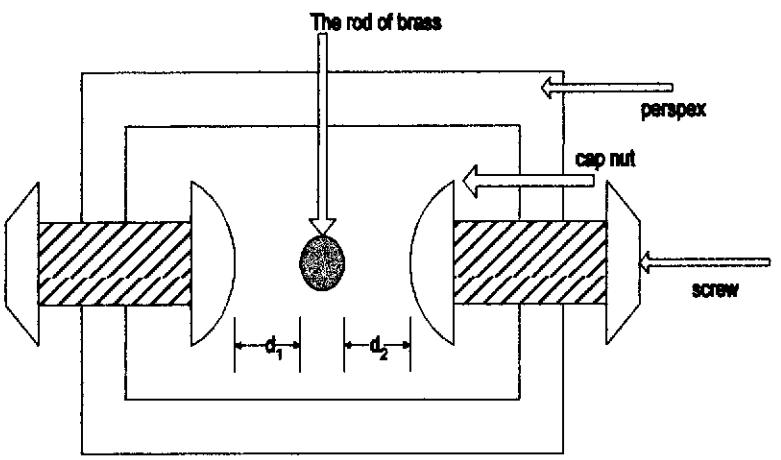
$\lambda=337.1nm$ เป็นค่าความยาวคลื่นของไนโตรเจนเลเซอร์

จะได้ $L=15.1695cm\approx 15cm$

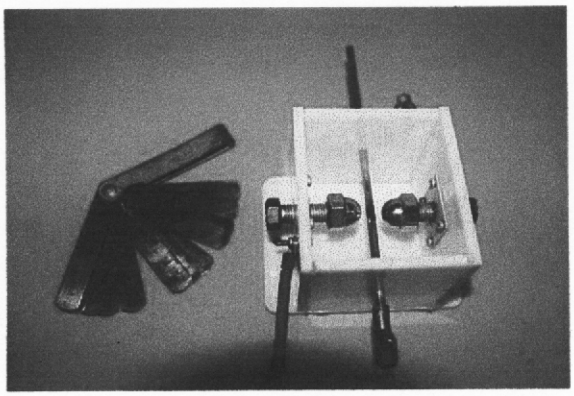
3.2.1.2 ระบบการควบคุมการทำงานของสปาร์คแกป

จากทฤษฎีที่กล่าวในบทที่ 2 ว่า เลเซอร์ไนโตรเจนจะต้องเกิดในลักษณะที่เป็นพัลส์เท่านั้น ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นที่จะต้องมีสปาร์คแกปเพื่อทำหน้าที่ปิดและเปิดในวงจรบลัมไลน์

สปาร์คแกปทำหน้าที่เป็นสวิทช์ควบคุมจังหวะการทำงานของระบบเลเซอร์ไนโตรเจน โดยทั่วๆไป สปาร์คแกปที่ใช้ในงานพัลส์แรงสูงจะต้องมีค่าความเหนี่ยวนำที่ต่ำ เพื่อที่จะให้การส่งผ่านของกระแสได้มาก (Frank, 1976)ในงานวิจัยนี้ได้ทำสปาร์คแกปอย่างง่ายประกอบด้วยขั้ว 3 ขั้ว คือ ขั้วตรงกลาง 1 ขั้วสำหรับทริกเกอร์ทำจากแท่งทองเหลือง และขั้วด้านข้าง 2 ขั้วทำจากน็อตหมวกออกแบบให้สามารถปรับระยะได้ตั้งแต่ 0-10มิลลิเมตร เพื่อที่จะได้หาระยะที่เหมาะสม (d_2:d_1)ได้จากการทดลอง ดังแสดงในภาพประกอบที่ 22 และ 23



ภาพประกอบที่ 22 แสดงระยะ d_2 และ d_1 ของสปาร์คแกป

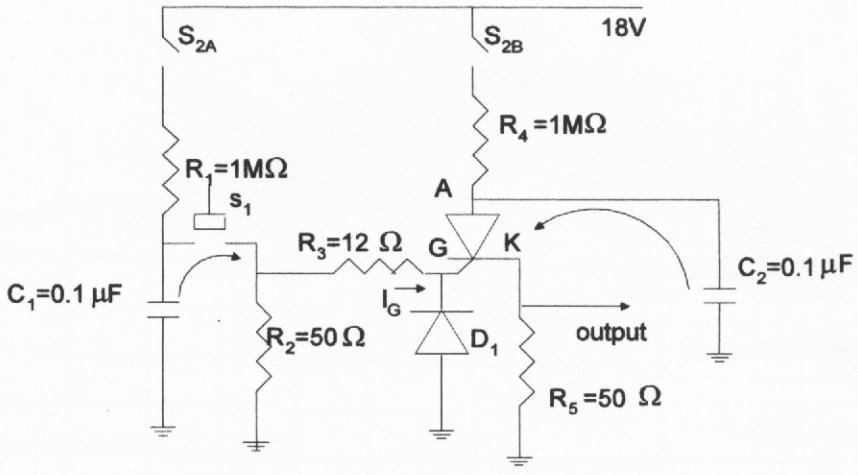


ภาพประกอบที่ 23 แสดงสปาร์คแกปสวิทช์และฟิลเลอร์เกจ

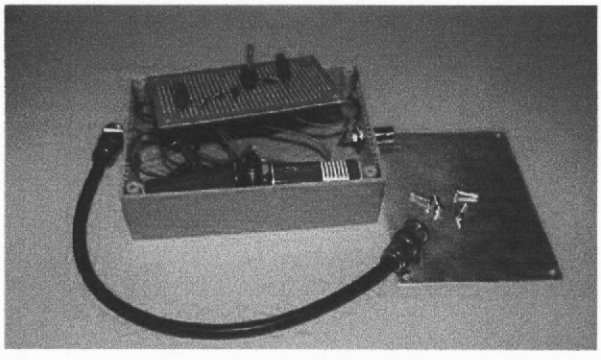
สวิทช์แบบสปาร์คแกปนี้ไม่สามารถปิดเปิดด้วยมือเหมือนสวิทช์ไฟบ้านทั่วๆไปได้ แต่จะต้องปิดด้วยวงจรพัลส์ที่มากระตุ้นการทำงานของสปาร์คแกป อย่างไรก็ตามถ้าปราศจากวงจรพัลส์ที่ใช้สำหรับควบคุมนี้ ระบบเลเซอร์ไนโตรเจนก็ยังคงทำงานได้ แต่ไม่สามารถควบคุมจังหวะการทำงานได้ กล่าวคือระบบจะทำงานไปเรื่อย ๆจนกว่าจะหยุดจ่ายแรงดันไฟฟ้า

วงจรควบคุมจังหวะการทำงานของสปาร์คแกปเป็นแบบควบคุมด้วยมือ (ณรงค์,1989) ประกอบด้วย ชุดไฟแรงดันต่ำ 12 โวลท์ ชุดไฟแรงดันสูง 870 โวลท์ หม้อแปลงทีวี 20 กิโลโวลท์มาต่อกัน ซึ่งมีรายละเอียดการทำงานของแต่ละชุดตามลำดับดังนี้

เมื่อสับสวิทช์ S_{2A} และ S_{2B} จะเกิดกระแสไหลจากแบตเตอรี่ 9 โวลท์ 2 ก้อน ผ่าน R_1 และR_4, มาเก็บยังตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 เมื่อสับสวิทช์ S_1 จะเกิดกระแสไหลผ่านตัว R_2 ซึ่งทำหน้าที่แบ่งแรงดันไปลงกราวน์ และ R_3 มาทริกที่ขาเกทของ SCR ซึ่งในขณะเดียวกัน C_2 ก็คายประจุ ทำให้เกิดการนำกระแสจากขั้วแอโนดไปสู่คาโทดและไหลผ่าน R_5 เกิดแรงดันคร่อม R_5 ส่วน D_1 ทำหน้าที่ป้องกันพัลส์ลบที่เข้ามา ดังแสดงในภาพประกอบที่ 24 และ 25

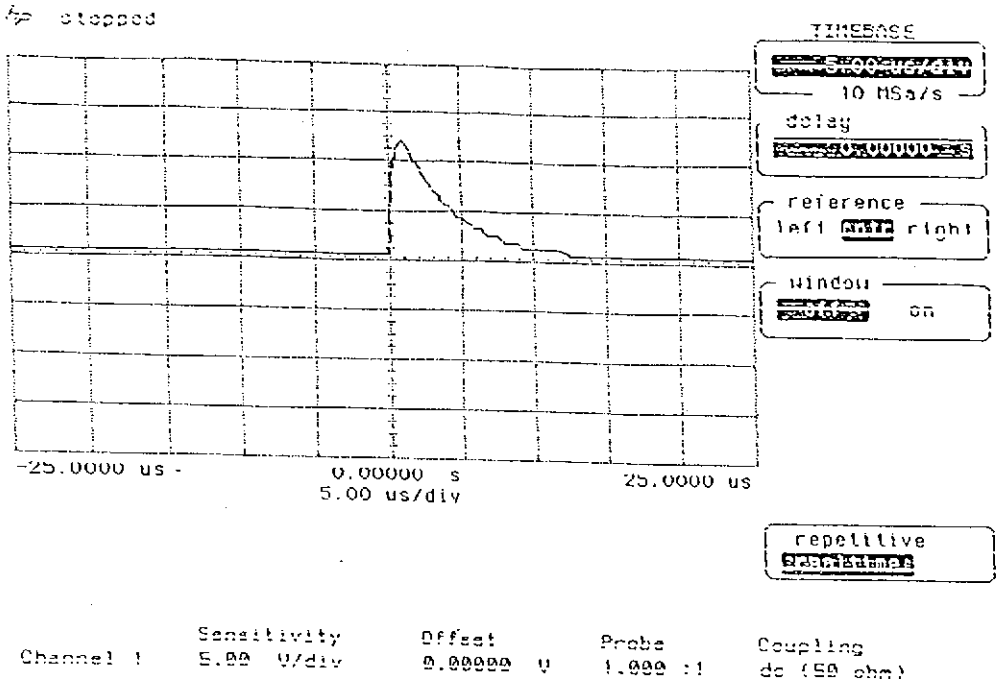


ภาพประกอบที่ 24 แสดงวงจรพัลส์แรงต่ำ (ที่มา : ณรงค์, 1989)



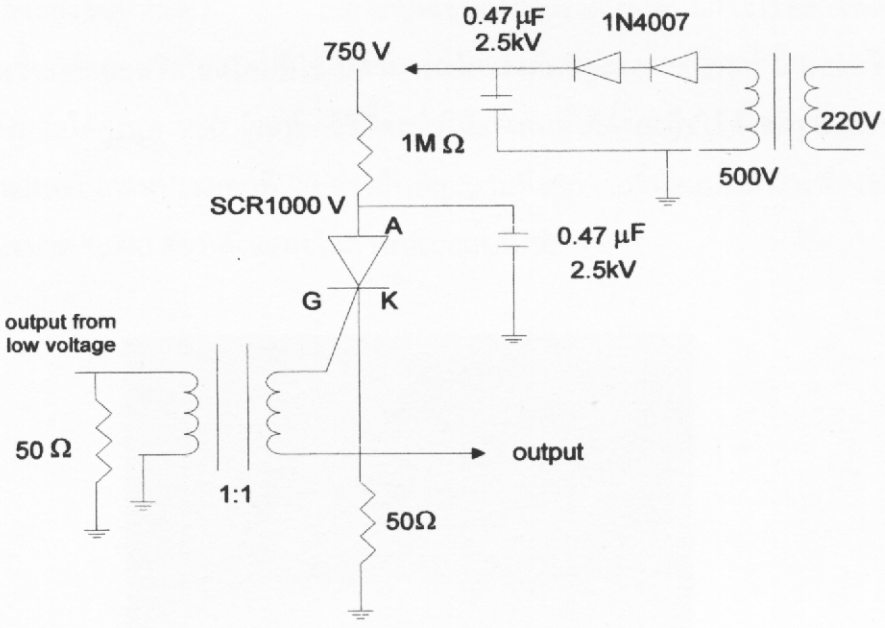
ภาพประกอบที่ 25 แสดงรูปพัลส์แรงต่ำ

เมื่อได้ชุดพัลส์แรงต่ำก็ทดสอบการทำงานโดยการวัดสัญญาณทริกเกอร์ด้วยออสซิลโลสโคป พบว่าได้แรงดัน 12 โวลท์ พัลส์กว้าง 12 ไมโครวินาที และมีช่วงเวลาขาขึ้น (rise time) คิดจากช่วงเวลา10-90 % ของเวลาขาขึ้น ได้ค่าประมาณ 1 ไมโครวินาที ซึ่งแสดงในภาพประกอบที่ 26 พัลส์ที่มีช่วงเวลาขาขึ้นเร็วประมาณ 1 ไมโครวินาทีนี้จะไปทำการทริกเกอร์ชุดพัลส์แรงสูงและชุดหม้อแปลงทีวีทำงานต่อไป

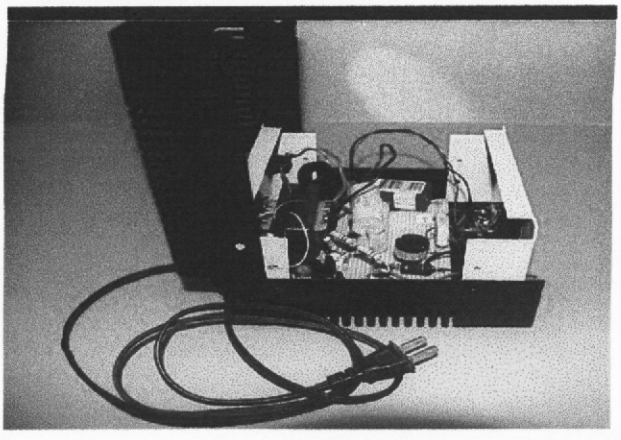


ภาพประกอบที่ 26 แสดงสัญญาณที่ได้ของพัลส์แรงต่ำ

แรงดันไฟฟ้า 12 โวลท์นี้จะถูกแปลงให้สูงขึ้นโดยวงจรในภาพประกอบที่ 27 และ 28 หลักการทำงานยังคงใช้ SCR เหมือนเดิม เมื่อพัลส์ 12 โวลท์จากไฟแรงต่ำมาผ่านหม้อแปลงพัลส์แบบ 1 : 1จะมาทริกที่ขาเกท ซึ่งในช่วงนี้ แรงดันไฟฟ้า 750 โวลท์ที่ได้จากการแปลงแรงดันจากไฟ 220 โวลท์เป็น 500 โวลท์ โดยหม้อแปลงแล้วเรคติไฟล์แบบครึ่งคลื่น (Half wave rectified)โดยไดโอด แล้วฟิลเตอร์ด้วยตัวเก็บประจุ มาคร่อมระหว่างขั้วอาโนดและคาโทด ทำให้เกิดพัลส์คร่อมความต้านทาน 50 โอห์ม

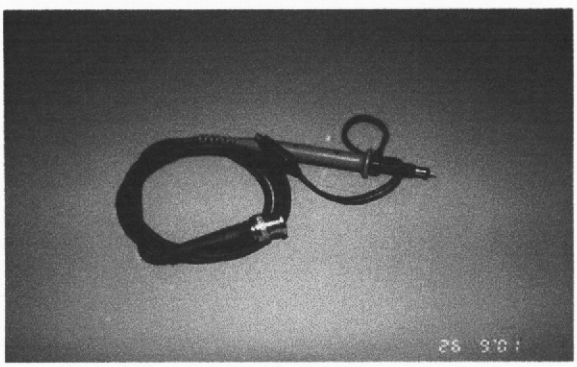


ภาพประกอบที่ 27 แสดงวงจรชุดพัลส์ไฟแรงสูง (ที่มา : ณรงค์, 1989)



ภาพประกอบที่ 28 แสดงรูปพัลส์แรงสูง

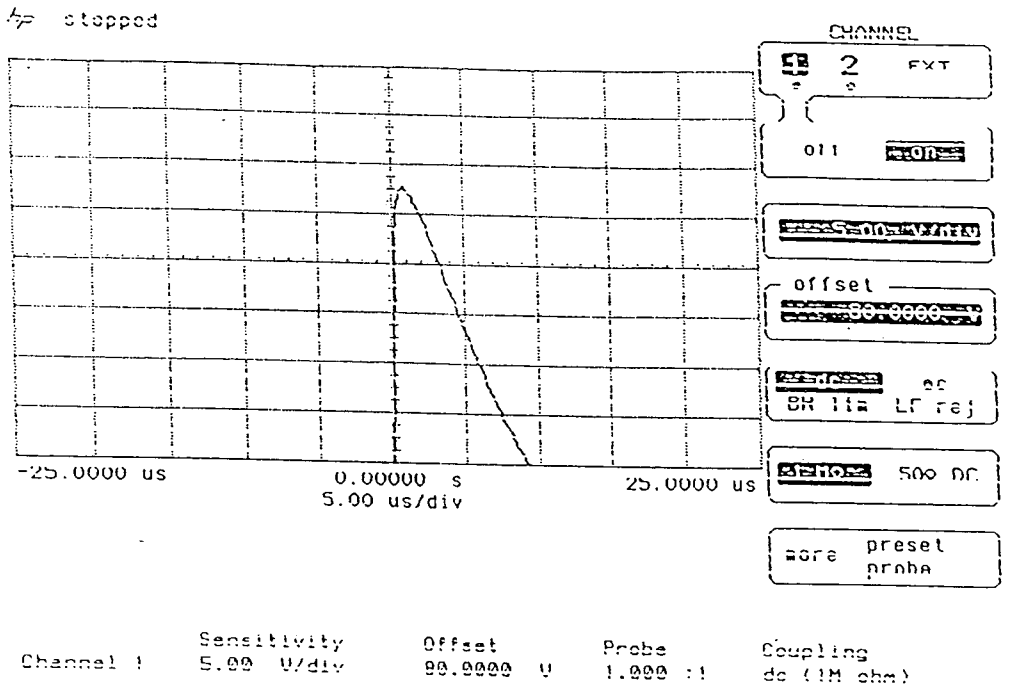
จากวงจรจะเห็นได้ว่าแรงดันไฟเลี้ยงที่ขาแอโนดของ SCR มีค่าประมาณ 750 โวลท์ ดังนั้น แรงดันที่ได้ก็จะสูงขึ้นจากเดิม ในการทดสอบวัดค่าแรงดันที่ได้นั้นก็จะใช้ออสซิลโลสโคปวัด ปัญหาที่เกิดขึ้นก็คือออสซิลโลสโคปที่ใช้ไม่สามารถวัดแรงดันที่สูงถึง 750โวลท์ โดยออสซิลโลสโคปที่ใช้นี้สามารถวัดได้สูงสุด 250 โวลท์ วิธีที่จะทำให้แรงดันที่ได้ต่ำลงคือใช้ตัวลดทอนแรงดันขนาด 10 ต่อ1 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 29 สำหรับสัญญานที่ออกจากหม้อแปลงทีวีจะต้องใช้หัววัดลดทอนแรงดันขนาด 1,000 ต่อ1 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 30



ภาพประกอบที่ 29 แสดงรูปตัวลดทอนแรงดันขนาด 10 ต่อ1

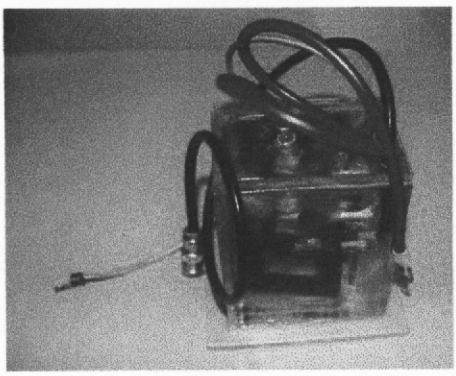
ภาพประกอบที่ 30 แสดงรูปหัววัดลดทอนแรงดัน 1000 ต่อ1

แรงดันที่ได้นี้ประมาณ 870 โวลท์ ความกว้างพัลส์ 9 ไมโครวินาทีดังแสดงในภาพประกอบที่ 31 อย่างไรก็ตามแรงดันไฟฟ้านี้ ยังไม่พอที่จะทำให้สปาร์คแกปทำงาน ดังนั้นจะขยายสัญญานที่ได้นี้ด้วยหม้อแปลงทีวีหรือนอกจากนี้อาจใช้คอยด์ในรถมอเตอร์ไซด์ก็ได้ เพื่อทำให้แรงดันที่ได้สูงในระดับกิโลโวลท์

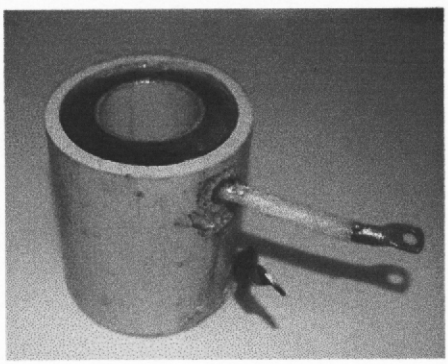


ภาพประกอบที่ 31 แสดงสัญญานของพัลส์แรงสูง

สัญญานที่ออกจากชุดไฟแรงสูง 870 โวลท์ จะถูกแปลงแรงดันให้สูงขึ้นประมาณ 20 กิโลโวลท์ด้วยหม้อแปลงทีวีดังแสดงในภาพประกอบที่ 32 ซึ่งสัญญานที่ออกจากหม้อแปลงทีวีนี้จะไปกระตุ้นให้สปาร์คแกปให้ทำงานต่อไป นอกจากนี้ยังมีตัวเก็บประจุแบบโคเอกเซียลขนาด 100 พิโคฟารัดดังภาพประกอบที่ 33 ต่อไว้เพื่อป้องกันแรงดันย้อนกลับไปสู่หม้อแปลงทีวี (Flyback Transformer) ซึ่งอาจทำให้ขดลวดในหม้อแปลงเสียหายได้

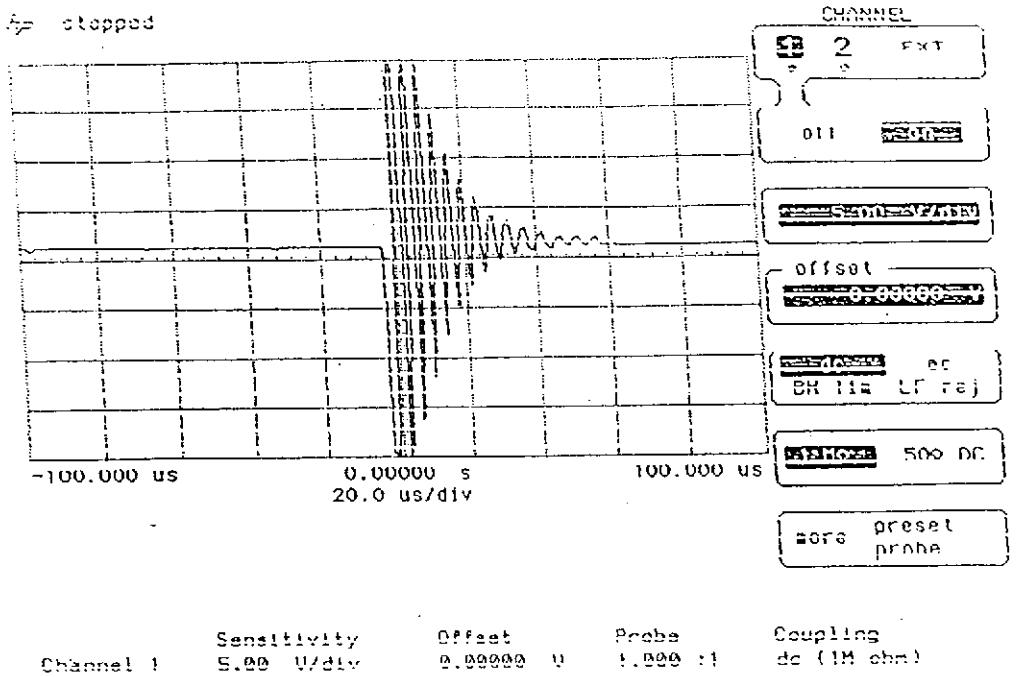


ภาพประกอบที่ 32 แสดงหม้อแปลงทีวีซึ่งใส่ในฉนวนอีพอกซีเรซิน



ภาพประกอบที่ 33 แสดงรูปตัวเก็บประจุที่ทำจากสายโคแอกเซียล

สัญญาณที่ได้ประมาณ 20 กิโลโวลท์ มีการลดแบบหน่วง (damping) เนื่องจากความต้านทานของวงจร RLC ในส่วนของหัววัด ถ้าในหัววัดมีค่าความต้านทานมาก แรงดันก็จะลดลงช้า ถ้าความต้านทานน้อยก็จะลดลงเร็ว ดังแสดงในภาพประกอบที่ 34

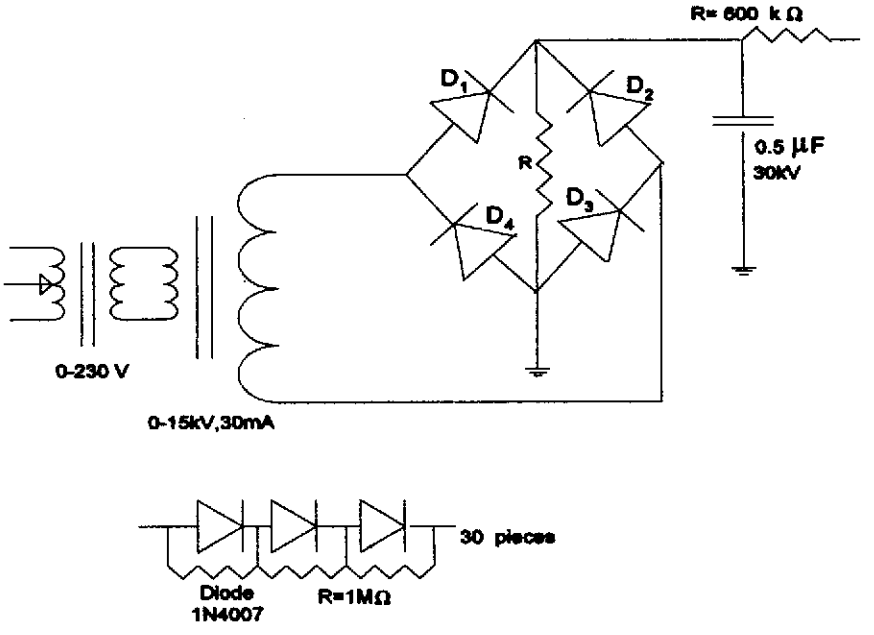


ภาพประกอบที่ 34 แสดงรูปสัญญาณที่วัดได้จากหม้อแปลงทีวี

การทดสอบกับสปาร์คแกปว่าสามารถควบคุมการทำงานได้หรือไม่นั้น ให้นำชุดพัลส์แรงต่ำมาต่อเข้ากับชุดพัลส์แรงสูงและต่อกับหม้อแปลงทีวี แล้วต่อขั้วไฟแรงสูงไปยังสปาร์คแกปที่ขั้วทองเหลืองและต่อขั้วกราวน์เข้ากับขั้วนิอดหมวก จากนั้นลองกดสวิทช์แบบกดติดปล่อยดับของชุดพัลส์แรงต่ำถ้ามีการเกิดการสปาร์คหรือระหว่างขั้วทองเหลืองและนิอดหมวกตามจังหวะที่กด ก็แสดงว่าวงจรควบคุมสปาร์คแกปทำงานได้ ถ้าไม่มีการสปาร์คเกิดขึ้นให้ลองตรวจสอบพวก SCR ในชุดพัลส์แรงสูงว่ายังใช้ได้หรือไม่ เนื่องจากบางครั้ง SCR ได้รับแรงดันหรือกระแสเกิน อาจจะทำให้ขาดได้ สำหรับบางหน่วยงานหรือห้องปฏิบัติการที่ไม่มีออสซิลโลสโคปความไวสูง ก็ไม่จำเป็นจะต้องไปวัดแรงดันของแต่ละชุดก็ได้ ถ้าสามารถทำให้เกิดการสปาร์คระหว่างสปาร์คแกปได้ก็เป็นอันว่าสามารถใช้งานได้

3.2.1.3 ชุดจ่ายไฟแรงดันสูงกระแสตรง

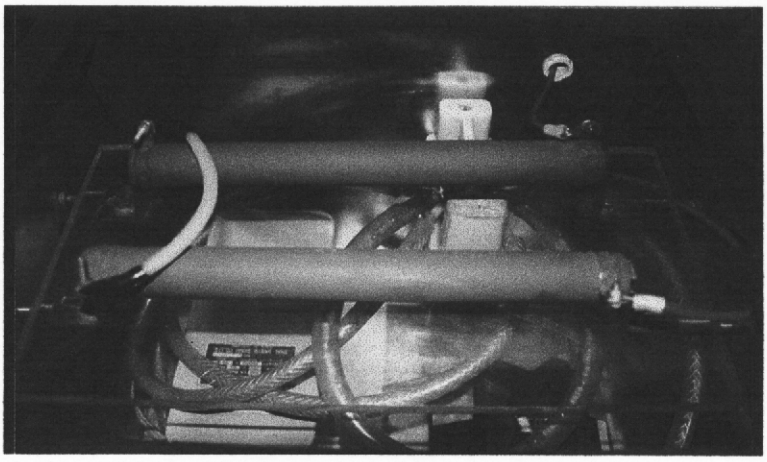
ชุดจ่ายไฟแรงดันสูงเป็นแหล่งจ่ายแรงดันสูงให้กับตัวเก็บประจุ ก่อนที่จะทำให้เกิดเลเซอร์จากการคายประจุของตัวเก็บประจุผ่านโมเลกุลของก๊าซไนโตรเจน วงจรไฟฟ้าแรงสูงที่นิยมใช้กัน เช่น วงจรฮาฟเวฟ(Half wave) ,วงจรฟูลเวฟ (Full wave) ,วงจรบริจด์ (Bridge) และวงจรทวีแรงดัน (Multiple)เป็นต้น ในที่นี้ได้เลือกวงจรแรงสูงแบบบริจด์เนื่องจากได้แรงดันสูงกว่าแบบฮาฟเวฟและมีค่าการกระเพื่อมของแรงดันน้อยกว่า ส่วนวงจรฟูลเวฟจะต้องใช้หม้อแปลงที่มีเซนเตอร์เทป และวงจรทวีแรงดันก็ต้องใช้ตัวเก็บประจุหลายตัว ดังนั้นเพื่อให้สอดคล้องกับอุปกรณ์ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการจึงสร้างวงจรบริจด์ขึ้นมาดังแสดงในภาพประกอบที่ 35 และ 36 ส่วนภาพประกอบที่ 37-40 เป็นอุปกรณ์ในชุดไฟฟ้าแรงสูง และภาพประกอบที่ 41 เป็นระบบ dumping เพื่อทำการคายประจุออกให้หมด



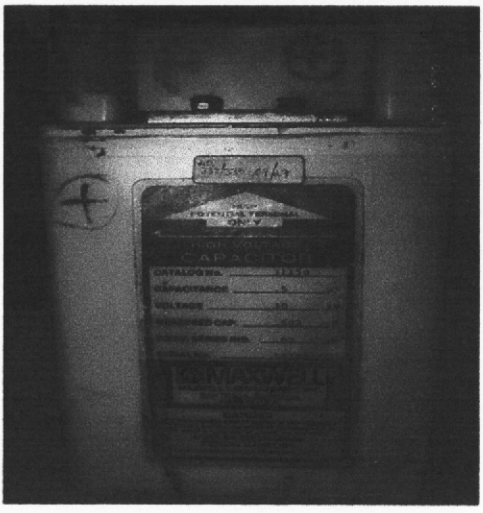
ภาพประกอบที่ 35 แสดงวงจรชุดจ่ายไฟแรงสูง

หลักการทำงานคือเมื่อจ่ายไฟ 220 โวลท์เข้าที่หม้อแปลงปรับค่าได้ตั้งแต่ 0-230 โวลท์ แรงดันนี้จะถูกแปลงให้สูงขึ้นโดยหม้อแปลงนีออนได้ค่าตั้งแต่ 0-15 กิโลโวลท์ ไดโอด D_1-D_4 จะทำหน้าที่เรียงกระแสโดยเปลี่ยนจากกระแสสลับเป็นกระแสตรง ตัวเก็บประจุจะทำหน้าที่กรองแรงดันให้เรียบขึ้น แรงดันที่ได้นี้จะถูกจำกัดโดย ตัวต้านทานแบบ wire wound 600 กิโลโอห์ม ซึ่งทนความร้อนได้สูง

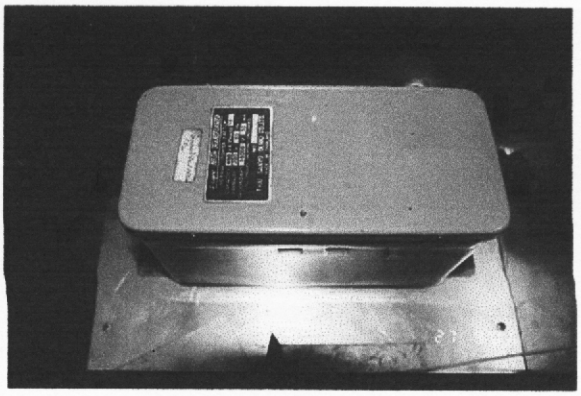
ในการสร้างไดโอด D_1-D_4 ได้ใช้ ไดโอดเบอร์ 1N4007 1 กิโลโวลท์ 1 แอมแปร์ต่ออนุกรมกัน จำนวน30 ตัว เพื่อเพิ่มแรงดันให้ได้ 30 กิโลโวลท์ สำหรับป้องกันแรงดันย้อนกลับตอนตัวเก็บประจุคายประจุไว้ 2 เท่า และจะมีตัวต้านทานขนาด 1 เมกกะโอห์มต่อขนานไว้เพื่อไม่ให้ไดโอดแต่และตัวได้รับกระแสมากเกินไป ไดโอดจะถูกใส่ไว้ในท่อพลาสติกเพื่อป้องกันการอาร์ค



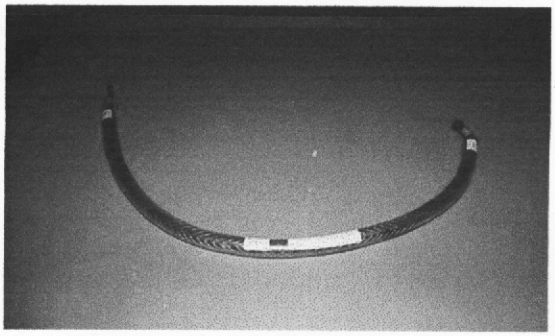
ภาพประกอบที่ 36 แสดงรูปชุดจ่ายไฟแรงสูง



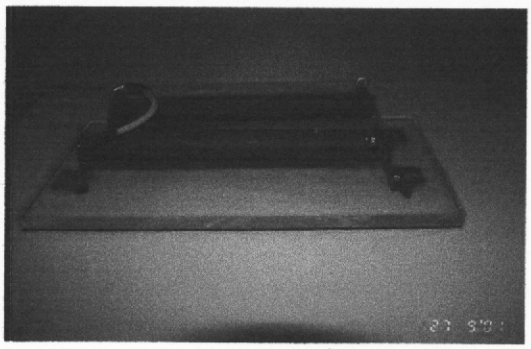
ภาพประกอบที่ 37 แสดงตัวเก็บประจุ



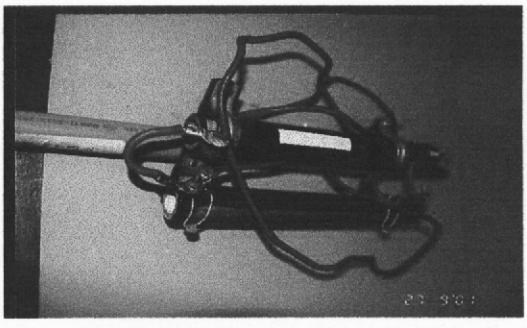
ภาพประกอบที่ 38 แสดงหม้อแปลงนีออน



ภาพประกอบที่ 39 แสดงการต่อไดโอดทนไฟแรงสูง

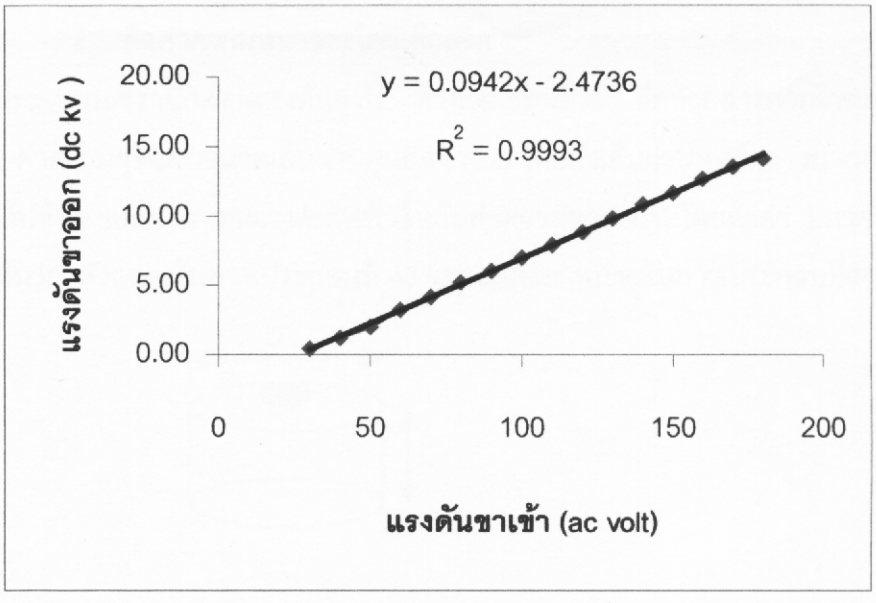


ภาพประกอบที่ 40 แสดงตัวต้านทานแบบ wire wound



ภาพประกอบที่ 41 แสดงระบบdumping เพื่อทำให้เกิดการคายประจุ

ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาเข้าและแรงดันขาออก แสดงในภาพประกอบที่ 42 จะเห็นว่ากราฟไม่ได้ผ่านจุดเริ่มต้น แสดงว่าตัวหม้อแปลงปรับค่าได้นี้มีค่าความผิดพลาดของแรงดันขาเข้า คือไม่ได้ปรับตัวหมุนของหม้อแปลงก็มีแรงดันแล้ว ซึ่งเกิดจากขดลวดเสื่อม ดังนั้นสเกลหน้าปัดไม่ตรงกับค่าจริง อย่างไรก็ตามยังสามารถใช้งานได้



ภาพประกอบที่ 42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาเข้าและแรงดันขาออก

3.2.1.4. ตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุมีหน้าที่สะสมพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูง เพื่อที่จะคายประจุผ่านโมเลกุลของก๊าซไนโตรเจน ตัวเก็บประจุที่ใช้สำหรับระบบไนโตรเจนเลเซอร์โดยมากมักจะใช้แบบแผ่นขนานเนื่องจากมีราคาถูก ค่าความเหนี่ยวนำต่ำ เช่น ตัวเก็บประจุที่ทำจากแผ่นไมลาร์ประกบกับแผ่นอะลูมิเนียมฟอยด์ 2 แผ่น (Kwek ,Tou and Lee,1989) หรือทำจากแผ่นพรินทองแดง 2 หน้า (Ernest,1977)เป็นต้น แต่มีข้อเสียคือค่าความจุจะไม่แน่นอน เพื่อเป็นการปรับปรุงจุดนี้จึงใช้ตัวเก็บประจุแบบเซรามิกส์ทนแรงดันสูง ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุแบบมาตรฐานเนื่องจากมีค่าความจุที่แน่นอนและขนาดเล็กอีกทั้งยังทนทานกว่าแบบแผ่นขนานที่ทำขึ้นเอง

โดยทั่วไปค่าความจุของตัวเก็บประจุจะเป็นไปตามสมการ

$$C = \frac{\varepsilon A}{d} \text{----------} (11)$$

เมื่อ

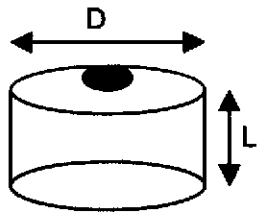
C คือค่าความจุของตัวเก็บประจุ

ε คือค่ายอมให้สนามไฟฟ้าผ่านได้ของไดอิเล็กตริก

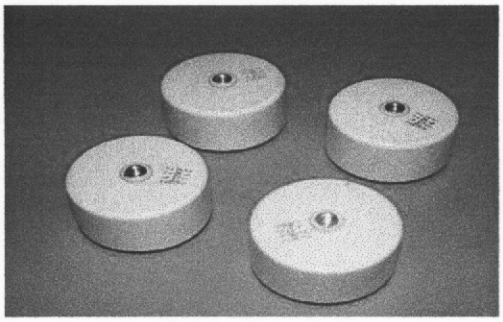
A คือค่าพื้นที่หน้าตัด

d คือค่าความหนาของไดอิเล็กตริก

ตัวเก็บประจุแบบเซรามิกส์ทนแรงดันสูงนี้ ทำด้วยเซรามิกส์ ยึดด้วยสารพวกอิพอกซีเรซิน (Epoxy resin) ค่าความจุขึ้นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D โดยถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางมากค่าความจุก็จะมากตามไปด้วย และอัตราทนแรงดันไฟฟ้าขึ้นกับค่าความยาว L โดยถ้าค่า Lมากก็จะทนแรงดันไฟฟ้าได้มาก ดังแสดงในภาพประกอบที่ 43 และแสดงภาพถ่ายในภาพประกอบที่44



ภาพประกอบที่ 43 แสดงเส้นผ่านศูนย์กลาง D และความยาว L



ภาพประกอบที่ 44 แสดงรูปตัวเก็บประจุแบบ Doorknob

ผลการวัดค่าตัวเก็บประจุด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่มีค่าละเอียดที่สุดเป็น 0.1นาโนฟารัด ได้ค่าความจุ เป็น 2.2 นาโนฟารัด ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าจริงคือ 2.4 นาโนฟารัด ในทางปฏิบัติถ้าต้องการค่าความจุเพิ่มขึ้นก็สามารถนำตัวเก็บประจุมาต่อขนานกัน ซึ่งจะทำให้ค่าความจุที่ได้เพิ่มเป็นจำนวนเท่าของความจุเดิม เมื่อค่าความจุแต่ละตัวมีค่าเท่ากัน เป็นไปตามสมการที่13

$$C_{total} = C_1 + C_2 + C_3 + ...C_n \text{ ----------(12)}$$

$$C_{total} = nC, C_1 = C_2 = C_3 = C_n \text{ ----------(13)}$$

3.1.2.5. ระบบจ่ายก๊าซไนโตรเจน

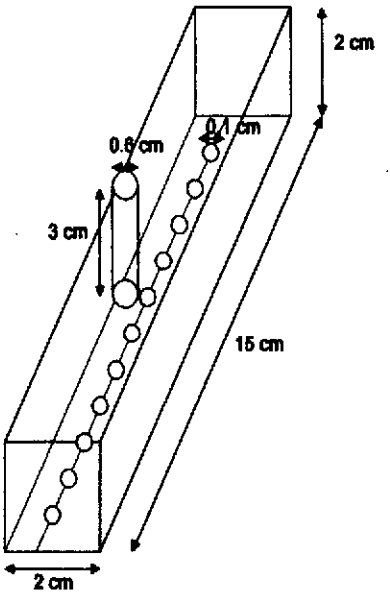
3.1.2.5.1. ถังก๊าซไนโตรเจนความดัน 2000 ปอนด์/ตร.นิ้ว

3.1.2.5.2 มิเตอร์วัดอัตราการไหลของก๊าซ วัดค่าได้ตั้งแต่ 0-15 ลิตร/วินาที

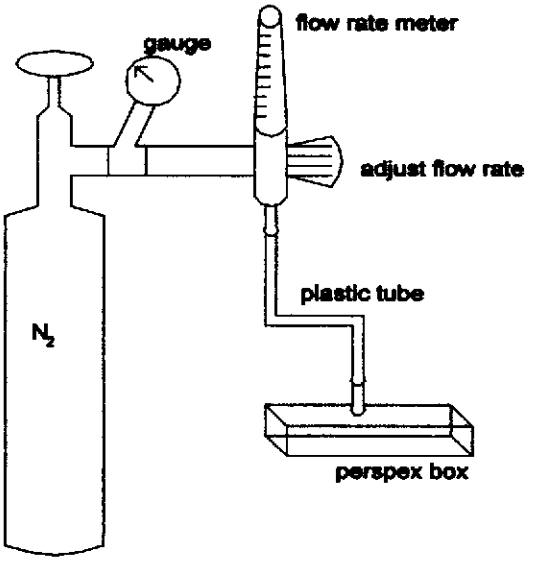
3.1.2.5.3 สายยางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 6 มิลลิเมตร

3.1.2.5.4 ก๊าซไนโตรเจนมีความบริสุทธิ์ 99.99 %

3.1.2.5.5 กล่องนำก๊าซไนโตรเจนเข้าสู่ช่องเลเซอร์ ดังภาพประกอบที่ 45 และระบบการจ่ายก๊าซแสดงในภาพประกอบที่ 46



ภาพประกอบที่ 45 แสดงรูปกล่องเก็บก๊าซ



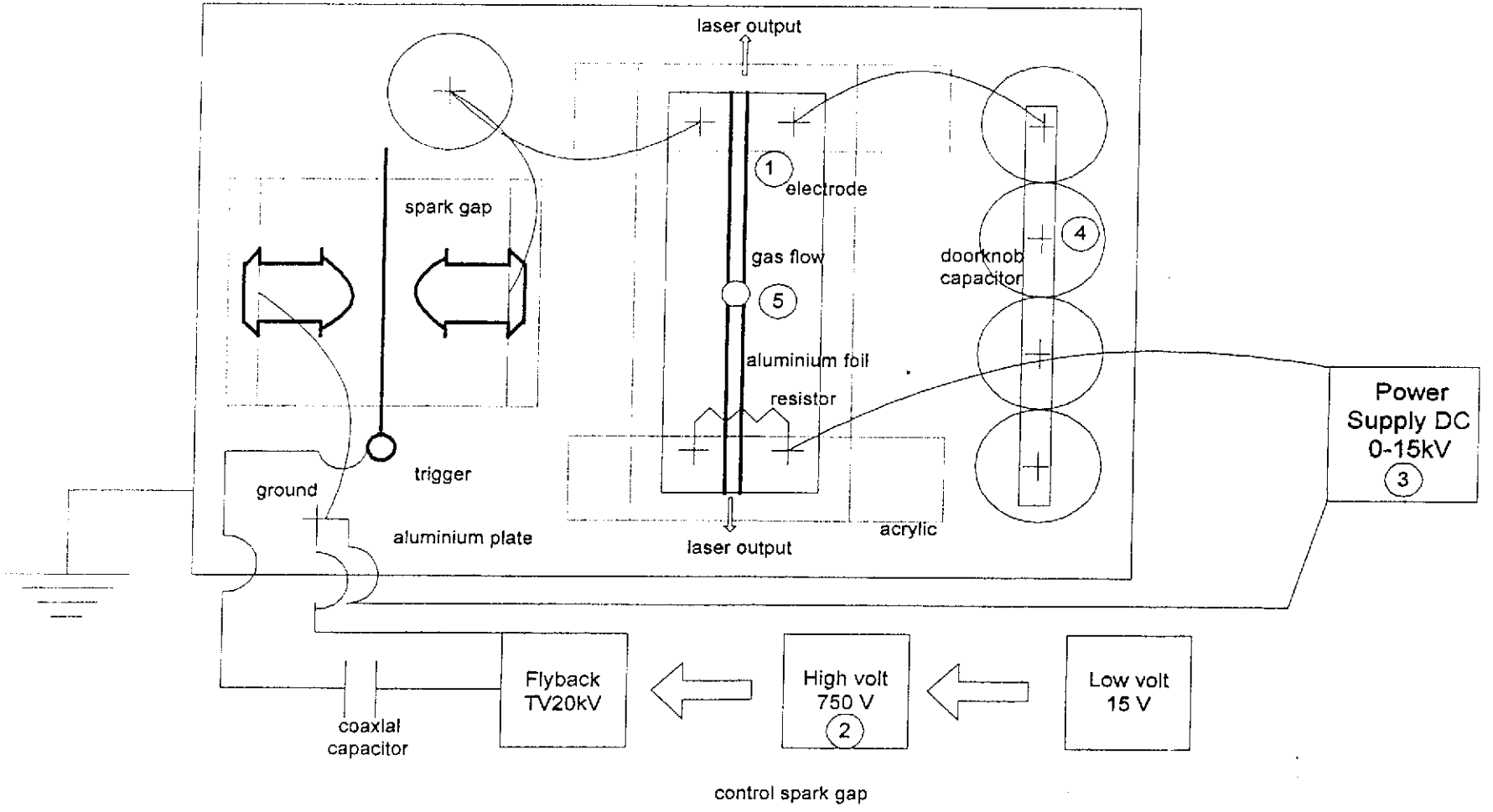
ภาพประกอบที่ 46 แสดงการจ่ายก๊าซไนโตรเจน

3.2.2 ประกอบแต่ละส่วนให้สมบูรณ์โดยการใช้วงจรบลัมไลน์

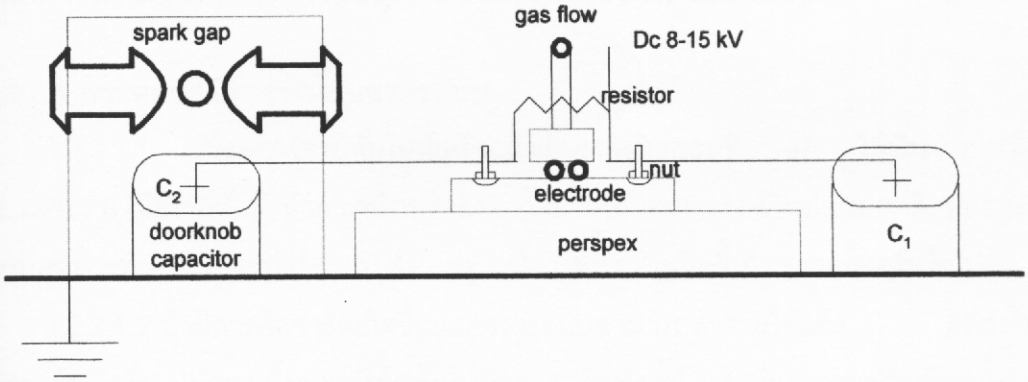
การที่จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ประชากรผกผันระหว่างระดับพลังงานที่ |4>และ |3> จะต้องใช้วงจรกระตุ้นที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำมากๆ วงจรที่มีลักษณะเช่นนี้ ได้แก่ วงจรส่งผ่านพลังงานโดยตัวเก็บประจุ(Capacitor charge transfer circuit), (Rickwood K.R,1986) วงจรบลัมไลน์ (Blumlein circuit) (Rodrigues and Baumann, 1992) เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกวงจรบลัมไลน์เป็นวงจรในการกระตุ้นเลเซอร์ไนโตรเจน เพราะเป็นวงจรที่นิยมใช้กันมากที่สุดและสร้างได้ง่าย

เมื่อสร้างส่วนต่าง ๆของเลเซอร์ไนโตรเจนสำเร็จแล้ว ก็นำมาประกอบเข้าด้วยกันตามวงจรบลัมไลน์จะได้ดังภาพประกอบที่ 47 และ 48

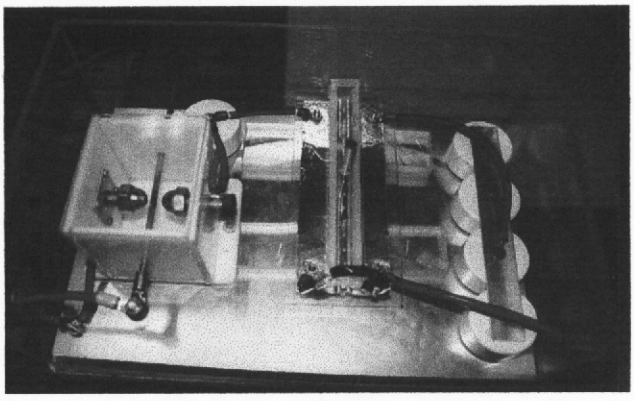


ภาพประกอบที่ 47 แสดงระบบของ เลเซอร์ ไนโตรเจนเมื่อมองด้านบน



ภาพประกอบที่ 48 ระบบของเลเซอร์ไนโตรเจนเมื่อมองด้านข้าง

ภาพถ่ายชุดเลเซอร์ไนโตรเจนถูกแสดงในภาพประกอบที่ 49 เมื่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง 8-15 กิโลโวลท์ผ่านตัวต้านทาน 1 เมกกะโอห์ม ตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 จะถูกเก็บประจุจนเต็ม ช่วงนี้ยังไม่เกิดความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด เมื่อสปาร์คแกปทำงานโดยการกระตุ้นจากวงจรพัลส์ ทำให้ตัวเก็บประจุ C_2 คายประจุอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด(ช่องเลเซอร์) ในสภาวะเหมาะสมเมื่อปล่อยก๊าซไนโตรเจนสู่ช่องเลเซอร์ โมเลกุลของไนโตรเจนจะถูกกระตุ้นจนสามารถปลดปล่อยเป็นแสงเลเซอร์ออกมาได้



ภาพประกอบที่ 49 แสดงรูปของเลเซอร์ไนไตรเจนที่ความดันบรรยากาศ

3.2.3 การทดสอบการทำงานของระบบและการตรวจวัดแสงเลเซอร์

3.2.3.1 การทดสอบการทำงานของระบบ

3.2.3.1.1 เมื่อต่อวงจรบลัมไลน์เสร็จแล้วดังภาพประกอบที่ 47 ให้เริ่มจ่ายไฟที่แรงดันประมาณ 8 กิโลโวลท์แล้วทำการทริกหรือยิง(trig or fire)โดยการกดสวิทย์แบบกดติดปล่อยดับที่ชุดควบคุมการทำงานของสปาร์คแกป สังเกตดูว่ามีการดิสชาร์ตเกิดขึ้นในช่องเลเซอร์หรือไม่

3.2.3.1.2 ถ้ามีการดิสชาร์ตเกิดขึ้นแสดงว่าระบบสามารถทำงานได้แล้ว แต่ถ้าไม่มีการดิสชาร์ตเกิดขึ้น ให้ลองเพิ่มแรงดันไฟฟ้าไปทีละ 1 กิโลโวลท์ แล้วทำการกดสวิทย์อีกครั้ง ถ้าไม่มีการดิสชาร์ตเกิดขึ้นให้ปรับหม้อแปลงปรับค่าได้มาที่สเกลศูนย์ แล้วปิดสวิทช์เครื่องจ่ายไฟแรงสูง รวมทั้งถอดปลั๊กออกให้หมด จากนั้นทำการคายประจุในชุดจ่ายไฟแรงสูงออกให้หมดเสียก่อน โดยใช้ระบบ dump

3.2.3.1.3 ทำการปรับระยะของสปาร์คแกปโดยค่อย ๆลดระยะห่างทีละ 1 มิลลิเมตร แล้วลองจ่ายไฟดูใหม่ ถ้ายังไม่เกิดการดิสชาร์ตก็ค่อย ๆลดระยะของสปาร์คแกปไปเรื่อยๆจนกว่าจะเกิดการดิสชาร์ต

3.2.3.1.4 ถ้าได้ยินเสียงอิสซีซึ่งก็คือการเกิดโคโรนาดิสชาร์ต(corona discharge)นั่นเอง ให้ปิดไฟเพื่อให้ห้องมืดจะได้สังเกตเห็นว่าบริเวณไหนเกิดโคโรนา จากนั้นให้หาฉนวนมากั้นไว้เพื่อลดการสูญเสียพลังงาน

3.2.3.2 การตรวจวัดแสงเลเซอร์

การตรวจวัดแสงเลเซอร์นี้มีความยากลำบากมาก ในการตรวจเนื่องจากแสงที่ออกมานั้นไม่ได้เป็นแสงในลักษณะที่ต่อเนื่องอย่างแสงเลเซอร์ชนิดอื่น ยิ่งกว่านั้นแสงที่ให้ออกมาก็เป็นแสงที่อยู่ในช่วงรังสีอัลตราไวโอเลตซึ่งหากมองด้วยตาเปล่าก็ไม่เห็น แม้ว่าการตรวจสอบจะยากแต่ก็พอมีวิธีที่จะพอทดสอบได้อยู่บ้าง การทดสอบควรทำในห้องมืดเพื่อมิให้แสงจากภายนอกมารบกวน

3.2.3.2.1.การใช้กระดาษขาวหรือกระดาษพิมพ์งาน A4 มารับแสงหน้าช่องเลเซอร์ จะสังเกตเห็นจุดสีน้ำเงินม่วงโดยมีจุดสว่างจ้าอยู่ตรงกลางที่กระดาษ และจะเห็นจุดนี้ใหญ่ขึ้นเมื่อเลื่อนกระดาษขาวนี้ออกไป อย่างไรก็ตามเนื่องจากแสงที่ได้จากเลเซอร์ไนโตรเจนนั้นเป็นแสงที่อยู่ในช่วงรังสีอัลตราไวโอเลต ซึ่งตามนุษย์เราไม่สามารถเห็นได้ ดังนั้นทำให้วิธีการตรวจวัดลักษณะนี้ไม่ค่อยที่จะถูกหลักวิทยาศาสตร์เท่าไหร่ แต่ก็ยังเป็นที่นิยมเนื่องจากง่ายในการตรวจสอบ

3.2.3.2.2 การใช้สารละลายเคมีที่สามารถตอบสนองต่อรังสีอัลตราไวโอเลตได้ สารที่สามารถตอบสนองได้ เช่น การใช้สาร 2,5 -PPO diphynyloxzazole ละลายใน Tolueneซึ่งเป็นตัวทำละลาย วิธีการทดสอบว่าสารละลายนี้ตอบสนองต่อรังสีอัลตราไวโอเลตหรือไม่ ให้นำสารละลายนี้ไปหยดลงบนแผ่นโครมาโตรกราฟแล้วนำไปส่องด้วยเครื่องฉายรังสีอัลตราไวโอเลต จะปรากฏเห็นสีน้ำเงินม่วงในบริเวณที่หยดสารละลาย ส่วนบริเวณที่ไม่ถูกหยดก็จะไม่เห็น เมื่อทราบว่าสารละลายนี้สามารถใช้ได้แล้วก็นำสารละลายนี้ไปใส่ในขวดแก้วแล้ววางไว้หน้าช่องเลเซอร์ โดยจัดให้ตรงกับแนวแสงที่ออกมาดูว่าเห็นสีม่วงที่ขวดแก้วหรือไม่ ถ้าเห็นสีม่วงก็แสดงว่ามีรังสีอัลตราไวโอเลตออกมา การตรวจวิธีนี้ถูกหลักวิทยาศาสตร์มากกว่าวิธีตรวจวัดด้วยกระดาษเพราะเป็นการทดสอบรังสีอัลตราไวโอเลตด้วย แต่ก็ยังนับว่าเป็นวิธีที่หยาบเนื่องจากไม่ทราบว่ารังสีอัลตราไวโอเลตที่ได้นั้นมากหรือน้อย

3.2.3.2.3 การตรวจวัดพัลส์ของแสงโดยใช้หัววัดซิลิคอน FDS010 ซึ่งสามารถตอบสนองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงรังสีอัลตราไวโอเลตได้ และมีช่วงเวลาขาขึ้นน้อยกว่า 1 นาโนวินาที ต่อเข้ากับออสซิลโลสโคปความเร็วสูง 500 MHz เพื่อดูว่าพัลส์ของแสงที่เกิดอยู่ในช่วงเวลาของการเกิดแสงเลเซอร์หรือไม่ วิธีนี้เป็นวิธีที่มาตรฐานที่ใช้กันทั่วไป แต่สำหรับห้องปฏิบัติการที่มีงบประมาณจำกัดไม่สามารถใช้วิธีนี้ได้เนื่องจากราคาออสซิลโลสโคปค่อนข้างสูง

3.2.3.24. การวัดค่าความยาวคลื่นแสงด้วยสเปคโตรมิเตอร์ที่สามารถวัดแสงแบบพัลส์ได้ วิธีนี้ก็ต้องอาศัยเครื่องมือที่ราคาแพงเช่นกัน แต่ถ้าไม่มีเครื่องมือนี้ก็สามารถทดสอบอย่างหยาบได้ คือการใช้เกรติง (grating) การวัดด้วยวิธีการนี้ใช้หลักการเลี้ยวเบนและแทรกสอดของแสง ดังภาพประกอบที่ 50 โดยเมื่อแสงผ่านเกรติงจะเกิดการเลี้ยวเบนแล้วไปแทรกสอดเกิดแถบสว่างตรงกลางและมืดบนฉากสลับกันไป ทำให้สามารถคำนวณค่าความยาวคลื่นของแสงได้ตามสมการที่ 14

$$d\frac{X}{L} = n\lambda \text{----------(14)}$$

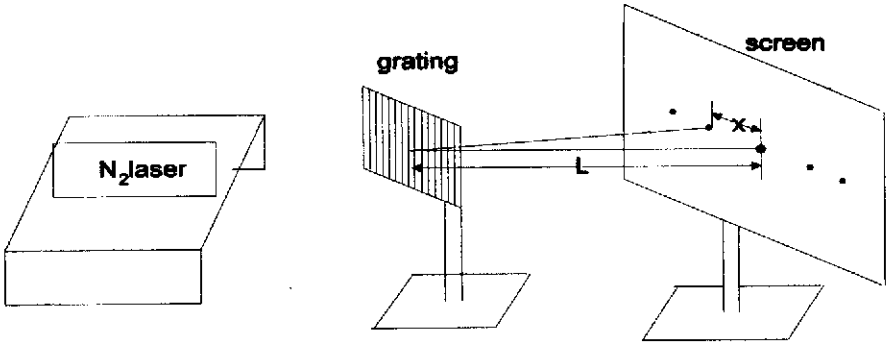
เมื่อ d คือระยะห่างของช่องในเกรติง

X คือระยะห่างของแถบสว่างที่อยู่ติดกัน

L คือคือระยะห่างจากระนาบของเกรติงถึงฉาก

n คือเลขจำนวนเต็ม 1,2,3....

λ คือความยาวคลื่น



ภาพประกอบที่ 50 วิธีการจัดชุดทดลองวัดความยาวคลื่น

วิธีนี้ดูง่ายแต่ก็จะมีปัญหาในการวัด เนื่องจากแสงที่ปรากฏบนฉากเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงไม่สามารถที่จะกำหนดจุดได้ทัน ดังนั้นจะต้องประมาณจุดเอาแล้วทำแบบเฉลี่ย นอกจากนี้ปัญหาที่เกิดขึ้นอีกคือแสงที่เกิดจากการดิสชาร์ตในช่องเลเซอร์แต่ละครั้งนั้นไม่ได้ออกมาเฉพาะแสงอัลตราไวโอเลตอย่างเดียวเท่านั้นแต่จะมีแสงในย่านที่ตามองเห็นออกมาด้วย ดังนั้นเมื่อนำแสงนี้มาผ่านเกรติงก็จะไม่สามารถเห็นเป็นสีเดียวหรือค่าความถี่เดียวร้อยเปอร์เซ็นต์ และอาจมีข้อโต้แย้งที่ว่าการวัดค่าความยาวคลื่นนั้นไม่ได้บอกว่าเป็นการปลดปล่อยด้วยตัวเอง (spontaneous emission)หรือ ปลดปล่อยโดยการกระตุ้น(stimulated emission) ผู้วิจัยได้ทดลองโดยวิธีนี้แล้วแต่ผลการทดลองไม่ชัดเจนและตำแหน่งที่เกิดการเลี้ยวเบนก็ไม่แน่นอน ในการทดสอบผู้วิจัยทำเฉพาะวิธีตรวจสอบด้วยกระดาษขาวเท่านั้นเนื่องจากมีข้อจำกัดของอุปกรณ์

3.2.4 ศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าพลังงานของเลเซอร์

พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อค่าพลังงานของเลเซอร์ไนโตรเจนที่ความดันบรรยากาศ เช่น แรงดันไฟฟ้า ขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้ ความดันก๊าซ อัตราการไหลของก๊าซ ตำแหน่งของสปาร์คแกป ถูกศึกษาโดย (Rodrigues, 1992, Rickwood K R, 1986, Hariri A, 1989)

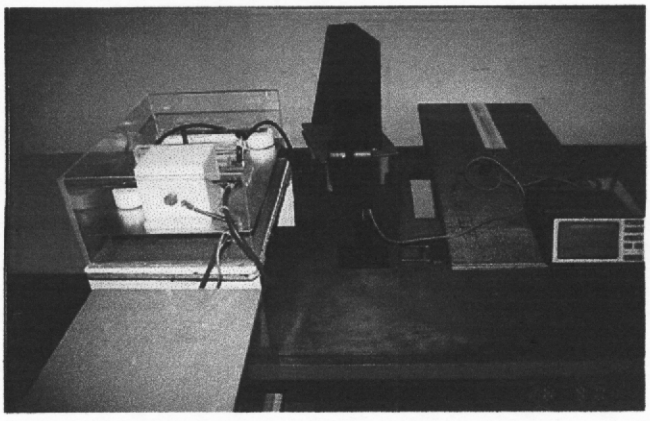
เพื่อที่จะทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพทางแสงมากที่สุด หมายถึงป้อนพลังงานไฟฟ้าเข้าไปน้อยแต่ได้พลังงานแสงมาก ดังนั้นจะต้องมีการศึกษาถึงพารามิเตอร์ต่างๆ ในที่นี้จะศึกษาแรงดันไฟฟ้า อัตราส่วนของตัวเก็บประจุ และอัตราการไหลของก๊าซ เมื่อทำการทดสอบตามหัวข้อ 3.2.3 แล้วก็จะต้องศึกษาพารามิเตอร์ที่ละตัวเพื่อที่จะหาสภาวะเหมาะสม ในการเลือกสภาวะเหมาะสมนั้นได้เลือกจากค่าพลังงานเฉลี่ยที่วัดได้มากที่สุดแล้วนำเป็นเงื่อนไขที่จะหาพารามิเตอร์ตัวต่อไป

3.2.4.1 การเพิ่มแรงดันไฟฟ้า โดยได้ทดลองที่แรงดันในช่วง 6-14 กิโลโวลท์ ที่ระยะดิสชาร์ต 3 ระยะคือ 1,2 และ 3 มิลลิเมตร ตามลำดับ อัตราการไหลของก๊าซ 1 ลิตร/นาที อัตราส่วนของตัวเก็บประจุเป็น 4 ต่อ1(9.6 :2.4)

3.2.4.2 แปรค่าอัตราส่วนของตัวเก็บประจุให้มากขึ้น โดยเริ่มจาก อัตราส่วน 2:1 (ค่าความจุเป็น 4.8:2.4) อัตราส่วน 3:1 (ค่าความจุเป็น 7.2 :2.4) และอัตราส่วน 4:1 (ค่าความจุเป็น 9.6 :2.4) โดยแรงดันไฟฟ้า 11 –14 กิโลโวลท์ อัตราการไหลของก๊าซ 1 ลิตร/นาที

3.2.2.3 ศึกษาผลของอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนตั้งแต่ 1-5 ลิตร/นาที

ชุดทดลองการวัดพลังงานของแสงได้วางหัววัดห่างจากช่องเลเซอร์ 15 เซนติเมตรดังแสดงในภาพประกอบที่ 51



ภาพประกอบที่ 51 แสดงชุดทดลองการวัดพลังงานของแสง

ในบทที่ 4 จะกล่าวถึงผลการทดสอบการทำงานของเลเซอร์ไนโตรเจนที่ได้ออกแบบสร้างขึ้นมาภายใต้เงื่อนไขต่างๆที่สนใจ