

การพัฒนาระบบตรวจสอบเครื่องเทศผ่านการฉายรังสีโดยเทคนิคการกระตุ้นให้เกิดแสงเรืองด้วยแสง



นายโอภาส อิศระชัย

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

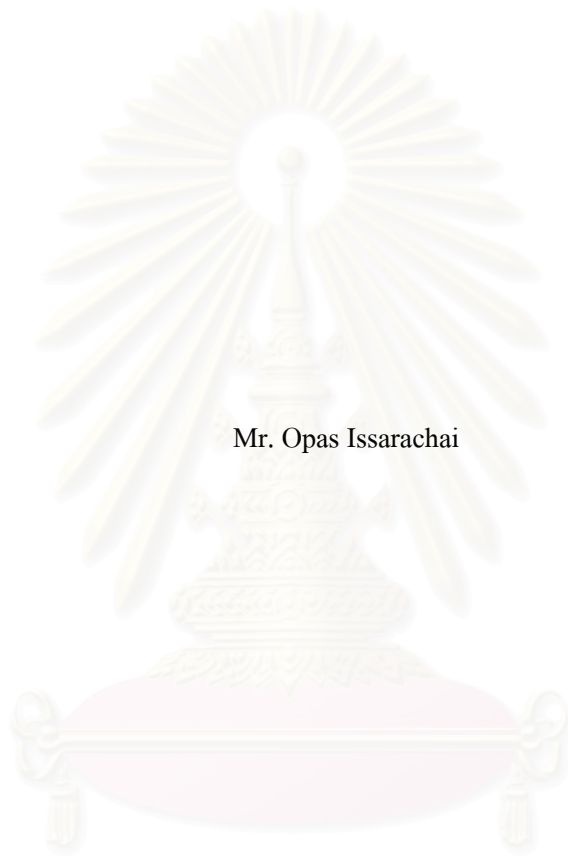
สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF AN IRRADIATED SPICES SCREENING SYSTEM USING  
PHOTOSTIMULATED LUMINESCENCE TECHNIQUE



Mr. Opas Issarachai

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Nuclear Technology

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาแบบตรวจสอบเครื่องเทศผ่านการฉายรังสีโดย

เทคนิคการกระตุ้นให้เกิดแสงเรืองด้วยแสง

โดย

นาย โอภาส อิศระชัย

สาขาวิชา

นิวเคลียร์เทคโนโลยี

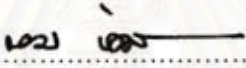
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม


นายประเวทย์ แก้วช่วง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ชยากริต ศิริอุปถัมภ์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(นายประเวทย์ แก้วช่วง)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ณรงค์ จันทน์ขาว)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถพร ภัทรสุมนต์)

โอกาส อิสสระชัย : การพัฒนาระบบตรวจสอบเครื่องเทศผ่านการฉายรังสีโดยเทคนิคการกระตุ้นให้เกิดแสงเรืองด้วยแสง. (DEVELOPMENT OF AN IRRADIATED SPICES SCREENING SYSTEM USING PHOTOSTIMULATED LUMINESCENCE TECHNIQUE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. สุวิทย์ ปุณณชัยยะ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : นายประเวทย์ แก้วช่วง 121หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบตรวจสอบเครื่องเทศผ่านการฉายรังสีโดยเทคนิคการกระตุ้นให้เกิดแสงเรืองด้วยแสง เพื่อใช้สำหรับการตรวจคัดแยกเครื่องเทศผ่านการฉายรังสีในขั้นตอนการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์อาหารสำเร็จรูป โดยระบบตรวจสอบเครื่องเทศผ่านการฉายรังสีที่พัฒนาขึ้น ได้ออกแบบบนพื้นฐานวิธีการกระตุ้นให้เกิดแสงเรืองแบบพัลส์ ประกอบด้วยระบบย่อย 4 ส่วนหลัก ได้แก่ ระบบกำเนิดแสงกระตุ้นด้วยชุดไดโอดเปล่งแสงย่านความยาวคลื่นแสง 870 nm ที่ให้ความเข้มแสงสูงสุด  $100 \text{ mW/cm}^2$ , ระบบนับโฟตอนชนิดตอบสนองเวลาช่วงสั้นซึ่งวัดโฟตอนแสงเรืองด้วยหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์รุ่น XP2206 พร้อมคัดเลือกสัญญาณพัลส์ด้วยวงจรดิสคริมีเนเตอร์ชนิดตอบสนองเวลาช่วงสั้น, ระบบควบคุมจังหวะพัลส์ในการกระตุ้นแสงเพื่อวัดสัญญาณโฟตอนแสงเรือง และระบบประมวลผลค่านับโฟตอนในการตรวจคัดแยกเพื่อแสดงผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

ผลทดสอบการทำงานของระบบที่พัฒนาขึ้นพบว่า ระบบมีความเสถียรที่อุณหภูมิแวดล้อมปกติ มีแบเรกกราวด์สัญญาณจากระบบนับโฟตอนในความถี่น้อยกว่า 350 cps ขณะใช้ไบอัส 1100 V และมีความไวในการวัดความเข้มแสงต่ำจากการเรืองแสงของสารอินทรีย์ ในการทดลองคัดเลือกเครื่องเทศผ่านและไม่ผ่านการฉายรังสี โดยใช้เครื่องเทศมาตรฐาน พบว่าการกระตุ้นด้วยพัลส์ความถี่ 30 kHz ความเข้มแสง  $60 \text{ mW/cm}^2$  และใช้เวลาในการคัดเลือก 60 วินาที มีความเหมาะสมกับระบบที่พัฒนาขึ้น และระบบสามารถตรวจคัดเลือกเครื่องเทศผ่านการฉายรังสี 5 ชนิดที่ปริมาณรังสี 1, 3, 5, 7, และ 10 kGy ได้ผลสอดคล้องกับตรวจคัดเลือกด้วยระบบตรวจสอบอ้างอิงสมรรถนะสูงอย่างมีนัยสำคัญ

ภาควิชา วิศวกรรมเทคโนโลยี  
สาขาวิชา วิศวกรรมเทคโนโลยี  
ปีการศึกษา 2551

ลายมือชื่อนิติคุณ  
ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม



## 4870570721 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS : PHOTOSTIMULATED LUMINESCENCE / IRRADIATED SPICES / FAST PHOTON COUNTING / FAST DISCRIMINATOR / PULSE STIMULATED

OPAS ISSARACHAI : DEVELOPMENT OF IRRADIATED SPICES SCREENING SYSTEM USING PHOTOSTIMULATED LUMINESCENCE TECHNIQUE.

ADVISOR : ASST. PROF. SUVIT PUNNACHAIYA, CO-ADVISOR : MR.

PRAVAIT KEAWCHOUNG, 121 pp.

This research aims to develop an irradiated spices screening system using photostimulated luminescence technique, in order to screen irradiated spices during instant food production quality control process. The developed system was based on a pulse photostimulated luminescence (PPSL) method, which comprised of 4 subsystems: the stimulation light source subsystem composing of light emitting diode with wavelength of 870 nm and  $100 \text{ mW/cm}^2$  maximum illumination, the fast photon counting subsystem employing a XP2206 photomultiplier tube for luminescence detection with fast discriminator, the signal pulse controlling subsystem for photosimulating/luminescent signal counting and the microcontroller-based counting data evaluation and screening detection display subsystem.

Test results showed that the system was stable under ambient temperature, that the dark signal background was less than 350 cps at 1100 V bias and that the system was sensitive to low-intensity luminescent from organic substances. For the screening test of irradiated and non irradiated spices using standard irradiated spice, the suitable conditions were found at 30 kHz stimulation pulse rate,  $60 \text{ mW/cm}^2$  illumination and 60 seconds counting time. It was also found that the 5 species of irradiated spices at dose level of 1, 3, 5, 7, and 10 kGy could be screened by the developed system, significantly corresponding to those screened by the high-performance reference system.

Department : ...Nuclear Technology.....

Student's Signature *Op Imm*

Field of Study : Nuclear Technology.....

Advisor's Signature *Savit Punrachaiya*

Academic Year : 2008.....

Co-Advisor's Signature *Praavit Keawchoung*

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ และ นายประเวทย์ แก้วช่วง อาจารย์ที่ปรึกษา รวมถึงคณาจารย์ ของภาควิชา นิเวศลิษฐ์เทคโนโลยี ที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ต่าง ๆ ตลอดจนให้คำปรึกษาชี้แนะ และ ถ่ายทอดประสบการณ์ อีกทั้งให้โอกาสในการศึกษาและทำวิทยานิพนธ์นี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ และศูนย์ประสานงานนักเรียนทุนรัฐบาลด้าน วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ได้อนุมัติให้เป็นนักเรียนรัฐบาลด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เพื่อศึกษาต่อในประเทศ รวมทั้งอำนวยความสะดวกต่างๆ และได้อนุญาตให้ใช้เครื่องมือในการฉาย รังสีและตรวจวัดตัวอย่าง

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ให้สนับสนุนทุนวิจัยวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อนุญาตให้ใช้ เครื่องมือ TL-OSL ในการทดสอบตัวอย่าง

ขอขอบคุณ บริษัท ไทยเพรซิเดนท์ฟูลด์ จำกัด (มหาชน) ที่ได้อนุญาตให้เข้าดูเครื่อง PPSL และ สนับสนุนตัวอย่างมาตรฐานในการทดสอบเครื่อง

ขอขอบคุณ คุณบัญชา อุนพานิช และ คุณกมลทิพย์ พลอยกระจ่าง ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ที่อำนวยความสะดวก แนะนำเทคนิคโปรแกรมและช่วยเหลือด้านการออกแบบแผ่นพิมพ์วงจร อิเล็กทรอนิกส์ ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ นิสิตรุ่นพี่และรุ่นน้อง ของภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ที่ได้อำนวยความสะดวก แนะนำ ให้การช่วยเหลือต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่ๆ ทุกคนและ คนรัก ที่คอยเป็นกำลังใจ ให้คำปรึกษา และให้ โอกาสในการศึกษา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	2
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 การฉายรังสีอาหาร.....	5
2.1.1 หลักการเบื้องต้น.....	5
2.1.2 รังสีแกมมา.....	5
2.1.3 อาหารฉายรังสี.....	6
2.2 ผลจากอันตรกิริยาของรังสีแกมมาที่มีต่ออาหาร.....	7
2.2.1 ผลทางตรง (Primary Effects).....	8
2.2.2 ผลทางอ้อม (Secondary Effects).....	12
2.2.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงของอาหารหลังการฉายรังสี.....	12
2.3 วิธีการตรวจสอบอาหารฉายรังสี (Detection Methods for Irradiated Food).....	15
2.3.1 คุณสมบัติที่พิจารณาในเทคนิคการตรวจสอบ.....	16
2.3.2 คุณลักษณะของวิธีการทางปฏิบัติ.....	17
2.3.3 วิธีการตรวจสอบอาหารผ่านการฉายรังสี.....	17
2.4 การตรวจสอบเครื่องเทศผ่านการฉายรังสีด้วยวิธีทางฟิสิกส์.....	21
2.4.1 วิธีการตรวจสอบโดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Electron Spin Resonance (ESR).....	22

2.4.2	วิธีตรวจสอบโดยกระตุ้นให้เกิดแสงเรือง (Luminescence Methods)	23
2.5	เทคนิคของระบบตรวจแบบกระตุ้นให้เกิดแสงเรืองด้วยแสง	26
2.5.1	การกระตุ้นให้เกิดแสงเรือง (Stimulated luminescence)	26
2.5.2	รูปแบบของการกระตุ้นให้เกิดแสงเรือง (Stimulation mode)	28
2.5.3	ต้นกำเนิดแสงกระตุ้น	31
2.5.4	อุปกรณ์วัดโฟตอนแสง	33
3	การพัฒนาาระบบตรวจสอบเครื่องเทศผ่านการฉายรังสีโดยเทคนิคการกระตุ้นให้เกิดแสงเรืองด้วยแสง	39
3.1	การออกแบบโครงสร้างของระบบ	39
3.1.1	ข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบ	39
3.1.2	โครงสร้างและการทำงานของระบบ	40
3.1.3	การออกแบบห้องกระตุ้นตัวอย่างและวัดโฟตอนแสงเรือง	41
3.2	การออกแบบระบบนับวัดโฟตอน	44
3.2.1	วงจรหลอดทิวทูนแสง	44
3.2.2	วงจรแหล่งจ่ายไบอัสแรงดันสูง	45
3.2.3	วงจรขยายสัญญาณพัลส์ชนิดไวต่อการตอบสนองเวลาช่วงสั้น	45
3.2.4	วงจรดิสคริมีเนเตอร์ชนิดไวต่อการตอบสนองเวลาช่วงสั้น	46
3.3	การออกแบบวงจรกำเนิดแสงกระตุ้นและนับพัลส์โฟตอน	47
3.3.1	วงจรต้นกำเนิดแสงกระตุ้น	47
3.3.2	วงจรกำเนิดคาบเวลากระตุ้นและนับพัลส์โฟตอน	49
3.3.3	วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ	50
3.4	การออกแบบวงจรประมวลผลและแสดงผล	50
3.4.1	โปรแกรมควบคุมการทำงาน	51
3.4.2	วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์	52
3.5	การติดตั้งอุปกรณ์และประกอบระบบ	53
4	การดำเนินงานและผลการวิจัย	55
4.1	การดำเนินงานวิจัย	55
4.2	เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ	55
4.2.1	เครื่องมือสำหรับใช้ในการทดสอบ	55
4.2.2	วงจรและระบบที่พัฒนาขึ้น	56



บทที่	ฉ หน้า
4.3 การทดสอบการทำงานของวงจร.....	56
4.3.1 การทดสอบเพื่อหาข้อมูลเบื้องต้น.....	56
4.3.2 ทดสอบวงจรขยายสัญญาณพัลส์ชนิดตอบสนองเวลาช่วงสั้น.....	59
4.3.3 วงจรดิสคริมีเนเตอร์ชนิดตอบสนองเวลาช่วงสั้น (Fast discriminator).....	61
4.3.4 ทดสอบวงจรกำเนิดคาบเวลากระตุ้น.....	64
4.3.5 ทดสอบวงจรมับพัลส์โฟตอนร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์.....	65
4.4 การทดสอบการทำงานของระบบตรวจสอบเครื่องเทศผ่านการฉายรังสีที่พัฒนาขึ้น....	65
4.4.1 ทดสอบความเสถียรของระบบ.....	66
4.4.2 ทดสอบการวัดเครื่องเทศผ่านการฉายรังสี.....	69
4.5 เปรียบเทียบผลการวัดตัวอย่างเครื่องเทศ.....	70
4.5.1 วิธีการทดสอบ.....	70
4.5.2 ทดสอบการวัดเครื่องเทศผ่านการฉายรังสี.....	71
5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	74
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	74
5.2 วิเคราะห์ผลการวิจัย.....	75
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	76
รายการอ้างอิง.....	77
ภาคผนวก ก.....	79
ภาคผนวก ข.....	83
ภาคผนวก ค.....	86
ภาคผนวก ง.....	109
ภาคผนวก จ.....	112
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	121

	หน้า
ตารางที่ 2.1 วิธีการตรวจสอบอาหารฉายรังสีตามมาตรฐาน CODEX.....	20
ตารางที่ 2.2 วิธีการตรวจสอบอาหารฉายรังสีประเภทต่างๆ.....	21
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของส่วนทวิปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ของหลอดทวิคูณแสง.....	37
ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติของหลอดทวิคูณแสงกับ MCP.....	38
ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าของต้นกำเนิดแสงและจำนวนนับโฟตอน.....	58
ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณทางเข้าและออกของวงจรมายสัญญาณพัลส์.....	60
ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดสัญญาณพัลส์และระดับดิสคริเมเนเตอร์.....	62
ตารางที่ 4.4 ผลทดสอบความคลาดเคลื่อนในการลบแบกกราวด์.....	65
ตารางที่ 4.5 ผลทดสอบความเสถียรในการทำงานของระบบนับวัดโฟตอน.....	66
ตารางที่ 4.6 ผลทดสอบความสามารถในการคัดเลือกเครื่องเทศผ่านการฉายรังสี.....	70
ตารางที่ 4.7 ผลเปรียบเทียบการตรวจสอบเครื่องเทศที่ผ่านการฉายรังสี.....	71

## สารบัญญภาพ

ฉ

		หน้า
รูปที่ 2.1	การเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์.....	8
รูปที่ 2.2	การเกิดปรากฏการณ์คอมป์ตัน.....	9
รูปที่ 2.3	การเกิดแพร์โพรดักชัน.....	10
รูปที่ 2.4	โอกาสในการเกิดอันตรกิริยาของรังสีแกมมาที่พลังงานสัมพัทธ์ กับเลขอะตอมของตัวกลาง.....	11
รูปที่ 2.5	ผลึกแคลไซต์.....	14
รูปที่ 2.6	ก้อนแร่ limestone.....	14
รูปที่ 2.7	แผนภาพโครงสร้างแถบพลังงานของสารเรืองแสง.....	14
รูปที่ 2.8	เครื่อง ESR ตัวอย่างและสเปกตรัม.....	22
รูปที่ 2.9	ตัวอย่างสเปกตรัมของผลไม้แห้งฉายรังสีที่ปริมาณรังสีต่างกัน.....	22
รูปที่ 2.10	แผนภาพระบบวัด Thermoluminescence (TL).....	24
รูปที่ 2.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความเข้มแสง (Glow curve).....	24
รูปที่ 2.12	แผนภาพระบบวัด Photostimulated Luminescence (PSL).....	25
รูปที่ 2.13	ตัวอย่างสัญญาณจากผลการวัด PSL.....	25
รูปที่ 2.14	ภาพตัวอย่างก้อนแร่ (Amelia Albite).....	26
รูปที่ 2.15	ภาพขยายของผลึกแร่ Amelia Albite.....	26
รูปที่ 2.16	กราฟแสดงค่าระดับพลังงานของแสงกระตุ้น.....	27
รูปที่ 2.17	กราฟแสดงผลตอบสนองแสงกระตุ้นของผลึก Amelia Albite และ Anorthite.....	27
รูปที่ 2.18	กราฟแสดงผลตอบสนองแสงกระตุ้นของ เฟลด์สปาร์.....	28
รูปที่ 2.19	แผนภาพกระบวนการยกระดับพลังงานอิเล็กตรอนเมื่อมีการดูดกลืนพลังงานแสง... ..	28
รูปที่ 2.20	รูปแบบการกระตุ้นด้วยแสงแบบ CW-PSL mode.....	29
รูปที่ 2.21	รูปแบบการกระตุ้นด้วยแสงแบบ LM-PSL mode.....	30
รูปที่ 2.22	รูปแบบการกระตุ้นด้วยแสงแบบ PPSL mode.....	30
รูปที่ 2.23	แผนภาพต้นกำเนิดแสงกระตุ้นแบบเลเซอร์ชนิดอาร์กอน.....	31
รูปที่ 2.24	ต้นกำเนิดแสงกระตุ้นแบบเลเซอร์ชนิดไดโอดอินฟราเรด.....	32
รูปที่ 2.25	ต้นกำเนิดแสงกระตุ้นแบบหลอดฮาโลเจน.....	32
รูปที่ 2.26	ไดโอดเปล่งแสงที่ให้ความยาวคลื่นแสงในย่านต่างๆ.....	33
รูปที่ 2.27	โครงสร้างของ IPDs และอุปกรณ์ IPDs.....	34
รูปที่ 2.28	ภาพแสดงรูปลักษณะของ CCD.....	34

	หน้า
รูปที่ 2.29 แผนภาพการทำงานของ CCD.....	35
รูปที่ 2.30 โครงสร้างของหลอดทวิคูณแสง.....	35
รูปที่ 2.31 แสดงวงจรไบอัสหลอดทวิคูณแสงแบบกรวด์เอโนด.....	36
รูปที่ 2.32 การทำงานของหลอดทวิคูณแสง.....	36
รูปที่ 2.33 รูปแบบของหลอดทวิคูณแสง.....	37
รูปที่ 2.34 รูปสัญญาณพัลส์จากหลอดทวิคูณแสงที่มีเวลาขาขึ้นแตกต่างกัน.....	38
รูปที่ 3.1 แผนภาพการทำงานของระบบตรวจสอบเครื่องเทศผ่านการฉายรังสี.....	40
รูปที่ 3.2 โครงสร้างของห้องกระตุ้นตัวอย่างเครื่องเทศและวัดโพตอนเรืองแสง.....	42
รูปที่ 3.3 แสดงตำแหน่งชิ้นส่วนของห้องกระตุ้นตัวอย่างเครื่องเทศและวัดโพตอนเรืองแสง.....	43
รูปที่ 3.4 แบบแยกส่วนของห้องกระตุ้นตัวอย่างเครื่องเทศและวัดโพตอนเรืองแสง.....	43
รูปที่ 3.5 วงจรหลอดทวิคูณแสงชนิดกรวด์เอโนด.....	44
รูปที่ 3.6 วงจรแหล่งจ่ายไบอัสแรงดันสูง.....	45
รูปที่ 3.7 วงจรขยายสัญญาณพัลส์ชนิดไวต่อการตอบสนองเวลาช่วงสั้น.....	46
รูปที่ 3.8 วงจรดิสคริมีเนเตอร์ชนิดไวต่อการตอบสนองเวลาช่วงสั้น.....	47
รูปที่ 3.9 วงจรชุดไดโอดเปล่งแสงและแหล่งจ่ายกระแสคงที่.....	48
รูปที่ 3.10 วงจรกำเนิดคาบเวลากระตุ้นและนับพัลส์โพตอน.....	49
รูปที่ 3.11 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ.....	50
รูปที่ 3.12 โพลวชาร์ตของโปรแกรมประมวลผล.....	51
รูปที่ 3.13 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์.....	52
รูปที่ 3.14 แผนภาพการเชื่อมโยงสายสัญญาณของแผ่นวงจร.....	53
รูปที่ 3.15 ภาพการประกอบแผ่นวงจรของระบบย่อย.....	53
รูปที่ 3.16 ภาพระบบตรวจสอบเครื่องเทศผ่านการฉายรังสีที่พัฒนาขึ้น.....	54
รูปที่ 4.1 แผนภาพการจัดอุปกรณ์เพื่อหาข้อมูลเบื้องต้น.....	56
รูปที่ 4.2 การตรวจความสม่ำเสมอของความเข้มแสงกระตุ้นครอบคลุมพื้นผิวตัวอย่าง.....	57
รูปที่ 4.3 เส้นกราฟความสัมพันธ์ของปริมาณกระแสไฟฟ้าของต้นกำเนิดแสงกับจำนวน นับโพตอน .....	58
รูปที่ 4.4 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบวงจรขยายสัญญาณพัลส์.....	59
รูปที่ 4.5 รูปสัญญาณวงจรขยายสัญญาณพัลส์ทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดรูปสัญญาณ.....	59
รูปที่ 4.6 เส้นกราฟความเป็นไม่เชิงเส้นของอัตราขยาย .....	60

## สารบัญภาพ

ฐ

	หน้า
รูปที่ 4.7 ความสูงของพัลส์จากการไปฮัสหลอดทวิคูณแสงต่างกัน.....	60
รูปที่ 4.8 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบวงจรดิสคริมีเนเตอร์.....	61
รูปที่ 4.9 รูปสัญญาณลอจิกจากวงจรถดดิสคริมีเนเตอร์.....	62
รูปที่ 4.10 สัญญาณจากวงจรถดดิสคริเนเตอร์และฟิวเจอน์.....	62
รูปที่ 4.11 เส้นกราฟความเป็นเชิงเส้นของระดับดิสคริมีเนเตอร์.....	63
รูปที่ 4.12 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบวงจรถดดิสคริมีเนเตอร์.....	63
รูปที่ 4.13 แผนภาพเวลาของวงจรถดดิสคริมีเนเตอร์.....	64
รูปที่ 4.14 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบวงจรถดดิสคริมีเนเตอร์.....	65
รูปที่ 4.15 สารเรืองรังสีเหลวและ ระบบตรวจสอบเครื่องเทศผ่านการฉายรังสีที่พัฒนาขึ้น.....	66
รูปที่ 4.16 กราฟทดสอบความเสถียรของระบบวัด.....	68
รูปที่ 4.17 กราฟผลทดสอบตรวจนับโพตอนเปรียบเทียบที่วัดได้จากระบบตรวจสอบเครื่องเทศที่พัฒนาขึ้นกับเครื่อง ฯที่ผลิตจากต่างประเทศ.....	71

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันกระบวนการถนอมอาหารและการผลิตอาหารปลอดภัยจากจุลินทรีย์โดยการฉายรังสีเพื่อการผลิตอาหารที่มีความปลอดภัยต่อสุขภาพของผู้บริโภคเชิงพาณิชย์ เป็นกระบวนการสากลที่มีมาตรฐานวิธีหนึ่งที่ทำให้ความเชื่อมั่นในการผลิตอาหารที่มีปลอดภัยสูง เครื่องเทศเป็นผลิตภัณฑ์อาหารซึ่งผู้ประกอบการธุรกิจด้านอาหารนิยมนำมาผ่านการฉายรังสีก่อนส่งเข้าสู่กระบวนการผลิตหรือส่งออกทั้งที่เป็นวัตถุดิบทางการเกษตรและอาหารสำเร็จรูป ในปัจจุบันประเทศไทยเป็นหนึ่งในผู้ส่งออกอาหารและผลิตผลการเกษตรรายใหญ่ ที่มีการส่งสินค้าไปยังภูมิภาคต่างๆ ของโลก การดำเนินการควบคุมคุณภาพจะต้องอยู่ภายใต้มาตรฐานของ The Codex Alimentarius Commission (CODEX) ซึ่งเป็นองค์กรกลางที่กำหนดมาตรฐานอาหาร และกรรมวิธีในทางปฏิบัติต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมการผลิตอาหารให้เป็นไปตามมาตรฐานเดียวกันทั่วโลกเพื่อความปลอดภัยต่อผู้บริโภค นอกจากนี้ในด้านการคุ้มครองสิทธิผู้บริโภคยังต้องมีการระบุและแสดงฉลากให้ทราบว่าอาหารชนิดใดเป็นอาหารที่ผ่านกรรมวิธีการฉายรังสีมาแล้ว ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาเทคนิคการตรวจสอบอาหารฉายรังสีในห้องปฏิบัติการขึ้นมาหลายวิธี

กรรมวิธีการตรวจสอบอาหารฉายรังสีด้วยวิธีกระตุ้นให้สารในอาหารเกิดแสงเรืองด้วยแสง (Photostimulated Luminescence Technique) เป็นหนึ่งในกรรมวิธีการตรวจสอบสำหรับการคัดแยกเบื้องต้น ( Screening ) ที่มีความสะดวกรวดเร็วและมีการกำหนดเป็นมาตรฐานตาม EN 13751:2002 ใน GENERAL CODEX METHODS FOR THE DETECTION OF IRRADIATED FOODS (CODEX STAN 231-2001, Rev.1 2003)<sup>[1]</sup> โดยเนื้อหาได้ระบุเทคนิคและวิธีการตรวจสอบอาหารฉายรังสี ประเภทต่างๆ ที่ CODEX กำหนดเป็นมาตรฐานระหว่างประเทศในการตรวจสอบอาหารฉายรังสี ซึ่งผู้ส่งออกสามารถใช้ตรวจสอบความถูกต้องก่อนส่งสินค้าไปยังประเทศผู้รับว่าวัตถุดิบที่นำมาใช้เป็นส่วนผสมในอาหารหรือวัตถุดิบที่ต้องการจะส่งออก ได้ผ่านการฉายรังสีมาแล้วหรือไม่ จากการศึกษาพบว่าอุตสาหกรรมในประเทศที่ผลิตอาหารสำเร็จรูปมีการใช้กรรมวิธีตรวจสอบวัตถุดิบเพื่อลดการสูญเสียค่าใช้จ่ายจากการที่ลูกค้าไม่รับสินค้าและส่งคืนสินค้าเนื่องจากตรวจพบการปะปนของอาหารฉายรังสี จึงจำเป็นต้องจัดหาเครื่องตรวจสอบวัตถุดิบที่ผ่านการฉายรังสีมาใช้ในห้องปฏิบัติการเพื่อคัดแยกประเภทวัตถุดิบก่อนนำเข้าสู่กระบวนการผลิต เครื่องตรวจสอบดังกล่าวต้องนำเข้าจากต่างประเทศ และมีใช้งานในประเทศอยู่จำนวนจำกัด ทำให้ประสบปัญหาด้านความล่าช้าในการตรวจสอบ และมีโอกาสสูญเสียเงินตราที่จะเป็นรายได้เข้าประเทศไป

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจการพัฒนากระบวนการตรวจสอบเครื่องเทศผ่านการฉายรังสี โดยเทคนิคการกระตุ้นให้เกิดแสงเรืองด้วยแสง ที่มีความสะดวกในการใช้งาน ให้ผลถูกต้อง มีราคาประหยัด เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ด้านตรวจสอบอาหารฉายรังสีประเภทเครื่องเทศ และศึกษาแนวทางในการพัฒนาเป็นระบบตรวจสอบอาหารผ่านการฉายรังสีที่สามารถใช้ตรวจสอบเพื่อออกไปรับรองได้ตามมาตรฐานของ CODEX ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาระบบตรวจสอบเครื่องเทศผ่านการฉายรังสี โดยเทคนิคการกระตุ้นให้เกิดแสงเรืองด้วยแสงที่มีความไวในการตรวจวัดสูง

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาและทดลองหาผลตอบสนองการกระตุ้นให้เกิดแสงเรืองด้วยแหล่งกำเนิดแสงชนิดต่างๆ และการจัด Geometry ที่เหมาะสม
2. ออกแบบและสร้างระบบวัดแสงเรืองที่มีสัญญาณรบกวนต่ำและพัฒนาเทคนิคเพิ่มความไวในการวัด
3. พัฒนาโปรแกรมควบคุมการวัดและแสดงผล
4. เปรียบเทียบผลการตรวจวัดกับเครื่องมือที่ใช้กรรมวิธีวัดเดียวกันจากต่างประเทศ

## 1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

1. ค้นคว้ารวบรวมข้อมูลและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาและทดลองวัดแสงเรืองจากเครื่องเทศหลังการกระตุ้นด้วยแหล่งกำเนิดแสง
3. ศึกษาและทดลองหาความสัมพันธ์ของ Geometry ของอุปกรณ์วัดและผลของความยาวคลื่นแสงที่ใช้กระตุ้น
4. ออกแบบและสร้างวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ต่างๆของระบบตรวจวัดแสงเรืองเพื่อเพิ่มความไวในการวัด
5. ทดสอบสมรรถนะและปรับปรุงการทำงานของระบบตรวจสอบฯ ให้สามารถใช้งานได้สมบูรณ์
6. สรุปผลการวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

ได้ระบบตรวจสอบเครื่องเทศผ่านการฉายรังสี โดยเทคนิคการกระตุ้นให้เกิดแสงเรืองด้วยแสง ที่มีความไวสูง ราคาประหยัดและเหมาะกับการใช้งาน

## งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ปีพ.ศ. 2548 วราภรณ์ สุดใจ<sup>[2]</sup> ได้ทำการวิจัยเรื่อง การประยุกต์ใช้เทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ในการตรวจพิสูจน์เครื่องเทศที่ผ่านการฉายรังสี การประยุกต์ใช้เทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ในการตรวจพิสูจน์เครื่องเทศที่ผ่านการฉายรังสีตามวิธีมาตรฐานของประชาคมยุโรป EN 1788 (2001) โดยศึกษาเครื่องเทศชนิดพริกไทยดำและพริกแห้งที่ผ่านการฉายรังสีประมาณ 5 กิโลเกรย์เปรียบเทียบกับเครื่องเทศชุดควบคุมที่ไม่ผ่านการฉายรังสีเครื่องเทศด้วยการวัดแสงเรืองจากสารซีลิเกตพบว่าปริมาณของซีลิเกตที่เหมาะสม ควรมีค่าประมาณ 4 มิลลิกรัมต่อตัวอย่างเพื่อให้เพียงพอต่อการวัดสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (TL) สำหรับตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยนี้พบว่าตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีจะมีค่าอัตราส่วนสัญญาณ TL ต่ำกว่า 0.1 และสำหรับตัวอย่างที่มีค่าอัตราส่วนของสัญญาณ TL อยู่ระหว่าง 0.1-0.5 ต้องมีการตรวจซ้ำเพื่อยืนยันผลจากการศึกษานี้พบว่า พริกแดงแห้งและพริกไทยดำที่ผ่านการฉายรังสีมีค่าอัตราส่วนของสัญญาณ TL อยู่ระหว่าง 1.08-1.93 และ 1.31-2.63 ตามลำดับ ส่วนตัวอย่างที่ไม่ได้ฉายรังสีทั้งสองชนิดมีค่าอัตราส่วนของสัญญาณ TL อยู่ระหว่าง 0.002-0.046 ผลการวิจัยนี้สามารถจำแนกตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีและไม่ผ่านการฉายรังสีได้ถูกต้อง

2. ปี ค.ศ. 1997 Mag. Heinz Anderle,<sup>[3]</sup> ได้ทำการวิจัยเรื่อง Detection of Food Irradiation with Luminescence Methods การฉายรังสีอาหารเป็นกรรมวิธีหนึ่งในการถนอมอาหารซึ่งจะต้องได้รับปริมาณรังสีไม่เกิน 10 kGy ตามข้อแนะนำขององค์การอนามัยโลก ซึ่งมีความจำเป็นต้องตรวจพิสูจน์และตรวจวัดปริมาณรังสีที่อาหารนั้นได้รับมา วิธีการตรวจสอบสามารถทำได้โดยใช้หลักการฟิสิกส์จากอันตรกิริยาของรังสีกับสารประกอบในอาหารทำให้ปริมาณของอิเล็กตรอนรั่วคู่และอนุมูลอิสระเกิดการเพิ่มขึ้น และอิเล็กตรอนรั่วคู่จะถูกกักอยู่ในโครงสร้างผลึกของสารประกอบซีลิเกต คาร์บอนเนต ซึ่งสามารถใช้เทคนิคการกระตุ้นให้เกิดแสงเรืองด้วยสารเคมี (Lyoluminescence, LL) การกระตุ้นให้เกิดแสงเรืองด้วยความร้อน (Thermoluminescence, TL) และการกระตุ้นให้เกิดแสงเรืองด้วยแสง (Photostimulated luminescence, PSL) มาทำการตรวจพิสูจน์อาหารผ่านการฉายรังสีได้

3. ปี ค.ศ. 1989 J.D. Salinger, M.L. Heimer, J. Sobodowski<sup>[4]</sup> ได้ทำการวิจัยเรื่อง Design and implementation of a luminometer : Control hardware and software การวัดแสงเรืองเป็นหนึ่งในเทคนิคที่ทันสมัยในการวิเคราะห์เพื่อยืนยันสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในเลือดตัวอย่าง การวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบ โดยนำไมโครคอนโทรลเลอร์มาควบคุมการทำงานของระบบการตรวจวัดการเกิดแสงเรืองของชีวภาพที่เรืองแสงได้ ซึ่งการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ลูมินอมิเตอร์ (Luminometer) มีความเหมาะสมในการนำมาใช้เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ การใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เข้ามาควบคุมกระบวนการวัดโดยการเชื่อมโยงการควบคุมผ่านเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อใช้งานในการวัดแสง

4. ปี คศ. 1989 M.L. Heimer, A. Gutmat & A. Del Boca M. L. Hei<sup>[5]</sup> ได้ทำการวิจัยเรื่อง Using a photomultiplier tube to measure weak bioluminescence การใช้เครื่องวัดลูมินอมิเตอร์ ในการตรวจวิเคราะห์การเกิดแสงเรืองของชีวภาพที่เรืองแสง (Bioluminescence) โดยการกระตุ้นให้เกิดอันตรกิริยาตามธรรมชาติ ในการจัดระบบวัดสำหรับวัดแสงเรืองที่เกิดขึ้นเลือกใช้หลอดทวีคูณแสง (Photomultiplier Tube, PMT) ทำหน้าที่วัดโฟตอนแสงเรือง และได้ออกวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เชื่อมโยงกับหลอดทวีคูณแสง เพื่อแสดงผลการวัด ผลการวิจัยพบว่าสามารถวัดแสงเรืองของชีวภาพที่เรืองแสงได้ผล



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1. การฉายรังสีอาหาร

##### 2.1.1. หลักการเบื้องต้น

การฉายรังสีอาหาร หมายถึง กระบวนการผลิตอาหารที่ใช้รังสีชนิดก่อก่อไอออน (Ionizing radiation) ร่วม โดยกรรมวิธีการฉายรังสีอาหาร คือ การนำอาหารที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสม บรรจุในภาชนะหรือ หีบห่อที่เหมาะสม เข้าไปรับการฉายรังสีจากต้นกำเนิดรังสีในบริเวณที่มีความแรงรังสีสูงตามระยะเวลาที่ทำให้ได้รับระดับปริมาณรังสีเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการฉายรังสีอาหารนั้นๆ

ปัจจุบันการฉายรังสีอาหารที่เป็นที่ยอมรับในระดับสากล ในประเทศไทยได้มีประกาศกระทรวงสาธารณสุข<sup>[6]</sup> (ฉบับที่ 297) พ.ศ. 2549 เรื่อง อาหารฉายรังสี เป็นกฎหมายที่กำหนดให้กรรมวิธีการฉายรังสีอาหารต้องปฏิบัติตาม Recommended International Code of Practice for Radiation Processing of Food (CAC/RCP 19-1979, Rev. 2-2003) ซึ่งชนิดของรังสี ต้องได้จากแหล่งของรังสีที่เป็นต้นกำเนิด ดังต่อไปนี้

ก. รังสีแกมมา จากเครื่องฉายรังสีที่มีโคบอลต์-60 ( $^{60}\text{Co}$ ) หรือซีเซียม-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) หรือ

ข. รังสีเอกซ์ จากเครื่องผลิตรังสีเอกซ์ที่ทำงานด้วยระดับพลังงานที่ต่ำกว่าหรือเท่ากับ 5 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ หรือ

ค. รังสีอิเล็กตรอน จากเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนที่ทำงานด้วยระดับพลังงานที่ต่ำกว่าหรือเท่ากับ 10 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์

โดยซีเซียม-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) ซึ่งมีพลังงานเท่ากับ 0.662 MeV หรือโคบอลต์-60 ( $^{60}\text{Co}$ ) ซึ่งมีพลังงานเท่ากับ 1.17 MeV และ 1.33 MeV เป็นต้นกำเนิดรังสีที่มีระดับพลังงานไม่สูงพอที่จะทำให้สารที่เป็นองค์ประกอบอาหารกลายเป็นสารกัมมันตรังสีตกค้างจากผลของการเกิดนิวตรอนได้

##### 2.1.2. รังสีแกมมา

รังสีแกมมา เป็นรังสีที่สามารถทำให้เกิดการแตกตัวก่อก่อไอออน โดยมีคุณสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic radiation) ไม่มีประจุ ไม่มีมวล ไม่เบี่ยงเบนในสนามไฟฟ้า มีความเร็วเท่ากับความเร็วแสง พลังงานของรังสีแกมมาจะมีความสัมพันธ์กับความถี่<sup>[7]</sup> สามารถคำนวณจากสมการต่อไปนี้



$$E = hv \quad \dots (2.1)$$

$$E = \frac{1.240 \times 10^{-6}}{\lambda} \quad \dots (2.2)$$

เมื่อ  $E$  คือ พลังงานของรังสีแกมมา (eV)

$h$  คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant =  $4.135 \times 10^{-15}$  eV.s)

$\nu$  คือ ความถี่ของคลื่น ( $s^{-1}$ )

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่น (m)

รังสีแกมมาเกิดจากการเปลี่ยนแปลงในนิวเคลียส หลังจากการสลายตัวหรือเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์มีผลให้นิวเคลียสอยู่ในสถานะกระตุ้น (Excited state) และลดระดับพลังงานลงมาอยู่ในสถานะพื้น (Ground state) โดยปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาในรูปรังสีแกมมา หากให้สถานะเริ่มต้นนิวเคลียสมีระดับพลังงาน  $E_i$  (สถานะกระตุ้น) และ  $E_f$  เป็นสถานะถัดไป ถ้าสถานะถัดไปเป็นสถานะพื้น การลดระดับพลังงานจะสิ้นสุด แต่ถ้าสถานะถัดไปยังเป็นสถานะกระตุ้นจากพลังงานที่เหลืออยู่ การลดระดับพลังงานก็จะเกิดขึ้นอีกจนกระทั่งเป็นสถานะพื้น พลังงานของรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยออกมาจะเท่ากับผลต่างระหว่างพลังงานของสถานะเริ่มต้นกับพลังงานของสถานะสุดท้าย ดังสมการ (2.3)

$$hv = \Delta E = E_i - E_f \quad \dots (2.3)$$

### 2.1.3. อาหารฉายรังสี <sup>[6]</sup>

อาหารฉายรังสี คือ อาหารที่ผ่านกรรมวิธีการฉายรังสีเพื่อบรรลุดัชนีประสงค์ในการฉายรังสีประเภทของอาหารฉายรังสีที่กำหนดไว้ในประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 297) พ.ศ. 2549 เรื่อง อาหารฉายรังสี สามารถจัดแบ่งได้ตาม วัตถุประสงค์ของการฉายรังสีอาหาร (Technological purpose) ได้แก่ การฉายรังสี เพื่อยับยั้งการงอกระหว่างเก็บรักษา เพื่อชะลอการสุก เพื่อทำลายและยับยั้งการแพร่พันธุ์ของแมลง เพื่อลดปริมาณปรสิต เพื่อยืดอายุการเก็บรักษา เพื่อลดปริมาณจุลินทรีย์เพื่อฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค หรืออื่น ๆ ทั้งนี้การฉายรังสีอาหารต้องมีปริมาณรังสีดูดกลืนต่ำสุดที่ทำให้บรรลุดัชนีประสงค์ของการฉายรังสี และมีปริมาณรังสีดูดกลืนสูงสุดอยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อผู้บริโภค สามารถคงคุณค่าทางโภชนาการของอาหารโดยไม่ทำลายโครงสร้าง คุณสมบัติเชิงหน้าที่ และคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของรสชาติอาหาร

### 2.1.3.1. การยับยั้งการงอกระหว่างการเก็บรักษา

สำหรับอาหารจำพวก พืชผัก เช่น การฉายรังสี หอมใหญ่ มันฝรั่ง ชะลอการบานเห็ด เพื่อลดการสูญเสียจากการงอกของพืชผัก ในระหว่างการขนส่งไปยังจุดจำหน่ายที่ห่างไกล

### 2.1.3.2. การชะลอการสุก

สำหรับอาหารจำพวก ผลไม้ เช่น การฉายรังสีมะม่วง กล้วยหอม แอปเปิล พีช แพร์ เพื่อลดความเสียหายจากการที่ผลไม้สุกเร็ว และเน่าเสีย ในระหว่างการขนส่งไปยังจุดจัดจำหน่ายที่ห่างไกล

### 2.1.3.3. การควบคุมการแพร่พันธุ์ของแมลงศัตรูพืช

สำหรับอาหารจำพวกธัญพืช หรือผลไม้ เช่น การฉายรังสี มะขามหวาน ข้าวสาร ถั่วชนิดต่างๆ เพื่อลดความเสียหายจากการกักกินของแมลง หรือ การฉายรังสีผลไม้ส่งออก เพื่อเป็นการควบคุมการแพร่พันธุ์ของแมลงศัตรูพืช ข้ามเขตภูมิภาคต่างๆ ของโลก ตามข้อกำหนดของข้อตกลงทางการค้าระหว่างประเทศ

### 2.1.3.4. การลดปริมาณปรสิตร

สำหรับอาหาร จำพวกเนื้อสัตว์ เช่นการฉายรังสี ปลาทะเล ปลาน้ำจืด เพื่อลดปริมาณ หรือกำจัด พยาธิ ชนิดต่างๆ

### 2.1.3.5. การยืดอายุการเก็บรักษา

สำหรับอาหารจำพวกพืชผัก และเนื้อสัตว์ เช่นการฉายรังสี หัวแครอท ผักกิ้นช่าย ดอกกะหล่ำ หอมหัวใหญ่ เนื้อหมู เนื้อไก่ กุ้ง ปลาทูน่า หมึกสด เพื่อเป็นการยืดอายุการเก็บรักษา หรือถนอมอาหาร ในช่วงเวลาอาหารขาดแคลน

### 2.1.3.6. การลดปริมาณจุลินทรีย์ และจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค

สำหรับอาหารจำพวก เนื้อสัตว์ที่ผ่านการหมัก เช่นการฉายรังสี แหนม ปลาสาม ปลาห้า ปลาจ่อม เพื่อลดปริมาณจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค และ อาหารจำพวกเครื่องเทศ ผักอบแห้ง เครื่องปรุงรส เพื่อลดปริมาณจุลินทรีย์

## 2.2. ผลจากอันตรกิริยาของรังสีแกมมาที่มีต่ออาหาร<sup>18)</sup>

เนื่องจากผลิตภัณฑ์อาหาร โดยส่วนใหญ่ได้มาจากวัสดุธรรมชาติและสิ่งมีชีวิต มักเป็นสารประกอบจากธาตุประเภท คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และ ไนโตรเจน ซึ่งอะตอมของธาตุต่างๆ จะประกอบรวมกันอยู่ตามโครงสร้างโมเลกุลเฉพาะของสารประกอบนั้นๆ โดยในโครงสร้างของอะตอมนั้นประกอบด้วย นิวเคลียสซึ่งมีโปรตอนและนิวตรอนอยู่ร่วมกัน และมีอิเล็กตรอนอยู่ในวงโคจรภายนอกนิวเคลียส เมื่อรังสีแกมมาผ่านเข้ามาในเนื้อของอาหาร จะถ่ายโอนพลังงานให้กับอาหาร ตามอันตรกิริยาของรังสีแกมมากับอะตอมของธาตุต่างๆที่เป็นองค์ประกอบของอาหารนั้น

อะตอมต่างๆ เหล่านี้จะดูดกลืนพลังงานและเกิดการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) หรืออะตอมอยู่ในสถานะกระตุ้น (Excited state) มีระดับพลังงานสูงขึ้น ส่งผลให้คุณสมบัติทางเคมีและทางฟิสิกส์ของอาหารเปลี่ยนไป โดยผลของรังสีแกมมาที่มีต่ออาหารแบ่งเป็น 2 แบบ คือ

### 2.2.1 ผลทางตรง (Primary Effects) <sup>[7]</sup>

ผลของรังสีทางตรงเป็นผลอันเกิดจากอันตรกิริยาของรังสีแกมมาที่มีต่ออะตอมของสสารและก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงฟิสิกส์ได้แก่

#### 2.1.1.1. ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ (Photoelectric Effect)

ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ เกิดจากรังสีแกมมาพลังงานต่ำ แต่มากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโคจร เคลื่อนเข้าชนอะตอมพร้อมทั้งถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้อิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม เนื่องจากอิเล็กตรอนอยู่ภายในวงโคจรด้วยพลังงานยึดเหนี่ยวจำนวนหนึ่ง ดังนั้นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจึงมีค่าเท่ากับพลังงานของรังสีแกมมาลบด้วยพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน ดังสมการ (2.4)

$$E_e = E_\gamma - E_b \quad \dots (2.4)$$

เมื่อ  $E_e$  คือ พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากอะตอม

$E_\gamma$  คือ พลังงานของรังสีแกมมาที่วิ่งเข้าชนอะตอม

$E_b$  คือ พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.1 การเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์

อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) กระบวนการนี้โฟตอนจะเสียพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอน และโฟโตอิเล็กตรอนจะเป็นตัวทำให้เกิดการแตกตัวเมื่อเคลื่อนผ่านอะตอมของสาร จากการที่โฟโตอิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมจะทำให้เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนในชั้นวงโคจร อิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นนอกจะลดระดับพลังงานเข้ามาแทนตำแหน่งเดิมที่ว่าง

พร้อมกับปล่อยรังสีเอกซ์เฉพาะ (Characteristic X-Ray) ออกมา และอาจจะชนกับอิเล็กตรอนที่อยู่ในรอบนอกแล้วทำให้เกิด “โอเจอร์อิเล็กตรอน” (Auger Electron) ซึ่งมีพลังงานเท่ากับผลต่างระหว่างพลังงานของรังสีเอกซ์เฉพาะกับพลังงานยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนในวงโคจร หากรังสีแกมมามีพลังงานสูงพออิเล็กตรอนจะถูกผลักไปในทิศทางข้างหน้าในแนวเดียวกับทิศของรังสีแกมมา แต่ถ้ารังสีแกมมาที่มาตกกระทบมีพลังงานต่ำมักจะส่งผลให้อิเล็กตรอนเคลื่อนในแนวทำมุมฉาก

### 2.1.1.2. ปรากฏการณ์คอมป์ตัน (Compton Effect)

เมื่อรังสีแกมมาทำอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนชั้นนอกของอะตอมของตัวกลางจะถ่ายเทพลังงานบางส่วนให้กับอิเล็กตรอนทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา ส่วนรังสีแกมมาจะกระเจิงทำมุม  $\theta$  กับแนวการเคลื่อนที่เดิมดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การเกิดปรากฏการณ์คอมป์ตัน

ถ้ารังสีแกมมามีพลังงาน  $h\nu$  และโมเมนตัม  $h\nu/c$  ตกกระทบกับอิเล็กตรอนที่มีมวลนิ่ง (Rest mass energy,  $m_0$ ) รังสีแกมมาที่กระเจิงออกมาเป็นมุม  $\theta$  มีพลังงาน  $h\nu'$  และโมเมนตัม  $h\nu'/c$  ( $\nu'$  น้อยกว่า  $\nu$ ) ทำให้ความยาวคลื่น  $\lambda'$  มากกว่า  $\lambda$  พลังงานของรังสีแกมมาที่ลดลงไป ( $h\nu - h\nu'$ ) กลายเป็นพลังงานจลน์  $E_k$  ของอิเล็กตรอนที่ถอยกลับ ถ้ามวลของอิเล็กตรอนเคลื่อนที่เท่ากับ ( $m$ ) พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนจะมีค่า

$$\begin{aligned}
 E_k &= mc^2 - m_0c^2 \\
 &= m_0c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right) \quad \dots (2.5)
 \end{aligned}$$

เมื่อ  $\beta = v/c$  โดย  $v$  เป็นความเร็วของอิเล็กตรอนถอยกลับ (Recoil electron) และโมเมนตัมของอิเล็กตรอน ( $p_0$ ) จะมีค่า

$$\begin{aligned}
 p_e &= m\beta c \\
 &= \frac{m_0\beta c}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad \dots (2.6)
 \end{aligned}$$

เมื่อแยกโมเมนตัมออกเป็น 2 แนวแกน x และ y และใช้หลักการอนุรักษ์โมเมนตัม และพลังงานทำให้ได้

$$\frac{h\nu}{c} = \frac{h\nu'}{c}\cos\theta + \frac{m_0\beta c}{\sqrt{1-\beta^2}}\cos\phi \quad \dots (2.7)$$

พลังงานของโฟตอนที่กระเจิงไปในทิศทางที่ทำมุม  $\theta$  จะเป็นไปตามสมการ

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \quad \dots (2.8)$$

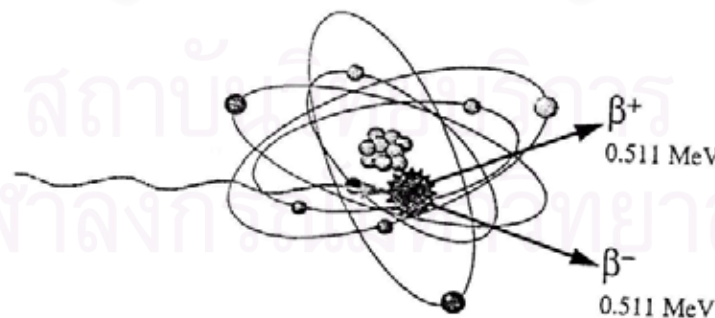
เมื่อ  $\alpha = \frac{h\nu}{m_0c^2}$  ซึ่งเท่ากับพลังงานของโฟตอนที่ตกลงบนอิเล็กตรอนที่อยู่ในหน่วยมวลนิ่งของอิเล็กตรอน

### 2.1.1.3. แพร่โพรดักชัน (Pair Production)

ปรากฏการณ์นี้ จะเกิดขึ้นเมื่อรังสีแกมมาที่มีพลังงานสูงกว่า 1.022 MeV เคลื่อนผ่านสนามไฟฟ้าความเข้มสูงบริเวณใกล้นิวเคลียสของอะตอม รังสีแกมมาจะหายไปเปลี่ยนเป็นอิเล็กตรอนและโพสิตรอนเคลื่อนไปในทิศทางตรงกันข้าม อันตรกิริยานี้เป็นตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงพลังงานไปเป็นมวล ดังนั้นพลังงานเริ่มต้นจะต้องมีค่าอย่างน้อยเท่ากับมวลนิ่งของอิเล็กตรอนและโพสิตรอนรวมกัน คือ 1.022 MeV

$$h\nu = e^+ + e^- + 2E_k \quad \dots (2.9)$$

เมื่อ  $2E_k$  คือพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนและโพสิตรอน



รูปที่ 2.3 การเกิดแพร่โพรดักชัน

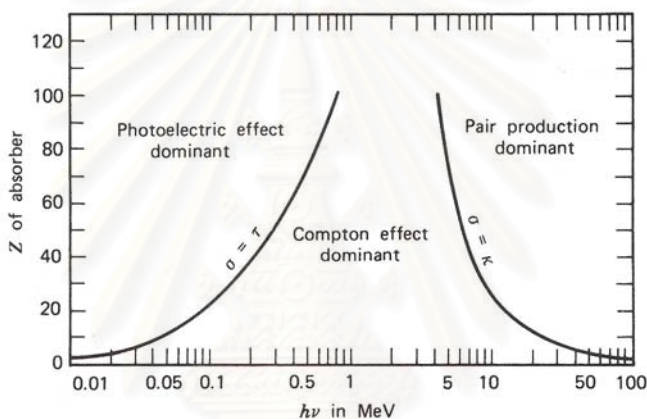
ถ้าพลังงานของรังสีแกมมาที่ทำให้เกิดอันตรกิริยาแบบโพรดักชันมีค่ามากกว่า 1.022 MeV พลังงานที่เหลือจะเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนและโพสิตรอน โพสิตรอนที่



เกิดขึ้นจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนและสลายมวลทำให้เกิดโฟตอน 2 ตัว ที่มีพลังงานแต่ละ 0.511 MeV เคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้าม เรียกว่า ปรากฏการณ์แอนนิฮิเลชัน (Annihilation) ซึ่งเป็นตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงมวลไปเป็นพลังงาน ตรงข้ามกับอันตรกิริยาแบบแพร์โปรดักชัน

$$e^+ + e^- \rightarrow 2h\nu \quad \dots (2.10)$$

เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ในการเกิดอันตรกิริยาทั้ง 3 แบบ จะพบว่าโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาแต่ละแบบนั้นจะมีความสัมพันธ์กับพลังงานของรังสีแกมมาและตัวกลางที่รังสีแกมมาไปทำอันตรกิริยาดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โอกาสในการเกิดอันตรกิริยาของรังสีแกมมาที่พลังงานสัมพันธ์กับเลขอะตอมของตัวกลาง<sup>[6]</sup>

สรุปได้ว่าผลจากการเกิดอันตรกิริยาต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับโมเลกุลของอาหารซึ่งอยู่ในรูปสารอินทรีย์นั้น จะส่งผลให้อะตอมที่มีสถานะเป็นกลางทางไฟฟ้าเกิดการแตกตัวเป็นไอออนและอิเล็กตรอนรวมทั้งอิเล็กตรอนไร้คู่ (Unpaired electron) แล้วเปลี่ยนตัวเองมาเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ประจุเป็นบวก ซึ่งอนุมูลอิสระและอิเล็กตรอนที่ไร้คู่นี้ มีความสามารถที่จะทำให้อะตอมอื่นๆ ที่อยู่ใกล้กันเกิดการแตกตัวได้ต่อไปอีก<sup>[9]</sup>



หรืออะตอมจะอยู่ในสถานะกระตุ้น (Excited state) โดยไม่มีการแตกตัวให้ประจุออกมา



### 2.2.2 ผลทางอ้อม (Secondary Effects) <sup>[8]</sup>

ผลทางอ้อมก่อให้เกิดเปลี่ยนแปลงทางเคมี ได้แก่ ผลผลิตการแยกย่อยด้วยรังสี (Radiolysis product) ซึ่งเป็นสารประกอบทางเคมีที่เกิดขึ้นจากการฉายรังสีสารใด ๆ เช่น การฉายรังสีอาหาร รังสีจะถ่ายโอนพลังงานให้โมเลกุลต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบหลักของอาหาร เช่น น้ำ โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต วิตามิน ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นโมเลกุลที่มีประจุไฟฟ้า และ เกิดการแยกย่อยได้อนุมูลอิสระซึ่งไม่เสถียรและทำปฏิกิริยากับสารที่เป็นองค์ประกอบของอาหารได้สารประกอบต่าง ๆ ที่มีโมเลกุลเล็กลง ปฏิกิริยาเคมี (Chemical reaction) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากโมเลกุลที่อยู่ในสถานะกระตุ้น (Excited state) จากผลทางตรง เหนี่ยวนำให้โมเลกุลข้างเคียงแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ



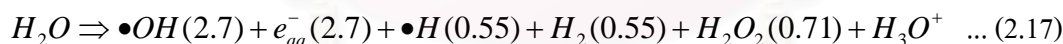
หรืออาจจะแตกออกเป็น โมเลกุล



และอนุมูลอิสระก็อาจจะรวมตัวกลับมาเป็น โมเลกุลใหม่



ถ้าอาหารนั้นมีความชื้นก็จะมีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วยเมื่อได้รับรังสีจะเกิดผลทางอ้อมดังนี้



จากอันตรกิริยาของโมเลกุลน้ำเมื่อได้รับรังสีจะทำให้เกิดอนุมูลอิสระเริ่มต้น ที่พร้อมจะทำปฏิกิริยาทางเคมีกับโมเลกุลของอาหารต่อไปอีก จึงเห็นได้ว่าอาหารที่ผ่านการฉายรังสีจะเกิดอิเล็กตรอนไร้คู่ (Unpaired electron) และอนุมูลอิสระ (Free radical) ขึ้นเป็นจำนวนมาก

### 2.2.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงของอาหารหลังการฉายรังสี <sup>[3,7,9]</sup>

สำหรับอันตรกิริยาที่จะเกิดในทางตรงกัอาหารฉายรังสีนั้นส่วนใหญ่จะเกิดจากผลของคอมป์ตัน (Compton Effect) เนื่องจากรังสีแกมมาที่ได้รับอนุญาตให้ใช้ในการฉายรังสีอาหารเป็นโฟตอนพลังงานสูง ระดับ 0.662 ถึง 1.33 MeV โดยอันตรกิริยาคอมป์ตัน แต่ทุกครั้งจะเกิดอิเล็กตรอนที่มีพลังงานจลน์สูงมากและอิเล็กตรอนนี้จะไปกระตุ้นให้เกิดการแตกตัวต่อเนื่องจนเกิด

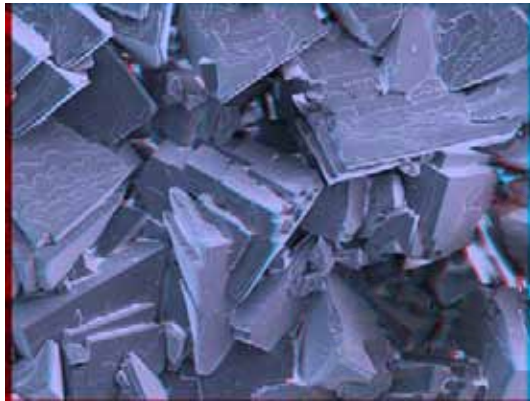
อิเล็กตรอนอิสระจำนวน 30,000-40,000 ตัว และกระตุ้นให้เกิดอะตอมที่ถูกยกระดับพลังงานจำนวน 45,000-80,000 อะตอม ซึ่งผลที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆเพียง  $10^{-14}$  วินาที แต่ก็เพียงพอที่จะทำให้เกิดผลในทางอ้อมต่อไปได้

เนื่องจากพืชเป็นผลผลิตที่เจริญเติบโตมาด้วยการดูดซึมแร่ธาตุต่างๆ จากดินและแหล่งน้ำธรรมชาติ ทั้งที่เกิดขึ้นเองและเกิดจากการเพาะปลูก ในบริเวณที่เปิดโล่ง ตามกระบวนการเพาะปลูก จึงทำให้พืชเหล่านี้มีโอกาสดูดซับผลึก Inorganic dielectrics ที่มีลักษณะเป็นสารอนินทรีย์ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารเรืองแสง ได้แก่ สารประกอบเกลือซิลิเกต อันประกอบไปด้วย แคลไซต์ (Calcite) ควอตซ์ (Quartz) เฟลสปาร์ (Feldspar) ที่อยู่ในหินปูนที่เกิดจากเปลือกหอย หรือ เอ็กโซสเคเลตัน (Exoskeletons) ซึ่งเป็นส่วนที่ปกคลุมอยู่ภายนอกร่างกายสิ่งมีชีวิต ได้แก่ ผม ขน เล็บและอื่นๆ หรือ ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite) ที่เป็นส่วนประกอบหลักของฟันและกระดูกของสัตว์ โดยสารประกอบดังกล่าวสามารถจะพบได้ในอาหารทั่วไป ที่ปะปนอยู่ในเศษหิน เศษทรายและฝุ่นละออง หรือสารประกอบ Hydroxyapatite Radical อันเป็นสารอนินทรีย์ชีวภาพ (Bioinorganic) ซึ่งมักจะพบสารเหล่านี้ในเศษชิ้นส่วนของกระดูก ฟัน เล็บ ของสัตว์ โดยที่ผลึกต่างๆ ดังในรูปที่ 2.5 และ 2.6 เหล่านี้ ฟูงกระจายอยู่ในอากาศ หรือเจือปนอยู่ในน้ำและในดินและพืชเหล่านี้จะเป็นอาหารของสัตว์อีกด้วย

บรรดาแร่ธาตุเหล่านี้มีคุณสมบัติโครงสร้างโมเลกุลเป็นสารเรืองแสง ที่มีพฤติกรรม การเรืองแสงตามแผนภาพโครงสร้างแถบพลังงาน (Energy band structure) ดังในรูปที่ 2.7 โครงสร้างแถบพลังงานของสารเรืองแสง (ด้านซ้าย แสดงพฤติกรรมของเอ็กซิตอน) และ (ด้านขวา แสดงบริเวณกับดักอิเล็กตรอน) พฤติกรรมดังกล่าวเกิดจากโครงสร้างผลึกที่ไม่สมบูรณ์ของสารที่มีความบกพร่องบริเวณแลตทิซผลึก (Crystal lattice) ก่อให้เกิดบริเวณกับดักอิเล็กตรอน ที่มีระดับพลังงานต่ำกว่า แถบนำและบริเวณกับดักโฮล (Hole trap) ที่มีระดับพลังงานสูงกว่าแถบวาเลนซ์ขึ้นบริเวณช่องว่างพลังงานในแถบห้าม (Eg) แสดงในรูปที่ 2.7 ด้านซ้าย ซึ่งบางกรณีกับดักนี้อาจเกิดจากการเจือสารบางชนิดลงไปเพื่อกำหนดระดับพลังงานของกับดักที่ใหม่ เรียกว่า “Activator trap” ดังรูปที่ 2.7 ด้านขวา กับดักอิเล็กตรอนเป็นบริเวณที่ทำหน้าที่กักอิเล็กตรอนซึ่งได้รับการกระตุ้นยกระดับพลังงาน (Excitation) จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ อิเล็กตรอนที่กล่าวถึงเป็นผลมาจากสารเรืองแสงได้รับการถ่ายโอนพลังงานจากรังสีบริเวณแลตทิซผลึก เกิดการไอออไนซ์ สร้างคู่ของอิเล็กตรอนและโฮลที่เหนี่ยวกันซึ่งกันและกันขึ้น คล้ายกับพฤติกรรมเทียมของไฮโดรเจน (Hydrogen-like pseudo atom) ที่เรียกว่า เอ็กซิตอน (Exciton) ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้ในแถบพลังงานดังแสดงในรูปที่ 2.7 ด้านซ้าย พฤติกรรมของเอ็กซิตอนมีความแตกต่างจากคู่ของอิเล็กตรอนและโฮล (Electron-hole pair) ที่เกิดขึ้นจากการไอออไนซ์ในสารกึ่งตัวนำซึ่งมีอิสระจากกันและเคลื่อนที่สวนทางกันในแถบพลังงาน

คู่เอ็กซิตอนจะเคลื่อนที่บริเวณแถบพลังงานในเวลาสั้นมาก จากนั้น เมื่ออิเล็กตรอนในแถบนำลดระดับพลังงานลงเล็กน้อยจะถูกจับในกับดักพร้อมๆ กับ โฮลและหยุดการเคลื่อนที่ ปริมาณ

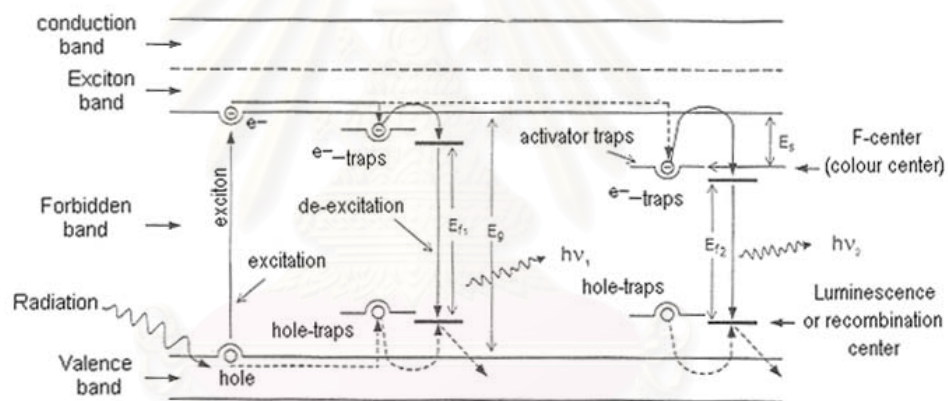
อิเล็กตรอนที่ถูกกักอยู่ในกับดักจะก่อบริเวณ Colour Center ขึ้น มีสถานะกึ่งเสถียร Meta-stable โดยปริมาณอิเล็กตรอนนี้จะถูกกักอยู่นานเพียงใดขึ้นอยู่กับความต่างระดับพลังงานบริเวณกับดักอิเล็กตรอนและแถบนำ ( $E_g$ )



รูปที่ 2.5 ผลึกแคลไซต์



รูป 2.6 ก้อนแร่ limestone



พฤติกรรมของอิเล็กตรอน

บริเวณกับดักอิเล็กตรอน

รูปที่ 2.7 แผนภาพ โครงสร้างแถบพลังงานของสารเรืองแสง

ในกรณีสารเรืองแสงทั่วไปความต่างระดับพลังงานบริเวณกับดักและแถบน้อยมาก เพียงแค่พลังงานจากอุณหภูมิแวดล้อม (Ambient temperature) ก็สามารถกระตุ้นให้อิเล็กตรอนที่กักอยู่ในบริเวณกับดักยกระดับพลังงานสู่แถบนำและลดระดับพลังงานมายังสถานะพักก่อนลงสู่ระดับพื้น (Ground state) พร้อมทั้งปลดปล่อยคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นสอดคล้องกับระดับพลังงานของบริเวณที่อิเล็กตรอนถูกกักไว้ตามสมการ

$$\lambda_f = \frac{hc}{E_f} \quad \dots(2.18)$$

เมื่อ	$E_f$	= พลังงานของคลื่นแสง
	$h$	= ค่าคงที่ของ Planck
	$c$	= ความเร็วแสง
	$\lambda_f$	= ความยาวคลื่นของคลื่นแสง

กลไกของการเปล่งแสงเรืองนี้เรียกว่า ลูมิเนสเซนซ์ (Luminescence) โดยทั่วไป กระบวนการเปล่งแสงเรืองสามารถแบ่งได้ดังนี้

ก.) กรณีที่สารเรืองแสงมีความต่างระดับพลังงานบริเวณกับดักและแถบนำ ( $E_s$ ) น้อย สามารถเกิดการเรืองแสงด้วยพลังงานกระตุ้นของอนุภาควัดล้อม ซึ่งจำแนกได้ 2 กระบวนการ กล่าวคือ ถ้าอิเล็กตรอนถูกยกพลังงานขึ้นสู่แถบนำและเคลื่อนที่ในแถบนำในเวลาสั้น ประมาณ  $10^{-9}$  วินาที โดยไม่ถูกจับในกับดักแต่ลดระดับพลังงานจากสถานะพักสู่ระดับพื้นพร้อมทั้งปลดปล่อยแสงเรืองทันที เรียกกลไกนี้ว่า ฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence) แต่ถ้าอิเล็กตรอนที่ถูกยกระดับพลังงานสู่แถบนำถูกกักไว้ที่กับดักในสถานะกึ่งเสถียรเป็นเวลามากกว่า  $10^{-8}$  วินาที ก่อนที่จะได้รับพลังงานกระตุ้นจากอนุภาควัดล้อมให้ยกระดับพลังงานสู่แถบนำอีกครั้ง และลดระดับพลังงานสู่ระดับพื้นพร้อมทั้งปล่อยแสงเรือง เรียกกลไกนี้ว่า ฟอสฟอรัสเซนซ์ (Phosphorescence)

ข.) กรณีที่สารเรืองแสงมีความต่างระดับพลังงานบริเวณกับดักและแถบนำค่อนข้างมาก อิเล็กตรอนจะถูกกักในบริเวณกับดักได้นานหลายชั่วโมง การกระตุ้น (Stimulation) ให้อิเล็กตรอนที่อยู่บริเวณกับดักยกระดับพลังงานสู่แถบนำจำเป็นต้องใช้พลังงานจากคลื่นความร้อนที่มีพลังงานสูงกว่าอนุภาควัดล้อม หรือคลื่นแสง ก่อนลดระดับพลังงานสู่ระดับพื้นและปล่อยแสงเรือง ในกรณีนี้ โครงสร้างผลึกสารเรืองแสงต้องการพลังงานจากคลื่นความร้อนอนุภาควัดล้อมสูงกระตุ้นให้เกิดการเรืองแสง เรียกกลไกนี้ว่า เทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (Thermoluminescence) หากโครงสร้างของผลึกสารเรืองแสงต้องการเพียงพลังงานจากคลื่นแสงกระตุ้นให้เกิดการเรืองแสงจะเรียกกลไกนี้ว่า โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence)

### 2.3. วิธีการตรวจสอบอาหารฉายรังสี (Detection Methods for Irradiated Food)<sup>[8]</sup>

อาหารฉายรังสีต้องมีการติดฉลากระบุให้ทราบว่า เป็นอาหารที่ผ่านการฉายรังสีมาแล้ว ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องพัฒนาการตรวจสอบที่สามารถระบุได้อย่างถูกต้อง เพื่อให้สามารถคัดแยกอาหารที่ผ่านการฉายรังสีและไม่ผ่านการฉายรังสีออกจากกันได้ จึงต้องมีวิธีพิจารณาคุณสมบัติในเทคนิคการตรวจสอบที่ให้ความมั่นใจได้



### 2.3.1 คุณสมบัติที่พิจารณาในเทคนิคการตรวจสอบ

2.3.1.1 การแยกแยะ (Discrimination) พิจารณาจากตัวแปรบ่งชี้ที่ใช้ในการตรวจวัดอาหารที่ผ่านการฉายรังสี จะต้องไม่มีอยู่ในอาหารที่ไม่ผ่านการฉายรังสี หรือ ตัวแปรบ่งชี้ที่ใช้ในการวัดจะต้องแสดงผลได้ชัดเจนในอาหารที่ไม่ผ่านการฉายรังสี โดยสามารถถูกชักนำให้เปลี่ยนแปลงได้ด้วยการฉายรังสีและต้องสามารถแยกออกจากกันได้อย่างชัดเจน

2.3.1.2 ความเฉพาะเจาะจง (Specificity) พิจารณาจากผลของตัวบ่งชี้ เมื่อผ่านกระบวนการผลิต และการเก็บรักษา จะต้องไม่มีผลของการเปลี่ยนแปลงเทียบเคียงได้กับการฉายรังสี

2.3.1.3 ความเหมาะสม (Applicability) พิจารณาจาก กรรมวิธีการทดสอบที่สามารถใช้ตรวจสอบได้ตลอดย่านของปริมาณรังสีที่ใช้ในการฉายรังสีของอาหารนั้น

2.3.1.4 ความเสถียร (Stability) พิจารณาจาก ตัวแปรบ่งชี้ที่ใช้ จะต้องสามารถใช้งานได้ดีตลอดอายุของการจัดเก็บอาหารที่ผ่านการฉายรังสีชนิดนั้นๆ

2.3.1.5 ความถาวร (Robustness) พิจารณาจากการตรวจวัดซึ่งจะต้องไม่ตอบสนองต่อผลข้างเคียง หรือเปลี่ยนแปลงต่ำพอเพียงที่จะมั่นใจในการตรวจสอบได้ เช่น ผลจากปริมาณรังสีต่อหน่วยเวลา อุณหภูมิในช่วงต่างๆ ตลอดกระบวนการฉายรังสี หรือการจัดเก็บ ปริมาณออกซิเจน ความชื้นในสถานที่เก็บ หรือส่วนผสมอื่นประกอบอยู่ในอาหาร ฯลฯ

2.3.1.6 ความเป็นอิสระ (Independence) พิจารณาจากวิธีการตรวจสอบไม่จำเป็นต้องใช้ตัวอย่างจากอาหารที่ไม่ได้ฉายรังสีและชุดการผลิตเดียวกันมาอ้างอิงเปรียบเทียบ

2.3.1.7 ความแน่นอน (Reproducibility and Repeatability) พิจารณาจากเทคนิควิธีการที่ใช้ต้องสามารถตรวจซ้ำและสอบย้อนได้

2.3.1.8 ความแม่นยำและมีผลถูกต้องตามหลักสถิติ (Accuracy and proper statistical validation) พิจารณาจากกรรมวิธีที่ให้ความถูกต้องและแม่นยำในการวัดสูงและผลการวัดที่ได้ต้องมีความถูกต้องตามหลักวิชาสถิติ

2.3.1.9 ความไว (Sensitivity) พิจารณาจากวิธีการที่ใช้ จะต้องสามารถใช้ตรวจสอบได้ในช่วงปริมาณรังสีที่ต่ำกว่าระดับปริมาณที่ฉายรังสีที่ใช้ฉายรังสีอาหารในเชิงพาณิชย์

2.3.1.10 ความต่างจากผลของปริมาณรังสี (Dose Dependence) พิจารณาจากวิธีการตรวจสอบจะต้องสามารถให้ผลตอบสนองต่อปริมาณรังสีสะสม (Dose response curve) ตามเกณฑ์มาตรฐานปริมาณรังสีสะสมที่ใช้การฉายรังสีอาหาร

### 2.3.2 คุณลักษณะของวิธีการทางปฏิบัติ

- 2.3.2.1 ขั้นตอนการทดสอบง่าย (Simplicity) ไม่จำเป็นต้องใช้ทักษะสูง ในขณะที่ทำการตรวจสอบ การอธิบายผลการวัด หรือใช้เครื่องมือพิเศษ
- 2.3.2.2 ค่าใช้จ่ายถูก (Low cost)
- 2.3.2.3 ใช้ปริมาณตัวอย่างน้อย (Small sample size)
- 2.3.2.4 ความรวดเร็วในการตรวจสอบ (Speed of measurement)
- 2.3.2.5 วิธีการทดสอบสามารถใช้ได้กับอาหารหลายช่วงอายุและหลายชนิด (Wide range and wide type)
- 2.3.2.6 การตรวจสอบไม่ทำให้ตัวแปรบ่งชี้ที่พิจารณาเสียหาย (non-destructive)
- 2.3.2.7 วิธีการตรวจสอบสามารถกำหนดให้เป็นมาตรฐานได้ง่าย และสามารถสอบเทียบอ้างอิงได้ (Easy standardization and cross-calibration)
- 2.3.2.8 เป็นวิธีการตรวจสอบที่เชื่อมั่นได้ว่าที่ป้องกันการปลอมแปลง (Resistant to fraud) โดยผลตรวจสอบมาจากอาหาร ไม่ใช่มาจากวัสดุอื่น เช่น ภาชนะบรรจุ ฝุ่นละอองจากภายนอก ฯลฯ

### 2.3.3 วิธีการตรวจสอบอาหารผ่านการฉายรังสี

จากที่กล่าวมาแล้วว่าหลังอาหารผ่านการฉายรังสีจะเกิดผลทางฟิสิกส์และเคมีแฝงอยู่ในองค์ประกอบทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ได้แก่ อิเล็กตรอนไร้คู่ และอนุมูลอิสระและอิเล็กตรอนในกับดัก ดังนั้นจึงมีวิธีการตรวจสอบอาศัยคุณสมบัติต่างๆดังนี้

#### 2.3.3.1 วิธีการทางฟิสิกส์ (Physical Methods)

- ก. Electron Spin Resonance (ESR) Spectroscopy ตรวจสอบจากผลการเกิดอิเล็กตรอนไร้คู่ในโครงสร้างในสารประกอบที่เป็นส่วนผสมอยู่ในอาหารหลังการฉายรังสี
- ข. Luminescence measurement ตรวจสอบจากการเกิดแสงเรืองของสารประกอบที่เป็นส่วนผสมอยู่ในอาหารฉายรังสี ได้แก่
- ข.1 Chemiluminescence (CL) การตรวจสอบด้วยการกระตุ้นให้เกิดแสงเรืองด้วยสารเคมีและวัดปริมาณโฟตอนแสงเรือง
- ข.2 Thermoluminescence (TL) การตรวจสอบด้วยการ กระตุ้นให้เกิดแสงเรืองด้วยความร้อนและวัดปริมาณโฟตอนแสงเรือง
- ข.3 Photostimulated Luminescence (PSL) การตรวจสอบด้วยการกระตุ้นให้เกิดแสงเรืองด้วยแสงและวัดปริมาณโฟตอนแสงเรือง

ค. Viscosity measurement ตรวจสอบจากคุณสมบัติความหนืดของการจับตัวกันของสารในอาหารฉายรังสี

ง. Electrical impedance measurement ตรวจสอบจากคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปของสารในอาหารฉายรังสี

### 2.3.3.2 วิธีการทางเคมี (Chemical Methods)

ก. Hydrocarbons ตรวจสอบจากปริมาณสารไฮโดรคาร์บอนที่เปลี่ยนแปลงไปในสารประกอบอินทรีย์ลิพิด (Lipid) ในอาหารฉายรังสี

ข. Alkylcyclobutanones ตรวจสอบจากการวิเคราะห์ 2-Alkyl-cyclobutanones ในไขมันที่ผสมอยู่ในอาหารฉายรังสี โดยใช้เทคนิค Gas chromatography - Mass spectrometry (GC-MS)

ค. Ortho-Tyrosine ตรวจสอบจากการวิเคราะห์หา Ortho-Tyrosine จากโปรตีนในอาหารฉายรังสี โดยใช้เทคนิค Gas chromatography - Mass spectrometry (GC-MS)

ง. Gas Evolution ตรวจสอบจากปริมาณของก๊าซต่างๆ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ แอมโมเนีย ที่เกิดขึ้นในอาหารที่ฉายรังสี

### 2.3.3.3 วิธีการทางดีเอ็นเอ (DNA Methods)

ก. DNA “Comet Assay” ตรวจสอบวิเคราะห์ความเสียหายของ DNA ด้วยเทคนิค Comet Assay ในอาหารฉายรังสี

ข. Agarose Electrophoresis of Mitochondrial DNA ตรวจสอบวิเคราะห์ความเสียหายของ mtDNA ด้วยเทคนิค Agarose electrophoresis ในอาหารฉายรังสี

ค. Immunologic Detection of Modified NDA Bases ตรวจสอบจากอัตราส่วนของ Thymidine เปลี่ยนมาเป็น Dihydrothymidine (DiHT) ในอาหารฉายรังสี

### 2.3.3.4 วิธีการทางชีวภาพ (Biological Methods)

ก. Shift in Microbial Load ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลง Microbial profile ของจุลินทรีย์ที่เจือปนอยู่ในอาหารฉายรังสี

ข. Direct Epifluorescent Filter Technique Combined with Aerobic Plate (DEFT/APC) ตรวจสอบจำนวนจุลินทรีย์ที่เจือปนอยู่ในอาหารฉายรังสีด้วยเทคนิค DEFT และ APC

ค. Limulus Amoebocyte Lysate Test Combined with Gram-Negative Bacterial Count (LAL/GNB) ตรวจสอบจำนวนจุลินทรีย์ที่เจือปนอยู่ในอาหารฉายรังสีด้วยเทคนิค LAL และ GNB

๓. Half-Embryo Test to Measure Inhibition of Seed Germination เป็นตรวจสอบ  
จุลินทรีย์ ที่เจือปนอยู่ในอาหารฉายรังสีด้วยเทคนิค Half-Embryo Test

จะเห็นว่าวิธีการตรวจสอบอาหารที่ผ่านการฉายรังสีมีหลากหลายวิธี การจะ  
เลือกใช้วิธีใดขึ้นอยู่กับ ชนิดของอาหาร วัตถุประสงค์ในการตรวจสอบ ความไว ความเหมาะสม ความ  
ถูกต้องแม่นยำ ความสะดวกรวดเร็ว และ ต้นทุน เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ The Codex Alimentarius  
Commission ได้มีการกำหนดมาตรฐานและกรรมวิธีในการตรวจสอบอาหารฉายรังสีไว้ตามส่วน  
ประกอบหลักที่มีในอาหารชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งแต่ละวิธีการตรวจสอบจะมีความ  
เหมาะสมกับอาหาร



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 วิธีการตรวจสอบอาหารฉายรังสีตามมาตรฐาน CODEX<sup>[1]</sup>

**GENERAL CODEX METHODS FOR THE DETECTION OF IRRADIATION FOODS**

**CODEX STAN 231-2001, Rev.1 2003**

<b>Provision</b>	<b>Commodity</b>	<b>Method</b>	<b>Principle</b>	<b>Type</b>
Detection of irradiated food containing fat	Food Containing fat	EN 1784:1996	Gas chromatographic and analysis of hydrocarbons	Type II
Detection of irradiated food containing fat	Food containing fat	EN 1785:1996	Gas chromatographic / spectrophotometric analysis of 2/alkycyclobutanones	Type III
Detection of irradiated food containing bones	Food containing bones	EN 1786:1996	ESR spectroscopy	Type II
Detection of irradiated food containing cellulose	Food containing cellulose	EN 1787:2000	ESR spectroscopy	Type II
Detection of irradiated food containing silicate mineral	Food containing silicate mineral	EN 1788:2001	Thermoluminescence	Type II
Detection of irradiated food	Food containing silicate mineral	EN 13751:2002	Photostimulated luminescence	Type III
Detection irradiated food containing crystalline sugar	Food containing crystalline sugar	EN 13708:2001	ESR spectroscopy	Type II
Detection irradiated food	Herb, Species and Raw minced meat	EN 13783:2001 NMKL 137 (2002)	Direct Epifluorescent Filter Technique /Aerobic Plate Count (DEFT/APC) (screening method)	Type III
Detection of irradiated food	Food containing DNA	EN 13784:2001	DNA comet assay (screening method)	Type III



ตารางที่ 2.2 วิธีการตรวจสอบอาหารฉายรังสีประเภทต่างๆ <sup>[10]</sup>

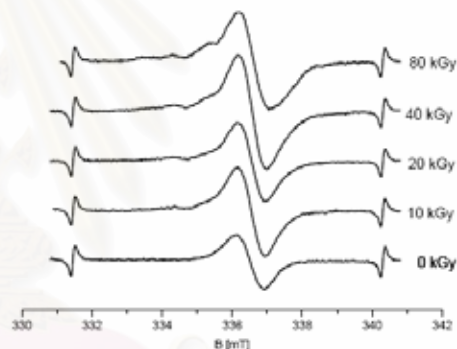
Standard No.	เทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบ	ชนิดของอาหาร
EN 1784:1996	การวิเคราะห์ Hydrocarbon ด้วยเทคนิค Gas chromatography (GC)	เนื้อสัตว์ (ไก่ หมู วัว) ชีส (camembert) อาโวคาโด มะละกอ มะม่วง
EN 1785:1996	การวิเคราะห์ 2-alkylcyclobutanones ด้วยเทคนิค Gas chromatography (GC)	เนื้อสัตว์ (ไก่ หมู ปลาซาลมอน) ไข่ดิบ ชีส (Camembert)
EN 1786:1996	การตรวจวิเคราะห์กระดูกด้วยเทคนิค ESR	กระดูกไก่ วัว ปลาเทราต์
EN 1787:2000	การตรวจวิเคราะห์เซลล์ูโลส ด้วยเทคนิค ESR	Paprika เปลือกของ pistachio nut เมล็ดจากผล สตรอเบอร์รี่
EN 1788:2001	การตรวจวิเคราะห์ซิลิเกต ด้วยเทคนิค Thermoluminescence	เครื่องเทศ สมุนไพร กุ้ง แมงกะพรุน ผัก และผลไม้สด
EN 13708:2001	การตรวจวิเคราะห์ผลึกน้ำตาล ด้วยเทคนิค ESR	ผลไม้แห้ง (มะละกอ มะม่วง มะเดื่อ ลูกเกด)
EN 13751:2002	การตรวจวิเคราะห์ซิลิเกต ด้วยเทคนิค Photostimulated luminescence	เครื่องเทศ สมุนไพรและแมงกะพรุน
EN 13783:2001	การตรวจเชื้อจุลินทรีย์ด้วยเทคนิค Direct Epifluorescent Filter Technique / Aero Plant Counting (DEFT/APC)	เครื่องเทศและสมุนไพร
EN 13784:2001	การตรวจวิเคราะห์ DNA ด้วยเทคนิค DNA Comet Assay	เมล็ดพืชชนิดต่างๆ (อัลมอนด์ พริกไทย ถั่วเหลือง งา ทานตะวัน ฯลฯ) ไข่กระดูกไก่ เอ็นไก่และหมู

#### 2.4. การตรวจสอบเครื่องเทศผ่านการฉายรังสีด้วยวิธีทางฟิสิกส์<sup>[1,3,8]</sup>

การตรวจสอบอาหารผ่านการฉายรังสีประเภทเครื่องเทศซึ่งมีสารประกอบเกลือซิลิเกต เซลลูโลส และกระดูก ปนอยู่ด้วยวิธีทางฟิสิกส์เป็นการตรวจวัดปริมาณอิเล็กตรอนในกับดัก (Trapped electrons) อิเล็กตรอนไว้ก่อนและอนุมูลอิสระ อันเป็นผลคงค้างที่เกิดจากอันตรกิริยาหลังการดูดกลืนพลังงานของรังสีในปริมาณต่างๆ ที่สารองค์ประกอบในอาหารได้รับ ซึ่งตามมาตรฐาน CODEX STAN 231-2001, Rev.1 2003 ได้มีข้อเสนอแนะวิธีการทางฟิสิกส์ที่สามารถนำมาตรวจสอบเครื่องเทศผ่านการฉายรังสีไว้ดังต่อไปนี้

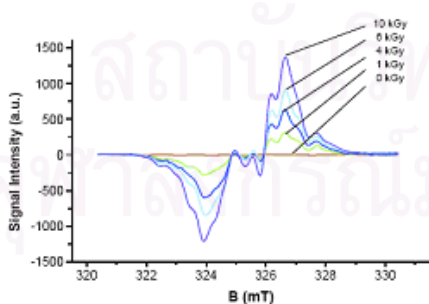
### 2.4.1. วิธีการตรวจสอบโดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Electron Spin Resonance (ESR)

สำหรับอาหารฉายรังสีที่เซลลูโลสเป็นส่วนประกอบอยู่จะดำเนินการตามมาตรฐาน EN 1787:2000 Foodstuffs-Detection of irradiated food containing cellulose by ESR spectroscopy การวิเคราะห์สารที่เป็นของแข็งที่มี เซลลูโลส (Cellulose) เป็นองค์ประกอบ เช่น ในผนังเซลล์ของพืช สามารถตรวจสอบได้ด้วยเครื่อง Electron Spin Resonance (ESR) หรือ Electron Paramagnetic Resonance (EPR) ซึ่งเป็นเทคนิคการตรวจวัดปริมาณ อิเล็กตรอนไร้คู่ ที่เกิดขึ้นจากสภาวะอนุมูลอิสระที่มีอายุยาวพอที่จะสามารถทำการวัดได้ โดยวิธีการตรวจวัดกระทำได้โดยนำตัวอย่างเข้าไปในสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มประมาณ 800-1000 mT เพื่อจัดระเบียบสปินและโมเมนต์แม่เหล็กของอิเล็กตรอนไร้คู่พร้อมทั้งวัดผลการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟของอิเล็กตรอนไร้คู่ ทำให้ได้สเปกตรัมความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณของคลื่นไมโครเวฟที่ถูกดูดกลืนโดยอิเล็กตรอน กับ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก ซึ่งปริมาณของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกดูดกลืนจะแปรผันตามปริมาณของอิเล็กตรอนไร้คู่ในโครงสร้างสารอินทรีย์ของเซลลูโลส ดังแสดงในรูปที่ 2.8 และ 2.9

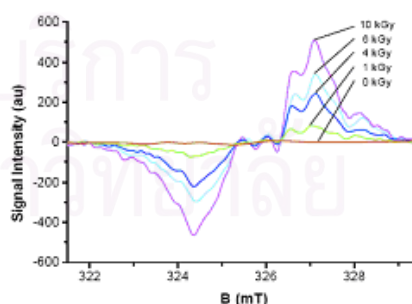


EPR spectra of *Spirulina platensis* for different doses.

รูปที่ 2.8 เครื่อง ESR และตัวอย่างสเปกตรัม



EPR spectra of irradiated dried pineapple, at different doses



EPR spectra of irradiated dried banana, at different doses

รูปที่ 2.9 ตัวอย่างสเปกตรัม EPR ของผลไม้แห้งฉายรังสีที่ปริมาณรังสีต่างกัน

เทคนิคนี้เหมาะกับการวัดอาหารฉายรังสีที่มีองค์ประกอบของเซลลูโลส เป็นการตรวจสอบที่ไม่ต้องเตรียมตัวอย่างยุ่งยาก บ่งชี้ปริมาณรังสีได้และสามารถตรวจวัดซ้ำในตัวอย่างเดิมได้ แต่มีข้อจำกัด คือ มีช่วงกำหนดปริมาณรังสีที่เหมาะสมในการวัดได้สำหรับอาหารบางชนิด เครื่อง Electron Spin Resonance (ESR) เป็นเครื่องมือที่ราคาสูง ความชื้นในขณะจัดเก็บจะมีผลต่อค่าวัด และความไวในการวัดขึ้นอยู่กับ ชนิดและ ปริมาณ ของเซลลูโลส ที่มีอยู่ในตัวอย่าง

#### 2.4.2. วิธีตรวจสอบโดยกระตุ้นให้เกิดแสงเรือง (Luminescence Methods)

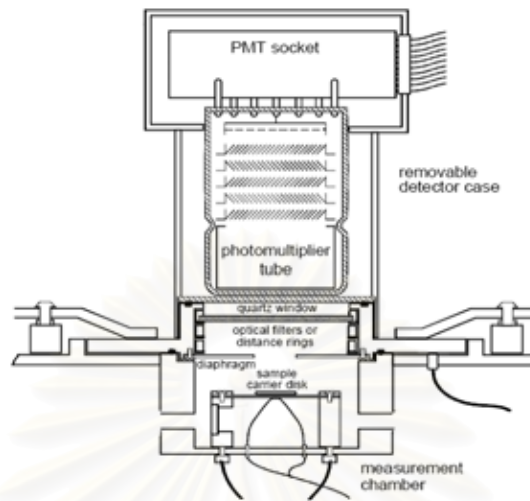
เทคนิคการกระตุ้นให้เกิดแสงเรืองอาศัยหลักการดูดกลืน (Absorption) พลังงานและการเปล่งแสงเรือง (Emission) ของสารอนินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบในอาหารฉายรังสีประเภทเครื่องเทศ แบ่งเป็น 2 แบบ ดังนี้

##### 2.4.2.1. การตรวจสอบโดยใช้เทคนิคการกระตุ้นให้เกิดแสงเรืองด้วยความร้อน (Thermoluminescence (TL) Technique)

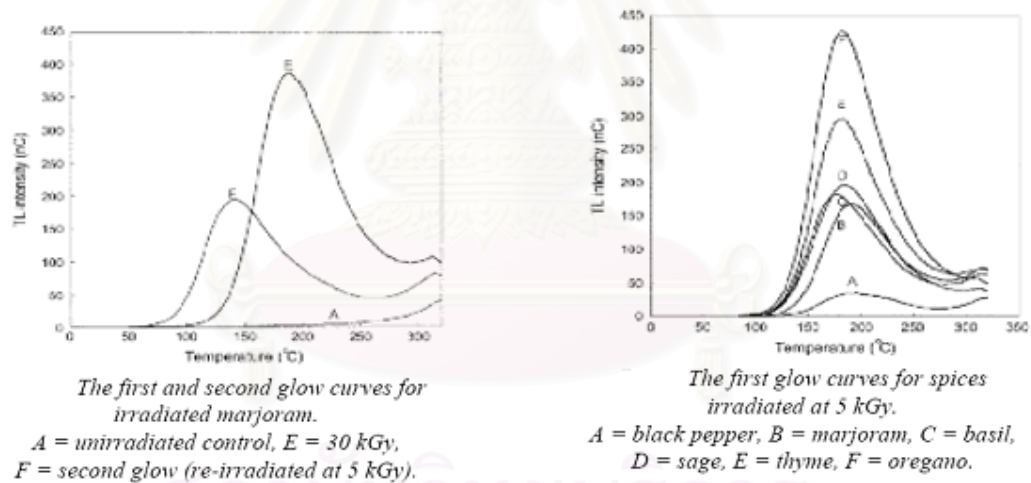
การตรวจสอบอาหารฉายรังสีโดยเทคนิคการทำให้เกิดแสงเรืองด้วยการให้ความร้อน (Foodstuffs-Thermoluminescence detection of irradiated food) ตามมาตรฐาน EN 1788:2001 เป็นกระบวนการตรวจสอบซึ่งอาศัยการวัดแสงเรืองจากผลของปริมาณรังสีที่สารประกอบตามธรรมชาติในอาหารฉายรังสีได้รับ สารประกอบดังกล่าว ได้แก่ สารประกอบกลุ่มซิลิเกต ที่ถูกคัดแยกออกจากเครื่องเทศในกระบวนการเตรียมตัวอย่าง แล้วนำไปผ่านการกระตุ้นด้วยพลังงานความร้อน โดยระบบวัดเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ ตามแผนภาพรูปที่ 2.10 พลังงานความร้อนจะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากกักเก็บแล้วเข้าแทนที่โฮลพร้อมกับคายพลังงานที่ได้รับไว้ตั้งแต่แรกออกมาในรูปของคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นในแถบแสงสีม่วงถึงสีน้ำเงิน (UV- Visible) ซึ่งสามารถตรวจวัดคลื่นแสงผ่านแผ่นกรองแสง (Optical filters) ด้วยหลอดทวีคูณแสง (Photomultiplier tube) เพื่อแปลงความสว่างแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่แปรเปลี่ยนสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในอัตราคงที่ สร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ของการเรืองแสง (Glow curve) ที่ปล่อยออกมาจากผลึกของสารประกอบ (TL signal) พื้นที่ใต้กราฟจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณรังสีที่ผลึกสารประกอบในอาหารได้รับ ดังเส้นกราฟในรูปที่ 2.11

เทคนิคนี้มีความแม่นยำสูง สามารถตรวจวัดอาหารที่ผ่านการฉายรังสีในปริมาณต่ำกว่า 1 kGy ได้ ไม่มีการลดต่ำลงของสัญญาณ (Fade) อาหารที่ผ่านการฉายรังสี ในช่วงเวลานับปี แต่มีข้อจำกัด คือ ต้องเตรียมตัวอย่างด้วยการคัดแยกซิลิเกต ออกจากอาหาร มีช่วงกำหนดปริมาณรังสีที่เหมาะสมในการวัดได้สำหรับอาหารบางชนิด เครื่องเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (Thermo Luminescence; TL) เป็น

เครื่องมือที่ราคาสูง และความไวในการวัดขึ้นอยู่กับ ชนิดและ ปริมาณ ของโครงสร้างซิลิเกต ที่มีอยู่ใน ตัวอย่าง



รูปที่ 2.10 แผนภาพระบบวัด Thermoluminescence (TL)

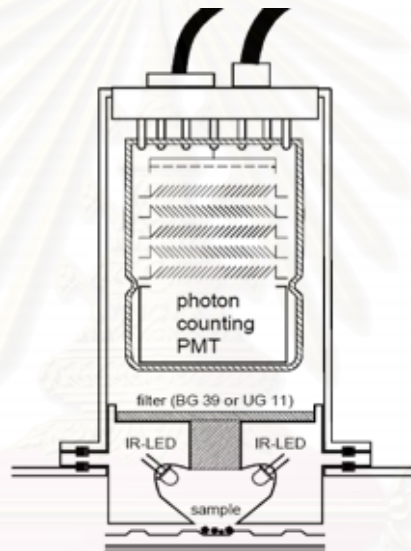


รูปที่ 2.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความเข้มแสง (Glow curve)

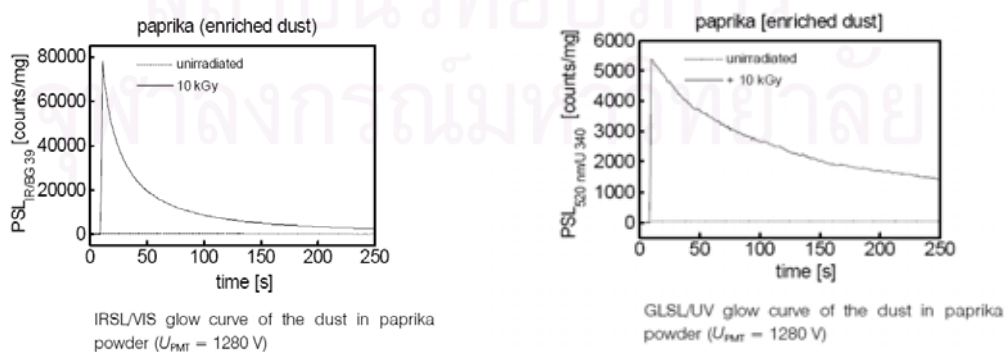
#### 2.4.2.2. วิธีตรวจสอบโดยใช้เทคนิคการกระตุ้นให้เกิดแสงเรืองด้วยแสง (Photostimulated Luminescence (PSL) Technique)

การตรวจสอบอาหารฉายรังสี โดยใช้เทคนิคการกระตุ้นให้เกิดแสงเรืองด้วยแสง (Foodstuffs-Detection of irradiated food using Photostimulated Luminescence) ตามมาตรฐาน EN 13751:2002<sup>[19]</sup> เป็นการตรวจสอบอาหารผ่านการฉายรังสีสำหรับการคัดแยกขั้นต้น โดยกระบวนการ

ตรวจสอบอาศัยการวัดแสงเรืองจากผลของปริมาณรังสีที่ผลึกของสารอนินทรีย์ตามธรรมชาติในอาหารฉายรังสีที่ได้รับ เมื่ออาหารฉายรังสีได้รับปริมาณรังสีและพลังงานที่ได้รับจะทำให้เกิดปริมาณอิเล็กตรอนสะสมอยู่ในโครงสร้างของผลึก สามารถใช้เทคนิคการกระตุ้นให้เกิดแสงเรืองด้วยแสงจากภายนอกในบริเวณที่ที่บแสง ดังแผนภาพระบบวัดรูปที่ 2.12 พลังงานของแสงจะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนในกับดักลงมารวม โสลด พร้อมกับคายพลังงานที่ได้รับไว้ตั้งแต่แรกออกมาในรูปของคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นในแถบแสงสีม่วงถึงสีน้ำเงิน ซึ่งสามารถตรวจวัดคลื่นแสงนี้ผ่านแผ่นกรองแสง (Optical filters) ด้วยหลอดทวีคูณแสง (Photomultiplier tube) เพื่อแปลงความสว่างแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า (PSL) โดยทำการตรวจวัดได้ด้วยระบบนับโฟตอน (Photon counter) สร้างเป็นกราฟตอบสนองจำนวนนับโฟตอนแสงเทียบกับเวลาสำหรับใช้ในการประมวลผลของปริมาณรังสีที่อาหารฉายรังสี ได้รับ ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 แผนภาพระบบวัด Photostimulated Luminescence (PSL)



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างสัญญาณผลการวัด PSL



เทคนิคนี้สามารถทำการตรวจสอบเพื่อคัดเลือกได้อย่างรวดเร็ว (Rapid screening) ใช้ปริมาณตัวอย่างในการตรวจสอบน้อย ไม่ต้องมีกระบวนการในการเตรียมตัวอย่างที่ยุ่งยาก ค่าใช้จ่ายในการวัดต่ำ เหมาะกับการตรวจสอบวัตถุคิบในด้านอุตสาหกรรมอาหาร แต่ไม่สามารถบ่งชี้ปริมาณรังสีที่ถูกต้อง ยังจำเป็นต้องใช้วิธีการอื่นมายืนยันความถูกต้อง ความไวในการวัดขึ้นอยู่กับ ชนิดและปริมาณ ของโครงสร้างซิลิเกต ที่กระจายอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของตัวอย่าง

## 2.5. เทคนิคของระบบตรวจแบบกระตุ้นให้เกิดแสงเรืองด้วยแสง

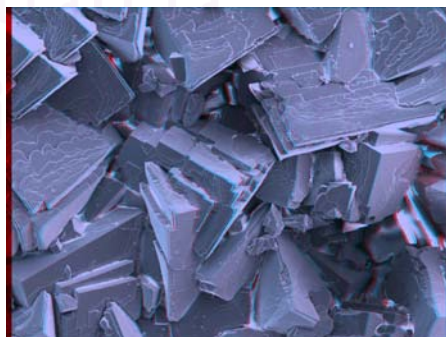
จากที่กล่าวมาแล้วว่าเทคนิคการกระตุ้นให้เกิดแสงเรืองด้วยแสงสามารถทำการตรวจคัดเลือกได้อย่างรวดเร็ว (Rapid screening) ใช้ปริมาณตัวอย่างในการตรวจสอบน้อย ไม่ต้องมีกระบวนการในการเตรียมตัวอย่างที่ยุ่งยาก ค่าใช้จ่ายในการวัดต่ำ จึงเหมาะกับการตรวจสอบวัตถุคิบในด้านการควบคุมคุณภาพ ในอุตสาหกรรมอาหาร

### 2.5.1. การกระตุ้นให้เกิดแสงเรือง (Stimulated luminescence)<sup>[11,12]</sup>

สารอนินทรีย์ที่มีคุณสมบัติเป็น ฉนวน (Insulating) หรือ สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) แร่ธาตุตามธรรมชาติ ที่เป็นสารอนินทรีย์ เช่น ผลึกสารประกอบเกลือซิลิเกต อันประกอบไปด้วย แคลไซต์ (calcite) จำพวกควอตซ์ (quartz) เฟลด์สปาร์ (feldspar) หรือสารเรืองแสงอื่นๆ เมื่อได้รับการฉายรังสี จะมีการก่ออันตรกิริยาการแตกตัว (Ionization) ภาวะการกระตุ้น (Excitation) เกิดเป็น อิเล็กตรอนอิสระ (Free electrons) หลุมอิสระ (Free holes) ซึ่งอิเล็กตรอนอิสระจะถูกจับในสถานะหลุมกับดักอิเล็กตรอน (Trapping states) ดังแผนภาพกระบวนการในรูปที่ 2.19 ซึ่งมีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางไฟฟ้าของสสาร ในรูปที่ 2.14 เป็นภาพตัวอย่างก้อนแร่ Amelia Albite ซึ่งอยู่ในกลุ่มแคลไซต์ และ รูปที่ 2.15 เป็นภาพขยายผลึกของแร่ Amelia Albite ที่พีชย่อยสลายเป็น สารอาหาร

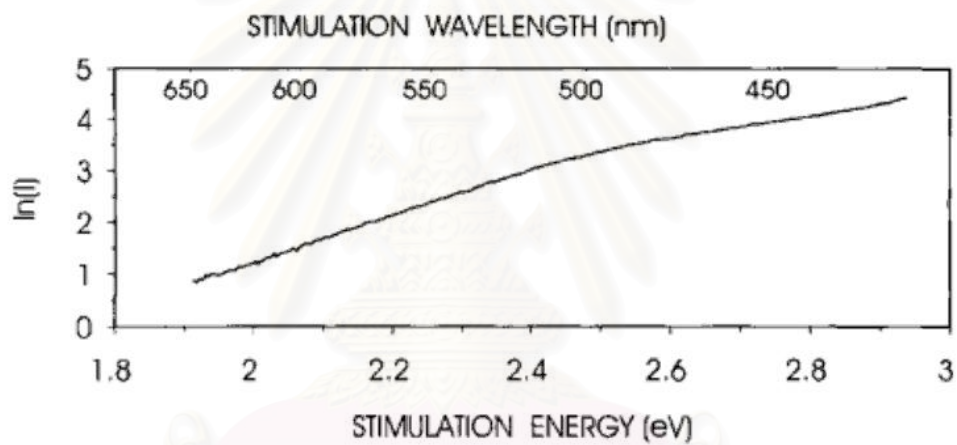


รูปที่ 2.14 ภาพตัวอย่างก้อนแร่ (Amelia Albite)

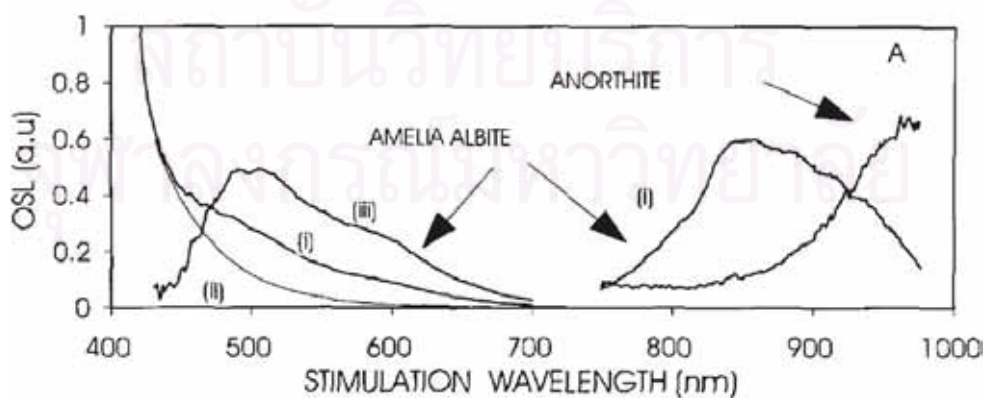


รูปที่ 2.15 ภาพขยายของผลึกแร่ Amelia Albite

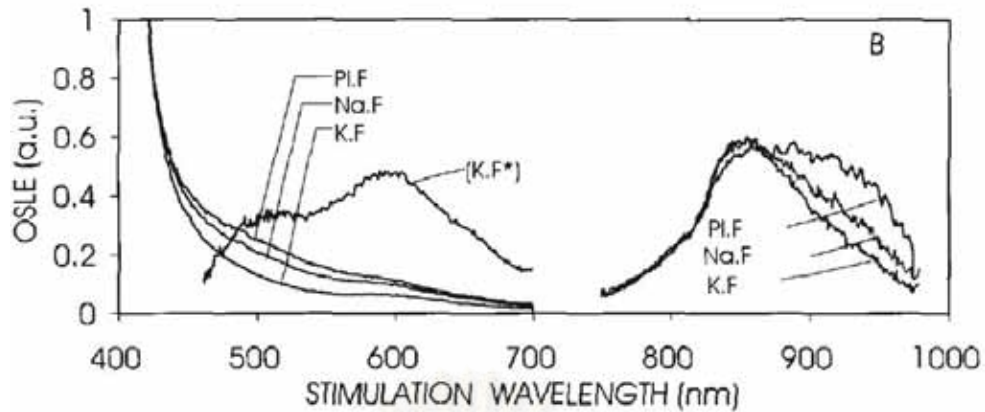
Photo-Stimulated Luminescence (PSL) Techniqueคือ เทคนิคการทำให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานสะสมของอิเล็กตรอนอิสระที่ถูกกักเก็บอยู่ในกับดัก (Electron trap) โดยการกระตุ้นด้วยแสงในช่วงความยาวคลื่นเฉพาะต่างๆ เช่น ช่วงอุลตราไวโอเล็ต (UV) ช่วงแสงสว่างที่ตามองเห็น (Visible) หรือ ช่วงอินฟราเรด (Infrared) ซึ่งจะมีระดับพลังงานในการกระตุ้นอยู่ระหว่าง 2-3 eV ขึ้นกับความยาวของคลื่นแสงย่านนั้น เช่นเดียวกับเทคนิค Optically Stimulated Luminescence (OSL) ในงานด้านการวัดระดับปริมาณรังสี (Radiation dosimetry) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 เมื่อผลึกในแร่ธาตุได้รับการกระตุ้นด้วยแสงจะส่งผลให้อิเล็กตรอนในหลุมกับดักได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นสามารถหลุดออกจากหลุมกับดักและลดระดับพลังงานสู่สถานะปกติ โดยคายพลังงานสะสมที่มีอยู่ออกมาในรูปของแสงเรืองที่ความยาวคลื่นที่ยาวกว่าออกมา ผลตอบสนองต่อแสงกระตุ้นที่ความยาวคลื่นในย่าน 400-1000 nm ของผลึกในแร่ธาตุแต่ละตัวจะมีความแตกต่างกันไปดังรูปที่ 2.17 และ รูปที่ 2.18



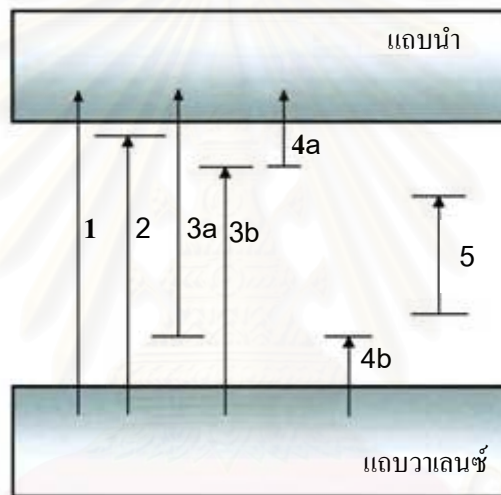
รูปที่ 2.16 กราฟแสดงค่าระดับพลังงานของแสงกระตุ้น



รูปที่ 2.17 กราฟแสดงผลตอบสนองแสงกระตุ้นของผลึก Amelia Albite และ Anorthite



รูปที่ 2.18 กราฟแสดงผลตอบสนองแสงกระตุ้นของ เฟลด์สปาร์



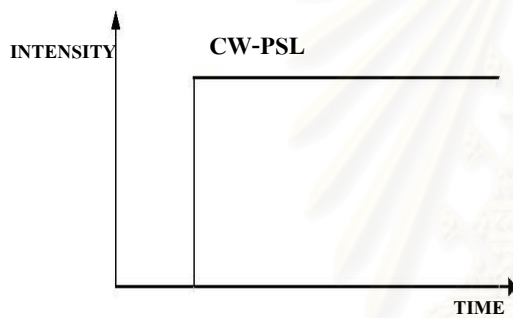
รูปที่ 2.19 แผนภาพกระบวนการยกกระด้นพลังงานอิเล็กตรอนเมื่อมีการดูดกลืนพลังงานแสง (1) Ionization; (2) Exciton formation; (3a, 3b) Defect ionization; (4a, 4b) Trap ionization; (5) Internal intra-center transition.

### 2.5.2. รูปแบบของการกระตุ้นให้เกิดแสงเรือง (Stimulation mode)<sup>[11,12]</sup>

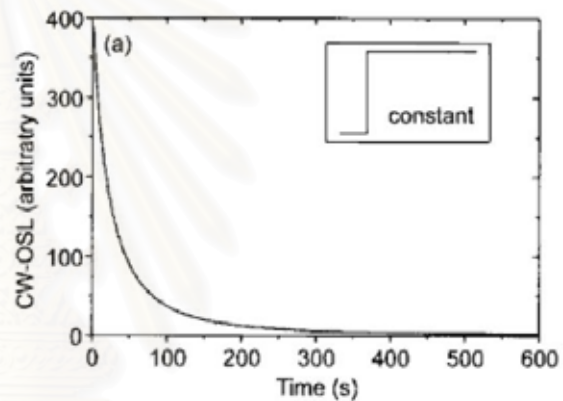
จากหลักการตรวจสอบอาหารฉายรังสีโดยเทคนิคการทำให้เกิดแสงเรืองจะเห็นว่าประกอบด้วยส่วนสำคัญหลัก 2 ส่วน ได้แก่ แหล่งกำเนิดแสงกระตุ้นที่มีความยาวคลื่นเหมาะสม และระบบวัดโฟตอนแสงเรือง ที่ปลดปล่อยปลดจากอาหารฉายรังสีตัวอย่างที่มีความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน ซึ่งรูปแบบของเทคนิคการกระตุ้นให้เกิดแสงเรืองและวัดความเข้มโฟตอน เพื่อให้สามารถคัดแยกอาหารที่ผ่านการฉายรังสีได้รวดเร็วสามารถแบ่งได้ 3 รูปแบบดังนี้

### 2.5.2.1. การกระตุ้นแบบต่อเนื่อง (Continuous-wave [CW-PSL] Mode)

การกระตุ้นด้วยแสงแบบต่อเนื่อง เป็นการตรวจวัดโดยส่องแสงกระตุ้นที่มีความเข้มคงที่ไปยังตัวอย่างที่ตรวจวัดทำให้เกิดแสงเรืองปลดปล่อยออกมาต่อเนื่อง ซึ่งแสงกระตุ้นต้องกรองเฉพาะความยาวคลื่นแสงแถบแคบ (Narrow band) ที่ออกไปใช้กระตุ้น ขณะที่กรองเฉพาะย่านความยาวคลื่นแสงเรืองที่เกิดขึ้นรับมาตรวจวัด ผลของความเข้มแสงเรืองจะมีรูปลักษณะเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential form) สลายในช่วงเวลา 300 วินาที ซึ่งรูปสัญญาณควบคุมต้นกำเนิดแสงกระตุ้นจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.20.ก ส่วนผลการวัดความเข้มโฟตอนแสงเรืองจะให้กราฟตอบสนองดังในรูป 2.20.ข โดยค่าความเข้มแสงมีหน่วยเป็น Absolute signal intensity หรือ เรียกว่า Arbitrary units [a.u.] ซึ่งมีค่าเท่ากับผลต่างความเข้มโฟตอนต่อความเข้มโฟตอนเริ่มต้น  $[(I-I_0)/I_0]$  ซึ่งอาจอ้างถึง PSL หรือ OSL



ก. รูปสัญญาณการกระตุ้น

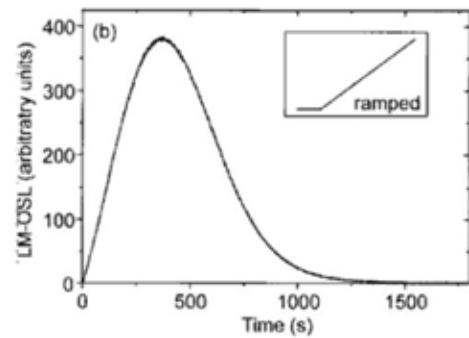
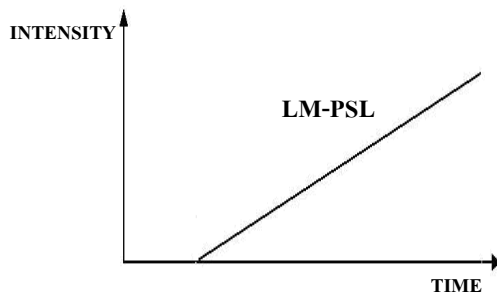


ข. ผลตอบสนองของแสงเรืองจาก CW-PSL

รูปที่ 2.20 รูปแบบการกระตุ้นด้วยแสงแบบ CW-PSL mode

### 2.5.2.2. การกระตุ้นแบบเชิงเส้น (Linear Modulation [LM-PSL] Mode)

การกระตุ้นด้วยแสงแบบเชิงเส้น เป็นการตรวจวัดโดยส่องแสงกระตุ้นที่ปรับเพิ่มความเข้มแสงแบบเชิงเส้นไปยังตัวอย่างที่ตรวจวัด ทำให้เกิดแสงเรืองการปลดปล่อยออกมา ซึ่งในการตรวจวัดจำเป็นต้องกรองแสงย่านความยาวคลื่นแถบแคบทั้งที่ใช้ในการกระตุ้นและแสงเรืองที่เกิดขึ้นในการตรวจวัด ผลของแสงเรืองที่ถูกปลดปล่อยออกมาจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากต่ำไปถึงค่าสูงสุดและลดลงในรูปลักษณะเกาส์เซียน (Gaussian) ซึ่งรูปลักษณะสัญญาณควบคุมต้นกำเนิดแสงกระตุ้นจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.21.ก ส่วนผลการวัดความเข้มโฟตอนแสงเรืองจะให้กราฟตอบสนองดังในรูป 2.21.ข



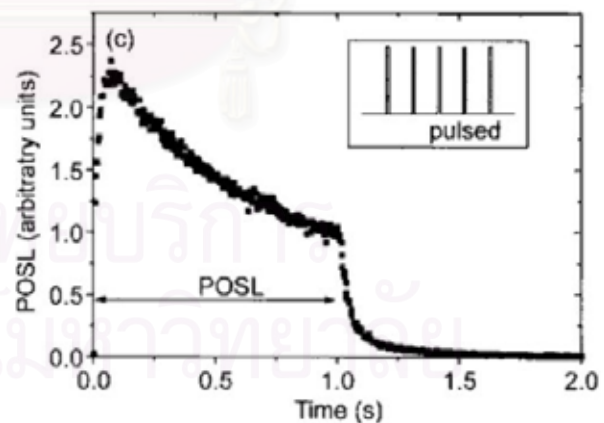
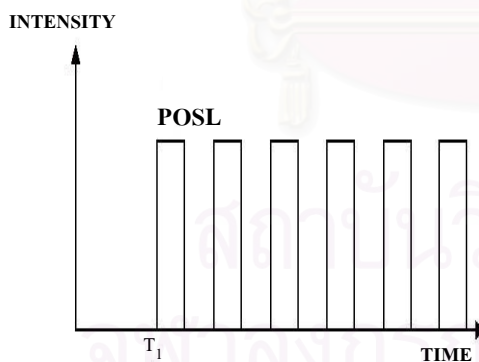
ก. รูปสัญญาณการกระตุ้น

ข. ผลตอบสนองของแสงเรืองจาก LM-PSL

รูปที่ 2.21 รูปแบบการกระตุ้นด้วยแสงแบบ LM-PSL mode

### 2.5.2.3. การกระตุ้นแบบเป็นจังหวะ (Pulsed [PPSL] Mode)

การกระตุ้นด้วยแสงแบบเป็นจังหวะ เป็นการตรวจวัดโดยส่องแสงกระตุ้นเป็นจังหวะไปยังตัวอย่างที่ตรวจวัด ทำให้ปลดปล่อยแสงเรืองออกมาเป็นจังหวะ ซึ่งในการตรวจวัดจำเป็นต้องกรองแสงย่านความยาวคลื่นแถบแคบทั้งที่ใช้ในการกระตุ้นและแสงเรืองที่เกิดขึ้นในการตรวจวัด ผลของแสงเรืองจะปลดปล่อยตามจังหวะการกระตุ้นโดยจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงระดับสูงสุดแล้วค่อยลดต่ำลงหากแสงที่ใช้กระตุ้นเป็นอินฟราเรดจะเรียกว่า IRSL mode ซึ่งรูปลักษณะสัญญาณควบคุมต้นกำเนิดแสงกระตุ้นจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.22.ก ส่วนผลการวัดความเข้มฟลูดอนแสงเรืองจะให้กราฟตอบสนองดังในรูป 2.22.ข



ก. รูปสัญญาณการกระตุ้น

ข. ผลตอบสนองของแสงเรืองจาก PPSL

รูปที่ 2.22 รูปแบบการกระตุ้นด้วยแสงแบบ PPSL mode



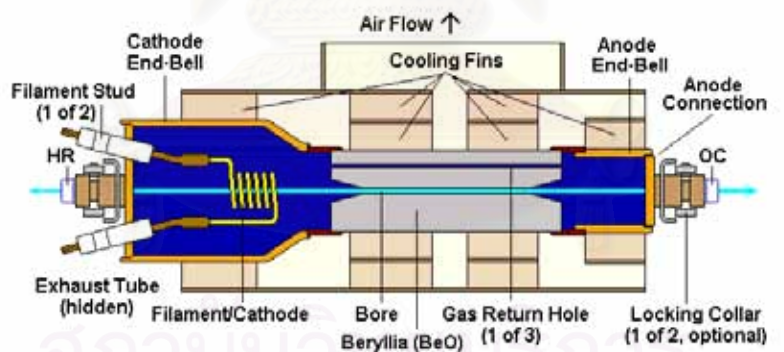
ไม่ว่าจะเลือกการตรวจคัดเลือกรายรังสีโดยใช้เทคนิคการกระตุ้นให้เกิดแสงเรืองด้วยแสงรูปแบบใด อุปกรณ์หลักที่สำคัญของระบบวัดส่วนหน้า 3 ส่วน ได้แก่ ต้นกำเนิดแสงกระตุ้น (Photostimulation light source), อุปกรณ์วัดโฟตอนแสงเรือง (Photon counting devices) และชุดแผ่นกรองย่านความยาวคลื่นแสงแถบแคบ (Band pass optical filter) สำหรับแยกแยะความยาวคลื่นแสงที่แตกต่างกัน

### 2.5.3. ต้นกำเนิดแสงกระตุ้น

ความยาวคลื่นที่ใช้ในระบบวัดด้วยเทคนิค Photostimulated Luminescence (PSL) เพื่อกระตุ้นสารประกอบอินทรีย์ที่ปนอยู่ในอาหารฉายรังสีที่จะอยู่ในช่วง 400-1110 nm การที่จะเลือกใช้ย่านความยาวคลื่นใดขึ้นกับความเหมาะสมของระดับพลังงานที่กลุ่มอิเล็กตรอนในหลุมกับดักของสารประกอบนั้นๆ ความยาวคลื่นแสงจากต้นกำเนิดแสงกระตุ้นสามารถเลือกได้โดยใช้แผ่นกรองย่านความยาวคลื่นแสงแถบแคบ สำหรับต้นกำเนิดแสงกระตุ้นที่นิยมใช้สามารถแบ่งแยกได้ดังนี้

#### 2.5.3.1 ต้นกำเนิดแสงเลเซอร์ (Laser light source)

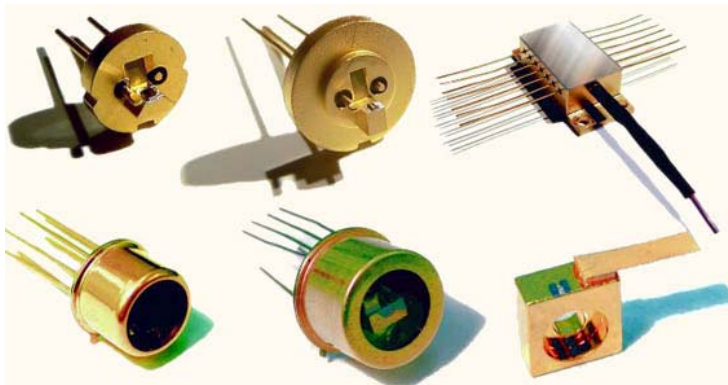
ก.) เลเซอร์ชนิดอาร์กอน (Argon laser) ให้ความเข้มแสงสูงในแถบสีเขียวที่ความยาวคลื่น 514.5 nm มีโครงสร้างดังในรูปที่ 2.23 มีกำลังส่องสว่างที่ใช้งานประมาณ  $50 \text{ mW/cm}^2$  ต้องการพื้นที่ติดตั้งมากทั้งระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าและระบบระบายความร้อน



Structure of Typical Cynonics/Uniphase Argon Ion Laser Tube

รูปที่ 2.23 แผนภาพต้นกำเนิดแสงกระตุ้นแบบเลเซอร์ชนิดอาร์กอน

ข.) เลเซอร์ชนิดไดโอดอินฟราเรด (IR Laser diode) ให้ความเข้มแสงสูงในแถบแสงอินฟราเรดที่ความยาวคลื่น 830 nm มีรูปร่างหลากหลายดังในรูปที่ 2.24 มีกำลังส่องสว่างที่ใช้งานประมาณ  $400 \text{ mW/cm}^2$  ต้องการพื้นที่ติดตั้งน้อย เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กให้ความเข้มแสงสูง



รูปที่ 2.24 ต้นกำเนิดแสงกระตุ้นแบบเลเซอร์ชนิดไดโอดอินฟราเรด

### 2.5.3.2 ต้นกำเนิดแสงชนิดหลอดฮาโลเจน (Halogen lamp)

หลอดฮาโลเจนเป็นหลอดจุดไส้ให้ความเข้มแสงสูงใช้สำหรับการกระตุ้นด้วยแสงสว่างแบบแถบกว้าง (Broad-band light stimulation) ย่าน blue-green light ช่วงความยาวคลื่น 420- 550 nm มีกำลังส่องสว่างที่ใช้งานประมาณ 16-30 mW/cm<sup>2</sup>



รูปที่ 2.25 ต้นกำเนิดแสงกระตุ้นแบบหลอดฮาโลเจน

### 2.5.3.1. ต้นกำเนิดแสงชนิดไดโอดเปล่งแสง

ต้นกำเนิดแสงชนิดไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode) เรียกย่อ ๆ ว่า LED เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่สามารถเลือกย่านความยาวคลื่นที่เปล่งแสงได้ระหว่าง 400 ถึง 900 nm ซึ่งจะครอบคลุม ในย่าน UV Visible และ Infrared การเพิ่มความเข้มแสงทำได้โดยการเพิ่มจำนวนไดโอดและ

จัดลำแสงให้ตกกระทบบริเวณพื้นผิวตัวอย่างที่ต้องการ ไดโอดเปล่งแสงที่นำมาใช้เป็นต้นกำเนิดแสงได้แก่



รูปที่ 2.26 ไดโอดเปล่งแสงที่ให้ ความยาวคลื่นแสงในย่านต่างๆ

ก.) ไดโอดเปล่งแสงอินฟราเรด (IR LED) ให้ความเข้มสูงที่ความยาวคลื่น 875 nm มีกำลังส่องสว่างที่ใช้งานประมาณ  $40\text{-}50\text{ mW/cm}^2$

ข.) ไดโอดเปล่งแสงแสงสีเขียว (Green LED) ให้ความเข้มสูงที่ความยาวคลื่น 515 nm มีกำลังส่องสว่างที่ใช้งานประมาณ  $30\text{ mW/cm}^2$

ค.) ไดโอดเปล่งแสงแสงสีน้ำเงิน (Blue LED) ให้ความเข้มสูงที่ความยาวคลื่น 470 nm มีกำลังส่องสว่างที่ใช้งานประมาณ  $18\text{-}24\text{ mW/cm}^2$

ง.) ไดโอดเปล่งแสงแสงสีน้ำเงิน และกรองแถบความยาวคลื่นออก (Blue LED and cut-off filter characteristics)

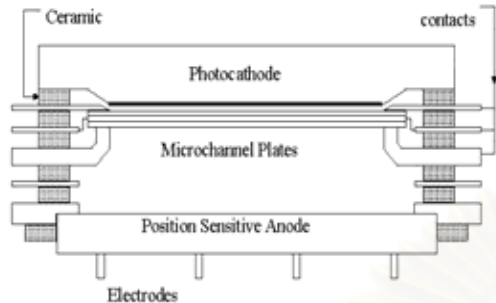
#### 2.5.4. อุปกรณ์วัดโฟตอนแสง

การตรวจวัดโฟตอนแสงเรื่องขึ้นมาจากตัวอย่างที่ทำการกระตุ้นด้วยแสงจะต้องใช้เซนเซอร์ที่ทำหน้าที่แปลงโฟตอนให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปยังวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่ในการนับวัดต่อไป ซึ่งเซนเซอร์ ที่ใช้ในการตรวจวัดโฟตอนที่ใช้ได้แก่

##### 2.5.4.1. Imaging photon detectors (IPDs)<sup>[13,14]</sup>

Imaging photon detectors (IPD) เป็นอุปกรณ์รับภาพที่ประกอบด้วยโครงสร้างของไมโครแชนแนลเพลต (Microchannel plate; MCP) และแอโนดชนิดไวต่อตำแหน่งแบบสองมิติ

สามารถตรวจวัดแสงที่มีความเข้มต่ำๆ ทำงานร่วมกับระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้สัญญาณแบบดิจิทัล เชื่อมโยงกับคอมพิวเตอร์ในการประมวลผลการวัดความเข้มแสง มีโครงสร้างและลักษณะดังรูปที่ 2.27.ก และ ข ตามลำดับ



ก. แสดงโครงสร้างของ IPDs

ข. ภาพอุปกรณ์ IPDs

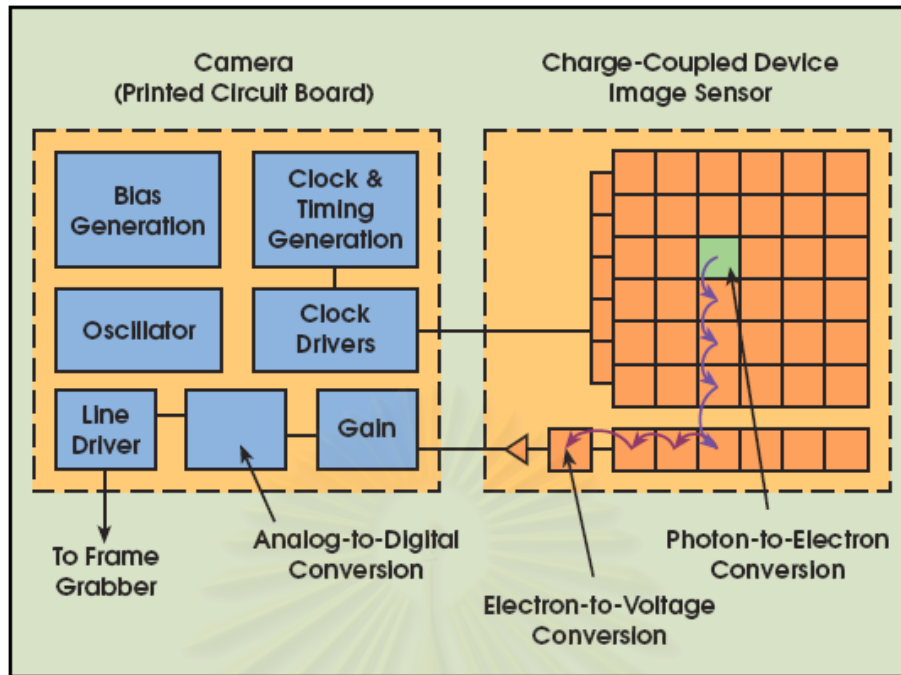
รูปที่ 2.27 โครงสร้างของ IPDs และอุปกรณ์ IPDs

#### 2.5.4.2. Charge coupled device (CCD)

Charge coupled device (CCD) เป็นอุปกรณ์รับภาพสำหรับกล้องโทรทัศน์ นำมาประยุกต์ใช้ในการวัดแสงที่บ่งบอกตำแหน่ง มีความละเอียดจุดรับแสงสูงระดับหลายล้านพิกเซล (Pixel) ดังแสดงรูปลักษณะในรูปที่ 2.28 มีความไวแสงสูงระดับไมโครลักซ์ (micro-lux) ตอบสนองความยาวคลื่นแสงย่านกว้างจาก UV-Visible เมื่อ CCD รับแสงจะเปลี่ยนความเข้มแสงเป็นปริมาณประจุตามสัดส่วนในรูปสัญญาณอนาล็อกและเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิทัลส่งเข้าระบบคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 2.29



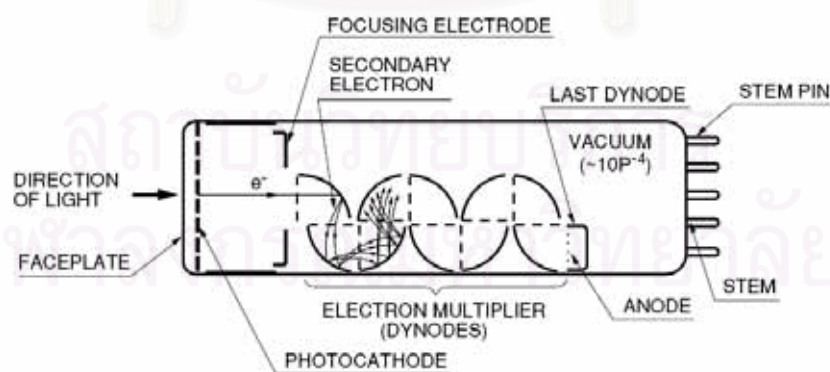
รูปที่ 2.28 แสดงภาพของ CCD



รูปที่ 2.29 แสดงแผนภาพการทำงานของ CCD

#### 2.5.4.3. หลอดทวีคูณแสง (Photomultiplier tubes; PMT)<sup>[15]</sup>

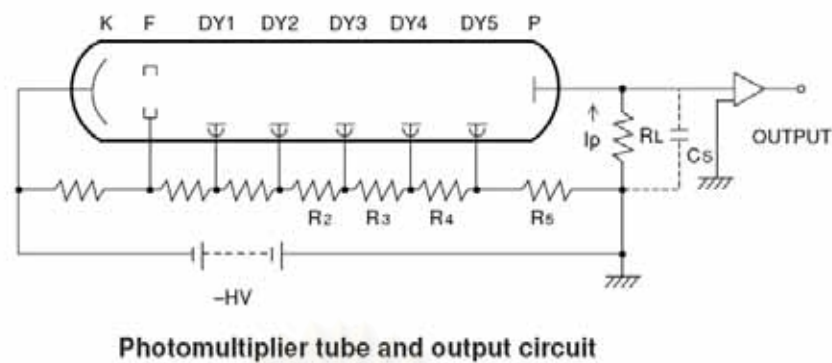
หลอดทวีคูณแสงเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนแสงที่มีความเข้มต่ำมากเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยหลอดทวีคูณแสงทั่วไปจะมีลักษณะเป็นหลอดสูญญากาศ ที่ภายในประกอบด้วย โฟโตแคโทด (Photo cathode) ไดโนด (Dynode) โฟกัส (focus) และ แอโนด (Anode) ดังโครงสร้างในรูปที่ 2.30 วงจรไบอัสให้หลอดทวีคูณแสงทำงานในแบบแบบกราวด์แอโนดแสดงในรูปที่ 2.31



Construction of a photomultiplier tube

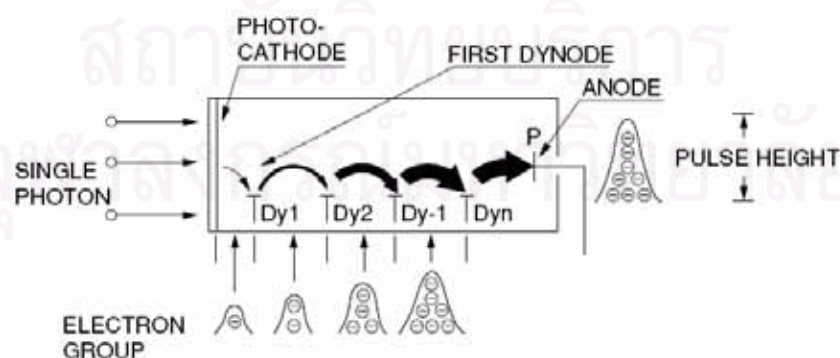
รูปที่ 2.30 โครงสร้างของหลอดทวีคูณแสง





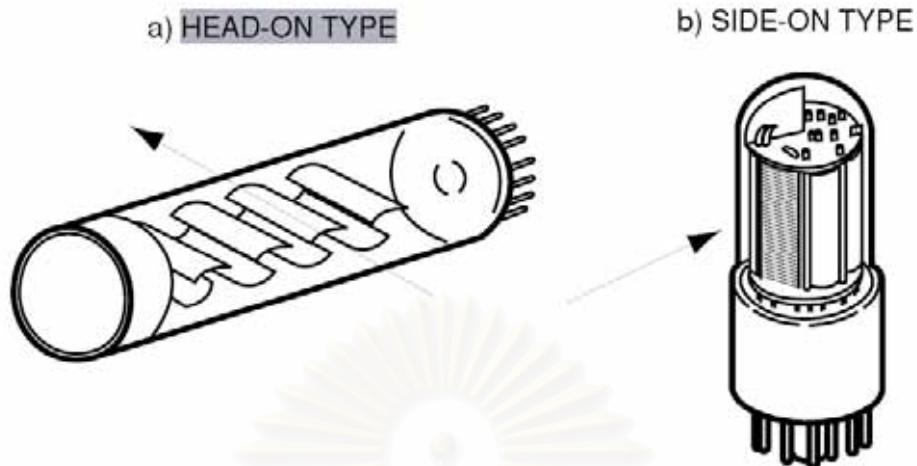
รูปที่ 2.31 แสดงการวงจรไบอัสหลอดทวีคูณแสงแบบกราวด์แอโนด

การทำงานเริ่มเมื่อมีโฟตอนแสงตกกระทบบน โฟโตแคโทด (Photo cathode) จะเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา เนื่องจากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกโฟกัสและเร่งด้วยสนามไฟฟ้าเข้าสู่ไดโนดตัวแรกผ่านกระบวนการทวีปริมาณอิเล็กตรอนตามลำดับจากไดโนดตัวแรกจนถึงไดโนดสุดท้าย และถูกรวบรวมบนแอโนด (Anode) ตามปกติหลอดทวีคูณแสงจะมีอัตราขยายประมาณล้านเท่า ดังนั้น โฟโตอิเล็กตรอนหนึ่งตัวจาก โฟโตแคโทดเมื่อถูกเร่งผ่านชุดไดโนดจะได้รับการทวีปริมาณอิเล็กตรอนได้มากถึงหนึ่งล้านตัวดังแผนภาพรูปที่ 2.32 หลอดทวีคูณแสงนั้นเหมาะสำหรับที่จะใช้กับแหล่งกำเนิดแสงเรืองที่มีความเข้มแสงต่ำมากๆ มีประสิทธิภาพในการวัดแสงประมาณ 20 เปรอร์เซ็นต์ หลอดทวีคูณมีการสนองต่อความเข้มแสงเป็นเชิงเส้น (Linear response) อย่างไรก็ตามการใช้งานหลอดทวีคูณแสง ต้องคำนึงถึงผลกระทบจากสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้าจากภายนอกต่อการเบี่ยงเบนของกลุ่มอิเล็กตรอนหลุดจากไดโนด หลอดทวีคูณแสงจะมีการผลิตใน 2 รูปแบบ คือ แบบแสงเข้าด้านหน้า (Head on type) และแสงเข้าด้านข้าง (Side on type) ดังรูปที่ 2.33



**Photomultiplier tube operation in photon counting mode**

รูปที่ 2.32 การทำงานของหลอดทวีคูณแสง



รูปที่ 2.33 แสดงรูปแบบของหลอดทวีคูณแสง

ส่วนทวีคูณอิเล็กตรอน (Electron multiplier) ของหลอดทวีคูณแสงจะมีโครงสร้าง 5 แบบ ได้แก่ linear-focused, Circular-cage, Box and grid, Venetian blind, Fine mesh และ Metal channel โครงสร้างแต่ละแบบมีการตอบสนองต่อเวลาในการรวบรวมอิเล็กตรอนหรือเวลาขาขึ้น (Rise time) และเวลาในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (Electron transition) แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ซึ่งมีผลต่อการใช้วัดแสงเรืองจากสารเรืองแสงที่มีเวลาสลายแสงที่ต่างกัน

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของส่วนทวีคูณอิเล็กตรอนของหลอดทวีคูณแสง

Unit : ns

Dynode Type	Rise Time	Fall Time	Pulse Width (FWHM)	Electron Transit Time	T.T.S.
Linear-focused	0.7 to 3	1 to 10	1.3 to 5	16 to 50	0.37 to 1.1
Circular-cage	3.4	10	7	31	3.6
Box-and-grid	to 7	25	13 to 20	57 to 70	to 10
Venetian blind	to 7	25	25	60	to 10
Fine mesh	2.5 to 2.7	40	5	15	to 0.9
Metal channel	0.65 to 1.5	1 to 3	1.5 to 3	4.7 to 8.8	0.26 to 0.28

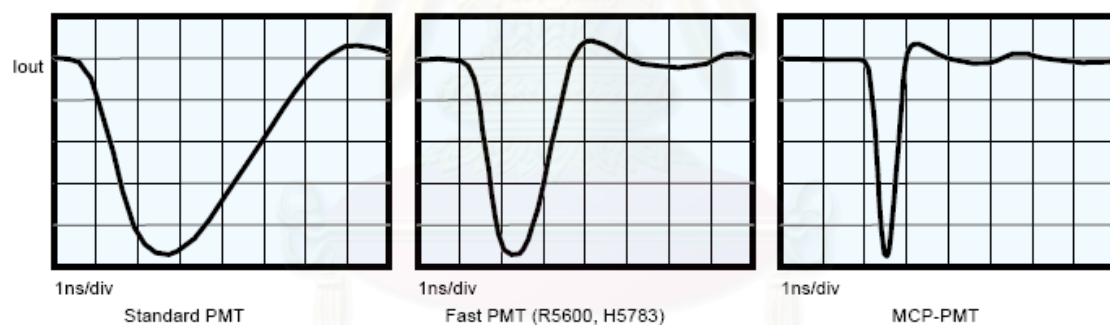
ในตารางที่ 2.4 แสดงคุณสมบัติของหลอดทวีคูณแสงที่มีโครงสร้างของส่วนทวีคูณอิเล็กตรอนแบบต่างๆ เปรียบเทียบกับหลอดทวีคูณแสงที่ส่วนทวีคูณอิเล็กตรอนเป็นไมโครแชนแนลเพลต (Microchannel Plate; MCP) และหลอดทวีคูณแสงแบบแชนแนลโลหะ (Metal channel) ทั้งในแง่ของความเป็นเชิงเส้นของสัญญาณ การรบกวนของสนามแม่เหล็กและประสิทธิภาพของการรวบรวม

อิเล็กทรอนิกส์ หลอดทวีคูณแสงที่ใช้ในการวัดแสงเรืองจากสารเรืองแสงที่มีเวลาสลายความเข้มแสงสั้นจะเลือกใช้ชนิดที่มีเวลาขาขึ้นสั้น โดยรูปสัญญาณพัลส์จากหลอดทวีคูณแสงแต่ละชนิดจะตอบสนองเวลาขาขึ้นของสัญญาณพัลส์แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.34

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของหลอดทวีคูณแสงกับ MCP

Dynode Type	Rise Time (ns)	Pulse Linearity at 2% (mA)	Magnetic Immunity (mT)	Uniformity	Collection Efficiency	Features
Circular-cage	0.9 to 3.0	1 to 10	0.1	Poor	Good	Compact, high speed
Box-and-grid	6 to 20			Good	Very good	High collection efficiency
Linear-focused	0.7 to 3	10 to 250		Poor	Good	High speed, high linearity
Venetian blind	6 to 18	10 to 40		Good	Poor	Suited for large diameter
Fine mesh	1.5 to 5.5	300 to 1000	*700 to 1200 or more	Good	Poor	High magnetic immunity, high linearity
MCP	0.1 to 0.3	700	15 to *1200 or more	Good	Poor	high speed
Metal channel	0.65 to 1.5	30	1 to 20**	Good	Good	Compact, high speed

\* In magnetic field parallel to tube axis  
\*\*Metal package PMT



รูปที่ 2.34 รูปสัญญาณพัลส์จากหลอดทวีคูณแสงแบบต่างๆ ที่มีเวลาขาขึ้นแตกต่างกัน<sup>[16]</sup>

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3

## การพัฒนาระบบตรวจสอบเครื่องเทศผ่านการฉายรังสีโดยเทคนิค การกระตุ้นให้เกิดแสงเรืองด้วยแสง

ระบบตรวจสอบเครื่องเทศผ่านการฉายรังสีโดยเทคนิคการกระตุ้นให้เกิดแสงเรืองที่พัฒนาขึ้นนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้สำหรับการตรวจคัดแยกเครื่องเทศผ่านการฉายรังสีในขั้นตอนการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์อาหารสำเร็จรูป เทคนิคการกระตุ้นให้เกิดแสงเรืองด้วยแสง เป็นการตรวจสอบอาหารผ่านการฉายรังสีสำหรับการคัดแยกขั้นต้นที่สามารถทำการตรวจสอบได้อย่างรวดเร็ว (Rapid screening) ใช้ปริมาณตัวอย่างในการตรวจสอบน้อย ไม่ต้องมีกระบวนการในการเตรียมตัวอย่างที่ยุ่งยาก ค่าใช้จ่ายในการวัดต่ำ เหมาะกับการตรวจสอบวัตถุดิบในด้านอุตสาหกรรมอาหาร แต่ไม่สามารถบ่งชี้ปริมาณรังสีที่ถูกต้อง หากผลการตรวจวัดไม่สามารถจำแนกได้เด็ดขาด จำเป็นต้องใช้วิธีการอื่นมายืนยันความถูกต้อง ความไวในการวัดขึ้นอยู่กับ ชนิดและปริมาณของโครงสร้างซิลิเกต ที่กระจายอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของตัวอย่าง ในการพัฒนานี้ได้ออกแบบระบบที่พร้อมใช้งานและทำการทดสอบสมรรถนะในการตรวจคัดแยกเครื่องเทศฉายรังสีเปรียบเทียบกับระบบวัดสมรรถนะสูงที่ผลิตมาจากต่างประเทศ

#### 3.1 การออกแบบโครงสร้างของระบบ

##### 3.1.1 ข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบ

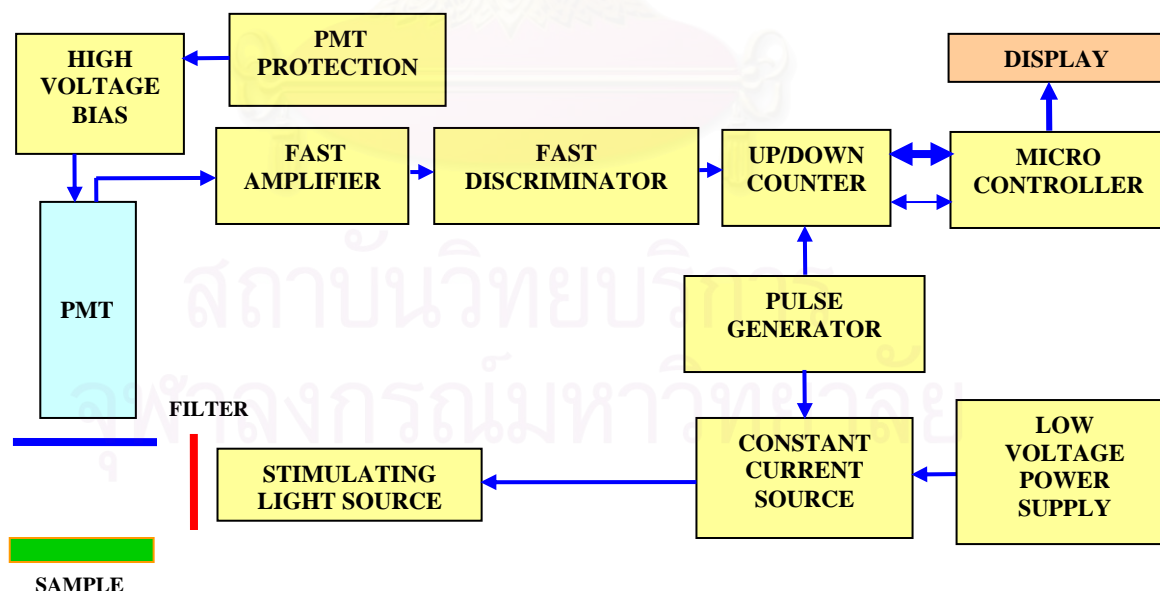
ก.) จากทฤษฎีของกระบวนการตรวจสอบด้วยเทคนิคการกระตุ้นให้เกิดแสงเรืองด้วยแสงนั้น อาศัยผลการวัดปริมาณแสงเรืองจากฟลูออโรโครมในธรรมชาติที่ปนอยู่ในเครื่องเทศที่ผ่านการฉายรังสี ปริมาณรังสีจะทำให้เกิดปริมาณอิเล็กตรอนอิสระที่หลุมกับดักในโครงสร้างของผลึก เมื่อกระตุ้นด้วยคลื่นกำเนิดแสงย่านความยาวคลื่นแสงระหว่าง 840-900 nm ที่มีความเข้มแสงสูงสุด 40-80 mW/cm<sup>2</sup> ภายในบริเวณที่บ่งแสง สามารถทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากกับดักแล้วเข้ามารวมตัวกับโฮล พร้อมกับคายพลังงานที่ลดระดับลงมาเป็นรูปของแสงเรืองที่มีความยาวคลื่นในช่วง UV/VIS ซึ่งสามารถตรวจวัดคลื่นแสงนี้ผ่านแผ่นกรองแสง (Optical Filters) ด้วยหลอดทวีคูณแสง (Photomultiplier tube) เพื่อแปลงความเข้มแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า (PSL) และทำการตรวจวัดด้วยระบบนับโฟตอน (Photon counter) ชนิดตอบสนองเวลาช่วงสั้นระดับนาโนวินาที จำนวนนับโฟตอนแสงที่ได้จะนำมาประมวลผลปริมาณรังสีที่ฟลูออโรโครมประกอบได้รับ

ข.) เพื่อให้สามารถประมวลผลปริมาณรังสีจากค่านับวัดที่ได้จากการตรวจวัดโฟตอนแสงเรืองที่เกิดจากการกระตุ้นจริง จำเป็นต้องใช้เทคนิคการหักลบสัญญาณจากแบกกราวด์ (Background

subtraction techniques) เนื่องจากกระบวนการตรวจวัดจะวัดสัญญาณได้ 2 ส่วน คือ สัญญาณที่เกิดจากกระแสในความมืดของหลอดทวิคูณแสงรวมกับสัญญาณรบกวนอื่นๆ เรียกว่า สัญญาณแบกกราวด์ (Background signal) และสัญญาณผลรวมระหว่างสัญญาณโฟตอนแสงเรืองกับสัญญาณแบกกราวด์ (Overall signal) ดังนั้นสัญญาณโฟตอนแสงเรืองจึงสามารถประมวลได้จากสัญญาณผลรวมหักลบออกด้วยสัญญาณแบกกราวด์ เทคนิคการกระตุ้นให้เกิดแสงเรืองที่หักลบแบกกราวด์ในเวลาใกล้เคียงกันสลับกันเป็นจังหวะระหว่างการนับและการหักลบนี้เป็นเทคนิคของระบบการกระตุ้นให้เกิดแสงเรืองแบบพัลส์ (PPSL)

### 3.1.2 โครงสร้างและการทำงานของระบบ

จากข้อมูลในข้อ 3.1.1 สามารถออกแบบระบบตรวจสอบเครื่องเทศผ่านการฉายรังสีซึ่งเลือกวิธีการกระตุ้นให้เกิดแสงเรืองแบบพัลส์ โดยหลักการของระบบจะประกอบด้วยระบบย่อย 6 ส่วนหลัก ได้แก่ ระบบกำเนิดแสงกระตุ้น (Stimulating light source), ระบบนับโฟตอนชนิดตอบสนองเวลาช่วงสั้น (Fast photon counter), ระบบกำเนิดพัลส์เพื่อควบคุมจังหวะการกระตุ้นแสง (Pulse generator), ระบบนับสัญญาณพัลส์ชนิดหักลบแบกกราวด์ (Up/down counter) ระบบประมวลผลค่านับวัดในการตรวจคัดแยกเพื่อแสดงผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) และแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (Low voltage power supply) โดยมีการทำงานเชื่อมโยงกันดังในแผนภาพรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพการทำงานของระบบตรวจสอบเครื่องเทศผ่านการฉายรังสี



การออกแบบโครงสร้างของระบบย่อยส่วนต่างๆ จะประกอบด้วยวงจรภายในดังนี้

- ก. ระบบกำเนิดแสงกระตุ้นประกอบด้วยวงจรต้นกำเนิดแสงและแหล่งจ่ายไฟฟ้าชนิดกระแสคงที่ (Constant current source)
- ข. ระบบนับโฟตอนชนิดตอบสนองเวลาช่วงสั้นประกอบด้วยวงจรหลอดทวีคูณแสง วงจรป้องกันหลอดทวีคูณแสง วงจรแหล่งจ่ายไบอัส วงจรขยายสัญญาณ และวงจรดิสคริมีเนเตอร์ชนิดตอบสนองเวลาช่วงสั้น
- ค. ระบบนับสัญญาณพัลส์ชนิดหักลบแบบกราวด์ประกอบด้วยวงจรมับสัญญาณ และวงจรบัพเฟอร์ข้อมูล
- ง. ระบบกำเนิดสัญญาณพัลส์ประกอบด้วยวงจรมับสัญญาณกำเนิดความถี่และวงจรมับคาบเวลาพัลส์
- จ. ระบบประมวลผลและแสดงผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

การทำงานของระบบเริ่มจากต้นกำเนิดแสงได้รับการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากวงจรแหล่งจ่ายกระแสคงที่เป็นจังหวะเปิดและปิดตามคาบเวลาของคลื่นรูปเหลี่ยม (Square wave) ที่ปรับเปลี่ยนความถี่ได้ระหว่าง 10 - 40 kHz ของวงจรมับพัลส์ ส่งแสงผ่านแผ่นกรองแสงเฉพาะความยาวคลื่นสูงกว่า 780 nm ผ่านไปกระตุ้นตัวอย่างทำให้เกิดโฟตอนแสงเรือง ส่งผ่านแผ่นกรองแสงที่ยอมให้เฉพาะแสงย่านความยาวคลื่น UV/VIS ผ่านไปยังโฟโตแคโทดของหลอดทวีคูณแสงที่รับการไบอัสที่เหมาะสม กำเนิดเป็นสัญญาณพัลส์ส่งให้วงจรมับสัญญาณพัลส์และคัดเลือกสัญญาณพร้อมแปลงเป็นสัญญาณลอจิกด้วยวงจรมับดิสคริมีเนเตอร์ส่งให้วงจรมับสัญญาณพัลส์โฟตอนแสงเรืองทำการนับและหักลบแบบกราวด์สอดคล้องกับจังหวะเปิดและปิดตามคาบเวลาของคลื่นรูปเหลี่ยม ส่วนระบบประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำหน้าที่ควบคุมการอ่านข้อมูลค่านับพัลส์และตรวจคัดแยกตามระดับอ้างอิงที่กำหนดเพื่อแสดงผลตามโปรแกรมที่ออกแบบไว้

### 3.1.3 การออกแบบห้องกระตุ้นตัวอย่างและวัดโฟตอนแสงเรือง

การกระตุ้นตัวอย่างเครื่องเทศและวัดโฟตอนแสงเรืองแสงต้องกระทำในบริเวณห้องใต้ตัวอย่างที่มีความมืดสนิท จัดระยะห่างระหว่างตัวอย่างและหน้าหลอดทวีคูณแสงร่วมกับระยะช่องแสงกระตุ้นที่จะทำให้ได้สัญญาณสูงที่สุดและจัดสวิตช์ป้องกันหลอดทวีคูณแสง ดังนั้นการออกแบบจึงต้องมีรายละเอียดขนาดของอุปกรณ์ประกอบ เพื่อจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์และกำหนดสัดส่วนของห้องกระตุ้นตัวอย่างและส่วนวัดโฟตอนแสงเรือง อุปกรณ์ประกอบที่กล่าวถึง ได้แก่

ก. หลอดทวีคูณแสงชนิดแสงเข้าด้านหน้าเบอร์ XP2206 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว มีรายละเอียดขนาดตามภาพผนวก ก. 1

ข. แผ่นกรองแสงเบอร์ BG39 สำหรับกรองแสงผ่านเฉพาะช่วงความยาวคลื่นของแสงสว่าง (Visible) ที่มีย่านตอบสนองกว้าง 210 nm (FWHM) โดยมีค่าสูงสุดที่ 507 nm และ แผ่นกรองแสง

เบอร์ RG-780 สำหรับกรองแสงผ่านเฉพาะความยาวคลื่นที่สูงกว่า 780 nm ผ่านได้ตามลำดับมี รายละเอียดขนาดและความหนาตามภาคผนวก ก. 2

ก. ชุดไดโอดอินฟราเรดชุดละ 15 ตัว 2 ชุด เพื่อให้ได้ความเข้มแสงรวม  $100 \text{ mW/cm}^2$  ส่องเต็มพื้นผิวหน้าตัวอย่าง มีขนาดแผ่นพิมพ์ลายวงจรขนาด  $3.0 \text{ cm} \times 5.0 \text{ cm}$  ทำมุมเอียงส่อง ตัวอย่าง  $45^\circ$  มีรายละเอียดการวางตำแหน่งไดโอดตามภาคผนวก ก. 3

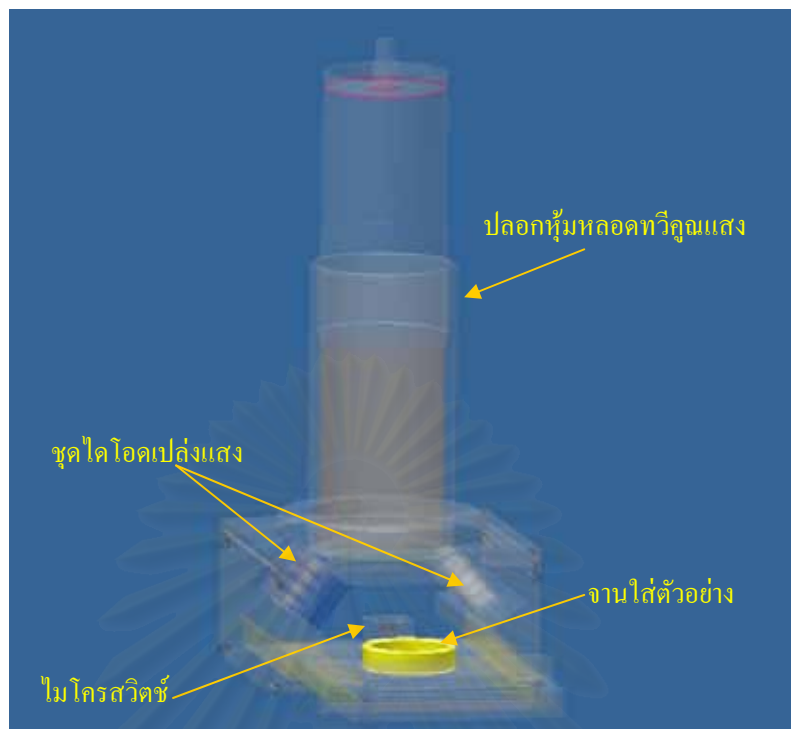
ง. งานใส่ตัวอย่างที่ใส่ปริมาณตัวอย่างได้ 50 g มีรายละเอียดขนาดตามภาคผนวก ก. 4

จากข้อมูลอุปกรณ์ที่เลือกเพื่อใช้ออกแบบวงจรในข้อ 3.2 สามารถออกแบบโครงสร้างภายนอกห้องกระตุ้นตัวอย่างและวัดโฟตอนแสงเรืองด้วยโปรแกรมออโตแคด (Auto CAD) ได้ดังรูปที่ 3.2 ประกอบด้วยส่วนหลัก 4 ส่วน ได้แก่ ฐานหลอดทวิคูณแสง ส่วนบรรจุหลอดทวิคูณแสง ลินซ์ใส่ตัวอย่างและห้องใส่ตัวอย่าง ในการออกแบบได้คำนึงถึงเทคนิคการป้องกันแสงรบกวนจากภายนอกในลักษณะลึนกันแสง การเพิ่มวัสดุป้องกันการรบกวนจากสนามแม่เหล็กและไฟฟ้าสถิตและป้องกันหลอดทวิคูณแสงขณะนำตัวอย่างเข้าหรือออก โดยนำมาออกแบบโครงสร้างภายในได้ดังรูปที่ 3.3 นอกจากนี้ยังแสดงแบบแบบแยกส่วนที่ง่ายต่อการถอดประกอบไว้ดังในรูปที่ 3.4 และรายละเอียดของแบบ (Structure drawing) แสดงไว้ในภาคผนวก ข.

ในการสร้างชิ้นส่วนเลือกใช้อลูมิเนียมเป็นวัสดุหลัก ชิ้นส่วนที่ต้องการความลื่นไหลใช้ เทฟลอน (Teflon) ซึ่งรวมทั้งฉนวนไฟฟ้าแรงดันสูงในฐานหลอดทวิคูณแสง สำหรับชิ้นส่วนป้องกันสนามแม่เหล็กใช้ Mu metal



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของห้องกระตุ้นตัวอย่างเครื่องเทศและวัดโฟตอนเรืองแสง



รูปที่ 3.3 แสดงตำแหน่งชิ้นส่วนของห้องกระตุ้นตัวอย่างเครื่องเทศและวัดโฟตอนเรืองแสง



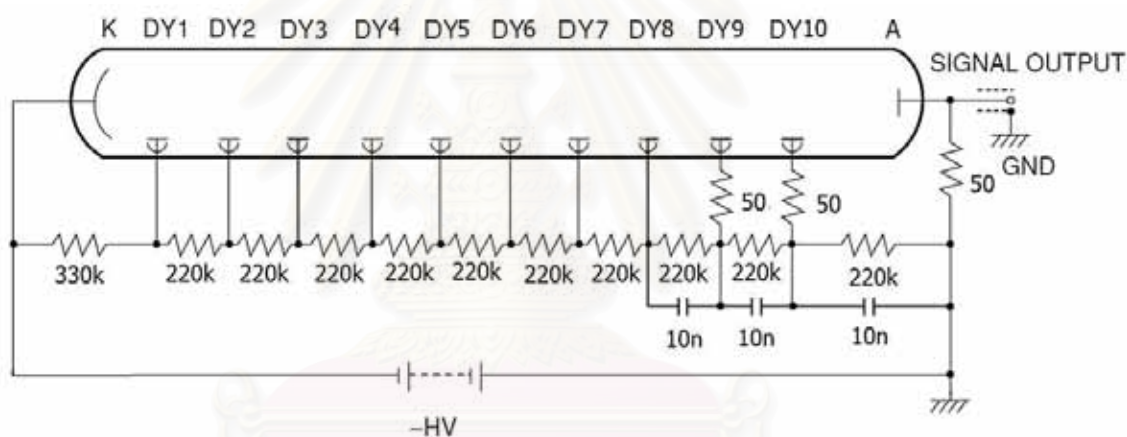
รูปที่ 3.4 แบบแยกส่วนของห้องกระตุ้นตัวอย่างเครื่องเทศและวัดโฟตอนเรืองแสง

### 3.2 การออกแบบระบบวัดโฟตอน

ระบบวัดโฟตอนแสงเรืองประกอบด้วยวงจรหลัก 5 ส่วน ได้แก่ วงจรหลอดทวีคูณแสง วงจรป้องกันหลอดทวีคูณแสง วงจรแหล่งจ่ายไบอัส วงจรขยายสัญญาณและวงจรดิสคริเมินเตอร์ ชนิดตอบสนองเวลาช่วงสั้น โดยมีการออกแบบวงจรแต่ละส่วนดังนี้

#### 3.2.1 วงจรหลอดทวีคูณแสง

ระบบวัดต้องการตอบสนองโฟตอนแสงเรืองที่มีเวลาสลายแสง 4-6 ns จึงเลือกหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ที่มีการตอบสนองเวลาขาขึ้นสั้นของบริษัท Photonic เบอร์ XP2206 ซึ่งมีไดโอด 10 ชั้นจัดแบบโฟกัสลิเนียร์ มีอัตราขยาย  $2.1 \times 10^7$  เท่า ที่แรงดันไบอัสสูงสุด 1600 V นำมาออกแบบวงจรวัดพัลส์โฟตอนชนิดกราวด์เอโนด ส่งสัญญาณพัลส์ด้วยสายเคเบิลโคแอกเซียลที่มีอิมพีแดนซ์  $Z_0 = 50 \Omega$  ดังวงจรในรูปที่ 3.5

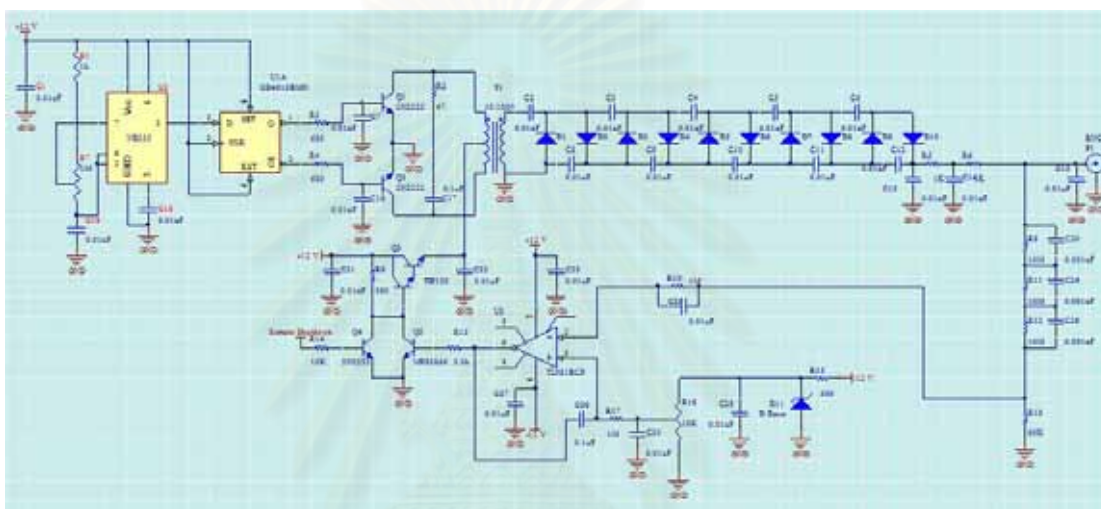


รูปที่ 3.5 วงจรหลอดทวีคูณแสงชนิดกราวด์เอโนด

กำหนดให้กระแสเอโนดเฉลี่ยที่อัตรานับโฟตอนพัลส์ 50 kcps ประมาณ  $40 \mu\text{A}$  จะต้องจัดกระแสในวงจรไดโอด (I) สูงกว่า 10 เท่าหรือประมาณ  $400 \mu\text{A}$  เพื่อความเสถียรของวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า เมื่อเลือกใช้แรงดันไบอัส (HV) ประมาณ 1000 V สามารถคำนวณความต้านทานรวม (R) ของวงจรไดโอดจาก  $R = HV/I$  และจัดแบ่งค่าความต้านทานแต่ละไดโอดได้เป็น 220 k $\Omega$  ในทางเทคนิค เพื่อเร่งโฟโตอิเล็กตรอนมายังไดโอดแรก แรงดันไฟฟ้าระหว่างแคโทดกับไดโอดแรกจึงต้องสูงกว่าไดโอดชุดอื่น จึงใช้ความต้านทานสูงขึ้นเป็น 330 k $\Omega$  ที่เอโนดจัดตัวต้านทานทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณพัลส์กระแสเป็นพัลส์แรงดันไฟฟ้ามีค่า 50  $\Omega$  เข้ากับค่า  $Z_0$  ของสายส่งสัญญาณ

### 3.2.2 วงจรแหล่งจ่ายไบอัสแรงดันสูง

จากความต้องการไบอัสของหลอดทวิคูณแสงสามารถกำหนดข้อมูลการออกแบบวงจรให้กำเนิดกระแสไฟฟ้าที่ 500  $\mu\text{A}$  แรงดันไฟฟ้าปรับค่าได้ 0-2000 V ขั้วไฟฟ้าออกเป็นลบ วงจรที่ออกแบบประกอบด้วย วงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ วงจรทวีแรงดันไฟฟ้า วงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้าชนิดปรับค่าได้ และวงจรควบคุมการหยุดจ่ายไฟระยะไกล (Remote shut down) ทำงานร่วมกันเป็นวงจรแหล่งจ่ายไบอัสแรงดันสูง ที่ต้องการแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ 12 V กระแสไฟฟ้า 2 A ดังในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วงจรแหล่งจ่ายไบอัสแรงดันสูง

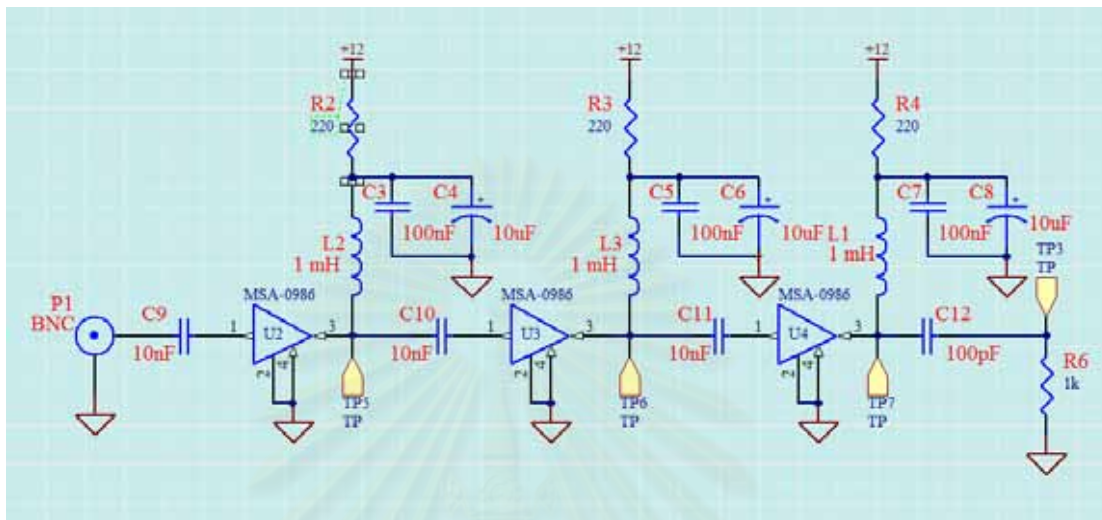
วงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับทำงานที่ความถี่ 10 kHz ใช้ไอซีเบอร์ 555 กำเนิดคลื่นสัญญาณรูปเหลี่ยมส่งให้วงจรหารความถี่ด้วย JK-flip flop แบ่งสัญญาณไปยังวงจรขับหม้อแปลงเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่มีอัตรารอบ 1:100 แบบพุช-พูล (Push-pull) แรงดันไฟฟ้าจากส่งเข้าวงจรทวีแรงดันต่ออีก 10 เท่า กรองกระแสไฟฟ้าด้วย R3, R4 และ C13,C14 จากนั้นสุม์แรงดันป้อนกลับด้วย R8-R12 และ R18 ให้วงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้าชนิดปรับค่าได้ ซึ่งจัดวงจรแบบ Series regulator ใช้ไอซีเปรียบเทียบแรงดันเบอร์ TL081 และปรับแรงดันไฟฟ้าด้วยทรานซิสเตอร์คาร์ลิงตัน (Darlington) Q1 (TIP122) ควบคุมการหยุดจ่ายไฟระยะไกลด้วยทรานซิสเตอร์สวิตช์ Q4 (2N2222)

### 3.2.3 วงจรขยายสัญญาณพัลส์ชนิดไวต่อการตอบสนองเวลาช่วงสั้น

เนื่องจากสัญญาณพัลส์โพลอนจากหลอดทวิคูณแสงเป็นพัลส์ที่มีเวลาขาขึ้นสั้นมาก จำเป็นต้องออกแบบวงจรตอบสนองความถี่สูงมากและมีจำนวนสเตจ (Stage) พอดีกับการกลับขั้วสัญญาณสเตจสุดท้ายให้เป็นขั้วบวก ในการออกแบบวงจรได้ประยุกต์ใช้วงจรขยายคลื่นไมโครเวฟ



ลำเรีจรูป (Monolithic Microwave Integrated Circuit; MMIC) ของบริษัท AVAGO เบอร์ MSA-0986 ซึ่งมีข้อมูลเฉพาะในภาคผนวก ค.1 จัวงจรขยายสัญญาณพัลส์ชนิดไวต่อการตอบสนองเวลาช่วงสั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.7 วงจรนี้ต้องการแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ 12 V กระแสไฟฟ้า 500 mA



รูปที่ 3.7 วงจรขยายสัญญาณพัลส์ชนิดไวต่อการตอบสนองเวลาช่วงสั้น

วงจรขยายเป็นแบบกลับขั้วสัญญาณมีอิมพีแดนซ์ทางเข้า 50 Ω และมีอัตราขยาย 7 dB ดังนั้นจึงจัดวงจรขยายแบบต่อเนื่อง 3 สเตจ ทำให้สัญญาณทางออกมีขั้วเป็นบวก อัตราขยายรวม 21 dB และสามารถคำนวณอัตราขยายรวมในรูป  $V_o/V_i$  ได้จาก

$$dB = 20\log V_o/V_i \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

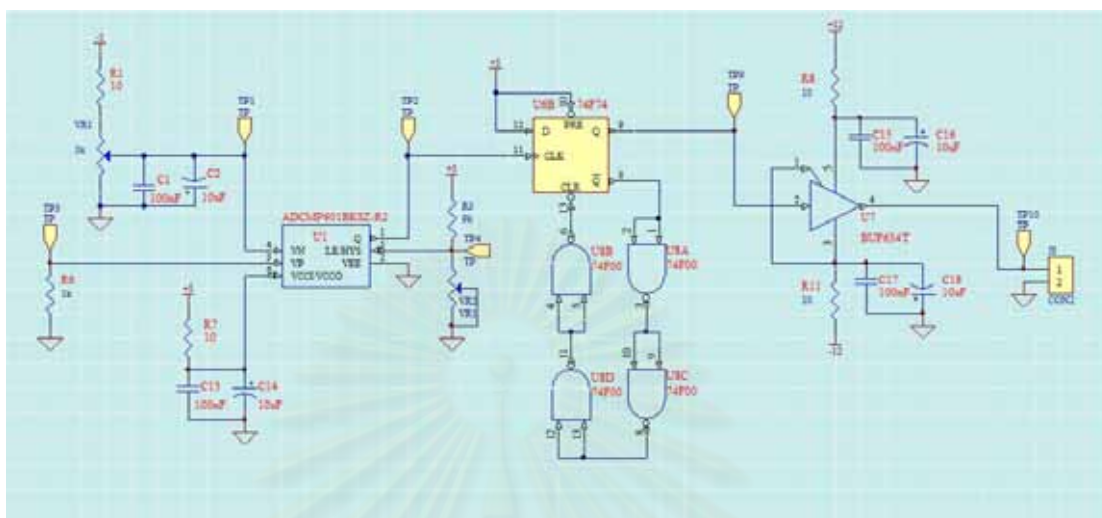
ดังนั้น  $V_o/V_i = 10^{21/20} = 11.22$  เท่า

การส่งผ่านสัญญาณแต่ละสเตจเป็นแบบ AC coupling โดยเลือกคาปาซิเตอร์ 1000 pF ต่อร่วมกับอิมพีแดนซ์ทางเข้าเกิดวงจรรวม RC differentiator มีค่าคงที่เวลาเท่ากับ 50 ns ส่วนสัญญาณทางออกปรับวงจรส่งผ่านให้เหมาะสมกับวงจรดิสคริมิเนเตอร์โดยมีโหลดทางออกเท่ากับ 1 kΩ

**3.2.4 วงจรดิสคริมิเนเตอร์ชนิดไวต่อการตอบสนองเวลาช่วงสั้น**

วงจรที่ออกแบบขึ้นประกอบด้วยวงจรร้อยได้แก่ วงจรเปรียบเทียบระดับแรงดันไฟฟ้า (Voltage comparator) วงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (Monostable multivibrator) และวงจรบัฟเฟอร์ (Buffer) ซึ่งทุกวงจรจะต้องมีคุณสมบัติตอบสนองเวลาช่วงสั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.8 การออกแบบนี้ในส่วนของวงจรถือเทียบระดับแรงดันเลือกใช้ไอซีชนิด Fast comparator เบอร์ ADCMP601 (U1) และเกตลอจิกใช้ Fast TTL series เบอร์ 74F74 (U6) และ 74F00 (U7) ซึ่งมีข้อมูลเฉพาะในภาคผนวก ค.2 ค.3 ค.4 และ ค.5 วงจรส่วนนี้ต้องการแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ 12 V

กระแสไฟฟ้า 10 mA สำหรับวงจรเปรียบเทียบระดับแรงดันและ 5 V กระแสไฟฟ้า 10 mA สำหรับเกตลอจิก TTL



รูปที่ 3.8 วงจรดีสคริมิเนเตอร์ชนิดไวต่อการตอบสนองเวลาช่วงสั้น

สัญญาณพัลส์ไฟตอนจะส่งเข้าทางขา Non-inverting เปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงปรับค่าได้ระหว่าง 0-4.5 V ที่ขา Inverting เพื่อคัดลอกขนาดความสูงของพัลส์ที่ข้ามระดับแรงดันอ้างอิงพร้อมส่งสัญญาณลอจิกออกไปกระตุ้นวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ที่ให้ความกว้างพัลส์ลอจิกคงที่ 30 ns โดยวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ที่ออกแบบใช้เทคนิคการเปลี่ยนสถานะของ D-flip flop และรีเซตสถานะด้วยสัญญาณหน่วงเวลาจากอนุกรมของเกต (gate propagation delay) วงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์รับสัญญาณพัลส์กระตุ้นด้วยขอบขาขึ้นที่ขา Clock และรีเซตที่ขา Clear ด้วยสัญญาณหน่วงเวลาจากขา Q ของ D-flip flop ผ่านอนุกรมของเกตกลับสัญญาณ U7A-U7D ได้สัญญาณลอจิกทางขา Q ที่มีความกว้างพัลส์คงที่ ส่งออกส่งไปยังวงจรขับสัญญาณไปยังวงจรมับพัลส์ผ่านวงจรมับพัลส์ที่ใช้ไอซีเบอร์ BUF634T สำหรับขับวงจรมับพัลส์ในขั้นตอนถัดไป

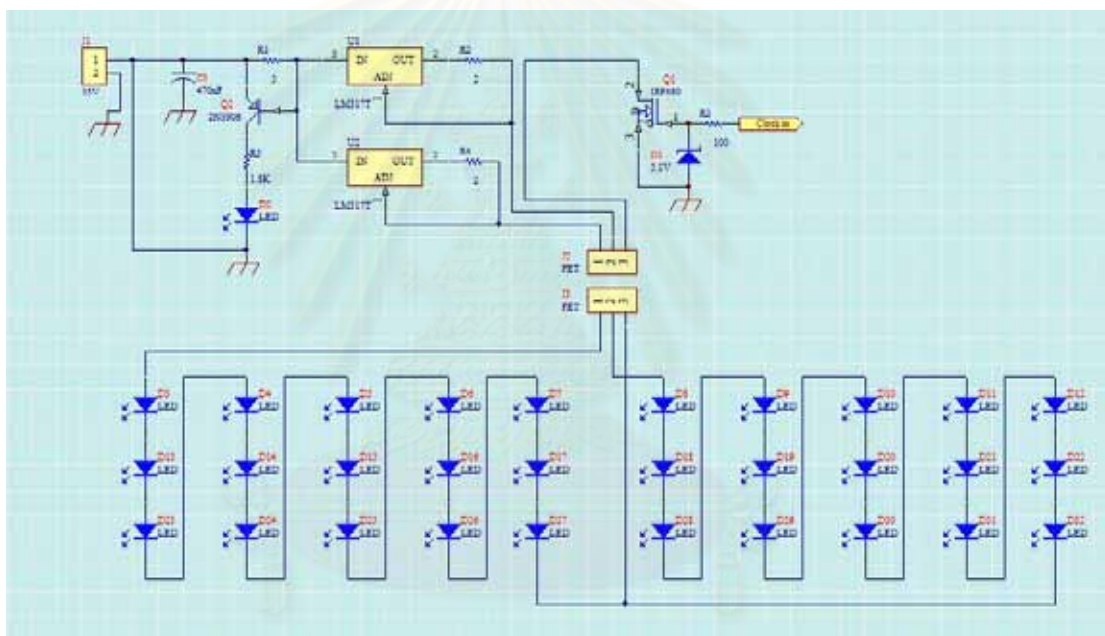
### 3.3 การออกแบบวงจรถูกานิตแสงกระตุ้นและนับพัลส์ไฟตอน

#### 3.3.1 วงจรต้นกำเนิดแสงกระตุ้น

วงจรถูกานิตแสงจะทำงานร่วมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าชนิดกระแสคงที่ที่ปล่อยแสงเป็นจังหวะตามการควบคุมของวงจรถูกานิตคาบเวลากระตุ้น ต้นกำเนิดแสงกระตุ้นสำหรับตรวจเครื่องเทศผ่านการฉายรังสีจะใช้ความยาวคลื่นหลังผ่านแผ่นกรองแสงเฉพาะที่ 870 nm ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ไดโอดเปล่งแสงอินฟราเรดของบริษัท Vishay Semiconductors เบอร์ TSFF5120 ซึ่งให้

ความยาวคลื่นสูงสุดในบริเวณช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการ ดังรายละเอียดในภาคผนวก ง. เนื่องจากไดโอดแต่ละตัวทำงานที่กระแสเฉลี่ย 250 mA ให้ความเข้มแสง 450 mW/Sr แต่ในการกระตุ้นตัวอย่างให้เกิดแสงเรืองอย่างเหมาะสม จึงได้ทดลองเบื้องต้นพบว่าเพื่อให้ได้ความเข้มแสงรวม 100 mW/cm<sup>2</sup> ครอบคลุมพื้นผิวตัวอย่าง จะต้องใช้ชุดไดโอดอินฟราเรดชุดละ 15 ตัว วางบนแผ่นพิมพ์ลายวงจรลักษณะ 3×5 ซิกกัน จำนวน 2 ชุด วางเหนือตัวอย่าง 2 ด้านทำมุม 45 ° มีระยะห่างจากถาดบรรจุตัวอย่าง 47.5 เซนติเมตร ดังโครงสร้างในรูปที่ 3.3

เพื่อให้กระแสและแรงดันไฟฟ้าของวงจรแหล่งจ่ายไม่สูงเกินไปจึงแบ่งการจ่ายกระแสไฟฟ้าวงจรไดโอดแบบต่ออันดับชุดละ 15 ตัว แยกจากกัน เนื่องจากไดโอดแต่ละตัวทำงานที่แรงดันไฟฟ้า 1.8 V และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย 250 mA ดังนั้นวงจรไดโอดแต่ละชุดจึงต้องการ  $V_{LED} = 15 \times 1.8 = 27.0 \text{ V}$  และกระแส  $I_{LED} = 250 \text{ mA}$



รูปที่ 3.9 วงจรชุดไดโอดเปล่งแสงและแหล่งจ่ายกระแสคงที่

จากข้อมูลความต้องการแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า สามารถนำมาออกแบบวงจรแหล่งจ่ายกระแสคงที่ โดยเลือกใช้ไอซีเบอร์ LM317 ทำหน้าที่ควบคุมกระแส  $I_{OUT}$  ให้คงที่จากการรักษาแรงดันไฟฟ้า  $V_{SENS}$  ที่ค่า 1.25 V คงที่ โดยเพื่อแรงดันปรับตัวบนไอซี  $V_{REG}$  ที่ 3 V ในการหาค่าแรงดันไฟฟ้าทางเข้าของวงจรคำนวณได้จากสมการ

$$V_S = V_{REG} + V_{SENS} + V_{LED} + V_{DS} \dots\dots\dots(3.2)$$

$$= 3 + 1.25 + 27 + 1 = 32.25 \text{ V}$$

และกระแสต่อเนื่องคำนวณได้จาก  $I_{OUT} = V_{SENS}/R_{SENS}$  จะได้  $R_{SENS} = V_{SENS}/I_{OUT}$  สำหรับการจ่ายกระแสแบบพัลส์เป็นการจ่ายกระแสตามคาบเวลา สามารถหาค่ากระแสเฉลี่ยได้จาก

$$I_{AV} = 1/T \int I_{OUT} dt = I_{OUT} t/T \quad \dots\dots\dots(3.3)$$

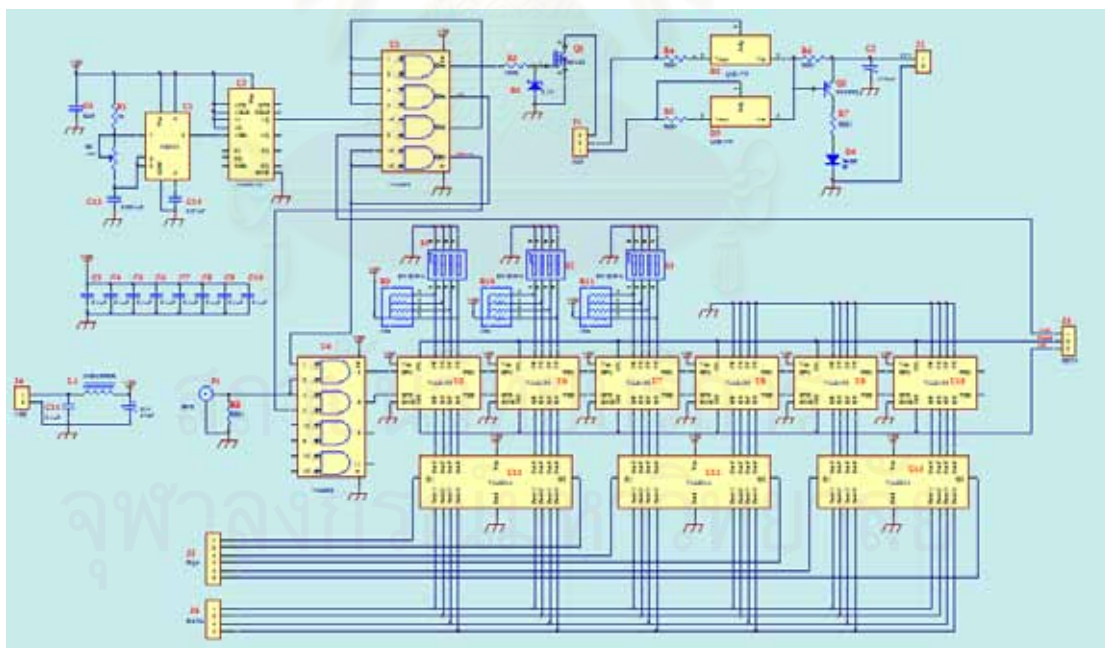
จากสมการ 3.3 เมื่อคาบเวลาเปิดและปิดเท่ากัน  $t/T = 0.5$  ดังนั้น  $I_{OUT} = 2 I_{AV} = 2 I_{LED}$  และนำมาคำนวณหาค่า  $R_{SENS}$  ได้ดังนี้

$$R_{SENS} = 1.25/2 \times 0.25 = 2.50 \Omega$$

วงจรชุดไดโอดเปล่งแสงและแหล่งจ่ายกระแสคงที่ที่แสดงในรูปที่ 3.9 ต้นกำเนิดแสงกระตุ้นจะถูกควบคุมด้วยทรานซิสเตอร์สวิตช์ Q1 (IRF90) ส่วน Q2 และไดโอดเปล่งแสง D4 ทำหน้าที่เป็นวงจรมอนิเตอร์การทำงานของวงจรต้นกำเนิดแสง วงจรส่วนนี้หลังเพื่อความเสถียรในการทำงานของวงจร ต้องการแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ 40 V กระแสไฟฟ้า 500 mA

### 3.3.2 วงจรกำเนิดคาบเวลากระตุ้นและนับพัลส์โฟตอน

การกำเนิดสัญญาณพัลส์ควบคุมแสงกระตุ้นและนับ โฟตอนต้องการให้ปรับเปลี่ยนคาบเวลาได้ระหว่าง 25-100  $\mu s$  ซึ่งสอดคล้องกับความถี่ระหว่าง 10-40 kHz ขณะที่ระบบนับสัญญาณพัลส์ออกแบบให้หักลบแบบกราวด์สลับการนับ และสามารถตั้งค่าเริ่มนับต่ำสุด (Offset count) ดังนั้นวงจรกำเนิดคาบเวลากระตุ้นและพัลส์โฟตอนจึงประกอบด้วยวงจรย่อยดังรูปที่ 3.10 ได้แก่ วงจรกำเนิดความถี่ วงจรสร้างคาบเวลาควบคุม วงจรควบคุมการนับ วงจรนับและวงจรับัพเฟอร์



รูปที่ 3.10 วงจรกำเนิดคาบเวลากระตุ้นและพัลส์โฟตอน

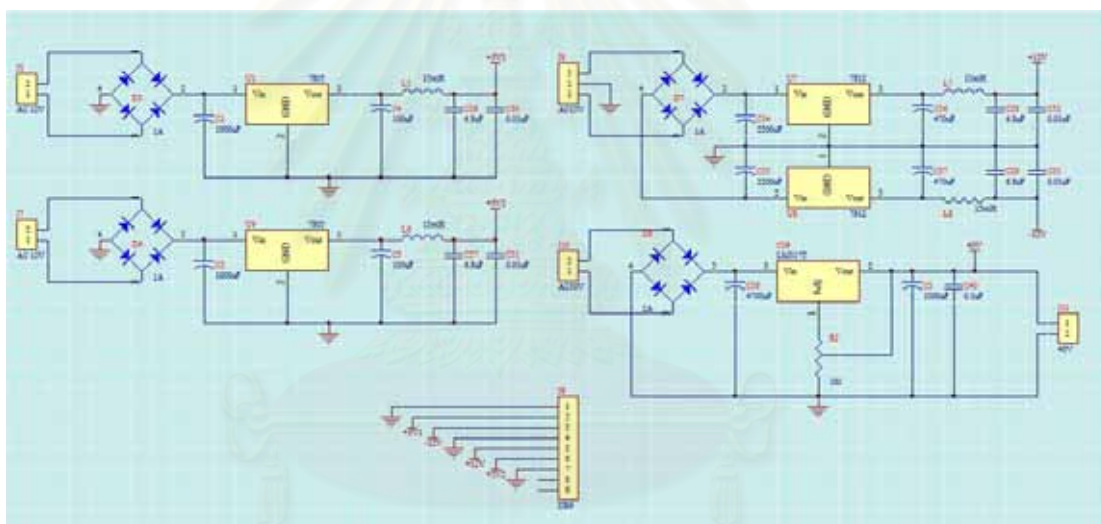
วงจรกำเนิดความถี่ได้เลือกไอซีเบอร์ NE555 ในการกำเนิดคลื่นรูปเหลี่ยมความถี่ปรับค่าได้ระหว่าง 20-80 kHz และหารครึ่งด้วย JK-flip flop ทำให้ได้ความถี่ 10-40 kHz ที่มีสัญญาณ



คาบเวลาเปิดปิดเท่ากันส่งผลให้เกิด 74LS00 เพื่อสร้างคาบเวลาควบคุมด้วยการปรับขั้วสัญญาณ สำหรับควบคุมการนับโฟตอนและนับแบรกกาวด์ พร้อมทั้งควบคุมสถานะการนับเพิ่ม/ลดของ วงจรนับ ในส่วนวงจรนับ 6 หลักเลือกใช้ไอซีเบอร์ 74HC191 ตั้งค่าต่ำสุด 3 หลัก (999 counts) ด้วย DIP switch เพื่อใส่ค่าเริ่มต้นที่เกิดจากการเบี่ยงเบนทางสถิติการนับแสงเรื่องไม่ให้เห็นค่าติดลบ ข้อมูลนับสามารถ รับการอ่านข้อมูลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ผ่านวงจรบัฟเฟอร์ (Tristate buffer) ซึ่งเลือกใช้ไอซีเบอร์ 74LS252

### 3.3.3 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ

วงจรต่างๆรวมทั้งไมโครคอนโทรลเลอร์ต้องการขนาดแรงดันไฟฟ้า  $\pm 12V$ ,  $+5V_{AN}$ ,  $+5V_{DG}$ ,  $+40V$  ที่กระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ จากข้อมูลความต้องการได้ออกแบบวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ โดยใช้ไอซีควบคุมแรงดันไฟฟ้าสำเร็จรูป (3-terminals regulator) และจัดแยกกราวด์อนาล็อก (AN) และดิจิทัล (DG) อย่างเป็นระบบดังในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ

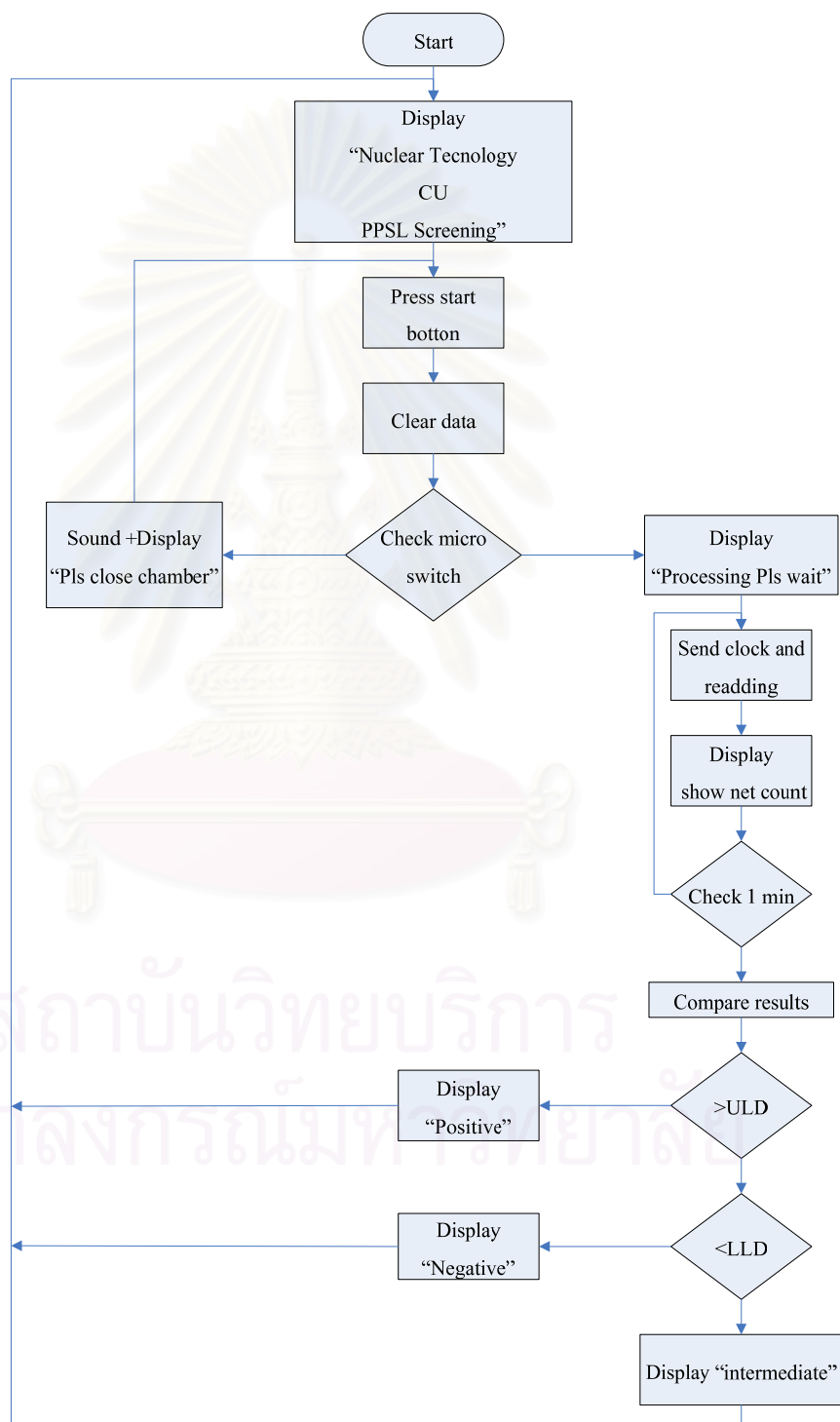
### 3.4 การออกแบบวงจรประมวลผลและแสดงผล

การทำงานของระบบตรวจสอบเครื่องเทศผ่านการฉายรังสีด้วยเทคนิค PPSL นี้ควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ เริ่มต้นจากการรีเซตระบบให้พร้อมทำงานและรอคำสั่งเริ่มนับโฟตอนพัลส์หลังใส่ตัวอย่างโดยตั้งเวลานับพร้อมหักแบกกราวด์ 1 นาที ระบบจะทำงานต่อเมื่อลิ้นชักใส่ตัวอย่างปิดสนิท ตรวจสอบไมโครสวิตช์ก่อนจ่ายไบอัส ระหว่างการนับระบบประมวลผลจะสุ่มอ่านข้อมูลนับเพื่อแสดงผล เมื่อสิ้นสุดเวลานับระบบประมวลผลจะตรวจสอบค่านับด้วยการเปรียบเทียบกับค่านับอ้างอิงต่ำสุดและสูงสุด (Threshold window) ที่ประเมินจากผลการตรวจคัดเลือกร่องเทศผ่านการฉายรังสีที่ปริมาณรังสีต่างๆ ด้วยระบบตรวจสอบสมรรถนะสูงอ้างอิงที่ผลิตจากต่างประเทศ การทำงานแต่ละขั้นตอนจะแสดงด้วยสื่อข้อความ



### 3.4.1 โปรแกรมควบคุมการทำงาน

จากขั้นตอนการทำงานของระบบดังกล่าวสามารถสร้างโฟลว์ชาร์ตของโปรแกรมควบคุมการทำงาน ประมวลผลและแสดงผลได้ดังในรูปที่ 3.12 จากนั้นออกแบบโปรแกรมทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ดังรายละเอียดในภาคผนวก จ.



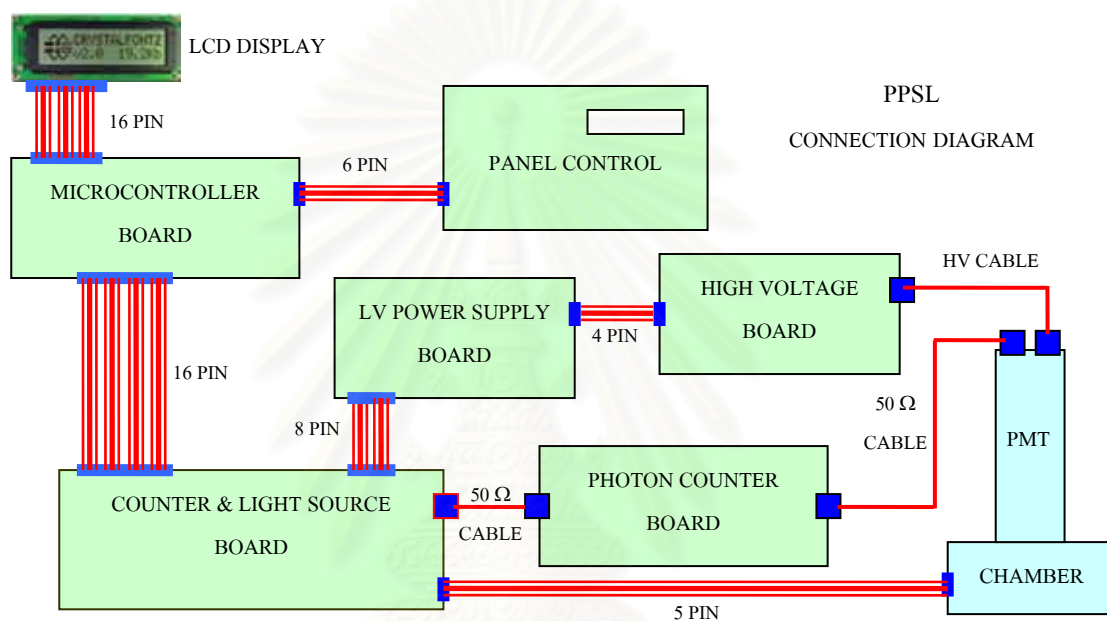
รูปที่ 3.12 โฟลว์ชาร์ตของโปรแกรมประมวลผล



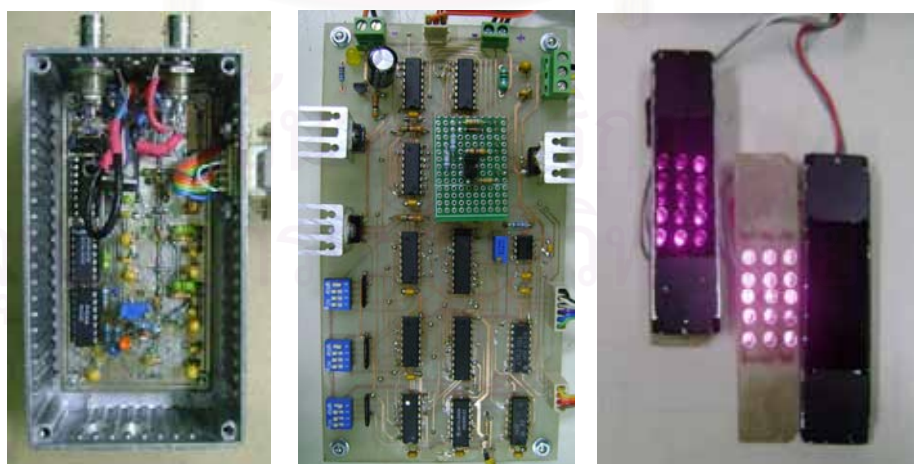
สแกนหลักนับ 6 หลัก เพื่อส่งไปแสดงผล เมื่อสิ้นสุดเวลานับระบบจะนำข้อมูลนับไปเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงในการคัดเลือกและแสดงข้อความดังรายละเอียดในโพลีชาร์ตในรูปที่ 3.12

### 3.5 การติดตั้งอุปกรณ์และประกอบระบบ

หลังขั้นตอนการออกแบบและสร้างแผ่นพิมพ์วงจรและทดสอบการทำงานสมบูรณ์แล้วได้นำมาประกอบเป็นระบบ PPSL แผนภาพการเชื่อมโยงสายสัญญาณของแผ่นวงจรในรูปที่ 3.14 ระบบย่อยแต่ละส่วนแสดงในรูปที่ 3.15 และภาพระบบตรวจสอบเครื่องเทศผ่านการฉายรังสีที่พัฒนาขึ้นแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.14 แผนภาพการเชื่อมโยงสายสัญญาณของแผ่นวงจร



ก. ระบบวัดโฟตอน ข. แผ่นวงจรนับพัลส์ ค. ต้นกำเนิดแสงอินฟราเรด

รูปที่ 3.15 การประกอบแผ่นวงจรของระบบย่อย



รูปที่ 3.16 ภาพระบบตรวจสอบเครื่องเทศผ่านการฉายรังสีที่พัฒนาขึ้น

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### การดำเนินงานและผลการวิจัย

#### 4.1 การดำเนินงานวิจัย

ได้ทดลองศึกษากระบวนการกระตุ้นเครื่องเทศผ่านการฉายรังสีให้เกิดแสงเรืองด้วยแหล่งกำเนิดแสงชนิดไดโอดอินฟราเรดและการจัด Geometry ที่เหมาะสม พร้อมทั้งออกแบบและสร้างระบบวัดโฟตอนแสงเรืองให้มีความไวในการวัดสูง ตลอดจนออกแบบโปรแกรมควบคุมการวัดและแสดงผลเพื่อสร้างระบบตรวจสอบเครื่องเทศผ่านการฉายรังสีด้วยเทคนิคการกระตุ้นให้เกิดแสงเรืองด้วยแสงแบบพัลส์ การออกแบบและสร้างวงจรในส่วนต่างๆ ได้ทำการทดสอบสมรรถนะเพื่อสรุปผลการทำงานของวงจรต่างๆ และการทำงานของระบบ โดยรวมในขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

1. การทดสอบเพื่อหาข้อมูลเบื้องต้น
2. การทดสอบวงจรขยายสัญญาณพัลส์
3. การทดสอบวงจรดิสคริมีเนเตอร์
4. การทดสอบวงจรกำเนิดคาบเวลากระตุ้น
5. การทดสอบวงจรมับโฟตอน
6. การทดสอบการทำงานของระบบ
7. เปรียบเทียบผลการวัดตัวอย่างเครื่องเทศ

#### 4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ

##### 4.2.1 เครื่องมือสำหรับใช้ในการทดสอบ

1. เครื่องอ่านรูปสัญญาณ (Oscilloscope) Tektronix รุ่น 2465
2. เครื่องกำเนิดรูปสัญญาณ Hewlett Packard รุ่น 8111
3. เครื่องมัลติมิเตอร์ชนิดดิจิทัล Fluke รุ่น 73 iii
4. โครงบรรจุโมดูลวัดนิวเคลียร์มาตรฐาน NIM (NIM Module) Ortec รุ่น 4001A
5. โมดูลนับพัลส์ Ortec รุ่น 875
6. โมดูลนับพัลส์ Ortec รุ่น 775
7. โมดูลตั้งเวลา Ortec รุ่น 719
8. โมดูลแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง Ortec รุ่น 478
9. แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักย์ค่า  $\pm 12, +5$  โวลต์ กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์
10. แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักย์ค่าชนิดปรับค่าได้ ขนาด 0 ถึง +35 โวลต์ ขนาด 2.5 แอมแปร์



11. หัวต่อสัญญาณสามทางพร้อม Terminator ขนาด 50 โอห์ม
12. สารเรืองรังสีเหลว Beckman Instrument Inc.
13. ต้นกำเนิดรังสี Sr-90 ความแรงแรังสี 0.6  $\mu\text{Ci}$
14. เครื่องเทศผ่านการฉายรังสีที่ใช้เป็นมาตรฐาน

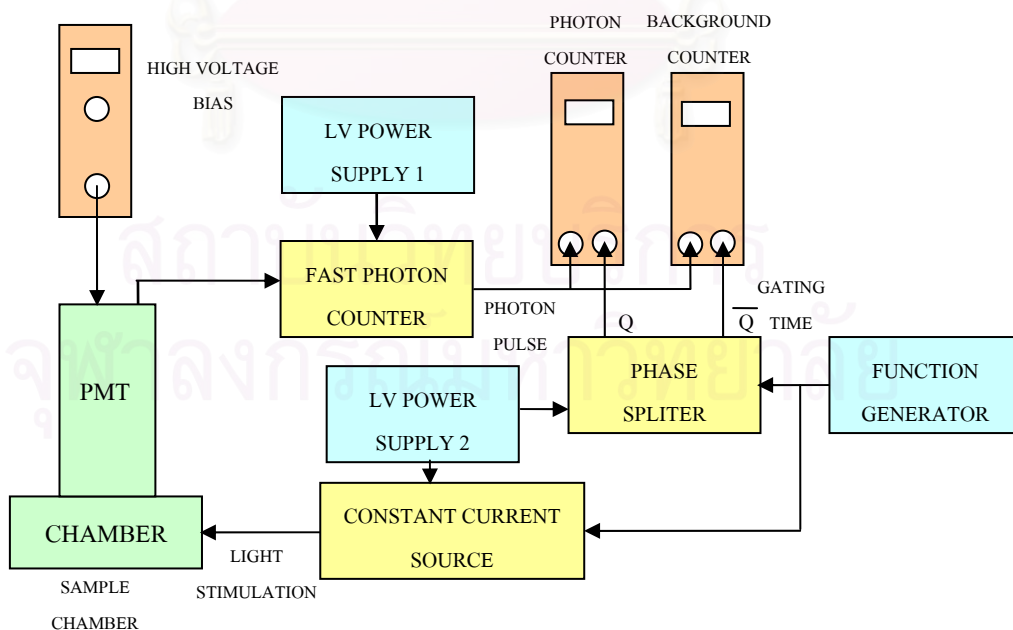
#### 4.2.2 วงจรและระบบที่พัฒนาขึ้น

1. ชุดอุปกรณ์วัดตัวอย่าง (Sample chamber)
2. วงจรขยายสัญญาณพัลส์ชนิดตอบสนองเวลาช่วงสั้น
3. วงจรดิสคริเมเนเตอร์ชนิดตอบสนองเวลาช่วงสั้น
4. วงจรกำเนิดคาบเวลากระตุ้น
5. วงจรนับพัลส์โฟตอน
6. วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์
7. ระบบตรวจสอบเครื่องเทศที่ผ่านการฉายรังสีที่พัฒนาขึ้น

#### 4.3 การทดสอบการทำงานของวงจร

การออกแบบและสร้างวงจรในส่วนต่างๆ ได้ทำการทดสอบสมรรถนะเพื่อสรุปผลการทำงานของวงจรต่างๆ และการทำงานของระบบโดยรวมในขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

##### 4.3.1 การทดสอบเพื่อหาข้อมูลเบื้องต้น

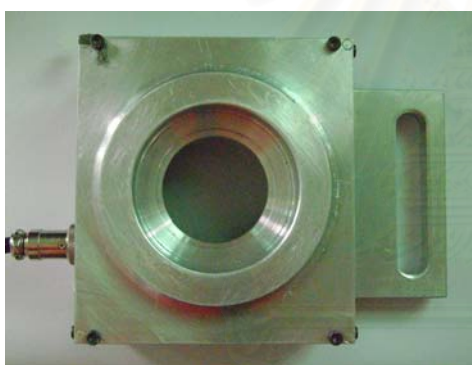


รูปที่ 4.1 แผนภาพการจัดอุปกรณ์เพื่อหาข้อมูลเบื้องต้น

### 4.3.1.3 วิธีการทดสอบ

จัดอุปกรณ์ทดสอบดังแผนภาพรูปที่ 4.1 เพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอของความเข้มแสงกระตุ้นครอบคลุมพื้นผิวตัวอย่างด้วยกล้องถ่ายภาพดิจิทัล (CCD) โดยเปิดช่องส่วนบนของห้องตัวอย่างออกและหยุดการทำงานของหลอดทวิคูณอิเล็กทรอนิกส์ ตั้งความถี่กระตุ้นต้นกำเนิดแสงที่ 30 kHz ทดสอบการกรองแสงกระตุ้นด้วยแผ่นกรองแสง RG-780 และทำการกรองแสงเรืองด้วยแผ่นกรองแสง BG-39 ได้ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.2 ก. ข. ค. และ ง. จากนั้นทดสอบปริมาณกระแสไฟฟ้าของต้นกำเนิดแสงกระตุ้นที่เหมาะสม โดยประกอบส่วนบนของห้องตัวอย่างและใส่เครื่องเทศผ่านการฉายรังสีที่ใช้เป็นมาตรฐาน ไบอัสหลอดทวิคูณอิเล็กทรอนิกส์ที่ 1000 และ 1100 V ตั้งความถี่กระตุ้นที่ 30 kHz แปรเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าให้วงจรต้นกำเนิดแสงและอ่านจำนวนนับโฟตอนแสงเรืองจากการกระตุ้นด้วยแสงอินฟราเรด ได้ผลทดสอบดังตารางที่ 4.1 และเส้นกราฟรูปที่ 4.3

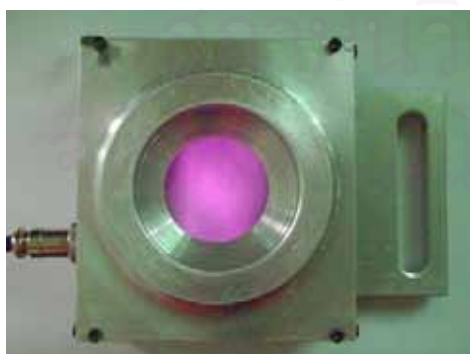
#### 4.3.1.1 ผลการทดสอบ



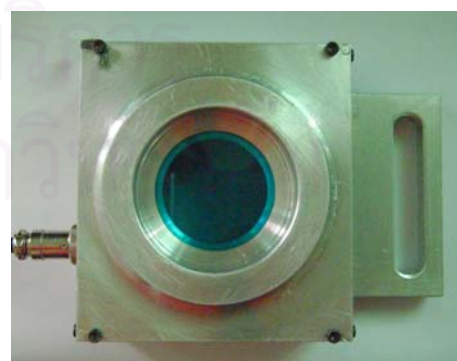
ก. ก่อนเปิดแสงกระตุ้น



ข. แสงกระตุ้นผ่านแผ่นกรองแสง



ค. หลังเปิดแสงกระตุ้น

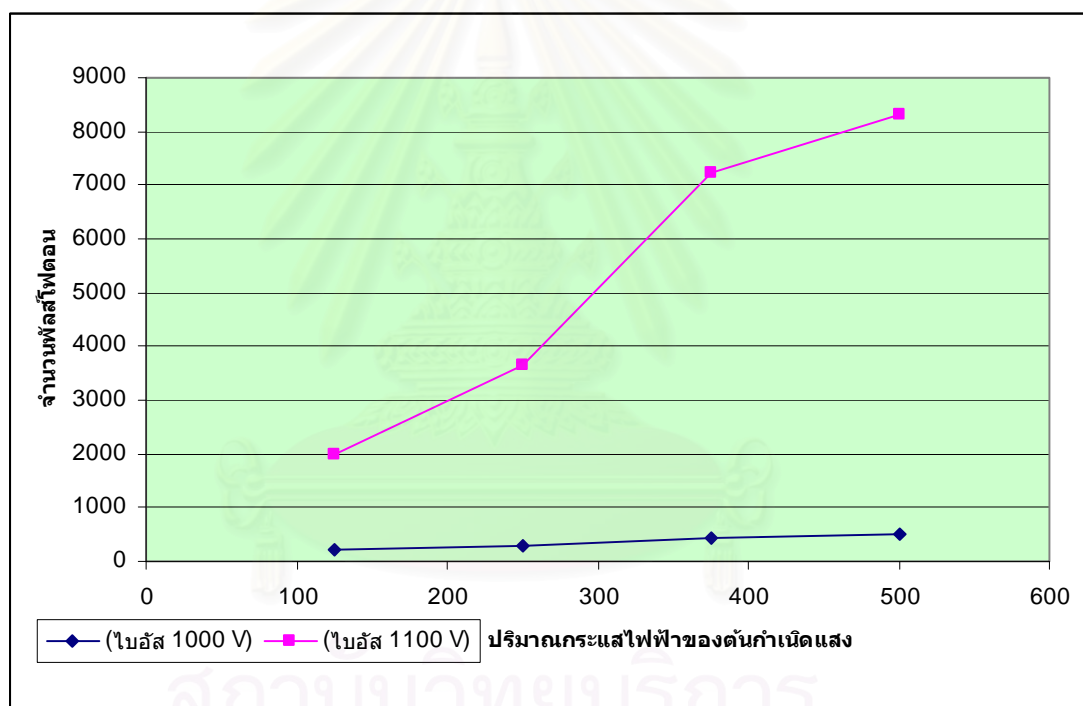


ง. หลังผ่านแผ่นกรองให้แสงเรืองผ่าน

รูปที่ 4.2 ความสม่ำเสมอของเข้มแสงกระตุ้นครอบคลุมพื้นผิวตัวอย่าง

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าของต้นกำเนิดแสงและจำนวนนับโฟตอน

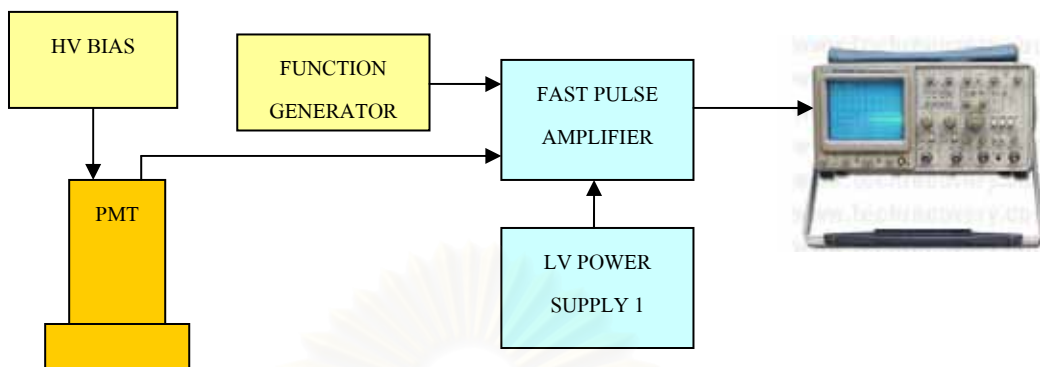
กระแสไฟฟ้า เฉลี่ยที่ไบอัส ไดโอดต่อชุด (mA)	จำนวนนับโฟตอน (cpm) (ไบอัส 1000 V)			จำนวนนับโฟตอน (cpm) (ไบอัส 1100 V)		
	สถานะของไดโอด		จำนวน ผลสุทธิ	สถานะของไดโอด		จำนวน ผลสุทธิ
	On	Off		On	Off	
125	995	772	233	14754	12770	1984
250	1894	1606	288	161208	157551	3657
375	1787	1370	417	124772	117553	7219
500	2142	1621	521	265082	256765	8317



รูปที่ 4.3 เส้นกราฟความสัมพันธ์ของปริมาณกระแสไฟฟ้าของต้นกำเนิดแสงกับจำนวนนับโฟตอน

ผลการทดลองเบื้องต้นพบว่าความเข้มแสงย่านอินฟราเรดที่ได้จากการจัดวางชุดไดโอด 2 ชุด ทำมุม  $45^\circ$  กระจายเต็มพื้นผิวตัวอย่างอย่างสม่ำเสมอ ดังในรูป 4.2.ข และหลังแสงผ่านแผ่นกรองเฉพาะความยาวคลื่น 870 nm จะไม่มีความเข้มแสงผ่านได้ดังในรูป 4.2.ข จากผลการทดสอบความสัมพันธ์ของปริมาณกระแสไฟฟ้าของต้นกำเนิดแสงกับจำนวนนับโฟตอนที่ไบอัสหลอดทวีคูณอิเล็กทรอนิกส์ที่ 1100 V จะเห็นว่าจำนวนนับโฟตอนทั้งคาบเวลากระตุ้นและหยุดกระตุ้นจะแปรเพิ่มตามปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นและผลนับสุทธิโฟตอนเพิ่มขึ้นด้วย

### 4.3.2 ทดสอบวงจรถายสัญญาณพัลส์ชนิดตอบสนองเวลาช่วงสั้น

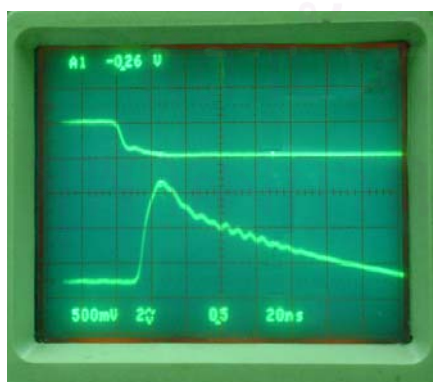


รูปที่ 4.4 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบวงจรถายสัญญาณพัลส์

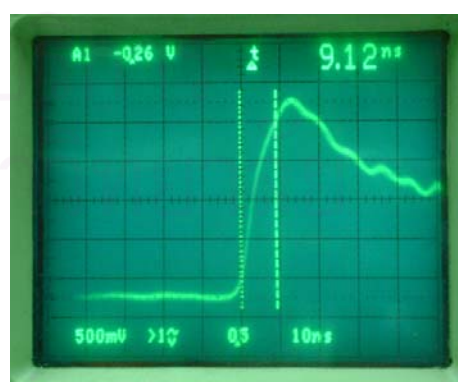
#### 4.3.2.1 วิธีการทดสอบ

จัดอุปกรณ์ทดสอบดังแผนภาพรูปที่ 4.4 เพื่อทดสอบลักษณะเฉพาะของวงจรถายสัญญาณพัลส์ชนิดตอบสนองเวลาช่วงสั้น ใน 2 กรณี ได้แก่ การทดสอบการตอบสนองการขยายสัญญาณด้วยเครื่องกำเนิดรูปสัญญาณ โดยแปรเปลี่ยนสัญญาณทางเข้า (Input signal) และอ่านรูปสัญญาณทางออก (Output signal) ได้ผลทดสอบรูปสัญญาณดังในรูปที่ 4.5 รวมทั้งความสัมพันธ์ของสัญญาณดังตารางที่ 4.2 พร้อมเส้นกราฟรูปที่ 4.6 จากนั้นทดสอบการตอบสนองสัญญาณในที่มีดหรือแบกกราวนด์จากหลอดทวิคูณแสงที่จ่ายไบอัส 1000 และ 1100 V อ่านขนาดและรูปสัญญาณทั้งทางด้านทางเข้า และ ด้านทางออก ได้ผลทดสอบดังในรูป 4.7

#### 4.3.2.2 ผลการทดสอบ



ก. เปรียบเทียบสัญญาณทางเข้าและออก

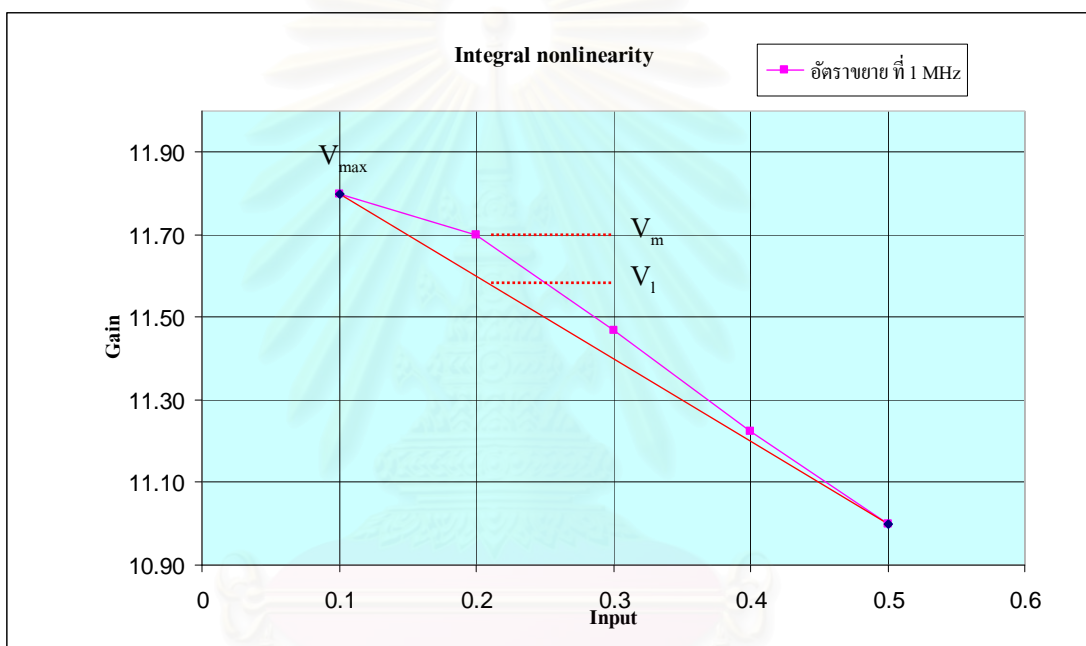


ข. รูปขยายสัญญาณทางออก

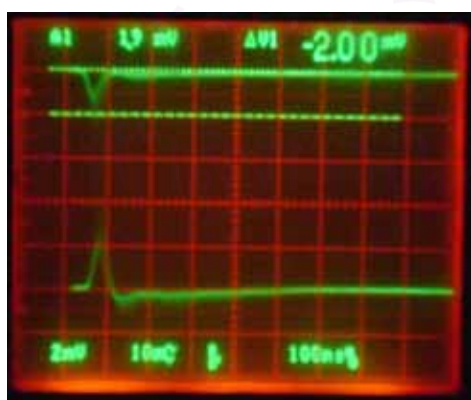
รูปที่ 4.5 รูปสัญญาณวงจรถายสัญญาณพัลส์ทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดรูปสัญญาณ

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณทางเข้าและออก

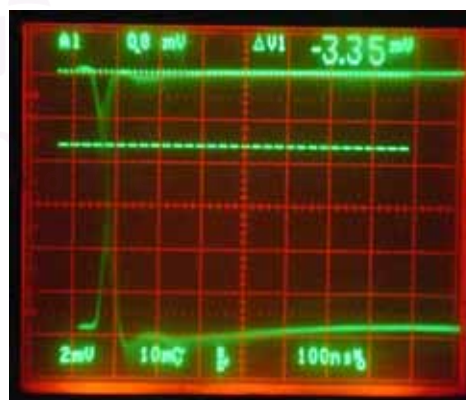
สัญญาณทางเข้า (V)	สัญญาณทางออก (V)	อัตราขยาย ที่ 1 MHz
0.1	1.18	11.80
0.2	2.34	11.70
0.3	3.44	11.47
0.4	4.49	11.23
0.5	5.5	11.00



รูปที่ 4.6 เส้นกราฟความเป็นไม่เชิงเส้นของอัตราขยาย



ก. ตั้งไบอัส 1000 V



ข. ตั้งไบอัส 1100 V

รูปที่ 4.7 ความสูงของพัลส์จากการไบอัสหลอดทวีคูณแสงต่างกัน

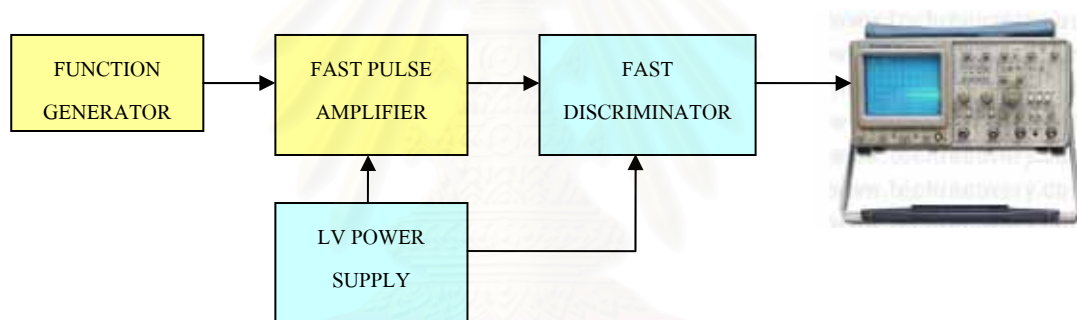


ผลการทดสอบวงจรมหาสัญญาณด้วยเครื่องกำเนิดรูปสัญญาณพบว่าวงจรมีอัตราขยาย 11 เท่า สามารถตอบสนองเวลาขาขึ้น 9 ns ที่ขนาดสัญญาณ 5.5 V หรือ 1.8 ns ที่ขนาดสัญญาณ 1 V มีเวลาสลายสัญญาณประมาณ 50 ns จากเส้นกราฟรูปที่ 4.6 สามารถประเมินความไม่เป็นเชิงเส้นของอัตราขยาย (Integral nonlinearity) ได้จาก<sup>[17]</sup>

$$\text{Integral nonlinearity} = \left[ \frac{V_m - V_l}{V_{\max}} \right] * 100 = \frac{11.7 - 11.6}{11.8} * 100 = 0.847\%$$

พบว่ามีความไม่เป็นเชิงเส้นของอัตราขยายน้อยกว่า 0.847 % และผลทดสอบสัญญาณแบกกราวด์จากหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์พบว่ารูปสัญญาณมีเวลาขาขึ้น 3.0 ns มีความกว้างพัลส์ 20 ns (FWHM) โดยมีขนาดสัญญาณพัลส์แบกกราวด์ที่ไบอัส 1000 และ 1100 V มีขนาด 0.02 และ 0.034 V ตามลำดับ

#### 4.3.3 วงจรดิสคริมิเนเตอร์ชนิดตอบสนองเวลาช่วงสั้น (Fast discriminator)

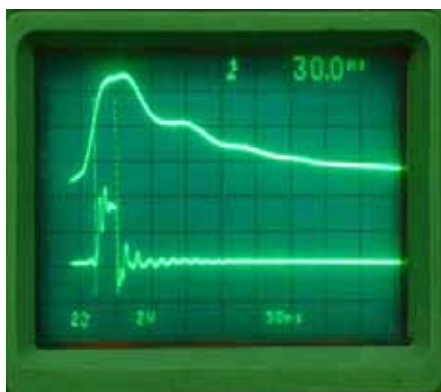


รูปที่ 4.8 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบวงจรมหาสัญญาณ

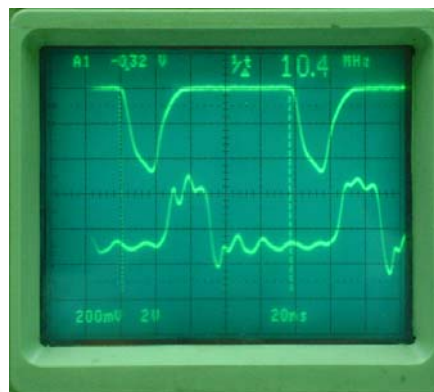
##### 4.3.3.1 วิธีการทดสอบ

จัดอุปกรณ์ทดสอบดังแผนภาพรูปที่ 4.8 พร้อมจัดกระบวนการแมตซิง (Matching) ในระบบส่งสัญญาณพัลส์ เพื่อทดสอบลักษณะเฉพาะของวงจรมหาสัญญาณชนิดตอบสนองเวลาช่วงสั้นที่พัฒนาขึ้น โดยตั้งระดับดิสคริมิเนเตอร์ที่ 0.5 V ป้อนสัญญาณพัลส์รูปเหลี่ยมที่มีขนาด 0.65 V ความกว้างพัลส์ 30 ns และความถี่ 1 MHz จากเครื่องกำเนิดรูปสัญญาณผ่านวงจรมหาสัญญาณพัลส์ (Fast pulse amplifier) วัดความต้องการกระแสไฟฟ้าของวงจรมหาสัญญาณด้วยมัลติมิเตอร์ชนิดดิจิทัลและอ่านรูปสัญญาณลอจิกทางออกได้ผลทดสอบรูปสัญญาณดังในรูปที่ 4.9.ก จากนั้นเพิ่มความถี่เป็น 10 MHz ได้ผลทดสอบรูปสัญญาณดังในรูปที่ 4.9.ข ขึ้นตอนสุดท้ายทดสอบการคัดเลือกสัญญาณโดยแปรเปลี่ยนขนาดสัญญาณพัลส์ทางเข้าและอ่านความสัมพันธ์ระหว่างขนาดสัญญาณพัลส์ทางออกกับระดับดิสคริมิเนเตอร์ที่จุด Half triggering ได้ผลทดสอบดังตารางที่ 4.3 พร้อมเส้นกราฟรูปที่ 4.11

## 4.3.3.2 ผลการทดสอบ

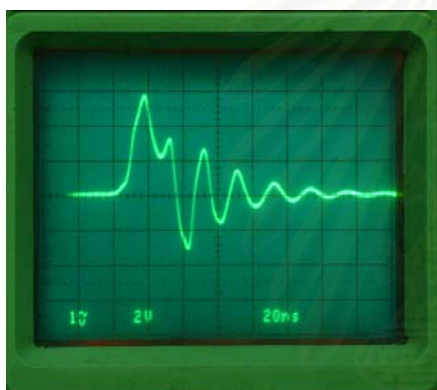


ก. เปรียบเทียบสัญญาณทางเข้าและออก

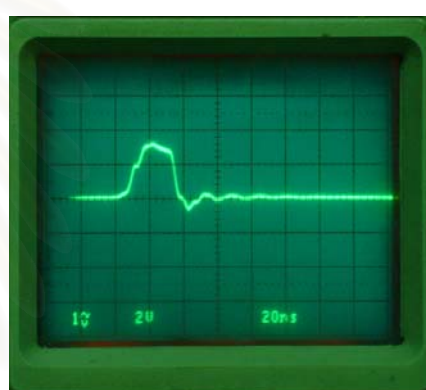


ข. สัญญาณทางออกที่ 10 MHz

รูปที่ 4.9 สัญญาณลอจิกจากวงจรดิจิตอล



ก. รูปสัญญาณที่ไม่ใส่เทอร์มินเตอร์



ข. รูปสัญญาณที่ใส่เทอร์มินเตอร์

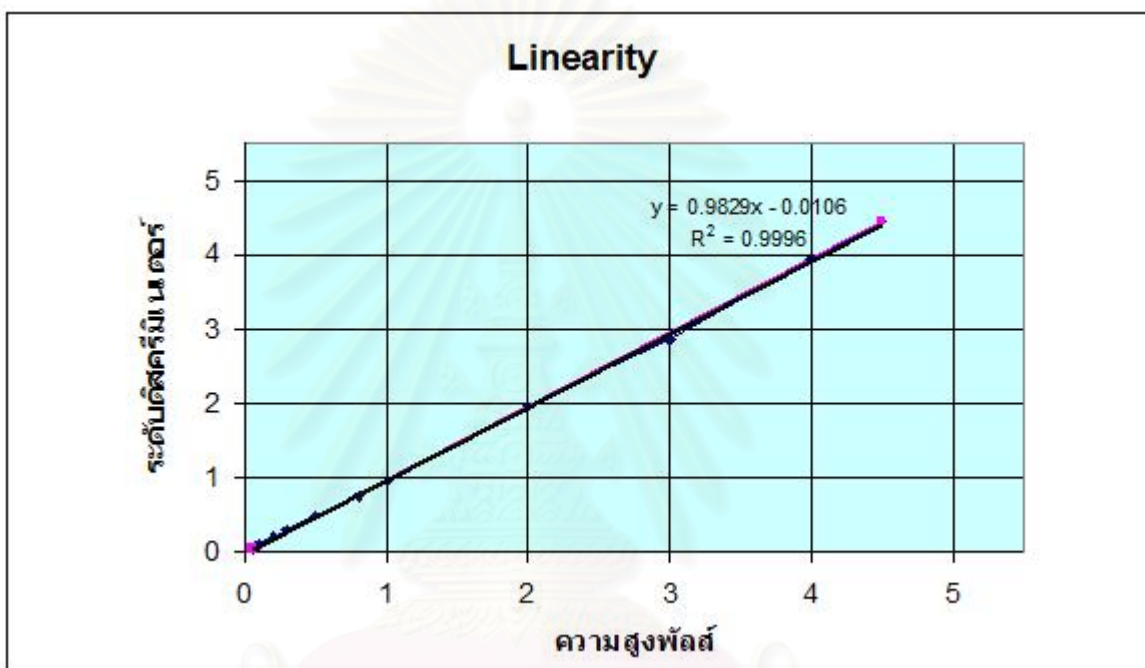
รูปที่ 4.10 สัญญาณลอจิกจากวงจรดิจิตอล

ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดสัญญาณพัลส์กับระดับดิจิตอล

ขนาดสัญญาณพัลส์	ระดับดิจิตอล
0.045	0.05
0.075	0.08
0.11	0.1
0.195	0.2
0.295	0.3
0.49	0.5
0.75	0.8
0.95	1

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดสัญญาณพัลส์กับระดับดิจิตอล

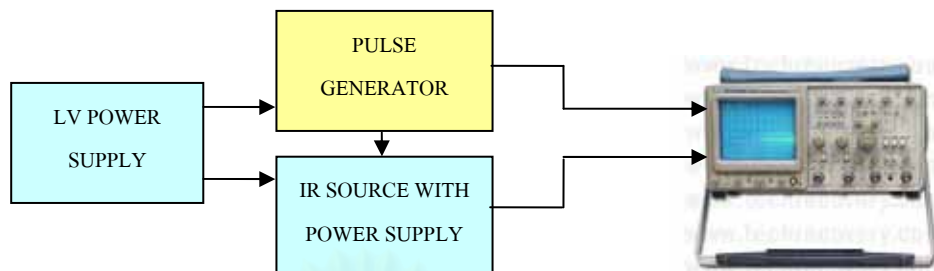
ขนาดสัญญาณพัลส์	ระดับดิจิตอล
1.96	2
2.85	3
3.95	4
4.45	4.5



รูปที่ 4.11 เส้นกราฟความเป็นเชิงเส้นของระดับดิจิตอล

ผลทดสอบการทำงานของวงจรดิจิตอลที่พัฒนาขึ้นพบว่าวงจรต้องการแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันค่า  $\pm 12$  V กระแสไฟฟ้า 250 mA และ 5 V กระแสไฟฟ้า 100 mA สามารถตอบสนองสัญญาณพัลส์ความถี่มากกว่า 10 MHz ที่มีเวลาขาขึ้นน้อยกว่า 3 ns มีความกว้างพัลส์ 20 ns (FWHM) โดยให้สัญญาณลอจิกทางออกที่มีความกว้างพัลส์ 30 ns คงที่ และสามารถคัดเลือกสัญญาณได้จาก 0-4.5 V โดยให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ระหว่างระดับดิจิตอลและขนาดสัญญาณพัลส์เป็น 0.9996 นอกจากนี้วงจรที่พัฒนาขึ้นยังสามารถสามารถขับวงจรที่มีอิมพีแดนซ์ทางเข้าต่ำถึง 50  $\Omega$  ได้โดยไม่กระทบรูปสัญญาณ อย่างไรก็ตามการจักระบบทดสอบต้องคำนึงถึงผลการรบกวนของสัญญาณสะท้อนเมื่อระบบไม่อยู่ในสถานะเมทซิงดังแสดงในรูปที่ 4.10.ก เปรียบเทียบกับสัญญาณลอจิกรูปที่ 4.10.ข ที่จักระบบให้อยู่ในสถานะเมทซิง และจะเห็นว่าเครื่องอ่านรูปสัญญาณชนิดอนาล็อกที่มีย่านตอบสนองความถี่กว้างยังมีความสำคัญมากในการอ่านรูปสัญญาณระดับนาโนวินาทีในงานวิจัยที่ต้องการรายละเอียดของสัญญาณสูง

#### 4.3.4 ทดสอบวงจรกำเนิดคาบเวลากระตุ้น

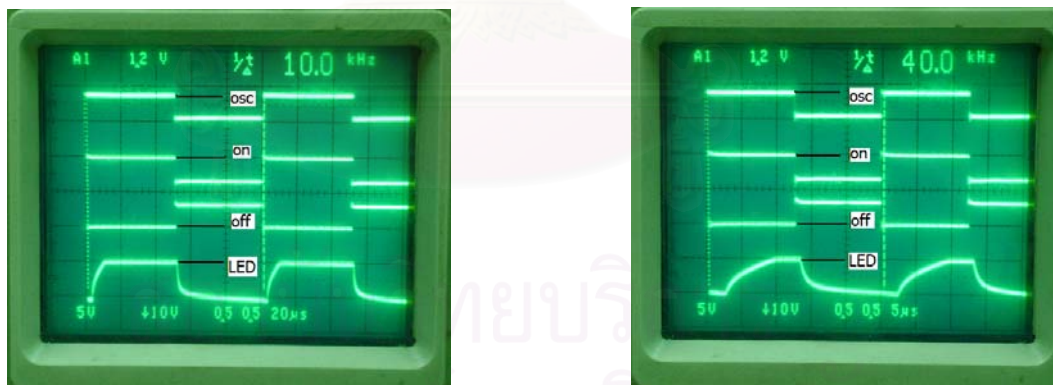


รูปที่ 4.12 แผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์ทดสอบวงจรกำเนิดคาบเวลากระตุ้น

##### 4.3.4.1 วิธีการทดสอบ

จัดอุปกรณ์ทดสอบดังแผนภาพรูปที่ 4.12 เพื่อทดสอบลักษณะเฉพาะของวงจรกำเนิดคาบเวลากระตุ้น โดยทดสอบความถูกต้องของคาบเวลาสัญญาณกระตุ้นซึ่งจะต้องนำไปควบคุมการทำงาน ใน 2 ส่วน ได้แก่ ต้นกำเนิดแสงและวงจรรับพัลส์โฟตอน ผลการอ่านรูปสัญญาณเปรียบเทียบเชิงคาบเวลาระหว่างจุดทดสอบ สัญญาณฐานความถี่ สัญญาณเปิดเกตนับพัลส์โฟตอน สัญญาณเปิดเกตนับแบกกราวด์ และสัญญาณสวิทช์ต้นกำเนิดแสง ดังแผนภาพเวลาในรูปที่ 4.13

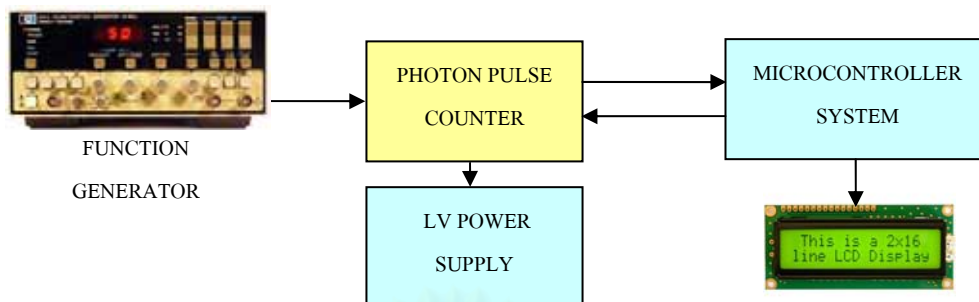
##### 4.3.4.2 ผลการทดสอบ



รูปที่ 4.13 แผนภาพเวลาของวงจรกำเนิดคาบเวลากระตุ้น

ผลการทดสอบการกำเนิดคาบเวลาของวงจรกำเนิดคาบเวลากระตุ้น ได้รูปสัญญาณเป็นไปตามการออกแบบและสามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้จาก 10-40 kHz ซึ่งเป็นการแปรเปลี่ยนคาบเวลาได้จาก 12.5-50  $\mu$ s

#### 4.3.5 ทดสอบวงจรนับพัลส์โฟตอนร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 4.14 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบวงจรนับพัลส์โฟตอน

##### 4.3.5.1 วิธีการทดสอบ

จัดอุปกรณ์ทดสอบวงจรดังแผนภาพในรูปที่ 4.14 เพื่อทดสอบการทำงานของวงจรนับพัลส์โฟตอน โดยทดสอบความคลาดเคลื่อนในการนับพัลส์และห้กลับแบกราวด์พร้อมอ่านผลการนับผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่ความถี่ 500 kcps เวลานั้น 1 min และ คาบเวลานับ 50, 16.67 และ 12.5  $\mu$ s ตามลำดับ ผลการทดสอบเป็นไปตามตารางที่ 4.4

##### 4.3.5.2 ผลการทดสอบ

ตารางที่ 4.4 ผลทดสอบความคลาดเคลื่อนในการลบแบกราวด์

ครั้งที่นับ	ค่าคาบเวลาในการกระตุ้น		
	50 $\mu$ s	16.67 $\mu$ s	12.5 $\mu$ s
1	102	-377	-47210
2	139	126	-17210
3	-108	340	-73609
4	<u>377</u>	2123	-17531
5	4	<u>-7260</u>	<u>-91338</u>
ความคลาดเคลื่อนมากที่สุด (%)	0.0754	1.452	18.26

ผลการทดสอบพบว่าวงจรนับห้กลับแบกราวด์ที่คาบเวลานับ 50, 16.67 และ 12.5  $\mu$ s มีความคลาดเคลื่อนมากที่สุด 0.0754, 1.452, 18.26 % ตามลำดับ

#### 4.4 การทดสอบการทำงานของระบบตรวจสอบเครื่องเทศผ่านการฉายรังสีที่พัฒนาขึ้น

ระบบตรวจสอบเครื่องเทศผ่านการฉายรังสีด้วยเทคนิคการกระตุ้นด้วยแสงอินฟราเรดแบบพัลส์ที่ประกอบสำเร็จ ได้นำมาทดสอบความเสถียรในแง่ความแม่นยำของการวัดของระบบและ



ทดสอบความสามารถในการคัดเลือกเครื่องเทศที่ผ่านการฉายรังสีที่เป็นมาตรฐานในการทดสอบเครื่องที่ผลิตจากต่างประเทศ

#### 4.4.1 ทดสอบความเสถียรของระบบ



ก. การกระตุ้นสารเรืองรังสีเหลวด้วย Sr-90



ข. ระบบตรวจสอบเครื่องเทศ

รูปที่ 4.15 สารเรืองรังสีเหลว และ ระบบตรวจสอบเครื่องเทศผ่านการฉายรังสีที่พัฒนาขึ้น

##### 4.4.1.1 วิธีการทดสอบ

จัดเตรียมอุปกรณ์และระบบตรวจสอบเครื่องเทศผ่านการฉายรังสีที่พัฒนาขึ้นดังในรูปที่ 4.15 ตัดการทำงานของแสงกระตุ้นเพื่อทดสอบความเสถียรเฉพาะส่วนระบบนับวัดโฟตอน โดยการนับวัดแบกกราวนด์และการนับวัดจำนวนโฟตอนแสงเรืองที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นสารเรืองรังสีเหลวด้วย Sr-90 ความแรงรังสี 0.6  $\mu\text{Ci}$  ด้วยการตั้งเวลานับวัด 10 วินาที และไบอัสหลอดทวีคูณแสงที่ 1100 V การทดสอบใช้เวลา 6 ชั่วโมง แต่ละชั่วโมงนับวัด 5 ครั้ง ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.5

##### 4.4.1.2 ผลการทดสอบ

ตารางที่ 4. 5 ผลทดสอบความเสถียรในการทำงานของระบบนับวัดโฟตอน

ชั่วโมงที่		ค่านับวัดแบกกราวนด์				ค่านับวัดการเรืองรังสี			
ครั้งที่		ช่วงเปิด	ช่วงปิด	ผลรวม	ผลต่าง	ช่วงเปิด	ช่วงปิด	ผลรวม	ผลต่าง
1	1	205	211	416	-6	4188	4069	8257	119
	2	201	214	415	-13	4103	4135	8238	-32
	3	206	235	441	-29	4005	3936	7941	69

ตารางที่ 4. 5 (ต่อ) ผลทดสอบความเสถียรในการทำงานของระบบนับวัดโฟตอน

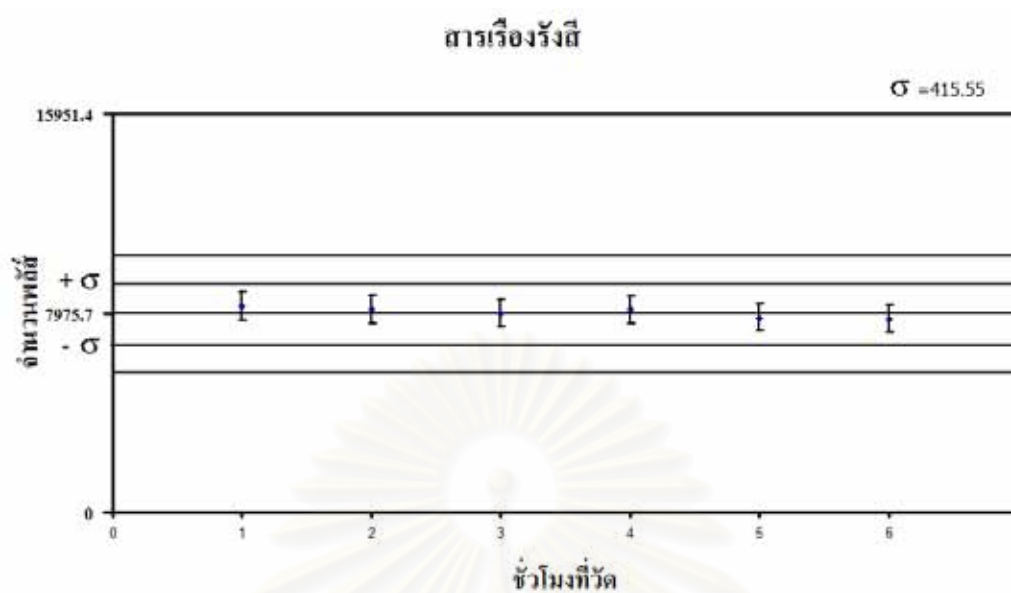
ชั่วโมงที่		ค่านับวัดแบกกราวนด์				ค่านับวัดการเรืองรังสี			
ครั้งที่		ช่วงเปิด	ช่วงปิด	ผลรวม	ผลต่าง	ช่วงเปิด	ช่วงปิด	ผลรวม	ผลต่าง
	3	206	235	441	-29	4005	3936	7941	69
	4	239	246	485	-7	4105	4173	8278	-68
	5	237	235	472	2	4096	4026	8122	70
เฉลี่ย		217.6	228.2	445.8	-10.6	4099.4	4067.8	8167.2	31.6
2	1	246	242	488	4	4121	4009	8130	112
	2	235	233	468	2	4148	4021	8169	127
	3	214	227	441	-13	4228	4060	8288	168
	4	260	217	477	43	3953	3992	7945	-39
	5	227	223	450	4	4104	4150	8254	-46
เฉลี่ย		236.4	228.4	464.8	8	4270.8	4046.4	8317.2	224.4
3	1	172	184	356	-12	4007	3959	7966	48
	2	169	205	374	-36	3992	4183	8175	-191
	3	201	168	369	33	4084	4099	8183	-15
	4	166	187	353	-21	3895	3947	7842	-52
	5	156	194	350	-38	3997	4041	8038	-44
เฉลี่ย		172.8	187.6	360.4	-14.8	3995	4045.8	8040.8	-50.8
4	1	220	225	445	-5	4062	4045	8107	17
	2	203	240	443	-37	3910	3868	7778	42
	3	227	211	438	16	3886	3982	7868	-96
	4	220	214	434	6	3860	3927	7787	-67
	5	247	203	450	44	3860	3927	7787	-67
เฉลี่ย		223.4	218.6	442	4.8	3915.6	3949.8	7865.4	-34.2
5	1	205	206	411	-1	3890	3892	7782	-2
	2	150	166	316	-16	3884	3923	7807	-39

ตารางที่ 4. 5 (ต่อ) ผลทดสอบความเสถียรในการทำงานของระบบนับวัดโฟตอน

ชั่วโมงที่		ค่านับวัดแบกกราวด์				ค่านับวัดการเรืองรังสี			
ครั้งที่		ช่วงเปิด	ช่วงปิด	ผลรวม	ผลต่าง	ช่วงเปิด	ช่วงปิด	ผลรวม	ผลต่าง
	3	206	203	409	3	3844	3927	7771	-83
	4	187	225	412	-38	3834	3954	7788	-120
	5	178	186	364	-8	4009	3952	7961	57
เฉลี่ย		185.2	197.2	382.4	-12	3892.2	3929.6	7821.8	-37.4
6	1	224	180	404	44	3845	3907	7752	-62
	2	199	220	419	-21	3973	3962	7935	11
	3	212	204	416	8	3796	4006	7802	-21
	4	190	166	356	24	4079	3887	7966	192
	5	229	218	447	11	3872	3881	7753	-9
เฉลี่ย		210.8	197.6	408.4	13.2	3713	3928.6	7641.6	-215.6



ก.กราฟทดสอบวัดแบกกราวด์



ข. กราฟทดสอบวัดโฟตอน

#### 4.16 กราฟทดสอบความเสถียรของระบบวัด

ผลการทดสอบความแน่นอนในการใช้งานต่อเนื่อง 6 ชั่วโมง พบว่าระบบนับมีความเสถียร โดยมีค่าเบี่ยงเบนในการนับแบกกราวด์น้อยกว่า  $\pm \sigma$

#### 4.4.2 ทดสอบการวัดเครื่องเทศผ่านการฉายรังสี

##### 4.4.2.1 วิธีการทดสอบ

จัดเตรียมเครื่องเทศผ่านการฉายรังสีที่ใช้เป็นมาตรฐานและระบบตรวจสอบเครื่องเทศผ่านการฉายรังสีที่พัฒนาขึ้น เพื่อทดสอบความสามารถในการคัดเลือกเครื่องเทศผ่านการฉายรังสีไปอัสหลอดทวิคูณแสงที่ 1100 V แปรเปลี่ยนคาบเวลากระตุ้นแสงและนับวัดโฟตอนแสงเรื่องใช้เวลาตรวจวัด 1 นาที ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.6

#### 4.4.2.2 ผลการทดสอบ

ตารางที่ 4.6 ผลการวัดโฟตอนเครื่องเทศผ่านและไม่ผ่านการฉายรังสี

ลำดับ ที่	ไม่ผ่านการฉายรังสี				ผ่านการฉายรังสี			
	กระตุ้น แสง	ไม่ กระตุ้น	ผลต่าง	ต่างจาก ค่าเฉลี่ย	กระตุ้น แสง	ไม่ กระตุ้น	ผลต่าง	ต่างจาก 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	

ผลทดสอบการกระตุ้นตัวอย่างเครื่องเทศในห้องวัดโฟตอนแสงเรือง ทำการวัดโฟตอนแสงเรืองเครื่องเทศผ่านการฉายรังสีที่ใช้เป็นมาตรฐานเปรียบเทียบกับเครื่องเทศที่ไม่ผ่านการฉายรังสี โดยเฉลี่ยผิวหน้าและวัดซ้ำ 5 ครั้ง จะเห็นว่าผลต่างค่านับโฟตอนแสงเรืองจากเครื่องเทศไม่ผ่านการฉายรังสีเฉลี่ยเท่ากับ 290 cpm ไม่แปรปรวนมาก ส่วนค่านับนับโฟตอนแสงเรืองจากเครื่องเทศที่ผ่านการฉายรังสีนั้นผลต่างค่านับโฟตอนครั้งแรกจะสูง ครั้งถัดมาจะลดลงแต่เมื่อเฉลี่ยค่านับจะได้ 2933 cpm ซึ่งจำนวนนับโฟตอนเครื่องเทศผ่านและไม่ผ่านการฉายรังสียังคงแตกต่างกันประมาณ 2600 cpm แสดงว่าระบบมีความไวเพียงพอต่อการแจกแจงผลด้วยค่านับโฟตอน

#### 4.5 เปรียบเทียบผลการวัดตัวอย่างเครื่องเทศ

##### 4.5.1 วิธีการทดสอบ

นำเครื่องเทศที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตอาหาร 5 ชนิด ได้แก่ ผงพริกไทย ผงพริกปาปริก้า ผงลูกผักชี ผงพริกหอม ผงกระหรี่ ไปผ่านการฉายรังสีแกมมาที่ระดับปริมาณรังสีดูดกลืน 1, 3, 5, 7 และ 10 kGy จากนั้นนำมาตรวจวัดด้วยระบบตรวจสอบเครื่องเทศที่ผ่านการฉายรังสีที่พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบกับระบบตรวจสอบเครื่องเทศซึ่งใช้เทคนิคเดียวกันที่ผลิตจากต่างประเทศ ด้วยจำนวนนับโฟตอนเรืองแสงเพื่อประเมินความไวของระบบในการวัดเครื่องเทศชนิดต่างๆ ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4. 7 และเส้นกราฟรูปที่ 4.17



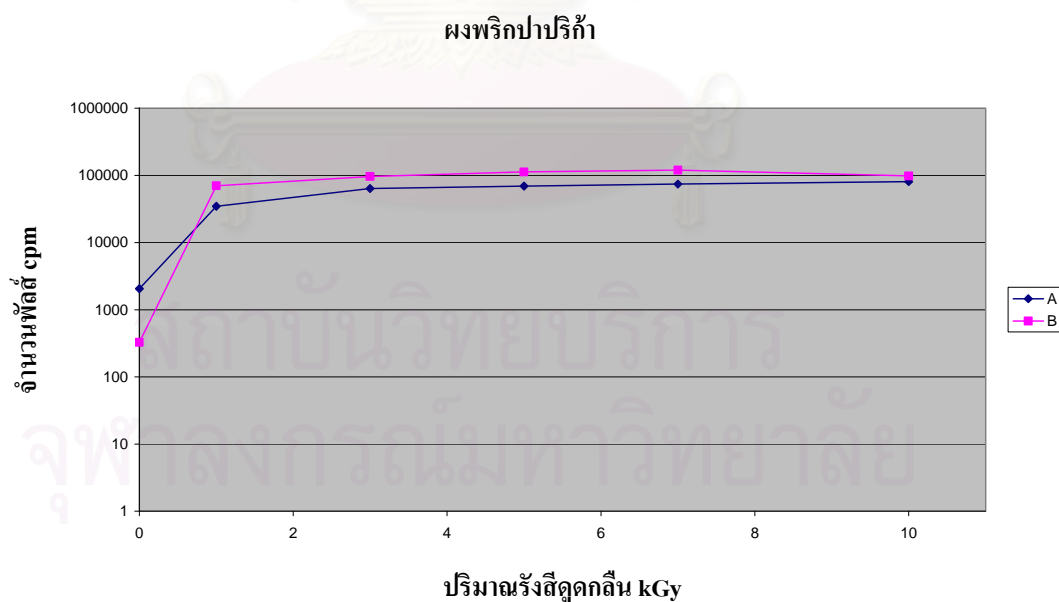
#### 4.5.2 ผลการทดสอบ

ตารางที่ 4.7 ผลเปรียบเทียบการตรวจสอบเครื่องเทศที่ผ่านการฉายรังสี

เครื่องเทศ	ผงพริกปาปริก้า		ผงพริกไทย		ผงพริกหอม		ผงกระหรี่		ผงลูกผักชี	
	A cpm	B cpm	A cpm	B cpm	A cpm	B cpm	A cpm	B cpm	A cpm	B cpm
control	2049	328	2372	295	935	695	286920	897003	1318	407
1.0	34734	70150	3797	1043	469424	1979111	1048324	3734241	2430	7914
3.0	63828	96499	3707	1904	795010	2462170	1054371	3215955	2958	27608
5.0	69343	112575	4500	1383	478799	2579416	748503	7732644	5513	7200
7.0	74137	119470	5466	1988	1030210	2230956	654087	3745977	7059	19348
10	80829	97986	4557	9973	1122321	2418574	702091	357977	9702	28452

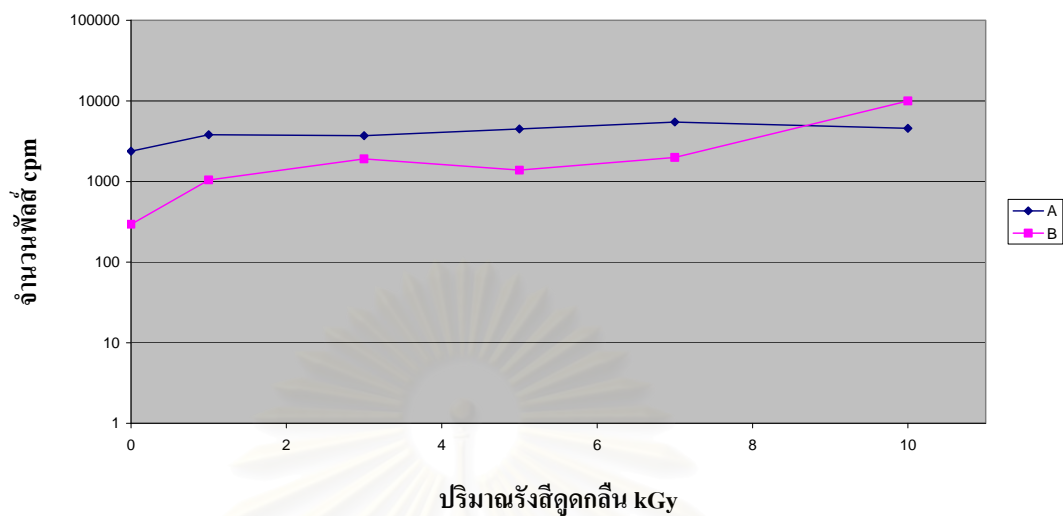
A = จำนวนโฟตอนแสงเรืองระบบตรวจสอบเครื่องเทศที่พัฒนาขึ้น

B = จำนวนโฟตอนแสงเรืองระบบตรวจสอบเครื่องเทศที่ผลิตจากต่างประเทศ



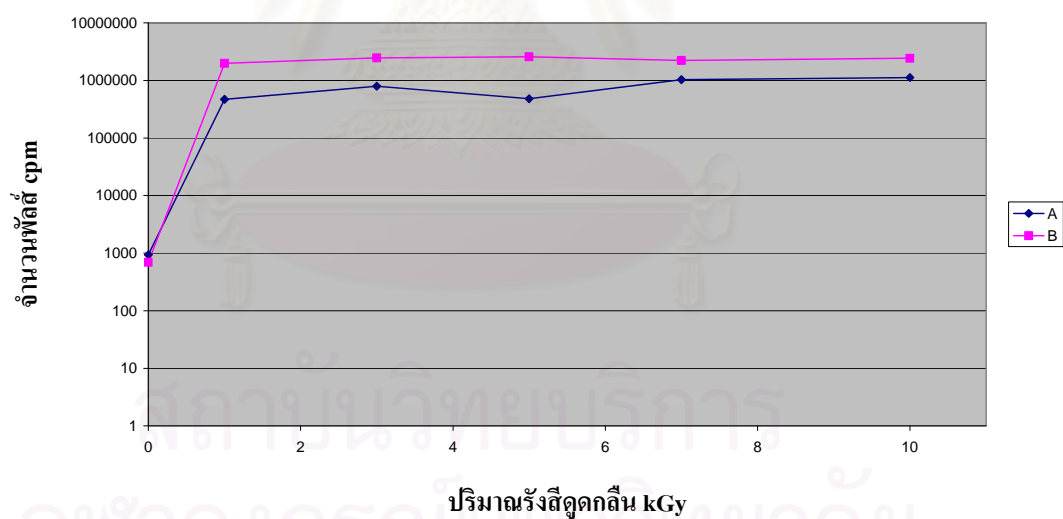
ก. เส้นกราฟผลการวัดเปรียบเทียบของผงพริกปาปริก้า

### ผงพริกไทย

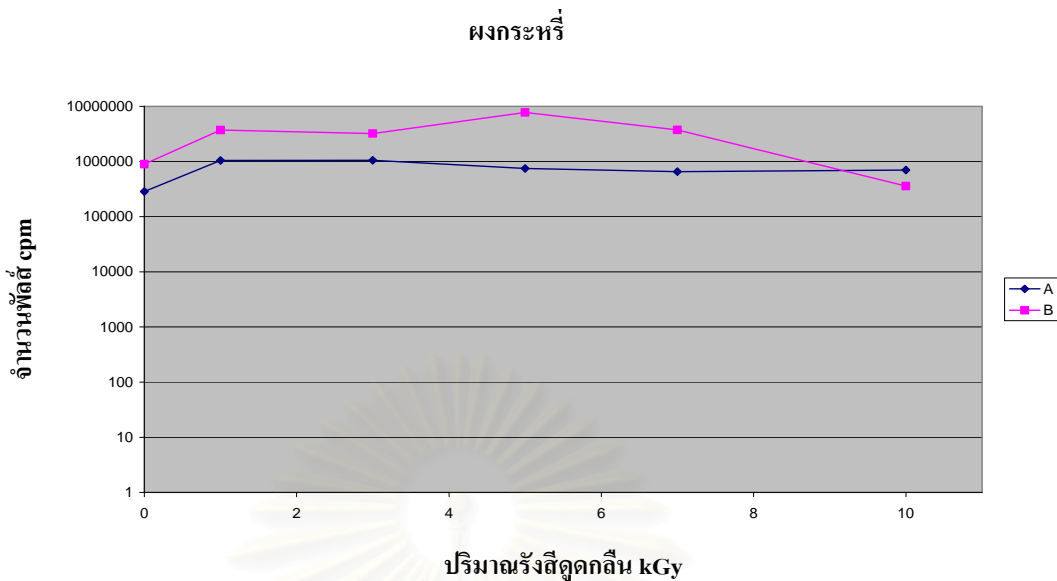


ข. เส้นกราฟผลการวัดเปรียบเทียบของผงพริกไทย

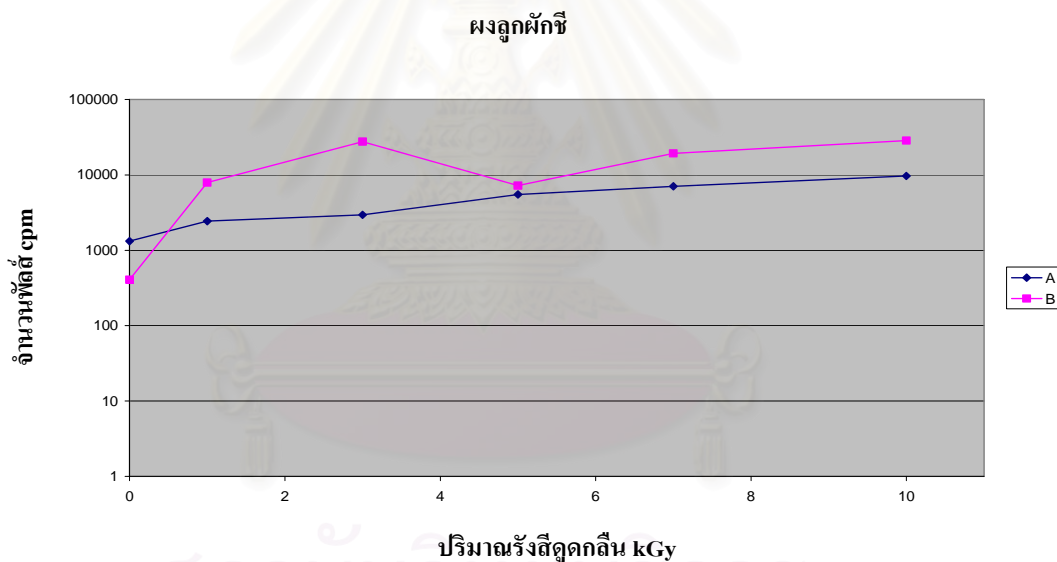
### ผงพริกหอม



ค. เส้นกราฟผลการวัดเปรียบเทียบของผงพริกหอม



ง. เส้นกราฟผลการวัดเปรียบเทียบของผงกระหรี



จ. เส้นกราฟผลการวัดเปรียบเทียบของผงกระหรี

รูปที่ 4.17 กราฟผลทดสอบการนับโพตอนเปรียบเทียบระหว่างระบบตรวจสอบเครื่องเทศที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องที่ผลิตจากต่างประเทศ

ผลทดสอบเครื่องเทศผ่านการฉายรังสี ด้วยระบบตรวจสอบเครื่องเทศที่พัฒนาขึ้นพบว่าระบบในการคัดเลือกใช้เวลาในการคัดเลือก 60 วินาที พบว่าระบบสามารถตรวจคัดเลือกเครื่องเทศผ่านการฉายรังสี 5 ชนิดที่ปริมาณรังสี 1, 3, 5, 7, และ 10 kGy ได้ผลสอดคล้องกับตรวจคัดเลือกด้วยระบบตรวจสอบอ้างอิงสมรรถนะสูงที่ผลิตจากต่างประเทศ อย่างมีนัยสำคัญ แต่ความไวในการในการแยกค่านับโพตอนสุทธิยังต่ำกว่าเครื่องที่ใช้อ้างอิงเปรียบเทียบ ยกเว้นผงพริกไท

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากผลการพัฒนาระบบตรวจสอบเครื่องเทศผ่านการฉายรังสี ด้วยเทคนิคการกระตุ้นให้เกิดแสงเรืองด้วยแสงแบบพัลส์ โดยได้ทดลองศึกษาความไวในการตรวจวัดและทดลองหาผลตอบสนองการกระตุ้นให้เกิดแสงเรืองด้วยแหล่งกำเนิดแสงชนิดไดโอดอินฟราเรด และเลือกอุปกรณ์ที่เหมาะสม พร้อมทั้งออกแบบและสร้างระบบวัดโฟตอนแสงเรืองให้มีความไวในการวัดสูง ตลอดจนพัฒนาโปรแกรมควบคุมการวัดและแสดงผลเพื่อเปรียบเทียบผลการตรวจวัดกับเครื่องมือที่ใช้กรรมวิธีวัดเดียวกันที่มีสมรรถนะสูงจากต่างประเทศ สามารถสรุปผลและข้อเสนอแนะได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ผลการศึกษาต้นกำเนิดแสงกระตุ้นไดโอดเปล่งแสงอินฟราเรดความยาวคลื่น 840 ถึง 900 nm จากลักษณะเฉพาะทางเทคนิคในด้านกำลังส่องสว่าง ขนาดซึ่งจะเกี่ยวข้องกับ geometry ของห้องวัดตัวอย่างและราคา พบว่าไดโอดอินฟราเรด เบอร์ TSFF5210 ความยาวคลื่น 870 nm มีความเหมาะสมที่นำมาจัดชุดต้นกำเนิดแสงกระตุ้นให้ได้กำลังส่องสว่างสูงสุด  $100 \text{ mW/cm}^2$

5.1.2 ผลการพัฒนาพบว่าชิพขยายสัญญาณไมโครเวฟ MAS-0986 สามารถประยุกต์ใช้ในวงจรขยายสัญญาณพัลส์ชนิดไวต่อการตอบสนองเวลาช่วงสั้นระดับนาโนวินาทีได้ดี มีความสะดวกในการออกแบบและสร้างวงจร ในการใช้ชิพ 3 แสดงขยายต่อเนื่องได้อัตราขยาย 11.22 เท่า มีความไม่เป็นเชิงเส้น (INL) = 0.847 % สามารถตอบสนองเวลาขาขึ้น 9 ns ที่ขนาดสัญญาณ 5.5 V หรือ 1.8 ns ที่ขนาดสัญญาณ 1V มีเวลาสลายสัญญาณประมาณ 50 ns

5.1.3 ผลทดสอบการทำงานของวงจรมินิโมเนเตอร์ที่พัฒนาขึ้นพบว่าวงจรสามารถตอบสนองสัญญาณพัลส์ความถี่มากกว่า 10 MHz ที่มีเวลาขาขึ้นน้อยกว่า 3 ns มีความกว้างพัลส์ 20 ns (FWHM) โดยให้สัญญาณลอจิกทางออกที่มีความกว้างพัลส์ 30 ns คงที่ และสามารถคัดเลือกสัญญาณได้จาก 0-4.5 V โดยให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ระหว่างระดับดิสคริมีเนเตอร์และขนาดสัญญาณพัลส์เป็น 0.9996 นอกจากนี้วงจรยังสามารถขับโหลดที่มีอิมพีแดนซ์ทางเข้าต่ำถึง  $50 \Omega$  ได้โดยไม่กระทบรูปสัญญาณ

5.1.4 ระบบตรวจสอบเครื่องเทศผ่านการฉายรังสี ด้วยเทคนิคการกระตุ้นให้เกิดแสงเรืองด้วยแสงแบบพัลส์ที่ประกอบสมบูรณ์ เมื่อจ่ายไบอัสทวิคูณแสงที่แรงดันไฟฟ้า 1100 V คัดเลือกขนาดสัญญาณพัลส์ด้วยดิสคริมีเนเตอร์ระดับ 50 mV พบว่าค่านับพัลส์จากผลของแบกกราวด์ในควมมืดต่ำกว่า 350 cps และสามารถรองรับอัตรานับพัลส์จากโฟตอนแสงเรืองได้มากกว่า 100 kcps

5.1.5 ผลเปรียบเทียบความไวในการคัดเลือกเครื่องเทศผ่านการฉายรังสีชนิดเดียวกัน ด้วยระบบตรวจสอบที่พัฒนาขึ้นกับระบบตรวจสอบสมรรถนะสูงที่ผลิตจากต่างประเทศ พบว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นมีความไวในการวัดโพตอนแสงเรืองมากกว่า แต่ผลการคัดเลือกเครื่องเทศ 5 ชนิด ได้แก่ ผงพริกไทย ผงพริกปาปริก้า ผงกระหรี่ ผงลูกผักชีและผงพริกหอม ที่ผ่านการฉายรังสีที่ 1, 3, 5, 7 และ 10 kGy ให้ผลตรวจสอบเป็นไปในทางเดียวกัน ยกเว้นผงพริกไทยที่เครื่องจากต่างประเทศ ให้ผล Negative

5.1.6 ผลทดสอบสมรรถนะทางเทคนิคของระบบตรวจสอบเครื่องเทศผ่านการฉายรังสี ที่พัฒนาขึ้นสรุปได้ดังนี้

ระบบการตรวจสอบ	การกระตุ้นแบบพัลส์
ระบบอ่านค่านับโพตอน	แบบหักลบแบกกราวนด์สลับการนับ
ระบบควบคุมการทำงาน	ไมโครคอนโทรลเลอร์
ระบบแสดงผล	LCD ขนาด 16x2 Characters
ต้นกำเนิดแสง	ไดโอดอินฟราเรดความยาวคลื่น 870 nm
อุปกรณ์วัดแสงเรือง	หลอดทวิคูณแสง XP2206
คาบเวลากระตุ้นและนับโพตอน	ปรับค่าได้ระหว่าง 25-100 $\mu$ s
แรงดันไบอัสหลอดทวิคูณแสง	ปรับค่าได้ระหว่าง 0-1500 V
การตั้งค่านับพัลส์เริ่มต้น	ปรับเปลี่ยนได้ระหว่าง 000-999
จำนวนหลักนับสูงสุด	BCD 6 หลัก
เวลาที่ใช้ในการคัดเลือก	1 นาที
ความสามารถในการคัดเลือก	เครื่องเทศผ่านการฉายรังสี ที่ปริมาณรังสีต่ำ
ระบบไฟฟ้าที่ใช้	220 VAC, 50 Hz, 20 VA

## 5.2 วิจารณ์ผลการวิจัย

5.2.1 แสงเรืองจากเครื่องเทศผ่านการฉายรังสี เกิดจากสารอนินทรีย์ที่ถูกกระตุ้นด้วยแสง การนับโพตอนแสงเรืองที่มีเวลาสลายความเข้มแสงสั้นและเวลาขาขึ้นสัญญาณสั้นมาก จะต้องเลือกใช้หลอดทวิคูณแสงที่ไวต่อการตอบสนองแสง (Fast PMT) และวงจรต้องตอบสนองเวลาช่วงสั้น (Fast response) ดังนั้นไอซีวงจรขยายต้องตอบสนองความถี่ย่านกว้างมาก วงจรเปรียบเทียบระดับแรงดันไฟฟ้าต้องเป็นชนิด Fast voltage comparator เกตลอจิกที่ใช้จะเป็นกลุ่ม Fast TTL และ วงจรบัฟเฟอร์เป็นชนิด High speed buffer

5.2.2 เนื่องจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ต้องทำงานในการตอบสนองสัญญาณระดับนาโนวินาที ดังนั้นการออกแบบแผ่นพิมพ์ลายวงจร การวางอุปกรณ์ การเชื่อมโยงสัญญาณ การสะท้อนสัญญาณจะมีผลต่อการรบกวนเกิดการ ทำงานผิดพลาด โดยเฉพาะการออกแบบแผ่นพิมพ์ลายวงจร



จะต้องระมัดระวังเรื่องการวางคาปาซิเตอร์กรองการกระเพื่อมแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายขณะวงจร สวิตซ์ตัวตอบสนองเวลาช่วงสั้น การวางระบบกราวด์ระหว่างสัญญาณอนาล็อกและดิจิตอลและในการจัดระบบวัดสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์ที่มีความเวลานั้น การส่งสัญญาณพัลส์ต้องคำนึงถึงการ ขจัดสัญญาณสะท้อนด้วยกระบวนการแมทซิงในระบบส่งสัญญาณพัลส์เสมอ

5.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบและสร้าง (Hardware) ส่วนใหญ่หาซื้อได้ในประเทศ ส่วนที่ต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศ ได้แก่ หลอดทวิคูณแสง แผ่นกรองแสง ไดโอดอินฟราเรด และ ชิพขยายสัญญาณไมโครเวฟ ในขณะที่โปรแกรมสั่งงาน (Software) สามารถพัฒนาได้ในระดับ ห้องปฏิบัติการ

5.3.4 จากผลเปรียบเทียบความไวในการคัดเลือกเครื่องเทศผ่านการฉายรังสีชนิดเดียวกัน ด้วยเครื่องที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องที่ผลิตจากต่างประเทศและพบว่าเครื่องที่พัฒนาขึ้นมีความไวในการ วัดโฟตอนแสงเรืองน้อยกว่า เกิดจากความไวของ PMT และการใช้กำลังส่องสว่างของชุดไดโอด IR ซึ่งสามารถปรับเพิ่มได้

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ควรมีการศึกษาด้านกำเนิดแสงกระตุ้นที่ผลิตขึ้นใหม่ในย่านความถี่อื่นที่เหมาะสมกับการเกิดแสงเรืองของผลึกสารประกอบในอาหารหรือเครื่องเทศอื่นๆ

5.3.2 ความไวของระบบวัดแสงเรืองขึ้นกับสมรรถนะของหลอดทวิคูณแสง ดังนั้นจึงน่าจะมีการศึกษาทดลองใช้หลอดทวิคูณแสงที่มีความไวสูง เพื่อความแม่นยำในการคัดเลือกเครื่องเทศ ผ่านการฉายรังสีของระบบ

5.3.3 จากสมรรถนะของ MAS-0986 สามารถสร้างวงจรให้สามารถตอบสนองเวลาขาขึ้น ได้ไวกว่า 0.5 ns แต่ต้องเปลี่ยนอุปกรณ์วัดโฟตอนแสงจากหลอดทวิคูณแสงชนิดหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ไปเป็นหลอดไมโครแชนแนลเพลต (MCP)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- [1] The Codex Alimentarius Commission. General CODEX methods for the detection of irradiation foods CODEX STAN 231-2001. Rev.1. FAO/WFO Food Standards Programme. Rome, Italy : 2003.
- [2] วรากรณ์ สุดใจ. การประยุกต์ใช้เทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ในการตรวจพิสูจน์เครื่องเทศที่ผ่านการฉายรังสี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [3] Mag. Heinz Anderle. Detection of food irradiation with luminescence methods, Current status and future trends, Volume 3. Proceedings of Euro Food Chem VIII, Poster Presentations, Institute of Analytical Chemistry, University of Vienna, 1997.
- [4] J.D. Salinger, M.L. Heimer, J. Sobodowski, Design and implementation of a luminometer : Control hardware and software, IEEE Engineering in Medicine & Biology Society 11TH Annual International Conference, 1989.
- [5] Heimer, M.L. Gutman, A. Del Boca, A. Using a photomultiplier tube to measure weak bioluminescence , Southeastcon '91., IEEE Proceedings ,1991.
- [6] สาธารณสุข, กระทรวง. ประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 297) เรื่อง อาหารฉายรังสี, 2549.
- [7] อรรถพร ภัทรสุมันต์. เอกสารประกอบการสอน วิชาความปลอดภัยทางรังสีและการกำบังรังสี รหัสวิชา 2111613. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [8] R. A. Molins, Food Irradiation: Principles and applications, New York: Wiley-Interscience, A John Wiley & Sons, 2001.
- [9] สุวิทย์ ปุณณชัยยะ ,นฤปวัจก์ เงินวิจิตร และ เดโซ ทองอร่าม. ถ่ายภาพรังสีด้วยเทคนิคคอมพิวเตอร์ดิโอกราฟี. วารสารศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 11(1): 38-49,
- [10] ศิริวรรณ บุรีคำ. การตรวจสอบความปลอดภัยของอาหารฉายรังสี, แหล่งที่มา: <http://clgc.rdi.ku.ac.th/article/tissue/radiation/foodsaf.html> [30 ต.ค. 2550]
- [11] Lars Bøtter-Jensen, Stephen W.S. McKeever, Ann G. Wintle, Optically Stimulated Luminescence Dosimetry, Amsterdam: Elsevier Science B.V., 2003.

- [12] Lars Bøtter-Jensen. Development of Optically Stimulated Luminescence Techniques using Natural Minerals and Ceramics, and their Application Retrospective Dosimetry, Roskilde: Information Service Department, Risø National Laboratory, 2000.
- [13] James S. Milnes, M. Page, M Ingle, J. Howorth, Photek . J.S. Lapington, Improved electronic readout system for an imaging photon detector, Centre for Space Physics, Boston University. Ref: NIM A vol 513 (2003) pp 163-166.
- [14] Photek Limited. , IPD Position sensing photomultipliers. Available from: <http://www.photek.com/datasheets/IPD%20system.pdf> [2008, May 1]
- [15] Electron Tube Division. Photomultiplier Tube Basics and Application, Edition 3a. Tokyo: Hamamatsu Photonics K.K., 2007.
- [16] Becker & Hickl, How (and why not) to amplify PMT signals, AMPPMT. DOC, Becker & Hickl GmbH., p. 1-7., 2004.
- [17] Nicholas Tsoulfanidis, Measurement and Detection of Radiation, Missouri: McGrag., 1983, p. 318-320.
- [18] British Standard. BS EN 13751. Foodstuffs - Detection of irradiated food using photostimulated luminescence, 2002.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก.1

**photomultiplier tubes**  
**product specification**

**XP2206****A tube for hot environment, 10-stage, 51mm (2") tube**

<b>Applications :</b>	For scintillation counting and industrial photometry in high temperature environment up to 130°C. (Unless otherwise stated, all characteristics are given at 20°C)		
<b>Description :</b>	Window :	Material :	borosilicate glass
		Photocathode :	high temperature bi-alkali
		Refr. index at 420 nm :	1.48
	Multiplier :	Structure :	linear focused
		Nb of stages :	10
	Mass :		110 g

**Photocathode characteristics**

Spectral range :			270-650	nm
	Maximum sensitivity at :		420	nm
Sensitivity ① :	Luminous :		typ.: 40	μA/lm
<input checked="" type="checkbox"/>	Blue :	min.: 5	typ.: 7	μA/lmF
	Blue at 130°C :		typ.: 5.5	μA/lmF
	Radiant, at 400 nm :		typ.: 50	mA/W

**Characteristics with voltage divider A**

Gain slope (vs supp. volt., log/log) :			7	
For an anode blue sensitivity of :			1.5	A/lmF
<input checked="" type="checkbox"/> Supply voltage :	max.: 1600		typ.: 1300	V
	min.: 1000			
Gain :			2.1x10 <sup>5</sup>	
<input checked="" type="checkbox"/> Anode dark current ② :	max.: 10		typ.: 1	nA
Anode dark current at 130°C :			typ.: 15	nA
Pulse height resolution <sup>137</sup> Cs ③ :			typ.: 8.5	%
Mean anode sensitivity deviation ④ :				
	long term (16 h) :		1	%
	after change of count rate :		1	%
	vs temperature between 0 and +40 °C at 420 nm :		-0.2	%/K
Gain halved for a magnetic field of :				
	perpendicular to axis "n" :		0.2	mT
	parallel to axis "n" :		0.1	mT

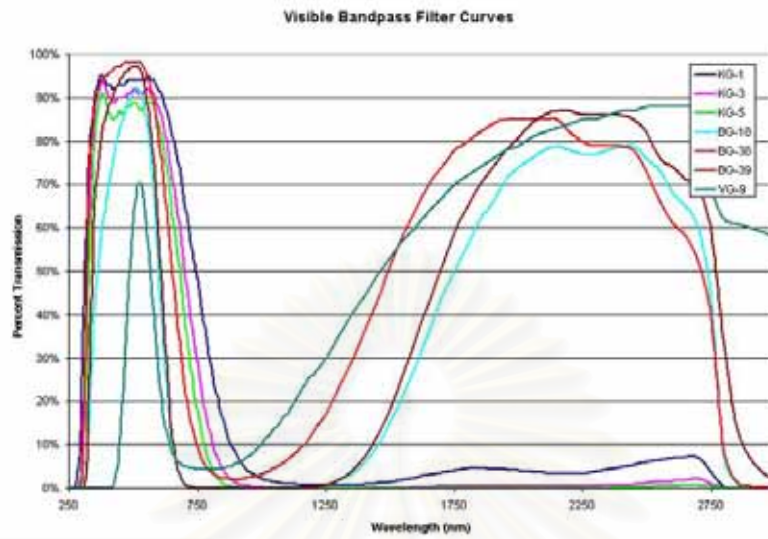
**Characteristics with voltage divider A ⑤ :**

For a supply voltage of :			1300	V
Gain :			2.1x10 <sup>5</sup>	
Linearity (2%) of anode current up to :			100	mA
Anode pulse ⑥ :				
	Rise time :		4	ns
	Duration at half height :		8	ns
	Transit Time :		36	ns
Capacitance	anode to all :		5	pF



ภาคผนวก ก.2

ข้อมูลแผ่นกรองแสง BG-39



Wavelength Range	VIS
Size	2" Sq.
Hoya or Schott	Schott
Glass Reference Number	BG-39
Color	Blue-Green
Thickness (mm)	3.00
CWL (nm)	507.00
FWHM (nm)	210.00
Density (g/cm <sup>3</sup> )	2.74
RoHS	Exempt

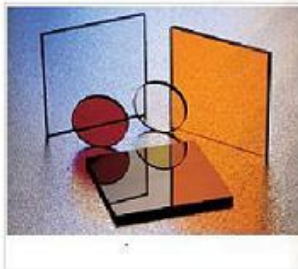
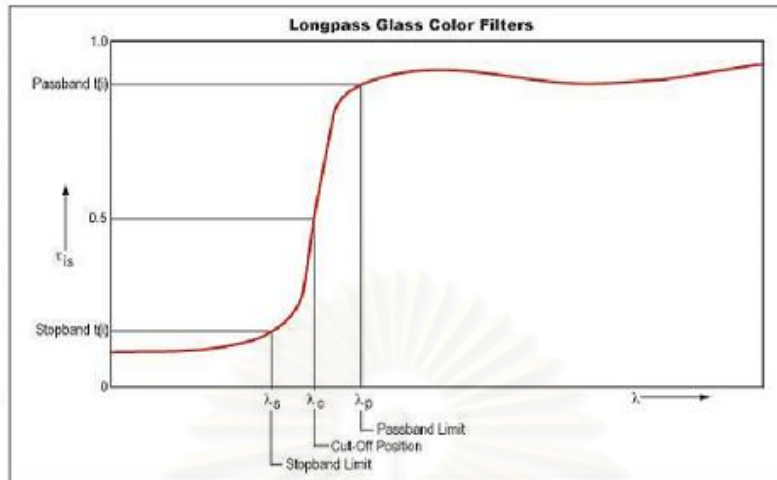


Dimensional Tolerances	Schott: ±0.015" (0.38mm) Hoya: +0/-0.25mm
Thickness Tolerances	Schott: nominal Hoya: ±0.2mm
Surface Quality	80-50
Properties applicable to these filters	
$\lambda_m$	Center wavelength: midpoint between $\lambda_1$ and $\lambda_2$ where $\lambda_1$ and $\lambda_2$ are the wavelengths at which the transmittance is half the maximum or $t_{max}/2$
FWHM	Full Width at Half Max: the distance between $\lambda_1$ and $\lambda_2$ (approx.)
$\rho$	Density
Tg	Transformation temperature

\*Intense UV radiation can cause a permanent reduction in the transmission of UG-1 and BG-12  
 \*\*\*BG-18 can also be used as a short pass filter with  $\lambda_c = 595\text{nm}$   
 \*\*\*BG-38 can also be used as a short pass filter with  $\lambda_c = 645\text{nm}$

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ข้อมูลแผ่นกรองแสง RG-780

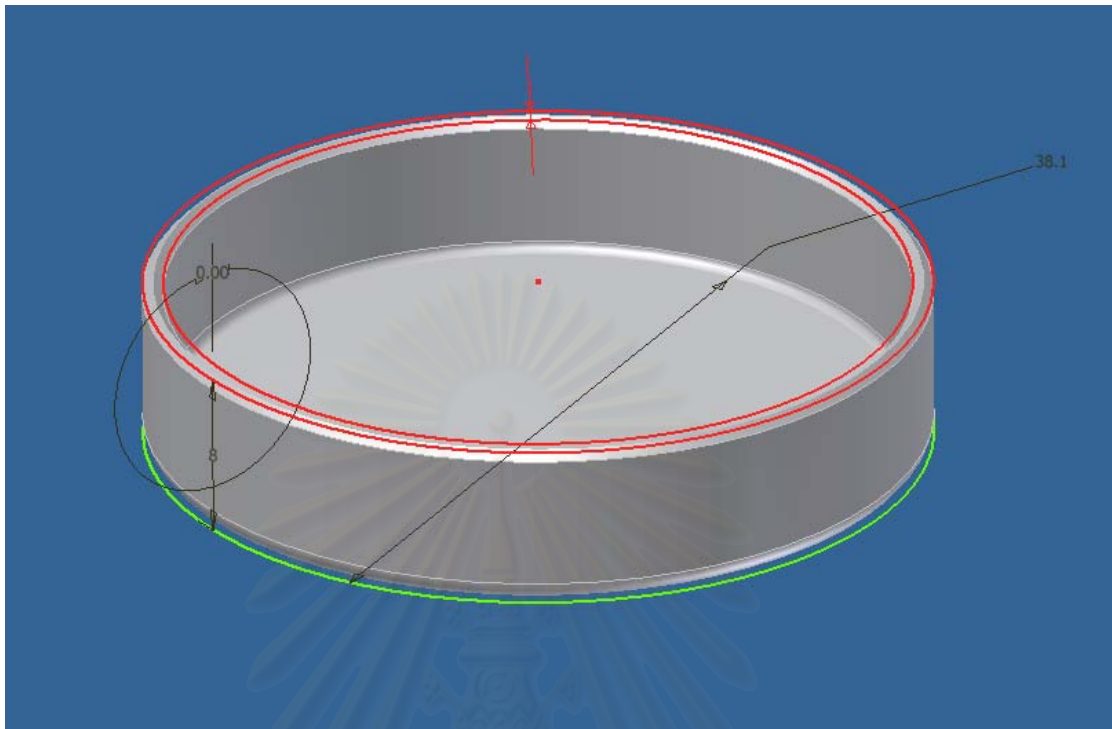


Size	2" x 2"
Wavelength Range	IR
Schott Filter No.	RG 780
Stopband Limit $\lambda_s$ (nm)	640.00
Cut-Off Position $\lambda_c$ (nm)	780±9
Passband Limit 1 $\lambda_{p1}$ (nm)	850.00
Passband Limit 2 $\lambda_{p2}$ (nm)	900.00
Density (g/cm <sup>3</sup> )	2.90
Transformation Temp. (°C)	571.00
Color	Black
RoHS	Exempt

Dimensional Tolerances	±0.015" (±0.38mm)
Material Thickness	3mm, 2.5mm for L 38
Surface Quality	80-50
$P_c$ Reflection Factor	$P_c = 0.92$ for all filters except RG665, RG695, RG715, RG780, RG830, RG850, RG1000 ( $P_c = 0.91$ )
Properties Applicable to these Filters are:	
$\lambda_s$	limit of stopband: specified at 0.001% internal transmittance
$\lambda_c$	cut-off position: specified at 50% internal transmittance
$\lambda_p$	limit of the passband
$T_p$	internal spectral transmittance at $\lambda_p$
$\rho$	density
$T_g$	transformation temperature

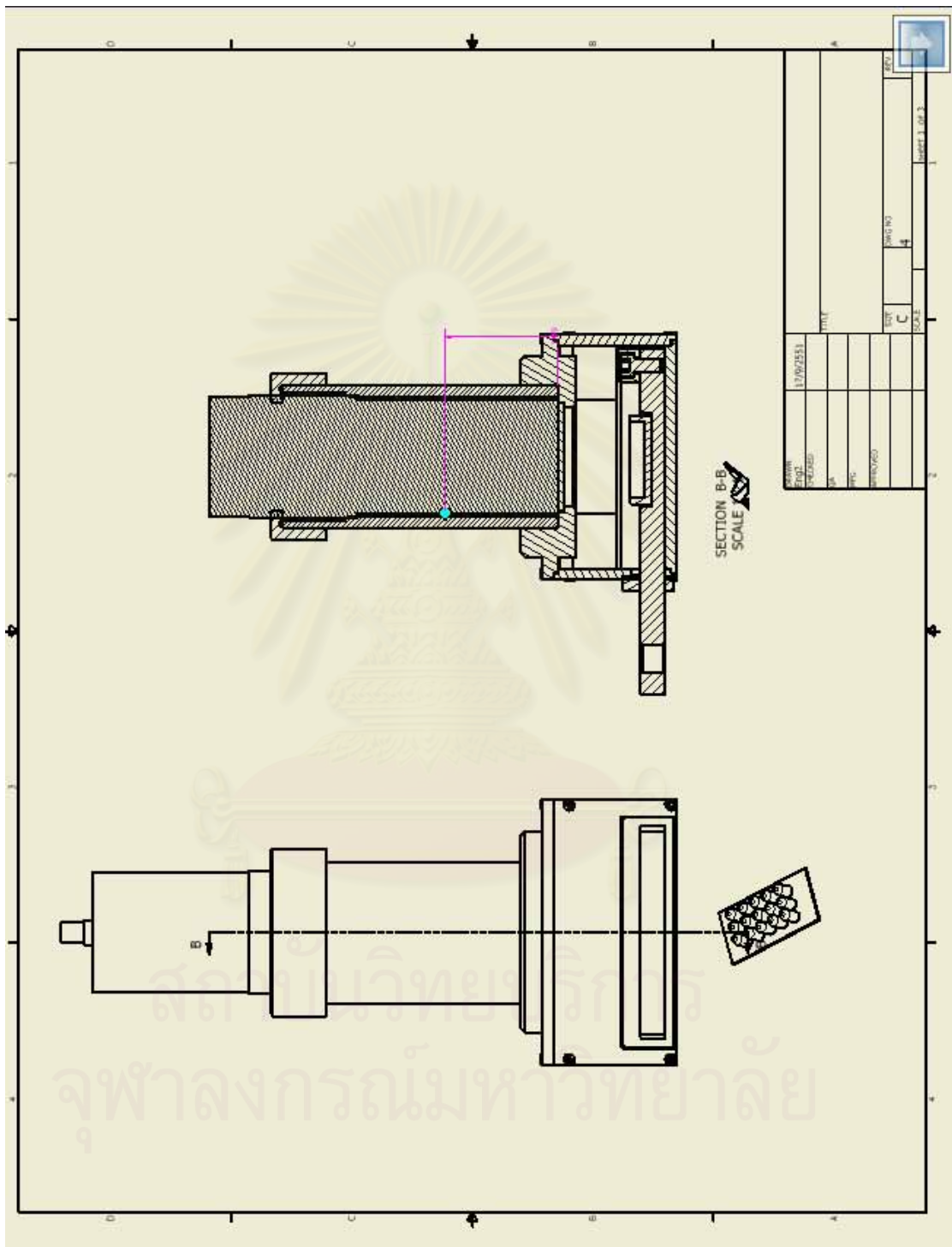
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

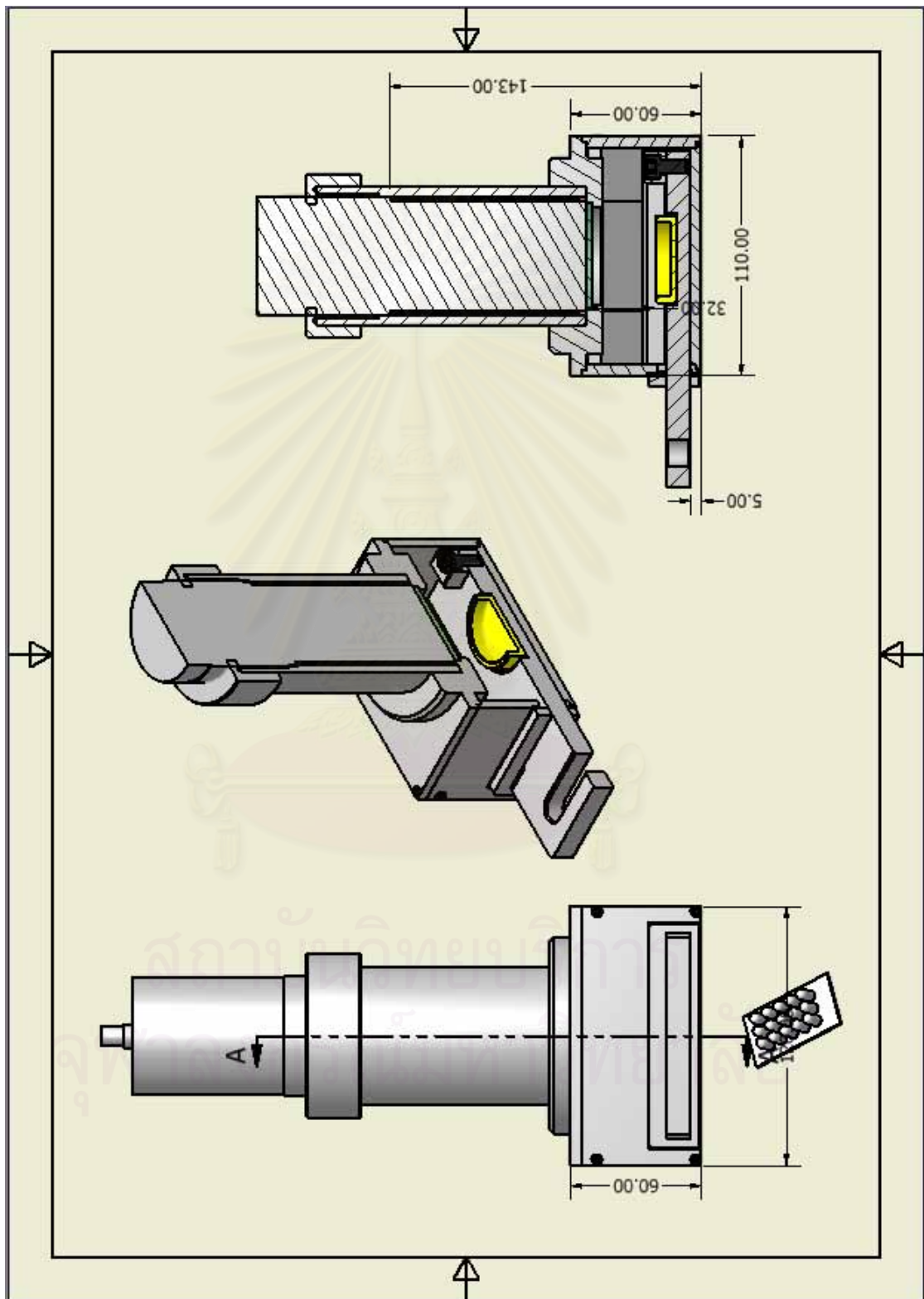
ภาพผนวก ก. 4



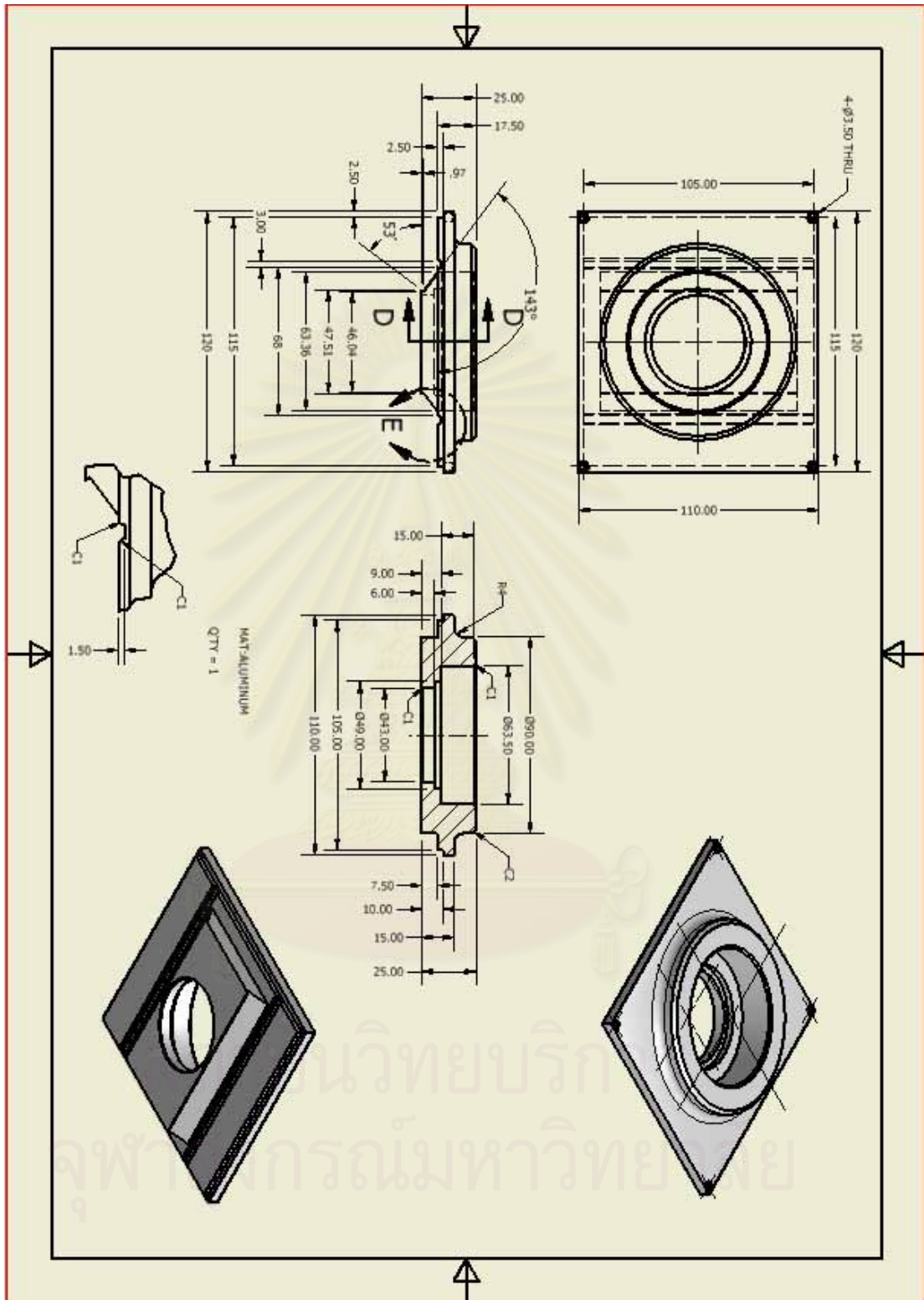
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข.  
ห้องกระตุ้นตัวอย่าง









## ภาคผนวก ก.1

**MSA-0986**

Cascadable Silicon Bipolar MMIC Amplifier

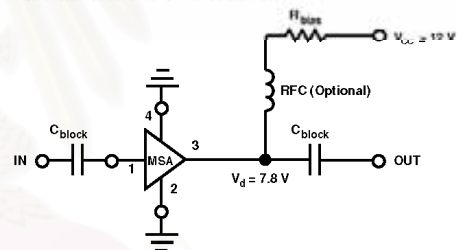
**Data Sheet****Description**

The MSA-0986 is a high performance silicon bipolar Monolithic Microwave Integrated Circuit (MMIC) housed in a low cost, surface mount plastic package. This MMIC is designed for very wide bandwidth industrial and commercial applications that require flat gain and low VSWR.

The MSA-series is fabricated using Avago's 10 GHz  $f_T$ , 25 GHz  $f_{MAX}$ , silicon bipolar MMIC process which uses nitride self-alignment, ion implantation, and gold metallization to achieve excellent performance, uniformity and reliability. The use of an external bias resistor for temperature and current stability also allows bias flexibility.

**Features**

- Broadband, Minimum Ripple Cascadable 50 $\Omega$  Gain Block
- $7.2 \pm 0.5$  dB Typical Gain Flatness from 0.1 to 3.0 GHz
- 3 dB Bandwidth: 0.1 to 5.5 GHz
- 10.5 dBm Typical  $P_{1dB}$  at 2.0 GHz
- Surface Mount Plastic Package
- Tape-and-Reel Packaging Option Available
- Lead-free Option Available

**86 Plastic Package****Typical Biasing Configuration**

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**MSA-0986 Absolute Maximum Ratings**

Parameter	Absolute Maximum <sup>(1)</sup>
Device Current	65 mA
Power Dissipation <sup>(2)(3)</sup>	500 mW
RF Input Power	+13 dBm
Junction Temperature	150°C
Storage Temperature	-65 to +150°C

Thermal Resistance<sup>(4)</sup>:  
 $\theta_{jc} = 140^\circ\text{C/W}$

**Notes:**

1. Permanent damage may occur if any of these limits are exceeded.
2.  $T_{\text{case}} = 25^\circ\text{C}$ .
3. Derate at 7.1 mW/°C for  $T_C > 80^\circ\text{C}$ .

**Electrical Specifications<sup>(1)</sup>,  $T_A = 25^\circ\text{C}$** 

Symbol	Parameters and Test Conditions: $I_d = 35\text{ mA}$ , $Z_0 = 50\ \Omega$	Units	Min.	Typ.	Max.
$G_P$	Power Gain ( $S_{21}^2$ ) $f = 2.0\text{ GHz}$	dB	6.0	7.2	
$AG_P$	Gain Flatness $f = 0.1\text{ to }3.0\text{ GHz}$	dB		+0.5	
$f_{3\text{ dB}}$	3 dB Bandwidth <sup>(2)</sup>	GHz		5.5	
VSWR	Input VSWR $f = 1.0\text{ to }3.0\text{ GHz}$			1.6:1	
	Output VSWR $f = 1.0\text{ to }3.0\text{ GHz}$			1.8:1	
NF	50 $\Omega$ Noise Figure $f = 2.0\text{ GHz}$	dB		6.2	
$P_{1\text{ dB}}$	Output Power at 1 dB Gain Compression $f = 2.0\text{ GHz}$	dBm		10.5	
$IP_3$	Third Order Intercept Point $f = 2.0\text{ GHz}$	dBm		29.0	
$t_D$	Group Delay $f = 2.0\text{ GHz}$	psec		95	
$V_d$	Device Voltage	V	6.2	7.8	9.4
dV/dT	Device Voltage Temperature Coefficient	mV/°C		-16.0	

**Notes:**

1. The recommended operating current range for this device is 25 to 45 mA. Typical performance as a function of current is on the following page.
2. Referenced from 0.1 GHz gain ( $G_P$ ).

**Ordering Information**

Part Numbers	No. of Devices	Comments
MSA-0986-BLK	100	Bulk
MSA-0986-BLKG	100	Bulk
MSA-0986-TR1	1000	7" Reel
MSA-0986-TR1G	1000	7" Reel
MSA-0986-TR2	4000	13" Reel
MSA-0986-TR2G	4000	13" Reel

Note: Order part number with a "G" suffix if lead-free option is desired.

บริษัท อีซีที จำกัด  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## Rail-to-Rail, Very Fast, 2.5 V to 5.5 V, Single-Supply TTL/CMOS Comparators

### ADCMP600/ADCMP601/ADCMP602

#### FEATURES

- Fully specified rail to rail at  $V_{CC} = 2.5\text{ V}$  to  $5.5\text{ V}$
- Input common-mode voltage from  $-0.2\text{ V}$  to  $V_{CC} + 0.2\text{ V}$
- Low glitch CMOS-/TTL-compatible output stage
- 3.5 ns propagation delay
- 10 mW at 3.3 V
- Shutdown pin
- Single-pin control for programmable hysteresis and latch
- Power supply rejection > 50 dB
- Improved replacement for MAX999
- $-40^{\circ}\text{C}$  to  $+125^{\circ}\text{C}$  operation

#### APPLICATIONS

- High speed instrumentation
- Clock and data signal restoration
- Logic level shifting or translation
- Pulse spectroscopy
- High speed line receivers
- Threshold detection
- Peak and zero-crossing detectors
- High speed trigger circuitry
- Pulse-width modulators
- Current/voltage-controlled oscillators
- Automatic test equipment (ATE)

#### GENERAL DESCRIPTION

The ADCMP600, ADCMP601, and ADCMP602 are very fast comparators fabricated on XFCB2, an Analog Devices, Inc. proprietary process. These comparators are exceptionally versatile and easy to use. Features include an input range from  $V_{EE} - 0.5\text{ V}$  to  $V_{CC} + 0.2\text{ V}$ , low noise, TTL-/CMOS-compatible output drivers, and latch inputs with adjustable hysteresis and/or shutdown inputs.

The device offers 5 ns propagation delay with 10 mV overdrive on 3 mA typical supply current.

A flexible power supply scheme allows the devices to operate with a single +2.5 V positive supply and a  $-0.5\text{ V}$  to +2.8 V input signal range up to a +5.5 V positive supply with a  $-0.5\text{ V}$  to +5.8 V input signal range. Split input/output supplies with no sequencing restrictions on the ADCMP602 support a wide

#### FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

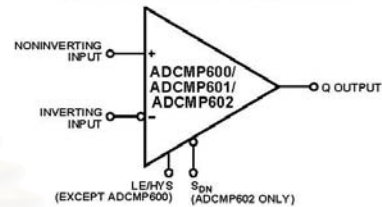


Figure 1.

input signal range while still allowing independent output swing control and power savings.

The TTL-/CMOS-compatible output stage is designed to drive up to 5 pF with full timing specs and to degrade in a graceful and linear fashion as additional capacitance is added. The comparator input stage offers robust protection against large input overdrive, and the outputs do not phase reverse when the valid input signal range is exceeded. Latch and programmable hysteresis features are also provided with a unique single-pin control option.

The ADCMP600 is available in 5-lead SC70 and SOT-23 packages, the ADCMP601 is available in a 6-lead SC70 package, and the ADCMP602 is available in an 8-lead MSOP package.

Rev. 0  
Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.  
Tel: 781.329.4700 [www.analog.com](http://www.analog.com)  
Fax: 781.461.3113 ©2006 Analog Devices, Inc. All rights reserved.



## ADCMP600/ADCMP601/ADCMP602

## SPECIFICATIONS

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS

$V_{OCT} = V_{OCC} = 2.5\text{ V}$ ,  $T_A = 25^\circ\text{C}$ , unless otherwise noted.

Table 1.

Parameter	Symbol	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
<b>DC INPUT CHARACTERISTICS</b>						
Voltage Range	$V_P, V_N$	$V_{CC} = 2.5\text{ V to } 5.5\text{ V}$	-0.5		$V_{CC} + 0.2$	V
Common-Mode Range		$V_{CC} = 2.5\text{ V to } 5.5\text{ V}$	-0.2		$V_{CC} + 0.2$	V
Differential Voltage		$V_{CC} = 2.5\text{ V to } 5.5\text{ V}$			$V_{CC} + 0.8$	V
Offset Voltage	$V_{OS}$		-5.0	$\pm 2$	+5.0	mV
Bias Current	$I_P, I_N$		-5.0	$\pm 2$	+5.0	$\mu\text{A}$
Offset Current			-2.0		+2.0	$\mu\text{A}$
Capacitance	$C_P, C_N$			1		pF
Resistance, Differential Mode		-0.1 V to $V_{CC}$	200	700		k $\Omega$
Resistance, Common Mode		-0.5 V to $V_{CC} + 0.5\text{ V}$	100	350		k $\Omega$
Active Gain	$A_V$			85		dB
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	$V_{CC} = 2.5\text{ V}, V_{CCO} = 2.5\text{ V},$ $V_{CM} = -0.2\text{ V to } +2.7\text{ V}$	50			dB
		$V_{CC} = 2.5\text{ V}, V_{CCO} = 5.5\text{ V}$	50			dB
Hysteresis (ADCMP600)				2		mV
Hysteresis (ADCMP601/ADCMP602)		$R_{HYS} = \infty$		0.1		mV
<b>LATCH ENABLE PIN CHARACTERISTICS</b> (ADCMP601/ADCMP602 Only)						
$V_{IH}$		Hysteresis is shut off	2.0		$V_{CC}$	V
$V_{IL}$		Latch mode guaranteed	-0.2	+0.4	+0.8	V
$I_{IH}$		$V_{IH} = V_{CC}$	-6		+6	$\mu\text{A}$
$I_{OL}$		$V_{IL} = 0.4\text{ V}$	-0.1		+0.1	mA
<b>HYSTERESIS MODE AND TIMING</b> (ADCMP601/ADCMP602 Only)						
Hysteresis Mode Bias Voltage		Current -1 $\mu\text{A}$	1.145	1.25	1.35	V
Resistor Value		Hysteresis = 120 mV	65	80	120	k $\Omega$
Hysteresis Current		Hysteresis = 120 mV	-18	-12	-7	$\mu\text{A}$
Latch Setup Time	$t_S$	$V_{OD} = 50\text{ mV}$		-2		ns
Latch Hold Time	$t_H$	$V_{OD} = 50\text{ mV}$		2.6		ns
Latch-to-Output Delay	$t_{LOH}, t_{LOL}$	$V_{OD} = 50\text{ mV}$		27		ns
Latch Minimum Pulse Width	$t_{PL}$	$V_{OD} = 50\text{ mV}$		21		ns
<b>SHUTDOWN PIN CHARACTERISTICS</b> (ADCMP602 Only)						
$V_{IH}$		Comparator is operating	2.0		$V_{CCO}$	V
$V_{IL}$		Shutdown guaranteed	-0.2	+0.4	+0.6	V
$I_{IH}$		$V_{IH} = V_{CC}$	-6		6	$\mu\text{A}$
$I_{OL}$		$V_{IL} = 0\text{ V}$		-100		$\mu\text{A}$
Sleep Time	$t_{SD}$	$I_{CCO} < 500\text{ }\mu\text{A}$		20		ns
Wake-Up Time	$t_H$	$V_{OD} = 100\text{ mV}$ , output valid		50		ns
<b>DC OUTPUT CHARACTERISTICS</b>						
Output Voltage High Level	$V_{OH}$	$V_{CCO} = 2.5\text{ V to } 5.5\text{ V}$ $I_{OH} = 8\text{ mA}, V_{CCO} = 2.5\text{ V}$	$V_{CC} - 0.4$			V
Output Voltage Low Level	$V_{OL}$	$I_{OL} = 8\text{ mA}, V_{CCO} = 2.5\text{ V}$			0.4	V
Output Voltage High Level at -40°C	$V_{OH}$	$I_{OH} = 6\text{ mA}, V_{CCO} = 2.5\text{ V}$	$V_{CC} - 0.4$			V
Output Voltage Low Level at -40°C	$V_{OL}$	$I_{OL} = 6\text{ mA}, V_{CCO} = 2.5\text{ V}$			0.4	V



<b>ADCMP600/ADCMP601/ADCMP602</b>
-----------------------------------

Parameter	Symbol	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
<b>AC PERFORMANCE<sup>1</sup></b>						
Rise Time /Fall Time	$t_{r/f}$	10% to 90%, $V_{DD} = 2.5\text{ V}$ 10% to 90%, $V_{DD} = 5.5\text{ V}$		2.2 4		ns ns
Propagation Delay	$t_{PD}$	$V_{OH} = 50\text{ mV}, V_{DD} = 2.5\text{ V}$		3.5		ns
		$V_{OH} = 50\text{ mV}, V_{DD} = 5.5\text{ V}$		4.3		ns
		$V_{OH} = 10\text{ mV}, V_{DD} = 2.5\text{ V}$		5		ns
		$V_{DD} = 2.5\text{ V to }5.5\text{ V}$ $V_{OH} = 50\text{ mV}$		500		ps
Propagation Delay Skew—Rising to Falling Transition						ps
Overdrive Dispersion		$10\text{ mV} < V_{OH} < 125\text{ mV}$		1.2		ns
Common-Mode Dispersion		$-0.2\text{ V} < V_{CM} < V_{DD} + 2\text{ V}$		200		ps
		$V_{OH} = 50\text{ mV}$				
Minimum Pulse Width	$PW_{MIN}$	$V_{OH} = V_{DD} = 2.5\text{ V}$		3		ns
		$PW_{OUT} = 90\%$ of $PW_{IN}$				
		$V_{DD} = V_{DD} = 5.5\text{ V}$ $PW_{OUT} = 90\%$ of $PW_{IN}$		4.5		ns
<b>POWER SUPPLY</b>						
Input Supply Voltage Range	$V_{DD}$		2.5		5.5	V
Output Supply Voltage Range	$V_{DD}$		2.5		5.5	V
Positive Supply Differential (ADCMP602 Only)	$V_{DD} - V_{DD}$	Operating	-3.0		+3.0	V
		Nonoperating	-5.5		+5.5	V
Positive Supply Current (ADCMP600/ADCMP601)	$I_{DD}$	$V_{CC} = 2.5\text{ V}$ $V_{CC} = 5.5\text{ V}$		3 3.5		mA
Input Section Supply Current (ADCMP602 Only)	$I_{DD}$	$V_{DD} = 2.5\text{ V}$		0.9	1.4	mA
		$V_{DD} = 5.5\text{ V}$		1.2	2.0	mA
Output Section Supply Current (ADCMP602 Only)	$I_{DD}$	$V_{DD} = 2.5\text{ V}$		1.45	3.0	mA
		$V_{DD} = 5.5\text{ V}$		2.1	3.5	mA
Power Dissipation	$P_D$	$V_{CC} = 2.5\text{ V}$		7	9	mW
		$V_{CC} = 5.5\text{ V}$		20	23	mW
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	$V_{DD} = 2.5\text{ V to }5\text{ V}$	-50			dB
Shutdown Mode $I_{DD}$ (ADCMP602 Only)		$V_{CC} = 2.5\text{ V}$		240	400	$\mu\text{A}$
Shutdown Mode $I_{DD}$ (ADCMP602 Only)		$V_{CC} = 2.5\text{ V}$			30	$\mu\text{A}$

<sup>1</sup>  $V_{IN} = 100\text{ mV}$  square input at 50 MHz,  $V_{OH} = 0\text{ V}$ ,  $C_L = 5\text{ pF}$ ,  $V_{DD} = V_{DD} = 2.5\text{ V}$ , unless otherwise noted.

## ADCMP600/ADCMP601/ADCMP602

## PIN CONFIGURATION AND FUNCTION DESCRIPTIONS

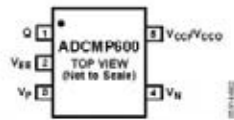


Figure 3. ADCMP600 Pin Configuration

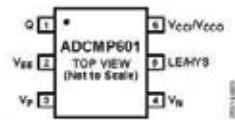


Figure 4. ADCMP601 Pin Configuration



Figure 5. ADCMP602 Pin Configuration

Table 5. ADCMP600 (SOT-23-5 and SC70-5) Pin Function Descriptions

Pin No.	Mnemonic	Description
1	Q	Noninverting Output. Q is at logic high if the analog voltage at the noninverting input, $V_i$ , is greater than the analog voltage at the inverting input, $V_p$ .
2	$V_n$	Negative Supply Voltage.
3	$V_i$	Noninverting Analog Input.
4	$V_p$	Inverting Analog Input.
5	$V_{cc}/V_{cc0}$	Input Section Supply/Output Section Supply. Shared pin.

Table 6. ADCMP601 (SC70-6) Pin Function Descriptions

Pin No.	Mnemonic	Description
1	Q	Noninverting Output. Q is at logic high if the analog voltage at the noninverting input, $V_i$ , is greater than the analog voltage at the inverting input, $V_p$ , if the comparator is in compare mode.
2	$V_n$	Negative Supply Voltage.
3	$V_i$	Noninverting Analog Input.
4	$V_p$	Inverting Analog Input.
5	LE/HYS	Latch/Hysteresis Control. Bias with resistor or current for hysteresis adjustment; drive low to latch.
6	$V_{cc}/V_{cc0}$	Input Section Supply/Output Section Supply. Shared pin.

Table 7. ADCMP602 (MSOP-8) Pin Function Descriptions

Pin No.	Mnemonic	Description
1	$V_{cc}$	Input Section Supply.
2	$V_p$	Noninverting Analog Input.
3	$V_i$	Inverting Analog Input.
4	SDn	Shutdown. Drive this pin low to shut down the device.
5	LE/HYS	Latch/Hysteresis Control. Bias with resistor or current for hysteresis adjustment; drive low to latch.
6	$V_n$	Negative Supply Voltage.
7	Q	Noninverting Output. Q is at logic high if the analog voltage at the noninverting input, $V_i$ , is greater than the analog voltage at the inverting input, $V_p$ , if the comparator is in compare mode.
8	$V_{cc0}$	Output Section Supply.

**ADCMP600/ADCMP601/ADCMP602**

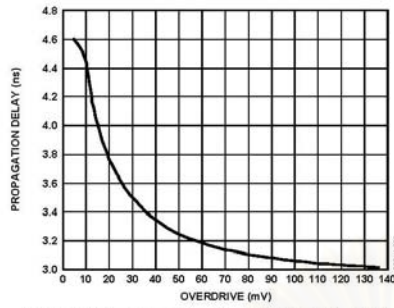


Figure 12. Propagation Delay vs. Input Overdrive at  $V_{CC} = 2.5\text{ V}$

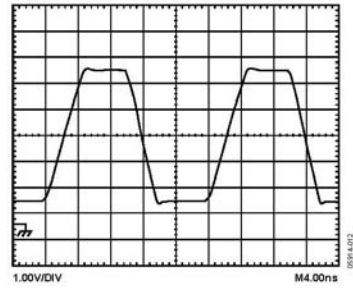


Figure 15. 50 MHz Output Waveform  $V_{CC} = 5.5\text{ V}$

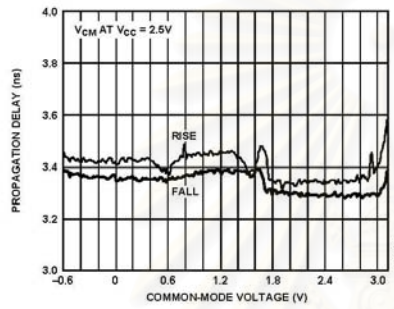


Figure 13. Propagation Delay vs. Input Common-Mode Voltage at  $V_{CC} = 2.5\text{ V}$

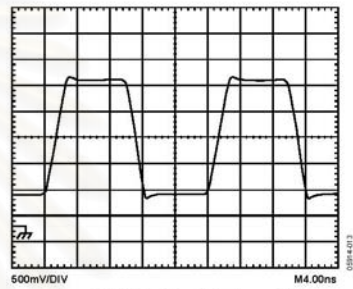


Figure 16. 50 MHz Output Waveforms @  $2.5\text{ V}$

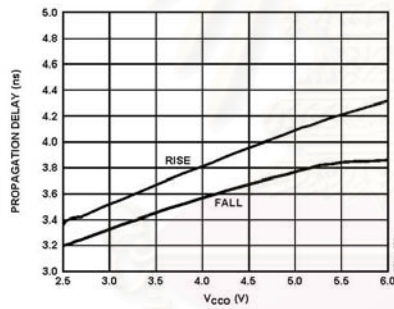



Figure 14. Propagation Delay vs.  $V_{CC}$

ภาคผนวก ก.3

74F00 Quad 2-Input NAND Gate



**FAIRCHILD**  
SEMICONDUCTOR™

December 1994  
Revised September 2000

## 74F00 Quad 2-Input NAND Gate


**General Description**  
This device contains four independent gates, each of which performs the logic NAND function.

**Ordering Code:**

Order Number	Package Number	Package Description
74F00SC	M14A	14-Lead Small Outline Integrated Circuit (SOIC), JEDEC MS-120, 0.150 Narrow
74F00SJ	M14D	14-Lead Small Outline Package (SOP), EIAJ TYPE II, 5.3mm Wide
74F00PC	N14A	14-Lead Plastic Dual-In-Line Package (PDIP), JEDEC MS-001, 0.300 Wide

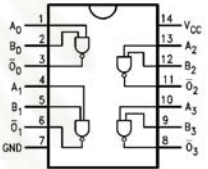
Devices also available in Tape and Reel. Specify by appending the suffix letter "X" to the ordering code.

**Logic Symbol**



IEEE/IEC

**Connection Diagram**



**Unit Loading/Fan Out**

Pin Names	Description	U.L. HIGH/LOW	Input I <sub>H</sub> /I <sub>L</sub> Output I <sub>OH</sub> /I <sub>OL</sub>
A <sub>n</sub> , B <sub>n</sub>	Inputs	1.0/1.0	20 μA/-0.6 mA
O <sub>n</sub>	Outputs	50/33.3	-1 mA/20 mA

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

74F00

Absolute Maximum Ratings (Note 1)		Recommended Operating Conditions	
Storage Temperature	-65°C to +150°C	Free Air Ambient Temperature	0°C to +70°C
Ambient Temperature under Bias	-55°C to +125°C	Supply Voltage	+4.5V to +5.5V
Junction Temperature under Bias	-55°C to +150°C		
V <sub>CC</sub> Pin Potential to Ground Pin	-0.5V to +7.0V		
Input Voltage (Note 2)	-0.5V to +7.0V		
Input Current (Note 2)	-30 mA to +5.0 mA		
Voltage Applied to Output in HIGH State (with V <sub>CC</sub> = 0V)			
Standard Output	-0.5V to V <sub>CC</sub>		
3-STATE Output	-0.5V to +5.5V		
Current Applied to Output in LOW State (Max)	twice the rated I <sub>OL</sub> (mA)		
ESD Last Passing Voltage (Min)	4000V		

**Note 1:** Absolute maximum ratings are values beyond which the device may be damaged or have its useful life impaired. Functional operation under these conditions is not implied.

**Note 2:** Either voltage limit or current limit is sufficient to protect inputs.

**DC Electrical Characteristics**

Symbol	Parameter	Min	Typ	Max	Units	V <sub>CC</sub>	Conditions
V <sub>IH</sub>	Input HIGH Voltage	2.0			V		Recognized as a HIGH Signal
V <sub>IL</sub>	Input LOW Voltage			0.8	V		Recognized as a LOW Signal
V <sub>CD</sub>	Input Clamp Diode Voltage			-1.2	V	Min	I <sub>IN</sub> = -18 mA
V <sub>OH</sub>	Output HIGH Voltage	10% V <sub>CC</sub> 5% V <sub>CC</sub>	2.5 2.7		V	Min	I <sub>OH</sub> = -1 mA I <sub>OH</sub> = -1 mA
V <sub>OL</sub>	Output LOW Voltage	10% V <sub>CC</sub>		0.5	V	Min	I <sub>OL</sub> = 20 mA
I <sub>H</sub>	Input HIGH Current			5.0	μA	Max	V <sub>IN</sub> = 2.7V
I <sub>BI</sub>	Input HIGH Current Breakdown Test			7.0	μA	Max	V <sub>IN</sub> = 7.0V
I <sub>CEx</sub>	Output HIGH Leakage Current			50	μA	Max	V <sub>OUT</sub> = V <sub>CC</sub>
V <sub>ID</sub>	Input Leakage Test	4.75			V	0.0	I <sub>D</sub> = 1.9 μA All other pins grounded
I <sub>OD</sub>	Output Leakage Circuit Current			3.75	μA	0.0	V <sub>DD</sub> = 150 mV All other pins grounded
I <sub>L</sub>	Input LOW Current			-0.6	mA	Max	V <sub>IN</sub> = 0.5V
I <sub>OS</sub>	Output Short-Circuit Current	-60		-150	mA	Max	V <sub>OUT</sub> = 0V
I <sub>CH</sub>	Power Supply Current		1.9	2.8	mA	Max	V <sub>O</sub> = HIGH
I <sub>CCL</sub>	Power Supply Current		6.8	10.2	mA	Max	V <sub>O</sub> = LOW


**AC Electrical Characteristics**

Symbol	Parameter	T <sub>A</sub> = +25°C V <sub>CC</sub> = +5.0V C <sub>L</sub> = 50 pF			T <sub>A</sub> = -55°C to +125°C V <sub>CC</sub> = +5.0V C <sub>L</sub> = 50 pF		T <sub>A</sub> = 0°C to +70°C V <sub>CC</sub> = +5.0V C <sub>L</sub> = 50 pF		Units
		Min	Typ	Max	Min	Max	Min	Max	
		t <sub>PLH</sub>	Propagation Delay A <sub>n</sub> , B <sub>n</sub> to $\overline{O}_n$	2.4	3.7	5.0	2.0	7.0	
t <sub>PHL</sub>		1.5	3.2	4.3	1.5	6.5	1.5	5.3	

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ค. 4



**74F74**  
**Dual D-Type Positive Edge-Triggered Flip-Flop**

April 1988  
Revised September 2000

74F74 Dual D-Type Positive Edge-Triggered Flip-Flop

**General Description**

The F74 is a dual D-type flip-flop with Direct Clear and Set inputs and complementary (Q,  $\bar{Q}$ ) outputs. Information at the input is transferred to the outputs on the positive edge of the clock pulse. Clock triggering occurs at a voltage level of the clock pulse and is not directly related to the transition time of the positive-going pulse. After the Clock Pulse input threshold voltage has been passed, the Data input is locked out and information present will not be transferred to the outputs until the next rising edge of the Clock Pulse input.

**Asynchronous Inputs:**

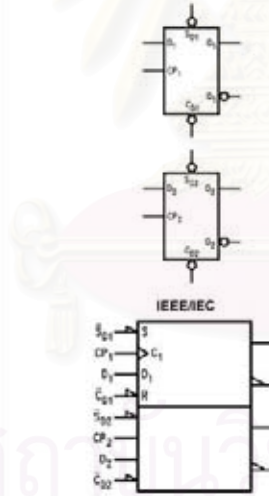
- LOW input to  $\bar{S}_D$  sets Q to HIGH level
- LOW input to  $\bar{C}_D$  sets Q to LOW level
- Clear and Set are independent of clock
- Simultaneous LOW on  $\bar{C}_D$  and  $\bar{S}_D$  makes both Q and  $\bar{Q}$  HIGH

**Ordering Code:**

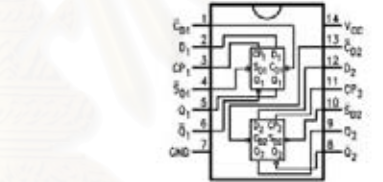
Order Number	Package Number	Package Description
74F74SC	M14A	14-Lead Small Outline Integrated Circuit (SOIC), JEDEC MS-120, 0.150 Narrow
74F74SJ	M14D	14-Lead Small Outline Package (SOP), EIAJ TYPE II, 5.3mm Wide
74F74PC	N14A	14-Lead Plastic Dual-In-Line Package (PDIP), JEDEC MS-001, 0.300 Wide

Devices also available in Tape and Reel. Specify by appending the suffix letter "X" to the ordering code.

**Logic Symbols**



**Connection Diagram**



74F74

**Unit Loading/Fan Out**

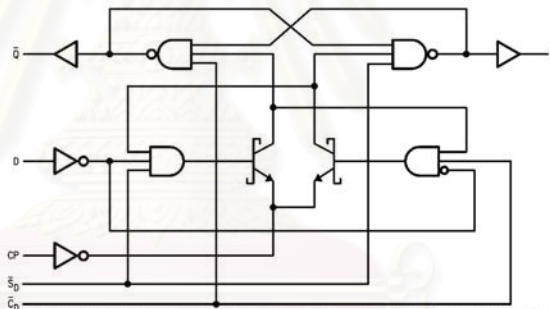
Pin Names	Description	U.L. HIGH/LOW	Input $I_{IH}/I_{IL}$ Output $I_{OH}/I_{OL}$
D <sub>1</sub> , D <sub>2</sub>	Data Inputs	1.0/1.0	20 $\mu$ A/-0.6 mA
CP <sub>1</sub> , CP <sub>2</sub>	Clock Pulse Inputs (Active Rising Edge)	1.0/1.0	20 $\mu$ A/-0.6 mA
$\overline{C}_{D1}$ , $\overline{C}_{D2}$	Direct Clear Inputs (Active LOW)	1.0/3.0	20 $\mu$ A/-1.8 mA
$\overline{S}_{D1}$ , $\overline{S}_{D2}$	Direct Set Inputs (Active LOW)	1.0/3.0	20 $\mu$ A/-1.8 mA
Q <sub>1</sub> , $\overline{Q}_1$ , Q <sub>2</sub> , $\overline{Q}_2$	Outputs	50/33.3	-1 mA/20 mA

**Truth Table**

Inputs				Outputs	
$\overline{S}_D$	$\overline{C}_D$	CP	D	Q	$\overline{Q}$
L	H	X	X	H	L
H	L	X	X	L	H
L	L	X	X	H	H
H	H	↗	h	H	L
H	H	↘	l	L	H
H	H	L	X	Q <sub>0</sub>	$\overline{Q}_0$

H (h) = HIGH Voltage Level  
 L (l) = LOW Voltage Level  
 X = Immaterial  
 Q<sub>0</sub> = Previous Q ( $\overline{Q}$ ) before LOW-to-HIGH Clock Transition  
 Lower case letters indicate the state of the referenced input or output one setup time prior to the LOW-to-HIGH clock transition.

**Logic Diagram**



Please note that this diagram is provided only for the understanding of logic operations and should not be used to estimate propagation delays.

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Absolute Maximum Ratings <sup>(Note 1)</sup>		Recommended Operating Conditions	
Storage Temperature	-65°C to +150°C	Free Air Ambient Temperature	0°C to +70°C
Ambient Temperature under Bias	-55°C to +125°C	Supply Voltage	+4.5V to +5.5V
Junction Temperature under Bias	-55°C to +150°C		
V <sub>CC</sub> Pin Potential to Ground Pin	-0.5V to +7.0V		
Input Voltage (Note 2)	-0.5V to +7.0V		
Input Current (Note 2)	-30 mA to +5.0 mA		
Voltage Applied to Output in HIGH State (with V <sub>CC</sub> = 0V)			
Standard Output	-0.5V to V <sub>CC</sub>		
3-STATE Output	-0.5V to +5.5V		
Current Applied to Output in LOW State (Max)	twice the rated I <sub>OL</sub> (mA)		
ESD Last Passing Voltage (Min)	4000V		


**Note 1:** Absolute maximum ratings are values beyond which the device may be damaged or have its useful life impaired. Functional operation under these conditions is not implied.


**Note 2:** Either voltage limit or current limit is sufficient to protect inputs.

### DC Electrical Characteristics

Symbol	Parameter	Min	Typ	Max	Units	V <sub>CC</sub>	Conditions
V <sub>IH</sub>	Input HIGH Voltage	2.0			V		Recognized as a HIGH Signal
V <sub>IL</sub>	Input LOW Voltage			0.8	V		Recognized as a LOW Signal
V <sub>CD</sub>	Input Clamp Diode Voltage			-1.2	V	Min	I <sub>IN</sub> = -18 mA
V <sub>OH</sub>	Output HIGH Voltage	10% V <sub>CC</sub> 5% V <sub>CC</sub>	2.5 2.7		V	Min	I <sub>OH</sub> = -1 mA I <sub>OH</sub> = -1 mA
V <sub>OL</sub>	Output LOW Voltage	10% V <sub>CC</sub>		0.5	V	Min	I <sub>OL</sub> = 20 mA
I <sub>HI</sub>	Input HIGH Current			5.0	μA	Max	V <sub>IN</sub> = 2.7V
I <sub>BV</sub>	Input HIGH Current Breakdown Test			7.0	μA	Max	V <sub>IN</sub> = 7.0V
I <sub>CEx</sub>	Output HIGH Leakage Current			50	μA	Max	V <sub>OUT</sub> = V <sub>CC</sub>
I <sub>ID</sub>	Input Leakage Test	4.75			V	0.0	I <sub>D</sub> = 1.9 μA All Other Pins Grounded
I <sub>OD</sub>	Output Leakage Circuit Current			3.75	μA	0.0	V <sub>DD</sub> = 150 mV All Other Pins Grounded
I <sub>LI</sub>	Input LOW Current			-0.8 -1.8	mA	Max	V <sub>IN</sub> = 0.5V (D, CP) V <sub>IN</sub> = 0.5V (C <sub>D</sub> , S <sub>D</sub> )
I <sub>OS</sub>	Output Short-Circuit Current	-60		-150	mA	Max	V <sub>OUT</sub> = 0V
I <sub>CC</sub>	Power Supply Current		10.5	16.0	mA	Max	

ภาคผนวก ค.5





# BUF634

---

## 250mA HIGH-SPEED BUFFER

### FEATURES

- HIGH OUTPUT CURRENT: 250mA
- SLEW RATE: 2000V/ $\mu$ s
- PIN-SELECTED BANDWIDTH: 30MHz to 180MHz
- LOW QUIESCENT CURRENT: 1.5mA (30MHz BW)
- WIDE SUPPLY RANGE:  $\pm 2.25$  to  $\pm 18$ V
- INTERNAL CURRENT LIMIT
- THERMAL SHUTDOWN PROTECTION
- 8-PIN DIP, SO-8, 5-LEAD TO-220, 5-LEAD DDPAK SURFACE-MOUNT

### APPLICATIONS

- VALVE DRIVER
- SOLENOID DRIVER
- OP AMP CURRENT BOOSTER
- LINE DRIVER
- HEADPHONE DRIVER
- VIDEO DRIVER
- MOTOR DRIVER
- TEST EQUIPMENT
- ATE PIN DRIVER

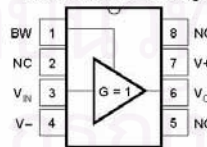
### DESCRIPTION

The BUF634 is a high speed unity-gain open-loop buffer recommended for a wide range of applications. It can be used inside the feedback loop of op amps to increase output current, eliminate thermal feedback and improve capacitive load drive.

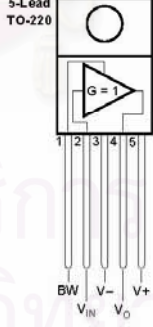
For low power applications, the BUF634 operates on 1.5mA quiescent current with 250mA output, 2000V/ $\mu$ s slew rate and 30MHz bandwidth. Bandwidth can be adjusted from 30MHz to 180MHz by connecting a resistor between V- and the BW Pin.

Output circuitry is fully protected by internal current limit and thermal shut-down making it rugged and easy to use.

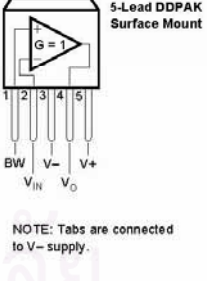
**8-Pin DIP Package**  
**SO-8 Surface-Mount Package**



**5-Lead TO-220**



**5-Lead DDPAK Surface Mount**



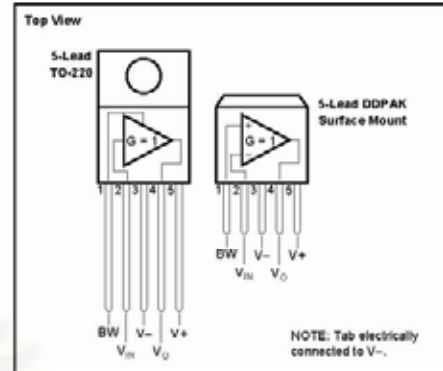
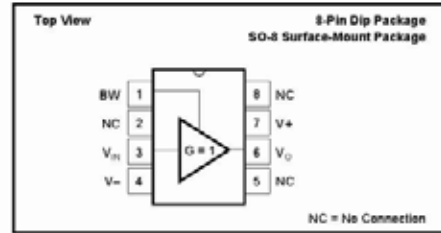
NOTE: Tabs are connected to V- supply.

International Airport Industrial Park • Mailing Address: PO Box 11400, Tucson, AZ 85734 • Street Address: 6730 S. Tucson Blvd., Tucson, AZ 85706 • Tel: (520) 746-1111 • Twx: 910-962-1111  
 Internet: <http://www.burr-brown.com> • FAX/Line: (800) 548-6133 (US/Canada Only) • Cable: BBRCORP • Telex: 066-6491 • FAX: (520) 889-1610 • Immediate Product Info: (800) 548-6132





**PIN CONFIGURATION**



**ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS**

Supply Voltage .....	±18V
Input Voltage Range .....	:V <sub>O</sub>
Output Short-Circuit (to ground) .....	Continuous
Operating Temperature .....	-40°C to +125°C
Storage Temperature .....	-55°C to +125°C
Junction Temperature .....	+150°C
Lead Temperature (soldering, 10s) .....	+300°C

**PACKAGE/ORDERING INFORMATION**

PRODUCT	PACKAGE	PACKAGE DRAWING NUMBER <sup>(1)</sup>	TEMPERATURE RANGE
BUF634P	8-Pin Plastic DIP	006	-40°C to +85°C
BUF634U	SO-8 Surface-Mount	182	-40°C to +85°C
BUF634T	5-Lead TO-220	315	-40°C to +85°C
BUF634F	5-Lead DPAK	325	-40°C to +85°C

NOTE: (1) For detailed drawing and dimension table, please see end of data sheet, or Appendix C of Burr-Brown IC Data Book.



**ELECTROSTATIC DISCHARGE SENSITIVITY**

Any integrated circuit can be damaged by ESD. Burr-Brown recommends that all integrated circuits be handled with appropriate precautions. Failure to observe proper handling and installation procedures can cause damage.

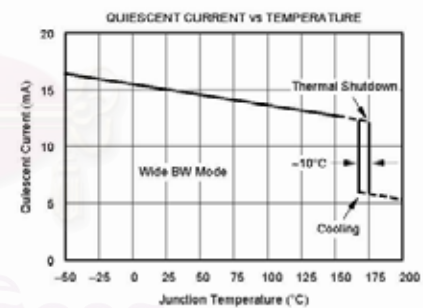
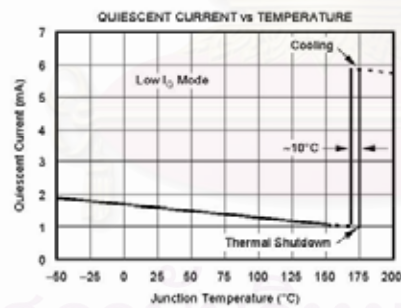
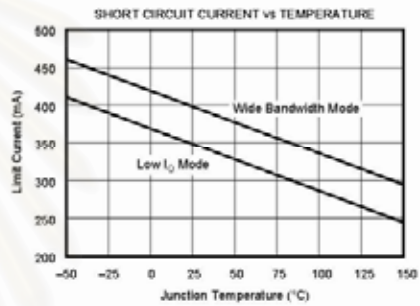
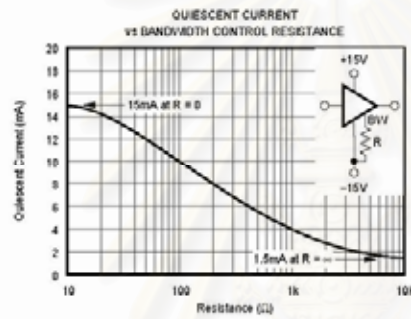
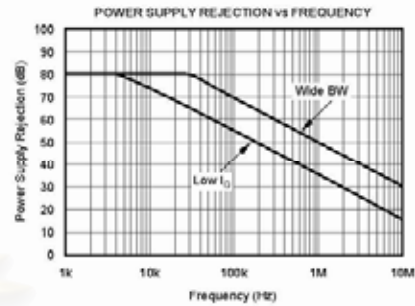
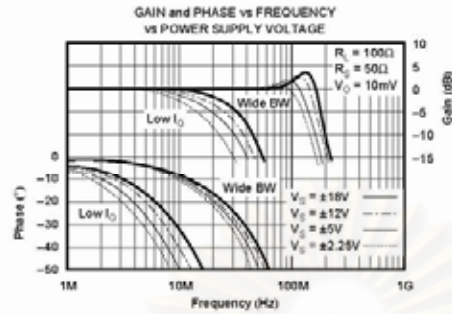
ESD damage can range from subtle performance degradation to complete device failure. Precision integrated circuits may be more susceptible to damage because very small parametric changes could cause the device not to meet published specifications.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



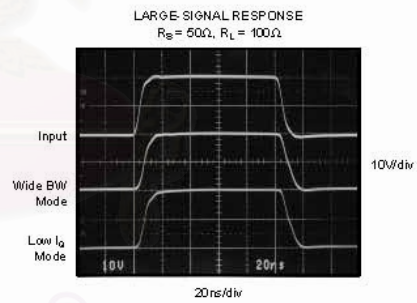
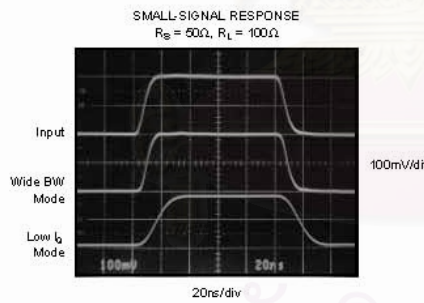
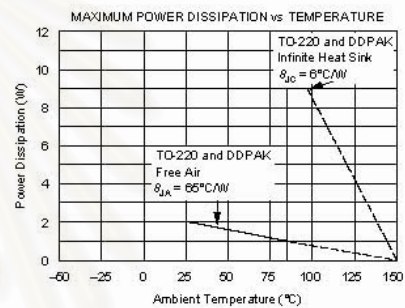
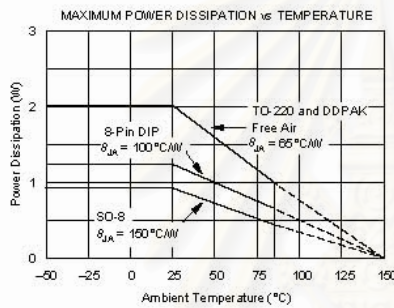
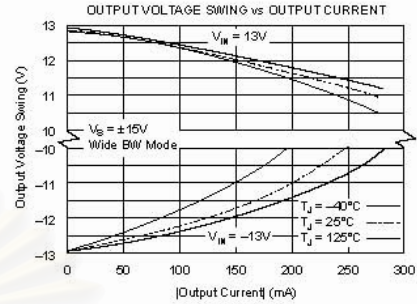
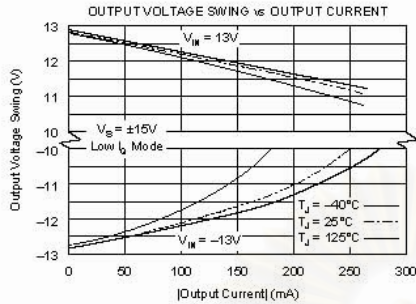
### TYPICAL PERFORMANCE CURVES (CONT)

At  $T_J = +25^\circ\text{C}$ ,  $V_{DS} = \pm 15\text{V}$ , unless otherwise noted.



### TYPICAL PERFORMANCE CURVES (CONT)

At  $T_A = +25^\circ\text{C}$ ,  $V_E = \pm 15\text{V}$ , unless otherwise noted.





October 20, 2008

## LM117/LM317A/LM317 3-Terminal Adjustable Regulator

### General Description

The LM117 series of adjustable 3-terminal positive voltage regulators is capable of supplying in excess of 1.5A over a 1.2V to 37V output range. They are exceptionally easy to use and require only two external resistors to set the output voltage. Further, both line and load regulation are better than standard fixed regulators. Also, the LM117 is packaged in standard transistor packages which are easily mounted and handled.

In addition to higher performance than fixed regulators, the LM117 series offers full overload protection available only in IC's. Included on the chip are current limit, thermal overload protection and safe area protection. All overload protection circuitry remains fully functional even if the adjustment terminal is disconnected.

Normally, no capacitors are needed unless the device is situated more than 6 inches from the input filter capacitors in which case an input bypass is needed. An optional output capacitor can be added to improve transient response. The adjustment terminal can be bypassed to achieve very high ripple rejection ratios which are difficult to achieve with standard 3-terminal regulators.

Besides replacing fixed regulators, the LM117 is useful in a wide variety of other applications. Since the regulator is "floating" and sees only the input-to-output differential voltage, supplies of several hundred volts can be regulated as long as

the maximum input to output differential is not exceeded, i.e., avoid short-circuiting the output.

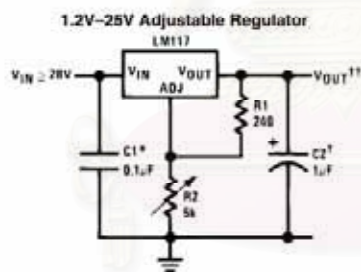
Also, it makes an especially simple adjustable switching regulator, a programmable output regulator, or by connecting a fixed resistor between the adjustment pin and output, the LM117 can be used as a precision current regulator. Supplies with electronic shutdown can be achieved by clamping the adjustment terminal to ground which programs the output to 1.2V where most loads draw little current.

For applications requiring greater output current, see LM150 series (3A) and LM136 series (5A) data sheets. For the negative complement, see LM137 series data sheet.

### Features

- Guaranteed 1% output voltage tolerance (LM317A)
- Guaranteed max. 0.01%/V line regulation (LM317A)
- Guaranteed max. 0.3% load regulation (LM117)
- Guaranteed 1.5A output current
- Adjustable output down to 1.2V
- Current limit constant with temperature
- P+ Product Enhancement tested
- 80 dB ripple rejection
- Output is short-circuit protected

### Typical Applications



Full output current not available at high input-output voltages  
 \*Needed if device is more than 6 inches from filter capacitors.  
 †Optional—improves transient response. Output capacitors in the range of 1µF to 1000µF of aluminum or tantalum electrolytic are commonly used to provide improved output impedance and rejection of transients.

$$V_{OUT} = 1.25V \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + I_{ADJ}(R_2)$$

LM117/LM317A/LM317 Package Options

Part Number	Suffix	Package	Output Current
LM117, LM317	K	TO-3	1.5A
LM317A, LM317	T	TO-220	1.5A
LM317	S	TO-263	1.5A
LM317A, LM317	EMP	SOT-223	1.0A
LM117, LM317A, LM317	H	TO-39	0.5A
LM117	E	LCC	0.5A
LM317A, LM317	MDT	TO-252	0.5A

### SOT-223 vs. TO-252 (D-Pak) Packages

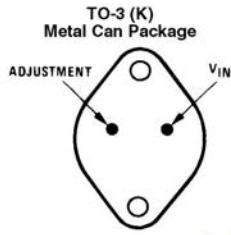


SOT-223 TO-252

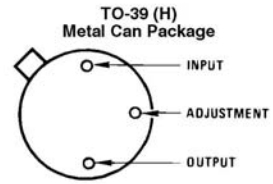
Scale 1:1

LM117/LM317A/LM317

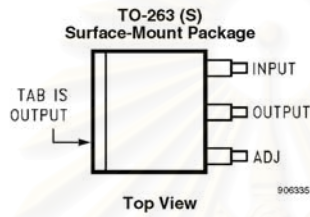
**Connection Diagrams**



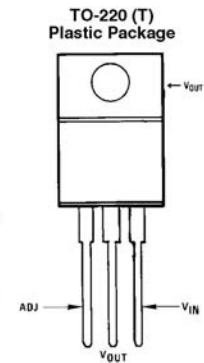
906330  
CASE IS OUTPUT  
**Bottom View**  
Steel Package  
NS Package Number K02A or K02C



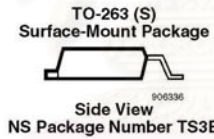
906331  
CASE IS OUTPUT  
**Bottom View**  
NS Package Number H03A



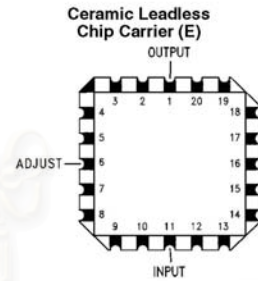
906335  
**Top View**



906332  
**Front View**  
NS Package Number T03B



906336  
**Side View**  
NS Package Number TS3B



906334  
**Top View**  
NS Package Number E20A



**Absolute Maximum Ratings** (Note 1)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

Power Dissipation	Internally Limited
Input-Output Voltage Differential	+40V, -0.3V
Storage Temperature	-65°C to +150°C
Lead Temperature	
Metal Package (Soldering, 10 seconds)	300°C
Plastic Package (Soldering, 4 seconds)	260°C
ESD Tolerance (Note 5)	3 kV

**Operating Temperature Range**

LM117	$-55^{\circ}\text{C} \leq T_J \leq +150^{\circ}\text{C}$
LM317A	$-40^{\circ}\text{C} \leq T_J \leq +125^{\circ}\text{C}$
LM317	$0^{\circ}\text{C} \leq T_J \leq +125^{\circ}\text{C}$

**Preconditioning**

Thermal Limit Burn-In	All Devices 100%
-----------------------	------------------

**LM117 Electrical Characteristics** (Note 3)

Specifications with standard type face are for  $T_J = 25^{\circ}\text{C}$ , and those with **boldface type** apply over full Operating Temperature Range. Unless otherwise specified,  $V_{IN} - V_{OUT} = 5\text{V}$ , and  $I_{OUT} = 10\text{mA}$ .

Parameter	Conditions	LM117 (Note 2)			
		Min	Typ	Max	Units
Reference Voltage	$3\text{V} \leq (V_{IN} - V_{OUT}) \leq 40\text{V}$ , $10\text{mA} \leq I_{OUT} \leq I_{MAX}$	<b>1.20</b>	<b>1.25</b>	<b>1.30</b>	V
Line Regulation	$3\text{V} \leq (V_{IN} - V_{OUT}) \leq 40\text{V}$ (Note 4)		0.01 <b>0.02</b>	0.02 <b>0.05</b>	%/V
Load Regulation	$10\text{mA} \leq I_{OUT} \leq I_{MAX}$ (Note 4)		0.1 <b>0.3</b>	0.3 <b>1</b>	%
Thermal Regulation	20 ms Pulse		0.03	0.07	%/W
Adjustment Pin Current			50	100	$\mu\text{A}$
Adjustment Pin Current Change	$10\text{mA} \leq I_{OUT} \leq I_{MAX}$ , $3\text{V} \leq (V_{IN} - V_{OUT}) \leq 40\text{V}$		<b>0.2</b>	<b>5</b>	$\mu\text{A}$
Temperature Stability	$T_{MIN} \leq T_J \leq T_{MAX}$		1		%
Minimum Load Current	$(V_{IN} - V_{OUT}) = 40\text{V}$		3.5	5	mA
Current Limit	$(V_{IN} - V_{OUT}) \leq 15\text{V}$ K Package H, E Package	1.5 <b>0.5</b>	2.2 <b>0.8</b>	3.4 <b>1.8</b>	A
	$(V_{IN} - V_{OUT}) = 40\text{V}$ K Package H, E Package	0.3 <b>0.15</b>	0.4 <b>0.20</b>		A
RMS Output Noise, % of $V_{OUT}$	$10\text{Hz} \leq f \leq 10\text{kHz}$		0.003		%
Ripple Rejection Ratio	$V_{OUT} = 10\text{V}$ , $f = 120\text{Hz}$ , $C_{ADJ} = 0\mu\text{F}$		<b>65</b>		dB
	$V_{OUT} = 10\text{V}$ , $f = 120\text{Hz}$ , $C_{ADJ} = 10\mu\text{F}$		<b>66</b>	<b>80</b>	dB
Long-Term Stability	$T_J = 125^{\circ}\text{C}$ , 1000 hrs		0.3	1	%
Thermal Resistance, $\theta_{JC}$ Junction-to-Case	K (TO-3) Package		2		$^{\circ}\text{C}/\text{W}$
	H (TO-39) Package		21		
	E (LCC) Package		12		
Thermal Resistance, $\theta_{JA}$ Junction-to-Ambient (No Heat Sink)	K (TO-3) Package		39		$^{\circ}\text{C}/\text{W}$
	H (TO-39) Package		186		
	E (LCC) Package		88		

LM317A and LM317 Electrical Characteristics (Note 3)								
Specifications with standard type face are for $T_J = 25^\circ\text{C}$ , and those with boldface type apply over full Operating Temperature Range. Unless otherwise specified, $V_{IN} - V_{OUT} = 5\text{V}$ , and $I_{OUT} = 10\text{mA}$ .								
Parameter	Conditions	LM317A			LM317			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Reference Voltage		1.238	1.250	1.262	-	1.25	-	V
	$3\text{V} \leq (V_{IN} - V_{OUT}) \leq 40\text{V}$ , $10\text{mA} \leq I_{OUT} \leq I_{MAX}$	<b>1.225</b>	<b>1.250</b>	<b>1.270</b>	<b>1.20</b>	<b>1.25</b>	<b>1.30</b>	V
Line Regulation	$3\text{V} \leq (V_{IN} - V_{OUT}) \leq 40\text{V}$ (Note 4)		0.005 <b>0.01</b>	0.01 <b>0.02</b>		0.01 <b>0.02</b>	0.04 <b>0.07</b>	%/V
Load Regulation	$10\text{mA} \leq I_{OUT} \leq I_{MAX}$ (Note 4)		0.1 <b>0.3</b>	0.5 <b>1</b>		0.1 <b>0.3</b>	0.5 <b>1.5</b>	%
Thermal Regulation	20 ms Pulse		0.04	0.07		0.04	0.07	%/W
Adjustment Pin Current			50	100		50	100	$\mu\text{A}$
Adjustment Pin Current Change	$10\text{mA} \leq I_{OUT} \leq I_{MAX}$ $3\text{V} \leq (V_{IN} - V_{OUT}) \leq 40\text{V}$		0.2	5		0.2	5	$\mu\text{A}$
Temperature Stability	$T_{MIN} \leq T_J \leq T_{MAX}$		1			1		%
Minimum Load Current	$(V_{IN} - V_{OUT}) = 40\text{V}$		3.5	10		3.5	10	mA
Current Limit	$(V_{IN} - V_{OUT}) \leq 15\text{V}$ K, T, S Packages	-	-	-	1.5	2.2	3.4	A
	EMP Package	1.5	2.2	3.4	1.5	2.2	3.4	
	H, MDT Packages	0.5	0.8	1.8	0.5	0.8	1.8	
	$(V_{IN} - V_{OUT}) = 40\text{V}$ K, T, S Packages	-	-	-	0.15	0.40	-	
	EMP Package	0.112	0.30		0.112	0.30		
	H, MDT Packages	0.075	0.20		0.075	0.20		
RMS Output Noise, % of $V_{OUT}$	10 Hz $\leq f \leq$ 10 kHz		0.003			0.003		%
Ripple Rejection Ratio	$V_{OUT} = 10\text{V}$ , $f = 120\text{Hz}$ , $C_{ADJ} = 0\mu\text{F}$		65			65		dB
	$V_{OUT} = 10\text{V}$ , $f = 120\text{Hz}$ , $C_{ADJ} = 10\mu\text{F}$		66	80		66	80	dB
Long-Term Stability	$T_J = 125^\circ\text{C}$ , 1000 hrs		0.3	1		0.3	1	%
Thermal Resistance, $\theta_{JC}$ Junction-to-Case	K (TO-3) Package		-			2		$^\circ\text{C/W}$
	T (TO-220) Package		-			4		
	S (TO-263) Package		-			4		
	EMP (SOT-223) Package		23.5			23.5		
	H (TO-39) Package		21			21		
	MDT (TO-252) Package		12			12		
Thermal Resistance, $\theta_{JA}$ Junction-to-Ambient (No Heat Sink)	K (TO-3) Package		-			39		$^\circ\text{C/W}$
	T (TO-220) Package		-			50		
	S (TO-263) Package (Note 6)		-			50		
	EMP (SOT-223) Package (Note 6)		140			140		
	H (TO-39) Package		186			186		
	MDT (TO-252) Package (Note 6)		103			103		

**Note 1:** Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. Operating Ratings indicate conditions for which the device is intended to be functional, but do not guarantee specific performance limits. For guaranteed specifications and test conditions, see the Electrical Characteristics. The guaranteed specifications apply only for the test conditions listed.

**Note 2:** Refer to RETS117H drawing for the LM117H, or the RETS117K for the LM117K military specifications.

**Note 3:**  $I_{MAX} = 1.5\text{A}$  for the K (TO-3), T (TO-220), and S (TO-263) packages.  $I_{MAX} = 1\text{A}$  for the EMP (SOT-223) package.  $I_{MAX} = 0.5\text{A}$  for the H (TO-39), MDT (TO-252), and E (LCC) packages. Device power dissipation ( $P_D$ ) is limited by ambient temperature ( $T_A$ ), device maximum junction temperature ( $T_J$ ), and package thermal resistance ( $\theta_{JA}$ ). The maximum allowable power dissipation at any temperature is:  $P_{D(MAX)} = ((T_{J(MAX)} - T_A)/\theta_{JA})$ . All Min. and Max. limits are guaranteed to National's Average Outgoing Quality Level (AOQL).

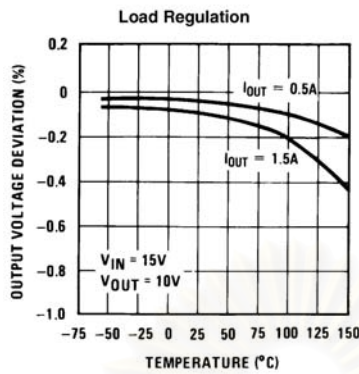
**Note 4:** Regulation is measured at a constant junction temperature, using pulse testing with a low duty cycle. Changes in output voltage due to heating effects are covered under the specifications for thermal regulation.

**Note 5:** Human body model, 100 pF discharged through a 1.5 k $\Omega$  resistor.

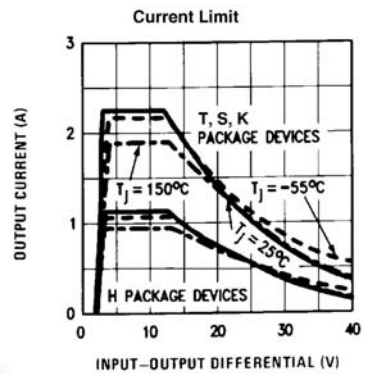
**Note 6:** When surface mount packages are used (TO-263, SOT-223, TO-252), the junction to ambient thermal resistance can be reduced by increasing the PC board copper area that is thermally connected to the package. See the Applications Hints section for heat sink techniques.

LM117/LM317A/LM317

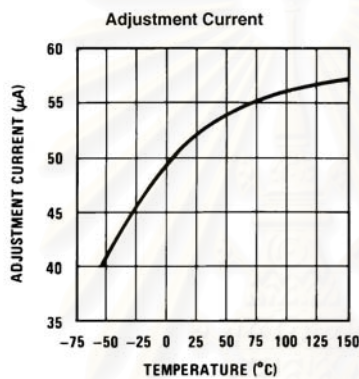
**Typical Performance Characteristics** Output Capacitor = 0  $\mu$ F unless otherwise noted



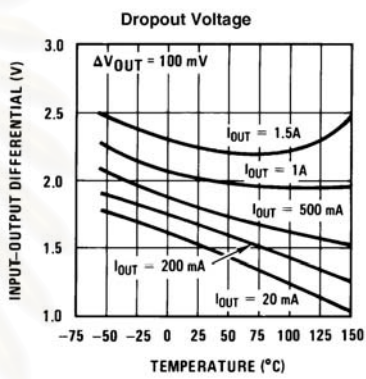
906337



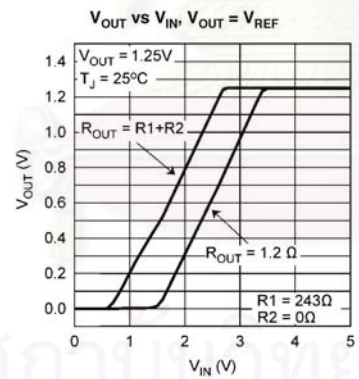
906338



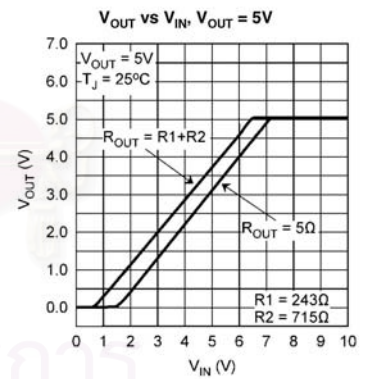
906339



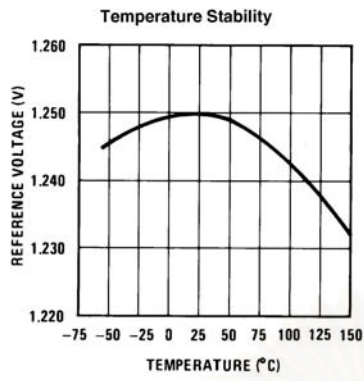
906340



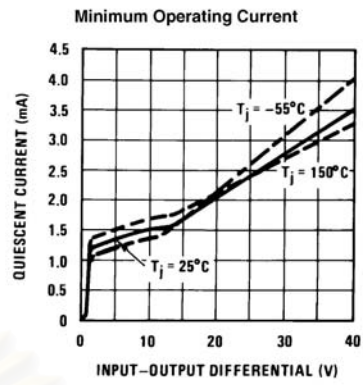
906367



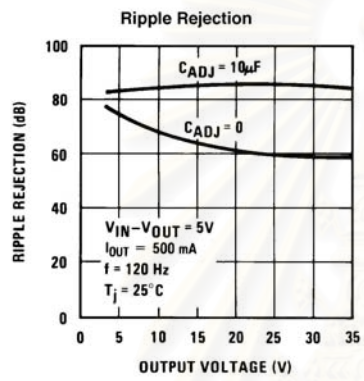
906368



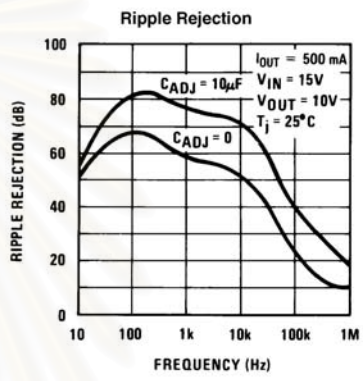
906341



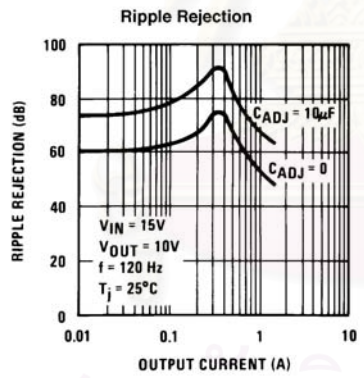
906342



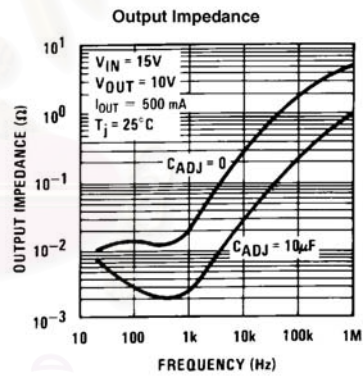
906343



906344



906345



906346

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก ง.



TSFF5210

Vishay Semiconductors

## High Speed Infrared Emitting Diode, 870 nm, GaAlAs Double Hetero

### Description

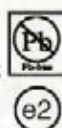
TSFF5210 is a high speed infrared emitting diode in GaAlAs on GaAlAs double hetero (DH) technology, molded in a clear, untinted plastic package.

DH technology combines high speed with high radiant power at wavelength of 870 nm.



### Features

- High modulation bandwidth (23 MHz)
- Extra high radiant power and radiant intensity
- Low forward voltage
- Suitable for high pulse current operation
- Standard T-1 $\frac{1}{2}$  ( $\varnothing$  5 mm) package
- Angle of half intensity  $\varphi = \pm 10^\circ$
- Peak wavelength  $\lambda_p = 870$  nm
- High reliability
- Good spectral matching to Si photodetectors
- Lead (Pb)-free component
- Component in accordance to RoHS 2002/95/EC and WEEE 2002/96/EC



### Applications

- Infrared video data transmission between Camcorder and TV set.
- Free air data transmission systems with high modulation frequencies or high data transmission rate requirements.

### Absolute Maximum Ratings

$T_{amb} = 25^\circ\text{C}$ , unless otherwise specified

Parameter	Test condition	Symbol	Value	Unit
Reverse voltage		$V_R$	5	V
Forward current		$I_F$	100	mA
Peak forward current	$t_p/T = 0.5$ , $t_p = 100 \mu\text{s}$	$I_{FM}$	200	mA
Surge forward current	$t_p = 100 \mu\text{s}$	$I_{FSM}$	1	A
Power dissipation		$P_D$	250	mW
Junction temperature		$T_J$	100	$^\circ\text{C}$
Operating temperature range		$T_{amb}$	-40 to +85	$^\circ\text{C}$
Storage temperature range		$T_{stg}$	-40 to +100	$^\circ\text{C}$
Soldering temperature	$t \leq 5$ sec, 2 mm from case	$T_{sd}$	260	$^\circ\text{C}$
Thermal resistance junction/ambient		$R_{\theta JA}$	300	K/W



# TSFF5210

Vishay Semiconductors



## Electrical Characteristics

$T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , unless otherwise specified

Parameter	Test condition	Symbol	Min	Typ.	Max	Unit
Forward voltage	$I_F = 100\text{ mA}$ , $t_p = 20\text{ ms}$	$V_F$		1.5	1.8	V
	$I_F = 1\text{ A}$ , $t_p = 100\text{ }\mu\text{s}$	$V_F$		2.3	3.0	V
Temp. coefficient of $V_F$	$I_F = 100\text{ mA}$	$TK_{VF}$		-2.1		mV/K
Reverse current	$V_{R1} = 5\text{ V}$	$I_R$			10	$\mu\text{A}$
Junction capacitance	$V_{R1} = 0\text{ V}$ , $f = 1\text{ MHz}$ , $E = 0$	$C_j$		125		pF

## Optical Characteristics

$T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , unless otherwise specified

Parameter	Test condition	Symbol	Min	Typ.	Max	Unit
Radiant intensity	$I_F = 100\text{ mA}$ , $t_p = 20\text{ ms}$	$I_e$	90	180	450	mW/sr
	$I_F = 1\text{ A}$ , $t_p = 100\text{ }\mu\text{s}$	$I_e$		1800		mW/sr
Radiant power	$I_F = 100\text{ mA}$ , $t_p = 20\text{ ms}$	$\phi_e$		50		mW
Temp. coefficient of $\phi_e$	$I_F = 100\text{ mA}$	$TK_{\phi_e}$		-0.35		%/K
Angle of half intensity		$\varphi$		$\pm 10$		deg
Peak wavelength	$I_F = 100\text{ mA}$	$\lambda_p$		870		nm
Spectral bandwidth	$I_F = 100\text{ mA}$	$\Delta\lambda$		40		nm
Temp. coefficient of $\lambda_p$	$I_F = 100\text{ mA}$	$TK_{\lambda_p}$		0.25		nm/K
Rise time	$I_F = 100\text{ mA}$	$t_r$		15		ns
Fall time	$I_F = 100\text{ mA}$	$t_f$		15		ns
Cut-off frequency	$I_{DC} = 70\text{ mA}$ , $I_{AC} = 30\text{ mA pp}$	$f_c$		23		MHz
Virtual source diameter		$\varnothing$		3.7		mm

## Typical Characteristics

$T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , unless otherwise specified

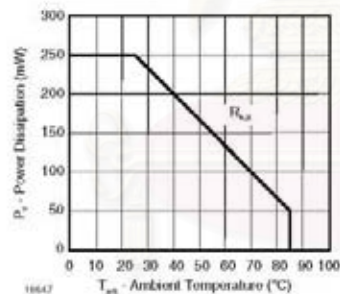


Figure 1. Power Dissipation vs. Ambient Temperature

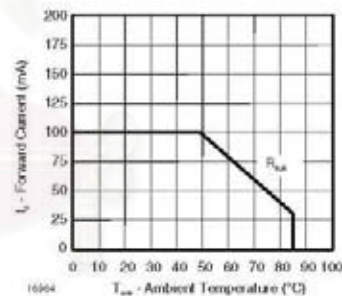


Figure 2. Forward Current vs. Ambient Temperature



**TSFF5210**  
Vishay Semiconductors

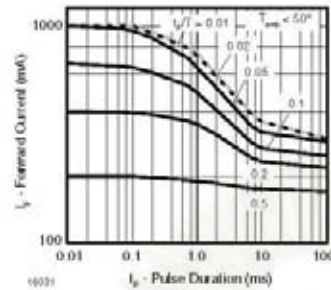


Figure 3. Pulse Forward Current vs. Pulse Duration

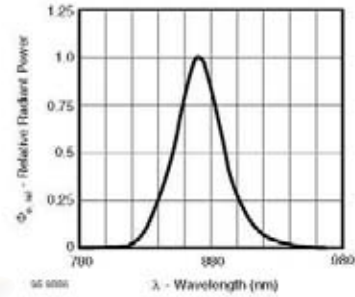


Figure 6. Relative Radiant Power vs. Wavelength

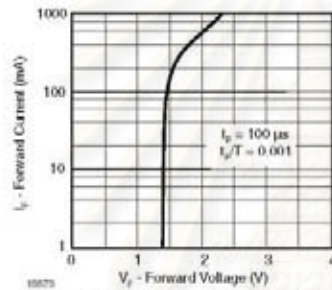


Figure 4. Forward Current vs. Forward Voltage

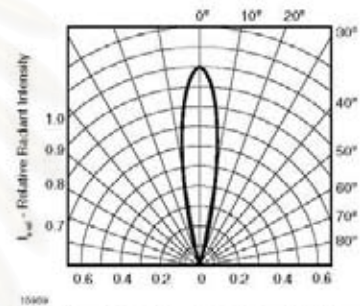


Figure 7. Relative Radiant Intensity vs. Angular Displacement

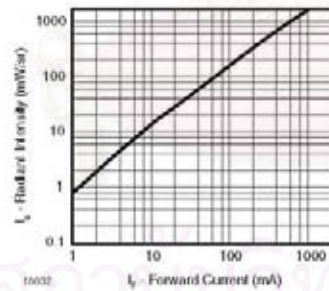


Figure 5. Radiant Intensity vs. Forward Current

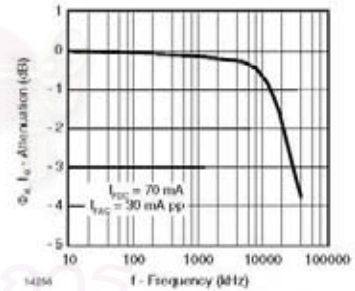


Figure 8. Attenuation vs. Frequency

ภาคผนวก จ.

โปรแกรมสั่งงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

Attribute VB\_Name = "Module1"

\*\*\*\*\*

```
'* Name      : PeeJo_thesis.BAS          *
'* Author    : [Kamontip Ploykrachang]   *
'* Notice    : Copyright (c) 2009 [select VIEW...EDITOR OPTIONS] *
'*          : All Rights Reserved        *
'* Date      : 17/3/2009                  *
'* Version   : 1.0                        *
'* Notes     : Read data from counter and display on LCD 2x16 *
'*          : >5000 POSITIVE, 5000-700 INTERMEDIAT, *
'*          : <700 NEGATIVE              *
```

\*\*\*\*\*

Include "Modedefs.bas"

define OSC 20

\*\*\*\*\* Define LCD \*\*\*\*\*

Define LCD\_DREG PORTB

Define LCD\_DBIT 4

Define LCD\_RSREG PORTB

Define LCD\_RSBIT 1

Define LCD\_EREG PORTB

Define LCD\_EBIT 2

Define LCD\_BITS 4

Define LCD\_LINES 2

\*\*\*\* Declare Control Pins \*\*\*\*

LED var PORTA.0

START var PORTA.1

uSW var PORTA.3

TMIN var PORTE.0

nPSet var PORTE.1

MR Var PORTE.2

BZ var PORTB.3

\*\*\*\*\* Decler variables \*\*\*\*\*

DEC\_DG1 var byte

DEC\_DG2 var byte

DEC\_DG3 var byte

DEC\_DG4 var byte

DEC\_DG5 var byte

DEC\_DG6 var byte

No\_Int var word

T\_Sec var byte

Complete var Bit

Update var byte

Down Var Byte

\*\*\* Set Interrupt TMR0 and RB0 \*\*\*

INTCON = %10000100 ' Disable interrupt TMR0 , Disable interrupt RB0

\*\*\* Determine I/O of PORTB and PORTC \*\*\*

ADCON1 = 7 'Set PortA,E to digital port

CMCON = %00000111 ' Comparator OFF

TRISA 0# = 0: TRISA 0.1 = 1: TRISA 0.3 = 1

TRISB = 0

TRISC = 0

TRISD = %11111111

TRISE 0# = 0: TRISE 0.1 = 0: TRISE 0.2 = 0

\*\*\*\*\* Program Start here \*\*\*\*\*

Start\_Pro:

PORTC = %11111111

MR = 1: nPSet = 1: Bz = 0 ' Clear Counter

TMIN = 0: No\_Int = 0: T\_Sec = 0: LED = 0: Complete = 0: Update = 0

TMR0 = 6

LCDOut \$FE,1 ' Clear LCD

```

LCDOut $FE,$80      '   Display Time on Line 1
LCDOut "NUCLEAR TECH CU." '   Display "NUCLEAR TECH CU."
LCDOut $FE,$C0      '   Display Time on Line 1
LCDOut "START => MEASURE" '   Display "Start => Measure"
OPTION_REG = %11000100 '   assign prescaler to TMR0 (256)
GoTo CheckSTR

```

```

On Interrupt GoTo INT_TIMER      ' Point to the interrupt handler

```

```

CheckSTR:

```

```

If START = 0 Then
    MR = 0          ' Counter ready
    pause 10
    LCDOut $FE,1    ' Clear LCD
    nPSet = 0
    pause 10
    nPSet = 1
    GoTo CheckUSW
End If
GoTo CheckSTR

```

```

CheckUSW:

```

```

If uSW = 1 Then
    INTCON = %10100100
    TMR0 = 6: T_Sec = 0
    TMIN = 1: LED = 1
    LCDOut $FE,1    ' Clear LCD
    LCDOut $FE,$80  '   Display on Line 1
    LCDOut "PROCESSING" '   Display "Processing"
    pauseus 10
    GoTo CheckComp
End If
If uSW = 0 Then

```



```

LCDOut $FE,1      ' Clear LCD
LCDOut $FE,$80    ' Display on Line 1
LCDOut "Please Close" ' Display "Please Close"
LCDOut $FE,$C0    ' Display on Line 2
LCDOut "Chamber => START" ' Display "Chamber => START"
GoTo CheckClose

End If

GoTo CheckUSW

CheckClose:
If START = 0 Then
    LCDOut $FE,1      ' Clear LCD
    GoTo CheckUSW
End If
GoTo CheckClose

CheckComp:
If Complete = 0 And Update <> T_Sec Then
    Update = T_Sec
    GoTo DisplayData
End If
If Complete = 1 Then
    INTCON = %10000100 ' Disable interrupt TMR0 , Disable interrupt RB0
    LCDOut $FE,1
    '***** Make Alarm from Buzzer *****
    Bz = 1: pause 200: Bz = 0: pause 200
    GoTo DisplayFinal
End If
GoTo CheckComp

DisplayData:
'Read data from buffer of Digit 1

```

```

PORTC = %11111110
pauseus 5
DEC_DG1 = PORTD
'Read data from buffer of Digit 2
PORTC = %11111101
pauseus 5
DEC_DG2 = PORTD
'Read data from buffer of Digit 3
PORTC = %11111011
pauseus 5
Dec_DG3 = PORTD
'Read data from buffer of Digit 4
PORTC = %11110111
pauseus 5
DEC_DG4 = PORTD
'Read data from buffer of Digit 5
PORTC = %11101111
pauseus 5
Dec_DG5 = PORTD
'Read data from buffer of Digit 6
PORTC = %11011111
pauseus 52
Dec_DG6 = PORTD
PORTC = %11111111
LCDOut $FE,1
LCDOut $FE,$80
LCDOut "PROCESSING ",#Down,"s"
LCDOut $FE,$C0
If Dec_DG6 = 0 Then
    If Dec_DG5 = 0 Then
        If DEC_DG4 = 0 Then
            If Dec_DG3 = 0 Then

```

```

If DEC_DG2 = 0 Then
    LCDOut "Counts:",#DEC_DG1
Else
    LCDOut "Counts:",#DEC_DG2,#DEC_DG1
End If
Else
    LCDOut "Counts:",#DEC_DG3,#DEC_DG2,#DEC_DG1
End If
Else
    LCDOut "Counts:",#DEC_DG4,#DEC_DG3,#DEC_DG2,#DEC_DG1
End If
Else
    LCDOut "Counts:",#DEC_DG5,#DEC_DG4,#DEC_DG3,#DEC_DG2,#DEC_DG1
End If
Else
    LCDOut
"Counts:",#DEC_DG6,#DEC_DG5,#DEC_DG4,#DEC_DG3,#DEC_DG2,#DEC_DG1
End If
GoTo CheckComp

DisplayFinal:
'Read data from buffer of Digit 1
PORTC = %11111110
pauseus 5
DEC_DG1 = PORTD
'Read data from buffer of Digit 2
PORTC = %11111101
pauseus 5
DEC_DG2 = PORTD
'Read data from buffer of Digit 3
PORTC = %11111011
pauseus 5

```

```

Dec_DG3 = PORTD
'Read data from buffer of Digit 4
PORTC = %11110111
pauseus 5
DEC_DG4 = PORTD
'Read data from buffer of Digit 5
PORTC = %11101111
pauseus 5
Dec_DG5 = PORTD
'Read data from buffer of Digit 6
PORTC = %11011111
pauseus 5
Dec_DG6 = PORTD
PORTC = %11011111
LCDOut $FE,$80      '   Display Time on Line 1
If Dec_DG6 = 0 Then
  If Dec_DG5 = 0 Then
    If DEC_DG4 = 0 Then
      If Dec_DG3 = 0 Then
        If DEC_DG2 = 0 Then
          LCDOut "Counts:",#DEC_DG1
        Else
          LCDOut "Counts:",#DEC_DG2,#DEC_DG1
        End If
      Else
        LCDOut "Counts:",#DEC_DG3,#DEC_DG2,#DEC_DG1
      End If
    Else
      LCDOut "Counts:",#DEC_DG4,#DEC_DG3,#DEC_DG2,#DEC_DG1
    End If
  Else
    LCDOut "Counts:",#DEC_DG5,#DEC_DG4,#DEC_DG3,#DEC_DG2,#DEC_DG1
  End If

```

```

    End If
Else
    LCDOut
"Counts:",#DEC_DG6,#DEC_DG5,#DEC_DG4,#DEC_DG3,#DEC_DG2,#DEC_DG1
    End If
**** Compare Counts with Threshold = 500 ****
LCDOut $FE,$C0      '    Display Time on Line 2
If Dec_DG6 = 0 Then
    If Dec_DG5 = 0 Then
        If DEC_DG4 > 5 Then
            LCDOut "POSITIVE"
        Else
            If DEC_DG4 = 5 Then
                If DEC_DG1 = 0 And DEC_DG2 = 0 And Dec_DG3 = 0 Then
                    LCDOut "INTERMEDIAT"
                Else
                    LCDOut "POSITIVE"
                End If
            End If
        End If
    End If
    If DEC_DG4 < 5 Then
        If DEC_DG4 > 0 Then
            LCDOut "INTERMEDIAT"
        End If
        If DEC_DG4 = 0 Then
            If Dec_DG3 >= 7 Then
                LCDOut "INTERMEDIAT"
            Else
                LCDOut "NEGATIVE"
            End If
        End If
    End If
End If
End If
End If

```



```

Else
    LCDOut "POSITIVE"
End If
Else
    LCDOut "POSITIVE"
End If
goto Loop
Loop:
LED = 1
pause 300
LED = 0
pause 300
goto Loop
disable Interrupt
INT_TIMER:
No_Int = No_Int + 1
If No_Int = 625 Then
    T_Sec = T_Sec + 1
    Down = 60 - T_Sec
    TMR0 = 6
    No_Int = 0
    If T_Sec = 60 Then
        T_Sec = 0
        TMIN = 0: Complete = 1: LED = 0
    End If
End If
INTCON 0.2 = 0
Resume
Enable Interrupt
End

```

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายโอภาส อิศระชัย เกิดวันที่ 8 มีนาคม 2509 ที่จังหวัดฉะเชิงเทรา สำเร็จการศึกษาประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง ในสาขาไฟฟ้ากำลัง แผนกช่างไฟฟ้า วิชาเขตเทคนิคกรุงเทพ วิทยาลัยเทคโนโลยีและอาชีวศึกษา เข้ารับราชการในตำแหน่งช่างไฟฟ้า 1 สังกัด เขตการทางสกลนคร กองบำรุง กรมทางหลวง เมื่อวันที่ 10 เมษายน 2531 หลังจากนั้นสอบโอนย้ายมาบรรจุในตำแหน่งนายช่างอิเล็กทรอนิกส์ 2 ที่ ศูนย์ฉายรังสีอาหารและผลิตผลการเกษตร กองวิทยาศาสตร์ชีวภาพ สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ ต่อมาได้ลาศึกษาต่อ ในระดับปริญญาบัณฑิต ในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมระบบวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร จนสำเร็จในปีการศึกษา 2545 และได้รับการคัดเลือกให้เป็นนักเรียนทุนรัฐบาลด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ให้เข้ารับการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชานิเวศลิษฐ์เทคโนโลยี ภาควิชานิเวศลิษฐ์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2548 ต่อมาในระหว่างที่ลาศึกษาต่อ ขณะที่ดำรงตำแหน่งนายช่างอิเล็กทรอนิกส์ 6 ได้ออกจากราชการ เพื่อโอนย้ายมาปฏิบัติหน้าที่ ช่างเทคนิคอาวุโส ศูนย์ฉายรังสี สถาบันเทคโนโลยีนิเวศลิษฐ์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ในวันที่ 25 ธันวาคม 2549

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย