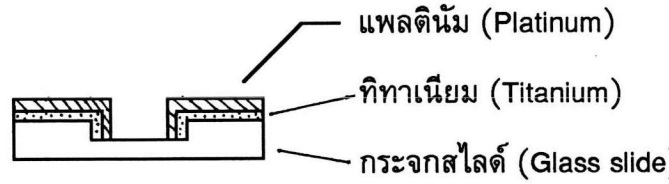
บทที่ 4

การประดิษฐ์เครื่องหลอมเซลล์ด้วยไฟฟ้า

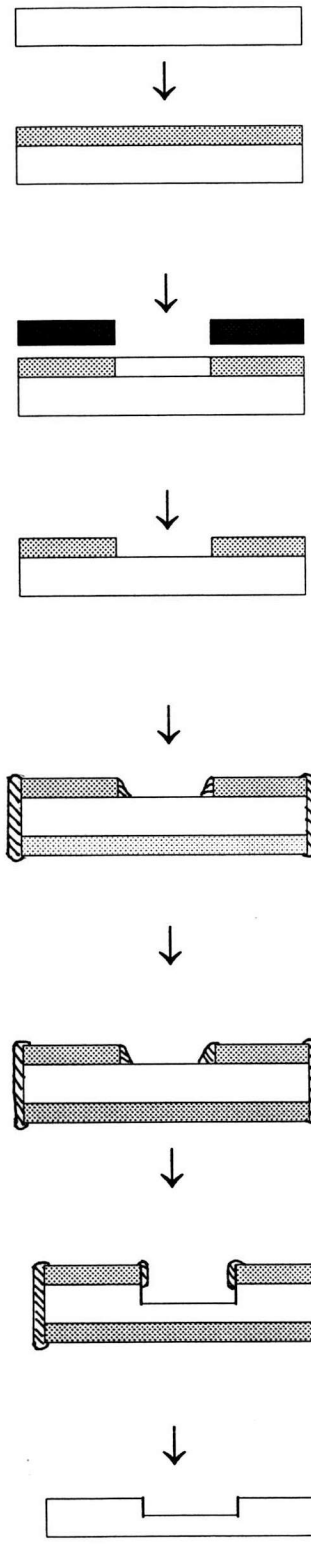
ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของการประดิษฐ์เครื่องหลอมเซลล์ซึ่งมีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 คือ 1. ห้องบรรจุเซลล์ 2. ส่วนสร้างคลื่นไฟฟ้า 3. ส่วนขยายภาพและแสดงผล

ห้องบรรจุเซลล์ (chamber)

ห้องบรรจุเซลล์ในระบบเครื่องหลอมเซลล์ด้วยไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประดิษฐ์ขึ้นจากกระจกสไลด์ที่ทำให้เป็นร่องเพื่อบรรจุเซลล์ ด้านบนของห้องบรรจุเซลล์จะมีฟิล์มบางของโลหะที่ใช้ทำเป็นขั้วอิเล็กโทรดซึ่งจะมีสายต่อเชื่อมโยงเข้ากับวงจรกำเนิดสัญญาณไฟฟ้าเพื่อนำสัญญาณไฟฟ้าเข้ามาใช้ในการหลอมเซลล์ โครงสร้างของห้องบรรจุเซลล์ที่ประดิษฐ์ขึ้นมีโครงสร้างดังรูปที่ 4.1 และมีขั้นตอนการประดิษฐ์ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของห้องบรรจุเซลล์



ล้างแผ่นกระจกสไลด์

ติดฟิล์มโฟโตรีซีส
(เบอร์ 6000)

ฉายแสงอัลตราไวโอเลตผ่าน
แผ่นฟิล์มที่มีรูปแบบตามต้องการ

ล้างฟิล์มโฟโตรีซีสส่วนที่ถูก
แสงออก

ติดฟิล์มโฟโตรีซีสด้านล่างกระจก
และเคลือบบริเวณขอบกระจก
ด้วยโฟโตรีซีสแบบเนกาทีฟ
(OMR 83)
อบที่ 80°C15 นาที

ฉายแสงอัลตราไวโอเลต
เพื่อทำให้โฟโตรีซีสแข็งตัว
อบที่ 80 ° C 15 นาที

นำไปกัดด้วยสารละลายกรด
ไฮโดรเจนฟลูออไรด์ 10%

ล้างโฟโตรีซีส ส่วนที่เหลือออก
ด้วยอะซีโตน

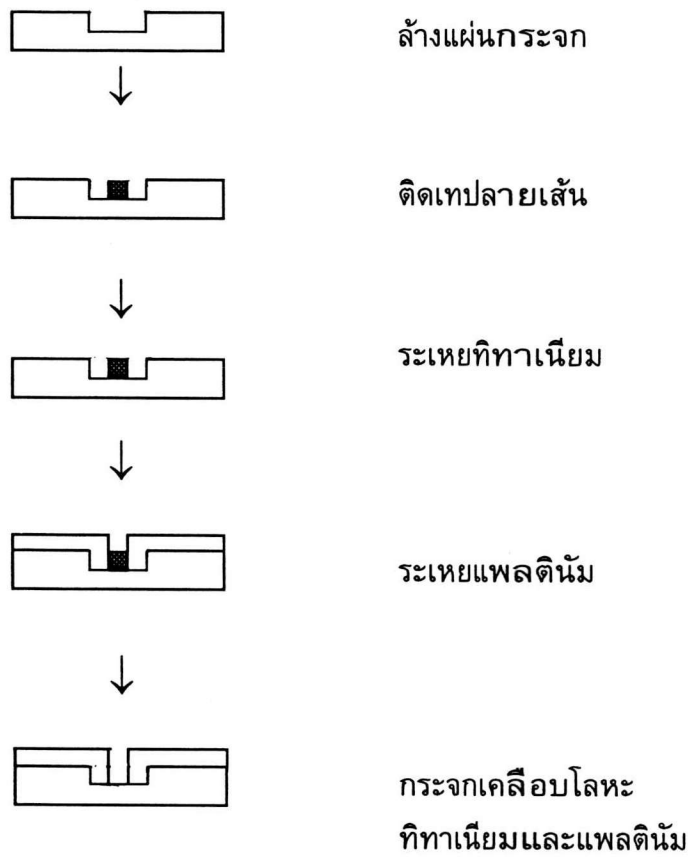
รูปที่ 4.2 ขั้นตอนการประดิษฐ์ห้องบรรจุเซลล์

จากขั้นตอนในรูปที่ 4.2 กระจกสไลด์จะถูกล้างทำความสะอาดด้วยน้ำยาทำความสะอาดและน้ำปลอดอิออน(DI) 2 ครั้ง หลังจากนั้นทำการล้างด้วยสารละลายอะซิโตนและไตรคลอโรเอทิลลีน ในเครื่องทำความสะอาด(Sonicator) สารละลายละ 15 นาที และล้างซ้ำด้วยสารละลายอะซิโตน และเอทิลแอลกอฮอล์ สารละลายละ 5 นาทีในเครื่องโซนิกเคเตอร์เช่นกัน

กระจกสไลด์ที่ล้างสะอาดดีแล้วจะนำไปทำแบบร่องด้วยเทคนิคโฟโตลิโทรกราฟี โดยนำกระจกมาติดฟิล์มโฟโตรีซีส(Morton no. 6000) เพื่อใช้ทำเป็นแบบร่อง และใช้เป็นหน้ากาก(Mask) สำหรับป้องกันการกัดเซาะของสารละลายกรดไฮโดรเจนฟลูออไรด์ 10 % หลังจากนั้นจะนำไปฉายแสงอัลตราไวโอเลตและล้างฟิล์มโฟโตรีซีสออก(Develope)

หลังจากนั้นติดฟิล์มโฟโตรีซีส และเคลือบบริเวณขอบฟิล์มโฟโตรีซีสด้วยโฟโตรีซีสที่เป็นสารละลาย(OMR 83)อีกครั้ง เนื่องจากโฟโตรีซีส OMR 83 จะติดแผ่นกระจกได้ดีกว่าฟิล์มโฟโตรีซีส จึงช่วยป้องกันการหลุดลอกของฟิล์มโฟโตรีซีสขณะทำการกัดด้วยสารละลายกรดไฮโดรเจนฟลูออไรด์ 10 % หลังจากนั้นนำกระจกที่ติดฟิล์มแล้วไปกัดเซาะร่องด้วยสารละลาย ไฮโดรเจนฟลูออไรด์10 % เป็นเวลา 5 ชั่วโมง (อัตราการกัดกระจกแสดงในภาคผนวก ง) แล้วล้างฟิล์มโฟโตรีซีสออกด้วยสารละลายอะซิโตน(โฟโตรีซีส OMR 83 จะหลุดออกไปและอาจมีบางส่วนที่ติดอยู่ ใช้ปากคีบที่สะอาดหยิบออก) ได้ร่องที่มีความลึกประมาณ 200 μm

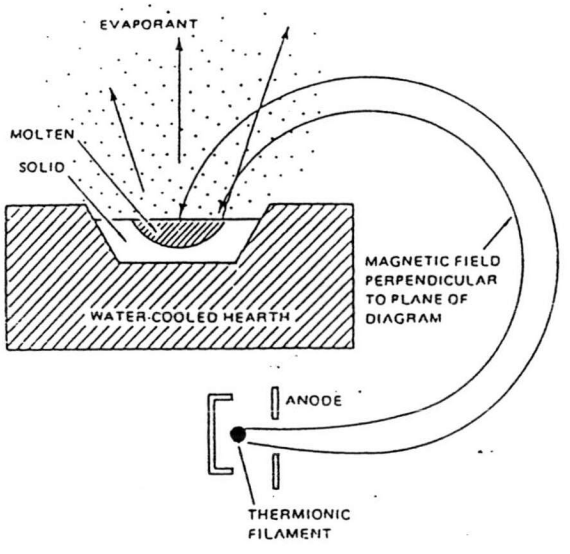
กระจกที่ผ่านการกัดเซาะร่องแล้วจะนำไปทำการติดขั้วโลหะโดยทำการล้างกระจกอีกครั้งด้วยสารละลายอะซิโตน และไตรคลอโรเอทิลลีน ในเครื่องโซนิกเคเตอร์ สารละลายละ 15 นาที และล้างซ้ำด้วย สารละลายอะซิโตน และเอทิลแอลกอฮอล์ สารละลายละ 5 นาที ในเครื่องโซนิกเคเตอร์เช่นกัน จากนั้นจึงนำเทปลายเส้นมาติดทับลงบนกระจกที่ได้แล้วนำไปเคลือบด้วยโลหะทิทาเนียมและแพลตินัมเพื่อทำเป็นขั้วโลหะ โดยมีขั้นตอนการทำแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ขั้นตอนการทำขั้วโลหะ

การเคลือบโลหะแพลตินัมและทิทาเนียมทำโดยใช้เครื่องระเหยโลหะแบบลำอิเล็กตรอน (electron beam evaporator) ยี่ห้อ ULVAC ดังในรูปที่ 4.4 การทำงานของเครื่องระเหยโลหะแบบลำอิเล็กตรอนมีหลักการทำงานอธิบายได้ดังรูปที่ 4.5 โดยสารที่จะระเหย(evaporant) จะถูกวางอยู่ในเบ้าทองแดง(crucible) แผ่นฐาน(substrate)ที่ต้องการเคลือบจะยึดติดกับตัวยึด (holder) ซึ่งอยู่ด้านบนของเบ้า ส่วนประกอบที่กล่าวไปทั้งหมดจะอยู่ภายในฝาครอบ(bell jar)

รูปที่ 4.4 เครื่องระเหยโลหะแบบลำอิเล็กตรอน



รูปที่ 4.5 หลักการทำงานของเครื่องระเหยโลหะแบบลำอิเล็กตรอน

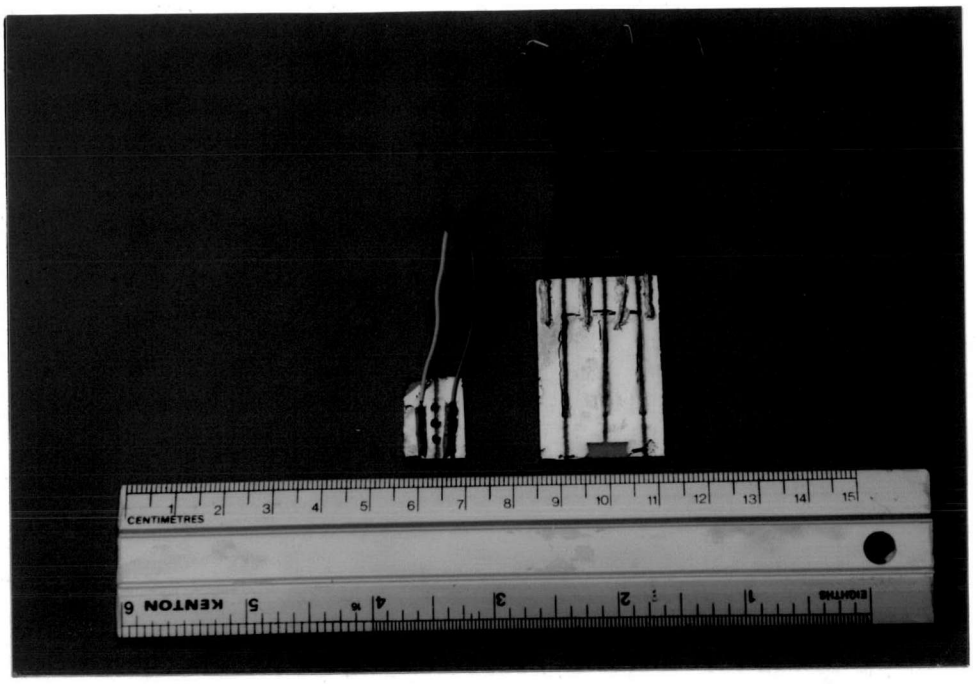
การทำงานของเครื่องระเหยโลหะแบบลำอิเล็กตรอนจะทำภายใต้ความดันในช่วงระหว่าง 2×10^{-6} torr ถึง 5×10^{-6} torr (สำหรับการระเหยโลหะทิเทเนียมและแพลตินัม) เริ่มจากการดูดอากาศออกด้วยปั๊มสุญญากาศจนกระทั่งได้ความดันเพียงพอ ลำอิเล็กตรอนจะ

ถูกโฟกัสไปยังโลหะจนกระทั่งโลหะกลายเป็นไอและระเหยไปติดยังแผ่นฐาน (กระจกสไลด์ที่ทำเป็นร่อง)ที่อยู่ด้านบนของเบ้าโลหะ ในการเคลือบโลหะจะเคลือบทิทาเนียมลงไปก่อนเพื่อทำหน้าที่เป็นชั้นเชื่อมประสานให้แพลตินัมเกาะติดแผ่นฐานได้เป็นอย่างดี จากนั้นจะเคลือบแพลตินัมอีกชั้นหนึ่งแล้วจึงนำไปต่อกับสายไฟเพื่อต่อเป็นขั้วโลหะระหว่างร่องของห้องบรรจุเซลล์

ในการระเหยโลหะนี้ใช้โลหะทิทาเนียมมีความบริสุทธิ์ 99.99 % ส่วนทองขาวที่ใช้มีความบริสุทธิ์ 99.5 % ภาวะที่ใช้ระเหยโลหะทั้งสองชนิด แสดงในตารางที่ 4.1 หลังจากระเหยโลหะลงบนกระจกแล้วจะได้ห้องบรรจุเซลล์ดังแสดงในรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.1 ภาวะที่ใช้ในการระเหยโลหะแบบลำอิเล็กตรอน

เงื่อนไข	ทิเทเนียม	แพลตินัม
thickness (^{o}A)	1000	1500
back pressure (torr)	$2x10^{-6}$	$5x10^{-6}$
substrate temperature(^{o}c)	20-25	20-25
deposition rate (^{o}A/s)	0.0-1.3	0.5-1.2
rotation speed (r/min)	2	2
emission control	60	72
current emission (mA)	15-20	90-120
calibration parameter for thickness monitor :		
density (g/cm^{3})	4.5	21.4
Z-ratio	0.628	0.245
tooling (%)	60	60



รูปที่ 4.6 กระจกสไลด์ที่ผ่านขั้นตอนต่างๆ จนได้ห้องบรรจุเซลล์ที่สมบูรณ์

เมื่อได้ห้องบรรจุเซลล์แล้ว ในงานวิจัยนี้ได้นำห้องบรรจุเซลล์ที่ประดิษฐ์ไปทดสอบการหลอมเซลล์ด้วยไฟฟ้ากับเซลล์มะเร็งหนู(NS-1) จะกล่าวต่อไปในบทที่ 5

ส่วนสร้างคลื่นไฟฟ้า

ส่วนสร้างคลื่นไฟฟ้าจะประกอบด้วย 2 ส่วนที่สำคัญคือ ส่วนกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ (Sine wave generator) และส่วนกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปพัลส์(Pulse generator) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

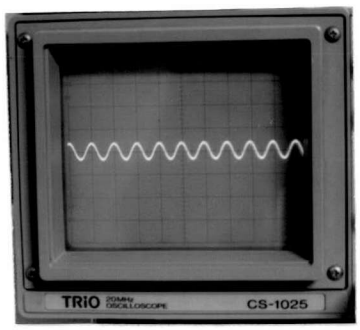
1. ส่วนกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ (Sine wave generator)

ในการหลอมรวมเซลล์ด้วยไฟฟ้านั้นเซลล์จะเข้ามาเรียงตัวกันรูปลูกโซ่เมื่อกระตุ้นด้วยสัญญาณคลื่นรูปไซน์ ตัวแปรที่ต้องพิจารณาสำหรับสัญญาณคลื่นรูปไซน์คือความถี่(Frequency) และสนามไฟฟ้า (Electric field)

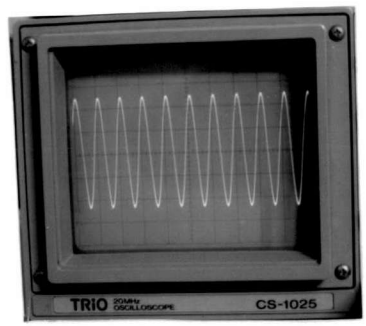
จากการพิจารณาการหลอมเซลล์ด้วยไฟฟ้าของเซลล์ชนิดต่างๆ ในตารางที่ 1.1 ที่กล่าวมาในบทที่ 1 Vienken and Zimmermann (1982) ได้รายงานการกระตุ้นเซลล์ให้มาเรียงกันด้วยสัญญาณคลื่นรูปไซน์โดยใช้สนามไฟฟ้า 100 V/cm ความถี่ 1 MHz เพื่อทำการหลอมเซลล์

จากการพิจารณาการหลอมเซลล์ด้วยไฟฟ้าของเซลล์ชนิดต่างๆ ในตารางที่ 1.1 ที่กล่าวมาในบทที่ 1 Vienken and Zimmermann (1982) ได้รายงานการกระตุ้นเซลล์ให้มาเรียงกันด้วยสัญญาณคลื่นรูปไซน์โดยใช้สนามไฟฟ้า 100 V/cm ความถี่ 1 MHz เพื่อทำการหลอมเซลล์มะเร็งหนูกับเซลล์ลิมโฟซัยท์ นอกจากนี้ Vienken et. al (1983) ได้รายงานการกระตุ้นเซลล์ของเซลล์มะเร็งหนู(SP2 กับ X63) โดยใช้สนามไฟฟ้า 200 V/cm ความถี่ 800 kHz ในงานวิจัยนี้จะใช้เซลล์มะเร็งหนู(NS-1)เป็นเซลล์ต้นแบบ ซึ่งจากข้อมูลดังที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าการกระตุ้นให้เซลล์มะเร็งหนูให้มาเรียงตัวกันควรจะใช้สนามไฟฟ้าในช่วง 100 - 200 V/cm และความถี่ในช่วง 800 kHz - 1 MHz

ในงานวิจัยได้ใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ (Wavetex model 180, USA) โดยเครื่องดังกล่าวนี้สามารถสร้างคลื่นรูปไซน์มีค่าแรงดันสูงสุด 20 V เมื่อใช้ความถี่ 1 MHz และเมื่อต่อเข้ากับความต้านทานขนาด 1 MΩ (ใช้แทนโหลดของห้องบรรจุเซลล์) จะทำให้ค่าแรงดันลดลงเป็น 8 V การที่ต่อโหลด ด้วยความต้านทาน 1 MΩ แล้วแรงดันขาเข้าลดต่ำลงคาดว่าเกิดจาก เครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ไม่สามารถจ่ายกระแสได้เพียงพอจึงทำให้ค่าแรงดันขาเข้าลดลงเหลือ 8 V เนื่องจากห้องบรรจุเซลล์ที่ประดิษฐ์ขึ้นมามีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ 2 mm ดังนั้นจะได้สนามไฟฟ้าเมื่อยังไม่ขยายสัญญาณเท่ากับ 40 V/cm แต่การกระตุ้นเซลล์ให้มาเรียงตัวกันของเซลล์มะเร็งของหนู กับเซลล์อื่นๆ จะใช้สนามไฟฟ้าในช่วง 100 - 250 V/cm และความถี่ในช่วง 800 kHz - 1 MHz ดังนั้นในระบบเครื่องหลอมเซลล์ด้วยไฟฟ้า จะต้องเพิ่มส่วนขยายสัญญาณคลื่นรูปไซน์ให้กับเครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ โดยการนำหม้อแปลงเพิ่มแรงดันมาต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปไซน์ หลังจากต่อทั้งสองส่วนที่กล่าวมาแล้ว นำไปวัดค่าแรงดันก่อนและหลังการขยายด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.2



ก่อนการขยายสัญญาณ



หลังจากขยายสัญญาณ

รูปที่ 4.7 สัญญาณคลื่นรูปไซน์ที่ผ่านการขยายด้วยหม้อแปลงเพิ่มแรงดันในขณะต่อโหลด
สเกลแรงดัน = 10 โวลต์/ช่อง
สเกลเวลา = 1 μs/ช่อง

ตารางที่ 4.2 แรงดันขาเข้าและขาออกจากส่วนขยายสัญญาณคลื่นรูปไซน์

โหลด	แรงดันขาเข้า(V in) (โวลต์)	แรงดันขาออก(V out) (โวลต์)	อัตราขยาย (เท่า)
∞	20	80	4
1 MΩ	8	50	6.25

ข้อสังเกต การที่อัตราขยายในขณะที่มีโหลด มีค่าสูงกว่าในขณะที่ไม่มีโหลดนั้น ได้มีการตรวจสอบแล้วพบว่าเป็นผลจากปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ เนื่องจากตัวเหนี่ยวนำของหม้อแปลงและตัวเก็บประจุของโหลด

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.2 เมื่อต่อส่วนขยายสัญญาณคลื่นรูปไซน์แล้วพบว่าสามารถเพิ่มแรงดันขาออกโดยมีอัตราขยายของแรงดันสัญญาณคลื่นรูปไซน์เท่ากับ 4 และ 6.25 เท่า ซึ่งแรงดันที่จะนำไปใช้งานคือแรงดันขาออก 50 V ดังนั้นจะได้สนามไฟฟ้า 250 V/cm (ระยะห่างของขั้ว = 2 mm) ซึ่งคาดว่าเพียงพอที่จะกระตุ้นเซลล์ให้มาเรียงตัวกันได้

เมื่อต่อส่วนขยายคลื่นรูปไซน์กับเครื่องกำเนิดฟังก์ชันแล้วจะนำไปประกอบกับส่วนวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ ที่จะกล่าวในหัวข้อ 4.3 ต่อไป

I20514517

2. ส่วนกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปพัลส์

ได้ทำการประดิษฐ์วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปพัลส์ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ต่อไปนี้

1) วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ต่อเนื่อง (Continuous pulse generator)

2) วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์เดี่ยว (Monostable pulse generator)

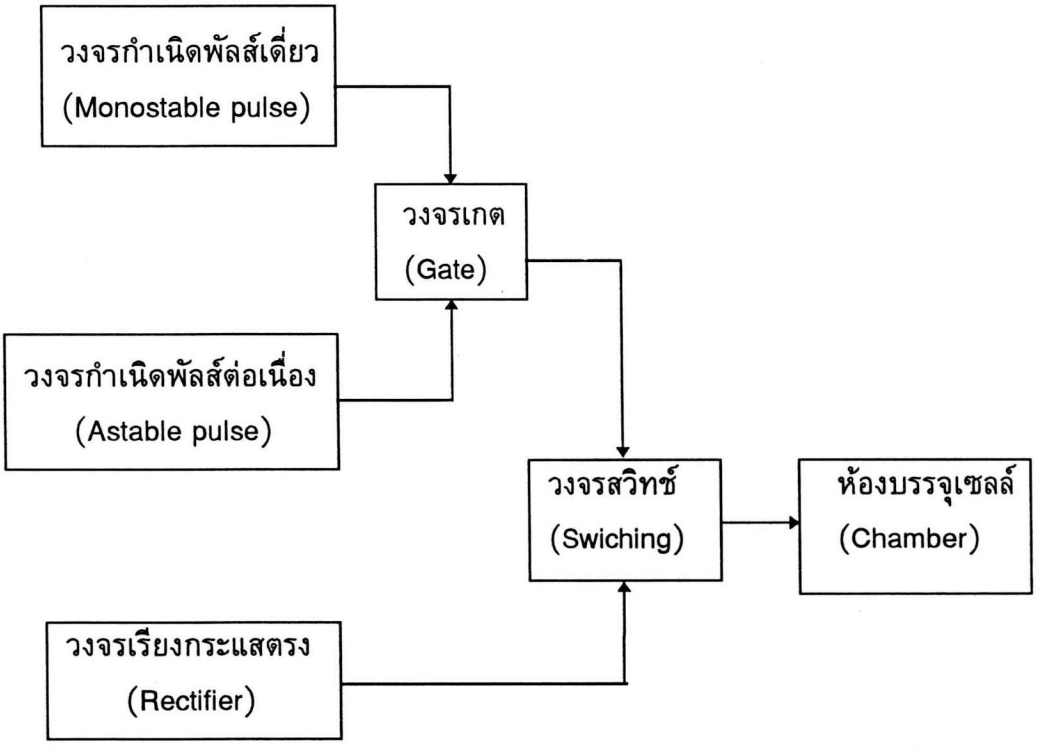
3) วงจรเกต (Gate)

4) วงจรเรียงกระแสตรง (Rectifier)

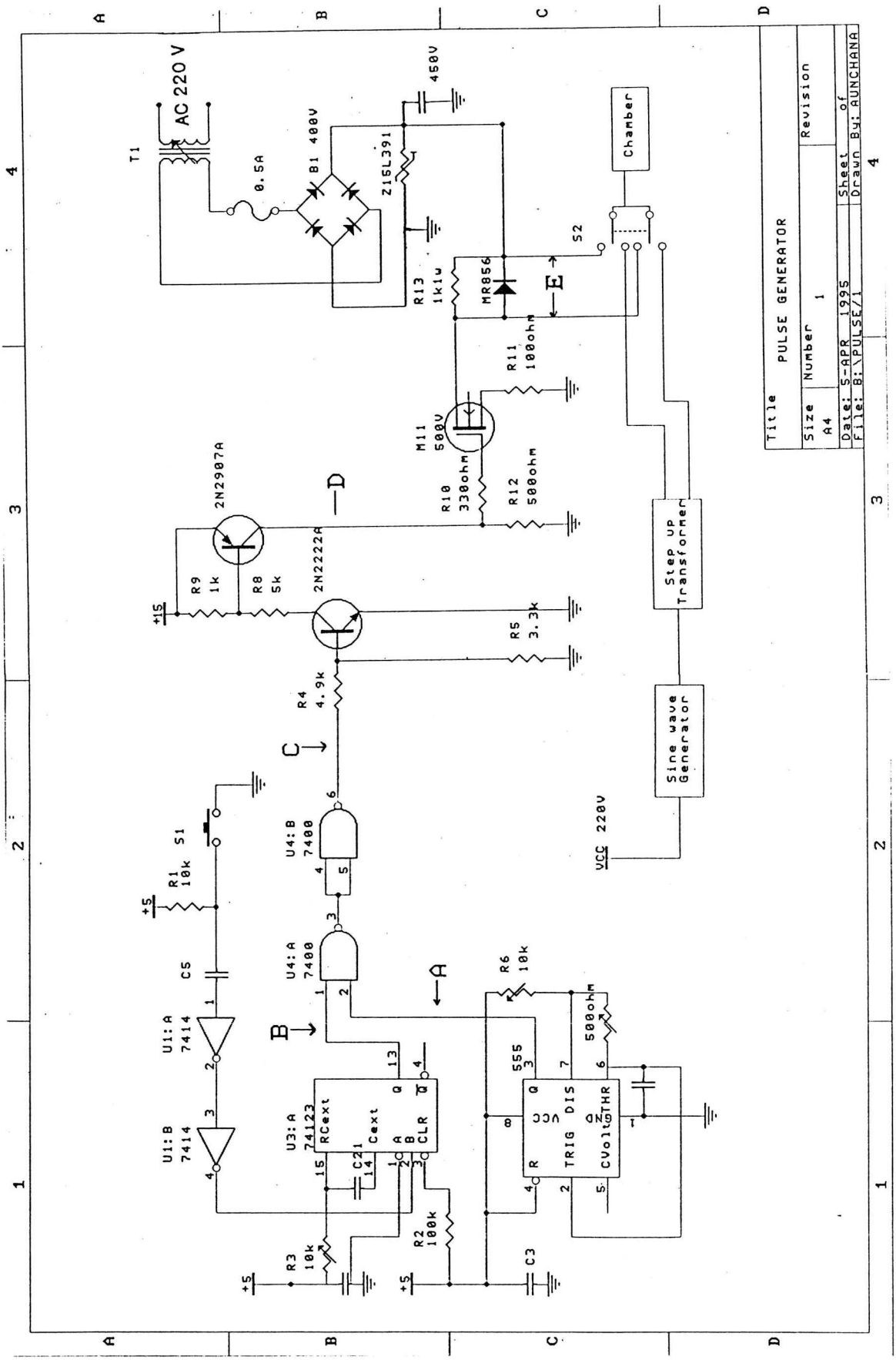
5) วงจรสวิทช์ (Swiching)

6) แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

โดยวงจรต่าง ๆที่จะนำมาประกอบกันสามารถเขียนเป็นรูปบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 แสดงผังวงจรไฟฟ้ารวม



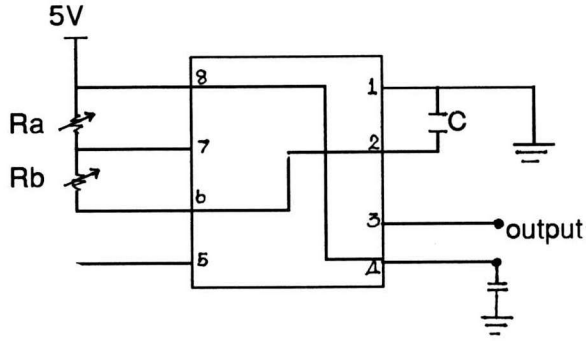
รูปที่ 4.8 บล๊อกไดอะแกรมของวงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นรูปพัลส์



รูปที่ 4.9 ผังวงจรไฟฟ้าสัญญาณคลื่นรูปพัลส์

จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 การทำงานของวงจรในแต่ละส่วนเป็นดังนี้

1.วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ต่อเนื่อง (Continuous pulse generator) เป็นวงจรที่สร้างสัญญาณคลื่นรูปพัลส์แบบต่อเนื่อง โดยจะมีสัญญาณคลื่นรูปพัลส์ออกมาตลอดเวลาและสามารถปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์ได้ในช่วง 5-20 μs ไอซีที่นำมาใช้งานคือ LM 555 โดยต่อให้ทำงานแบบ Astable Mode ดังแสดงในผังวงจรไฟฟ้าในรูปที่ 4.10 ค่าความกว้างของสัญญาณขาออก คือ T1 และ T2 นั้นสามารถกำหนดได้ด้วยตัวต้านทาน Ra และ Rb และตัวเก็บประจุที่มาต่อภายนอกตามสมการที่ 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.10 ผังวงจรไฟฟ้าสัญญาณพัลส์ต่อเนื่องของ LM 555

$$T1 = 0.693\,(Ra+Rb)C \qquad (4.1)$$

$$T2 = 0.693\,(Rb)C \qquad (4.2)$$

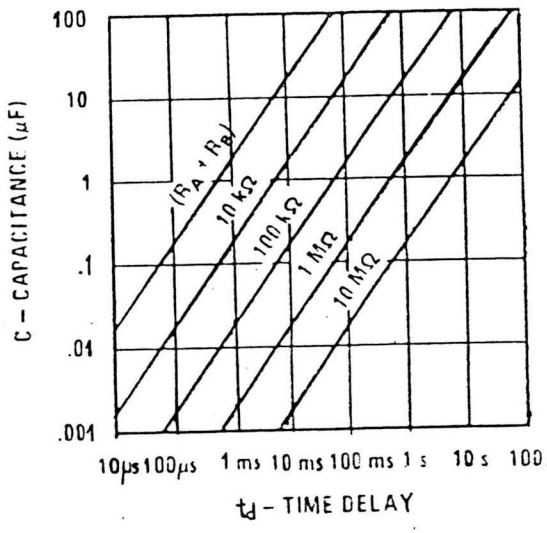
เมื่อ T1 คือ ความกว้างของพัลส์ขณะมีแรงดัน (output high)

T2 คือ ความกว้างของพัลส์ขณะไม่มีแรงดัน (output low)

Ra และ Rb คือ ค่าความต้านทานภายนอกที่นำมาต่อกับวงจร

C คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภายนอก

จากสมการ 4.1 และ 4.2 สามารถหาค่า C ที่เหมาะสมโดยการแทนค่า T1 และ T2 ที่ต้องการจากกราฟรูปที่ 4.11

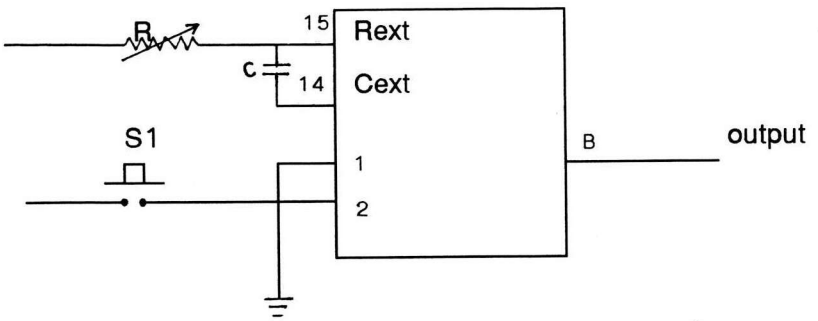


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของเวลากับค่าความจุไฟฟ้าที่ใช้ในวงจรสัญญาณพัลส์ต่อเนื่อง

ในงานวิจัยได้กำหนดค่าเบื้องต้นของ T1 และ T2 ในการออกแบบวงจรคือ 15 และ 10 μs จากการหาค่า C จากกราฟรูปที่ 4.11 ได้ค่าที่เหมาะสมโดยประมาณ คือ 0.047 μF เมื่อคำนวณค่าความต้านทาน Ra และ Rb ตามสมการข้างต้นแล้วจะได้ค่าของ Ra คือ 154 Ω และ Rb คือ 307 Ω

ในการประกอบวงจรได้ใช้ความต้านทานแบบปรับค่าได้ โดยใช้ Ra 500 Ω และ Rb 10 kΩ ซึ่งจะทำให้สามารถปรับค่าความกว้างของพัลส์ขณะมีแรงดันได้ในช่วง 5 - 20 μs

2.วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์เดี่ยว เป็นวงจรที่สร้างสัญญาณพัลส์เดี่ยวที่สามารถปรับค่าความกว้างของสัญญาณได้ในช่วง 20-250 μs ในการสร้างวงจรนี้ได้ใช้ TTL เบอร์ 74123 มาต่อให้เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์เดี่ยว ซึ่งค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์ถูกกำหนดด้วยตัวต้านทาน (R) และตัวเก็บประจุ (C) จากภายนอก ที่มาต่อดังในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์เดี่ยว

จากการกำหนดเบื้องต้นสำหรับจำนวนพัลส์ที่ต้องการคือจำนวนพัลส์ 10 พัลส์ มีคาบของพัลส์ 25 μs และค่าความจุที่เหมาะสม วัดจากกราฟรูปที่ 4.11 ได้ค่าโดยประมาณ คือ 0.05 μF จะสามารถคำนวณค่า R ที่ต้องการใช้ได้ดังสมการ 4.3

$$T = 1.1\,RC \qquad (4.3)$$

เมื่อ T คือ ความกว้างของพัลส์

R คือ ค่าความต้านทาน

C คือ ค่าความเก็บประจุ

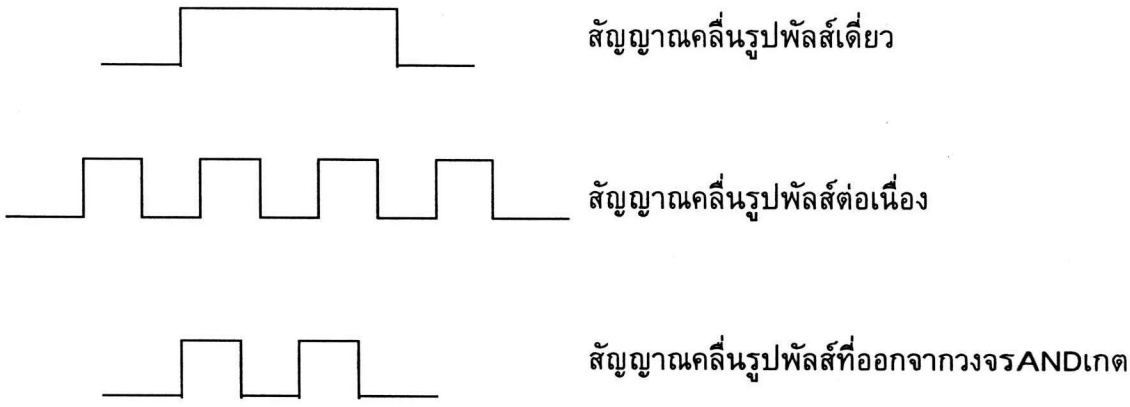
แทนค่า T และ C ลงในสมการได้ $R = 250 \times 10^{-6} / 1.1 \times 0.05 \times 10^{-6}$

$R = 4545.05\ \Omega$

ในการประกอบวงจรได้ใช้ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ขนาด 10 kΩ เพื่อสามารถที่จะทำการปรับค่าความกว้างของพัลส์ได้มากกว่า 250 μs เป็นผลให้สามารถปรับจำนวนพัลส์ได้มากขึ้นด้วย

หลักการทำงานของวงจร เริ่มจากการกดสวิทช์ S1 จะมีสัญญาณมากระตุ้นที่ขา 2 ของ TTL LS74123 ทำให้วงจรเริ่มทำงาน วงจรที่จะกำเนิดสัญญาณพัลส์เดี่ยวจะออกมาที่ขา 13 ของ TTL LS74123

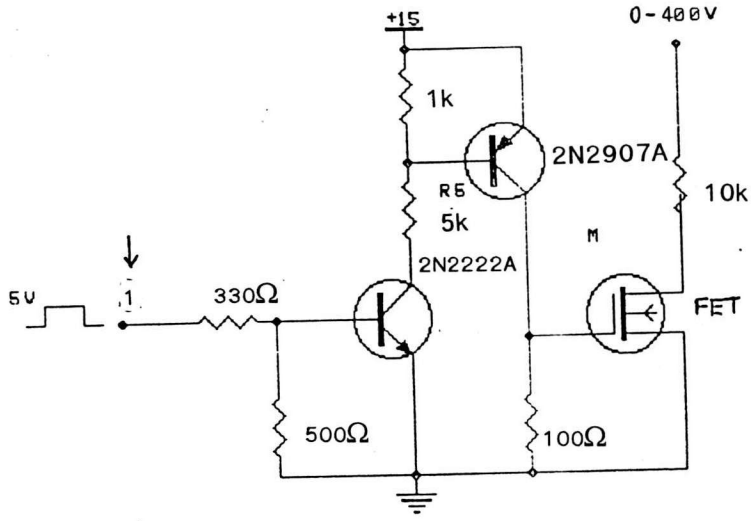
3.วงจรเกต (Gate) เป็นวงจรที่ทำหน้าที่กำหนดจำนวนพัลส์ที่จะไปกระตุ้นเซลล์ในห้องบรรจุเซลล์ โดยนำสัญญาณจากวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์เดี่ยวมารวมกับสัญญาณพัลส์ต่อเนื่อง และได้ผลลัพธ์เป็นสัญญาณขาออกดังรูปที่ 4.13 โดยจำนวนพัลส์ที่ออกมาจากวงจร ANDเกต นี้จะมีจำนวนเท่ากับความกว้างของพัลส์เดี่ยวหารด้วยคาบของพัลส์ต่อเนื่อง แสดงรูปของสัญญาณคลื่น รูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 สัญญาณคลื่นรูปพัลส์ก่อนและหลังวงจรเกต

4.วงจรเรียงกระแสตรง (rectifier) เป็นวงจรที่ทำการแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ 0-380 V ที่ออกมาจากหม้อแปลงไฟฟ้าให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดยวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (Full Bridge Rectifier) และตัวเก็บประจุ สัญญาณที่ได้จากตัวเก็บประจุนี้จะถูกนำไปใช้ในการกระตุ้นเซลล์ โดยไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้มีค่าแรงดันตั้งแต่ 0-400 V

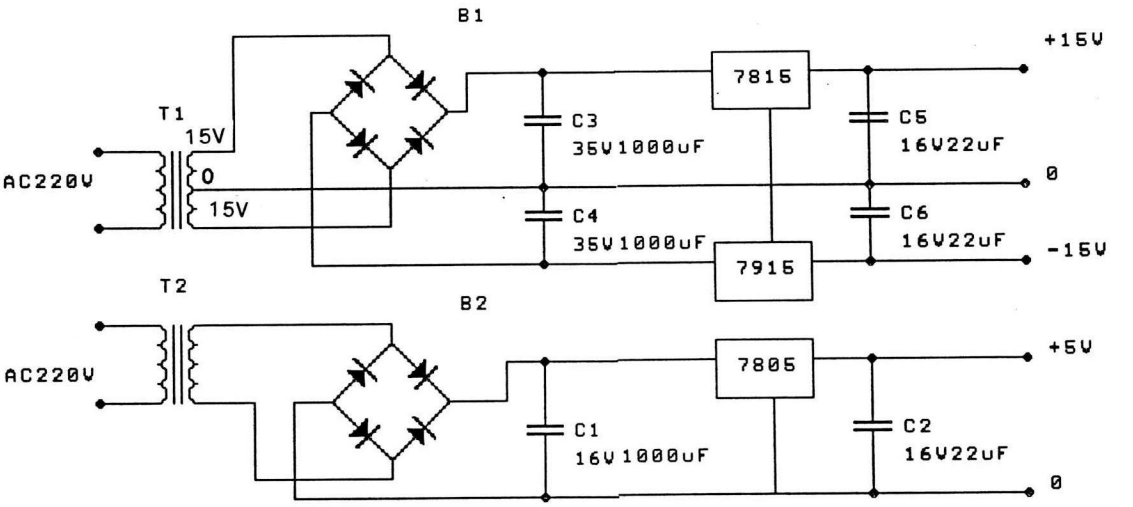
5.วงจรสวิทช์(Swiching) เป็นวงจรที่ทำหน้าที่รับสัญญาณที่ได้จากวงจร AND เกต โดยที่สัญญาณพัลส์จากวงจร AND เกต จะทำหน้าที่สั่งให้ปิดเปิด FET เพื่อให้นำกระแสหรือไม่นำกระแสในช่วงที่ต้องการ



รูปที่ 4.14 ผังวงจรสวิทช์

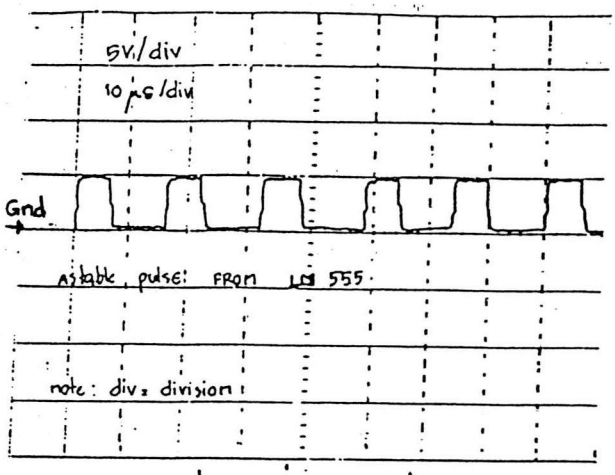
จากรูปที่ 4.14 หลักการทำงานของวงจรเป็นดังนี้คือ เมื่อมีสัญญาณพัลส์ขนาดแรงดัน 5 V เข้าที่ตำแหน่ง 1 ของวงจรจะทำให้ทรานซิสเตอร์ 2N2222A และ 2N2907A ทำงานและส่งสัญญาณพัลส์ไปยัง FET เป็นผลให้ FET ทำงานและแรงดันจากวงจรเรียงกระแสตรงก็จะถูกจ่ายไปให้กับห้องบรรจุเซลล์ในรูปของสัญญาณคลื่นรูปพัลส์แรงดันสูงในกรณีที่ ไม่มีสัญญาณเข้าที่ตำแหน่ง 1 ตัว FET จะไม่ทำงานและจะทำให้ไม่มีสัญญาณคลื่นรูปพัลส์ส่งไปยังห้องบรรจุเซลล์

6. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง จะประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแรงดัน 5 V เพื่อใช้เลี้ยงวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์เดี่ยว วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ต่อเนื่อง และวงจรเกตส่วนแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแรงดันขนาด 15 V เพื่อจ่ายให้กับวงจรขยาย วงจรที่ใช้เป็นวงจรกระแสตรงทั้งสองชนิดนี้ ทำโดยการใช้วงจรบริดซ์ต่อกับไอซี regulator เบอร์ 7805 และ 7815 เพิ่มเข้าไปเพื่อทำให้ได้ค่าแรงดัน 5 และ 15 V ที่ขาออกมีค่าคงที่ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.15

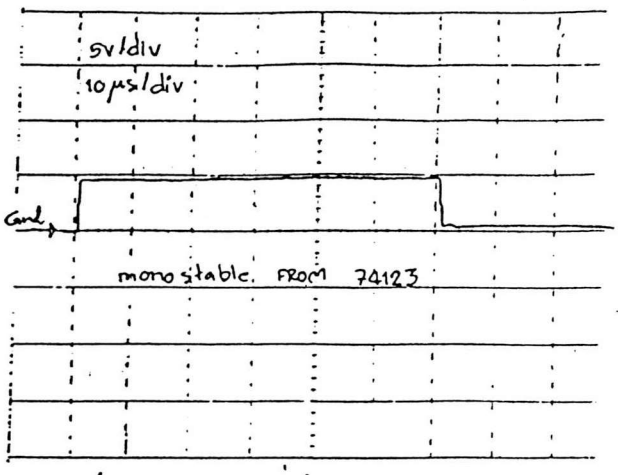


รูปที่ 4.15 ผังวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

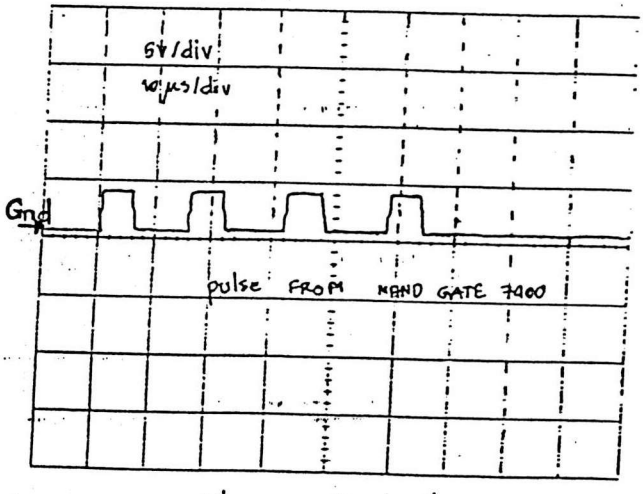
หลังจากประกอบส่วนต่าง ๆของวงจรกำเนิดสัญญาณเข้าด้วยกันแล้วนำวงจรไปทดสอบสัญญาณที่ได้โดยใช้เครื่องออสซิโลสโคป (Oscilloscope, HEMEG HM203-6) แบบบันทึกภาพได้ โดยทำการวัดสัญญาณที่จุด A-E (รูปที่ 4.8) ซึ่งจะได้ผลการทดลองดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.16



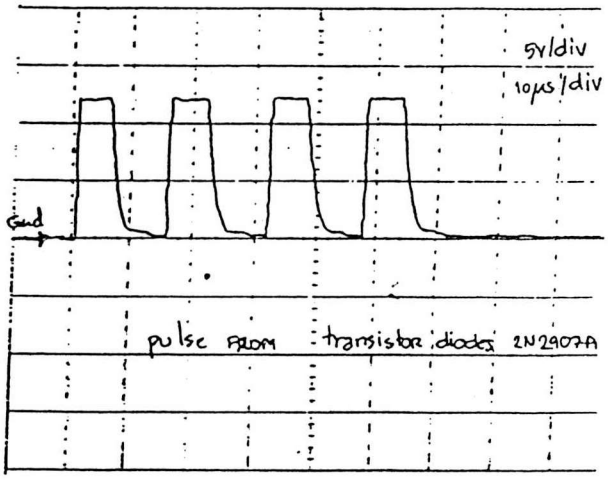
รูปที่ 4.16 ก สัญญาณที่จุด A



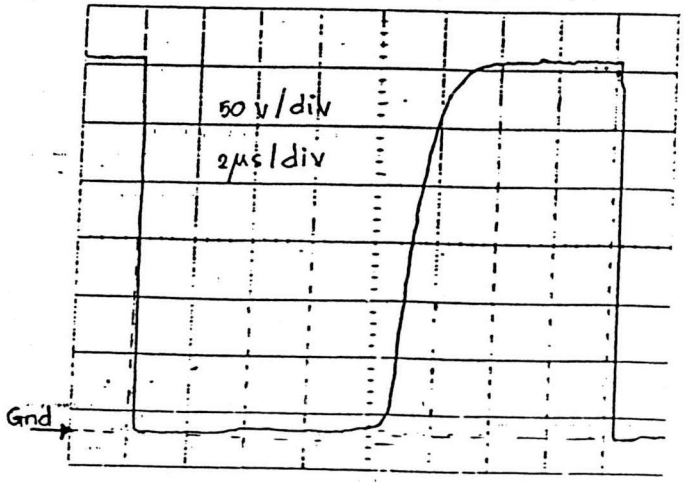
รูปที่ 4.16 ข สัญญาณที่จุด B



รูปที่ 4.16 ค สัญญาณที่จุด C



รูปที่ 4.16 ง สัญญาณที่จุด D



รูปที่ 4.16 จ สัญญาณที่จุด E

รูปที่ 4.16 สัญญาณคลื่นรูปพัลส์จากวงจรกำเนิดพัลส์

ผลการทดลอง

รูปที่ 4.16ก แสดงสัญญาณที่จุด A เป็นสัญญาณคลื่นรูปพัลส์แบบต่อเนื่องของไอซี LM555 ที่ปรับความกว้างของพัลส์เป็น 10 μs ขนาดแรงดัน 5 V

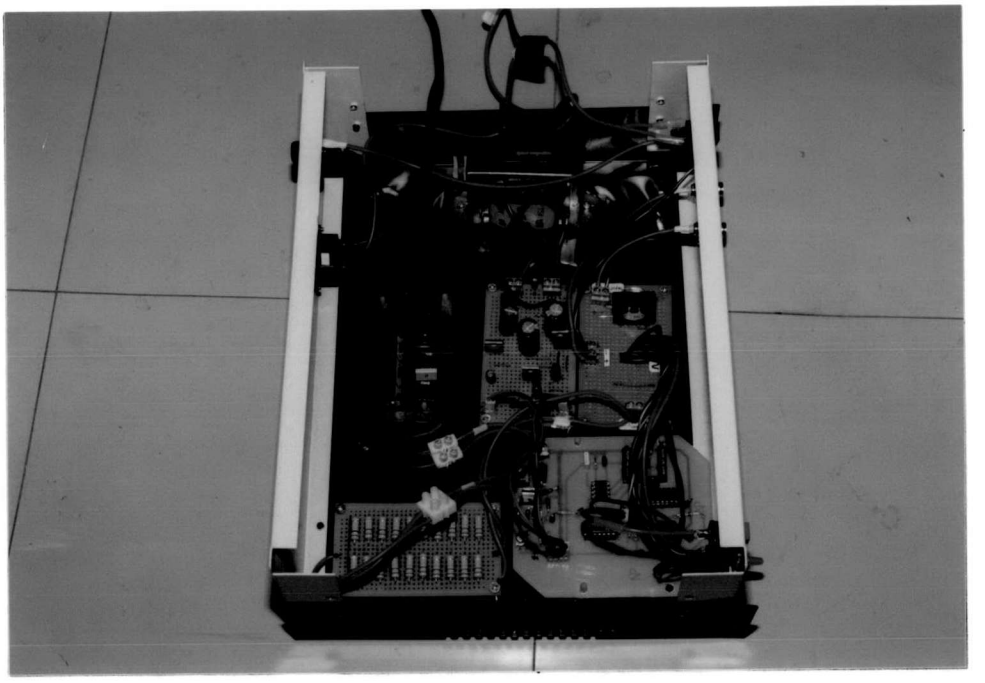
รูปที่ 4.16ข แสดงสัญญาณที่จุด B เป็นสัญญาณคลื่นรูปพัลส์เดี่ยวจาก TTL 74123 ที่ปรับความกว้างของพัลส์เป็น 60 μs

รูปที่ 4.16ค แสดงสัญญาณที่จุด C เป็นสัญญาณคลื่นรูปพัลส์ที่ออกมาจาก TTL 7400 (Nand gate) ซึ่งรวมสัญญาณที่มาจากจุด A และ จุด B ได้สัญญาณจำนวน 4 พัลส์ ขนาดแรงดัน 5 V

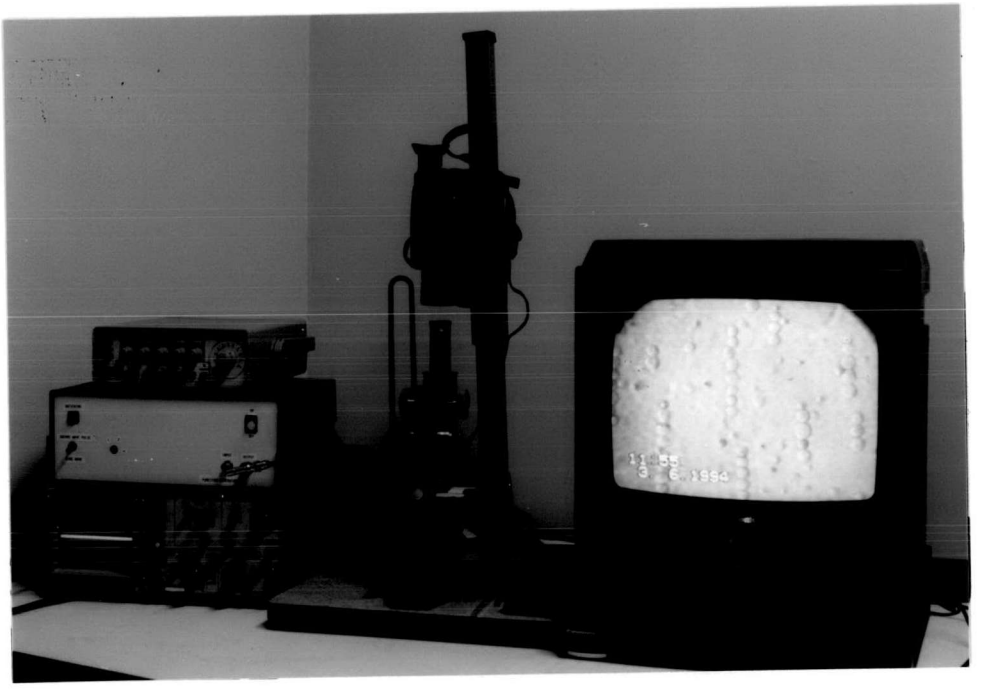
รูปที่ 4.16ง แสดงสัญญาณที่จุด D เป็นสัญญาณคลื่นรูปพัลส์ที่วัดได้จากทรานซิสเตอร์ 2N2907A ซึ่งได้สัญญาณพัลส์จำนวน 4 พัลส์ ขนาดแรงดัน 12 V

รูปที่ 4.16จ แสดงสัญญาณที่จุด E เป็นสัญญาณคลื่นรูปพัลส์ที่ออกจาก FET IRF 830 ซึ่งทำการเปิดปิดสัญญาณที่มาจากตัวเก็บประจุ (Capacitor) ของวงจรเรียงกระแสตรงได้ขนาดแรงดันประมาณ 330 V

เมื่อได้สัญญาณคลื่นรูปพัลส์และนำไปประกอบกับส่วนสร้างสัญญาณคลื่นรูปไซน์ส่วนขยายภาพก็จะได้ระบบเครื่องหลอมเซลล์ด้วยไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18



รูปที่ 4.17 ลักษณะภายในของเครื่องหลอมเซลล์ด้วยไฟฟ้า



รูปที่ 4.18 ระบบเครื่องหลอมเซลล์ด้วยไฟฟ้า

3. ส่วนขยายภาพและแสดงผล

ส่วนขยายภาพและแสดงผลประกอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายของเลนส์ 80 เท่า และกล้องถ่ายภาพกำลังขยาย 1-12 เท่า จะได้ภาพปรากฏที่มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 960 เท่า สัญญาณภาพที่ได้จะแสดงผลทางโทรทัศน์และทำการถ่ายภาพและบันทึกผลขณะทำการกระตุ้นเซลล์ให้มาเรียงตัวและหลอมรวมกันลงบนแถบวีดิทัศน์ ซึ่งภาพของเซลล์ที่มีขนาดประมาณ 5 - 10 μm สามารถมองเห็นได้จากจอโทรทัศน์อย่างชัดเจน