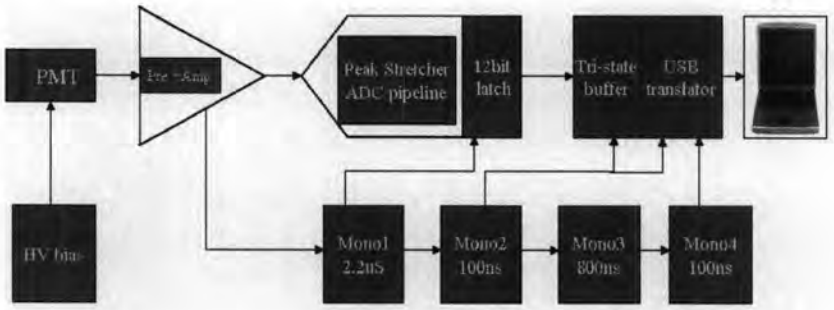
บทที่ 3

การพัฒนาระบบวิเคราะห์แบบหลายช่องที่บรรจุในฐานหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์

จากข้อมูลวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล ที่มีการนำไปประยุกต์ใช้ในเครื่องมือวิเคราะห์ความสูงแบบหลายช่อง จะเห็นว่าวงจรแปลงผันแบบแฟลช แม้ใช้เวลาในการแปลงผันสัญญาณที่สั้น แต่ไม่สามารถให้จำนวนช่องวิเคราะห์พลังงานเพียงพอต่อการวัดสเปกตรัมรังสีได้ อีกทั้งยังใช้กำลังไฟฟ้ามากไม่เหมาะจะพัฒนาเครื่องมือวัดให้มีขนาดเล็ก ขณะที่การแปลงสัญญาณแบบซัคเซสซีฟแอพพรอกซิเมชันต้องใช้เวลาในการแปลงสัญญาณที่นาน อีกทั้งส่วนมากจะให้ค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่า 1 LSB และการแปลงสัญญาณแบบวิลคินสันมีข้อเสียที่ใช้เวลาในการแปลงผันไม่คงที่เปลี่ยนตามความสูงของพัลส์ ที่ขึ้นอยู่กับพลังงานของอนุภาคนิวเคลียร์ที่ตกกระทบหัววัดรังสี ทำให้มีปัญหาในการคำนวณเวลาสำหรับการวัดรังสีให้ถูกต้องค่อนข้างยาก เมื่อพิจารณาถึงความสามารถของอุปกรณ์ที่มีสมรรถนะทดแทนข้อเสียดังกล่าว การใช้วงจรแปลงผันสัญญาณแบบไปไลน์ จึงเป็นวิธีที่สามารถออกแบบให้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีมีความคลาดเคลื่อนน้อย เวลาแปลงผันสัญญาณคงที่ และมีขนาดเล็กบรรจุเข้าไว้ในฐานหลอดได้

กระบวนการวัดส่วนหน้าและแปลงผันสัญญาณสมรรถนะสูง จำเป็นต้องใช้ระบบส่งถ่ายข้อมูลไปยังอุปกรณ์ประมวลผลข้อมูลปลายทางหรือคอมพิวเตอร์ที่มีความเร็วสูง เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อปริมาณข้อมูลในส่วนหน้าอย่างถูกต้องครบถ้วน จึงจำเป็นต้องเลือกใช้ระบบพอร์ตยูเอสบี ดังนั้นการออกแบบวงจรให้อยู่ร่วมกันภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดขึ้นแสดงได้ดังภาพที่ 3.1

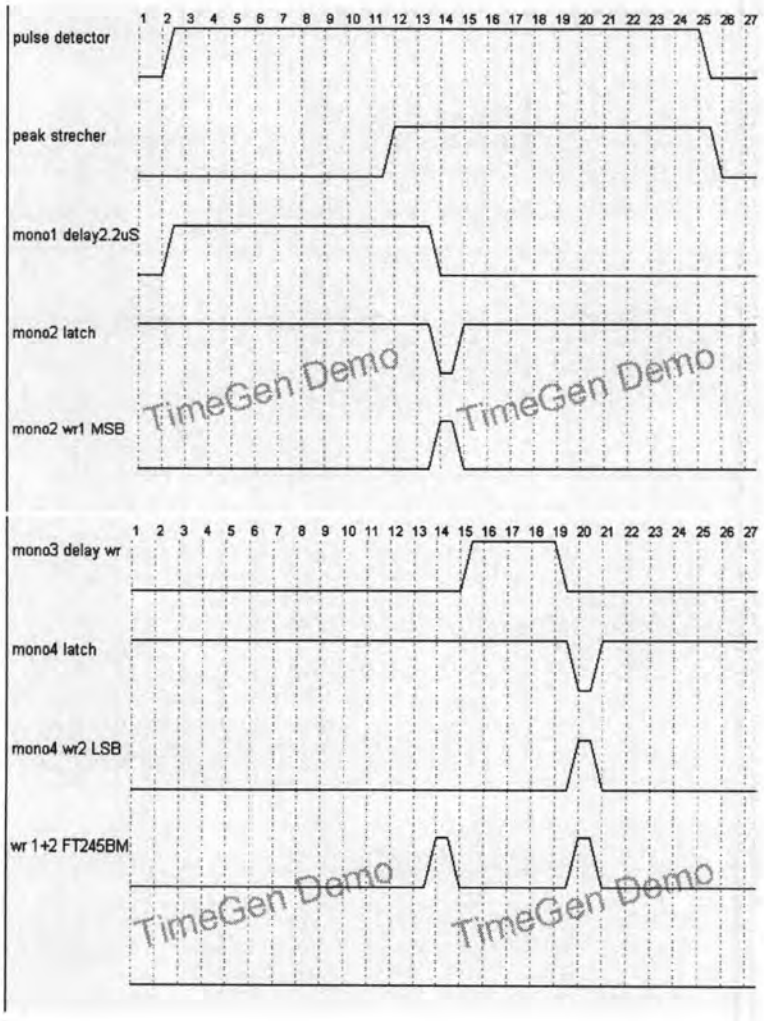


รูปที่ 3.1 แผนภาพการทำงานของระบบวิเคราะห์หลายช่องที่พัฒนาขึ้น

จากแผนภาพรูปที่ 3.1 แสดงส่วนประกอบของระบบวิเคราะห์หลายช่องที่ออกแบบขึ้น การทำงานเริ่มจากรังสีที่ตกกระทบหัววัดเรืองรังสี จะทำให้เกิดสัญญาณพัลส์ไฟฟ้าขนาดเล็ก ซึ่งมีขนาดความสูงของพัลส์ในรูปแรงดันไฟฟ้าแปรผันตามพลังงานที่ถ่ายโอนในหัววัดรังสี และจำนวนของสัญญาณพัลส์ที่เกิดขึ้นนั้นก็จะสัมพันธ์กับปริมาณรังสีที่ตกกระทบบริเวณไวรังสีของหัววัดรังสี ขนาดสัญญาณพัลส์ที่ได้จากการวัดรังสีจะมีขนาดสัญญาณต่ำปะปนอยู่กับสัญญาณรบกวน จึงมีความจำเป็นต้องลดสัญญาณรบกวนเพื่อให้ได้อัตราสัญญาณต่อสิ่งรบกวนสูง (S/N) ซึ่งจะช่วยให้สเปกตรัมที่วิเคราะห์อยู่มีความสามารถในการแจกแจงเข้าใกล้ความสามารถในการแจกแจงพลังงานของหัววัดรังสี ดังนั้นการจัดระบบวัดส่วนหน้าจึงประกอบด้วย ภาคขยายส่วนหน้าที่ออกแบบให้ปรับสัญญาณจากหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ และส่งสัญญาณผ่านภาคขยายสัญญาณหลัก ให้ทำการขยายสัญญาณพร้อมกรองสิ่งรบกวนที่ปะปนมากับสัญญาณออกให้ต่ำที่สุด กระบวนการนี้มีผลให้รูปสัญญาณพัลส์เปลี่ยนไป จึงมักเรียกว่า การแต่งรูปสัญญาณ เกิดเป็นสัญญาณที่พร้อมวิเคราะห์ขนาดความสูงของพัลส์

การวิเคราะห์สเปกตรัมรังสี เป็นการบันทึกจำนวนนับรังสีที่ระดับความแตกต่างความสูงของพัลส์ และนำไปแสดงผลในรูปฮิสโตแกรมการกระจายพลังงาน (Energy Distribution) การแจกแจงขนาดความสูงของสัญญาณพัลส์ ทำได้โดยการจับสัญญาณพัลส์ที่ตำแหน่งความสูงด้วยวงจรตรวจจับขนาดความสูงและยืดเวลาออกไปเพื่อส่งสัญญาณ ณ ตำแหน่งความสูงให้กับวงจรแปลงผันสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลแบบไปป์ไลน์ขนาด 12 บิต ข้อมูลดิจิตอลที่แปลงมานั้นจะส่งไปยังไมโครคอมพิวเตอร์ได้ครั้งละ 6 บิต ผ่านพอร์ตสื่อสารข้อมูลยูเอสบีของคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงสเปกตรัมความสูงของพัลส์ การส่งลำดับชุดข้อมูลทำได้โดยชุดวงจรหน่วงเวลาที่ 1 จะคอยตรวจจับขอบขาขึ้นของสัญญาณพัลส์พร้อมหน่วงเวลา 2.2 μs ให้กับวงจรแลทช์ค้างข้อมูลดิจิตอลที่เป็น

ค่าความสูงของพัลส์ออกไปรอ ส่วนทางเข้าวงจรส่งข้อมูลผ่านพอร์ตยูเอสบี ข้อมูลดิจิตอลจากวงจรแปลงผัน 12 บิต ที่แบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุดนั้นๆ ชุดแรกจะเป็น 6 บิตบน (MSB) และชุดหลังเป็น 6 บิตล่าง (LSB) เพื่อให้สามารถส่งได้วงจรยูเอสบีครั้งละ 8 บิต ทำให้มีจำนวนบิตว่างครั้งละ 2 บิต จึงได้ทำการเพิ่มเครื่องหมายแสดงบิตบนล่างลงไปในชุดข้อมูล คือในข้อมูลชุดบนหรือ 6 บิตบน ให้บิตที่ 8,7 เป็นลอจิก 1,0 ตามลำดับส่วนข้อมูลชุดล่างหรือ 6 บิตล่าง ให้บิต 8,7 เป็นลอจิก 0,0 เมื่อทำการอ่านค่าด้วยระบบคอมพิวเตอร์ซอฟแวร์ที่เขียนขึ้นจะทำหน้าที่รวมข้อมูลที่ได้จากชุดบนและล่างให้กลับคืนอยู่ในรูป 12 บิตพร้อมนำค่าที่ได้แปลงเป็นเลขฐานสิบตั้งแต่ 0 ถึง 4095 เพื่อเป็นช่องวิเคราะห์พลังงาน สำหรับชุดหน่วงเวลาที่ 2, 4 จะกำเนิดสัญญาณพัลส์ 100 ns ให้กับไอซีส่งข้อมูลในชุดบนและล่างตามลำดับ โดยจะมีระยะเวลาในการส่งห่างกัน 800 ns ทำให้เกิดช่วงเวลาส่งข้อมูลจากชุดหน่วงเวลาที่ 3 จากการออกแบบระบบส่งข้อมูลดังกล่าวสามารถเขียนเป็นแผนภาพเวลาได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนภาพเวลาการทำงานของระบบวิเคราะห์หลายช่องที่บรรจุในฐานหลอด

3.1 ข้อมูลพื้นฐานของการออกแบบและการสร้าง

1. อุปกรณ์วิเคราะห์แบบหลายช่อง ออกแบบให้มีส่วนขยายสัญญาณพัลส์และแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงสำหรับหัววัดเรืองรังสีประกอบอยู่ภายใน
2. ส่วนขยายสัญญาณพัลส์มีโครงสร้างรวมแบบ preamplifier / amplifier โดยภาคขยายส่วนหน้าเป็นแบบ Parasitic และภาคขยายหลักมีอัตราขยายสัญญาณพัลส์ 50 เท่า เพื่อขยายสัญญาณให้เพียงพอต่อความต้องการของ ADC
3. แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงจะต้องสามารถปรับศักดาไฟฟ้าได้จาก 0 – 1,000 โวลต์ จ่ายกระแสได้ไม่ต่ำกว่า 500 ไมโครแอมแปร์ ให้กับหลอด PMT
4. การแปลงสัญญาณพัลส์อนาลอกเป็นดิจิตอลเป็นระบบไปป์ไลน์ ให้ความละเอียด 4095 ช่องวัด หรือ 12 บิต
5. ส่วนแสดงผลและเก็บข้อมูล สามารถแสดงสเปกตรัม อ่านค่ารายละเอียดของข้อมูลช่องวิเคราะห์ และจำนวนนับรังสี

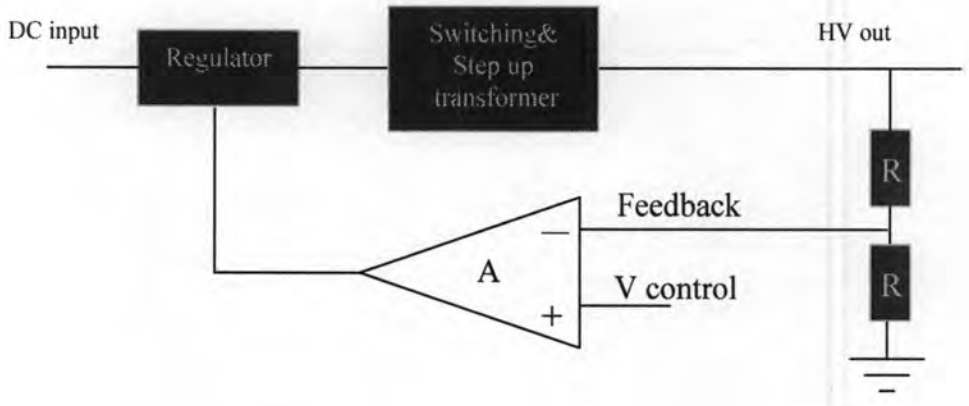
3.2 การออกแบบระบบวิเคราะห์แบบหลายช่อง

การออกแบบระบบวิเคราะห์หลายช่องแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือส่วนที่เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในการแปลงสัญญาณจากพัลส์ทางรังสีจนถึงส่วนส่งข้อมูลผ่านระบบยูเอสบี และส่วนที่ 2 เป็นโปรแกรมอิมูเลเตอร์ ในส่วนของวงจรอิเล็กทรอนิกส์สามารถแบ่งเป็นส่วนย่อยได้ 5 ส่วนดังนี้

1. แหล่งจ่ายไฟศักดาสูงเพื่อไบอัสให้กับ PMT
2. วงจรไบอัสในฐานหลอด PMT และวงจรขยายส่วนหน้า
3. วงจรขยายหลักพร้อมวงจรแต่งรูปสัญญาณ
4. วงจร ADC พร้อมวงจรยืดสัญญาณพัลส์
5. วงจรส่งข้อมูลจาก ADC ผ่านทางพอร์ต USB

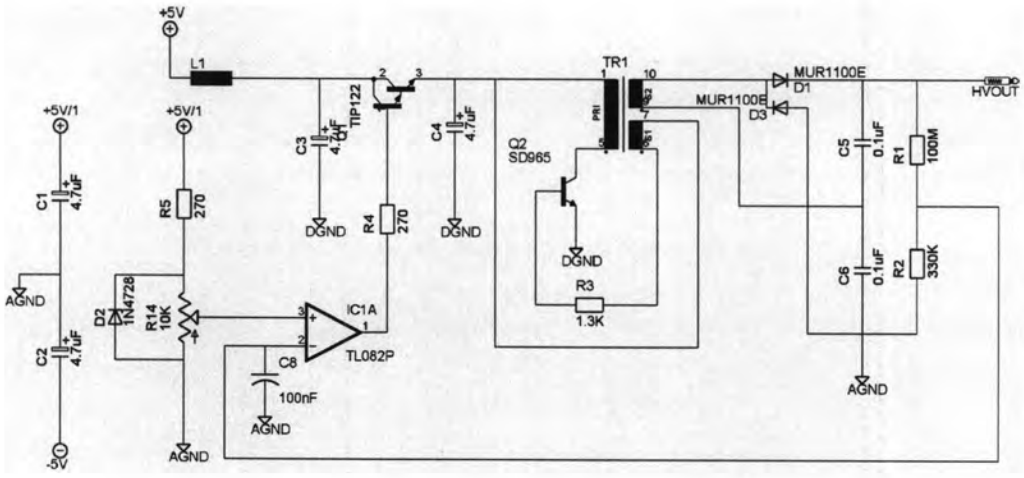
3.2.1 แหล่งจ่ายไฟศักดาสูงเพื่อไบอัสให้กับ PMT

วงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงศักดาต่ำเป็นไฟฟ้ากระแสตรงศักดาสูง (Converter) เลือกใช้วงจรกำเนิดความถี่ด้วยตัวเองแบบซิงเกิลเอนด์ (Single End Self Excited-oscillation) สำหรับแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับในขั้นแรก แรงดันไฟฟ้าศักดาต่ำจากแหล่งจ่ายไฟขนาด ±5 โวลต์ จะส่งผ่านวงจรควบคุมการปรับศักดาไฟฟ้าให้คงที่ เพื่อจ่ายให้วงจรกำเนิดความถี่และหม้อแปลงเพิ่มศักดาไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับศักดาสูงจะถูกแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงศักดาสูง ซึ่งปรับค่าได้จาก 0 – 1,000 โวลต์ ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 3.3 ซึ่งประกอบด้วยวงจรขับกระแสหม้อแปลงเพิ่มศักดาไฟฟ้า วงจรกรองกระแส วงจรเปรียบเทียบศักดาไฟฟ้า และวงจรควบคุมศักดาไฟฟ้าให้คงที่



รูปที่ 3.3 แผนภาพแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง

รูปที่ 3.3 เป็นวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงที่ออกแบบขึ้น Q_2 ทำหน้าที่ขับกระแสให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเพิ่มศักดา โดยหม้อแปลงมีขดป้อนกลับสัญญาณแบบบวก ทำให้ Q_2 เกิดภาวะออสซิลเลชัน (Oscillation) กำเนิดความถี่ขึ้นด้วยตัวเอง มีผลให้เกิดไฟฟ้ากระแสสลับบนขดปฐมภูมิของ TR_1 และเหนี่ยวนำให้เกิดศักดาไฟฟ้าสูงกระแสสลับบนขดทุติยภูมิของ TR_1 ส่งให้วงจรทวีคูณแรงดันสองเท่า และกรองกระแสให้เรียบด้วย C_5, C_6 ไฟฟ้าศักดาสูงจะถูกแบ่งอัตราลดทอนด้วยความต้านทาน 100M : 330KΩ ส่งเข้าวงจรเปรียบเทียบศักดาไฟฟ้าที่ไอซี 1 ขา เพื่อเปรียบเทียบกับศักดาอ้างอิงที่ปรับค่าได้ด้วย R_{14} สำหรับปรับค่าไฟฟ้าศักดาสูงและควบคุมศักดาไฟฟ้าให้คงที่ โดยสัญญาณทางออกขา 1 ของไอซี 1 จะนำไปควบคุมการทำงานของ Q_1 ให้ขับกระแส Q_2 เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่หม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 3.4 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง

3.2.2 วงจรไบอัสหลอด PMT และวงจรขยายส่วนหน้า

วงจรไบอัสหลอด PMT จะจัดอยู่ในรูปแบบแคโทดลงกราวนด์ (Cathod-Ground) เนื่องจากการเชื่อมต่อกับวงจรจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงกระทำได้ง่ายกว่า และส่งสัญญาณออกทางไดโนดหรือแอโนดแบบ AC Coupling โดยมีตัวเก็บประจุเป็นตัวกั้นไฟฟ้าศักดาสูงกระแสตรงของไบอัสกับสัญญาณพัลส์จากการวัดรังสีที่เป็นกระแสไฟฟ้าสลับ

เมื่อให้มีปริมาณโฟโตอิเล็กตรอนเท่ากับ 1000 ที่เกิดจากโฟโตแคโทด และให้อัตราขยายของหลอด PMT มีค่า 10^6 จะได้จำนวน 10^9 อิเล็กตรอนต่อพัลส์ที่แอโนด ขณะทำการวัดสัญญาณรังสีที่มีจำนวนนับ 10^5 cps จะสามารถคำนวณหากระแสเฉลี่ยที่แอโนดได้ดังสมการ[7]

$$I_{avg} = 10^9 \frac{\text{electrons}}{\text{pulse}} \times 1.6 \times 10^{-19} \frac{\text{coulomb}}{\text{electron}} \times 10^5 \frac{\text{pulses}}{\text{second}} \quad \text{---------- (1)}$$

$$= 1.6 \times 10^{-5}\ \text{A} = 0.016\ \text{mA}$$

กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง สำหรับไบอัสหลอด PMT ซึ่งจัดวงจรตามรูปที่ 3.6 เกิดจากผลรวมของกระแสแอโนด (Ia) และกระแสที่เกิดจากวงจรแบ่งแรงดัน (Bleeding Current, Ib) ซึ่งมักจะมีค่าเป็น 10 – 50 เท่าของกระแสจากแอโนด เมื่อให้ค่าแรงดันระหว่างไดโนดไม่เกิน 100 โวลต์ และกระแสแอโนดขณะวัดพลังงานสูงสุดเท่ากับ 10 μA ที่แรงดันไบอัสสูงสุด 1,000 โวลต์ และกระแสจัดแบ่งในวงจรฐานหลอดเป็น 17 เท่าของกระแสแอโนด ทำให้สามารถคำนวณหาความต้านทานของวงจรฐานหลอดได้จาก

$$R_{ch} = \frac{\text{Bias Voltage (max)}}{I_s} \qquad \text{---------- (2)}$$

เมื่อ R_{ch} = ความต้านทานรอบวงจรฐานหลอด (Chain Resistor)

I_s = กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไบอัส

และ $I_s = I_a + I_b$

เมื่อคำนวณค่าความต้านทานรวมของวงจรฐานหลอดจะได้

$$R_{ch} = \frac{1000}{(10+(10x17)x10^{-6})}$$

$$= 5,555,555 \text{ โอห์ม}$$

ตัวต้านทานรอบฐานหลอดมีทั้งหมด 11 ตัว ทำให้ได้ตัวต้านทานแต่ละไดโนดเป็น

$$= \frac{5,555,555}{11}$$

$$= 505 \text{ กิโลโอห์ม}$$

I23561919

ค่ามาตรฐานตัวต้านทานที่มีจำหน่ายเป็น 510 กิโลโอห์ม และในขณะวัดพลังงานสูงสุด ปริมาณประจุต่อพัลส์จะมีค่าประมาณ 1 nC ที่ไดโนดสุดท้าย และศักดาไฟฟ้าระหว่างไดโนดกับแอโนดมีค่าไม่เกิน 100 โวลต์ ทำให้หาค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในการกรองกระแสของวงจรไบอัสบริเวณใกล้แอโนดได้จาก

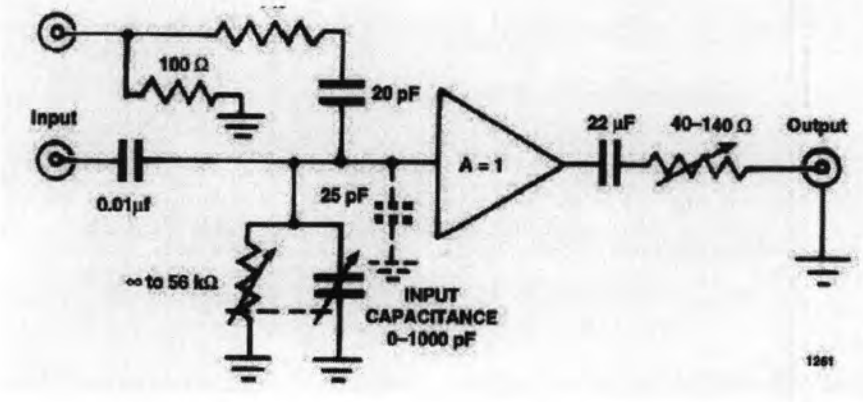
$$C = \frac{Q}{V} \qquad \text{---------- (3)}$$

$$= \frac{1x10^{-9}}{100}$$

$$= 10\ pF$$

เพื่อให้วงจรมีเสถียรภาพต่อการทำงาน จึงต้องกำหนดให้ค่าตัวเก็บประจุมีค่าเป็น 100 เท่าของค่า C ทำให้ได้ค่าตัวเก็บประจุ 1nF ที่ไดโนดสุดท้ายและสำหรับไดโนดก่อนสุดท้ายอีก 2 ตัว สามารถเลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุได้เหมือนกัน

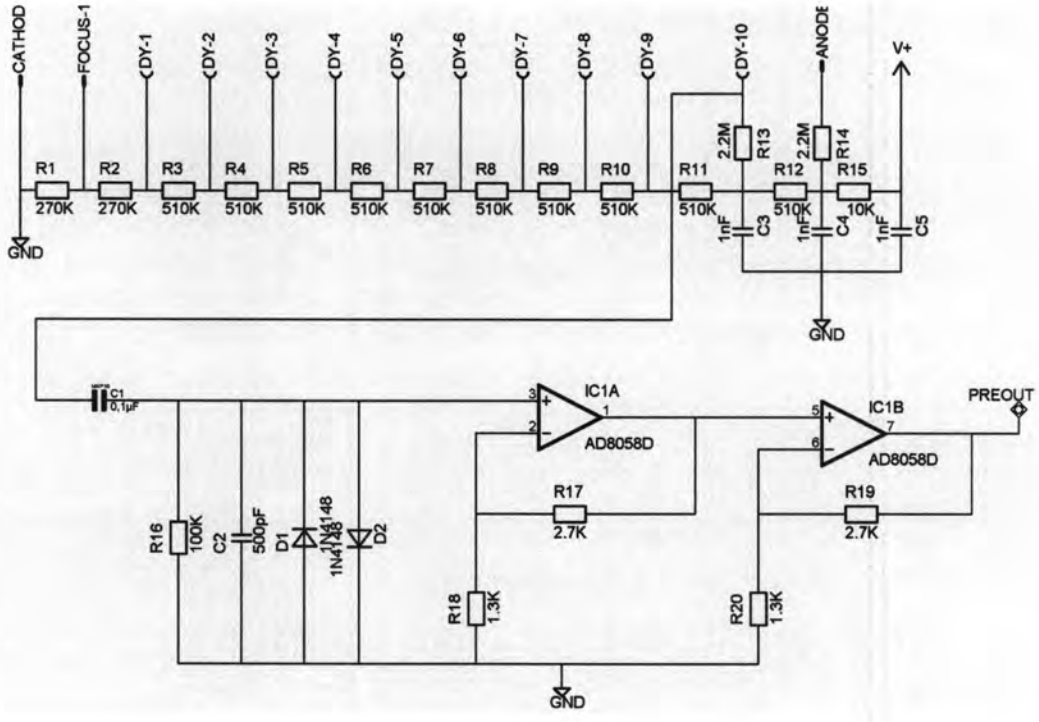
ขณะวัดรังสีแกมมาพลังงานต่ำจะทำให้ได้กระแสแอโนดต่ำ จึงจำเป็นต้องขยายสัญญาณขั้นต้นก่อนที่จะนำส่งให้ภาคขยายหลัก ในการจัดวงจรภาคขยายส่วนหน้าสำหรับหลอด PMT นิยมใช้วงจรแบบค่าความจุแฝง (Parasitic Capacitance)[8] ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การจัดวงจรขยายส่วนหน้าชนิดค่าความจุแฝง

และเพื่อให้เป็นไปตามข้อตกลงของเวลาสลายสัญญาณพัลส์ของภาคขยายส่วนหน้า จึงมีการต่อตัวต้านทานขนาด 100 กิโลโอห์ม ขนานกับตัวเก็บประจุเพื่อให้มีค่าเวลาคงที่ (Time Constant) 50 μs

สำหรับวงจรขยายส่วนหน้าจัดวงจรแบบไม่กลับสัญญาณ (Non Inverting Amplifier) 2 สเตจ ถูกออกแบบให้รับสัญญาณพัลส์ซีกบวกจากไดโนดตัวสุดท้ายของวงจรฐานหลอด โดยมีอัตราขยายสัญญาณมากสุดเท่ากับ 10 เมื่อจัดรูปวงจรทั้งหมดแล้วจึงทำให้ได้วงจรรวมของภาคขยายส่วนหน้า พร้อมวงจรไบอัสฐานหลอดแสดงดังรูปที่ 3.6



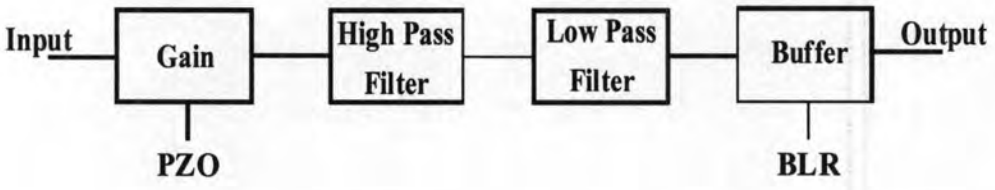
รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงวงจรไบอัสฐานหลอด พร้อมวงจรขยายส่วนหน้า

โดยคุณสมบัติของวงจรขยายส่วนหน้า ทำหน้าที่รับสัญญาณอินพุตจาก PMT ที่มีความต้านทานขาออกสูงให้มีความต้านทานขาออกต่ำ และปรับแรงดันขาออกสัญญาณเบื้องต้นให้เหมาะสมกับวงจรขยายส่วนหลังโดยที่ไม่ทำให้สูญเสียข้อมูลของการวัด ไอซีออปแอมป์ที่เลือกใช้นั้นจำเป็นต้องตอบสนองสัญญาณทางรังสีที่มีค่าไรส์ไทม์ (Rise Time) ที่สูง จึงได้เลือกใช้ออปแอมป์เบอร์ AD8058 ของบริษัท อนาลอก ดีไวส์ ซึ่งมีอัตราสลูว์ (Slew Rate) สูงถึง 1000 V/s

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

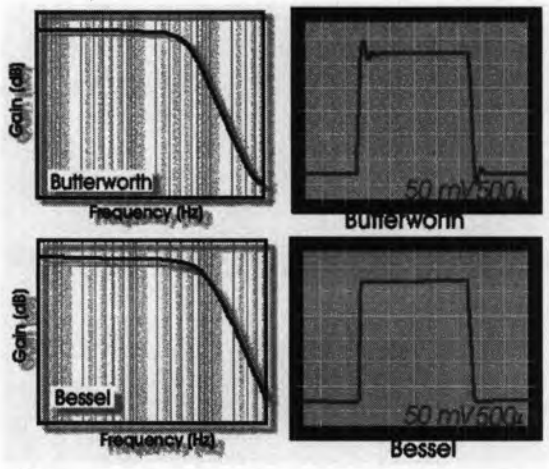
3.2.3 วงจรขยายหลักพร้อมวงจรแต่งรูปสัญญาณ

หัววัดรังสีมีคุณสมบัติเป็นแหล่งจ่ายกระแสชั่วขณะขนาดเล็ก มีความไวต่อสัญญาณรบกวน ดังนั้นวงจรขยายหลัก นอกจากจะทำหน้าที่ขยายขนาดสัญญาณพัลส์จากวงจรขยายส่วนหน้าแล้ว ยังต้องทำหน้าที่ลดสัญญาณรบกวนออกจากสัญญาณพัลส์ของรังสี การลดสัญญาณรบกวนทำได้โดยวงจรกรองความถี่แบบต่อเนื่องระหว่างวงจรกรองชนิดยอมความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter) และวงจรกรองความถี่ชนิดยอมความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) ซึ่งมีจุดตัดความถี่ (Corner Frequency) ตรงกัน เพื่อให้มีย่านตอบสนองความถี่แคบมาก ดังนั้นวงจรจึงยอมให้องค์ประกอบสัญญาณพัลส์ผ่านได้เฉพาะอิมพัลส์ ขณะที่ขัดขวางสัญญาณฮาร์มอนิกส์ไม่ให้ผ่านไป มีผลให้รูปสัญญาณเปลี่ยนไป เท่ากับเป็นการแต่งรูปสัญญาณที่เหมาะสมกับการนำไปวิเคราะห์ขนาดความสูงของพัลส์ ดังนั้นโครงสร้างของวงจรขยายหลักจึงมีแผนภาพวงจรดังในรูปที่ 3.7

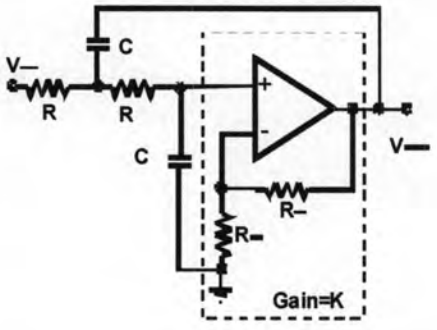


รูปที่ 3.7 แผนภาพของวงจรขยายหลักและวงจรแต่งรูปสัญญาณ

วงจรกรองชนิดยอมความถี่สูงผ่านเลือกแบบเฟิร์สออเดอร์ (First Order) หรือในเชิงฟังก์ชันส่วนกลับในรูปโดเมนเวลา (Time Domain) จะเรียกว่า Differentiator กำหนดค่าคงที่เวลาที่ 0.5 μs วงจรกรองชนิดยอมความถี่ต่ำผ่าน มีรูปแบบวงจรหลายแบบ เช่นวงจร ChebyShev, Butterworth และ Bessel ซึ่งให้ผลตอบสนองย่านความถี่แตกต่างกันดังในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แสดงการตอบสนองของวงจรอินทิเกรเตอร์แบบต่างๆ



รูปที่ 3.9 รูปแบบของวงจรกรองแบบ Bessel

จากแผนภาพของวงจรขยายสัญญาณพัลส์ในรูปที่ 3.7 ได้ออกแบบวงจรโดยใช้ไอซีเบอร์ AD8058 ทุกสเตจ (Stage) โดยสเตจแรกจัดวงจรขยายแบบไม่กลับสัญญาณที่อัตราขยาย 3 เท่า ทางเข้าของวงจรจัดวงจรกรองชนิดยอมความถี่สูงผ่านแบบประกอบด้วย R_{23} และ C_3 พร้อมวงจรโพลซีโร (Pole Zero) เมื่อปรับแก้ฐานสัญญาณด้วย R_6 และ R_7 สเตจถัดไปเป็นวงจรกรองชนิดยอมความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง โดยเลือกใช้วงจรกรองแบบ Bessel ซึ่งได้พิจารณาจากผลตอบสนองสัญญาณพัลส์ของวงจรกรองต่างๆ ในรูปที่ 3.8 สามารถคำนวณได้จากสมการของฟังก์ชันถ่ายโอนลำดับสองของตัวกรองชนิดยอมความถี่ต่ำผ่าน[9] ดังนี้

$$A(s) = \frac{A_o}{1+\omega_c RC(3-A_o)s+(\omega_c RC)^2 s^2} \qquad \text{---------- (4)}$$

และสัมประสิทธิ์ของตัวกรองจากการแก้สมการถ่ายโอน

$a_1 = \omega_c RC(3-A_o)$

$b_1 = (\omega_c RC)^2$

จะได้ $R = \frac{\sqrt{b_1}}{2\pi f_c C}$ และ $A_o = 3 - \frac{a_1}{\sqrt{b_1}} = 3 - \frac{1}{Q}$

เมื่อ Q เป็น Pole Quality ของตัวกรองชนิดยอมให้ความถี่ต่ำผ่าน

ตัวกรองในวงจรขยายสัญญาณพัลส์จะมี f_c เดียวกันทั้งหมด ดังนั้นค่า R และ C จึงมีค่าเท่ากับตัวกรองยอมให้ความถี่สูงผ่าน กำหนดให้ $a_1 = \sqrt{3}$ จะได้ Q = 0.577 สามารถคำนวณหาอัตราขยายได้โดย

$$Q_t = \frac{1}{3 - Av} \qquad \text{---------- (5)}$$

$$Av = 1.266$$

เมื่อกำหนดให้ตัวต้านทาน R_b มีค่า 1300 โอห์ม

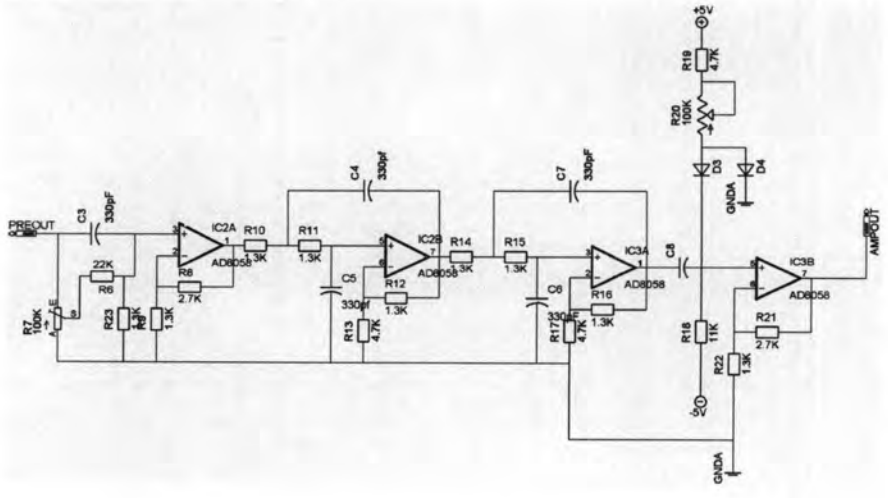
จาก $$Av = \frac{R_b}{R_a} + 1 \qquad \text{---------- (6)}$$

$$R_1 = 4{,}881 \text{ โอห์ม}$$

ในที่นี้เลือกใช้ค่าที่มีจำหน่ายในท้องตลาด ค่า 4700 โอห์ม โดยที่ค่าเวลาคงตัวยังอยู่ที่ 0.5 µs

วงจรในสเตจสุดท้ายมีรูปแบบของวงจรเหมือนกับวงจรขยายสเตจแรก มีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นวงจรขับสัญญาณทางออกและจัดวงจรปรับแก้ฐานสัญญาณ (Baseline Restorer, BLR) ไว้ประกอบด้วย R_{18}, R_{19} และ R_{20} ทำงานร่วมกับไดโอด D_3 และ D_4 ปรับแก้ไบอัสที่ขา 5 ของไอซี 3B

จากการออกแบบวงจรส่วนต่างๆ ของวงจรขยายหลักและวงจรแต่งรูปสัญญาณ สามารถนำมาจัดเป็นวงจรทั้งหมดได้ดังในรูปที่ 3.10

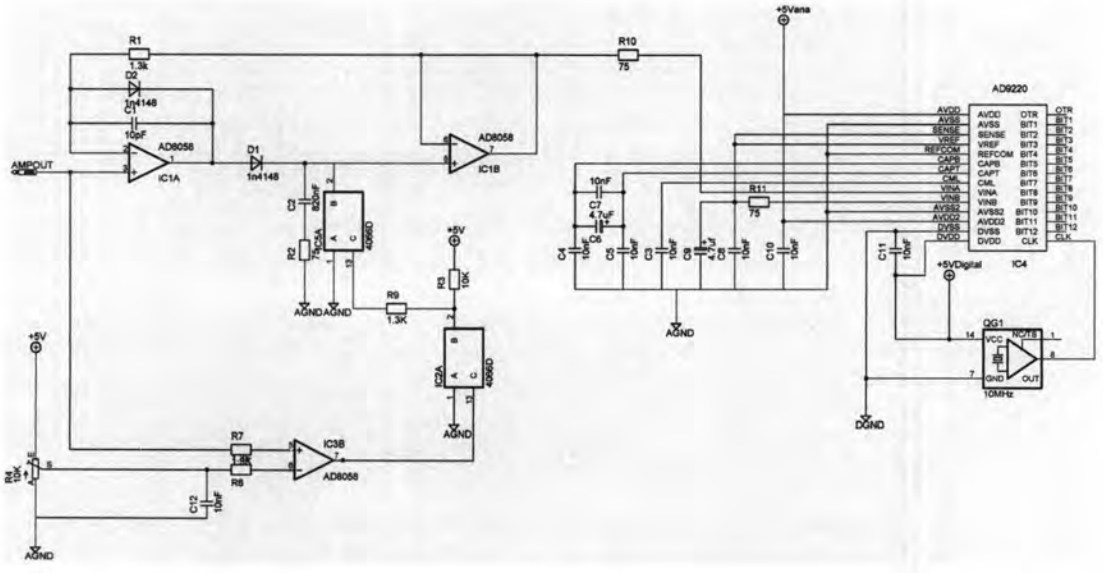


รูปที่ 3.10 แผนภาพวงจรขยายหลัก พร้อมวงจรแต่งรูปสัญญาณ

3.2.4 วงจรแปลงผันสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล

วงจรแปลงผันสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลจะใช้ไอซีเบอร์ AD9220 จัดวงจรแปลงขนาดความสูงของพัลส์ เป็นตำแหน่งช่องวิเคราะห์ในรูปรหัสดิจิตอลดังในรูปที่ 3.11 โดยมีวงจรยืดสัญญาณพัลส์อยู่ส่วนหน้า เพื่อทำหน้าที่ยืดเวลาของแรงดันสูงสุดของสัญญาณพีครังสีออกไปจนกว่า ADC จะแปลงผันสัญญาณเสร็จสิ้น การตรวจจับตำแหน่งสัญญาณสูงสุดใช้ไอซี 1A (AD8058) ไดโอด D1 และ C2 เมื่อแรงดันทางเข้าของไอซี 1A มีค่าสูงสุดและเก็บประจุผ่านแรงดัน C2 ได้ค่าสูงสุดอินพุตขา 3 มีแรงดันปรากฏลดลงต่ำกว่าขา 2 จะทำให้ไอซี 1A หยุดการประจุ C2 และได้ค่าแรงดันสูงสุดคงที่จนกว่าจะถูกรีเซ็ตจากไอซีอนาลอกสวิตช์ 4066 เพื่อคายประจุให้วงจรรับสัญญาณรังสีในลูกถัดไป ไอซี 3B เป็นวงจรพัลส์ดีเท็คเตอร์ ทำหน้าที่ตรวจสอบระดับเทรสโฮลด์ (Threshold) เพื่อทำการคายประจุหลังเสร็จสิ้นการแปลงสัญญาณ

ADC ออกแบบให้ทำงานด้วยวงจรกำเนิดความถี่สำเร็จรูปที่ 10 เมกะเฮิร์ตซ์ หรือเวลาในการแปลงผัน 100 ns และใช้สัญญาณนาฬิกา 3 ลูก จึงได้ค่าสัญญาณดิจิตอลที่ต้องการ ทำให้การนับสัญญาณพัลส์ต้องหน่วงเวลาในการนำค่าดิจิตอลออกที่ 300 ns หลังจากสัญญาณพัลส์รังสีผ่านตำแหน่งสูงสุดแล้วจึงจะได้รหัสดิจิตอลส่งไปยังวงจรส่งข้อมูลผ่านพอร์ตยูเอสบี



รูปที่ 3.11 วงจรแปลงผันสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล

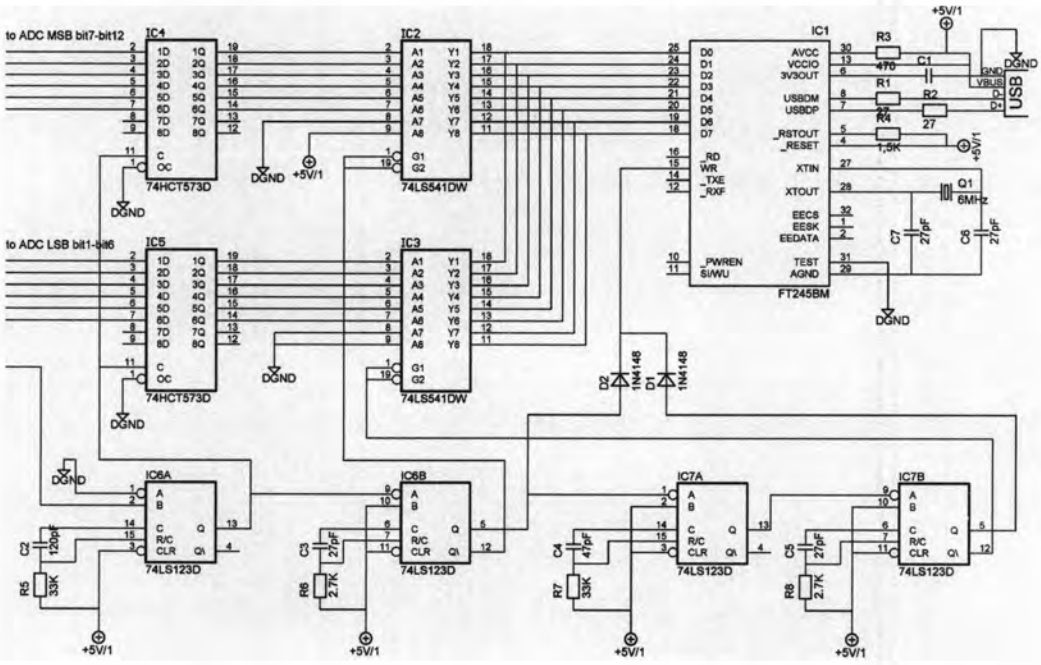
3.2.5 วงจรส่งข้อมูล ADC ผ่านพอร์ตยูเอสบี

วงจรแปลงผันสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลมีขนาด 12 บิต ซึ่งมีรหัสเชิงเลขเทียบเท่ากับจำนวนช่องวิเคราะห์แบบหลายช่องขนาด 4096 ช่องวิเคราะห์ แต่ความสามารถของตัวแปลงข้อมูลขนานเป็นยูเอสบีรับค่าได้เพียงครั้งละ 8 บิต ทำให้ต้องแบ่งข้อมูลเป็น 2 ชุด และทำการส่งข้อมูลเป็นครั้งละ 8 บิต โดยมีการส่งเป็น 6 บิตบน และ 6 บิตล่างแยกจากกัน ในการส่งครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 มีบิตที่เหลือครั้งละ 2 บิต ซึ่งสามารถนำมากำหนดเป็นข้อมูลชุดแรกและชุดหลังได้โดยการใส่ค่า “1” และ “0” ที่บิตสูงสุดดังนี้

ค่า ADC เอาต์พุต	b_{12}	b_{11}	b_{10}	b_9	b_8	b_7	b_6	b_5	b_4	b_3	b_2	b_1
การส่งครั้งที่ 1	“1”	“0”	b_{12}	b_{11}	b_{10}	b_9	b_8	b_7				
การส่งครั้งที่ 2	“0”	“1”	b_6	b_5	b_4	b_3	b_2	b_1				

การเติมค่า 0 หรือ 1 เข้าไปกับการส่งในแต่ละครั้ง เป็นการบ่งบอกชุดข้อมูลเพื่อให้คอมพิวเตอร์รับรู้ว่าเป็นข้อมูลการส่งในชุดใด ทำให้สามารถตรวจเช็คข้อมูลได้ง่าย

จากกรรมวิธีการส่งและปัญหาของจำนวนบิตที่มากกว่าของวงจรแปลงสัญญาณ จึงได้ออกแบบวงจรส่งข้อมูลได้ดังรูปที่ 3.12



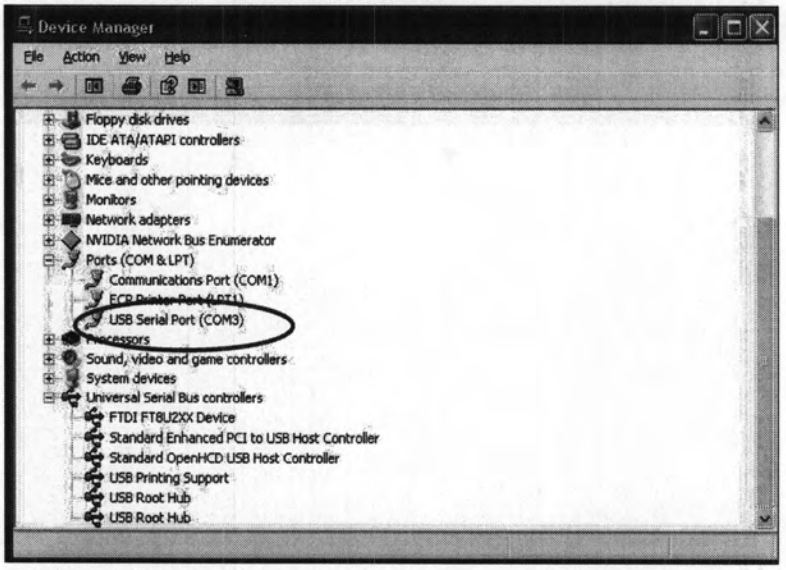
รูปที่ 3.12 วงจรส่งข้อมูลทางพอร์ตยูเอสบีและรับค่าจาก ADC

จากรูป 3.12 เมื่อสัญญาณจากวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์ทางรังสีได้เปลี่ยนสภาวะจากลอจิก 0 เป็นลอจิก 1 วงจรโมโนสเตเบิล (Monostable) ชุดที่ 1 จะทำการหน่วงเวลาการส่งค่าออกของ ADC ไปอีก 2 μs เพื่อให้มีความแน่นอนว่าสัญญาณที่ได้จากรังสีเป็นตำแหน่งที่มีแรงดันสูงสุด พร้อมทั้งไปกระตุ้นให้ชุดที่ 2 เปิดโอกาสให้ค่าดิจิตอล 6 บิตบนของวงจรแปลงออกไปยังตัวแปลงยูเอสบี (FT245BM) เมื่อตัวแปลงยูเอสบีได้รับค่าลอจิกที่อินพุต พร้อมสั่งให้มีการเขียนข้อมูลออกไปยังคอมพิวเตอร์ด้วย ลอจิกขอบขาลงจาก "1" ไป "0" ที่ขา WR ข้อมูล 8 บิต จะถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อรับค่าการแปลง 6 บิตบน อยู่ในช่วงเวลา 100 ns เมื่อจบเวลาของโมโนสเตเบิลชุดที่ 2 จะไปกระตุ้นให้โมโนสเตเบิลชุดที่ 3 เปิดบัฟเฟอร์รับข้อมูล 6 บิตล่าง ส่งให้ตัวแปลงยูเอสบีเป็นข้อมูลในชุดที่ 2 เมื่อนำข้อมูลมารวมกันจึงได้เป็นข้อมูลขนาด 16 บิต โดยคอมพิวเตอร์จะต้องแปลความหมายของข้อมูลทั้ง 2 ชุด หลังได้รับชุดข้อมูลไปแล้ว

3.3 โปรแกรมอิมูเลเตอร์สำหรับระบบวิเคราะห์แบบหลายช่อง

โปรแกรมอิมูเลเตอร์สำหรับระบบวิเคราะห์แบบหลายช่อง ประกอบด้วยโปรแกรมติดต่อข้อมูลทางพอร์ตยูเอสบี และโปรแกรมปรับไมโครคอมพิวเตอร์ให้ทำงานเป็นระบบวิเคราะห์แบบหลายช่อง

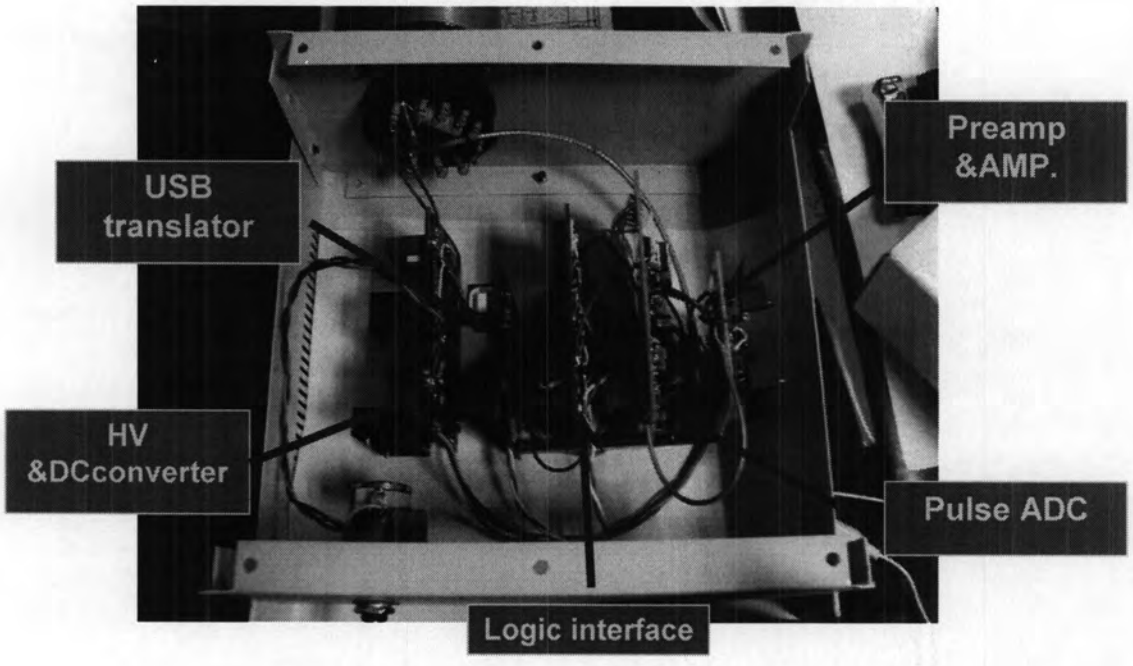
การเขียนโปรแกรมติดต่อกับพอร์ตยูเอสบีสามารถทำได้หลายแบบ วิธีที่ง่ายที่สุดและให้ประสิทธิภาพสูงสำหรับไอซี FT245BM คือการติดต่อผ่านไดรเวอร์เวอร์ชวลคอมพอร์ต (VCP) การใช้ VCP ทำให้การติดต่อทางคอมพิวเตอร์มองเป็นพอร์ตอนุกรม ทำให้มีข้อเสียที่ไม่สามารถรู้ตำแหน่งของอุปกรณ์ได้โดยอัตโนมัติ ผู้ใช้งานต้องทำการตรวจสอบจากหน้า Hardware Properties ของระบบปฏิบัติการเพื่อระบุตำแหน่งที่แน่นอน เช่น com3, com4, com5 ดังรูปที่ 3.13 เมื่อทำการระบุตำแหน่งที่แน่นอนของพอร์ตแล้ว โปรแกรมจะพร้อมรับค่าดิจิตอลจากพอร์ตยูเอสบีได้ โปรแกรมรับข้อมูลจะเชื่อมโยงกับโปรแกรมปรับการทำงานของไมโครคอมพิวเตอร์ ให้เป็นเครื่องวิเคราะห์ระบบหลายช่อง มีขั้นตอนการจัดการข้อมูลเพื่อแสดงสเปกตรัมรังสี และติดต่อกับผู้ใช้เป็นไปตามโฟล์วชาร์ต (Flow Chart) ดังในรูปที่ 3.14 และโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในภาคผนวก ก.



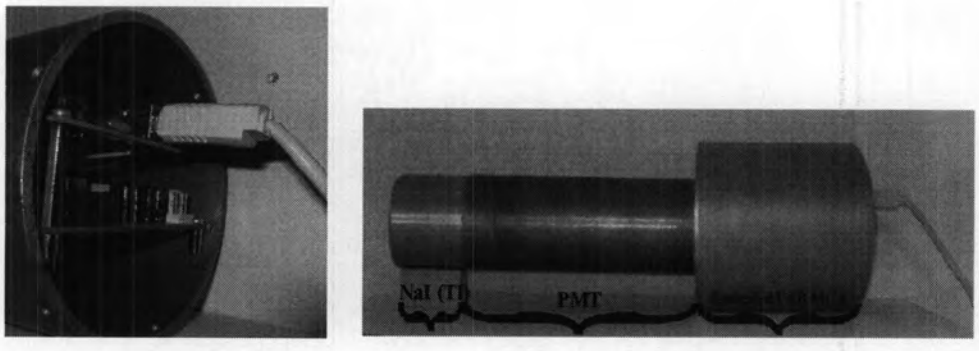
รูปที่ 3.13 แสดงรายการหน้าจอ Hardware Properties ของพอร์ตอนุกรม (com3)

รูปที่ 3.14 โฟล์วชาร์ตการส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์

จากวงจรที่ได้ออกแบบขึ้น ประกอบกับโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถสร้างเครื่องต้นแบบของระบบวิเคราะห์พลังงานแบบหลายช่อง ที่มีวงจรร่วมประกอบด้วยแหล่งจ่ายไบอัสศักดาสูง วงจรขยายสัญญาณ และวงจรเชื่อมโยงสัญญาณ นำมาประกอบกันและทดสอบสมรรถนะก่อนที่จะบรรจุรวมกันในฐานหลอด PMT ดังแสดงในรูปที่ 3.15 และโครงสร้างของอุปกรณ์ที่ประกอบในฐานหลอด PMT แสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.15 แสดงการจัดเรียงวงจรต่างๆ ที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 3.16 แสดงต้นแบบอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้น