

ET05: ระบบนับโฟตอนชนิดตอบสนองเวลาช่วงสั้นสำหรับวัดประกายแสงจาก สารอินทรีย์เรืองแสง

*สุวิทย์ ปุณณชัยยะ และ โอภาส อิศสระชัย

ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

โทรศัพท์ 0 2218 6773 โทรสาร 0 2218 6780 E-Mail: fnespn@eng.chula.ac.th

บทคัดย่อ

ระบบนับโฟตอนชนิดตอบสนองเวลาช่วงสั้นนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อใช้วัดสัญญาณซึ่งมีความกว้างพัลส์ระดับนาโนวินาที ที่เกิดจากกระบวนการเรืองรังสีและเปล่งประกายแสงของกลุ่มสารอินทรีย์เรืองรังสี ระบบนับโฟตอนที่ออกแบบขึ้นประกอบด้วย วงจรขยายสัญญาณพัลส์ชนิดตอบสนองเวลาช่วงสั้นซึ่งประยุกต์ใช้พวงจขยายสัญญาณไมโครเวฟเบอร์ MSA-0986 จัดวงจรต่อเนื่อง 3 ชั้น เพื่อขยายสัญญาณจากวงจรวัดโฟตอนแสงด้วยหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์รุ่น XP2206 แบบกราวนด์เอโนด และคัดเลือกสัญญาณพัลส์ด้วยวงจรดิสคริมีเนเตอร์ชนิดตอบสนองเวลาช่วงสั้น ผลการทดลองนับสัญญาณโฟตอนที่แรงดันไบอัสของหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ 1100 V ตั้งระดับการคัดเลือกสัญญาณที่ 50 mV พบว่ามีสัญญาณพัลส์รบกวนจากกระแสในควมมืดที่อุณหภูมิห้องน้อยกว่า 350 cps ระบบสามารถรับอัตรานับสัญญาณโฟตอนที่มีความกว้างพัลส์ 20 ns (FWHM) ได้มากกว่า 100 kcps และผลของการทดลองนับโฟตอนซึ่งมีความเข้มแสงต่ำจากการกระตุ้นสารอินทรีย์ที่ผ่านการฉายรังสีให้เปล่งประกายแสงด้วยชุดไดโอดเปล่งแสงพบว่าระบบมีความไวในการนับวัดเป็นที่พึงพอใจ

คำสำคัญ: การนับโฟตอน วงจรขยายตอบสนองเวลาสั้น ประกายแสงจากสารอินทรีย์ พัลส์ระดับนาโนวินาที

Fast Photon Counting System for Organic Scintillation Measurement

*Suvit Punnaichaiya, and Opas Issarachai

Department of Nuclear Technology, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

Phone: 0 2218 6773, Fax: 0 2218 6780, E-Mail: fnespn@eng.chula.ac.th

Abstract

The fast photon counting system was developed for measuring a nanosecond width pulse signal, generated from the scintillation in luminescence process of organic scintillator. The system consisted of 3 stages cascade of MAS-0986 monolithic microwave amplifier integrated circuit to perform a fast response amplifier for amplifying light photon signal, detector circuit using XP2206 photomultiplier tube (PMT) with anode grounding in pulse operation mode and fast discriminator circuit for signal discrimination. The tested results of photon counting system when setting the PMT biased voltage at 1100 V and 50 mV discrimination threshold showed that the dark current pulse at room temperature was less than 350 cps and more than 100 kcps count rate of fast photon

signal with 20 ns (FWHM) pulse width could be counted. The system counting sensitivity was satisfied for low intensity scintillated photon counting in LED photo-stimulated luminescence from irradiated organic material.

Keywords: Photon counting, Fast pulse amplifier, Organic scintillation, Nanosecond pulse

1. บทนำ

โฟตอนแสงเรืองจากกระบวนการเรืองรังสีของสารอินทรีย์เหลวที่ใช้กับหัววัดเรืองรังสี (Scintillation counter) เป็นโฟตอนแสงเรืองในรูปประกายแสงที่เกิดจากการลดระดับพลังงานของกลุ่มอิเล็กตรอนหลังการดูดกลืนพลังงานของรังสี มีความยาวคลื่นในช่วง 350-450 nm มีค่าคงที่เวลาสลายความเข้มแสง (Decay constant) ตื่นมากระหว่าง 1-3 ns และในเชิงสัญญาณพัลส์มีเวลาขาขึ้น (Rise time; t_r)¹ ระหว่าง 0.2-0.6 ns การนับวัดโฟตอนแสงเรืองระดับนาโนวินาทีนี้ จะต้องใช้ระบบนับโฟตอนที่มีการตอบสนองเวลาช่วงสั้น เริ่มจากหลอดทวีคูณแสงชนิดโฟโตมัลติพลายเออร์ (Photomultiplier tube; PMT) ซึ่งทำหน้าที่แปลงความเข้มแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า ต้องมีส่วนทวีคูณอิเล็กตรอนชนิดตอบสนองเวลาเคลื่อนที่ของโฟโตอิเล็กตรอนช่วงสั้น (Fast PMT)² พร้อมทั้งมีโฟโตแคโทดที่ไวต่อความยาวคลื่นแสงในช่วงอัลตราไวโอเลต (UV) ในทางเทคนิคจะใช้หลอดทวีคูณแสงที่มีโฟโตแคโทดชนิดไบอัลคาไล (Bialkali) และส่วนทวีคูณอิเล็กตรอนแบบโฟกัสลิเนียร์ (Focused linear)³ จัดวงจรไบอัสชนิดกราวด์แอโนดแบบให้สัญญาณพัลส์ ในทำนองเดียวกันวงจรขยายสัญญาณพัลส์จำเป็นต้องตอบสนองเวลาช่วงสั้นด้วย วงจรขยายสัญญาณพัลส์ชนิดตอบสนองเวลาช่วงสั้น (Fast pulse amplifier) จะต้องมีย่านตอบสนองความถี่กว้างมาก โดยมีความถี่สิ้นสุด (Corner frequency; f_c) เพียงพอที่จะรักษาลักษณะองค์ประกอบย่อยของสัญญาณตามทฤษฎีอนุกรมฟูรีเยร์ (Fourier series) ให้คงความสมบูรณ์ของรูปสัญญาณไว้ ซึ่งสามารถประเมินได้จากความสัมพันธ์ของความถี่และเวลาขาขึ้นสั้นที่สุด⁴ ดังนี้

$$f_c = 0.35 / t_r \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$= 0.35 / 0.2 \times 10^{-9} = 1.75 \text{ GHz}$$

จะเห็นว่าวงจรขยายสัญญาณพัลส์ต้องตอบสนองความถี่ย่านคลื่นไมโครเวฟ การออกแบบวงจรขยายสัญญาณย่านความถี่นี้มีความยุ่งยาก แต่ปัจจุบันสามารถใช้ไอซีขยายย่านคลื่นไมโครเวฟสำเร็จรูป (Monolithic microwave integrated circuit; MMIC)⁵ จัดวงจรขยายต่อเนื่องให้ได้อัตราขยายตามต้องการ ส่วนสุดท้ายเป็นวงจรดิสคริมีเนเตอร์ตอบสนองเวลาช่วงสั้น (Fast discriminator) ทำหน้าที่คัดเลือกขนาดสัญญาณเหนือระดับน้อยที่สุด (Threshold level) และส่งสัญญาณลอจิกไปยัง

อุปกรณ์นับพัลส์และตั้งเวลา (Counter/Timer) อย่างไรก็ตามการส่งคลื่นสัญญาณความถี่ย่านคลื่นไมโครเวฟต้องคำนึงถึงสถานะแมตชิ่ง (Matching) เพื่อป้องกันการรบกวนจากผลการสะท้อนสัญญาณบนสายส่งที่มีอิมพีแดนซ์ (Impedance) 50 หรือ 93 Ω

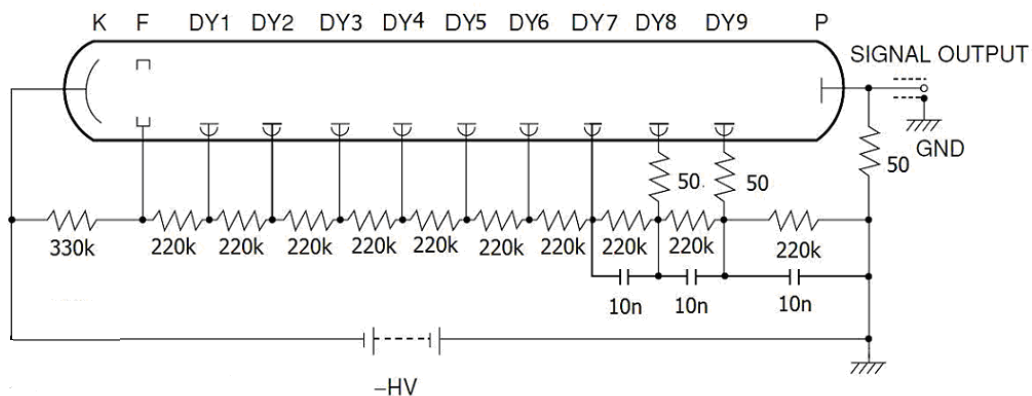
ระบบนับโฟตอนชนิดตอบสนองเวลาช่วงสั้นยังสามารถนำไปใช้ในการวัดแสงเรืองจากการกระตุ้นฟลูออโรสสารประกอบอนินทรีย์บางชนิดที่ผ่านการได้รับรังสีด้วยแสง ซึ่งมีการใช้เทคนิคนี้ใน 2 กรณี คือ Optically Stimulated Luminescence (OSL) ในด้านงานวัดระดับปริมาณรังสี (Dosimetry) และ Photostimulated luminescence (PSL) ในด้านงานฉายรังสีหรือถ่ายภาพรังสี ปริมาณโฟตอนแสงเรืองที่ปลดปล่อยจากอิเล็กตรอนที่สะสมในหลุมกับดักในโครงสร้างของผลึกขณะลดระดับพลังงานสู่ระดับพื้น สามารถนำมาใช้ประมวลผลปริมาณรังสีที่ฟลูออโรสสารประกอบอนินทรีย์ได้รับ

2. การพัฒนาระบบ

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบระบบนับวัดโฟตอนแสงเรืองในส่วนหลัก 2 ส่วน ได้แก่ วงจรหลอดทวิคูณแสงและวงจรขยายสัญญาณพัลส์ชนิดตอบสนองเวลาช่วงสั้น เพื่อนำมาประกอบกับอุปกรณ์แหล่งจ่ายไบอัส วงจรดิสคริมีเนเตอร์ อุปกรณ์นับและตั้งเวลา โดยมีรายละเอียดในการออกแบบดังนี้

2.1 การออกแบบวงจรหลอดทวิคูณแสง

ระบบวัดต้องการตอบสนองโฟตอนแสงเรืองที่มีเวลาสลายแสง 2-4 ns จึงเลือกหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ที่มีการตอบสนองเวลาขาขึ้นสั้นของบริษัท Photonis เบอร์ XP2206 ซึ่งมีไดโนด 10 ชั้นจัดแบบโฟกัสลิเนียร์ มีอัตราขยาย 2.1×10^5 เท่า ที่แรงดันไบอัสสูงสุด 1600 V นำมาออกแบบวงจรวัดพัลส์โฟตอนชนิดกราวด์เอโนด ส่งสัญญาณพัลส์ด้วยสายเคเบิลโคแอกเซียลที่มีอิมพีแดนซ์ $Z_0 = 50 \Omega$ ดังวงจรในรูปที่ 1

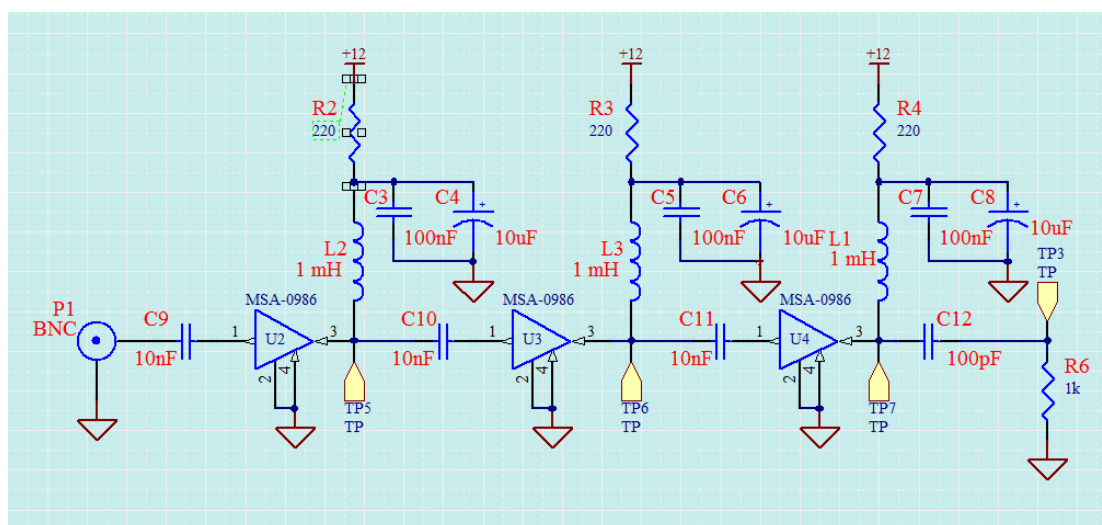


รูปที่ 1 วงจรหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ชนิดกราวด์เอโนด

กำหนดให้กระแสแอโนดเฉลี่ยที่อัตรานับโฟตอนพัลส์ 50 kcps ประมาณ 40 μA จะต้องจัดกระแสในวงจรไดโนด (I) สูงกว่า 10 เท่าหรือประมาณ 400 μA เพื่อความเสถียรของวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า เมื่อเลือกใช้แรงดันไบอัส (HV) ประมาณ 1000 V สามารถคำนวณความต้านทานรวม (R) ของวงจรไดโนดจาก $R = HV/I$ และจัดแบ่งค่าความต้านทานแต่ละไดโนดได้เป็น 220 k Ω ในทางเทคนิค เพื่อเร่งโฟโตอิเล็กตรอนมายังไดโนดแรก แรงดันไฟฟ้าระหว่างแคโทดกับไดโนดแรกจึงต้องสูงกว่าไดโนดชุดอื่น จึงใช้ความต้านทานสูงขึ้นเป็น 330 k Ω ที่แอโนดจัดตัวต้านทานทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณพัลส์กระแสเป็นพัลส์แรงดันไฟฟ้าที่มีค่า 50 Ω เข้ากับค่า Z_0 ของสายส่งสัญญาณ

2.2 การออกแบบวงจรขยายสัญญาณพัลส์

เนื่องจากสัญญาณพัลส์โฟตอนจากหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์เป็นพัลส์ที่มีเวลาขึ้นสั้น จำเป็นต้องออกแบบวงจรตอบสนองความถี่สูงมากและมีจำนวนสเตจ (Stage) พอดีกับการกลับซ้ำสัญญาณของวงจรสเตจสุดท้ายให้เป็นขั้วบวก ในการออกแบบวงจรได้ประยุกต์ใช้วงจรขยายคลื่นไมโครเวฟสำเร็จรูป (microwave amplifier) ของบริษัท Avago Technologies เบอร์ MSA-0986 จัดวงจรขยายสัญญาณพัลส์ชนิดไวต่อการตอบสนองเวลาช่วงสั้น ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรขยายสัญญาณพัลส์ชนิดไวต่อการตอบสนองเวลาช่วงสั้น

ใช้วงจรขยายเป็นแบบกลับซ้ำสัญญาณมีอิมพีแดนซ์ทางเข้า 50 Ω และมีอัตราขยายตัวละ 7 dB ดังนั้นจึงจัดวงจรขยายแบบต่อเนื่อง 3 สเตจ ทำให้สัญญาณทางออกมีขั้วเป็นบวก อัตราขยายรวม 21 dB ซึ่งสามารถคำนวณอัตราขยายรวมในรูป V_O/V_I ได้จาก

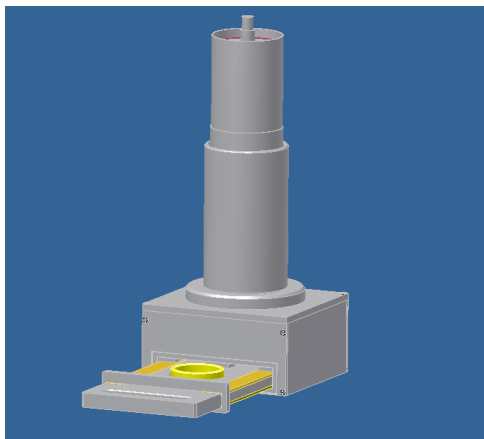
$$\text{dB} = 20 \log V_O/V_I \quad \dots\dots\dots (2)$$

ดังนั้น $V_O/V_I = 10^{21/20} = 11.22$ เท่า

การส่งผ่านสัญญาณแต่ละสเตจเป็นแบบ AC coupling โดยเลือกคาปาซิเตอร์ 10 nF ต่อร่วมกับอิมพีแดนซ์ทางเข้าเกิดวงจรรวม RC differentiator มีค่าคงที่เวลาเท่ากับ 500 ns ส่วนสัญญาณทางออกปรับวงจรส่งผ่านให้เหมาะสมกับวงจรดิสคริมีเนเตอร์แบบประหยัดโดยมีโหลดทางออกเท่ากับ 1 k Ω

2.3 การจัดระบบวัดโฟตอนแสงเรือง

ระบบวัดโฟตอนแสงเรืองที่สมบูรณ์ประกอบด้วยห้องวัดโฟตอนแสงเรืองจากตัวอย่างทำด้วยโลหะอลูมิเนียมห่อหุ้มหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ปิดมิดสนิทป้องกันแสงจากภายนอกเข้า มีลิ้นชักสำหรับใส่ตัวอย่างและแหล่งกำเนิดแสงกระตุ้นชนิดอินฟราเรดภายในดังในรูปที่ 3. ก ส่วนระบบนับโฟตอนเป็นการจัดระบบวัดสัญญาณพัลส์เวลาจากขึ้นต้นจากวงจรหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ที่จ่ายไบอัสด้วยแหล่งจ่ายไบอัส สัญญาณพัลส์จากวงจรขยายสัญญาณพัลส์ชนิดตอบสนองเวลาช่วงสั้นจะส่งสัญญาณไปคัดเลือกขนาดความสูงพัลส์ ด้วยระดับอ้างอิงของวงจรดิสคริมีเนเตอร์ที่ตั้งค่าไว้ สัญญาณลอจิกหลังการคัดเลือกจะส่งไปยังอุปกรณ์นับและตั้งเวลาดังแสดงระบบในรูปที่ 3. ข



ก. ห้องวัดโฟตอนแสงเรือง



ข. ระบบนับโฟตอนที่พัฒนาขึ้น

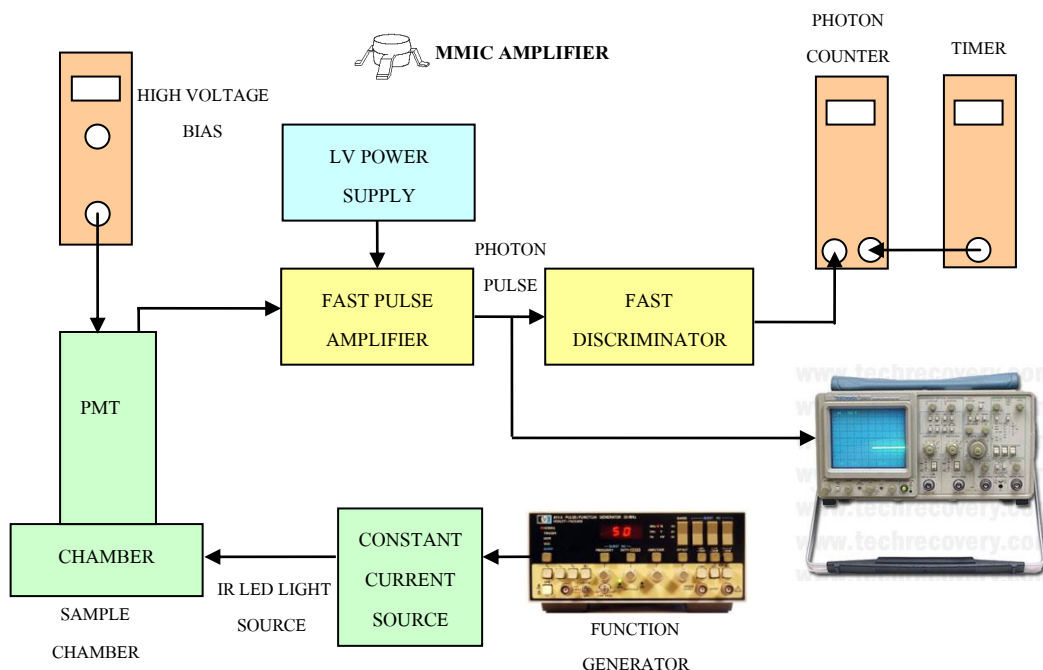
รูปที่ 3 ระบบนับโฟตอนชนิดตอบสนองเวลาช่วงสั้น

3. วิธีการทดสอบ

เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ

1. เครื่องอ่านรูปสัญญาณ Tektronix รุ่น 2465
2. เครื่องกำเนิดรูปสัญญาณของบริษัท Hewlett Packard รุ่น 8111
3. โครงบรรจุโมดูลวัดนิวเคลียร์มาตรฐาน NIM, Ortec รุ่น 4001A
4. โมดูลนับพัลส์ Ortec รุ่น 875
5. โมดูลตั้งเวลา Ortec รุ่น 719

6. โมดูลแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง Ortec รุ่น 478
7. แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ ± 12 V และ + 5 โวลต์
8. หัวต่อสายสามทางพร้อมเทอร์มินเตอร์ (Terminator) ขนาด 50 โอห์ม
9. สารเรืองรังสีเหลว ของบริษัท Beckman Instrument Inc.
10. ชุดต้นกำเนิดแสงอินฟราเรด
11. ต้นกำเนิดรังสี Sr-90 ความแรงรังสี 0.6 μ Ci
12. เครื่องเทศผ่านการฉายรังสีที่ใช้เป็นมาตรฐาน



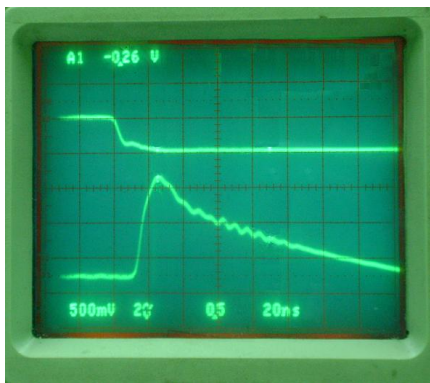
รูปที่ 4 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบระบบนับโฟตอนแสงเรือง

วิธีการทดสอบ

จัดอุปกรณ์ทดสอบดังแผนภาพรูปที่ 4 เพื่อทดสอบสมรรถนะของระบบนับโฟตอนแสงเรืองใน 2 กรณี ได้แก่ การทดสอบลักษณะเฉพาะของวงจรขยายสัญญาณพัลส์ชนิดตอบสนองเวลาช่วงสั้นและทดสอบความสามารถในการนับโฟตอนแสงเรืองของทั้งระบบ การทดสอบวงจรขยายสัญญาณใช้สัญญาณจากเครื่องกำเนิดรูปสัญญาณ ป้อนสัญญาณพัลส์ทางเข้าช่วงขนาด 0.5 V ที่ความถี่ 10 kHz ความกว้างพัลส์ 10 μ s และอ่านรูปสัญญาณพัลส์ทางออกได้ผลทดสอบรูปสัญญาณดังในรูปที่ 5 จากนั้นทดสอบความไม่เป็นเชิงเส้นของอัตราขยายของวงจรขยายสัญญาณพัลส์ด้วยการแปรเปลี่ยนขนาดสัญญาณพัลส์และอ่านค่าความสัมพันธ์ของสัญญาณทางเข้าและออกได้ผลดังตารางที่ 1 พร้อมเส้นกราฟรูปที่ 6

การทดสอบความสามารถในการนับโฟตอนแสงเรืองของทั้งระบบ เริ่มจากการอ่านรูปสัญญาณในที่มีหรือแบกกราวด์จากหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์และนับโฟตอนแสงเรืองจากสารเรืองรังสีเหลวที่วัดรังสีบีตาจากต้นกำเนิดรังสี Sr-90 ในห้องวัดโฟตอนแสงเรืองทั้งกรณีที่ย้ายไบอัส 1000 และ 1100 V ตั้งระดับดิสคริมิเนเตอร์ที่ 50 mV ใช้เวลานับ 10 วินาที ได้ผลดังในรูปที่ 7 และตารางที่ 2 จากนั้นทดลองใช้ต้นกำเนิดแสงอินฟราเรดความยาวคลื่น 870 nm ความเข้มแสงประมาณ 60 mW/cm² ใช้อัตราพัลส์ 20 kHz และคาบเวลา 25 μ s กระตุ้นตัวอย่างเครื่องเทศในห้องวัดโฟตอนแสงเรือง โดยย้ายไบอัส 1100 V ให้หลอดทวีคูณแสง ใช้เวลานับ 1 นาที ทำการวัดโฟตอนแสงเรืองเครื่องเทศผ่านการฉายรังสีที่ใช้เป็นมาตรฐานเปรียบเทียบกับเครื่องเทศที่ไม่ผ่านการฉายรังสี ได้ผลดังตารางที่ 3

4. ผลการทดลองและวิจารณ์



ก. เปรียบเทียบสัญญาณเข้าและออก

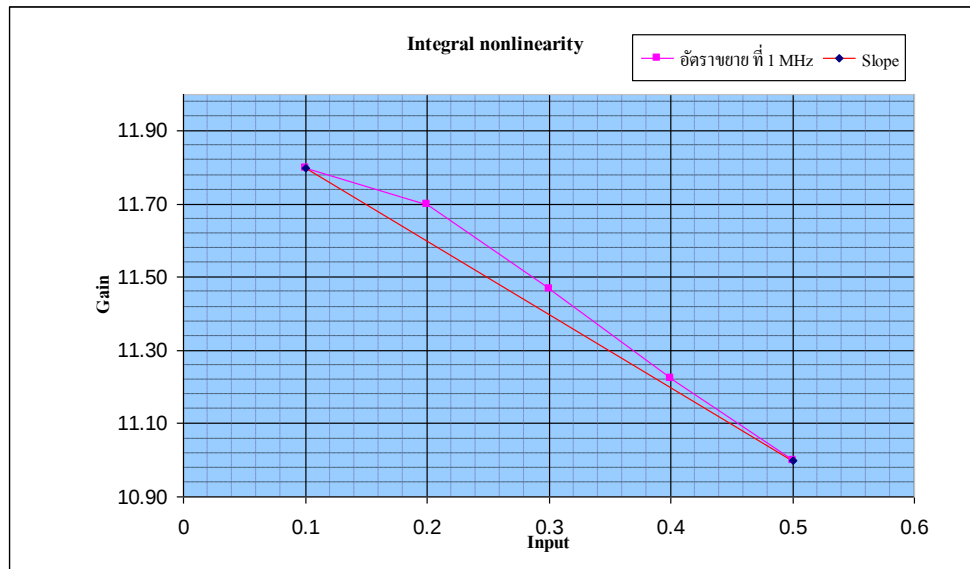


ข. รูปขยายสัญญาณทางออก

รูปที่ 5 รูปสัญญาณวงจรขยายสัญญาณพัลส์ทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดรูปสัญญาณ

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณทางเข้าและออก

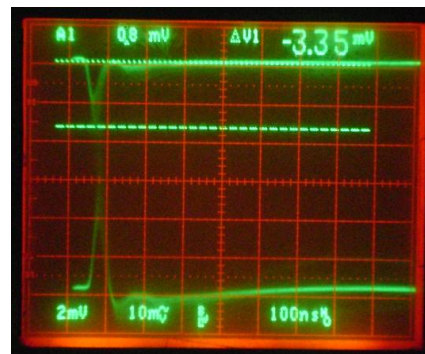
สัญญาณทางเข้า (V)	สัญญาณทางออก (V)	อัตราขยาย ที่ 1 MHz
0.1	1.18	11.80
0.2	2.34	11.70
0.3	3.44	11.47
0.4	4.49	11.23
0.5	5.5	11.00



รูปที่ 6 เส้นกราฟความไม่เป็นเชิงเส้นของอัตราขยายรวม



ก. ตั้งไบอัส 1000 V



ข. ตั้งไบอัส 1100 V

รูปที่ 7 ความสูงของพัลส์สัญญาณแบกกราวด์หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ต่างกัน

ตารางที่ 2 ผลการนับโฟตอนแสงเรืองของระบบวัด

ลำดับ ตัวอย่าง	จำนวนนับที่ไบอัส 1000 V (cps)		จำนวนนับที่ไบอัส 1100 V (cps)	
	แบกกราวด์	แสงเรือง	แบกกราวด์	แสงเรือง
1	34	56958	306	114030
2	60	56271	341	113604
3	44	56483	317	110633
4	42	56526	381	109461
5	39	56414	351	111728

ตารางที่ 3 ผลการวัดโฟตอนแสงเรืองจากเครื่องทดสอบและไมการฉายรังสี

ลำดับ ที่	ค่านับโฟตอนจาก เครื่องเทศไม่ผ่านการฉายรังสี (cpm)				ค่านับโฟตอนจาก เครื่องเทศผ่านการฉายรังสี (cpm)			
	กระตุ้น แสง	ไม่ กระตุ้น	ผลต่าง	ผลต่างจาก ค่าเฉลี่ย	กระตุ้น แสง	ไม่ กระตุ้น	ผลต่าง	ผลต่าง จาก ค่าเฉลี่ย
1	14580	14423	157	132.6	40300	31444	8856	-5923.2
2	23273	23026	247	42.6	33997	31223	2774	158.8
3	28469	28036	433	-143.4	36391	35452	939	1993.8
4	31880	31492	388	-98.4	37033	36132	901	2031.8
5	34116	33893	223	66.6	39763	38569	1194	1738.8
		ค่าเฉลี่ย	289.6			ค่าเฉลี่ย	2932.8	

การฉายรังสีเฉลี่ยเท่ากับ 290 cpm ไม่แปรปรวนมาก ส่วนค่านับนับโฟตอนแสงเรืองจากเครื่องเทศที่ผ่านการฉายรังสีนั้นผลต่างค่านับโฟตอนครั้งแรกจะสูง ครั้งถัดมาจะลดลงแต่เมื่อเฉลี่ยค่านับจะได้ 2933 cpm ซึ่งจำนวนนับโฟตอนเครื่องเทศผ่านและไม่ผ่านการฉายรังสียังคงแตกต่างกันประมาณ 2600 cpm แสดงว่าระบบมีความไวเพียงพอต่อการแจกแจงผลด้วยค่านับโฟตอน

5. สรุปผล

ผลการพัฒนาพบว่าชิพขยายสัญญาณไมโครเวฟ MSA-0986 สามารถประยุกต์ใช้ในวงจรขยายสัญญาณพัลส์ชนิดไวต่อการตอบสนองเวลาช่วงสั้นระดับนาโนวินาทีได้ดี อัตราขยายมีความเป็นเชิงเส้นค่อนข้างสูง มีความสะดวกในการออกแบบและสร้างวงจร จากสมรรถนะของ MSA-0986 สามารถสร้างวงจรให้สามารถตอบสนองเวลาช้าขึ้นได้ไวกว่า 1.0 ns แต่ต้องเปลี่ยนอุปกรณ์วัดโฟตอนแสงจากหลอดทิวทูนแสงชนิดหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ไปเป็นหลอดทิวทูนแสงชนิดไมโครแชนแนลเพลต (MCP) นอกจากนี้ผลการทดสอบระบบนับโฟตอนแสงเรืองที่พัฒนาขึ้นแสดงให้เห็นว่าระบบมีความไวในการนับวัดโฟตอนที่มีความเข้มแสงต่ำจากการกระตุ้นสารอินทรีย์ที่ผ่านการฉายรังสีให้เปล่งแสงเรืองด้วยชุดไดโอดเปล่งแสงได้เป็นที่พอใจ

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนวิจัย พร้อมกันนี้ขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการวิจัยและพัฒนาอิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์วัดนิวเคลียร์ ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดลองและขอขอบคุณบริษัทไทยเพอร์ซิเดนซ์ฟูลส์ จำกัด (มหาชน) ที่ได้เอื้อเฟื้อเครื่องเทศผ่านการฉายรังสีที่ใช้เป็นมาตรฐานในงานวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

1. Knoll, Glenn F., 2000. Radiation detection and measurement. 3rd ed. John Wiley & Sons, New York, p. 226.
2. Becker & Hickl, 2004. How (and why not) to amplify PMT signals. AMPMT. DOC, Becker & Hickl GmbH., p.1-7.
3. Popov1+, V., Majewski1, S., Wojtsekhowski1, B. and Guerin, D., 2002. A simple method to increase effective PMT gain by amplifier circuit powered from voltage divider. IEEE Journal., 634-637.

4. Nicholson, P.W., 1974. Nuclear electronics. John Wiley & Sons, New York, p. 45
5. Avago Technologies, 2006. Cascadable silicon bipolar MMIC amplifier. MAS-0986 Data sheet. Avago Technologies, Limited, U.S.A.
6. Botter-Jensen, L., McKeever, S.W.S., Wintle, A.G., 2003. Optically Stimulated Luminescence Dosimetry. Elsevier, Science B.V., Amsterdam. P. 311-324.
7. Tsoulfanidis, N., 1983. Measurement and detection of radiation. Hemisphere publishing Corporation, p. 320.