

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การตรวจจับซิงเกิลโฟตอน



นายกรณ์ เอกพจนานันท์
นางสาวนันทนา ชื่นศิริพรชัย
นายพิเชษฐ มะโนสร้อย

โครงการพิเศษเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

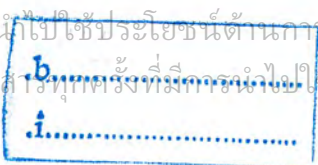
ปีการศึกษา 2547

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 58689

วัน,เดือน,ปี 31 ส.ค 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น. อีกทั้งยังมีผลให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีไปใช้



Single Photon Detector



A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of

Bachelor of Science

Department of Applied Physics

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การตรวจจับซิงเกิลโฟตอน
นักศึกษา นายกรณ์ เอกพจนานันท์
 นางสาวนันทนา ชื่นศิริพรชัย
 นายพิเชษฐ์ มะโนสร้อย
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. ปรีชา ยูพาพิน

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ อ. ภารุจ บัณฑิตาภิชาติ	
กรรมการที่ปรึกษา รศ.ดร. ปรีชา ยูพาพิน	
กรรมการ อ. เบญจพล ต้นอู่	
กรรมการ อ. สุรศักดิ์ พิพัฒน์ศาสตร์	

(รองศาสตราจารย์ วิชาญ เตชิตธีระ)

หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การตรวจจับรังสีแกมมา
นักศึกษา	นายกรณ์ เอกพจนานันท์ นางสาวนันทนา ชื่นศิริพรชัย นายพิเชษฐ มະโนสร้อย
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2547
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. ปรีชา ยุพาพิน

บทคัดย่อ

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับระบบของ Single Photon Detector โดยใช้อุปกรณ์ OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) เป็นแหล่งกำเนิดโฟตอน โดยจะส่งลำโฟตอนผ่านเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งลำโฟตอนจะเดินทางผ่านไปเส้นใยแก้วนำแสง จากนั้นลำโฟตอนจะเดินทางเข้าไปกระทบกับดีเทคเตอร์ ซึ่งจะทำหน้าที่ตรวจจับลำโฟตอน เพื่อวัดหาโฟตอนออกมา แล้วแสดงออกมาในรูปของพลังงานทางไฟฟ้า ทั้งนี้ดีเทคเตอร์สามารถใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า Thermoelectric cooler เป็นตัวควบคุมอุณหภูมิภายในดีเทคเตอร์ ซึ่งที่อุณหภูมิต่ำมาก ๆ นั้นจะทำให้เป็นการลดทอนสัญญาณรบกวนของดีเทคเตอร์

Special Project Title	Single Photon Detector
Name	Mr.Korn Ekpojananan Miss Nantnna Chuensiripornchai Mr.Pichet Manosoi
Department	Applied Physics Faculty of Science
Program	Applied Physics - Science and Industry Instrumentation
Academic Year	2004
Special Project Advisor	Assoc.Prof.Dr. Precha Yupapin

ABSTRACT

In this a special project, we learned about the single photon detector system. We used OTDR (optical time domain reflectometer) with a light source. Photon will be pass into the fiber optic, it will be pass the detector. The detector measure photon energy and show is the electrical energy. The detector can be used to the thermoelectric cooler (TEC) , its can be controller internal temperature of detector because the TEC can reduce quantum noise of detector.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้ประสบกับปัญหาและอุปสรรคต่างๆมากมาย และการแก้ไข
ปัญหาเหล่านี้จะไม่สามารถผ่านพ้นไปได้หากขาดบุคคลเหล่านี้

- บิดา-มารดา ผู้ให้ความรัก ความอบอุ่น และความห่วงใยเมื่อยามประสบ
ปัญหาต่างๆ
- รศ.ดร.ปรีชา ยุพาพิน ผู้ให้ความรู้ ความเอาใจใส่ และอบรมสั่งสอนต่างๆ รวมถึงทำให้
พวกเราได้มีโอกาสศึกษาในสิ่งที่ไม่เคยเรียนรู้มาก่อน]
- พี่ ๆ ที่ห้องวิจัย ผู้ที่ให้ความเป็นกันเอง ดูแลเอาใจใส่ ช่วยเหลืออย่างดียิ่งในการทำ
โครงการพิเศษนี้
- เพื่อน ๆ ฟิสิกส์รุ่น 20 ที่คอยให้กำลังใจและความช่วยเหลือตลอดระยะเวลา 4 ปีที่ได้ร่วม
ศึกษาเล่าเรียนกันมา
- น้องฟิสิกส์ทุกคน ที่คอยให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือพวกเราเป็นอย่างดี
- น้องภาณุมาศ ธรรมเวช ผู้ให้พี่ได้หิบบีบีมีซึกัลองถ่ายรูปติดจอในการถ่ายรูปลูกศรและ
การทดลองต่าง ๆ ของการทำโปรเจคในครั้งนี้
- น้องกฤษดา อุดมเวช ขอขอบคุณที่ช่วยเหลือด้านข้อมูลและช่วยในการจัดหาอุปกรณ์ทั้งยังมี
ส่วนในการช่วยในการทดลองในการทำโปรเจคในครั้งนี้
- คุณ รมณ ชัยญาวรรณ ที่คอยให้กำลังใจและให้คำปรึกษาทุก ๆ เรื่องทั้งเรื่องการทำโปรเจค
และเรื่องราวต่าง ๆ ขอขอบคุณจากใจ (โดย กรณ์ เอกพจนานันท์)
- คุณ นันทนา ชื่นศิริพรชัย ที่ทำให้รู้ว่าการทำโปรเจค 3 คน ก็เหมือนกับการทำ 2 คน ไม่ได้มี
อะไรแตกต่างกันเลย ขอขอบคุณมากครับ

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณครอบครัวเอกพจนานันท์ ,ครอบครัวชื่นศิริพรชัย และ
ครอบครัวมะโนสร้อย ที่คอยเป็นกำลังใจและกำลังใจทวีให้แก่พวกเรา ในการทำโครงการพิเศษใน
ครั้งนี้ได้ลุล่วงเป็นอย่างดี

นายกรณ์ เอกพจนานันท์

นางสาวนันทนา ชื่นศิริพรชัย

นายพิเชษฐ มะโนสร้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการพิเศษ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 ธรรมชาติของแสง	4
2.1.1 การเป็นคลื่นของแสง	6
2.1.2 การเป็นอนุภาคของแสง	8
2.2 ควอนตัมของแสง	8
2.2.1 โฟลารไเรเซชันของแสง	8
2.2.2 สมมุติฐานของเดอบรอยล์	11
2.3 สัญญาณรบกวน	12
2.3.1 Thermal noise	13
2.3.2 Shot noise	13
2.3.3 1/f noise	14
2.3.4 Environment noise	14
2.4 การลดสัญญาณรบกวน	14
2.4.1 การลดสัญญาณรบกวนแบบ Thermal noise	14
2.4.2 การลดสัญญาณรบกวนแบบ Shot noise	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.3 การลดสัญญาณรบกวนแบบ $1/f$ noise	15
2.5 การตรวจจับสัญญาณควอนตัม	15
2.5.1 โฟโตไดโอด	15
2.5.2 โครงสร้างของโฟโตไดโอดชนิดต่าง ๆ	15
2.5.3 พินโฟโตไดโอด	16
2.5.3.1 พินโฟโตไดโอดชนิดวัสดุต่าง ๆ	16
2.5.3.1.1 พินโฟโตไดโอดชนิดวัสดุธาตุเดี่ยวและ ชนิดสารประกอบไบนารี	16
2.5.3.1.2 พินโฟโตไดโอดชนิดสารประกอบเทอร์นารีและ สารประกอบควอเทอร์นารี	19
2.5.4 ระยะเวลาซีโฟโตไดโอด	20
2.5.4.1 แรงดันไฟฟ้าพังทลาย	20
2.5.4.2 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อ APD	23
2.5.4.3 กระแสไฟฟ้ามืด	23
2.5.4.4 ระยะเวลาซีโฟโตไดโอดชนิดซิลิกอน	24
2.5.4.5 ระยะเวลาซีโฟโตไดโอดชนิดเจอร์เมเนียม	25
2.5.4.6 ระยะเวลาซีโฟโตไดโอดชนิดแกลเลียมอาร์เซไนด์	25
2.5.4.7 ระยะเวลาซีโฟโตไดโอดชนิดอินเดียมฟอสไฟด์	27
2.5.4.7.1 APD ชนิดโครงสร้าง SAM	28
2.5.4.7.2 APD ชนิดโครงสร้าง SAGM	28
2.5.4.7.3 APD ชนิดโครงสร้างแพลนาร์	29
2.5.4.7.4 APD ชนิดโครงสร้างซูเปอร์แลตทิซ	29
2.5.4.8 กระบวนการของ Geiger mode	34
2.6 Quantum Cryptation	35
2.6.1 ประวัติความเป็นมาของ Quantum Cryptography	35
2.6.2 Cryptographic services and primitives	36
2.6.3 Quantum Cryptography	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.4 System Configuration	37
2.6.5 Classical and Quantum Domain	38
2.7 Thermoelectric Coolers	39
2.7.1 หลักการทำงานของ Thermoelectric coolers	39
บทที่ 3 ขอบเขตและวิธีการดำเนินงานวิจัย	41
3.1 การศึกษาข้อมูล	41
3.2 ขอบเขตและวิธีการดำเนินงานวิจัย	41
3.3 ชุดอุปกรณ์การวิจัยประกอบด้วย	43
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	45
4.1 การทดลองตรวจจับสัญญาณโดยตรง	46
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	69
5.1 สรุปผลการทดลอง	69
5.2 ข้อเสนอแนะ	69
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงค่าคุณสมบัติของโฟโตไดโอดชนิดต่าง ๆ	32
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าการตรวจจับโฟตอนโดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส	49
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าการตรวจจับโฟตอนโดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส	53
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าการตรวจจับโฟตอนโดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	57
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าการตรวจจับโฟตอนโดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 19 องศาเซลเซียส	61
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าการตรวจจับโฟตอนโดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 18 องศาเซลเซียส	65



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงความถี่และความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ	7
รูปที่ 2.2 แสดงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	8
รูปที่ 2.3 แสดงสนามไฟฟ้าของคลื่นแสง	9
(ก). แสงไม่โพลาไรซ์	
(ข). แสงโพลาไรซ์	
รูปที่ 2.4 แสดงแสงโพลาไรซ์จากแหล่งกำเนิดตกกระทบตัวทำโพลาไรซ์	10
(ก). แกนโพลาไรซ์ของตัววิเคราะห์ขนานกับของตัวทำโพลาไรซ์ ก็จะมีแสงโพลาไรซ์ผ่านไปได้	
(ข). แกนโพลาไรซ์ของตัววิเคราะห์ตั้งฉากกับของตัวทำแสงโพลาไรซ์ ตัวนั้นก็ไม่มีแสงผ่าน	
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างสเปกตรัมผลการตอบสนองของพินโฟโตไดโอดที่ผลิตจากวัสดุชนิดต่าง ๆ	17
รูปที่ 2.6 (ก) การขึ้นแรงดันไบอัสย้อนของกระแสไฟฟ้ามืดของพินโฟโตไดโอดชนิด Si โดยที่พารามิเตอร์คือ อุณหภูมิขณะทำงาน	18
(ข) การเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้ามืดของพินโฟโตไดโอดชนิด Ge, Si	
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างโครงสร้างของพินไดโอดที่มีการผลิตจริง	18
(ก) รอยต่อ pin ลักษณะของขั้วไฟฟ้าด้านบนจะเปิดช่องออกเพื่อให้แสงเข้าสู่ชั้น p ได้โดยตรง	
(ข) การออกแบบเพื่อให้แสงเข้าทางด้านข้าง	
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างโครงสร้างของพินโฟโตไดโอดชนิด GaInAs ที่มีโครงสร้างแบบแพลนาร์	19
รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันพังทลายและความหนาแน่นในการโด๊ปสำหรับสารกึ่งตัวนำ 4 ชนิด คือ Si, Ge, GaAs และ GaP	22

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.10 (ก) ความหนาแน่นในการโดปสารกึ่งตัวนำแบบมีความลาดตาม ระยะทางในรอยต่อ pn	22
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันพังทลายและความหนาแน่นในการ โดป โดยมีความลาดของการโดปเป็นพารามิเตอร์	
รูปที่ 2.11 (ก) ตัวอย่างโครงสร้างของ RAPD ที่มีการผลิตใช้งานจริง	24
(ข) สเปกตรัมผลตอบสนอง	
รูปที่ 2.12 โครงสร้างของ SPAD (single photon APD)	25
รูปที่ 2.13 ตัวอย่างโครงสร้างของ APD ชนิด Ge แบบต่าง ๆ	26
รูปที่ 2.14 (ก) โครงสร้างของ APD ชนิด GaAs ในระยะเริ่มแรก	26
(ข) สเปกตรัมผลตอบสนองของ APD ชนิดต่าง ๆ	
รูปที่ 2.15 (ก) โครงสร้างของ APD ชนิด InGaAsP/InP ที่มีการผลิตเป็นครั้งแรก	28
(ข) แถบพลังงานของ APD ชนิด InGaAsP/InP	
รูปที่ 2.16 (ก) โครงสร้างของ APD ชนิด SAM (separate avalanche and multiplication)	30
(ข) ลักษณะของสนามไฟฟ้าในชั้นต่าง ๆ	
รูปที่ 2.17 แถบพลังงานของ APD ชนิด SAGM (separate absorption,grading and multiplication)	30
L คือความหนาของชั้นที่เปลี่ยนช่องว่างพลังงานแบบให้มีความลาด	
รูปที่ 2.18 (ก) โครงสร้างของ SAM-APD แบบเมซา (mesa)	31
(ข) โครงสร้างของ SAGM-APD แบบเมซา (mesa)	
รูปที่ 2.19 (ก) โครงสร้างของ SAM-APD แบบแพลนาร์ (planar) โดยมีชั้น การ์ดริง (guard ring structure) อยู่ภายใน	31
(ข) โครงสร้างของ SAM-APD แบบแพลนาร์ (planar) โดยมีชั้นฝัง (buried structure) อยู่ภายใน	

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.20 โครงสร้างของ APD ซึ่งมีชั้นซูเปอร์แลตทิซอยู่ภายใน (ก) ชั้นซูเปอร์แลตทิซทำหน้าที่เปลี่ยนช่องว่างพลังงานประสิทธิผลให้เป็นแบบมีความลาด (ข) ชั้นซูเปอร์แลตทิซทำหน้าที่เป็นชั้นอะวะลันซ์	32
รูปที่ 2.21 แสดงกราฟการตอบสนองของสัญญาณอุปกรณ์รับสัญญาณชนิด Silicon ที่ $0.82 \mu\text{m}$	33
รูปที่ 2.22 แสดงกราฟการตอบสนองของสัญญาณของอุปกรณ์รับสัญญาณชนิด InGaAs ที่ $1.55 \mu\text{m}$	33
รูปที่ 2.23 แสดงวงจรไฟฟ้าของ Geiger mode	34
รูปที่ 2.24 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้ากับเวลา	34
รูปที่ 2.26 Marand-Townsend Interferometric Quantum Cryptation Scheme	37
รูปที่ 2.27 Intensity (probability) Distribution for Interferometer at time t	38
รูปที่ 2.28 คุณสมบัติของอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์และแสดงค่าความต่างเฟสของกราฟทั้งสองเส้น	38
รูปที่ 2.29 Cross Section of a Typical TE Couple	40
รูปที่ 3.1 แสดงการเชื่อมต่อชุดอุปกรณ์ต่าง ๆ ของชุดการทดลอง	41
รูปที่ 3.2 แสดงส่วนการเชื่อมต่อของ TEC กับชุดทดลองเมื่อมีอุปกรณ์ TEC	42
รูปที่ 3.3 แสดงแหล่งกำเนิดโฟตอนโดยใช้ OTDR	43
รูปที่ 3.4 แสดงโฟโตไดโอดที่ใช้ในการทดลอง	43
รูปที่ 3.5 แสดงออกซิลิคอนโคปที่ใช้ในการทดลอง	44
รูปที่ 3.6 แสดงวงจรควบคุมอุณหภูมิของ TEC	44
รูปที่ 4.1 แสดงชุดอุปกรณ์การทดลอง	45
รูปที่ 4.1 แสดงหน้าจอของ OTDR ที่ตรวจที่ระยะ 20 km มีความยาวคลื่น 1310 nm	46
รูปที่ 4.2 แสดงหน้าจอของ OTDR ที่ตรวจที่ระยะ 40 km มีความยาวคลื่น 1310 nm	46
รูปที่ 4.3 แสดงหน้าจอของ OTDR ที่ตรวจที่ระยะ 80 km มีความยาวคลื่น 1310 nm	47
รูปที่ 4.4 แสดงหน้าจอของ OTDR ที่ตรวจที่ระยะ 20 km มีความยาวคลื่น 1550 nm	47
รูปที่ 4.5 แสดงหน้าจอของ OTDR ที่ตรวจที่ระยะ 40 km มีความยาวคลื่น 1550 nm	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.6 แสดงหน้าจอของOTDR ที่ตรวจที่ระยะ 80 km มีความยาวคลื่น 1550 nm	48
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1310$ nm ระยะทาง 20 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส	49
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1550$ nm ระยะทาง 20 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส	50
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1310$ nm ระยะทาง 40 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส	50
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1550$ nm ระยะทาง 40 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส	51
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1310$ nm ระยะทาง 80 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส	51
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1550$ nm ระยะทาง 80 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส	52
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1310$ nm ระยะทาง 20 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส	53
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1550$ nm ระยะทาง 20 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส	54
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1310$ nm ระยะทาง 40 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส	54
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1550$ nm ระยะทาง 40 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส	55
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1310$ nm ระยะทาง 80 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส	55
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1550$ nm ระยะทาง 80 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส	56
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1310$ nm ระยะทาง 20 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1550$ nm ระยะทาง 20 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	58
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1310$ nm ระยะทาง 40 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	58
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1550$ nm ระยะทาง 40 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	59
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1310$ nm ระยะทาง 80 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	59
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1550$ nm ระยะทาง 80 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	60
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1310$ nm ระยะทาง 20 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 19 องศาเซลเซียส	61
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1550$ nm ระยะทาง 20 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 19 องศาเซลเซียส	62
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1310$ nm ระยะทาง 40 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 19 องศาเซลเซียส	62
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1550$ nm ระยะทาง 40 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 19 องศาเซลเซียส	63
รูปที่ 4.29 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1310$ nm ระยะทาง 80 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 19 องศาเซลเซียส	63
รูปที่ 4.30 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1550$ nm ระยะทาง 80 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 19 องศาเซลเซียส	64
รูปที่ 4.31 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1310$ nm ระยะทาง 20 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 18 องศาเซลเซียส	65
รูปที่ 4.32 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1550$ nm ระยะทาง 20 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 18 องศาเซลเซียส	66

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.33 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1310$ nm ระยะทาง 40 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 18 องศาเซลเซียส	66
รูปที่ 4.34 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1550$ nm ระยะทาง 40 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 18 องศาเซลเซียส	67
รูปที่ 4.35 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1310$ nm ระยะทาง 80 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 18 องศาเซลเซียส	67
รูปที่ 4.36 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1550$ nm ระยะทาง 80 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 18 องศาเซลเซียส	68



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

โลกในยุคปัจจุบันมีการพัฒนาทางด้านควอนตัมเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะขณะนี้มีความก้าวหน้าทางด้านควอนตัมทางแสง มีนักวิทยาศาสตร์จำนวนมากที่ได้ทำการศึกษา ค้นคว้าวิจัยทางด้านแสง ทั้งนี้แสงนั้นสามารถประพุดิตัวเป็นได้ทั้งคลื่น และอนุภาคได้อันทำให้เกิดการค้นคว้าวิจัยที่เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเป็นอย่างมาก

ทฤษฎีทางควอนตัมของแสงนั้น ประกอบไปด้วยทฤษฎีและปรากฏการณ์ต่าง ๆ ได้แก่ ทฤษฎีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, ทฤษฎีการแผ่รังสีของวัตถุดำ , กฎของพลังค์, ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก, ปรากฏการณ์คอมพิ้นท์ม ทั้งหมุดนี้ทำให้เกิดการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับควอนตัมของแสงขึ้น

ในโครงการพิเศษนี้จะทำการศึกษาเกี่ยวกับ Quantum cryptography ซึ่งทั้งนี้งานวิจัยทางด้าน Quantum cryptography (QC) เป็นงานวิจัยที่เป็นที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจาก QC มีความปลอดภัยซึ่งใช้พื้นฐานของกฎทางควอนตัมฟิสิกส์ที่ใช้การวิจัยทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ค่อนข้างจะมีความยุ่งยากซับซ้อนในการคำนวณ ดังนั้นจึงเป็นวิธีการแบบใหม่ที่เป็นประโยชน์ โดยใช้คุณสมบัติทางควอนตัมของโฟตอนเดี่ยว ส่วนในการตรวจสอบโฟตอนเดี่ยว นั้นจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์รับสัญญาณที่มีความไวสูง และต้องสามารถรับสัญญาณขนาดเล็กที่เป็นโฟตอนเดี่ยวได้ ซึ่งเหตุผลนี้ทำให้ต้องทำการหล่อเย็นตัวอุปกรณ์รับสัญญาณเพื่อเป็นการลดสัญญาณรบกวนควอนตัม (Quantum noise) จะเรียกว่า Single-photon detector (SPD) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่ใช้ในอุปกรณ์ต่างๆ เช่น High-resolution spectroscopy , Optical time-domain reflectometry , Eye-safe lidar และ Quantum cryptography (QC) ตัวตรวจวัดที่ใช้ในการตรวจวัดโฟตอนเดี่ยวนั้น จะใช้เป็นแบบโฟโตไดโอดชนิด Avalanche photodiode (APD) ตัว APD นี้จะทำงานด้วยปรากฏการณ์อะวาลานซ์เป็นโฟโตไดโอดที่ทำงานโดยการไบอัสย้อนกลับด้วยแรงดันไฟฟ้าที่สูง จนสามารถเร่งพาหะที่เกิดจากแสงให้วิ่งไปชนอะตอมในผลึก จนเกิดการแตกตัวเป็นไอออนและเกิดอิเล็กตรอนชุดที่สองเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นตัว APD จึงใช้ตรวจรับแสงที่สามารถขยายสัญญาณกระแสไฟฟ้าโฟโตและตรวจวัดสัญญาณแสงที่มีกำลังต่ำมากๆ ได้ดี จากโครงสร้างที่มีความจุไฟฟ้าต่ำ จึงทำให้มีการตอบสนองแสงได้รวดเร็วมากถึงในระดับพิโกวินาที ทำให้ APD มีการนำมาใช้งานเป็นอุปกรณ์ตรวจรับสัญญาณแสงอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วนำแสง

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาระบบวัดและทดสอบ Single-photon detector (SPD)
2. เพื่อศึกษาวิธีการ Quantum cryptography
3. เพื่อศึกษาและใช้งานวงจรรีเลย์ทรอนิกส์หล่อเย็น
4. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางควอนตัมของโฟตอนเดี่ยว

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ในการวิจัยโครงการพิเศษนี้ เราจะทำการศึกษาค้นคว้าคุณสมบัติต่างๆ ทางควอนตัมของแสงและเลือกใช้ Avalanche photodiode (APD) เป็นตัวตรวจวัดโฟตอนเดี่ยวและทำการตรวจวัดค่าพลังงานของโฟตอนเดี่ยวแต่เพื่อให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นจึงมีการใช้วงจรรีเลย์ทรอนิกส์เพื่อเป็นการลดสัญญาณรบกวนควอนตัม

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานมีดังนี้

1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและหลักการทางควอนตัมของแสงหรือควอนตัมของโฟตอน
2. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและหลักการของ Photon detector และเลือกใช้งานได้ถูกต้อง
3. ศึกษาค้นคว้าและออกแบบวงจรที่ใช้ทำเป็นเครื่องมือตรวจวัดโฟตอนเดี่ยว
4. ศึกษาค้นคว้าและใช้งาน Thermo-cooling circuit เพื่อใช้ลดสัญญาณรบกวนทางควอนตัม
5. ทำการศึกษาและออกแบบระบบของ SPD
6. ทำการศึกษาและออกแบบวิธีการทดลองในการตรวจวัดโฟตอนเดี่ยว

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการพิเศษนี้ คือ

1. ทำให้ได้รับความรู้เพิ่มเติมในการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีทางควอนตัมของแสงและ QC
2. ทำให้ทราบถึงทฤษฎีและหลักการตรวจวัดของชุดตรวจวัดโฟตอนเดี่ยว
3. ทำให้ได้รับความรู้เพิ่มเติมในการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับ Thermo-cooling circuit



บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ธรรมชาติของแสง

แสงเป็น “พลังงาน” ที่สามารถทำให้ประสาทตาของคนปกติเกิดความรู้สึกในการมองเห็นและสามารถเปลี่ยนรูปกับพลังงานอื่นได้ ในราวกลางศตวรรษที่ 17 ที่ผ่านมา คนโดยทั่วไปเชื่อว่า แสงประกอบด้วยลำของอนุภาคเล็ก ๆ ซึ่งถูกปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดแสง โดยที่อนุภาคเล็ก ๆ เหล่านี้จะเคลื่อนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงในแนวเส้นตรง และจะผ่านวัตถุโปร่งแสงไปได้ แต่ถ้าตกกระทบวัตถุทึบแสงจะสะท้อนกลับมาและเมื่ออนุภาคเล็ก ๆ เหล่านี้กระทบกับดวงตา จะทำให้เราสามารถมองเห็นวัตถุได้ และสามารถที่จะใช้ทฤษฎีของอนุภาคนี้อธิบายการเดินทางเป็นเส้นตรง การสะท้อนกลับจากผิวเรียบด้วยมุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบ และการหักเหเมื่อเคลื่อนผ่านตัวกลางชนิดหนึ่งไปยังตัวกลางอีกชนิดหนึ่ง

ในขณะเดียวกันมีนักวิทยาศาสตร์บางคนเกิดความคิดว่า แสงบางที่อาจจะไม่ใช่การประกอบด้วยอนุภาคเล็ก ๆ เพียงอย่างเดียว แต่อาจจะเป็นคลื่นบางก็ได้ ในปี ค.ศ. 1670 คริสเตียน ฮอยเกนส์ (Christian Huygens) ได้อธิบายให้เห็นว่า กฎการสะท้อนและการหักเหสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีคลื่น และยังสามารถอธิบายปรากฏการณ์ใหม่ได้อีกด้วย เช่น การหักเหเชิงซ้อน แต่ในขณะนั้นคนส่วนใหญ่ยังไม่ยอมรับความคิดนี้จึงมีข้อขัดแย้งเกิดขึ้นคือ ถ้าแสงเคลื่อนที่เป็นคลื่นจริงแล้วก็ย่อมสามารถมองเห็นแสงอ้อมผ่านมุมห้องได้ ทั้งนี้เพราะคลื่นนั้นสามารถอ้อมผ่านวัตถุได้ อย่างไรก็ตามความยาวช่วงคลื่นของคลื่นแสงนั้นสั้นมากซึ่งแม้แสงจะสามารถหักเหผ่านสิ่งกีดขวางได้ก็ตามก็ยังมองเห็นได้ ผู้สังเกตเห็นปรากฏการณ์อันนี้คือ กริมาลดี (Grimaldi) ในปี ค.ศ. 1665 และเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการเลี้ยวเบนของแสง (Diffraction of light)

ในปี ค.ศ. 1827 ยู้ง (Young) และเฟรสเนล (Fresnel) ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับเรื่องการแทรกสอด (Interference) และการวัดความเร็วของคลื่นแสงในของเหลว ซึ่งการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การใช้ทฤษฎีของอนุภาคอย่างเดียวไม่เพียงพอ ต้องใช้ปรากฏการณ์แทรกสอดและเลี้ยวเบนของแสงอธิบาย

ในปี ค.ศ. 1873 เจมส์ คลาร์ก แมกซ์เวลล์ (Jame Clerk Maxwell) นักวิทยาศาสตร์ชาวสก๊อตได้พิสูจน์ให้เห็นว่าวัตถุที่สามารถสั่น (Oscillate) ได้ จะต้องแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา ความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นสามารถประมาณ 3×10^8 เมตร/วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งค่าที่วัดได้นี้จะเท่ากับความเร็วในการเคลื่อนที่ของแสงที่วัดได้จริง ๆ จากหลักฐานที่วัดได้นี้จึงยืนยันได้ว่าแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญประการหนึ่งที่สนับสนุนการมีพฤติกรรมเชิงแสง โดยมีความยาวช่วงคลื่นสั้นมาก ภายหลังจากการทดลองของแมกซ์เวลล์แล้ว ในปี ค.ศ. 1888 ไฮน์ริช รูดอล์ฟ เฮิร์ตซ์ (Heinrich Rudolf Hertz) ได้ใช้วงจรกำเนิดความถี่สร้างคลื่นที่มีความยาวคลื่นสั้นมาก เรียกว่า ไมโครเวฟ และแสดงให้เห็นว่าคลื่นนี้มีคุณสมบัติของคลื่นแสงทุกประการ กล่าวคือสะท้อนได้ หักเหได้ โฟกัสไปรวมกันที่จุดหนึ่งโดยใช้เลนส์ได้ และมีสมบัติโพลาไรซ์ได้เช่นเดียวกับคลื่นแสง ดังนั้นทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์และการทดลองของเฮิร์ตซ์จึงนำมาสู่ความคิดที่ว่าแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในราวศตวรรษที่ 19 คนส่วนใหญ่จึงเชื่อว่าแสงเป็นคลื่นชนิดหนึ่ง อย่างไรก็ตามทฤษฎีนี้ยังไม่สามารถที่จะอธิบายถึงปรากฏการณ์ปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากผิวของตัวนำ เมื่อมีคลื่นมาตกกระทบผิวของตัวนำนั้นได้

อย่างไรก็ตาม ก็มีความยุ่งยากเกิดขึ้น เมื่อ เฮิร์ตซ์ ได้พบความจริงจากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect) ว่ามีโฟโตอิเล็กตรอนหลุดออกมาจากผิวโลหะซึ่งมีแสงตกกระทบ โดยที่พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนดังกล่าวไม่ขึ้นกับความเข้มของลำแสง จึงถือได้ว่าขัดต่อทฤษฎีคลื่นของแสง ซึ่งจะต้องชี้ให้เห็นว่าลำแสงที่มีความเข้มมาก ก็ย่อมจะให้พลังงานแก่อิเล็กตรอนด้วยปริมาณที่มากด้วย

แมกซ์ พลังค์ (Max Planck) เป็นผู้หนึ่ง que พัฒนาแนวคิดเกี่ยวกับการกระทำให้เป็นควอนตัม (Quantization) ของพลังงาน และในปี ค.ศ. 1905 อัลเบิร์ต ไอน์สไตน์ (Albert Einstein) ได้เป็นผู้ที่ผนวกแนวคิดของพลังค์เข้ากับแสงและได้ตั้งสมมติฐานไว้ว่า พลังงานของลำแสงแทนที่จะถูกปล่อยออกมาผ่านบรรยากาศในรูปของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้านั้นกลับรวมกันเป็นกลุ่มก้อนเรียกว่า โฟตอน (Photon) โดยโฟตอนแต่ละกลุ่มจะมีความถี่โดยเฉพาะ และมีพลังงานแปรผันตามความถี่ของกระบวนการปลดปล่อยเนื่องจากไฟฟ้าพลังแสง (Photoelectric emission) ซึ่งขึ้นอยู่กับการถ่ายเทพลังงานจากโฟตอนไปสู่อิเล็กตรอน และต่อมามีลลิแกน (Millikan) ได้ทำการทดลองซึ่งสรุปผลที่ได้จากการทดลองได้ว่า พลังงานจลน์ของโฟตอนนั้นเป็นไปตามทฤษฎีของไอน์สไตน์ทุกประการ

2.1.1 การเป็นคลื่นของแสง

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งซึ่งจะมีความสัมพันธ์ดังนี้ โดยถ้าให้ λ คือ ความยาวคลื่นแสง ν คือความถี่ และ c_0 คือความเร็วของแสงที่เดินทางในสุญญากาศ ($c_0 = 2.99792458 \times 10^8$ m/s) จะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\lambda = \frac{c_0}{\nu} \quad (2.1)$$

แสงที่ตามนุษย์เรามองเห็นเรียกว่า แสงมองเห็น (Visible light) ซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงประมาณ 400 – 700 nm แสงมองเห็นนี้ในสเปกตรัมแสงมีการแบ่งเป็นสีต่าง ๆ ได้แก่แสงสีม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง ส้ม และแดง ในจำนวนแสงสีต่าง ๆ เหล่านี้สีที่มนุษย์มีความไว (Sensitivity) มากที่สุดคือแสงสีเขียว รูปที่ 2.1 แสดงความถี่และความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่างๆ

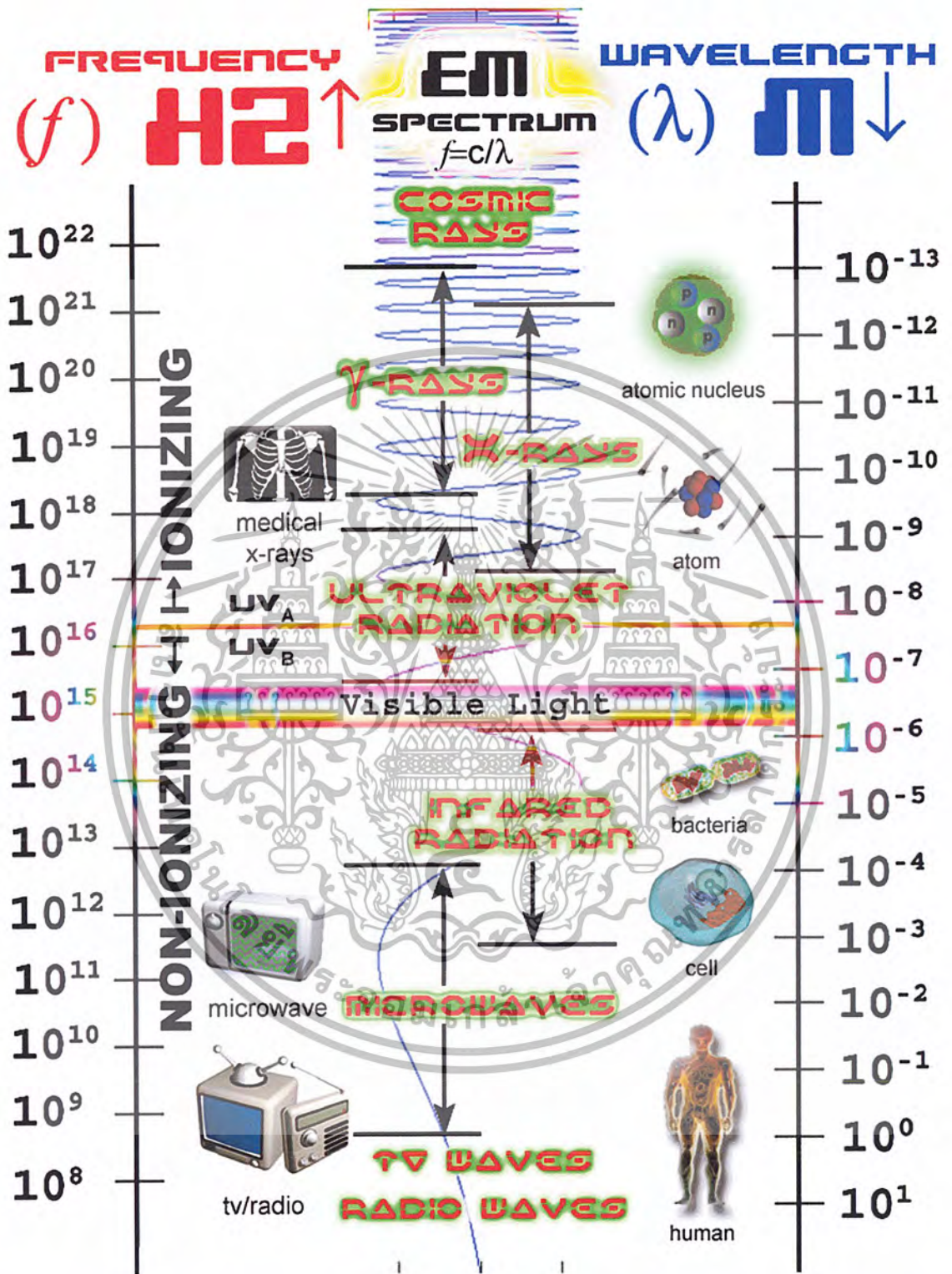
ถ้าแสงเดินทางในวัสดุที่มีเนื้อราบเรียบตลอดและเป็นวัสดุไอโซทรอปี แสงจะเดินทางเป็นเส้นตรง แต่ถ้าแสงเดินทางจากวัสดุหนึ่งไปสู่วัสดุอีกชนิดหนึ่ง ที่รอยต่อระหว่างวัสดุทั้งสองนั้นแสงจะหักเหหรือสะท้อนกลับได้ การเดินทางของแสงในวัสดุที่มีค่าดัชนีหักเหแสงเท่ากับ n จะทำให้ความเร็วของแสงช้ากว่าในสุญญากาศ กล่าวคือความเร็วแสง c ในวัสดุจะเท่ากับ

$$c = \frac{c_0}{n} \quad (2.2)$$

ค่าดัชนีหักเหแสง n ของวัสดุใด ๆ จะขึ้นกับความยาวคลื่นหรือความถี่ของแสงด้วย และค่า n นี้มีความสัมพันธ์กับค่าคงตัวไดอิเล็กทริก ϵ ของวัสดุ (Dielectric constant) ดังนี้

$$n = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}} \quad (2.3)$$

โดยที่ ϵ_0 คือค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ $= 8.85418782 \times 10^{-12}$ F/m



รูปที่ 2.1 แสดงความถี่และความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

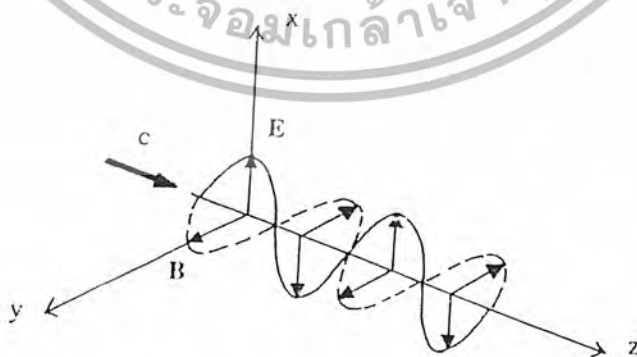
2.1.2 การเป็นอนุภาคของแสง

แสงนอกจากมีคุณสมบัติเป็นคลื่นแล้วยังมีคุณสมบัติเป็นอนุภาคด้วย เราเรียกอนุภาคแสงว่า โฟตอน (Photon) การกล่าวถึงแสงในลักษณะโฟตอนถือได้ว่าเป็นกรณีที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีอนุภาคของแสง และการขยายแนวคิดของแสงในลักษณะการทำให้เป็นควอนตัมได้ โดยเริ่มมาจาก พลังค์ ซึ่งเป็นผู้เสนอแนวคิดเกี่ยวกับสถานะควอนตัมของพลังงาน และมีความเชื่อเกี่ยวกับค่าอันจำกัดของพลังงาน เมื่อโมเลกุลตัวหนึ่งมีสถานะควอนตัมของพลังงานเปลี่ยนแปลงแนวคิดดังกล่าวก็นับได้ว่าเป็นสิ่งสำคัญส่วนหนึ่งของฟิสิกส์ควอนตัม และจากการศึกษาปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกของไอน์สไตน์ ซึ่งกล่าวเน้นถึงการเกิดโฟโตอิเล็กตรอนอันเนื่องมาจากโฟตอนตกกระทบผิวโลหะชนิดหนึ่ง และจากการศึกษาปรากฏการณ์คอมป์ตันซึ่งสามารถขยายแนวความคิดเกี่ยวกับโฟตอนของแสงได้อีก

2.2 ควอนตัมของแสง

2.2.1 โพลาริเซชันของแสง

เมื่อต้องการพิจารณาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) ซึ่งถือว่าเป็นคลื่นระนาบที่มีการแผ่ในทิศทางหนึ่ง และเป็นคลื่นโพลาริเซชันเชิงเส้น โดยมีสนามไฟฟ้า (Electric field "E") และสนามแม่เหล็ก (Magnetic field "B") อยู่ในทิศทางอันจำกัด เช่น สมมติให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่ไปตามแนวแกน z โดยมีสนามไฟฟ้า (E) และสนามแม่เหล็ก (B) ซึ่งต่างก็มีค่าแปรผันเป็นรูปไซน์อยู่ในระนาบ z-x และระนาบ y-z เทียบกับแกน z ดังกล่าว ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ดังนั้น จึงพิจารณาสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของขนาดสนามไฟฟ้า (E) และของขนาดสนามแม่เหล็ก (B) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ไปตามแกน z ด้วยอัตราเร็ว c เมื่อเปรียบเทียบกับสมการคลื่นแผนเดิมจะได้

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (2.4)$$

และ

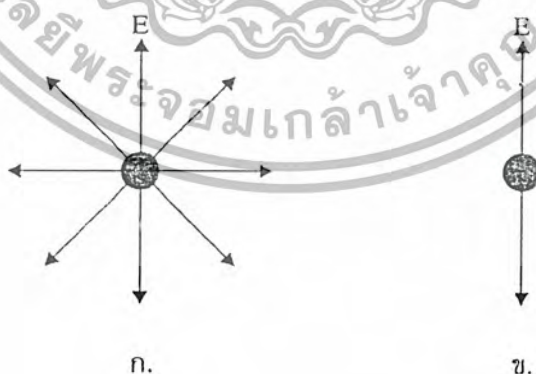
$$\frac{\partial^2 B}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} = 0 \quad (2.5)$$

แสดงว่าผลที่ได้มีลักษณะสมบัติของคลื่นระนาบ และข้อสมมติที่สอดคล้องกับของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

นอกจากนี้ ยังปรากฏว่า $E \cdot B = 0$ ที่เป็นผลสะท้อนได้ทางหนึ่งว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นตามขวาง (Transverse wave) โดยไม่ได้มีข้อยกเว้นประการใดเกี่ยวกับสมบัติคลื่นตามขวางของแสงซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง

เมื่อพบความจริงว่าแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ความจริงต่าง ๆ ที่เรากล่าวถึงก็จะเป็นสมบัติของแสงไปโดยปริยาย

โพลาริเซชันที่จะกล่าวถึงจะเป็นการเน้นถึงสมบัติตามขวางของแสงได้



รูปที่ 2.3 แสดงสนามไฟฟ้าของคลื่นแสง

(ก). แสงไม่โพลาริเซชัน

(ข). แสงโพลาริเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามไฟฟ้าของคลื่นแสง ซึ่งเกิดจากการสั่นของอะตอมหรือโมเลกุลของต้นทางแสงมีการเปลี่ยนแปลงตามทิศทางต่าง ๆ ซึ่งอยู่ในระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางการแผ่ของคลื่น ในลักษณะที่รู้จักกันในนามแสงไม่โพลาไรซ์ (Unpolarized light) เช่นในรูปที่ 2.3 ก. สนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในระนาบของกระดาษแผ่นหนึ่ง ขณะที่คลื่นแสงแผ่ตามทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบของกระดาษแผ่นนั้น แต่ถ้การเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าดังกล่าวนั้นอยู่ในแนวหนึ่ง เช่น ตามทิศทางขึ้นหรือลง ดังรูปที่ 2.3 ข. ย่อมแสดงว่าคลื่นแสงขณะนั้นเป็นแสงโพลาไรซ์ และเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงในแนวทงหนึ่งตลอดเวลา จึงนิยมกล่าวถึงว่าแสงโพลาไรซ์เชิงเส้น (Linearly polarized light) เช่นเดียวกับที่เรียกคลื่นโพลาไรซ์เชิงเส้น หรือบางที่อาจเรียกว่าแสงโพลาไรซ์ระนาบ (Plane-polarized light)

ถ้ย้อนกลับไปดูรูปที่ 2.2 อีกครั้งหนึ่ง จะพบความจริงว่าสนามไฟฟ้าแกว่งกวัดอยู่ในระนาบ $z - x$ ซึ่งก็คือระนาบโพลาไรซ์ (Polarized plane) นั้นเอง การโพลาไรซ์แบบการดูดกลืนเลือก (Selective absorption)

ถ้คิดเวกเตอร์สนามไฟฟ้าของแสงซึ่งไม่โพลาไรซ์เป็น 2 แนว ซึ่งตั้งฉากกันแสงที่โพลาไรซ์จะมีเพียงสนามไฟฟ้าเหลือเพียงแนวเดียว กรรมวิธีของการดูดกลืนเลือกโดยใช้สารบางชนิดที่ยอมให้เฉพาะเวกเตอร์สนามไฟฟ้าซึ่งสั้นในระนาบหนึ่งที่ขนานกับแกนส่งผ่าน (Transmission axis) หรือแกนโพลาไรซ์ (Polarization axis) เท่านั้นผ่านไปได้ และดูดกลืนสนามไฟฟ้าที่สั้นอยู่ในอีกระนาบหนึ่ง ซึ่งตั้งฉากกับระนาบเดิมนั้น



รูปที่ 2.4 แสดงแสงโพลาไรซ์จากแหล่งกำเนิดตกกระทบตัวทำโพลาไรซ์

(ก). แกนโพลาไรซ์ของตัววิเคราะห์ขนานกับของตัวทำโพลาไรซ์ ก็จะมีแสงโพลาไรซ์ผ่านไปได้

(ข). แกนโพลาไรซ์ของตัววิเคราะห์ตั้งฉากกับของตัวทำแสงโพลาไรซ์

ตัวนั้นก็ไม่มีการผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติว่าแสงโพลาไรซ์จากแหล่งต้นทางแสงแหล่งหนึ่ง (S) ซึ่งตกกระทบตัวทำแสงโพลาไรซ์ เช่น โพลารอยด์แผ่นหนึ่ง (P) จะมีเฉพาะแสงโพลาไรซ์ตามแกนโพลาไรซ์ของตัวทำแสงโพลาไรซ์ตัวนั้นที่ผ่านออกไปสู่ตัววิเคราะห์ เช่น โพลารอยด์อีกแผ่นหนึ่ง (A) ถ้าแกนโพลาไรซ์หรือแกนส่งผ่านของตัววิเคราะห์ขนานกับของตัวทำโพลาไรซ์ก็จะมีแสงโพลาไรซ์ผ่านไปได้ ดังรูปที่ 2.4 ก. แต่ถ้าแกนส่งผ่านของตัววิเคราะห์ตั้งฉากกับของตัวทำแสงโพลาไรซ์ตัวนั้นก็ไม่มีแสงผ่านตัววิเคราะห์ตัวนี้ไป ดังรูปที่ 2.4 ข.

ถ้าสมมติเป็นกรณีทั่วไปดังนี้

I_0 แทนความเข้มแสง ซึ่งผ่านตัวทำแสงโพลาไรซ์ตัวหนึ่ง มีขนาดแอมพลิจูดสนามไฟฟ้าคือ E_0

I แทนความเข้มแสง ซึ่งผ่านตัววิเคราะห์ตัวหนึ่งที่มีแกนส่งผ่านกระทำมุม θ กับแกนโพลาไรซ์ของตัวทำแสงโพลาไรซ์ตัวนั้น

และ $E_0 \cos \theta$ แทนขนาดแอมพลิจูดสนามไฟฟ้าที่อยู่ในแนวขนานกับแกนส่งผ่านของตัววิเคราะห์ตัวดังกล่าว จะเป็นส่วนที่ผ่านไปได้

ประกอบกับความสัมพันธ์เกี่ยวกับค่าความเข้มของแสงที่เป็นสัดส่วนกับกำลังสองของค่าแอมพลิจูดสนามไฟฟ้า

มีกฎที่รู้จักกันในนามกฎของมาลัส (Malus's law) ดังนี้

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (2.6)$$

2.2.2 สมมุติฐานเดอบรอยล์

เดอบรอยล์ได้ให้สมมุติฐานถึงธรรมชาติทวิภาคของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าไว้ดังนี้

1. การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีโมเมนตัม p นำโดยคลื่นที่มีความยาวคลื่น λ

จาก

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (2.7)$$

เมื่อ h เป็นค่าคงตัวของพลังค์

2. ค่าแอมพลิจูดกำลังสองของคลื่นที่มีความยาวคลื่น λ เป็นปฏิภาคกับความน่าจะเป็นของการพบอนุภาคที่มีโมเมนตัม p โดยที่

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad (2.8)$$

เดอบรอยล์ได้ใช้สมการที่กล่าวมาเป็นสมการทั่วไปที่สามารถประยุกต์ต่ออนุภาคของสสารทั้งหลายได้ทั้งหมด รวมถึงอนุภาคโฟตอนด้วยโมเมนตัมของอนุภาคตัวหนึ่งที่มีมวล m และความเร็ว v จะมีค่าเป็น

$$p = mv \quad (2.9)$$

และความยาวคลื่นเดอบรอยล์ (de Broglie wavelength)

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad (2.10)$$

ดังนั้นโมเมนตัมของอนุภาคยิ่งมาก ความยาวคลื่นก็ยิ่งสั้น ในสมการที่ m คือ มวลเชิงสัมพัทธ์

2.3 สัญญาณรบกวน

สัญญาณรบกวน (Noise) คือสัญญาณหรือข้อมูลที่ไม่ต้องการ เมื่อมีการเกิดสัญญาณรบกวนเข้ามาเกี่ยวข้องจะทำให้ข้อมูลที่ได้เกิดข้อผิดพลาด และจะทำให้ตัวตรวจวัดแสงมีค่า Accuracy และ Precision ต่ำลง สัญญาณรบกวนนั้นเกิดจากอุณหภูมิและ Quantum effect หรืออาจเกิดจากตัวอุปกรณ์เครื่องมือเอง ซึ่งสัญญาณรบกวนมีหลายแบบ คือ

1. Thermal noise
2. Shot noise หรือ Quantum noise
3. Flicker หรือ $1/f$ noise
4. Environmental noise

2.3.1 Thermal noise

เกิดจากความร้อนเข้าไปกระตุ้นทำให้อิเล็กตรอนหรือเกิดประจุพาหะอื่น ๆ เกิดการไหลไม่สม่ำเสมอในส่วนต่าง ๆ ของระบบการตรวจวัด ซึ่งจะมีทั้งชนิดที่เป็นสุ่มและแบบเกิดเป็นช่วง ๆ จึงเกิดความไม่สม่ำเสมอขึ้นในส่วนต่าง ๆ และเมื่อมีการให้แรงดันไฟฟ้าเข้าวงจร ก็จะไปทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอมากขึ้น

2.3.2 Shot noise หรือ Quantum noise

Shot noise เป็นทั้งกระแสไฟฟ้าและคุณสมบัติทางแสง ซึ่งเป็นกระแสที่ไหลอย่างราบเรียบเพราะสามารถหาค่าได้ คือกระแสไฟฟ้าในหน่วยของอิเล็กตรอนและแสงในหน่วยของโฟตอน ซึ่งเป็นการไหลที่ไม่แน่นอนทั้งคู่ ดังนั้นขึ้นอยู่กับอัตราการไหลเฉลี่ย ณ ช่วงขณะหนึ่ง จะมีการไหลของควอนตัมจำนวนมาก ในเวลาต่อมาก็จะน้อยลง จะสามารถคิดกระแสในขณะที่ยังขาด

Shot noise เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอย่างอิสระของอิเล็กตรอนที่ขับออกมาหรือการมาถึงของควอนตัมจำนวนมากในอิเล็กตรอนหรือโมกกีโฟตอนอย่างใดอย่างหนึ่ง ในกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างอิสระจะเกิดกับอิเล็กตรอนในขณะที่ Cross junction ในทรานซิสเตอร์หรือการมาถึงที่ผิวหน้าเช่นเดียวกับโฟตอนที่ออกจากแหล่งกำเนิดแสงแบบการเปลี่ยนแปลงอย่างอิสระ ดังนั้นโฟตอนที่มาถึงที่ผิวหน้าจะแสดงถึง Shot noise

ในขณะที่ทั้งตัวอย่างจริงและตัวอย่างที่สมมติขึ้น เราจะอยู่ภายใต้หลังคาสังกะสีเมื่อเริ่มฝนตก เราจะได้ยินเสียงฝนตกกระทบหลังคาสังกะสีแต่ละหยด เสียงจะดังมากจนค่อย ๆ เบาลง และเมื่อฝนตกแรงขึ้นเสียงก็จะดังมากขึ้นถึงแม้ว่าเสียงแต่ละหยดที่ตกลงมาจะไม่สามารถสังเกตได้ อย่างไรก็ตามถ้าฝนตกหนักเกิดขึ้นตามมาจริง เสียงจะเริ่มดังมากขึ้น ค่าเฉลี่ยของฝนแต่ละหยดนั้นคือฝนที่ตกลงบนหลังคาเท่านั้น เสียงสั้น ๆ นี้เรียกว่า Shot noise ดูเหมือนจะเหมาะสมที่สุด ส่วนชื่ออื่นนั้นคือ Quantum noise และ Schottky noise

$$I_{noise} (rms) = \sqrt{2qI_{dc} B} \quad (2.11)$$

q คือ ค่าประจุของอิเล็กตรอน (1.60×10^{-19} คูลอมบ์)

B คือ ค่าที่วัดจากแบนวิดท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 Flicker หรือ 1/f noise

Flicker หรือ 1/f noise เป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความแปรปรวนของค่า Conductivity ในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะเกิดในช่วงความถี่ต่ำ (>100 Hz) นั่นก็คือ Flicker หรือ 1/f noise เป็นสัญญาณรบกวนที่ขึ้นกับความถี่ของสัญญาณที่วัด สัญญาณรบกวนชนิดนี้จะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของขนาด 1/f ซึ่งจะมีผลเกี่ยวข้องกับส่วนประกอบของวงจรรวมและสารกึ่งตัวนำ

2.3.4 Environment noise

เป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดจากสิ่งแวดล้อม สภาพภายนอกอุปกรณ์หรือระบบการวัด มีการเหนี่ยวนำเข้ามาสู่ระบบการวัด เช่น มาจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า การจุดระเบิดเครื่องยนต์ ฟิวแล็บ เป็นต้น Environment noise มักจะเกิดในย่านความถี่ช่วงไฟฟ้าตามบ้าน (50 Hz)

2.4 การลดสัญญาณรบกวน

เป็นการยากที่เราจะกำจัดสัญญาณรบกวนให้หมดไปได้ แต่เราก็ยังสามารถที่จะลดทอนสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นได้ การลดทอนสัญญาณรบกวนจะมีวิธีคือ

2.4.1 การลดทอนสัญญาณแบบ Thermal noise

1. ลดองค์ประกอบส่วนที่ทำให้เกิดความร้อน (Lower component temperature)
2. วัดในแถบความถี่การตอบสนองไม่กว้างนัก (Minimize bandwidth frequency)
3. ระบายความร้อนหรือการหล่อเย็นส่วนที่เป็นตัวตรวจวัดสัญญาณเริ่มต้น ถ้าหล่อเย็นด้วย Liquid N_2 ที่ 77 K จะทำให้สัญญาณรบกวนแบบ Thermal noise ลดลงได้ประมาณครึ่งหนึ่งจากที่อุณหภูมิห้อง

2.4.2 การลดทอนสัญญาณแบบ Shot noise หรือ Quantum noise

1. ออกแบบและลดองค์ประกอบของวงจรรวมไฟฟ้า
2. ระบายความร้อนหรือการหล่อเย็นส่วนที่เป็นตัวตรวจวัดสัญญาณเริ่มต้น ถ้าหล่อเย็นด้วย Liquid N_2 เพื่อลดการสั่นของอนุภาค

2.4.3 การลดทอนสัญญาณแบบ Flicker หรือ 1/f noise

1. ลดด้วยการใช้ความต้านทานชนิดเส้นลวด (Wire-Wound) หรือชนิด Metallic flim มากกว่าชนิดธรรมดาทั่วไป
2. Reduce current
3. Design for narrow bandwidth
4. Use high quality components

2.5 การตรวจจับสัญญาณควมด้ม

2.5.1 โฟโตไดโอด

โฟโตไดโอด (Photodiode) เป็นสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงชนิดโฟโตอิเล็กทริกแบบภายใน (Internal photoelectric) มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดรอยต่อ pn เมื่อมีแสงตกกระทบบที่รอยต่อ pn จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าและแรงดันขึ้น สำหรับในระบบการสื่อสารด้วยแสงนิยมใช้โฟโตไดโอดชนิดพิเศษที่ทำงานได้รวดเร็วมากคือ พินโฟโตไดโอดและอะวอลานซ์โฟโตไดโอด

2.5.2 โครงสร้างของโฟโตไดโอดชนิดต่าง ๆ

โฟโตไดโอดเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงอินพุตเป็นสัญญาณไฟฟ้าเอาต์พุตได้เมื่อมีแสงตกกระทบบ ปัจจุบันมีการพัฒนาให้โฟโตไดโอดมีโครงสร้างและคุณสมบัติเด่นแตกต่างกันออกไปมากมายหลายชนิด เช่น

- โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pn (pn photodiode) และแบ่งออกเป็น
 - ชนิดแพลนาร์ดิฟฟิวชัน (planar diffusion)
 - ชนิดแพลนาร์ดิฟฟิวชันที่มีประจุไฟฟ้าต่ำ (low capacitance planar diffusion)
 - ชนิดรอยต่อ pnn⁺
- พินโฟโตไดโอด (pin photodiode)
- โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อชอตต์กี (Schottky photodiode)
- อะวอลานซ์โฟโตไดโอด (Avalanche photodiode)

โฟโตไดโอดทั้งหมดเหล่านี้มีคุณสมบัติเด่นโดยทั่วไปคือ

1. สัญญาณเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงตามความเข้มของแสงอินพุตแบบเชิงเส้นได้ดี (excellent linearity)
2. มีสัญญาณรบกวนต่ำ (low noise)
3. ตอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงที่กว้าง (wide spectral response)
4. มีความคงทนทางกลศาสตร์ (mechanical ruggedness)
5. มีขนาดกะทัดรัดและเบา (compact & light weight)
6. มีอายุการใช้งานยาวนาน (long life time)

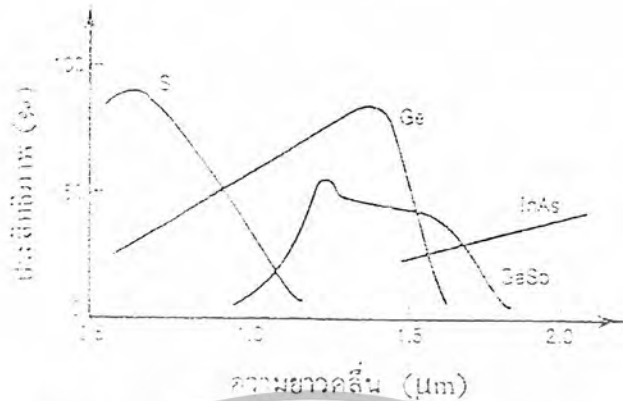
2.5.3 พินโฟโตไดโอด

พินโฟโตไดโอด (p-i-n photodiode) คือ โฟโตไดโอดที่มีรอยต่อชนิด p-i-n ซึ่งมีโครงสร้างแตกต่างจากโฟโตไดโอดธรรมดาตรงที่ระหว่างชั้น p และชั้น i คั่นอยู่ ชั้น i นี้หมายถึงชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดบริสุทธิ์ (intrinsic) ซึ่งมีความบริสุทธิ์สูงหรือมีการโด๊ปด้วยสารเจือปนด้วยปริมาณที่น้อยมาก ลักษณะเด่นของพินโฟโตไดโอดคือ จากการที่มีชั้น i จึงทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อ (junction capacitance) มีค่าน้อย จึงทำให้มีผลตอบสนองด้านเวลาได้รวดเร็วมาก (ultra-fast response speed) ถึงระดับพิโกวินาที ปัจจุบันมีการใช้งานพินโฟโตไดโอดเป็นตัวตรวจรับสัญญาณแสงกันอย่างแพร่หลายในระบบที่ต้องการทำงานอย่างรวดเร็ว

2.5.3.1 พินโฟโตไดโอดชนิดวัสดุต่างๆ

2.5.3.1.1 พินโฟโตไดโอดชนิดวัสดุธาตุเดี่ยวและชนิดสารประกอบไบนารี

ตัวอย่างสารกึ่งตัวนำชนิดธาตุเดี่ยวและสารประกอบไบนารีที่นิยมใช้ผลิตเป็นพินโฟโตไดโอดได้แก่ Si Ge GaSb และ InAs ในรูปที่ แสดงสเปกตรัมการตอบสนองของพินโฟโตไดโอดเหล่านี้



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างสเปกตรัมผลการตอบสนองของพินโฟโตไดโอดที่ผลิตจากวัสดุชนิดต่างๆ

GaAs เป็นวัสดุที่มีราคาแพงและสเปกตรัมผลการตอบสนองก็สามารถครอบคลุมได้ด้วยวัสดุเหล่านี้ ดังนั้นจึงไม่ค่อยมีการผลิตพินโฟโตไดโอดจาก GaAs

Si เป็นวัสดุที่มีราคาถูกที่สุดและเหมาะกับแสงที่มีความยาวคลื่นสั้น ตัวอย่างมีการใช้เป็นตัววัดแสงในระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วนำแสงที่มีความยาวคลื่น 0.85 µm

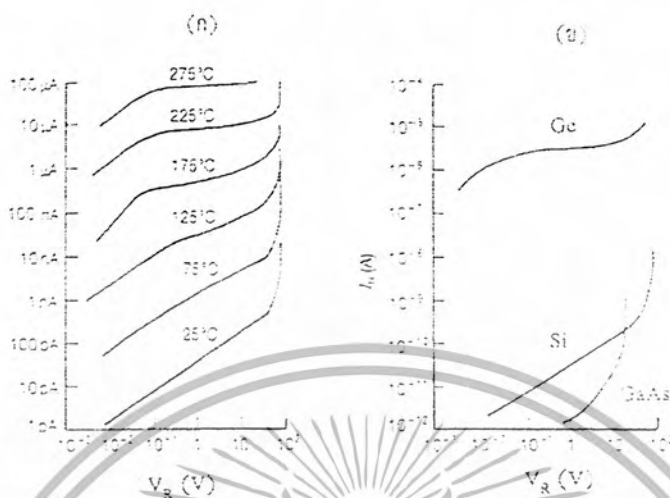
Ge สามารถใช้วัดแสงที่มีความยาวคลื่นถึงย่านประมาณ 1.5 µm

GaSb สามารถวัดแสงที่มีความยาวคลื่นได้ยาวกว่า Ge เล็กน้อย

InAs สามารถวัดแสงที่มีความยาวคลื่นได้หลายไมครอน

โครงสร้างของพินโฟโตไดโอดที่มีการผลิตจริงแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.7 ในรูป ก. แผ่นฐานได้แก่สารกึ่งตัวนำชนิด n ต่อจากนั้นมีการปลูกผลึกชนิด i ชั้นทับและที่ผิวบนแพร่ซึมสารเจือปนให้เป็นชนิด p ชั้น p ด้านบนนี้จะบางมาก ที่ผิวบนจะมีฉนวนของ SiO₂ เพื่อกำหนดตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าด้านบนลักษณะของขั้วไฟฟ้าด้านบนนั้นจะเปิดช่องออกเพื่อให้แสงเข้าสู่ชั้น p ได้โดยตรง อย่างไรก็ตามสามารถเปลี่ยนชนิดของสารกึ่งตัวนำสลับบนล่างให้เป็น nip ก็ได้เช่นกัน

ส่วนในรูป ข. เป็นกรณีที่ออกแบบเพื่อให้แสงเข้าทางด้านข้าง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อไม่ต้องการให้การดูดกลืนแสงด้วยชั้น p ก่อนที่แสงจะเข้าถึงชั้น i และที่ด้านหลังมีการเคลือบวัสดุสะท้อนแสง แต่โครงสร้างนี้ต้องใช้แรงดันไบอัสสูงมาก เพราะชั้น i มีความหนาเป็นพิเศษ



รูปที่ 2.6 (ก) การขึ้นแรงดันไบอัสย้อนของกระแสไฟฟ้ามืดของพินโฟโตไดโอดชนิด Si โดยที่พารามิเตอร์คือ อุณหภูมิขณะทำงาน
 (ข) การเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้ามืดของพินโฟโตไดโอดชนิด Ge, Si



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างโครงสร้างของพินไดโอดที่มีการผลิตจริง

- (ก) รอยต่อ pin ลักษณะของขั้วไฟฟ้าด้านบนจะเปิดช่องออกเพื่อให้แสงเข้าสู่ชั้น p ได้โดยตรง
- (ข) การออกแบบเพื่อให้แสงเข้าทางด้านข้าง

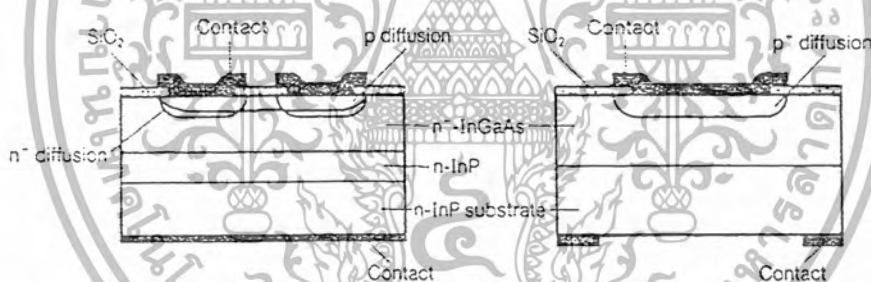
2.5.3.1.2 พินโฟโตไดโอดชนิดสารประกอบเทอร์นารี และสารประกอบควอเทอร์นารี

ย่านความยาวแสงที่นิยมใช้ในระบบการสื่อสารด้วยแสงย่านหนึ่งในปัจจุบันคือย่าน 1.3 – 1.55 μm สารกึ่งตัวนำที่มีความไวแสงย่านนี้มากที่สุดได้แก่

1. สารประกอบกึ่งตัวนำชนิดเทอร์นารี หรือ ชนิดไตรภาค (ternary compound semiconductors) ซึ่งประกอบด้วยธาตุ 3 ชนิด เช่น InGaAs

2. สารประกอบกึ่งตัวนำชนิดควอเทอร์นารี หรือ ชนิดจตุภาค (quaternary compound semiconductors) ซึ่งประกอบด้วยธาตุ 4 ชนิด เช่น InGaAsP และ AlGaSb ซึ่งใช้ InP และ GaSb เป็นแผ่นฐานตามลำดับ

รูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างโครงสร้างของพินโฟโตไดโอดชนิด GaInAs ที่มีโครงสร้างแบบแพลนาร์ สังเกตว่าที่ผิวด้านบนมีการเคลือบวัสดุเพื่อลดการรวมตัวของพาหะที่ผิว ทำให้สามารถลดกระแสไฟรั่วให้ต่ำกว่า $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ และโครงสร้างแบบแพลนาร์นี้จะเป็นประโยชน์และง่ายต่อการพัฒนาให้เป็นสิ่งประดิษฐ์จิวเจอร์รวมไอซีทางแสงได้อีกด้วย



(ก) แสงเข้าทางด้านบนหรือด้านข้าง (ข) แสงเข้าทางด้านแผ่นฐานด้านล่าง

รูปที่ 2.8 ตัวอย่างโครงสร้างของพินโฟโตไดโอดชนิด GaInAs ที่มีโครงสร้างแบบแพลนาร์

2.5.4 อะวาลันซ์โฟโตไดโอด

อะวาลันซ์โฟโตไดโอด (Avalanche photodiode ย่อว่า APD) คือโฟโตไดโอดชนิดหนึ่งที่ทำงาานด้วยปรากฏการณ์อะวาลันซ์ (Avalanche effect) เป็นโฟโตไดโอดที่ทำงาานภายใต้การไบแอสย้อนด้วยแรงดันไฟฟ้าที่สูงมากจนสามารถเร่งพาหะที่เกิดจากแสงให้วิ่งไปชนอะตอมในผลึกจนเกิดการแตกตัวเป็นไอออนและเกิดอิเล็กตรอนชุดที่สอง (secondary electron) เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ดังนั้น APD จึงเป็นสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงที่สามารถขยายสัญญาณกระแสไฟฟ้าโฟโตและตรวจวัดสัญญาณแสงที่มีกำลังต่ำมาก ๆ ได้ดีมากและจากโครงสร้างที่มีความจุไฟฟ้าต่ำ APD จึงสามารถตอบสนองต่อแสงได้รวดเร็วมากถึงระดับพิโกวินาที ปัจจุบันมีการใช้ APD เป็นอุปกรณ์รับสัญญาณแสงในระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแสงอย่างแพร่หลาย

คุณสมบัติเด่นของ APD ได้แก่

- มีโครงสร้างเป็นสารกึ่งตัวนำ จึงมีขนาดเล็กกะทัดรัดมาก
- ทำงาานด้วยปรากฏการณ์อะวาลันซ์ จึงมีสามารถใช้วัดแสงที่มีกำลังอ่อนมาก ๆ ได้ดี
- มีผลตอบสนองต่อแสงรวดเร็วมาก (ระดับพิโกวินาที)
- ผลิตจากวัสดุได้หลายชนิด เช่น Ge, Si, InGaAs, และ InGaAsP จึงสามารถเลือกใช้วัสดุสำหรับวัดแสงที่มีความยาวคลื่นที่ต้องการได้
- ใช้วัดแสงในระบบการสื่อสารด้วยแสงได้ผลที่ดี
- มีชนิดทำงานที่อุณหภูมิต่ำเพื่อลดสัญญาณรบกวน

2.5.4.1 แรงดันไฟฟ้าพังทลาย

ในสารกึ่งตัวนำรอยต่อ p-n (หรือ p-i-n) การไบแอสแบบย้อนไม่ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหล แต่ถ้าแรงดันไบแอสย้อนมีค่าสูงเกินขีดจำกัดก็จะทำให้เกิดปรากฏการณ์อะวาลันซ์อย่างรุนแรงและจะมีกระแสไฟฟ้าไหลได้มาก เราเรียกแรงดันไฟฟ้านี้ว่า "แรงดันไฟฟ้าพังทลาย" (Breakdown voltage : V_B) แต่อย่างไรก็ตามในการใช้งานอะวาลันซ์โฟโตไดโอดนั้น เราจะป้อนแรงดันไบแอสย้อนในขอบเขตที่ยังไม่เกิดการพังทลายเพียงแต่ต้องการให้เกิดปรากฏการณ์อะวาลันซ์ด้วยอัตราการขยายที่เหมาะสมเท่านั้น เราเรียกแรงดันไฟฟ้าที่เริ่มทำให้เกิดการอะวาลันซ์ว่า "แรงดันไฟฟ้าวิกฤต" (Critical voltage : V_C) ดังนั้นการทราบค่าแรงดันไฟฟ้าพังทลายในการไบแอสย้อนจึงนับว่ามีความสำคัญในการใช้งาน

ตามปกติสนามไฟฟ้าภายในรอยต่อ p-n หรือ p-i-n จะขึ้นอยู่กับตำแหน่ง x ในรอยต่อ อย่างไรก็ตามถ้าความหนาแน่นของสารเจือปนที่โด๊ปในรอยต่อ p-n มีการเปลี่ยนค่าแบบขั้นจากชั้น p ไปสู่ชั้น n และความหนาแน่นของสารเจือปนมีค่า $N_A > N_D$ ค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้า E_0 ภายในรอยต่อจะมีค่าดังนี้

$$E_0 = -\frac{eN_D w}{\epsilon\epsilon_0} \quad (2.12)$$

และแรงดันไฟฟ้าไบแอส (รวมค่าแรงดันไฟฟ้าภายใน) มีค่าเท่ากับ

$$V = \int_0^w E_0 dx = \frac{eN_D w^2}{2\epsilon\epsilon_0} \quad (2.13)$$

โดยที่ w คือความกว้างของเขตปลอดพาหะและมีขนาดขึ้นกับแรงดันไบแอส V

ϵ คือค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของสารกึ่งตัวนำ

จากสมการที่ (2.12) และ (2.13) แรงดันไฟฟ้าพังทลาย V_B แรงดันไฟฟ้าวิกฤต V_C และความหนาแน่นของสารเจือปน N_D มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$V_B = \frac{\epsilon\epsilon_0 E_C^2}{2eN_D} \quad (2.14)$$

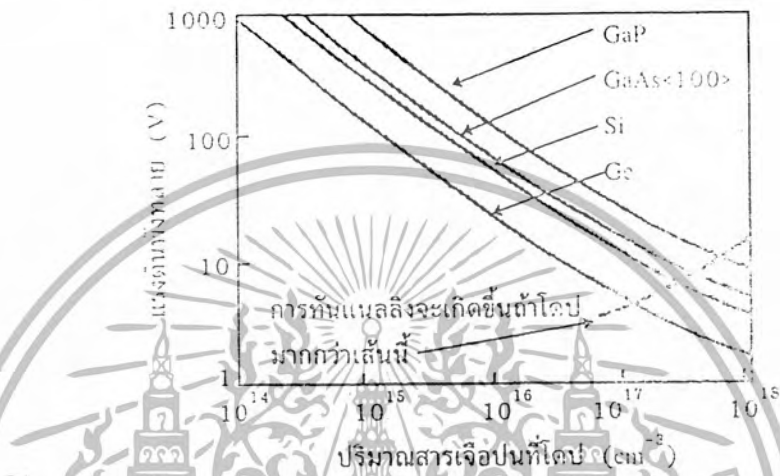
โดยที่ $E_C = V_C / w$

สมการนี้บอกให้ทราบว่า แรงดันไฟฟ้าพังทลายแปรผกผันกับความหนาแน่นของสารเจือปน รูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าพังทลายและความหนาแน่นของสารเจือปนในกรณีสารกึ่งตัวนำ 4 ชนิดซึ่งได้แก่ Si, Ge, GaP และ GaAs

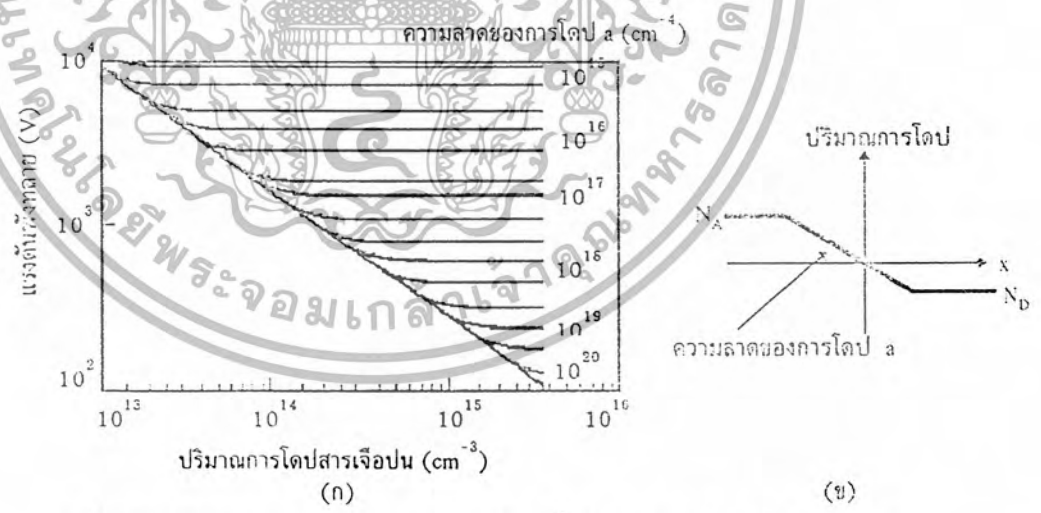
สำหรับในกรณีที่ออกแบบให้ความหนาแน่นของสารเจือปนในรอยต่อ p-n ลดลงแบบเชิงเส้นตรงด้วยความลาด a ลดลงจากชั้น p ไปสู่ชั้น n ดังที่แสดงในรูปที่ 2.10 ข จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$V_B = \left[\frac{32}{9} \frac{\epsilon\epsilon_0 E_C^3}{ea} \right]^{1/2} \quad (2.15)$$

ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าพังทลายและความหนาแน่นของสารเจือปน แสดงในรูปที่ 2.10 ก โดยที่พารามิเตอร์ a หมายถึงความลาดของความหนาแน่นของสารเจือปนในรอยต่อ p-n จากรูปพบว่าถ้าความลาด a มีค่าน้อย แรงดันพังทลายจะไม่ขึ้นกับสารเจือปนมากนัก



รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันพังทลายและความหนาแน่นในการโด๊ปสำหรับสารกึ่งตัวนำ 4 ชนิด คือ Si, Ge, GaAs และ GaP



รูปที่ 2.10 (ก) ความหนาแน่นในการโด๊ปสารกึ่งตัวนำแบบมีความลาดตามระยะทางในรอยต่อ pn

(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันพังทลายและความหนาแน่นในการโด๊ป โดยมีความลาดของการโด๊ปเป็นพารามิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4.2 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อ APD

อุณหภูมิมีอิทธิพลต่อการทำงานของ APD ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ 1.แรงดันไฟฟ้าพังทลายสูงขึ้น และ 2.กระแสไฟฟ้ามืดสูงขึ้น สาเหตุที่แรงดันไฟฟ้าพังทลายสูงขึ้น เพราะว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้โครงผลึกสั้นมากขึ้น นั่นคือโฟตอนมีจำนวนมากขึ้นซึ่งจะทำให้พาหะถูกกระเจิงมากขึ้นซึ่งจะส่งผลให้สัมประสิทธิ์การเกิดไอออนลดลง ส่วนในกรณีกระแสไฟฟ้ามืดนั้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้กระแสไฟฟ้าชนิดแพร่ซึมและชนิดเจเนอเรชันเพิ่มขึ้นนั่นเอง โดยปกติที่ใกล้ย่านอุณหภูมิห้องกระแสไฟฟ้าชนิดเจเนอเรชันรีคอมบิเนชันจะมีอิทธิพลมากกว่าชนิดแพร่ซึม

2.5.4.3 กระแสไฟฟ้ามืด

ในกรณีที่สนามไฟฟ้าไบแอสย่อนมีค่าน้อย กระแสไฟฟ้ามืดจะเกิดจากกระแสไฟฟ้าชนิดเจเนอเรชันและรีคอมบิเนชันที่รอยต่อของ InP/InGaAs และในกรณีที่สนามไฟฟ้าไบแอสย่อนมีค่ามาก กระแสไฟฟ้ามืดจะเกิดจากการทลเนลิงของอิเล็กตรอนจากแถบเวเลนซ์ไปสู่แถบคอนดักชันและกระแสไฟฟ้าทลเนลิงมีค่าดังนี้

$$I_{\text{dark}} = \frac{(2m^*)^{1/2} e^3 EVA}{4\pi^2 \eta^2 E_g^{1/2}} \exp\left(-\frac{\theta m_0^{1/2} E_g^{3/2}}{e\eta E}\right) \quad (2.16)$$

โดยที่ m^* : มวลประสิทธิผลของพาหะที่ทำกาการทลเนลิง E : สนามไฟฟ้า

V : แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมรอยต่อ A : พื้นที่ของรอยต่อ

M_0 : มวลของอิเล็กตรอนอิสระ

$\theta = \beta \left(\frac{m^*}{m_0}\right)^{1/2}$ โดยที่ β เป็นปริมาณที่ไม่มีหน่วยและมีค่าขึ้นกับลักษณะรายละเอียดของกำแพง

ศักย์

ถ้าเป็นการทลเนลิงจากแถบเวเลนซ์ไปสู่แถบคอนดักชัน β จะมีค่าใกล้เคียง 1

อนึ่งแรงดันไฟฟ้าพังทลายของ APD ที่มีโครงสร้างชนิดนี้คือ

$$V_B = 60 \times \left(\frac{E_g}{1.1}\right)^{3/2} \left(\frac{N_C}{10^{16}}\right)^{-3/4} \quad (2.17)$$

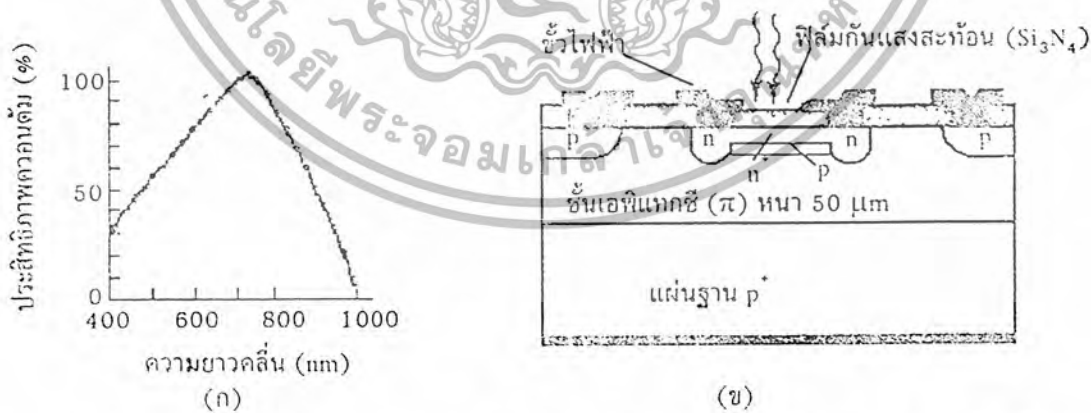
โดยที่ E_g : ช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ และ N_0 : ความหนาแน่นของสารเจือปนชนิด n

2.5.4.4 อะวาลานซ์โฟโตไดโอดชนิดซิลิคอน

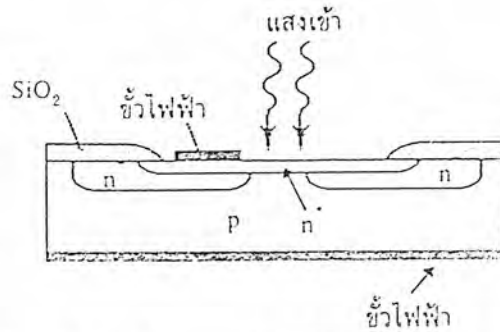
เนื่องจาก Si เป็นวัสดุที่มีการพัฒนามานานแล้ว ดังนั้น APD ในระยะเริ่มแรกส่วนใหญ่จึงผลิตจาก Si ซึ่งสามารถใช้วัดแสงได้ตั้งแต่แสงมองเห็นไปจนถึงย่านใกล้อินฟราเรดและโครงสร้างของ APD ที่กล่าวถึงข้างต้นทั้งหมดนั้นก็ชนิด Si ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่าโครงสร้างแบบรีซทอร์เป็นโครงสร้างที่ดีที่สุด มีความหนาประมาณ 5.-100 μm

รูปที่ 2.11 แสดงตัวอย่างโครงสร้างที่ใช้จริงโดยมีแผ่น Si ชนิด p^+ เป็นแผ่นฐาน แสงอินพุตส่องเข้าทางด้านชั้น n^- ที่อยู่บนสุด ที่รอบๆ ชั้น n^+ จะสังเกตเห็นว่ามีชั้น n ซึ่งมีความลึกล้อมรอบอยู่ซึ่งเรียกว่าชั้นการ์ดริง (guard ring) ชั้นการ์ดริงนี้มีหน้าที่ช่วยทำให้สนามไฟฟ้าที่ไบแอสจากภายนอกไปตกคร่อมที่บริเวณใจกลางสิ่งประดิษฐ์ให้มากที่สุด ถ้าไม่มีชั้นการ์ดริงสนามไฟฟ้าส่วนมากจะไปตกคร่อมที่บริเวณของรอบๆ สิ่งประดิษฐ์

ชั้น p ด้านนอกสุดทำหน้าที่ช่วยหยุดการแผ่ขยายของชั้นปลอดพาหะในแนวระนาบไม่ให้กว้างเกินความจำเป็น ด้วยโครงสร้างเช่นนี้ทำให้ได้ประสิทธิภาพควอนตัมภายในสูงถึงเกือบ 100% รูปที่ 2.11 ข. แสดงสเปกตรัมผลตอบสนองของ APD ชนิด Si ซึ่งมียอดสเปกตรัมอยู่ที่ประมาณ 700 nm ช่วงเวลาขาขึ้นและขาลงประมาณ 2 ns ใช้แรงดันไฟฟ้าประมาณ 100-500 V หรือบางครั้งอาจออกแบบให้ใช้แรงดันไฟฟ้าสูงมากถึงระดับ 1,500-2,000 V ก็มี



รูปที่ 2.11 (ก) ตัวอย่างโครงสร้างของ RAPD ที่มีการผลิตใช้งานจริง
(ข) สเปกตรัมผลตอบสนอง



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของ SPAD (single photon APD)

APD ชนิดวัสดุ Si ที่น่าสนใจอีกชนิดหนึ่งคือ "APD ชนิดโฟตอนเดี่ยว" หรือ SPAD ซึ่งย่อมาจากคำว่า single photon APD มีโครงสร้างดังที่แสดงในรูปที่ 2.12 มีลักษณะแตกต่างจาก APD ทั่วไปตรงที่ไม่มีชั้น \mathcal{N} แสงอินพุตเข้าทางด้านชั้น n^+ บนสุดและอะวาลานซ์เกิดขึ้นในรอยต่อ n^+p ซึ่งมีพื้นที่เพียงเล็กน้อย ประสิทธิภาพของสิ่งประดิษฐ์ชนิดนี้ต่ำ แต่สามารถใช้โฟตอนเพียง 1 ตัวในการก่อให้เกิดอะวาลานซ์ได้และมีความรวดเร็วในการตอบสนองต่อแสงได้ดีมากถึงระดับ 20 ps

2.5.4.5 อะวาลานซ์โฟโตไดโอดชนิดเจอร์เมเนียม

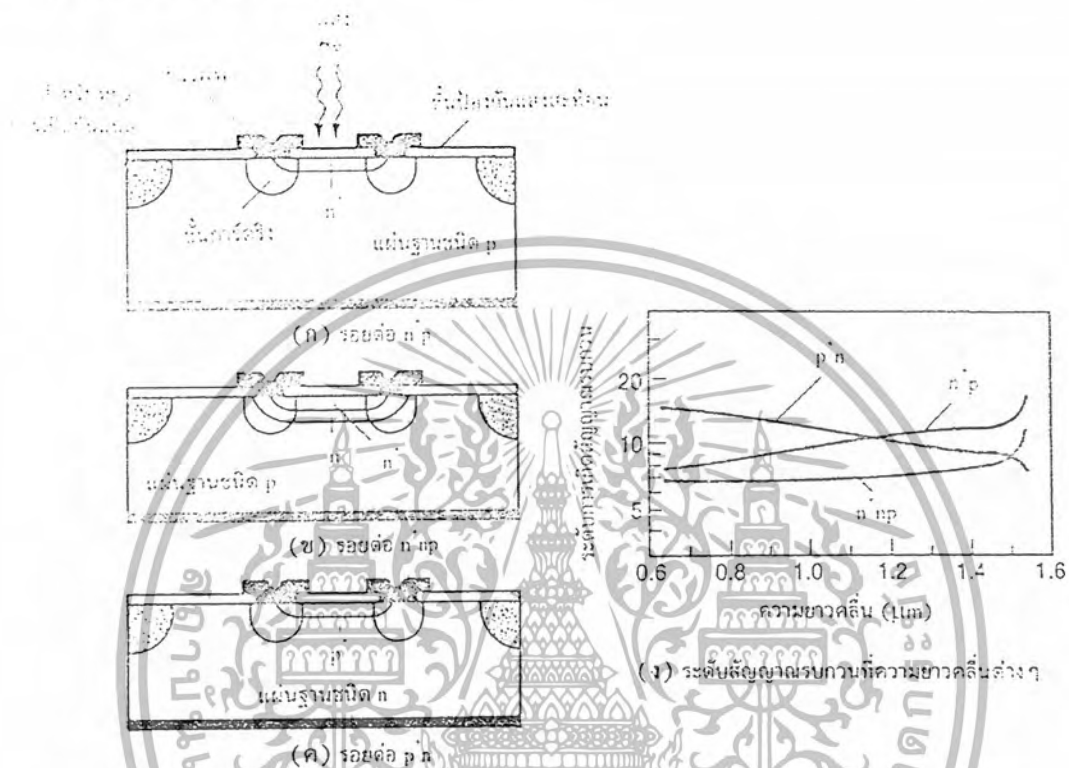
สารกึ่งตัวนำเจอร์เมเนียมมีช่องว่างพลังงานเท่ากับ 0.67 eV จึงสามารถดูดกลืนแสงได้ถึงความยาวคลื่นประมาณ 1.65 μm ซึ่งสามารถครอบคลุมแสงที่ใช้ในการสื่อสารด้วยแสง แต่เนื่องจากช่องว่างพลังงานมีค่าน้อย ดังนั้นจึงมีปัญหาตรงประเด็นที่กระแสไฟฟ้ามีค่ามาก นอกจากนี้สัมประสิทธิ์การเกิดไอออนของอิเล็กตรอนและของโฮลมีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นจึงมีปัญหาเรื่องการมีสัญญาณรบกวนมาก ดังนั้น APD ชนิด Ge จึงต้องมีการออกแบบฟิลิพิตันเป็นพิเศษแตกต่างไปจากกรณีของ Si APD ชนิด Ge ตัวแรกได้รับการพัฒนาขึ้นใน ค.ศ. 1966 โดยมีโครงสร้างแสดงในรูปที่ 2.13 (ก) มีการใช้โครงสร้างการรูดิ่งด้วย ชั้นอะวาลานซ์ได้แก่รอยต่อ n^+p ที่ค่อนข้างตื้น ส่วนในรูป (ข) และ (ค) มีโครงสร้างเป็น รอยต่อของ n^+pp และ p^+n

2.5.4.6 อะวาลานซ์โฟโตไดโอดชนิดแกเลียมอาร์เซไนด์

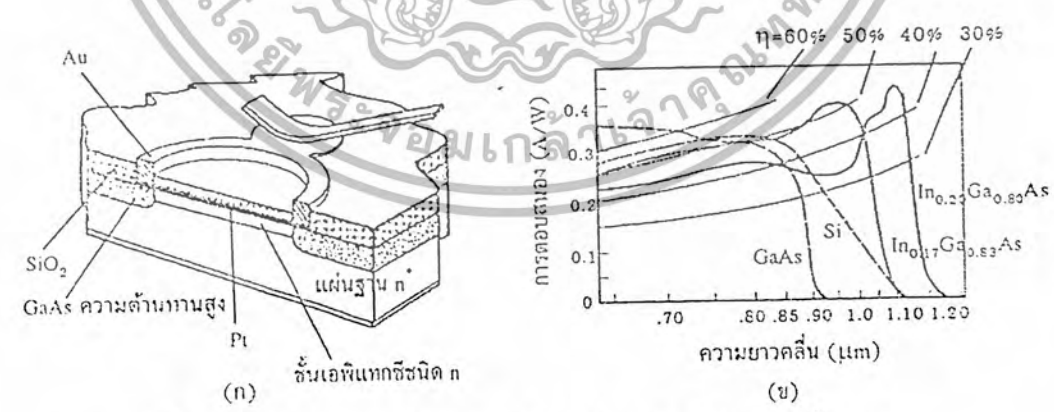
APD ชนิด GaAs ไม่ค่อยมีการใช้งานกันกว้างขวางมากนัก เพราะมีช่องว่างพลังงานใกล้เคียงกับของ Si โครงสร้างพื้นฐานของ APD ชนิดวัสดุตระกูล III-V เช่น GaAs ใช้รอยต่อชนิดขอตติกดังแสดงในรูปที่ 2.14 (ก) รอยต่อขอตติกเกิดจากการเคลือบฟิล์มบางของโลหะแพลทินัมลงบนชั้นเอพิแทกซีชนิด n รูปที่ 2.14 (ข) แสดงเปรียบเทียบสเปกตรัมผลตอบสนองของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APD ที่ผลิตจากวัสดุชนิดต่างๆ จากรูปนี้ จะเห็นว่าผลตอบสนองของ GaAs ใกล้เคียงกับของ Si ส่วนในกรณีของ InGaAs นั้นถ้าเพิ่มปริมาณของ In จะทำให้ตอบสนองต่อแสงที่มีความยาวคลื่นยาวดีขึ้นและยาวกว่า 1.2 μm ได้ด้วย



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างโครงสร้างของ APD ชนิด Ge แบบต่างๆ



รูปที่ 2.14 (ก) โครงสร้างของ APD ชนิด GaAs ในระยะเริ่มแรก
(ข) สเปกตรัมผลตอบสนองของ APD ชนิดต่างๆ

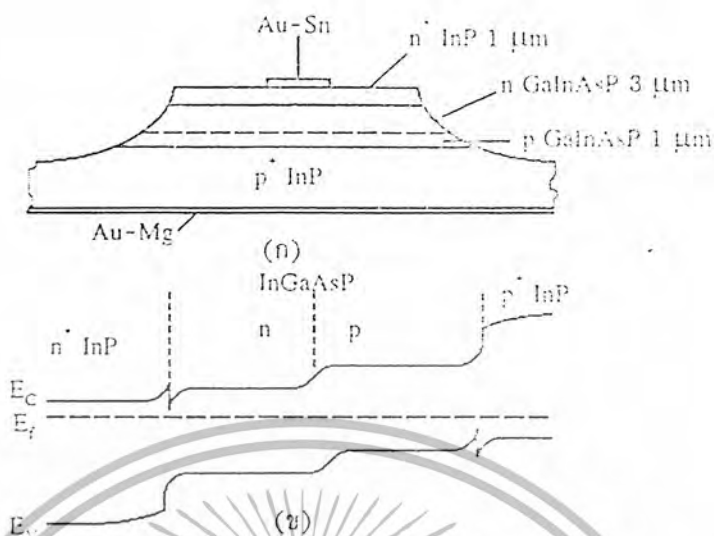
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิจัยและพัฒนา APD ชนิด GaAs ส่วนใหญ่เพื่อเป็นการปูแนวทางในการพัฒนาไปสู่ APD ชนิดสารประกอบหลายชนิด เช่น InP และการพัฒนา APD ชนิดซูเปอร์แลตทิซ (superlattice APD) หรือ มัลติควอนตัมเวลล์ (multi-quantum well APD) วัตถุประสงค์หลักของ APD ชนิดมัลติควอนตัมเวลล์คือการเพิ่มสัมประสิทธิ์การเกิดไอออนของพาหะชนิดใดเพียงชนิดเดียวและเพื่อหวังผลให้สัญญาณรบกวนลดลง

2.5.4.7 อะวาลันซ์โฟโตไดโอดชนิดอินเดียมฟอสไฟด์

ปัจจุบันนิยมใช้ APD ของผลึกตระกูลอินเดียมฟอสไฟด์ (InP และ GaInAsP) สำหรับวัดแสงที่มีความยาวคลื่นย่าน 1.55 μm ซึ่งเป็นย่านที่นิยมใช้มากที่สุดในการสื่อสารด้วยแสงระยะไกล ผลึกของสารประกอบกึ่งตัวนำชนิดเทอร์นารี เช่น InGaAs หรือชนิดควอเทอร์นารี เช่น GaInAsP ตอบสนองต่อแสงในย่าน 1.2-1.6 μm ได้ดี

ระยะเริ่มแรกมีการปลูกผลึก InGaAs ลงบนแผ่นฐานชนิด GaAs ซึ่งมีค่าคงตัวแลตทิซแตกต่างกัน จึงใช้วิธีค่อยๆ เปลี่ยนส่วนผสมของ InGaAs กล่าวคือค่อยๆ เพิ่มปริมาณของ In และใช้รอยต่อชนิดชอตตี ต่อมาเมื่อมีการพัฒนาแผ่นฐานชนิด InP สำเร็จ จึงได้เริ่มมีการปลูกผลึกชนิด InGaAsP ลงบนแผ่นฐานชนิด InP ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.15 ก. $p^+ \text{-InP/n-Ga}_{0.24}\text{In}_{0.76}\text{As}_{0.58}\text{P}_{0.42}$ ($E_g = 1.0\text{eV}$)/ $n^+ \text{-InP}$ รูปตัดขวางมีลักษณะเป็นแบบเมซา (mesa) ลักษณะของแถบพลังงานแสดงในรูป (ข) ชั้น InP ด้านรับแสงทำหน้าที่เป็นชั้นหน้าต่างและป้องกันมิให้พาหะข้างน้อยแพร่เข้าไปรวมตัวแบบสูญเสียที่ผิวด้านบน ปรากฏการณ์อะวาลันซ์เกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อ p-n ของ InGaAsP ซึ่งมีสนามไฟฟ้าสูงคร่อมอยู่



รูปที่ 2.15 (ก) โครงสร้างของ APD ชนิด InGaAsP/InP ที่มีการผลิตเป็นครั้งแรก
(ข) แถบพลังงานของ APD ชนิด InGaAsP/InP

2.5.4.7.1 APD ชนิดโครงสร้าง SAM

APD ที่ออกแบบขึ้นมาเพื่อลดกระแสไฟฟ้ามีดชนิดทลเนลิงชนิดหนึ่งได้แก่ APD ชนิด SAM ซึ่งย่อมาจาก "Separate absorption and multiplication" ซึ่งมีลักษณะคล้ายชนิดรีซทอร์โดยมีโครงสร้างดังที่แสดงในรูปที่ 2.16 (ก) ชั้นบนสุดคือรอยต่อ p⁺n ของ InP และตามด้วย InGaAsP ชนิด n แผ่นฐานใช้ InP ชนิด p⁺ หลักการทำงานนั้นเป็นไปตามชื่อของสิ่งประดิษฐ์ คือ การดูดกลืนแสงส่วนใหญ่เกิดขึ้นในชั้น InGaAsP ซึ่งหนาที่สุด หลังจากนั้นพาหะจะถูกพัดพาไปสู่รอยต่อ p⁺n ของ InP ซึ่งมีสนามไฟฟ้าสูงและจะเกิดปรากฏการณ์อะวะลาซันซ์ขึ้นทันที เนื่องจากชั้น InP เป็นชั้นที่มีช่องว่างพลังงานกว้าง (1.35 eV) ดังนั้นในโครงสร้างนี้จึงสามารถส่องแสงเข้าไปได้ทั้งจากด้านบนและด้านล่าง เนื่องจาก InP มีช่องว่างพลังงานที่กว้างกว่าชั้นอื่น ดังนั้นโครงสร้างนี้จึงช่วยลดกระแสไฟฟ้ามีดชนิดทลเนลิงได้ และเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าไบแอสย้อนที่รอยต่อ p⁺n ของ InP มีค่าสูงมากดังนั้นจึงสามารถได้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายทวีคูณที่สูงด้วย

2.5.4.7.2 APD ชนิดโครงสร้าง SAGM

ในโครงสร้างชนิด SAM ที่กล่าวมานั้น ช่องว่างพลังงานของชั้น InP มีขนาดกว้างกว่าของชั้น InGaAsP มาก ดังนั้นจึงเกิดลักษณะป็นขั้นบันไดของแถบพลังงาน (band discontinuity) ซึ่งจะเป็นอุปสรรคในการเคลื่อนที่ของพาหะ (โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับโฮล) และจะทำให้ APD ตอบสนองต่อแสงช้าลง เพื่อที่จะแก้ปัญหานี้ จึงได้มีการพัฒนา APD ที่มีโครงสร้าง

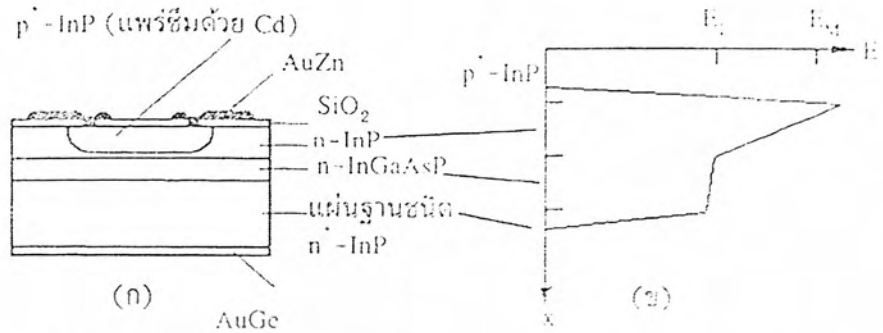
ชนิด SAGM ขึ้นมาซึ่งย่อมาจาก “separate absorption , grading and multiplication” ดังที่แสดงในรูปที่ 2.17 เป็นการออกแบบให้ช่องว่างพลังงานของชั้น InGaAs ค่อย ๆ กว้างขึ้นแบบมีความลาดเมื่อเข้าใกล้ชั้น InP และเมื่อมีการไบแอสย้อนก็จะยิ่งทำให้ความสูงของชั้นบันไดลดลงด้วยตามขนาดของสนามไฟฟ้า โดยทั่วไปความหนาของชั้นที่ช่องว่างพลังงานเปลี่ยนแปลงแบบลาด L นั้นนิยมใช้ประมาณ $400 - 2,000 \text{ \AA}$ ด้วยโครงสร้างเช่นนี้ทำให้ APD ทำงานตอบสนองต่อแสงได้รวดเร็วถึงระดับพิโกวินาที

2.5.4.7.3 APD ชนิดโครงสร้างแพลนาร์

ในระยะเริ่มแรกจนถึง ค.ศ. 1980 โครงสร้างของ APD ชนิด SAM และ SAGM มักจะนิยมออกแบบให้มีลักษณะเป็นแบบเมซา (mesa) ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.18 (ก) และ (ข) เพราะเหมาะกับการผลิตจำนวน ๆ และโครงสร้างแบบเมซานี้ช่วยลดการรั่วของกระแสไฟฟ้าที่ผิวได้ด้วย ต่อได้มีการเปลี่ยนแปลงมาใช้โครงสร้างที่เหมาะสมกับการผลิตจำนวนมาก ๆ ซึ่งได้แก่โครงสร้างแบบแพลนาร์ (planar) ดังแสดงในรูปที่ 2.19 (ก) และ (ข)

2.5.4.7.4 APD ชนิดโครงสร้างซูเปอร์แลตทิซ

ตัวอย่าง APD ชนิดโครงสร้างซูเปอร์แลตทิซของ InGaAs/InP (SAGM) แสดงในรูปที่ 2.20 (ก) ลักษณะการออกแบบพิเศษในโครงสร้างนี้ซูเปอร์แลตทิซนี้คือ การออกแบบให้ช่องว่างพลังงานประสิทธิผลของซูเปอร์แลตทิซ InGaAs/InP มีการเปลี่ยนแปลงแบบมีความลาดซึ่งเป็นการช่วยลดความสูงของชั้นบันไดในแถบเวเลนซ์ให้น้อยลงซึ่งจะส่งผลให้ APD ทำงานได้เร็ว ส่วนในรูปที่ 2.20 (ข) นั้นมีการใช้ชั้นซูเปอร์แลตทิซเป็นชั้นที่เกิดอะวะลานซ์โดยตรง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการเพิ่มสัมประสิทธิ์การเกิดไอออนของพาหะชนิดใดชนิดหนึ่ง (เช่น อิเล็กตรอน) ในทำนองเดียวกับที่ใช้ในกรณีของ APD ชนิด AlGaAs



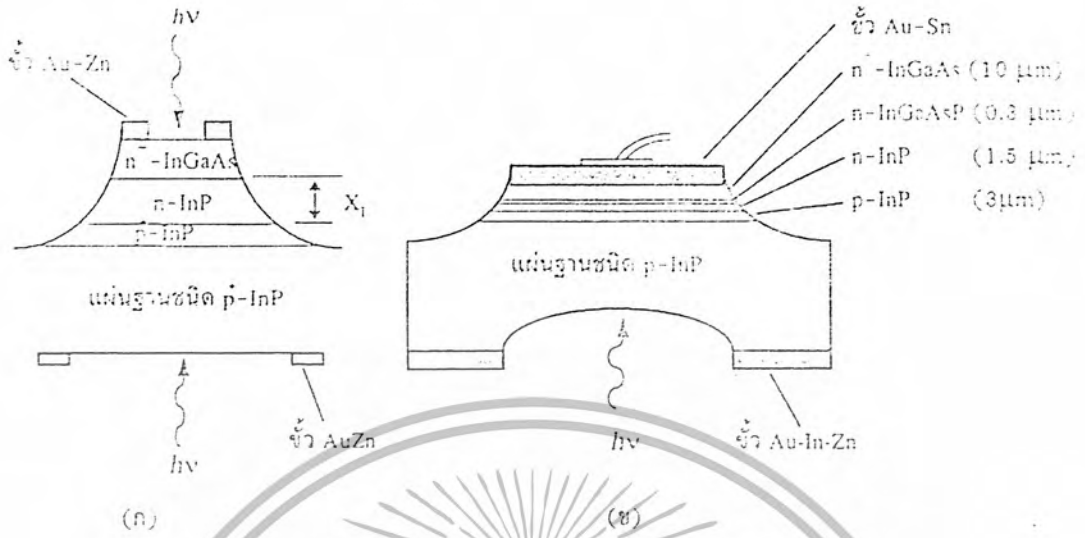
รูปที่ 2.16 (ก) โครงสร้างของ APD ชนิด SAM (separate avalanche and multiplication)

(ข) ลักษณะของสนามไฟฟ้าในชั้นต่างๆ

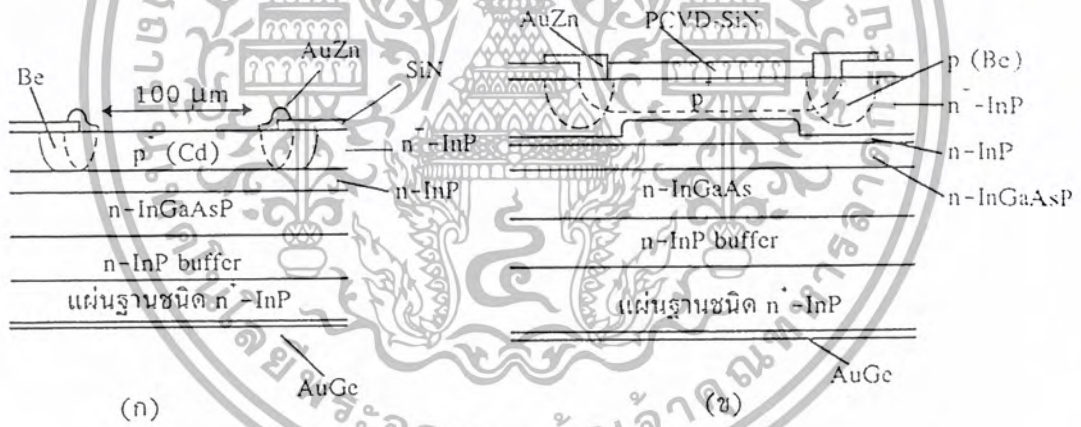


รูปที่ 2.17 แถบพลังงานของ APD ชนิด SAGM (separate absorption, grading and multiplication)

L คือความหนาของชั้นที่เปลี่ยนช่องว่างพลังงานแบบให้มีความลาด

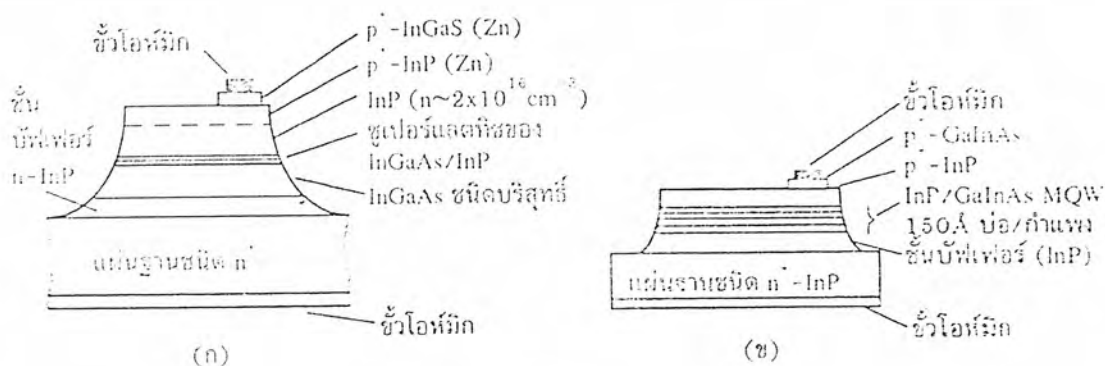


รูปที่ 2.18 (ก) โครงสร้างของ SAM-APD แบบเมซซา (mesa)
 (ข) โครงสร้างของ SAGM-APD แบบเมซซา (mesa)



รูปที่ 2.19 (ก) โครงสร้างของ SAM-APD แบบแพลนาร์ (planar) โดยมีชั้น
 การ์ดริง (guard ring structure) อยู่ภายใน
 (ข) โครงสร้างของ SAM-APD แบบแพลนาร์ (planar) โดยมีชั้นฝัง
 (buried structure) อยู่ภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 โครงสร้างของ APD ซึ่งมีชั้นซูเปอร์แลตทิซอยู่ภายใน

- (ก) ชั้นซูเปอร์แลตทิซทำหน้าที่เปลี่ยนช่องว่างพลังงานประสิทธิผลให้เป็นแบบมีความลาด
- (ข) ชั้นซูเปอร์แลตทิซทำหน้าที่เป็นชั้นอะวาลันซ์

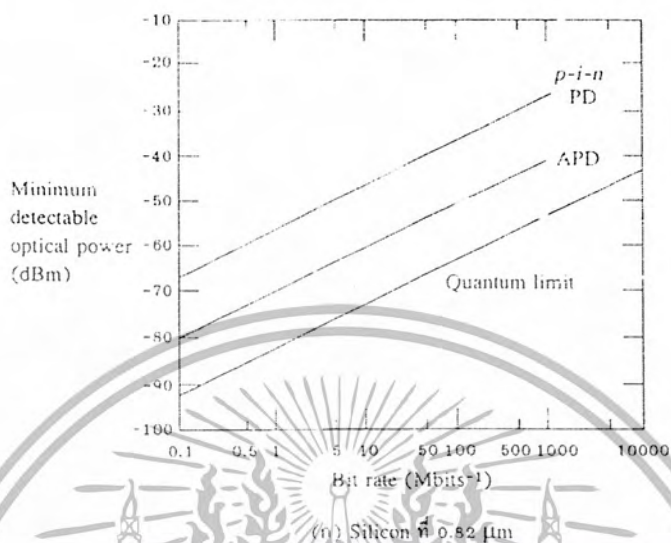
ดังนั้นไดโอดทั้งสองชนิดมีโครงสร้างคล้ายกัน โดยย่านความยาวคลื่นที่ใช้งานขึ้นกับวัสดุที่นำมาทำไดโอด ทำให้ไดโอดตรวจจับความยาวคลื่นต่างๆกัน ดังเช่นตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าคุณสมบัติของโฟโตไดโอดชนิดต่างๆ

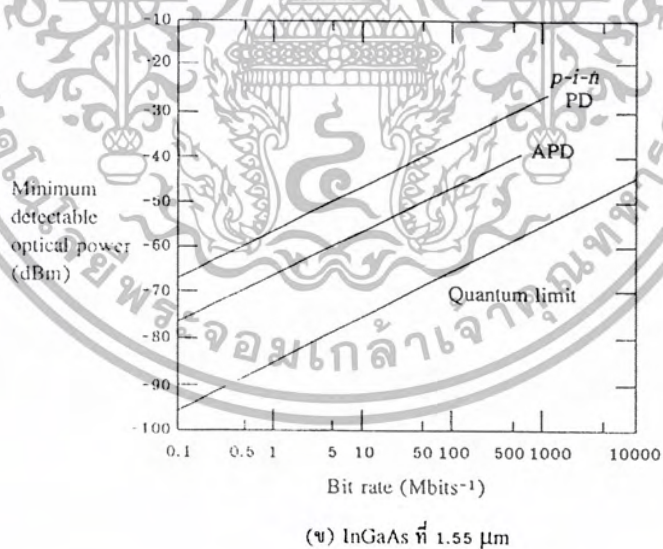
Type of diode	Wavelength Region	Quantum efficiency	Response time	Dark current
Si-PIN	0.4 - 1.1 μm	90%	0.1 - 5 ns	1 - 50 nA
Si-APD	0.4 - 1.1 μm	85%	0.05 - 0.3 ns	20 - 100 nA
Ge-APD	0.6 - 1.6 μm	85%	0.1 ns	20 - 100 nA
Ge-PIN	1 - 1.6 μm	60%	2.5 ns	100 nA
III-V	0.92 - 1.65 μm	50 - 70%	10 ns of ps	$10^{-5} - 10^{-1} \text{ A/cm}^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาจากกราฟเปรียบเทียบค่าความไวของ PIN และ APD ดังนี้



รูปที่ 2.21 แสดงกราฟการตอบสนองสัญญาณอุปกรณ์รับสัญญาณชนิด Silicon ที่ $0.82 \mu\text{m}$

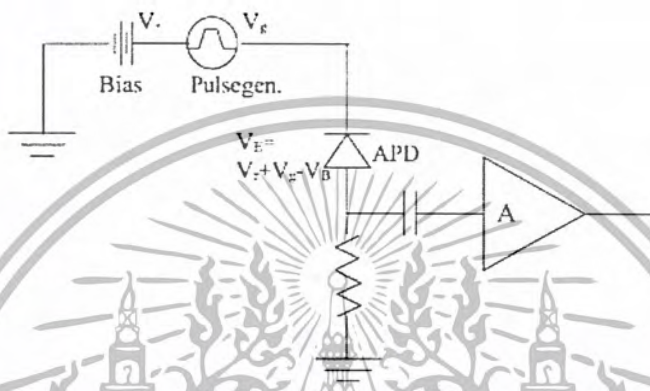


รูปที่ 2.22 แสดงกราฟการตอบสนองสัญญาณของอุปกรณ์รับสัญญาณชนิด InGaAs ที่ $1.55 \mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

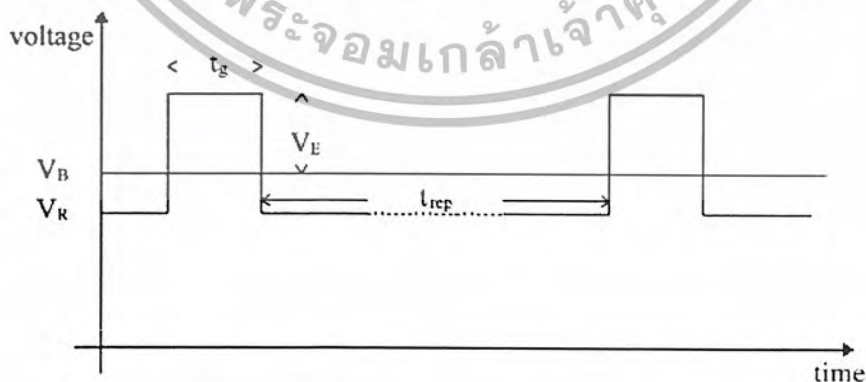
2.5.4.8 กระบวนการของ Geiger mode

กระบวนการ Geiger mode (GM) เป็นพื้นฐานอย่างหนึ่งของ QC เพื่อใช้ในอะวาลานซ์โฟโตไดโอด เมื่อ Geiger mode มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ดีเทคเตอร์ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพและสามารถนำไปใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์ทางธุรกิจได้ ตัวเลขต่าง ๆ ในตัวแปรทางสถิติจะสัมพันธ์กับ Geiger mode



รูปที่ 2.23 แสดงวงจรไฟฟ้าของ Geiger mode

การอธิบายเกี่ยวกับ Geiger mode แนวคิดต่าง ๆ ในการเปลี่ยนแปลงทางคุณลักษณะทางไฟฟ้าในดีเทคเตอร์จะทำได้โดยการจัดวางดีเทคเตอร์ไว้ในเกท ซึ่งจะถูกเรียกว่า Geiger mode ช่วงของคาบเวลาที่สั้นนั้นการไบอัสจะสูงกว่าค่าระดับของ Breakdown voltage จากรูปที่ 2.24 จะแสดงตัวแปรทางสถิติต่าง ๆ ที่จะบ่งบอกถึงลักษณะของกระบวนการ Geiger ที่ขอขาขึ้นและขาลงของเวลาจะไม่นำมาคิด ซึ่งดีเทคเตอร์ของซิงเกิลโฟตอนจะทำงานภายใต้ Gate window



รูปที่ 2.24 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้ากับเวลา

ค่าพารามิเตอร์ของ Geiger mode ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะอธิบายกระบวนการพื้นฐานของ GM ซึ่งได้แก่

V_r คือค่า Reverse Bias ของดีเทคเตอร์

V_B คือค่า Breakdown Voltage ของดีเทคเตอร์

V_E คือค่า Excess Voltage ที่สูงกว่าค่า V_B จาก Gatepulse

V_G คือค่า Amplitude ของ Gatepulse

t_g คือ ขนาดความกว้างของ Gatepulse และ Detection window

t_{rep} คือ ค่าที่หาได้จาก $\frac{1}{f_{rep}} = \text{ความถี่ของ Gatepulse}$

2.6 Quantum Cryptography

Quantum Cryptography ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาหลาย ๆ วิธีการ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการเก็บข้อมูล ซึ่งจะกระทำบนพื้นฐานทางทฤษฎีต่าง ๆ สำหรับในหัวข้อนี้จะอธิบายเกี่ยวกับหลักการพื้นฐานเพื่อให้เข้าใจเกี่ยวกับ Cryptography

2.6.1 ประวัติความเป็นมาของ Quantum Cryptography

การเรียนรู้ในเรื่อง Cryptography เริ่มมีมาตั้งแต่ 2500 ปีที่ผ่านมา การวิจัยและการพัฒนาเกี่ยวกับ Cryptography ได้เริ่มมีการใช้งานด้านเกี่ยวกับการทูตและได้มีการพัฒนาขึ้นเรื่อย ๆ ในช่วงสงคราม แต่การส่งข้อมูลที่เป็นความลับยังคงได้ยากและใช้เวลามาก แต่ในปัจจุบันเป็นเรื่องที่ง่ายมากของ Dechiper ข้อความที่ส่งถึง Julius Caesar คือ "Aqtr gzz z jmhed" แปลกลับกลายเป็น "Brutus has a knife" ซึ่งเป็นข้อความง่าย ๆ ตรงไปตรงมาและถูกต้องตามอักขระอย่างไรก็ตาม Cryptography ได้ถูกใช้มาเรื่อยๆ และพัฒนาให้ดีขึ้นในอีก 10 ปี ต่อมา

Unbreakble chipper ได้ถูกประดิษฐ์ขึ้นในปี 1918 จนกระทั่งปี 1940 ได้พิสูจน์ว่ามันเป็น Breakble ซึ่งตัว chipper ตัวนี้ฝ่ายเยอรมันได้นำมาใช้ ในช่วงกลางยุค 70 Cryptography นั้นเป็นที่สนใจทางวิชาการเมื่อนักวิจัยของสแตนฟอร์ดได้พัฒนาหลักการของ Public-key Cryptation หลังจากนั้นมาไม่นาน ในปี 1977 นั้น Rivest, Sharmir และ Adleman ซึ่งเป็นนักวิทยาศาสตร์ของ MIT ได้ประดิษฐ์ Cryptation ขึ้นมาและสามารถใช้งานได้จริง พวกเขาเรียกมันว่า RSA ทฤษฎีพื้นฐานของ Chiper ของตัว RSA ได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 Cryptographic services and primitives

เมื่อมีการส่งข้อความ ผู้ส่งและผู้รับต้องพิจารณาถึงปัจจัยต่าง ๆ โดยทำการดำเนินการอย่างปลอดภัย การพิจารณาวិธีการส่งข้อมูลเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของข้อมูล มีปัจจัยที่สำคัญอยู่ 3 ประการ ได้แก่ ความสมบูรณ์ของข้อมูล, ที่มาของข้อมูล, และความลับของข้อมูล

ความสมบูรณ์ของข้อมูลและที่มาของข้อมูลที่เชื่อถือได้จะมีส่วนที่สัมพันธ์กัน ซึ่งจะขาดอันใดอันหนึ่งไม่ได้ ถ้าขาดอันใดอันหนึ่งจะทำให้เราไม่ทราบถึงข้อมูลที่แท้จริง นอกจากนี้ได้รับการรับรองจากผู้ส่งที่ถูกต้องเท่านั้น เนื่องจากการส่งข้อมูลยังไม่มีกำบัง ดังนั้นจึงมีการพัฒนาวิธีการการป้องกันในการส่งข้อมูลจากทั้ง 3 ปัจจัยที่กล่าวมา ซึ่งในปัจจุบันสิ่งเหล่านี้มีความสำคัญต่อการเก็บรักษาข้อมูลทางการแพทย์และการธนาคาร

ในช่วงระยะแรก ๆ Cryptographic ต่าง ๆ ได้ถูกนำมาใช้ด้านการบริการต่าง ๆ พื้นฐานของ Encryption มี 2 แบบ คือ Symmetrical และ Asymmetrical โดย Symmetrical นั้นเป็นวิธีที่เก่ามาก ตัว Key ที่เหมือนกันจะใช้ทั้งในการ Enchiper และ Dechiper ของข้อมูล Chiper ที่ดีที่สุดในประเภทนี้จะเป็นแบบ The Data Encryption Standrad (DES) ซึ่งจะใช้ Key 56 บิต และได้มีการพัฒนาปรับปรุงแก้ไข DES ต่อมาเรื่อย ๆ Asymmetric หรือ public key chiper เป็นเครื่องมือที่ไม่ค่อยดีพอ ข้อแตกต่างทั้ง 2 Key ได้ถูกนำมาใช้กันมาก ดังนั้นระบบของ RSA จึงเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลาย

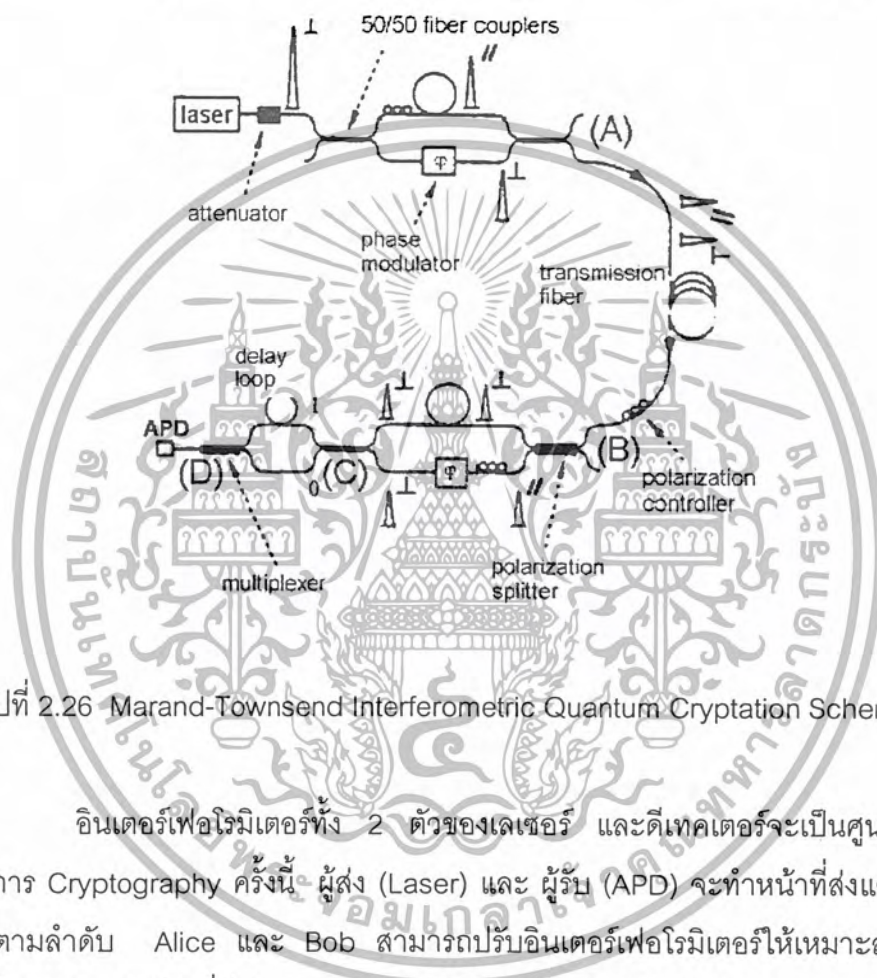
2.6.3 Quantum Cryptography

Quantum Cryptography (QC) เป็นวิธีการแบบใหม่ที่น่าเสนอความสำคัญของ Cryptography ลักษณะเฉพาะของโฟตอนจะใช้หลักการความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก หลักการดังกล่าวนี้จะกล่าวถึงวิธีการวัดที่แน่นอนในการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่าง ๆ ของ QC การรบกวนของ Eabesdropper จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของข้อมูล ดังนั้นจึงมีการใช้ QC Charnel ในการแลกเปลี่ยนข้อมูลเพื่อให้เกิดความปลอดภัย ซึ่งหลักการดังกล่าวเป็นพื้นฐานทางฟิสิกส์

ความคิดเรื่อง QC เริ่มต้นเมื่อประมาณช่วงปลายปี 1960 เมื่อ Stephen Weisner ได้เขียนบทความที่มีชื่อว่า "Conjunctate Coding" แต่ก็ไม่ประสบความสำเร็จ จนกระทั่ง 20 ปีต่อมา Bennett และ Brassard ได้ประสบความสำเร็จในการทดลองดังกล่าวในปี 1984 ตั้งแต่นั้นมาก็มีการส่งข้อมูลของ QC ได้ไกลกว่า 10 กิโลเมตร

2.6.4 System Configuration

การทดลองครั้งแรกได้อาศัยหลักการขั้นพื้นฐานของโพลาริซิง ซึ่งต่อมาภายหลังทำให้เข้าใจถึงลำดับขั้นตอนการปฏิบัติ ทำให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น การติดตั้งอุปกรณ์การทดลองจะใช้หลักการพื้นฐานของ Mach-Zender Interferometer ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.26

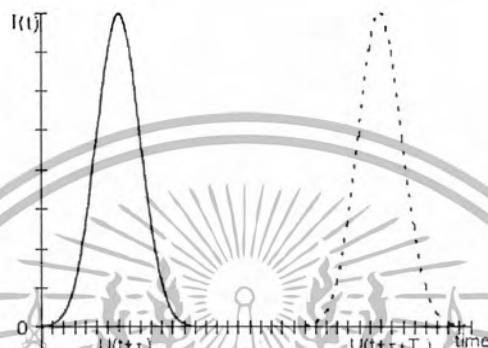


รูปที่ 2.26 Marand-Townsend Interferometric Quantum Cryptation Scheme

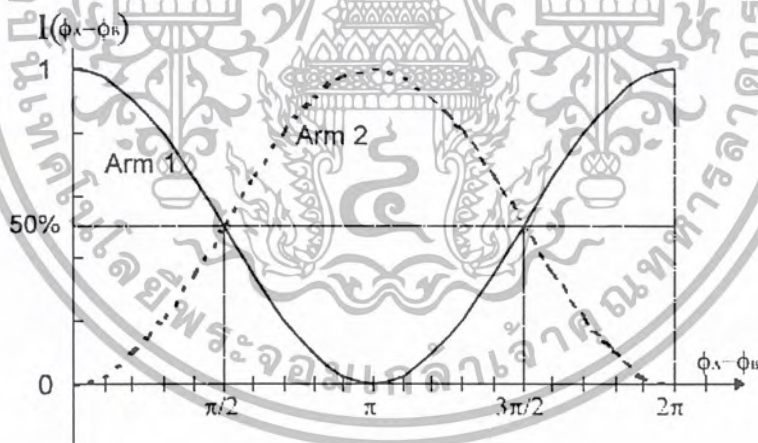
อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ทั้ง 2 ตัวของเลเซอร์ และดีเทคเตอร์จะเป็นศูนย์กลางของระบบ ในการ Cryptography ครั้งนี้ ผู้ส่ง (Laser) และ ผู้รับ (APD) จะทำหน้าที่ส่งและรับข้อมูลเรื่อย ๆ ตามลำดับ Alice และ Bob สามารถปรับอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ให้เหมาะสมกับความแตกต่างทั้ง 4 เฟสและเสียงที่มี Strange จะสามารถทำให้ซิงเกิลโฟตอนเกิดการแทรกสอด วิธีการโพลาริซิงสามารถปรับปรุงระบบให้มีประสิทธิภาพ ดังนั้นในกระบวนการอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ทั้งสอง ควรเลือกคลื่นที่มีคลื่นที่สม่ำเสมอ

2.6.5 Classical and Quantum Domain

ในกระบวนการวิเคราะห์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์จะทำในรูปแบบของ CW-light ค่าของ Intensity Distributions จะเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปตาม Quantum Domain ดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.27 Intensity (probability) Distribution for Interferometer at time t



รูปที่ 2.28 คุณสมบัติของอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์และแสดงค่าความต่างเฟสของกราฟทั้งสองเส้น

กราฟจะมีลักษณะคล้ายรูประฆัง ซึ่งจะบอกถึงลักษณะความน่าจะเป็นของ Photon interfering ที่ช่วงระยะเวลาหนึ่ง ค่าพารามิเตอร์ของอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ในรูปที่ 2.27 จะบอกถึงลักษณะความเป็นไปได้ของการแทรกสอด ภายใต้แนวคิดนี้เมื่อค่า Intensity สูงกว่าระดับ 50% ขึ้นไป ค่าของอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์จะเท่ากับ 1 และที่ระดับต่ำกว่า 50% ค่าของอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์จะเท่ากับ 0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 Thermoelectric Coolers

Thermoelectric coolers เป็นอุปกรณ์ประเภท solid state heat pumps จะประยุกต์ใช้กับ temperature stabilization และ temperature cycling หรือการทำให้อุณหภูมิให้ต่ำกว่าอุณหภูมิรอบ ๆ ตามต้องการ ดังนั้นจึงมีผลิตภัณฑ์จำนวนมากมายี่นา Thermoelectric coolers มาใช้งาน เช่น กล้องถ่ายภาพดิจิทัลที่มีการใช้ CCD ในการรับแสง , เลเซอร์ไดโอด , ไมโครโปรเซสเซอร์ , เครื่องวิเคราะห์โลหิต , เครื่องทำความเย็นแบบพกพา

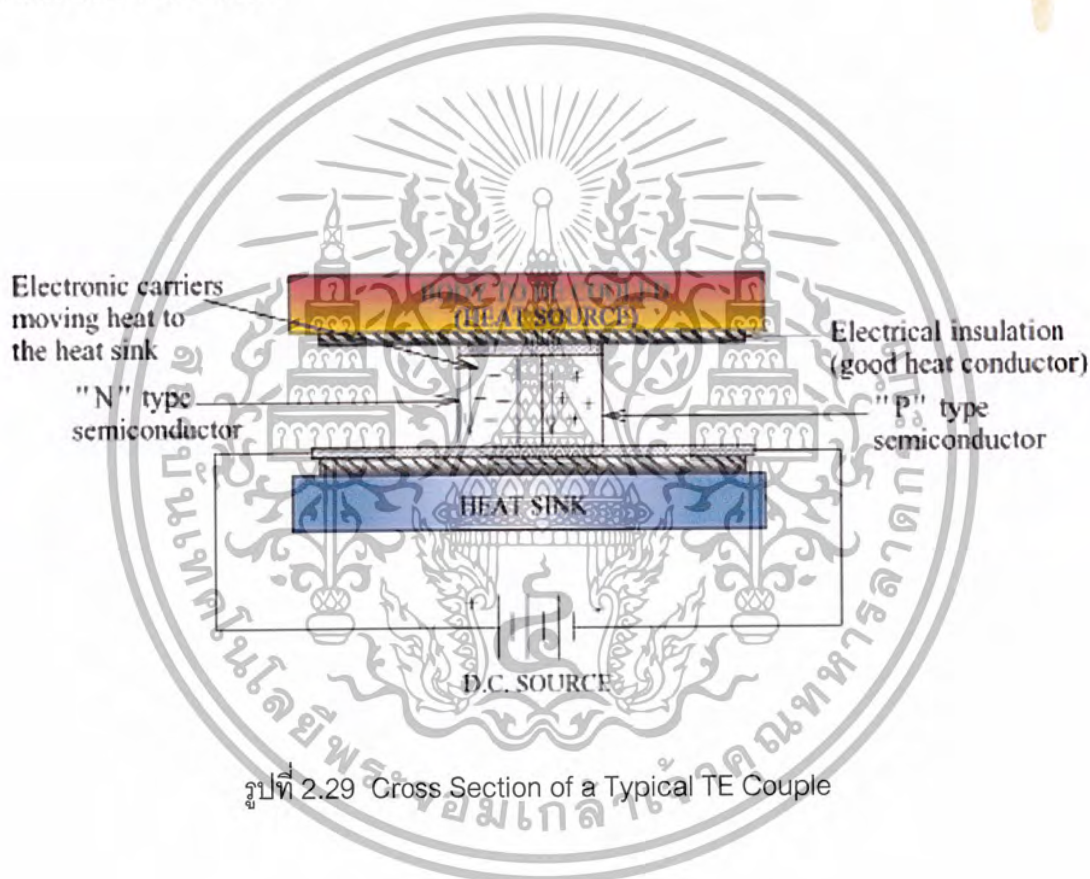
2.7.1 หลักการทำงานของ Thermoelectric coolers

Thermoelectric coolers จะใช้พื้นฐานของปรากฏการณ์ Peltier Effect ที่ถูกค้นพบในปี 1834 โดยกระแสไฟฟ้าแบบตรงจะถูกนำมาประยุกต์ให้ไหลผ่านระหว่างวัสดุที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นเหตุให้เกิดความแตกต่างทางอุณหภูมิของวัสดุทั้งสอง ปรากฏการณ์ Peltier Effect เป็นหนึ่งในสามของปรากฏการณ์ Thermoelectric Effect ซึ่งมีอีกสองปรากฏการณ์คือ Seebeck Effect และ Thomson Effect ด้วยเหตุนี้ทั้งสองปรากฏการณ์ทำให้ single conductor ปรากฏการณ์ Peltier Effect จะเป็นปรากฏการณ์ชนิดรอยต่อหรือเรียกว่า junction phenomenon ทั้งสามปรากฏการณ์มีการเชื่อมต่อกันและกันด้วยความสัมพันธ์อย่างง่าย ๆ

ชนิดของชิ้นส่วนของ Thermoelectric นั้นถูกผลิตโดย thin ceramic wafers 2 ชั้น ซึ่งมี P และ N และได้ปด้วยสาร bismuth-telluride แล้วจะใช้วัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำมาระบายกันอย่างแซนวิทระหว่างตัวมัน วัสดุที่เป็นเซรามิคทั้งสองด้านของ Thermoelectric จะเพิ่มความแข็งแรงและจะเป็นฉนวนไฟฟ้าไปโดยธรรมชาติ วัสดุชนิด N จะมีปริมาณของอิเล็กตรอนมากเกินไป และวัสดุชนิด P จะมีปริมาณของอิเล็กตรอนที่น้อยเกินไป P 1 ตัวและ N 1 ตัวจะมีการชดเชยให้กันในระหว่างคู่ของมัน ดังรูปที่ 2.28

คู่ของ Thermoelectric จะเป็นอนุกรมทางไฟฟ้าและเกิดความร้อนในทางขนาน ชิ้นส่วนของ Thermoelectric 1 ชิ้น สามารถที่จะบรรจุได้หลายร้อยคู่ เนื่องจากอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากวัสดุชนิด P ไปยังวัสดุชนิด N โดยการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้า เมื่ออิเล็กตรอนกระโดดไปสู่สถานะพลังงานที่สูงกว่า จะทำให้เกิดการดูดกลืนพลังงานความร้อน (ด้านที่เย็น) ต่อจากนั้นก็ จะทะลุผ่านไปในแลตทิซของวัสดุ การไหลของอิเล็กตรอนจากด้านของวัสดุชนิด N ไปสู่ด้านที่เป็นวัสดุชนิด P ผ่านทางการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้า ก็ต่อเมื่อมีการตกไปสู่สถานะพลังงานที่ต่ำกว่าและพลังงานที่ปล่อยออกมาจะถูกปล่อยในรูปของความร้อน โดยเป็นทางด้านฮีทซิงค์ (ด้านร้อน)

Thermoelectric นั้นสามารถใช้ได้ทั้งงานทางด้านความเย็นและความร้อน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของกระแส ซึ่งเมื่อนำมาประยุกต์ใช้งานก็เป็นสิ่งที่จำเป็นของทั้งเครื่องทำความร้อนและเครื่องทำความเย็น ส่วนใหญ่แล้วการออกแบบนั้นจะเน้นไปที่การทำความเย็นโดยใช้โหมดความเย็น ส่วนการใช้ Thermoelectric ในโหมดความร้อนจะมีประสิทธิภาพมาก เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นภายในทั้งหมด (Joulian heat) และมันจะไหลออกจากทางด้านเย็นที่จะถูกสูบไปทางด้านร้อน สิ่งนี้จะทำให้เกิดการลดความต้องการพลังงาน ซึ่งจะทำให้บรรลุผลของความต้องการทำความร้อน



รูปที่ 2.29 Cross Section of a Typical TE Couple

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

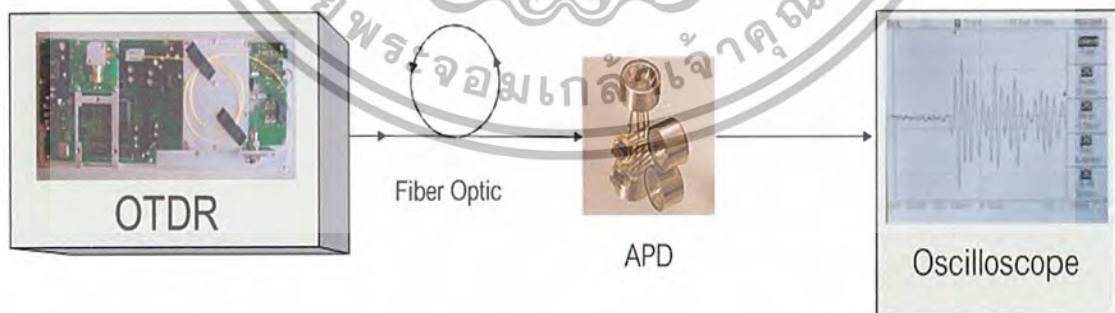
ขอบเขตและวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 การศึกษาข้อมูล

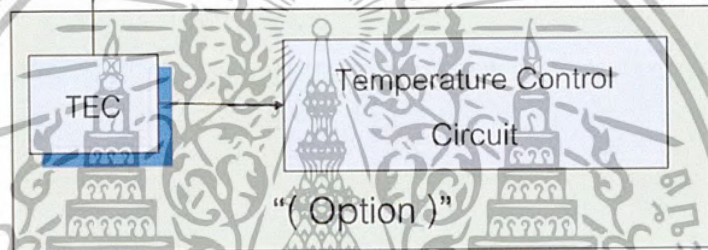
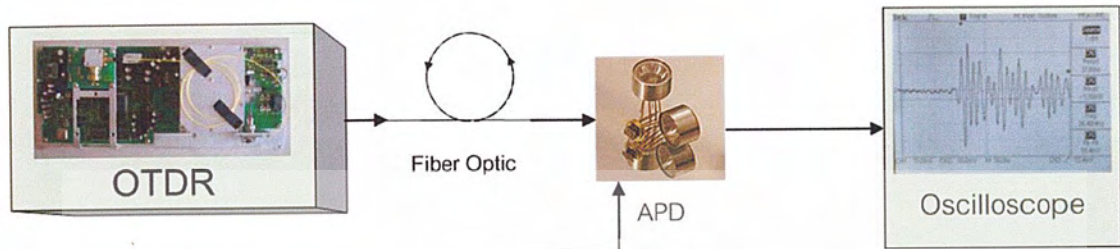
1. ศึกษาวิธีการของ Quantum Cryptography
2. ศึกษาคุณสมบัติทางควอนตัมของแสงหรือโฟตอน
3. ศึกษาข้อมูลคุณสมบัติของตัวตรวจจับแสงแบบต่าง ๆ เพื่อนำมาตรวจจับโฟตอน

3.2 ขอบเขตและวิธีการดำเนินงานวิจัย

การศึกษานี้จะทำกรสร้างชุดอุปกรณ์สำหรับการตรวจจับโฟตอนโดยใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงชนิดอะวาแลนช์โฟโตไดโอด ซึ่งจะต่อจากอุปกรณ์ OTDR ซึ่งจะใช้เป็นแหล่งกำเนิดลำโฟตอนที่ใช้ในการทดลอง เมื่อ OTDR ทำงานจะปล่อยลำโฟตอนเข้าสู่เส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งแสงจะเดินทางไปภายในเส้นใยแก้วนำแสง จากนั้นจะเดินทางเข้าสู่ดีเทคเตอร์ ซึ่งจะสามารถอ่านค่าที่ได้จากดีเทคเตอร์ได้จากออสซิลโลสโคป ซึ่งดีเทคเตอร์บางตัวนั้นจะมีอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิและตัววัดอุณหภูมิอยู่ภายในดีเทคเตอร์ อุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิเรียกว่า TEC หรือ Thermolectric cooler ซึ่ง TEC นั้นจะต้องมีวงจรควบคุมอีกที TEC จะใช้ทฤษฎีของ Peltier Effect ในการควบคุมอุณหภูมิ



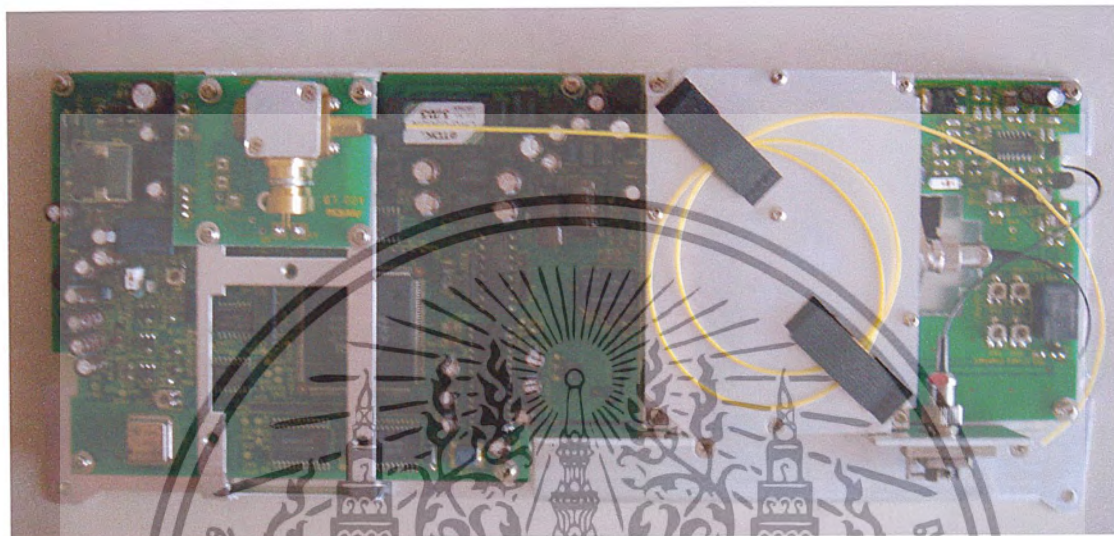
รูปที่ 3.1 แสดงการเชื่อมต่อชุดอุปกรณ์ต่าง ๆ ของชุดการทดลอง



รูปที่ 3.2 แสดงส่วนการเชื่อมต่อของ TEC กับชุดทดลองเมื่อมีอุปกรณ์ TEC

3.3 ชุดอุปกรณ์การวิจัยประกอบด้วย

1. แหล่งกำเนิดโฟตอน



รูปที่ 3.3 แสดงแหล่งกำเนิดโฟตอนโดยใช้ OTDR

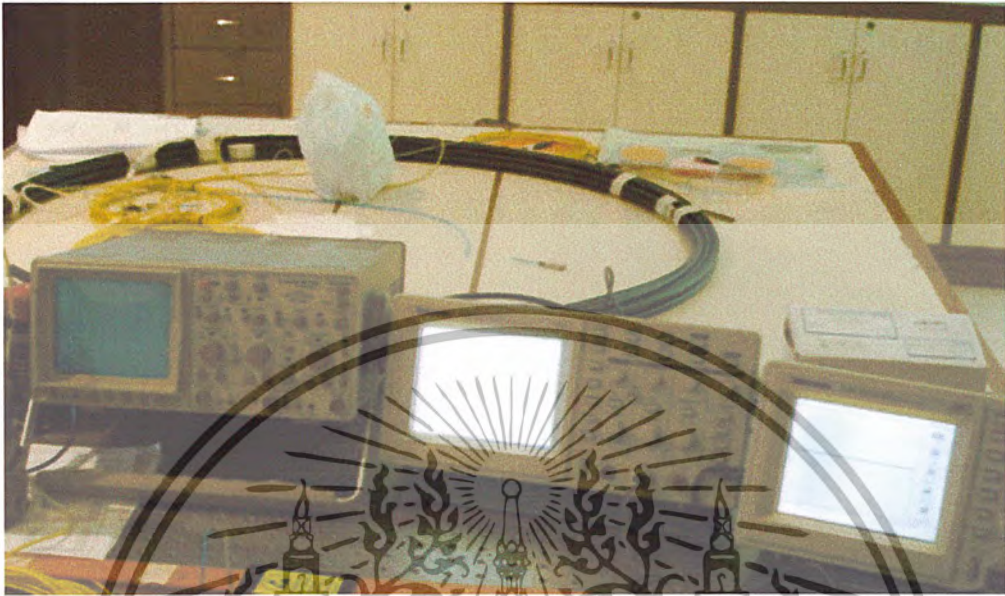
2. APD (Avalanche Photo Diode)



รูปที่ 3.4 แสดงโฟโตไดโอดที่ใช้ในการทดลอง

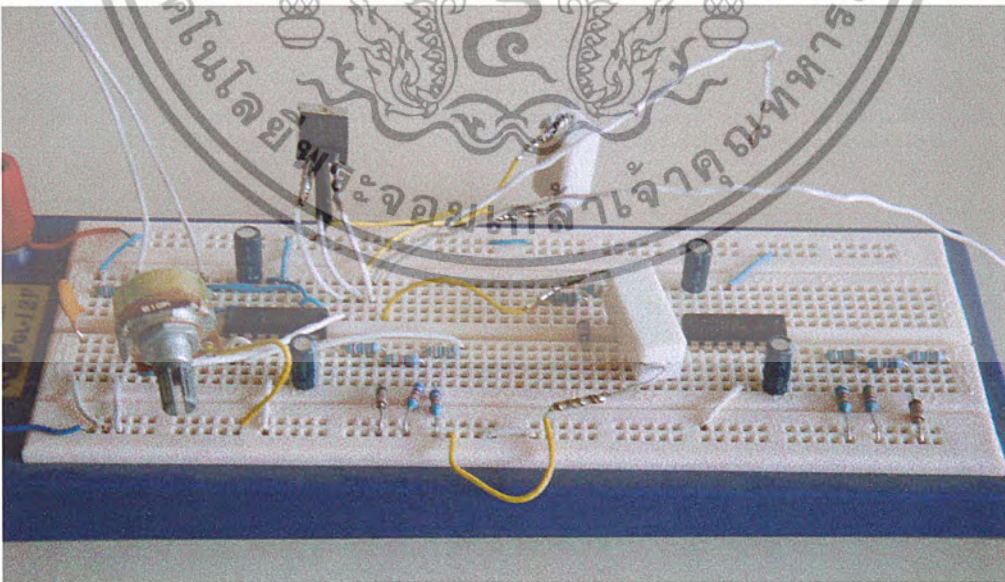
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ออสซิลโลสโคป



รูปที่ 3.5 แสดงออสซิลโลสโคปที่ใช้ในการทดลอง

4. Temperature Control Circuit (Option)



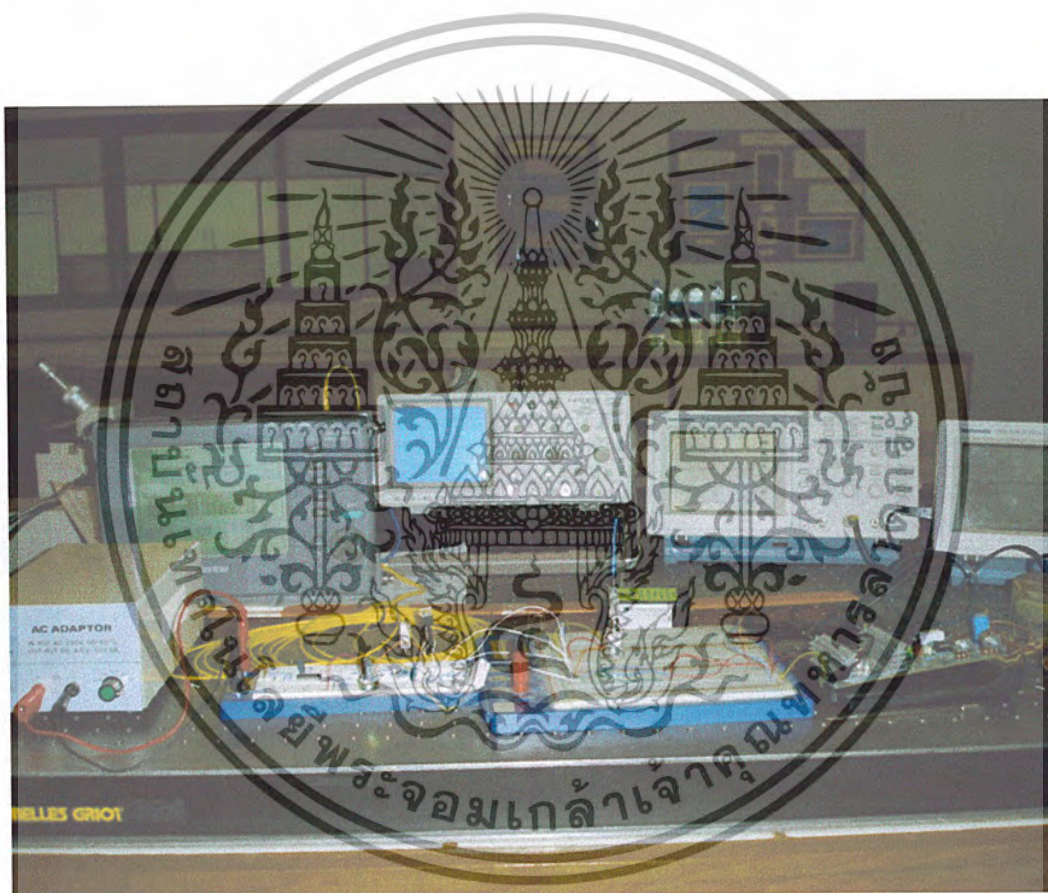
รูปที่ 3.6 แสดงวงจรควบคุมอุณหภูมิของ TEC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับระบบของ Single Photon Detector โดยจะใช้อุปกรณ์ OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) เป็นแหล่งกำเนิดโฟตอน โดยจะส่งลำแสงโฟตอนผ่านเส้นใยแก้วนำแสง

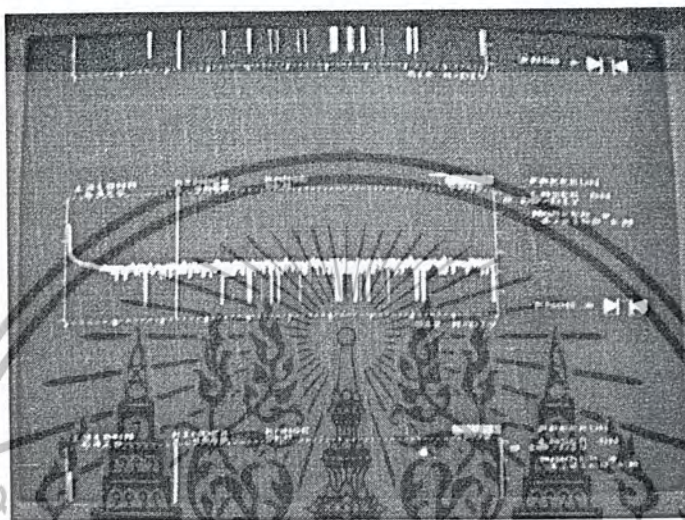


รูปที่ 4.1 แสดงชุดอุปกรณ์การทดลอง

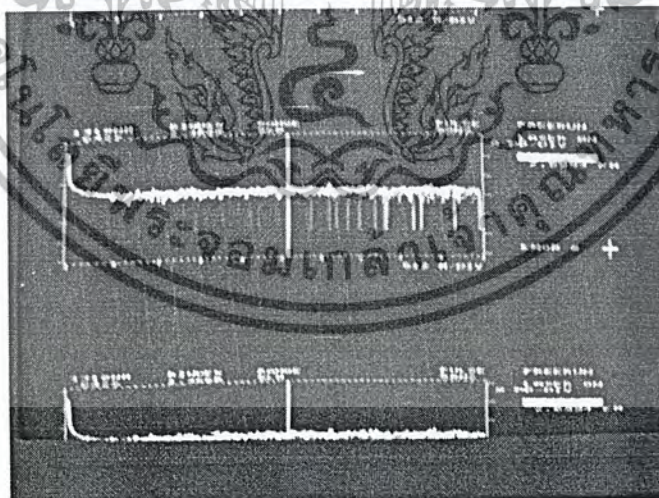
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 การทดลองตรวจจับสัญญาณของลำโฟตอน

เป็นการทดลองต่อแหล่งกำเนิดเข้ากับดีเทคเตอร์ ซึ่งจะส่งสัญญาณแสงเดินทางไปในเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งมีระยะความยาว 20,40,80 km โดยมีความยาวคลื่น 1310 nm. และ 1550 nm. จะได้ผลการทดลองดังนี้

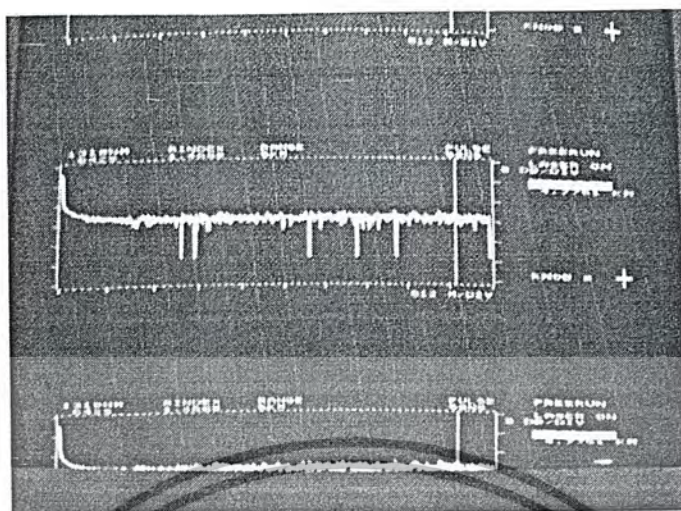


รูปที่ 4.1 แสดงหน้าจอของOTDR ที่ตรวจที่ระยะ 20 km มีความยาวคลื่น 1310 nm

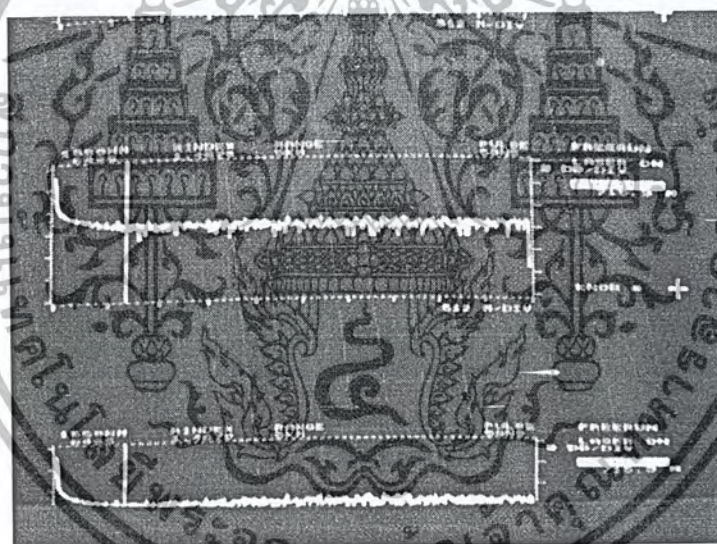


รูปที่ 4.2 แสดงหน้าจอของOTDR ที่ตรวจที่ระยะ 40 km มีความยาวคลื่น 1310 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

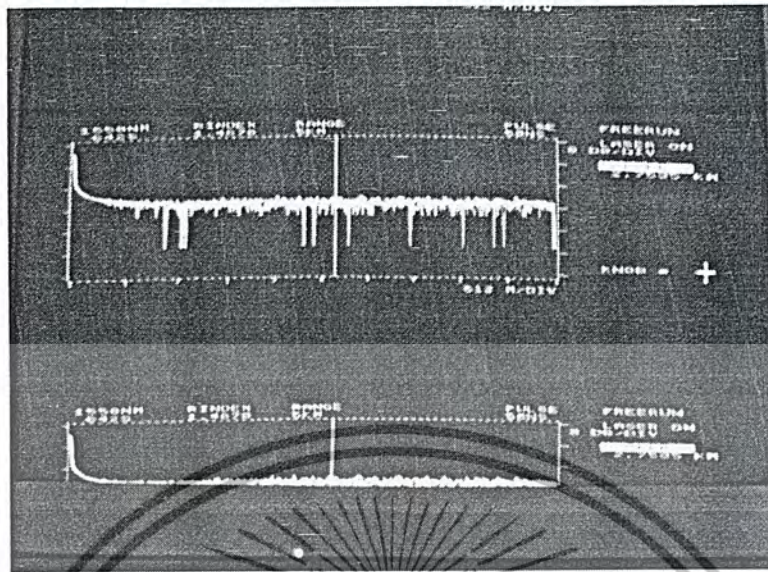


รูปที่ 4.3 แสดงหน้าจอของOTDR ที่ตรวจที่ระยะ 80 km มีความยาวคลื่น 1310 nm

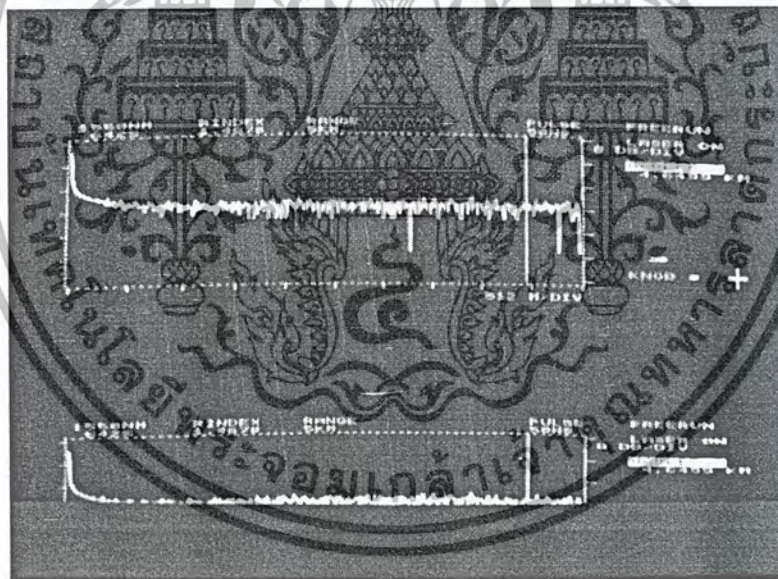


รูปที่ 4.4 แสดงหน้าจอของOTDR ที่ตรวจที่ระยะ 20 km มีความยาวคลื่น 1550 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงหน้าจอของOTDR ที่ตรวจที่ระยะ 40 km มีความยาวคลื่น 1550 nm

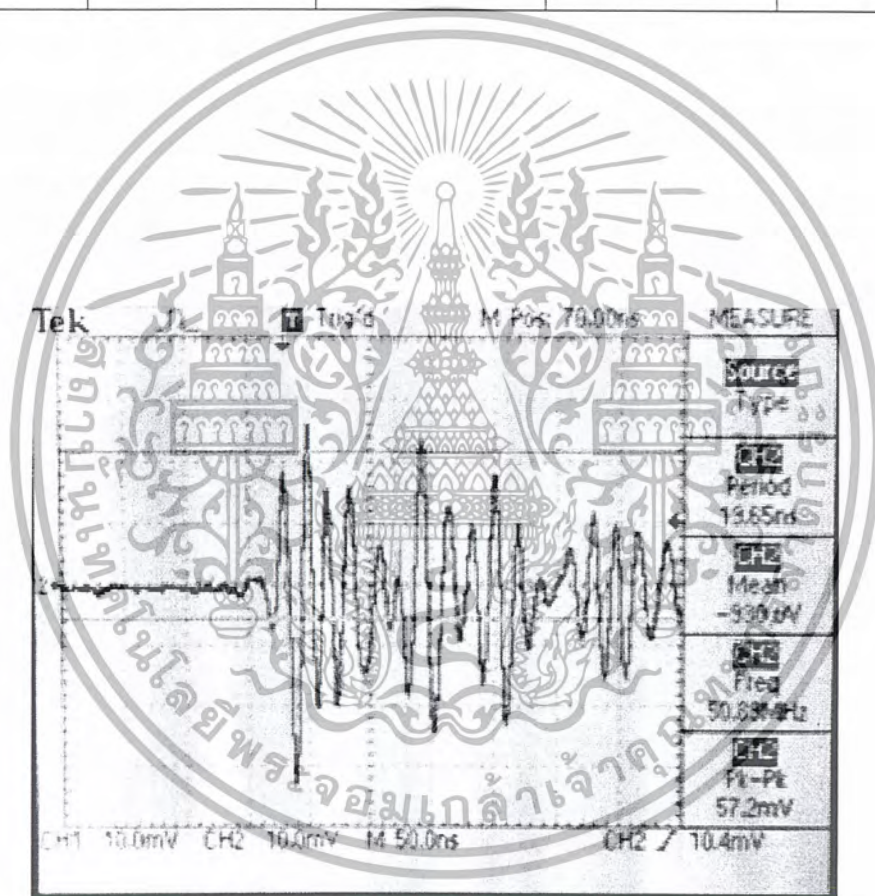


รูปที่ 4.6 แสดงหน้าจอของOTDR ที่ตรวจที่ระยะ 80 km มีความยาวคลื่น 1550 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

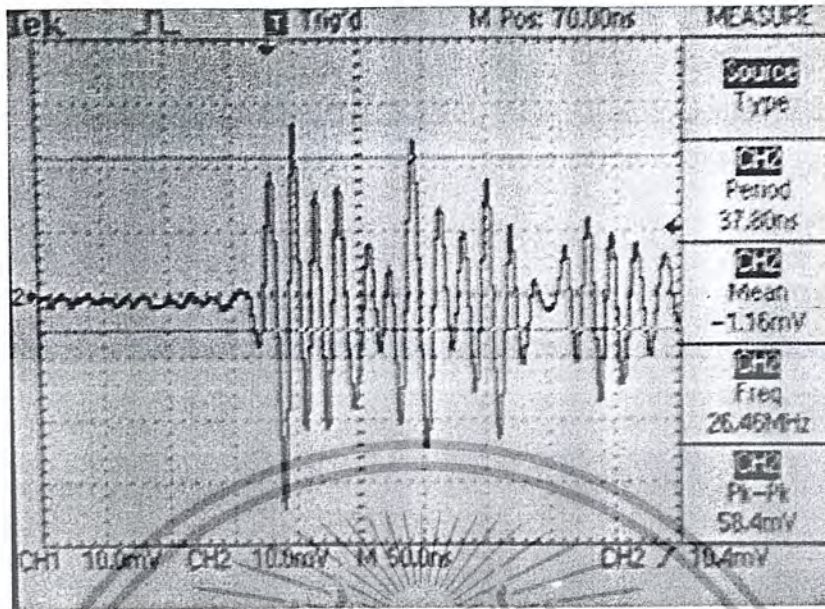
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าการตรวจจับสนิฟตอนโดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส

ระยะทาง (km)	Peak to Peak (mv)		ความถี่ (MHz)	
	$\lambda = 1310 \text{ nm}$	$\lambda = 1550 \text{ nm}$	$\lambda = 1310 \text{ nm}$	$\lambda = 1550 \text{ nm}$
20	8.57	9.12	21.25	25.52
40	9.02	10.55	24.37	28.44
80	10.76	11.82	25.40	30.62

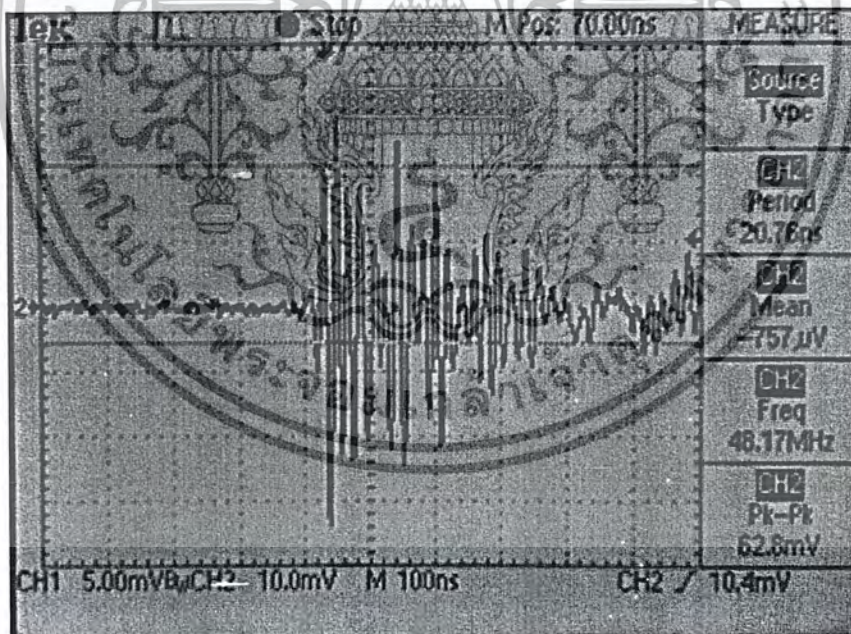


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1310 \text{ nm}$ ระยะทาง 20 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

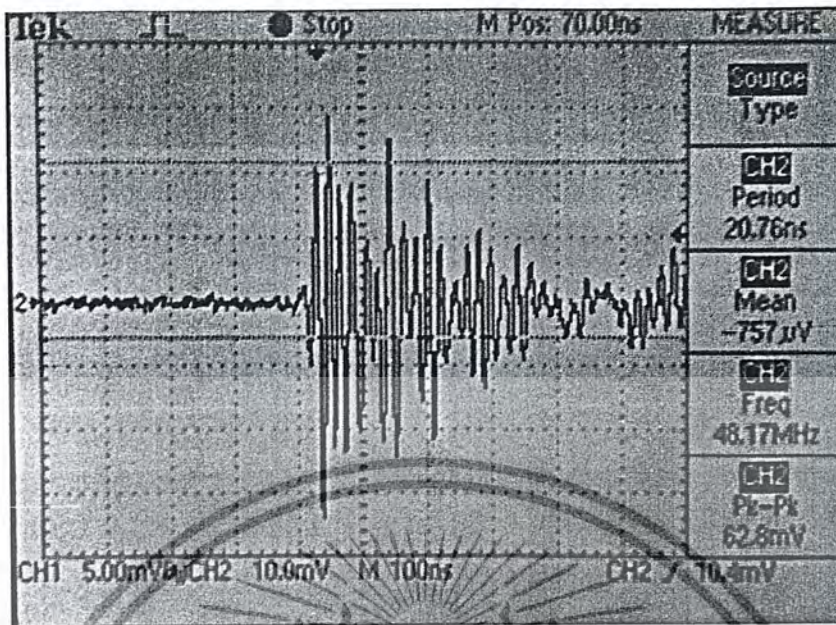


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1550$ nm ระยะทาง 20 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส

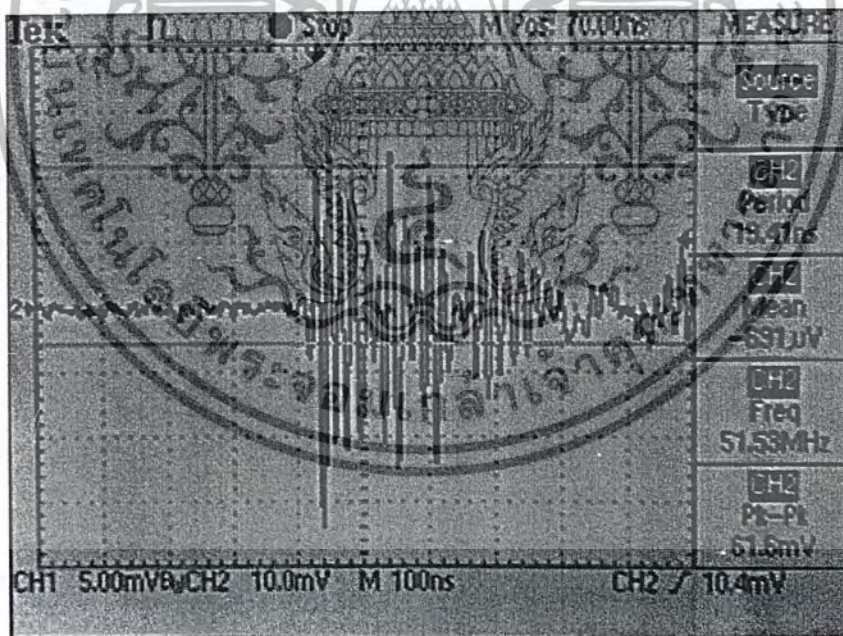


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1310$ nm ระยะทาง 40 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

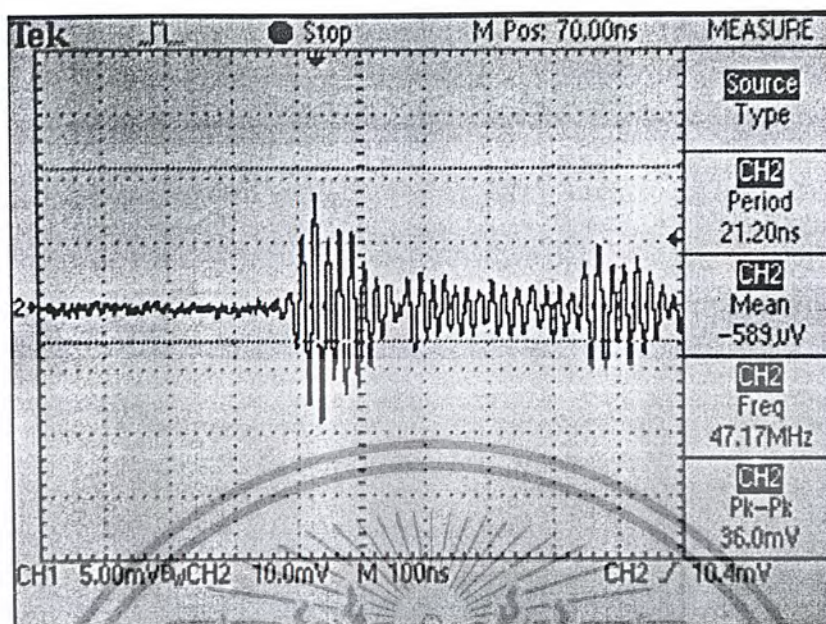


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1550$ nm ระยะทาง 40 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1310$ nm ระยะทาง 80 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

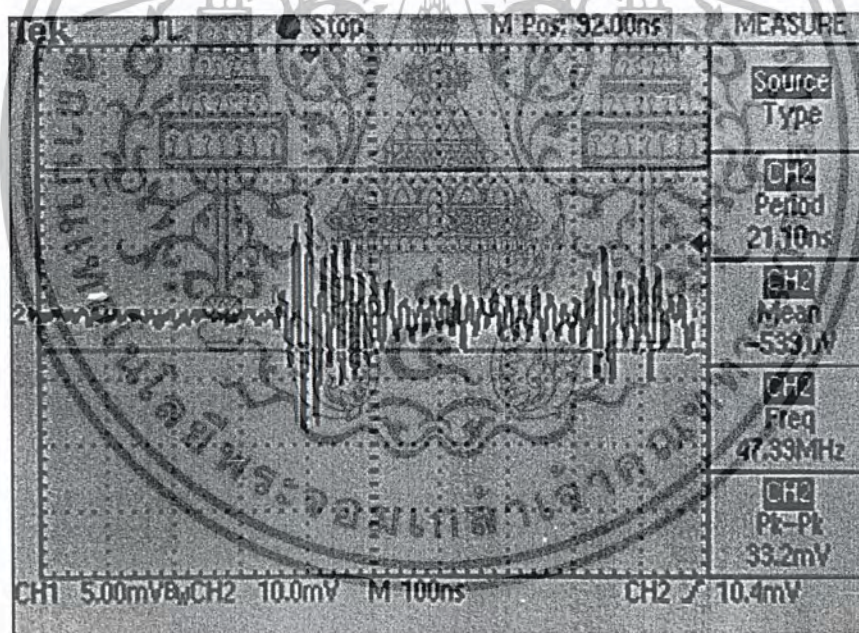


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1550 \text{ nm}$, ระยะทาง 80 km โดยดีเทคเตอร์มีอนุกรม 22 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

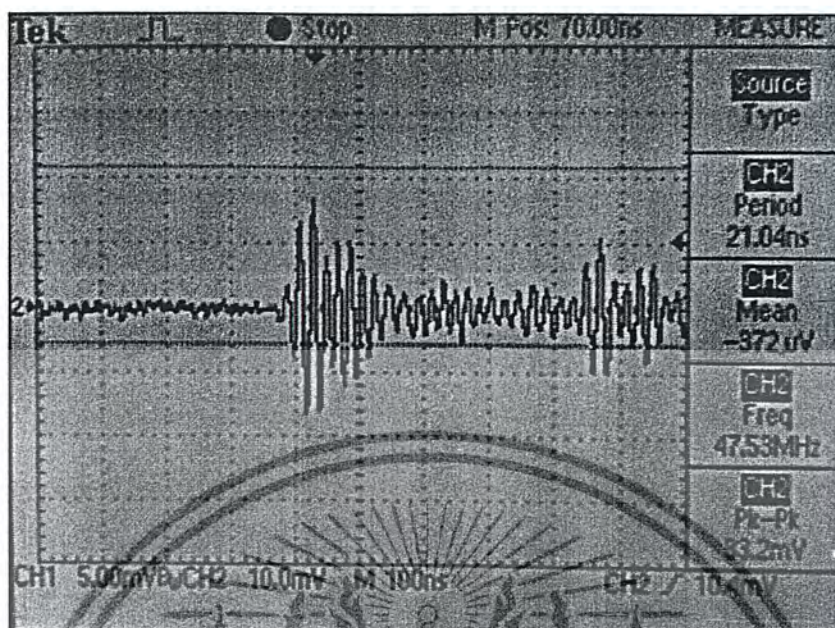
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าการตรวจจับโฟตอนโดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส

ระยะทาง (km)	Peak to Peak (mv)		ความถี่ (MHz)	
	$\lambda = 1310 \text{ nm}$	$\lambda = 1550 \text{ nm}$	$\lambda = 1310 \text{ nm}$	$\lambda = 1550 \text{ nm}$
20	8.13	8.76	23.75	27.32
40	8.89	10.25	26.48	29.55
80	10.25	11.42	27.55	32.48

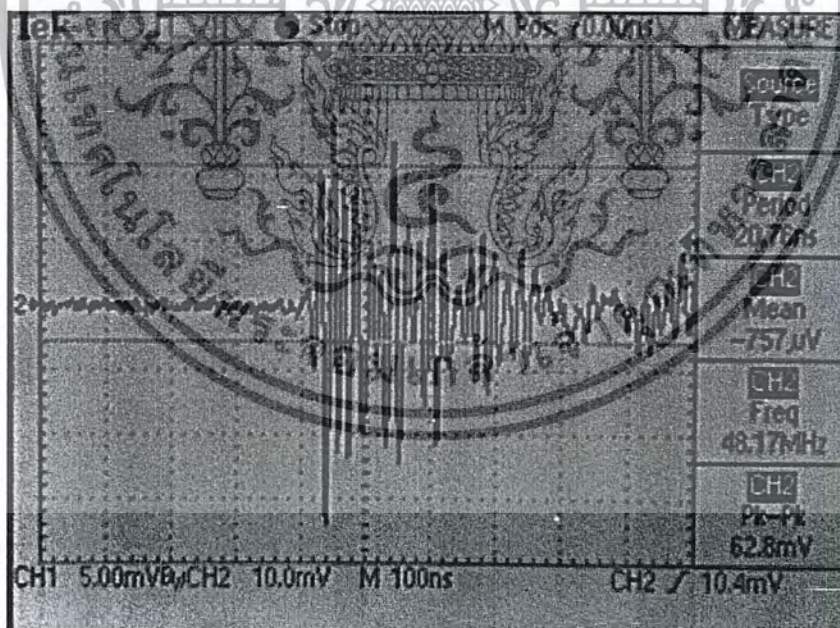


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่า Peak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1310 \text{ nm}$ ระยะทาง 20 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

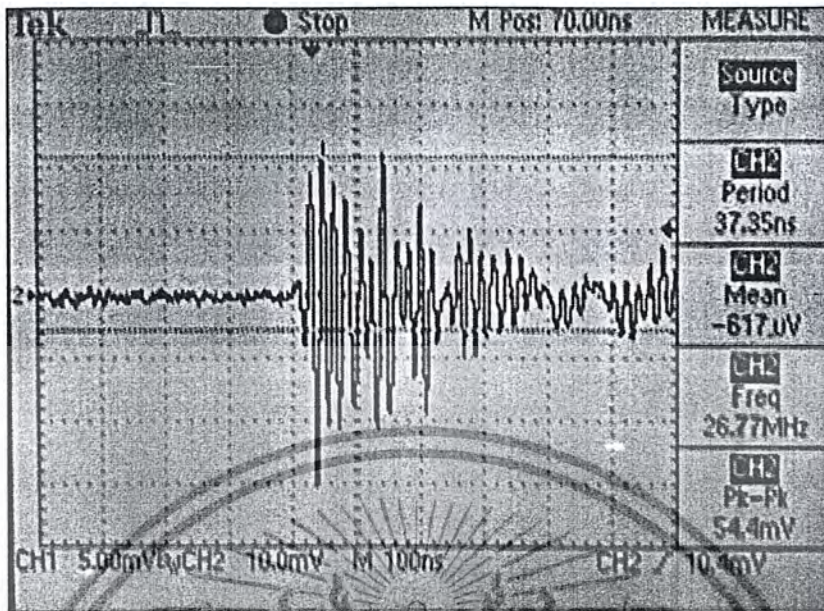


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1550$ nm ระยะทาง 20 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส

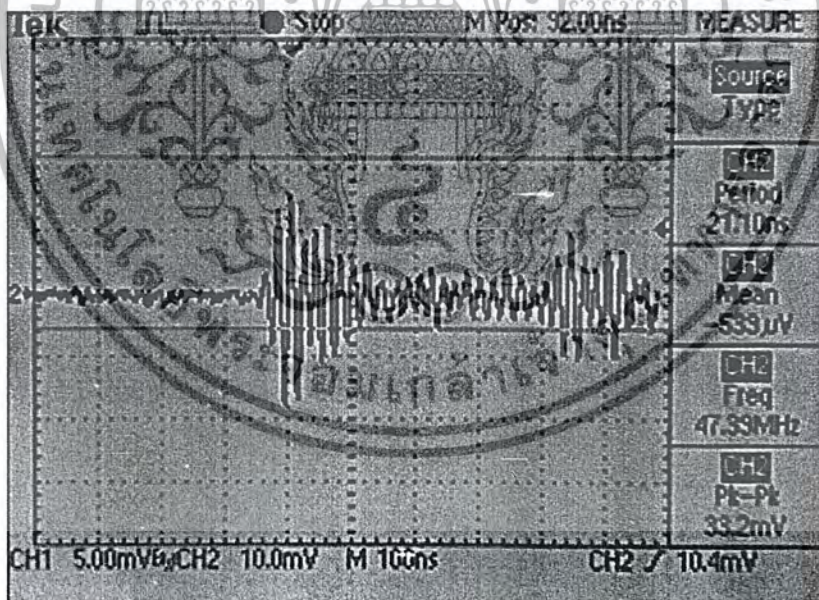


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1310$ nm ระยะทาง 40 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

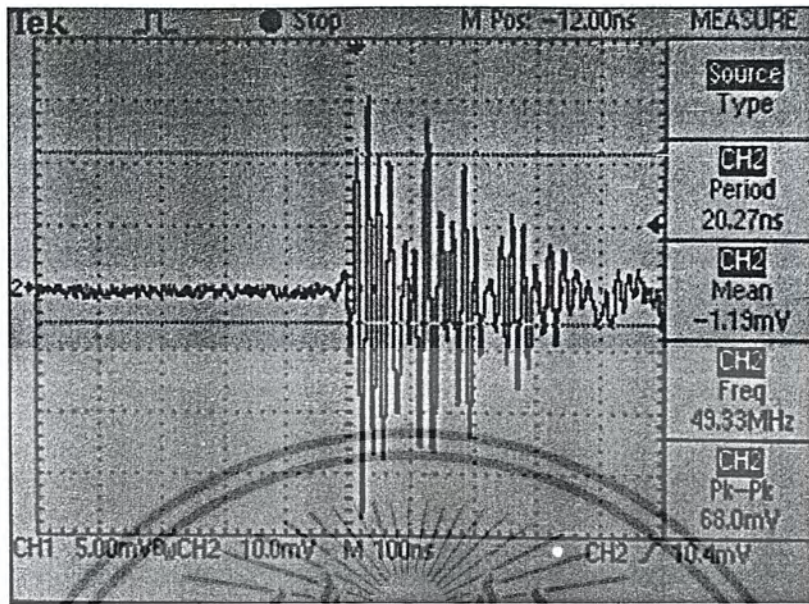


รูปที่ 4.16 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1550$ nm ระยะทาง 40 km โดยดีเทคเตอร์มีอนุกรม 21 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1310$ nm ระยะทาง 80 km โดยดีเทคเตอร์มีอนุกรม 21 องศาเซลเซียส

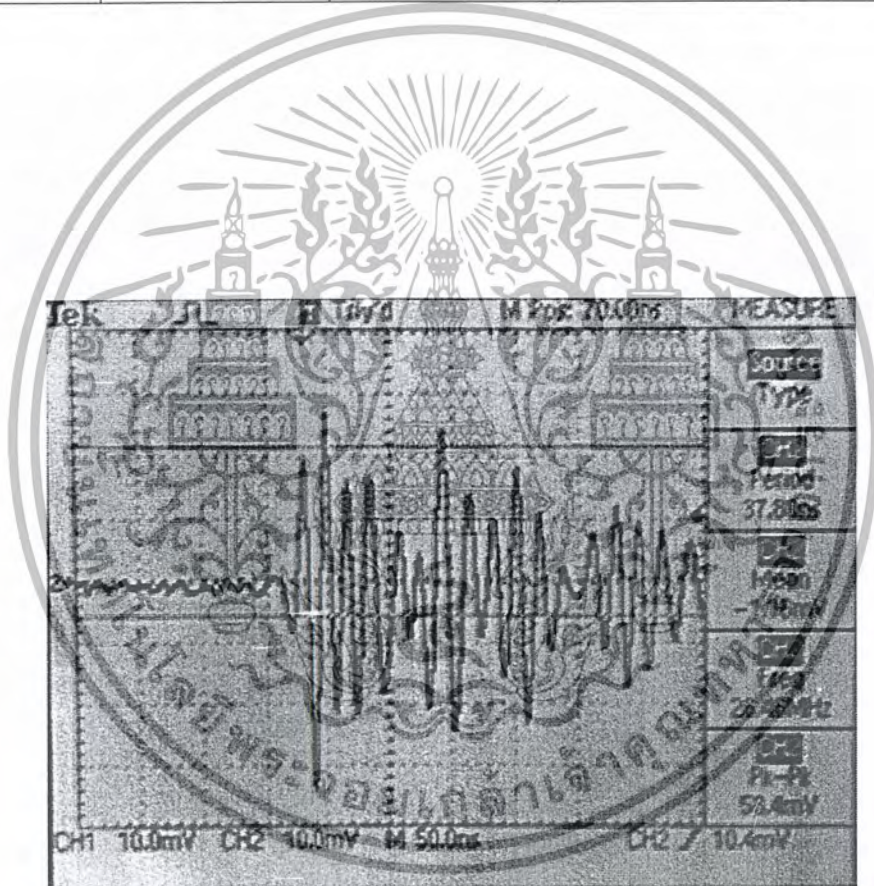
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



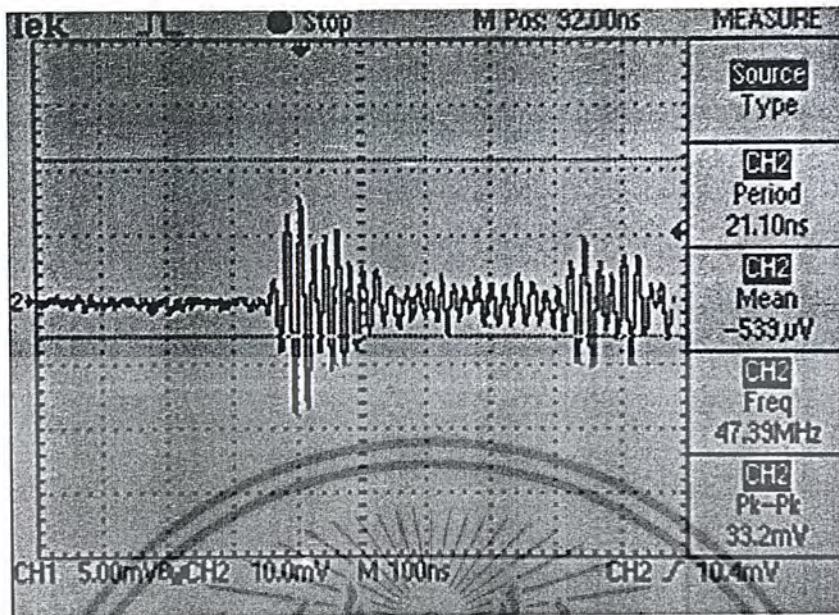
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงค่า Peak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1550$ nm ระยะทาง 80 km โดยดีเทคเตอร์มีอนุกรม 21 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าการตรวจจับสนิทอนโดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

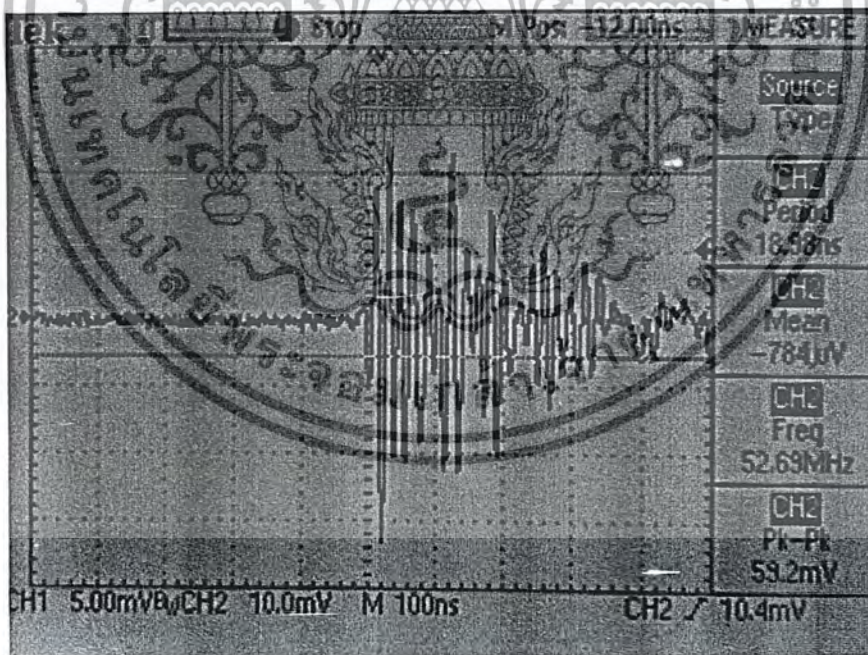
ระยะทาง (km)	Peak to Peak (mv)		ความถี่ (MHz)	
	$\lambda = 1310 \text{ nm}$	$\lambda = 1550 \text{ nm}$	$\lambda = 1310 \text{ nm}$	$\lambda = 1550 \text{ nm}$
20	7.92	8.20	24.39	30.13
40	8.52	9.92	33.88	34.67
80	9.56	11.08	36.65	37.59



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1310 \text{ nm}$
ระยะทาง 20 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

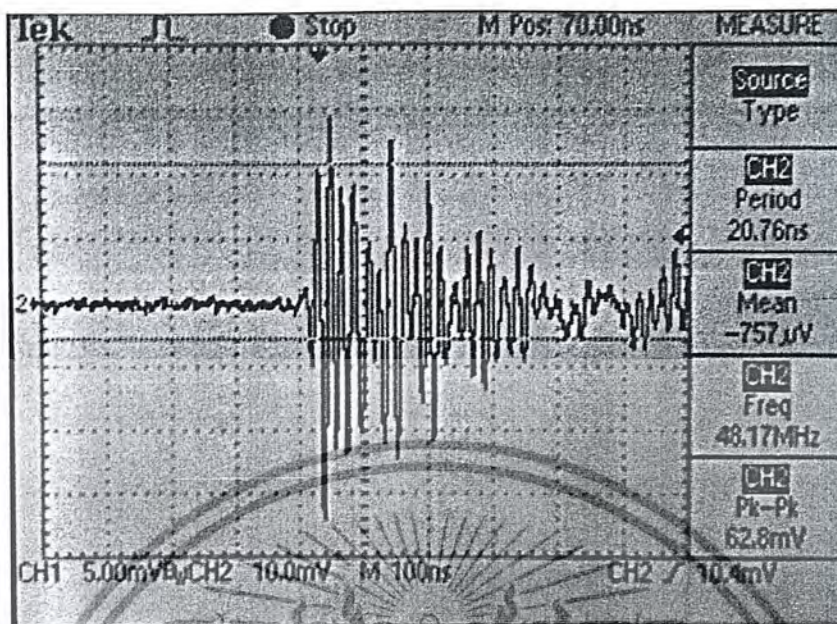


รูปที่ 4.20 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1550$ nm ระยะทาง 20 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

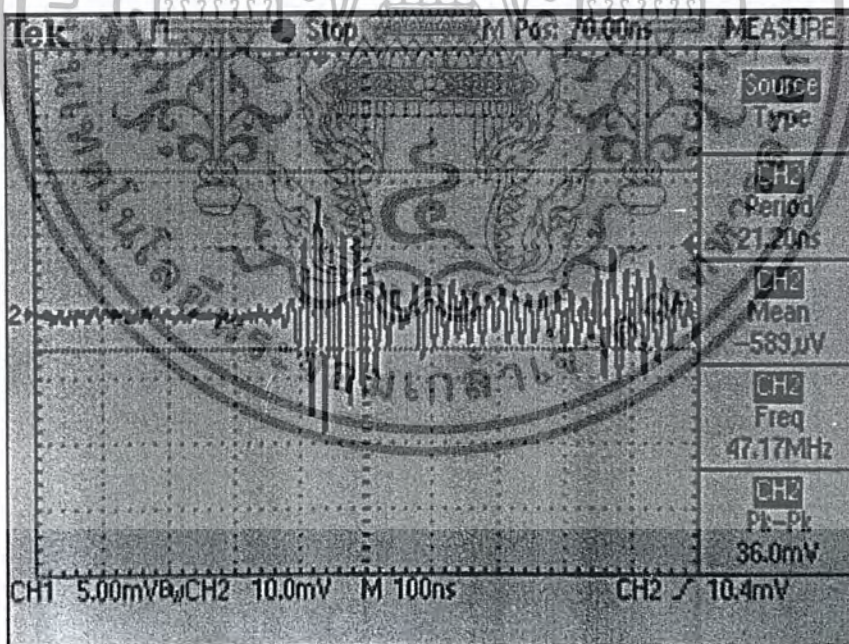


รูปที่ 4.21 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1310$ nm ระยะทาง 40 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

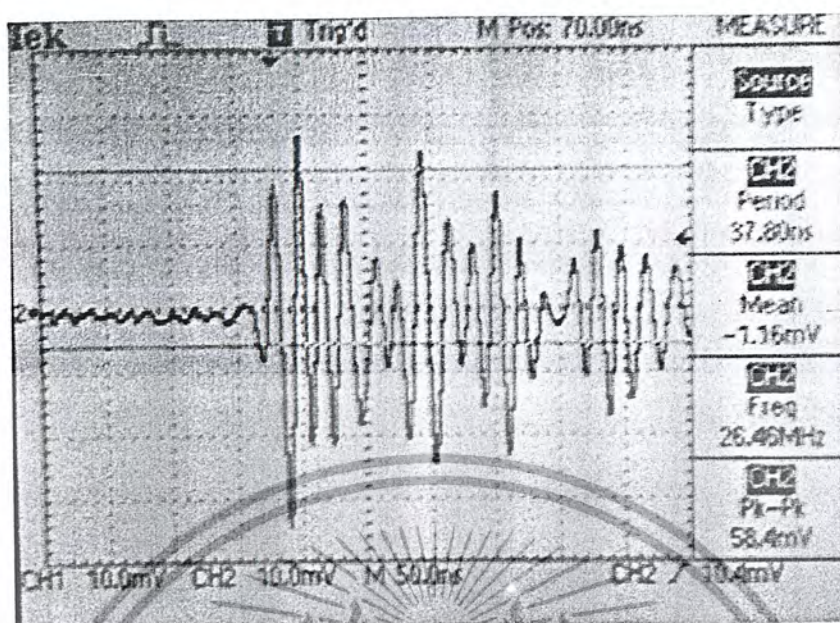


รูปที่ 4.22 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1550$ nm
ระยะทาง 40 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1310$ nm
ระยะทาง 80 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

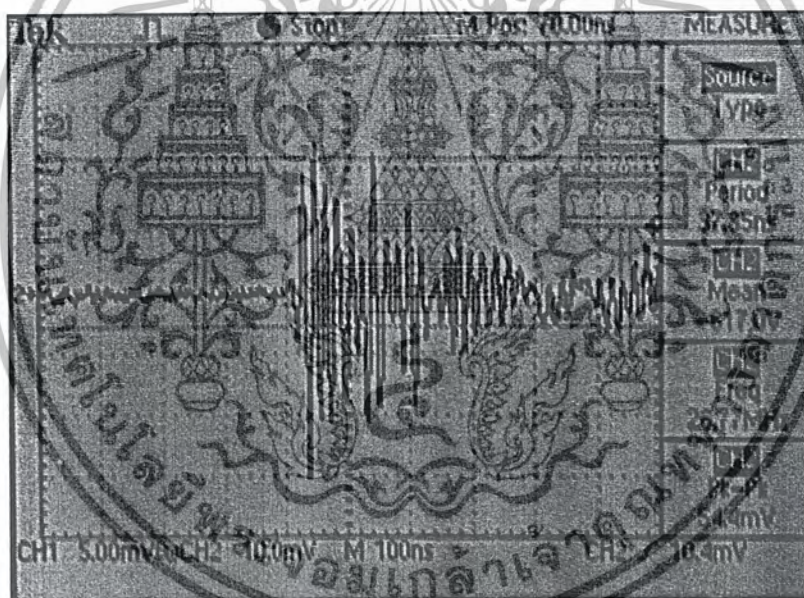
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1550$ nm ระยะทาง 80 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

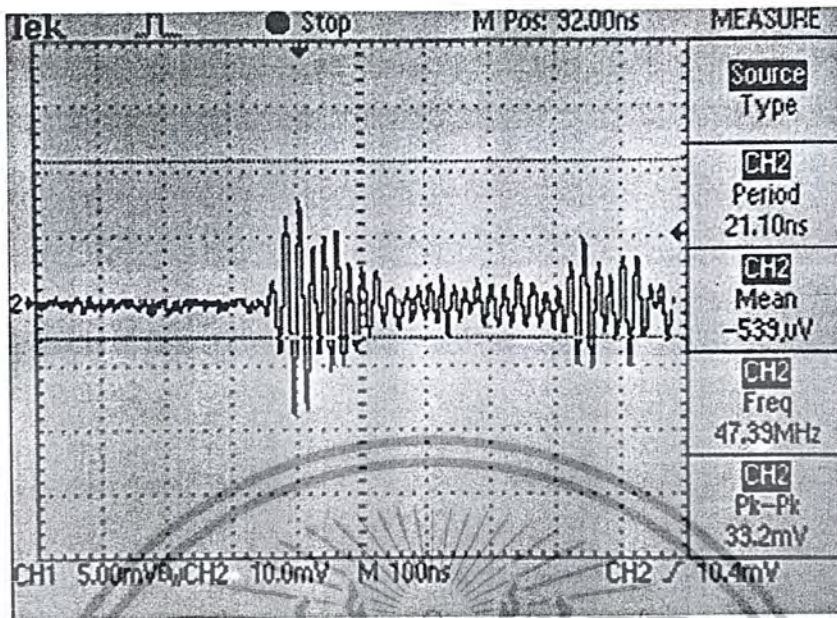
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าการตรวจจับโฟตอนโดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 19 องศาเซลเซียส

ระยะทาง (km)	Peak to Peak (mv)		ความถี่ (MHz)	
	$\lambda = 1310 \text{ nm}$	$\lambda = 1550 \text{ nm}$	$\lambda = 1310 \text{ nm}$	$\lambda = 1550 \text{ nm}$
20	6.36	7.48	29.15	30.13
40	7.06	7.94	33.88	34.67
80	8.13	8.80	36.65	37.59

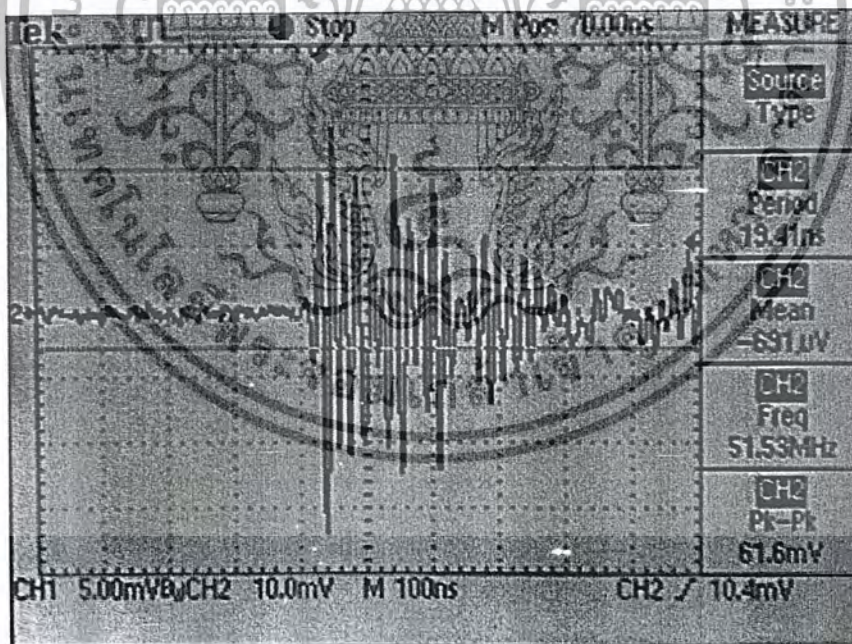


รูปที่ 4.25 กราฟแสดงค่า Peak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1310 \text{ nm}$ ระยะทาง 20 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 19 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

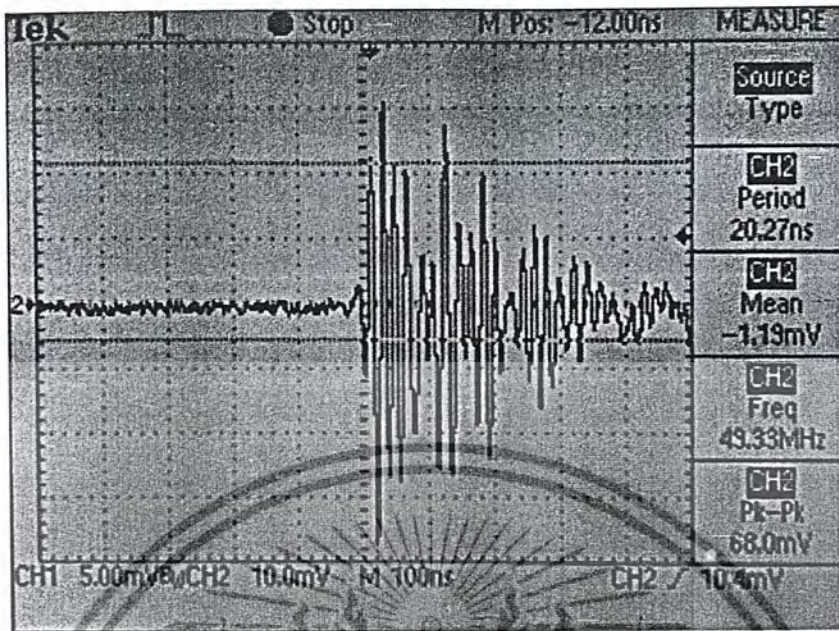


รูปที่ 4.26 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1550$ nm ระยะทาง 20 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 19 องศาเซลเซียส

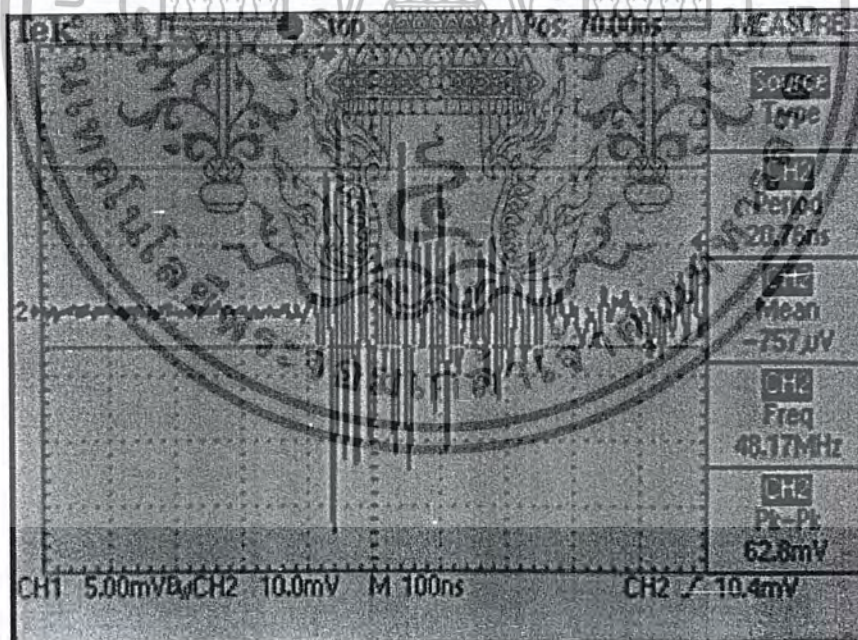


รูปที่ 4.27 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1310$ nm ระยะทาง 40 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 19 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

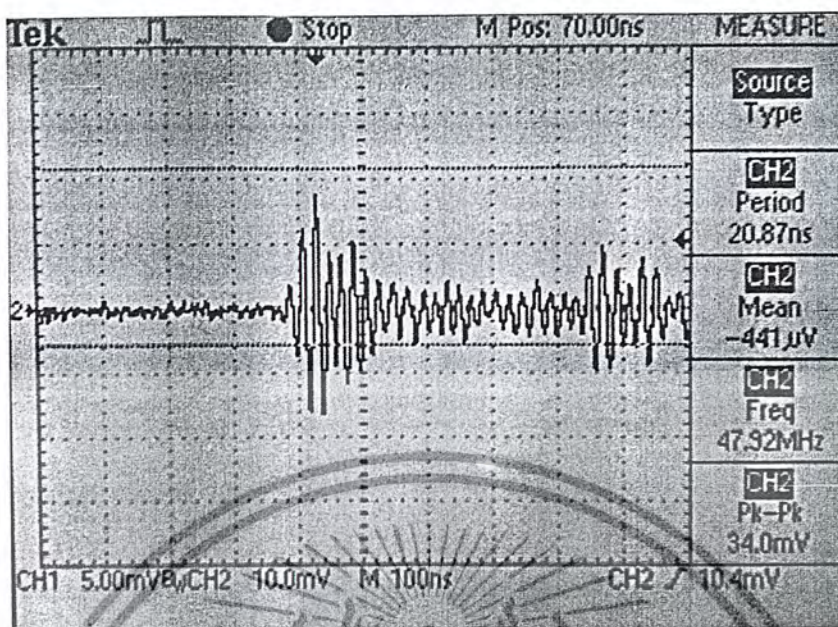


รูปที่ 4.28 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1550$ nm ระยะทาง 40 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 19 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1310$ nm ระยะทาง 80 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 19 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงค่า Peak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1550$ nm ระยะทาง 80 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 19 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

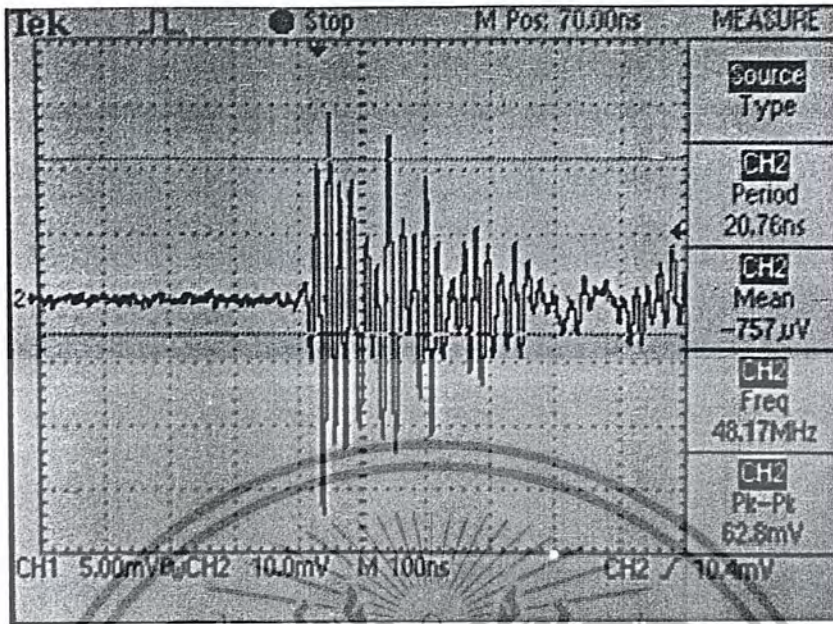
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าการตรวจจذبโฟตอนโดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 18 องศาเซลเซียส

ระยะทาง (km)	Peak to Peak (mv)		ความถี่ (MHz)	
	$\lambda = 1310 \text{ nm}$	$\lambda = 1550 \text{ nm}$	$\lambda = 1310 \text{ nm}$	$\lambda = 1550 \text{ nm}$
20	5.16	7.12	33.24	37.20
40	6.84	7.60	37.54	38.11
80	7.68	8.08	39.13	40.92



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1310 \text{ nm}$ ระยะทาง 20 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 18 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

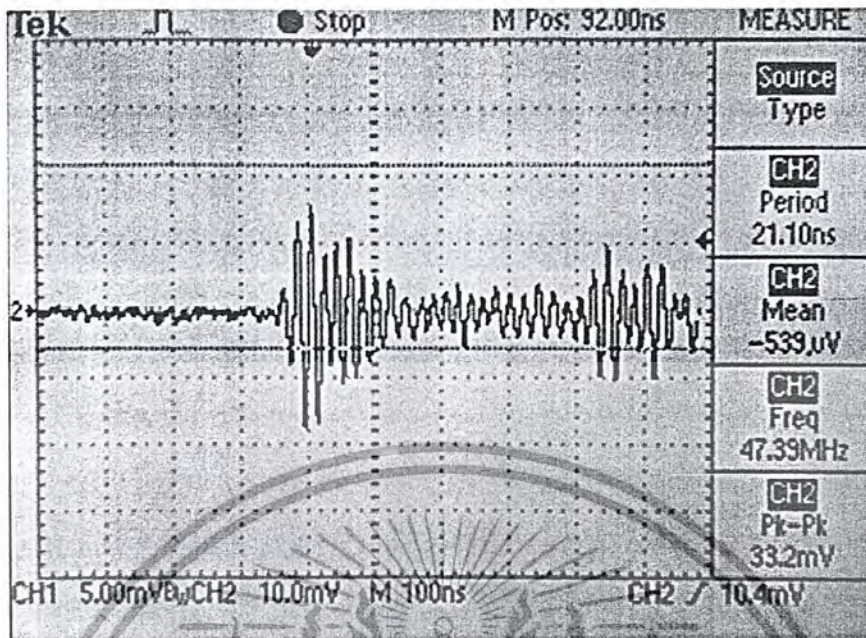


รูปที่ 4.32 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1550$ nm ระยะทาง 20 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 18 องศาเซลเซียส

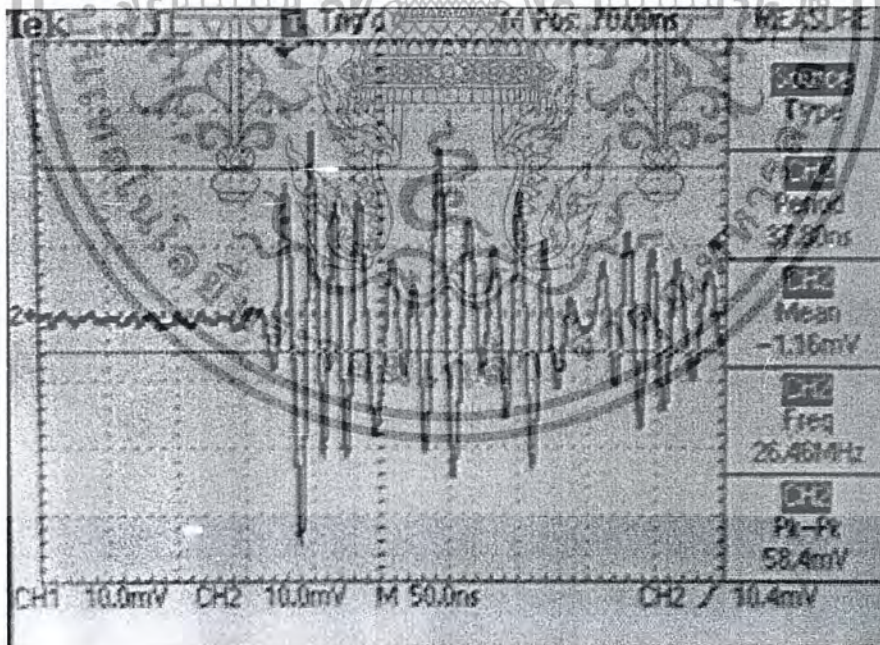


รูปที่ 4.33 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1310$ nm ระยะทาง 40 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 18 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

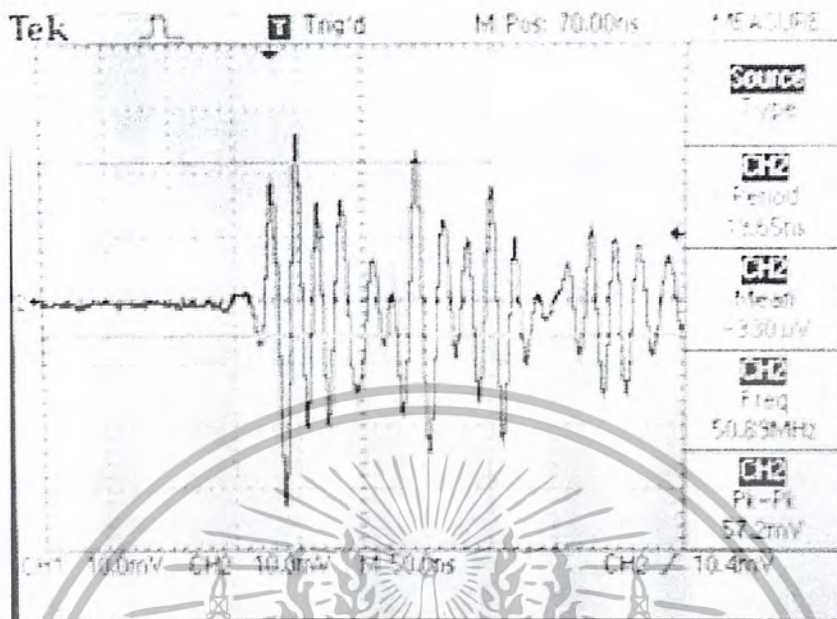


รูปที่ 4.34 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1550$ nm ระยะทาง 40 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 18 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.35 กราฟแสดงค่าPeak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1310$ nm ระยะทาง 80 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 18 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 กราฟแสดงค่า Peak to Peak และความถี่ที่ได้จากดีเทคเตอร์ที่ $\lambda = 1550$ nm ระยะทาง 80 km โดยดีเทคเตอร์มีอุณหภูมิ 18 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อให้ความยาวคลื่นของลำแสงที่ออกมาจาก OTDR คงที่ แต่เมื่อมีการปรับแรงดันไฟฟ้าให้ลดลง จะทำให้อุณหภูมิมีค่าลดลงและความถี่ของสัญญาณที่ได้จากตัวดีเทคเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ถ้าปรับแรงดันไฟฟ้าให้เพิ่มขึ้น ค่าอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้น ทำให้ความถี่ของสัญญาณที่ได้จากตัวดีเทคเตอร์มีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากตัวดีเทคเตอร์ (APD) ทำงานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำๆ และที่อุณหภูมิต่ำๆจะมีสัญญาณรบกวนน้อย

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการพิเศษนี้เป็นการสร้างระบบการตรวจจับโฟตอนเดี่ยว โดยใช้ OTDR เป็นแหล่งกำเนิดลำแสงโฟตอน ซึ่งตัว OTDR ที่ใช้ในโครงการพิเศษนี้จะมีความยาวคลื่นอยู่สองค่าคือ 1310 nm. และ 1550 nm. ซึ่งเป็นย่านของการสื่อสารในระบบเส้นใยแก้วนำแสง และมีการใช้เส้นใยแก้วนำแสงที่ระยะ 20 , 40 และ 80 กิโลเมตร

ในการวิจัยครั้งนี้ลำแสงโฟตอนที่เกิดจาก OTDR จะถูกส่งผ่านไปตามท่อเส้นใยแก้วนำแสงจากนั้นจะเข้าดีเทคเตอร์ (APD) เพื่อทำการตรวจจับโฟตอน โดยจะแสดงออกทางหน้าจอของ Oscilloscope

ปกติดีเทคเตอร์จะมีการเชื่อมต่อกับ Thermoelectric cooler และ Temperature control circuit เพื่อทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของดีเทคเตอร์เพราะว่าดีเทคเตอร์จะทำงานได้ดีเมื่ออุณหภูมิต่ำมาก ๆ แต่เนื่องจาก Thermoelectric cooler นั้นเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาแพง และไม่มีขายในประเทศ ทั้งนี้เราแค่เพียงใช้ Thermoelectric cooler ที่มีอยู่ในดีเทคเตอร์ ซึ่งมีขนาดเล็กมาก ทำให้เราไม่สามารถลดอุณหภูมิลงได้ถึงระดับตามที่ต้องการได้

ในโครงการพิเศษนี้ได้ศึกษาปัจจัยทางด้านอุณหภูมิของระบบที่มีผลต่อการตรวจจับโฟตอน ในขณะที่ความยาวคลื่นคงที่ เมื่ออุณหภูมิลดลง ค่า Peak to peak (mV) จะมีค่าลดลง แต่ค่าความถี่จะเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเมื่อปรับแรงดันไฟฟ้าให้ลดลง อุณหภูมิจะลดลงแต่ค่าความถี่ในการตรวจจับโฟตอนจะมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่าแบนวิทซ์กว้างขึ้น และทำให้ดีเทคเตอร์มีการตอบสนองได้รวดเร็วขึ้น เพราะว่าดีเทคเตอร์ (APD) ทำงานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำซึ่งจะช่วยลดสัญญาณรบกวนทางควอนตัม จากกราฟที่ได้นั้นดีเทคเตอร์จะสามารถตรวจจับซิงเกิลโฟตอนได้ 1 ครั้ง จากนั้นดีเทคเตอร์จะเกิดการอิ่มตัวทำให้ไม่รับรู้ต่อพลังงานต่อมาได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในโครงการพิเศษนี้ การควบคุมอุณหภูมิทำได้โดยค่อนข้างลำบาก เนื่องจากได้รับผลกระทบจากภายนอก เช่น แสงแดดสะท้อนจากรถไฟ และแรงลมจากเครื่องปรับอากาศ ทำให้ได้ผลการทดลองที่คลาดเคลื่อนจากเดิมเล็กน้อย เพราะว่ามีสัญญาณรบกวน และเนื่องจากอุปกรณ์ TEC มีราคาแพงทำให้การทดลองไม่อาจลดอุณหภูมิลงได้ถึงระดับที่ติดลบได้ ทำให้ได้ผลการทดลองไม่ดีเท่าที่คาดการณ์ไว้ เนื่องจากมีสัญญาณรบกวนทางควอนตัมเกิดขึ้นมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. สมพงษ์ ใจดี., *ฟิสิกส์มหาวิทยาลัย 4*, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, 2542.
2. ดุสิต เครื่องงาม., *สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งานเล่ม 1*, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
3. อ่าง เมธาศิริ., *ฟิสิกส์แผนใหม่*, ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2531.
3. ปรีชา ยุพาพิน., *วิศวกรรมใยแก้วนำแสง*, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพมหานคร, 2544.
4. ปรีชา ยุพาพิน., *เครือข่ายใยแก้วนำแสง*, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพมหานคร, 2543.
5. Hans A. Bachor., *A guide to experiments in quantum optics*, The Australian National University, Faculty of science, Department of Physics Australia, WILEY-VCH Germany, 1998.

เอกสารอ้างอิง

1. สมพงษ์ ใจดี.,ฟิสิกส์มหาวิทยาลัย 4, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,กรุงเทพมหานคร,2542.
2. ดุสิต เครื่องงาม.,สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งานเล่ม1,สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
3. อ่าง เมธาศิริ.,ฟิสิกส์แผนใหม่, ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,2531.
3. ปรีชา ยูพาพิน.,วิศวกรรมใยแก้วนำแสง, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพมหานคร,2544.
4. ปรีชา ยูพาพิน.,เครือข่ายใยแก้วนำแสง, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพมหานคร,2543.
5. Hans A. Bachor., *A guide to experiments in quantum optics* ,The Australian National University, Faculty of science, Department of Physics Australia, WILEY-VCH Germany,1998.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PHOTO DIODES 3.6 μm

Model PD36-03-TEC

3.6 μm 0.3 mm

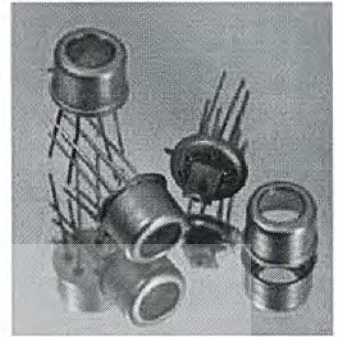
One stage Thermoelectrically Cooled InAs/InAsSbP photodiodes

Photodiodes **PD36-03-TEC** are designed for detecting the radiation in the Middle Infrared spectral range from 1000 to 3600 nm. Heterostructures with the InAsSbP "window" are grown on InAs substrates.

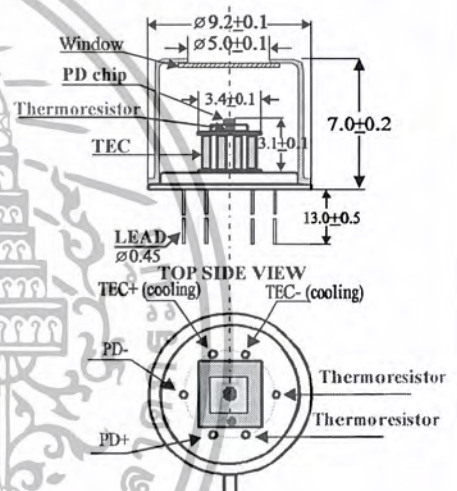
- Photodiodes **PD36-03-TEC** are placed in standard 9 mm package TO-5. Thermocooler and thermoresistor are mounted inside package TO-5.

- Photodiodes **PD36-03-TEC** have the photosensitive area with diameter of 300 μm . Fast response makes possible their use for the detection of high frequency modulated laser or LED emission.

- Related products: **PD36-03** can be used in optical pair with our **LED27÷LED36** and **LD300÷LD360**. We offer the preamplifier model **AM-04** suitable for **PD36-03**.



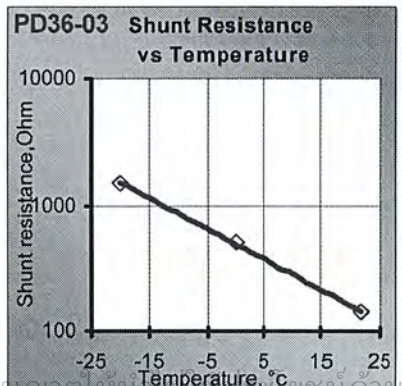
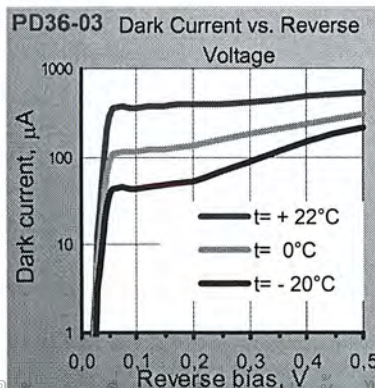
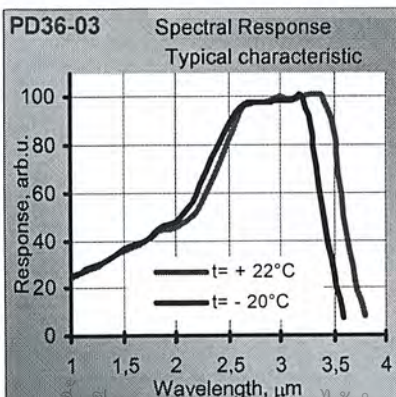
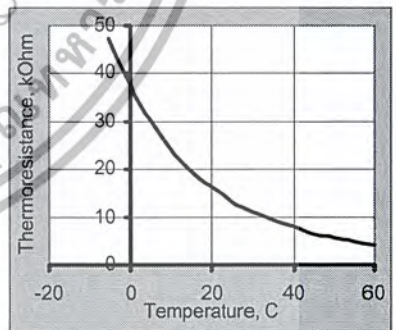
Package TO-5

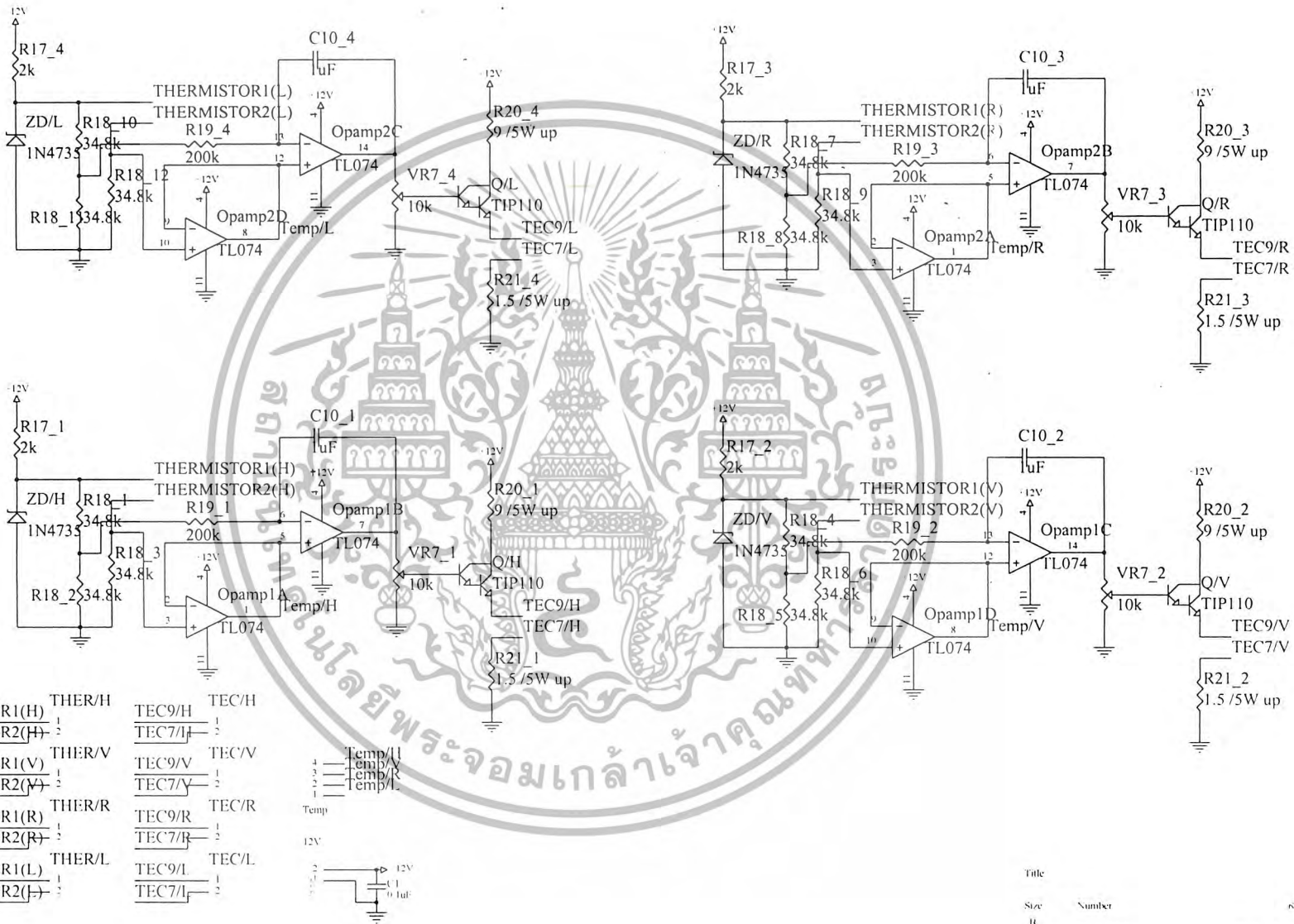


Parameters	$t = -20^\circ\text{C}$	$t = 22^\circ\text{C}$
Cut-off wavelength, μm (at 10%)	3.70	3.80
Responsivity, A/W ($\lambda = 3.4 + 3.6 \mu\text{m}$)	1.0	1.2
Peak wavelength > 90%	2.5-3.3	2.6-3.4
Dark Current, μA ($V = -0.2\text{V}$)	40-90	400-500
($V = -0.4\text{V}$)	90-150	500-600
Shunt resistance, Ohm	minimum 900	minimum 100
	typical 1100	typical 120
Capacitance, pF ($V = 0$)	minimum 800	typical 1300
Rise and Fall Time, ns ($V = 0\text{V}$)	150-200 ns	
Detectivity, D^* , $\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ ($\lambda_p, 1000, 1$)	$(0.6-1.0) \cdot 10^{10}$	$(1-3) \cdot 10^9$
Sensitive area diameter, μm	300	
Package	TO-5 with thermocooler and thermistor	

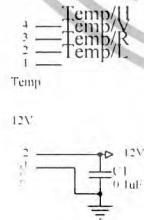
Main thermocooler parameters (without load)

I_{max} (Amps)	Q_{max} (Watts)	U_{max} (Volts)	ΔT_{max} $^\circ\text{C}$
0.7	0.4	1.0	67





THERMISTOR1(H)	THER/H	TEC9/H	TEC/H
THERMISTOR2(H)		TEC7/H	
THERMISTOR1(V)	THER/V	TEC9/V	TEC/V
THERMISTOR2(V)		TEC7/V	
THERMISTOR1(R)	THER/R	TEC9/R	TEC/R
THERMISTOR2(R)		TEC7/R	
THERMISTOR1(L)	THER/L	TEC9/L	TEC/L
THERMISTOR2(L)		TEC7/L	



Title	Number	Revision
Size		
Date	29-Sep-2004	Sheet of
File	C:\share\TTC\Rec_tec.dtb	Drawn By

NASA/TM-1999-209689



Temperature Control of Avalanche Photodiode Using Thermoelectric Cooler

Tamer F. Refaat
Old Dominion University, Norfolk, Virginia

William S. Luck, Jr. and Russell J. DeYoung
Langley Research Center, Hampton, Virginia



October 1999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The NASA STI Program Office ... in Profile

Since its founding, NASA has been dedicated to the advancement of aeronautics and space science. The NASA Scientific and Technical Information (STI) Program Office plays a key part in helping NASA maintain this important role.

The NASA STI Program Office is operated by Langley Research Center, the lead center for NASA's scientific and technical information. The NASA STI Program Office provides access to the NASA STI Database, the largest collection of aeronautical and space science STI in the world. The Program Office is also NASA's institutional mechanism for disseminating the results of its research and development activities. These results are published by NASA in the NASA STI Report Series, which includes the following report types:

- **TECHNICAL PUBLICATION.** Reports of completed research or a major significant phase of research that present the results of NASA programs and include extensive data or theoretical analysis. Includes compilations of significant scientific and technical data and information deemed to be of continuing reference value. NASA counterpart of peer-reviewed formal professional papers, but having less stringent limitations on manuscript length and extent of graphic presentations.
 - **TECHNICAL MEMORANDUM.** Scientific and technical findings that are preliminary or of specialized interest, e.g., quick release reports, working papers, and bibliographies that contain minimal annotation. Does not contain extensive analysis.
 - **CONTRACTOR REPORT.** Scientific and technical findings by NASA-sponsored contractors and grantees.
 - **CONFERENCE PUBLICATION.** Collected papers from scientific and technical conferences, symposia, seminars, or other meetings sponsored or co-sponsored by NASA.
 - **SPECIAL PUBLICATION.** Scientific, technical, or historical information from NASA programs, projects, and missions, often concerned with subjects having substantial public interest.
 - **TECHNICAL TRANSLATION.** English-language translations of foreign scientific and technical material pertinent to NASA's mission.
- Specialized services that complement the STI Program Office's diverse offerings include creating custom thesauri, building customized databases, organizing and publishing research results ... even providing videos.
- For more information about the NASA STI Program Office, see the following:
- Access the NASA STI Program Home Page at <http://www.sti.nasa.gov>
 - E-mail your question via the Internet to help@sti.nasa.gov
 - Fax your question to the NASA STI Help Desk at (301) 621-0134
 - Phone the NASA STI Help Desk at (301) 621-0390
 - Write to:
NASA STI Help Desk
NASA Center for AeroSpace Information
7121 Standard Drive
Hanover, MD 21076-1320

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

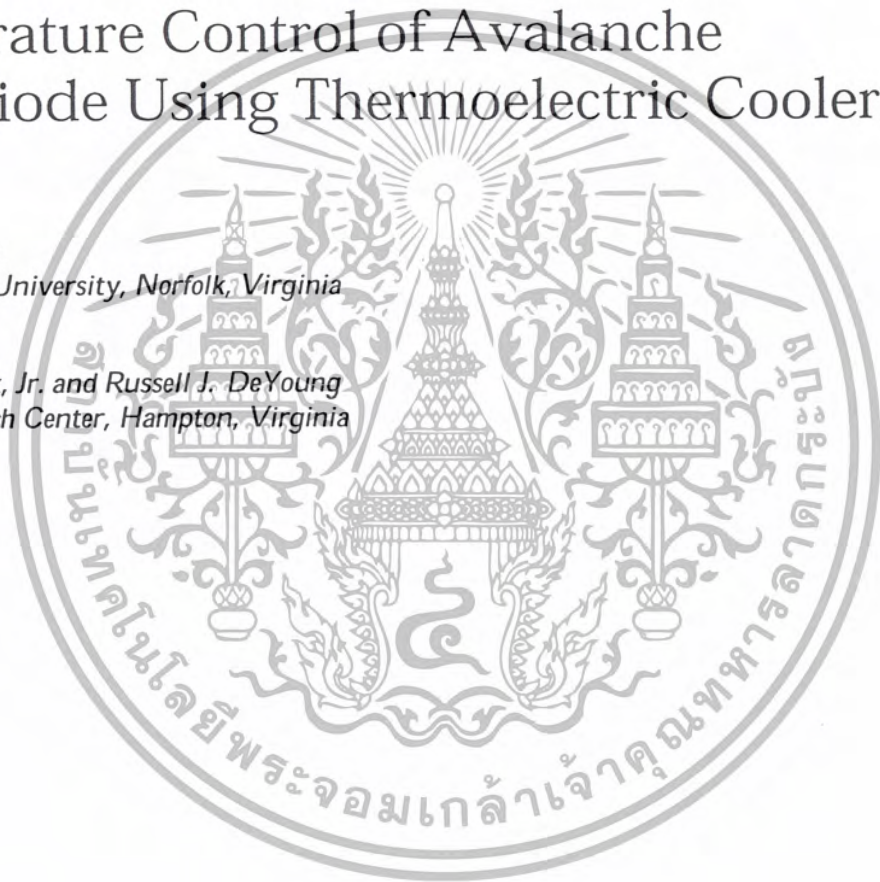
NASA/TM-1999-209689



Temperature Control of Avalanche Photodiode Using Thermoelectric Cooler

Tamer F. Refaat
Old Dominion University, Norfolk, Virginia

William S. Luck, Jr. and Russell J. DeYoung
Langley Research Center, Hampton, Virginia



National Aeronautics and
Space Administration

Langley Research Center
Hampton, Virginia 23681-2199

October 1999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Available from:

NASA Center for AeroSpace Information (CASI)
7121 Standard Drive
Hanover, MD 21076-1320
(301) 621-0390

National Technical Information Service (NTIS)
5285 Port Royal Road
Springfield, VA 22161-2171
(703) 605-6000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. Introduction

The avalanche photodiode (APD) is a solid state, quantum, optical detector which uses the photo-generation of charge carriers in order to detect light. APDs are highly recommended for low-light optical detection applications in the visible and near infrared region due to their linearity with incident light intensity, compactness, ruggedness, and relatively large internal gain. The APD output current is dependent on both the operating temperature and the bias voltage of the device (ref. 1 and 2). The bias voltage can be set using a stable, high-voltage source. To address the temperature dependence of the output current, many APD packages come with a built-in thermoelectric cooler (TEC) for accurately controlling the operating temperature (ref. 3).

This memorandum reviews the theory of thermoelectric cooling. Also, the design and performance of a proportional integral (PI) temperature controller and its application to an EG&G APD package (C30649E), which includes a built-in TEC and a thermistor, are discussed. This APD package was chosen, after characterizing a group of APDs, in order to develop an advanced detection system for atmospheric water vapor DIAL measurements (ref. 2, 4, 5 and 6).

2. APD Temperature Dependence

An APD is a device similar to a rectifier diode, except its output current contains a term which is dependent on the incident light intensity on its surface in the operating wavelength range. The APD output current is given by (ref. 1, 7 and 8)

$$I_{APD} = -I_d + I_s \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (1)$$

where I_{APD} is the APD output current, I_d is the detected photo-current, I_s is the saturation dark current, q is the electron charge, V is the device bias voltage (negative for reverse bias), k is Boltzmann's constant, and T is the temperature. The second term of equation (1) represents the APD dark current and the first term, I_d , represents the photo-current, given by (ref. 1, 7 and 8)

$$I_d = \mathfrak{R} \cdot P \quad (2)$$

where \mathfrak{R} is the APD responsivity, and P is the incident optical power. The APD responsivity, \mathfrak{R} (A/W), is obtained from (ref. 1, 7 and 8)

$$\mathfrak{R} = \eta G \cdot \frac{q}{hc} \cdot \lambda \quad (3)$$

where η is the wavelength dependent quantum efficiency, G is the APD internal gain, h is Planck's constant, c is the speed of light, and λ is the wavelength of the incident light. At a constant bias voltage, the APD operating temperature affects its output current. The APD gain, and therefore its responsivity, is a strong function of the device temperature. On the other hand, the APD dark current, as well as the dark current noise, is also dependent on the APD temperature.

At a constant bias voltage and wavelength, the APD responsivity increases by decreasing the device temperature. Therefore, cooling the APD is recommended to increase its detected photo-current. Figure 1 clearly indicates this fact by showing the responsivity-versus-temperature relations at three different wavelengths for a 336V bias voltage (ref. 2, 7 and 8).

The APD dark current, given by the second term of equation (1), is also dependent on the device operating temperature. Decreasing the APD temperature will increase the dark current. The maximum dark current will be obtained at a temperature of 0 K and will be equal to the saturation current.

More importantly, the APD dark current is associated with noise, known as the dark current shot noise, which is given by (ref. 9 and 10)

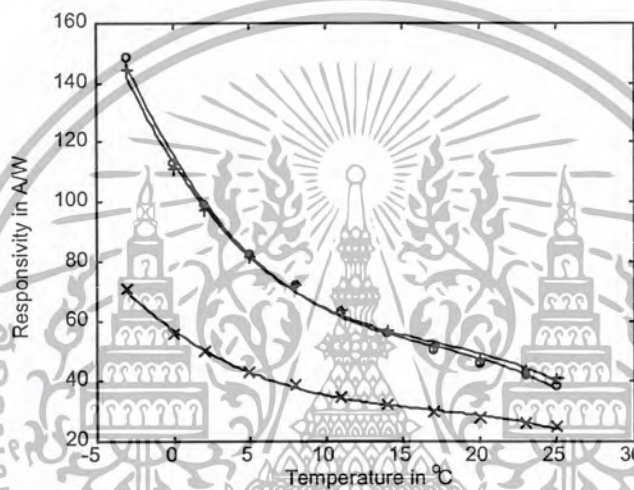


Figure 1. EG&G C30649E responsivity variation with temperature at 336 V bias at (o) 720 nm, (+) 820 nm and (x) 940 nm. (See ref. 2)

$$i_n^2 = 2qGFB \left[I_s \left(e^{\frac{qV}{kT}} + 1 \right) + I_d \right] \quad (4)$$

where i_n is the shot noise current, F is the excess noise factor, and B is the device bandwidth. The APD temperature affects the dark current shot noise directly in the denominator of the exponential power and indirectly by its effect on the device gain. The first effect is dominant; and for a reverse bias voltage, the dark current shot noise is reduced by reducing the operating temperature.

In most applications, the effect of the APD dark current on the output signal can be eliminated by either modulating the input optical signal (ref. 2) or by subtracting the dark current from the device output (ref. 4). Therefore, low temperature operation of APDs is recommended in order to increase the device responsivity and to reduce the dark current shot noise.

3. Thermoelectric Coolers

A thermoelectric cooler module consists of an array of semiconductor (group V-VI, e.g. bismuth telluride) pellets that have been positively (p) or negatively (n) doped. The p-n pellet pairs are connected electrically in series and thermally in parallel (ref. 11, 12 and 13). Consider a simple thermoelectric cooling unit, as illustrated in figure 2, in which the electrical resistance between the semiconductor elements and metal links, as well as the resistances of the links themselves, are negligible. Also, the thermal resistance between the semiconductor pair, the heat source, and the heat sink are neglected. For simplicity, all of the material thermal coefficients are assumed constant and independent of temperature.

3.1. TEC Theory of Operation

TEC operation is based on the Peltier effect which results in the transport of heat when electric current flows in a conductor (ref. 11 and 13). This heat flow is revealed only at a junction between two different materials where the heat transport on either side is different. In the two branches of figure 2, the heat transported (Watts) from the source is given by (ref. 11)

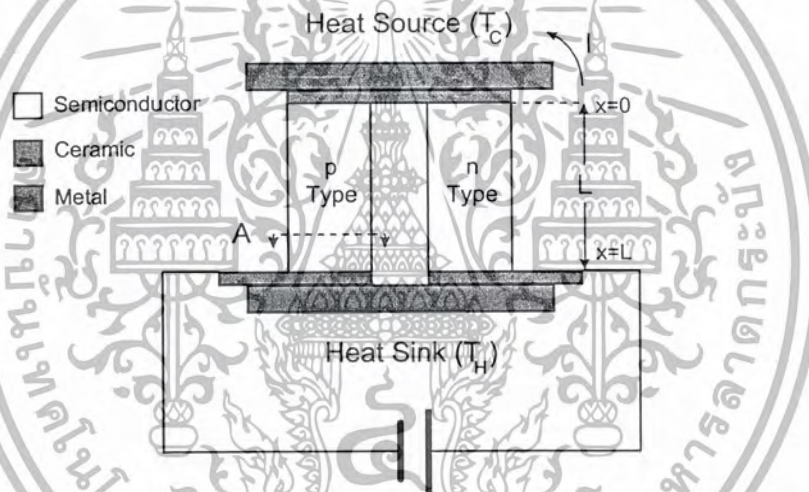


Figure 2. A TEC p-n pair.

$$q_p = \alpha_p IT - \kappa_p A \frac{dT}{dx} \tag{5}$$

$$q_n = -\alpha_n IT - \kappa_n A \frac{dT}{dx} \tag{6}$$

where α_p and α_n are the Seebeck coefficients ($WK^{-1}A^{-1}$) of the p and n materials, respectively, κ_p and κ_n are their thermal conductivity ($Wm^{-1}K^{-1}$), I is the TEC current, A is the semiconductor pellet cross-sectional area, and T is the temperature. α_n is a negative quantity, and the thermoelectric heat flow from the source through both branches is positive and is opposed by the effect of thermal conduction. Within

the branches, the rate of generation of heat per unit length ($\text{Js}^{-1}\text{m}^{-1}$) from the Joule effect is given by (ref. 11)

$$-\kappa_p A \frac{d^2 T}{dx^2} = \frac{I^2 \rho_p}{A} \quad (7)$$

$$-\kappa_n A \frac{d^2 T}{dx^2} = \frac{I^2 \rho_n}{A} \quad (8)$$

where ρ_p and ρ_n are the electrical conductivity ($\Omega\text{-m}$) of the p and n materials, respectively. Now, if the branches are of length L , then the boundary conditions are $T=T_C$ at $x=0$, and $T=T_H$ at $x=L$. Solving differential equations (7) and (8) and substituting in differential equations (5) and (6) at $x=0$, we get (ref. 11)

$$q_p = \alpha_p I T_C - \frac{\kappa_p A (T_H - T_C)}{L} - \frac{I^2 \rho_p L}{2A} \quad (9)$$

$$q_n = -\alpha_n I T_C - \frac{\kappa_n A (T_H - T_C)}{L} - \frac{I^2 \rho_n L}{2A} \quad (10)$$

The cooling power Q_C at the sink is the sum of the above two equations and is given by

$$Q_C = \alpha I T_C - K(T_H - T_C) - \frac{1}{2} I^2 R \quad (11)$$

where $\alpha = \alpha_p - \alpha_n$ is the differential Seebeck coefficient of the unit. The thermal conductance, K , of the two branches in parallel is given by

$$K = \frac{\kappa_p A}{L} + \frac{\kappa_n A}{L} \quad (12)$$

and the electrical resistance R of the two branches in series is given by

$$R = \frac{\rho_p L}{A} + \frac{\rho_n L}{A} \quad (13)$$

From equation (11), it is interesting to note that the reversible cooling process (represented by the first term) is opposed by the sum of two irreversible processes, which are the heat conduction (represented by the second term) and half the joule heating (represented by the power loss in the third term).

The electrical power consumed in the branches is given by (ref. 11)

$$p_p = \alpha_p I (T_H - T_C) + \frac{I^2 \rho_p L}{A} \quad (14)$$

$$P_n = -\alpha_n I(T_H - T_C) + \frac{I^2 \rho_n L}{A} \quad (15)$$

Thus, the total power input is given by the sum of equations(14) and (15)

$$P = \alpha I(T_H - T_C) + I^2 R \quad (16)$$

Applying the first law of thermodynamics, the heating power, Q_H , at the sink is the sum of equations (11) and (16) and is given by

$$Q_H = \alpha I T_H - K(T_H - T_C) + \frac{1}{2} I^2 R \quad (17)$$

Finally, the system efficiency is examined by the coefficient of performance, ϕ , which is the ratio of the rate at which heat is extracted from the source to the rate of expenditure of electrical energy (ref. 11 and 13). Using equations (11) and (16), the coefficient of performance is given by

$$\phi = \frac{Q_C}{P} = \frac{\alpha I T_C - K(T_H - T_C) - \frac{1}{2} I^2 R}{\alpha I(T_H - T_C) + I^2 R} \quad (18)$$

For a certain temperature difference, the current, I_m , for maximum coefficient of performance, ϕ_m , can be evaluated by setting $d\phi/dI = 0$. In this case, ϕ_m is given by

$$\phi_m = \frac{T_C \left[(1 + Z T_m)^{1/2} - (T_H/T_C) \right]}{(T_H - T_C) \left[(1 + Z T_m)^{1/2} + 1 \right]} \quad (19)$$

where Z is the TEC figure of merit, which is given by (ref. 11 and 13)

$$Z = \frac{\alpha^2}{KR} \quad (20)$$

and T_m is the average temperature which is given by

$$T_m = \frac{T_H + T_C}{2} \quad (21)$$

3.2. TEC Cooling Cycle

The TEC cooling cycle can be further understood in a qualitative manner by studying the energy band diagram of its materials, as shown in figure 3. An electron at the cold metal absorbs a heat quanta, which leads to an increase in the electron's potential energy. The applied electric field from the supply causes the electron to drift to the n-material. A fraction of the electron energy is converted to kinetic energy as

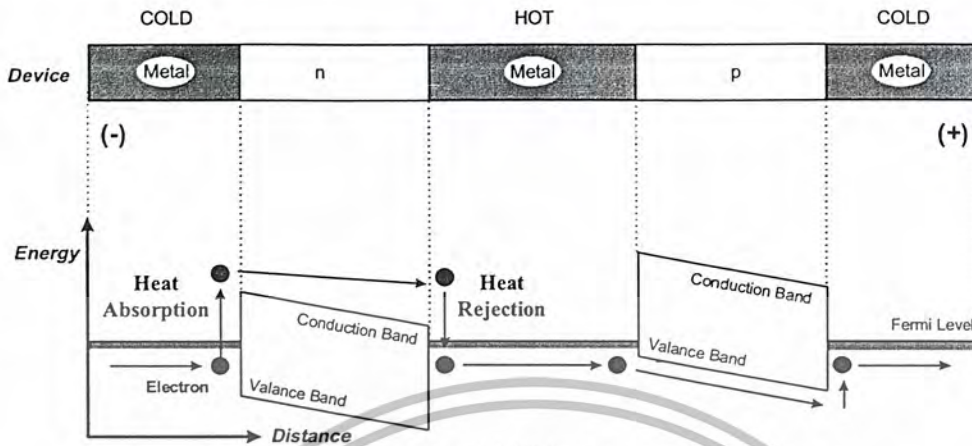


Figure 3. Energy band diagram for a thermoelectric cooling unit.

the electron proceeds through the n-material. At the end of the n-material, the electron rejects its energy gain to the hot metal in the form of heat. In order to complete the cycle, the electron must reject more energy to pass through the p-material using the lower band. On the other hand, at the p-material cold-metal junction, the electron gains more energy, through heat absorption, in order to complete its cycle.

Similarly, the holes do the same thing in the opposite direction, which leads to a heat transfer from the cold metal to the hot metal by both charge carriers. The power supply must provide the energy for the carriers to continue the cycle and also provide the system with the energy that is lost due to the electrical resistance of the cooling unit.

4. APD Temperature Controller

The EG&G APD C30649E package, shown schematically in figure 4, is supplied with a built-in TEC cooler to control the detector temperature. The temperature status of the APD is sensed by the thermistor, which is located as close as possible to the APD in order to ensure a minimal temperature gradient between the two devices. For this particular thermistor, the relation between its resistance (Ω) and the temperature (K) is given by (ref. 3)

$$R_T = 10^4 \cdot \exp \left[3940 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298} \right) \right] \quad (22)$$

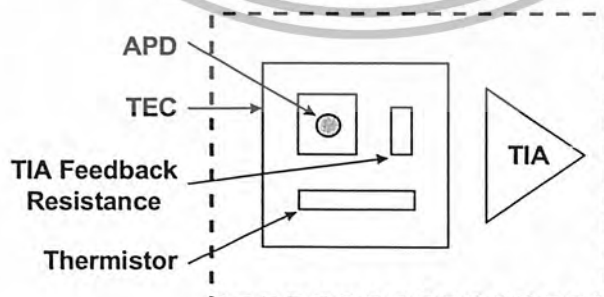


Figure 4. APD package physical diagram.

The APD temperature controller circuit is shown in the circuit diagram of figure 5. The APD temperature feedback is obtained by placing the thermistor in an arm of a Wheatstone bridge. The remaining arms are formed by three equal-valued resistors, R_S . According to equation (22), the value of R_S determines the balance condition of the bridge and sets the detector temperature to a value given by

$$T = \left\{ \frac{\ln\left(\frac{R_S}{10^4}\right)}{3940} + \frac{1}{298} \right\}^{-1} \quad (23)$$

The bridge is supplied by the zener diode, D, with a zener voltage V_Z . R_Z is a current-limiting resistor which stabilizes the zener diode voltage and prevents its break down.

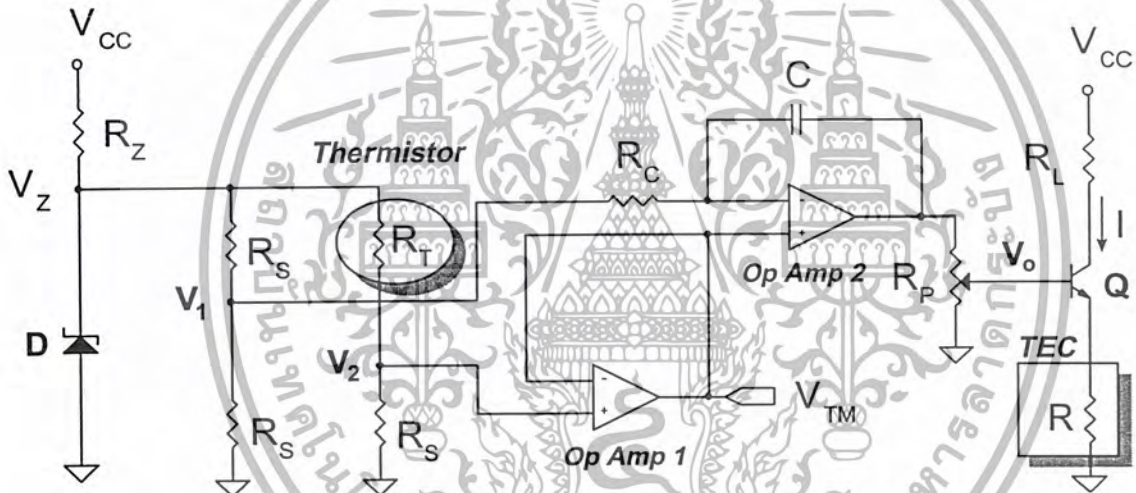


Figure 5. APD temperature controller circuit diagram.

The bridge balance error, $V_2 - V_1$, is sensed by a PI controller formed by two operational amplifiers (op amp's). Op amp 1 acts as a voltage follower with an output voltage V_{TM} . This voltage is used to monitor the APD operating temperature. The output of op amp 2 is applied to a potentiometer, R_P , to set the TEC current by controlling the emitter current of transistor Q. The setting of R_P changes the controller overall gain K_{PI} . According to the analysis of the circuit shown in figure 5, the controller input-output relation is given by

$$V_o = K_{PI} \left[V_2 + \frac{1}{sCR_C} (V_2 - V_1) \right] \quad (24)$$

In terms of the error signal, E_{rr} , defined as the difference between V_2 and V_1 , the same equation can be rewritten as

$$V_o - K_{PI} V_1 = K_{PI} \left[1 + \frac{1}{sCR_C} \right] E_{rr} \quad (25)$$

Resistor R_L is used to limit the TEC current that corresponds to its maximum value (See Appendix A). The temperature monitor voltage reading, V_{TM} , is given in terms of the zener voltage as

$$V_{TM} = \frac{R_S}{R_S + R_T} V_Z \quad (26)$$

If the APD temperature reaches its steady state value, the monitor voltage is given by

$$V_{TM} = \frac{1}{2} V_Z \quad (27)$$

Appendix B gives the value of the controller circuit components used to construct this controller.

5. Heat Load Estimation

The heat loads at the cold side of the TEC cooler are due to active and passive heat sources. In the EG&G C30649E APD package, the detector output photo-current variation is converted into a voltage variation by a trans-impedance amplifier (TIA) (ref. 1, 2 and 3). The feedback resistor R_F of this amplifier is cooled by the same TEC cooler in order to reduce the Johnson noise. The APD, thermistor, and TIA feedback resistor define the three active heat loads Q_{APD} , Q_{THR} , and Q_{TIA} , respectively. The power consumed in these elements is directly transformed to heat and is given, respectively, by.

$$Q_{APD} = V_{BIAS} \cdot I_{APD} \quad (28)$$

$$Q_{THR} = \frac{R_T}{(R_T + R_S)^2} V_Z^2 \quad (29)$$

$$Q_{TIA} = I_{APD}^2 \cdot R_F \quad (30)$$

TEC passive heat loads come from the temperature gradient between the cooled components and the ambient environment. The first passive load, Q_{RAD} , is the heat radiation from the ambient environment to the TEC cold side and is given by (ref. 12)

$$Q_{RAD} = F \cdot e \cdot s \cdot A_{TEC} (T_{amb}^4 - T_C^4) \quad (31)$$

where F is the surface shape factor, e is the surface emissivity, s is the Stefan-Boltzmann constant, A_{TEC} is the area of the TEC cold surface, and T_{amb} is the ambient temperature. The second passive load, Q_{CON} ,

is due to the conduction between the TEC cold surface and the ambient environment through the air space below the package window, which has a length L_p (see Appendix A). This is given by (ref. 12)

$$Q_{CON} = \frac{K_{Air} A_{TEC}}{L_p} (T_{amb} - T_C) \quad (32)$$

where K_{air} is the air thermal conductivity.

At the TEC hot side, heat accumulation will lead to device failure. Therefore, a heat sink is used for heat dissipation to the ambient environment. Considering the worst-case situation in which the heat transfer from the heat sink to the ambient environment is only through radiation, the amount of heat radiated from the heat sink, Q_{HS} , is given by

$$Q_{HS} = F \cdot e \cdot s \cdot A_{HS} (T_H^4 - T_{amb}^4) \quad (33)$$

where A_{HS} is the heat sink surface area.

The heat transfer problem is summarized in the power flow diagram of figure 6. Assuming the worst case in which the surface shape factor and emissivity are both equal to one, the heat loads at the source are evaluated using equations (28) through (32) by assuming an ambient temperature of 27 °C and maximum possible values for the active heat loads. The sum of the heat loads is equated with the required cooling power given by equation (11). Knowing the TEC parameters (given in Appendix A) and setting the cold temperature equal to 0.3 °C, the hot temperature, T_H , at the sink is evaluated, using equation (11), to be 30.7 °C. Substituting these temperatures into equation (17), the heating power at the sink is obtained. Since, in the worst case, this heating power is dissipated only by radiation, substituting its value in equation (33) defines the heat-sink surface area required (104.5 cm²). In reality, a considerable amount of the heating power is dissipated by conduction rather than only through radiation. Therefore, for mechanical assembly considerations, the heat sink used is only half of the calculated area given above. However, extensive testing has proven that the reduced heat sink area is sufficient under all expected operating conditions.

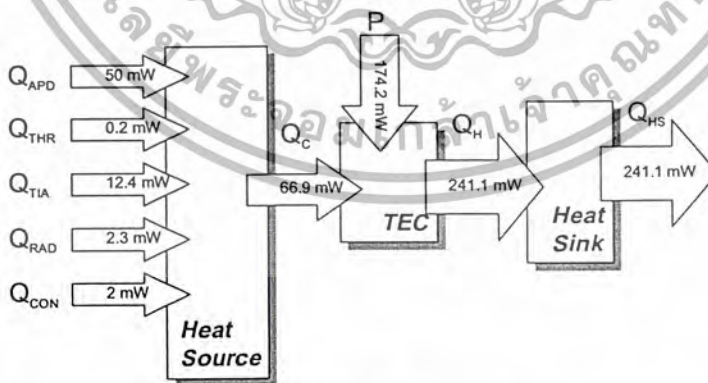


Figure 6. Power flow diagram for the APD cooling system.

6. Controller Performance

Referring to equation (23), the APD temperature is set to $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ by setting R_S equal to $33\text{ k}\Omega$. For an initial APD temperature of $23.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, figure 7 shows the transient response of the APD temperature monitor voltage V_{TM} , the thermistor resistance, the APD temperature, and the TEC current. The rise time is approximately 5 s , and the 5 percent settling time is approximately 50 s with about $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ of overshoot. The steady-state temperature was $0.3\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$. The temperature measurement is obtained by converting the temperature monitor voltage to a thermistor resistance according to equation (26), and then this is further converted into temperature according to equation (22). From figure 7(a) and (c), it is interesting to note a linear relationship between the APD temperature, T , and the temperature monitor voltage, V_{TM} , over a $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ operating range, which can be approximated by

$$T \approx 17.2 \cdot V_{TM} - 43.6 \quad (34)$$

Figure 7(d) shows a steady-state TEC current of approximately 0.35 A . From equation (20), the figure of merit of the TEC is calculated to be 1.6×10^{-3} . From equations (16) and (18), the TEC input power is 174.2 mW , which results in a coefficient of performance equal to 38.4 percent. The maximum theoretical coefficient of performance is 39.1 percent. For successful temperature controller operation, the maximum ambient temperature is $27\text{ }^{\circ}\text{C}$; and since the controller was designed to cool the detector, the minimum ambient temperature is theoretically equal to the controller temperature setting.

7. Conclusion

For this memorandum, an APD temperature controller was designed, and its performance was evaluated. The APD considered is an EG&G APD package C30649E with a built-in thermoelectric cooler, thermistor, and trans-impedance amplifier. The theory of thermoelectric cooling is discussed, and the importance of sufficient heat sinking, in order to stabilize controller operation, is shown.

The temperature controller performance is acceptable. The final steady-state temperature of $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ and power consumption of 174.2 mW , corresponding to a 38.4 percent TEC coefficient of performance, is close to the theoretical maximum value. For successful operation, the maximum allowable ambient temperature variation is between $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ maximum and a minimum equal to the temperature setting. This temperature controller design has adequate accuracy and is suitable for any APD which has a built-in or external thermoelectric cooler and a temperature feedback element. The design can be simply changed to meet any temperature setting, assuming that it is below the ambient temperature. Other advantages of this controller circuit are its simplicity, low-cost, and compactness.

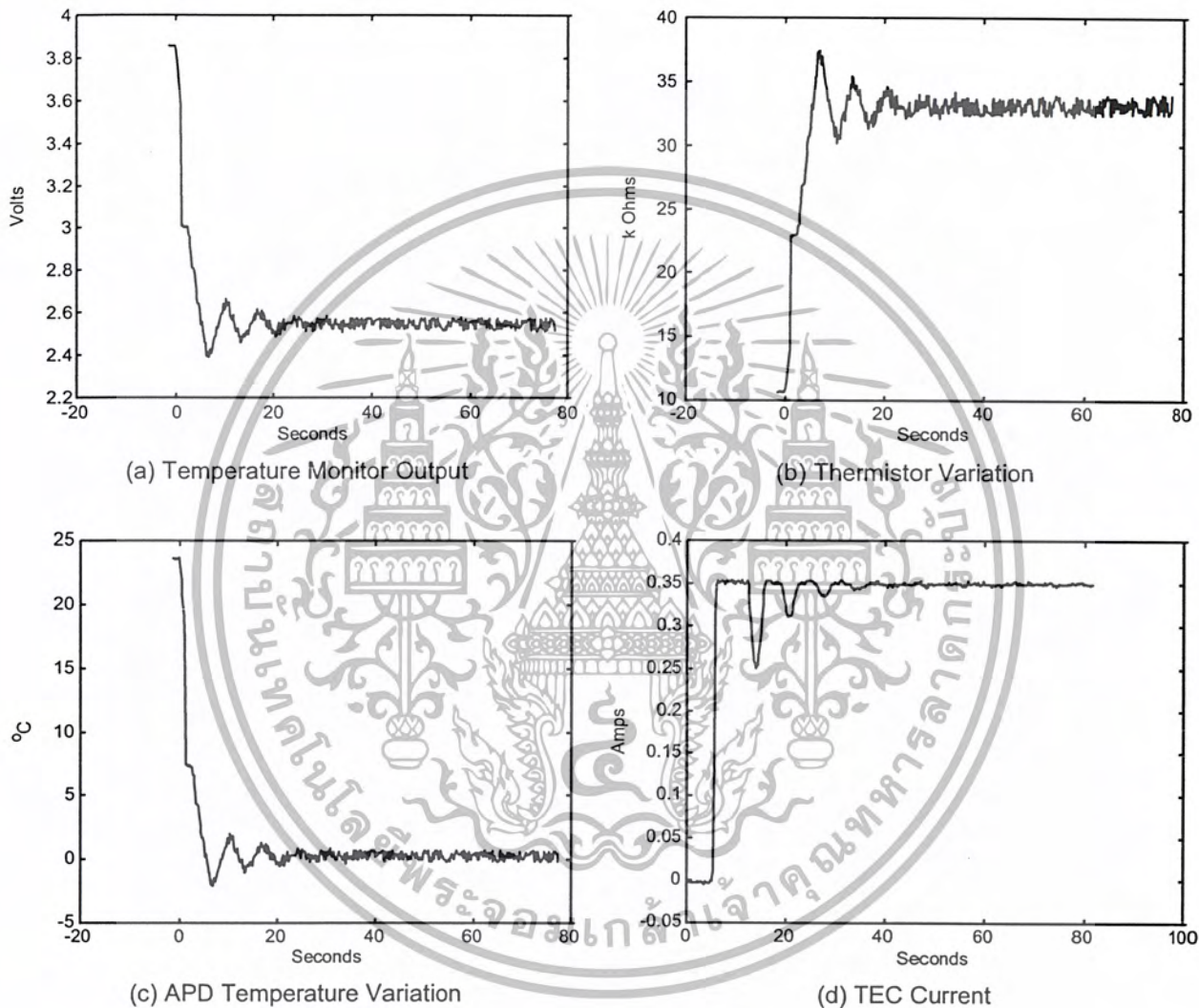


Figure 7. APD temperature and temperature monitor transients.

References

1. B. Salah & M. Teich, *Fundamentals of Photonics*, Wiley Interscience Publication, 1991
2. T. Refaat, G. Halama & R. DeYoung, "Characterization of Advanced Avalanche Photodiodes for Lidar Receivers", *NASA/TP*, under review.
3. EG&G SLIK APD C30649E data sheet.
4. T. Refaat, W. Luck & R. DeYoung, "Design of advanced atmospheric water vapor differential absorption lidar (DIAL) detection system", *NASA/TP-1999-209348*, July 1999.
5. T. Refaat, W. Luck & R. DeYoung, "Advanced Detector and Waveform Digitizer for Water Vapor DIAL Systems", *19th International Laser Radar Conference*, Annapolis, 1998.
6. T. Refaat, W. Luck & R. DeYoung, "Advanced Water Vapor DIAL Detection System", *Conference on Lasers and Electro Optics*, 1999.
7. C. Crowell & S. Sze, "Temperature Dependence of Avalanche Multiplication in Semiconductors", *Applied Physics Letters*, Vol. 9, No 6, pp 242-244, 1966.
8. J. Conradi, "Temperature Effects in Silicon Avalanche Diodes", *Solid State Electronics*, Vol. 17, pp. 99-106, 1974.
9. R. Boyd, *Radiometry and the Detection of Optical Radiation*, Wiley, New York, 1983.
10. G. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, Wiley, New York, 1997.
11. H. Goldsmid, *Electronic Refrigeration*, Pion Limited, 1986.
12. Marlow Industries, Inc. "Thermoelectric Cooling Systems Design Guide", Publication No 017-7939, Rev 1, 1994.
13. A. Kapitulnik, "Thermoelectric cooling at very low temperature", *Applied Physics Letters*, 60, 1992.

Appendix A: EG&G C30649E Detector Package

A1 Manufacturer Test Data Sheet

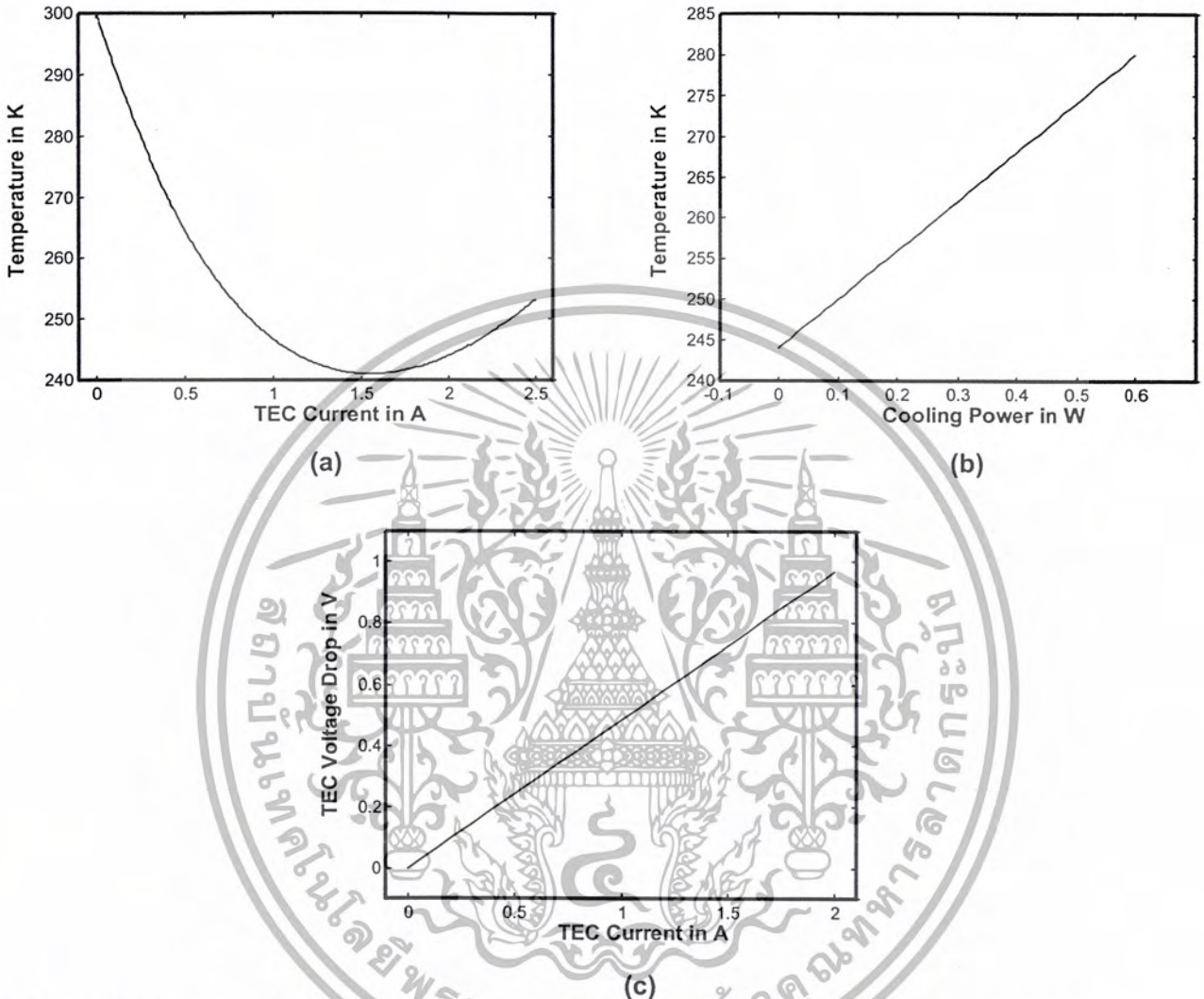
DESCRIPTION	CONDITION	MIN.	DATA	MAX.	UNITS
Positive Bias Current	Vr, dark, 25 °C	11	18	22	mA
Negative Bias Current	Vr, dark, 25 °C	5	7.1	15	mA
Output Offset Voltage	Vr, dark, 25 °C	-1.5	0.19	0.5	V
APD Breakdown Voltage	Ihv=2uA, dark, 25 °C	325	356	500	V
APD Operating Voltage	Resp=50 MV/W, 25 °C	300	349	480	V
APD Dark Current	Vr, dark, 25 °C	==	7	35	nA
Spectral Noise Peak	Vr, dark, 25 °C	==	150	150	nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Noise Equivalent Power	Vr, dark, 25 °C	==	0.003	0.006	pW/ $\sqrt{\text{Hz}}$
APD Operating Voltage	Resp=50 MV/W, 0 °C	290	336	470	V
APD Dark Current	Vr, dark, 0 °C	==	4	15	nA
Spectral Noise Peak	Vr, dark, 0 °C	==	140	150	nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Noise Equivalent Power	Vr, dark, 0 °C	==	0.003	0.006	pW/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Bandwidth	Ihv=2uA, dark, 25 °C	10	11	==	MHz

Test are done at $\pm 5\text{V}$ on the amplifier with 50Ω AC coupled.
 Test wavelength is 820 nm.
 Serial Number 147

A2 Parameters

A_{APD}	Detector Sensitive Area	0.24 mm ² (measured)
R_{F}	Trans-Impedance Amplifier Feedback Resistance	560 k Ω
Q_{APD}	Detector Maximum Power Loss	50 mW
I_{max}	TEC Maximum Current	1.8 A
I_0	TEC Rated Current @ 0 °C	0.5 A
A_{TEC}	TEC Area	3.96x3.96 mm ²
R	TEC Electrical Resistance	0.4833 \pm 0.1 Ω
K	TEC Thermal Conductance	0.0102222 W/ $^{\circ}\text{C}$
α	Differential Seebeck Coefficient	3.2222x10 ⁻³ W/AK
L_{P}	APD Surface - Window Distance	5 mm
R_{T}	Thermistor Resistance	$R_{\text{T}} = 10^4 \cdot e^{\left[3940 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298}\right)\right]}$

A3 TEC Characteristics Curves

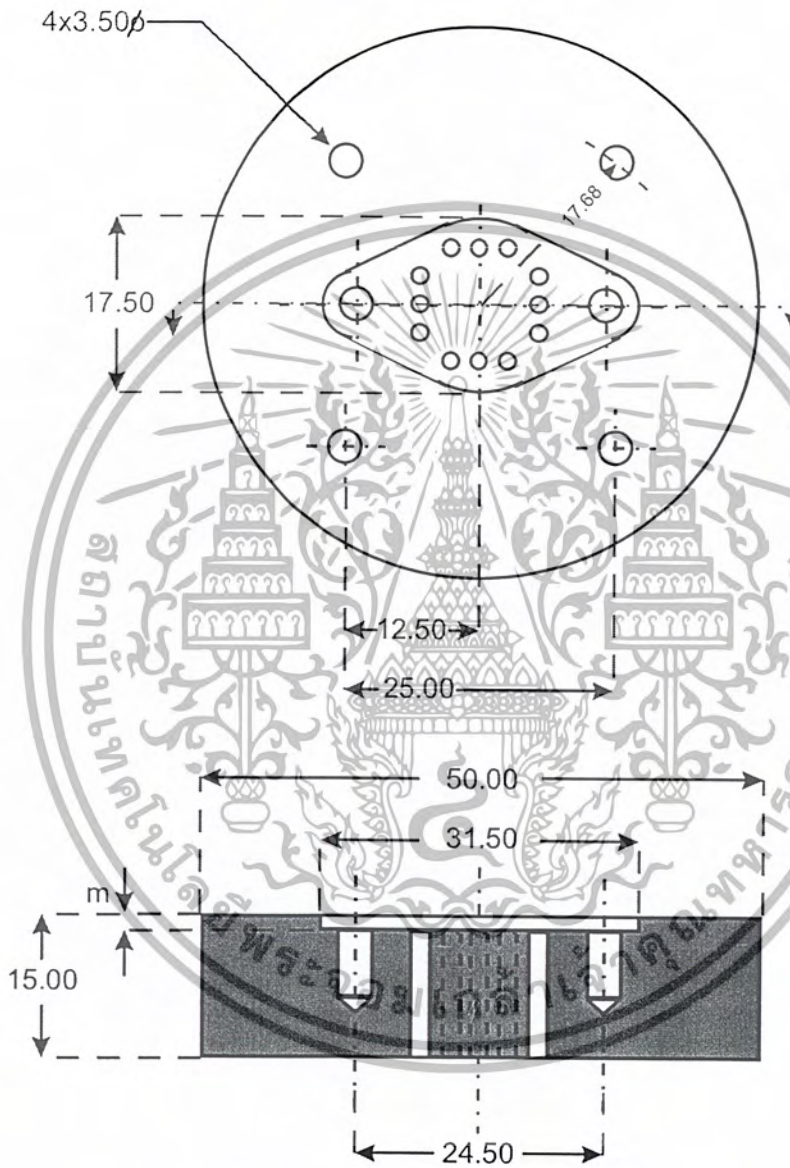


(a) Cold side Temperature, T_C , versus TEC current, I , at cooling power, $Q_C=0$ with still air and $T_H=300K$. (b) Cold side Temperature, T_C , versus cooling power, Q_C , at TEC current, $I=2A$ with still air and $T_H=300K$. (c) TEC current, I , versus TEC voltage drop at $T_H=T_C=300K$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Appendix B: Applied Temperature Controller System

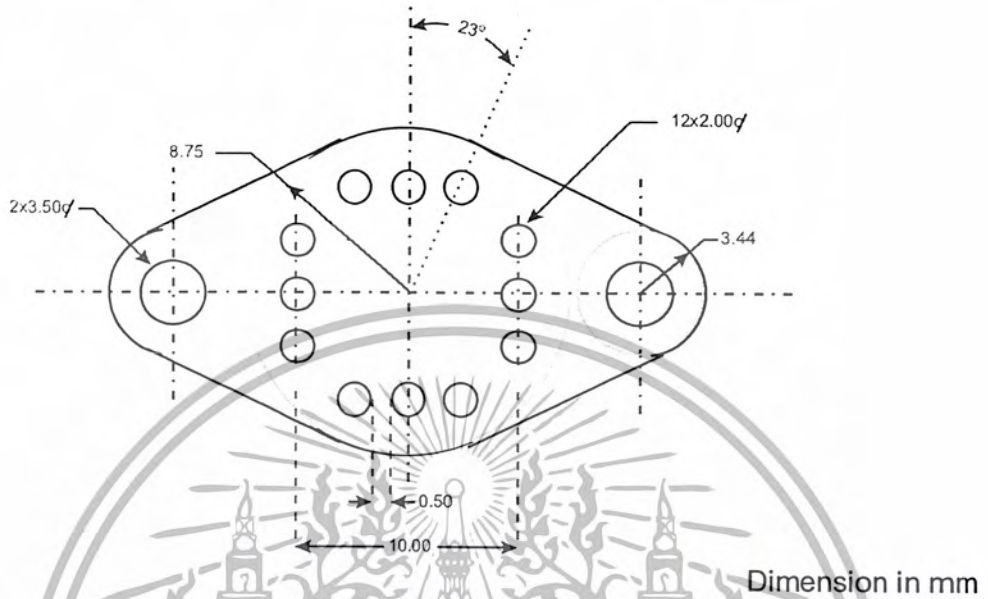
B1 Heat Sink Design



$$m = 1.5 + \text{Screw Head}$$

Dimension in mm
Material: Aluminum

B2 Dimension of the APD Package



B3 Temperature Controller Parameters

V_{CC}	Power Supply Voltage	12 V
V_Z	Zener Diode Voltage	5.1 V
R_Z	Zener Diode Current Limiting Resistor	2 k Ω
R_S	Temperature Setting Resistance	33 k Ω
R_C	Integration Time Constant Resistance	200 k Ω
C	Integration Time Constant Capacitance	2 μ F
R_P	Transistor Gain Control Resistance	10 k Ω
R_L	TEC Current Limiting Resistor	5 Ω

REPORT DOCUMENTATION PAGE			Form Approved OMB No. 0704-0188	
Public reporting burden for this collection of information is estimated to average 1 hour per response, including the time for reviewing instructions, searching existing data sources, gathering and maintaining the data needed, and completing and reviewing the collection of information. Send comments regarding this burden estimate or any other aspect of this collection of information, including suggestions for reducing this burden, to Washington Headquarters Services, Directorate for Information Operations and Reports, 1215 Jefferson Davis Highway, Suite 1204, Arlington, VA 22202-4302, and to the Office of Management and Budget, Paperwork Reduction Project (0704-0188), Washington, DC 20503.				
1. AGENCY USE ONLY (Leave blank)		2. REPORT DATE October 1999	3. REPORT TYPE AND DATES COVERED Technical Memorandum	
4. TITLE AND SUBTITLE Temperature Control of Avalanche Photodiode Using Thermoelectric Cooler			5. FUNDING NUMBERS WU 622-63-13-70	
6. AUTHOR(S) Tamer F. Refaat, William S. Luck, Jr., and Russell J. DeYoung				
7. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES) NASA Langley Research Center Hampton, VA 23681-2199			8. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NUMBER L-17906	
9. SPONSORING/MONITORING AGENCY NAME(S) AND ADDRESS(ES) National Aeronautics and Space Administration Washington, DC 20546-0001			10. SPONSORING/MONITORING AGENCY REPORT NUMBER NASA/TM-1999-209689	
11. SUPPLEMENTARY NOTES				
12a. DISTRIBUTION/AVAILABILITY STATEMENT Unclassified-Unlimited Subject Category 33. Distribution: Nonstandard Availability: NASA CASI (301) 621-0390			12b. DISTRIBUTION CODE	
13. ABSTRACT (Maximum 200 words) Avalanche photodiodes (APDs) are quantum optical detectors that are used for visible and near infrared optical detection applications. Although APDs are compact, rugged, and have an internal gain mechanism that is suitable for low light intensity; their responsivity, and therefore their output, is strongly dependent on the device temperature. Thermoelectric coolers (TEC) offers a suitable solution to this problem. A TEC is a solid state cooling device, which can be controlled by changing its current. TECs are compact and rugged, and they can precisely control the temperature to within 0.1 °C with more than a 150 °C temperature gradient between its surfaces. In this memorandum, a proportional integral (PI) temperature controller for APDs using a TEC is discussed. The controller is compact and can successfully cool the APD to almost 0 °C in an ambient temperature environment of up to 27 °C.				
14. SUBJECT TERMS APD; TEC; PI controllers; Temperature controllers			15. NUMBER OF PAGES 21	
			16. PRICE CODE A03	
17. SECURITY CLASSIFICATION OF REPORT Unclassified	18. SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE Unclassified	19. SECURITY CLASSIFICATION OF ABSTRACT Unclassified	20. LIMITATION OF ABSTRACT UL	

NSN 7540-01-280-5500

Standard Form 298 (Rev. 2-89)
Prescribed by ANSI Std. Z-39-18
298-102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Quantum Cryptography

Einstein wrote, “I cannot believe that God plays dice with the cosmos.”¹ But quantum mechanics has proved him wrong, and a remarkable crop of new cryptographic systems takes full advantage of those dice that Einstein found so troubling. Though most people think

they are science fiction, quantum cryptography systems are now operational, with prototypes protecting Internet traffic across metropolitan areas. These systems are so novel that we can consider quantum cryptography—or, more properly, quantum key distribution (QKD)—as the third and final insight to transform cryptography in the 20th century.

In the 1940s, Claude Shannon provided the information-theoretic basis for secrecy; the amount of uncertainty that can be introduced into an encoded message can't be greater than that of the cryptographic key used to encode it.² To achieve perfect secrecy, the key must be at least as long as the message and never reused, that is, we must use Vernam ciphers.³ Also known as “one-time pads.” Unfortunately, in practice, it is difficult to distribute completely secret, completely random, one-time pads needed for Vernam ciphers, so they haven't been widely adopted.

In the early 1970s, or possibly earlier, several researchers, including Whitfield Diffie, Martin Hellman, Ralph Merkle, Ron Rivest, Adi Shamir, Leonard Adleman, James Ellis, Clifford Cocks, and Malcolm Williamson, invented cryptographic techniques based on computational complexity. Today, these public-key

techniques are ubiquitous; probably the most well known are the Diffie-Hellman key-exchange and RSA prime-factor algorithms. Unlike Shannon, who assumed that adversaries had unlimited mathematical prowess, public-key techniques assume that certain mathematical functions are one way—easy to do in one direction but too difficult for an adversary to undo in a reasonable time. For example, the RSA algorithm assumes that it is simple to multiply two large prime numbers to get their product, but quite hard to factor that product into the two original primes. (However, no one has proved these assumptions.)

Invented by Charles Bennet and Giles Brassard in 1984,⁴ QKD begins with a radically different premise: we should base security on known physical laws rather than on mathematical complexities. Physical devices with specialized cryptographic protocols can conjure up ever-flowing streams of random bits whose values will remain unknown to third parties. When we use these bits as key material for Vernam ciphers, we can achieve Shannon's ideal of perfect secrecy—cheaply and easily. In contrast with the unproven foundations of public-key techniques, QKD provides information-

theoretic secrecy firmly based on the laws of physics.

How does it work?

QKD lets two parties—for example, Alice and Bob—agree on secret keys. More formally, it's a technique for agreeing on a shared random bit sequence within two distinct devices, with a very low probability that other eavesdroppers will be able to make successful inferences as to those bits' values. We use the random bit sequences as secret keys for encoding and decoding messages between the two devices. Thus, QKD is not, in itself, a full cryptosystem. Rather, we should compare it to other key-distribution techniques, such as trusted couriers, the Diffie-Hellman key exchange, and so on.

QKD can be an intensely confusing field; there are many approaches, the schemes are complex, and it helps to have a working knowledge of quantum optics, which is fundamental to the technology. I recommend Nicholas Gisin's article⁵ for a detailed review. However, the basic idea is simple, as Figure 1 illustrates.

Alice sends a series of single photons to Bob, each modulated with a random *basis* (here, a two-sided card) and a random value. Alice chooses a card side at random, writes a random 0 or 1 on that side, and sends the card to Bob. Bob also chooses a side at random and reads that side's value. When Alice and Bob choose the same side, Bob reads exactly what Alice wrote. Otherwise, he reads a 0 or 1 completely at random.

After Bob reads all the photons, he performs a *sifting* transaction with Alice to discard all cases where he read the wrong side (basis). He sends

CHIP ELLIOTT
BBN
Technologies

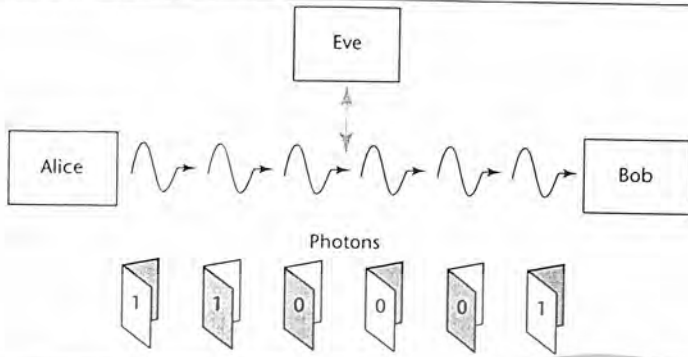


Figure 1. The basic idea of quantum cryptography. Alice sends a series of single photons to Bob, each modulated with a random basis. Bob demodulates them with a random basis. Any noise in Bob's detection is assumed to have been added by an eavesdropper, Eve, who guessed the basis wrong in her eavesdropping. Alice and Bob can use those bits where they randomly selected the same basis, provided that the detection noise is low.

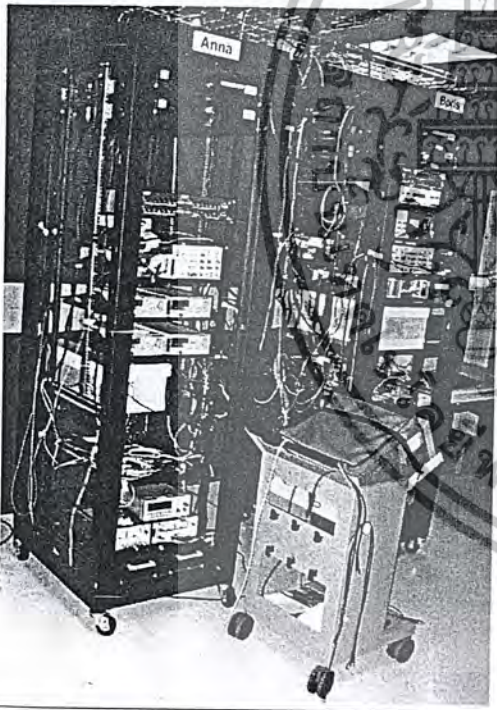


Figure 2. BBN quantum cryptography system (Anna and Boris). A full-featured quantum cryptography system now operating in the world's first quantum cryptographic network, under the streets of Cambridge, Massachusetts.

the random basis settings list that he used to Alice, and she tells him

which ones were correct. Then Alice and Bob discard all values where they disagreed on the basis and keep the remaining values for raw key material.

Now, what about an eavesdropper, who we shall call Eve? At first, Eve is in a situation similar to Bob's. She must guess which side of the card to read; half the time she will be able to read what Alice sent, and the other half she'll get a random value. But she can't surreptitiously siphon off a little bit of a single photon because when she reads it, she demolishes it. But if Bob doesn't get that photon, it's no loss; the sifting process will discard that photon and Alice and Bob won't use that bit in their key material.

A clever Eve might try to regenerate a demolished photon and send a copy to Bob but she can't. Quantum physics' no-cloning theorem says that she can't copy values from both sides of the card—only from the side she read. The other side will have a random value. If that's a side that Alice and Bob agree on during sifting, any Eve-generated random values will appear as small noise bursts in the communicated values. Hence, eavesdropping always produces QKD noise, and a cautious

Alice and Bob interpret all noise as evidence of active eavesdropping.

In a perfect world, that would end the story. However, in real systems, some channel noise is always present, and a cryptographic system must operate with some noise levels even if they imply eavesdropping activities. To address this, we employ relatively elaborate error-detection and -correction protocols to find and correct bit errors and *privacy amplify* the result so that Eve has a vanishingly small knowledge of the resultant bit values Alice and Bob use. Operating on bits in computer memory, privacy amplification is a classical algorithm that smears out the value of each initial shared bit across the shorter resulting set of bits; that is, it distributes its value via a universal hash across the resulting bits.

Current systems

Bennet and Brassard built the first primitive QKD apparatus in 1992⁶ (eight years after their first paper); several systems followed since then, including systems built by Los Alamos, British Telecom, Johns Hopkins University, and IBM Almaden Research Center. Most were component parts, typically only optics. In the past year, two fully-operational systems emerged from Los Alamos and BBN,^{7,8} and two companies (ID Quantique, www.idquantique.com and Magiq Technologies, www.magiqtech.com) announced commercial systems but haven't provided public demonstrations.

QKD can work through telecommunications fiber or through the atmosphere. Although these systems differ greatly in their technical details, researchers have demonstrated both approaches. Today's systems generate very high-grade key material at rates approaching 5,000 bits/s at distances of up to 50 km through telecom fiber or 10 to 20 km through atmosphere. While these rates are not fast enough to protect useful traffic with one-time pads, they do allow very rapid rekey-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

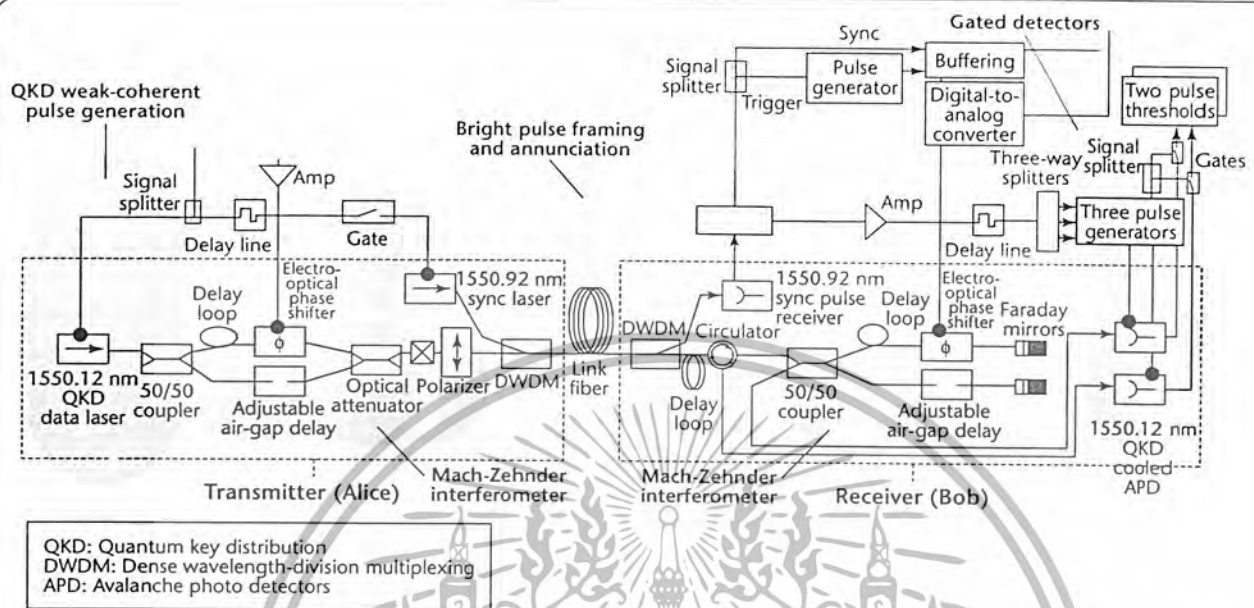


Figure 3. Functional decomposition of BBN quantum cryptography system. Alice produces single photons and phase-modulates them via a Mach-Zehnder interferometer for transmission over standard telecommunication fiber to Bob. Bob demodulates them with an identical interferometer and detects the values that Alice transmitted with his thermo-electrically cooled and electrically gated detectors.

ing of conventional cryptographic algorithms, for example, the Advanced Encryption Standard (AES). Fortunately, there is a relatively clear, though challenging, technology path toward much faster systems. Today's QKD systems are severely limited by the rates at which they can detect single photons; exotic new detectors based on cryogenic superconductors might remove this limit or, perhaps, even more conventional indium-gallium arsenide detectors tailored to the single-photon regime.

As real-world implementation examples, I'll describe Anna and Boris (see Figure 2), two systems BBN Technologies (www.bbn.com) built as part of the DARPA Quantum Network project (<http://quantum.bbn.com>), which recently began to operate the world's first quantum cryptographic network under the streets of Cambridge, Massachusetts. We now have six QKD nodes running in our laboratory. Four of them became

operational in October 2003, replacing our first-generation system, which started continuous operation in December 2002. These systems continuously generate key material, and then use it to protect Internet traffic. (We extended standard Internet Protocol security [IPsec] protocols to support the rapid rekeying of conventional encryption algorithms.)

Each system uses a highly attenuated "single-photon" telecommunications laser operating at a standard wavelength (1550.12 nanometers) with phase modulation via unbalanced Mach-Zehnder interferometers and thermo-electrically cooled avalanche photo detectors (APDs), which are capable of detecting single photons. We implemented most of the electronics using discrete components (such as pulse generators), though we could integrate all necessary electronics onto a small custom printed circuit board.

In May 2004, we deployed Anna

at Harvard University and will shortly install Boris at Boston University. Alice and Bob remain at BBN. They are linked by the Cambridge dark fiber network (optical telecommunications fiber without amplifiers or electronics). The longest fiber length (between Boston University and BBN) is about 22 km.

Figure 3 highlights the systems' major features. The transmitter at Alice sends data using 0.1 mean photon number laser pulses. Each pulse passes through a Mach-Zehnder interferometer, which randomly modulates it to one of four phases, encoding a basis and a value in that photon's self interference. The receiver at Bob contains another Mach-Zehnder interferometer, randomly set to one of two phases to select the demodulation basis. The received single photons pass through Bob's interferometer to strike one of the two APDs to present a received value. Alice also transmits bright pulse—typical telecommunications

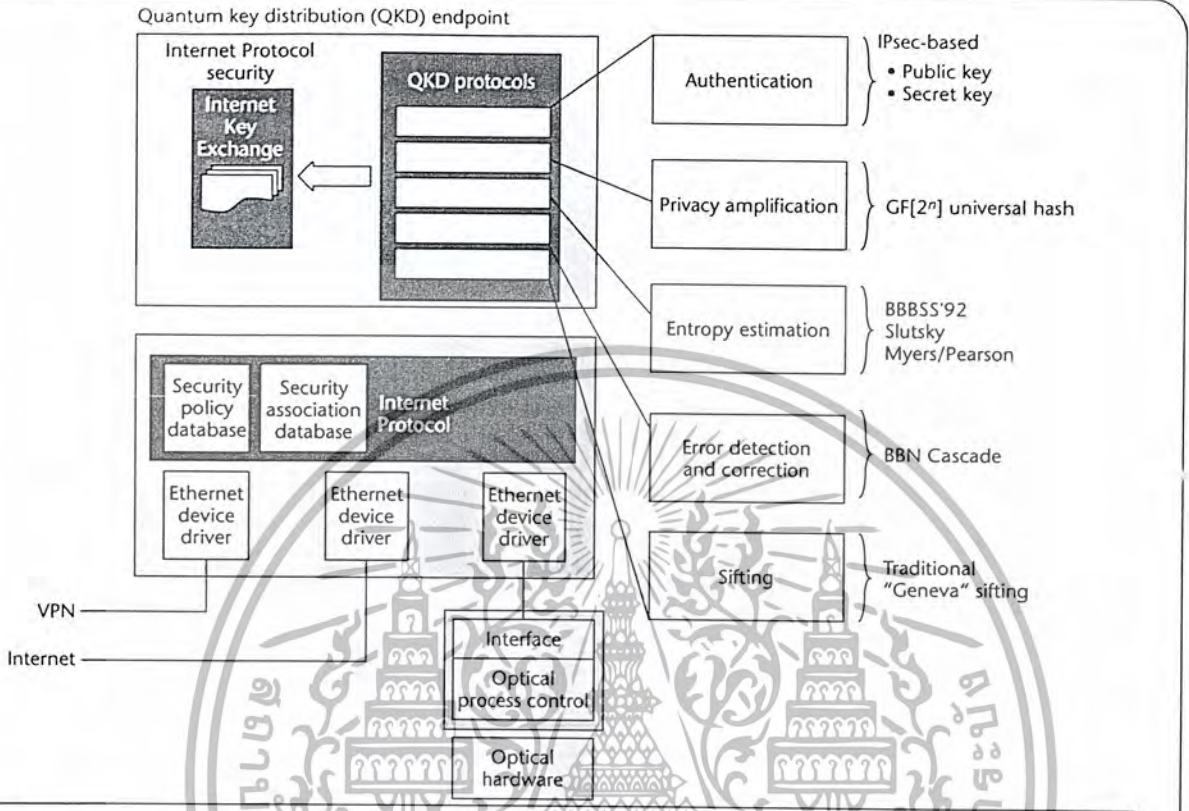


Figure 4. BBN quantum cryptography protocols. Quantum cryptography protocols form a “stack,” somewhat like conventional communications protocols. There are many possible variants for the different stack layers. BBN has implemented a full suite of quantum cryptography protocols, including the variants shown here.

power level—multiplexed over the same fiber, to send timing and framing information to Bob.

QKD protocols

Although a detailed discussion of QKD protocols is beyond this article’s scope, QKD systems contain a surprising amount of sophisticated software. While developing our systems, we observed that QKD optics is perhaps the easiest part; the electronics are more difficult than the optics; and, for a practical functional system, the software is harder than the electronics.

Figure 4 illustrates how QKD protocols might integrate into a Unix operating system to provide key material to its indigenous Internet Key Exchange (IKE) daemon for use in cryptographically protecting Internet

traffic via standard IPsec protocols and algorithms. BBN’s QKD protocol stack is written in C for portability to embedded real-time systems. David Pearson, Gregory Troxel (both at BBN Technologies) and I present a more detailed discussion of this implementation and how QKD interacts with IKE and IPsec elsewhere.⁸

As I previously mentioned, once Alice and Bob agree on sifted bits, they must perform error correction to find and eliminate any bits damaged (or compromised by Eve) in transmission, for example, bits sent as a 1s but received as 0s. There are many ways to perform error correction but each has two important consequences:

- Error correction is always probabilistic unless all bits are revealed during the process, and thus there

is a small possibility that Alice and Bob believe that they share identical bit sets, but, in fact, they do not.

- Error correction requires communications between Alice and Bob, and inevitably—assuming that Eve can obtain plain-text versions of all such public communications—the process of error correction reveals sifted-bit information to Eve.

Thus, the error correction’s end results are that Alice and Bob will—with high probability—have in their local memories identical copies of a set of error-corrected bits and Eve will have some knowledge of these bits’ values, which Alice and Bob must reduce through privacy amplification.

Privacy amplification lets Alice and Bob reduce Eve’s knowledge of

their error-corrected bit values to an arbitrarily low fraction of the total number of bits. At its core, it occurs via randomized algorithms in Alice and Bob and public communication between them regarding the results of these algorithms.

Finally, authentication gives Alice and Bob reasonable assurance that they are communicating with each other. In most modern cryptographic systems, this function occurs via some kind of one-way function, for example, digital signatures implemented by public-key techniques. In classic QKD literature, authentication relies on shared secret keys, such as in universal hash functions.

QKD networks

The DARPA Quantum Network consists of two transmitters, Alice and Anna, and two compatible receivers, Bob and Boris, with quantum channels directly interconnected using fiber via a 2×2 optical switch. Either transmitter can negotiate a mutual key with either receiver. The switch is optically passive; that is, it does not detect or amplify any photons passing through it, so it doesn't disturb the quantum state of the photons that encode key bits.

When two QKD endpoints don't share a direct or switched channel but there is a path between them over channels through trusted relays, our networking protocols let them agree on a shared key by choosing a path through the network, creating a new random number R , and, essentially, sending an R one-time-pad encrypted across each link. We call this process *key relay*, and the resulting network a *trusted network* because this scheme's chief characteristic is that the key's secrecy depends on the endpoints and intermediate nodes being trustworthy.

The BBN key relay protocols have been operating continuously in the DARPA Quantum Network since October 2003. Even though Alice and Anna are transmitters, the

protocols let Alice build up a reservoir of shared key material with Anna via a trusted relay at Bob or Boris. Similarly, Bob and Boris continuously build up shared key material via trusted relays at Alice or Anna.

What's next? QKD's next generation will be even stranger than today's because it will draw key material from pairs of entangled photons. In some ways, this is the most satisfying of all forms of QKD because it directly exploits the universe's underlying randomness and strangeness. Such cryptographic systems create, and derive their keys from, highly unusual "Siamese twin," or entangled, photons:

The entangled state contains no information on the individual particles; it only indicates that two particles will be in opposite states. The important property of an entangled pair is that as soon as a measurement on one particle projects it, say, onto [a horizontal polarization], the state of the other one is determined to be [vertical], and vice versa. How could a measurement on one of the particles instantaneously influence the state of the other particle, which can be arbitrarily far away? Einstein, among many other distinguished physicists, could simply not accept this "spooky action at a distance." But this property of entangled states has been demonstrated by numerous experiments."—Dik Bouwmeester

One of these systems is taking shape in BBN's Cambridge laboratory. Other teams, such as those at Bristol and Vienna universities, are proposing even wilder, space-based systems with entangled photon pairs transmitting between Earth and orbiting satellites. It is remarkable that

Einstein's "spooky action at a distance" consideration provides the engineering core for the next generation of cryptographic systems! □

References

1. A. Einstein, "Sayings of the Week," *London Observer*, 5 Apr. 1964.
2. C.E. Shannon, "Communication Theory of Secrecy Systems," *Bell System Technical J.*, vol. 28, no. 4, 1949, pp. 656–715.
3. G.S. Vernam, "Cipher Printing Telegraph Systems for Secret Wire and Radio Telegraphic Communications," *J. Am. Inst. Electrical Eng.*, vol. 45, 1926, pp. 109–115.
4. C.H. Bennett and G. Brassard, "Quantum Cryptography: Public Key Distribution and Coin Tossing," *Proc. Int'l Conf. Computers, Systems & Signal Processing*, CS Press, 1984, pp. 175–179.
5. N. Gisin et al., "Quantum Cryptography," *Rev. Modern Physics*, vol. 74, no. 1, 2002, pp. 145–195.
6. C.H. Bennett et al., "Experimental Quantum Cryptography," *J. Cryptology*, vol. 5, no. 1, 1992, pp. 3–28.
7. R.J. Hughes et al., "Practical Free-Space Quantum Key Distribution Over 10 km in Daylight and at Night," *New J. Physics*, vol. 4, 2002, pp. 43.1–45.14.
8. C. Elliott, D. Pearson, and G. Troxel, "Quantum Cryptography in Practice," *Proc. ACM SIGCOMM 2003*, ACM Press, 2003, pp. 227–238.
9. D. Bouwmeester et al., "Experimental Quantum Teleportation," *Nature*, vol. 390, 1997, pp. 577–579.

Chip Elliott is principal engineer for BBN Technologies. His research interests include quantum cryptography and mobile ad hoc networking. He has a BA in mathematics from Dartmouth College. He is a senior member of the IEEE, a member of the American Association for the Advancement of Science, the ACM, and the American Institute of Aeronautics and Astronautics, and has been nominated for a World Technology Award for his work in quantum cryptography. Contact him at celliott@bbn.com.